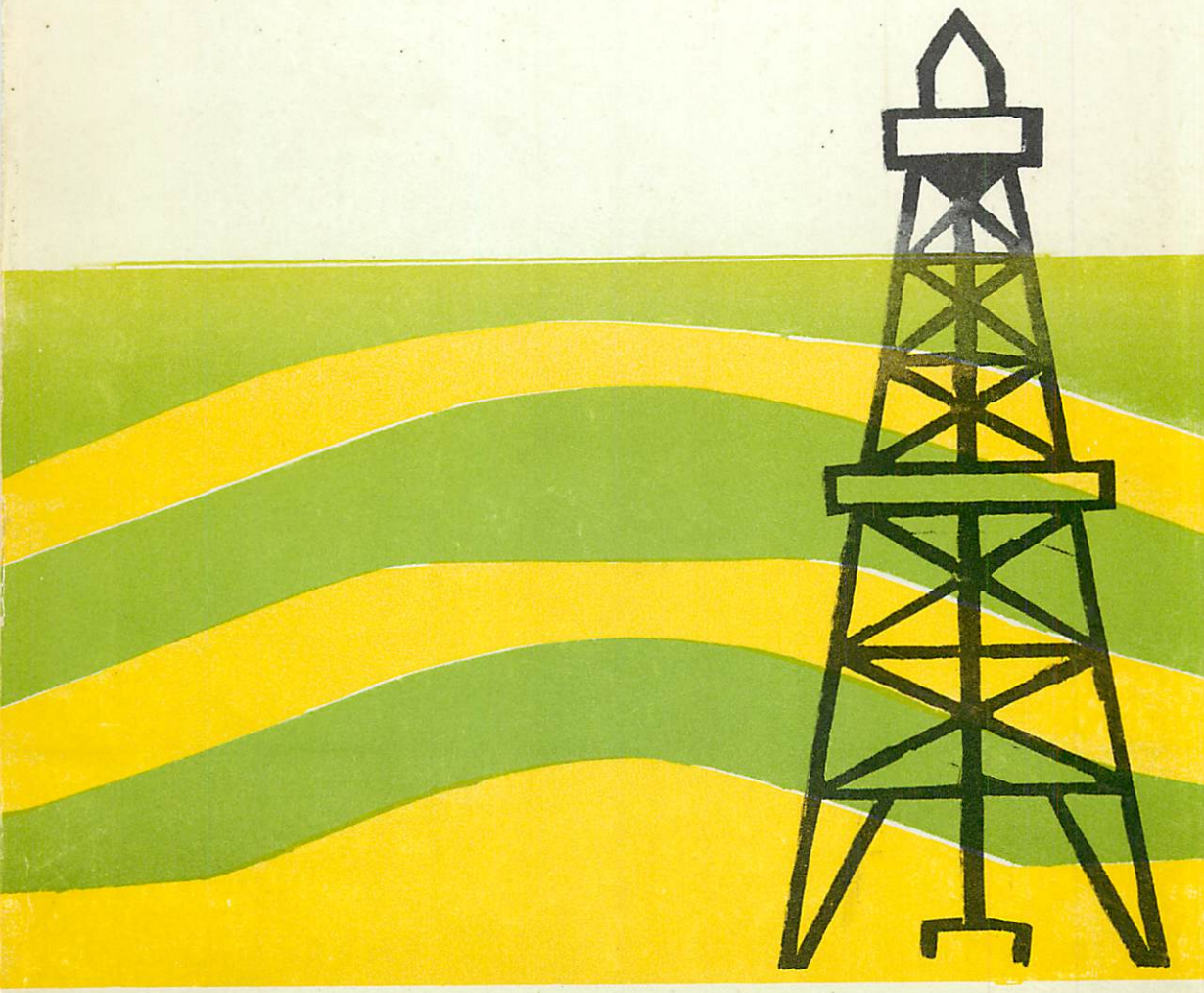
أساسيات جيولوجيا البترول

تأليف
أ. د. ريتشارد سيلي
جامعة لندن - انكلترا

ترجمة
د. فاضل السعدوني
جامعة اليرموك - الأردن



ساعدت جامعة اليرموك على طبع هذا الكتاب

أساسيات جيولوجيا البترول

تأليف
أ. د. ريتشارد سيلي
جامعة لندن - انكلترا

ترجمة
د. فاضل السعدوني
جامعة اليرموك - الأردن

ساعدت جامعة اليرموك على طبع هذا الكتاب

دار الأمل للنشر والتوزيع

اربد - ص.ب ٤٦٩

تلفون - ٢٧٦١٧٤

الاردن

١٩٩٤

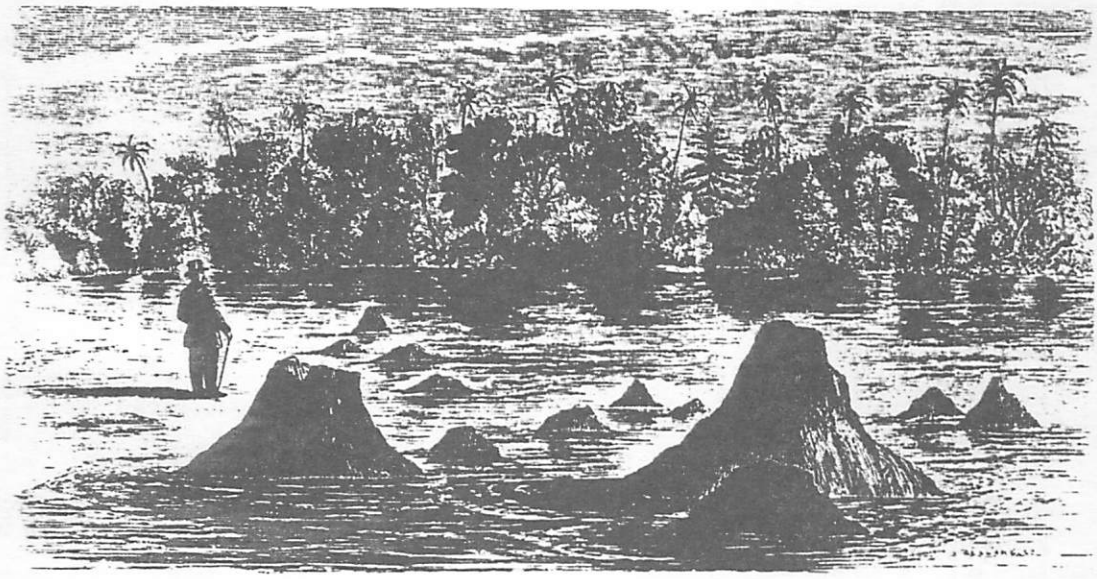
أساسيات جيولوجيا البترول

تأليف
أ. د. ريتشارد سيلي
جامعة لندن- انكلترا

ترجمة
د. فاضل السعدوني
جامعة اليرموك - الأردن

طبع هذا الكتاب بدعم من عمادة البحث العلمي والدراسات العليا في جامعة اليرموك

١٩٩٤



اللوحة الأمامية: جيولوجي يتأمل البركان الطيني البترولي في (مونكي تاون)، ترينداد من [Wall and Sawkins, 1860].

الى الرعيل الأول من جيولوجيي البترول العرب ،

خورشيد النقيب، انور عز الدين، جوزيف كدو،

زياد بيضون، عبدالله السياب،

جعفر الساكني وآخرين.

توطئة

يعّد علم الجيولوجيا أحد الحقول العديدة التي تساهم في استكشاف النفط والغاز وانتاجهما. وهو يندمج مع هندسة البترول من جانب ومع الجيوفيزياء من جانب آخر. كما يشتمل استكشاف البترول أيضا كلا من الهندسة والقانون والمحاسبة والاقتصاد. وبذلك فان هذا الكتاب سوف يغطي أحد جوانب الاستكشاف البترولي حسب.

لقد كتبتُ هذا الكتاب بشكل رئيسي لاولئك الذين اما أنهم يدرسون الاستكشاف البترولي في المراحل النهائية من دراستهم الجامعية أو اولئك الذين ابتدأوا لتوهم مهنة في الصناعة النفطية. ومن الناحية الأساسية فان الكتاب معد للجيولوجيين وليس للمهندسين أو الجيوفيزيائيين. لذلك أفترض أن القاريء ملم بالأفكار الأساسية في الجيولوجيا، وسبق أن أخذ بشكل خاص مساقات في علم الطبقات وعلم الصخور والرسوبيات. ورغم أن هدف الكتاب الأساسي هو جيولوجيا البترول، الاّ أنه يضم أيضا مواد في الجيولوجيا وهندسة المكامن البترولية. ولقد تم تقديم كلا من هذين الفرعين بمستوى أولي جدا ويحتاج جيولوجيو البترول الى معلومات أكثر من تلك التي يحتويها هذا الكتاب. وهنالك العديد من الكتب المنهجية المتوفرة مسبقا عن هذين الفرعين، كما أن جيولوجي البترول المبتديء سوف يلتحق بمساقات في تفسير المعطيات الزلزالية وتحليل المجسات في بداية حياته المهنية.

كما آمل أن يكون هذا الكتاب مفيدا لمهندسي البترول والجيوفيزيائيين، وخصوصا اولئك الذين اكتسبوا معرفة بالجيولوجيا من خلال المساقات أو الخبرة. أن هؤلاء سوف يكونون قادرين على تمييز الفرق بين الجيولوجيا وبين حقول اختصاصهم.

ورغم أن علم الجيولوجيا، يعتمد الى حد كبير، على المعطيات الرقمية الا أنه أقل عرضة للتحليل الرياضي الصارم المستعمل في الهندسة والجيوفيزياء. والأكثر من ذلك أنه لا يمكن أن يفهم الا من خلال عاصفة من المصطلحات الغامضة. وللمهندسين أقول: عندما تقرأون هذا الكتاب احتفظوا بمعجم جيولوجي على مقربة، واهملوا الفقرات المتعلقة بتحليل المجسات وهندسة المكامن البترولية.

وللجيوفيزيائيين أقول: مرة أخرى احتفظوا بمعجم جيولوجي على مقربة، واهملوا الفقرة المتعلقة بالطرق الجيوفيزيائية.

آر. سي. سيلي
أيلول ١٩٨٤

مقدمة المترجم

هذا كتاب ريتشارد سيلي في جيولوجيا البترول يزهو بعربيته وتزهو العربية به، جاء ليسد فراغاً واضحاً في موضوع هام، وليؤنس وحشة الدارسين في موضوع أرتبط بالعرب وأرتبط العرب به.

ولا شك أن ترجمة كتاب في موضوع مثل هذا يتطلب جهداً استثنائياً بسبب جِدّة مصطلحاته وغرابتها، وتنوع موضوعاته وتفرقها، غير أنه كلما وهن العزم ولانت العريكة بحثنا في قاع النفس عن وشالة صبر ومتكأ عزيمة، وهكذا لملمنا شعاث النفس وتوكلنا على من يتوكل عليه العباد، فسهل الصعب وقرب البعيد، فلله الحمد على كل شيء.

ولقد إستمديت وافر العزم من تلاميذي في قسم علوم الأرض والبيئة في جامعة اليرموك وأنا أراهم يجهدون النفس مع حروف الكتاب اللاتينية، ومن زملاء أعزة باركوا الجهد وأزروه أخص منهم بالذكر الدكتور رافع الشناق والدكتور نزار أبو جابر. ولاشك أن عملاً مثل هذا يتطلب مساهمة عدد كبير من البشر، لذا أود أن أتقدم بجزيل شكري الى عمادة البحث العلمي والدراسات العليا في جامعة اليرموك لمساعدتها في طبع الكتاب والى الأخ أمجد القرعان الذي وفر أفضل الخدمات الفنية لاخراج الكتاب بأبهى حلله، والى زوجتي السيدة غادة سليم التي تحملت مشقة الاخراج النهائي للكتاب والى أستاذي دوغلاس هاملتون من جامعة برستل في إنجلترا الذي علمني أول الدروس سواء في الحياة الحقيقية أو في جيولوجيا البترول، والشكر لله سبحانه وتعالى أولاً وأخيراً.

فاضل السعدوني

إربد، شتاء ١٩٩٤

الفصل الأول

مراجعة تاريخية لاستكشاف النفط والغاز

فقال الرب لنوح... ابن لك فُلكاً من
خشب السرو، واجعل فيه غرفاً تطليها
بالزفت من الداخل والخارج.

سفر التكوين، ٦، ١٣ - ١٤.

البترول من نوح الى الأوبك

التنقيب عن البترول حرفة قديمة جدا مثلما توضح العبارة الظاهرة في أعلاه. ويحتوي الانجيل على اشارات عديدة لاستعمال القطران Pitch أو الاسفلت الذي كان يجمع من نضوحات طبيعية يضج بها الشرق الأوسط.

قدم هيرودتس في نحو ٤٥٠ ق.م. وصفا للنضوحات النفطية في قرطاجة (تونس) وجزيرة زاخينثوس Zachynthus الاغريقية (هيرودتس، ٤٥٠ ق.م.)، ولقد أعطى وصفا مفصلا لطرق استخراج البترول من الآبار الواقعة قرب أردريكا Ardericca في ايران الحديثة، رغم أن الآبار لا يمكن أن تكون عميقة جدا، ذلك لأن الموائع كانت تستخرج باستعمال زق خمر مثبت في نهاية عمود طويل يستند على عتلة، وكان البترول والملح والحمر (البتيومن Bitumine) تستخرج من هذه الآبار. وخلال الألف الميلادي الأول، كان البترول والأسفلت يجمعان طبيعيا من نضوحات طبيعية في أرجاء مختلفة من العالم.

كانت الاستعمالات الأولى للبترول تتضمن التطبب واستعماله كواق من الماء وفي الحروب أيضا، اذ كان البترول يوضع خارجيا على الجروح والروماتزم، كما كان يوصف للاستعمال الداخلي باعتباره مسهلا للأمعاء، فمن أيام نوح استعمل القير لتزفيت القوارب منذ أقدم العصور في الحروب. فعندما احتل الاسكندر المقدوني الهند عام ٣٢٦ ق.م. شنت فيالق فرسان الفيلة الهنود بان كرٌ عليهم خيالة يلوحون بأباريق مملوءة بالقير المشتعل. واستعمل نادر شاه جهازا مشابها، وذلك بأن شبع سنامات الجمال بالبترول وأرسلها مشتعلة ضد فيالق الفيلة عام ١٧٣٩ (Pratt and Good, 1950). ولقد اخترعت النار الاغريقية Greek Fire من قبل كالينكوس الهليوبوليسي عام ٦٦٨ بعد الميلاد. ان مكوناتها ما تزال مجهولة، ولكن يعتقد انها كانت تشمل الجير الحي والكبريت والنفثا، وكانت تشعل وهي

رطبة، ولقد كانت سلاحا فتاكا في الحرب البحرية البيزنطية.

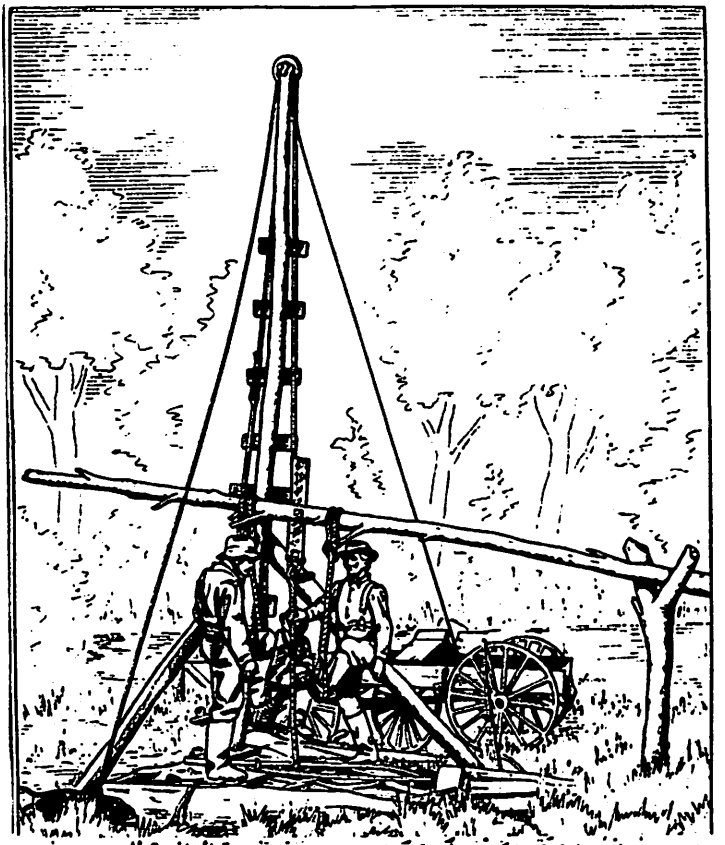
وحتى منتصف القرن التاسع عشر، ظل الاسفلت والنفط ومنتجاتهما ينتجان فقط من النضوحات والحفر الضحلة، او الابار المحفورة باليد. وفي عام ١٦٩٤، أصدر التاج البريطاني براءة اختراع الى السادة ايل، هانكوك وبورتلوك «لاستخراج كميات كبيرة من القير والقار والبترول من نوع من الصخور». وكانت الصخرة المقصودة هي من العصر الكاربوني (الفحمي) وتوجد في بيتشفورد Pitchford، وهي تسمية مبررة في شروبشاير (Eele, 1697).

ولقد اتضح أنّ البئر الأولى التي حفرت بهدف البحث عن البترول (بعد ان كانت تحفر بحثا عن الماء او الماء المالح)، كانت في بيشلربرون بفرنسا، وذلك عام ١٧٤٥، كما شوهدت تكشفات Outcrops من الرمل الزيتي Oil Sand في هذه المنطقة. ومنح لويس الخامس عشر اجازة الى ام.دي لاسوربونير الذي حفر العديد من الابار وشيد مصفاة في السنة نفسها (Redwood, 1913). ويعود الفضل في ولادة صناعة السجيل الزيتي Oil Shale الى جيمس يونغ James Young الذي ابتدأ بتقطير البترول من السجيل الكاربوني في توربان باسكتلندا عام ١٨٤٧ (انظر صفحة ٥١٣).

تضم منتجات تلك المصافي الأولى الامونيا والشمع البرافيني الصلب والبرافين السائل (الكيروسين او زيت الفحم) . وكان الشمع يستعمل في صناعة الشموع والكيروسين للمصابيح. ولقد أصبح الكيروسين أقل سعرا من زيت الحوت، وبذلك توسع سوق الهايدروكاربونات السائلة بسرعة فائقة في أواسط القرن التاسع عشر، وكان الطلب يلبى في البداية من السجيل الزيتي والنفط المستخرج من النضوحات الطبيعية والحفر والابار المحفورة باليد والدهاليز Galleries.

قبل مرحلة التنقيب عن البترول، كان الحفر الدقاق Cable-tool drilling تقنية معروفة في أرجاء مختلفة من العالم بحثا عن الماء والمياه المالحة (الشكل ١-١). وكانت البئر الأولى التي أنتجت نفطا بحق، قد حفرت في اويل كريك Oil Creek، بنسلفانيا من قبل العقيد دريك عام ١٨٥٩ (Owen, 1975). ولقد تبع ذلك نمو مطرد في انتاج البترول من الابار تحت السطحية سواء في أمريكا الشمالية وفي أرجاء مختلفة من العالم. وكان الحافز الرئيسي لإنتاج البترول هو تطوير ماكنة الاحتراق الداخلي في سبعينيات القرن التاسع

عشر وثمانينياته. وتدريجا، فاق الطلب على المشتقات النفطية الخفيفة الطلب على الكيروسين . ومع ذلك، فلقد وجدت استعمالات لكل المشتقات المصفاه من الغاز الخفيف مرورا بالبترول والبرافين وزيت الديزل والقار والكبريت الى البقايا الثقيلة.



الشكل ١-١: برج الحفر الدقاق المبكر في أمريكا. كان يتم توفير القوة الدافعة للبرج من قبل رجل واحد وعمود نابض.(Courtesy of British Petroleum).

اشتد الطلب على المنتجات النفطية كثيرا خلال الحرب العالمية الأولى (١٩١٤-١٩١٨). وبحلول العشرينات من هذا القرن أصبحت الصناعة النفطية تحت هيمنة سبع شركات كبرى، اطلق عليها اسم الشقيقات السبع Seven Sisters من قبل انريكوماتي Enrico Mattei (Sampson, 1975)، وتضم هذه الشركات :-

النفط البريطانية	British Petroleum
شل	Shell

Exxon (formely Esso)	اكسون (اسوسابقا)
Gulf	غلف
Texaco	تكساكو
Mobil	موبيل
Socal (or Chevron)	سوكال(اوشفرون)

عثرت كل من شركتي النفط البريطانية وشل على احتياطياتهما بعيدا عن البلدان التي تأسستا فيهما، وخصوصا في الشرق الأوسط والأدنى ، على التوالي. وبذلك انغمست هاتان الشركتان منذ وقت مبكر بنقل بحري بعيد المسافات، وبذلك أخذت تقيسان نفوطهما بالطن البحري Seagoing tonne وعلى النقيض من ذلك، فان الشركات الأمريكية التي تعاملت بالمسافات القصيرة، استعملت البرميل كوحدة قياس.

ابتدأت الشركات الأمريكية عملياتها الخارجية عبر البحار في أمريكا الجنوبية والوسطى بشكل رئيسي خلال عشرينات هذا القرن. وفي الثلاثينات، نشأت شركة الزيت العربية-الامريكية (ارامكو) من كارتل يتكون من سوكال وتكساكو وموبيل واكسون. أصبح مبدأ الكارتلات سائدا في معظم أنحاء العالم الحر بعد الحرب العالمية، والازدهار الذي تلاها. اذ قامرت شركات البترول بالأرباح التي تجنيها من منطقة منتجة كيما تنقب عن البترول في مناطق جديدة. ولكن ان تتحمل كل مجازفات المشاريع الجديدة لهو أمر تجافيه الحكمة، لذلك أخذت الشركات تستثمر في العديد من المشاريع المشتركة، او الكارتلات. ويظهر الجدول (١-١) بعضا من الكارتلات الرئيسية مظهرا الرقصة الرسمية للشقيقات السبع وهن يغيرن شركاءهن حول العام.

وخلال هذه العملية تتبادل الكارتلات العملاقة علاقات ود وكراهية متبادلتين. ان الغرض من اي مشروع اقتصادي هو الحصول على أعلى الأرباح. لذلك كان من منفعتها المشتركة ان تصدر النفط من الدول المنتجة بأرخص سعر ممكن، وان تبيعه الى السوق

العالمي بأعلى سعر ممكن. ان منفعة كارتل ما، تعوض برغبة كل شركة مساهمة في ان تزيد مبيعاتها على حساب منافسيها وذلك من خلال بيع منتجاتها بأسعار أقل.

الشركات	ايران الكونسرتيوم	العراق شركة نفط العراق	السعودية ارامكو	الكويت شركة نفط الكويت	ابو ظبي أدمار	أ. د. بي. مي	ليبيا الواحة
B.P.	X	X		X	X	X	
Shell	X	X				X	X
Exxon	X	X	X			X	
Mobil	X	X	X			X	
Gulf	X			X			
Texaco	X		X				
Socal	X		X				
C.F.P.	X					X	
Conoco							X
Amerada							X
Marathon							X

الجدول ١-١: المساهمون في بعض أهم كارتلات النفط الاجنبية.

في عام ١٩٦٠ تأسست منظمة الأقطار المصدرة للنفط (أوبيك) في بغداد بشكل مبدئي من العراق، وايران، والكويت، والمملكة العربية السعودية، وفنزويلا (Martines, 1969) بعد ذلك توسعت لتشمل الجزائر ودبي والاكوادور والغابون واندنوسيا وليبيا ونايجيريا وقطر ودولة الامارات العربية المتحدة. ولكي يتأهل قطر ما لعضوية المنظمة، فأن اقتصاد ذلك البلد يجب ان يعتمد اعتمادا رئيسيا على الصادرات النفطية، لذلك لم تتأهل الولايات المتحدة او المملكة المتحدة للعضوية.

ان هدف اوبيك هو السيطرة على قوة الشركات النفطية المستقلة وذلك من خلال الربط بين السعر وبين امتلاك أرصدة الشركات. فبالنسبة للعديد من دول الأوبيك، يعد البترول المصدر الطبيعي الوحيد، وعندما ينضب، فانه لن تبقى لديها أرصدة ما لم تتمكن

من الحصول على أقصى ريع نفطي كي توظفه في قطاعات الصناعات الأخرى. ولقد نجحت الاوابك في المنهج الذي اختطته بشكل ملحوظ، رغم ان الزيادة الكبيرة التي حصلت في الأسعار في بداية السبعينات ساهمت في خلق أجواء من الركود الاقتصادي العالمي الذي أثر، على حد سواء، على كل من البلدان المتقدمة وبلدان العالم الثالث الأكثر فقرا.

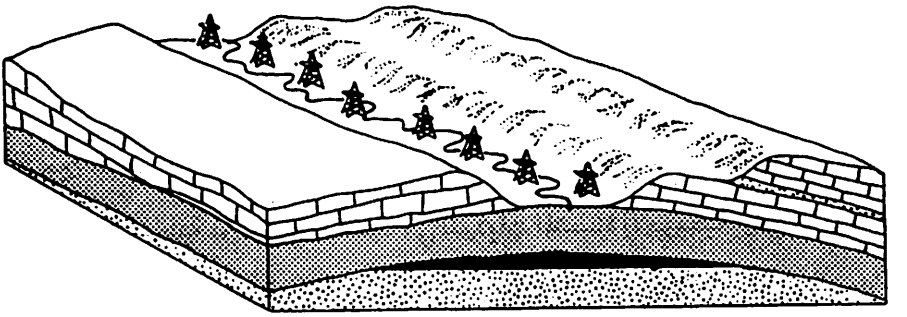
ان فكرة ان تسيطر الدولة المنتجة على فعاليات الشركة النفطية قد صدرت من اوبيك، إذ تأسست شركات نفط حكومية لا في البلدان التي كانت تفتقد الخبرة النفطية المحلية حسب (مثل ستيت اويل في النرويج وبيتروناس في ماليزيا) ولكن ايضا في الدول التي تتوفر لديها مثل هذه الخبرة (بتروكان في كندا وبروتل في المملكة المتحدة) . وفي السابق كانت الثروة التي تحققها شركات النفط في أحد البلدان تمثل رأسمال لمجازفة تستثمر في بلد آخر. اما رأسمال المجازفة الان فانه يأخذ من دافع الضرائب.

تطور أفكار التنقيب عن البترول وتقنياته

منذ أيام نوح والى الاوبيك، ازداد دور جيولوجي النفط مهارة ومتطلبا. ففي الأيام المبكرة كان يعثر على النفط خلال التجول في الريف بمشعل مكشوف وتفاؤل واحساس بالمغامرة. ذات مرة وظفت احدى شركات البترول الرئيسية، وسيظل اسمها غفلا، رئيس جيولوجيين كانت تتلخص فلسفة الاستكشاف عنده بحفر قبور الهنود القديمة. بينما اعتاد منقب اخر عن النفط ان يرتدي قبعة قديمة، ويهرول بها في البراري حتى تسقط القبعة فيبدأ بالحفر حيثما سقطت. ويسجل التاريخ انه كان ناجحا جدا (Cinningham-Craig, 1912).

من بين أفكار الاستكشاف المبكرة دراسة الجداول Creekology. إذ اتضح تدريجيا للحفارين الأوائل ان النفط غالبا ما يوجد في الابار الواقعة على قيعان الأنهار أكثر من تلك الموجودة على التلال (الشكل ١-٢). ولقد طرحت نظرية الطيات المحدبة

Anticlinal theory، التي فسرت هذه الظاهرة من قبل (Hunt, 1861)، وحتى ايامنا هذه، ظل البحث عن الطيات المحدبة أحد الأفكار الاستكشافية الأكثر نجاحا.



الشكل ١-٢: دراسة السواقي-سهولة العثور على النفط في الايام الخوالي.

وسرعان ما أظهرت التجربة مع ذلك، ان النفط يمكن ان يوجد خارج التركيب، اذ لاحظ (Carll,1880)، ان رمل فينانغو (Venango Sands)، البحري الحامل للبترول في بنسلفانيا يوجد في اتجاهات لا تعكس التركيب بل السواحل القديمة. وهكذا ولدت فكرة ان النفط يمكن ان يصطاد طبقيا كما تركيبيا، وتنتج المصائد الطبقية Stratigraphic traps من التغيرات الحاصلة في الترسيب او التعرية او العمليات التحويرية داخل المكمن.

وخلال أواخر القرن التاسع عشر ومطلع القرن العشرين، كان التنقيب عن البترول يستند على رسم الخرائط السطحية للطيات المحدبة، وكان يعثر على المصائد الطبقية على نحو عرضي اما بالموهبة او من خلال رسم الخرائط تحت السطحية، واستقراء Extroplation المعطيات التي يتم تجميعها من الابار التي حفرت لفحص بعض الشواذ او الظواهر التركيبية.

ان وجـود سطوح عـدم التـوافق Unconformities والطي غـير المتسـاوق Disharmonic folding حد من العمق الذي يمكن ان يستعمل فيه رسم الخرائط السطحية لتوقع التراكيب تحت السطحية. وابتدأ حل المشكلة بالظهور أواسط العشرينات عندما استعملت الطرق الزلزالية (الانكسارية) والجذبية والمغناطيسية جميعا في التنقيب عن البترول. ولقد ندر ان أثبتت المسوحات المغناطيسية انها وسيلة مؤثرة للعثور على البترول، في حين أثبتت الطرق الجذبية والزلزالية قدرتها في العثور على مصائد القبب الملحية في المقاطعة الساحلية من خليج المكسيك في الولايات المتحدة الأمريكية. وفي الفترة الزمنية نفسها، استعملت الطرق الجيوفيزيائية في جس الابار، واجري أول جس كهربائي في بيشلبرون Pechelbronn في فـرنسـا عـام ١٩٢٧. وبعـد ذلك، تلت تقنيـات الجس الكهربائي والصوتي والاشعاعي.

ابتدأت المسوحات الجوية في العشرينات من هذا القرن، ولكن علم الجيولوجيا التصويرية Photogeology الذي يستعمل الصور المجسمة Stereophotos، لم يصبح معروفا على نطاق واسع الا بعد الحرب العالمية الثانية. في ذلك الوقت كانت المسوحات الجوية منخفضة التكلفة الى حد سمح بالمسح الاستطلاعي السريع لمقاطعات واسعة، وكانت الجيولوجيا التصويرية مؤثرة على نحو ملحوظ في صحارى افريقية والشرق الأوسط، حيث لا يغطي الغطاء النباتي الجيولوجيا السطحية.

تقدمت طرق التنقيب الجيولوجية الصرفة ببطء ولكن بثبات خلال النصف الأول من القرن العشرين. وكانت احدى التطبيقات الرئيسية في التنقيب عن البترول هو تطور علم المتحجرات او المستحاثات Micropaleontology. ان الانطقة الاحيائية الطبقية Biostratigraphic zones الكلاسيكية، والتي تستند على المتحجرات العينية (الكبيرة) Macrofossils مثل الامونايت Ammonites، يمكن الا تميز في المقاطع تحت السطحية بسبب الطبيعة التدميرية للحفر، لذلك تم تحديد أنطقة جديدة اعتمادا على

المتحجرات الدقيقة (المجهرية) Microfossils التي تتم معايرتها عند السطح مع أنطقة المتحجرات الكبيرة.

وفرت دراسة البيئات الرسوبية الحديثة في أواخر الخمسينات وأوائل الستينات، وبشكل ملحوظ على جزيرة غالفستون Galveston (تكساس) ودلتا المسيسبي وحاجز البهاما Bahama Bank وبحر الوادن الهولندي Dutch Wadden Sea تصورا حديثا عن السحنات الرسوبية القديمة وتفسيرها، ولقد وفر هذا التصور توقعا أفضل لمعمارية المكامن البترولية ومساميتها الداخلية والتغيرات الحاصلة في نفوذيتها.

شهدت السبعينات تطورات رئيسية على جبهتين - جيوفيزيائية وجيوكيميائية، وادى مقدم الحاسوب الى قفزة كمية أساسية في معالجة المعلومات الزلزالية، فبدلا من ان ينكب المعالج الزلزالي مجهدا على بضعة اثار غالفونومترية متراكمة Galvanometer Traces، أصبح بالامكان عرض قدر هائل من المعطيات على مقاطع زلزالية مستمرة، ويمكن تأشير الأنطقة العاكسة بألوان براقة من قبل الجيوفيزيائيين أولاً ومن ثم حتى من قبل بعض الجيولوجيين. وبتحسن التقنية، أصبحت المقاطع الزلزالية تشبه أكثر فأكثر المقاطع الجيولوجية، كيما تصبح الأفكار الطبقية والرسوبية قابلة للتطبيق على نحو مباشر.

من الأيام المبكرة للبحث العلمي، عزي أصل النفط الى اصلين العضوي واللاعضوي، فالكيميائيون من أمثال مندليف في القرن التاسع عشر، والفلكيون من أمثال غولد Gold وهويل Hoyle في القرن العشرين يجادلون لصالح الأصل العضوي - وهو ناري في بعض الأحيان او خارج أرضي Extraterrestrial في أحيان أخرى اوخليطا من الاثنين. بينما يعتقد أغلب جيولوجيي البترول ان البترول يتكون من تحوير المادة العضوية المدفونة، ولاحظوا انه مرتبط بالصخور الرسوبية وليس الصخور النارية . ان مقدم تقنيات التحليل الكيميائي الدقيقة وزهيدة التكلفة سمح بدراسة الصخور المولدة للنفط. وأصبح

ممكنا الان ان نقارن البترول مع السجيل المولد له، وان نشخص الصخور المولدة المحتملة وقدرتها على توليد النفط والغاز ودرجة نضوجها الحراري.

تبقى ان نرى ما سوف تؤول اليه التطورات الاساسية في تقنية التنقيب عن البترول اواخر الثمانينات. ان من المتوقع ان تتحسن التقنيات كلها، وقد يكون الاستشعار من بعد من الأقمار الصناعية أحد المعدات الرئيسية الجديدة، شأنه شأن الاستشعار المباشر من الطرق السطحية الجيوكيميائية والجيوفيزيائية، وتتضمن الطرق الأخيرة هذه تشخيص نضوحات الغاز المجهرية والتذبذبات الحاصلة في توصيلية Conductivity الصخور فوق التراكمات النفطية. وهذه الطرق مستعملة منذ نصف قرن من الأزمان، ولكن يتوجب ان تقابل بقبول على نطاق أوسع. ان عدم القبول هذا لا يسر الا الجيولوجيون حسب، الذين شأنهم شأن المحاميين، لهم مصلحة في انعدام الكفاءة. ان اكتشاف «صندوق أسود» للعثور على البترول سوف يؤدي الى بطالة واسعة النطاق، مثلما يمكن ان يحدث لو أصبح بمقدور المحاميين ان يحسموا الدعاوى خلال أيام او اسابيع بدلا من الشهور او السنين.

وبغية تكون تراكمات اقتصادية من البترول لا بد من توفر خمسة شروط أساسية هي :-

(١) لا بد من توفر صخرة مصدرية غنية بالمواد العضوية كي تولد النفط او الغاز.

(٢) ان الصخرة المصدرية لا بد ان تكون قد سخنت بما يكفي لتحرير البترول.

(٣) لا بد من توفر مكمن لاحتواء الهايدروكاربونات المتحررة. ان هذا المكمن يجب ان يحتوي على :-

أ- مسامية كي تحتوي النفط او الغاز.

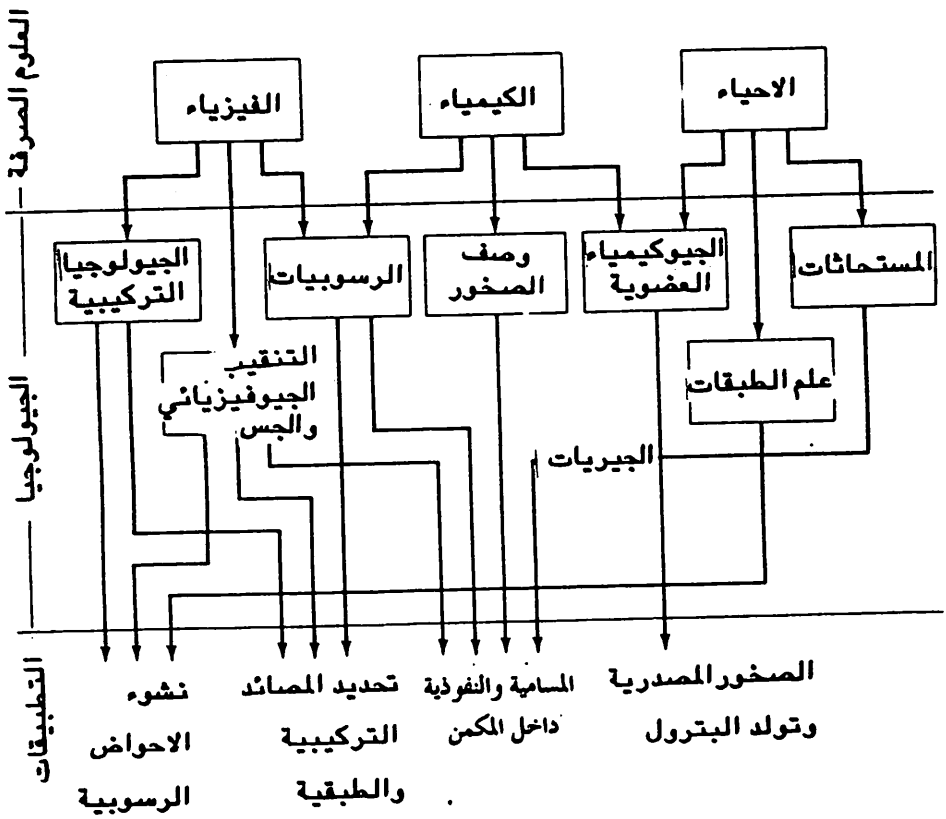
ب- نفوذية كي تسمح بانسياب المائع.

(٤) يجب ان يختم المكمن بصخور غطائية Cap rocks صلدة لمنع هروب

البترول باتجاه الاعلى نحو سطح الأرض.

(٥) يجب ان يرتب المصدر والمكمن والختم بطريقة كي تصطاد البترول.

يتناول الفصل الخامس من هذا الكتاب تولد البترول وهجرته من الصخور المصدرية، ويشرح الفصل السادس طبيعة المكامن، بينما يتعامل الفصل السابع مع أنواع المصائد المختلفة.



الشكل ١-٣: علاقة جيولوجيا البترول بالعلوم الصرفة.

مقام جيولوجيا البترول بين العلوم الاخرى The context of Petroleum Geology

يمثل جيولوجيا البترول تطبيق الجيولوجيا (اي دراسة الصخور) في التنقيب عن البترول والغاز والمساعدة في انتاجهما. ان علم الجيولوجيا في حد ذاته يستند كثيرا على علوم الكيمياء والفيزياء والاحياء، متضمنا تطبيق أفكار مجردة بشكل رئيسي على معطيات منظورة. وفي الماضي، كانت هذه المعطيات تعتمد بشكل أساسي على المشاهدة والتفسير الذاتي، بيد انها تتحول الان، وعلى نحو متزايد، الى معطيات فيزيائية وكيميائية، وبذلك الى شكل أكثر موضوعية. ان علم الجيولوجيا بشكل عام، وجيولوجيا البترول، بشكل خاص، ما يزال معتمدا على أحكام قيمية Value judgements، تستند على الخبرة وتقييم المعطيات المقدمة.

أظهر الجزء السابق الطريقة التي تقدم بها التنقيب عن البترول على مدى السنوات المنصرمة بتطور التقنيات الجيولوجية المختلفة. ان من المناسب الان، ان نعالج بشيء من التفصيل دور الكيمياء والفيزياء وعلم الاحياء في التنقيب عن البترول، (شكل ١-٣).

الكيمياء وجيولوجيا البترول

ان لاستعمال الكيمياء في دراسة الصخور (الجيوكيمياء) استعمالات عديدة في جيولوجيا البترول، فالمعرفة التفصيلية بالتركيب المعدني للصخور مهمة على مستويات عديدة.

ففي المراحل الأولى من التنقيب، هنالك جملة استنتاجات عامة مثل توزيع المكامن المحتملة ونوعها يمكن ان تستنبط من صخاريتها العامة. فعلى سبيل المثال، ان مسامية الحجر الرملي ترتبط عادة بالسحنات، في حين ان الوضع ليس كذلك في الصخور الجيرية. فالمعرفة التفصيلية بمعدنية المكمن تمكننا من احتساب معدل فقدانه للمسامية خلال الدفن Burial، وان هذه المعلومات التفصيلية ضرورية في التفسير الدقيق لمجسات الابار

الجيوفيزيائية خلال المكمن. ويمكن استعمال المعرفة بكيمياء الموائع الموجودة في المسامات وتأثيرها على استقرارية المعادن لتحديد المواقع التي ستدمر المسامية فيها بالتسميت، وتلك التي تحتفظ بشكلها الأصلي وتلك التي تزداد بتأثير ذوبان المعادن بماء التكوين.

وترتبط الكيمياء العضوية في كل من تحليل البترول والغاز وكذلك في دراسة العمليات التحويرية التي تتعرض لها أنسجة النباتات والحيوانات في الترسبات والطريقة التي يولد فيها المركب العضوي الناتج والمسمى كيروجين البترول في النهاية.

الفيزياء وجيولوجيا البترول

يكتسب تطبيق الفيزياء في دراسة الصخور (الجيوفيزياء) أهمية خاصة في جيولوجيا البترول. وفي تطبيقها الأوسع، تساهم الجيوفيزياء مساهمة رئيسية في فهم القشرة الأرضية، وخصوصا من خلال تطبيق نظرية تكتونية الصفيح الحديثة لدراسة تكون البترول واحتمالية وجوده في الأحواض الرسوبية. وفي الجانب الأكثر تحديدا، فثمة حاجة للأفكار الفيزيائية لفهم الطيات Folds والفوالق Faults والطيات الاختراقية Diapirs، وبالتالي دورها في اصطياد البترول.

لا يمكننا ان نفكر بالتنقيب الحديث عن البترول دون مساعدة المسوحات المغناطيسية والزلزالية في العثور على المصائد البترولية المحتملة. كما لا يمكن تقييم اية احتمالات نفطية تقييما مؤثرا دون المجسات البئرية الجيوفيزيائية لقياس الصخارية والمسامية والمحتوى البترولي للمكمن.

علم الاحياء وجيولوجيا البترول

يطبق علم الاحياء في الجيولوجيا في أوجه عدة، وبشكل ملحوظ من خلال دراسة المتحجرات (علم المتحجرات Paleontology)، وهو مهم على نحو خاص في تحديد

الأنطقة الاحيائية الطباقية Biostratigraphic zones لأغراض المضاهاة الطباقية. ان التحول في التأكيد على استعمال المتحجرات الدقيقة بدلا من المتحجرات الكبيرة لأغراض تحديد الأنطقة Zonation الذي أحدثه التنقيب عن البترول، لهو أمر ملحوظ اساسا. كما ان علم البيئة Ecology الذي يمثل دراسة العلاقة بين الكائنات الحية وبيئاتها لهو جانب مهم ايضا في جيولوجيا البترول. ويمكن للترسبات الجيرية بشكل عام، والشعاب الجيرية بشكل خاص ان تدرس على نحو مثمر بمساعدة المعرفة التفصيلية لبيئة الحيوانات والنباتات البحرية الحديثة. وان علم الاحياء، وخصوصا الكيمياء الاحيائية Biochemistry، مهمة جدا في دراسة تحول أنسجة الحيوانات والنباتات الى كيروجين Kerogen أثناء الدفن، وتولد البترول والغاز الذي يمكن ان ينتج من هذا التحول.

علاقة جيولوجيا البترول بالتنقيب عن البترول وانتاجه

يؤمن الجيولوجيون، على النقيض من العديد من غير الجيولوجيين، ان معرفة الأفكار الجيولوجية يمكن ان تساعد في العثور على البترول. والأكثر من ذلك، انهم غالبا ما يظنون ان جيولوجيا البترول والتنقيب عن البترول هما عبارتان مترادفتان، بيد انهما ليستا كذلك. ان النظريات التي تقول ان البترول لم يتكون من تحول المادة العضوية في الترسبات قد ذكرت مسبقا، وسوف تناقش بتفصيل أكثر في الفصل الخامس. فاذا لم تقبل وجهة نظر جيولوجيي البترول حول تولد البترول وهجرته، عندها فان طرق الاستكشاف الحالية تحتاج الى تعديلات كثيرة.

وما يزال بعض المنقبين عن البترول ينكرون الحاجة لوجود جيولوجيين لمساعدتهم في بحثهم. ففي عام ١٩٨٣، اعترف منقب بترول ناجح من ميدلاند في ولاية تكساس الامريكية بأن عدم تشغيله للجيولوجيين يعزى الى ان كل ما يحصل عليه منافسيه عندما يعينوهم هو ارتفاع كلفة برميل البترول الذي يعثرون عليه. كما ان شركة بترول جنوب افريقيا الحكومية

SOEKOR تخضع لالزام رسمي من قبل الحكومة ينص على ان تخضع للفحص كل مزاعم تتعلق بطريقة ما للعثور على البترول سواء كان ذلك عن طريق رياقة المياه* Dowsing او اية تقنية علمية متطورة. ان هذه الأمثلة ليست حالات متعجلة، ولقد جادل بعضهم على ان النفط ربما يوجد بمعدلات افضل اذا تم الحفر على نحو اعتباطي بدلا من تطبيق المباديء العلمية (انظر الصفحة ٥٢٥).

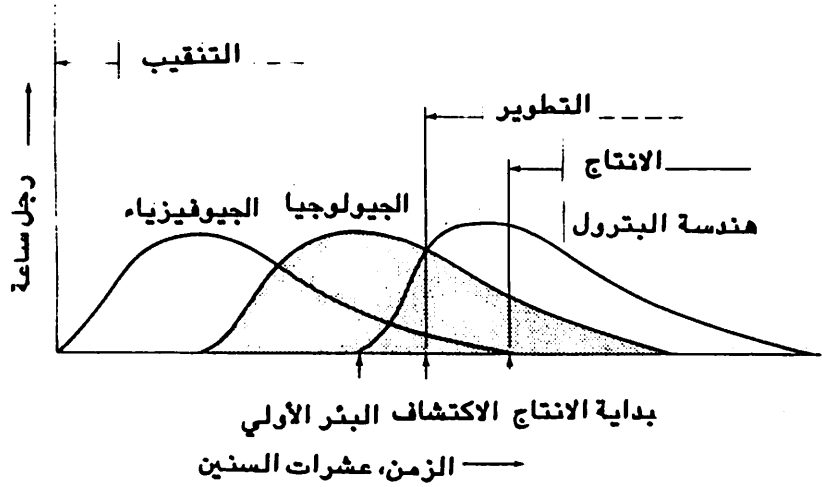
يمثل جيولوجيا البترول جانبا واحدا من حقل التنقيب عن البترول وانتاجه. فاذا ما وضعنا جانبا هيكلية منشأة نموذجية، فان التنقيب عن البترول يشمل الان فرقا متكاملة من اناس يمتلكون مدى واسعا من الخبرات المهنية (الشكل ١-٤)، وتضم هذه خبرات سياسية واجتماعية من النوع الذي يساهم في الحصول على المناطق الواعدة، بينما يساهم المسح الجيوفيزيائي في اعداد المعطيات الأولية التي يعتمد عليها ايجار الأرض Leasing، ومن ثم التوصية بالحفر لاحقا. وتطبق التصورات الجيولوجية في تفسير المعطيات الجيوفيزيائية ما ان يتم الحصول عليها ومعالجتها. وحالما يتم حفر البئر النفطية تحتاج الجوانب الهندسية من الاستكشاف تقييما لها. ويهتم مهندسو النفط باحتساب احتياطي الحقل وتوزيع البترول ضمن المكمن والطريقة الفضلى في انتاجه. وبذلك فان جيولوجيا البترول يقع ضمن سلسلة متواصلة من الميادين تبدأ بالجيوفيزياء وتنتهي بهندسة البترول، ولكنها تتداخل في كل من الزمن والموضوع (الشكل ١-٥).

يقبع خلف هذا التتابع من الأحداث، الاقتصاد باعتباره العامل المسيطر. ان شركات البترول لم تؤسس كي تعثر على البترول والغاز حسب، بل شأنها شأن أية مؤسسة اقتصادية أخرى يجب ان تحقق أرباحا. لذلك فان أية خطوة من الرحلة من الايجار الى الحفر ومن ثم الانتاج واخيرا الاستخلاص المدعم Enhanced Recovery، تراقب من قبل محاسبين واقتصاديين. وتتسارع فعاليات التنقيب عن البترول وانتاجه عندما ترتفع

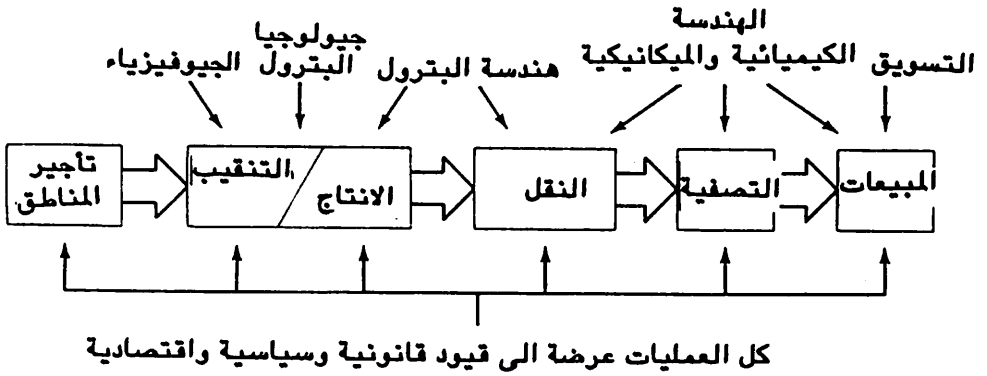
---

* او القنقنه كما اسماها معجم مصطلحات العلم والتكنولوجيا، وهي طريقة غير علمية للبحث عن المياه او المعادن تحت السطحية باستعمال عصا ذات شعبتين (المترجم).

أسعار البترول العالمية وتقل او حتى تتوقف عندما تنخفض الأسعار.



الشكل ١-٤: خط بياني يظهر ان جيولوجيا البترول هو جزء من سلسلة من الحقول العلمية المطبقة في التنقيب عن النفط والغاز وانتاجهما.



الشكل ١-٥: مرتسم انسيابي يظهر ان جيولوجيا البترول هو مجرد جانب واحد من التنقيب عن البترول وانتاجه، وان هذه الفعاليات في حد ذاتها هي جزء من سلسلة من الاحداث المعرضة الى العديد من القيود والمعجلة بالعديد من الميادين الاخرى.

ان جيولوجيي البترول في وضع استثنائي، اذ انهم عرضة للطرد من وظائفهم اما بسبب انعدام الكفاءة او الابداع في الوقت نفسه ولكن ليس بسبب توسط مستواهم. فاذا لم يعثروا على النفط، فانهم قد يطردون، وعلى نحو مشابه، فاذا ما عثروا على كميات كبيرة من

البترول فان وجودهم يصبح غير ضروري في قوائم الرواتب.

ان الجيولوجيين الاكفاء هم الاكثر أهمية بالنسبة للشركات الصغيرة التي تمثل سلسلة من الابار الجافة كارثة بالنسبة لها. اما الشركات الكبرى فان بمقدورها تحمل درجة مناسبة من انعدام الكفاءة بسبب توفر المصادر المالية لتحمل سلسلة من الكوارث، ولا يصح هذا في أية حالة أكثر من انطباقه على شركات البترول الحكومية، فبتوفر تجهيز لا نهاية له من أموال دافع الضرائب لاعالتها، فان الانفاق السياسي في البحث عن احتياطات بترولية محلية قد يتغلب على اية اعتبارات اقتصادية أخرى .

SELECTED BIBLIOGRAPHY

For an account of the early historical evolution of the oil industry, see:

REDWOOD, SIR B. 1913. *A Treatise on Petroleum*, vol. 1. London: Griffin & Co., 367 pp.

For the evolution of geological concepts in petroleum exploration, see:

DOTT, R. H. and REYNOLDS, M. J. 1969. *Source Book for Petroleum Geology*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 5, 471 pp.

For accounts of the evolution of the oil industry over the last century, see:

PRATT, W. E. and GOOD, D. 1950. *World Geography of Petroleum*. Princeton: Princeton Univ. Press, 464 pp.

OWEN, E. W. 1975. *Trek of the Oil Finders: A History of Exploration for Petroleum*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 1647 pp.

SAMPSON, A. 1975. *The Seven Sisters*. London: Hodden and Stoughton, 334 pp.

REFERENCES

CARLL, J. F. 1880. The geology of the oil regions of Warren, Venango, Clarion and Butler Counties. *Penn. Geol. Surv.*, *3*, 482.

CUNNINGHAM-CRAIG, E. H. 1912. *Oil-Finding*. London: Edward Arnold, 195 pp.

EELE, M. 1697. On making pitch, tar and oil out of a blackish stone in Shropshire. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, *xix*, 544.

HERODOTUS, H. ?450 B.C. *The Histories*. 9 books.

HUNT, T. S. 1861. Bitumens and mineral oils. *Montreal Gazette*, 1 March.

LYMAN, E. J. 1877. Tokyo: *Report on the Geological Survey of the Oil Lands of Japan*.

MARTINEZ, A. R. 1969. *Chronology of Venezuelan Oil*. London: Allen & Unwin, 207 pp.

OWEN, E. W. 1975. *Trek of the Oil Finders: A History of Exploration for Petroleum*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 1647 pp.

PRATT, W. E. and GOOD, D. 1950. *World Geography of Petroleum*. Princeton: Princeton Univ. Press, 464 pp.

REDWOOD, SIR B. 1913. *A Treatise on Petroleum*, vol. 1. London: Griffin & Co., 367 pp.

SAMPSON, A. 1975. *The Seven Sisters*. London: Hodden and Stoughton, 334 pp.

SHIRLEY, T. 1667. The description of a well and earth in Lancashire taking fire by a candle approached to it. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, *2*, 482.

الفصل الثاني

الصفات الفيزيائية والكيميائية للنفط والغاز

يعني التنقيب عن البترول ، بشكل رئيسي ، البحث عن النفط والغاز ، وهما عضوين من مجموعة من المركبات المتنوعة فيزيائيا وكيميائيا يطلق عليها اسم الهايدروكاربونات Hydrocarbons. ومن الناحية الفيزيائية ، تتحول الهايدروكاربونات من غازات ، مرورا بالسوائل والمواد المرنة Plastic الى المواد الصلبة. وتضم الغازات الهايدروكاربونية الغاز الجاف (الميثان) والغازات الرطبة (الايثان والبروبان والبيوتان ...الخ). اما المكثفات Condensates فهي هايدروكاربونات غازية تحت السطح بيد انها تتكاثف الى سوائل عندما تبرد عند السطح ، ويطلق على الهايدروكاربونات السائلة اسم النفط ، او النفط الخام Crude Oil او خام فقط Crude. اما الهايدروكاربونات المرنة Plastic فتضم الاسفلت Asphalt والمواد الأخرى ذات العلاقة ، وتشمل الهايدروكاربونات الصلبة الفحم Coal والكيروجين Kerogen. في حين ان الهايدرات الغازية Gas hydrates هي بلورات ثلجية ذات تشبيك Lattice ذري غريب التركيب ، يحتوي على جزيئات من الميثان والغازات الأخرى .

يصف هذا الفصل الصفات الفيزيائية والكيميائية للغاز الطبيعي والبترول وهايدرات الغاز ، ويمثل توطئة للفصل الخامس الذي يعنى بتولد البترول وهجرته. وسوف تتم مناقشة الهايدروكاربونات المرنة والصلبة في الفصل التاسع الذي سيغطي الرمل القاري Tar Sand والسجيل الزيتي Oil Shale.

يتكون جو الأرض من "الغاز الطبيعي" Natural gas. ومع ذلك ، يعرف الغاز الطبيعي في الصناعة النفطية ، على انه "خليط من الهايدروكاربونات وكميات متغايرة من اللاهايدروكاربونات التي اما ان توجد في حالة غازية او مذابة مع النفط الخام في المكامن الطبيعية تحت السطحية". ان التعريف السابق قد تبنته كل من مؤسسة البترول الأمريكية American Petroleum Institute واتحاد جيولوجيي البترول الاميركان American Association of Petroleum Geologists وجمعية مهندسي البترول Society of Petroleum Engineers. وتقسم هذه الجهات نفسها الغاز الطبيعي الى مذاب Dissolved ومصاحب Associated وغير مصاحب

Nonassociated ، والغاز المذاب يكون كذلك في النفط الخام في المكمن ، اما الغاز المصاحب ، ويعرف عادة بغاز القبعة الغازية Gas gap gas ، فهو يغطي او على تماس مع النفط الخام في المكمن ، بينما يوجد الغاز غير المصاحب في المكمن الذي لا يحتوي على كميات هامة من النفط الخام ، في حين يمثل الغاز الطبيعي المسيل Natural gas liquids تلك الأجزاء من غاز المكمن التي تتسيل عند السطح أثناء العمليات الحقلية او معالجة الغاز ، ويشمل الغاز الطبيعي كلا من الأيثان والبروبان والبيوتان والنبتان والغازولين الطبيعي والمكثفات ، ولكنه لا يقتصر على ما تقدم حسب. ومن الناحية الأساسية يمكن تقسيم الغازات الطبيعية التي يمكن العثور عليها تحت السطح الى مجموعتين رئيسيتين: الأصل العضوي وذات الأصل غير العضوي ، (الجدول ٢-١).

الجدول (٢-١) الغازات الطبيعية وطرق تكونها السائدة

الغاز	المصدر الرئيسي
الهيليوم الارغون الغازات الخاملة الكربتون الرادون	لا عضوي
النتروجين ثاني اوكسيد الكربون كبريتيد الهيدروجين الهيدروجين	خليط
الميثان – غاز جاف الايثان البروبان غازات رطبة البيوتان	عضوي بشكل رئيسي

تصنف الغـازات الى جافة او رطبة اعتمادا على مقدار البـخار المسيل Liquid Vapour الذي تحتويه ، ويمكن تعريف الغاز الجاف على نحو اعتباطي على انه ذلك الغاز الذي يحـتوي على أقل من ١,. غـالون لكل ١٠٠٠ قـدم مكعب من المكتـشفـات . ومن الناحـية الكيميائية ، فان أغلب الغاز الجاف هو من الميثان . اما الغاز الرطب فـهو ذلك الذي يحتوي على أكثر من ٣,. غالون لكل ١٠٠٠ قدم مكعب من المكتشفات. ومن الناحية الكيميائية تحتوي هذه الغازات على الايثان والبيوتان والبروبان. كما يوصف الغاز أيضا بأنه غاز حلوSweet وغاز حامض Sour ، اعتمادا على وجود أو غياب كبريتيد الهيدروجين على التوالي:

الغازات الطبيعية Natural Gases

الغازات الهايدروكاربونية Hydrocarbon Gases

تعد الهايدروكاربونات من سلسلة البرافين المكونات الأساسية للغاز الطبيعي (الجدول ٢-٢). وتتناقص غزارة الأعضاء الأثقل من السلسلة مع زيادة الوزن الجزيئي. والميثان هو الأكثر غزارة ، والأيثان والبيوتان والبروبان شـائعة التـواجد في حين ان البرافينات ذات الوزن الجزيئي الأكبر من البنتان هي الأقل شيوعاً.

ويعرف الميثان (CH_4) ايضاً باسم غاز المستنقعات اذا ما وجد عند السطح او غاز النار اذا مـا عـثـر عليـه في منجم فـحم ، وتوصف الاثار الضـئيلة من الميـثان باسم غـاز السجيل Shale Gas او غاز الخلفية او القياس Background Gas أثناء حفر جميع الابار باستثناء الابار الجافة جدا والميثان غاز عديم اللون ، ملتهب ينتج (مع موائع أخرى) من التـقطيـر الاتلافي Destructive distillation للفحم. ولذلك ، فلقد استـعـمل للأغراض المنزلية في اوروبا حتى تم ابداله بالغـاز الطبيعي ، الذي يتكون في حد ذاته الى حد كبير من الميثان. والميثان أول عضو في سلسلة البرافينات ، وهو غير قـابل للتفاعل من الناحية الكيميائية ، يذوب قليلا في الماء وهو أخف من الهواء (كثافته النسبية ٠,٥٥٤).ومن

المعروف ان الميثان يتواجد كناتج من تحلل المادة العضوية من قبل البكتيريا عند ظروف الضغط ودرجات الحرارة الاعتياديين. ان هذا الميثان الاحيائي Biogenic يمثل مصدرا محتملا للطاقة. وفي القرن التاسع عشر ، ناقش بعض الفكتوريين المبرزين امكانية اضاءة شوارع لندن بالميثان المستخرج من مجاري التصريف Sewers. ويستخرج رواد الزراعة ايامنا هذه قدرا كبيرا من الطاقة الحرارية التي يحتاجونها لحقولهم من خلال تجميع الغاز المتحرر من نضوج الغائط الحيواني.

الاسم	الرمز	الوزن الجزيئي	نقطة الغليان عند الضغط الجوي	اللوبانية ماء g/10⁶g
الميثان	CH_4	16.04	−162	24.4
الايثان	C_2H_6	30.07	−89	60.4
البروبان	C_3H_8	44.09	−42	62.4
الايزوبيوتان	C_4H_{10}	58.12	−12	48.9
بيوتان–ن	C_4H_{10}	58.12	−1	61.4
أيزوبنتان	C_5H_{12}	72.15	30	47.8
بنتان–ن	C_5H_{12}	72.15	36	38.5
هكسان–ن	C_6H_{14}	86.17	69	9.5

الجدول ٢–٢: معطيات هامة عن سلسلة البرافين.

يتكون الميثان الاحيائي عادة في البيئات تحت السطحية الضحلة بتحلل الترسبات الغنية بالمادة العضوية من قبل البكتريا. ولكن بازدياد عمق الدفن ودرجات الحرارة ، فان هذه العملية تتضاءل تدريجيا ويتوقف فعل البكتيريا. ويتم انتاج الميثان الذي يعثر عليه في المكامن العميقة بالنضوج الحراري للمادة العضوية. وستناقش هذه العملية بالتفصيل لاحقا (صفحة ٢٣٢).

تضم الهايدروكاربونات الرئيسية الأخرى التي توجد في الغاز الطبيعي كلا من الايثان والبروبان والبيوتان وفي بعض الاحيان البنتان. وتظهر صيغها الكيميائية وبناها

الجزيئية في الشكل (٢-١). كما ان تواجدها في مكامن الغاز المختلفة موضح في الجدول (٢-٣).وعلى النقيض من الميثان فان هؤلاء الأعضاء الثقلاء من سلسلة البرافين لا يتكونون احيائيا ، بل انهم ينتجون من خلال النضوج الحراري للمادة العضوية حسب ، فاذا ما تم تسجيل وجودها من قبل مكشاف الغاز gas detector أثناء حفر البئر ، فان ذلك غالبا ما يدلل على الاقتراب من مكمن هايدروكاربوني مهم او صخرة مصدرية.

الغازات اللاهايدروكاربونية Nonhydrocarbon Gases

الغازات الخاملة Inert Gases

يعد الهيليوم من المعادن الاضافية الثانوية الشائعة في العديد من الغازات الطبيعية ، كما وجدت ايضا اثار Traces من الارغون Argon والرادون Radon في المقاطع تحت السطحية ، وباستثناء الهيليوم ، فانه ليس لأي من هذه الغازات أهمية اقتصادية.

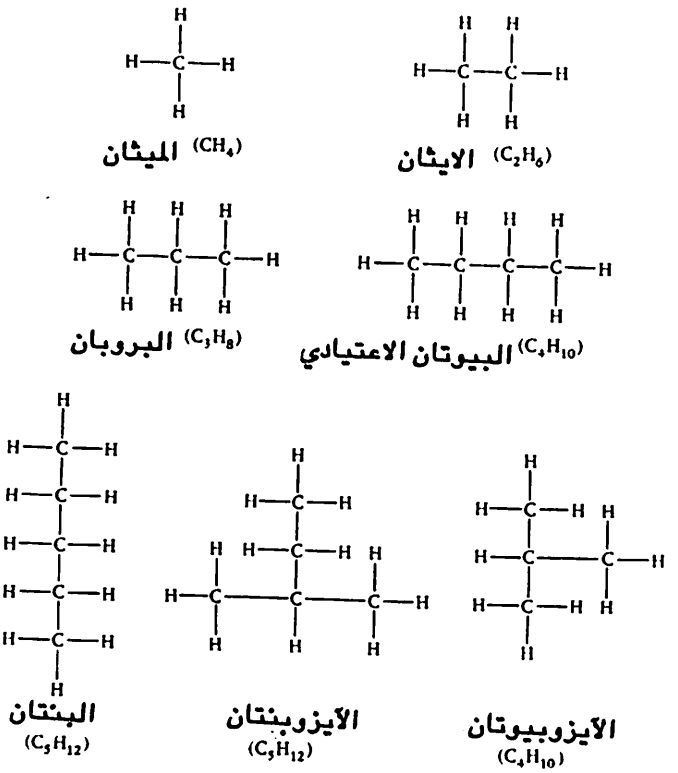
يوجد الهيليوم في الجو بمعدل ٥ أجزاء بالمليون ، كما يسجل وجوده في المناجم والينابيع الحارة والمنافث او الداخنات البركانية Fumaroles. وعثر عليه ايضا في غازات الحقول النفطية بمقادير تصل الى ٨ بالمئة (Dobben, 19) . وفي امريكا الشمالية ، فان الغازات الطبيعية الغنية بالهيليوم توجد في منطقة (فوركورنرز Four Corners) ، وفي تكساس بانهاندل Texas Panhandle في الولايات المتحدة الامريكية والبرتا وساسكاتشوان Saskatchewan في كندا (Lee, 1963, Hitchon, 1963) . وفي كندا توجد التركيزات الرئيسية على امتداد مناطق الشد القشري Crustal Tension مثل(بيس ريفر Peace River) و (سويتوتر اركس Sweatwater Arches) ومقتربات جبال الروكي. ومن المناطق الأخرى التي تحتوي على غازات طبيعية غنية بالهيليوم هي بولندا والالزاس وكوينزلاند في استراليا.

ومن المعروف ان الهيليوم ينتج من تحلل العناصر المشعة المختلفة ، وبشكل رئيسي

الحقل والمنطقة	التركيب: Methane	الإيثان	البروبان	البيوتان	البنتان	CO_2	N	H_2S	He	المصدر
Southern N. Sea basin										
Groningen	81.3	2.9	0.4	0.1	0.1	0.9	14.3	Tr[a]	Tr	Cooper (1977) (1975)
Hewett	83.2	5.3	2.1	0.4	0.5	0.1	8.4	Tr	Tr	Cumming and Wyndham (1975)
West Sole	94.4	3.1	0.5	0.2	0.2	0.5	1.1			Butler (1975)
Algeria										
Hassi-R'Mel	83.5	7.0	2.0	0.8	0.4	0.2	6.1			Cooper (1977)
France										
Lacq	69.3	3.1	1.1	0.6	0.7	9.6	0.4	15.2		Cooper (1977)
Canada										
Turner Valley	92.6	4.1	2.5	0.7	0.13					Slipper (1935)
U.S.A.										
Panhandle	91.3	3.2	1.7	0.9	0.56	0.1			0.5	Cotner and Crum (1935)
Hugoton	74.3	5.8	3.5	1.5	0.6				Av.[b]	Keplinger et al. (1949)
Trinidad										
Barrackpore	95.65	2.25	1.55	0.80	0.25					Suter (1952)
Venezuela										
La Concepcion	70.9	8.2	8.2	6.2	3.7	2.8				Anon (1948)
Cumarebo	63.89	9.49	14.41	8.8	5.4					Payne (1951)
New Zealand										
Kapuni	46.2	5.2	2.0	0.6	44.9	1.0				Cooper (1975)
Russia										
Baku	88.0	2.26	0.7	0.5	6.5					Shimkin (1950)
Abu Dhabi										
Zakum	76.0	11.4	5.4	2.2	1.3	2.3	1.1	0.3		Cooper (1975)
Iran										
Agha Jari	66.0	14.0	10.5	5.0	2.0	1.5	1.0			Cooper (1975)

[a] Tr = trace
[b] Av. = average

الجدول ٢-٣: التركيب الكيميائي لحقول غازية مختلفة.



الشكل ٢-١: التركيب الجزيئي للغازات الهايدروكاربونية الأكثر شيوعاً.

اليورانيوم والثوريوم والراديوم. وان معدلات انتاج الهيليوم من هذه العناصر موضحة في الجدول (٢-٤). ولقد حسب Rogers (1921) ان هنالك ما بين ٢٨٢ الى ١,٠٦ مليار قدم مكعب من الهيليوم تتولد سنويا . واعتمادا على هذه المعطيات ، يُعتقد على نطاق واسع ان الهيليوم الموجود في الغاز الطبيعي ينبعث من صخور القاعدة العميقة وخصوصا الغرانيت. ورغم ان معدل الانتاج بطيء وثابت ، فان خروج الغاز الى غطاء الترسبات العلوي قد يحدث بسرعة عندما تتعرض القاعدة الى فعالية حرارية او التكسر بتأثير التقوس القشري Crustal Arching.

المادة المشعة	أنتاج الهيليوم g/(year)(mm³)
اليورانيوم	2.75×10^{-9}
اليورانيوم في توازن مع منتجاته	11.0×10^{-9}
الثوريوم في توازن مع منتجاته	3.1×10^{-9}
الراديوم في توازن مع الانبعاث الراديوم آ والراديوم سي	158

(عن Levorsen, ١٩٦٧ ينشر بموافقة)

الجدول ٢-٤: معدلات انتاج الهيليوم من العناصر المشعة المختلفة.

من الناحية المثالية قد يكون مفيدا البرهنة على وجود مضاهاة بين الغازات الطبيعية الغنية بالهيليوم وصخور القاعدة المشعة ، وبشكل عام يصعب تأسيس هذه المضاهاة لأن الهيليوم يميل الى التواجد في الابار العميقة بدلا من الضحلة، ومن النادر ان تكون هنالك معلومات من الابار بما يكفي لرسم خارطة لجيولوجية القاعدة.

يقع المصدر الرئيسي للهيليوم في الولايات المتحدة الأمريكية في حقل (بانهاندل هوغوتون Panhandle Hugoton) في تكساس ويحتوي هذا الحقل موقعيا على نحو ١,٨٦ بالمئة من الهيليوم ، وثمة محطة استخلاص تعمل منذ عام ١٩٢٩ (Pippin, 1970). ان من المهم ان نلاحظ ان هذا الحقل ينتج الهيليوم من الترسبات التي يتضاءل سمكها Pinch out على كتلة متفلقة غرانيتية رئيسية Major granitic fault block.

يتحرر الهيليوم ايضا من تحطم أجسام خامات اليورانيوم ضمن التتابعات الرسوبية ، كما هو الحال في (كاسلغيت Castlegate) في يوتا الوسطى Central Utah . وفضلا عن الهيليوم تم العثور على اثار من غازات خاملة اخرى في المقاطع تحت السطحية. ويوجد الارغون Argon في حقل (بانهاندل هوغوتون) مثلما يوجد الرادون Radon ، وكذلك في اليابان. والارغون والرادون ناتجان من التحلل الاشعاعي للبوتاسيوم والراديوم على التوالي ، ويعتقد ان لهما أصلا شبيها بذلك الذي للهيليوم.

النتروجين *Nitrogen*

النتروجين غاز لاهايدروكاربوني اخر يوجد بين الحين والاخر على نحو طبيعي في قشرة الأرض ، ويرتبط عادة مع كل من الغازات الخاملة التي تناولناها على التوومع الهايدروكاربونات. ويوجد النتروجين في امريكا الشمالية في نطاق يمتد من نيومكسيكو الى البرتا الى ساسكاتشوان ، وان حقل (رتل سنيك Rattlesnake) الغازي في نيومكسيكو لهو مثال واضح على ذلك (Hinson, 1947) وله التركيب التالي :

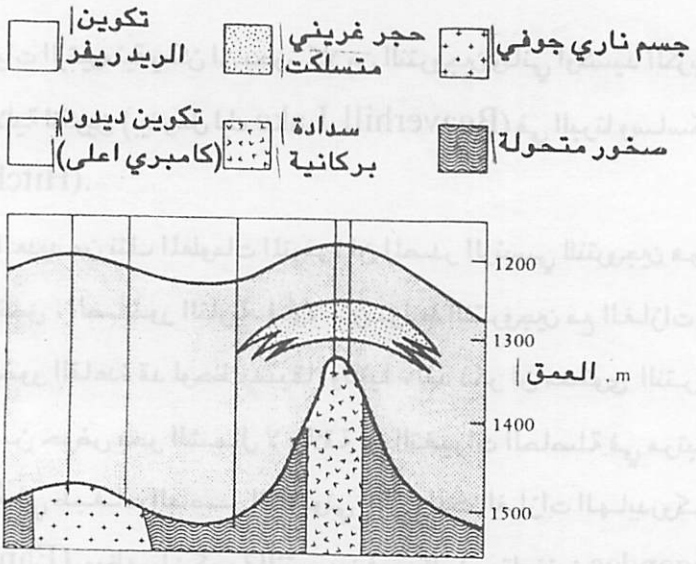
النتروجين	٪٧٢,٦
الميثان	٪١٤,٢
الهيليوم	٪٧.٦
الايثان	٪٢.٨
ثاني اوكسيد الكربون	٪٢.٨
المجموع	٪١٠٠

لاحظ ترابط النتروجين مع الهيليوم. كما ان النتروجين كذلك مكون أساسي لغازات روتليغند Rotliegende في جنوب حوض بحر الشمال. وتظهر التقديرات المنشورة مديات تتراوح بين ١-١٤ بالمئة في حقلي (وست سول West Sole). و (غروننغن Groninge) على التوالي ، (Butler, 1975, Stauble and Milius, 1970) . ولقد ذكر ان الابار المنفردة في القطاع البحري Offshore Sector الالماني قد صادفت كميات أكبر.

ان أصل النتروجين أقل مباشرة من الغازات الخاملة ، اذ سجل وجود النتروجين من الانبعاثات البركانية ، ولكن بعض الدراسات اقترحت انه ربما يتكون عضويا ، على سبيل المثال من تحلل النترات بواسطة البكتيريا الى امونيا. ورغم ان هذا ممكن من الناحية الكيميائية ، الا ان من المحتمل ان ينتج هذا النتروجين الاحيائي في الظروف الضحلة فقط ، بينما يوجد في الطبيعة في المكامن الهايدروكاربونية العميقة. كما أقترح ان التحول

الحراري للجيريات البتيومنية يمكن ان يحرر كلا من النتروجين وثاني اوكسيد الكربون. ولقد اقترحت هذه الالية لتكوين (بيفرهل ليك Beaverhill Lake) في البرتا وساسكاتشوان (Hitchon, 1963).

تقترح العديد من نتف المعلومات المتوفرة ان المصدر الرئيسي للنتروجين هو القاعدة او على نحو أخص ، الصخور النارية. فأولا ، ان ترابط النتروجين مع الغازات الخاملة الناتجة من صخور القاعدة قد لوحظ مسبقا. وثانيا ، لقد ذكر ان محتوى النتروجين في الجزء الجنوبي من حوض بحر الشمال لا علاقة له بالتغيرات الحاصلة في مرتبة الفحم Coal rank في طبقات العصر الكاربوني التي ولدت الغازات الهايدروكاربونية (Eames, 1975). ويظهر ان كمية النتروجين في مكامن روتليغندز Rotliegendes تزداد صوب الشرق عبر الحوض باتجاه زيادة الاقتحامات النارية Igneous intrusives. ولقد وصفت حالة هامة أخرى من جنوب غرب ساسكاتشوان من قبل (Burwash and (Cumming, 1974). ويحتوي الغاز الطبيعي الذي انتج من فتاتيات حقبة الحياة القديمة القاعدية على نحو ٩٧ بالمئة من النتروجين و ٢ بالمئة من الهيليوم و ١ بالمئة من ثاني اوكسيد الكربون. ولم يتم العثور على اية هايدروكابونات مصاحبة ، وتتواضع التراكمات على سدادة بركانية عمودية Upstanding volcanic plug ، في قاعدة متحولة (الشكل ٢-٢) ، فاذا ما أخذت في مجملها ، فان الأدلة المختلفة هذه تقترح ان النتروجين في الغازات الطبيعية ذو أصل احيائي على نحو غالب ، رغم ان العمليات العضوية قد تكون مولدات هامة للنتروجين الجوي والضحل. والأكثر من ذلك ، ان بعض النتروجين الجوي ربما يكون قد اصطيد في الترسبات أثناء الترسيب متواجدا الان كغاز حبيس Connate gas.



الشكل ٢-٣: عينات من هايدرات غازية مصمتة تم الحصول عليها من مشروع الحفر البحر: العميق باذن من (Drs. R. Von Huene and J. Aubouin ومشروع الحفر البحري العميق ومؤسسة Scripps لعلم المحيطات).

الهيدروجين *Hydrogen*

نادرا ما يوجد غاز الهيدروجين الحر في الطبقات تحت السطحية ، ويعزى ذلك من جانب الى قدرته على التفاعل وحركته من جانب آخر. ومع ذلك فثمة حالة او اثنتان معروفتان ، اذ تم اكتشاف أكثر من ١,٣٦ ترليون قدم مكعب من غاز الهيدروجين في صخور المسيسبي في حوض فورست ستي Forest City بكنساس. ولقد أظهرت التحليلات التي أجريت على الغاز المكتشف انه يتكون من ٤٠ بالمئة من الهيدروجين و٦٠ بالمئة من النتروجين مع اثار من ثاني أوكسيد الكربون والأرغون والميثان (Anon, 1984).

يذوب الهيدروجين عادة في المياه تحت السطحية كبقايا ، ولكنه نادرا ما تم العثور عليه من خلال التحليلات التقليدية (Hunt, 1979). وربما يتم انتاج الهيدروجين تحت السطحي بواسطة النضوج الحراري للمادة العضوية.

ثاني اوكسيد الكربون *Carbone Dioxide*

غالبا ما يوجد ثاني اوكسيد الكربون (CO_2) كغاز اضافي ثانوي في الغازات الطبيعية الهايدروكاربونية. كما انه يرتبط ايضا مع النتروجين والهيليوم كما أظهرت المعطيات التي قدمناها من قبل. ان تراكمات الغاز الطبيعي التي يكون فيها ثاني اوكسيد الكربون المكون الرئيسي شائعة في مناطق الفعاليات البركانية الشديدة مثل صقلية واليابان ونيوزلندا وسلسلة كورديليرا في امريكا الشمالية من الاسكا وحتى المكسيك . ويدرج (Levorsen, 1967) امثلة محددة من تكوين (تن سليب Tensleep) الرملي (البنسلفاني) في حقل (فيرتز دوم Wertz Dome) بولاية يومنغ الامريكية :

ثاني اوكسيد الكربون	٤٢٪
الهايدروكاربونات	٥٢.٨٪
النتروجين	٤.٠٩٪
كبريتيد الهيدروجين	١.١١٪
	١٠٠٪

كما يذكر Levorsen ايضا ابارا في (نيومكسيكو) قادرة على انتاج ما يبلغ ٢٦ مليون قدم مكعب في اليوم من ثاني اوكسيد الكربون الذي تبلغ نقاوته ٩٩ بالمئة.

ودون شك فأن كلا من العمليات اللاعضوية والعضوية يمكن ان تولد مقادير هامة من ثاني اوكسيد الكربون في القشرة الأرضية. ويسجل ثاني اوكسيد الكربون عادة في الغازات الطبيعية المرتبطة مع الانبعاثات البركانية والزلازل (Sugisaki et al., 1983) ، كما انه قد يتحرر ايضا حيث تقوم الطفوح البركانية بتحويل الترسبات الجيرية. ويمكن ان تولد الصخور الجيرية والدولوميتية ذات المسامية العالية غاز ثاني اوكسيد الكربون عندما تحتل

وتغسل بالمياه الحامضية ذات الأصل الجوي والحبيس. ومثلما سنرى في الفصل الخامس (صفحة ١٩٠) ، فان غاز ثاني اوكسيد الكربون هو ناتج طبيعي من النضوج الحراري للكيروجين ، ويطرد في العادة قبل تحرر البترول.

كما يتحرر غاز ثاني اوكسيد الكربون أثناء تخمر المادة العضوية (انظر صفحة ١٨٦) ، ومن أكسدة المادة العضوية الناضجة اما بسبب الاحتلال من قبل الموانع او التفسخ المتسبب من البكتيريا . وعلى نحو محدد ، فان الميثان بوجود الماء المؤكسجن قد يولد غاز ثاني اوكسيد الكربون والماء.

$$3CH_4+6O_2=3CO_2+6H_2O$$

ان قدرا كبيرا من ثاني اوكسيد الكربون سوف يبقى مذابا كحامض الكربونيك . وبذلك فان أصلا متعددا لثاني اوكسيد الكربون يبدو محتملا جدا.

كان ثاني اوكسيد الكربون في الماضي ذا قيمة اقتصادية محدودة حسب ، اذ كان يستعمل بشكل رئيسي في الثلج الجاف . ولقد ادت تطبيقاته الحديثة في انتاج البترول المدعم Enhanced oil recoveryالى زيادة فوائده (Taylor, 1983).

كبريتيد الهيدروجين *Hydrogen Sulfide*

يتواجد غاز كبريتيد الهيدروجين (H_2S) تحت سطح الأرض كغاز حر ، وبسبب ذوبانيته العالية ، فانه يتواجد ايضا مذابا مع النفط والمياه المالحة. وهو غاز سام ، ذو رائحة كريهة يؤدي وجوده عادة الى مشاكل عملياتية في حقل الغاز والنفط. وهو يؤدي الى تاكل الفولاذ ، فيهاجم بسرعة أنابيب الانتاج والصمامات وخطوط الانسياب. ويطلق على كل من الغاز والنفط الذي يحتوي على اثار هامة من كبريتيد الهيدروجين اسم حامض Sour على النقيض من مصطلح "حلوSweet" الذي يطلق على النفط او الغاز الخالي من كبريتيد الهيدروجين. ان وجود كميات قليلة من كبريتيد الهيدروجين في النفط او الغاز لهو مضر من

الناحية الاقتصادية ذلك لانه يجب نصب محطة تنقية للتخلص منه ، وذلك منعا للتآكل ولجعل الغاز المتبقي مناسبا للاستهلاك المنزلي. ان وجود احتياطي هائل من الغاز الحامض يمكن ان يتحول الى منفعة لانه يمكن ان يعالج باعتباره مصدرا للكبريت الحر.

ولقد انتج تحليل واحد لعينة من غاز غني بكبريتيد الهيدروجين من اموري Emory في تكساس التركيب الكيميائي التالي (Anon, 1951):

كبريتيد الهيدروجين	٪٤٢.٤٠
هايدروكاربونات	٪٥٣.١٠
ثاني اوكسيد الكربون	٪٤.٥٠
	٪١٠٠.٠٠

يتحرر غاز كبريتيد الهيدروجين عادة مع ثاني اوكسيد الكبريت من الانبعاثات البركانية. كما انه ينتج ايضا داخل الترسبات الحديثة في البيئات المختزلة Euxinic مثل البحر الميت والبحر الأسود. وتتم هذه العملية من قبل البكتيريا المختزلة للكبريت التي تؤثر على الكبريتات الفلزية ، والحديد بشكل خاص ، وذلك وفق المعادلة التالية:-

$$2C+MeSO4+H2O \rightarrow MeCO3+CO2+H2S$$

حيث تمثل Me = الفلز Metal.

لاحظ ان الغاز الحامض يوجد بصورة عامة في المقاطعات الهايدروكاربونية حيث تتواجد كميات كبيرة من التبخريات. ومن الأمثلة الواضحة على ذلك حوض الديفوني في البرتا وحوض بارادوكس في كولورادو ، جنوب غرب المكسيك ، وأجزاء واسعة من الشرق الأوسط.

ان الانهايدرايت يمكن ان يتحول الى الكالسايت بوجود المادة العضوية ، ويؤدي التفاعل الى توليد كبريتيد الهيدروجين استنادا الى المعادلة التالية :-

$$CaSO4+2CH2O=CaCO3+H2O+CO2+H2S$$

حيث ان CH_20 = هي المادة العضوية.

ثمة نقطة أخرى تثير الاهتمام تتعلق بالغاز الحامض ، فهو لا يرتبط بالتبخريات حسب بل انه غالبا ما يرتبط مع الجيريات (الكاربونات) ، وبشكل عام الشعابية Reefal منها وأجسام الخام المتكونة من كبريتيد الرصاص والخارصين (التوتياء) . ولقد اقترحت علاقة تكوينية Genetic بين هذه الخامات الحرمائية الضحلة Telethermal والتبخريات (Davidson, 1965).

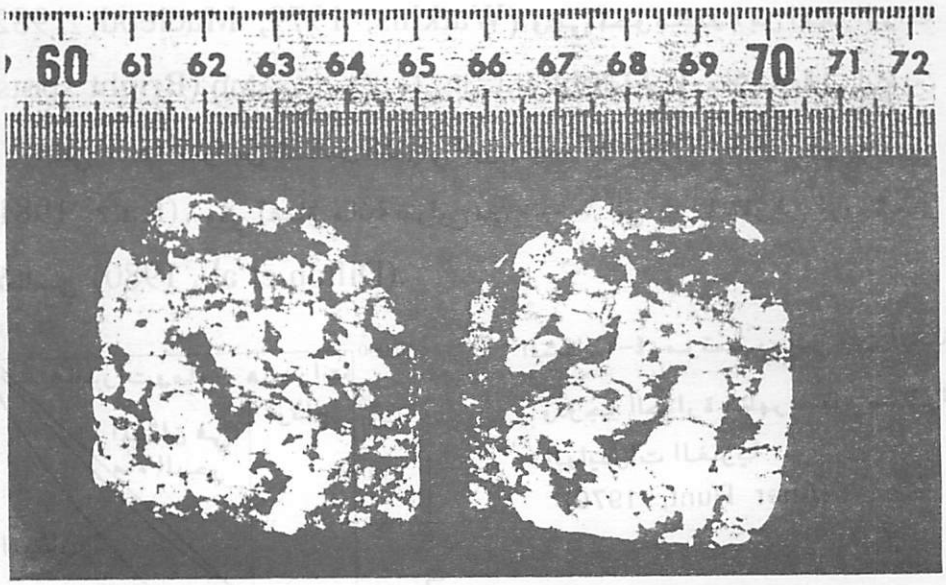
ولقد أظهر (Dunsmore, 1973) ان اختزال الانهايدرايت الى كالسايت والى غاز حامض يمكن ان يحدث لاعضويا دون تدخل من البكتيريا . ويكون التفاعل من النوع المصدر للحرارة Exothermic ، الذي قد يحرر درجات الحرارة اللازمة لتحريك الكبريتدات الفلزية.

هايدرات الغاز Gas Hydrates

التركيب الكيميائي والتواجد *Composition and Occurrence*

تتكون هايدرات الغاز من الماء المتجمد الذي يحتوي على جزيئات الغاز. ويطلق على جزيئات الثلج نفسها اسم الكلاثرات Clathrates ومن الناحية الفيزيائية ، تبدو شبيهة بذرور الثلج الأبيض (الشكل ٢-٣) ، ولها نوعان من بنى الوحدات Unit structure. وتحتوي البنية الصغيرة على ثماني جزيئات من الميثان كحد أقصى ضمن ثماني وأربعين جزيئة ماء. ولا تحتوي هذه الكلاثرات على الميثان حسب ، بل كذلك الايثان وثاني كبريتيد الهيدروجين وثاني اوكسيد الكربون. وتتكون الكلاثرات الكبيرة من خلايا وحدات تحتوي على

١٣٦ جزيئة ماء. ان هذه الكلاثرات يمكن ان تستوعب جزيئات الهايدروكاربونات الكبيرة من البنتان والبيوتان-ن.

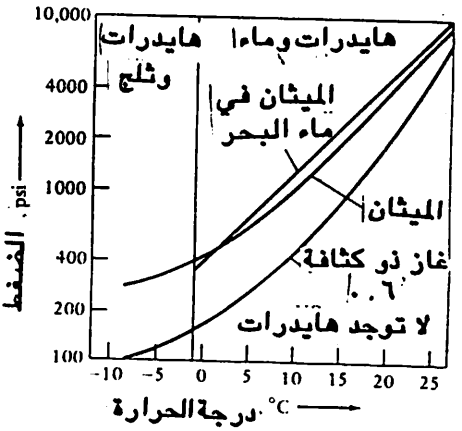


الشكل ٢-٣: عينات من هايدرات غازية مصمتة تم الحصول عليها من مشروع الحفر البحر؛ العميق باذن من Drs. R. Von Huene and J. Aubouin ومشروع الحفر البحري العميز ومؤسسة Scripps لعلم المحيطات).

تتواجد الهايدرات فقط في ظروف ضغط وحرارة معينين. ويظهر الشكل (٢-٤) انها مستقرة عند الضغوط العالية ودرجات الحرارة المنخفضة ، وان الضغط المطلوب للاستقرار يزداد لوغارتميا لمال خطي حراري. وتوجد الهايدرات الغازية في الترسبات القطبية الضحلة والترسبات المحيطية العميقة. ولقد وصفت هايدرات الغاز من الترب القطبية دائمة التجمد Permafrost من الاسكا وسيبيريا. وفي الاسكا تتواجد بين نحو ٧٥٠ الى ٣٥٠٠ مترا (Holder et al., 1976) . وفي سيبيريا، حيث يكون المال الحراري اوطأ مستوى فانها تمتد الى نحو ٢١٠٠ مترا (Makogon et al., 1971).

عثر على الهايدرات في الترسبات المحيطية في العديد من المحيطات في أرجاء

مختلفة من العالم. ولقد استخرجت من لباب ابار مشروع الحفر البحري العميق DSDP ، ولقد استنتج وجودها من المعطيات الزلزالية ، (على سبيل المثال Moore and Watkins, 1979, Macleod, 1982). وعلى نحو محدد ، من البقع البراقة (Bright spots) (أنظر ص١٠٩) ، على الخطوط الزلزالية في أعماق مائية تتراوح بين ١٠٠٠ الى ٢٥٠٠ مترا من الساحل الشرقي لنورث ايلند North Island ، في نيوزلندا (Katz, 1981) ، وفي أعماق مائية تتراوح بين ١٠٠٠ الى ٤٠٠٠ متر في غرب شمال الأطلسي (Dillon et al., 1980).



الشكل ٢-٤: مرتسم بياني بين الضغط ودرجة الحرارة تُظهر حقل استقرار الهايدرات الغازية (After Hunt, 1979)

ولقد عزيت هايدرات الغاز بشكل عام الى أصل احيائي Biogenic ضحل (على سبيل المثال Hunt, 1979). واعتمادا على محتواها من نسب نظائر الكربون والهيليوم ، افترض (MacDonald, 1983) ، أصلا لاعضويا للهايدرات في القشرة الأرضية.

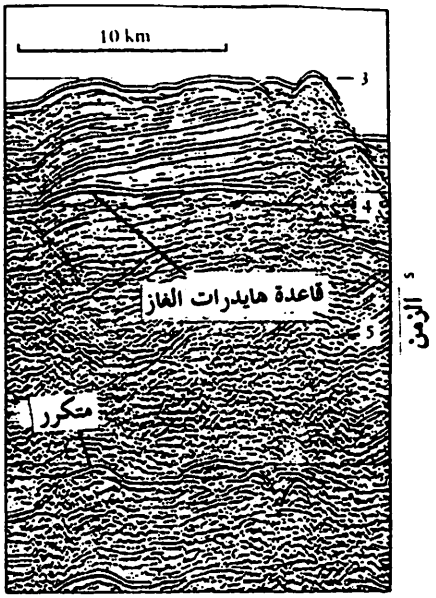
التشخيص والاهمية الاقتصادية

Identification and Economic Significance

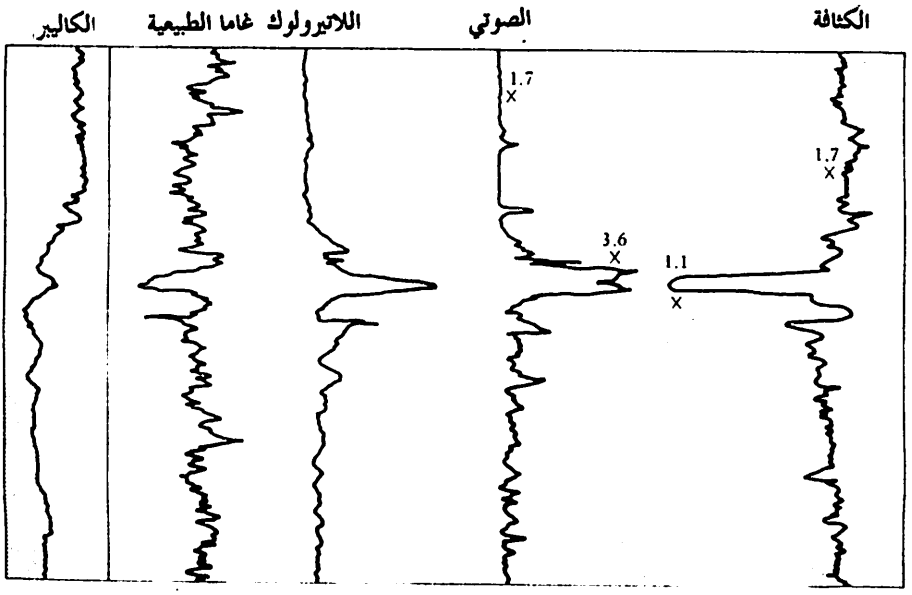
مثلما لاحظنا قبل قليل ، يمكن الشك بوجود هايدرات الغاز ولكن لا يمكن البرهنة على وجودها من المعطيات الزلزالية. وغالبا ما تتطابق النهاية السفلى لتواجد الترسبات

المسمتة بالهايدرات مع قياس أعماق البحار ، ذلك لان الفرق في السرعة بين الترسبات المسمتة بالهيدرات والترسبات التحتية غير المسمتة ، يكون مرتفعا الى حد توليد نطاق عاكس يمكن تشخيصه. وقد يظهر العاكس المشابه للقاع على شكل بقعة براقة Bright spot (أنظر ص١٠٩) تقطع العواكس التي تمثل سطوح التطبق. ويجب ممارسة الحذر في التمييز بين عواكس قيعان هايدرات الغاز من متعددات قاع البحر الاعتيادية Seabed Multiples(الشكل ٢-٥). ومن المعتاد ان تزداد عواكس الهايدرات القاعدية تحت القاع مع زيادة عمق الماء بسبب نقص درجة حرارة الماء فوق قاع البحر. ومع ذلك ، يمكن البرهنة على وجود هايدرات الغاز بالمعطيات الهندسية حسب. اذ يكون معدل اختراق البريمة واطئا عندما يتم حفر الترسبات المسمتة بالكلاثرات. وتوفر براميل اللباب الدليل النهائي ، ذلك لان هايدرات الغاز تظهر هبوطا مميزا في الضغط عندما تجلب خلية الضغط الى السطح وتفتح (Stoll et al., 1971) كما ان هايدرات الغاز تظهر ايضا استجابات جس مميزة معينة (Bily and Dick, 1974) ، فهي تتميز بسرعة صوتية ومقاومية عالية ، مصحوبة مع كثافة واطئة. (الشكل ٢-٦).

ان مساحات واسعة من الترب القطبية دائمة التجمد وقيعان المحيطات تحتوي على احتياطيات هائلة من الغاز الهايدروكاربوني محتجزا في الترسبات الكلاثراتية. وتستطيع الكلاثرات استيعاب ستة أضعاف الغاز الذي يمكن ان يستوعبه النظام المسامي المفتوح الحر المملوء بالغاز. ولسوء الحظ ، تمثل هايدرات الغاز مشكلة انتاجية محسوسة ما تزال بانتظار ان يتم التغلب عليها. وتعزى هذه المشاكل ، جزئيا ، الى نفوذية المكمن الواطئة والى المشاكل الكيميائية المتعلقة بتحرر الغاز من البلورات . ان ترسبات الكلاثرات قد تكون ذات أهمية اقتصادية غير مباشرة ، وذلك بعملها كصخور غطائية . فبسبب نفوذيتها الواطئة ، فانها تكون أغطية تمنع حركة الغاز الحر نحو الأعلى.



الشكل ٢-٥: مقطع زلزالي من سواحل نيوزلندا تظهر بقعة برّاقة التي تفسر على انها تمثل السطح الاسفل لتراكم الهايدرات الغاز (From Katz, 1981، يعاد نشرها بموافقة).



الشكل ٢-٦: مجس بئري لجزء من مشروع الحفر البحري العميق، موقع ٥٧٠، يظهر نطاق هايدرات الغاز. وهو يتميز بمقاومية وسرعة صوتية مرتفعتين واشعاعية وكثافة منخفضتين. تظهر المقاطع السرع والكثافات في الانطقة الحاملة للهايدرات وفي الانطقة الاعتيادية.
(Courtesy of Drs R. von Huene and J. Aubouin and the Deep Sea Drilling Project. Scripps Institute of Oceanography).

النفط الخام Crude Oil

يعرف النفط الخام بانه «خليط من الهايدروكاربونات التي تتواجد في الحالة السائلة في المكامن تحت السطحية الطبيعية وتبقى سائلة عند الضغط الجوي بعد مرورها بامكانات فصل السطح» (تعريف مشترك لكل من معهد النفط الأمريكي واتحاد جيولوجيي البترول الامريكان وجمعية مهندسي البترول). ويتغاير النفط الخام في المظهر من الأصفر القشي الى البني والبني الغامق او الأسود في اللون. والنفط في الطبيعة زيتي النسيج وله قيم لزوجية متغايرة. ويميل النفط الى ان يكون أكثر لزوجة عند السطح من النفط الموجود في المكامن تحت السطحية الساخنة. وتتراوح قيم اللزوجة السطحية من ١,٤ الى ٤٠٠,١٩ سنتيستوك ، وهي لا تتغير مع درجات الحرارة حسب ، بل كذلك مع عمر النفط وعمقه. (انظر ص٤٦).

ان معظم النفوط أخف من الماء. ورغم أن كثافة النفط يمكن ان تقاس باعتبارها الفرق بين وزنه النوعي والوزن النوعي للماء ، فانه غالبا ما يعبر عنه بوحدات الجاذبية التي تم تعريفها من قبل معهد النفط الامريكي وفق المعادلة التالية :-

$$API = \frac{141.5}{\text{الوزن النوعي ٦٠/٦٠ف}} - 131.5$$

حيث تمثل النسبة ٦٠/٦٠ف الوزن النوعي للنفط عند درجة حرارة ٦٠ف مقارنة مع الوزن النوعي للماء عند درجة حرارة ٦٠ف.

لاحظ ان درجات معهد النفط الأمريكي API تتناسب عكسيا مع الكثافة. وبذلك ، فان للنفوط الخفيفة كثافات فوق ٤٠ وحدة (الوزن النوعي ٠,٨٣) ، في حين ان للنفوط الثقيلة كثافات أقل من ١٠ وحدات من وحدات معهد البترول الأمريكي (الوزن النوعي ١). وهكذا تعرف النفوط الثقيلة بانها تلك النفوط التي لها كثافة أعلى من كثافة الماء. وسوف يتم شرح التغاير في كثافة النفط مع العمر والعمق في الصفحة (٤٧٩). وبشكل عام ، فان لزوجة النفط ووحدات معهد البترول الأمريكي للكثافة تتناسب عكسيا مع بعضها الآخر.

كيمياء النفط الخام Chemistry

بمصطلحات الكيمياء الأولية ، يتكون النفط الى حد كبير من الكربون والهايدروجين مع مقادير ثانوية من الأوكسجين والنتروجين والكبريت. كما يحتوي النفط ايضا على اثار من الفناديوم والنيكل وعناصر أخرى. (أنظر الجدول ٢-٥). ورغم ان التركيب العنصري للنفط واضح وبسيط ، فقد يكون هناك عدد هائل من المركبات الجزيئية. فليس ثمة نوعان من النفط متطابقان سواء في المركبات التي يحتويانها او في النسب المختلفة الموجودة. ومع ذلك ، فان ثمة اتجاهات تركيبية معينة ترتبط مع العمر والعمق والمصدر والموقع الجغرافي للنفط. فنفط شركة كونكو بونكا سيتي الخام من ولاية اوكلاهوما ، على سبيل المثال ، يحتوي في الأقل على ٢٣٤ مركبا (Rossini, 1960) ولأغراض الدراسة ، تقسم المركبات الموجودة في النفط الى مجموعتين رئيسيتين :-

(١)- الهايدروكاربونات التي تحتوي على ثلاث مجموعات ثانوية و (٢) المركبات غير المتجانسة Heterocompounds التي تحتوي على العناصر الأخرى. وسوف يتم وصف المكونات المختلفة هذه في الفقرات التالية :-

البرافينات Paraffins

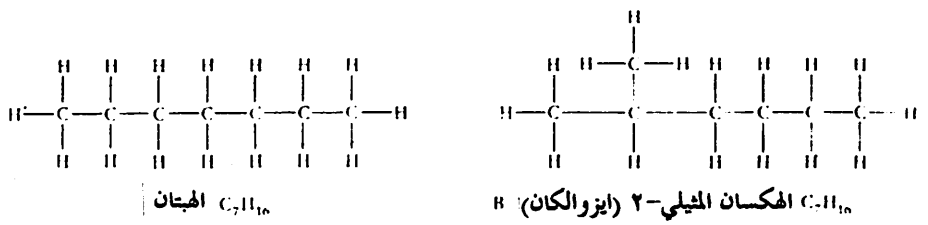
غالبا ما يطلق على البرافينات اسم الالكانات Alkanes، وهي هايدروكاربونات مشبعة ، ذات صيغة عامة هي C_nH_{2n+2} . وللقيم التي تكون فيها n أكبر من ٥ ، تكون البرافينات غازية عند درجات الحرارة والضغوط الاعتيادية . ان هذه المركبات (الميثان والايثان والبروبان والبيوتان) سوف تناقش في الجزء المكرس للغاز الطبيعي (ص١٥). اما بالنسبة لقيم n التي تتراوح من ٥ (البنتان C_5H_{12} الى ١٥ (البنتاديكان ، $C_{15}H_{32}$) فان البرافينات تكون سائلة عند درجات الحرارة والضغط الاعتياديين ، وفي الحالات التي تكون فيها n أكبر من ١٥ فانها تتراوح من الموائع اللزجة الى الشمع الصلب.

الجدول ٢-٥: التركيب العناصري للنفوط الخام بالنسبة المئوية الوزنية.

العنصر	الحد الادنى	الحد الاقصى
الكاربون	82.2	87.1
الهيدروجين	11.8	14.7
الكبريت	0.1	5.5
الاوكسجين	0.1	4.5
النتروجين	0.1	1.5
اخرى	Trace	0.1

(عن Levorsen, ١٩٦٧ ينشر بموافقة).

يوجد نوعان من جزيئات البرافين ضمن السلسلة ، ولكليهما تركيب ذري متشابه (مماكبات Isomers) تزداد في الوزن الجزيئي على امتداد السلسلة باضافة جزيئات CH_2 . وتتكون احدى السلسلتين من جزيئات ذات سلسلة مستقيمة ، في حين تتكون الأخرى من جزيئات ذات سلسلة متفرعة. ان هذه الاختلافات البنيوية موضحة في الشكل (٢-٧).



A البتان C_4H_{10} B الهكسان الميلي-٢ (ايزوالكان) C_6H_{14}

الشكل ٢-٧: البنية الايزومرية لسلسلة البرافين. قد يكون للاركان (أ) بنية من سلسلة اعتيادية أو (ب) أيزومير ذو سلاسل متفرعة.

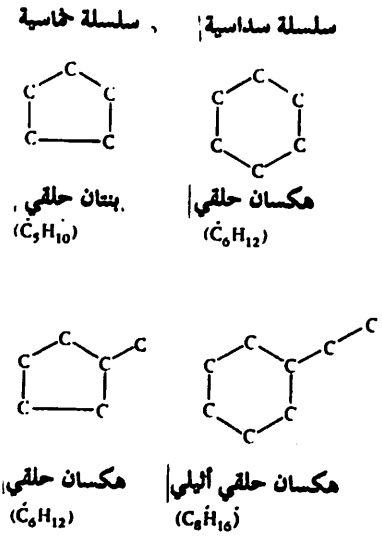
تتواجد البرافينات بشكل غزير في النفط الخام ، وتسود النوعيات المتكونة من السلسلة المستقيمة الاعتيادية على البنى المتكونة من السلسلة المتفرعة. ولقد سجل وجود أعضاء من السلاسل حتى $C_{78}H_{158}$ وبالنسبة لوزن جزيئي معين فان للبرافينات الاعتيادية درجة غليان أعلى من الايزوبرافينات ذات الوزن المكافىء.

تمثل البرافينات المكونات الأساسية للغازات الهايدروكاربونية . كما انها مهمة كميا

في الغازولين الخفيف ونفوط الكيروسين ، مكونة نحو ٣٠ الى ٢٥ بالمائة من النفط ، على التوالي . وبزيادة نقطة الغليان ، فان الجزء البرافيني من النفط يبدأ بالتناقص التدريجي.

النافثينات *Naphthenes*

تعد النافثينات المجموعة الثانية في الأهمية من الهايدروكاربونات الموجودة في النفط الخام ، وتسمى ايضا بالالكانات الحلقية Cycloalknes . ولهذه المجموعة صيغة عامة هي C_nH_{2n} . وشانها شان البرافينات ، فانها تتواجد في سلسلة متجانسة تتكون من حلقات ذات خمس او ست جزيئات كاربون يطلق عليها اسم البنتانات الحلقية Cyclopentanes والهكسانات الحلقية Cyclohexanes ، على التوالي (الشكل ٢-٨). وعلى النقيض من البرافينات ، تكون كل النافثينات سائلة عند درجة الحرارة والضغط الاعتيادية. وهي تشكل نحو ٤٠ بالمائة من كلا من النفط الخام الخفيف والثقيل.



الشكل ٢-٨: أمثلة على البنى الجزيئية للنافثينات الخماسية والسداسية (الكانات حلقية). وللملائمة فانه تم حذف ذرات الهايدروكاربونات المرافقة.

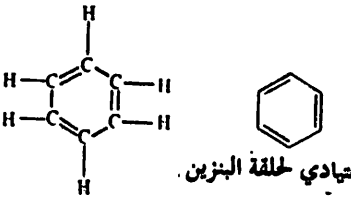
الاروماتات (العطريات) *Aromatics*

ان المركبات الاروماتية هي المجموعة الهايدروكاربونية الثالثة من حيث الأهمية التي توجد عادة في النفط الخام ، وتعتمد بنيتها الجزيئية على حلقة من ست ذرات من الكربون. وأبسط أعضاء العائلة هو البنزين (C_6H_6) الذي تظهر بنيته في الشكل (٢-٩). وتتكون سلسلة رئيسية من المركبات الاروماتية بتعويض ذرات الهيدروجين بجزيئات الالكانات (C_nH_{2n+2}) ، وتضم سلسلة البنزين الالكيلي Alkyl Benzene البنزين الاثيلي Ethyl Benzine (C_6H_5, C_2H_5) والتولوين Toluene ($C_6H_5CH_3$) . وتتكون سلسلة أخرى من حلقات كربون ذات سلاسل مستقيمة او متفرعة. وتضم هذه السلسلة النافثلين Naphthalene ($C_{10}H_8$) والانثراسين Anthracene ($C_{14}H_{10}$). وتضم الهايدروكاربونات الاروماتية المركبات الاسفلتية . وتقسم هذه المركبات الى الاصماغ Resins التي تذوب في البنتان -n Pentane والاسفلتينات Asphaltenes التي لا تذوب.

تكون الهايدروكاربونات الاروماتية سائلة عند درجات الحرارة والضغط الاعتيادية (درجة غليان البنزين هي ٨٠.٥ درجة مئوية) . وهي موجودة بمقادير ثانوية نسبيا (نحو ١٠ بالمائة) في النفوط الخفيفة ، بيد انها تزداد في الكمية مع نقصان كثافة API الى أكثر من ٣٠ بالمئة في النفوط الثقيلة. ويعد التولوين ($C_6H_5CH_3$) أكثر المكونات الاروماتية وجودا في النفط الخام ، يليه الزايلين Xylenes ($C_6H_4(CH_3)_2$) والبنزين.

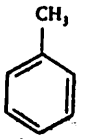
المركبات غير المتجانسة *Heterocompounds*

يحتوي البترول الخام على العديد من المركبات غير المتجانسة المختلفة التي تحتوي على عناصر أخرى غير الهيدروجين والكربون. وتضم المركبات الرئيسية الأوكسجين والنتروجين والكبريت مع الذرات الفلزية النادرة التي تضم في العادة النيكل والفناديوم.

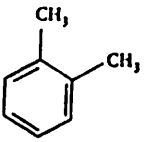


التمثيل الاعتيادي لحلقة البنزين.

البنزين (C_6H_6)



التولوين ($C_6H_5CH_3$)



البنزين المثيلي الثنائي
(واحد من ثلاثة أيزوميرات للزايلين)

الشكل ٢-٩: البنية الجزيئية للهايدروكاربونات الاروماتية شائعة الوجود في النفط الخام.

تتراوح مركبات الأوكسجين بين ٠,٠٦-٠,٤ بالمائة من وزن أغلب النفوط الخام. وهي تضم الأحماض والاسترات Esters والكيتونات Ketones والفينولات Phenols والكحول Alcohols . وتكون الأحماض شائعة الوجود عادة في النفوط الحديثة غير الناضجة وتضم الأحماض الدهنية Fatty acids والايزوبرينويدات Isoprenoids والأحماض النافثينية Naphthenic والكاربوكسيلية Carboxylic . ان وجود الستيرينات Steranes في بعض النفوط الخام لهو دليل مؤثر مهم على أصلها العضوي. وتتراوح مركبات النتروجين بين ٠,٠١ و٠,٩ بالمئة من وزن أغلب النفوط الخام. وهي تضم الاميدات Amides والبريميدات Pyridines والانـدولات Indoles والبايرولات Pyroles.

تتراوح مركبات الكبريت بين ١,٠ و٧ بالمئة في النفط الخام. ويمثل هذا الرقم جزيئات كربون أصلية حاملة للكبريت ، وهو بذلك لا يشمل غاز كبريتيد الهيدروجين (H_2S) والكبريت الحر. ويوجد الكبريت على هيئة عنصر في النفوط الضحلة الحديثة (فوق درجة حرارة ١٠٠ مئوية يتحد الكبريت مع الهيدروجين لتكوين غاز كبريتيد الهيدروجين) وتوجد خمس سلاسل رئيسية حاملة للكبريت في النفط الخام وهي الثيولات الالكانية Alkane thiols (المركبتانات Mercaptans) والالكانات الثيوية Thio alkanes (الكبريتيدات Sulfides) والالكانات الحلقية الثيوية Thio cycloalkanes والالكانات الثيوية الثنائية Dithio alkanes والكبريتيدات الحلقية Cyclic sulfides.

ولقد وجدت اثار لعناصر عديدة أخرى في النفوط الخام ، ولكن تحديد فيما اذا كانت تتواجد في هيئة مركبات عضوية أصلية او انها ملوثات من الصخرة المكمنية او مياه التكوينات او معدات الانتاج لهو امر في غاية الصعوبة. ولقد أدرج (Hobson and Tiratsoo, 1975) العديد من هذه العناصر الاثارية. وتضم قوائمهما المعادن المكونة للصخور الشائعة مثل السليكون والكالسيوم والمغنيسيوم مع العديد من الفلزات مثل الحديد والالمنيوم والنحاس والرصاص والقصدير والذهب والفضة. ويكتسب التواجد شبه الدائم للنيكل والفناديوم أهمية خاصة. وعلى نقيض العديد من الفلزات الأخرى ، يمكن البرهنة على ان النيكل والكادميوم يوجدان لا كمواد ملوثة بل كمركبات عضوية فلزية Organometallic في هيئة جزيئات بورفرين Porphyrin عادة.

وتحتوي البورفرينات على الكربون والنتروجين والاوكسجين فضلا عن جذور الفلزات Radical . ويكتسب وجود البورفرينات في النفط الخام أهمية نوعية خاصة لأنها ربما تكون قد اشتقت من يخضور النباتات Chlorophyll ويحمور الدم Hemoglobin . وتظهر المعطيات التي جمعها (Tissot and Welte 1978) ان معدل محتوى الفناديوم والنيكل في ٦٤ عينة من النفط الخام تبلغ ٦٣ و١٨ جزء بالمليون على التوالي . والقيمة

القصوى هي ١٢٠٠ جزء بالمليون من الفناديوم و ١٥٠ جزء بالمليون من النيكل في خام بوسكان في فنزويلا.

تميل الفلزات الى الارتباط مع الصمغ والكبريت في والأجزاء الاسفلتيه في النفط الخام. والفلزات نادرة الوجود في النفوط القديمة البحرية العميقة ، وهي غزيرة نسبيا في الخامات الضحلة والحديثة او المتحللة Degraded . ويظهر الشكل (٢-١٠) غزارة المركبات المختلفة المتواجدة في النفوط الخام.

التصنيف Classification

اقترحت العديد من الخطط لتصنيف الأنواع المختلفة من النفوط الخام. وبشكل عام، تقسم التصنيفات الى قسمين رئيسيين هما :-

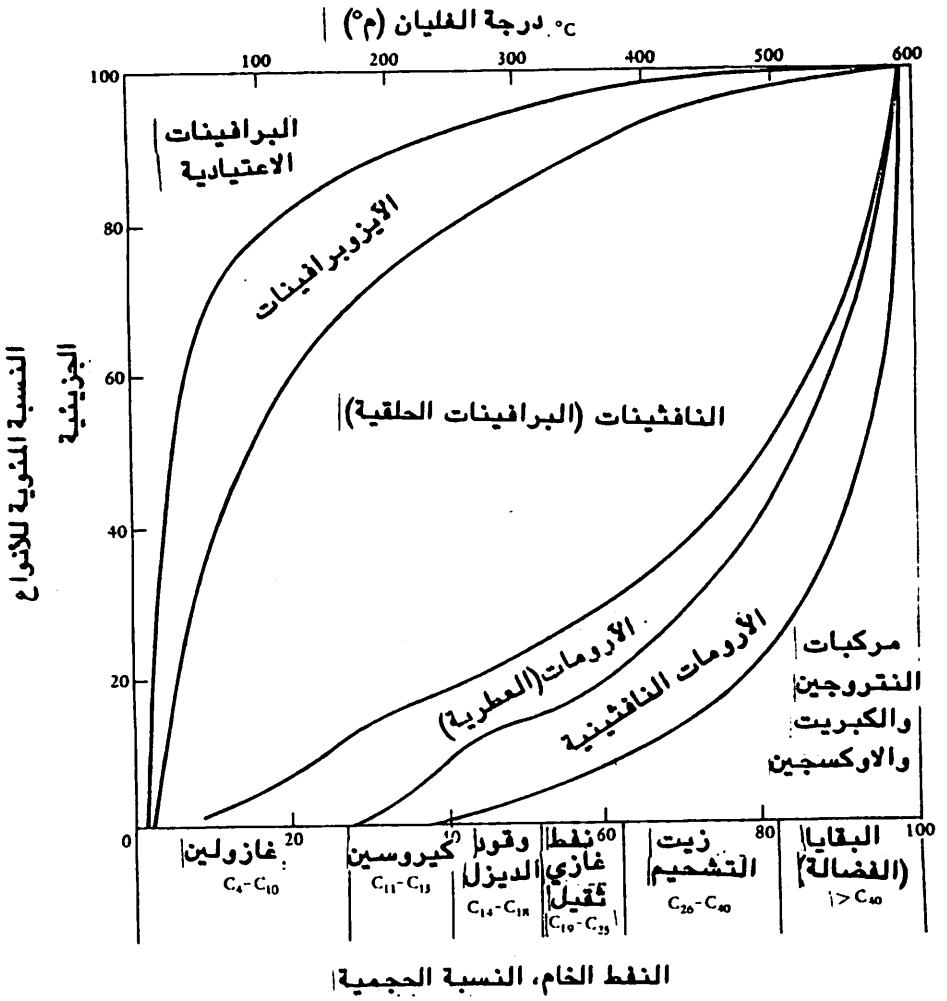
(١) تلك التي اقترحت من قبل المهندسين الكيميائيين المهتمين بتصفية النفط الخام.

(٢) تلك التي ابتدعت من قبل الجيولوجيين والجيوكيميائيين كعامل مساعد في فهم مصدر النفوط الخام ونضوجها وتاريخها واية معاملات جيولوجية أخرى.

يتعلق التصنيف الأول بكميات الهيدروكاربونات الموجودة في خام ما وصفاتها الفيزيائية مثل اللزوجة ونقطة الغليان . فعلى سبيل المثال ، تستند خطة n.d.M على معامل الانكسار والكثافة والوزن الجزيئي (n = معامل الانكسار، d = الكثافة و M=الوزن الجزيئي).

اما الخطط التصنيفية التي تثير اهتمام الجيولوجيين فهي تلك التي تتعلق بالبنى الجزيئية للنفوط ، لان تلك قد تكون مفتاحا لأصلها وتاريخها الجيولوجي. ولقد طورت أول هذه الخطط في مؤسسة المناجم الأمريكية (Smith, U.S. Bureau of Mines

1927, Lene and Garton, 1935) . وهي تقسم النفوط الى برافينية ونافثينية وأنواع متوسطة اعتمادا على أجزائها التقطيرية Distillate عند درجات الحرارة والضغوط المختلفة. بعد ذلك ، ابتدع (Sachenen, 1945) خطة تتضمن الأنواع الاسفلتية والاروماتية للنفط الخام.



الشكل ٢-١٠: التركيب الكيميائي للنفط الخام (From Hunt, 1979, Reprinted with permission)

وثمة خطة أكثر حداثة وضعت من قبل (Tissot and Welte 1978) وتستند على النسبة بين البرافينات والنافثينات والارومات بضمنها المركبات الاسفلتية (الجدول ٢-٦ والشكل ٢-١١). تكمن الفائدة الكبيرة لهذا التصنيف في امكانية استعماله ايضا لاظهار النضوج ومسارات تحلل Degradation النفط في البيئة تحت السطحية. (انظرص٤٧٩).

وهناك خطة أكثر استنادا على الوجود الجيولوجي اقترحت من قبل (Biederman, 1965) وتستند هذه الخطة الرقمية (الامبريقية Empirical) على أعماق وأعمار محددة على نحو اعتباطي :-

(١) نفوط حقبة الحياة الوسيطة Mesozoic والحديثة Cenozoic عند عمق أقل من ٦٠٠ متر.

(٢) نفوط حقبة الحياة الوسيطة والحديثة عند عمق أكثر من ٣٠٠٠ متر.

(٣) نفوط حقبة الحياة القديمة Paleozoic عند أعماق أقل من ٦٠٠ متر.

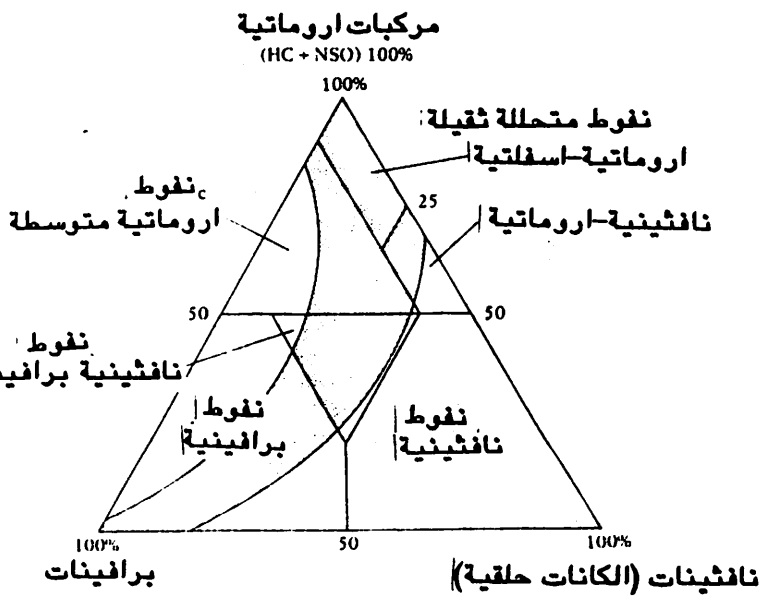
(٤) نفوط حقبة الحياة القديمة عند عمق أكثر من ٣٠٠٠ مترا.

ومن الناحية الأساسية ، تميز هذه الخطة أربع شعب من النفط هي:حديث-ضحل، حديث-عميق ، قديم-ضحل و قديم-عميق.

ولقد أظهرت دراسة تفصيلية للعديد من النفوط قام بها (Martin et al., 1963) عددا من الفروقات الكيميائية والفيزيائية المهمة من الناحية الاحصائية بين هذه المجاميع. فالنفوط الحديثة والضحلة تميل الى ان تكون ثقيلة وازجة. وهي بشكل عام كبريتية، من جانب آخر تكون النفوط الحديثة-العميقة أقل لزوجة وذات كثافة عالية ، وذات محتوى برافيني عال ومحتوى كبريتي واطيء. ويمكن مقارنة النفوط القديمة الضحلة بشكل عام مع النفوط الحديثة العميقة في النقاوة واللزوجة والطبيعة البرافينية. ولكنها مثل النفوط الحديثة الضحلة تميل الى ان تكون ذات محتوى كبريتي عال. وتتميز النفوط القديمة العميقة بكونها الأقل لزوجة وكثافة ومحتوى كبريتي من بين المجاميع الأربع.

التراكيز في النفط الخام (> 210°C)					
S = مشبعات AA = عطريات + صمغ + إسفلتينات	P = برافينات N = نافثينات		نوع النفط الخام	المحتوى الكبريتي في النفط الخام تقريباً	عدد العينات لكل شعبة (المجموع ٥٤١)
	P > N and P > 40%		برافيني		100
S > 50% AA < 50%	P ≤ 40% and N ≤ 40%		برافيني-نافثيني	< 1%	217
	N > P and N > 40%		نافثيني		21
	P > 10%		أروماتي متوسط	> 1%	126
S ≤ 50% AA ≥ 50%		N ≤ 25%	أروماتي إسفلتي		41
	P ≥ 10%	N ≥ 25%	أروماتي نافثيني	عموماً S < 1%	36

الجدول ٢-٦: تصنيف النفوط الخام



الشكل ٢-١١: شكل ثلاثي يظهر تصنيف النفوط المقترح من (Tissot and Welte, 1978).

تغطي تركيب معظم النفوط

ان هذا النظام التصنيفي هو نظام حدسي الى حد كبير ، وستتم مناقشة التغيرات التي تظهرها النفوط الخام اعتمادا على المعاملات الجيولوجية بتفصيل أكثر في الفصل الثامن. ومن الجدير بالملاحظة ، ان النفوط تتغاير لا مع العمر والعمق حسب ، بل كذلك مع التغيرات في الصخور المولدة ودرجة التحلل التي تعرضت اليها . ان هذا التحلل يسبب تغيرات واسعة ، وخصوصا في النفوط الضحلة.

مراجع مختارة

SELECTED BIBLIOGRAPHY

HUNT, J. M. 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology*. San Francisco: Freeman. Chapter 3 (pp. 28–66) gives a detailed account of the chemistry of oil and gas.

KINGHORN, R. F. K. 1983. *An Introduction to the Physics and Chemistry of Petroleum*. New York: Wiley, 432 pp.

NEUMANN, I. B., PAZYNSKA-LAHME, and SEVERIN, D. 1981. *Composition and Properties of Petroleum*. London: Wiley, 148 pp.

TIRATSOO, E. N. 1972. *Natural Gas*, Second Edition. Beaconsfield: Scientific Press. Chapter 1 (pp. 1–38) gives a good account of the occurrence of natural gases, hydrocarbons, and others.

TISSOT, B. P. and WELTE, D. H. 1978. *Petroleum Formation and Occurrence*. Berlin: Springer-Verlag. Part IV, Chapter 1 (pp. 333–368) gives a detailed account of the chemistry of oil and gas.

المصادر

REFERENCES

ANON. 1948. Oil fields of Royal Dutch-Shell Group in Western Venezuela. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 32*, 595.

ANON. 1951. Sour gas discovery at Emory field, Texas. *Oil and Gas J.*, 24 May, 82.

BARKER, C., HINCH, H. H., JONES, R. W., McAULIFFE, C., MOMBER, J., and PRICE, L. 1978. *Physical and Chemical Constraints on Petroleum Migration*. Continuing Education Course Note Series, No. 8. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 293 pp.

BIEDERMAN, E. W. 1965. Crude oil composition—a clue to migration. *World Oil*, No. 161, 78–82.

BILY, C. and DICK, J. W. L. 1974. Naturally occurring gas-hydrates in the Mackenzie Delta, N.W.T. *Can. Petrol. Geol. Bull., 22*, 340–352.

BURWASH, R. A. and CUMMING, G. L. 1974. Helium source-rock in southwestern Saskatchewan. *Can. Petrol. Geol. Bull., 22*, 405–412.

BUTLER, J. B. 1975. The West Sole Gas Field. In: *Petroleum and the Continental Shelf of Northwest Europe*, vol. 1. *Geology*. A. W. Woodland (ed.). London: Applied Science Publishers, 213–222.

COTNER, V. and CRUM, H. E. 1935. Natural gas in Amarillo District, Texas. In: *Geology of Natural Gas*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 409.

CUMMING, A. D. and WYNDHAM, C. L. 1975. The geology and development of the Hewett gas field. In: *Petroleum and the Continental Shelf of Northwest Europe*. A. W. Woodland (ed.). London: Applied Science Publishers, 313–326.

DAVIDSON, C. F. 1965. A possible mode of strata-bound copper ores. *Econ. Geol., 60*, 942–954.

DILLON, W. P., GROW, J. A., and PAULL, C. K. 1980. Unconventional gas hydrate seals may trap gas off Southeast U.S.A. *Oil & Gas J.*, 7 Jan., 124–130.

DOBBIN, C. E. 1935. Geology of natural gases rich in helium, nitrogen, carbon dioxide and hydrogen sulphide. In: *Geology of Natural Gas*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 1053–1064.

DUNSMORE, H. E. 1973. Diagenetic processes of lead-zinc emplacement in carbonates. *Trans. Inst. Miner. Metall.*, Section B, *82*, B. 168–173.

EAMES, T. D. 1975. Coal rank and gas source relationships—Rotliegendes reservoirs. In: *Petroleum and the Continental Shelf of Northwest Europe*, vol. 1. *Geology*. A. W. Woodland (ed.). London: Applied Science Publishers, 191–204.

HINSON, H. H. 1947. Reservoir characteristics of Rattlesnake oil and gas field, San Juan County, N. Mexico. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 31*, 731–771.

HITCHON, B. 1963. Geochemical studies of natural gas, part III. Inert gases in western Canada natural gases. *J. Can. Petrol. Technol., 2*, 165–174.

HOLDER, G. D., KATZ, D. L., and HAND, J. H. 1976. Hydrate formation in subsurface environments. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60*, 981–988.

HUNT, J. M. 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology*. San Francisco: Freeman, 617 pp.

IKORSKIY, S. V. 1967. *Organic substances in minerals of igneous rocks in the Khibina massif*. (Translated from the Russian by L. Shapiro and I. A. Breger). McLean, VA: Clark Co., 155 pp.

KATZ, D. L. D., CORNELL, P., KOBAYASHI, R., POETTMAN, F. H., VARY, J. A., ELENBAAS, J. R., and WEINANG, C. F. 1959. Water-hydrocarbon systems. In: *Handbook of Natural Gas Engineering*. D. L. Katz et al. (eds.). New York: McGraw-Hill, 189–221.

KATZ, H. R. 1981. Probable gas hydrate in continental slope east of the North Island, New Zealand. *J. Petrol. Geol., 3*, 315–324.

KEPLINGER, C. H., WANEMACHER, C. H., and BURNS, K. R. 1949. Hugoton, worlds largest dry gas field in amazing development. *Oil and Gas J.*, 6 Jan., 84–88.

LANE, E. C. and GARTON, E. L. 1935. 'Base' of a crude oil. *U.S. Bur. Mines Rep.*, No. 3279.

LEE, H. 1963. The technical and economic aspects of helium production in Saskatchewan. *J. Can. Petrol. Technol., 2*, 16–27.

LEVORSEN, A. I. 1967. *Geology of Petroleum*, Second Edition. San Francisco: Freeman, 724 pp.

MacDONALD, G. J. 1983. The many origins of natural gas. *J. Petrol. Geol., 5*, 31–362.

MacLEOD, M. K. 1982. Gas hydrates in ocean bottom sediments. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 66*, 2649–2662.

MAGLIONE, P. R. 1970. Triassic gas field of Hassi er R'Mel, Algeria. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 489–501.

MAKOGON, Y. F., TREBIN, F. A., TROFIMUK, A. A., TSAREV, V. P., and CHERSKIY, N. V. 1971. Detection of a pool of natural gas in a solid (hydrated gas) state. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR., 196*, 197–200.

MARTIN, R. L., WINTERS, J. C., and WILLIAMS, J. A. 1963. Composition of crude oil by gas chromatography: geological significance of hydrocarbon distribution. Frankfurt: *Proc. 6th World Petrol. Cong.*, Section 5, Paper 13.

MASSA, D., RUHLAND, M., and THOUVENIN, J. 1972. Structure et fracturation du Champ d'Hassi Messaoud (Algerie) Pt. 1. Observation des phenomenes tectoniques au Tassili des Ajjers. *Rev. Institut Francais du Petrol., 27*, 489–534.

MOORE, J. C. and WATKINS, J. S. 1979. Middle America trench. *Geotimes, 24*, 20–22.

PAYNE, A. L. 1951. Cumarebo oil field, Falcon, Venezuela. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 35*, 1870.

PIPPIN, L. 1970. Panhandle-Hugoton field, Texas–Oklahoma–Kansas—the first fifty years. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 204–222.

PORFIR'EV, V. B. 1974. Inorganic origin of petroleum. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58*, 3–33.

ROGERS, G. S. 1921. *Helium-Bearing Natural Gas*. U.S. Geol. Surv., 113 pp.

ROSSINI, F. D. 1960. Hydrocarbons in petroleum. *J. Chem. Ed., 37*, 554–561.

SACHENEN, A. N. 1945. *Chemical Constituents of Petroleum*. New York: Rheinhold, 414 pp.

SHIMKIN, D. B. 1950. Is petroleum a Soviet weakness? *Oil & Gas J.*, 21 Dec., 214–226.

SLIPPER, S. E. 1935. Natural Gas in Alberta. In: *Geology of Natural Gas*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 51.

SMITH, N. A. C. 1927. The interpretation of crude oil analyses. *U.S. Bur. Mines Rep.*, No. 2806.

STAUBLE, A. J. and MILIUS, B. 1970. Geology of Groningen gas field, Netherlands. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 359–369.

STOLL, R. D., EWING, J., and BRYAN, G. M. 1971. Anomalous wave velocities in sediments containing gas hydrates. *J. Geophys. Res., 76*, 2090–2094.

SUGISAKI, R., ID, M. T., TAKEDA, H., and ISOBE, Y. 1983. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity. *J. Geol., 91*, 239–258.

SUTER, H. H. 1952. The general and economic geology of Trinidad. In: *Colonial Geol. & Miner. Res., 4*, 28 pp.

TAYLOR, G. 1983. CO_2 projects to test recovery theories. *AAPG Explorer*, June, 1, 20–21.

TIRATSOO, E. N. 1972. *Natural Gas—A Study*, Second Edition. Beaconsfield: Scientific Press, 352 pp.

الفصل الثالث
طرق الاستكشاف
METHODS OF EXPLORATION

حفر الابار واكمالها Well Drilling and Completion

في أيام الاستكشاف المبكرة، كان النفط يجمع من النضوحات السطحية. ففي الصين وبورما ورومانيا كانت المناجم تحفر لتنتج النفط الضحل. وكان الوصول اليه يتم عبر السلالم والبكرات، بينما كان الهواء يضخ الى المنجم عبر الانابيب. وكان النفط ينضح الى المنجم ثم يرفع الى السطح بواسطة الدلاء. ولم يكن هذا النوع من التقنية مفضياً الى حياة صحية ولا تقاعد طويل لعمال المناجم.

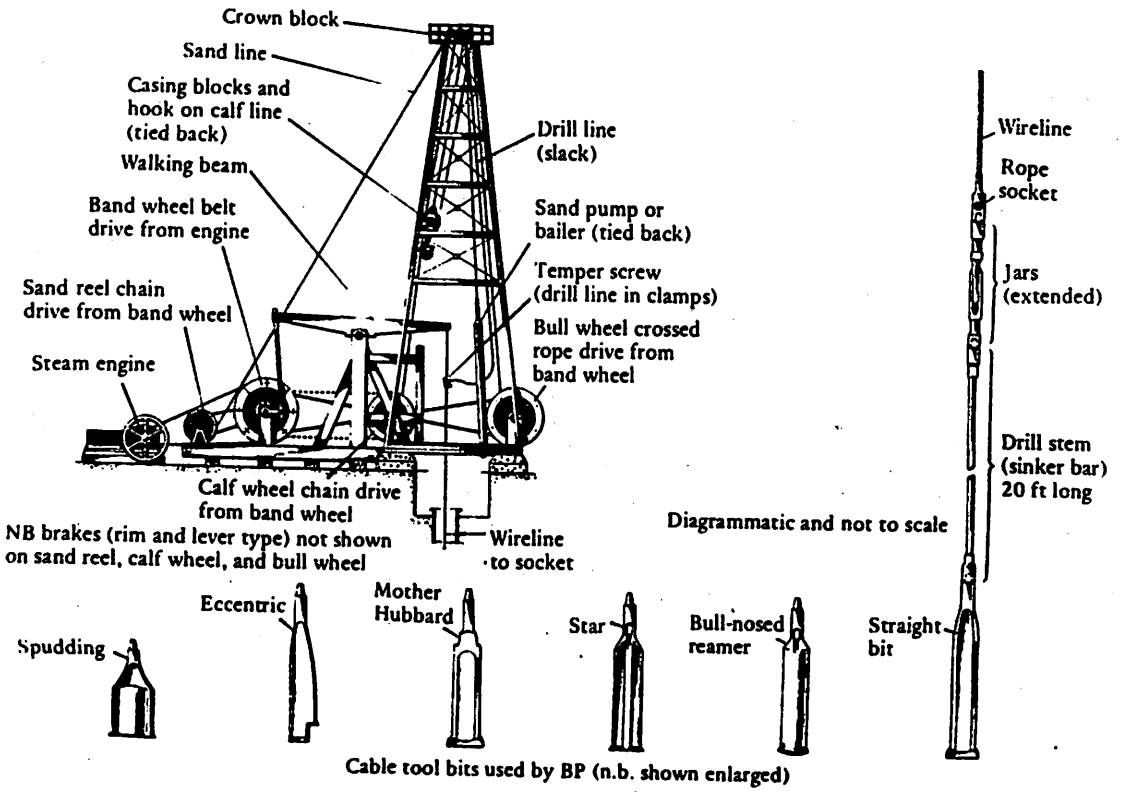
كما كان النفط يستخرج في أجزاء مختلفة من العالم بحفر مسارب أفقية الى المكامن فيقطر النفط الى القاع من الجدران وينساب الى مدخل المنجم. ولقد أعيد استعمال هذه التقنية مؤخراً من قبل شركة كنكو في حقل نورث تيسدال North Tisdale في يومنغ (Dobson and Seelye, 1981). ولكن من المعتاد أن يحدد وجود النفط والغاز ويستخرجان بحفر الابار. وسوف يتم وصف كلا من طريقتي الحفر الدقاق Cable-tool والحفر الدوراني Rotary-tool باختصار في الفقرات التالية :-

الحفر الدقاق Cable-Tool Drilling

يبدو أن الحفر الدقاق قد تطور على نحو متزامن في أجزاء عديدة من العالم. ففي مطلع القرن التاسع عشر، كان الصينيون يحفرون المناجم الى أعماق تصل الى ٧٠٠ مترا، باستعمال بريمة زنة ١٨٠٠كغم تتدلى من سلك من الخيزران. وكان قطر البئر يتراوح بين ١٠ الى ١٥ سنتمترا، ومعدل الحفر بين ٦٠ الى ٧٠ سنتمترا في اليوم. وكانت الابار تبطن بجذوع الخيزران او السرو المجوف (Imbert, 1828, Coldre, 1891). وكانت هذه الابار تحفر بحثا عن المياه العذبة والمياه المالحة التي يستخرج منها الملح.

وفي الحفر الدقاق الحديث، يضرب قاع البئر بقطعة ثقيلة من المعدن تدعى البريمة Bit مثبتة في نهاية سلك. وتشبه البريمة الازميل عادة، ويؤدي هذا الدق المتكرر تدريجا الى كسر الصخور في قاع تجويف البئر. وبين الفينة والأخرى، تسحب البريمة الى السطح،

ويربط أنبوب نزح عند نهاية السلك. وأنبوب النزح هذا عبارة عن اسطوانة فولاذية ذات صفيحة رقيقة أحادية الاتجاه عند القاع. وعندما يسقط أنبوب النزح على قاع البئر، تجبر بعض القطع الصخرية على الاندفاع في داخله بتأثير الصفيحة المصطادة Trap Flap. وعندما يرفع أنبوب النزح الى الأعلى قبل اسقاطه مرة أخرى، يحتفظ في الصخور في المصيدة (الشكل ٣-١). وعندما يحرك الفتات الصخري من تجويف البئر، يسحب الأنبوب خارجا ويفرغ. ثم تعاد البريمة عند نهاية السلك، ويبدأ الدق مرة أخرى. وبازدياد عمق البئر تدريجيا، يتولد ميل طبيعي عند الجدران كي تتهدم. ويتم التغلب على ذلك عادة بتبطين البئر ببطانة فولاذية.



الشكل ٣-١: برج حفر بخاري دقاق مع معداته. (Courtesy of British Petroleum)، ينشر بموافقة مسبقة

في أيام الاستكشاف المبكرة كانت قوة الدق توفر من قبل رجل او عدة رجال يسحبون الحبل، وتمت مساعدتهم لاحقا بواسطة عمود نبضي Spring-pole. وفي الأيام الأكثر معاصرة، تم توفير القدرة بالبخار او مكائن الاحتراق الداخلي. ولقد تطورت طرق الحفر الدقاق بنهاية القرن الثامن عشر. وكانت تستعمل بشكل رئيسي، لحفر ابار المياه. وفي بعض الأحيان، كانت هذه الابار تعثر على مياه ملوثة بالنفط، مما يُسبّب ازعاجا للحفار.

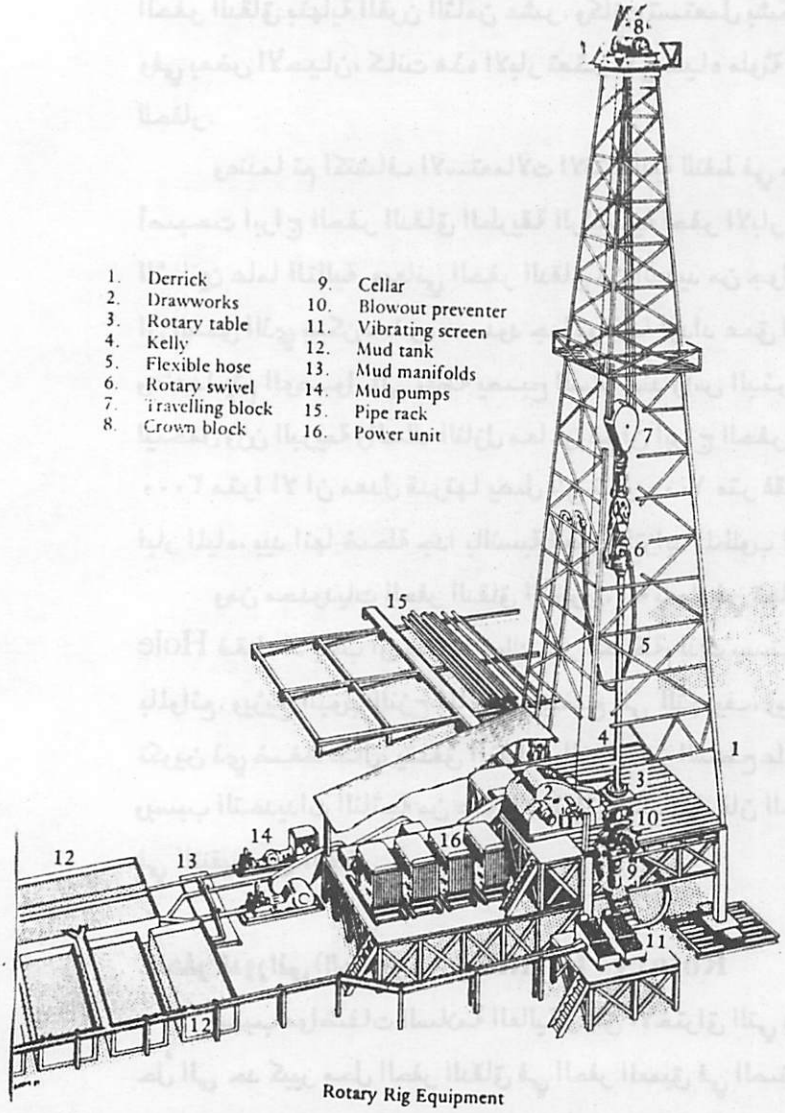
وعندما تم اكتشاف الاستعمالات الاقتصادية للنفط في منتصف القرن التاسع عشر، أصبحت ابراج الحفر الدقاق الطريقة الرئيسية لحفر الابار النفطية، وبقيت كذلك طوال الثمانين عاما التالية. ويعاني الحفر الدقاق من العديد من جوانب القصور الميكانيكي فأولا ان العمق الذي يمكن حفره محدود جدا، وكلما ازداد عمق التجويف، ازداد ثقل السلك. وعندها يتم الوصول الى نقطة يصبح السلك عند رأس البئر ليس قويا بما فيه الكفاية ليتحمل وزن البريمة والسلك النازل معا. ورغم ان ابراج الحفر الدقاق قد حفرت ابار بعمق ٣٠٠٠ مترا الا ان معدل قدرتها يصل الى نحو ١٠٠٠ متر فقط. وهذه القدرة كافية لأغلب ابار المياه، بيد انها ضحلة جدا بالنسبة للعمق المتزايد المطلوب لاستكشاف النفط.

ومن محدوديات الحفر الدقاق الأخرى، انه يعمل في تجاويف الابار المفتوحة Open Hole فقط. اذ يجب ان يكون السلك حر الحركة، لذلك يستحيل ابقاء التجويف مملوءاً بالموائع. ويزيح انبوب النزح الماء الذي ينضح الى التجويف، وبذلك عندما يصل الأنبوب الى تكوين ذي ضغط عال، يتدفق النفط او الغاز الى السطح على شكل نافورة Gusher. وبسبب التحديدات الناتجة من عمق الاختراق والسلامة، فان الحفر الدقاق ذا فائدة محدودة في التنقيب عن النفط.

الحفر الدوراني (الرحوي) Rotary Drilling

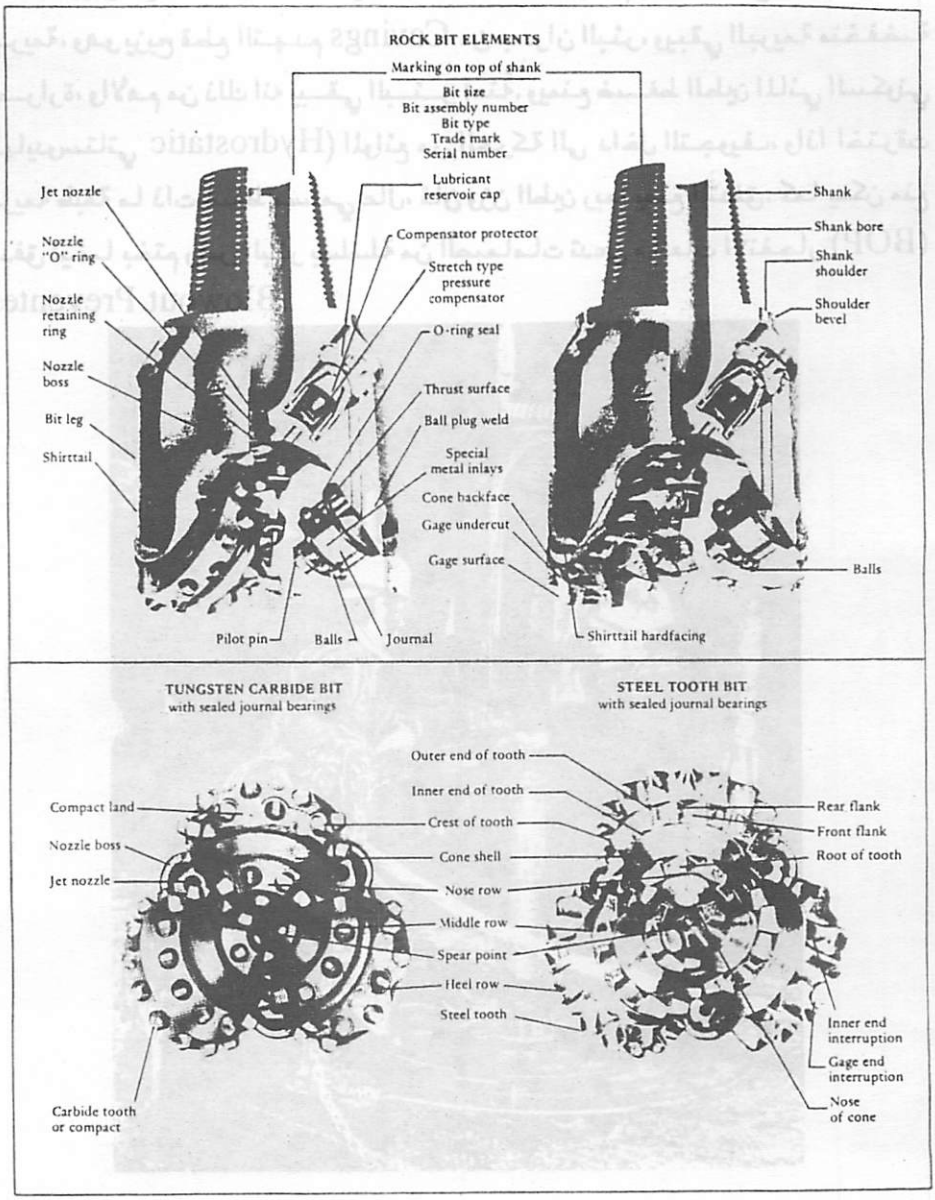
بسبب مواصفات السلامة العالية وعمق الاختراق التي يوفرها الحفر الدوراني، فانه حلٌ الى حد كبير محل الحفر الدقاق في الحفر العميق في الصناعة النفطية. (الشكل ٣-٢). وفي هذه التقنية، تدور البريمة عند نهاية أنبوب فولاذي مجوف يدعى أنبوب الحفر Drill String. وتستعمل أنواع مختلفة من البريمات، غير ان اكثرها شيوعا تتكون من ثلاثة

مخاريط دوارة مزودة باسنان (الشكل ٣-٣). تدور البريمة وتقوم الاسنان بقضم الصخور عند قاع تجويف البئر. وفي الوقت نفسه، يضخ الطين او الماء عبر انبوب الحفر، ليتناثر من خلال الفتحات الموجودة في البريمة لينساب الى الأعلى باتجاه السطح، بين انبوب الحفر وجدار البئر.



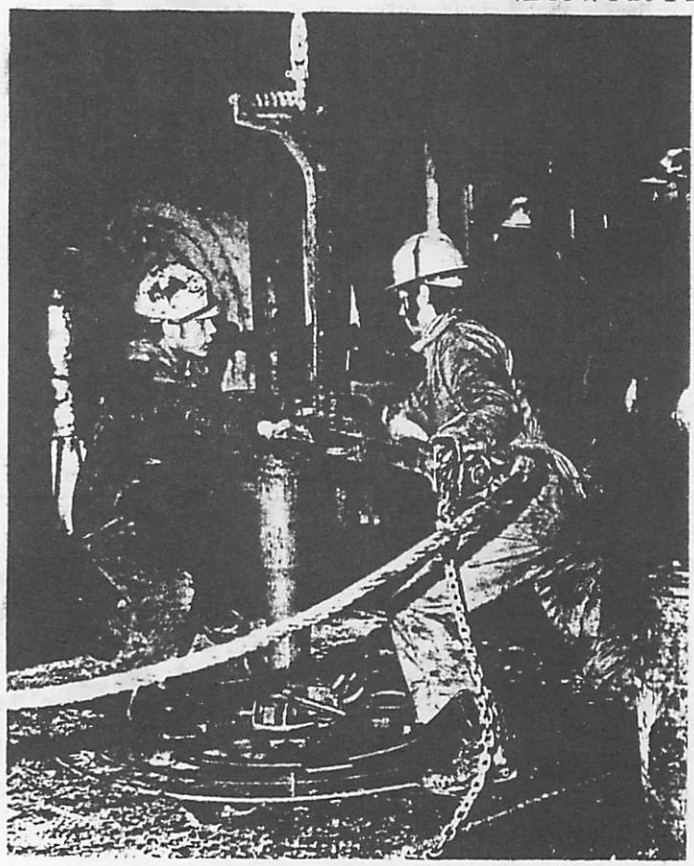
Rotary Rig Equipment

الشكل ٣-٢: شكل تخطيطي مبسط لبرج حفر دوراني على اليابسة.(Courtesy of British Petroleum)، ينشر



الشكل ٣-٣: نوعان من البرائم ثلاثية المخروط المستعملة في الحفر الدوراني. (Courtesy of Hughes Tool Co.)

لدوران طين الحفر هذا العديد من الفوائد، فهو يقوم بازالة القطع الصخرية من البريمة، وهو يزيح قطع التهدم Cavings من جدران البئر، ويبقي البريمة منخفضة الحرارة، والأهم من ذلك انه يُبقي البئر آمناً. ويمنع ضغط الطين المائي السكوني (الهايدوستاتي Hydrostatic) الموائع من الحركة الى داخل التجويف، واذا اخترقت البريمة طبقة ما ذات ضغط مسامي عال، فان وزن الطين ربما يمنع التدفق. كما يمكن منع التدفق ايضا بختم رأس البئر بسلسلة من الصمامات تدعى مانعات الانفجار (BOP) Blowout Preventers.



الشكل ٣-٤: استعمال الكماشة في تثبيت أنبوب الحفر على قاع البرج في برج (سي كونكويست) التابع لشركة البترول البريطانية.
(Courtesy of British Petroleum).

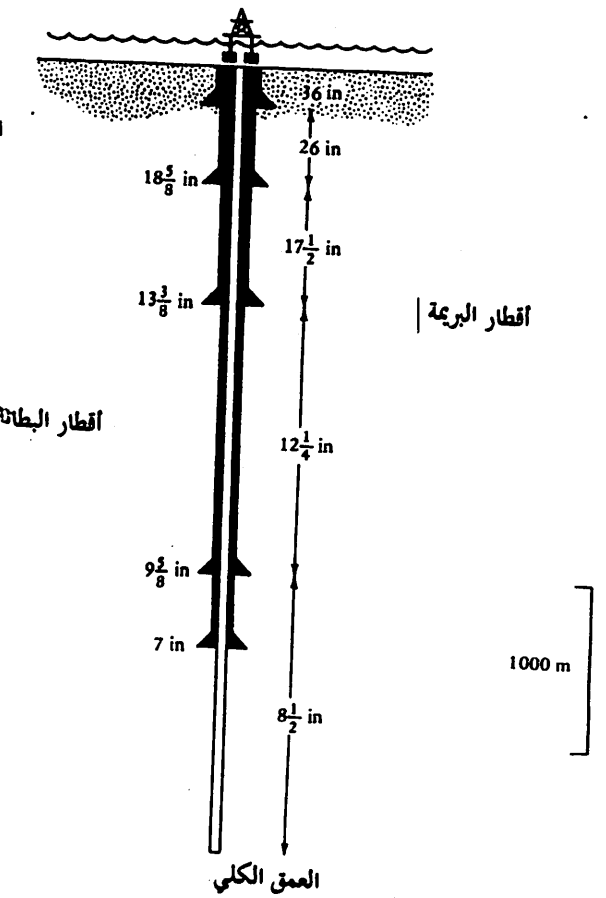
وعندما تعمق البريمة التجويف، تضاف قطع جديدة من أنبوب الحفر، وذلك بان تثبت على انبوب الحفر الموجود على السطح. اذ يثبت الجزء الأخير من انبوب الحفر لوابيا الى جزء فولاذي ذي مقطع مربع يدعى جذع التدوير Kelly، يعلق عموديا في ثقب جذع التدوير Kelly Bushing وهو ثقب مربع في وسط النضد (الرحى) الدوار. وبذلك فان دوران النضد بمحرك البرج يخلق حركة دورانية على امتداد انبوب الحفر وصولا الى البريمة في قاع التجويف. وبازدياد عمق التجويف، ينزلق الجذع خلال النضد الدوار حتى يحين الوقت لربط قطعة أخرى من انبوب الحفر (الشكل ٣-٤). وعندما تبلى البريمة، وهو أمر يعتمد على نوع البريمة وصلابة الصخور، تسحب انابيب الحفر خارجا وترتب على البرج. وعندما تجلب البريمة الى السطح، تزال وتبدل بواحدة جديدة.

بعد الحفر الى عمق معين، يُغلف البئر ببطانة فولاذية، ويوضع السمنت بين البطانة وجدار البئر. وبعد ذلك قد يستأنف الحفر ببريمة أصغر. ان قطر البريمات والبطانة تم تقييسها عالميا. واعتمادا على عمق البئر النهائي، يتم استعمال عدة قياسات من البريمات مع البطانات المناسبة لها (الشكل ٣-٥). ويتراوح معدل عمق آبار النفط بين ١ الى ٣ كيلومتر، ولكن يمكن اختراق أعماق قد تصل الى ١١.٥ كيلومترا.

عند الحفر في مكمن بترولي، قد ترفع البريمة الاعتيادية وتستبدل ببرميل لباب Core Barrel. وبرميل اللباب هو انبوب فولاذي مجوف له أسنان تتكون عادة من الالماس (او الماس) عند النهاية السفلى. وعندما يدور برميل اللباب، فانه يقطع اسطوانة من الصخور وينزل فوقها مع ازدياد عمق البئر. وعندما يسحب برميل اللباب الى السطح، يحتفظ بلباب الصخور في برميل اللباب وذلك بفضل وجود نوابض فولاذية متجهة نحو الأعلى . وأخذ اللباب ابطأ من الحفر بالبريمة الاعتيادية، وبذلك فانه أكثر كلفة. وهو يستعمل عند الضرورة حسب في التنقيب عن النفط، وذلك لجمع عينات صخرية كبيرة سليمة للمعلومات الجيولوجية والهندسية.

يشترك الجيولوجيون بدرجات مختلفة في حفر الابار. وفي ابار تطوير حقول البترول التقليدية، حيث يكون العمق ومواصفات المكمن معروفة مسبقا، فان الجيولوجي قد لا يكون موجوداً في موقع البئر، رغم انه قد يراقب تقدم البئر من مكتبه. اما في الابار الاستكشافية البحرية، فقد يكون هنالك خمسة جيولوجيين او أكثر. وربما تضع الشركة التي

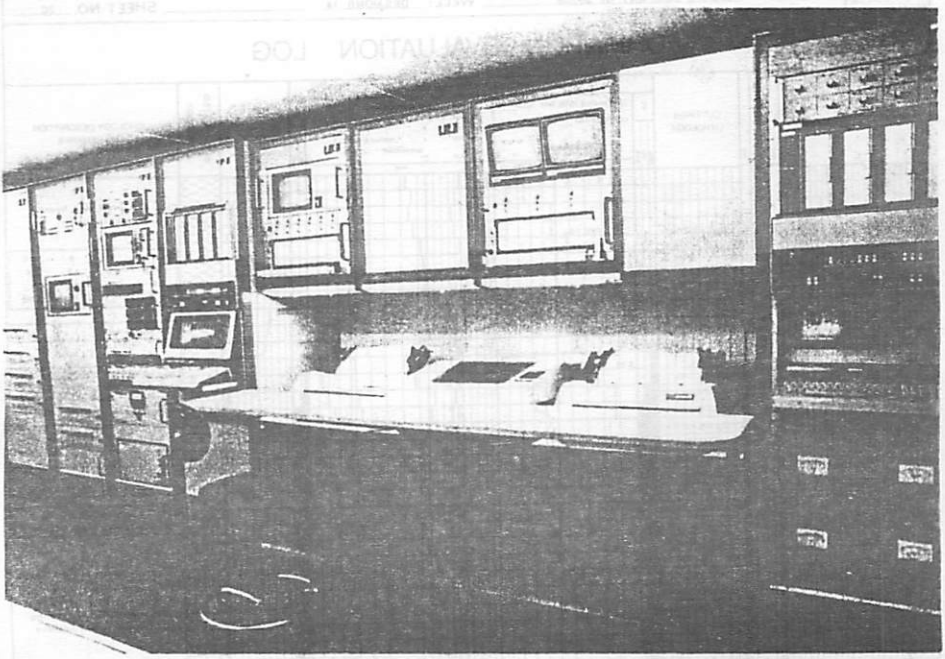
يحفر البئر لها أحد جيولوجييها على الموقع. وتشتمل مهماته تقديم النصح لكل من الحفار والى دائرة العمليات عن التكوينات والموائع والضغوط المتوقعة، واختيار مناطق قطع اللباب وانزال البطانة، وتحديد الوقت المناسب لاجراء الجس البئري Well Logging، والاشراف على عمليات الجس وتفسير نتائجه النهائية، والأكثر من ذلك، تشخيص الشواهد الهايدروكاربونية في البئر وتقييمها.



الشكل ٣-٥: اقطار البطانة والبرائم المستعملة في بئر نموذجي من آبار بحر الشمال

اما الجيولوجيون الاخرون فانهم يعملون في جس الطين Mud Loggers، وهم يشتغلون اثنين اثنين بخفارة تمتد لاثنتي عشرة ساعة. وتقاول شركة جس طين الحفر من قبل شركة النفط للقيام بتقييم معقد ومتواصل للبئر اثناء حفرها. ويتم اجراء هذا التقييم

من وحدة جس الطين Mudlogging unit، التي هي مقصورة او عربة متطورة مملوءة بالحواسيب ومعدات المراقبة الالكترونية، (الشكل ٣-٦). ويسجل المسؤول عن جسّ الطين العديد من متغيرات الحفر، ويضمنها معدل الاختراق، درجة حرارة الطين، الضغط المسامي ، وكثافة السجيل. ويسجل كروماتوغراف الغاز Gas Chromatographs وجود الغازات الهيدروكربونية في الطين. وتجمع عينات الفتات الصخري عند فترات عمق محددة، وتدقق تحت الضوء فوق البنفسجي والفحوصات الأخرى بحثا عن وجود النفط، ومن ثم تشخص وتوصف. وترسم هذه المعطيات باستمرار على مجس الطين Mudlog (الشكل ٣-٧). وثمة مناقشة مفيدة للجوانب الجيولوجية لجس الطين والفعاليات الأخرى المصاحبة في ابراج الحفر، اعطيت من قبل (Dicky, 1979).



الشكل ٣-٦: وحدة جس الطين كما تبدو من الداخل.

(Courtesy of Exploration Logging Services, Ltd.).

EXLOG

COMPANY ABC OIL COMPANY OF SPAIN

WELL DESMOND 1X
FIELD ANDORRA
REGION OFFSHORE SPAIN
COORDINATES 39 deg 44 min 54 s N
03 deg 23 min 33 s E
API WELL INDEX NO.
SPUD DATE 5/4/81
ELEVATION RKB to MSL : 84.5 ft
RKB to SF : 174.2 ft
TOTAL DEPTH 5345 ft
CONTRACTOR DEEP DRILLING COMPANY
RIG / TYPE CHARLIE JONES/JACKUP

LOG INTERVAL

DEPTH FROM 400 ft TO 5345 ft
DATE FROM 5/4/81 TO 21/5/81
SCALE 1:500 UNIT 501
LOG PREPARED BY A.EVANS, G. JONES, A.EDWARDS

HOLE SIZE

26 in	TO	750 ft	8 1/2 in	TO	5345 ft
17 1/2 in	TO	2300 ft		TO	
12 1/4 in	TO	4190 ft		TO	

CASING RECORD

30 in	AT	400 ft	9 5/8 in	AT	4185 ft
20 in	AT	735 ft	7 in	AT	5340 ft
13 3/8 in	AT	2295 ft		AT	

MUD TYPES

SEAWATER/GEL	TO	2300 ft
KCL/POLYME	TO	5345 ft
	TO	

LITHOLOGY SYMBOLS

LIMESTONE, DOLOMITE, ANHYDRITE AND GYPSUM, HALITE, COAL AND LIGNITE, CLAY, SHALE, SILT AND SILTSTONE, SILTY SANDSTONE, SAND AND SANDSTONE, CONGLOMERATE, CHERT, IGNEOUS UNDIFFERENTIATED

EXLOG SUITE

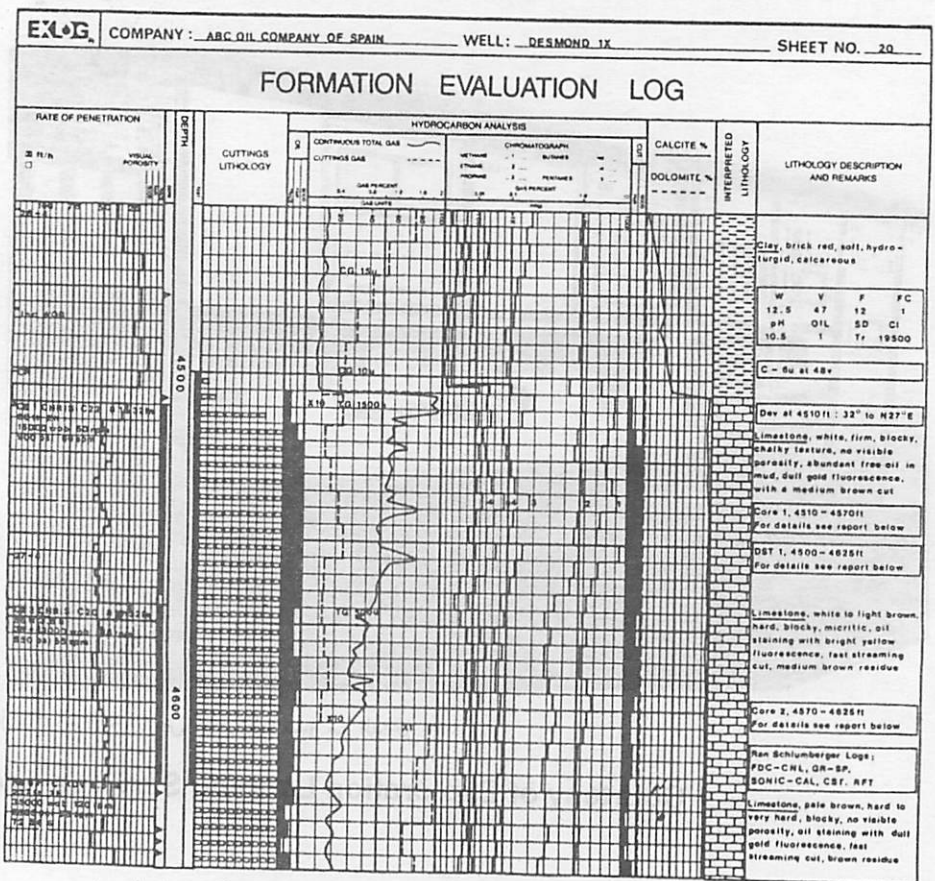
FORMATION EVALUATION LOG
PRESSURE EVALUATION LOG
DRILLING DATA PRESSURE LOG
WIRELINE DATA PRESSURE LOG
TEMPERATURE DATA LOG
GEMOAS COMPUTER LOGS

ABBREVIATIONS

NB	NEW BIT	SVG	SURVEY GAS
RRB	RERUN BIT	C	CARBIDE TEST
CB	CORE BIT	W	MUD DENSITY PPG
WOB	WEIGHT ON BIT	V	FUNNEL VISCOSITY
RPM	REVS PER MINUTE	F	FILTRATE – API
FLC	FLOW CHECK	FC	FILTER CAKE
CR	CIRCULATE RETURNS	PV	PLASTIC VISCOSITY
PR	POOR RETURNS	YP	YIELD POINT
NR	NO RETURNS	SOL	SOLIDS – %
LAT	LOGGED AFTER TRIP	SD	SAND – %
BG	BACKGROUND GAS	S	SALINITY – PPM Cl
TG	TRIP GAS	RM	MUD RESISTIVITY
STG	SHORT TRIP GAS	RMF	FILTRATE RESISTIVITY
CG	CONNECTION GAS		
SWG	SWAB GAS		

CASING SEAT, WIRELINE LOG RUN, CORED INTERVAL, TEST INTERVAL, NO RECOVERY, WIRELINE TEST, SIDEWALL CORE

GAS – 100 Total gas units is equivalent to 2% methane in air
OIL – Based on live oil in unwashed cuttings and percentage staining of washed cuttings

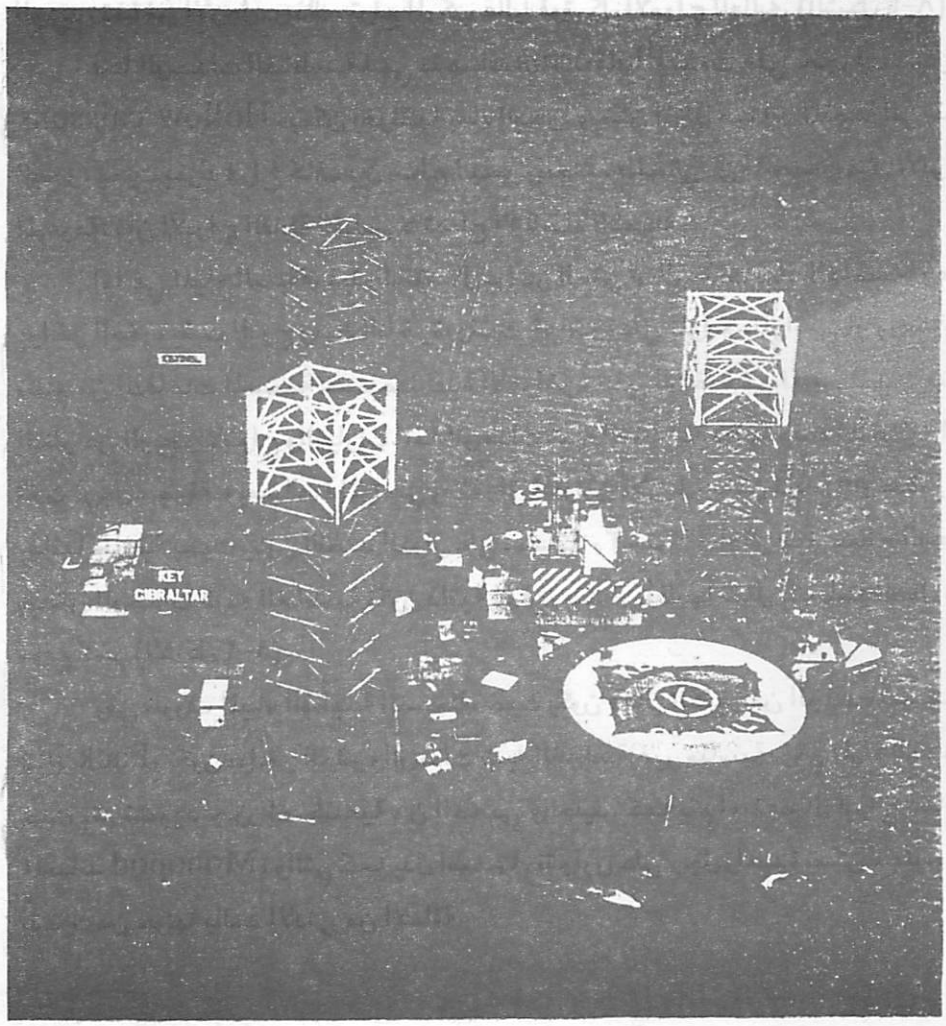


الشكل ٣-٧: مثال على جزء من مجس طين نموذجي يظهر أنواع المعطيات المتعلقة بالحفر والجيولوجيا.

(Courtesy of Exploration Logging Services, Ltd.).

انواع وحدات الحفر المختلفة Various Types of Drilling Unit

قد يستعمل برج الحفر الدوار على اليابسة أو في البحر. وعلى اليابسة تستعمل الابراج الجاهزة، ويمكن نقلها بالانزلاق على لوح خشبي او على عجلات كبيرة او، في حالة الابراج الصغيرة بوساطة الطائرات السمتية. وما ان يتم حفر البئر، يفكك البرج وينقل الى الموقع التالي، سواء كانت البئر منتجة او خاوية من الهايدروكاربونات (تسمى بمصطلحات أهل النفط بئراً جافة Dry hole او غبارية Duster) وبذلك، فان حقول النفط الحديثة لا تبدو وكأنها غابة من الابراج مثلما كانت تظهر في الصور والأفلام القديمة.



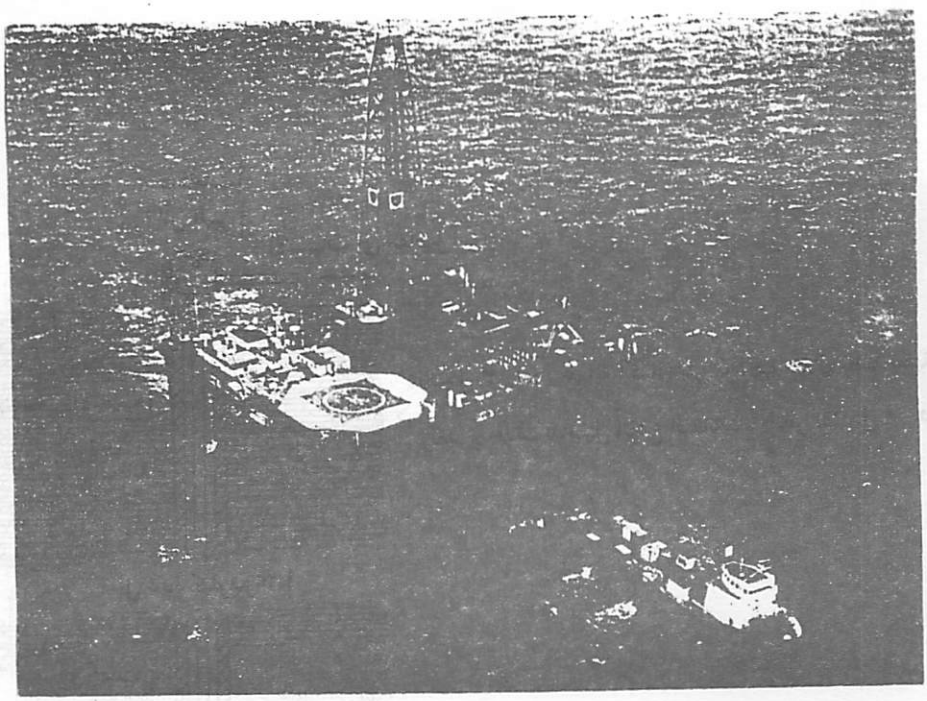
الشكل ٣-٨: برج حفر قابل للرفع من شركة كي. جبرالتر (معار الى شركة البترول البريطانية) في حقل ويست سول الغازي التابع الى شركة البترول البريطانية في بحر الشمال. (Courtesy of British Petroleum).

وفي عمليات الحفر البحري، يمكن أن يثبت البرج بطرق مختلفة. ففي الممرات المائية المحمية، يمكن أن يُنصب على مسطح Flat-bottomed barge. ولقد استعملت هذه التقنية، على سبيل المثال، في اخوار دلتا المسيسبي طوال الخمسين سنة الماضية. وفي الأبراج المرفوعة Jack-up، يثبت البرج على مركب مسطح مزود بأرجل يمكن رفعها او خفضها. وعندما يراد تحريك البرج، ترفع الأرجل، (اي يخفض المركب) حتى يطفو، وبعض أنواع المراكب يندفع ذاتيا، بيد ان الاغلبية تحرك بواسطة العتل. وعند الوصول الى الموقع الجديد، تخفض الأرجل، وبذلك، ترفع المركب عاليا فوق كل الأمواج العالية. (الشكل ٣-٨).

اما الوحدات الغاطسة فهي منصات Platforms تثبت على حجرات مجوفة Hollow caissons، يمكن اغراقها بماء البحر. ويمكن انزال مساند المنصة الى قاع البحر، بحيث يترك فراغ كاف بين سطح البحر والجانب التحتي من المنصة، ومثل الابراج المرفوعة، فان الابراج القابلة للغطس لا تصلح الا للمياه الضحلة.

اما في المياه العميقة، فيتم استعمال بواخر الحفر او الوحدات شبه الغاطسة. وعلى بواخر الحفر، يثبت البرج وسط الباخرة، وتثبت الباخرة على الموقع بالمراسي او بوساطة نظام من الدفاعات المصممة خصيصا لهذه الأغراض، تبقي الباخرة في الموقع نفسه بغض النظر عن الريح والأمواج والتيارات. اما الوحدات شبه الغاطسة، فانها منصات عائمة لها ثلاث أرجل مجوفة. وبمساعدة المراسي والاغراق المتوازن للأرجل، يمكن تثبيت الوحدة، رغم بقائها طافية بحيث يكون النضد الدوار على مسافة ٣٠ مترا او أكثر فوق سطح البحر. وبعض الوحدات شبه الغاطسة تكون ذاتية الدفع، بيد ان أغلبها تنقل بوساطة العتل من موقع لاخر (الشكل ٣-٩).

وفي ظروف المياه القطبية الضحلة، حيث يكون هناك الكثير من الجليد المضغوط Pack ice، تكون بواخر الحفر والوحدات شبه الغاطسة غير مناسبة. وفي المياه الضحلة جدا، يتم تشييد جزر اصطناعية من الحصى والجليد. كما يتم استعمال ابراج احادية المساند Monopod، والتي كما يدل اسمها، تتوازن على رجل واحدة يمكن للجليد ان يتحرك من حولها بالحد الأدنى من الاعاقة.

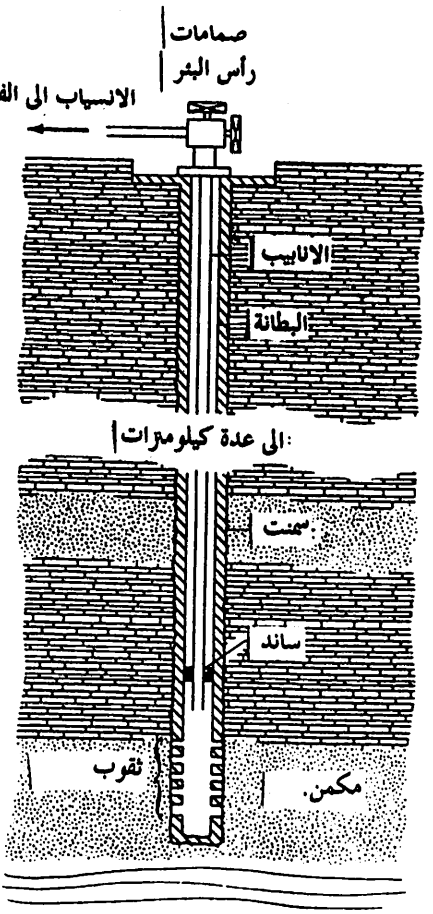


الشكل ٣-٩: برج الحفر شبه الغاطس التابع لشركة البترول البريطانية (سي كونكويست).
(Courtesy of British Petroleum).

أنواع وحدات الانتاج المختلفة Various Types of Production Units

مثلما اسلفنا من قبل، بعد ان يتم حفر بئر ما، يتم نقل البرج الى الموقع التالي. ويتم انتاج النفط والغاز من الابار بطرق مختلفة. وسوف يتم التطرق الى الأنواع المختلفة من آليات دفع النفط خارج المكمن Drive Mechanisms في الفصل السادس (ص٣٣١). بينما يتم الانتاج الحقيقي وفق طريقتين، اعتمادا على ان كان انسياب النفط الى السطح يتم باستعمال مضخة او من دونها.

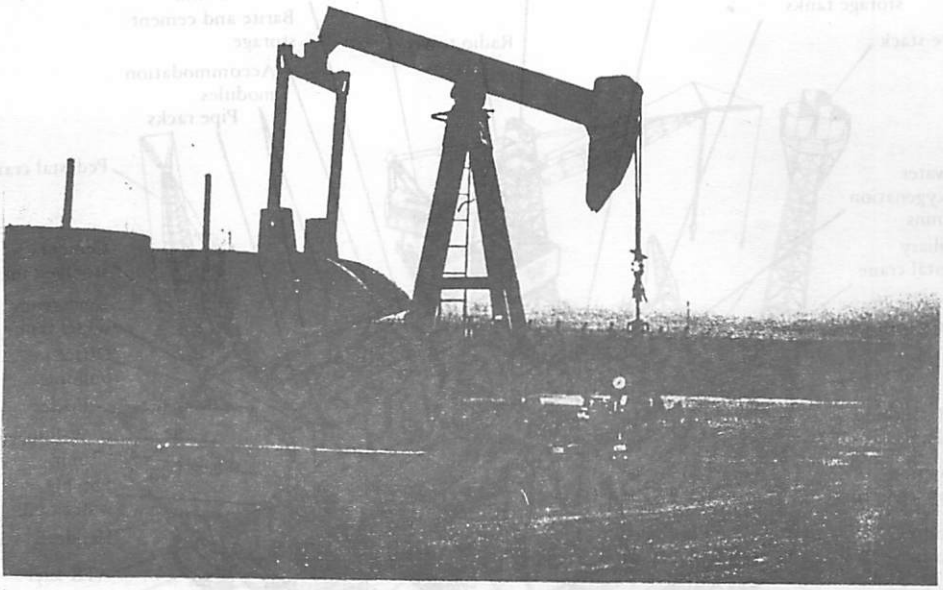
وفي أغلب الحالات، يتوفر في المكمن ضغط كاف للنفط او الغاز كي ينساب الي السطح. وفي مثل هذه الحالات يتم وضع البطانة عادة تحت النطاق المنتج، ويتم عمل التثقيبات Perforations خلال البطانة باستعمال شحنات متفجرة مقابل النطاق المنتج للهايدروكاربونات. وتعلق الانابيب من رأس البئر الى النطاق المنتج، وتختم الفتحة الموجودة بين الانابيب والبطانة بالمسند Packer (الشكل ٣-١٠). ويتم نصب منظومة من الصمامات يطلق عليها اسم شجرة عيد الميلاد Chrismas Tree على رأس البئر، يخرج منها انبوب انسياب يؤدي الى الخزان الذي يفصل فيه النفط والغاز تحت الضغط الجوي.



الشكل ٣-١٠: عملية أكمال بئر نموذجية خلال بطانة مثقبة، ولقد تم حذف تفاصيل أنواع البطانات، (أنظر الشكل ٣-٥).

اذا كان ضغط البئر واطئا جدا لكي ينساب النفط الى السطح، يتم استعمال جهاز ضخ يتمثل أمّا في المضخة النوادة Nodding Donkey عند رأس البئر او في نصب مضخة داخل تجويف البئر. ويوضح الشكل (٣-١١) مضخة عند رأس البئر، حيث يقوم محرك عضدي Beam Engine يدار بالكهرباء او بالديزل برفع وخفض مجموعة من انابيب المص Sucker rods، تُربط الى مكبس Piston عند قاعدة تجويف البئر.

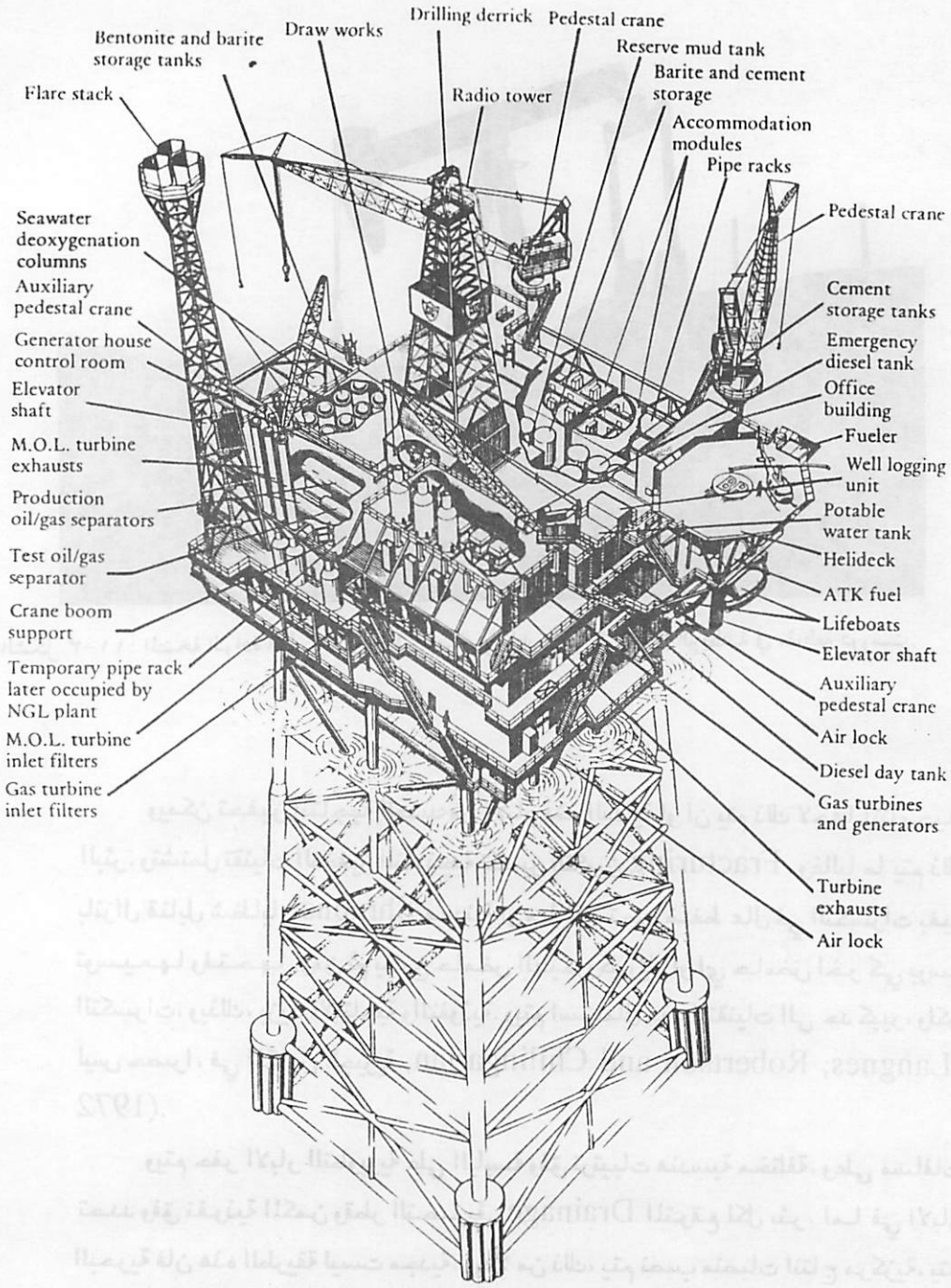
وكبديل عن ذلك، يتم استعمال مضخة مركزية طاردة تدار بالكهرباء في قعر التجويف. ان هذا الجهاز أكثر كفاءة من المضخة النوادة وأقل اثارة لمشاعر المهتمين بشؤون البيئة. وقد تكون تكلفة الصيانة أعلى بسبب المشاكل المتعلقة بالوصول اليها، كما تكون اعتماديتها أقل.



الشكل ٣-١١: المضخة النوادة الرأسية على حقل كيمرج بي التابع لشركة البترول البريطانية في مقاطعة دورست.

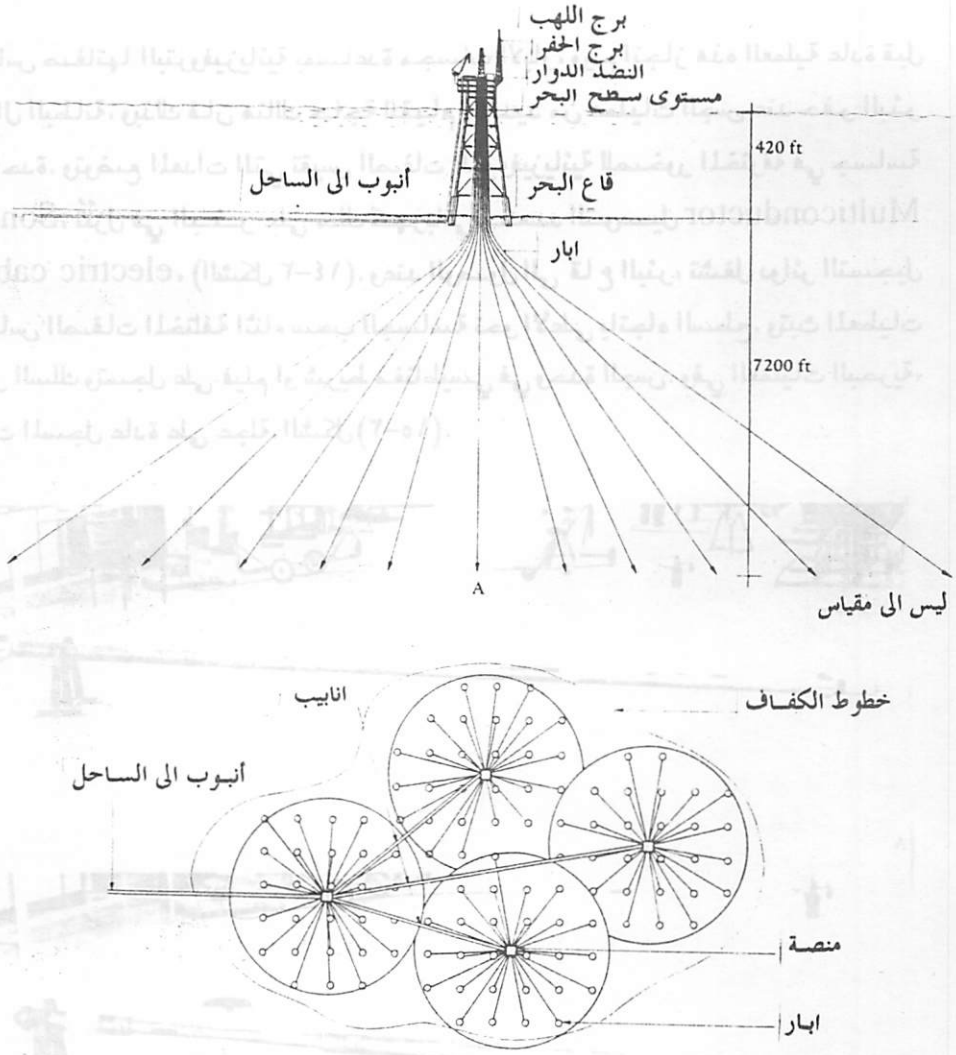
ويمكن تحفيز انتاجية العديد من الابار منذ البداية او ان يتم ذلك لاحقا اثناء حياة البئر. وتشتمل تقنيات التحفيز النموذجية تكسير التكوين Fracturing، وغالبا ما يتم ذلك بانزال قنابل شظايا Shrapnel معدنية او مطاطية تحت ضغط عال في التكسرات بغية توسيعها وفتحها. ومن ثم يضخ حامض الهيدروكلوريك او اي حامض اخر كي يوسع التكسرات، وبذلك، يزيد الانتاجية والنفوذية. ويتم استعمال هذه التقنيات الى حد كبير، ولكن ليس حصرا، في المكامن الجيرية (Langnes, Robertson and Chilingarian, 1972).

ويتم حفر الابار التطويرية على اليابسة وفق ترتيبات هندسية مختلفة، وعلى مسافات تحدد وفق نفوذية المكمن وقطر التصريف Drainage المتوقع لكل بئر. اما في الابار البحرية فان هذه الطريقة ليست مجدية. وبدلا من ذلك، يتم نصب منصات انتاج مركزية، يتم منها حفر العديد من الابار المائلة Deviated wells كي تخترق المكمن عند العمق والمسافة المطلوبين. (الشكلان ٣-١٢، ٣-١٣).



الشكل ٣ ١٢: أحدى منصات الانتاج في حقل فورتي التابع لشركة البترول البريطانية في بحر الشمال.

(Courtesy of British Petroleum).

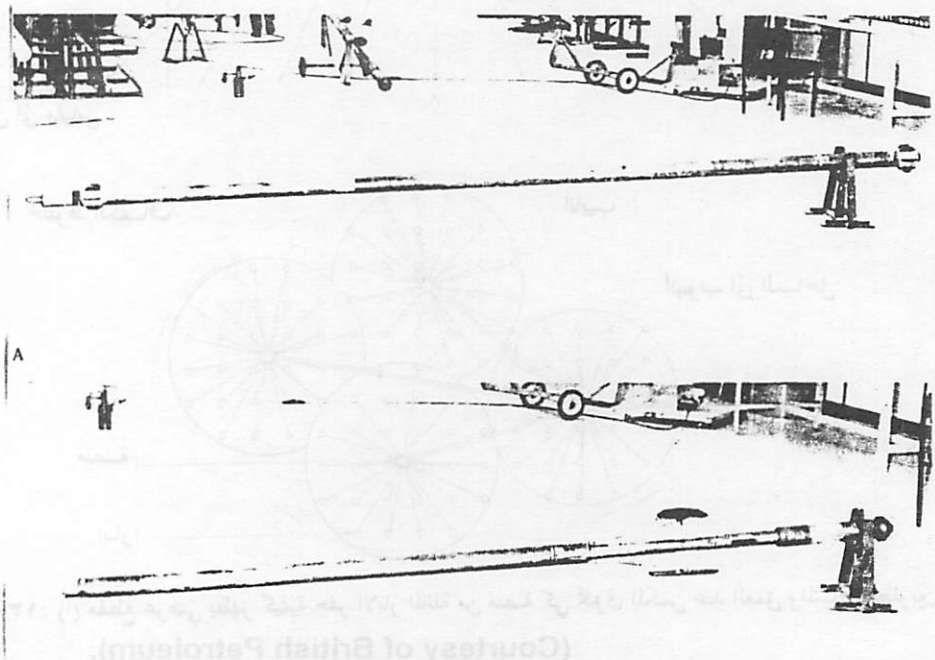


الشكل ٣-١٣: (أ) مقطع عرضي يظهر كيفية حفر الابار المائلة من منصة كي تخترق المكمن عند العمق والمسافة المطلوبين (ب).
(Courtesy of British Petroleum).

تقييم المكمن Formation Evaluation

تنتج الابار الكثير من المعلومات الجيولوجية والهندسية، وخصوصا عندما يتم استخراج اطوال مناسبة من اللباب. ولان اللباب عملية مكلفة، يتم حفر الابار عادة ببريمة دوارة اعتيادية، وبعد ذلك، يتم الحصول على معلومات اضافية عن التكوينات المخترقة، وذلك

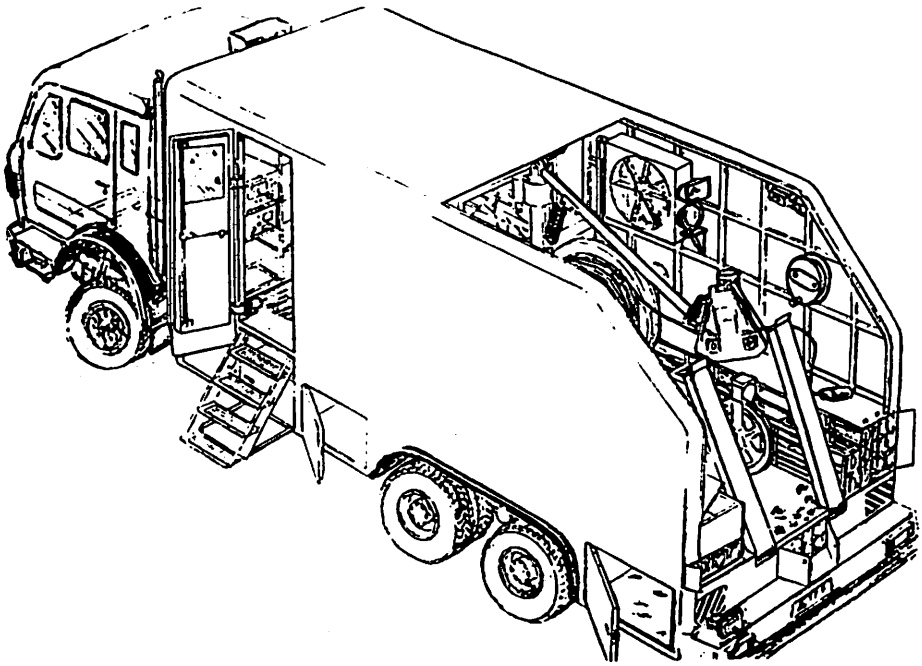
بقياس صفاتها البتروفيزيائية بمساعدة مجسات الابار، ويتم انجاز هذه العملية عادة قبل انزال البطانة، وبذلك فان هنالك حاجة للقيام بالعديد من عمليات الجس عند حفر البئر الواحدة. وتوضع المعدات التي تقيس الصفات الجيوفيزيائية للصخور المخترقة في جساسة Sonde، تُنزّل في البئر على سلك كهربائي متعدد التوصيل Multiconductor electric cable، (الشكل ٣-١٤). وعند الوصول الى قاع البئر، تشغل دوائر التسجيل وتقاس الصفات المختلفة اثناء سحب الجساسة نحو الأعلى باتجاه السطح. وتبث المعطيات عبر السلك وتسجل على فيلم او شريط مغناطيسي في وحدة الجس. وفي العمليات البحرية، يثبت المسجل عادة على عجلة، الشكل (٣-١٥).



الشكل ٣-١٤: مجسان يستعملان لقياس الصفات الكهربائية للتكوينات

(أ) معدات مقاومية الحث التي تشمل الجس التلقائي ومجس مقاومية أعتيادي قياس ١٦ لقياس Rxo ومجس حث عميق لقياس Rt.

(ب) مجس مسلط مجهريا يسجل الجهد التلقائي و Rxo وقطر البئر (Courtesy of Tesel Services Ltd.).



الشكل ٣-١٥: عجلة نموذجية لجس الابار على اليابسة.

(Courtesy of Tesel Services Ltd.).

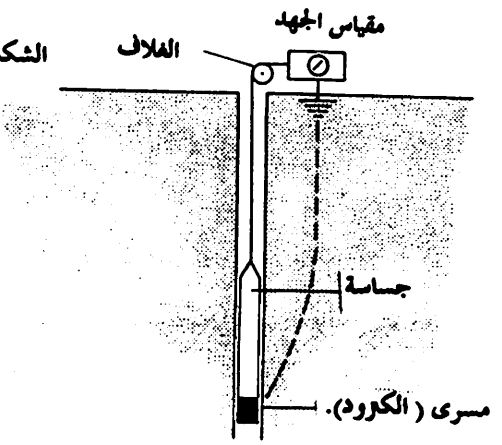
يمكن تسجيل العديد من معاملات الصخور، مثل مقاومية التكوين، والسرعة الصوتية والكثافة والاشعاعية. ويمكن تفسير المعطيات المسجلة لتحديد صخارية التكوينات المخترقة ومساميتها، وكذلك نوع وكمية الموائع (النفط والغاز والماء) داخل المسامات.

ان تقييم التكوينات موضوع كبير ومعقد. وتوظف العديد من شركات النفط محللي مجسات بصفة دائمة. ولا يُقصد من المراجعة التالية سوى أن تكون مجرد مقدمة للموضوع. وسوف يتم وصف أنواع المجسات المختلفة ومراجعة مباديء تحليل المجسات. ومن المعتاد ان ينضم جيولوجيو البترول الى مساقات عن تحليل المجسات في الأيام المبكرة من عملهم الوظيفي، وتوفر هذه عادة معلومات حديثة وتفصيلية عن المعدات والطرق التحليلية الجديدة.

المجسات الكهربائية Electric Logs

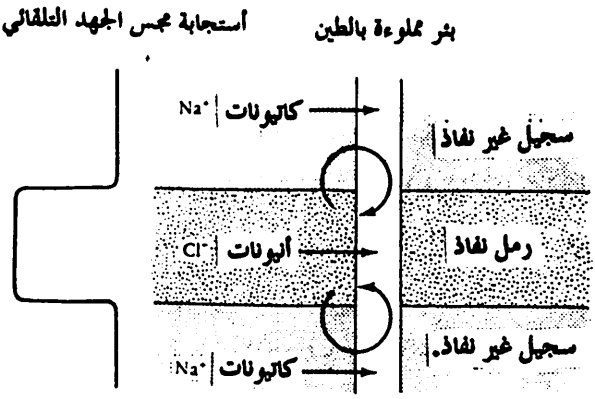
مجس الجهد التلقائي *The Spontaneous Potential, or S.P. Log*

يعد مجس الجهد التلقائي أو مجس الجهد الذاتي أقدم أنواع المجسات الجيوفيزيائية المستعملة (الشكل ٣-١٤). ولقد سُجِّل المجس الأول قبل أكثر من خمسين عاما. ويسجل مجس الجهد التلقائي الجهد الكهربائي الناشيء بين مسرى (الكترود) Electrodeموضوع في جساسة Sonde تسحب الى الأعلى في تجويف البئر، وبين مَسْرى مثبت عند سطح الأرض (الشكل ٣-١٦). وهو لا يمكن ان يستعمل الا في الابار المفتوحة (اي الابار غير المبطنة) المملوءة بالطين الموصل، شريطة توفر حد أدنى من النفوذية Permeability، اذ يعتمد مجس الجهد التلقائي بصورة مبدئية على الفرق في الملوحة بين طين الحفر وبين ماء التكوين.



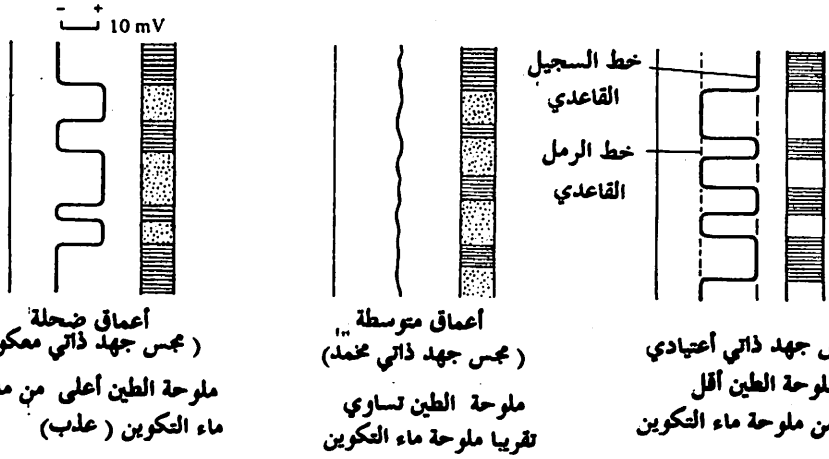
الشكل ٣-١٦ : الترتيبات الاساسية لمجس الجهد التلقائي.

وتنتج الشحنة الكهربائية لمجس الجهد التلقائي من انسياب الأيونات (أيونات الصوديوم والكلور بشكل رئيسي)، من محلول مركز الى محلول مخفف. وبشكل عام، يتم الانسياب من ماء التكوين المالح الى طين الحفر الأكثر عذوبة، (الشكل ٣-١٧). يرتبط هذا الجهد الكهربائي طبيعي الحدوث (والذي يقاس بالمليفولت) بالدرجة الأساسية بنفوذية التكوين. ان انحراف المجس عن خط السجيل القاعدي Shale baseline المحدد اعتباطيا يُدلل على وجود صخور رملية او صخور جيرية ذات مسامية. وفي أغلب الحالات، يكون هذا الانحراف، الذي يسمى بالانحراف الاعتيادي أو السالب Normal or



الشكل ٣-١٧: مرتسم يظهر الكيفية التي يسبب فيها الانتشار الايوني تأثير الجهد التلقائي. تظهر الاسهم الملتوية اتجاه أنسياب التيار الموجب . وتشير استجابة المجس الى الوضع الذي تكون فيه ملوحة ماء التكوين أكبر من ملوحة طين الحفر.

Negative الى يسار القاعدي، بينما يطلق على الانحراف الحاصل الى يمين الخط القاعدي اسم الانحراف المعكوس او الموجب Reversed or Positive، وهو يحدث عادة عندما يكون ماء التكوين أكثر عذوبة من الراشح الطيني Mud Filtrate. ويحدث انحراف ضعيف أو لا يحدث على الاطلاق في التكوينات غير النفاذة بشكل منتظم، أو حيثما تكون قيم ملوحة الطين وماء التكوين متقاربة، (الشكل ٣-١٨). وفي أغلب الحالات، وبوجود جهد تلقائي اعتيادي، يمكن استعمال المنحني للتمييز بين تبادل من طبقات السجيل غير النفاذ والحجر الرملي أو الصخور الجيرية النفاذة.



الشكل ٣-١٨: مجسات جهد تلقائي لانواع مختلفة من حالات الاختلاف بين ملوحة الطين وماء التكوين . أن مجسات الجهد التلقائي المعكوسة تكون نادرة جدا بينما تحدث مجسات الجهد التلقائي المخمدة حيثما يستعمل الطين الماء ويبدو الشكل المعتاد للمجس في القسم الاسفل من المجس.

لاحظ ان ليس هنالك قيما مطلقة absolute value لمجس الجهد التلقائي. ويقوم مهندس الجس بازاحة الخط القاعدي عندما يتزحزح المنحني تدريجا عبر المقياس اثناء عملية الجس، ولا يمكن مقارنة انحراف الجهد التلقائي كمياً في الابار المتجاورة. وعلى نحو مشابه، ورغم ان الانحرافات الموضعية على المنحنى تنتج من التغيرات الرأسية الحاصلة في النفوذية، الا انه لا يمكن الحصول على قياسات بالملي دراسي منها.

ان قيمة التيار، وبالتالي، مقدار الانحراف على منحنى الجس التلقائي، لا يرتبط بالنفوذية حسب، ولكن كذلك بالفرق الحاصل بين ملوحة طين الحفر وماء التكوين. وعلى نحو محدد، الفرق بين مقاومية المائعين. ولقد وجد رقميا ان:-

$$E=K \log \frac{Rmf}{Rw}$$

حيث ان :-

E = شحنة الجهد التلقائي (بالمليفولت).

K = ثابت، وهو يساوي $65+0.24T\ (C^{O})$ or $61+01.33T\ (F^{O})$

Rmf = مقاومية الراشح الطيني (بالاوم لكل متر).

Rw = مقاومية ماء التكوين (بالاوم لكل متر).

ويمكن العثور على تفاصيل هذه العلاقة في Wyllie (1957)، وفي الكتب الارشادية التي تطبعها شركات الجس المختلفة. لاحظ انه نتيجة لتغير مقاومية الماء المالح مع درجات الحرارة، فان من الضروري أخذ ذلك بنظر الاعتبار عند حل هذه المعادلة. ويمكن قياس مقاومية راشح طين الحفر عند السطح، او اذا كانت درجة حرارة قاع البئر معلومة، يمكن ان يعاد احتسابها عند عمق النطاق الذي يقاس عنده الجهد التلقائي. ويمكن عندئذ حل المعادلة، وبعد ذلك تحسب قيمة مقاومية ماء التكوين، وبذلك ملوحته ايضا.

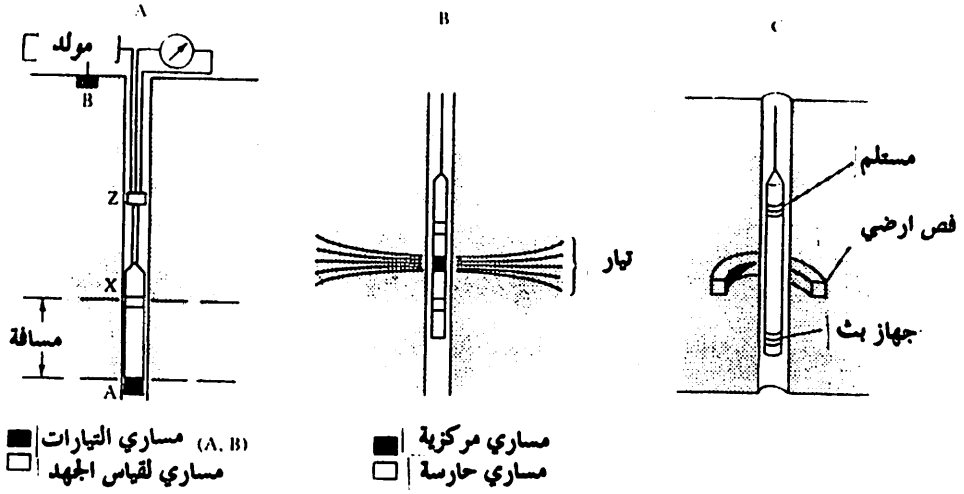
وباختصار يمكن استعمال مجس الجهد التلقائي في تحديد الانطقة المسامية، وبالتالي، يساعد في التشخيص الصخاري وفي المضاهاة Correlation بين الابار. كما يمكن استعمال مجس الجهد التلقائي في حساب Rw، أي مقاومية ماء التكوين. ويتحدد دور مجس الجهد التلقائي في حقيقة انه لا يمكن ان يستعمل في الابار المبطنة، كما انه يصبح

غير مؤثر عندما تكون مقاومية الراشح الطيني Rmf مكافئة تقريبا الى مقاومية الماء Rw، وهي حالة تحدث في الابار البحرية التي تستعمل فيها أطيان الحفر التي تكون قاعدتها من الماء المالح Saltwater-based drilling Mud.

مجسات المقاومية Resistivity Logs

هنالك ثلاث طرق رئيسية في الوقت الحاضر لقياس المقاومية الكهربائية لتكوين يتم اختراقه ببئر، وتشمل المجس الاعتيادي Normal Log، واللاتيروالوك laterolog، ومجس الحث Induction Log. وفي مجس المقاومية الاعتيادي او التقليدي Conventional يخلق فرق جهد كهربائي وانسياب تيار بين مسرى على جساسةومسرى عند السطح. ويستعمل زوج من المساري على الجساسة لقياس التغيرات الحاصلة في مقاومية التكوين أثناء رفع الجساسة الى السطح. ويمكن تغيير المسافة بين مسرى التيار ومسرى التسجيل كما هو ظاهر في الشكل (٣-١٩) (أعلى اليسار). والمسافات الثلاث التي تستعمل في العادة هي ١٦ إنج في (الاعتيادي القصير Short Normal) و ٦٤ إنج في (الاعتيادي الطويل Long Normal) و ٨ قدم و ٨ إنج في (العرضي الطويل Long Lateral). ويمكن انزالها بشكل عام على نحو متزامن مع مجس الجهد التلقائي.

ويمكن العثور على معدات المقاومية الاعتيادية، رغم انه قد تم ابدالها بمعدات أكثر جدة، في مجسات الابار القديمة. وبشكل عام، يتم الان استعمال مجس اللاتيروالوك او جارد لوك Guard log في الاطيان المالحة ذات المقاومية الواطئة. وفي هذا النوع من المنظومات، يصدر مسرى منفرد تيارا مسلطا Focused current لينساب افقيا الى التكوين. يتم هذا الانسياب الأفقي بوضع مسرين حارسين فوق مسرى التيار وتحته. وبموازنة تيار المسرى الحارس مع ذلك الصادر من المسرى المركزي المولد، تخترق جبهة من التيارات التكوين. ويقاس فوق الجهد الكهربائي للمسرى الحارس والمركزي عند رفع الجساسة نحو الأعلى ، كما هو ظاهر في الشكل (٣-١٩) (أعلى اليمين). ومثلما هو الحال مع مجسات المقاومية التقليدية، يمكن استعمال أنواع مختلفة من اللاتيروالوك لقياس المقاومية عند مسافات مختلفة من تجويف البئر. ويتم انجاز مثل هذا القياس بتغيير هندسية (ترتيب) Geometry المساري المسلطة.

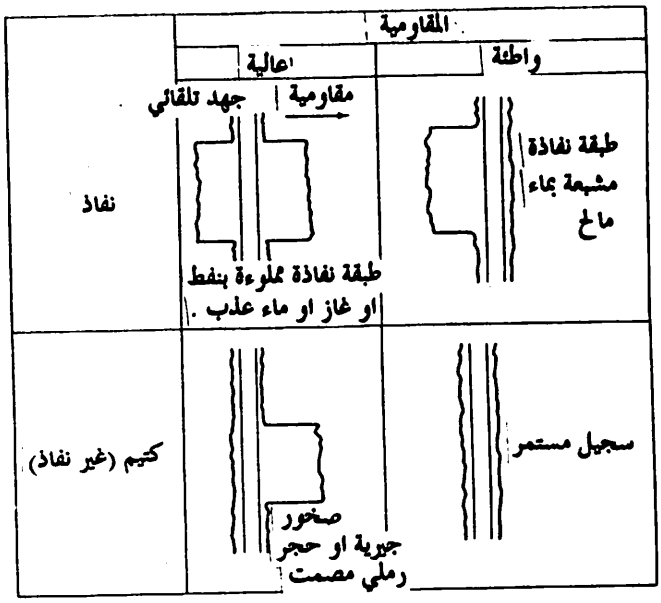


الشكل ٣-١٩ : (أعلى اليسار) ترتيب تخطيطي لمعدات جس المقاومة الاعتيادية . ويحدد الفرق في المسافة بين النقطتين (أ) و (X') البعد من تجويف البئر الذي تقاس فيه المقاومة. (أعلى اليمين) مرتسم لطريقة اللاتيرولوك . (في الاسفل) مرتسم لمبدأ الحث . للتفسير أنظر المتن.

وقدر تعلق الأمر بالأطيان ذات القاعدة المتكونة من الماء العذب او النفط، التي تتميز بمقاومية واطئة، يستعمل نوع ثالث من أجهزة القياس. ان هذا الجهاز هو مجس الحث، الذي يوضع فيه ملفي المرسل Transmitter والمستلم Receivor عند نهايتي الجسّاسة، ويستعملان لبث تيار متبادل ذي تردد عال. ويخلق هذا التيار حقلا مغناطيسيا، والذي يولد تيارات في التكوين. وتتذبذب هذه التيارات اعتمادا على مقاومية التكوين وتقاس عند الملف المستلم، كما هو ظاهر في الشكل (٣-١٩) (في الأسفل).

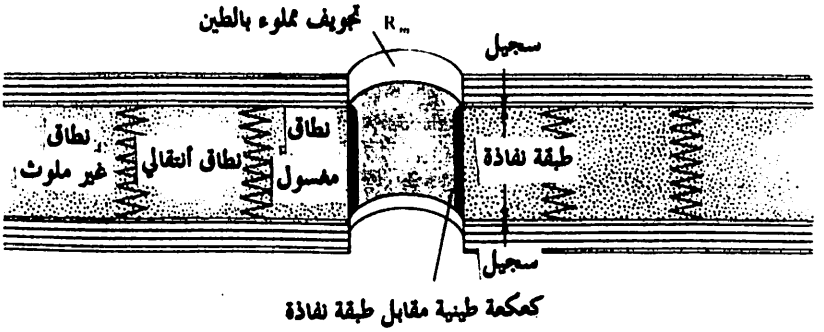
تتغاير مقاومية التكوين تغيّرا واسعا. فالصخور الصلبة تتميز بمقاومية عالية، وكذلك الحال مع الصخور المسامية المشبعة بالمياه العذبة او النفط او الغاز. اما السجيل، من جانب آخر، والتكوينات المسامية المشبعة بالماء المالح فانها تتميز بمقاومية واطئة. وعندما يتم انزال مجس الجهد التلقائي ومجسات المقاومية في الوقت نفسه، فان ذلك يوفر تفسيرا كميا للصخارية وطبيعة المونع الموجودة في المسامات، (الشكل ٣-٢٠).

ان احدى وظائف طين الحفر هي منع انسياب الموائع الى تجويف البئر من التكوينات النفاذة. وعند مثل هذه الأنطقة، تنشأ كعكة طينية Mud cake حول جدار البئر، وينضغط الراشح الطيني الى داخل التكوين. وبذلك تتم ازاحة المائع الأصلي الموجود في

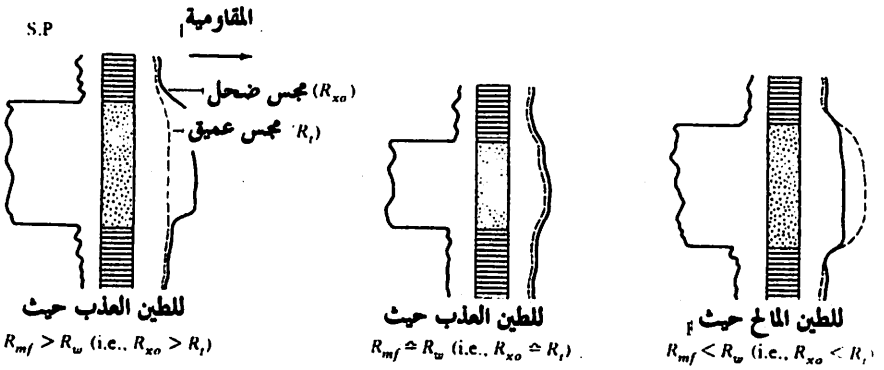


الشكل ٣-٢٠ : الاستجابات الاساسية الاربع لمجس الجهد التلقائي ومجسات المقاومية لطبقة بين طبقتين غير نفاذتين.

المسامات، والذي قد يكون ماء حبيسا Connate water، او نفطاً او غازا. وهكذا يخلق نطاق دائري ملوث Invaded، او مغسول Flushed حول تجويف البئر، تكون له مقاومية يرمز لها (Rxo)، والتي قد تكون مختلفة تماما عن مقاومية النطاق غير الملوث، التي يرمز لها بالرمز (Rt). وثمة نطاق انتقالي Transitional يفصل بين الاثنين. ان هذه المفاهيم موضحة في الشكل (٣-٢١). ومثلما لاحظنا مسبقا، ان الأنواع المختلفة من مجسات المقاومية لا تصمم لأنواع الطين المختلفة حسب، بل كذلك لقياس مقاومية كل من النطاق غير الملوث (Rt) والنطاق المغسول (Rxo). ويطلق على النوع الأخير اسم مجسات المقاومية المجهرية Microresistivity logs، والتي تتوفر منها أنواع مختلفة باسماء تجارية متنوعة. ويظهر الشكل (٣-٢٢) استجابات مجسات المقاومية الحقيقية العميقة (Rt) والمقاومية الضحلة (Rxo) في أنواع مختلفة من المكامن الحاملة للماء. لاحظ التقليد المتبع والمتمثل برسم المجس عميق الاختراق بخط متقطع Dashed line والمجس الضحل بخط متصل. وحيثما يكون التكوين عادم النفوذية، لا يكون هناك انفصال بين المجسين، لانه ليس ثمة نطاق مغسول. وبامكان جساسة منفردة ان تقيس على نحو متزامن مجس الجهد التلقائي وأكثر من نوع واحد من منحنيات المقاومية، الشكل (٣-١٤).

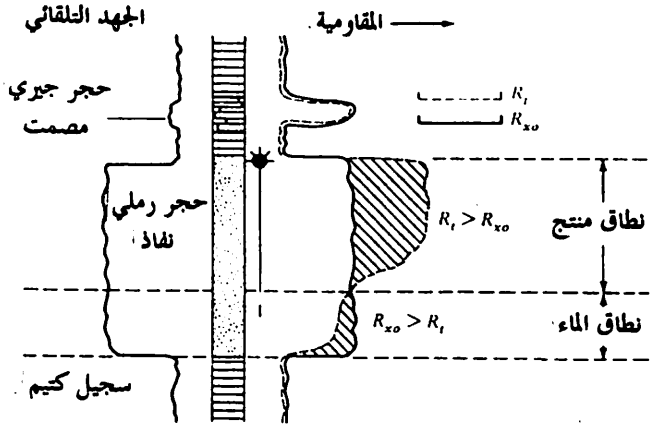


الشكل ٣-٢١ : الوضع حول تجويف بئر مجاور لطبقة نفاذة . مقاومية النطاق المغسول(R_{xo}) ، مقاومية النطاق غير الملوث (Rt) ومقاومية الراشح الطيني (Rmf) ومقاومية ماء التكوين (Rw) . (Courtesy of Schlumberger).



الشكل ٣-٢٢ : مجسات الجهد التلقائي والمقاومية تظهر أستجابات المكمن الحامل للماء لحالات فروق مختلفة بين مقاومية طين الحفر ومقاومية ماء التكوين .

ولقد ذكرنا مسبقا الطريقة التي يمكن بها تشخيص الإنطقة الحاملة للهايدروكاربونات من مجسات المقاومية. فحيثما يتم انزال مجسين معا، تكون الاستجابة كتلك الظاهرة في الشكل (٣-٢٣). بيد ان هذا الشكل، مع ذلك، ما هو الا تفسير نوعي Qualitative . اذ لا يمكن استعمال حد قطع Cutt-off لقيمة مقاومية مطلقة لتحديد التشبع النفطي.



الشكل ٣-٢٣ : مجسا الجهد التلقائي والمقاومية خلال مكمن هايدروكاربوني يظهر الاستجابات التلقائية للموقف الذي يكون فيه

الحسابات الكمية لتحديد التشبع الهايدروكاربوني

Quantitative Calculation of Hydrocarbon Saturation

بعد ان تم استعراض الأنواع المختلفة من مجسات المقاومية وتفسيراتها النوعية، فان من المناسب ان نشرح الحسابات الكمية للمحتوى الهايدروكاربوني لمكمن ما. وبشكل عام يتم تناول هذه الحسابات بطريقة معكوسة، وذلك بحساب التشبع المائي (Sw) اولا. والمكمن الذي تمتلأ مساماته كليا بالنفط او الغاز تشبع مائي يساوي صفراً، وان التشبع لمكمن خال من الهايدروكاربونات يبلغ ١٠٠ بالمائة او ١.

والان تخيل كتلة صخرية تم قياس مساميتها كما هو موضح في الشكل (٣-٢٤)، وعندئذ فأنّ :

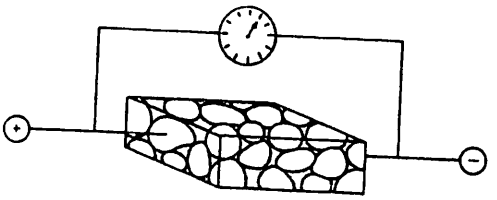
المقاومة (بالاوم) تساوي $\text{Resistance (ohm)} = R \times \frac{L}{A}$ [(ohm / (m)(m2)]

حيث ان :-

R = المقاومية (اوم /متر).

L = طول العينة الموصلة.

A= مساحة المقطع العرضي.



الشكل ٣-٢٤: مرتسم يوضح كيفية قياس مقاومية الصخرة.

لاحظ كذلك ايضا أن :-

$$\text{المقاومية} = \frac{}{\text{التوصيلية (موء mhos)}}$$

تتكون معظم المكامن من حبيبات معدنية ذات مقاومية عالية بطبيعتها، ولكن بينها ثمة مسامات مشبعة بموائع تتغاير توصيليتها بتغير التركيب المعدني ودرجة الحرارة. وبذلك فان هناك رقما مهما في تفسير المجسات هو معامل مقاومية التكوين الذي يرمز له (F) ويعرف على النحو التالي :-

$$\text{معامل مقاومية التكوين (F)} = \frac{Ro}{Rw}$$

حيث ان :- Ro= مقاومية الصخور عند تشبعها كليا (١٠٠ بالمئة) بماء ذي مقاومية R.

لاحظ ان مقاومية الماء Rw تتناقص مع الزيادة الحاصلة في الملوحة ودرجة الحرارة، مثلما هو الحال مع Ro. اما قيمة F فانها تتزايد مع تناقص المسامية.

ولقد اشتق Archie (1942) رقميا ما يعرف الان بصيغة اركي Archie Formula.

$$F = \frac{a}{\phi^m}$$

حيث ان :-

a = ثابت.

ϕ= المسامية.

m= معامل التسميت.

---

* الموء (معكوس الأوم) وحدة قياس التوصيلية الكهربائية (المترجم).

وتعتمد قيم a و m على معاملات التكوين التي يصعب قياسها، لكونها تتأثر بدرجة التشابك Tortuosities بين المسامات المترابطة مع بعضها.

ولقد تم ايجاد قيم مختلفة لكل من a و m رقميا بما يتناسب مع المكامن المختلفة.

فللرمال :-

$$F= \frac{0.81}{\phi^2}$$

وبالنسبة للتكوينات المنضغطة Compact (الصخور الجيرية على نحو خاص) :-

$$F= \frac{1}{\phi^2}$$

اما صيغة شركة شل للصخور الجيرية ذات المسامية الواطئة فهي :-

$$F=\frac{1}{\phi^m}$$

حيث تمثل $m= 1.87 + \frac{0.019}{\phi}$

اما معادلة همبل Humble Formula (المناسبة للتكوينات الهشة) فهي :-

$$F= \frac{0.62}{\phi^{2.15}}$$

ومرة أخرى وجد رقميا انه في التكوينات النظيفة الخالية من الاطيان، يمكن حساب التشبع المائي من المعادلة التالية :-

$$S_w^n=\frac{FRw}{Rt}$$

حيث تمثل n= أس التشبع Saturation Exponent (الذي يعوض عنه برقم ٢

عادة)، ولكن بالتعريف :-

$$F = \frac{Ro}{Rw}$$

أو

$$Ro = FRw$$

وبذلك :-

$$S_w^2 = \frac{Ro}{Rt}$$

أو

$$Sw = \frac{\sqrt{Ro}}{Rt}$$

وباستعمال مجس يقرأ المقاومية العميقة، يمكن قياس Rt في النطاق الذي يُشك بوجود النفط فيه، وقياس قيمة Ro في النطاق الذي يفترض بشكل معقول انه مشبع بالماء بدرجة ١٠٠ بالمئة. وبذلك يمكن قياس Sw خلال مكمن محتمل. ان هذه طريقة بسيطة، وهي لا تستعمل الا للمكامن النظيفة (اي الخالية من الاطيان). فاذا كان الملاط طينيا، تقل مقاومية المكمن، ويمكن عدم الانتباه الى وجود رمل سجيلي مشبع بالنفط. كما ان هذه الطريقة تفترض ان قيمة F تكون ثابتةً في كل من أنطقة الماء او النفط، وهو امر نادرا ما يكون صحيحا، ذلك لان النفط يمنع تكون التسميت، الذي يمكن ان يستمر في النطاق المائي الأسفل. (انظر صفحة ٣١١).

والتغلب على بعض من هذه المشاكل، يمكن استعمال طريقة النسبة Ratio Method، وتستند هذه النظرية على الفرض القائل ان :-

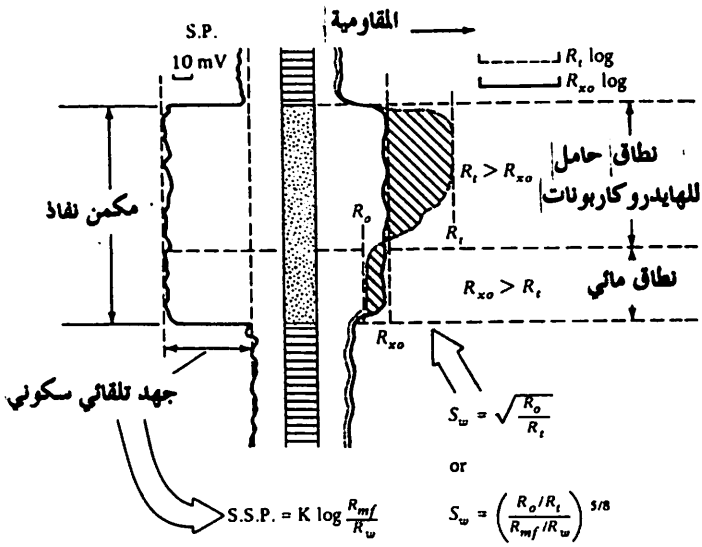
$$Sxo = S_w^{0.2}$$

ويمكن اشتقاق العلاقة التالية من هذه المعادلة :-

$$Sw = \left(\frac{Rxo / Rt}{Rmf / Rw} \right)^{5/8}$$

ويمكن قياس قيمة Rxo من مجس المايكروولوك Microlog ، و Rt من مجس

المقاومية العميقة، وRmf من طين الحفر عند السطح (وتصحح لدرجة حرارة النطاق المرغوب)، وRw من مجس الجهد التلقائي، كما هو ظاهر في الشكل (٣-٢٥).



الشكل ٣-٢٥: مجسا الجهد التلقائي والمقاومية لنطاق هايدروكاربوني يظهر موقع أخذ القراءات لحل حسابات S_w و R_w للتفسير أنظر المتن.

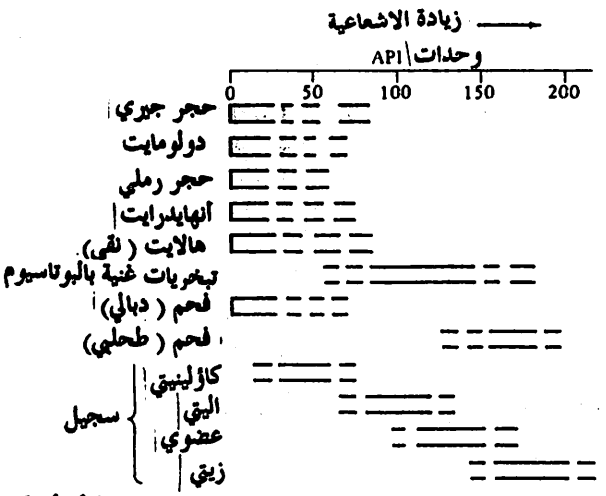
مجسات الاشعاعية Radioactivity logs

مجس أشعة غاما (ومجس قطر البئر - الكاليبر)

The Gamma-Ray Log (and Caliper

هنالك ثلاثة أنواع مستعملة من المجسات التي تقيس الاشعاعية، وهي أشعة غاما Gamma-ray والمجس النيوتروني Neutron ومجس الكثافة Density. ويستعمل مجس أشعة غاما او مجس غاما عدّادا ومَضانياً Scintillation counter لقياس الاشعاعية الطبيعية للتكوينات عندما تسحب الجساسة باتجاه أعلى تجويف البئر. ان العنصر الاشعاعي الرئيسي في الصخور هو البوتاسيوم، الذي يتواجد عادة في الأطيان الأليّتية Illitic clays وبكميات أقل في الفلسبار والمايكا والغلوكونايت. كما ان الزروكونيوم (في الزركون الحطامي Detrital) والمونزايت والمعادن الفوسفاتية المختلفة مشعة هي الأخرى وتحتوي المادة العضوية عادة على اليورانيوم والثوريوم، وبذلك فان

الصخور المولدة للنفط، والسجيل الزيتي Oil Shale والسابروبلايت Sapropelite والفحم الطحلبي هي مواد مشعة ايضا. في حين ان الفحم الدبالي Humic coal من جهة أخرى، ليس مشعا. وبذلك، فان مجس أشعة غاما لهو اداة هامة في التشخيص الصخاري. (الشكل ٣-٢٦). وتقاس الاشعاعية عادة بوحدات مؤسسة البترول الأمريكية API، ومن المعتاد ان ترسم على مقياس يتراوح بين ٠-١٠٠ او ٠-١٢٠ آي.بي.آي (API).



الشكل ٣-٢٦: مديات مجس أشعة غاما التقريبية للصخور المختلفة . لاحظ أن أية كميات صغيرة من الطين المشع , على سبيل المثال , يمكن أن تزيد قراءة أية صخارية.

ومن المتفق عليه ان تثبت قراءات غاما الطبيعية على العمود الأيسر من المجس بطريقة مشابهة، وفي بعض الأحيان على نحو متزامن مع مجس الجهد التلقائي. ويمكن استعمال مجس أشعة غاما بطريقة مشابهة لمجس الجهد التلقائي، بعد ان يتم رسم خط السجيل القاعدي. ان الانحراف الى يسار هذا الخط لا يدلل على وجود النفوذية، بل بالأحرى، على تغير من السجيل الى صخارية نظيفة، مثل الحجر الجيري او الرملي بشكل عام. وتتأثر قراءات غاما بقطر تجويف البئر، لذلك غالبا ما ينزل مع مجس قطر البئر، الذي هو جهاز ميكانيكي يقيس قطر تجويف البئر الانطقة التي يحصل فيها اتساع في التجويف نتيجة للغسل او الانهدام، وبذلك يؤدي الى انحراف أشعة غاما والاستجابات الجسية الأخرى المتوقعة. كما ان التجويف يمكن ان يصبح أقل من قطر البريمة حيثما يحصل التجسير Bridging. ويحدث التجسير اما نتيجة لانهدام جانب البئر وحدوث انهيار مبدئي، او تكون

كعكة طينية مقابل الانطقة المسامية. ورغم ان مجس أشعة غاما يتاثر بقطر تجويف البئر، الا انه يتمتع بميزة هامة هي ان بالامكان انزاله في الابار المبطنة. ومجس أشعة غاما مهم في تشخيص الصخارية وحساب حجم السجيل في المكمن ومضاهاة الابار المتجاورة.

جهاز تحليل طيف أشعة غاما الطبيعية

The Naturar Gamma-Ray Spectrometry Tool

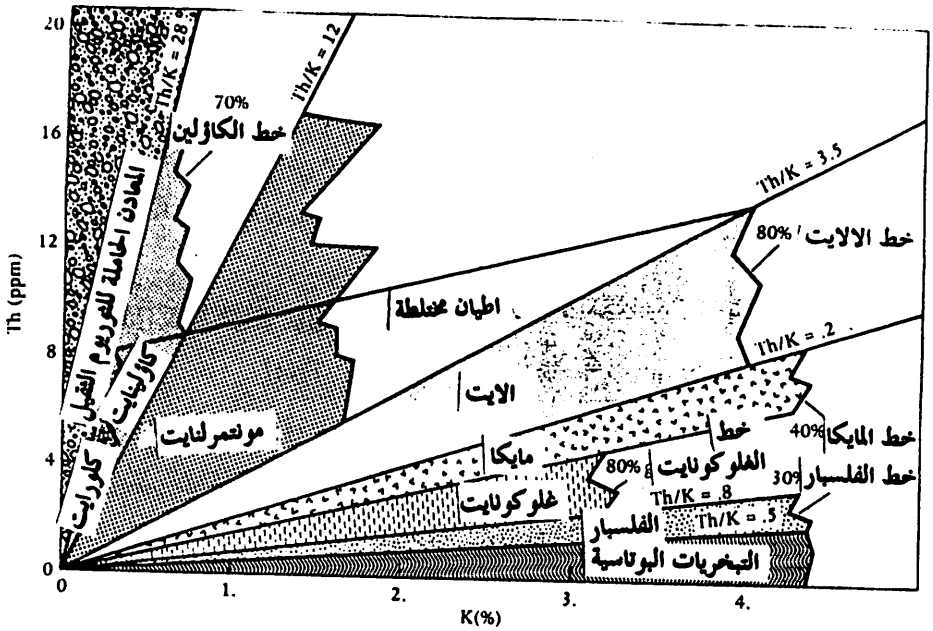
من بين نقاط القصور التي يتميز بها مجس أشعة غاما القياسي هو أنه غير قادر على التمييز بين المعادن المشعة المختلفة التي تسبب استجابة غاما. ان فقدان القدرة التمييزية هذه، يسبب مشكلة شديدة عندما يستعمل المجس لقياس المحتوى الطيني لمكمن يكون فيه الطين اما من نوع الكاؤلين Kaoline (الذي هو خال من البوتاسيوم وغير مشع)، أو عندما توجد معادن مشعة أخرى مثل المايكا أو الغلوكونايت أو الزركون أو المونزايت أو اليورانيوم الممتص على المادة العضوية.

فبتحليل طيف الطول الموجي للطاقة الصادرة من اشعاع غاما المقاس، فان جهاز تحليل طيف أشعة غاما المحسن يقيس وجود ثلاث سلاسل من التحليل الاشعاعي المألوفة، والتي تكون عناصرها المولدة هي الثوريوم واليورانيوم والبوتاسيوم (Hassan, Hossin and Combaz, 1976). ويمكن استعمال هذه المعلومات لأغراض التشخيص التفصيلي للمعادن، وخصوصا انها توفر امكانية دراسة أنواع الأطيان. وهناك مثال على مثل هذا الاستعمال موضح في الشكل (٣-٢٧)، حيث تظهر نسبة البوتاسيوم الى الثوريوم باتجاه تحول الفلسبار البوتاسي الى الاطيان الكاؤلينيتية.

ان جس طيف أشعة غاما مهم ايضا في تقييم الصخور المولدة، ذلك لان بمقدوره التمييز بين المعادن المشعة الحطامية التي تحتوي على البوتاسيوم والثوريوم والمادة العضوية التي تمتص اليورانيوم.

المجس النيوتروني *The Neutron Log*

ينتج المجس النيوتروني، مثلما يدلل الاسم، من استعمال جهاز يقوم بقصف Bombardment التكوين بالنيوترونات المتحررة من عنصري الأمريسيوم أو البريليوم



الشكل ٣-٢٧: مرتسم تقاطعي للثوريوم والبوتاسيوم يظهر كيفية تمييز الانواع المختلفة من الطين (وانواع المعادن المختلفة) بمجس أشعة غاما الطيفي . (Courtesy of Schlumberger) .

أو أي مصدر مشع آخر. ويؤدي القصف النيوتروني للصخور الى تحرير أشعة غاما بمقادير تتناسب مع محتواها الهيدروجيني ويسجل اشعاع غاما هذا بالجساسة. ويتواجد الهيدروجين في كل أنواع الموائع الموجودة في التكوين (النفط والغاز أو الماء) في المكمن، ولكن ليس في المعادن. وبذلك فان استجابة المجس النيوتروني ترتبط بالدرجة الأساسية مع المسامية. ومع ذلك، فان قطر تجويف البئر، والصخارية والهايدروكاربونات تؤثر جميعا على استجابة المجس النيوتروني. ويمكن التغلب على تأثير التغير الحاصل في قطر التجويف وذلك بانزال مجس قُطر البئر (الكاليبر) في الوقت نفسه مع مصحح آلي يتناسب مع قُطر البريمة. وفي الأيام المبكرة كان المجس النيوتروني يسجل بوحدات API. ولأنه دقيق القياس قدر تعلق الأمر بالمكامن النظيفة، فان المجس النيوتروني يقاس الآن بشكل مباشر بوحدات المسامية الجيرية أو الرملية (Limestone or sandstone units (LPU or SPU. ومثلما هو الأمر مع كل مجسات المسامية، يوضع منحني المجس الى يمين مقياس العمق، وتزدادُ المسامية الى اليسار. ولأن السجيل يحتوي دوما بعض الماء الأصري Bonded water فان المجس النيوتروني سوف يعطي دوما قراءات مسامية ظاهرية أعلى في المكامن

السجيلية من القيم الحقيقية. ان المحتوى الهيدروجيني في كل من النفط والماء يكاد أن يكون متساويا، ولكنه أقل من ذلك في الغاز الهايدروكاربوني. وبذلك، فان المجس النيوتروني قد يعطي قراءات مسامية واطئة جدا في المكامن الغازية. ومثلما هو واضح في الفقرة التالية، فان بالامكان تحويل هذه الحقيقة الى فائدة. ويمكن انزال المجس النيوتروني في الآبار المبطنة، ذلك لأن بمقدور القصف النيوتروني اختراق الفولاذ.

مجس الكثافة *Density Log*

يقيس النوع الثالث من معدات الاشعاعية كثافة التكوين باصدار أشعة غاما من الجهاز وتسجيل مقدار اشعاع غاما العائد من التكوين (الشكل ٣-٢٨). ولهذا السبب غالبا ما يطلق على هذا الجهاز اسم جهاز غاما-غاما Gamma-Gamma Tool. ويتم اجراء التصحيحات على نحو آلي داخل الجساسة من تأثير قطر تجويف البئر وسمك الكعكة الطينية ويمكن ربط قراءات اشعاع غاما المسجلة مع الكثافة الالكترونية للذرات في التكوين، والتي بدورها، ترتبط على نحو مباشر بالكثافة الكلية للتكوين. ان كثافة الصخور الكلية هي دالة للصخارية والمسامية، ويمكن حساب المسامية من المعادلة التالية:-

$$\text{Porosity} \quad (\phi) = \frac{e_{ma} - e_b}{e_{ma} - e_f}$$

حيث أن:

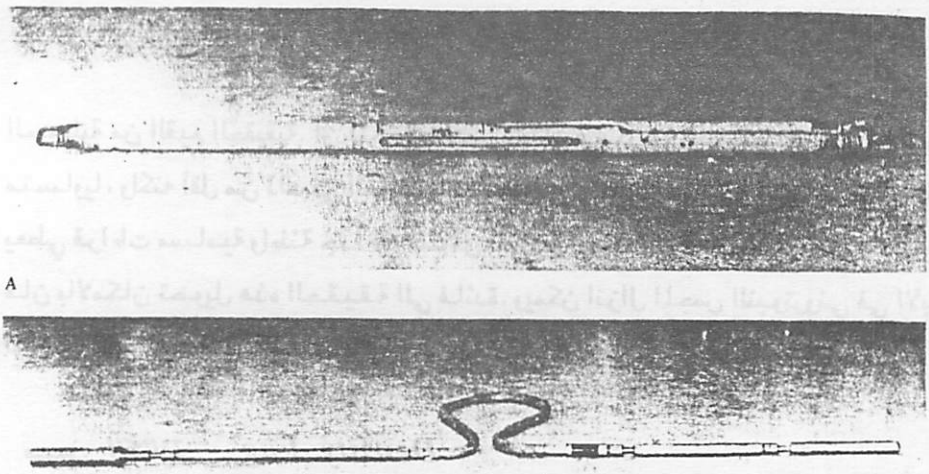
ema = كثافة الصخرة الجافة (بالغرام لكل سنتمتر مكعب).

eb = الكثافة الكلية المسجلة من المجس.

ef = كثافة المائع.

وتُؤخذ القيم التالية عادة للصخاريات المختلفة:-

الصخارية	الكثافة (غم/سم^3)
الحجر الرملي	٢.٦٥
الحجر الجيري	٢.٧١
الدولومايت	٢.٨٧



A

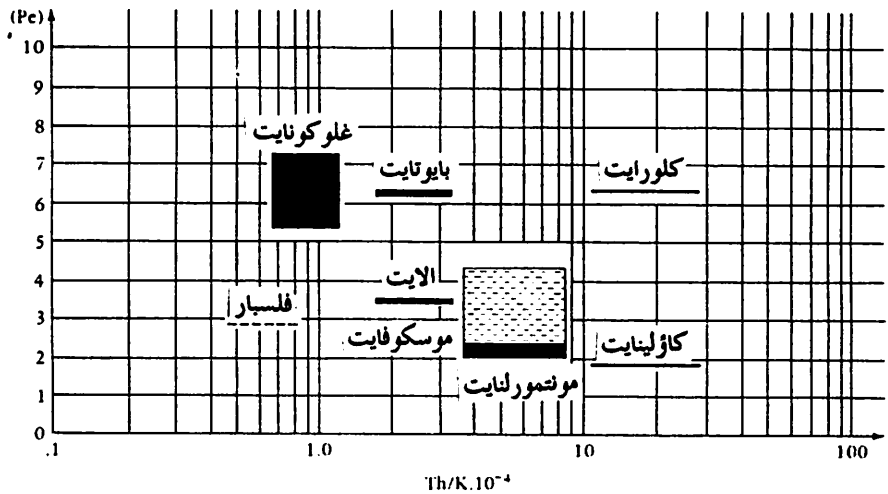
B

الشكل ٣-٢٨: (أ) جهاز كثافة يسجل مسامية التكوين ويقوم بتصحيحات تلقائية لقطر البئر وسمك الكعكة الطينية (ب) جساسة صوتية لقياس السرعة الصوتية للتكوين . (Courtesy of Tesel Services, Ltd.).

ان المائع الموجود في المسامات الموجودة قرب جدار التجويف هو الراشح الطيني بشكل عام. ولان للجهاز القدرة على التحري في الأعماق الضحلة فقط، و "لا يرى" الا ذلك الجزء من التكوين الذي تم احتلاله من قبل الراشح الناتج من طين الحفر، فانه يقرأ هذه القيمة كمكافيء للمسامية. وبذلك، فان كثافة المائع قد تتغير من ١ غم لكل سنتمتر مكعب بالنسبة لطين الحفر الذي تتكون قاعدته من الماء العذب الى ١,١ غم لكل سنتمتر مكعب للأطيان المالحة. كما يؤثر وجود السجيل على دقة المسامية المشتقة من الكثافة بالنسبة للمكمن. وكذلك، فان لبعض المعادن كثافات شاذة، وان شكلها على المجس قد يؤثر على قيم المسامية. ومن بين هذه المعادن المايكا والسدرايت والبايرايت. ولوجود النفط تأثير قليل على قيم المسامية، ولكن الغاز يخفض كثافة الصخرة، وبالتالي، يؤثر على المجس ليعطي قراءات مسامية مرتفعة. ويمكن تحويل هذا الى فائدة، عندما يترابط مع المعلومات المستقاة من المجس النيوتروني.

The lithodensity Log مجس الكثافة الصخارية

شملت التحسينات الحديثة التي أجريت على تقنيات جس الكثافة اضافة معامل جديد يتمثل في المقطع العرضي الضوئي الكهربائي Photoelectric Cross-section، الذي يرمز له عادة بالرمز Pe. ان Pe أقل اعتمادا على المسامية من كثافة التكوين، وهو مفيد على نحو خاص في تحليل تأثير المعادن الثقيلة على تفسير المجسات. وثمة تطبيق مفيد، على نحو خاص، يشتمل على ترابط Pe مع نسبة الثوريوم – البوتاسيوم من جهاز تحليل طيف أشعة غاما، مثلما هو ظاهر في الشكل (٣-٢٩).



الشكل ٣-٢٩: مرتسم تقاطعي يظهر تشخيص المعادن بأستعمال المجسات الطيفية ومجسات الكثافة الصخرية .

(Courtesy of Schlumberger).

Sonic or Acoustic Log المجس الصوتي

ثمة طريقة ثالثة لتحديد مسامية الصخور، تتمثل في قياس سرعتها الصوتية بالمجس الصوتي (الشكل ٣-٢٨). وفي هذه التقنية تحرر الجساسة من احدى نهايتيها سلسلة من القرقعات Clicks التي يتم تسجيل وقت الانتقال Interval Transit Time الخاص بها على مستلم واحد أو أكثر عند النهاية الأخرى. ان الموجات الصوتية تنتقل، بشكل عام، أسرع خلال التكوين من سرعتها في الطين الذي يملأ التجويف. ان وقت الانتقال (Δt)، الذي يقاس بالمايكروثانية لكل قدم، يمكن أن يستعمل في حساب المسامية

استنادا الى المعادلة التالية (Wyllie et al., 1958):-

$$\phi = \frac{\Delta t \log - \Delta t ma}{\Delta tf - \Delta t m}$$

حيث تمثل:

Δt_{log}= زمن الانتقال المسجل على المجس.

Δt_{ma}= سرعة الصخور عندما تكون (f= صفر).

Δt_f = سرعة المائع الموجود في المسامات.

ان أكثر أنواع السرع استعمالا هي على النحو التالي:-

الصخارية	السرعة	
(ع.س.م معدن نقي، (ϕ = صفر)	قدم/ثانية	ملي ثانية/قدم
الحجر الرملي (المرو)	١٨٠٠٠-٢١٠٠٠	٥٥.٥-٥١.٣
الحجر الجيري (الكالسايت)	٢١٠٠٠-٢٣٠٠٠	٤٧.٥
الحجر الدولوميتي (الدولومايت)	٢٣٠٠٠	٤٣.٥
الأنهايدرايت (كبريتات الكالسيوم)	٢٠٠٠٠	٥٠
الهالايت (كلوريد الصوديوم)	١٥٠٠٠	٦٧
المائع (طين عذب أو طين)	٥٣٠٠	١٨٩

ولا يمكن أن يستعمل المجس الصوتي الاّ في الآبار المفتوحة غير المبطنة. ويجب توليف الدارات Circuitry المستعملة مع المستلمات بعناية بحيث لا تنطلق عند حدوث ضوضاء مصطنعة Spurious Noise، ومع ذلك تلتقط أول الموجات الواصلة من الموجة الصوتية الأصلية. ويتخذ قدوم الأمواج وعودتها شكلا جسيا يطلق عليه التخطي الدائري، Cycle Skipping اذا كانت الحساسية Sensitivity غير كافية أو اذا كانت الموجة المرتدة ضعيفة جدا. وتنتج هذه الظاهرة من القدح Triggering على الجزء الأخير من نبض الموجة الصوتية، مما يتسبب في زمن انتقال طويل بشكل خاطيء، ويحدث التخطي الدائري

في التكوينات الأقل تراصاً Undercompacted، وخصوصا اذا كانت مملوءة بالغاز، وفي الأنطقة المتكسرة، وفي الأنطقة التي يتوسع فيها تجويف البئر ويتجاوز حجم البريمة، وبذلك فان طين الحفر في الآبار التي هي أوسع من القُطر الاعتيادي ينعكس قبل أن تدخل الاشارة التكوين. ان التطورات الحديثة في معدات الجس المسيطر عليها بالحاسوب، تقلل الى حد كبير مشكلة موازنة حساسية القدح، وهو أمر كان يتطلب في الماضي مراقبة متواصلة من قبل مهندس الجس.

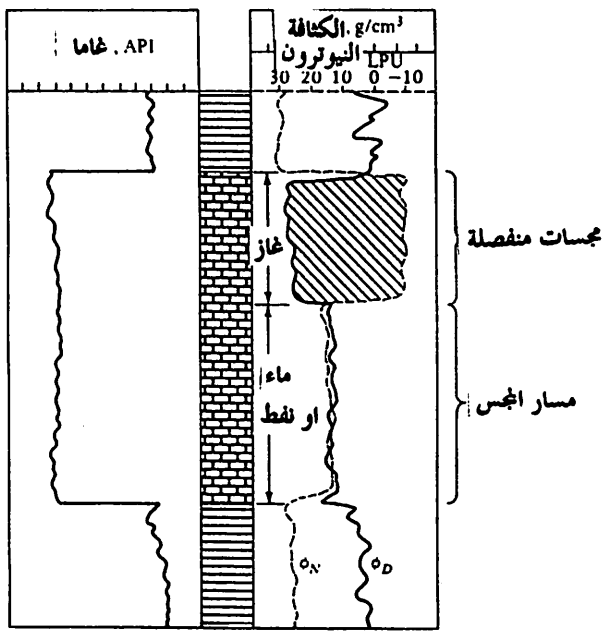
ان الطريقة الصوتية هي الأقل دقة من بين مجسات المسامية الثلاثة، لأنها الأكثر تأثرا بالصخارية. من جانب آخر، ولهذا السبب نفسه، فانها تُستعمل على نطاق واسع كوسيلة لتحديد الصخارية، وبالتالي في المضاهاة بين بئر وآخر. والمجس الصوتي كذلك مفيد جدا للجيوفيزيائيين لأنه يمكن أن يستعمل في تحديد سرع الأنطقة Interval Velocity الخاصة بالتكوينات، وبذلك يربط بين توقيتات العواكس الزلزالية وبين الصخور الحقيقية حول تجويف البئر بالتحويل من الزمن الى العمق بواسطة الحاسوب. ولهذا السبب فان المجس الصوتي يمكن أن يسجل أيضا وقت الانتقال الكلي بالملي ثواني على امتداد طوله من خلال عملية تكامل، وتُسجل النتيجة كسلسلة من النبضات Pips على امتداد طول المجس. ان العدد التراكمي لهذه النبضات الزمنية الثابتة يمكن أن يُعَد بين حدود التكوينات، وبالتالي فان سرع التكوينات يمكن أن تربط زمنيا وعمقيا.

مجسات المسامية المترابطة *Porosity Logs in Combination*

تتأثر مجسات المسامية الثلاثة بمواصفات التكوين الأخرى الى جانب المسامية، وبشكل ملحوظ، صخاريتها، ومحتواها الطيني، ووجود الغاز فيها. وعندما تستعمل مترابطة بدلا من استعمالها منفردة، تعطي المجسات دلائل أكثر دقة عن المسامية ويمكن استخلاص معلومات أكثر فائدة.

ولقد لاحظنا مسبقا أنه في أنطقة الغاز، يسجل المجس النيوتروني قيم مسامية واطئة، في حين يسجل مجس الكثافة قيما مرتفعة جدا. ان قيم المسامية المختلفة هذه يمكن أن تحوّل الى منفعة اذا ما تم توليف المجسين بحيث يقتفي أحدهما أثر الآخر. وفي الصخور الجيرية توالف المنحنيات بحيث أن صفر وحدة مسامية جيرية يعادل ٢.٧١ غم لكل

سنتمتر مكعب، وفي الحجر الرملي يعادل صفر وحدة مسامية رملية ٢.٦٥ غم لكل سنتمتر مكعب. فاذا تمت الموالفة، يدلل الانفصال بين المجسين على وجود الغاز، (الشكل ٣-٣٠). لاحظ أن هذه الظاهرة لا تنطبق الا على الانطقة المكمنية. ولسوف يُلاحظ الانفصال نفسه عادة في المقاطع السجيلية، ولكن باتجاه معاكس.

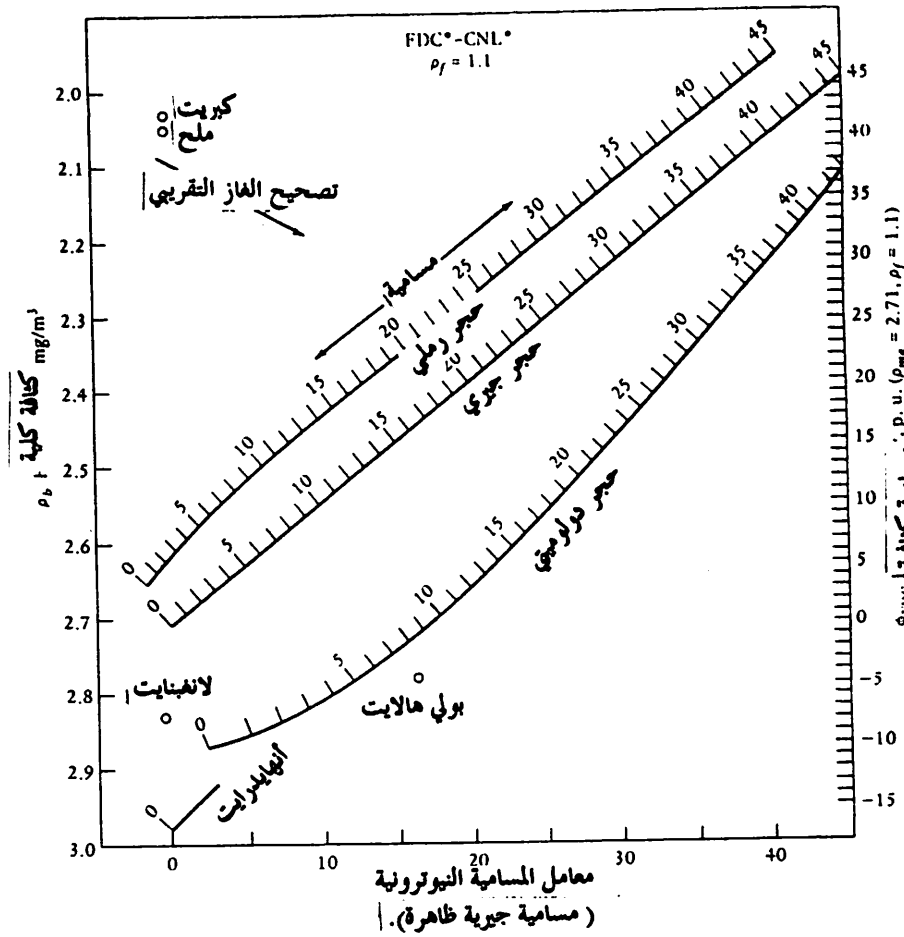


الشكل ٣-٣٠: مجس يظهر الكيفية التي يظهر فيها الانفصال بين مجسي الكثافة والنيوترون الفترات الحاملة للغاز.

ويمكن تحديد قيم دقيقة للمسامية وتشخيص الصخارية بالرسم التقاطعي لقراءات مجسي مسامية، وباستعمال كتب المرتسمات التي توفرها بعض شركات خدمات الجس. ويظهر الشكل (٣-٣١) أحد هذه المرتسمات البيانية من شركة شلمبرجر Schlumberger وهو يمثل مجس كثافة ومجس نيوتروني معوض Compensated سُجلا في تجويف مملوء بطين قاعدته من الماء العذب.

ان هذه المرتسمات مفيدة فقط بوجود الحجر الجيري والحجر الرملي والدولومايت، ولكنها غير دقيقة في حالة وجود الأطيان وبعض المعادن الشاذة الأخرى.

وثمة طريقة أكثر تعقيدا لتشخيص الصخارية يطلق عليها اسم M-N Cross-



الشكل ٣-٣١: مرتسم تقاطعي للكثافة – النيوترون لتحديد المسامية والصخارية . للتفسير أنظر المتن .

(Courtesy of Schlumberger).

Plot، أي مرتسم تشخيص الملاط (Burke et al., 1969). وتأخذ المعادلتين المستعملتين في هذه الطريقة قراءاتهما من ثلاثة مجسات مسامية وتزيل تأثير المسامية، وبذلك تبقي تأثير الصخارية حسب.

والتكوينات المشبعة بالماء:-

$$M=\frac{\Delta t_f-\Delta t}{e_b-e_f} \times 0.01$$

$$N=\frac{(\phi_N)f-\phi_N}{eb-ef}$$

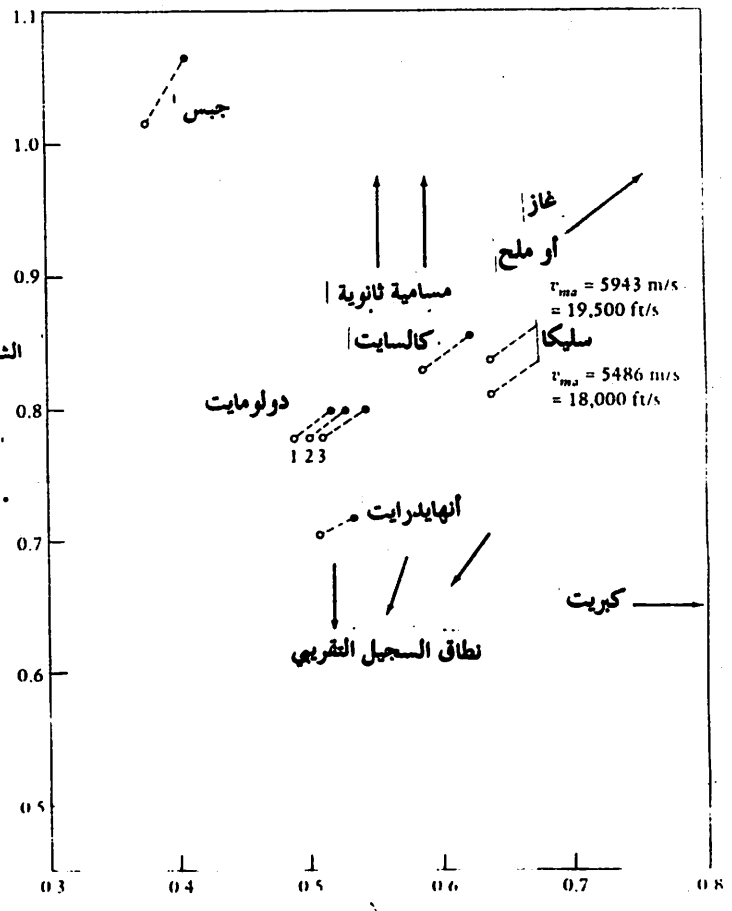
وللأطيان ذات القاعدة المكونة من الماء العذب فان:

Δt = ١٨٩ ملي ثانية لكل قدم.

ϕ_N = ١

ef = ١

وترسم قيم Mو N بعد ذلك على المرتسم الظاهر في الشكل (٣-٣٢). وهذه الطريقة أفضل من طريقة الرسم التقاطعي لقيم مجسين حسب، لأنها يمكن أن تميز بين نسب الصخور متعددة المعادن. لاحظ، مع ذلك، أن الحسابات ما تزال متأثرة بتأثير الغاز والطين والمعادن الشاذة.

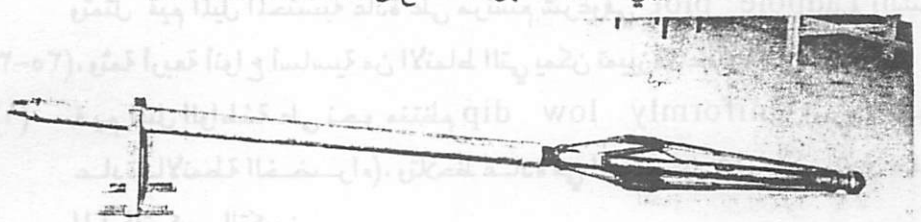


الشكل ٣-٣٢ : مرتسم تقاطعي نوع M-N لتشخيص أنواع الصخارية المعقدة . للتفسير انظر النص.

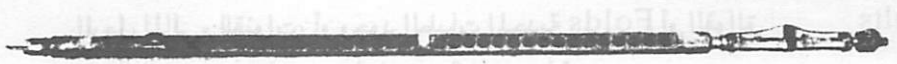
Courtesy of Schlumberger) .

مجس قياس الميل *The Dipmeter Log*

ان مجس مقياس الميل هو جهاز مصمم لقياس اتجاه ميل الطبقات المجاورة لتجويف البئر. وهو بالدرجة الأساسية مجس مقاومية مجهرية متعدد الأذرع Multiarm Microresistivity Log (الشكل ٣-٣٣). وتسجل ثلاثة أو أربعة أذرع مثبتة على نوابض سجلات مقاومية مجهرية منفصلة، بينما تسجل البوصلة Compass الموجودة داخل الجسّاسة اتجاه الجهاز وهو يسحب الى أعلى تجويف البئر. ويقوم الحاسوب بمضاهاة الانحرافات Deviation أو النبضات Kicks على المجسات ويحسب مقدار ميل الطبقات واتجاهه، ويخمن اعتمادية الميل Dip Reliability (الشكل ٣-٣٤)، ويمكن تطبيق العديد من برامج الحاسوب لهذا الغرض. وتقوم بعض البرامج بتسوية Smoothing الميل على فترات كبيرة، بينما يستعمل بعضها تقنيات احصائية للتمييز بينها وبين ظواهر التطبق الثانوية، بحيث لا تعرض الا اتجاهات الميل كبيرة المقاييس، وكلا النوعين مناسب لتحديد الميل التركيبي. ويحسب بعض البرامج الميل على فترات لا تتجاوز بضعة سنتمترات. ان هذا النوع من البرامج (بعد ازالة الميل التركيبي) يمكن أن يستعمل لاكتشاف الميل الترسيبي، مثل التطبق المتقاطع Cross-Bedding.

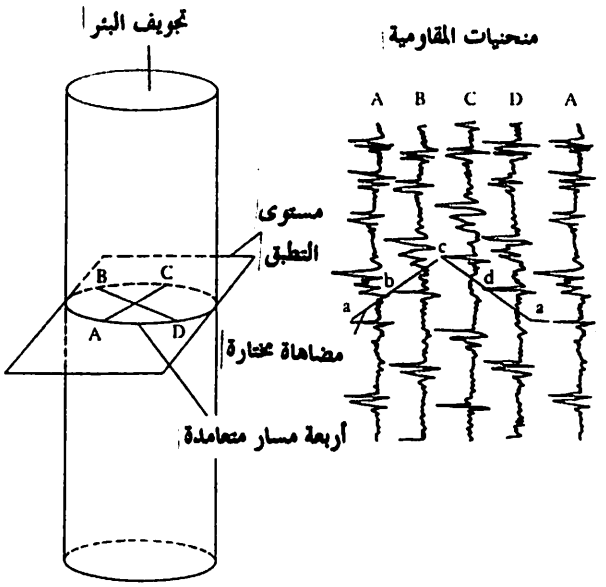


(أ) جساسة ثلاثية الاذرع لقياس الميل A



(ب) بندقية لباب جانبي . B

الشكل ٣-٣٣: يطلق هذه الجهاز رصاصات فولاذية أسطوانية التي ترتبط للبندقية بأسلاك قصيرة الى جانب البئر ، وبذلك يمكن تجميع عينات صخرية صغيرة من أعماق معروفة . (Courtesy of Tesel Services, Ltd.)



الشكل ٣-٣٤ : شكل تخطيطي يظهر كيفية أستعمال مجس الميل لحساب اتجاه الميل حول تجويف البئر.

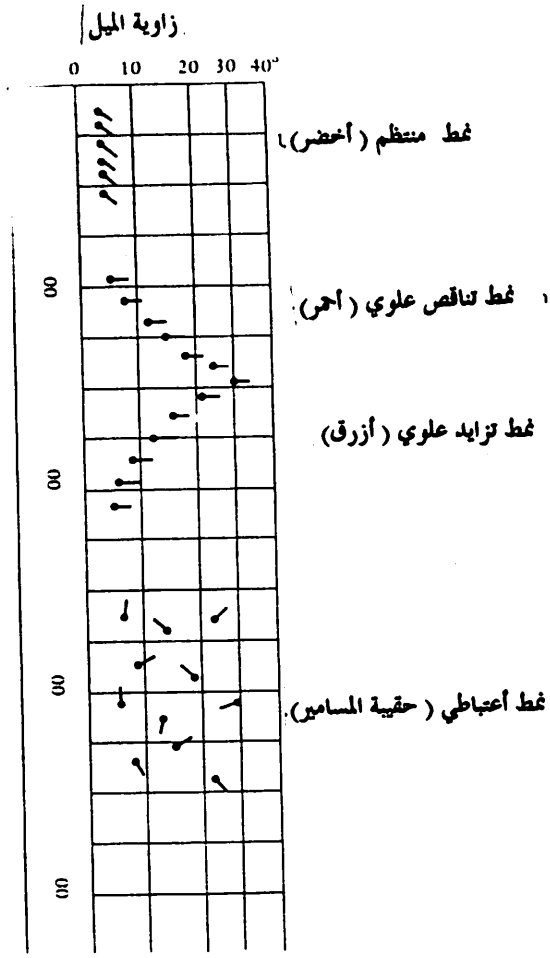
وتمثل قيم الميل المحتسبة عادة على مرتسم شرغوفي* Tadpole plot (الشكل ٣-٣٥)، وثمة أربعة أنواع أساسية من الأنماط التي يمكن تمييزها عادة :-

(١) قيم الميل الواطئة على نحو منتظم Uniformly low dip (ويرمز اليها عادة بالأنمطة الخضراء)، وتلاحظ عادة في السجيل Shale، وتدل على الميل التركيبي للتكوين.

(٢) تتابعات ميل متناقصة نحو الأعلى Upward declining dip sequences (ويرمز اليها عادة بالأنمطة الحمراء) وقد تنتج من انسدال Drape السجيل على الشعاب Reefs أو الحواجز الرملية Sandbars، أو في الرمل المالىء للقنوات، أو وجود الطيات المحدبة Folds أو الفوالق Faults أو سطوح عدم التوافق Unconformities.

(٣) تتابعات ميل متزايدة نحو الأعلى Upward increasing dip sequences، وقد تنتج من التقدم الرسوبي Sedimentary progrades في

* شبيه بيرقة الضفدع او العلجوم، جسم كروي وذيل طويل (المترجم).



الشكل ٣-٣٥: مرتسم شرغوفي لجس ميل تقليدي يظهر الانماط الاربعة الشائعة . ويمكن أنتاج كل نمط بظواهر جيولوجية مختلفة عديدة . يظهر رأس الدعموص مقدار الميل بينما يشير الذيل باتجاه الميل.

الشعاب والمراوح تحت البحرية، أو فصوص الدلتا Delta lobes. وقد ينتج هذا أيضا من الطيات المحدبة أو الفوالق أو سطوح عدم التوافق.

(٤) أنمطة اعتباطية تدعى (حقيبة المسامير Bag O" nail)، ويمكن أن تعكس ظروفا سيئة داخل البئر، أو قد تكون مهمة من الناحية الجيولوجية، مثل التكسرات Fractures أو الانهيارات Slumps أو تدل على وجود الحجر الحصوي (المدملك) Conglomerate أو الانسياب الحبيبي Grainflow.

يوفر مجس الميل الكثير من المعلومات الثمينة، بيد أنه لا يمكن أن يفسر على نحو مكتمل الا بتوفر المجسات الأخرى والمعطيات الجيولوجية. ولمزيد من المناقشات الاضافية أنظر الكتب الارشادية التي توزعها شركات خدمات الجس وكلا من:

[McDaniel (1968), Campell (1968), Gilreath and Maricelli (1964), Selley (1978a, 1978b) and Goetz et al. (1972), Jageler and Matuszak (1972)].

أخرى	الميل التركيبي والرسوبي	توقع الضغط	مسامية	هايدروكاربونات	صخارية	المجسات الكهربائية
حساب Rw والمحتوى السجيلي للتكوين التشخيص النوعي للنفوذية					١	الجهد التلقائي
حساب كل من Rxo, Rt , Sw		١		١	١	المقاومية
						المجسات الاشعاعية
حساب المحتوى السجيلي للطبقة والمحتوى العضوي					١	غاما
تشخيص الصخارية بالمرتسمات المتقاطعة			١ تأثير الغاز	١		النيوترون
			١	١		الكثافة
معايرة التكوينات مع المعطيات الزلزالية		١	١	١	١	الصوتي
	١					الميل

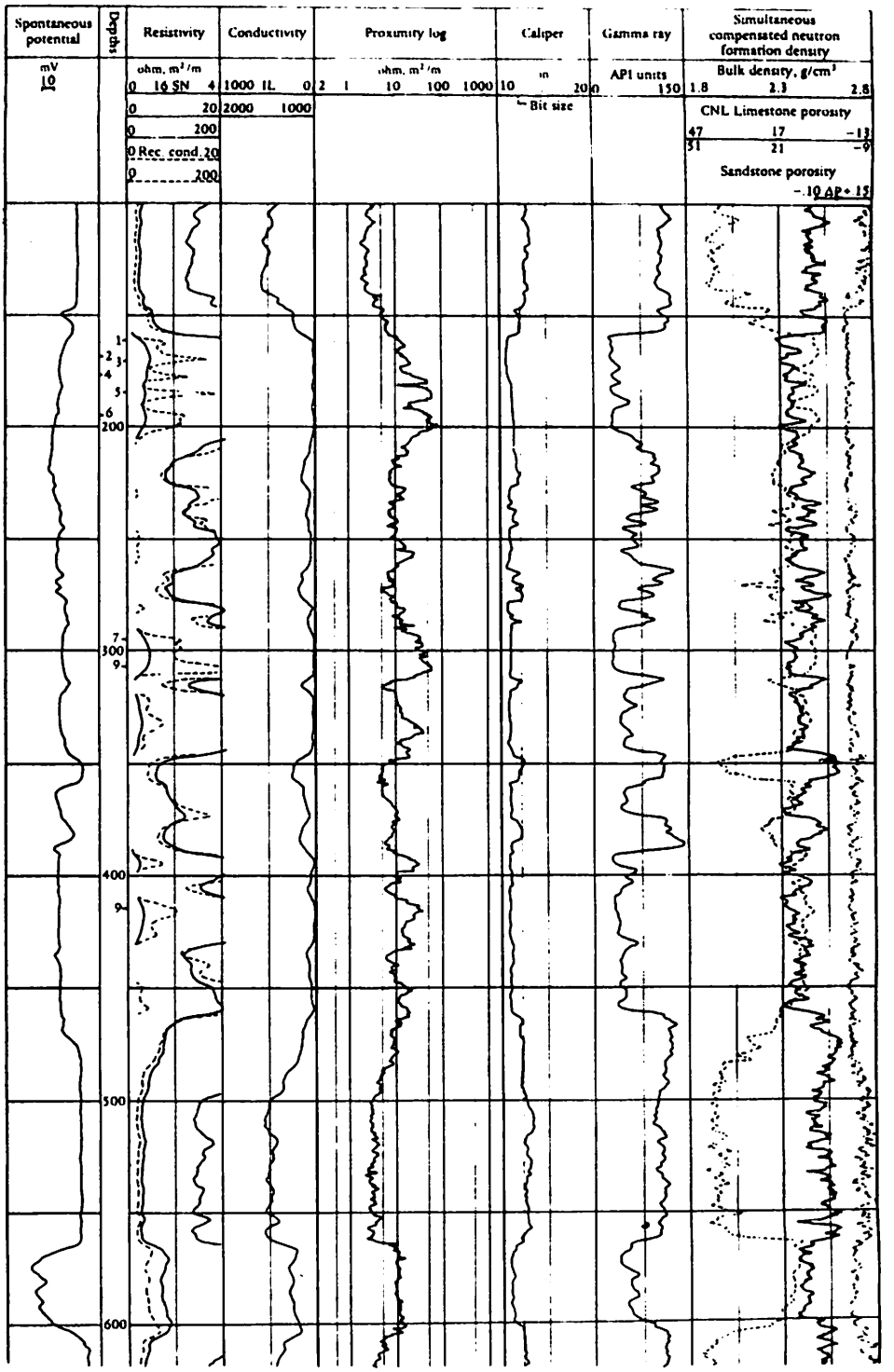
الشكل ٣-٣٦: خلاصة الانواع الرئيسية من مجسات الابار وتطبيقاتها الرئيسية.

استعمال المجسات في التحليل البتروفيزيائي

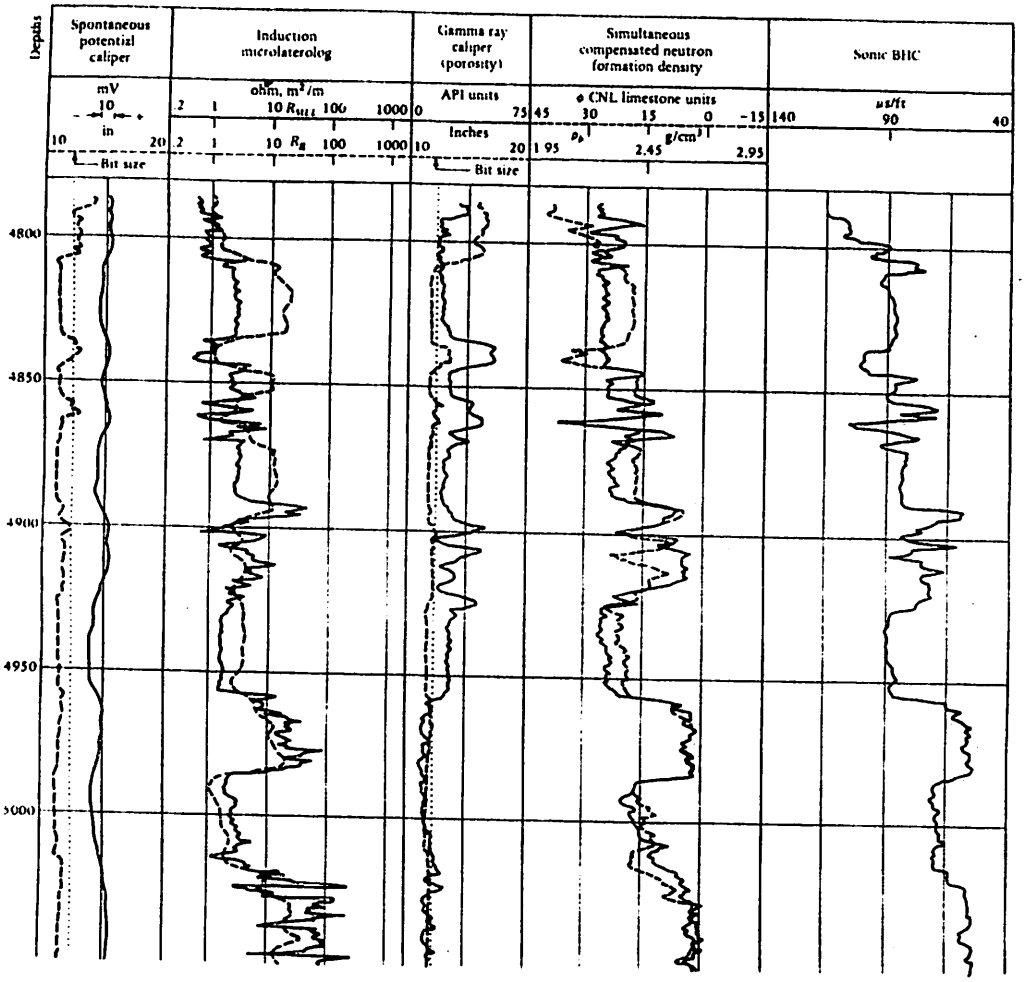
Uses of Logs in Petrophysical Analysis.

Summary *الخلاصة*

توفر الفقرة السابقة مراجعة قصيرة، وبالتالي، مبسطة لأنواع تقنيات الجس الرئيسية الأساسية في التنقيب عن الهايدروكاربونات وانتاجها. ويتم باستمرار طرح تقنيات حديثة، بيد أن المباديء الأساسية تبقى ثابتة. ويوفر الشكل (٣-٣٦) خلاصة للمجسات الجيوفيزيائية الأكثر شيوعا واستعمالاتها الرئيسية. كما يوفر الشكلان (٣-٣٧، ٣-٣٨) أمثلة نموذجية على أطقم Suites المجسات واستجاباتها لأجزاء من بئرين. ويمكن اجراء



الشكل ٣-٣٧: مجموعة نموذجية من المجسات خلال تتابع من الرمل - السجيل في دلتا نهر البيجر . لاحظ النطاق ذا المقاومة العالية الحامل للهايدروكاربونات بين العمقين ١٦٠ الى ٢١٠ قدم وما تحت ذلك . (Courtesy of Schlumberger)



الشكل ٣-٣٨: مجموعة نموذجية من المجسات خلال ترسبات الباليوسيني في بحر الشمال حيث يتحول الحجر الرملي والسجيل في الاعلى الى حجر جيري في الاسفل. وتدل المقاومية العالية في الرمال المحصورة بين الاعماق ٤٨٠٥- ٤٨٩٥ متر على وجود الهايدروكاربونات بينما يدل الانفصال بين مجسي الكثافة والنيوتروني على أن هذه الهايدروكاربونات يمكن أن تكون غازا.

(Courtesy of Schlumberger)

أغلب الحسابات المتعلقة بمقاومية الماء Rw والتشبع المائي Sw وما شابه ذلك، باستعمال الكتب الارشادية الخاصة بشركات خدمات الجس أو الحسّابات اليدوية. أما بالنسبة للحسابات الطويلة، فيفضل استعمال التفسيرات المعالجة بالحواسيب، والتي تعطي قراءات متواصلة للصخارية والمسامية والنسبة المئوية للموائع المختلفة (الشكل ٣-٣٩). ورغم أن مخرجات output الحاسوب تبدو مقنعة جدا، وخصوصا عندما تكون ملونة بألوان براقة، الا أننا يجب أن نتذكر الحكمة القديمة التي تقول «هراء داخل، هراء خارج».

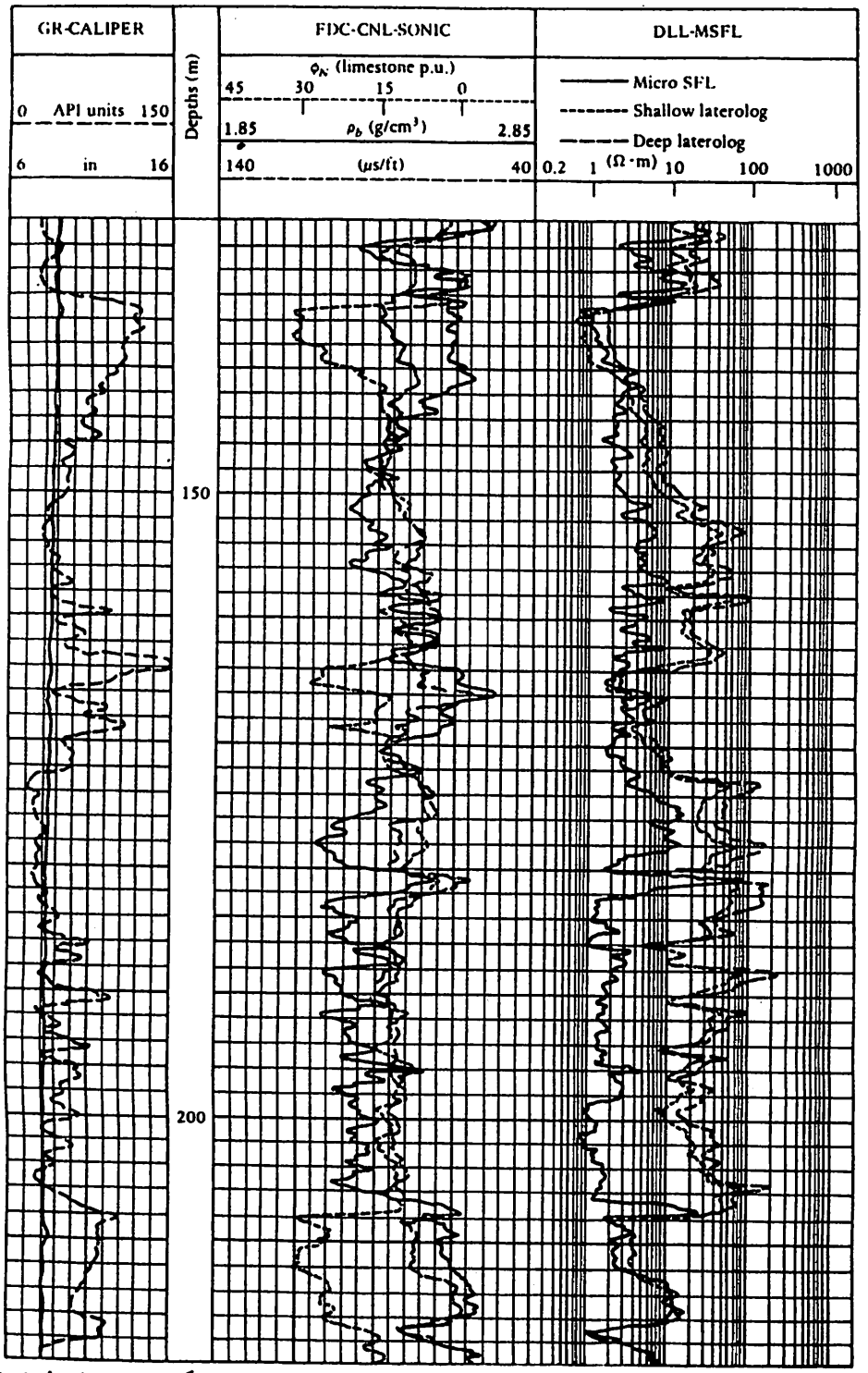
ان الفشل في تدقيق نوعيات المجسات الأصلية أو عدم ملاحظة وجود معادن غريبة أو شاذة سوف يلغي العملية بأكملها. فعلى سبيل المثال أن وجود الكثير من رقائق المايكا في الحجر الرملي سوف يقرأ على أنه "طين" على المجس مما يعطي قيمة كاذبة للمسامية.

تطبيق المجسات في تحليل السحنات

Applications of Logs in Facies Analysis

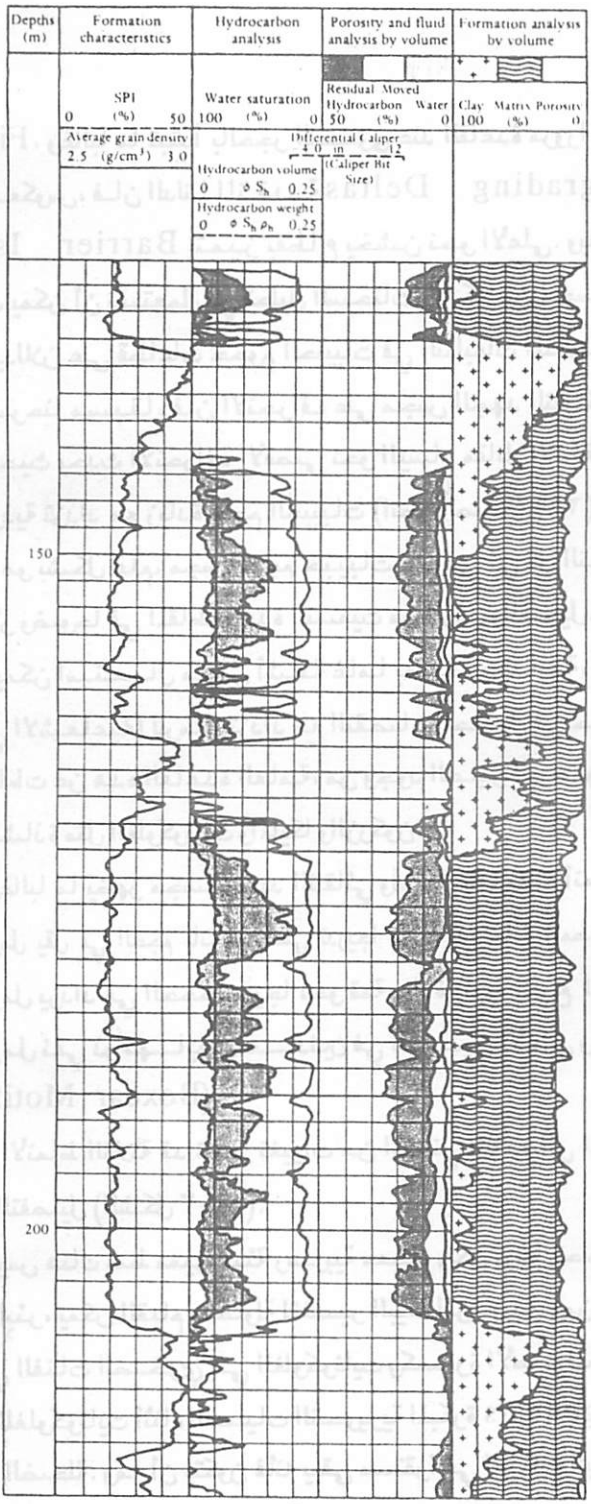
تطرقنا في الفصول السابقة الى مراجعة الأنواع المختلفة من المجسات الجيوفيزيائية، واستعمالاتها في تشخيص الصخارية والمسامية والتشبع الهايدروكاربوني، ولكن المجسات تستعمل بطرق أخرى. فعندما يتم تحديد طباقية Stratigraphy البئر، سواء أكانت تلك طباقية صخارية Lithostratigraphy أو طباقية احيائية Biostratigraphy(وهي التي تحدد فيها أنطقة المتحجرات)، يصبح ممكنا مضاهاة الآبار المجاورة طباقيا. كما تستعمل المجسات أيضا في تحديد السحنات والبيئة الرسوبية لمكمن ما. ومن هذه الدراسات يمكن توقع معمارية Geometry المكمن واتجاهه Orientation.

تحدد السحنات الجيرية وتستنتج بيئاتها الترسيبية الى حد كبير من الدراسات البتروغرافية. وتظهر المجسات الجيوفيزيائية توزيع المسامية في الصخور الجيرية، ولكن لأنها عموما ذات أصل ثانوي، فليس هناك سوى القليل من المضاهاة بين استجابة المجس والسحنات الأصلية (انظر الصفحة ٣١٢). ولكن في الحجر الرملي، فان المسامية ذات أصل أولي كليا تقريبا، وتظهر الدراسات التي تُجرى على الترسبات الحديثة أن لحجم الحبيبات قطاعات عمودية متميزة. فمن الملاحظ أن الترسبات القنوية تقل حجومها باتجاه الأعلى



الشكل ٣-٣٩ (أ) : مجموعة من المجسات في رمال الرياسي الحاملة للغاز من الجزائر. (الشكل مستمر على الصفحة الثانية).

١٠٠ (Courtesy of Schlumberger)



B

الشكل ٣-٣٩ (ب) : المجسات الظاهرة في (أ) وقد تم تفسيرها بالحاسوب.

(Courtesy of Schlumberger)

Fine up، وغالبا ما تبتدأ بالحجر الحصوي عند القاعدة مرورا بالرمل ثم الغرين والطين. وبشكل معكوس، فان الدلتا المتقدمة Prograding Deltas والجزر الحاجزية Barrier Islands تتميز بقطاع يخشن نحو الأعلى. وبذلك فان قطاعات حجوم الحبيبات يمكن أن تستعمل في تحليل السحنات. ان كلا من مجسي الجهد التلقائي وأشعة غاما قد يدللان على قطاعات حجوم الحبيبات في التتابعات المتكونة من الرمل-السجيل.

ومثلما شرحنا مسبقا، فان الانحراف على مجس الجهد التلقائي يتأثر موضعيا بتأثير النفوذية حيث يحدث الانحراف الأقصى نحو اليسار مقابل الأنطقة ذات النفوذية، ومع ذلك، فان النفوذية تزداد مع زيادة حجم الحبيبات (انظر الصفحة ٢٨٦). وبذلك، فان مجس الجهد التلقائي هو بشكل عام، مجس حجم حبيبات عمودي في كل التتابعات الرملية السجيلية ولكنه أكثر وضوحا في المقاطع جيدة التسميت من الرمل والسجيل.

ويمكن استعمال مجس أشعة غاما بطريقة مشابهة، وذلك لأن المحتوى الطيني (وبالتالي الاشعاعية) للرمال تزداد مع النقصان الحاصل في حجم الحبيبات. وقد تحدث الاستثناءات عن هذه القاعدة العامة، من وجود الحجر الحصوي الطيني ووجود المعادن المشعة الشاذة مثل الغلوكونايت والمايكا والزركون.

وغالبا ما يظهر مجسا الجهد التلقائي وأشعة غاما ثلاثة أنمطة أساسية وهي:-

(١) رمل يقل في الحجم باتجاه الأعلى تدريجا من قاعدة حادة (نمط الجرس Bell Motif).

(٢) رمل يزداد في الحجم تدريجا نحو قمة حادة (نمط القمع Funnel Motif)

(٣) رمل نقي ذو نهايتين حادتين في الحدين الأعلى والأسفل (نمط العربة Boxcar Motif).

ان هذه الأنماط الثلاثة قد تظهر تغيرات من المنحني الناعم الى المُحزّز Serrated عندما تدرس بالتفصيل (الشكل ٣-٤٠).

ليس هناك نمط مميز لبيئة رسوبية معينة، ولكن بربط تحليل قطاع المجس مع تركيب عينات البئر، يمكن القيام بمحاولة لتفسير البيئة الرسوبية. ومن المكونات التي يجب البحث عنها في الفتات الصخري هي الغلوكونايت وكسارة الأصداف والحطام الفحمي والمايكا. ويتكون الغلوكونايت أثناء العمليات التحويرية المبكرة Early diagenesis للترسبات البحرية الضحلة. وما أن يتكون فانه يبقى مستقرا في البيئات البحرية، ولكنه يمكن أن ينقل

نمط الجس			
حاجز تراجعي	قناة مدية	موجة رملية مدية	غلوكونايت مع كسارة الاصداف (بيئة بحرية ذات طاقة عالية)
مروحة تحت بحرية متقدمة	قناة تحت بحرية ملء عكورة	ملء انسياب حبيبي	غلوكونايت مع كسارة الاصداف والفتات الكاربونية والمايكا (بيئة مدفونة)
دلتا متقدمة او كريفاس سيلي	قناة نهرية او دلتائية	قناة دلتائية فرعية	فتات كاربونية مع مايكا (بيئة مدفونة)

الشكل ٣-٤٠: مرتسم يظهر أنماط حجم الحبيبات الثلاثة الشائعة التي يمكن تمييزها على مجسي الجهد الذاتي وغاما والكيفية التي يمكن بها من خلال ربط هذه الانماط مع عينات الابار يمكن تحديد البيئات الرسوبية للاجسام الرملية.

باتجاه اليابسة على الشواطيء أو باتجاه الحوض على مراوح البحر العميق. وسرعان ما يتأكسد الغلوكونايت في التكشفات، وبذلك فان الغلوكونايت المعاد الترسيب في دورة رسوبية ثانية لهو أمر غير معروف جوهريا. وهكذا فان وجود حبيبات الغلوكونايت في الحجر الرملي يدل على بيئة بحرية، رغم أن غيابه لا يدل على أي شيء.

تعيش اللافقريات الفارزة للأصداف في بيئات المياه العذبة والمياه البحرية، ولكن الرمل الحاوي على الأصداف يميل الى أن يكون بحريا أكثر من كونه قاريا. ويمكن تسهيل التشخيص اذا أمكن التعرف على وجود متحجرات بحرية معينة.

ويشمل الحطام الفحمي كلا من الفحم وكسارة النباتات والكيروجين. ان هذه المواد قد تكون بحرية أو قارية الأصل، ولكن حفظ المادة العضوية يدل بشكل عام على ترسيب سريع مع الحد الأدنى من اعادة الترسيب Reworking والأكسدة. وعلى نحو مشابه، فان وجود المايكا يدلل على ترسيب سريع سواء في البيئات البحرية أو القارية.

تسجل هذه المكونات الأربع عادة في وصف عيّنات الآبار، وبذلك فان وجودها

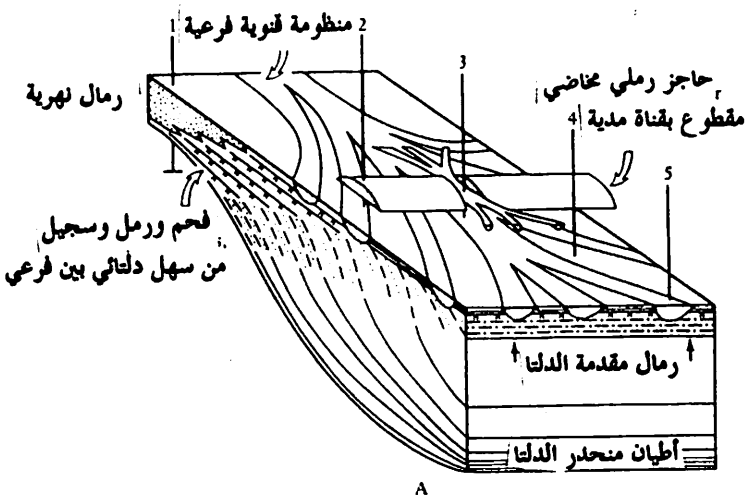
مصحوباً بدراسة أنماط الجس، (ولكن ليس غيابها) قد يساعد في تشخيص البيئة الرسوبية للأجسام الرملية، وبالتالي، توقع معمارية المكمن واتجاهه. (الشكل ٣-٤٠) ولقد اقترحت هذه التقنية للمرة الأولى من قبل (1976) Selley وأعيد تحسينها من قبل (Selley, 1978a, 1978b). وفي عالم مثالي، فان التحليل السحني يجب أن يعتمد على دراسة رسوبية وصخرية تفصيلية للباب، ولكن هذه الطريقة قد تستعمل لتوسيع التفسيرات لتشمل الآبار التي لا توجد فيها لباب أو في المناطق التي لا تتوفر فيها اللباب. ويظهر الشكلان (٣-٤١ و ٣-٤٢) نوعا من التحليل السحني الذي يمكن انتاجه من دمج معلومات الجس مع المعطيات الصخرية. وهناك أمثلة حقيقية من بعض هذه الأنماط موضحة في هذا الكتاب وخصوصا في الفصلين السادس والسابع.

الطرق الجيوفيزيائية في التنقيب Geophysical Methods of Exploration

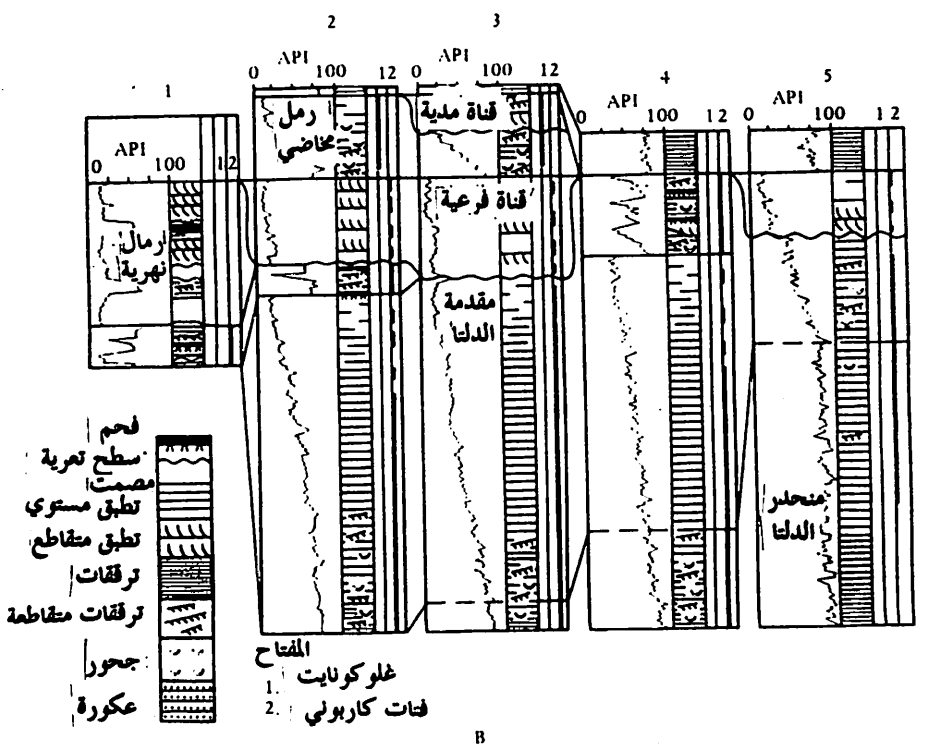
يتعلق التنقيب عن النفط الى حد كبير بالتفسير الجيولوجي للمعطيات الجيوفيزيائية، وخصوصا في المناطق البحرية. ويتوجب على جيولوجيّي البترول أن يكونوا على اطلاع كاف بالطرق الجيوفيزيائية. وطوال سنوات عديدة، كان هناك حاجز في الاتصال، في العديد من الشركات، بين المجموعتين اللتين كانتا توضعان اداريا في أقسام مختلفة. ولقد اختفى هذا الفصل الى حد كبير الآن، بظهور جيل جديد من المنقبين عن البترول - نصف جيولوجي ونصف مفسر زلزالي. ولكن لسوء الحظ حدث انقسام جديد ضمن المجموعة الجيوفيزيائية بين الرياضيين والفيزيائيين ومبرمجي الحاسبات (الذين يقومون بمعالجة المعطيات الزلزالية)، واؤلئك الذين يستعملون التصورات الجيولوجية في تفسير هذه المعلومات.

ان العرض التالي للطرق الجيوفيزيائية في التنقيب عن البترول لهو أساسي جدا. وهو ربما يكون كافيا لمهندسي البترول الذين يبحثون عن معرفة أصل الخرائط التي يعثر على الحقول من خلالها ويحتسب الاحتياطي بموجبها. أما بالنسبة لجيولوجيي البترول، فانه مجرد مقدمة، ويفترض أنها سوف تتبع بمساقات في الجيوفيزياء، وخلال الأيام الأولى من العمل في الصناعة البترولية غالبا ما يتبع بمساق في التفسيرات الزلزالية.

تستعمل ثلاث طرق جيوفيزيائية رئيسية في التنقيب عن البترول، وهي الطرق

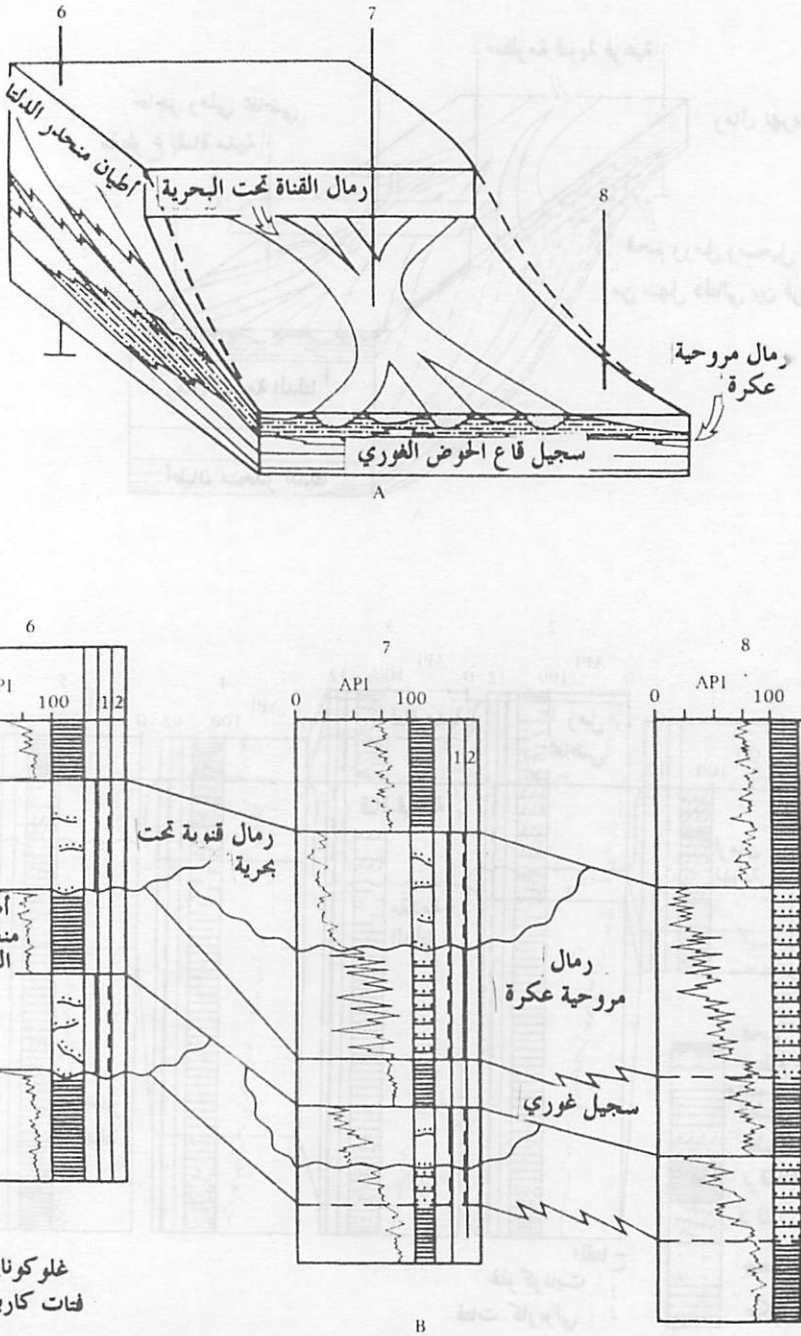


A



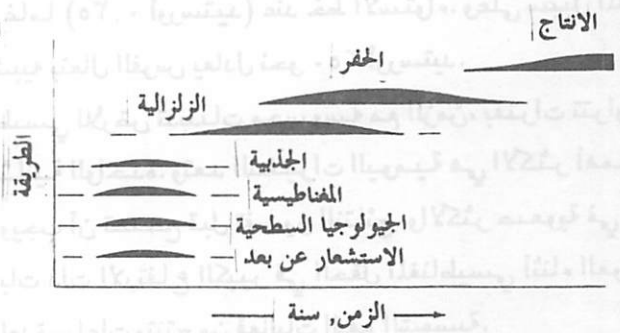
B

الشكل ٣-٤١: هندسية الجسم الرملي (أ) وأستجابة المجس (ب) التي يتوقع وجودها في تتابع دلتائي متقدم (من , Selley ١٩٧٨ تطبع بموافقة مسبقة).



الشكل ٣-٤٦: خارطة شذوذ بوجيه لجنوب بريطانيا الكبرى . قيم الخطوط الكنتورية بالملي غال (من Maroof , ١٩٧٤ تطبع بموافقة مسبقة).

المغناطيسية والجذبية والزلزالية. وتستعمل الطريقتين الأولى والثانية فقط في مراحل التنقيب السابقة للحفر. أما الطرق الزلزالية فانها تستعمل في مرحلتي التنقيب والتطوير، وهي الى حد كبير أكثر الطرق الثلاث أهمية، (الشكل ٣-٤٣).



الشكل ٣-٤٣: شكل تخطيطي يظهر توقيتات الطرق الجيوفيزيائية المختلفة المستعملة في التنقيب عن البترول.

المسوحات المغناطيسية Magnetic Surveying

الأسس النظرية Methodology

تولد الأرض حقلا مغناطيسيا، كما لو أنها مغناطيس ثنائي القطبين. وتخرج خطوط القوة من أحد القطبين المغناطيسيين وتلتقي عند القطب الآخر. ويتغاير ميل الحقل المغناطيسي من الوضع العمودي عند القطبين المغناطيسيين الى الوضع الأفقي عند خط الأستواء المغناطيسي Magnetic Equator. ويتحرك محور الأرض المغناطيسي في دائرة تتراوح زاويتها بين ١٠ الى ١٥ درجة قوسية من محور الدوران.

ويمكن التعبير عن القوة بين القطبين المغناطيسيين على النحو التالي:-

$$F=\frac{AM1M2}{r\,2}$$

حيث أن :-

A = ثابت، ويعادل وحدة واحدة فقط.

M 1 و M 2 = قوة القطبين المعنيين.

r = المسافة بين القطبين.

وتقاس قوة الحقل المغناطيسي اما بوحدات الغاما Gammas أووحدات الأورستيد

*Oersteds ويمثل الأورستيد الواحد الحقل المغناطيسي الذي يسلط قوة تعادل داينا واحدا على قطب مغناطيسي يعادل وحدة واحدة. تساوي الغاما ١٠ أس ناقص ٥ من الأورستيد. ويتغاير الحقل المغناطيسي للأرض من نحو ٦٠ ألف غاما (٠.٦ أورستيد) عند القطبين الى نحو ٣٥ ألف غاما (٠.٣٥ أورستيد) عند خط الاستواء. وعلى سبيل المقارنة، فان مغناطيس الأطفال الشبيه بنعال الفرس يعادل نحو ٣٥٠ أورستيد.

يظهر الحقل المغناطيسي للأرض تذبذبات محسوسة مع الزمن، بفترات تتراوح من مئات السنين الى نحو الثانية الواحدة. وتعد التغيرات اليومية هي الأكثر أهمية في المسوحات المغناطيسية، ويجب أن تصحح قبل تفسير النتائج. والأكثر صعوبة في الأخذ بنظر الاعتبار هي التذبذبات ذات الارتفاع الكبير في الحقل المغناطيسي أثناء العواصف المغناطيسية، التي تستمر لعدة ساعات وتنتج من فعاليات البقع الشمسية.

ان تمغنط Magnetization معدن مغناطيسي معين ترتبط عادة بقوة الحقل الاقليمية اعتمادا على العلاقة التالية:-

$$J=KH$$

حيث أن:-

J= هي شدة التمغنط، وتعرف بانها العزم المغناطيسي Magnetic Moment لوحدة حجمية واحدة من الصخرة.

K = الحساسية المغناطيسية للصخرة.

H = شدة الحقل المغناطيسي المسبب للمغناطيسية.

ان شدة التمغنط ربما تكون قد حصلت واحتفظت بزيادات في المراحل الأولى من تاريخ الصخور، وربما يجب أن تؤخذ بنظر الاعتبار في التفسير. والحساسية المغناطيسية للصخور تتغاير كثيرا، وهي بين أقل من 10^{-4} ** cm^3/emu للصخور الرسوبية وبين 10^{-3} الى 10^{-2} cm^3/emu للصخور النارية القاعدية الغنية بالحديد.

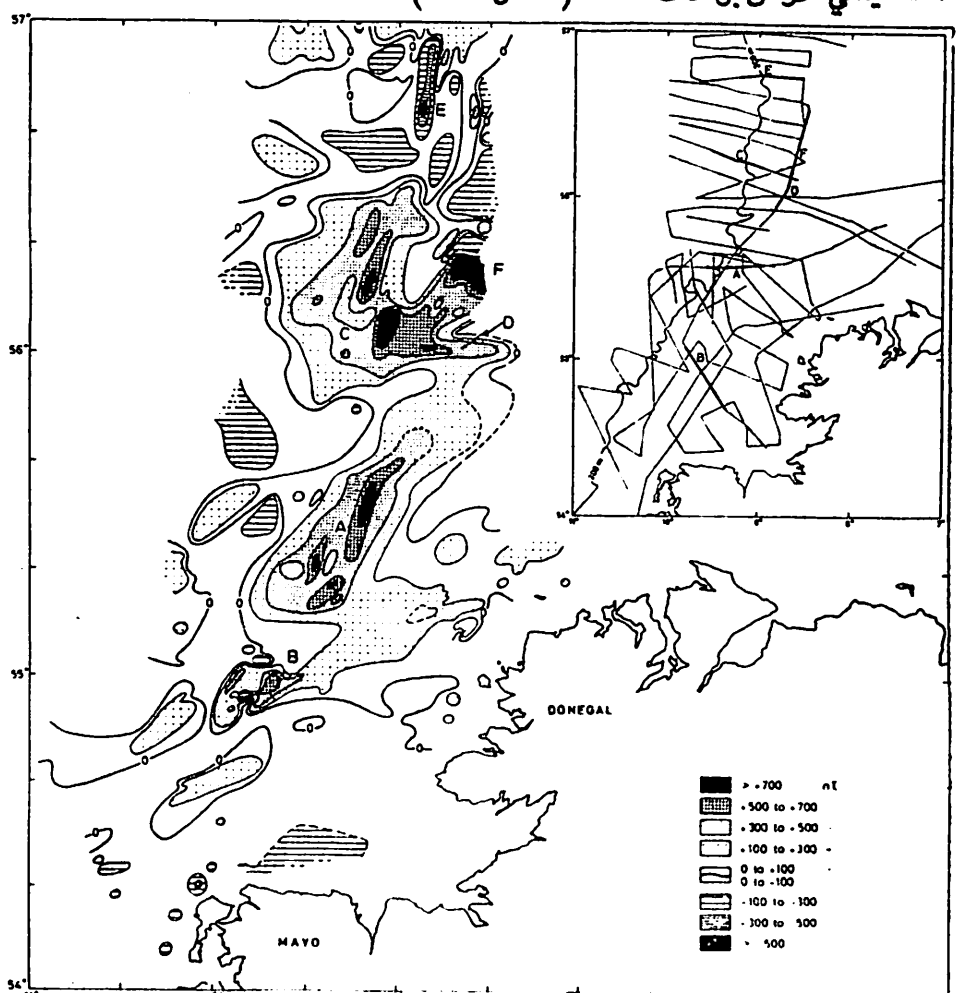
عند اية نقطة على سطح الأرض، يُعادل الحقل المغناطيسي الأرضي مجموع الحقل

---

* يقاس الحقل المغناطيسي الآن بوحدات النانو-تسلا (NT) أيضا (المترجم).

** وحدة كهرومغناطيسية واحدة.

الاقليمي والحقل الموضعي الناتج من الصخور المغناطيسية الموجودة في الجوار. ان الهدف من المسوحات المغناطيسية، هو بالتالي، قياس قوة الحقل فوق المنطقة المدروسة. ان التغيرات المسجلة في قوة الحقل سوف تعزى الى التغيرات في حقل الأرض المغناطيسي والى حجم الصخور التحتية والى حساسيتها المغناطيسية. ويمكن ازالة هذه التغيرات بالغاء التذبذبات من قبل محطة ثابتة في المنطقة الممسوحة، وتربطُ القيم المتبقية بعد ذلك، على نحو مباشر بالصخور التحتية. وتتغير المسافة بين خطوط المسح اعتمادا على طبيعة المسح والميزانية المرصودة له، ولكن الخطوط قد تكون متقاربة بحيث لا تتجاوز المسافة بينها ٢ كيلومترا، تقطعها خطوط تبلغ المسافة بينها نحو ١٠ كيلومترا. وبهذه الطريقة يمكن رسم خارطة مغناطيسية جوية Aeromagnetic map تمثل الشذوذ الحاصل في الحقل المغناطيسي للأرض بوحدات الغاما، (الشكل ٣-٤٤).



الشكل ٣-٤٤: خارطة الشدة المغناطيسية الكلية لسواحل شمال ايرلندا بينما يظهر موقع خطوط المسح في الخارطة المرفقة

التفسيرات *Interpretation*

تستعمل المسوحات المغناطيسية في المراحل المبكرة من التنقيب عن البترول. وتظهر خرائط الشواذ المغناطيسية Magnetic anomalies المظهر الجيولوجي العام للمنطقة، كما تظهر اتجاهات المرتفعات والمنخفضات في القاعدة. وقد تتميز الفوالق بالمسافات الكنتورية المتقاربة او التغيرات المفاجئة في اتجاهات الخطوط الكنتورية. وفي بعض الأحيان، قد تستعمل الخرائط لتمييز القاعدة Basement (أي الصخور النارية او المتحولة الخالية من المسامية) من الغطاء الرسوبي. ومع ذلك، فان مثل هذا التمييز ليس ممكنا الا عندما يكون هناك تناقض حاد بين الحساسية المغناطيسية للقاعدة والغطاء الرسوبي، وحيثما يكون ذلك التناقص مستمرا افقيا. ويمكن للمسح المغناطيسي ان يفسر ويمثل كخرائط عميقة الى القاعدة المغناطيسية Depth - to- magnetic basement map (الشكل ٣-٤٥). ويمكن القيام بهذا الاجراء عندما تتوفر معلومات قليلة من الابار عن سطح القاعدة، تساندها قياسات لمعاملات الصخور، وبعض المعرفة عن الجيولوجيا الاقليمية. كما ان خرائط الشذوذ المغناطيسي مفيدة في التنقيب عن البترول، لانها تحدد اماكن تواجد السدادات النارية Igneous plugs، والاقتحامات Intrusives او الانسيابات او الطفوح البركانية Lava Flows، وهي مناطق يجب تجنبها اثناء البحث عن الهايدروكاربونات.

والخلاصة ان المسوحات المغناطيسية طريقة سريعة ومناسبة من ناحية التكلفة لتحديد معمارية الأحواض الواسعة، بيد انها نادرا ما تستعمل في تحديد المناطق ذات الاحتمالات البترولية التي يمكن حفرها.

المسوحات الجذبية Gravity Surveying

الأسس النظرية *Methodology*

اعتمادا على قانون نيوتن للجذب العام فان :-

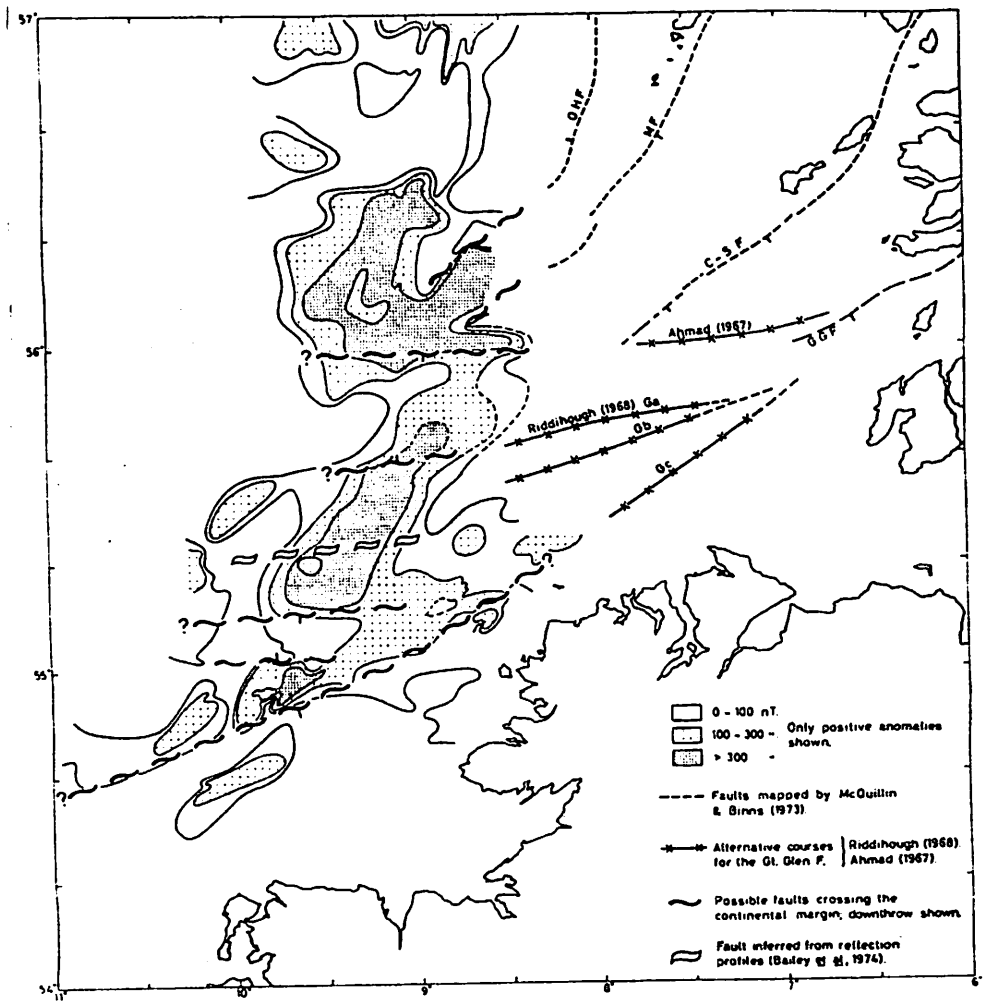
$$F = \frac{GM_1M_2}{d^2}$$

حيث ان F هي القوة الجذبية بين كتلتين نقطيتين، هما M_1 و M_2.

d = المسافة بين M_1 و M_2.

c = الثابت الجذبي الكوني. (الذي يساوي عادة 6.670×10^{-8} or $6.670 \times 10^{-11} m^3/(Kg)(S^2)$

(in cgs units).



الشكل ٣-٤٥: تفسير خارطة الشدة المغناطيسية الظاهرة في الشكل ٣-٤٤ تظهر المواقع المحتملة للفوالق . (من R. J. Bailey et al., ١٩٧٥ تطبع بموافقة مسبقة).

واستنادا الى قانون نيوتن الثاني في الحركة، يمكن التعبير عن التعجيل (a) Accelartion، عندما تنجذب كتلة نقطية هي M_1 الى كتلة نقطية أخرى هي M_2، وفق المعادلة التالية :-

$$a = \frac{F}{M_1} = \frac{GM_2}{r^2}$$

فاذا اعتبرنا (M_2) على انها كتلة الأرض، وان (r) هو قطرها، عندها فان (a) تمثل التعجيل الجذبي على سطح الأرض. ولو كانت الأرض كرة مكتملة ذات كثافة منتظمة، عندها لكانت (a) قيمة ثابتة في كل مكان على سطح الأرض. ومع ذلك، فان قيمة (a) تتغاير من مكان لاخر عبر الأرض. وتعزى هذه التغيرات الى تأثير خطوط العرض Latitude والطوبوغرافية، وكذلك جيولوجية المنطقة. ان العوامل الثلاثة الأولى يجب ان تزال قبل ان يتم الكشف عن المتبقي Residual الأخير.

ان الأرض ليست كرة كاملة، ولكنها مضغوطة قليلة عند القطبين بحيث ان نصف القطر القطبي يقل بنحو ٢١ كيلومترا عن نصف القطر الاستوائي. وبذلك، فان الجاذبية تزداد مع زيادة خطوط العرض. والأكثر من ذلك، ان الجاذبية تتأثر بسرعة دوران الأرض، التي تزيد من تأثير خطوط العرض.

ويحسب تصحيح العرض عادة باستعمال قانون الجاذبية العالمي لعام ١٩٦٧، والذي يلغي النسخة القديمة الصادرة عام ١٩٣٠.

$$G = 978031.8[1/(0.0053024\ \mathrm{Sin}^2 y - 0.0000058\ \mathrm{Sin}^2 2y)]$$

حيث تمثل y = خط العرض.

ويقاس التعجيل الناتج عن الجاذبية بوحدات الغال Gals (على اسم غاليلو)، ويمثل الغال الواحد تعجيلا قدرة اسم/ثانية مربع. ولأغراض عملية يستعمل عادة الملي غال (mgal) والذي يمثل واحد بالألف من الغال، او وحدة الجاذبية (gu)، والتي تعادل 0.00001 من الغال.

وعندما يتم اجراء التصحيحات اللازمة للتغيرات الحاصلة في G بسبب خطوط

العرض، فان قيم الجاذبية تستمر بالتغاير من مكان لاخر، ويحدث هذا التغاير لان قوة الجاذبية تتاثر ايضا بالتغيرات الموضعية في ارتفاع Altitude محطة القياس وطوبوغرافيتها. وتقل الجاذبية مع الارتفاع، اي المسافة من مركز الأرض، وبمعدل يبلغ ٠.٣٠٨٦ ملي غال لكل متر. لذلك يجب القيام بتصحيح الهواء الحر Free-air correction للتعويض عن هذا التاثير. كما يجب القيام بتصحيح ثان للتعويض عن القوة الناتجة من كتلة الصخور بين محطة المسح والخط المرجعي Refernce Datum، والذي يؤخذ عادة عند مستوى سطح البحر. ان هذا الفرق الذي يطلق عليه شذوذ بوجيه Bouguer Anomaly، وهو يساوي 0.04191d ملي غال/متر، حيث تمثل (d) كثافة الصخور.

ويمكن القيام بتصحيح الهواء الحر وتصحيح بوجيه في الوقت نفسه باستعمال المعادلة التالية :-

$$E= (0.3086-0.04191\ d)h$$

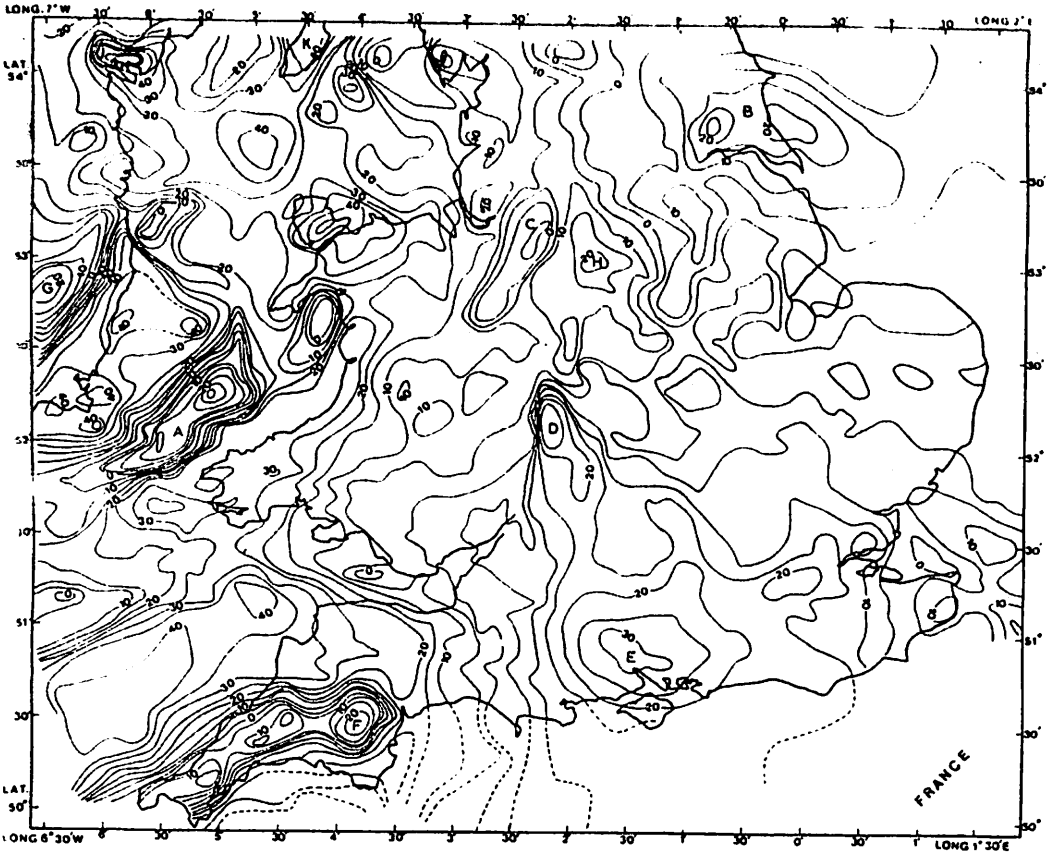
حيث تمثل :-

d =كثافة الصخرة.

h =الارتفاع بالمتر فوق المستوى المرجعي.

وفي المناطق الجبلية، يجب القيام بتصحيح اخر للتعويض عن السحب الجذبي الذي تسببه الجُرُف المجاورة او الجبال. وعندما يتم اجراء تصحيحات الهواء الحر وتصحيح بوجيه وتصحيح التضاريس للقراءات عند كل محطة في أي مسح جذبي، فانها يمكن ان ترسم على خارطة ويتم رسم الخطوط الكنتورية بوحدات الملي غال، (الشكل ٣-٤٦).

ويمكن القيام بالمسوحات الجذبية في كل من اليابسة وعلى قاع البحر ومن سطح سفينة. وفي الحالة الأخيرة، يجب اجراء تصحيحات بسبب حركة السفينة وكثافة ماء البحر وعمقه. وفي الفترة الأخيرة، أصبحت المسوحات الجذبية الجوية ممكنة، (Hammer, 1982).



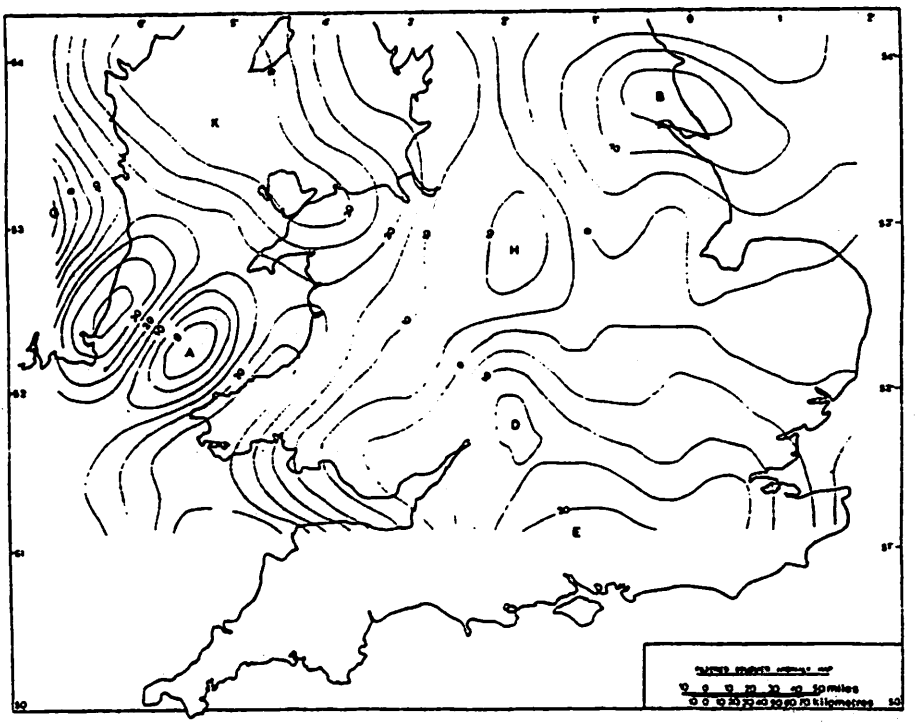
الشكل ٣-٤٦: خارطة شذوذ بوجيه لجنوب بريطانيا الكبرى . قيم الخطوط الكنتورية بالملي غال (من Maroof , ١٩٧٤ تطبع بموافقة مسبقة).

التفسيرات *Interpretation*

يمثل تفسير الخرائط الجذبية العديد من المشاكل، أبسطها تلك المشاكل الناتجة من وجود أجسام تحت سطحية مختلفة تنتج التأثيرات نفسها على السطح. فعلى سبيل المثال، يكون التمييز بين كرة صغيرة ذات كثافة عالية وكرة كبيرة ذات كثافة منخفضة عند عمق متماثل امرا مستحيلا.

ويمكن فحص السبب الدقيق للشواذ المنفردة بسلسلة من النماذج، ويوضع كل نموذج عند اعماق وكثافات وهندسيات Geometries مختلفة للجسم. ونادرا ما تستعمل الخرائط الجذبية لمثل هذه التفسيرات المفصلة، ذلك لان المسوحات الجذبية أكثر فائدة بشكل عام في المناطق الصغيرة. ومثل الخرائط المغناطيسية، فان الخرائط الجذبية أكثر فائدة لاظهار المعمارية العامة لحوض رسوبي. وبمصطلحات عامة، يظهر المحور الترسيبي

Depocenter للترسبات ذات الكثافة الواطئة كشواذ سالبة، بينما تظهر بروزات صخور القاعدة الكثيفة على شكل شواذ موجبة، (الشكل ٣-٤٧).



الشكل ٣-٤٧: خارطة شذوذ برجيه المرشحة لجنوب بريطانيا الكبرى محتسبة من المعطيات الاولية الظاهرة في الشكل (٣-٤٦) .(من Maroof, ١٩٧٤ تطبع بموافقة مسبقة).

وفي بعض الأحيان، قد تدل الخرائط الجذبية على مناطق محتملة صالحة للحفر، وذلك بتحديد مواقع قباب الملح Salt Domes والشعاب Reefs. ان الملح، أقل كثافة بشكل ملموس من أغلب الترسبات، وبسبب هذه الكثافة الواطئة، فانه غالبا ما ينساب الى الأعلى في القباب. ويمكن لهذه القباب ان تتسبب في تكون مصائد هايدروكاربونية في المقاطعات الغنية بالبترول (أنظر صفحة ٢٩٦). وبسبب كثافتها الواطئة، فان القباب الملحية غالبا ما تحدد من الخرائط الجذبية. وعلى نحو مشابه، فان الشعاب قد تصطاد الهايدروكاربونات

(انظر صفحة ٣٨٩)، وقد تظهر كذلك على شكل شواذ جذبية بسبب الفرق في الكثافة بين الحجر الجيري الشعابي والترسبات المجاورة، (Ferris, 1972).

المسوحات المغناطيسية والجذبية Magnetic and Gravity Survey

الخلاصة *Summary*

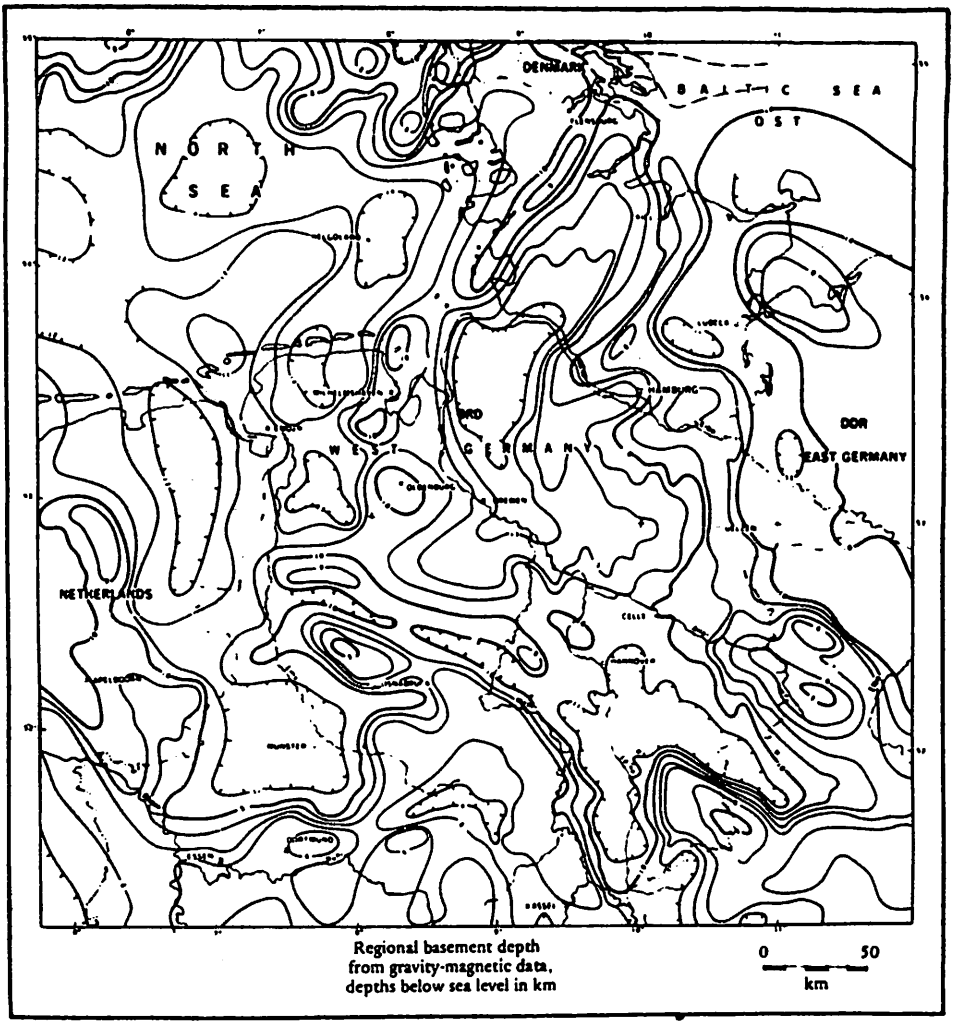
ان كلا من طريقتي المسح المغناطيسي والجذبي مناسبة الكلفة لاجراء مسوحات أولية للمناطق قبل البدء بالحفر. وان استعمالاتها الأساسية هي في تحديد حدود الأحواض الرسوبية ومقاسها والتوزيع الداخلي للمرتفعات والمنخفضات التركيبية، (Nettleton, 1972)، وعندما تُستعمل الطريقتان بالترابط مع بعضها، يمكن تحضير خارطة أكثر دقة للقاعدة Basement، افضل مما لو فسرت كل واحدة على حدة (الشكل ٣-٤٨) ان كلا الطريقتين لا تستجيبان على نحو كاف للتغيرات الجيولوجية كي يستعملا لتحديد المواقع البترولية المحتملة المنفردة، رغم ان المسوحات الجذبية يمكن ان تحدد في بعض الاحيان المصائد الشعابية وتلك المرتبطة مع القباب الملحية. (الشكل ٣-٤٩).

المسوحات الزلزالية Seismic Surveying

المبادىء الأساسية *Basic Principles*

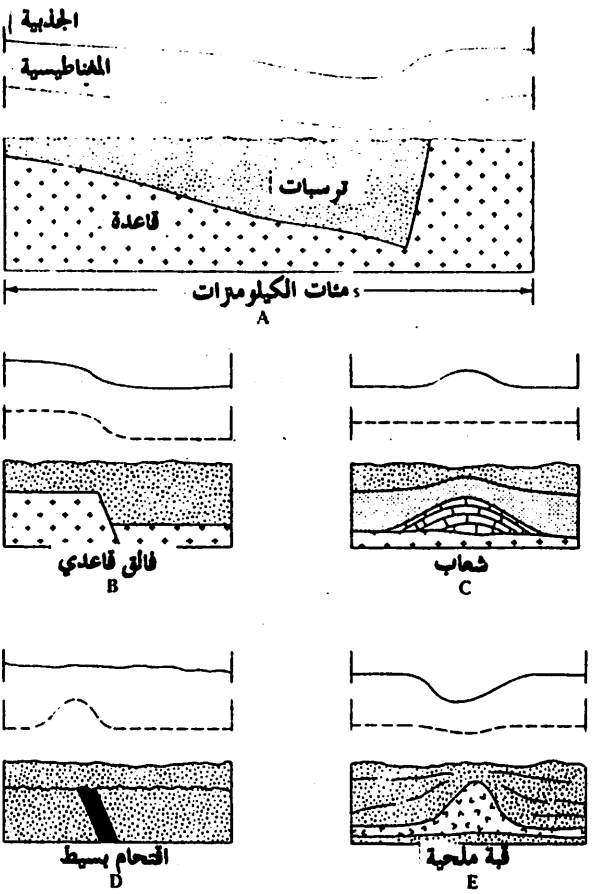
تعد الطرق الزلزالية الأكثر أهمية بين طرق المسوحات الجيوفيزيائية الثلاث. ولكي نفهم الطريقة، فان مراجعة للمبادىء الفيزيائية التي تحكم حركة الأمواج الصوتية او أمواج الصدمة Acoustic or Shock Waves خلال وسط متطبق تصبح امرا ضروريا.

تصوّر مصدرا للطاقة الصوتية عند نقطة على سطح الأرض. هناك ثلاثة أنواع من الموجات التي تصدر عن السطح، وتنتقل خلال الطبقات المجاورة، والتي لها سرع وكثافات يرمز اليها V_2P_2وV_1P_1. وتتحرك الموجات السطحية او الطولية Surface or Longitudinal على امتداد السطح. اما النوعان المتبقيان من الأمواج فيسميان الأمواج الجسمية Body Waves وتتحركان شعاعياً من مصدر الطاقة. وتغادر امواج P (الدفع Push) بحركة شعاعية من مقدمة الموجة، بينما تتحرك امواج S (الاهتزاز Shake) بحركة تماسية Tangential.



الشكل ٣-٤٨: خارطة عمق القاعدة الاقليمية (قيم الخطوط الكنتورية بالكيلومترات) لجنوب غرب المانيا معتمدة على ترابط من المسوحات المغناطيسية والجذبية والمعطيات الجيولوجية . (من ١٩٧٩ ,Pratsch تطبع بموافقة مسبقة).

وتتحرك موجات P أسرع من موجات S. والموجات السطحية ذات أهمية محدودة في المسوحات الزلزالية. فهي تتحرك على امتداد سطح الأرض، وبسرعة أقل من سرعة الأمواج الجسمية. ويدعى التشويش السطحي surface Disturbance باسم التمايل او العطوف الأرضي Ground Roll وقد يشمل نمط راليه Rayleigh وانمطة الانتشار الأخرى العمودية والأفقية.

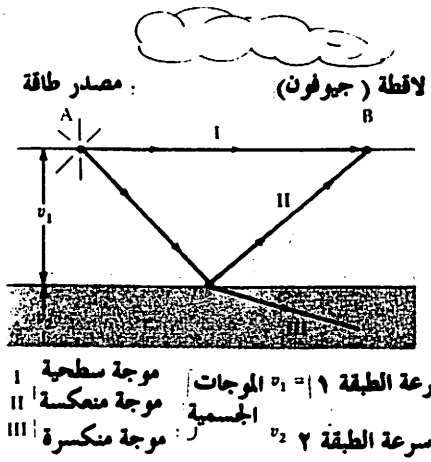


الشكل ٣-٤٩: الاستجابات الجذبية والمغناطيسية للظواهر الجيولوجية المختلفة (أ) الاستجابات الاقليمية عبر حوض رسوبي من (ب) الى (ه) الشواذ الموضعية التي يمكن أن توجد على مقياس بضعة كيلومترات.

تتعلق المسوحات الزلزالية الى حد كبير بموجات P الأولية. فعندما تنبعث موجة من السطح فانها تصل الى الحد الفاصل بين الوسطين اللذين يمتلكان ممانعة صوتية مختلفة Accoustic Impedence (وهو يمثل حاصل ضرب الكثافة بالسرعة)، وان بعضا من الطاقة ينعكس ويعود الى الوسط العلوي. واعتمادا على درجة السقوط، فان بعض الطاقة قد ينكسر على امتداد الحد الفاصل بين الوسطين او قد ينكسر الى داخل الوسط الأسفل.

ان قوانين الانكسار والانعكاس التي تتحكم بانتقال الضوء تنطبق على الموجات الصوتية ايضا. وبذلك، فان من المناسب ان نتصور حركة الأمواج بمصطلحات مسارات اشعتهما. ويمثل مسار الشعاع Ray Path الخط العمودي على جبهات الأمواج المتتالية

بينما تتحرك النبضات الصوتية خارجة من المصدر. ويظهر الشكل (٣-٥٠) مسارات الأشعة للأنواع الثلاثة من الأمواج التي تم وصفها قبل قليل.



الشكل ٣-٥٠: مقطع عرضي يوضح مسارات الامواج الزلزالية المختلفة .

ان المبدأ الأساسي للمسح الزلزالي هو خلق نبضة Pulse زلزالية عند او قرب سطح الأرض وتسجيل الارتفاعات Amplitudes وأوقات الأمواج العائدة الى السطح بعد ان تكون قد انعكست او انكسرت من الحد الفاصل او الحدود الفاصلة لطبقة او عدة طبقات من الصخور. وتتعلق المسوحات الزلزالية الى حد كبير بمسارات الأشعة المنعكسة أكثر من المنكسرة. فاذا كان معدل السرعة للصخرة معروفا، عندها يصبح ممكنا حساب العمق D الى الحد الفاصل

$$D = \frac{Vt}{2}$$

حيث ان :-

V = السرعة الصوتية.

t = زمن الانتقال ذهابا وايابا.

تتغير السرعة الصوتية للصخور اعتمادا على ثوابت مرونتها Elastic Constants وكثافتها. وعندما ترص الترسبات اثناء دفنها، فان كثافتها (وبالتالي سرعتها الصوتية) تزداد عموما مع العمق. ومن الناحية النظرية، فان سرعة الموجة من نوع P يمكن ان تحتسب على النحو التالي :-

$$V=\sqrt{\left(K+\frac{4}{3}h\right)/p}$$

حيث ان:-

K =معامل تغيّر الحجم Bulk Modulus.

h =معامل القص Shear Modulus.

p =الكثافة.

ان العلاقة بين سرعة الصخور الرسوبية الشائعة وكثافتها ظاهرة في الشكل (٣-٥١).ويطلق على حاصل ضرب السرعة بالكثافة اسم الممانعة (او المعاوقة) الصوتية Acoustic Impedence . ويطلق على النسبة بين ارتفاع الأمواج المنعكسة والساقطة اسم معامل الانعكاس او الانعكاسية Reflectivity or reflection coefficient.

$$\text{معامل الانعكاس} = \frac{\text{ارتفاع الموجة المنعكسة}}{\text{ارتفاع الموجة الساقطة}}$$

$$= \frac{\text{التغير في الممانعة الصوتية}}{\text{٢x معدل الممانعة الصوتية}}$$

$$= \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1}$$

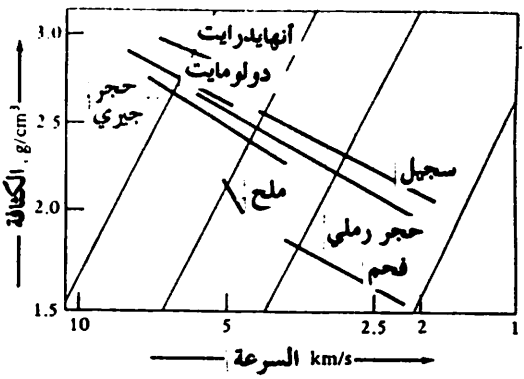
حيث ان:-

ρ_1=كثافة الصخرة العليا.

ρ_2 =كثافة الصخرة السفلى.

v_1 =السرعة الصوتية للصخرة العليا.

v_2 =السرعة الصوتية للصخرة السفلى.



الشكل ٣-٥١: العلاقة بين السرعة والكثافة في الصخور الرسوبية . لاحظ كيفية زيادة السرعة مع الكثافة في أغلب الصخور باستثناء الملح. الخطوط القطرية هي خطوط تساوي الممانعة الصوتية.

(عن Gardner et al., ١٩٧٤ تطبع بموافقة مـ

ولان السرعة والكثافة تزدادان عموما مع الزيادة في العمق، لذلك فان معامل الانعكاس Reflection Coefficient يكون موجبا دائما. ويحدث المعامل السالب حيثما يكون هناك تناقص في السرعة والكثافة باتجاه الأسفل، على سبيل المثال، على قمة سدادة سجيلية فائقة الضغط Overpressured shale diapir. ان معامل الانعكاس الذي يكون موجبا لموجة نازلة يكون سالبا بالنسبة لموجة صاعدة، والعكس صحيح طبعا.

وبشكل عام تزداد السرعة والكثافة مع العمق في الصخارية المتجانسة، ولكن عند الحد الفاصل بين وحدتين، يمكننا الحصول عادة على تناقص صخاري. وبذلك فان معاملات الانعكاس الموجبة والسالبة تميل الى الظهور بتردد متساو تقريبا (اخذين حالة الموجة النازلة فقط)، وتستند معالجة المعطيات الزلزالية غالبا على الافتراض الذي مفاده ان سلسلة معاملات انعكاس الأرض هي اعتباطية، وهو امر صحيح من الناحية الرقمية. ولكن هذا الافتراض لن يكون هو الحالة المثلى اذا كانت أغلب معاملات الانعكاس موجبة. وتوجد المعاملات السالبة حيثما يكون هناك تناقص في الممانعة الصوتية عبر الحد العاكس Reflecting Interface. ولقيم معامل الانعكاس مدى اقصى ينحصر بين القيمتين +١ و -١، كما يمكن ان توجد قيم تتراوح بين +٢ او -٢ للعواكس القوية جدا. وفي التطبيق العملي تتراوح أغلب قيم معاملات الانعكاس بين -١ الى +١. وسوف يتميز الحد الفاصل بين رمل مسامي وحجر جيري كثيف وصلد بمعامل انعكاس عال، وسوف يظهر كسطح عاكس واضح، ولكن الحد الفاصل بين طبقتي سجيل ذاتي ممانعة متشابهة سوف يكون له معامل انعكاس ذا قيمة ضئيلة وسوف يعكس القليل من الطاقة.

ان من المناسب ان نرى كيف تستعمل هذه المباديء العامة في المسوحات الزلزالية. ومن المعتاد ان يتضمن الاستكشاف الزلزالي ثلاث خطوات، وهي تحصيل المعطيات Data Acquisition، معالجة المعطيات Data Processing والتفسير Interpretation.

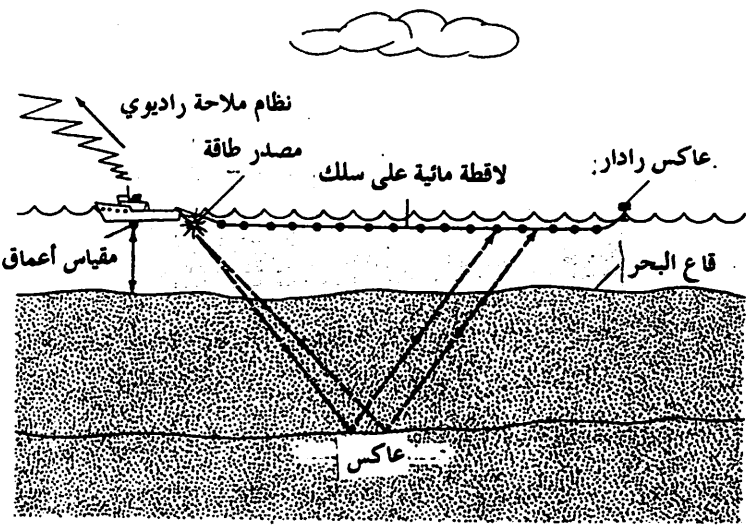
تحصيل المعطيات *Data Acquistion*

تجرى المسوحات الزلزالية على اليابسة وفي البحر، وبطرق مختلفة. فعلى اليابسة، قد يتوفر مصدر الطاقة من متفجرات تدفن في ثقوب التفجير، او باسقاط وزن ثقيل من مؤخرة سيارة لوري (ان تقنية الصدم Thumper هي بالاحرى تقنية معقدة)، او من خلال تذبذب صفيحة معدنية على الأرض(الهزازات Vibroseis). وتسجل الموجات الصوتية العائدة بلاقطات (جيوفانات Geophones) مرتبة في مجموعات. وتبث الاشارات من اللاقطات على امتداد اسلاك الى عربة التسجيل Recordering Truck. وتسيطر الاجهزة الموجودة في هذه العجلة على تفجير مصدر الطاقة وتسجيل الاشارات القادمة من اللاقطات على اشرطة مغناطيسية.

ويمكن ان ترتب نقاط التفجير واللاقطات المستلمة بطرق عديدة. اذ توضع عدة مجموعات من اللاقطات في العادة على خط مشترك، وتكون نقاط التفجير في نهاية او وسط مجموعة الجيوفونات. وفي هذه الأيام تستعمل طريقة نقطة العمق المشتركة Common Depth Point او ما يسمى CDP على نطاق واسع. وفي هذه الطريقة، تحرك نقاط التفجير تدريجياً على امتداد خط الجيوفونات. وبهذه الطريقة يمكن لاكثر من ٤٨ اشارة من ان تنعكس بزوايا مختلفة بالنسبة لنقطة عمق مشتركة.

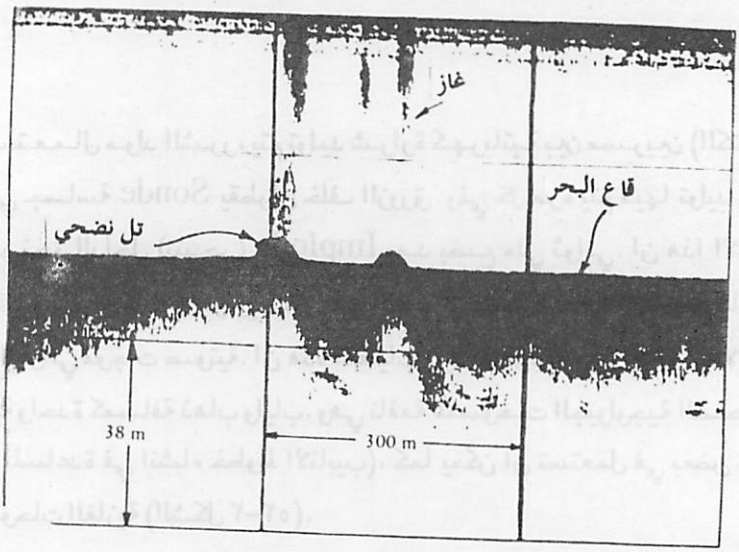
ان الطريقة الاساسية في تحصيل المعطيات في المناطق البحرية تشبه كثيرا الطريقة المستعملة في المناطق اليابسة، ولكنها ابسط واسرع، وبذلك، فانها اقل كلفة. وتحل الزوارق الزلزالية محل العجلات باعتبارها المسيطر والمسجل لعملية المسح. ويسحب هذا الزورق مصدر الطاقة وسلك اللاقطات (الشكل ٣-٥٢). وفي المسوحات البحرية نادرا ما يتم استعمال الدايناميت كمصدر للطاقة. ففي المسوحات الضحلة ذات القدرة التمييزية العالية High-Resloution، ويضمنها المسوحات التي تتم باستعمال مولد الشرر Sparker والمحوال Transducer، يتم استعمال الموجات ذات التردد العالي. وفي المسوحات التي

يتم فيها استعمال مولد الشرر، يتم توليد شرارة كهربائية بين مسريين (الكترودين) موضوعين في جساسة Sonde يقطران خلف الزورق. وفي كل مرة يتم فيها توليد شرارة، فانها تنفجر نحو الداخل (تنبجر) Implode بعد بضع ملي ثواني. ان هذا الانبجار Implosion يخلق موجات اهتزازية، تمر عبر البحر الى الطبقات. اما القلابات فانها تبث وتستلم على التوالي موجات صوتية. ان هذه التقنيات ذات القدرة التمييزية العالية لا تخترق اكثر من ثانية واحدة كمسافة ذهاب وياب. وهي نافعة للمسوحات الجيولوجية الضحلة (على سبيل المثال المساعدة في انشاء خطوط الانابيب)، كما يمكن ان تستعمل في بعض الاحيان لتحديد النضوحات الغازية (الشكل ٣-٥٣).



الشكل ٣-٥٢: مرتسم يوضح كيفية الحصول على المعطيات الزلزالية في البحر.

اما بالنسبة للمسوحات العميقة، فيتم استعمال البندقية الهوائية Air Gun على نطاق واسع كمصدر للطاقة. وفي هذه الطريقة، تفرغ فقاعة من الهواء المضغوط الى البحر، ومن المعتاد ان يقدح عدد من نبضات الطاقة في آن واحد من عدة بنادق هوائية. ويمكن للبنادق الهوائية ان تبث ما يكفي من الطاقة لتوليد اشارات يتراوح زمن ذهابها وايابها بين ٥-٦ ثوان. واعتماداً على سرع الفواصل Interval velocities، فان هذه الاشارات يمكن أن تخترق الى اكثر من خمسة كيلومترات.



الشكل ٣-٥٣: سجل لحول الطاقة Transducer يظهر نضوحات غازية وتلال في مراحل تكساس (من Sieck and Self, ١٩٧٧ تطبع بموافقة مسبقة).

تسجل الاشارات المنعكسة باللاقطات على سلك يقطر خلف السفينة. ويمتد السلك لعدة امتار تحت البحر، وقد يتراوح بين ٢-٥ كيلومتر في الطول. وكما هوالحال، في المسوحات الارضية، تستمل طريقة نقطة العمق المشتركة، وقد يستعمل ما مجموعة ٤٨ لاقطة. وتبث الاشارات المنعكسة الكترونياً من مجموعة من اللاقطات المائية Hydrophones على امتداد سلك الى وحدة التسجيل على سفينة المسح.

وتضم الاجهزة الرئيسية الاساسية الاخرى على متن السفينة، جهاز قياس الاعماق Fathometer، واجهزة تثبيت المواقع Position-Fixing devices. اذ من الواضح ان التثبيت الدقيق للمواقع في البحر اكثر صعوبة منه على اليابسة. ويتم ذلك عموما اما بتحديد الموقع راديويا، او تثبيت الموقع على اثنين او اكثر من أجهزة الارسال الملاحية التي تستعمل الاشارة من الساحل، مدعمة بمنظومة ابحار بواسطة قمر اصطناعي.

معالجة المعطيات *Date Processing*

ما ان يتم تحصيل المعطيات الزلزالية، فانها يجب ان تعالج لتحول الى شكل مناسب للتفسير الجيولوجي. وتشتمل هذه العملية التعامل الاحصائي مع عدد هائل من ارقام المعطيات باستعمال التقنيات الرياضية، وبمستويات تتجاوز استيعاب الجيولوجيين. ومن بين

معالجي المعطيات الزلزالية الرياضيين والفيزيائيين والمهندسين الالكترونيين ومبرمجي الحاسبات الالكترونية.

تصور اشارات ثلاثة مستلمات مرتبة في خط مستقيم من نقطة التفجير. ان الوقت الذي تستغرقه الموجة كي تنعكس من طبقة معينة سوف يظهر على شكل تمعج Wiggle على اثر المستلم Receiver Trace. ان وقت الوصول سوف يزداد مع بُعْد المستلمات من نقطة التفجير. وبذلك، يمكن رسم مرتسم بياني يظهر الوقت – مقابل المسافة Time-Distance كما هو ظاهر في الشكل (٣-٥٤). وعندما يرسم مربع الوقت مقابل مربع المسافة، يمكن رسم خط مستقيم من اوقات وصول الاشارات. ان سرعة الموجة خلال الوسط هي:-

$$\text{السرعة} = \sqrt{\frac{1}{\text{منحدر الخط}}}$$

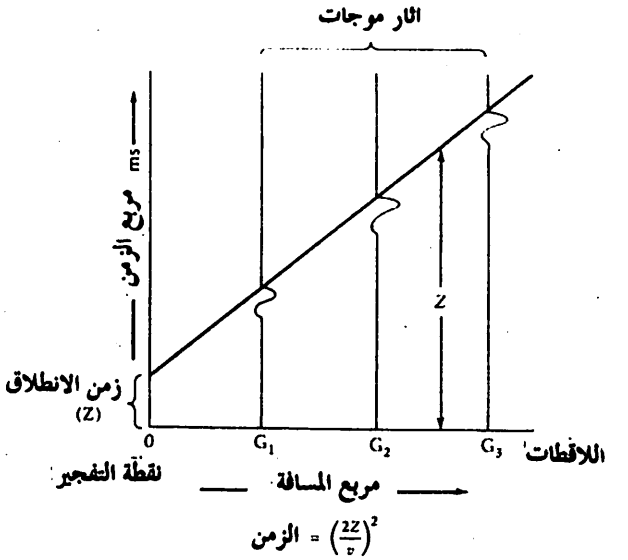
ويمكن حساب العمق من السطح على النحو التالي:-

العمق = السرعة × الوقت (ذهاب فقط)

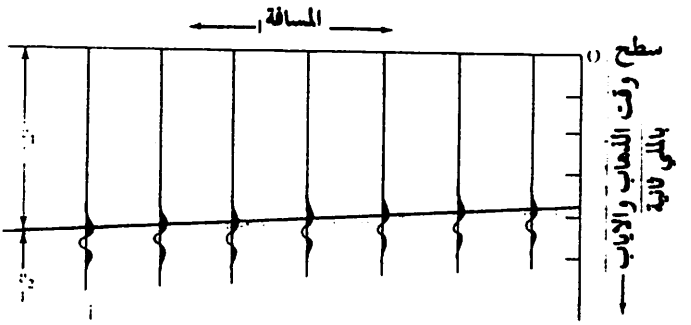
ولكن لان زمن الانتقال يسجل ذهابا وايابا

$$\text{العمق} = \text{السرعة} \times \frac{\text{الزمن (بالثانية)}}{2}$$

وباستعمال التفجير وفق طريقة نقطة العمق المشتركة (التي شرحت سابقا)، تسجل الانعكاسات من النقاط تحت السطحية نفسها بعدد من الترابطات المختلفة للمصدر السطحي ومواقع المستلمات، بينما تربط الاشارات او تكدس Stacked. وبذلك فان المرتسمات البيانية الخاصة بالموجة – الزمن يمكن ان تعرض في مقطع زلزالي مستمر، ويمكن تتبع نطاق عاكس زلزالي منفرد عبره. وتمثل اثار الموجات بطرق عديدة. اذ يمكن ان تظهر على شكل خط بياني مستقيم او اثر متمعج Wiggle. ويمكن ان تظهر العواكس على نحو أفضل على منطقة عَرْض متغايرة، يظهر فيها الانحراف في اتجاه واحد (استقطاب سالب او موجب) باللون الاسود (الشكل ٣-٥٥). ان هذا النوع من العَرْض هو اساس المقطع الزلزالي التقليدي المستعمل الان.



الشكل ٣-٥٤: مرتسم بياني لزمن الانتقال يظهر كيفية أحتساب السرعة بقياس طول الوقت الذي تستغرقه موجة كي تنتقل من نقطة تفجير الى لاقط موضوع على مسافة معروفة.



الشكل ٣-٥٥: مرتسم للمسافة- الزمن يظهر أثار موجات لنقطة عمق مشتركة لسلسلة من اللاقطات التي تسجل اشارة من حد فاصل بين صخور ذات سرعة V١ و V٢ . ولقد تم تظليل اثار الموجات بطريقة المنطقة المتغيرة وتمثل هذه الطريقة اساس المقاطع الزلزالية التقليدية.

ثمة اربع خطوات رئيسية تنتظم في معالجة المعطيات الزلزالية الاولية قبل انتاج المقطع الزلزالي النهائي (McQuillan and Ardus, 1977).

١. تحويل معطيات الشريط الحقلي المغناطيسي الى حالة مناسبة للمعالجة.

٢. تحليل المعطيات لاختيار معاملات المعالجة المناسبة (على سبيل المثال، تصحيح التجوية وسرعة مياه البحر).

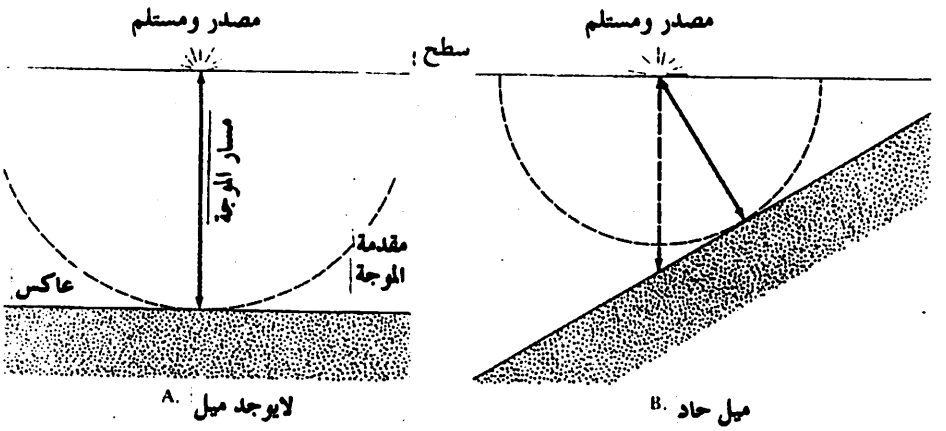
٣. المعالجة لازالة العواكس المكررة Multiple Reflectors وتحسين العواكس الاولية.

٤. تحويل المعطيات من الشكل الرقمي Digital الى الشكل التماثلي Analogu، وطبع الناتج النهائي على شكل عَرْض بياني (اي الخط الزلزالي النهائي).

اثناء المعالجة يجب ترشيح العديد من التأثيرات غير المرغوب بها. وتحتوي كل التسجيلات الزلزالية على كل من الاشارات الاصلية الصادرة من الصخور و«الضوضاء» Noise الخلفية الناتجة من العديد من العوامل الخارجية، والتي يمكن ان تتراوح من الرفيف الارضي Microseim الى تأثير سيارة باص مارة بالجوار. وتعد نسبة الاشارة – الضوضاء كقياس لنوعية مسح ما. ومن الواضح انه يجب ترشيح الضوضاء، وان تردد الموجة وارتفاعها هما نتيجة للعديد من المتغيرات، بضمنها نوع مصدر الطاقة المستعمل وارتفاع الموجة الناتجة، والتردد والشكل ومعاملات الصخور المختلفة التي تمر بها. وتعد عملية فك الالتواء Deconvolution معكوس الترشيح الذي يقابل تأثيرات المرشحات المبكرة غير المرغوب بها.

ان احد الجوانب الهامة في المعالجة هو تهجير الامواج Wave Migration. فعندما يكون ميل الطبقات شديداً، تعود الموجة من العاكس لا من النقطة الواقعة تحت الموقع السطحي مباشرة وسط المسافة بين نقطة التفجير وكل لاقطة منفردة بل من نقطة تقع في اعلى الميل من الموقع (الشكل ٣-٥٦). واثناء المعالجة، يجب ان تهجر المعطيات لتصحيح هذا التأثير. وبسبب التهجير العديد من التعديلات الهامة في المقطع الزلزالي الناتج. اذ تصبح الطية المحدبة اكثر حدة، والطية المقعرة اقل ميلا، والفوالق اكثر وضوحا.

لقد غطت المناقشة السابقة باختصار بعض جوانب معالجة المعطيات الزلزالية. ان النقطة المهمة التي يجب ان تلاحظ هي ان المعطيات الزلزالية المسجلة رقميا يمكن ان تعالج المرة تلو الاخرى، اما باستعمال برامجيات حاسوب جديدة او محسنة او بتوليف الاشارة لاظهار الجوانب ذات الاهمية الجيولوجية.



الشكل ٣-٥٦: مرتسم يظهر المشكلة التي تتم مصادفتها عندما تكون الطبقة شديدة الميل . ففي المقطع الايسر (أ) تكون الطبقات أفقية وبذلك فأن مقدمات الموجة تصطدم العواكس اولا عموديا تحت مصدر الطاقة والمستلم. ولي المقطع الايسر (ب) مع ذلك , فأن الطبقات تكون شديدة الميل , وبذلك فأن الموجات العائدة الى المستلم اولا تكون من الطبقات الواقعة في أعلى الميل وبذلك تكون أقل عمقا ظاهريا من العمق العمودي الحقيقي , ويمكن تصحيح هذه الظاهرة بأستعمال عملية تسمى التهجير .

التفسيرات الزلزالية *Seismic interpretation*

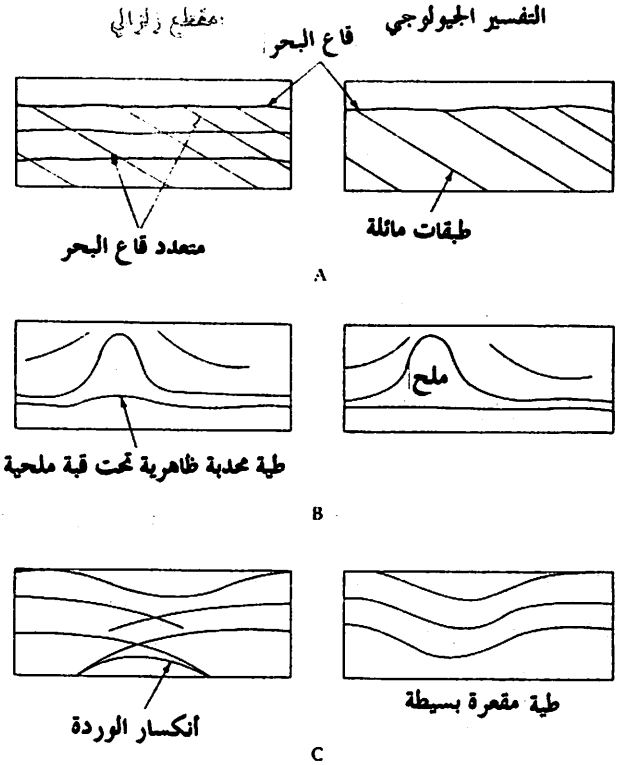
ان الجيولوجيين الذين يتفحصون الخطوط والخرائط الزلزلية يميلون بشكل محتم الى ان ينظروا اليها باعتبارها تمثيلاً للصخور، وينسون انها في الحقيقة تمثل الزمن.

استناداً الى (Tucker and Yorston 1973) هنالك ثلاث مجموعات من الاخطاء في التفسيرات الزلزالية التي يجب تجنبها وهي :

١. الاخطاء الناتجة عن المعالجة.
٢. الاخطاء الناتجة عن الشذوذ الموقعي في السرع.
٣. الاخطاء الناتجة عن التغيرات السريعة في الهندسية Geometry.

ان الاخطاء الناتجة عن المعالجة هي الأصعب بالنسبة للجيولوجيين، وأن احدى الاخطاء الاكثر شيوعاً هي العواكس المكررة Multiple Reflectors، وهي سلسلة من العواكس المتوازية الناتجة من الترداد Reverberation بين عاكسين. وأكثر النوعيات شيوعاً هي متكرر قاع البحر Seabed Multiple، والتي كما يدل اسمها، ناتجة عن التردد بين سطح البحر وقاعه (الشكل ٣-٥٧أ). والأصعب اكتشافاً هو التكرار الناتج عن

احداث داخل الترسبات نفسها. وتقع هذه الاحداث عادة عندما تكون هنالك طبقة ذات معامل انعكاس عال في الاعلى والأسفل، ويمكن ازالة التكرار بالتسوية والترشيح اثناء المعالجة.



الشكل ٣-٥٧: أمثلة على كل من مجاميع الاخطاء الثلاثة في التفسيرات الزلزالية . (أ) أخطاء التفسير (ب) أخطاء السرع (ج) أخطاء الهندسية (المعمارية).

تسبب التغيرات الموضعية السريعة في سرعة التكوين العديد من الهفوات، وينتج اثنان من اكثر الامثلة المعروفة من هذه التغيرات من تأثير القباب الملحية والشعاب. وفي كلتا الحالتين، فأنه قد يكون للملح والحجر الجيري اوقات انتقال اسرع من الترسبات المجاورة. وبذلك، فأن العاكس السابق للملح او الشعاب قد يظهر على المقطع الزلزالي على هيئة طية محدبة، بينما هو في الحقيقة مجرد سحب سُرَعي Velocity Pull-up (الشكل ٣-٥٧ب). ولقد حفرت العديد من القباب الملحية بحثاً عن الطيات الوهمية هذه حتى طوّرت طريقة فهمها كمساعدة مؤثرة في رسم خرائط التراكيب السابقة للملح (Krey and

(Marshall, 1975). ومن الهفوات الاقل خطورة هي الطيات المحدبة تحت الشعابية، ذلك لان الشعاب نفسها هي هدف بترولي استكشافي في حد ذاتها، ومن المحتمل أن يكون مقرراً للبئر أن تحفر الصخور السابقة للشعاب على أية حال.

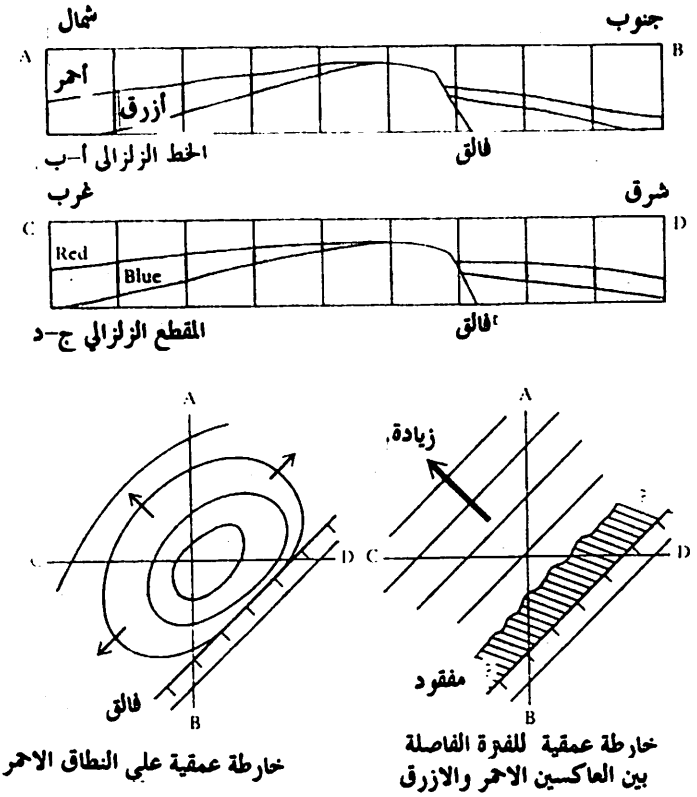
وعلى مقياس إقليمي، فأن الوحدات قد تبدو في بعض الاحيان وكأنها تقل في السمك بزيادة العمق من الجرف shelf الى قاع الحوض. ومن المحتمل ان يكون للطبقة سمك ثابت، غير ان سرعتها تزداد مع زيادة الانضغاط Compaction. وبذلك فأن الوقت الذي تستغرقه الموجات الزلزالية لعبور كل نطاق يقل باتجاه الحوض.

يحدث النوع الثالث من الهفوات في التفسيرات الزلزالية عند اختلاف هندسية الصخور من النموذج المتطبق البسيط، ان هذه الهفوة قد تجعل العواكس تبدو وكأنها تميل بحدة، كما هو الحال في الطيات الضيقة Tight Folds والسدادات Plugs، او انها تبدو وكأنها تنتهي (بجوار الفوالق والسدادات). ان الحالة السابقة يمكن ان تتسبب في نشوء الانعكاسات المشوهة Distorted Reflections، كما هو الحال في ما يسمى بتأثير عقدة الوردة Bow Tie، الناتج من وجود الطيات المقعرة (الشكل ٣-٥٧ ج). ويؤدي انتهاء العاكس الى الانكسارات التي تتقاطع مع العواكس على الخطوط الزلزالية.

عندما يتم تفسير المعطيات الزلزالية على نحو صحيح، ويتم بذلك تجنب الهفوات التي شخصناها للتو، يمكن رسم العواكس المختلفة على شكل خرائط. ويمكن استعمال اقلام ملونة برّاقة لاغراض التحديد العرضي للعواكس المستمرة. ولان الخطوط الزلزالية تمسح وفق تشبيك Grid متقاطع، فأنه يمكن ربط العواكس من خطٍ الى آخر.

وفي المسوحات الواسعة، يمكن تتبُع العواكس من خطٍ لآخر، وتربط في شبكة للتأكد من ان العاكس قد أُلتقط على نحو صحيح، وان المفسر لم يقفز من عاكس لآخر في العملية.

ويمكن بعد ذلك جدولة أزمان العواكس لكل نقطة تفجير، ويمكن رسم خرائط كنتورية لكل نطاق (الاحمر، الازرق، الاخضر.....الخ). لاحظ ان هذه الخرائط هي خرائط زمنية وليست خرائط عمقية، فهي تظهر خطوط تساوي زمن الذهاب والأياب Isochron، وليست خطوط تركيبية. ويظهر الشكل (٣-٥٨) بطريقة بسيطة جداً الكيفية التي يتم بها التقاط العواكس على خطين زلزاليين متقاطعين، ويستعملان لرسم الخرائط الزمنية.



الشكل ٣-٥٨: مرتسم مبسط يظهر كيفية التقاط العواكس على خطين زلزاليين متقاطعين أ-ب و ج-د وأستعمالها في رسم خرائط تساوي العمق لعاكس منفرد (أسفل اليسار) او الفاصل بين العاكسين (أسفل اليمين).

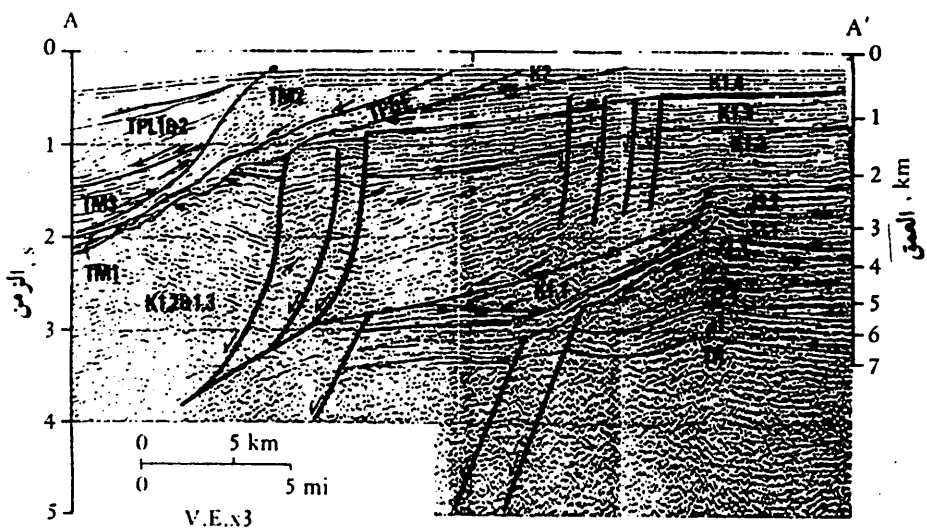
التطبيقات الجيولوجية *Geological Aplication*

تستعمل الخطوط والخرائط الزلزالية في التنقيب عن البترول بخمس طرق أساسية: رسم الخرائط الاقليمية، رسم خرائط الاحتمالات البترولية Prospect Mapping، تحديد المكامن البترولية Reservoir Delineation، وتحديد النماذج الزلزالية والكشف المباشر للهايدروكاربونات Direct Hydrocarbon Detection.

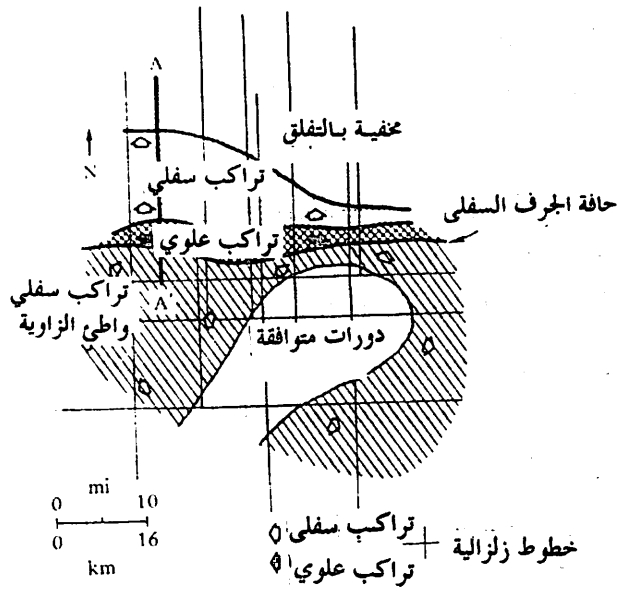
وتمثل الثلاثة الاولى من هذه التطبيقات سلسلة متواصلة من المحاولات، في حين ان الاثنتين الاخيرتين منفصلتان تماماً.

في المراحل الاولى من رسم الخرائط الاستطلاعي Reconnaissance Mapping لحوض رسوبي جديد، يتم في العادة استعمال تشبيك واسع، وتدمج المعلومات

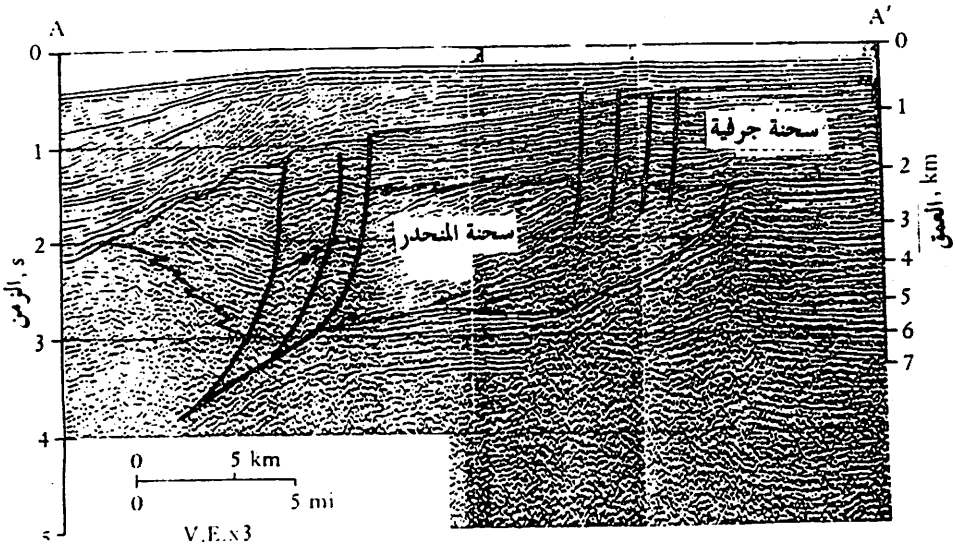
هذه مع المسوحات المغناطيسية والجذبية. ولقد أوضح Vail et al (1977) الطريقة التي تستعمل بها الخرائط الزلزالية على نطاق واسع في تحديد التتابعات الزلزالية Seismic Sequences. ويحتوي كل تتابع زلزالي على سلسلة من العواكس المتوافقة Concordant والمحاطة من الاعلى والأسفل بسطح عدم توافق. وقد تنتج الحدود بين هذه الحدود من التراكيب Onlap والتراكب العلوي Top lap والتراكب السفلي Down lap والقطع Truncation. ان عمر التتابع الزلزالي وصخاريته قد لا يكونان ظاهران للعيان على نحو مباشر دون سيطرة جيدة، ولكنها مع ذلك، وحدات يمكن رسم خرائط لها (الشكل ٣-٥٩ و ٣-٦٠). ولقد اظهرت الدراسات التي قام بها Vail وزملاؤه (1977)، وجود طباقية زلزالية كونيه تتميز بوجود تتابع منتظم من التتابعات الزلزالية المميزة التي يمكن ان تعزى الى التذبذبات الحاصلة في مستوى سطح البحر. ومثلما هو مفسر في الفصل الخامس، فأن فترات التقدم البحري الرئيسية، ترتبط على ما يبدو مع فترات ترسيب الصخور المصدرية (الصفحة ٢١٨).



الشكل ٣-٥٩: خطوط زلزالية لسواحل غرب أفريقيا يظهر حدود التتابعات التي تراوح في العمر بين الثلاثي (T) و الطباشيري (K) والجوراسي (J) والرياسي (TR). للمواقع أنظر الشكل ٣-٦٠. (من ١٩٧٧ ,.Vail et al يطبع بموافقة مسبقة).



الشكل ٣-٦٠: خارطة السحنات الزلزالية تظهر أنعكاس السطح الاسفل من تتابعات الطباشيري الاسفل , سواحل غرب أفريقيا. الخط الزلزالي أ-أ' هو الخط الزلزالي الظاهر في الشكلين ٣-٥٩ و ٣-٦٠ (عن Vail et al., ١٩٧٧).

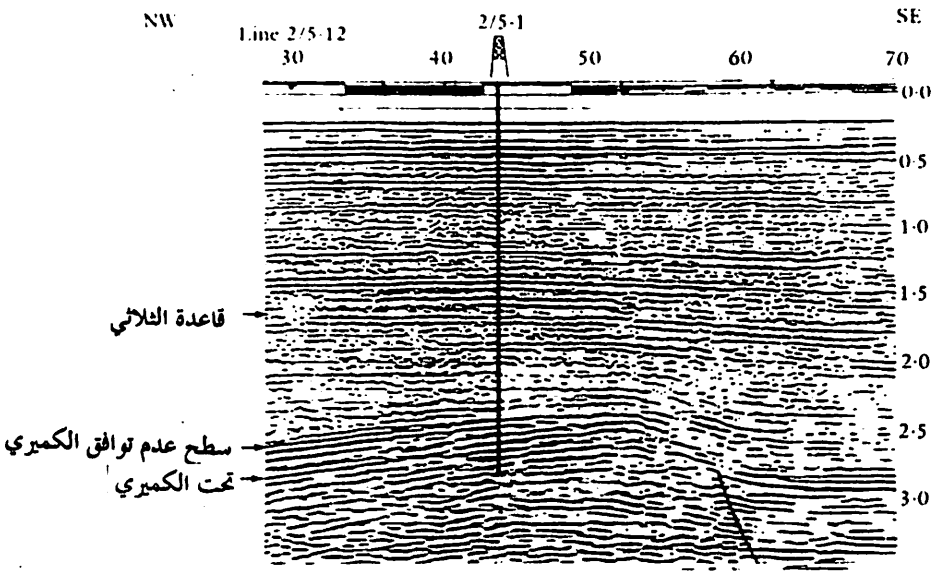


الشكل ٣-٦١: الخط الزلزالي الظاهر في الشكل ٣-٥٩ نفسه (الموقع ظاهر في الشكل ٣-٥٩) يظهر حدود السحنات الزلزالية (عن Vail et al., ١٩٧٧ بتطبع بموافقة مسبقة).

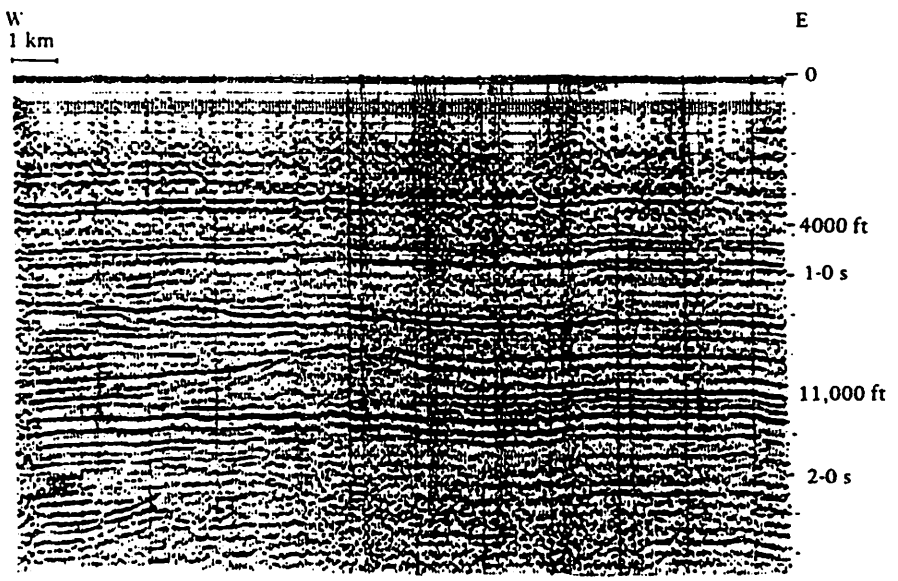
ويمكن رسم المعطيات الزلزالية اما بمصطلحات التتابعات الزلزالية التي هي ذات اهمية طباقية كونية، او على هيئة سحنات زلزالية. وتُعرّف السحنات الزلزالية وفق الصفات الداخلية للتتابعات الزلزالية مثل ارتفاع الموجة Amplitude والاستمرارية continuity وصفات العواكس. تعطي هذه المتغيرات انطباعاً عن الصخاريه والبيئة الرسوبية للسحنات (الشكل ٣-٦١). وتشمل المظاهر الرسوبية كبيرة المقياس التي يمكن تمييزها كلاً من الدلتات وحافات الاجراف الجيرية والمراوح تحت البحرية . Submarine Fans (Sheriff, 1976)

فاذا انتقلنا من المقياس الاقليمي الى المقياس الموضعي، فانه ما أن يتم اجراء مسح ضيّق التشابك، يصبح بالامكان تحديد المواقع المحتملة القابلة للحفر على المقاطع والخرائط الكنتورية، ويمكن بذلك تحديد المصائد التركيبية وحتى الطبقية في بعض الاحيان. ويتعرض الفصل السابع للمصائد المختلفة بتفصيل أكثر. ويكفي القول الآن أنّ الخرائط الزلزالية يمكن ان تستعمل في تشخيص المصائد التركيبية الناتجة من الطي والتفلق (الشكل ٣-٦٢). ولان نوعية المعطيات الزلزالية قد تحسنت خلال السنوات الأخيرة، فلقد أصبح تحديد الوحدات الرسوبية صغيرة المقياس مثل القنوات والحواجز الرملية والشعاب ممكناً إيضاً (Payton, 1977 , Lyons and Dobrin, 1972, Harms and Tackenberg, 1972). وانّ العديد من هذه المظاهر هي مصائد طبقية (الشكل ٣-٦٣).

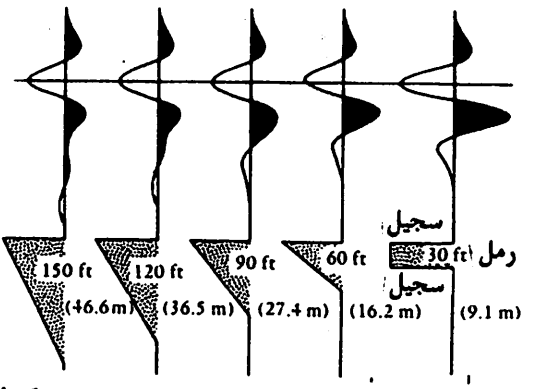
ما أن يتم حفر المصيدة ويعثر على الهايدروكاربونات فيها، فانها يُمكن ان تعرض الى المزيد من التحريات الزلزالية الأكثر تفصيلاً. ان هذه التحريات سوف تشمل رسم الخرائط الدقيقة للعاكس الموجود على قمة المكمن (أو اقرب ما يمكن اليه) كعامل مساعد في الحساب الدقيق للاحتياطي. كما أنه يشمل كذلك مسحاً زلزالياً بالابعاد الثلاثة، حيث يستعمل فيه تشبيك متقارب جداً. أن غزارة المعطيات تسمح للخطوط الزلزالية بأن تُرتّب وفق اي اتجاه آخر مطلوب، حتى أفقياً بحيث يُصبح بالامكان عرض شرائح زمنية. ان الدراسة التفصيلية لارتفاع الموجات وصفات الاشارات الزلزالية المنفردة قد تبرهن على جدواها، فهي يمكن أنْ تعطي تصوراً عن سمك الرمل وطبيعة الحدّين العلوي والسفلي (الشكل ٣-٦٤). إنّ هذه المعلومات يمكن ان تُعطي تصوراً عن البيئة الرسوبية، وبالتالي، عن هندسية المكمن واستمراريته.



الشكل ٢-٦٢: خط زلزالي يظهر مصيدة تركيبية في حقل هيثر في شمال بحر الشمال . المكمن هو الرمل الجوراسي في كتلة منغلقة مقطوعة تحت سطح عدم توافق الكميري . (عن Gray and Barnes, ١٩٨١ تطبع بموافقة مسبقة).



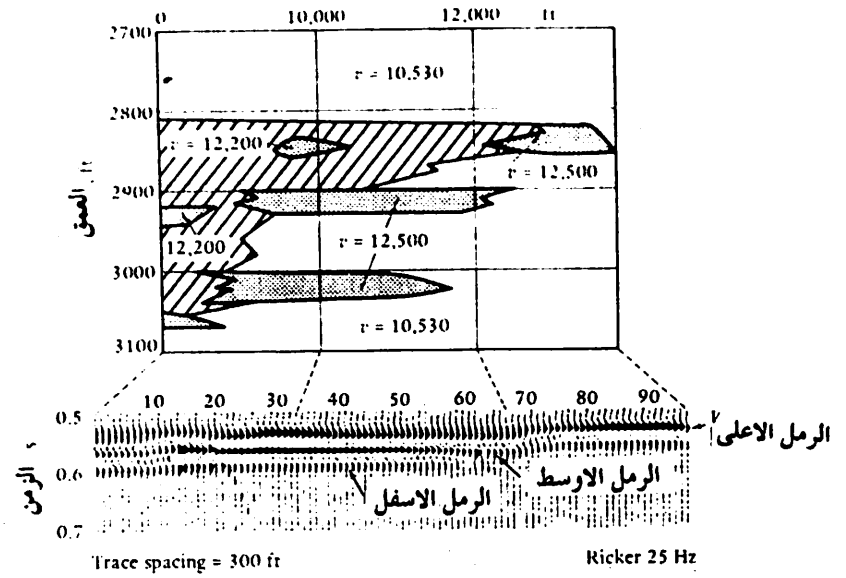
الشكل ٣-٦٣: خط زلزالي يظهر شعابا : مصيدة طبقية محتملة (عن ١٩٧٦ Fitch تطبع بموافقة مسبقة).



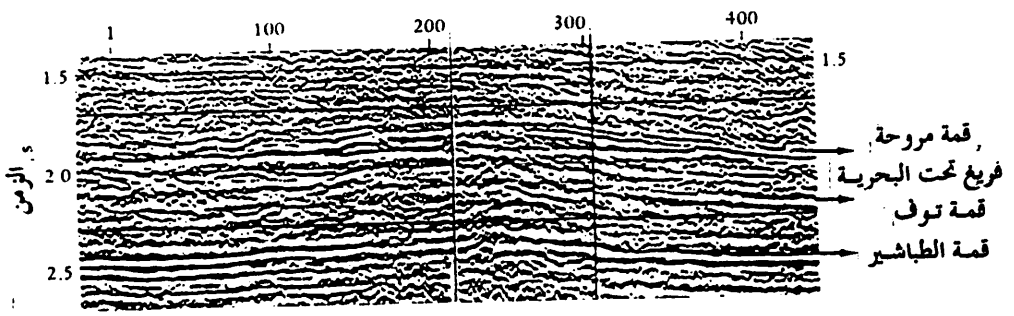
الشكل ٣-٦٤: الاستجابات الزلزالية للانواع المختلفة من تتابعات الرمل - السجيل . أن هذه الاشارات يمكن أن تعطي بعض الدلائل عن البيئة الرسوبية للجسم الرملي . وتدل الاشارات الموجودة على اليسار الى وجود ترسبات متقدمة Progradational . أما المثال الايمن فانه أكثر دلالة على بعض القنوات. (عن Neidell and Poggiagliolmi , ١٩٧٧).

يؤدي هذا النوع الأخير من تحليل المعطيات الزلزالية منطقياً الى اعداد النماذج الزلزالية Seismic Modelling. وتتحسن نوعية التفسيرات الزلزالية بازدياد عدد الآبار المحفورة. وليس المجس الصوتي حسب، بل كذلك التفجيرات الخاصة بتدقيق السرعة تعطي معلومات دقيقة عن سمك الطبقات المختلفة وسرعها ومن هذه المعطيات يصبح وضع نموذج جيولوجي يحدد فيه المقياس والشكل وسرع الصخور خطوة صغيرة (McDonald et al, 1982)، وعندها يمكن برمجة الحاسوب لانشاء مقاطع زلزالية مُصنّعة Simulated لذلك النموذج (الشكل ٣-٦٥).

يُعَد الكشف المباشر Direct Detection التطبيق النهائي للطرق الزلزالية في التنقيب عن الهايدروكاربونات. ففي بعض الحالات، قد تظهر حدود التماس بين النفط والماء، والاكثر شيوعاً، الحد الفاصل بين الغاز والماء، كعاكس على خط زلزالي (Stone, 1977). وبذلك، فأن العواكس المنحنية قد تُحدد طية محدبة في داخل لُبّها Core عاكس مستقيم يطلق عليه عادة اسم البقعة المستويه Flat Spot. وفي بعض الأحيان، ولكن ليس دوماً لسوء الحظ، فأنّ هذه البقعة المستوية قد تدل على وجود حد تماسٍ بين الماء والهايدروكاربونات (الشكل ٣-٦٦) فضلاً عن ذلك، فان ظاهرة ذات ارتفاع موجي عالٍ قد تظهر على الأثر الزلزالي عندما يتحول من صخور الغطاء Cap Rocks الى الرمل



الشكل ٣-٦٥: نموذج جيولوجي (في الاعلى) ومقطع زلزالي مصنع بالحاسوب (في الاسفل) لرمال حاجزية ساحلية مواجهة (معدلة عن Meckel and Nath, ١٩٧٧ تطبع بموافقة مسبقة).



الشكل ٣-٦٦: خط زلزالي خلال حقل فريغ في شمال بحر الشمال . والمكمن هو مروحة تحت بحرية التي تبدو طوبوغرافيتها القديمة واضحة جدا. ضمن المروحة يؤشر عاكس حد تماس الغاز- النفط. (عن Heritier et al., ١٩٧٩ تطبع بموافقة مسبقة).

المسامي المملوء بالغاز. ويطلق على هذه الظاهرة اسم البقعة البراقة او البقعة المعتمة Bright Spot or Dim Spot، اذا كان الاستقطاب سالباً او موجباً على التوالي.

لقد قصد من الاستعراض السابق، رغم قصر مادته، إظهار الطرق التي تُستعمل بها المسوحات الزلزالية في التنقيب عن البترول، وتوضيح طبيعة بعض المشاكل التي تنتظر الجيولوجي الذي ينسى حقيقة ان الخطوط الزلزالية تظهر خطوطاً زمنية وليست اعماقاً.

الجيولوجيا تحت السطحية Subsurface Geology

يتضمن التنقيب الناجح عن الهايدروكاربونات دمج مجسات الآبار Wireline Logs والمسوحات الجيوفيزيائية التي وصفت مبكراً في هذا الفصل مع المعطيات والأفكار الجيولوجية. ويتعلق هذا الجزء بادارة المعلومات الجيولوجية وتمثيلها. ولقد كُتِب على افتراض أن القاريء ملِم بالمباديء الاساسية لعلم الطبقات Stratigraphy والمضاهاة Correlation ورسم الخرائط الكنتورية. ان العديد من الطرق التي سوف يتم شرحها ليست مقتصرة على التنقيب عن البترول بالطبع، بل أنَّ لها تطبيقات جيولوجية اوسع. ومن الناحية الأساسية، فأنَّ الطريقتين الاساسيتين لتمثيل المعطيات الجيولوجية هما المقاطع العرضية والخرائط. وسوف يتم شرحهما في الفقرات التالية.

المقاطع العرضية الجيولوجية Geological Cross-Sections

ان المقاطع العرضية العمودية لهي في غاية الأهمية في تمثيل المعطيات الجيولوجية. وسوف تبتدأ هذه المناقشة مع المقاطع ذات المقياس الصغير ومضاهاة الابار ثم تنتقل الى المقاطع الاقليمية.

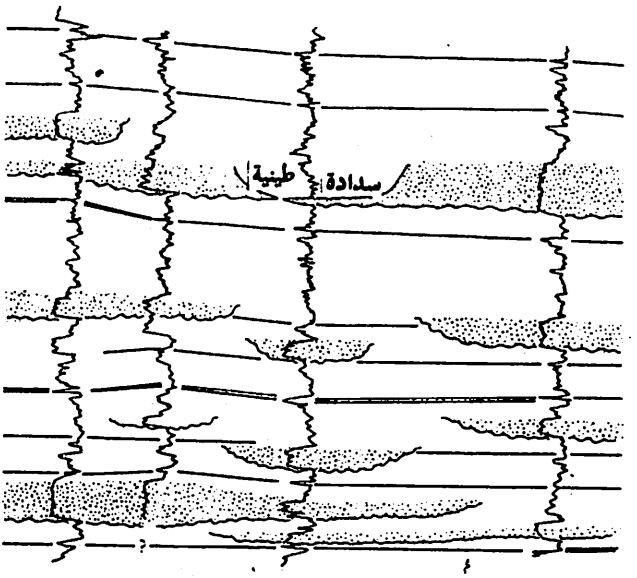
مضاهاة الآبار Well Correlation

إنَّ نقطة البداية في البناء التفصيلي للمقاطع العرضية، كما هو الحال، على سبيل المثال، في حقل بترولي معين، هو إمكانية القيام بمضاهاة الآبار. فعندما يتم حفر بئر ما و من ثمَّ جسّها، يتم اعداد مجس مركب لها Composite Log. إنَّ هذا المجس يضاهي المعطيات الجيولوجية التي تم تجميعها من الفتات الصخرية Well Cuttings مع تلك

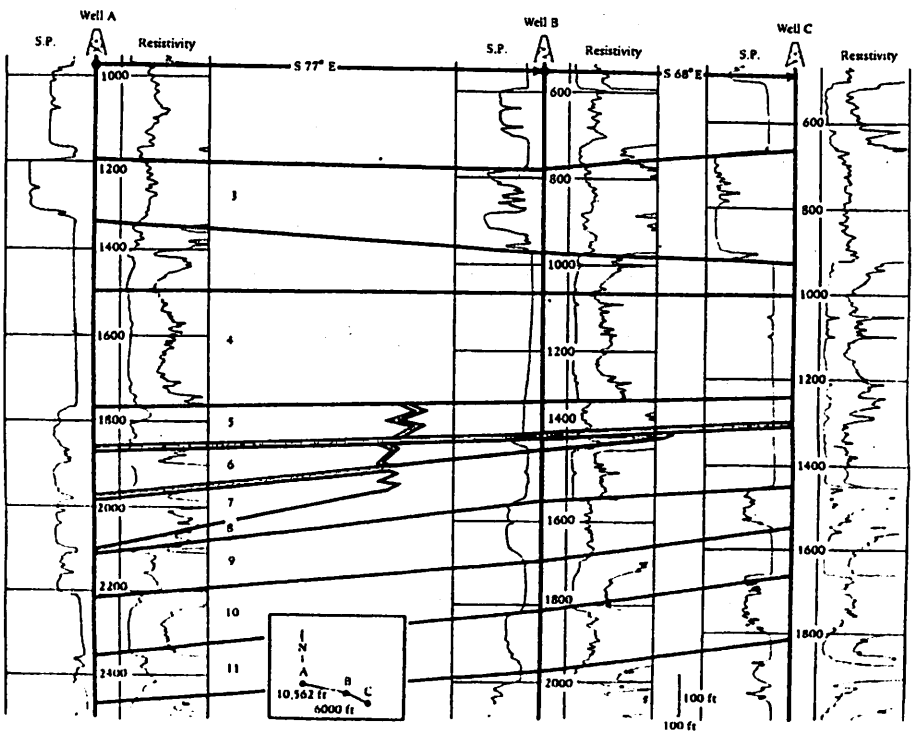
المستقاه من مجسات الآبار. ثم يتم بعد ذلك، تحديد اعالي التكوينات، وهي مهمة ليست بالسهلة دوماً. إذ انّ كلاً من المختص بالمتحجرات والجيولوجي والجيوفيزيائي ربما يحددّ قمة العصر الطباشيري في أعماق مختلفة. فالجيولوجي قد يلتقط القمة عند أول طبقة من الرمل على سبيل المثال، بينما يحددها المختص بعلم المتحجرات عند الظهور الاول لمتحجرة دقيقة معينة (والتي ربما لم تعش في بيئة الترسبات المقصودة) ويحددها الجيوفيزيائي عند تغير السرعة في السجيل shale، وهو نطاق عاكس واضح.

عندما يتم التقاط قمم التكوينات، يمكن بعد ذلك، اجراء مضاهاة مع الآبار المجاورة. إن هذه المضاهاة هي فن تمتزج فيه المعلومات الأساسية مع الخبرة. فاولاً يجب تحديد المجسات الجيوفيزيائية الأكثر فائدة والتي سوف يتم استعمالها. ففي الأيام المبكرة من مضاهاة الآبار، كان يتم استعمال مجموعة المقاومية IES من المجسات في رسم المجسات المركبة. اما الآن فيتم استعمال مجس اشعة غاما مع المجس الصوتي Gamma-Sonic Logs، عندما يكون مجس الجهد التلقائي S.p.Log غير مؤثر. وتشترك مجسات اشعة غاما والصوتي ومنحنيات المقاومية Resistivity في ارتفاع موجاتها، وهو امر ضروري لمضاهاة ناجحة. وكخط إرشادي عام، فان طبقات الفحم والحجر الجيري قليلة السمك غالباً ما تمثل طبقات دالة Marker beds معنية، فكلاهما قليل السمك، بيد أنهما يعطيات ارتدادات Kicks واضحة على مجسات المقاومية والمسامية. ويوضح الشكل (٣-٦٧) سلسلة صعبة المضاهاة من المجسات. ولقد تم انجاز المضاهاة باستعمال طبقة الفحم افضل استعمال ولكنها غائبة في بعض المواقع بسبب عدم الترسيب او حدوث التعري قداخل القنوات.

وفي بعض الاحيان، عند مضاهاة الآبار، قد تكون هناك اجزاء هامة مفقودة من المقطع. وتنتج هذه المظاهرة من انخفاض السمك الرسوبي والتعرية والتفلق العادي Normal Faulting (الشكل ٣-٦٨). ان تفحص الخطوط الزلزالية المناسبة سوف يكشف بشكل عام احد الاحتمالات الثلاثة الأكثر في الحدوث. كما يمكن في بعضها ملاحظة ظاهرة تكرار المقاطع Repetition. وقد ينتج التكرار من التفلق المعكوس Reverse Faulting، ولكن هذه الاحتمالية يجب ان تؤخذ بنظر الاعتبار في المناطق التي يُعرف بأنها تعرضت الى حركة انضغاطية Compressional Tectonics. وكتفسير بديل، هو ان الترسيب التكراري Cyclic Sedimetation قد يؤدي الى تكرار أنمطة الجس.



الشكل ٣-٦٧: مضاهاة الابار في مكمن دلتائي معقد. لاحظ أن الفحم يوفر الفصل الانطقة الدالة. فهي لاتميز من مجسات غاما حسب بل من مجسات المسامية أيضا. (عن Rider and Laurier, ١٩٧٩).



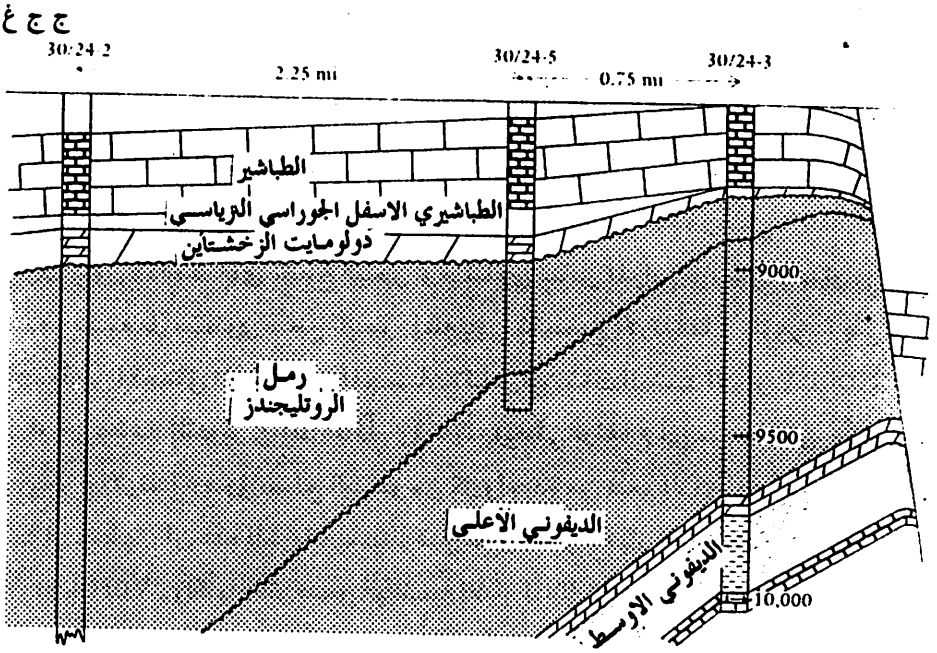
الشكل ٣-٦٨: مضاهاة ثلاث أبار في دلتا النيجر تظهر تناقص السمك العرضي وتغير السحنات.

(Courtesy of Schlumberger).

رسم المقاطع العرضية *Constructing Cross-Sections*

ما ان يتم التقاط قمم التكوينات في الآبار، وتضاهى مع الآبار الاخرى، فانها يمكن ان تُرسم في مقطع عرضي. ويتم إنجاز هذه المهمة استناداً الى خط مرجعي Datum Line، وقد يكون هذا مستوى سطح البحر او مستوى تماس الموائع او نطاق جيولوجي دال. وعندما يستعمل مستوى سطح البحر، فانه يجب تصحيح الارتفاعات الموجودة على المجسات، إذ ان الاعماق المثبتة على المجسات تقاس من تحت النضد الدوّار Rotary Table او من عضد التدوير Kelly Bushing، ويعطى ارتفاع أيٍّ منهما على رأس البئر. ويطرح الارتفاع فوق سطح البحر من كل واحدة من قمم التكوينات كي نحدد ارتفاعها او عمقها. ان هذه الطريقة بسيطة قدر تعلق الامر بالابار الرأسية او العمودية Vertical Wells، ولكنها أكثر صعوبة بالنسبة للآبار المائلة Deviated Wells، مثل تلك التي تحفر من منصة انتاج بحرية. ففي هذا النوع من الآبار، فأن الارتفاع الرأسي الحقيقي (TVD) يجب ان يحددّ، وهو امر يتطلب معرفة تفصيلية ودقيقة عن مسار البئر. عندما يرسم مقطع عرضي نسبة الى مستوى مرجعي أفقي، وليكن مستوى سطح البحر او مستوى تماس النفط-الماء، تكون النتيجة مقطعاً عرضياً تركيبياً (بنيوياً) Strutural Sections (الشكل ٣-٦٩). ومقابل ذلك، يمكن رسم مقطع عرضي باستعمال نطاق جيولوجي معين كخط مرجعي (الشكل ٣-٧٠). أن الهدف من المقطع العرضي يجب أن يعرف قبل ان يتم اختيار المستوى المرجعي المناسب. وفي الشكل (٣-٧٠)، فأن الهدف هو اظهار القطع الحاصل في الأنطقة الواقعة تحت سطح عدم التوافق الكميري Cimmerian Unconformity.

تعتمد المقاطع العرضية لحقول البترول على الآبار. اما بالنسبة للدراسات الاقليمية فيتم استعمال ترابط من المعلومات الزلزالية مع معلومات الآبار. ويمثل تطور مقطع عرضي منفرد سلسلة من المقاطع التي ترسم باستعمال تتابع من انطقة معطيات مختلفة وعندما يتم اختيار انطقة معطيات كي تغطي زمنياً عدداً من الطبقات الدالة وصولاً الى الوقت الحاضر، فأنّ تلك تستعمل لتوثيق نشوء الحوض او أي مظهر تركيبي منفرد (الشكل ٣-٧١).

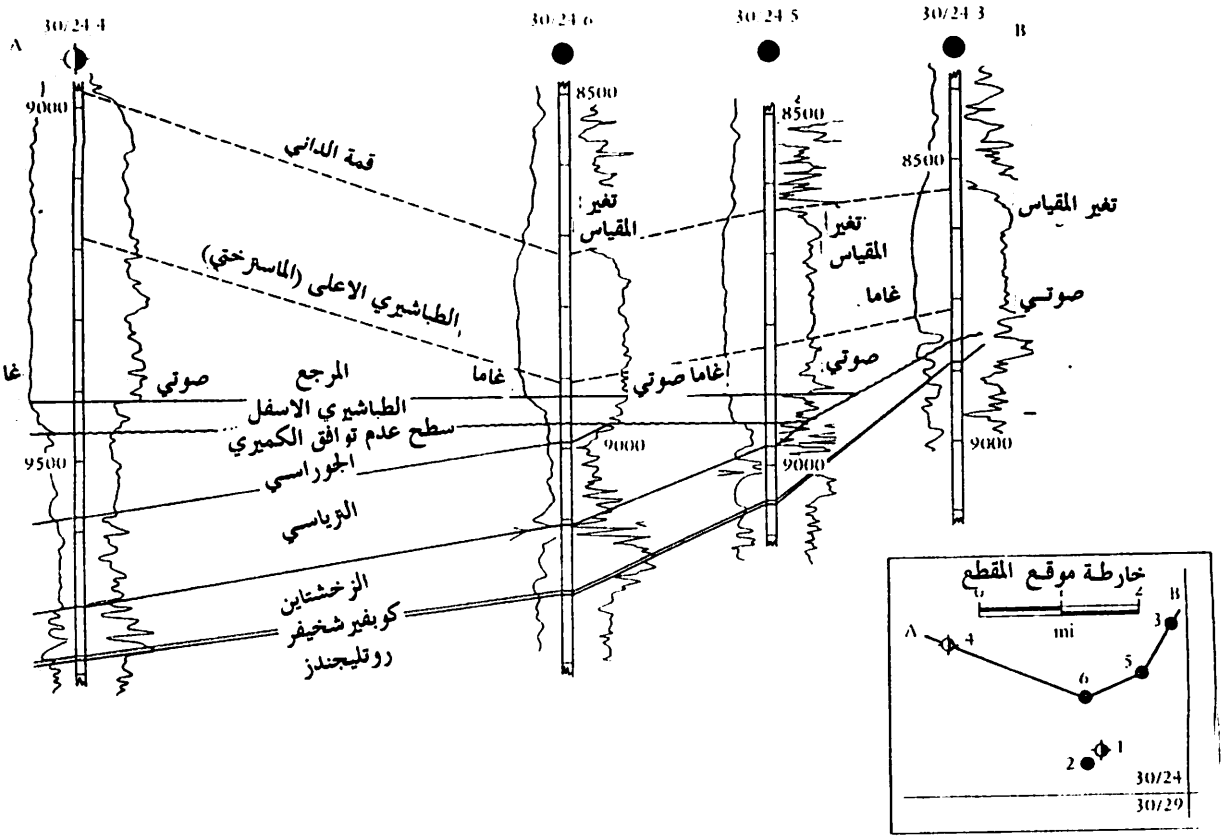


الشكل ٣-٦٩: مقع عرضي تركيبي خلال خلال حقل أرغيل , بحر الشمال (عن ١٩٧٥ ,Pennington).

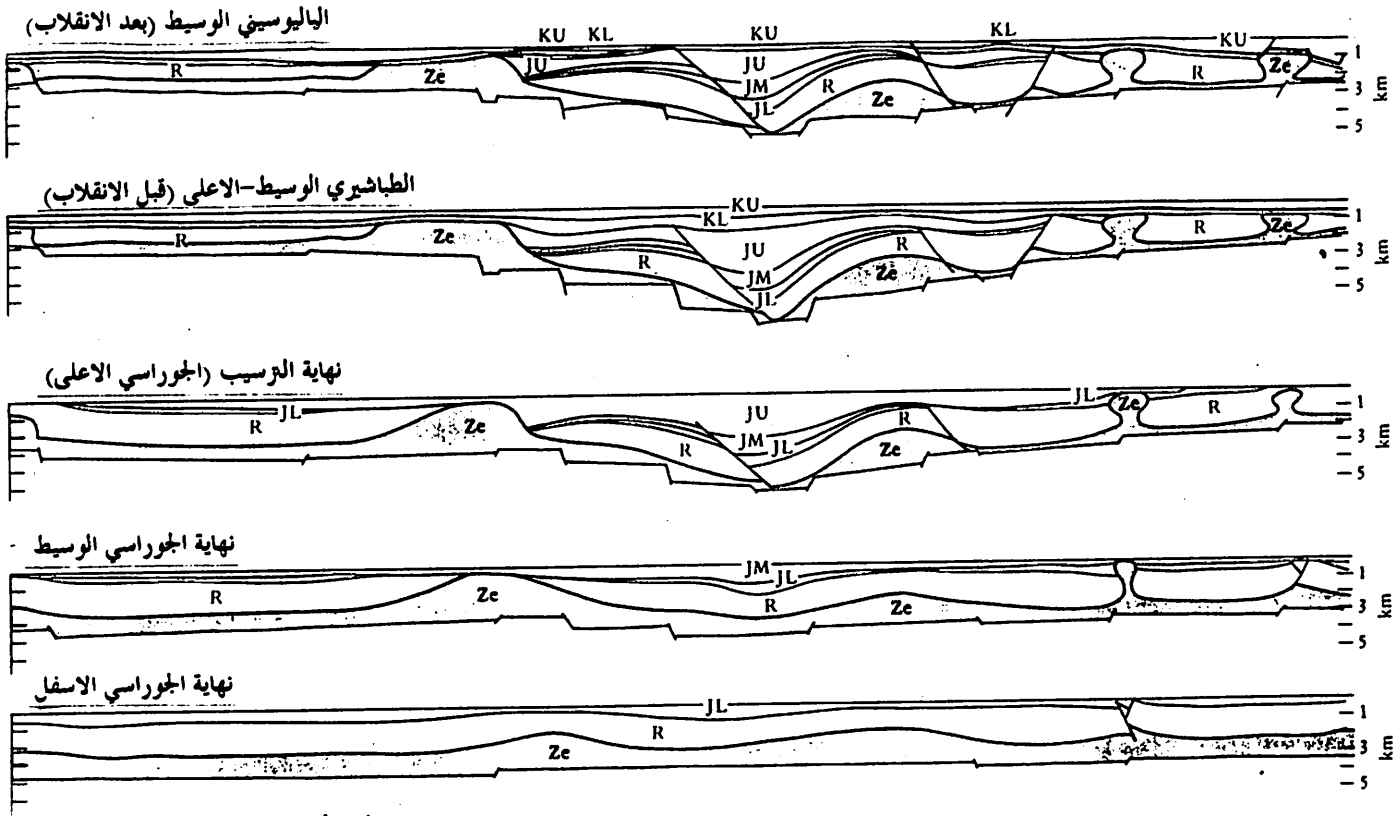
الخرائط الجيولوجية تحت السطحية Subsurface Geological Maps

تستعمل انواع محتلفة من الخرائط الجيولوجية تحت السطحية في التنقيب عن النفط وسوف يتم في هذا الفصل مراجعة الأنواع الأكثر أهمية منها حسب. وتُعد الخرائط الكنتورية التركيبية Structure Contour Maps أبسط الانواع واكثرها اهمية. وتظهر هذه الخرائط توزيع نطاق معين إستناداً الى مستوى مرجعي معين ، والذي هو مستوى سطح البحر في العادة. وقد تكون الخرائط التركيبية موضعية أو اقليمية ، دالة على شكل الاحواض او المصائد على التوالي. وقد تستند هذه المعلومات على المعطيات الزلزالية او معلومات الآبار ، او الاكثر تأثيراً ، ترابطاً بين الأثنين. وتحدد الخرائط التركيبية الكنتورية المصائد وهي ضرورية لحسابات الاحتياطي.

وثاني الخرائط أهمية هي خرائط تساوي السمك Isopach Maps التي تُسجل سُمك التكوينات . وكما هو الحال مع الخرائط التركيبية ، فأنها قد تكون موضعية او اقليمية،



الشكل ٣-٧٠: مقطع عرضي للابار خلال حقل أرغيل في بحر الشمال بأستعمال سطح عدم توافق الكميري كخط مرجعي . أن هذا الشكل يظهر على نحو مفيد قطع الطبقات في ما قبل العصر الطباشيري. (عن Pennington, ١٩٧٥).

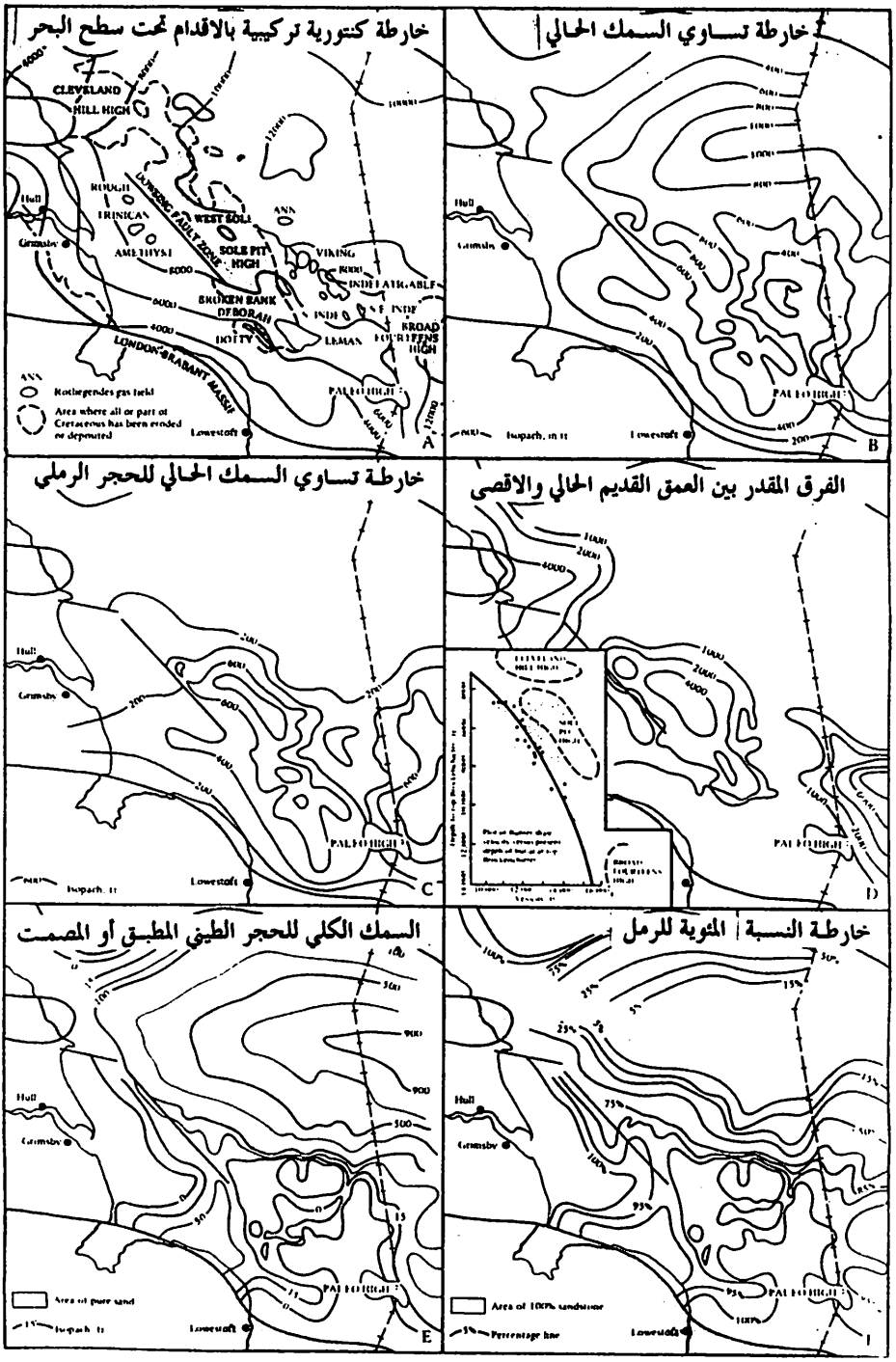


الشكل ٣-٧١: مقطع عرضي اقليمي يظهر النشوء التركيبي للجزء الجنوبي من وسط منخسف بحر الشمال (عن Heybroek, ١٩٧٥).

وتزداد درجة الوثوق بها عندما تستند على دمج معلومات الابار مع معلومات الابار مع المعلومات الزلزالية. ويجب توخي اقصى درجات الحذر عند تفسير خرائط تساوي السمك ، فهنالك ميل طبيعي للاعتقاد بأن السمك يزداد مع زيادة هبوط Subsidence الحوض ، وهو امر ليس ضرورياً على الدوام . إذ أن معدلات الترسيب لكل من الترسبات الجيرية والرملية تكون في سمكها الأقصى بعيداً تماماً عن الحوض . ويميل سمك الطبقات للنقصان باتجاه الساحل بسبب التعريه وباتجاه الحوض وذلك لانعدام الترسيب او انخفاض معدلاته (انظر كذلك ص ٤٢٢). وعلى نحو مشابه، بأن القطع الموضعي او الاقليمي قد يؤدي الى انعدام العلاقة بين سمك التكوينات وبين شكل الحوض اثناء الترسيب.

تمثل خرائط تساوي العمق Isochore Maps نوعاً معيناً من خرائط تساوي السمك يظهر سمك الفترة الفاصلة بين مستوى تماس النفط-الماء وصخور غطاء المصيدة. ومن الخرائط الجيولوجية تحت السطحية ذات العلاقة هي خرائط سمك العطاء الصافي Net Pay Map داخل المكمن ، والتي تمثل خطوطها الكنتورية النسبة بين سمك العطاء الكلي الى سمك العطاء الصافي داخل المكمن. كما يمكن رسم خرائط نسبة الرمل الى السجيل Sand-Shale Ratio ، التي تكون مفيدة جداً على المقياسين الموضعي والاقليمي ذلك لانها قد تدلل على مصدر الرمل ، وبذلك يمكن تحديد مناطق المكامن الجيدة. وتعد خرائط سمك الرمل الصافي وسمك العطاء الصافي اساسية في التقييم التفصيلي لحقول النفط والغاز. كما يتطلب تطوير الحقول ايضاً خرائط تمثل قيم المسامية Porosity والنفوذية Permeability عبر الحقل معبراً عنها كنسبة مئوية وبالملي دارسي على التوالي. وتعتمد هذه الخرائط بشكل عام على معلومات الابار، ولكن بتحسن نوعية المعطيات الزلزالية ، يمكن رسم خرائط سمك الرمل الصافي وخرائط المسامية دون الحاجة الى معلومات الابار. ومن الواضح ان دقتها تتحسن عندما تدقق مع معلومات المجسات. ويظهر الشكل (٣-٧٢) انواع الخرائط المختلفة التي شرحت للتو لترسبات البحر في البرمي الاسفل Lower Permian في جنوب حوض بحر الشمال North Sea Basin.

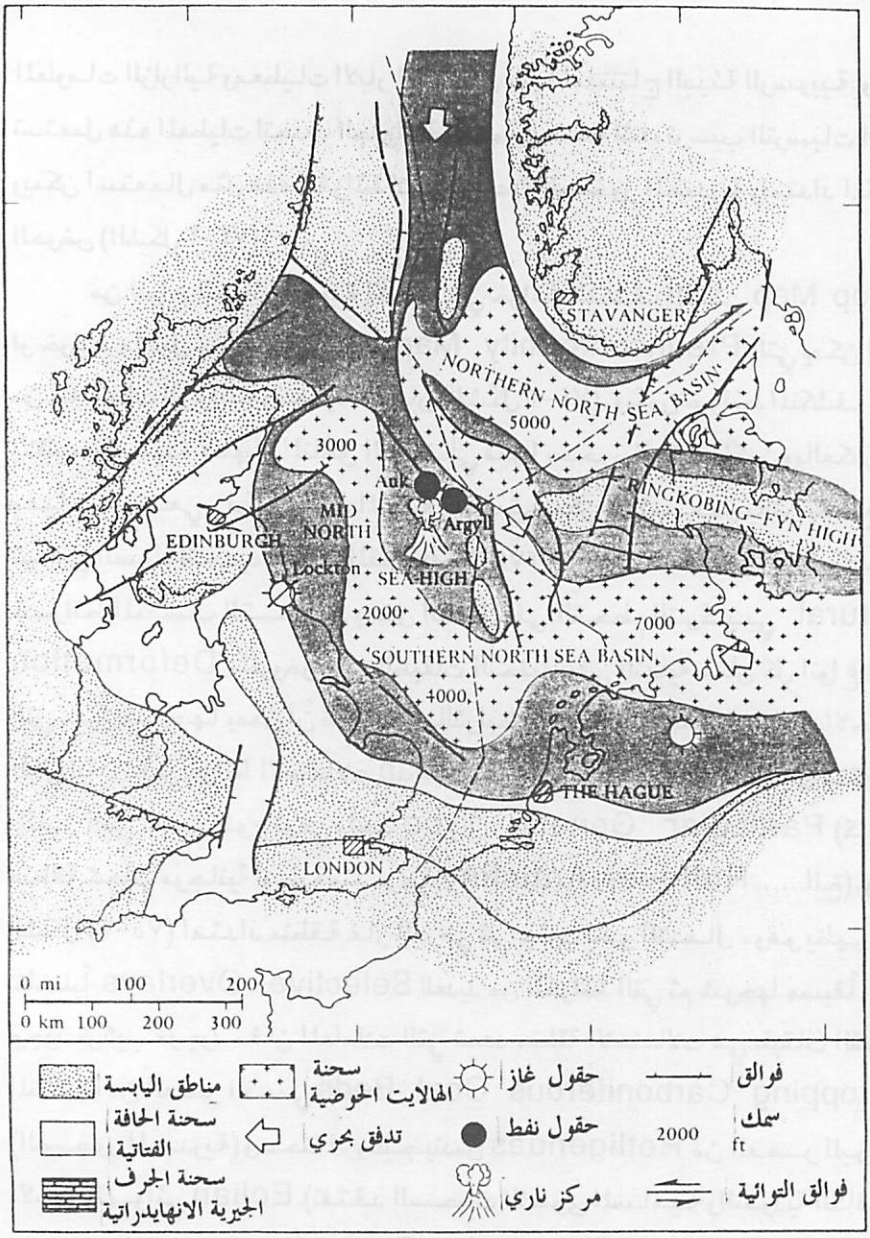
وغالباً ما تستعمل خرائط سمك الرمل الصافي بالترابط مع الخرائط الجغرافية القديمة Paleographic Maps . ويجب ان تستند الخرائط الجغرافية القديمة على



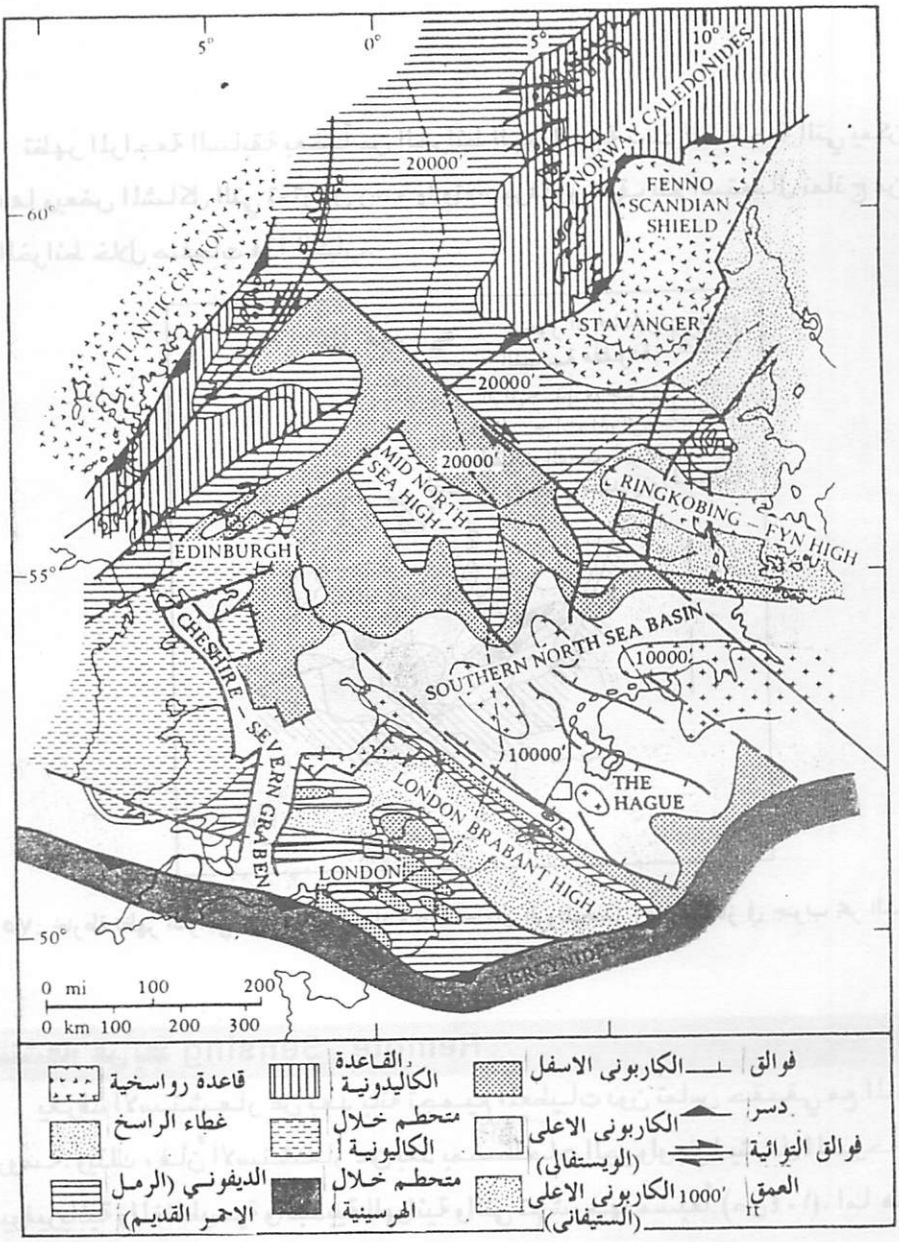
الشكل ٣-٧٢: خرائط البرمي الاسفل (الروتلجندز) في حوض جنوب بحر الشمال تظهر الانواع المختلفة من الخرائط التي يمكن أن ترسم من المعلومات الاساسية نفسها. (عن ١٩٧٥ , Marie).

المعلومات الزلزالية ومعطيات الابار التي يمكن منها استنتاج البيئة الرسوبية. ويمكن ان تستعمل هذه المعطيات لتحديد الجغرافية القديمة للمنطقة اثناء ترسيب الترسبات المدروسة. ويمكن استعمال مثل هذه الخرائط لتحديد نوعية الصخور المصدرية وامتداد المكمن عبر الحوض (الشكل ٣-٧٣).

من انواع الخرائط المفيدة الاخرى هي خرائط المنكشف التحتي Subcrop Map او خرائط ما قبل سطح عدم التوافق Preunconformity Map التي يمكن أنْ تُرسم من المعلومات الزلزالية ومعطيات الآبار (الشكل ٣-٧٤). وتكون خرائط المنكشف التحتي الاقليمية مفيدة لاظهار المناطق التي تغطي فيها صخور الغطاء المكمن وبالعكس . وعلى مقياس موضعي ، فأن خرائط المنكشف التحتي يمكن ان تستعمل بالترابط مع خرائط تساوي السمك لتحديد المكامن المقطوعة Truncated Reservoirs. كما تُعطي خرائط المنكشف التحتي بعض الدلائل على التحطم التركيبي Structural Deformation المفروض على الطبقات التحتية. وفي النهاية ، فأن كل انواع الخرائط التي سبق شرحها يمكن أنْ تُستعمل بالترابط مع بعضها لتحديد مناطق الاحتمالات البترولية. وتظهر خرائط الاحتمالات Play Map الامتداد الجغرافي المحتمل لحقول النفط والغاز التي تنتمي لنوع نوعي واحد Particular Genetic Type (كأن تكون منطقة شعاب مرجانية او طية متدحرجة Rollover-Anticline .....الخ). ويوضح الشكل (٣-٧٥) امتداد منطقة غاز البرمي في جنوب بحر الشمال ، وهو يظهر تراكباً تفاضلياً Selective Overlays للعديد من الخرائط التي تم شرحها مسبقاً. وعرضة لوجود تركيب موجود ، فان المعاملات التي تحدد منطقة الاحتمالات هي طبقات الفحم تحت المتكشفة من العصر الفحمي Subcropping Carboniferous Coal Beds (الصخور المصدرية) وسحنة الروتليجيندس Rotligendes من العصر البرمي ذات الاصل الهوائي Eolian (تفتقد السحنات الاخرى المسامية والنفوذية الكافيتين) ، وتبخريات الزخشتاين Zechstein Evaporites الغطائية من البرمي الاعلى كي تمنع الغاز من الهروب . كما ان خرائط التوقعات Prospect Maps تعتمد على ترابط مختار بموضوعية لانواع الخرائط التي سبق شرحها ، ولكنها قد تحتوي ، اذا ما اقتضت الحاجة ، على خرائط كنتورية تركيبية كي تحدد منطقة التوقعات المرادة.

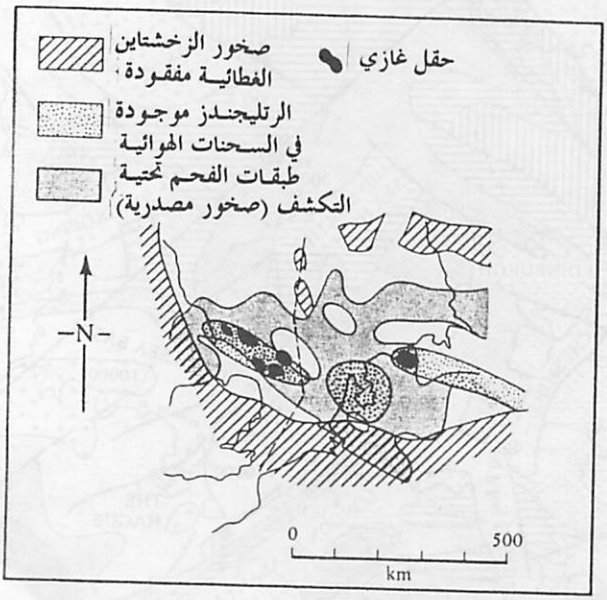


الشكل ٣-٧٣: خارطة جغرافية قديمة للزخشتاين (البرمي الاعلى) في بحر الشمال . (عن Ziegler, ١٩٧٥).



الشكل ٣-٧٤: خارطة لتكشف تحتي لما قبل البرمي في بحر الشمال. ان هذه الخارطة مفيدة في اظهار طبيعة التحطم التركيبي والتعرية السابقين للبرمي ومداهما. كما أنه يدل أيضا على مدى عروق الفحم من الكاربوني الاعلى التي تمثل مصدر الغاز المصطاد في الرمال الفوقية من البرمي. (عن Ziegler, ١٩٧٥).

تظهر المراجعة السابقة بعضاً من الخرائط الجيولوجية تحت السطحية التي يمكن إعدادها وبعض المشاكل التي تعترض رسمها وتفسيرها. وسوف يتم استعمال نماذج من هذه الخرائط خلال صفحات هذا الكتاب.

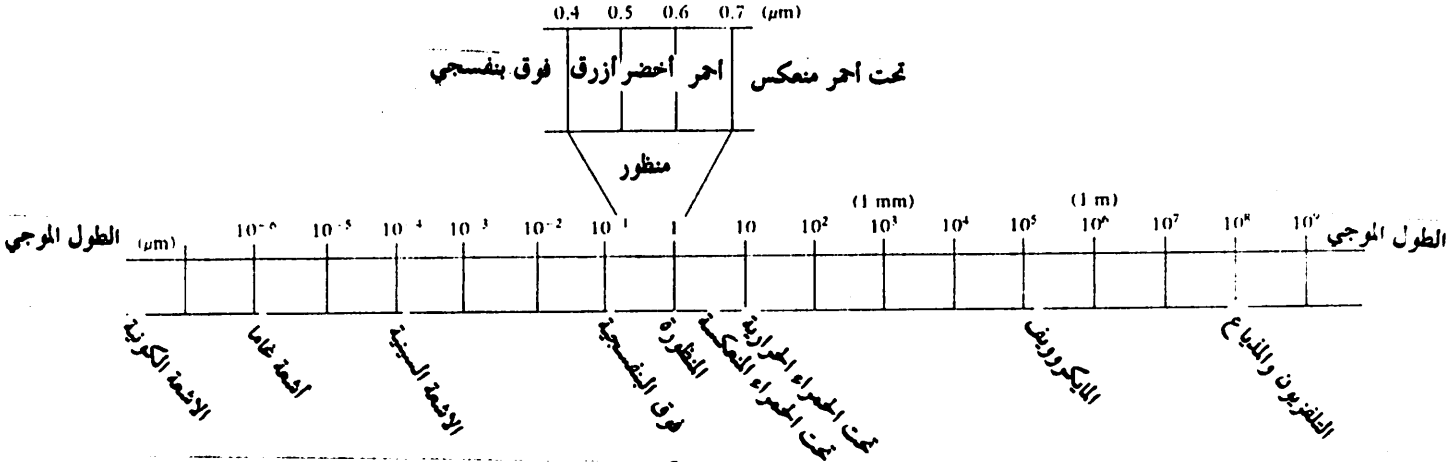


الشكل ٣-٧٥: خارطة تظهر العوامل المؤثرة على امتداد منطقة احتمال الروتليجندز الحاملة للغاز في جنوب بحر الشمال .

الاستشعار عن بعد Remote Sensing

يعرف الاستشعار عن بعد بأنه تجميع المعطيات دون تماس حقيقي مع المادة المدروسة. وبذلك ، فأنَّ الاستشعار عن بعد بمصطلحات الجيولوجيا يشمل المسوحات الجيوفيزيائية والمغناطيسية والجذبية الهوائية والتي تم شرحها مسبقاً (ص١٠٤). اما هذه الفقرة فأنها تتعلق فقط بالاستشعار عن بعد باستعمال الموجات الكهرومغناطيسية.

يضمُّ الطيف الكهرومغناطيسي الضوء المرئي Visible Light ، ولكنه يتراوح من الاشعاع الكوني Cosmic Radiation الى الموجات الراديوية Radio Waves (الشكل ٣-٧٦). ويمكن القيام بالاستشعار عن بعد من ارتفاعات متغايرة تتراوح بين قمة شجرة الى قمر اصطناعي في طبقات الجو العليا. وبذلك فان العاملين الاساسين



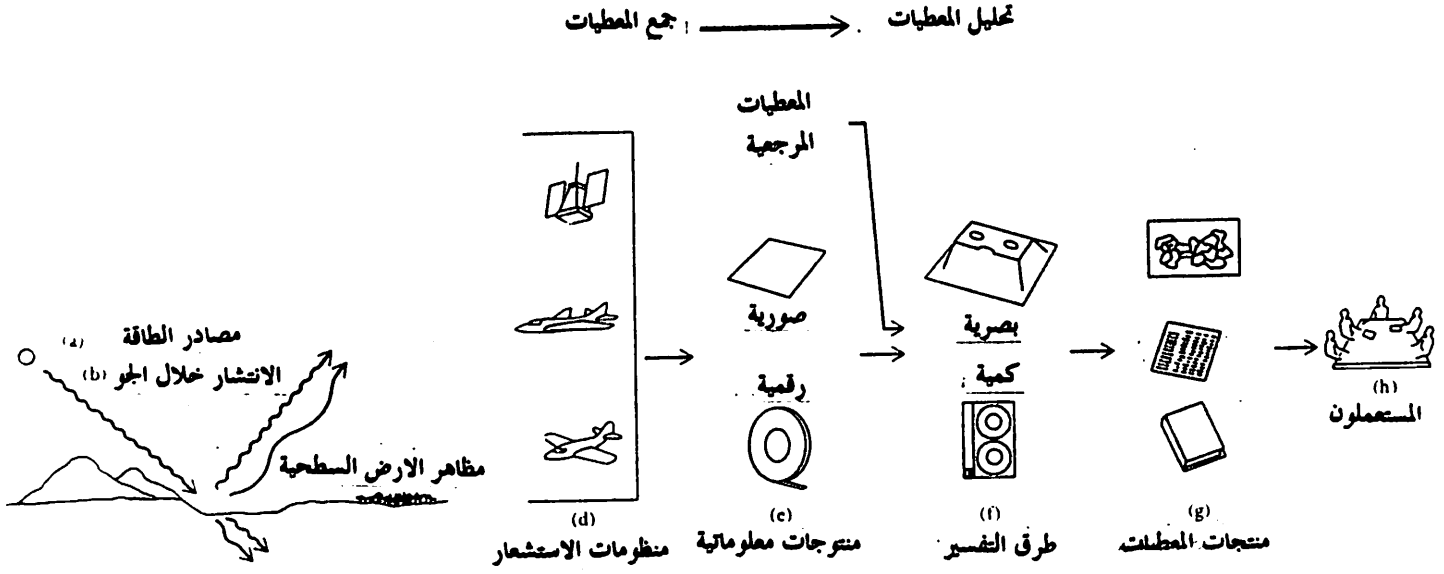
الشكل ٣-٧٦: الطيف الكهرومغناطيسي (عن Lillesand and Kiefer, ١٩٧٩, Remote Sensing and Image Interpretation, (c) John Wiley & Sons, Inc.).

في الاستشعار عن بعد الذي يستعمل الموجات الكهرومغناطيسية هما الارتفاع Elevation والاطوال الموجية التي يتم تحليلها. ومع ذلك ، فان هذه التقنيات تشمل العديد من العوامل . فوجود مصدر للطاقة يُعدُّ امراً ضرورياً ، وقد يكون محفزاً Induced (كما هو الحال مع الاشعاع الموجي المجهري (المايكروويفي) المستعمل في الرادار) او طبيعياً (كما هو الحال مع الطاقة الشمسية) . ويتم ترشيح موجات الشمس الكهرومغناطيسية عبر الجو ، وبذلك فهي اما ان تمتص او تنعكس من سطح الارض . ويتم التأثير على الموجات المنعكسة من قبل تضاريس الارض السطحية. وتتغاير بعض انواع الطاقة اعتماداً على التغير الحراري للسطح والغطاء النباتي وجيولوجية المنطقة وما شابه ذلك. ويمكن قياس التغير الحاصل في هذه الموجات تصويرياً Photographically او عددياً Numerically ، ومن ثم تُحللُ بعد ذلك اما بصرياً Visually وموضوعياً او باستعمال معالجات اكثر تطوراً بالحاسوب ، وبعد ذلك يتم تفسيرها (الشكل ٣-٧٧).

ان حقل الاستشعار عن بعد حقل واسع ، وهو يشهد توسعاً سريعاً في الوقت الحاضر ، إذ ان هنالك العديد من التقنيات التي تتطور وتطبق لا للتنقيب عن البترول حسب ، بل في المسوحات الجيولوجية الاخرى ولدراسة العديد من جوانب سطح الارض الاخرى. ومن تقنيات الاستشعار عن بعد الاساسية التي تستعمل في التنقيب عن البترول الطرق البصرية visual والرادار والمسح متعدد الاطياف Multispectral . وسوف يتم وصف هذه التقنيات في الفقرات التالية ، وللمزيد من المعلومات راجع Lillesand and Kiefer (1979) ، Siegal and Gillespie (1980).

الاستشعار عن بعد البصري Visual Remote Sensing

يُعدُّ التصوير الجوي التقليدي من اقدم تطبيقات الاستشعار عن بعد في التنقيب عن البترول. ولقد التقطت الصور الجوية الاولى من مناطيد في أواخر القرن التاسع عشر. وخلال السنوات الاولى من القرن العشرين ، تم التقاط الصور من الطائرات ، وخصوصاً على هيئة لقطات منفردة أُستعملت في رسم الخرائط. ولكن حقل التصوير الجوي تقدم بسرعة للاغراض العسكرية خلال الحرب العالمية الثانية. وفي هذه الاثناء ، تم اختراع التقنيات الاساسية حيث تم تصميم آلات تصوير مهيئة لالتقاط تتابع من الصور عند فتراتٍ

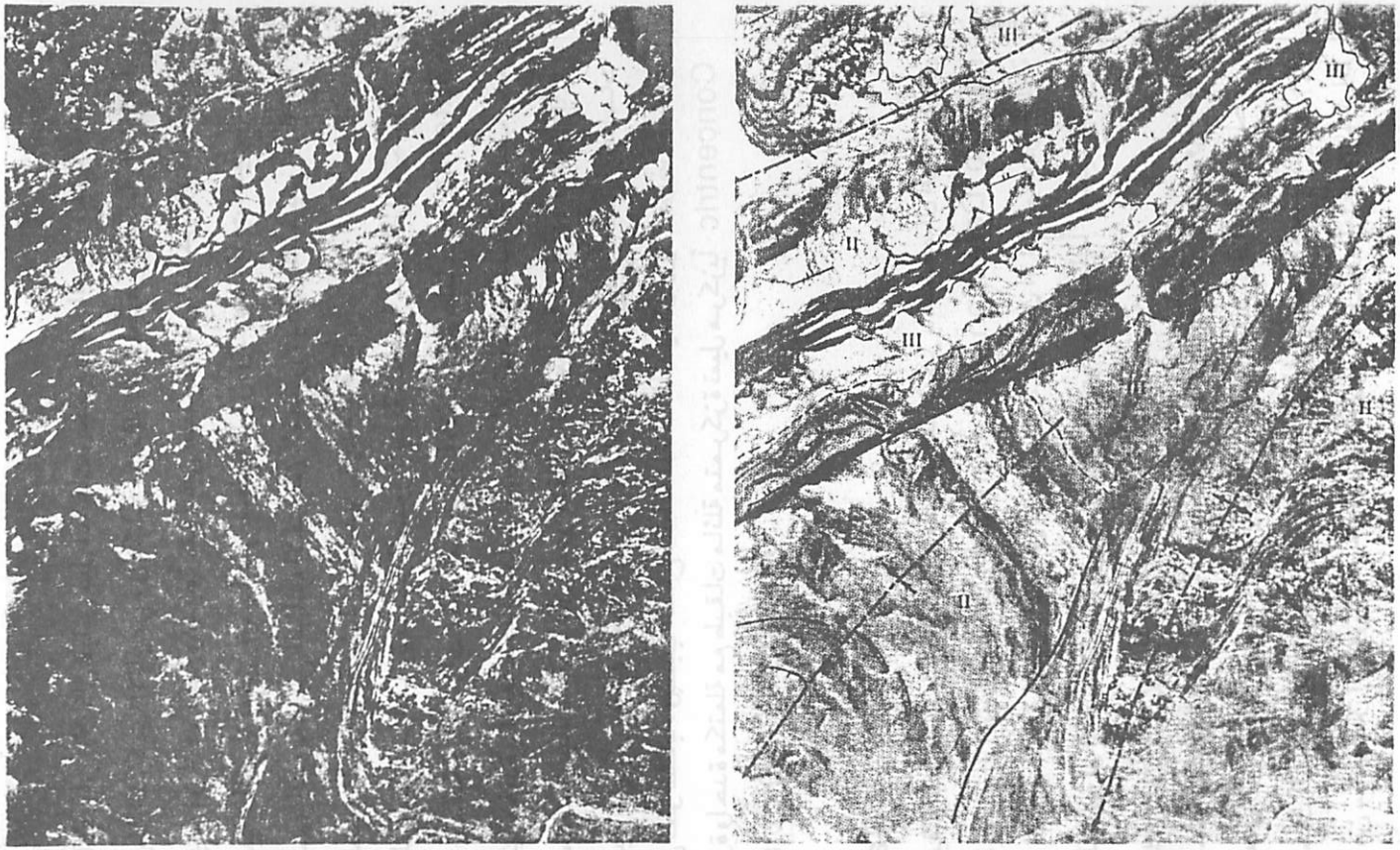


الشكل ٣-٧٧: الاستشعار الكهرومغناطيسي لمصادر الارض (عن Lillesand and Kiefer, ١٩٧٩, Remote Sensing and Image Interpretation , (c) John Wiley & Sons, Inc.).

منتظمة على امتداد خط طيرانٍ مختارٍ بعنايةٍ ، وهو ما يجب ان يحدد بدقة متناهية . وتلتقط الصور عند فترات متقاربة بما يكفي لانتاج تداخل Overlap يتراوح بين ٥٠-٦٠ بالمئة (تداخل نهائي Endlap داخل الخط وتداخل جانبي Sidelap بين الخطوط المتجاورة). وقد تستعمل الصور بطريقتين . ففي احدى الطرق يمكن ان تدمج مع بعضها في فسيفساء Mosaic بعد ان تزال الحواف المتداخلة غير المرغوب فيها من الصور بعناية ، ويمكن اعادة تصوير الفسيفساء الناتجة لسهولة الانتاج. كما يمكن استعمال الفسيفساء التصويرية كأساس لكل من المسوحات الطوبوغرافية والجيولوجية. ومثل اعداد الخارطة النهائية ، تحتاج الفسيفساء التصويرية الى عدد من التصحيحات. فالمقياس الحقيقي للفسيفساء يجب ان يُعاير Caliberated بالاشارة الى مواقع تم قياس انفصالها Separation على الأرض. ان المقياس قد لا يكون ثابتاً على اتساع الفسيفساء اذا كان الارتفاع قد تغير اثناء الطيران ، او تغير ارتفاع سطح الارض . وبحسب مقياس ارتفاع التضاريس استناداً الى مستوى سطح البحر ، كما يجب تحديد اتجاه الفسيفساء وموقعها الدقيقين على سطح الارض ايضاً. ويمكن انجاز هذه المهمة بصنع مثبتات نجميه Astrofixes على المواقع الارضية بحيث يمكن تشخيصها بسهولة على الصورة الجوية.

والتقنية الثانية واسعة التطبيق في التصوير الجوي تتم باستعمال تداخل الصور المتجاورة. إذ يمكن رؤية صورتين متداخلتين جنباً الى جنب بالابعاد الثلاثة Stereoscopically (الشكل ٣-٧٨). وبذلك يمكن رؤية الطوبوغرافية بالابعاد الثلاثة. وفي ايام التصوير الجوي المبكرة ، كانت الصورة تفحص باستعمال الستريوسكوب الثنائي العيني البسيط Simple Binocular Stereoscope . اما اليوم فتتوفر اجهزة أكثر تطوراً. كما أصبح بالامكان قياس ارتفاع سطح الارض بدقة استناداً الى مستوى مرجعي معين ، وبذلك يمكن تحويل الارتفاعات النقطية Spot Heights الى ارقام ، وتوضع على خارطة الأساس Base Map ، او يمكن رسم الخطوط الكنتورية من الصور الجوية مباشرة ، وهكذا يمكن الحصول على مسوحات طوبوغرافية عالية الدقة.

ولان الطوبوغرافية ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالجيولوجيا ، فأن الصور الجوية يمكن أن تُستعمل أيضاً في رسم الخرائط الجيولوجية ، إذ يمكن رسم حدود الوحدات الصخرية



الشكل ٣-٧٨: مزدوج مجسم لصورتين جويتين مع خارطة تفسيرية . المقياس التقريبي ١:٣٠٠٠٠ . تمثل (١) أقدم وحدة متكشفة وتتكون من حجر جيري جيد التطبق . أما (١١) فانها تتكون من الرمال والسجيل . الوحدة (١١١) تمثل ترسبات سطحية . ويمكن تحديد العديد من الفوالق والطيات. (Courtesy of Huntings Geology and Geophysics Ltd.).

المختلفة ، ولكن الأهم ان بالامكان قياس ميل الطبقات ومضربها من الصور الجوية ، بحيث يمكن رسم خارطة للتركيب الاقليمي ، والاكثر من ذلك ، ان المظاهر الخطية Linear Features تبدو من الجو اكثر وضوحاً منها على سطح الارض. ويمكن رؤية المظاهر الخطية الرئيسية ، التي لا يمكن رؤيتها على سطح الارض، وتتبعها لمئات الكيلومترات باستعمال الصور الجوية. وعلى الجانب الآخر من المقياس ، يمكن تشخيص منظومة التكسرات من الصور الجوية ويمكن تحليل اتجاهها وترددها رقمياً.

تتعلق المعالجة السابقة بتفسير الصور الجوية الملتقطة من طائرات تحلق على ارتفاعات تبلغ بضعة كيلومترات فقط. اما صور الأقمار الاصطناعية Satellite images فانها مفيدة بطريقة مختلفة تماماً. فبسبب الارتفاعات الشاهقة يصعب رسم الخرائط المجسمة . من جانب آخر ، فأن صور الاقمار الاصطناعية قد تظهر وجود ظواهر خطية أساسية لا يمكن رؤيتها من الأرض او من الطائرات التي تحلق على ارتفاعات منخفضة. وعلى نحو مشابه، وبسبب اتساع المنطقة المغطاة فانه يمكن رؤية احواض رسوبية كاملة في صورة واحدة مكتملة مع طبقات مائلة متمركزة تميل مركزياً Concentric Centripetally Dipping Strata.

الرادار Radar

ثمة طريقة اخرى من طرق الاستشعار عن بعد تنجز باستعمال الرادار (وهي مختصر لعبارة كشف الراديو وتحديد المدى Radio Detection And Ranging) . وبينما تسجل الصور الجوية الضوء المنعكس من الشمس ، يستعمل الرادار مصدراً للطاقة موجودا على الطائرة او القمر الاصطناعي من النوع الذي يُحررّ اشعاعاً موجياً قصيراً (مايكروويف) ويسجل الاشعاع المرتد في هيئة مشابهة للصور الجوية.

والرادار فوائد جمّة قياساً للصور الجوية. فموجات المايكروويف تخترق السحب والضباب ويمكن ان تستعمل اثناء الليل والنهار ، وبذلك يمكن اجراء المسوحات الرادارية وفق محددات اقل من المسوحات التصويرية والميزة الثانية هي ان الرادار يسجل المعطيات على نحو مستمر ، بدلاً من سلسلة من الصور المنفصلة، وبذلك يمكن التخلص من العديد من مشاكل التداخل والمقارنة.

وتعتمد القدرة التمييزية المكانية Spatial Resolution على قطر الهوائي ، فكلما كبر الهوائي ، ازدادت القدرة التمييزية لطول موجي معين. وبسبب صعوبة تثبيت هوائي دوار على الطائرة ، فانه يثبت عموماً في الاسفل ويوجه جانبياً نحو الخارج. وبذلك فأن أغلب منظومات الرادار هي من الانواع الجانبية المحمولة هوائياً ، والتي تسمى SLAR او ببساطة SLR.

المسح متعدد الاطياف Multispectral Scanning

تقيس الصور الجوية التقليدية الضوء المنعكس. كما ان قياس الاشعاع الحراري لسطح الأرض باستعمال المتحسس الحراري Thermal Sensor لهو امر ممكن ايضاً. ويوسع المسح متعدد الأطياف هذه الأفكار، وذلك بقياسه أطوالاً موجية مختلفة للطاقة في وقت متزامن . وبدلاً من تسجيل الصور على فيلم (رق) من خلال عدسة بصرية ، يتم تسجيل المعطيات الكترونياً . ولهذا النوع من التسجيل فائدة عظمى تتمثل في الغاء الحاجة لنقل المعطيات الى الارض في فيلم يتوجب إظهاره. ويمكن بث المعطيات من قمر اصطناعي او (مركبة فضائية) بالموجات الراديوية. وبعد ذلك يمكن عرض المعلومات بصرياً في صور ذات لون زائف False-color لا تظهر التغيرات في الضوء بل في اي طول موجي تم اختياره للتسجيل والتحليل. وبينما تظهر الصور الضوئية أطوالاً موجية بين ٠,٣-٠,٩ مايكرومتر ، فان المسح متعدد الاطياف يمكن ان يمد هذه القيمة الى نحو ١٤ مايكرومتر.

ولان المعلومات تسجل الكترونياً وليس بصرياً ، فانها يمكن ان تعالج باستعمال الحاسوب الالكتروني باستعمال العديد من الطرق. وتتبع ثلاث خطوات رئيسية في المعالجة قبل ان يتم تفسيرها . فاولا يجب تصحيح الصورة كي تطابق الأصل قدر الامكان . اذ يتم تصحيح عيوب الصورة وتأثيرات الغبش Haze. كما يجب تحديد موقع الصورة نسبة الى سطح الأرض بدقة ، وان ترتبّ الصور المتجاورة في فسيفساء. في المرحلة الثانية من المعالجة يتم تحسين نوعية الصورة وبذلك من خلال توضيح حافات أنواع السطوح المختلفة اما بتوسيع التناقض Contrast Strecting او تشريح الكثافة Density Slicing واختيار الوان للحزم الطيفية المختلفة وفي المرحلة الثالثة والنهائية من المعالجة ، يتم استخلاص المعلومات وعرضها على نسخة ورقية (اللوحة ٣) باستعمال الوان زائفة.

يوفر المسح متعدد الاطياف معطيات اكثر بكثير ما توفره الصور التقليدية. ذلك لان مثل هذا المدى الطيفي الواسع يمكن ان يسجل ولان المعطيات يمكن ان تعالج بطرق مختلفة ، فالمعطيات عرضه لتنوع هائل من التفسيرات ويمكن تنفيذ المسح متعدد الاطياف من الطائرات ، ولكنه يستعمل على نطاق واسع في الاقمار الاصطناعية ، وخصوصا منظومتي (لاندسات LANDSAT) و(سيسات SEASAT) ولمزيد من التفاصيل عن الموضوع أنظر (Sabins, 1978).

الاستنتاجات Conclusions

ان الاستشعار عن بعد تقنية لا يستغنى عنها في التنقيب عن البترول فبشكل غير مباشر ، يمكن الاستفادة منها في رسم الخرائط الطوبوغرافية ، والاكثر مباشرة ، تم استعمال التصوير الجوي على نطاق واسع في رسم الخرائط الجيولوجية ، وخصوصاً في المناطق الصحراوية ، حيث يكون تأثير الغطاء النباتي في حده الادنى . اما تطبيق الاستشعار عن بعد متعدد الاطياف من الاقمار الاصطناعية فأنه ما يزال في مرحلة طفولته ، ويجب التزام الحذر الشديد عند تفسيره. ولقد أظهر (Halbouty, 1980) الكيفية التي ظهر بها خمسة عشر حقلاً بترولياً عملاقاً حول العالم في صور اللاندسات. وكما هو الامر مع جميع المعدات الاستكشافية ، فأن الاستشعار عن بعد متعدد الاطياف عرضة لسوء التفسير والتفسير الخاطيء عندما يستعمل بمفرده وعندما يستعمل بالترابط مع تقنيات اخرى ، مثل المسوحات الجذبية والمغناطيسية ، فأنه قد يحدّد الشواذ التي تستحق المزيد من الاهتمام على سطح الارض.

مراجع مختارة

SELECTED BIBLIOGRAPHY

Oil well drilling and production:

MOORE, P. L. 1974. *Drilling Practices Manual.* Tulsa: Pennwell, 448 pp.

NIND, T. E. W. 1981. *Principles of Oil Well Production.* New York: McGraw-Hill, 391 pp.

Formation evaluation:
Books and chart books of the various wireline service companies are essential (and free), but some assume an understanding of the subject. Other useful books include:

ASQUITH, G. 1982. *Basic Well Log Analysis for Geologists.* Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 216 pp.

MERKEL, R. H. 1979. *Well Log Formation Evaluation.* Am. Assoc. Petrol. Geol. Course Note Series, No. 4, 82 pp.

PIRSON, S. J. 1983. *Geological Well Log Analysis,* Third Edition. Houston: Gulf Publishing Co., 424 pp.

Geophysics:
Books that cover gravity, magnetic, and seismic surveying:

DOBRIN, M. B. 1976. *Introduction to Geophysical Prospecting.* New York: McGraw-Hill, 630 pp.

McQUILLAN, R. and ARDUS, D. A. 1977. *Exploring the Geology of Shelf Seas.* London: Graham and Trotman, 234 pp.

NETTLETON, L. L. 1976. *Gravity and Magnetics in Oil Prospecting.* New York: McGraw-Hill, 464 pp.

TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E., and KEYS, D. A. 1976. *Applied Geophysics.* London: Cambridge University Press, 860 pp.

For seismic prospecting only, see:

ANSTEY, N. A. 1982. *Simple Seismics.* Boston: International Human Resources Development Corporation, 168 pp.

COFFEEN, J. A. 1978. *Seismic Exploration Fundamentals.* Tulsa: Petroleum Publishing Co., 277 pp.

FITCH, A. A. 1976. *Seismic Reflection Interpretation.* Berlin: Gebruder Borntraeger, 148 pp.

KLEYN, A. H. 1982. *Seismic Reflection Interpretation.* Barking: Applied Science Publishers, 269 pp.

PAYTON, C. E. 1977. *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration.* Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 26, 516 pp.

TUCKER, P. M. and YORSTON, H. J. 1973. *Pitfalls in Seismic Interpretation.* Soc. Expl. Geophys., Monograph No. 2, 50 pp.

WATERS, K. H. 1978. *Reflection Seismology.* New York: Wiley, 394 pp.

Remote sensing:

LILLESAND, T. M. and KIEFER, R. W. 1979. *Remote Sensing and Image Interpretation.* New York: Wiley, 612 pp.

SABINS, F. F. 1978. *Remote Sensing: Principles and Interpretation.* San Francisco: Freeman, 175 pp.

SIEGAL, B. S. and GILLESPIE, A. R. 1980. Remote Sensing in Geology. London: Wiley, 720 pp.

REFERENCES

ARCHIE, G. E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *J. Petrol. Technol., 5*, Tech Paper No. 1422. Also published in *Trans. Am. Inst. Mech. Eng., 146*, 54–62.

BAILEY, R. J., BUCKLEY, J. S., and KIELMAS, M. M. 1975. Geomagnetic reconnaissance on the continental margin of the British Isles between 54° and 57° N. *J. Geol. Soc. Lond., 131*, 275–282.

BURKE, J. A., CAMPBELL, R. L., and SCHMIDT, A. T. 1969. The lithoporosity crossplot. *The Log Analyst*, Nov.–Dec., 1–29.

CAMPBELL, R. L. 1968. Stratigraphic applications of dipmeter data in mid-continent. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 52*, 1700–1719.

COLDRE, M. L. 1891. Les Salines et les Puits de Feu de la Province du Se-Tchouan. *Annales des Mines*, 8th Series, *19*, 441–528.

DICKEY, P. A. 1979. *Petroleum Development Geology*. Tulsa: PPC Books, 398 pp.

DOBSON, W. F. and SEELYE, D. R. 1981. Mining technology assists oil recovery from Wyoming field. *J. Petrol. Technol., 34*, 259–265.

FERRIS, C. 1972. Use of gravity meters in search for traps. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields*. R. E. King (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 252–270.

GARDNER, G. H. F. L., GARDNER, L. W., and GREGORY, A. R. 1974. Formation velocity and density—the diagnostic basics of stratigraphic traps. *Geophys., 39*, 770–780.

GILREATH, J. A. and MARICELLI, J. J. 1964. Detailed stratigraphic control through dip computation. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 48*, 1902–1910.

GOETZ, J. F., PRINS, W. J., and LOGAR, J. F. 1977. Reservoir delineation by wireline techniques. Jakarta: *Proc. 6th Cong. Indonesian Petrol. Assn.*, 40 pp.

GRAY, W. D. T. and BARNES, G. 1981. The Heather oil field. In: *Petroleum Geology of the Continental Shelf of Northwest Europe*. L. V. Illing and G. D. Hobson (eds.). London: Heyden Press, 335–341.

HALBOUTY, M. T. 1980. Geologic significance of Landsat data for 15 giant oil and gas fields. *Am. Assoc. Petrol. Geol., 64*, 8–36.

HAMMER, S. 1982. Airborne gravity is here! *Oil and Gas J.*, 11 Jan., 113–122.

HARMS, J. C. and TACKENBERG, P. 1972. Seismic signatures of sedimentation models. *Geophys., 37*, 45–58.

HASSAN, M., HOSSIN, A., and COMBAZ, A. 1976. Fundamentals of the differential gamma ray log. Trans. 4th European Symp. *Soc. Prof. Well Log Anal.*, F, 18 pp.

HERITIER, F. E., LOSSEL, P., and WATHNE, E. 1979. Frigg field—Large submarine-fan trap in Lower Eocene rocks of North Sea Viking Graben. *Am. Assoc. Petrol. Geol., 63*, 1999–2020.

الفصل الرابع

البيئة تحت السطحية

Subsurface Environment

يُعنى حقل جيولوجيا البترول الى حدٍ كبير بدراسة الموائع، لا النفط والغاز الذين تمّ شرحهما في الفصل الثاني حسب، بل كذلك المياه التي ترتبط بهما والتي يتحركان من خلالها. وقبل أن نتفحص موضوع تولد النفط والغاز وهجرتهما في الفصل الخامس، يجب أن نتعامل مع البيئة تحت السطحية التي تحدث فيها هذه العمليات.

يبدأ هذا الفصل بالحديث عن المياه تحت السطحية، ثم يتعرض للضغط ودرجة الحرارة وتأثيرهما على تكاثف Condensation الغاز والنفط وتبخرهما. ويختتم الفصل بوضع هذه المكونات مع بعضها وشرح حركية (داينميكية) الموائع في الأحواض.

المياه تحت السطحية Subsurface Water

يمكن تمييز نوعين من المياه السطحية من خلال نمط تواجدهما، وهما:-

(١) المياه الحرة Free Water.

(٢) المياه المتخللة أو غير القابلة للاستخلاص Interstitial or irreducible Wate.

والمياه الحرة تستطيع الدخول الى المسامات Pores والخروج منها استجابة للفروقات في الضغط. أما المياه المتخللة من جانب آخر فهي ملتصقة بالحبيبات المعدنية، وذلك اما بالتعلق بالهياكل البلورية الذرية Atomic Lattices على هيئة هايدروكسيلات او على شكل طبقة رقيقة منفصلة عن المياه. وغالبا ما يطلق على المياه المتخللة اسم المياه غير القابلة للاستخلاص لانه لا يمكن تحريكها أثناء انتاج النفط أو الغاز من المكمن.

التحليل Analysis

تحلّل المياه تحت السطحية لأسباب معينة عديدة، جانبا من الفضول العلمي العام. ومثلما ذكرنا في الفصل الثالث (ص ٧٧)، فأن قياس مقاومية ماء التكوين Resistivity والتي يرمز اليها بالرمز (Rw) لهو اجراء ضروري لأغراض التقييم الدقيق للتشبع المائي (Sw)، وبالتالي، للتشبع الهايدروكاربوني. وترتبط مقاومية ماء التكوين ارتباطا وثيقا

بالملوحة Salinity. وتتغاير الملوحة عموديا أو أفقيا عبر الحوض. وغالبا ما تزداد الملوحة مع الاقتراب من المكامن الهايدروكاربونية. وبذلك فأن خرائط الملوحة الاقليمية قد تكون أداة استكشافية هامة. وعلى نحو مشابه، تحتوي المياه تحت السطحية على بقايا من الغازات الهايدروكاربونية الذائبة التي تزداد محتوياتها مع الاقتراب من التراكمات الهايدروكاربونية.

يمكنُ أن تُحلّل المياه تحت السطحية بطريقتين، اذ يمكنُ احتساب التركيز الكلي للمواد الصلبة أو الملوحة من مقاومية ماء التكوين (Rw) باستعمال مجس الجهد التلقائي (S.P.Log)، مثلما تم شرح ذلك في صفحة (٧٩)، وبدلاً من ذلك يمكن الحصول على عيّنات من فحوصات جذع الحفر Drill stem tests أو أثناء الانتاج. ويجب اتخاذ الحيطة عند تفسير العيّنات المأخوذة من فحوص جذع الحفر بسبب احتمالية التلوث بالراسخ الطيني Mud Filterate.

التكوين Genesis

من الناحية التقليدية، يمكن تعريف أربعة أنواع من المياه تحت السطحية اعتمادا على طريقة تكونها:

المياه الجوفية Meteoric

المياه الخليطة Mixed

المياه الحبيسة Connate

المياه الحديثة Juvenile

تتواجد المياه الجوية قرب سطح الأرض وتنتج من ترشح مياه الأمطار. وتكون ملوحتها واطئة جدا بالطبع، وتميل الى أن تكون من النوع المُؤكسد. وتكون المياه الجوية في الأغلب حامضية بسبب وجود الأحماض الدبالية Humic والكاربونيك والنتريك (في الجو)، رغم أنها قد تتعادل بسرعة تحت السطح، وخصوصا عندما تنساب خلال الصخور الجيرية.

يصعب تعريف المياه الحبيسة، فلقد اعتقد في البداية أنها مياه بحرية متبقية أو فضالية Residual وقد تم احتجازها أثناء الترسيب. وتضم التعريفات الحالية للمياه الحبيسة تصورات عديدة من بينها أنها قد تكون "مياهاً متخللةً Interstitial" موجودة في المكمن قبل تشويهه بالحفر" (Case, 1956)، أو أنها "مياه دُفنت في نظام هايدرولي

(مائي) مغلق ولم تشكل جزءا من دورة مائية منذ زمن طويل" (White, 1957). وتختلف المياه الحبيسة اختلافا واضحا عن مياه البحر في كل من التركيز والتركيب الكيميائي.

أما المياه الحديثة فهي ذات أصل صهاري Magmatic أولي، وقد يكون صعبا البرهنة على أن مثل هذه المياه هي مياه أولية حقا، ولم تتعرض لأي نوع من التلوث من المياه الحبيسة.

تقودنا هذه التعريفات الثلاثة طبيعيا الى المرتبة الرابعة من المياه تحت السطحية – أي ذات الأصل المختلط. وقد تنتج المياه المختلطة من امتزاج المياه الحديثة والحبيسة والمياه الجوية. وفي معظم الأحواض يوجد نطاق انتقالي بين الخزان السطحي Surface Aquifer ونطاق المياه الحبيسة العميق. ولقد تمت مناقشة تأثير هذا النطاق الانتقالي على مجس الجهد التلقائي مسبقا (ص ٧١).

كيمياء المياه تحت السطحية Chemistry of subsurface Waters

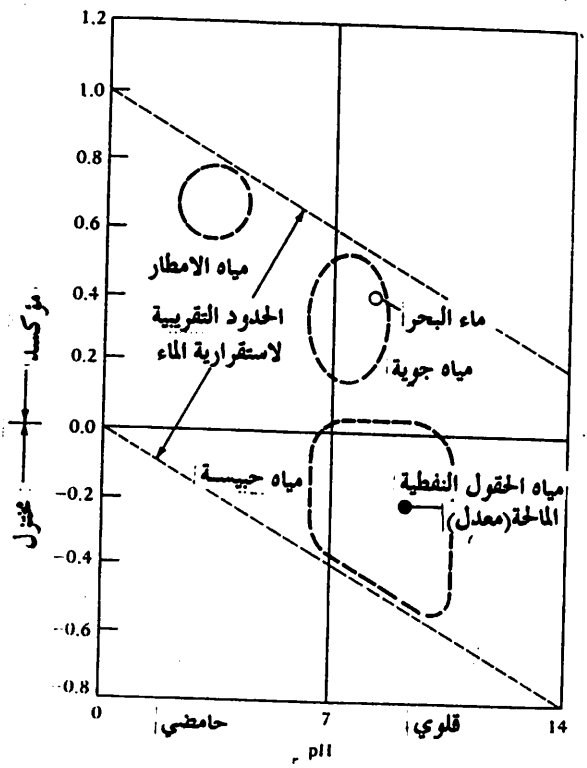
تشمل المميزات الأربع للمياه تحت السطحية كلا من رقم التأكسد (EH) والرقم الهايدروجيني (PH) والتركيز والتركيب.

رقم التأكسد (EH) والرقم الهايدروجيني (PH)

ان المعطيات المتعلقة بكل من رقم التأكسد والرقم الهايدروجيني الخاصة بالمياه تحت السطحية ملخصة في الشكل (٤-١)، أنظر كلاً من:
(Friedman and Sanders1978, Krumbine and Garrels,1952, & Pirson, 1983). وتُظهر هذه المعطيات أن مياه الأمطار مؤكسدة وحامضية، وهي تحتوي بشكل عام الأوكسجين والنيتروجين وثاني أوكسيد الكاربون مذابة مع نترات الأمونيوم بعد حدوث الزوابع الرعدية.

وبينما تتغلغل مياه الأمطار داخل التربة، فأنها تتعرض الى تغييرات عديدة في مسار تحولها الى مياه جوية. وهي تميل الى أن تتحول الى مياه مختزلة Reducing Water عندما تقوم بأكسدة المادة العضوية. ان الرقم الهايدروجيني PH للمياه الجوية قد يبقى منخفضا في البيئات المستنقعية Swampy Environment بسبب وجود الأحماض

الدبالية، بيد أنه قد يرتفع في المناخات القاحلة. فاذا انسابت المياه الجوية عميقا تحت السطح، فانها قد تذوب تدريجيا الأملاح وتزيد الرقم الهايدروجيني. وتظهر المياه الحبيسة العميقة مدى واسعا من قيم رقم التاكسد والرقم الهايدروجيني اعتمادا على تأريخها وخصوصا على مدى اختلاطها مع المياه الجوية أو احتوائها على مكامن قديمة محتجزة تحت سطوح عدم التوافق Unconformities. وتميل مياه حقول النفط شديدة الملوحة الى أن تكون قلوية وشديدة الاختزال. ولمزيد من التفاصيل عن EH الموائع تحت السطحية وأهميتها في التنقيب عن البترول، أنظر (Pirson 1983).



الشكل ٤-١: مرتسم تخطيطي لرقم الهيدروجين- رقم الاكسدة يظهر التوزيع التقريبي للانواع المختلفة من الموائع تحت السطحية. مختزل مؤكسد مياه الامطار الحدود التقريبية لاستقرار المياه مياه البحر المياه الجوية مياه الحقول النفطية الماحة (معدل) مياه حبيسة قلوي حامضي.

وتتحكم قيم رقم التاكسد والرقم الهايدروجيني للموائع الموجودة في المسامات في ترسيب الأطيان واذابتها فضلا عن بقية مواد التسميت التحويرية الأخرى (أنظر ص ٢٩٦).

ومن الواضح أن دراسة علاقتها مع العمليات التحويرية Diagenesis ونشوء المسامية لهو أمر مهم (أنظر Selley 1982، ص ٩١-١٠٧ لمزيد من التفاصيل).

التركيز *Concentration*

لقد ذكرنا مسبقا أهمية قياس تركيز الأملاح في المياه تحت السطحية فهي ليست مهمة في تقييم الآبار فحسب، ولكن المعطيات يمكن أن ترسم اقليميا كأداة استكشافية. ان الملوحة، أو على نحو أصح المواد الصلبة الكلية المذابة Total Dissolved Solids تُقاس بالجزء بالمليون ولكن غالبا ما يعبر عنها للملائمة بالملغرام لكل لتر:

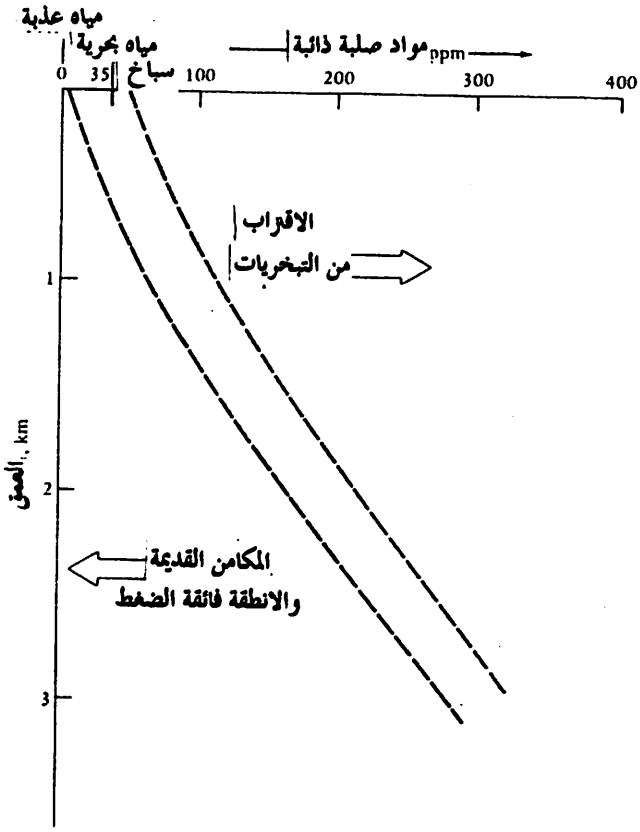
$$\text{ملغم/١} = \frac{\text{جزء بالمليون PPM}}{\text{الكثافة Density}}$$

وتحتوي مياه البحر الاعتيادية على نحو (٣٥٠٠٠) جزء بالمليون (٣.٥ بالمئة) من المعادن المذابة، وتتراوح القيم في المياه تحت السطحية بين صفر جزء بالمليون في المياه العذبة الى نحو (٦٤٢٧٩٨) جزء بالمليون من مياه شديدة الملوحة من صخور سالينا الدولوميتية Salina dolomite في ميتشغن (Case, 1956)، والقيمة الأخيرة مرتفعة جدا بسبب ذوبان التبخريات Evaporites. وفي معظم المياه الحبيسة، فان محتويات المواد الصلبة الذائبة نادرا ما تتجاوز (٣٥٠٠٠٠) جزء بالمليون. وفي الرمال فان ملوحة المياه الحبيسة تزداد بشكل عام مع العمق (الشكل ٤-٢) بمعدلات تتراوح بين ٨٠ الى ٣٠٠ ملغم/(لتر)(م) (Dickey, 1979). ولمعرفة مصادر المعطيات انظر (Dickey, 1966, 1969 و Russell, 1951).

ولقد لوحظت اتجاهات معاكسة موضعية للاتجاه العام وعزيت الى سببين، فالمياه الجوية قد تحتجز أحيانا تحت سطح عدم التوافق، وبذلك تحفظ كخزان قديم Paleoaqifer. ولقد ذكر مثال ظاهر على هذا التواجد من سطح عدم توافق تحت ترسبات العصر الطباشيري من "اسرائيل" (Bentor, 1969).

فهنا تبلغ قيمة ملوحة الطبقات الواقعة فوق سطح عدم التوافق نحو (٦٠٠٠٠) جزء بالمليون، بينما تنخفض قيم الملوحة الى نحو (٢٠٠٠٠) جزء بالمليون تحت سطح عدم التوافق قبل أن

تزداد تدريجيا مرة أخرى الى أكثر من (٤٠٠٠٠) جزء بالمليون.



الشكل ٤-٢: مرتسم تخطيطي للملوحة مقابل العمق للمياه تحت السطحية . (عن Dickey, ١٩٦٦, ١٩٦٩, and Russell, ١٩٥١.).

كما لوحظ اتجاه معاكس لازدياد الملوحة مع العمق في الأنطقة ذات الضغوط الفائقة Overpressure . ولسوف تتم مناقشة هذه الظاهره بتفصيل أكثر لاحقا (ص ١٨٧)، ولكنها بشكل عام تعكس حقيقة أن المياه ذات الضغوط الفائقة تحتجز ولا يمكن أن تتحرك. ومع ذلك، فأن الزيادة الحاصلة في الملوحة مع العمق في الصخور السجيلية هي أقل وضوحا. وغالبا ما تكون ملوحة الرمل زهاء ثلاثة أضعاف ملوحة السجيل الذي يمكن أن يتطبق معه، (Dickey, 1979). ولقد عُزي هذا الفرق مع الزيادة الكلية في الملوحة مع العمق الى غربلة الملح Sieving), (Salt (De Sitter, 1947). ان السجيل قد

يتصرف مثل غشاء شبه نفاذ. وعندما يتحرك الماء نحو الأعلى خلال الترسبات المنضغطة، فان السجيل يمنع أيونات الملح من الهروب من الرمل، وتكون النتيجة النهائية لذلك زيادة مطردة للملوحة مع العمق (أنظر Magara, 1977, 1978 لمزيد من التفصيل).

واستنادا الى الدراسات التي أجريت على خليج المكسيك، ودلتا مكنزي Mackenzie Delta قام كل من (Overton, 1973 و Van Elsberg, 1978) بتعريف أربع بيئات تحت سطحية رئيسية وهي:-

النطاق الأول: السطحي ويصل الى عمق يبلغ نحو كيلومتر واحد، وهو نطاق المياه الجوية الدوّارة، والملوحة فيه منتظمة بشكل عام.

النطاق الثاني: يتراوح عمق هذا النطاق بين ١-٣ كيلومتر، وتزداد فيه الملوحة عموما مع العمق، ويكون ماء التكوين المالح مؤينا.

النطاق الثالث: يتجاوز عمق هذا النطاق ٣ كيلومتر، وبيئته مختزلة كيميائيا تتكون فيها الهايدروكاربونات، وملوحته منتظمة وتزداد مع العمق، وقد تقل اذا تعرضت الى ضغط فائق.

النطاق الرابع: يتميز هذا النطاق بتحول مبدئي Incipient Metamorphism مع اعادة تبلور الأطيان الى المايكا Mica.

بعد أن أنهينا مناقشة التغيرات العمودية في الملوحة، فأننا بالمقابل سوف نتناول تغيّرات الملوحة الأفقية. ومن المعروف منذ فترة طويلة، أن الملوحة تزداد من حافات الحوض الى وسطه ولقد وثق العديد من حالات زيادة الملوحة هذه من قبل كل من (Case, 1945) و (Youngs, 1975). وأن من السهل تفسير هذه الظاهرة، اذ أن حافات البحر أكثر تأثرا بالمياه الجوية الدوّارة من وسط الحوض، حيث يكون الانسياب قليلا جدا أو أنه يأتي من الأسفل (أنظر ص ١٩٧). ويمكن أن تكون خرائط تساوي الملوحة الاقليمية Regional Isohaline Maps أداة استكشافية هامة، اذ تدلل على المناطق ذات الملوحة المرتفعة، ويفترض أن هذه المناطق هي مناطق راكدة Stagnant لا تتأثر بانسياب المياه الجوية حيث تحفظ تراكمات النفط والغاز.

التركيب الكيميائي Composition

تحتوي المياه تحت السطحية على تراكيز متغايرة من الأملاح اللاعضوية مع بقايا من المركبات العضوية وبضمنها الهايدروكاربونات. ويقدم الجدول (٤-١) تحليلات للعديد من عيّنات المياه تحت السطحية. وللمزيد من المعطيات أنظر (Krejci-Graf, 1962, 1978) وكذلك (Collins, 1975).

ولا تختلف المياه الجوية عن المياه الحبيسة في الملوحة حسب، بل في الكيمياء أيضا. اذ أن للمياه الجوية تركيزا أعلى من أيونات البايكاربونات والكبريتات ومقادير منخفضة من الكالسيوم والمغنيسيوم. وتمثل هذه الفروقات الأساس في تصنيف المياه تحت السطحية الذي اقترحه (Sulin, 1946) والذي تم استعماله على نطاق واسع من قبل الجيولوجيين (الجدول ٤-٢). ولمراجعة عن هذا التصنيف وغيره، أنظر (Ostroff, 1967).

لا تختلف المياه الحبيسة عن مياه البحر في احتوائها على مواد صلبة مذابة أكثر، لكن في كيميائيتها أيضا. وتحتوي المياه الحبيسة على نسبة أقل من الكبريتات والمغنيسيوم، والكالسيوم في الأغلب (ربما ينتج ذلك من ترسيب الأنهايدرايت والدولومايت والكالسايت)، ونسب عالية من الصوديوم والبوتاسيوم والكلوريدات أكثر مما تحويه مياه البحر.

وبسبب التركيب الكيميائي المعقد للمياه تحت السطحية، فأن الطريقة المُثلى لعرضها، ومقارنتها مع بعضها هي الطريقة البيانية Graphic. ولقد اقترح العديد من المخططات من قبل كل من (Tickell, 1921) و(Sulin, 1946). وتم رسم التركيب الكيميائي لمياه البحر والمياه الحبيسة النموذجية اعتمادا على هذه المخططات في الشكل (٤-٣).

تحتوي المياه الحبيسة أيضا على بقايا من الهايدروكاربونات المذابة. وكان العمل الأصلي المتعلق بالموضوع قد نُشر من قبل (Buckley et al., 1958). واعتمادا على عملهم المستند على دراسة آلاف من نتائج فحوصات جذع الحفر من منطقة الغولف كوست Gulf Coast، فأنهم عثروا على ميثان مذاب في المياه تحت السطحية بتراكيز تصل الى ١٤ قدم مكعب قياسي لكل برميل Standard Cubic Feet per Barrel. كما أنهم سجلوا وجود الايثان والبروبان وتراكيز قليلة جدا من الهايدروكاربونات الأثقل. ويتضاءى مقدار الغازات المذابة مع الملوحة ويزداد مع العمق ومن حافة الحوض الى وسطه. وتم وصف هالات من المياه الحبيسة المشبعة بالغاز حول حقول النفط.

الجدول ٤-١: تحاليل ممثلة لمياه الحقول النفطية (جزء بالمليون).

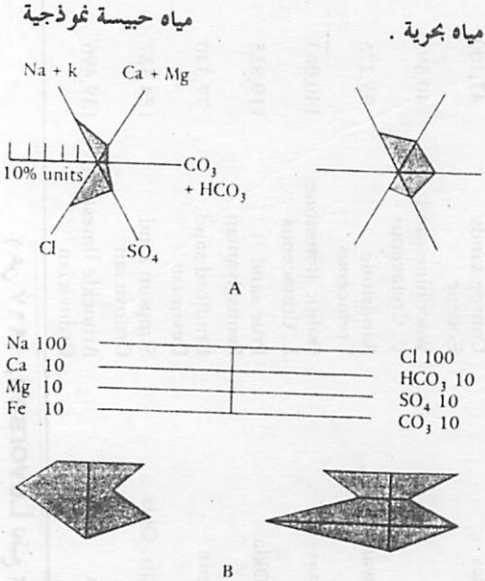
الخزان	الصخرة المكمنية وعمرها .	Cl	SO_4	CO_3	HCO_3	$Na^+ + K^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Total, ppm
Seawater, ppm		19,350	2690	150		11,000	420	1300	35,000
Seawater, %		55.3	7.7	0.2		31.7	1.2	3.8	
Lagunillas, western Venezuela	2000-3000 ft Miocene	89	—	120	5263	2003	10	63	7548
Conroe, Texas	Conroe sands Eocene	47,100	42	288		27,620	1865	553	77,468
East Texas	Woodbine sand U. Cretaceous	40,598	259	387		24,653	1432	335	68,964
Burgan, Kuwait	Sandstone Cretaceous	95,275	198	—	360	46,191	10,158	2206	154,388
Rodessa, Texas-La.	Oolitic limestone L. Cretaceous	140,063	284	—	73	61,538	20,917	2874	225,749
Davenport, Okla.	Prue sand Pennsylvanian	119,855	132	—	122	62,724	9977	1926	194,736
Bradford, Penn.	Bradford sand Devonian	77,340	730	—	—	32,600	13,260	1940	125,870
Oklahoma City, Okla.	Simpson sand Ordovician	184,387	286	—	18	91,603	18,753	3468	298,497
Garber, Okla.	Arbuckle limestone Ordovician	139,496	352	—	43	60,733	21,453	2791	224,868

(عن Levorsen, ١٩٦٧ تطبع بموافقة مسبقة).

أنواع المياه	نسب التركيز معبر عنها كنسبة مئوية للملي مكافئ.		
	$\frac{Na}{Cl}$	$\frac{Na-Cl}{SO_4}$	$\frac{Cl-Na}{Mg}$
جوية			
كبريتات-صوديوم	>1	<1	<0
بايكربونات-صوديوم	>1	>1	<0
حبيسة			
كلوريد-مغنيسيوم	<1	<0	<1
كلوريد-كالسيوم	<1	<0	>1

الجدول ٤-٢: شعب المياه الرئيسية المختلفة حسب تصنيف **Sulin**.

تكتسب هذه المعطيات أهمية فائقة لسببين، فهي تزيد من امكانية رسم خرائط اقليمية لمحتوى الغازات المذابة باعتبارها دليلا لتحديد حقول جديدة من النفط والغاز. كما أن لهذه المعطيات علاقة بالمشاكل المتعلقة بهجرة النفط والغاز (كمثال على ذلك أنظر Price, 1980). ولقد تم شرح هذا الموضوع بتفصيل أكثر في الفصل الخامس (ص ٢٤٢).



الشكل ٤-٣: الطرق المستعملة في رسم كيمياء المياه. مرتسم **Tickell** (أ) ومرتسم **Sulin** (ب) لمياه البحر (اليمين) والمياه الحبيسة النموذجية (اليسار).

درجات الحرارة تحت السطحية Subsurface Temperatures

المبادئ الأساسية Basic Principles

تزداد درجة الحرارة من سطح الأرض باتجاه مركزها. ويمكن أن تسجل درجة حرارة قاع البئر ("BHT" Bottom Hole Temperature) من الآبار، وغالبا ما يتم قياسها عدة مرات عند كل نقطة تبطين Casing. وعندما ينزل كل مجس يمكن قياس درجة حرارة القاع. أن تعدد القراءات عند كل عمق لهو أمر ضروري لأن طين الحفر في قاع البئر يستغرق عدة ساعات كيما يسخن ليصل الى درجة حرارة الطبقات المجاورة والمحيطة بتجويف البئر. وبذلك يتم تسجيل درجات حرارة القاع مع عدد الساعات منذ التدوير Circulation. ويظهر الشكل (٤-٤) منحنى تراكم درجات حرارة العمق BHT build-up Curve. ويمكن أن تتحدد درجة الحرارة الحقيقية المستقرة من مرتسم هورنر Horner Plot (Ferti and Wichman, 1977). ووفق هذه الطريقة يتم رسم درجة الحرارة المسجلة مقابل النسبة التالية:-

$$\frac{\Delta t}{(t+\Delta t)}$$

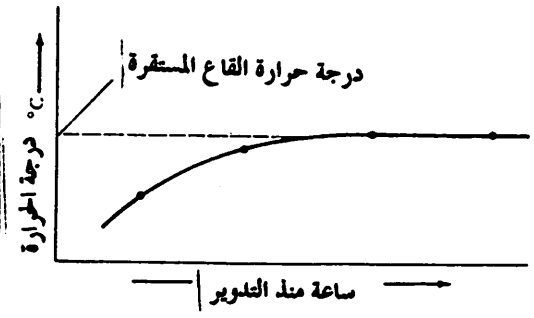
حيث تمثل:

t : عدد الساعات منذ فترة التدوير والجس.

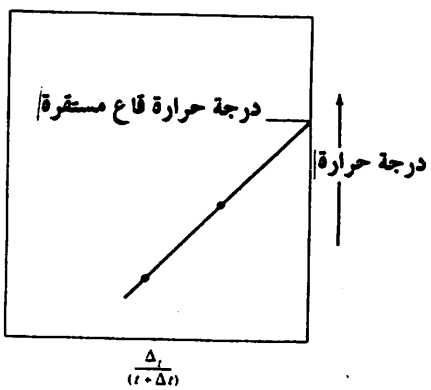
Δt : ساعات التدوير عند ذلك العمق.

ويظهر الشكل (٤-٥) مثالا على مرتسم هورنر. ولتحليل أكثر تفصيلا عن هذا الموضوع أنظر (Carstens and Finstad, 1981).

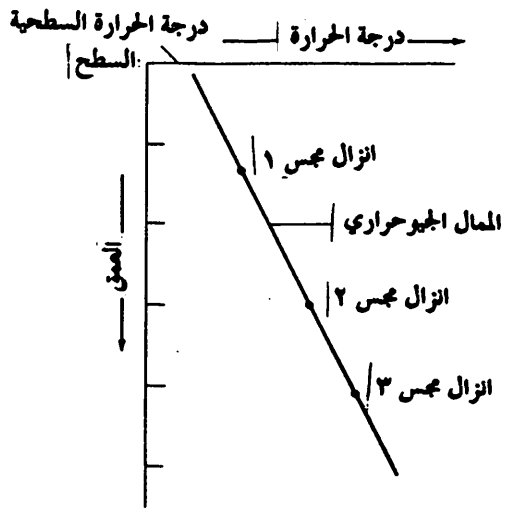
ما أن يتم الحصول على عدة قراءات لدرجة حرارة القاع عندما يتم حفر البئر، فانه يمكن عندها رسمها مقابل العمق لتحديد المال الجيوحراري Geothermal Gradient. (الشكل ٤-٦). وتتراوح هذه القيمة بين مما يقرب من ٨ . ١م°/١٠٠ متر الى ٥ . ٥م°/١٠٠ متر. وعندما يتم رسم عدة قيم لدرجة حرارة القاع مقابل العمق لبئر ما، فانها ربما تظهر أن المال الجيوحراري ليس ثابتا مع العمق. ويعزى هذا الاختلاف عموما الى



الشكل ٤-٤: مرتسم بياني يظهر ان درجة حرارة قاع البحر لاتتحدد الا بالعديد من القراءات المأخوذة على أمتداد عدة ساعات.



الشكل ٤-٥: مرتسم Horner يظهر الكيفية التي تستقراً بها درجة حرارة قاع البئر من قراءتين.



الشكل ٤-٦: مرتسم تخطيطي يظهر الكيفية التي يمكن بها تحديد المعال الجيوحراري من قراءتين أو أكثر للدرجة حرارة قاع البئر أخذتا عند حالات انزال مجسات مختلفة.

التغيّرات الحاصلة في التوصيلية الحرارية للطبقات المخترقة Thermal Conductivity. ويمكن التعبير عن هذه العلاقة على النحو التالي:-

الانسياب الحراري= الممال الجيوحراري x التوصيلية الحرارية للصخرة.

ويُظهر الجدول (٤-٣) التوصيلية الحرارية للترسبات المختلفة. وعندما تتداخل ترسبات ذات توصيلية حرارية مختلفة مع بعضها، فأن الممال الجيوحراري سوف يكون مختلفا لكل طبقة.

الجدول (٤-٣) : التوصيلية الحرارية للصخور المختلفة.

الصخارية	التوصيلية الحرارية $W\ m^{-1}\ C^{o-1}$
الهالايت(ملح الطعام)	٥.٥
الانهايدرايت	٥.٥
الدولومايت	٥
الحجرالجيري	٣.٥-٢.٨
الحجر الرملي	٤-٢.٦
السجيل	٢.٩-١.٥
الفحم	٠.٣

عن Evans, 1977, Oxburgh and Andrews-Speed, 1981

ويمكن توقّع مدى واسعا من القيم من الرمل والسجيل والحجر الجيري بسبب التغيرات في المسامية. ولأن التوصيلية الحرارية للماء هي أوطأ منها للمعادن، فأنها تقلّ مع نقصان المسامية وزيادة عمق الدفن Burial Depth اعتمادا على المعادلة التالية:-

$$K_{pr} = K_w^{\phi} \cdot K_r^{1-\phi}$$

حيث أن:

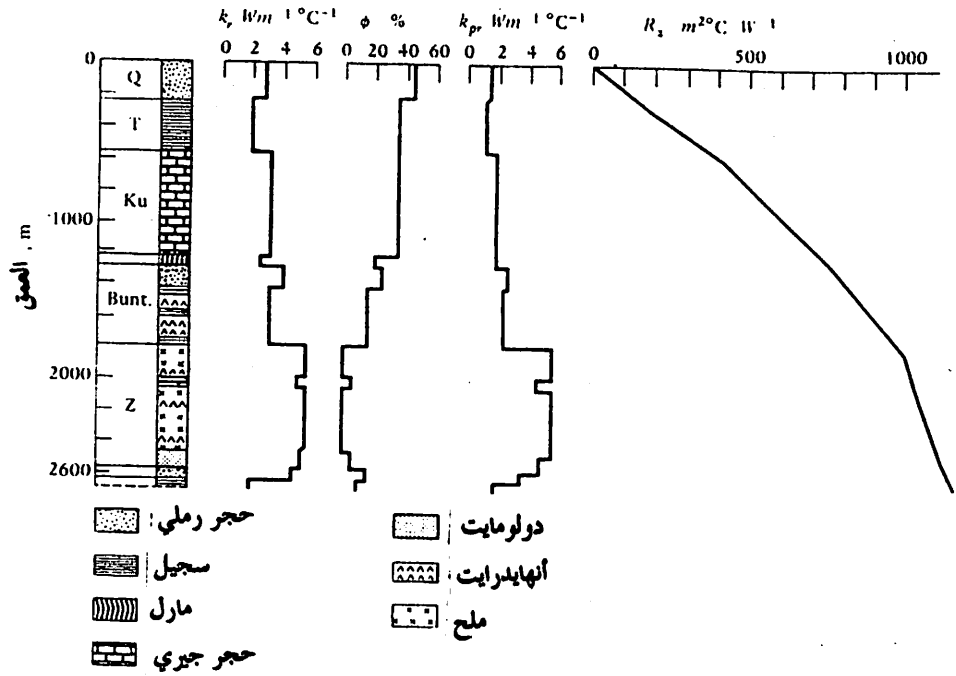
K_{pr}= التوصيلية الكلية المشبّعة.

Kw = توصيلية مائع المسامات.

Kr = توصيلية الصخرة عند مسامية تساوي صفرا.

ϕ = المسامية.

يوضح الشكل (٤-٧) التغيرات العمودية في التوصيلية والمسامية والممال الجيوحراري لأحدى الأبار من بحر الشمال. لاحظ كيف تزداد التوصيلية مع الممال وتقلّ مع العمق ونقصان المسامية. وتعزى التغيرات الموضعية الى الصخارية وخصوصا التوصيلية المرتفعة لتبخريات زيخشتاين Zechstein Evaporites.



الشكل ٤-٧: التغيرات في التوصيلية الحرارية والمسامية والممال الجيوحراري لبئر في بحر الشمال . لاحظ الكيفية التي تزداد فيها التوصيلية الحرارية والممال تدريجا مع العمق ومع تناقص المسامية . لاحظ أيضا التذبذبات الموضعية الناتجة من الصخارية وخصوصا التوصيلية العالية لتبخريات الزخشتاين. (عن Oxburgh and Andrews-Speed, ١٩٨١).

ما أن يتم رسم الممال الجيوحراري، يمكن عندها رسم خطوط تساوي الحرارة Isothems (الشكل ٤-٨). لاحظ أن المسافات العمودية لخطوط تساوي الحرارة تقل مع التوصيلية وزيادة الممال الجيوحراري.

التغيرات الحرارية الموضعية Local Thermal Variations

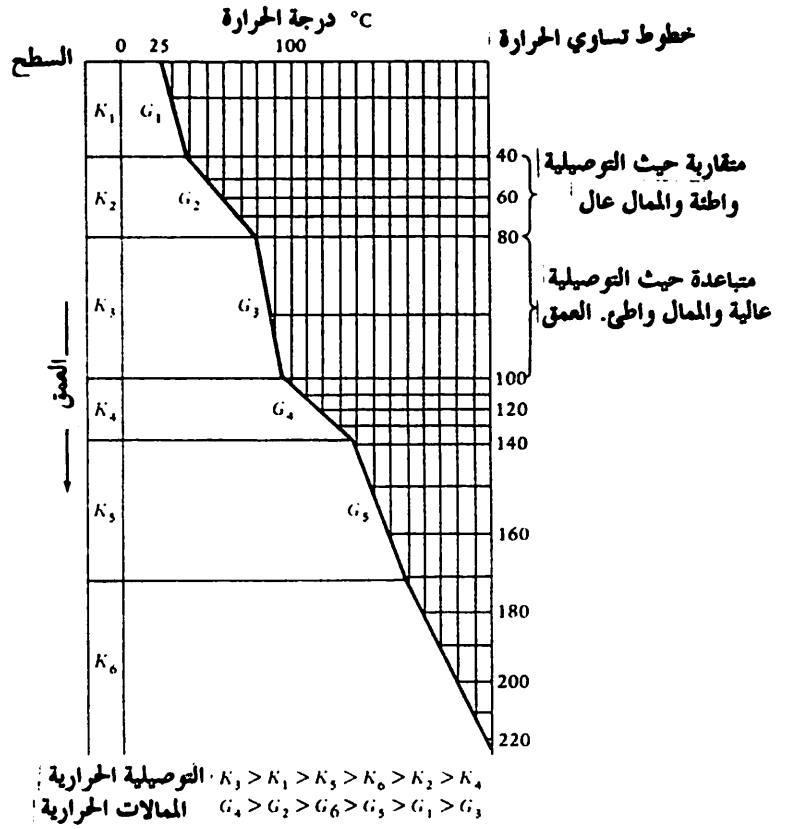
ما أن يتم احتساب خطوط تساوي الحرارة، يكون اسقاطها عبر حوض معين أمرا

مفيدا. ونادرا ما تكون خطوط تساوي الحرارة أفقية عرضيا بسبب العوامل الثلاثة التالية:

١- الهندسية (المعمارية) غير المستوية للترسبات.

٢- حركة الموائع.

٣- التغيرات الاقليمية في الانسياب الحراري.



الشكل ٤-٨: مرتسم بين العمق-درجة الحرارة يظهر تأثير الصخور ذات التوصيلية الحرارية المتغايرة (K) على الممال الجيوحراري (G) والمسافة العمودية بين خطوط تساوي الحرارة.

وعندما تطوى الطبقات أو حيثما تكون عدسية الشكل، فأنّ من المحتمل حدوث شذوذ في هندسية خطوط تساوي الحرارة. وهنالك تغيّران موضعيان يكتسبان أهمية ملحوظة. ويظهر الجدول (٤-٣) أن للملح توصيلية أعلى بكثير من أغلب الترسبات الأخرى (بحدود ٥.٥ $Wm^{-1} C^{-1}$).

لاحظ (Evans, 1977) في دراسة أجراها على الممال الجيوحراري لبحر الشمال أن خطوط تساوي الحرارة تتخذ شكلا محدبا فوق السّدادات الملحية Salt Diapirs بسبب التوصيلية الحرارية المرتفعة للتبخريات. ولقد درس (Rashid and McAlary, 1977) وكذلك (Rashid, 1978) النضوج الحراري للكيروجين Kerogen في بئرين في الغراند بانكس Grand Banks في نيوفاوندلاند NewFoundLand. ولقد احتوت بئر أدولفوس ٢-كي-٤١ Adolphus 2-K-41 الواقعة على قمة التركيب الملحي كيروجينا ذا درجة نضوج أعلى من البئر أدولفوس دي-٥٠ Adolphus D-50 الذي يقع على بعد ثلاثة كيلومترات من سفح Flank التركيب. ويعزي هذا الفرق الى التوصيلية الحرارية العالية للتركيب الملحي.

وعلى النقيض من ذلك، فان السدادات الطينية المكونة من الأطيان ذات المسامية المرتفعة تتميز بتوصيلية حرارية واطئة على نحو مميز. وتكون خطوط تساوي الحرارة داخل الطين متقاربة مع بعضها وتنخفض فوق القمة. وتعمل الأطيان فائقة الضغط كفريش عازل Insulating Blanket، مما يؤدي الى حجز الطاقة الحرارية ويساعد على النضوج الحراري للصخور المصدرية (أنظر ص ٢٤٥).

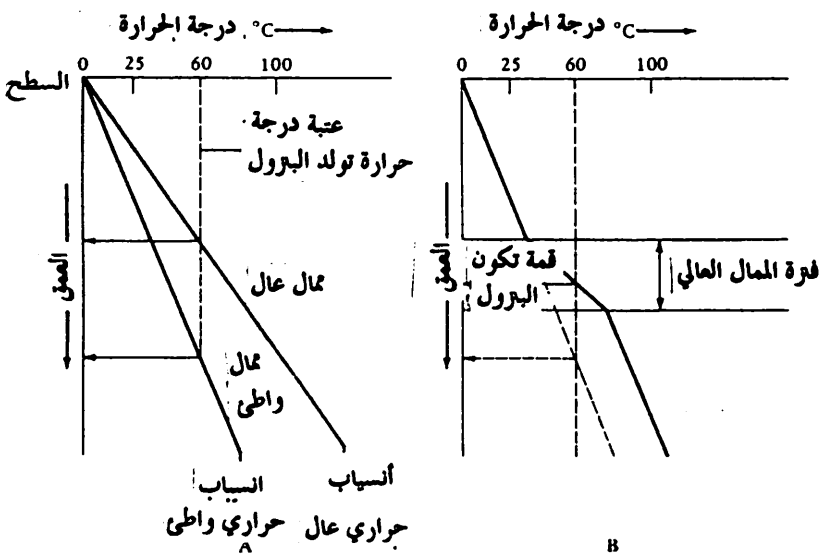
ويعد انسياب الموائع عاملا اضافيا للتوزيع الغريب لخطوط تساوي الحرارة، فحيثما تصرف المياه Dishcharged بسرعة الى السطح، على امتداد فالق مفتوح، على سبيل المثال، فان خطوط تساوي الحرارة تُسحب الى الأعلى. ولقد وصفت هذه الظاهرة من بعض الفوالق الحدودية في منخسف فايكنغ Viking Graben Boundary Faults في بحر الشمال من قبل Cooper et al., 1975) ومن الفوالق النامية Growth Faults لمنطقة الغولف كوست (Jones and Wallace, 1974).

التغيرات الحرارية الاقليمية Regional Thermal Variations

وُصفَ الانسياب الحراري داخل القشرة الأرضية من قَبْلُ، باعتباره حاصل ضرب الممال الجيوحراري بالتوصيلية الحرارية. ولقد وردت المعطيات المتعلقة بالانسياب الحراري الكوني وتغيّراته الاقليمية في(Lees, 1965)و(Sass, 1971). ويبلغ معدل الانسياب الحراري الكوني بحدود ١.٥ ملي كاليروي/(سم) (ثانية). ويوجد انسياب حراري عال بشكل

استثنائي على امتداد البروزات المحيطية (Mid-Oceanic Ridges)وحفرالانهدام الرواسخية الداخلية Intracratonic Rifts، حيث ترتفع الصهارة Magma الى السطح، وتنحف القشرة وتنفصل. وعلى نحو معكوس، يكون الانسياب الحراري واطئا بشكل واضح عند حدود الصفائح المتقاربة Convergent plate boundaries حيث تهبط ترسبات باردة نسبيا الى الوشاح Mantle (Klemme, 1975).

تُؤثر التغيرات الاقليمية في الانسياب الحراري على تولد البترول مثلما سيتم شرحه في الفصل القادم، اذ سوف يتم تقديم معطيات تُظهر أن تولد النفط يحدث بين درجات الحرارة التي تتراوح بين ٦٠ الى ١٢٠ درجة مئوية. وفي المناطق التي تتميز بانسياب حراري مرتفع، وبالتالي، بممال جيوحراري مرتفع، يتم الوصول الى درجة الحرارة المثلى عند أعماق أقل من المناطق ذات الانسياب الحراري والممال الجيوحراري الواطئين (الشكل ٤-٩أ). لاحظ أيضا تأثير التكوينات ذات التوصيلية الواطئة، فبسبب ممالاتها الجيوحرارية العالية فأنها تؤدي الى زيادة العمق الذي يتم منه الدخول الى نافذة النفط Oil Window (الشكل ٤-٩ب)، وبذلك فان تولد النفط يبدأ عند أعماق أكثر في المنخفضات الانخسافية Subductive Troughs أكثر من أحواض الانهدام Rift Basins. وقد تؤدي الطبقات الصخرية ذات التوصيلية الواطئة الى زيادة العمق الذي يبدأ فيه النفط بالتولد.



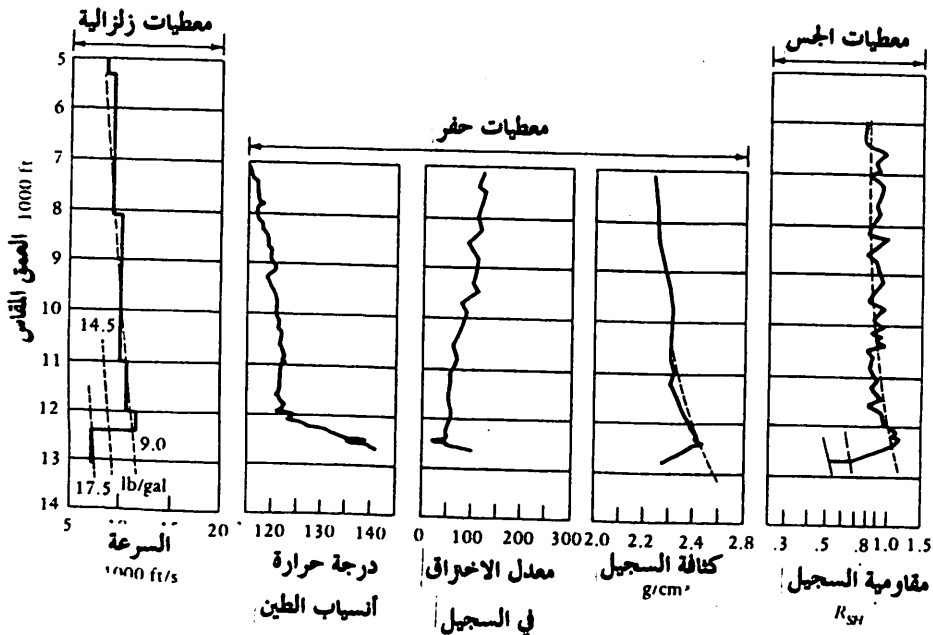
الشكل ٤-٩:(أ) مرتسم بياني بين العمق-درجة الحرارة يظهر الكيفية التي يرتفع فيها نطاق تولد البترول مع زيادة الممال الجيوحراري . (ب) مرتسم بياني بين العمق-درجة الحرارة يظهر الكيفية التي يرتفع فيها تكوين ذو توصيلية واطئة وممال عال عتبة عمق تولد البترول.

القياسات Measurement

يمكن أن تُقاس الضغوط تحت السطحية بعدة طرق. اذ تدل بعض الطرق على الضغط قبل حفر البئر، في حين يُستعمل بعضها أثناء الحفر، وبعضها الآخر بعده.

وفي المناطق البكر Wildcat، حين تكون معلومات الآبار قليلة جدا، فان سرع الفواصل Interval Velocities التي تحتسب من المعطيات الزلزالية يمكن أن تعطي تصورا clue عن الضغط، أو على الأقل، عن الضغط الفائق وتزداد السرعة عموما مع العمق بسبب انضغاط Compaction الترسبات. وقد يدلل اتجاه معاكس لهذا الاتجاه، على ترسبات أقل انضغاطا Undercompacted وذلك يعني وجود سجيل فائق الضغط Overpressured shale (الشكل ٤-١٠).

عندما تكون البئر في طور الحفر، فأن هنالك العديد من المعاملات التي قد تُدلل على وجود ضغط شاذ Abnormal Pressure. وتضم هذه المعاملات زيادة مفاجئة في معدل الاختراق Penetration. وزيادة مفاجئة في درجة حرارة طين الحفر ونقصانا في



الشكل ٤-١٠: الدلائل المختلفة على كشف الضغط الفائق. في هذه البئر هنالك نطاق من الضغط الفائق تحت العمق ١٢٤٠٠ قدم

(عن Fertl and Chillingarian, ١٩٧٦, (c) SPE-AIME.).

كثافة الفتات السجيلي Shale cuttings. وثمة طريقة نافعة بشكل خاص تتعلق بأس الحفر Drilling (d) Exponent (Jordan and Shirley, 1966). وتأخذ هذه الطريقة بنظر الاعتبار حقيقة أن معدل اختراق البريمة Bit لا يعكس درجة انضغاط الترسبات حسب، بل وزن البريمة وسرعة الدوران Rotary Speed أيضا.

$$\text{d exponent} = \frac{\log (R/60N)}{\log (12W/10^6 D)}$$

حيث تمثل:

R = معدل الاختراق (قدم/ساعة).

N = سرعة الدوران (دورة في الدقيقة).

W= الوزن المسلط على البريمة(بالباوند-الرطل).

D = قطر تجويف البئر (انج).

ويرسم أس الحفر مقابل العمق أثناء حفر البئر، ولسوف يتناقص هذا خطيا حتى الوصول الى قمة الضغط الشاذ عند العمق الذي يزيد فيه.

عندما تُشير هذه الطرق الى أنه قد تم اختراق نطاق الضغط الفائق، قد يكون من الأفضل حينئذ ايقاف الحفر وانزال المجسات. وقد تظهر المجسات: الصوتي والكثافة والنيوترون جميعها زيادة مفاجئة في المسامية، في حين تقل المقاومية بحدّة، (Hottman and Johnson, 1965). ولأن المجسات تستجيب لأكثر من متغّير، فليس هنالك من مجس منفرد يمكن أن يستعمل لوحده في التشخيص، فالتغيرات الصخارية قد تُعطي استجابات مشابهة.

ان المشكلة المتعلقة بجميع كل هذه الطرق التي تُستعمل في الكشف عن الضغوط الفائقة هي صعوبة تحديد النقطة التي يحدث فيها الانحراف عن الضغط الاعتيادي الى ما يمكن تشخيصه على نحو واضح بأنه ضغط فائق، وبذلك يكون الوقت متأخرا، لأن البئر تكون قد انفجرت. ما أن يتم حفر البئر بطريقة أمينة، يمكن عندها قياس الضغط بطرق عديدة. فقنبلة الضغط Pressure Bomb التي يُسجل فيها الضغط مقابل الزمن يمكن أن تنزل

في تجويف البئر.

كما أن فحص جذع الحفر الذي يُسمح فيه للبئر بالانسياب لفترات قصيرة عديدة، بينما يتم تسجيل الضغط خلال ذلك، هو طريقة أخرى لقياس الضغط. ان فحوص جذع الحفر قد تعطي نتائج قياسات جيدة، لا للضغط حسب، بل كذلك لمعدل الانسياب (وبالتالي النفوذية) الخاصة بالتكوين. كما قد يسمح للموائع بالانسياب الى السطح لاجراء الفحوصات عليها. لمزيد من التفاصيل، أنظر (Bradley, 1975) و (Dickey, 1979). وتصمم بعض أنواع مجسات الآبار لقياس ضغوط التكوينات واستخلاص الموائع من الأنطقة المهمة، وفي بعض الأحيان فانها قد تكون مفيدة.

المبادئ الأساسية Basic Principles.

الضغط هو القوة المسلطة على مساحة معينة، ويقاس عادة بالكيلوغرام لكل سنتمتر مربع (كغ/سم^2)، أو الباوند لكل أنج مربع.

ويمكن تقسيم الضغوط تحت السطحية المختلفة على النحو التالي:-

الثقل الفوقي : Overburden Pressure

١. الضغط السكوني الصخاري Lithostatic Pressure

٢. ضغط الموائع : Fluid Pressure

أ- السكوني المائي Hydrostatic

ب-الحركي المائي Hydrodynamic

ينتج الضغط السكوني الصخاري من ضغط الصخرة الذي ينتقل تحت السطح عبر تماس الحبيبات مع بعضها. ويتغاير ممال الضغط السكوني الصخاري اعتمادا على العمق وكثافة مواد الثقل الفوقي، والمدى الذي تسند به سطوح التماس بين الحبيبات من قبل ضغط الماء، ويبلغ معدله في العادة نحو ١ باوند لكل انج مربع/لكل قدم 1Psi/ft.

ينتج ضغط المائع من تأثير الموائع الموجودة داخل المسامات البينية. واعتماداعلىقانون تيرزغاي Terzaghis' Law (Terzaghi, 1936, Hubbert and Pubey, 1959)

$$S = P + O$$

حيث تمثل:

S = ضغط الثقل الفوقي.

P = الضغط السكوني الصخاري.

O = ضغط المائع.

وبازدياد ضغط المائع في موقف معين، فان القوى المؤثرة على سطوح تماس حبيبات الترسبات تتضاءل ويقل الضغط السكوني الصخاري. وفي الحالات المتطرفة فان هذا التأثير قد يحول الترسبات الى حالة مرنة Plastic غير مستقرة.

وفي الصناعة النفطية يتم احتساب ضغط المائع على النحو التالي:

$$P = 0.052 \text{ X } wt \text{ X } D$$

حيث تمثل:

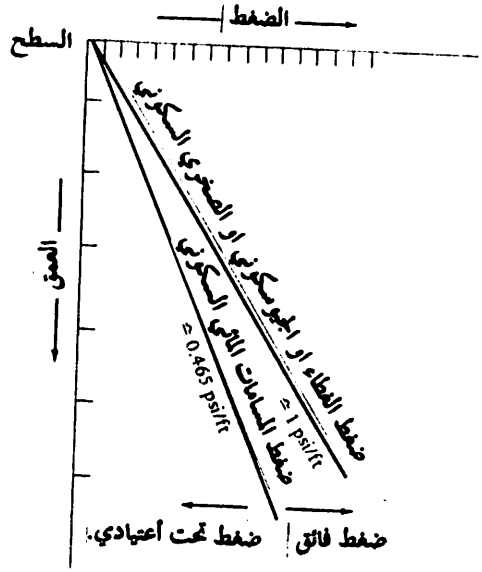
P = الضغط السكوني المائي (باوند لكل انج مربع).

Wt = وزن الطين (باوند لكل غالون).

D = العمق (قدم).

ان نوعي ضغط المائع هما السكوني المائي Hydrodynamic، ويسلط الضغط السكوني المائي من قبل عمود مستقر من المائع. وبالنسبة لعمود من الماء العذب (كثافته ١)، يبلغ المال السكوني المائي ٤٣٣ . ٠ باوند لكل انج مربع لكل قدم أو ١٧٣ . ٠٠، كيلوغرام (سم٢) (متر). وبالنسبة لماء يحتوي على ٥٥٠٠٠ جزء بالمليون من الأملاح الذائبة يبلغ المال نحو ٤٥ . ٠ باوند لكل انج مربع لكل قدم، وعندما يبلغ التركيز ٨٨٠٠٠ جزء بالمليون من الأملاح الذائبة يكون المال نحو ٤٦٥ . ٠ باوند لكل انج لكل قدم. ان هذه القيم بالطبع تعتمد على درجة الحرارة. ويظهر الشكل (٤-١١) العلاقة بين الضغط السكوني الصخاري والضغط السكوني المائي.

والنوع الثاني من ممالات الموائع هو ممال الضغط الحركي المائي أو ممال المائع الكامن Fluid Potential Gradient الناتج من انسياب المائع. وعندما تحفر بئر ما،



الشكل ٤-١١: مرتسم بياني للعمق-الضغط يوضح الضغط المائي السكوني والجيوسكوني والافكار المتعلقة بهما.

فان للمائع الموجود في المسامات ميل طبيعي للانسياب نحو تجويف البئر. وفي العادة، يُعرقل هذا الانسياب بكثافة طين الحفر. ومع ذلك، فان القدرة على قياس المستوى الذي سوف يرتفع اليه المائع اذا ما فتحت البئر يعد أمرا مهما. ويسمى هذا المستوى باسم مستوى فرق الجهد Potentiometric أو سطح الضغط العالي Piezometric ويحتسب على النحو التالي:

$$\text{Elevation to potentiometric level.(ارتفاع مستوى فرق الجهد)} = \frac{P}{W} - (D - E)$$

حيث تمثل:

P = ضغط قاع البئر (باوند لكل انج مربع).

W= وزن المائع (باوند لكل انج مربع لكل قدم).

D = العمق (قدم).

E = ارتفاع الرحى (النضد) الدوار فوق مستوى سطح البحر (قدم).

ويمكن رسم خارطة كنتورية لقيم مستوى فرق الجهد في الآبار المجاورة لتحديد سطح فرق الجهد، فاذا كان السطح أفقيا، عندها لن ينساب مائع عبر المنطقة ويكون ضغط المائع سكونيا مائيا صرفا. فاذا كان سطح فرق الجهد مائلا، عندها فان المائع سوف يتحرك عبر الحوض باتجاه ميل السطح، وينتج ضغط المائع من كل من قوى الضغط السكوني المائي، والحركي المائي (الشكل ٤-١٢). ومن المعتاد أن تزداد ملوحة ماء التكوين باتجاه ميل سطح فرق الجهد (الشكل ٤-١٣). وحيث يكون ممال الضغط سكونيا مائيا (نحو ٠,٤٣ باوند لكل انج مربع لكل قدم) يسمى الضغط اعتياديا Normal. وقد تكون الممالات الشاذة Abnormal شبه اعتيادية Subnormal (أقل من الضغط السكوني المائي) أو فائقة Supernormal (أعلى من الضغط السكوني المائي). ان المستوى الذي سوف يرتفع اليه أو ينخفض منه مائع التكوين كي يصل الى سطح فرق الجهد يُسمى جهد المائع Fluid Potential.

ولقد أظهر (Hubbert, 1936) أن هذا الجهد يمكن أن يحتسب على النحو التالي:

$$\text{Fluid Potential (جهد المائع)} = Gz + \frac{P}{e}$$

حيث تمثل:

G = التعجيل الناتج من الجاذبية.

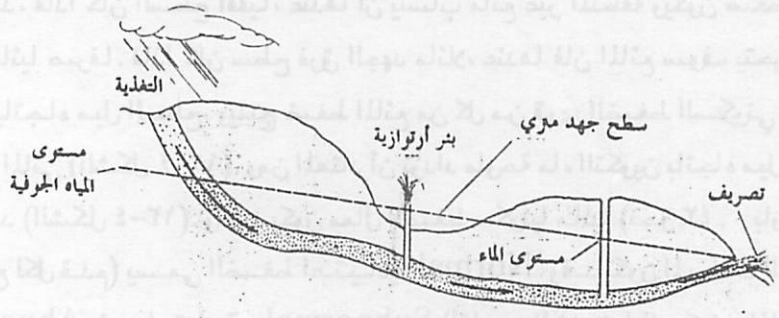
Z = مستوى المرجع عند موقع قياس الضغط.

P = ضغط المائع السكوني.

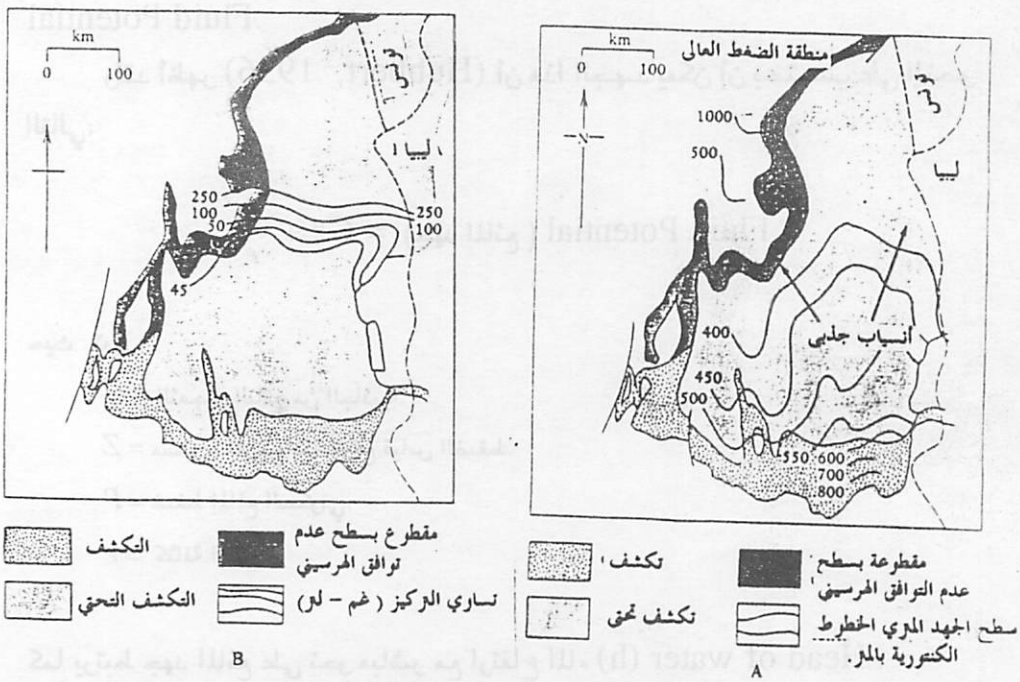
e = كثافة المائع.

كما يرتبط جهد المائع على نحو مباشر مع ارتفاع الماء Head of water (h):

$$\text{Fluid Potential (جهد المائع)} = hG$$



الشكل ٤-١٢: مرتسم تخطيطي يوضح فكرة سطح الجهد المرني أو البيزومرني.



الشكل ٤-١٣: خرائط الجهد المرني (أ) وتساوي التركيز isocon map (ب) للحجر الرملي السيلوري – الديفوني الاسفل (أكاكيوس وتادرارت) في شرق الجزائر. لاحظ الكيفية التي ينخفض فيها سطح الجهد المرني باتجاه الشمال مع زيادة ملوحة التكوين (عن Chiarelli, ١٩٧٨).

وفي بعض الأحيان لا تكون سطوح تماس النفط-الماء أفقية بل منحنية، ويعّد الانسياب الحركي المائي أحد أسباب عديدة لمثل سطوح التماس هذه (انظر صفحة ٣٤٨). ولقد أظهر (Hubbert, 1953)الكيفية التي يرتبط فيها منحدر Slope التماس في مثل هذه الحالات مع جهد المائع (الشكل ٤-١٤):

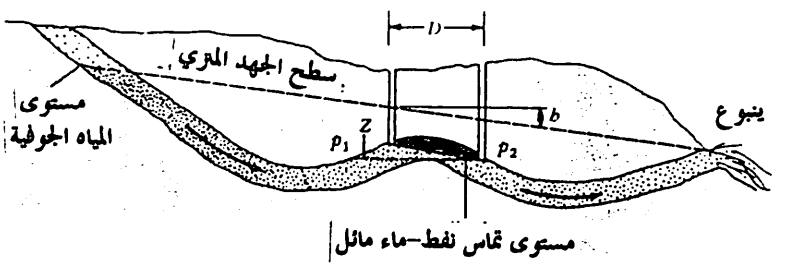
$$\frac{z}{d}=\frac{h}{d}\left(\frac{e_w}{e_w-e_o}\right)$$

حيث تمثل:

e_w = كثافة المائع.

e_o = كثافة النفط.

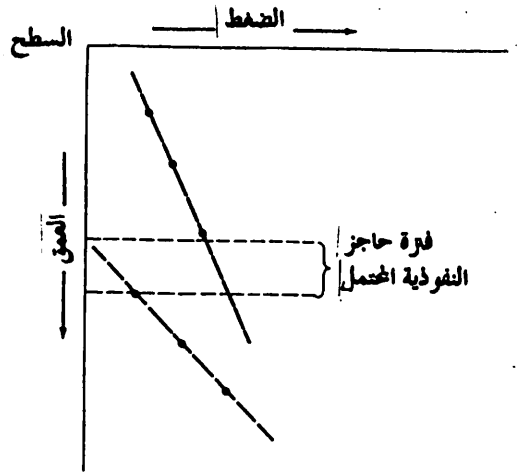
d = المسافة بين الآبار.



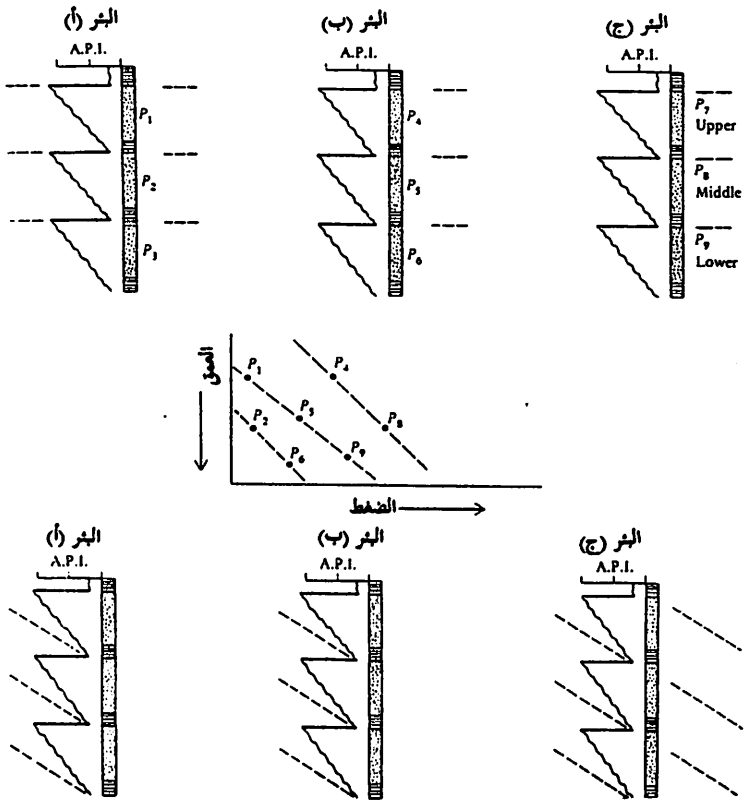
الشكل ٤-١٤: مرتسم تخطيطي يظهر الكيفية التي ينتج فيها خط تماس النفط- الماء من الانسياب الهايدروداينميكي (المائي- الحركي).

وضمن أي تكوين ذي نظام مسامي مفتوح، يزداد الضغط خطيا مع العمق. وعندما تتم مصادفة ممالات ضغط منفصلة في البئر، فان ذلك يدلل على وجود حواجز نفوذية Permeability Barriers تفصل بين التكوينات (الشكل ٤-١٥). ويمكن أن يكون هذا المبدأ مفيدا في مضاهاة التكوينات المكمنية بين الآبار.

وفي الموقف الموضح في الشكل (٤-١٦)، فانه يُغري بالافتراض أن طبقات الرمل العلوية والوسطى والسفلية مستمرة من بئر الى أخرى. ويمكن أن تُظهر ممالات الضغط مضاهاة مختلفة تماما في النهاية. أن هذا الاختلاف شائع على نحو خاص في الرمال الحاجزية التراجعية المتراكمة Stacked regressive barrier bar sands.كما تُستعمل معطيات



الشكل ٤-١٥: مرتسم الضغط- العمق لبئر يظهر المماالت المختلفة. أن هذه المماالت تدل على وجود حاجز نفوذية بين النطاقين مع مماالت منتظمة ولكن مختلفة.



الشكل ٤-١٦: مرتسمات تخطيطية تظهر الكيفية التي يمكن فيها أن تكون المضاهاة الظاهرة بين رمال متعددة الطبقات (في الاعلى) غير صحيحة من معطيات الضغط (في الوسط). أن المضاهاة الظاهرة في الاسفل تكون شائعة في الرمال الحاجزية المتراكمة عرضيا Laterally stacked barrier bar sands

ضغوط الآبار لرسم خرائط فرق جهدية اقليمية يمكن أن تُستعمل في تحديد مواقع المصائد الحركية المائية (صفحة ٤٠٤).

الضغوط الفائقة Supernormal Pressures

تُعرف الضغوط الفائقة بأنها تلك الضغوط التي تفوق الضغط السكوني المائي. وهي توجد عادة في الترسبات التي تتراوح في العمر بين الكامبري والعصر الحديث، غير أنها أكثر تواجدا في ترسبات العصر الثلاثي الدلتائية، مثل تلك الموجودة في بحر الشمال ودلتا النيجر Niger Delta ومنطقة الغولف كوست في تكساس. ان دراسة مسببات الضغط الفائق وتوزيعه لهما جانبان مهمان، ذلك لأن الضغط الفائق يمثل مخاطر في الحفر، ويرتبط على نحو حميم مع تكوين البترول وتوزيعه.

يوجد الضغط الفائق في بيئات الموانع ذات المسامات المغلقة Closed-pores حيث لا يمكن تسرب ضغط المائع خلال الطبقات النفاذة الى السطح. وبذلك فان المسألتين اللتين يجب أخذهما بنظر الاعتبار هما طبيعة حاجز الموانع وسبب تنامي الضغط Pressure build-up.. (Plumley, 1980,Barker, 1979, Bradley, 1975, Jacquin and Poulet, 1973)

ان حاجز النفوذية الذي يمنع تحرر الضغط قد يكون تركيبا (بنيويا) Structural أو صخاريا. ومن حواجز النفوذية الشائعة هي صخور التبخريات Evaporites والسجيل Shale. ومن بين الأقل شيوعا هي صخور الجيريات Carbonates أو الصخور الرملية غير النفاذة التي يمكن أن تعمل عمل الحواجز. وقد تتوافر حواجز النفوذية البنيوية من قبل الفوالق رغم أنه ومثلما سوف نشرح بالتفصيل لاحقا (ص١٣٦٢)، فان بعض الفوالق قد يحجز في حين قد لا يفعل ذلك بعض الأنواع الأخرى.

ولقد أدرج Fertl and Chilingarian (1976) ثلاثة عشر سببا محتملا لنشوء الضغط الفائق، وسوف يتم شرح الأنواع الأكثر أهمية فقط:

١- الارتوازي Artesian.
٢- البنيوي Structural.
٣- التراصّي Compactional.
٤- التحويري Diagenetic.

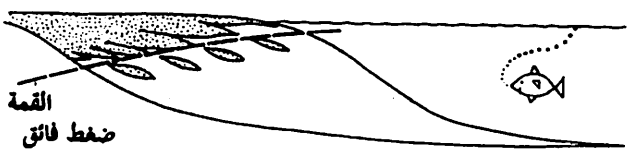
ولقد تناولنا للتو فكرة سطح فرق الجهد والضغط الارتوازي. وفي حالات مثل الحجر الرملي السيلوري-الديفوني في الجزائر (الشكل ٤-١٣)، فان سطح فرق الجهد عند حافة الحوض ينخفض باتجاه المركز. ومع ذلك، ففي وسط الحوض، يرتفع السطح، وبذلك يحدث ضغط عال جدا حيثما يغطي الحجر الرملي تحت سطح عدم التوافق الهرسيني Hercynian Unconformity.

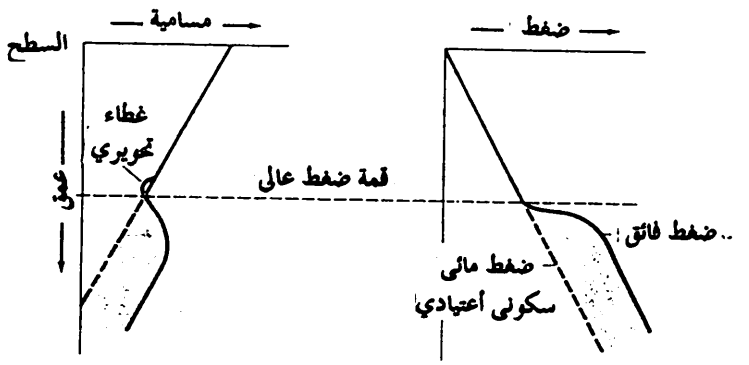
يمكن أن يؤدي التشوه البنيوي Structural Deformation الى نشوء الضغط الفائق بطرق عديدة. وفي أبسط الحالات، يمكن أن ترتفع كتلة من الترسبات بين فالقين حاجزين Sealing Faults، فاذا لم يكن للموائع مخرج Egress آخر، فان ضغط المسامات لن يكون قادرا على التكيف مع الضغط السكوني المائي الواطئ الجديد. وفي أوضاع أكثر تعقيدا، فان انضغاط Compression الطبقات أثناء الطي يمكن أن يسبب نشوء الضغط الفائق اذا لم يتوفر للموائع الزائدة مهرب آخر. ويحدث هذا الوضع على نحو خاص عندما تتداخل الطبقات النفاذة مع التبخريات، كما هو الحال في ايران. ويمكن أن تتعرض التبخريات الى انضغاط شديد، مما يؤدي الى تحطمها على نحو مرن Plastic ويمنع الموائع الزائدة من التسرب من خلال التكسرات أو الفوالق.

ينتج النوع الثالث والذي هو أكثر شيوعا من أنواع الضغوط الفائقة، بتأثير الانضغاط Compaction أو فقدانه. وهذا النوع شائع على نحو خاص في الدلتات حيث يكون الترسيب سريعا بالنسبة للترسبات كي تتعرض للانضغاط وتفقد مياهها Dewater بالطريقة الاعتيادية. ولقد درس هذا الموضوع بتفصيل شديد (أنظر على سبيل المثال Athy, 1930, Jones, 1969, Perry and Hower 1979, Rieke and Chilingarian 1973, Fertl, 1977)

يُظهر الشكل (٤-١٧) تأثيرات الانضغاط الأساسية على الضغط الفائق. ففي سهول الدلتا Delta Plain تتبادل الرمال عادة مع الأطيان. وتكون الرمال مسامية وتتصل مع السطح. وعندما تدفن هذه الترسبات، تنضغط الأطيان وتفقد مساميتها. وتتحرك موائع المسامات الزائدة الى الرمال وتهرب الى السطح. وبذلك فانه رغم أن ضغط المسامات يزداد مع العمق الا أنه يبقى عند المستوى السكوني المائي. وعند الجانب المواجه للبحر من الدلتا يصبح الرمل متقطعا ومن ثم يختفي نهائيا. وعندما تتقدم الدلتا باتجاه البحر، تتواضع

ترسبات سهل الدلتا فوق أطيان أمام الدلتا Pro-delta muds ويزداد ضغط الترسبات الفوقية على ترسبات أمام الدلتا الطينية، ولكن بسبب افتقادها المسالك النفاذة Permeable Conduits، فانها لا يمكن أن تفقد مياهها. تبقى المسامية مرتفعة ويتجاوز ضغط المسامات الضغط السكوني المائي. ولهذا النوع من الضغط الفائق العديد من التطبيقات في جيولوجيا البترول. ولقد تمت مسبقا ملاحظة المشاكل المتعلقة بالحفر. والأكثر أهمية أنه يكون للسجيل المتعرض الى الضغط الفائق كثافات واطئة وتوصيليات حرارية واطئة مقارنة بالسجيل المتعرض الى ضغط اعتيادي.





الشكل ٤-١٧: (أ) مقطع عرضي خلال دلتا و (ب) منحنيات العمق-المسامية والعمق- الضغط تدل على ضغط فائق بسبب الرص الشديد.

ان الكثافة المنخفضة التي تميّز السجيل المتعرض الى ضغط فائق تعني أنه يميل الى الانسياب نحو الأعلى، ويتم احلاله بترسبات أكثر كثافة ومتعرضة الى ضغوط اعتيادية من الأعلى. ويسبب هذا الانسياب نشوء الفوالق النامية Growth Faults والسدادات الطينية Clay Diapirs التي يمكن أن تكوّن مصائد نفطية مهمة، مثلما سوف يتم شرحه وتوضيحه على الصفحات ٢٧٢ و٢٧٧. ان أهمية التوصيلية الحرارية الواطئة للسجيل

المتعرض الى الضغوط الفائقة قد تمت ملاحظتها مسبقا (ص ١٧٦). وبزيادة المال الحراري فان تولد النفط يمكن أن يحدث عند أعماق ضحلة.

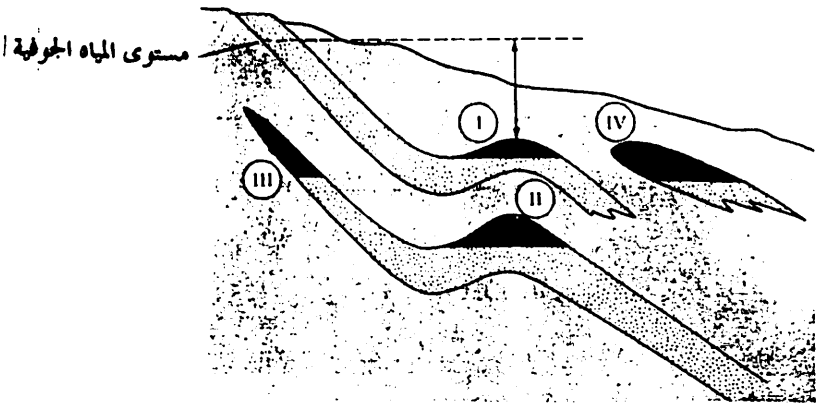
ويُعزى المسبب الرابع لتكّون الضغط الفائق الى التفاعلات المعدنية أثناء العمليات التحويرية. ولقد تمت ملاحظة عدد من هذه التفاعلات بضمنها تميؤ الجبس Gypsum Hydration الى انهايدرايت وماء، وتغيّر الرماد البركاني الى الأطيان والى ثاني أوكسيد الكربون. ولعل أهم التفاعلات المسؤولة عن نشوء الضغط الفائق هي تلك التي تشتمل على الأطيان، وبشكل خاص، قد يكون تميؤ المونتمرلونايت Montmorillonite هاما في هذا الجانب. وعندما تتعرض الأطيان المونتمرلونايتية الى الانضغاط، فأنها لا تحرر ماء المسامات الحر، بل ماء التبلور أيضا. أن درجات الحرارة والضغوط التي تحدث عندها هذه التفاعلات مشابهة الى تلك التي يحدث عندها تحرر النفط.

ويمكن ربط هذه الظاهرة على نحو وثيق بمشكلة هجرة النفط الأولية، مثلما سوف يتم شرحه في الفصل القادم (ص٢٤٥). وتحدث تفاعلات تحويرية أخرى في السجيل، ولا تؤدي هذه الى زيادة ضغط المسامات حسب بل الى خفض النفوذية أيضا. وغالباً ما توجد صخور غطائية Cap مكونة من السجيل المسمت بالمواد الجيرية فوق النطاق المتعرض الى الضغط الفائق. وأخيرا، فان الضغط الفائق يمكن أن ينتج أثناء الانتاج، أما بسبب حقن الموائع Fluid Injection أو عمليات التسميت المخطوءة Faulty Cementing Jobs، التي تنتقل خلالها الموائع من تكوين معرض الى ضغط فائق الى تكوين ذي ضغط اعتيادي.

الضغوط المنخفضة Subnormal Pressures

تُعرّف الضغوط المنخفضة بأنها تلك الضغوط التي تكون قيمتها أقل من الضغط السكوني المائي. ولقد أعطيت مسببات الضغوط المنخفضة مع أمثلة عليها من قبل كل من: Fertl and Chilingarian (1976) and Dickey and Cox (1977).

وتحدث الضغوط المنخفضة فقط في الممكن الذي يكون منفصلا عن المياه الجوفية الدوارة بواسطة حاجز نفوذية، وحيثما لا يكون الأمر كذلك، فان المكمن سوف يمتلأ بالماء، ويرتفع ضغطه الى الضغط السكوني المائي (الشكل ٤-١٨).



الشكل ٤-١٨: مقطع عرضي يوضح وضع مصيدة ذات ضغط دون الاعتيادي (١) في تواصل موائع مع السطح وسوف تكون ذات ضغط أعتيادي . أما المصيدتان ١١ و ١١١ فأنها في تواصل موائع مع المياه الحبيسة في منتصف الحوض . أن هذه المصائد يمكن أن تكون مصائد ذات ضغط أعتيادي أو فائقة الضغط . أما المصيدة ١٧ فأنها منغلقة تماما في سجيل غير نفاذ . أن الضغط المبدئي قد يكون دون أو فوق الاعتيادي ولكنه سوف ينخفض الى دون الاعتيادي أثناء الانتاج بسبب عدم وجود خزان Aquifer لضمان ديمومة الضغط المكمني . (عن Parke and Dickey, ١٩٧٧).

ويمكن الحصول على ضغوط منخفضة من خلال انتاج الموائع من المكامن، وخصوصا عندما تفتقد الى دفع الماء Water Drive (أنظرص ٢٦٤). وتوجد الضغوط المنخفضة ذات المسببات الطبيعية في أرجاء مختلفة من العالم في كل من المصائد البنيوية Structural والطباقية Stratigraphic. ولقد ذكر Fertl and Chilingarian (1976) حقول الغاز البنسلفاني في مناطق الابلاشيان Appalachians ورمل مورو Morrow Sand في شمال غرب أوكلاهوما كأمثلة على ذلك. كما ذكر Dickey and Cox (1977) ضغوطا منخفضة من الأجسام الرملية الحاجزية من الطباشيري من رمال فايكنغ Viking Sands في كندا الى حجر غالوب الرملي Gallup Sandstone في نيومكسيكو.

وفضلا عن انتاج الموائع، فان الضغوط المنخفضة يمكن أن تتسبب بعمليتين رئيسيتين:

١- زيادة حجم المسامات.

أ -بازالة الانضغاط Decompression.

ب-التكسر Fracturing.

٢- الانخفاض في درجة حرارة المكمن.

تؤدي الزيادة في حجم المسامات في نظام محصور Confined الى انخفاض الضغط عندما تتمدد الموائع كي تملأ الفراغ الاضافي، وقد يتوسع حجم المسامات بازالة الانضغاط أو الحركية (التكتونية) Tectonism. كما تؤدي تعرية الصخور فوق مكمن تحت ضغط اعتيادي الى انخفاض في ضغط الترسبات الفوقية وبذلك يؤدي الى تمدد الصخور المكمنية المصحوب بزيادة حسب المعدل *Pro rata* في حجم المسامات. وبدلا من ذلك قد يزيد حجم المسامات عندما تتكون التكسرات الانفتاحية Extensional فوق ذروة الطيه المحدبة Crest of the anticline.لقد اقترحت هذه الآلية لتفسير الضغط الفائق لحقل كمبرج بي Kimmeridge Bay في دورست Dorset (Brunstrom, 1963).

والسبب الرئيسي الثاني للضغط المنخفض هو النقص في المال الحراري Geothermal gradient الذي يؤدي الى برودة موائع المكمن وتقلصها Shrinkage وبذلك يحدث انخفاض في الضغط.

حركية (ديناميكية) الموائع تحت السطحية Subsurface Fluid Dynamics.

علاقات الضغط-درجات الحرارة Pressure-Temperature Relationships

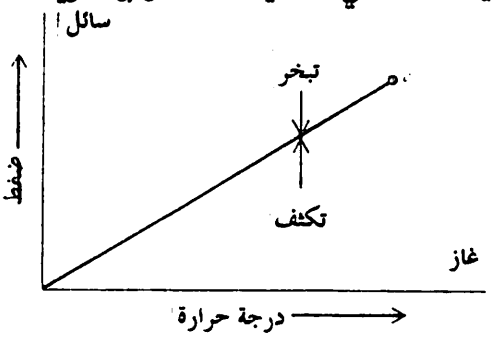
لقد تم استعراض كل من درجة الحرارة والضغط تحت السطحيين على نحو منفصل، أما الآن فلسوف يتم استعراضهما معا. وهما يرتبطان معا حسب قوانين بويل Boyle وتشارلز Charles:

$$\text{ثابت} = \frac{\text{الضغط} \times \text{الحجم}}{\text{درجة الحرارة}}$$

هذه العلاقة الأساسية هي التي تتحكم بسلوك الموائع تحت السطح، كما هو الحال في أي موضوع آخر، وهي مهمة بشكل خاص في تحديد معامل التكوين الحجمي للمكمن Formation Volume Factor (ص٣٢٨).

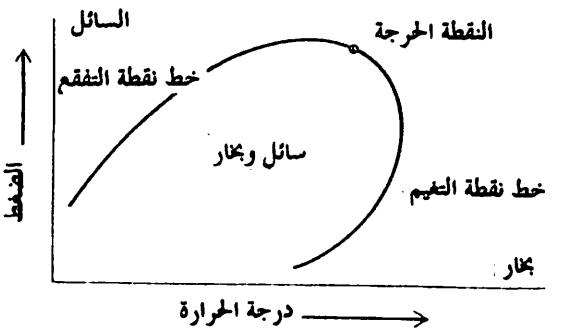
وبالنسبة لمائع عند ضغط ثابت، ثمة درجة حرارة معينة يفقع Bubbles الغاز عندها من السائل، كما يتكاثف عندما تنخفض درجة الحرارة. وعلى نحو مشابه، عند درجة حرارة منتظمة هنالك ضغط معين يتبخر عنده السائل عندما ينخفض الضغط ويتكاثف Condensate الغاز عند زيادة الضغط.

ويمكن لمائع نقي أن يوجد في كلٍ من الحالتين السائلة والغازية، اعتمادا على درجة الحرارة والضغط (الشكل ٤-١٩). أما فوق النقطة الحرجة (c) Critical Point فلا يمكن أن توجد الاّ حالة واحدة حسب. والموائع تحت السطحية هي مزيج من مركبات عدّة وماء حبيس يحتوي على بقايا من هايدروكاربونات مذابة، في حين أن البترول هو مزيج من هايدروكاربونات عديدة مختلفة في الحالتين السائلة أو/والغازية.



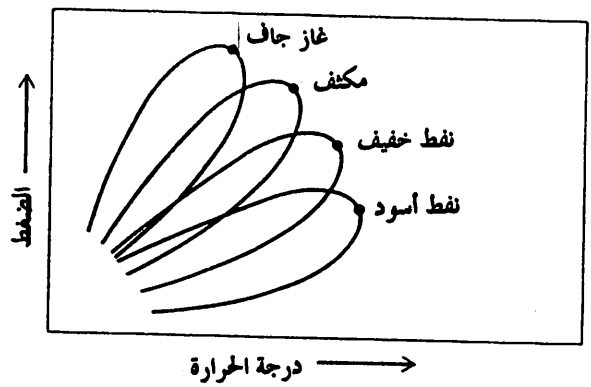
الشكل ٤-١٩: مرتسم بياني للضغط-درجة الحرارة من مائع نقي. فوق النقطة الحرجة (C) لاتوجد الا حالة واحدة فقط.

وهنالك منحنى ضغط-درجة حرارة لنظام ذي مكونتين Two-Components System موضح في الشكل (٤-٢٠). ويُظهر هذا الشكل ثلاث حالاتٍ مختلفة: سائل، سائل وبخار Vapor وغاز. ويحدد خط نقطة التفقع Bubble Point Line الحد الفاصل الذي يبدأ عنده الغاز بالتفقع خارجا من السائل، بينما يحدد خط نقطة التكاثف Dew Point Line الحد الفاصل الذي يبدأ عنده الغاز بالتكاثف. ويلتقي هذان الخطان عند النقطة الحرجة.



الشكل ٤-٢٠: مرتسم بياني للضغط-درجة الحرارة لمائع ذي حالتين يظهر موقع خطي نقطة التفقع ونقطة التغيم.

يظهر الشكل (٤-٢١) منحنيات الضغط-درجة الحرارة لخلطات مختلفة من الهايدروكاربونات، ويمكن استنباط العديد من الاستنتاجات العامة من هذه المنحنيات. ويزداد مقدار الغاز الذي يذوب في النفط بزيادة الضغط وبالتالي مع زيادة العمق. وكلما كانت كثافة النفط أقل (أي وحدات كثافة API أعلى) ازدادت قدرته على احتواء الغاز المذاب. وفي داخل مكمن ذي عمودي نفط وغاز منفصلين، يكون النطاقان في حالة توازن حركي حراري Thermodynamic equilibrium. وعندما يبدأ انتاج الغاز وينخفض الضغط، سوف يتحرر الغاز من السائل وسوف يقل حجم النفط الخام.



الشكل ٤-٢١: مرتسم بياني للضغط-درجة الحرارة يظهر السلوك الحالي للهايدروكاربونات ذات الكثافات المختلفة .

هجرة البترول الثانوية Secondary Migration of Petroleum.

للضغط ودرجة الحرارة تأثير هام على البترول، فهما يسيطران على كل من الطريقة التي يتصرف بها البترول في مكمن منتج وهجرته من الصخور المصدرية الى المصيدة. ولسوف تتم مناقشة انتاج البترول من المكامن في الفصل السادس (ص٣٣١)، ويحدث عادة نوعان من الهجرة:

تُعرّف الهجرة الأولية للبترول Primary Migration بأنها حركة الهايدروكاربونات من الصخور المولّدة Source rock الى الطبقات المسامية الحاملة. أما الهجرة الثانوية Secondary Migration فهي حركة الهايدروكاربونات خلال الطبقات الحاملة الى المكمن. وما تزال الهجرة الأولية أحجية Mystery ولسوف تتم مراجعتها في الفصل الخامس (ص٢٤٢).

بين مغادرة الصخور المولدة وملء مسامات المصيدة، يجب أن يتواجد البترول على هيئة قطيرات Droplets. وبذلك فانه طالما كان قطر القطيرات أقل من قطر عنق المسامات Pore throats، فان عملية الطفو Buoyancy سوف تحرك القطيرات حتى تصل الى عنق يكون قطره أقل من قطر القطيرة. ولا يحدث المزيد من الحركة الاّ عندما يتجاوز ضغط الازاحة Displacement Pressure الضغط الشعري للمسامة. وسوف يتم شرح الضغط الشعري بتفصيل أكثر في الفصل السادس (ص. ٢٩)، ولكن توجد العلاقات الرئيسية التالية:-

$$\text{الضغط الشعري (Capillary Pressure)} = \frac{2\, i \cos\theta}{r}$$

حيث تمثل:

i = الشد بين السطحي (InterFacial Tension) بين مائعين.

θ = زاوية التماس Angle of Contact

r = قطر المسامة Radius of Pore

ولا يمكن للطفو أو الضغط الحركي المائي وحدهما أن يتجاوزا ضغط الازاحة. وحينما تتراكم قطيرات النفط تحت العنق الضيق، فأنها تزيد الضغط حتى تنضغط قطيرة خلال الفتحة، وبذلك تستمر العملية حتى يصل النفط الى الترسبات التي تكون مساماتها صغيرة الى حد أن ضغط عمود النفط في الأسفل يكون غير كافٍ كي يؤدي الى المزيد من الحركة. وبذلك يكون النفط قد أحتجز تحت صخور الغطاء Cap Rocks.

ولقد حدد (Berg, 1975) ارتفاع عمود النفط اللازم للتغلب على ضغط الازاحة وفق المعادلة التالية:

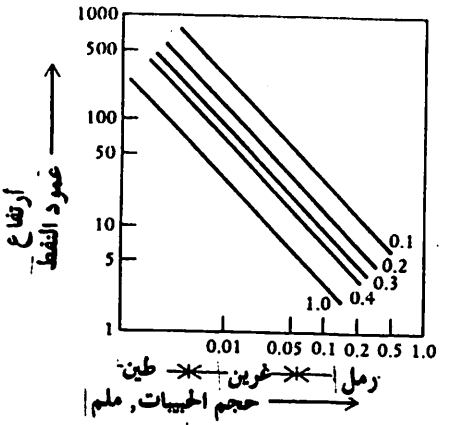
$$Zo = 2y\left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_p}\right) / G(\rho w - \rho o)$$

حيث تمثل: Zo = ارتفاع عمود البترول.

r_i = قطر عنق المسامة في صخور الغطاء.

y = الشد بين السطحي بين البترول والماء.

r_p = قطر عنق المسامة في الصخرة المكمنية.



الشكل ٤-٢٢: مرتسم بياني يظهر عمود النفط المصطاد بمراتب متغايرة من الترسبات لمنظومات النفط- الماء ذات الفروق الكثافية المختلفة. وبشكل اساسي , كلما كان حجم الحبيبات صغيرا (أي كلما كان قطر المسامات صغيرا) , كان عمود النفط الذي يمكن اصطياده أكثر سمكا . (عن Berg, ١٩٧٥).

يظهر الشكل (٤-٢٢) العلاقة بين ارتفاع عمود النفط وحجم الحبيبات لمنظومة النفط-الماء للفروقات المختلفة في الكثافة (ان فرقا مقداره ٠,٣ يُعد اعتياديا)، وبذلك يتم الاحتفاظ بالنفط تحت صخور غطاء دقيقة الحبيبات بالضغط الشعري في ما يمكن أن يُطلق عليه اسم الختم الشعري .Capillary seal ومن المحتمل أن يكون الختم الشعري أكثر تأثيرا بالنسبة للنفط من الغازات الأكثر حركة. ان اصطياد الغاز Gas Entrapment قد لا يُعزى كثيرا الى الأختام الشعرية بل الى الأختام الضغطية Pressure Seals، (Magara, 1977). ويتكون الختم الضغطي عندما يكون الضغط الناتج من طفو العمود الهايدروكاربوني أقل من زيادة ضغط السجيل على الضغط السكوني المائي. ويوجد الختم عادة حيثما تتواضع أطيان ذات ضغط فائق على رمال تحت ضغط اعتيادي، أي أن ممال الضغط يكون معكوساً موضعيا من الزيادة المعتادة باتجاه الأسفل الى نقصان. والأمثلة على هذه الظاهرة معروفة من العديد من الأحواض ذات الضغوط الفائقة بضمنها منطقة الغولف كوست، (Schmidt, 1973). وما أن يصل النفط أو الغاز الى الختم الأصم (غير النفّاذ)، سواءً كان ذلك شعريا أو ضغطيا، فانه سوف يزيح أفقيا الماء من المسامات.

ان المسافة العرضية التي يمكن أن يقطعها البترول كانت دوماً موضعاً للشكوك، فحيثما يصطاد النفط في عدسات رملية محاطة بالسجيل، فان مسافة الهجرة يجب أن تكون قصيرة. وحيثما يوجد النفط في مصائد ليس في جوارها صخور مصدرية واضحة،

فلا بد أن هجرة عرضية بعيدة قد حدثت. ويدرج الجدول (٤-٤) بعض الأمثلة الموثقة عن هجرة عرضية بعيدة للبترول. لاحظ أن أدلة قد قُدمت للتدليل على هجرة تتجاوز ٤٠٠ كيلومتراً (٢٥٠ ميل).

المثال	المسافة كم	المسافة (ميل)	المصدر
Phosphoria Shale, Wyoming and Idaho	400	(250)	Claypool et al. (1978)
Gulf Coast, U.S.A. Pleistocene	160	(100)	Hunt (1979)
Pennsylvanian, northern Oklahoma	120	(75)	Levorsen (1967)
Magellan basin, Argentina	100	(60)	Zielinski and Bruchhausen (1983)
Athabasca Tar Sands, Canada	100	(60)	Tissot and Welte (1978)

الجدول ٤-٤: أمثلة موثقة من الهجرة الافقية العرضية البعيدة للبترول.

الخلاصة: حركية الموائع في الأحواض الحديثة والهرمة.

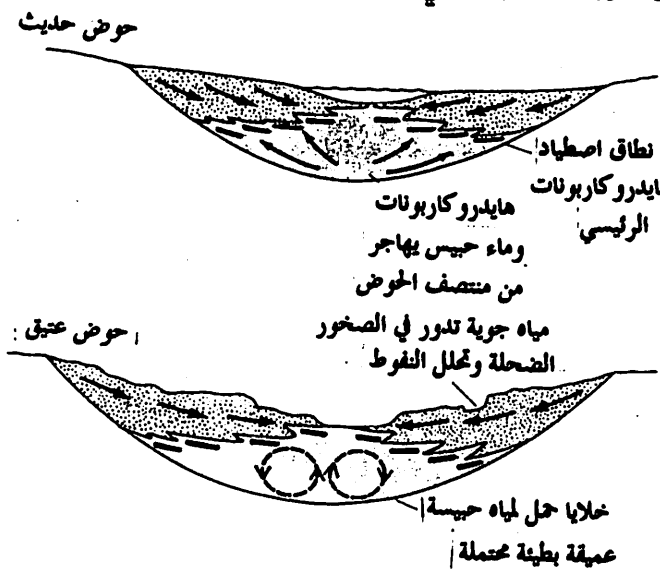
Summary: Fluid Dynamics of Young and Senile Basins

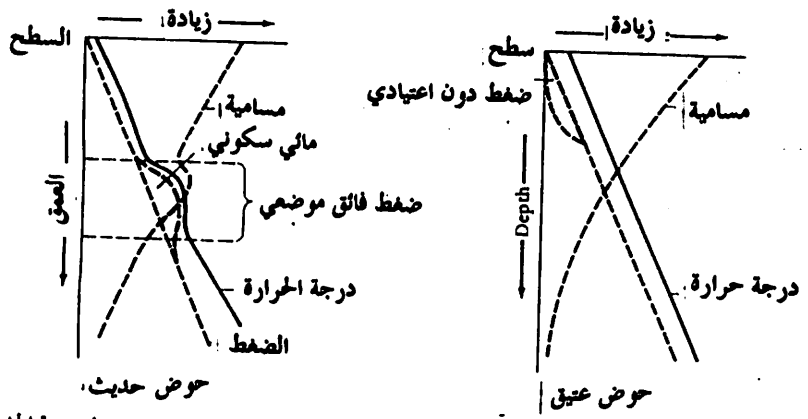
كي نفهم تولد النفط وهجرته واصطياده، فان المعرفة بالبيئة تحت السطحية تُعد مطلبا ضروريا. وبشكل أساسي، تزداد كثافة الصخور ودرجة الحرارة والملوحة والضغط بازدياد العمق، في حيث تقل المسامية. وقد تحدث اتجاهات معاكسة لهذه الاتجاهات العامة في أنطقة الضغط الفائق.

لقد تمت مراجعة انسيابية الموائع في الأحواض من قبل (Cousteau, 1975, Neglia, 1979, Bonham, 1980) وللحوض الرسوبي الحديث نظام موائع حركي جدا، ولكن حركة المائع الحبيس العميق تقل بتقدم العمر. وبعد الترسيب مباشرة، يسبب ضغط الترسبات الفوقية حركة عمودية هائلة للماء بسبب التراص Compaction. وترتبط هذه الحركة عادة مع هجرة الهايدروكاربونات واصطيادها. وقد تُقاطع هجرة المائع العمودية موضعيا بأنطقة ضغط فائق.

بمرور الزمن ونضوج الحوض، يتوقف تولد الهايدروكاربونات ويتسرب الضغط الفائق

ببطء نحو السطح. ويصبح الضغط سكونيا مائيا أو منخفضا كليا بسبب البرودة أو التعرية وتمدد المكمن. وسوف يستمر دوران المياه الجوية Meteoric في الغطاء الرسوبي السطحي الضحل، وقد يستمر الماء الحبيس العميق بالحركة، رغم أن ذلك يتم ببطء شديد في خلايا حملية (اسرائية) Convection Cells. ان هذه النظرية هي تفسير واحد للمعطيات المتوفرة عن انسياب الحرارة الشاذ في جنوب بحر الشمال، وتيارات الحمل موجودة داخل المكامن البترولية (Combarnous and Aziz 1970). ويلخص الشكل (٤-٢٣) ويظهر الفروقات الموجودة في مواصفات الأحواض الحديثة والناضجة.





الشكل ٤-٢٣: الشكل مقاطع عرضية ومنحنيات العمق تظهر الفروقات في حركية المواقع في الاحواض الرسوبية الحديثة والعتيقة.

SELECTED BIBLIOGRAPHY

مراجع مختارة

Chemistry of subsurface fluids:

COLLINS, A. G. 1975. *Geochemistry of Oilfield Waters.* Amsterdam: Elsevier, 495 pp.

DREVER, J. I. 1982. *The Geochemistry of Natural Waters.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 388 pp.

Subsurface temperatures:

KLEMME, H. D. 1975. Geothermal gradients, heat flow and hydrocarbon recovery. In: *Petroleum and Global Tectonics.* A. G. Fisher and S. Judson (eds.). Princeton: Princeton Univ. Press, 251–304.

Subsurface pressures:

VOCKROTH, G. B. (ed.). 1974. *Abnormal Subsurface Pressure.* Am. Assoc. Petrol. Geol., Reprint Series No. 11, 205 pp.

Subsurface fluid dynamics:

CHAPMAN, R. E. 1972. *Petroleum Geology, A Concise Study.* Amsterdam: Elsevier, 304 pp. Chapter 3 (pp. 48–82) gives an excellent exposé of fluid dynamics.

DAHLBERG, E. C. 1982. *Applied Hydrodynamics in Petroleum Exploration.* Heidelberg: Springer-Verlag, 161 pp.

NEGLIA, S. 1979. Migration of fluids in sedimentary basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 573–597.

YOUNG, A. and GALLEY, J. E. 1965. *Fluids in Subsurface Environments.* Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 4, 414 pp. Dated, but with a mass of data and several seminal papers.

REFERENCES

المصادر

ATHY, L. F. 1930. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 14,* 1–24.

BARKER, C. 1979. Role of temperature and burial depth in development of subnormal and abnormal pressures in gas reservoirs. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 414.

BENTOR, Y. K. 1969. On the evolution of subsurface brines in Israel. *Chem. Geol., 4,* 83–110.

BERG, R. R. 1975. Capillary pressures in stratigraphic traps. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 59,* 939–56.

BONHAM, L. C. 1980. Migration of hydrocarbons in compacting basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64,* 549–567.

BRADLEY, J. S. 1975. Abnormal formation pressure. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 59,* 957–973.

BRUNSTROM R. G. W. 1963. Recently discovered oil fields in Britain. Frankfurt: *Proc. World Petrol. Cong.,* Section 1, Paper 49, 11–20.

BUCKLEY, S. E., HOCUTT, C. R., and TAGGART, M. S. 1958. Distribution of dissolved hydrocarbons in subsurface waters. In: *The Habitat of Oil.* L. G. Weeks (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., 850–882.

CARSTENS, H. and FINSTAD, K. 1981. Geothermal gradients of the northern North Sea basin, 59–62°N. In: *Petroleum Geology of the Continental Shelf of North-West Europe*. L. V. Illing and G. D. Hobson (eds.). London: Heyden Press, 152–161.

CASE, L. C. 1945. Exceptional Silurian brine near Bay City, Michigan. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 29*, 567–570.

CASE, L. C. 1956. The contrast in initial and present application of the term "connate water." *J. Petrol. Technol., 8*, 12.

CHIARELLI, A. 1978. Hydrodynamic framework of eastern Algerian Sahara—influence on hydrocarbon occurrence. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62*, 667–685.

CLAYPOOL, G. E., LOVE, A. H., and MAUGHAM, E. K. 1978. Organic geochemistry, incipient metamorphism, and oil generation in black shale members of phosphoria formation, western interior United States. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62*, 98–120.

COLLINS, A. G. 1975. *Geochemistry of Oilfield Waters*. Amsterdam: Elsevier, 495 pp.

COMBARNOUS, M. and AZIZ, K. 1970. Influence de la convection naturelle dans les reservoirs d'huille ou de gas. *Revue Institute Francais de Petrol., 25*, 1335–1354.

COOPER, B. S., COLEMAN, S. H., BARNARD, P. C., and BUTTERWORTH, J. S. 1975. Palaeotemperatures in the northern North Sea basin. In: *Petroleum and the Continental Shelf of North West Europe*, vol. 1. A. W. Woodland (ed.). London: Applied Science Publishers, 487–492.

COUSTEAU, H. 1975. Classification hydrodynamiques des bassins sedimentaires. Tokyo: *Proc. 9th World Petrol. Cong., 2*, 105–119.

DE SITTER, L. V. 1947. Diagenesis of oilfield brines. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 31*, 2030–2040.

DICKEY, P. A. 1966. Patterns of chemical composition in deep subsurface waters. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 50*, 2472–2478.

DICKEY, P. A. 1969. Increasing concentration of subsurface brines with depth. *Chem. Geol., 4*, 361–370.

DICKEY, P. A. 1979. *Petroleum Development Geology*. Tulsa: Petroleum Publishing Co., 398 pp.

DICKEY, P. A. and COX., W. C. 1977. Oil and gas in reservoirs with subnormal pressures. *Am. Assoc. Petrol. Geol., 61*, 2134–2142.

EVANS, T. R. 1977. Thermal properties of North Sea rocks. *Log Analyst, 18 (2)*, 3–12.

FERTL, W. H. 1977. Shale density studies and their application. In: *Developments in Petroleum Geology I*. G. D. Hobson (ed.). London: Applied Science Publishers, 293–328.

FERTL, W. H. and CHILINGARIAN, G. V. 1976. Importance of abnormal pressures to the oil industry. *Soc. Petrol. Eng.*, Paper 5946, 11 pp.

FERTL, W. H. and WICHMANN, P. A. 1977. How to determine static BHT from well log data. *World Oil, 184 (1)*, 105–106.

FRIEDMAN, G. M. and SANDERS, J. E. 1978. *Principles of Sedimentology*. New York: Wiley, 792 pp.

HOTTMAN, C. E. and JOHNSON, R. K. 1965. Estimation of formation pressures from log-derived shale properties. *J. Petrol. Technol.*, June, 717–722.

HUBBERT, M. K. 1953. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 37*, 1954–2026.

HUBBERT, M. K. and RUBEY, W. W. 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 70*, 115–166.

HUNT, J. M. 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology*. San Francisco: Freeman, 616 pp.

JACQUIN, C. and POULET, M. 1973. Essai de Restitution des conditions hydrodynamiques regnant dans un basin sedimentaire au cours de son evolution. *Rev. Institut Francais du Petrol., 28*, 269–298.

JONES, P. H. 1969. Hydrodynamics of geopressure in the northern Gulf of Mexico basin. *J. Petrol. Technol., 21*, 803–810.

JONES, P. H. and WALLACE, R. H. 1974. Hydrogeologic aspects of structural deformation in the northern Gulf of Mexico basin. *J. Res. U.S. Geol. Surv., 2*, 511–517.

JORDAN, J. R. and SHIRLEY, O. J. 1966. Application of drilling performance data to overpressure detection. *J. Petrol. Technol., 18*, 1387–1394.

KLEMME, H. D. 1975. Geothermal gradients, heat flow and hydrocarbon recovery. In: *Petroleum and Global Tectonics*. A. G. Fisher and S. Judson (eds.). Princeton: Princeton Univ. Press., 251–304.

KREJCI-GRAF, K. 1962. Oilfield waters. *Erdol Kohle Petrochem., 15*, 102.

KREJCI-GRAF, K. 1978. *Data on the Geochemistry of Oil Field Waters*. Frankfurt: K. Krejci, Graf. am Main, 174 pp.

KREY, T. and MARSCHALL, R. 1975. Undershooting saltdomes in the North Sea. In: *Petroleum and the Continental Shelf of North West Europe*, vol. 1. A. W. Woodland (ed.). London: Applied Science Publishers, 265–274.

KRUMBEIN, W. C. and GARRELS, R. M. 1952. Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation-reduction potentials. *J. Geol., 60*, 1–33.

LEE, W. H. K. (ed.). 1965. *Terrestrial Heat Flow*. Am. Geophys., Union Monograph 8.

LEVORSEN, A. I. 1967. *Geology of Petroleum*. London: Freeman, 724 pp.

MAGARA, K. 1977. Petroleum migration and accumulation. In: *Developments in Petroleum Geology*, vol. 1. G. D. Hobson (ed.). London: Applied Science Publishers, 83–126.

MAGARA, K. 1978. *Compaction and Fluid Migration*. Amsterdam: Elsevier, 320 pp.

NEGLIA, S. 1979. Migration of fluids in sedimentary basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63*, 573–597.

OSTROFF, A. G. 1967. Comparison of some formation water classification systems. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 51*, 404.

OVERTON, H. L. 1973. Water chemistry analysis in sedimentary basins. 14th Ann. Logging Symp. *Soc. Prof. Well Log Analysts Assn.*, Paper L.

OXBURGH, E. H. and ANDREWS-SPEED, C. P. 1981. Temperature, thermal gradients and heat flow in the southwestern North Sea. In: *Petroleum Geology of the Continental Shelf of Northwest Europe*. L. V. Illing and G. D. Hobson (eds.). London: Heyden Press, 141–151.

PERRY, E. D. and HOWER, J. 1970. Burial diagenesis in Gulf Coast pelitic sediments. *Clays and Clay Miner., 18*, 165–177.

PIRSON, S. J. 1983. *Geological Well Log Analysis*, Third Edition. Houston: Gulf Publishing Co., 370 pp.

PLUMLEY, W. J. 1980. Abnormally high fluid pressure: survey of some basic principles. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64*, 414–430.

POTTER, P. E., MAYNARD, B., and PRYOR, W. A. 1980. *Sedimentology of Shales*. New York: Springer-Verlag, 306 pp.

PRICE, L. C. 1980. Aqueous solubility of crude oil at 400°C and 2,000 bars pressure in the presence of gas. *J. Petrol. Geol., 4*, 195–223.

RASHID, M. A. 1978. The influence of a salt dome on the diagenesis of organic matter in the Jeanne d'Arc Subbasin of the northeast Grand Banks of Newfoundland. *Org. Geochem., 1*, 67–77.

RASHID, M. A. and McALARY, J. D. 1977. Early maturation of organic matter and genesis of hydrocarbons as a result of heat from a shallow piercement salt dome. *J. Geochem. Explor., 8*, 549–569.

RIEKE, H. H. and CHILINGARIAN, G. V. 1973. *Compaction of Argillaceous Sediments*. Amsterdam: Elsevier, 350 pp.

RUSSELL, W. L. 1951. *Principles of Petroleum Geology*. New York: McGraw-Hill, 508 pp.

SASS, J. H. 1971. The earth's heat and internal temperature. In: *Understanding the Earth*. I. G. Gass, P. J. Smith, and R. C. L. Wilson (eds.). Sussex: Artemis Press, 80–87.

SCHMIDT, G. W. 1973. Interstitial water composition and geochemistry of deep Gulf Coast shales and sandstones. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 57*, 321–37.

SELLEY, R. C. 1982. *Introduction to Sedimentology*, Second Edition. London: Academic Press, 417 pp.

SILVER, C. 1968. Principles of gas occurrence, San Juan basin. In: *Natural Gases of North America*. B. W. Beebe and B. F. Curtis (eds.). Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. 9, 1, 946–960.

SULIN, V. A. 1946. Vody neftyanykh mestorozhdenii v sisteme priroduikhvod (Waters of oil reservoirs in the system of natural waters). Moscow: Gostoptedkhizdat.

TERZAGHI, K. 1936. The shearing resistance of saturated soils. *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech.*, Harvard, *1*, 54–46.

TICKELL, F. G. 1921. Summary of Operations. *California Division of Mines, 6*, 7–16.

TISSOT, B. P. and WELTE, D. H. 1978. *Petroleum Formation and Occurrence*. Berlin: Springer-Verlag, 538 pp.

VAN ELSBERG, J. N. 1978. A new approach to sediment diagenesis. *Can. Petrol. Geol. Bull., 26*, 57–86.

WHITE, D. E. 1957. Magmatic, connate and metamorphic waters. *Geol. Soc. Am. Bull., 68*, 1659–1682.

WHITE, D. E. 1965. Saline waters in sedimentary rocks. In: *Fluids in Subsurface Environments*. Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 4, 346–366.

YOUNGS, B. G. 1975. The hydrology of the Gidgealpa formation of the Western and Central Cooper Basin. *Rep. of Invest. 43. Geol. Surv. S. Aust.*, 35 pp.

ZIELINSKI, G. W. and BRUCHHAUSEN, P. M. 1983. Shallow temperature and thermal regime in the hydrocarbon province of Tierra del Fuego. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 67*, 166–177.

الفصل الخامس

تولد البترول وهجرته

ناقشت الفصول السابقة الصفات الفيزيائية والكيميائية للنفط الخام والغاز الطبيعي وسلوك الموائع في البيئة تحت السطحية Subsurface Environment . اما الهدف من هذا الفصل فهو مناقشة تكون البترول وهجرته ونضوجه . اننا نتوفر الان على فهم جيد لمكونات النفط والغاز ، وعلى الكثير من المعطيات المشتقة رقميا (أمبريقيا) Emprical التي تظهر الطريقة التي تتواجد فيها ، وبذلك فأننا نعرف كيف نجد النفط والغاز وكيف نستعملهما. ومع ذلك ، فان التفاصيل الدقيقة المتعلقة بتولد البترول وهجرته ما تزال موضع جدال . ان التطورات الحديثة في علم الجيوكيمياء وخصوصا في التقنيات التحليلية ، أدت الى تقدم سريع على هذه الجبهة بيد ان هنالك العديد من المشاكل التي تتطلب الحلول.

ان اية نظرية عن تولد البترول يجب ان تفسر مجموعتين من الملاحظات الجيولوجية والكيميائية.

الحقائق الجيولوجية التي يجب ان تفسرها اية نظرية مقترحة لتكون البترول:

(١) تتواجد التراكمات الهايدروكاربونية الرئيسية على نحو مميز في الصخور الرسوبية (الجدول ٥-١). وبكلمات (Pratt1924) "أعتقد أن كمية النفط في الارض هي أغزر بكثير واكثر توزيعاً مما كان يعتقد بشكل عام. ان النفط علامة مميزة للصخور البحرية غير المتحولة المتكونه في المياه الضحلة. وفي بيئته الطبيعية ، في قشرة الترسبات البحرية التي تُضمّ بمرور الزمن الى القشرة الارضية ، يصبح النفط مكونا اعتيادياً من مكونات تلك القشرة ، مخلوق بتأثير التفاعل المباشر بين قوى الارض المألوفة على مواد الارض" بعد ما يقرب من نصف قرن من ذلك هناك قلّة من الجيولوجيين حسب ممن لا يتفقون مع هذه العبارة ، باستثناء أضافة ملاحظة عابرة مفادها أن الترسبات القارية والبحرية العميقة مولدة للبترول هي الاخرى.

(٢) ان هناك العديد من الامثلة من التراكمات الهايدروكاربونية في مكامن الحجر الرملي والحجر الجيري المنغلقة من تحت وفوق وعرضيا بصخور مصمتة غير نفاذة

الجدول ٥-١: مقدار المادة العضوية في الصخور الرسوبية.

	الكتلة in 10^{18} g	
ترسبات عضوية		
بترول	1	
أسفلت	0.5	
فحم، لغنايت، خث	15	
		16.5
مادة عضوية منتشرة في الصخور الرسوبية		
هايدروكاربونات	200	
أسفلت	275	
كيروجين (مادة عضوية غير قابلة للاستخلاص)	12,000	
		12,475
المجموع		12,491.5

(عن Hunt, ١٩٧٧ تنشر بموافقة مسبقة).

Impermeable. وتمثل الشعاب المرجانية من العصر الديفوني في البرتا Devonian Reefs of Alberta، والرمال الشريطية من العصر الطباشيري في احواض مقتربات جبال الروكي Cretaceous Shoestring Sands of the Rocky Mountain Foothill Basins أمثلة على هذه الظاهرة. (أنظر صفحة ٣٨٣).

(٣) من بين التواجدات الجيولوجية الاخرى التي ينبغي أخذها بنظر الاعتبار هي :

(أ) تم العثور على تراكمات هايدروكاربونية في صخور القاعدة Basement Rocks (انظر صفحة ٣٩٨)، ولكن لا يتوقع ان يتحسن الوضع المهني لجيولوجي مبتدىء اذا ما اوصى ادارة الشركة التي يعمل بها بحفر مثل مناطق الاحتمالات هذه.

(ب) وجدت آثار من هايدروكاربونات موضعية النشأة Indigenous في الصخور النارية والمتحولة. ومع ذلك، فأن التراكمات الاقتصادية في القاعدة هي في استمرارية مع مستوى الموائع مع الصخور الرسوبية.

(جـ) توجد بقايا من الهايدروكاربونات في النيازك الكوندرية Chondritic Meteorites.

الحقائق الكيميائية التي ينبغي على أية نظرية مقترحة ان تفسرها.

(١) تختلف النفوط الخام من الهايدروكاربونات الحديثة الضحلة بما يلي :

(أ) انها تظهر تفضيلا لسلاسل الكاربون ذات الارقام الشفعية Even-Numbered (تميل الهايدروكاربونات الحديثة الى التواجد في سلاسل ذات أرقام وترية Odd-Numbered).

(ب) أنها تحتوي على أكثر من ٥٠ بالمائة من الهايدروكاربونات الخفيفة ، التي تكون نادرة او ذائبة في الترسبات الحديثة.

(٢) تظهر النفوط الخام علاقة الالفة Affinities مع الهايدروكاربونات العضوية الحديثة :

(أ) تظهر النفوط حديثة العمر ظاهرة المياسرة Levorotation. أن هذه الصفة من صفات الفعالية البصرية Optical Activity لهي صفة مميزة للترسبات التي تتكون بالتخليق العضوي Biosynthetically.

(ب) أنها تحتوي على بعض الجزيئات الحديثة او كنتاج لتحللها Degradation. (على سبيل المثال البروفرينات Porphyrins والستيرويدات Steroids).

عند مناقشة النظريات التي تهدف الى تفسير الحقائق الجيولوجية والكيميائية سالفة الذكر ، فأن من المهم ان نميز العديد من الفروقات، فإن كان البترول عضوي (احيائي) أو لاعضوي (كوني Cosmic أو صهاري Magmatic) المنشأ لهي مسألة ما تزال تثير الجدل. كما يدور جدل حول الطريقة التي تكون فيها البترول من مادته الاولية ايضاً . أن أصل البترول وطريقة تكونه هما مسألتان مرتبطتان مع بعضهما ، بيد أنهما متميزتان عن بعضهما ايضا. أن لدى معظم الجيولوجيين تصور واضح بأنه عضوي المنشأ ، رغم ان معظمهم لا يمتلك الا صورة غامضة جدا عن الكيفية التي تكون فيها . أن الجهل بمباديء التقطير يجب الا يمنع المرء من معرفة ان الجعة تصنع من الخميرة وحشيشة الدينار والشعير المنقوع.

وسوف تناقش الفقرة التالية ان كان البترول عضوي او لاعضوي المنشأ، وسنتبع هذه الفقرة بمناقشة عن طريقة تكون البترول.

أصل البترول، عضوي أم لا عضوي

ORIGIN OF PETROLUM : ORGANIC OR INORGANIC

اقترحت نظريات تكون البترول المبكرة أصلا لاعضويا (على سبيل المثال (Berthelot, 1866; Mendele'ev, 1877, 1902) . فمن المعروف ان المشتري وزحل يحتويان على الميثان. وهنالك شعبة من النيازك ، هي الكوندرايت الفحمية (الكاربونية) ، تحتوي على بقايا من هايدروكاربونات مختلفة ، بضمنها أحماض أمينية معقدة والفيتان الايزوبرينويدي Isoprenoids Phytane والبريستان Pristane (Mueller, 1963). ان وجود الهايدروكاربونات الخارج أرضية Extraterrestrial يُعَد من قبل العديد من الجهات باعتباره دليلاً على التكون اللاعضوي (Studier, Hayatsu and Anders, 1965). ولقد قلب (Link, 1957) هذه المحاججة رأساً على عقب ، مقترحا أن وجود الهايدروكاربونات الكونية انما هو دليل على وجود الحياة خارج الارض (أن الهايدروكاربونات الموجودة في الكوندرايت قد تمثل بقايا وحوش فضائية مشوية).

والى وقت قريب نسبيا ، كان العديد من الفلكيين يعتقدون أن نفط الارض هو نو أصل كوني. وفي وقت حديث نسبياً يرجع الى عام ١٩٥٥ ، كتب البروفيسور السير فردريك هويل: ان وجود الهايدروكاربونات في الاجسام التي تكونت منها الارض يجعل من المؤكد ان يحتوي باطن الارض على مقادير هائلة من النفط أكثر مما يمكن استخراجه من سمكة متفسخة – وهي نظرية غريبة ظلت رائجة لسنوات عديدة .... فاذا كانت تكهناتنا من أن ترسبات النفط قد تحررت خارجة من باطن الارض صحيحة ، فاننا عندها ، كما أعتقد ، يجب ان نقبل وجهة النظر القائلة بأن مقدار النفط الذي ما يزال موجودا في أعماق سحيقة يتجاوز كثيرا الكميات الضئيلة نسبيا التي تمكن الانسان من استخراجها (Hoyle, 1955).

دعنا نعود الى الارض كي نتفحص هذه النظرية . حتى دورة القرن ، كان العديد من العلماء المرموقين يؤمنون بالاصل الصهاري للهايدروكاربونات . ومن بين اولئك العلماء واكثرهم شهرة الجغرافي الكسندر فون همبولت Alexander Von Humboldt والكيميائي العظيم غي لوساك Gay-Lussac (أنظر Becker, 1909). ولقد تم تبني هذه النظرية من قبل منديليف Mendele'ev الذي اقترح ان الوشاح (الجبة أو الفسطاط

Mantle) يحتوي على كاربيد الحديد . ويمكن لكاربيد الحديد هذا ان يتفاعل مع الماء المتخلل (Percolating Water) ليكون الميثان والهايدروكاربونات الاخرى (Mendele'ev, 1902) ، وهو مشابه للتفاعل الذي يؤدي الى تكون الاستيلين من تفاعل الكاربيد مع الماء:

$$CaC_2+2H_2O = C_2H_2+Ca(OH)_2$$

هنالك القليل من الادلة على وجود كاربيد الحديد في الوشاح. ومع ذلك فان الاعتقاد باصل لاعضوي عميق للهايدروكاربونات قد تم تبنيه على نطاق واسع من قبل العديد من العلماء (كيميائيون وفلكيون أكثر من جيولوجيين) خلال القرن التاسع عشر (لمراجعة تاريخية أنظر Dott and Reynolds, 1969) وما تزال بقايا أثارية من هذا الاعتقاد تقاوم في روسيا (Porfir'ev, 1974) وحتى في الولايات المتحدة الامريكية. فاذا كانت هذه النظرية صحيحة ، فان المرء يتوقع عندئذ ان ترتبط الهايدروكاربونات في العادة مع الصخور النارية ومناطق الاضطراب القشري العميق والتفلق . والان سوف يتم تفحص الدليل المتعلق بتحرر الهايدروكاربونات من البراكين ، وتواجدها في الصهارة المتصلبة ، وترابطها مع الفوالق.

سُجِّل تحرر للهايدروكاربونات الغازية وهي تنبعث من البراكين في العديد من أنحاء العالم. ولقد استعرض (White and Waring, 1963) بعضا من هذه التواجدات . ويُعَّد الميثان من أكثر الهايدروكاربونات الغازية تواجدا ، وهو يوجد عادة بنسبة أقل من ١ بالمئة ، رغم انه تمت ملاحظة نسب تتجاوز ١٥ بالمئة. ومع ذلك ، فأن في كل هذه الحالات يتفجر البركان خلال غطاء من الصخور الرسوبية التي يمكن ان يكون الميثان قد أشتق منها نتيجة لتسخين المادة العضوية.

ولقد تراكمت خلال السنوات الماضية معطيات تصف وجود الهايدروكاربونات من الصخور النارية. ويمكن تمييز ثلاثة أنواع أصلية Genetic Types من الهايدروكاربونات النارية :

١- الهايدروكاربونات الموجودة في الحويصلات Vesicles والمتضمنات Inclusions الموجودة في الصخور النارية.

٢- الهايدروكاربونات المحتجزة حيث تقتحم الصخور النارية الترسبات.

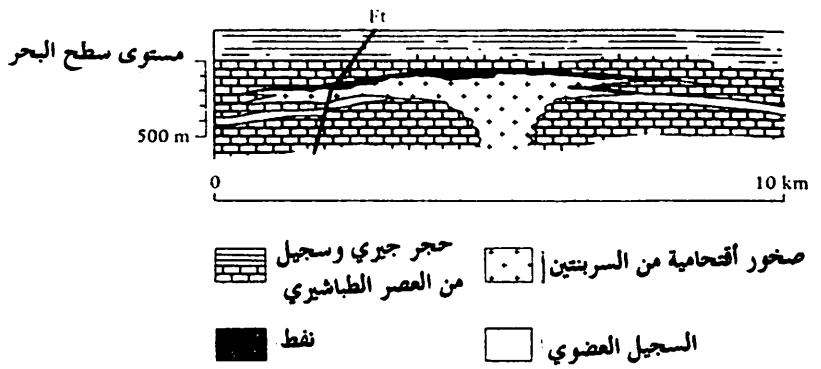
٣- الهايدروكاربونات الموجودة في صخور القاعدة النارية المحتجزة تحت سطوح عدم التوافق Unconformities.

توجد بين أكثر حالات النوع الاول شهرة في مصمت خيبني khibiny Massif في شبه جزيرة كولا Kola Peninsula في روسيا (Petersitye,1962;Ikorsky,1967) . فهناك تخترق المقتحمات القلوية Alkaline intrusive سلسلة من الترسبات البركانية والترسبات الفتاتية البركانية . ويتكون تسعون بالمئة من هذه المقتحمات من السيانايت النفليني Nepheline Syenit. وتوجد الهايدروكاربونات الغازية والسائلة داخل المتضمنات في بلورات النفلين. ويتكون بين ٨٥ الى ٩٠ بالمئة من الهايدروكاربونات من الميثان ولكن هنالك ايضا بقايا من الايثان والبروبان والايزوبيوتان-ن والايزوبيوتان isobutane مع الهيدروجين وثاني أوكسيد الكاربون كما تمت ملاحظة وجود بقايا من البتيومن ، مع الكانات طويلة السلسلة Long-chain Alkanes والاروماث (العطريات) Aromatics. ورغم ان كمية الهايدروكاربونات الموجودة في مقتحمات خيبني هي في منتهى الضالة ، غير ان تنوعها يثير الاهتمام . ولقد تمت مراجعة تواجدات النفط الناري الاخرى في روسيا من قبل (Porfir'ev, 1974).

اما الحالة الثانية المشهورة من النفط الناري فلقد وصفت من قبل (Evans, Morton, and Cooper, 1964) من منطقة دايفيكا Dyvika في منطقة ارينداك في النرويج. وهناك يتواجد النفط في حويصلات في قواطع الدولوريت Dolerite Dyke . وتكون الحويصلات محاطة عند الحافات ببلورات من الكالسايت ، والانالسايت Analcite والكالسيدوني والكوارتز (المرو). وتوجد الهايدروكاربونات البرافينية في وسط الحويصلات، وتقتحم قواطع الدولوريت صخور النايس والشست من العصر ما قبل الكامبري.

النوع الثاني من تواجد الهايدروكاربونات في القاعدة هو اكثر شيوعا بكثير ويحتوي على العديد من التراكمات الاقتصادية من النفط والغاز ويوجد النفط في بعض الاحيان حيث تقتحم الترسبات ، وخصوصا السجيل العضوي بالمواد النارية. وتوجد مثل هذه الحالات على سبيل المثال في السجيل الزيتي من العصر الكاربوني في وادي المدلاند باسكتلندا. كما توجد تراكمات اقتصادية من هذا النوع في حقل جاتيبونيكو Jatibonico Field

بمنطقة جاتيبونيكو في كوبا ، وكذلك في السهل الساحلي الداخلي في تكساس (Collingwood and Rettger, 1926). وفي هذه الحالات يوجد النفط في العديد من الاقتحامات القاعدية المتغيرة حرمائيا Hydrothermal. أن مثل هذه الحقول تفتقد الى المياه ، ورغم أنها قد تظهر انتاجا مبدئيا مرتفعا جدا بسبب الدفع الناتج عن تمدد النفط او الغاز ، فأنها غالبا ما تنضب بسرعة . أن اقتحام تكساس Texas intrusive الذي عثر فوقه على أكثر من (١٧) حقلا ، يقتحم صخور الحجر الجيري والسجيل من العصر الطباشيري (الشكل ٥-١).



الشكل ٥-١: مقطع عرضي في خزان لايتون سيرنغ النفطي في مقاطعة كالدويل بتكساس . يتواجد النفط في ذروة سدادة دائرية من السربنتين. ليس هنالك مياه حرة. لاحظ السجيل العضوي المجاور (عن Collingwood and Rettger, ١٩٢٦).

النوع الثالث من تراكمات النفط في الصخور النارية غالبا ما يكون مهما من الناحية الاقتصادية . أن هذا النوع هو حيث يوجد النفط والغاز في التكسرات ومسامات الاذابة Solution Pores داخل الصخور النارية والمتحولة، وتوجد حالات مثل هذا النوع من المصائد تحت سطوح عدم التوافق. ومن الواضح ان المسامية تعزى الى التجوية. وتغطي صخور القاعدة بالترسبات ، وغالبا ما توجد أطيان غنية بالمواد العضوية بجوار الترسبات. ويمثل حقل أوغيلا - نافورا في ليبيا هذا النوع من التراكمات (أنظر صفحة ٣٩٨).

دعنا الان نناقش أصول هذه الانواع الثلاثة من النفط في الصخورالنارية. وبالنسبة للنوع الأول حيث توجد الهايدروكاربونات في حويصلات او متضمنات ، فانه يصعب استبعاد الاصل اللاعضوي لهذه الهايدوكاربونات. ان تلوث الصهارة وهي تقتحم الترسبات

العضوية أمر يمكن افتراضه ، ولكن في كلتا الحالتين اللتين ذكرناهما في السابق ، كانت الصخور الرسوبية غائبة.

النوع الثاني من التواجد حيث توجد الهايدروكاربونات عند حافات الاقتحامات النارية فهو غامض الاصل. اذ يمكن الافتراض ان النفط اما ان يرتبط من ناحية الاصل بالصهارة ، او انه قد تكّون نتيجة للتحول الحراري للكيروجين في الترسبات المقتحمة.

النوع الثالث حيث يوجد النفط في صخور القاعدة المتجوية تحت سطوح عدم التوافق ، فانه يمكن تفسيره على نحو أفضل ، باعتباره نتيجة لهجرة النفط من الترسبات المغلفة. ان من الصعب القبول بفكرة التكون المتزامن مع الاقتحام ، لان توضّع البترول لا بد ان يكون لاحقا لكل من تجوية صخور القاعدة وتوّضع الترسبات التي وفرت الغطاء Seal. ولقد ذكرنا مسبقا أنه حيثما يلاحظ تسرب غازي ناري ، فان الغازات المتسربة تكون من الغازات النبيلة Noble gases وليس من الهايدروكاربونات (أنظر صفحة ٢٢).

كي نختتم مراجعتنا هذه للهايدروكاربونات في الصخور النارية ، فان من المهم التأكيد على أن حالات النفط الصهاري الموضعي التي يبدو أصلها غير مشكوك فيه هي نادرة وغير مهمة من الناحية الاقتصادية. ولا تكون حجوم الهايدروكاربونات المصطادة بهذه الطريقة غير مهمة حسب ، بل أن "المكامن" هي الاخرى تكون غير نفاذة ما لم تكن مكسرة. ولا توجد تراكمات اقتصادية من الهايدروكاربونات في الصخور النارية الا في الحالات التي تقتحم فيها الصخور النارية الترسبات او ان تتوضع الترسبات فوقها.

ومثلما ناقشنا في صفحة ٣٦٢ ، تؤدي الفوالق دورا هاما في هجرة البترول واصطياده. وتسمح بعض الفوالق بالحركة العمودية للنفط والغاز ، اما بعضها الاخر فغير نفاذ ويعمل عمل الختم ، وبذلك يؤدي الى تكون مصائد الفوالق Fault Traps. وتحرر بعض الفوالق غازات قابلة للاحتراق عند سطح الارض اثناء الهزات الارضية. ويسبق تحرر الغازات انتفاخ الارض وحدوث انفجارات هائلة وأضوية براقة وموجات أرضية محسوسة. كما تتبع احيانا برائحة كريهة بسبب وجود غاز كبريتيد الهايدروجين. أن هذه الظواهر موثقة جيدا وهي تظهر بوضوح ان بعض الفوالق هي قنوات للغازات القابلة للاشتعال (Gold, 1979).

اظهر التحليل التفصيلي لهذه الغازات وجود الميثان وثاني أوكسيد الكاربون وكبريتيد

الهايدروجين وبقايا من الغازات النبيلة(Sugisaki et al., 1983) ولقد جادل كل من (Payve1956) وكذلك (Subbottin, 1966) ان البترول اللا أحيائي تحت القشرة الارضية يهاجر نحو الاعلى على امتداد الفوالق الرئيسية كي يصطاد في الاحواض الرسوبية او يتبدد عند سطح الارض. ولقد أورد (Porfir'ev, 1974) الفوالق المحيطية Flanking Faults في منخسفات Grabens كل من السويس والراين وبيكال وبارغوزن كأمثلة على مغذيات البترول هذه.

ولقد تلقت هذه المدرسة الفكرية مؤخرا دعما في الغرب من قبل كل من (Gold, 1979, Gold and Soter, 1982). ويجادل Gold بأن تسرب الغازات اثناء الهزات الارضية على امتداد الفوالق يسمح للميثان بالهرب من الوشاح. وتؤدي هذه العملية الى تكون مكامن غازية عميقة ، كما يؤدي بعملية البلمرة Polymerization الى تكون النفط في الانطقة الاقل عمقا. وبالنسبة للعديد من الجيولوجيين تبدو هذه الافكار غير محتملة الوقوع وغالبا ما يتم استبعادها . أن نظرية Gold المتعلقة بتسرب الغازات اثناء الهزات الارضية تعني أنه لن تكون هناك أزمة طاقة ، وأنه بغية العثور على كميات لا نهاية لها من النفط والغاز ، فأن كل ما يتوجب ان نعمله هو حفر آبار بجوار الفوالق تكون عميقة بما يكفي وغالبا ما يكون ذلك كافياً.

تمت مجادلة هذا التصور الجيولوجي الكلاسي من قبل (North, 1982) فلأن المسامية والنفوذية تقل مع العمق ، فلن تكون هناك مكامن عميقة كي تستوعب وتوزع اي غاز يحتمل تواجده. ووفق مقياس كوني ، فأن مكامن الغاز ترتبط ارتباطا حميما بالتكوينات الحاملة للفحم في العصر الكاربوني الاعلى (البنسلفاني Pennsylvanian)والطباشيري والبلايوسيني (سوف تتم لاحقا مناقشة قدرة الكيروجين الدبالي Humic Kerogen على تولد الغاز).

يلاحظ ان اغلب التقارير المتعلقة بتسرب الغازات اثناء الهزات الارضية اثارة ، هي تلك التي تحدث في الاحواض المتفلقة ذات التتابعات السميكة من الترسبات الحديثة. ان الرمال المفككة لا بد وان تكون مشحونة بالميثان الاحيائي وكبريتيد الهايدروجين. وأن هزة زلزالية سوف تؤدي الى تماسك الرمل ، مما يؤدي الى انخفاض المسامية وانفجار عنيف لموائع المسامات الزائدة.

ومع ذلك ، فان من الممكن التمييز بين الميثان الاحيائي واللاأحيائي. فللكاربون نظيران هما : C^{12} , C^{13}. وأن النسبة بين C^{12}-C^{13} تتغاير في المركبات المختلفة ، وأن هذه النسبة مرتفعة على نحو خاص ، في الانواع المختلفة من الميثان . ويكون الميثان الاحيائي غنيا بالنظير C^{12} في حين أن الميثان اللاحيائي يحتوي على نسبة أعلى من النظير C^{13} كما أورد ذلك (Hoefs, 1980) . وتدل نسبة C^{12}-C^{13} التي قيست من "البقع الساخنة " Hot spotsفي البحر الاحمر وبحيرة كيفو (شرق افريقيا) ومرتفع شرق الهاديء East Pacific Rise على ان للميثان اصل لا احيائي (McDonald, 1983).

وبذلك فان هنالك بعض الادلة المتوفرة التي تؤيد الاصل اللاحيائي لبعض انواع الميثان وحركته من خلال التسرب اثناء حدوث الهزات الارضية. ولن يفوت الجيولوجيون ان يلاحظوا ، مع ذلك ، أن التراكمات الهايدروكاربونية الاقتصادية تقتصر على الاحواض الرسوبية. وأن نضوحات البترول وتراكماته غائبة في الصخور النارية والمتحولة في الدروع القارية Continental Shields ، وكلاهما بعيد عن الفوالق المجاورة. ولقد أصبح امرا تقليديا الان استعمال بصمات الغاز الكروماتوغرافية Chromatography Finger Printing لمضاهاة المادة العضوية في السجيل مع البترول الموجود في المكامن المجاورة (Flory et al., 1983). وبذلك استنتج الجيولوجيون ان البترول يتكون بالنضوج الحراري للمادة العضوية. وسوف يتم الان تفحص هذه الفرضية، مبتدئين بمقدمة عن انتاج المادة العضوية وحفظها على سطح الارض ومن ثم نتتبّع تطورها بعد ان تدفن مع الترسبات.

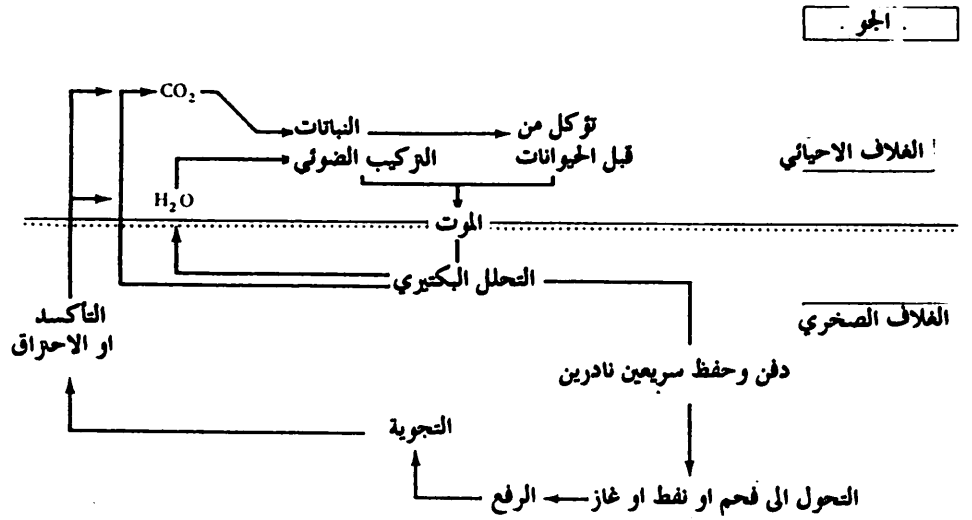
العمليات العضوية الحديثة على سطح الأرض

حُددَّ المقدار الكلي للكاربون الموجود في قشرة الارض بأنه يزن نحو ٢٠×٢.٦٥غم (Hunt, 1977). وهناك نحو ٨٢ بالمئة من هذا الكاربون محتجز بشكل كاربونات الكالسيوم في الحجر الجيري والدولومايت. ويوجد نحو ١٨ بالمئة ككاربون عضوي في الفحم والنفط والغاز (Schidlowski et al., 1974). أن التفاعل الرئيسي هو تحول الكاربون العضوي الى الهايدروكاربونات بعملية التركيب الضوئي. وفي هذا التفاعل ،

يتحول الماء وثاني أوكسيد الكاربون الجوي من قبل الطحالب والنباتات الى ماء وغلوكوز:

$$6CO_2+12H_2O=C_6H_{12}O_6+6H_2O+6O_2$$

يعد الغلوكوز نقطة البداية للتصنيع العضوي للسكريات المتعددة Polysaccharides ومركبات الكاربون الاخرى الاكثر تعقيدا. أن انتاج هذه السكريات المتعددة قد يحدث داخل النباتات أو الحيوانات التي تتغذى على النباتات. وفي المسار الطبيعي للاحداث تموت النباتات وتنفق الحيوانات وتتأكسد مادتهما العضوية متحولة الى ثاني أوكسيد الكاربون والماء. وبذلك تكتمل الدورة (الشكل ٥-٢). وفي بعض الحالات الاستثنائية ، يمكن للمادة العضوية ان تدفن في الترسبات وتحفظ ، رغم أن ذلك يتم في حالة محسنة على شكل فحم او نفط او غاز. ولكي نتتبع تطور المادة العضوية فأن من الضروري ان نبدأ بتفحص كيمياء المادة العضوية.

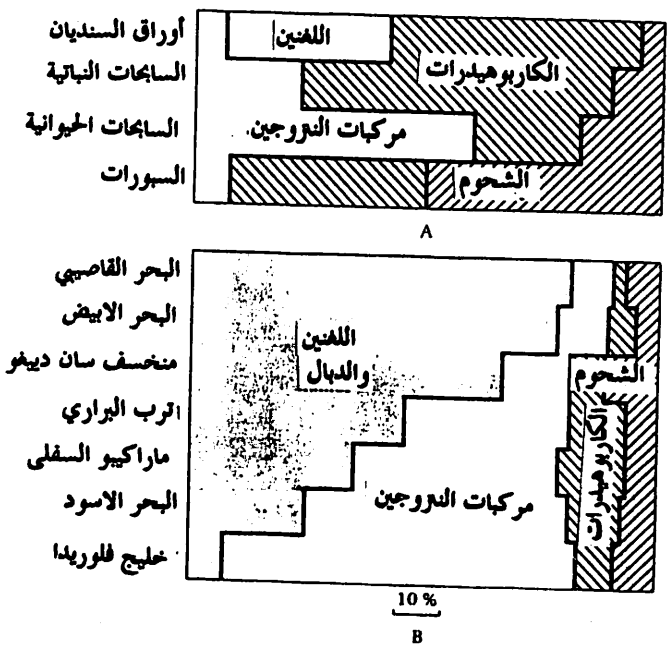


الشكل ٥-٢: دورة الكاربون العضوي.

تضم مجاميع الكيميائيات التي توجد في المادة العضوية كلا من البروتينات والكاربوهيدرات والشحوم والخشبين Lignin. وتوجد البروتينات بشكل رئيسي في الحيوانات والى مدى أقل في النباتات . وهي تحتوي على عناصر الهيدروجين والكاربون والاوكسجين والنتروجين مع بعض الكبريت والفسفور. ويوجد ترابط العناصر هذا بهيئة أحماض أمينية. وتوجد الهايدروكاربونات في كل من الحيوانات والنباتات ، ولها الصيغة

الاساسية $Cn(H_2O)n$ وتشمل السكريات الغلوكوز وبوليراتها وهي السيللوز والنشأ والجَنّون (الكيتين) Chitin. وتوجد الشحوم ايضا في كل من الحيوانات والنباتات. وهي تتميز بشكل عام بعدم ذوبانها في الماء وتضم الدهون Fats والزيوت Oils والشموع Waxes. ومن الناحية الكيميائية تحتوي الشحوم على ذرات الكاربون والهيدروجين والاوكسجين. وتتكون جزيئة الشحوم الاساسية من خمس ذرات من الكاربون (C_5H_8). ومن هذه القاعدة تبنى الاستيرويدات Steroids وآخر هذه المجموعات الرئيسية الاربع من المركبات العضوية هي الخشبين التي توجد فقط في النباتات الاكثر تطورا. والخشبين هو فينول متعدد (بولي فينول) ذو وزن جزيئي مرتفع ، يتكون من أنواع مختلفة من الحلقات الكاربونية الاروماتية.

يظهر الشكل (٥-٣) توزيع هذه المجاميع الاربع من المركبات في الكائنات الحية وفي الترسبات الحديثة الضحلة. كما يظهر الجدول (٥-٢) غزارتها في المجاميع المختلفة من الحيوانات والنباتات.



الشكل ٥-٣ : تركيب المادة العضوية في الكائنات الحية (أ) وفي الرسبات الحديثة الضحلة (ب) . (عن Hunt, ١٩٧٨).

الجدول ٥-٢: التركيب الكيميائي للمجاميع المختلفة من الحيوانات والنباتات.

المادة	النسبة المئوية الوزنية للمكونات الرئيسية (خالية من الرماد)			
	البروتينات	الكاربوهيدرات	اللجنين	الشحوم
النباتات				
التوب	1	66	29	4
أوراق السنديان	6	52	37	5
ابر الصنوبر	8	47	17	28
السابحات النباتية	23	66	0	11
الدايوتومات	29	63	0	8
أبواغ الاشنات الارضية	8	42	0	50
الحيوانات				
السابحات الحيوانية	60	22	0	18
الكوبيبدات	65	25	0	10
اللافقريات العليا	70	20	0	10

(عن Hunt, ١٩٧٩ تنشر بموافقة مسبقة).

الناتجية المادة العضوية وحفظها

مثلما تم شرحه مسبقا ، يرتبط مقدار المادة العضوية المدفونة في الترسبات بنسبة الانتاجية العضوية وتدميرها. وبشكل عام ، تتحطم المادة العضوية على سطح الارض ، ولا يحفظ منها الا جزء يسير. ويحفز ترسيب الترسبات الغنية بالمواد العضوية بمعدلات انتاج المادة العضوية المرتفعة واحتمالية حفظها المرتفعة. وسوف تتم الان مناقشة هذين العاملين. أن تحديد الانتاج والحفظ خلال الوقت الحالي يعد امرا سهلا نسبيا ، ولكن اسقاط المعلومات المتعلقة بالماضي يعد امراً أصعب. وتصبح هذه المشكلة اكثر في ما يتعلق بالبيئات القارية التي تكون فيها نسبة الانتاج – التدمير للمادة العضوية مرتبطة الى حد كبير بنمو النباتات الارضية. وبذلك ، فانه يجب التعامل مع البيئات البحرية والقارية على نحو منفصل.

الانتاجية والعمليات العضوية في البحار والمحيطات

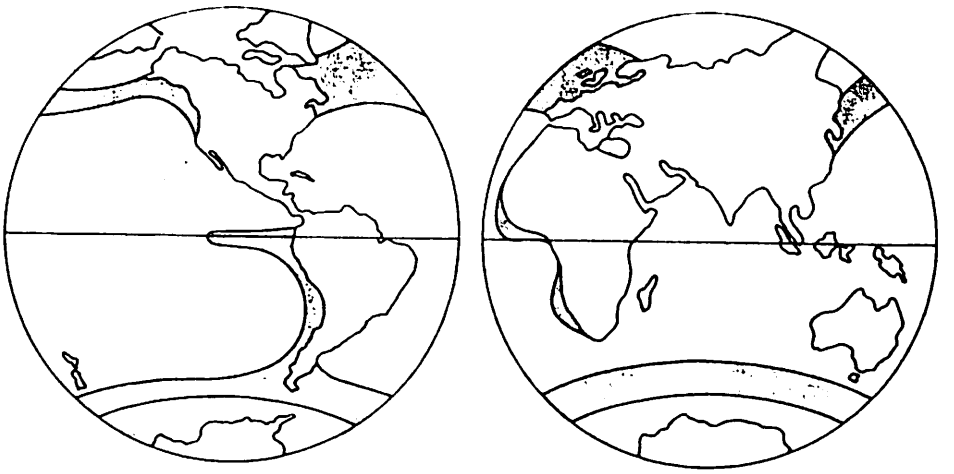
في البحار ، كما هو الحال على الارض ، تتكون كل المادة العضوية في الأصل بعملية التركيب الضوئي. ان صانعات الغذاء في البحر هي العوالق النباتية الغورية Pelagic Phytoplankton والطحالب القاعية . ان الانتاجية الاحيائية لهذه النباتات ترتبط بكلٍ من المعاملات الفيزيائية والكيميائية. ومن بين الاولى تعد درجة الحرارة والضوء

الاكثر اهمية. ويعتمد مقدار الضوء على العمق وخط العرض وعكورة الماء ويكون مقدار الانتاجية العضوية في حده الاعلى في النطاق الضوئي الضحل ويقل بسرعة مع زيادة عمق الماء وقلة الضوء ودرجة الحرارة.

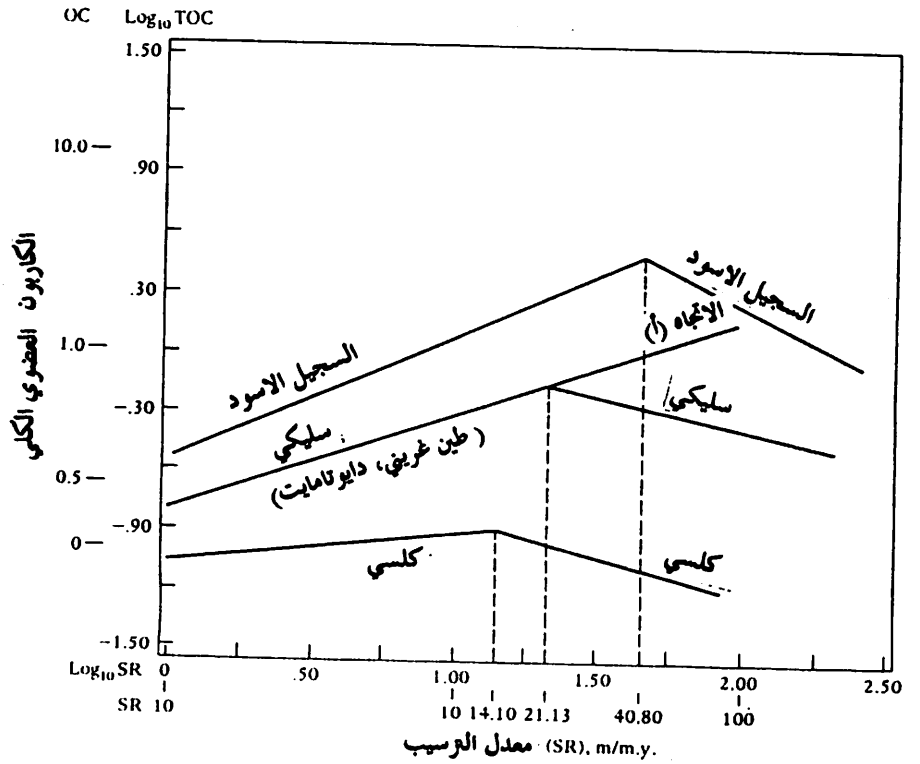
تضم الظروف الكيميائية التي تشجع الانتاجية العضوية غزارة الفوسفات والنترات. أن هذه المواد الكيميائية أساسية لنمو النباتات والحيوانات. ولا تعدّ الاكسجة Oxygenation مهمة بالنسبة للعوالق نفسها ، بيد أنها ضرورية لوجود الحيوانات التي تشكل لاحقا الحلقات في السلاسل الغذائية. ولأن الاوكسجين هو من نواتج التركيب الضوئي ، فأن العوالق تزداد مع زيادة المحتوى الاوكسجيني في البحر.

يظهر الشكل (٥-٤) الانتاجية الاحيائية في محيطات العالم الحالية ويمكن تمييز ثلاث مناطق رئيسية للانتاجية العضوية : نطاق كبير ، حيث يتم انتاج أقل من ٥٠ غم / متر مربع / سنة ، وهو يوجد في البحار القطبية والمناطق الوسطى من المحيطات الكبيرة. وهناك نطاقان من الانتاجية المرتفعة (٢٠٠ الى ٤٠٠ غم / متر مربع / سنة) يحيطان الكرة الارضية على امتداد الحد الفاصل بين المحيطات القطبية والاستوائية . وهناك ثلاثة أنطقة يكون فيها الانتاج العضوي فوق المعدل وتوجد في المناطق القريبة من السواحل الغربية لامريكا الشمالية وامريكا الجنوبية وافريقيا. وتوجد هذه الانطقة حيث تبزغ التيارات المحيطية العميقة الباردة من أعماق سحيقة (تيارات كاليفورنيا وهمبولت وبانغيولا على التوالي). وتحتوي المواد الغذائية في هذه التيارات على النترات والفوسفات بشكل رئيسي ، وهي مسؤولة عن الانتاجية العضوية المرتفعة لهذه الأنطقة.

ان من المهم ان نؤكد ان مناطق الانتاجية المحيطية العضوية المرتفعة ليست بالضرورة هي المناطق التي تحفظ بها على نحو أفضل. ويحفز حفظ المادة العضوية بظروف القاع اللاهوائية ومعدلات الترسيب السريعة. ولقد قدم (Johnson Ibach, 1982) دراسة تفصيلية عن العلاقة بين معدل الترسيب والكاربون العضوي الكلي في اللباب المستخرج من قيعان المحيطات في مشروع الحفر البحري العميق Deep Sea Drilling Project. تتراوح العينات في العمر من الجوراسي الى العصر الحديث. ويوضح الشكل (٥-٥) النتائج، ولقد أظهرت ترسبات السجيل الاسود والترسبات السيليكية والجيرية على نحو منفصل. وبالنسبة لكل أنواع الترسبات الثلاثة ، فأن مجموع الكاربون العضوي يزداد مع



الشكل ٥-٤: أنتاج المادة العضوية في المحيطات الحالية في العالم. لاحظ الانتاجية الواطئة في الانطقة القطبية والانتاجية المرتفعة على أمتداد الجوانب الشرقية من المحيطات .(عن Debyser and Deroo, ١٩٦٩ and Degens and Mopper, ١٩٧٦).



الشكل ٥-٥: مرتسم بياني يظهر العلاقة بين الكاربون العضوي الكلي ومعدلات الترسيب للباب من الجوراسي وحتى العصر الحديث تم أستخراجها من مشروع الحفر البحري العميق. ويظهر المرتسم أن لكل نوع من الرسبات معدل ترسيب مثالي للحد الاقصى من حفظ المادة العضوية. وفي المعدلات البطيئة جدا ، تحدث الاكسدة ، أما في المعدلات المرتفعة جدا ، يختلط الكاربون العضوي مع الرسبات. (عن Johnson Ibach, ١٩٨٢).

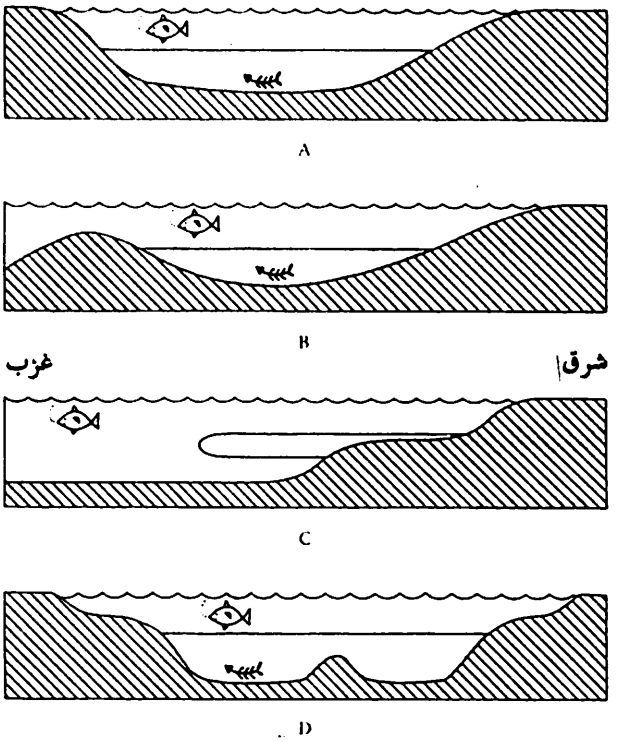
معدلات الترسيب بالنسبة لمعدلات الترسيب البطيئة ، ولكنه يقل مع الترسيب عند معدلات الترسيب العالية. ويحدث التحول Switchover عند معدلات ترسيب مختلفة قليلا بالنسبة لانواع الصخاريات الثلاثة.

يُفَسر Johnson Ibach هذه النتائج بأنها تظهر انه عند معدلات الترسيب البطيئة تتأكسد المادة العضوية على أو قرب قاع البحر. ويخفف الترسيب السريع على نحو مؤثر ، المحتوى العضوي للترسبات. ويبدو ان لكل صخارية هناك درجة مثلى Optimum لحفظ المادة العضوية ، وهذا المعدل يمثل توازنا بين تخفيف الجزء العضوي وتدميره.

الطرف الثاني في الاهمية الذي يحبذ حفظ المادة العضوية هو وجود التطبق داخل المياه التي يحدث منها الترسيب. ولقد ميز Demaison and Moore (1979,1980) أربعة أوضاع رئيسية لتكون الترسبات الغنية بالمواد العضوية في البيئات عادمة الاوكسجين Anoxic (الشكل ٥-٦).

الاول من بين هذه الاوضاع هو بحيرات المياه العذبة التي ينشأ فيها تطبق للمياه نتيجة لأسباب حرارية وحيث يوجد الماء الدافيء قرب السطح والمياه الابرد والاكثر كثافة في الاعماق. وسوف تزدهر الحياة في النطاق العلوي حيث تقوم العوالق النباتية بصنع الغذاء وأكسجة النطاق الضوئي اما في الطبقة الاعمق ، فأن الاوكسجين حالما يستعمل فأنه لن يعوض لأن صنع الغذاء لا يحدث في الظلام ، وأن التطبق الناتج من الفروق في الكثافة سوف يمنع دوران المياه. وقد تحفّز العواصف الموسمية دوران المياه وتؤدي الى انقراض جماعي نتيجة الاختناق Asphyxiation داخل البحيرة ، مما يزيد كمية الحطام العضوي المترسب على قاعها. ان هذا الوضع معروف جيدا في البحيرات الحديثة مثل تلك الموجودة في شرق افريقيا (Degens et al., 1971, 1973). وتضم البحيرات المشابهة في العصور القديمة سلسلة بحيرات العصر الثلاثي في كولورادو ويوتا ويومنغ التي ترسب فيها السجيل الزيتي من تكوين (غرين ريفر) (Bradley, 1948; Robinson, 1976).

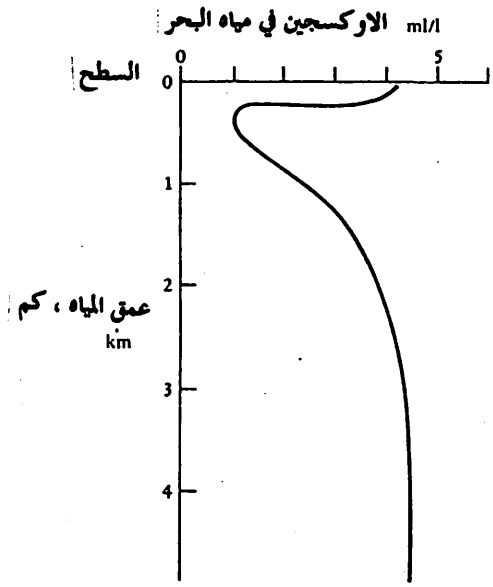
الوضع الثاني لترسيب المادة العضوية وحفظها في بيئة عادمة الاوكسجين يوجد في الاحواض المغلقة Barred Basins (الشكل ٥-٦ب). وفي هذا الوضع تدخل مياه البحر المستنقعات والخلجان والبحار شبه المغلقة. وفي المناخات القاحلة يؤدي التبخر الى انخفاض



الشكل ٥-٦: مرتسم تخطيطي للاوضاع الاربعة الرئيسية للبيئات عادمة الاوكسجين الملائمة لحفظ المادة العضوية في الرسبات حسب تصنيف Demaison and Moore, ١٩٨٠ : (أ) بحيرة (تطبق محفز حراريا). (ب): حوض محجوز (التطبق يعزى الى الفرق في الملوحة) (ج) جرف قاري مع تيارات متدفقة نحو الاعلى (د) حدث عادم للاوكسجين في حوض محيطي.

مستوى المياه وزيادة الملوحة. تدخل المياه الأقل كثافة من البحر المفتوح عبر الحاجز وتطفو على المياه الموضعية الاكثر كثافة. وبذلك ينتج تطبق للمياه شبيه بذلك الذي يحصل في بحيرات المياه العذبة. ولكن في هذه الحالة فأن التطبق الكثافي Density Layering يعزى الى الفرق في الملوحة وليس في درجة الحرارة. ومع ذلك ، فأن ظروف قاع عادمة الاوكسجين مشابهة يمكن أن تنشأ أيضا ويمكن بذلك حفظ المادة العضوية. ويعد البحر الاسود مثالا حديثا على البحار المحصورة عادمة الاوكسجين (Deuser, 1971; Degens and Ross, 1974). وأن السجيل العضوي الغني بالمواد العضوية من العصر الليلاسي في شمال غرب أوربا ربما ترسب في هذا النوع من الاحواض المغلقة (Hallam, 1981).

الوضع الثالث المناسب لترسيب المادة العضوية وحفظها يقع أيامنا هذه على الجوانب الغربية من القارات في المناطق القريبة من خط الاستواء ، ولقد تم مسبقا شرح الانتاجية العضوية المرتفعة لهذه المناطق (الشكل (٥-٦ج). وفي هذا الأوضاع ، تكون المياه عادة قليلة الاوكسجين بين الاعماق ٢٠٠ و ١٥٠٠ مترا (٦٥٠ الى ٥٠٠٠ قدم) ، (الشكل ٥-٧).

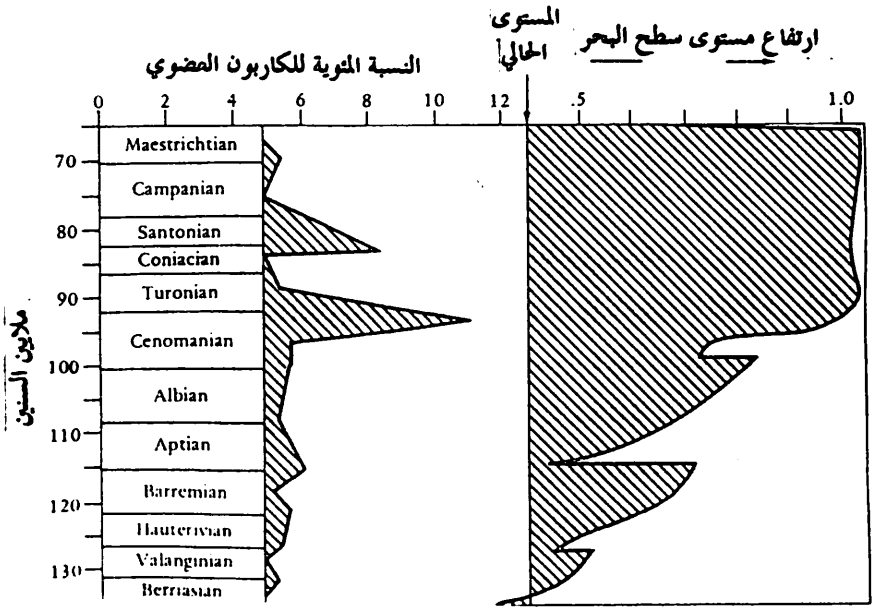


الشكل ٥-٧: التغير في محتوى الاوكسجين مقابل العمق في المحيطات الحديثة. (عن Emery, ١٩٦٣ and Dietrich, ١٩٦٣).

من المحتمل ان تكوين فوسفوريا Phosphoria Formation (البرمي) وسجيل شاتانوغا-وودفورد Chattanooga-Woodford Shales (الديفوني-المسيسبي) قد ترسبا في وضع مشابه (Claypool et al., 1978) و (Duncan and Swanson, 1965). وكلاهما تكوينات قليلة السمك نسبيا ، ذات توزيع افقي واسع ، مهما من التكوينات التي تغطي الأجواف القارية القديمة. ويحفز ترسيب هذا النوع من الترسبات الغنية بالمادة العضوية بارتفاع مستوى مياه البحر الناتج ربما من الارتفاع الكوني في درجة الحرارة ، بحيث أن النطاق العادم للاوكسجين يقع بين ٢٠٠و١٥٠٠ مترا (٦٥٠ و ٥٠٠٠ قدما) يمتد عبر الأجراف القارية.

الوضع الرابع لترسيب المادة العضوية يحدث في حوض محيطي عادم للأوكسجين Anoxic Ocean Basin ، وليس هناك مثال حديث معروف مشابه لهذا الوضع. اذ أن

أغلب قيعان المحيطات الحديثة هي جيدة المحتوى الأوكسجيني بشكل عام. وينتج دوران المياه المحيطية العميق بتأثير تيارات الكثافة ، حيث تنساب المياه القطبية الباردة تحت المياه الدافئة في المناطق القريبة من خط الاستواء . ولقد جادل بعضهم أن دوران المياه المحيطية العميق ربما لم يكن موجودا في الفترات الجيولوجية الماضية عندما كان للارض مناخ منظم مستو دون وجود المنطقتين القطبيتين الحاليتين. في مثل تلك الأوقات ، قد تكون الأحداث الكونية "عادمة الاوكسجين" مسؤولة عن ترسيب الترسبات الغنية بالمواد العضوية في شتى أنحاء العالم (الشكل ٥-٦د). ولقد اقترحت هذه الآلية لتفسير ترسبات السجيل الاسود الواسعة من الجوراسي الاعلى-الطباشيري الاسفل في العديد من أنحاء العالم (Arthur and Schlanger, 1979) (Schlanger and Cita, 1982). ولقد أوضح (Tissot, 1979) أنَّ نحو ٨٥ بالمئة من نفط العالم قد تولد من هذه التكوينات. ويظهر الشكل (٥-٨) أن ثمة مضاهاة بين الترسيب العضوي ومستوى سطح البحر ، وهذا يؤيد الفرض القائل بأن التقدم البحري يحفز نشوء البيئات عادمة الاوكسجين.



الشكل ٥-٨: (اليسار) مرتسم بياني لمعدل قيم الكاربون العضوي في لباب مشروع الحفر البحري العميق في شمال المحيط الاطلسي. (عن Arthur and Schlanger, ١٩٧٩). (اليمين) منحنى مستوى سطح البحر الكوني . (عن Vail, Mitchum and Thompson, ١٩٧٧).

ومع ذلك ، فلقد جادل (Waples, 1983) مشككا بوجود حدث كوني عادم للاوكسجين في الطباشيري المبكر ، مشيرا الى أن الادلة على ذلك تأتي بشكل رئيسي من المحيط الاطلسي والاراضي المجاورة له. وفي أثناء ذلك ، كان المحيط الاطلسي مجرد ممر بحري ضيق ، لذلك كانت التحديدات الموقعية في دوران المياه متوقعة.

أظهرت هذه المراجعة أن حفظ المادة العضوية في الترسبات تحفز بمعدل ترسيب أمثل وظروف عادمة الاوكسجين. أن هذين الشرطين يمكن أن يتحققا في أوضاع متنوعة ، من البحيرات المتمركزة Localized الى المحيط بأكمله. ولقد وثق العديد من الجيولوجيين توزيع الترسبات الغنية بالمواد العضوية في الزمان والمكان (North, 1979, 1980; Grunau, 1983). ولقد أعد (Parrish, 1982) سلسلة من الخرائط الجغرافية الكونية القديمة لحقبة الحياة القديمة Paleozoic ، واستعمل هذه الخرائط لتوقع المناخ القديم وأنمطة دوران المياه في المحيطات القديمة. أظهرت هذه التوقعات ان العديد من صخور السجيل الاسود من حقبة الحياة القديمة قد ترسبت في المناطق القريبة من خط الاستواء وعلى الاجراف القارية المواجهة للغرب. ولقد أجرى (Ager, 1973) دراسة مشابهة للعصر الجوراسي.

الانتاجية العضوية وحفظها في البيئات القارية

ان انتاجية المادة العضوية وحفظها في المحيط القاري تختلف عن تلك الموجودة في المحيطات والبحار والبحيرات. فالمحتوى الاوكجسيني ثابت ، والمتغيرات المهمة هي الماء وعدد أيام النمو في كل سنة ، والتي هي بدورها دالة لدرجة الحرارة وساعات النهار. وبذلك فأن الانتاجية العضوية في المناطق القطبية تكون واطئة. فاذا ما توفرت رطوبة كافية ، فأنها تزداد مع الزيادة الحاصلة في درجة الحرارة وضوء النهار باتجاه خط الاستواء.

لا يحدث تدمير مهم للمادة العضوية في المناطق المرتفعة تحت معدل درجة حرارة يقارب ١٠ درجات مئوية ، وفي المستنقعات التي تصل درجة حرارتها الى ١٥ درجة مئوية (Gordon et al., 1958). ولان من غير المحتمل ان تحفظ ترسبات سواء أكانت تحتوي على مادة عضوية او لا تحتوي في بيئات المناطق المرتفعة (النجدية Upland) ، لذلك فأن ما يعنينا هنا هي ترسبات المستنقعات. ولقد أظهر (Gordan et al., 1958)

أيضا أن معدل الانتاج مقابل تحلل المادة العضوية يزداد بدءاً من درجات الحرارة القطبية الى نحو ٢٥ درجة مئوية. وعند هذه النقطة تبدأ الانتاجية العضوية بالانخفاض رغم أن معدل التحلل يستمر بالزيادة. وبذلك فأن احتمالية حفظ الفتات العضوي يتضاءل عند درجات الحرارة التي تتجاوز ٢٥درجة مئوية. ان هذه المعطيات ذات أهمية نسبية قليلة نسبيا قدر تعلق الامر بتولد الهايدروكاربونات السائلة ، بيد أنها ذات أهمية محسوسة قدر تعلق الامر بتكون الفحم. ولقد تم التوصل الى الاستنتاج ذاته بالنسبة للبيئات القارية مثلما هو الامر بالنسبة للمحيطات ، وبالتحديد ، ان معدل تحلل المادة العضوية أكثر أهمية من معدلات تكونها.

حفظ المادة العضوية في الترسبات القديمة

ان اسقاط هذه المعطيات من الحاضر رجوعاً في الزمن الجيولوجي لهي مهمة شاقة. فبينما يبدو ان المحيطات وقد احتوت على حياة نباتية وحيوانية متنوعة منذ ما قبل الكامبري ، غير أنّ النباتات ابتدأت باستعمار الارض منذ نهاية العصر السيلوري فقط ، ولم يبدأ تكون الفحم على نطاق واسع قبل العصر الكاربوني (الفحمي) ، فضلا عن احتمالية تذبذب معدلات انتاج المادة العضوية في الماضي. كما أن التركيب الكيميائي للنباتات المختلفة يمكن أن يكون قد تغير ايضا. وبشكل خاص فأن من المحتمل أن يكون مقدار الخشبين قد ازداد نسبة الى الشحوم والكاربوهيدرات والبروتينات.

وعلى نحو مشابه ، فأن العديد من علماء المتحجرات قد تتبعوا غزارة مجاميع المتحجرات المختلفة خلال العصور الجيولوجية . ولقد استعملت معظم الدراسات اعداد الانواع Species في مجموعة ما كدليل على غزارتها. ورغم أن اسقاط هذه المعطيات وتحويلها الى أرقام حقيقية وكتل احيائية Biomass هو أمر صعب ، فأن دراسات مثل تلك التي قام بها (Tappan and Loeblich, 1970) على العوالق النباتية قد تكون مهمة على نحو خاص ، إذْ افترضا زيادة مطردة في غزارة العوالق النباتية بدءا من ما قبل الكامبري وحتى العصر الحديث ، مع فترات ازدهار بين الاوردوفيشي المتأخر والسيلوري المبكر وفي الطباشيري المتأخر.

تكون الكيروجين Formation of Kerogen

بعد ان شرحنا تولد المادة العضوية وحفظها عند سطح الأرض ، فأن من المناسب أن نتناول ما يحدث لهذه المادة العضوية عندما تدفن في حوض رسوبي يهبط على نحو ثابت. وبمرور الزمن ، يزداد عمق الدفن ، معرضا الترسبات الى درجات حرارة وضغوط متزايدة.

ميّز (Tissot, 1977) ثلاث حالات رئيسية في تطور المادة العضوية استجابة للدفن:

(١) *التحوير Diagenesis* تحدث هذه الحالة في البيئات تحت السطحية الضحلة عند درجات حرارة وضغوط شبه اعتيادية. وهي تضم كلا من التحلل الاحيائي المحفز بالبكتيريا والتفاعلات اللاأحيائية . ويتحرر كل من الميثان وثاني أوكسيد الكاربون والماء من المادة العضوية ، تاركة هايدروكاربونات معقدة يُطلقُ عليها اسم الكيروجين Kerogen (وسوف يتم شرحها بتفصيل أكثر بعد فترة قصيرة) . أن المحصلة النهائية لتحوير المادة العضوية هو تقليل محتواها الاوكسجيني مع إبقاء نسبة الهيدروجين–الكاربون دون تغيير يُذكر.

(٢) *التولد الهدمي Catagenesis* تحدث هذه الحالة في البيئة تحت السطحية العميقة باستمرار الدفن وزيادة درجة الحرارة والضغط، ويتحرر البترول من الكيروجين أثناء التولد الهدمي–النفط اولا ثم الغاز. وتقل نسبة الهايدروجين–الكاربون دون أي تغير هام في نسبة الأوكسجين–الكاربون.

(٣) *التولد الانحرافي Metagenesis* تحدث هذه الحالة الثالثة عند درجات الحرارة والضغوط المرتفعة التي تقترب من التحول. ويتم تحرر اخر الهايدروكاربونات ، وهو الميثان فقط عادة. وتنخفض نسبة الهيدروجين–الكاربون حتى يترك الكاربون بمفرده في هيئة غرافيت Graphite. وتكون قيم المسامية والنفوذية واطئة جدا .

ان تطور المادة العضوية السطحية الى كيروجين وتولد البترول اللاحق سوف يناقش بالتفصيل في الفقرة التالية:

التحويل الضحل للمادة العضوية Shallow Diagenesis of Organic Matter

ان الرقم الهايدروجيني PH وحالة الاكسدة Eh الحد الفاصل بين الترسبات- الماء يتأثر بالتفاعلات الكيميائية التي تؤدي فيها البكتيريا دورا هاما. وفي مسار الاحداث التقليدي يخلط دوران الماء باستمرار المياه المكسجة Oxygenated والمياه الناضبة الاوكسجين Oxygen-depleted Water ، ومثلما تم شرحه مسبقا (صفحة ١٨٠) ، فأن أجسام المياه المتطبقة تمنع هذا الدوران. ويتوضع نطاق مؤكسج (+Eh) على نطاق مختزل (-Eh). واعتمادا على الظروف، فأن الحد الفاصل بين الظروف المؤكسدة والمختزلة قد يحدث داخل الماء، أو بين الحد الفاصل بين الترسبات والماء ، أو اذا كانت الترسبات مسامية ، تحت قاع البحر. وفي النطاق المختزل الأسفل فأن البكتيريا اللاهوائية المختزلة للكبريت من جنس ديسولفبريو *Desulfovibrio* تزيل الاوكسجين من أيونات الكبريتات ، محررة الكبريت الحر. أما في النطاق المؤكسد الأعلى ، فأن البكتيريا من جنس ثايوباسيلوس Thiobacillus تؤكسد الكبريت مرة أخرى:

$$SO_4 \underset{\text{Thiobacillus}}{\overset{\text{Desulfovibrio}}{\rightleftharpoons}} S + 2O_2$$

وفي النطاق المؤكسد ، فأن الكبريت يمكن ان يرتبط مع الحديد في هايدروكسيد الحديدوز Ferrous Hydroxide لكي يكون البايرايت:

$$Fe(OH)_2+2S=FeS_2+H_2O$$

كما يمكن أن تتفاعل أيونات الكبريتات مع المادة العضوية لتكون كبريتيد الهايدروجين :

$$SO_4+2CH_2O=2HCO_3+H2S$$

ان هذه الصيغة للمادة العضوية بسيطة جدا ، وقد يكون من المناسب اكثر أن نفترض أن لمعدل محتويات المادة العضوية البحرية نسبة كاربون-نتروجين- فوسفور تبلغ ١٠٦-١٦-١ (Goldhaber, 1978).

ان المرحلة الاولى من التحلل الاحيائي هي الاكسدة التي تولد الماء وثاني أوكسيد الكاربون والنترات والفوسفات :

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)16H_3PO_4+138O_2=106CO_2+16NHO_3+H_3PO_4+122H_2O$$

وفي المرحلة التالية ، يحدث اختزال للنترات والنتريت:

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4+94.4NHO_3=106CO_2+55.2N_2+177.2H_2O+H_3PO_4$$

وتستتبع هذه العملية بدورها بعملية اختزال الكبريتات ، الذي يؤدي الى تولد كبريتيد الهايدروجين والأمونيا :

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4+52SO_4^{2-}=106HCO_3^-+53H_2S+16NH_3+H_3PO_4$$

ان هذه المعادلات بالطبع مبسطة جدا. ومثلما أوضحنا مسبقا ، فأن المركبات العضوية التي تمثل نقطة البداية في هذه السلسلة من التفاعلات معقدة ومتنوعة ، تتكون بشكل أساسي من البروتينات والكاربوهيدرات والشحوم والخشبين ، ويكون معدل التحلل النسبي بهذا التسلسل ، حيث تكون البروتينات الأقل استقرارا والخشبين الاكثر مقاومة. ويتم التأثير على هذه المركبات بأجمعها من قبل أنزيمات المايكروبات لكي تنتج المونوميرات المزدوجة Biomonomers . وعلى سبيل المثال ، فأن الكاربوهيدرات مثل النشأ والسيللوز تتحطم الى السكر ، كما أن السيللوز يتحول الى الميثان وثاني أوكسيد الكاربون :

$$(C_6H_{10}O_5)_n \rightarrow CO_2+CH_4$$

يعد الميثان ناتجاً رئيسياً للتحلل الجرثومي (البكتري) لا للسيللوز حسب بل للعديد من المركبات العضوية الاخرى. وعندما يتحرك هذا الميثان الاحيائي باتجاه الأعلى من المادة

العضوية المتحللة ، فانه ربما يجتاز سطح التاكسد-الاختزال Eh:+Eh - ويتاكسد :

$$3CH_4+6O_2=3CO_2+6H_2O$$

في البيئات التي يكون فيها ترسيب المادة العضوية ومعدل تحللها مرتفعين ، فان الميثان قد يتسرب الى السطح على شكل فقاعات من غاز المستنقعات. أن هذا الغاز قد يشتعل تلقائيا مسببا ظاهرة لهبة القش *Will O'Wisp* ، التي ترعب الاشخاص الغافلين في المغاضات Bogs والمقابر.

تتفسخ البروتينات الموجودة في المادة العضوية العضوية المتحللة الى أحماض أمينية وببتيدات Peptides. وتتفسخ الشموع الشحمية Lipid Waxes والدهون الى غليسرول Glycerol وأحماض دهنية Fatty Acids. ويتكسر الخشبين الموجود في الانسجة الخشبية الى فينولات Phenols والاحماض الاروماتية (العطرية) Aromatic Acids والكينونات Quinones. تحدث جميع هذه التغيرات في الامتار القليلة العليا من الترسبات . ومع الزيادة التدريجية في عمق الدفن ، تتغير البيئة الفيزيائية لهذه الترسبات ، وتتغير التفاعلات الكيميائية استجابة لهذه التغيرات. تؤدي الزيادة في ضغط الترسبات الفوقية الى انضغاط الترسبات. ولقد أنجزت العديد من الدراسات عن الانضغاط Compaction وسوف تتم مناقشتها في مكان أخر (صفحة ٢٤٥). عند هذه النقطة ، فانه يكفي ان نذكر أنه داخل الثلثمائة متر الاولى من الدفن ، فان مسامية الطين سوف تتضاءل من ٨٠ بالمائة الى نحو ٣٠ او ٤٠ بالمائة فقط أثناء الانضغاط وهروب الماء. أن جزءا من هذا الماء هو في الاساس ماء مسامي أولي Primary Pore Water ، غير ان بعضا منه احيائي الاصل ، فهو يحتوي بشكل مذاب على كل من ثاني أوكسيد الكاربون والميثان وكبريتيد الهايدروجين وبعض المركبات العضوية الاخرى الناتجة من التحلل ، التي يطلق عليها بشكل عام اسم الأحماض الدبالية *Humic Acids* .

عند هذا الوقت ، قد يحدث العديد من التفاعلات اللاعضوية مما يؤدي الى تكون المعادن الموضعية Authigenic Minerals المبكرة ولقد تم مسبقا مناقشة تكون البايرايت ، ولكن في الاطيان الغنية بالجيريات (الكاربونات) فان معدن السيدرايت

Siderite ($FaCO_3$) قد يكون شائعا أيضا. ان التسميت المبكر بكاربونات الكالسيوم قد يحدث بالترسيب المباشر ، أو في البيئات التبخرية من خلال تفاعل كبريتات الكالسيوم مع المادة العضوية (Friedman, 1972) . وتتفاعل أيونات الكبريتات مع المادة العضوية كي تنتج كبريتيد الهايدروجين (مثلما تم شرحه مسبقا) وكذلك HCO_3 ، وتتفاعل الاخيرة مع الكالسيوم كي تكون الكالسايت والماء وثاني أوكسيد الكاربون ، وبشكل رئيسي :

$$CaSO_4 + 2CH_2O = CaCO_3 + H_2O + CO_2 + H_2S$$

مع زيادة عمق الدفن ، تزداد درجة حرارة المادة العضوية ، ويقل دور البكتيريا في التفاعلات الاحيائية تدريجيا اذ تبدأ بالموت (رغم أن بعض البكتيريا اليفة الكبريت Thiophilic يمكن ان توجد عميقا في البيئة تحت السطحية) وفي الوقت نفسه ، فأن زيادة درجة الحرارة تساعد على تعجيل التفاعلات اللاعضوية. ويبدأ تولد الهايدروكاربونات الان بالانخفاض مع توقف انتاج الميثان الاحيائي. وهنالك تقارير متفرقة عن وجود ضحل لهايدروكاربونات احيائية غير الميثان. ان احد اكثر التواجدات شهرة هو وجود ما يصل الى ٢٠٠ جزء بالمليون من النافثينات الاروماتية والبرافينية في رمل يبلغ عمره أقل من عشرة آلاف سنة ولا يتجاوز عمقه الثلاثين متراً على مقربة من دلتا أورنوكو (Orinoco Delta) (Kidwell and Hunt, 1958). ولقد تم مؤخرا وصف هايدروكاربونات سائلة غنية بالشحوم من عينات قاعية محيطية . لقد تكون هذا البترول الأولي *Protopetroleum* نتيجة التكسر البسيط للدهون العضوية. وهو متميز كيميائيا عن النفط الخام ، فهو لم يتعرض الى نضوج حراري ، ولا يبدو أنه يتواجد في تراكمات اقتصادية (Welte, 1972) . وتستمر تغيرات هامة الحدوث، مع ذلك ، داخل المادة العضوية المحفوظة ، ويستمر طرد الماء وثاني أوكسيد الكاربون مع بداية تكون الكيروجين.

كيمياء الكيروجين Chemistry of Kerogen

ان اصل كلمة كيروجين وتعريفها كما تم تمييزه في السجيل الزيتي قد تمت مناقشته في الصفحة (٥١٣). وفي الوقت الحاضر ، فأن الكيروجين هو المصطلح الذي يستعمل للدلالة

على المادة العضوية المنتشرة في الترسبات والتي لا تذوب في مذيبات بترولية اعتيادية ، مثل ثاني كبريتيد الكاربون Carbon bisulfide. ان عدم الذوبان هذا يميزها عن البتيومن Bitumen. ومن الناحية الكيميائية ، يتكون الكيروجين من الكاربون والهايدروجين والاوكسجين مع مقادير ضئيلة من النتروجين والكبريت (الجدول ٥-٤).

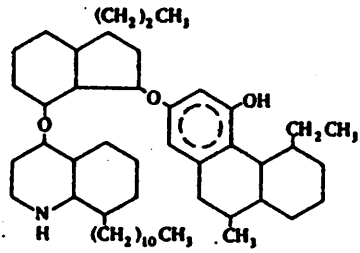
نوع البترول	النسب		النسبة المئوية الوزنية					
	O-C	H-C	S	N	O	H	C	
نفط	0.06	1.65	2.7	1.97	7.66	8.84	75.9	النوع ١ الطحلبي : ٧ عينات
نفط وغاز	0.1	1.28	2.7	2.15	10.5	6.8	77.8	النوع ١١ الشحمي : ٦ عينات
غاز	0.13	0.84	0.1	2.1		4.6	82.6	النوع ١١١ الدبالي : ٣ عينات

الجدول ٥-٤: كيمياء الكيروجين . (معطيات النسب المئوية الوزنية عن Tissot amd Welte, ١٩٧٨ ، النسب من Dow, ١٩٧٧ ، تطبع بموافقة مسبقة).

يمكن بشكل عام ، تمييز ثلاثة أنواع اساسية من الكيروجين. والفروقات بينها كيميائية ، وترتبط بطبيعة المادة العضوية الاصلية. ولان أنواع الكيروجين الثلاثة هذه تولد هايدروكاربونات مختلفة ، فأن تمييزها والتفريق بينها يعد أمرا مهما (Tissot, 1977, Dow, 1977).

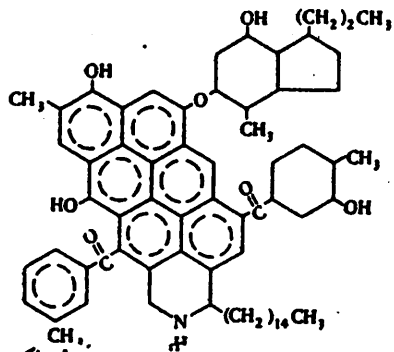
الكيروجين من النوع الأول Type I Kerogen يكون طحلبي الأصل بشكل اساسي (اللوحة ٢) ، وهو يحتوي على نسبة أعلى من الهيدروجين نسبة الى الاوكسجين اكثر من أنواع الكيروجين الاخرى (تبلغ نسبة الهيدروجين-الاوكسجين (١.٢-١.٧). وتبلغ نسبة الهيدروجين-الكاربون نحو ١.٦٥ (الجدول ٥-٤). وتعد الشحوم هي المكونات الغالبة في هذا النوع من الكيروجين مع مشتقاته من الدهون والشحوم والشموع وهذا النوع من الكيروجين غزير على نحو خاص ، في الطحالب مثل بوتريوكوكس *Botryococcus* الذي يوجد في الكورنغايت Coorongite الحديثة وفي السجيل الزيتي القديم (أنظر صفحة ٥١٣). وهناك كيروجين طحلبي مشابه يميز العديد من ترسبات السجيل الزيتي والصخور المصدرية وفحم القنوات او المغاضات Cannel or Boghead Coals . ان البنية الكيميائية الاساسية للكيروجين نوع I ظاهرة في الشكل (٩-١٥).

كيروجين طحلبي (A)

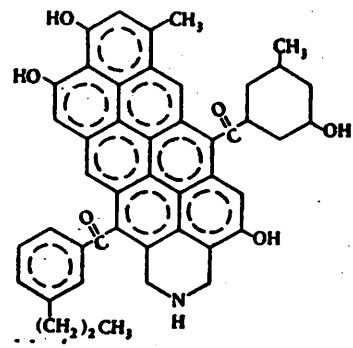


	A	B	C
ذري H-C	1.65	1.28	0.84
ذري O-C	0.06	0.10	0.13
هايدروكاربونات	Oil	Oil + Gas	Gas

كيروجين شحمي (B)



كيروجين دبالي (C)

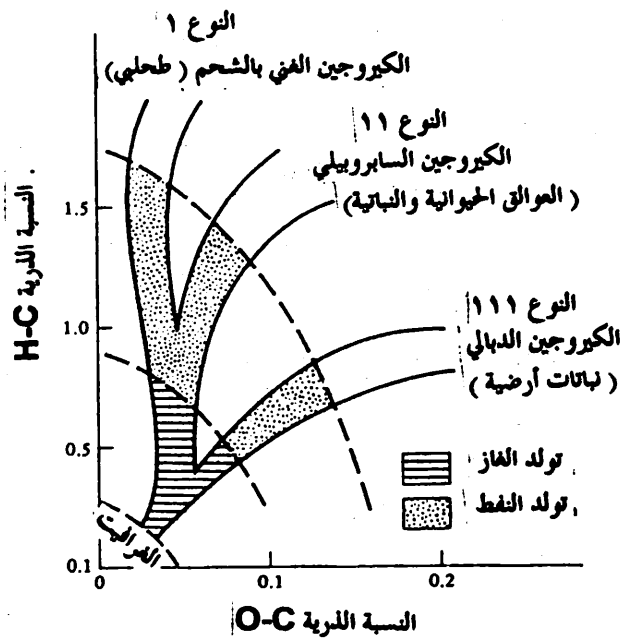


الشكل ٥-٩: البنية الجزيئية (أ) للكيروجين نوع ١ أو الكيروجين الطحلبي ، (ب) الكيروجين نوع ١١ أو الكيروجين الشحمي و (ج) الكيروجين نوع ١١١ أو الكيروجين الدبالي. (عن Dow, ١٩٧٧ ينشر بموافقة مسبقة).

اما النوع II او الكيروجين الشحمي Liptinic Kerogen فهو نو تركيب متوسط (اللوحة ٢) ، وشأنه شأن الكيروجين الطحلبي فهو غني بالمواد الاليفة للكبريت ، وتكون نسبة الهايدروجين-الكاربون أكبر من واحد وبنيته الكيميائية ظاهرة في الشكل (٩-٥ب). وتتكون المادة العضوية الاصلية للكيروجين من نوع II من فتات طحلبي ، غير انها تحتوي ايضا على مواد مشتقة من العوالق الحيوانية Zooplankton والعوالق النباتية Phytoplankton. ويعد طين كميرج Kimmeridge Clay في بحر الشمال وسجيل تانيزوفت Tannezuft Shale (السيلوري) في الجزائر من هذا النوع.

النوع III ، او الكيروجين الدبالي Humic Kerogen له نسبة هيدروجين-كاربون منخفضة كثيرا (أقل من ٠,٨٤) . ومن الناحية الكيميائية ، فانه يحتوي على نسبة منخفضة من المركبات الاليفة للكبريت ، ولكنه غني بالمواد الاروماتية (اللوحة ٢). والبنية الجزيئية الاساسية ظاهرة في الشكل (٥-١٠ج). ويتولد الكيروجين الدبالي من الخشبين في النباتات

الخشبية العليا ، التي تنمو على اليابسة . ان هذه المادة الدبالية ، التي اذا ما دفنت على شكل خث Peat فانها تعاني تحويرا متحولة الى الفحم. يميل الكيروجين نوع III بشكل رئيسي الى توليد الغاز والقليل من النفط ان كان يولد ذلك على الاطلاق. ولقد اعتقد في فترة من الزمن ان الاحواض اللابحرية لا تولد الا الغاز بسبب غزارة الكيروجين الدبالي ، في حين كان يعتقد ان الاحواض البحرية هي مقاطعات نفطية بسبب النسبة العالية للكيروجين الطحلبي . ان هذا النوع من التعميم غير صحيح ، اذ ان هنالك العديد من الاحواض القارية التي تحتوي على سجيل بحيري Lacustrine Shale غني بالكيروجين الطحلبي . ومن الامثلة الواضحة على ذلك تكوين (غرين ريفر Green River) في كولورادو ، ويوتا ويومنغ. (أنظر صفحة ٥١٥) ، وتوجد امثلة اخرى على ذلك في الصين (Ma Li et al., 1982) . ويمكن العثور على تفاصيل أكثر عن الكيروجين في (Tissot and Welte, 1978 و Hunt, 1979 و Durand, 1980).



الشكل ٥-١٠: مرتسم بياني لمسارات نضوج الانواع الثلاثة المختلفة من الكيروجين.

تظهر هذه المراجعة لانواع الكيروجين الثلاثة أهمية تشخيص طبيعة المادة العضوية في الصخرة المصدرية كي يتم بدقة تقييم قدرتها على توليد الهايدروكاربونات. والعامل المهم الثاني الذي يجب أخذه بنظر الاعتبار لا يتحدد بنوعية الكيروجين حسب بل كذلك الكمية

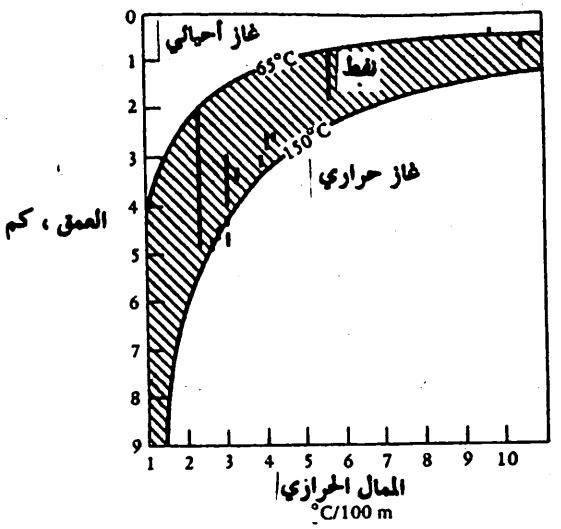
اللازمة لتوليد كمية مهمة من النفط والغاز صالحة للانتاج التجاري. وهنا يجب أخذ العديد من الامور المنفصلة بنظر الاعتبار من ضمنها معدل كمية الكيروجين في الطبقة المولدة ، والحجم الكلي للطبقة المولدة ، ونسبة الهايدروكارونات المهاجرة الى الهايدروكاربونات الفضائية Residual . وتتغاير كمية المادة العضوية الكلية الموجودة في الترسبات من صفر بالمئة في الكثير من ترسبات السجيل ما قبل الكامبري والقاري الى نحو ١٠ بالمائة في بعض أنواع الفحم. ومن المعتاد ان يؤخذ رقم ١٥٠٠ جزء بالمليون من الكاربون العضوي باعتباره المتطلب الادنى للقيام بالتنقيب اللاحق عن صخرة مصدرية معنية (Pusey, 1973a).

نضوج الكيروجين Maturation of Kerogen

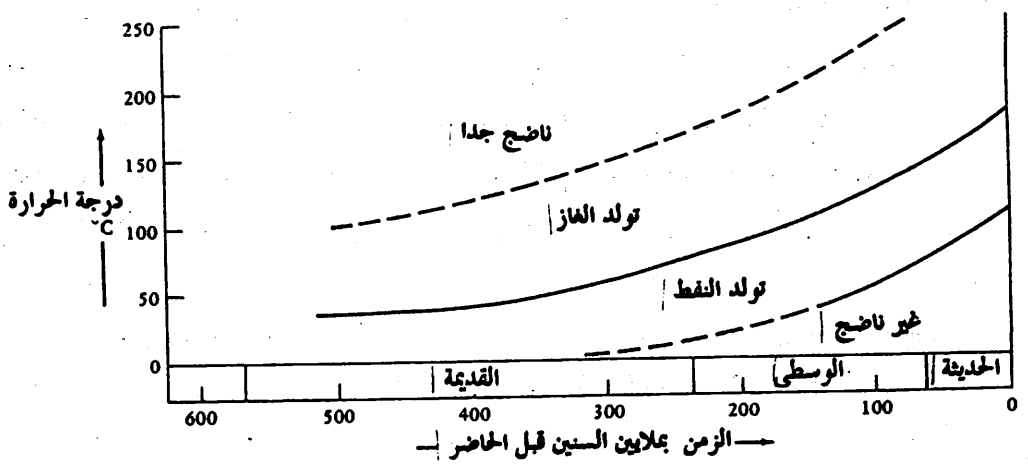
أثناء مرحلة التحوير الهدمي Catagenesis ، ينضج الكيروجين ويولد النفط والغاز. أن تحديد مستوى نضوج الكيروجين في الصخور المصدرية لمنطقة معنية معرضة للتنقيب عن البترول يعد امرا حيويا. فعندما يكون الكيروجين غير ناضج فلن يتم توليد اي بترول ، وبازدياد النضوج ، يتم تحرير النفط اولا ومن ثم الغاز ، وعندما يكون الكيروجين فائق النضوج Overmature ، فلن يتبقى النفط أو الغاز . ويوضح الشكل (٥-١٠) مسارات النضوج لأنواع الكيروجين المختلفة . ويمكن قياس نضوج الكيروجين بتقنيات متعددة سوف يتم وصفها بعد قليل. وأن معدل النضوج قد يعتمد على درجة الحرارة والزمن وربما الضغط.

ولقد وثق العديد من العاملين مضاهاة رقمية (أمبريقية) بين درجة الحرارة وتولد البترول (Philippi, 1975, Hunt, 1979 , Pusey, 1973a, 1973b). ويحدث تولد هام للنفط بين درجات الحرارة ٦٠ و ١٢٠ درجة مئوية ، بينما يحدث تولد هام للغاز بين درجات الحرارة ١٢٠ و ٢٢٥ درجة مئوية . وفوق درجة ٢٢٥ يكون الكيروجين خاملا Inert ، بعد ان يكون قد حرر كل الهايدروكاربونات، ولا يبقى سوى الكاربون في هيئة غرافيت (الشكل ٥-١١). أن درجات الحرارة التي ذكرت للتو هي مجرد حدود تقريبية لنوافذ تولد النفط والغاز Oil and Gas Windows.

ان قوانين الحركية الكيميائية Kinetics مثلما يتم التعبير عنها في معادلة ارينوس Arrhenius Equation ، تنص على أن سرعة التفاعل الكيميائي تعتمد على درجة



الشكل ٥-١١: مرتسم بياني للعمق مقابل المال الحراري يظهر كيفية تواجد النفط في نافذة السائل بين ٦٥ و ١٥٠ درجة مئوية ، والتي تمتد من أعماق ضحلة ذات ممالات حرارية مرتفعة الى أحواض عميقة ذات ممالات واطئة. (عن Pusey, ١٩٧٣a).



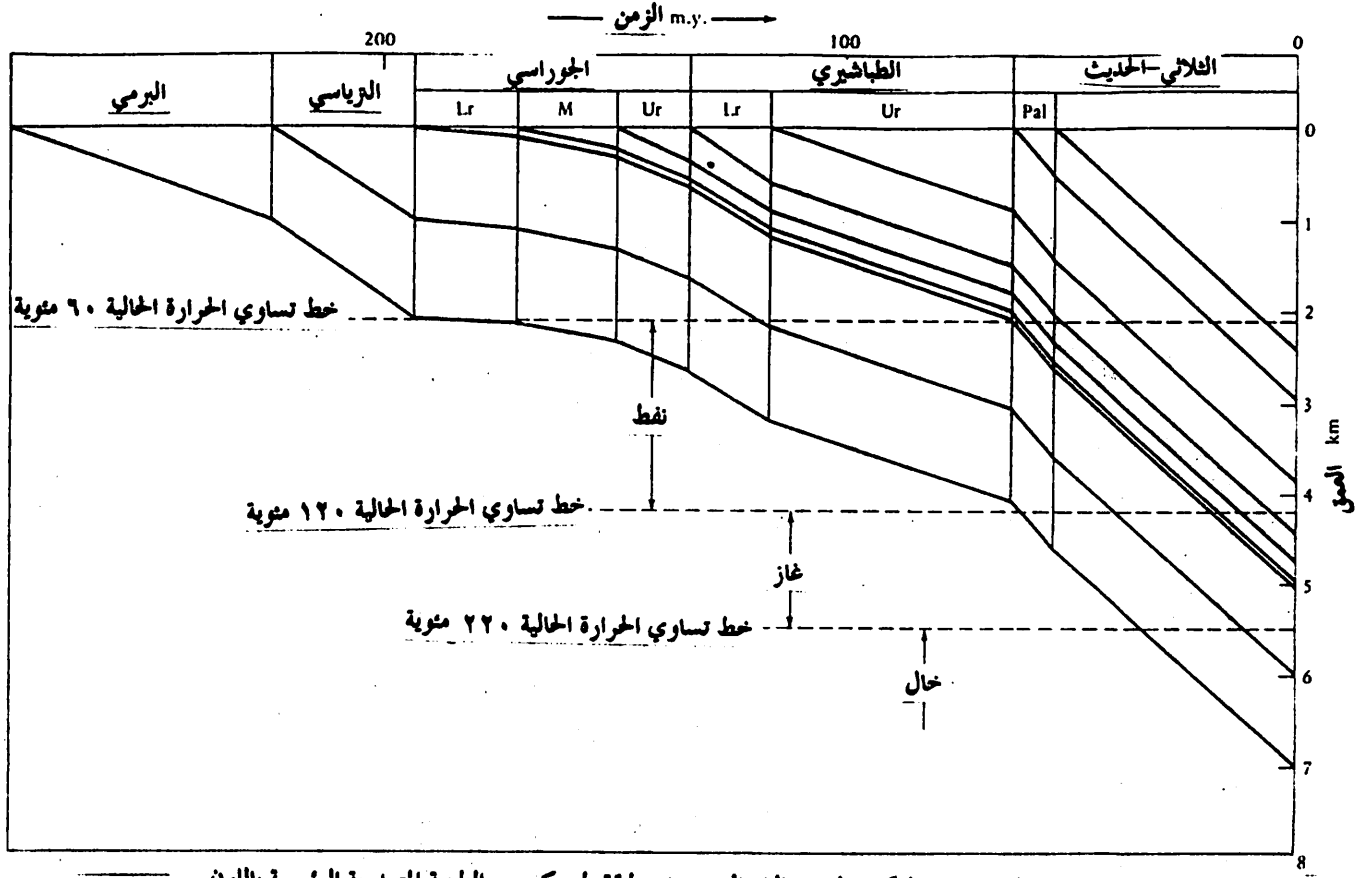
الشكل ٥-١٢: مرتسم بياني لدرجة الحرارة مقابل زمن تكوّن النفط والغاز . للمشاكل المتعلقة بتفسير هذا المرتسم ، أنظر المتن . (عن Connan, ١٩٧٤; Erdman, ١٩٧٥ and Cornelius, ١٩٧٥).

الحرارة والزمن. اذ ان سرعة التفاعلات تتضاعف بشكل عام مع كل ارتفاع قدره ١٠ درجات في درجة الحرارة . لذلك اعتقد العديد من الجيولوجيين ان نضوج الكيروجين هو دالة لدرجة الحرارة والزمن (الشكل ٥-١٢). وبذلك فأن البترول ربما يكون قد تولد من صخور مصدرية باردة قديمة فضلا عن صخور مصدرية ساخنة حديثة (على سبيل المثال

(Connan, 1974, Erdman, 1975 and Carnelius, 1975). ولقد تم تطوير العديد من التقنيات التي تحاول تحديد علاقة رقمية بين درجة الحرارة والزمن ونضوج الكيروجين. وتعتمد هذه التقنيات بشكل عام على منحنى تاريخ الدفن Burial History Curve (Van Hinte, 1978) الذي هو خط بياني يرسم عليه عمق الدفن مقابل الزمن الجيولوجي لمنطقة معينة (أنظر الشكل ٥-١٣).

هنالك معاملا نضوج يستعملان على نطاق واسع هما معامل النضوج الحراري (Thermal Maturation Index) ومستوى النضوج العضوي (Level of Organic Maturation LOM). ولقد اقترح معامل TTI للمرة الأولى من قبل Lopatin (1971) وطور من قبل (Waples, 1980, 1981). وحسب معامل النضوج الحراري من معادلة تضم درجة الحرارة مع الزمن الذي تقضيه المادة العضوية عند كل درجة حرارة (زيادة قدرها ١٠ درجة مئوية) عند دفن الصخرة المصدرية. أن الوقت الذي ينصرم عند كل زيادة في درجة الحرارة يحدد من منحني الدفن. أما معامل LOM فلقد اقترح للمرة الأولى من قبل (Heed et al., 1975) وتم تطويره من قبل (Royden et al., 1980). ويعتمد معامل LOM على الفرض القائل بأن سرعة التفاعل تتضاعف عند كل زيادة ١٠ درجات مئوية في درجات الحرارة. ويحدث تولد النفط بين قيم LOM تتراوح بين ٧ الى ١٣ ، بينما يحدث تولد الغاز بين قيم تتراوح بين ١٣ و ١٨.

يجب أن يتم استعمال كل من معاملي TTI و LOM بمنتهى الحذر. فهما يفترضان أن المال الجيوحراري Geothermal gradient كان ثابتاً خلال الزمن، وهو امر نادرا ما كان صحيحا. كما يجب استعمال منحنيات الدفن بحذر شديد لا بمجرد الاخذ بنظر الاعتبار عمق التكوين أيامنا هذه ولكن يجب أيضا الاخذ بنظر الاعتبار الرّص والرفع Uplift. وكذلك حقيقة أنه في قلة من الاحواض يوازن الانخفاض Subsidence والترسيب بعضهما الاخر. ولقد القى (Price, 1983) المزيد من الشكوك على هاتين الطريقتين، اذ قادة تحليله الدقيق لمعطياته الخاصة ومعطيات منشورة مسبقا الى الاستنتاج بأن درجة الحرارة فقط هي التي تؤثر على تحول المادة العضوية ، وأن الزمن ليس بالعامل المهم.



الشكل ٥-١٣: منحنى الدفن للمنخسف المركزي في بحر الشمال . وتبدو طبقة طين كيمرج الطينية المصدرية الرئيسية باللون الاسود ، ولانه تم أستعمال خط تساوي الحرارة الحالية فأن المرتسم لايعطي الا فكرة أولية عن وقت دخول الصخرة المصدرية الى نوافذ النفط والغاز. (عن Selley, ١٩٨٠).

بغض النظر عن طبيعة القضية المتعلقة بتأثير درجة الحرارة والزمن ، فأن من الواضح أن قياس الكيروجين هو أمر مهم . وهنالك العديد من التقنيات المتوفرة ، وسوف يتم وصف بعضا منها في الفقرات التالية.

مقاييس الحرارة القديمة Paleothermometers

بسبب العلاقة المهمة بين درجة الحرارة وتولد البترول ، فأن قياس نضوج الكيروجين يعد أمرا هاما. أنه لا يكفي أن نكون قادرين على الاجابة على أسئلة مثل : هل هناك صخور مصدرية غنية بالمواد العضوية موجودة في الحوض؟، وهل هي موجودة بكميات كافية ؟ ، وهل هي مولدة للنفط أم الغاز؟. كما أن من الضروري أن نعرف ان كانت الصخرة قد نضجت بما فيه الكفاية ام لا لتوليد البترول أم أنها فائقة النضوج وفارغة.

ان الاكتفاء بقياس درجة حرارة قاع البئر Bottom Hole Temperature لا يكفي للاجابة على السؤال المتعلق بنضوج الكيروجين ، فهذا القياس يدلل فقط على درجة الحرارة الحالية ، والتي قد تكون أقل بكثير من تلك التي كانت في الماضي. أن من الضروري اذن توفر مقاييس حرارية قديمة يمكن ان تقيس درجة الحرارة القصوى التي تعرضت لها الصخرة المصدرية في مرة من المرات. ويتوفر العديد من هذه المعدات ، ويختلف بعضها عن الآخر في الكفاءة ، وكل واحدة منها يتطلب وجود معدات مختبرية غالية الثمن ودرجة ملموسة من الخبرة التقنية . وبشكل عام ، هنالك مجموعتان رئيسيتان من التقنيات المستعملة في قياس درجة الحرارة القصوى القديمة التي سخنت اليها الصخرة (Cooper, 1977).

١. المقاييس الحرارية القديمة الكيميائية Chemical Paleothermometers

(أ) العضوية

(i). نسبة الكاربون.

(ii). الرنين المغزلي الالكتروني Electron Spin Resonance

(iii). الحل الحراري Pyrolysis

(ب) اللاعضوية

(i). تحوير المعادن الطينية.

(ii). متضمنات الموائع Fluid Inclusions.

٢. المقاييس الحرارية الاحيائية Biological Paleothermometers

(أ) تلون الأبواغ Pollen Coloration

(ب) معامل انعكاس الفترنايت Vitrinite Reflectance

المقاييس الحرارية القديمة الكيميائية

ان احدى أقدم معاملات النضوج وأكثرها أساسية ، هي طريقة نسبة الكاربون فمن الواضح أنه عند نضوج المادة العضوية ، يفقد الكاربون العضوي أولا في هيئة ثاني أوكسيد الكاربون أثناء نزكرة (نزع كاربون) الأوكسيل Decarboxylation ، وأثناء تولد البترول لاحقاً. وهكذا فأن المحصلة النهائية لنضوج الكيروجين هو تناقص تدريجي في نسبة الكاربون العضوي القابل للحركة Movable ، والزيادة النسبية في نسبة الكاربون الثابت Fixed Carbon.

تقارن طريقة نسبة الكاربون العضوي الكلي (C_T) في العينة مع الكاربون الفضالي (C_R) بعد الحل الحراري عند درجة حرارة ٩٠٠ درجة مئوية . أن النسبة C_R-C_T تزداد مع النضوج (Gransch and Eisma, 1970) . ان ليس من السهل معايرة Calibration هذا المقياس الحراري القديم بسبب التغيرات في محتويات الكاربون الأصلي في أنواع الكيروجين المختلفة ، والافتراض المحفوف بالمخاطر الذي مفاده أن نسب الكاربون تتغير وفق المعدل نفسه.

المقياس الحراري الكيميائي الثاني هو الرنين المغزلي الالكتروني (ESR) الذي تم تطويره في شركة كونكو (Pusey, 1973b) . وتعتمد طريقة ESR على حقيقة أن الجزء الذري للكيروجين Atom Fraction يحتوي على الكترونات حرة ، يرتبط عددها وتوزيعها بعدد حلقات البنزين Benzene Ringe وتوزيعها. أن هذه المواصفات الالكترونية تتغير تدريجيا مع نضوج الكيروجين (Marchand et al., 1969). ويمكن استخلاص الكيروجين من الصخرة المصدرية ووضعه في حقل مغناطيسي يمكن السيطرة على قوته. فاذا ما تم تعريض العينة لاحقا الى موجات مايكروية Microwave، فأن الالكترونات الحرة سوف ترن Resonate (ومن هنا جاءت التسمية ESR) ، وبفعلها ذلك فانها تغيّر

تردد الموجات المايكروية ، وبوجود مكهار Electrometer يصبح بالامكان قياس بعض صفات الالكترونات بضمنها عددها وسعة اشارتها Signal Width وموقع نقطة الرنين . ومثلما ذكرنا مسبقا، فلقد أتضح ان هذه المعاملات تتغاير مع نضوج الكيروجين.

تم تطوير طريقة ESR كمقياس حراري في منطقة الغولف كوست في الولايات المتحدة الامريكية (Pusey, 1973b) ، وبعد ذلك في بحر الشمال في انكلترا (Cooper et al., 1975). وتتميز هذه الطريقة بأنها سريعة (ما أن يتم إنشاء المختبر)، ويمكن استعمالها على العينات الصغيرة وغير النقية من الكيروجين. وكما هو الحال مع أغلب المقاييس الحرارية القديمة ، يجب اتخاذ منتهى الحذر مخافة ان تكون عينات السجيل التي تجمع أثناء الحفر ملوثة ، ويفضل أن يتم استعمال اللباب أو اللباب الجانبي Sidewall Core . ومرة أخرى ، وكما هو الحال مع طريقة نسبة الكاربون ، تعاني طريقة ESR من بعض المشاكل الناتجة من التغيرات في تركيب الكيروجين ووجود الفتات العضوي المعاد ترسيبه (Durand et al., 1970).

أن الحل الحراري Pyrolysis ، أي تسخين الكيروجين أو المادة العضوية ، هي التقنية التي طورت لانتاج البترول من السجيل الزيتي. أما اليوم فأن الحل الحراري لعينات الكيروجين يعد تقنية مختبرية هامة في تحليل الصخور المولدة (أنظر Hunt, 1970, Tissot and Weite, 1978). ويتم اجراء الحل الحراري في الوقت الحاضر عموما باستعمال مكشاف تأين لهبي Flame Ionization Detector. اذ يتم تسخين عينة صخرية أو الكيروجين المستخرج منها في تيار من الهيليوم. وترفع درجة الحرارة تدريجيا وفق معدلات مقاسة بدقة ، وتسجل الغازات الهايدروكاربونية المتحررة بمكشاف تأين لهبي . وعند درجات حرارة منخفضة نسبيا (بين ٢٠٠ الى ٣٠٠ درجة مئوية) سوف يتم تطاير أي هايدروكاربونات حرة موجودة في العينة . ويطلق على هذا النوع من الهايدروكاربونات رمز S_1. وبارتفاع درجة الحرارة ، تتحرر هايدروكاربونات من الكيروجين ويرمز لهذه الهايدروكاربونات بالرمز S_2. أما ثاني أوكسيد الكاربون والماء اللذان يتحرران ايضا فيرمز لهما بالرمز S_3. وبشكل عام يستمر الحل الحراري الى نحو ٨٠٠ الى ٩٠٠ درجة مئوية ويمكن استعمال القراءات الثلاث لتحديد مستوى نضوج الصخرة المولدة (Espitalie, 1977) . وعندما لا تحدث الهجرة ، فأن النسبة $S_1-(S_1+S_2)$ تظهر مقدار البترول

المتحرر قياسا الى المقدار الكلي القابل للتحرر، ويطلق على هذه النسبة اسم نسبة التحول Transformation Ratio . فاذا ما رسمت مقابل العمق ، فأن نسبة التحول سوف تظهر بشكل عام زيادة مطردة مع نضوج الصخرة المصدرية.

يُعدُّ تحليل المعادن الطينية أحد أقدم المقاييس الحرارية القديمة اللاعضوية ، وكان قد درس بشكل منفصل تماماً عن نضوج الكيروجين. تضم المعادن الطينية المترسبة حديثا السمكتايت Smectites (المونتمورلنايت Montmorillonite) والاليت illite والكاؤلين Kaolin). وتعتمد الغزارة المتغيرة للأنواع المعدنية المختلفة جزئيا على منطقة المصدر Source area وجزئيا على البيئة الترسيبية (صفحة ٢٩٦) . وبدفن الاطيان ، فانها تتعرض الى عدة تغيرات تحويرية . يعتمد التكون الموضعي Authigenesis للاليت والكاؤلين الى حد كبير على الرقم الحامضي pH لمائع المسامات. وبزيادة عمق الدفن ، فأن درجات الحرارة المرتفعة تؤدي الى اعادة تبلور الاطيان. ويُعدُّ سلوك السمكتايت من الأمور التي تثير الانتباه ، اذ أنه يفقد ماءه ويتحول الى الايت ضمن درجة حرارة مثلى مناسبة لتولد النفط (٨٠ الى ١٢٠ درجة مئوية) . أن هذه الظاهرة مهمة الى حد ما في هجرة البترول (Power, 1967) ، وسوف تتم مناقشتها لاحقا في هذا الفصل (صفحة ٢٤٥).

ما أن ترتفع درجات الحرارة الى حدودها العليا التي يتكون فيها النفط والغاز ، تحدث تغيرات أساسية في الاطيان. اذ يعاد تبلور الكاؤلين والالايت الى مايكا ، في حين في البيئات الغنية بالمعادن الحديدية المغنيسية Ferromagnesian ، فانها تكون الكلورايت (Chlorites) ولقد وثق عدد من الدراسات هذه التغيرات (على سبيل المثال Fuchtbauer, 1967). ان نقاط المعايرة Calibration Points هذه غير دقيقة كي يتم التقاطها على مقياس نضوج الكيروجين . ولقد تم تحقيق درجة عالية من التفنن Sophistication مع ذلك من قبل (Gill et al., 1979) الذي أظهر الكيفية التي يمكن بها رسم بلورية Crystallinity الكاؤلين والالايت عبر حوض فحم جنوب ويلز ، والكيفية التي يمكن أن تضاهي بها تلك التغيرات مع مرتبة الفحم Coal Rank. ومن دون شك ، فأن بالامكان تطبيق هذه التقنية على مناطق أخرى.

تم توفير مقياس حراري قديم لاعضوي اخر من دراسة متضمنات الموائع ولقد

استعملت هذه الطريقة لسنوات عديدة من قبل دارسي الصخور الصلبة المهتمين بتحديد درجة حرارة المعادن المتبلورة (Roedder, 1967). ولقد بذلت العديد من الجهود لاستعمال هذه التقنية في دراسة متضمنات الموائع في الكوارتز (المرو) وفي الكالسايت الموجود في التكسرات (Nwachukwu, 1974) Currie and . وفي الوقت الحاضر فأن من غير المحتمل أن تطبق هذه الطريقة على نطاق واسع بسبب انخفاض درجات الحرارة التي يشتمل عليها تولد الهايدروكاربونات.

المقاييس الحرارية الاحيائية *Biological Paleothermometers*

فضلا عن الطرق الكيميائية لقياس درجة الحرارة القديمة ، فأنه يتم استعمال العديد من المقاييس الحرارية الاحيائية. وتقيس احدى هذه التقنيات لون المادة العضوية في الصخرة المولدة. وللكيروجين العديد من الالوان والظلال Shades ، التي تعتمد على كل من النضوج والتركيب . ومع ذلك ، فأن الابواغ والسبورات Pollen and Spores تبدأ حياتها عديمة اللون بشكل اساسي. وما ان يتم تسخينها تدريجياً ، فانها تتحول الى الاصفر ، ثم البرتقالي ، ثم البني (الفاتح الى الغامق) ومن ثم الى اللون الأسود. ولقد استعمل علماء الابواغ والسبورات Palyonologists هذا التغير في نمط اللون طوال سنوات عديدة لتمييز السبورات والابواغ المعادة الترسيب من الموضعية النشأة Indigenous، ذلك لان الاولى تكون أغمق لونا من المعدل بالنسبة لعينة معينة.

قبل فترة قصيرة ، تم تمييز ان هذه التغيرات اللونية يمكن ان ترتبط مع درجة نضوج الكيروجين المرتبط. ولقد استعمل العديد من الشفرات Codes اللونية من قبل علماء الابواغ والسبورات ، بعضها تم تطويره من قبلهم ، وبعضها الاخر تمت استعارته من مقطري الكحول . ومن بين الانظمة الشائعة هو نظام معامل لون الابواغ عشري النقاط (10-Point Spore Color Index) الذي اقترحه (Barnard et al., 1978) والنظام الاخر هو معامل التغير الحراري الخماسي النقط (5-Point Thermal Alteration Index) الذي اقترحه (Staplin, 1969). وباستعمال الشفرة اللونية البسيطة الخاصة بالمقطرين ، فلقد لوحظت العلاقة التالية بين لون الابواغ وتحرر الهايدروكاربونات: ماء : غير ناضج ، جعة اللاغر Lager : تولد البترول ، الجعة المرة

Bitter : تولد المكثفات Condensate Generation جعة الغنس Guinness : غاز جاف. ولقد جادل بعضهم أن قياس لون الابواغ هو تخمين غير موضوعي ولكن بالمقارنة مع المقاييس المرجعية والخبرة الكافية ، فأن النتائج تبدو صحيحة . والتقنية سريعة واقتصادية نسبيا ، ذلك لان علماء الابواغ والسبورات يراجعون عيناتهم كتدقيق تقليدي عن التلوث واعادة الترسيب في كل الاحوال.

أخر المقاييس الحرارية القديمة التي يجب أخذها بنظر الاعتبار هو معامل انعكاس الفترنايت (Dow and O'Connor, 1979, Dow, 1977, Cooper, 1977) ، وهي تقنية استعملت من قبل بتروغرافيي الفحم لتقييم مرتبة عينات الفحم. ومن الناحية الاساسية ، فأن بريق الفحم Shininess يزداد مع المرتبة بدءاً من الخث Peat الى الانثرسايت Anthracite ان هذا البريق أو الانعكاس يمكن أن يقاس بصريا . ويوجد الفترين Vitrain الذي هو نقيع Moceral الفحم المستعمل في القياس على نحوواسع ، قليلا متفرقا ، خلال الصخور الرسوبية. ويفصل الكيروجين ، الذي يشمل الفترين من العينة بالذوبان في حامضي الهايدروفلوريك والهايدروليك ، وتثبت الفضالة على شريحة ، أو في كتلة صمغ مع صمغ أوبكسي واطىء درجة الحرارة ومن ثم يتم صقلها. ويستعمل بعد ذلك ، مجهر ضوئي عاكس Reflecting-light Microscope لقياس درجة الانعكاس والتي يرمز لها بالرمز Ro . وتتطلب هذه الخطوة عناية فائقة ولا يمكن انجازها الا من قبل فني جيد التدريب. أن من المحتمل الا تحتوي العينة المحضرة على الكيروجين موضعي النشأة حسب ، ولكن كذلك بعض المواد المتساقطة والمعادة الترسيب ، فضلا عن مادة عضوية من طين الحفر (اللغنوسلفونات Lignosulfonate). ويمكن أن تتغير الانعكاسية بسبب وجود البايرايت أو الاسفلت. ويتم الحصول على عدة قراءات الانعكاسية لكل عينة ، ومن ثم ترسم على هيئة متدرج بياني Histogram ، وتتم الاشارة الى عينات قياسية ذات قيم Ro معروفة ويمكن قياس قيم Ro من سلسلة من العينات المأخوذة من تجويف بئر ، ويمكن رسم خط بياني يمثل معامل الانعكاسية مقابل العمق.

لوحظت علاقة رقمية (أمبريقية) بين انعكاس الفترنايت وتولد الهايدروكاربونات. ويحدث تولد النفط الخام لقيم Ro التي تتراوح بين ٠,٦ و ١.٥ . بينما يحدث تولد الغاز بين ١.٥ و ٣ . وعند القيم التي تزيد عن ٣ تكون الصخور غرافيتية بالدرجة الاساسية وخالية

من الهايدروكاربونات. أن هذه القيم هي قيم تقريبية فقط ، لانه ومثلما شرحنا مسبقا ، فان قدرة الكيروجين على تولد النفط أو الغاز تتغاير اعتمادا على تركيبه الأصلي.

أفترض بشكل عام ان الانعكاسية تزداد مع درجة الحرارة والزمن. ولقد أوضح (McTavish, 1978) ، مع ذلك ، التأثير المعيق Retarding للضغط الشاذ، ومثلما أوضحنا مسبقا ، فلقد اعتبر (Price, 1983) درجة الحرارة باعتبارها المتغير المهم الوحيد.

ان قياس معامل إنعكاسية الفترنايت هو أحد التقنيات المستعملة على نطاق واسع لتحديد نضوج صخرة مصدرية محتملة في منطقة ما. ومن بين الاستعمالات الاخرى أن مجسات الابار التي ترسم فيها قيم Ro مقابل العمق تدلل على الاعماق التي يمكن أن يكون النفط او الغاز قد تولد فيها. أن الانحراف المفاجيء في قيم Ro مع العمق متبوعة بعودة الى المال السابق قد تكون ناتجة عن الاقتحامات النارية.

تظهر هذه المراجعة للمقاييس الحرارية القديمة ان هنالك نطاقا واسعا من التقنيات المتوفرة. وتتطلب جميع الطرق معدات مختبرية مكلفة وفنيو مختبرات مدربين تدريبا جيدا وتفسيرات ماهرة للمعطيات الناتجة. ومن المحتمل أن تلون الابواغ وانعكاس الفترنايت هما أكثر معاملات النضوج اعتمادية واوسعها استعمالا في الوقت الحاضر. ويظهر الشكل (٥-١٤) العلاقة بين Ro وتلوّن السبورات وتولد الهايدركاربونات.

هجرة البترول Petroleum Migration

أظهرت الفقرات السابقة من هذا الفصل ان البترول ذو أصل عضوي ، وناقشت انتاج المادة العضوية وحفظها في الترسبات ، وتتبعت تحوير المادة العضوية الى كيروجين ونضوج الكيروجين عند تحرر البترول. أما هدف هذه الفقرة فهو مناقشة الكيفية التي قد تهاجر بها الهايدروكاربونات المائعة من الصخرة المولدة (المصدرية) الى المكمن.

هنالك العديد من الادلة المنظورة التي توضح ان النفط والغاز لا يتولدان بشكل عام في الصخرة التي يتواجدان بها ، ولكن لا بد أنهما قد هاجرا اليها من مكان آخر. ولقد تمت البرهنة على هذه النظرية بالمشاهدات التالية :

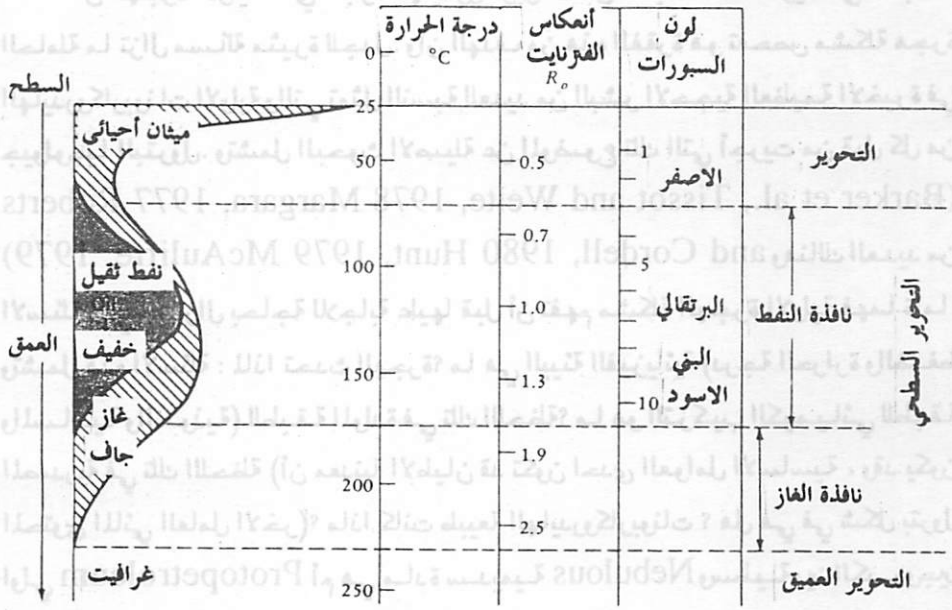
١. مثلما شرحنا مسبقا ، يمكن تحطيم المادة العضوية بسهولة بالاكسدة في الترسبات

المسامية النفاذة عند سطح الأرض. فلا بد اذن انها قد احتلت الصخرة المكمنية بعد فترة مناسبة من الدفن وعند درجة حرارة مرتفعة.

٢. غالبا ما يوجد النفط والغاز في مسامات الاذابة والتكسرات التي لا بد ان تكونت بعد الدفن وتصلب Lithification الصخرة المضيفة.

٣. يتم اصطياد النفط والغاز في النقطة الاعلى (الذرى البنيوية Structural Culmination) أو التحزق الطبقي Stratigraphic Pinchout لوحدة صخرية نفاذة مما يدلل على هجرة عمودية وافقية.

٤. يوجد النفط والغاز والماء في الصخور المكمنية المسامية والنفاذة متطبقين اعتمادا على كثافاتها النسبية. ان هذا التطبق يدلل على أنهما كانا ولم يزالا حرين في الهجرة عموديا او افقيا داخل المكمن.



الشكل ٥-١٤: المضاهاة بين تولد الهايدروكاربونات ودرجة الحرارة وبعض المعاملات الحرارية القديمة.

ان كل هذه المشاهدات تشير الى الاستنتاج الذي مفاده ان الهايدروكاربونات تهاجر الى الصخور المكمنية عند عمق محسوس تحت السطح بعد مرور بعض الوقت بعد الدفن.

يتم اجراء تمييز مهم بين الهجرة الاولية Primary Migration والهجرة الثانوية

Secondary Migration. وتفهم الهجرة الاولية على أنها هجرة الهايدروكاربونات من الصخرة المولدة (الطين أو السجيل) الى الطبقات النفاذة الحاملة (بشكل عام أما حجر جيري أو حجر رملي) اما الهجرة الثانوية فيعنى بها الحركة اللاحقة للنفط والغاز ضمن الطبقات الحاملة النفاذة والمكامن. وهنالك اجماع في الرأي على أن الهجرة الثانوية تحدث حينما يميز البترول على انه نفط خام أو غاز ، ورغم أن الغاز قد يكون مذابا في النفط الاّ أن درجة ذوبانه في المياه الحبيسة Connate Water تكون ضئيلة جدا. وتحدث الهجرة الثانوية بتأثير قدرة الطفو Buoyancy بسبب الكثافات المختلفة للموائع المعنية واستجابة للضغوط التفاضلية Differential Pressures مثلما تم شرحه في الفصل الرابع (صفحة ١٩٥).

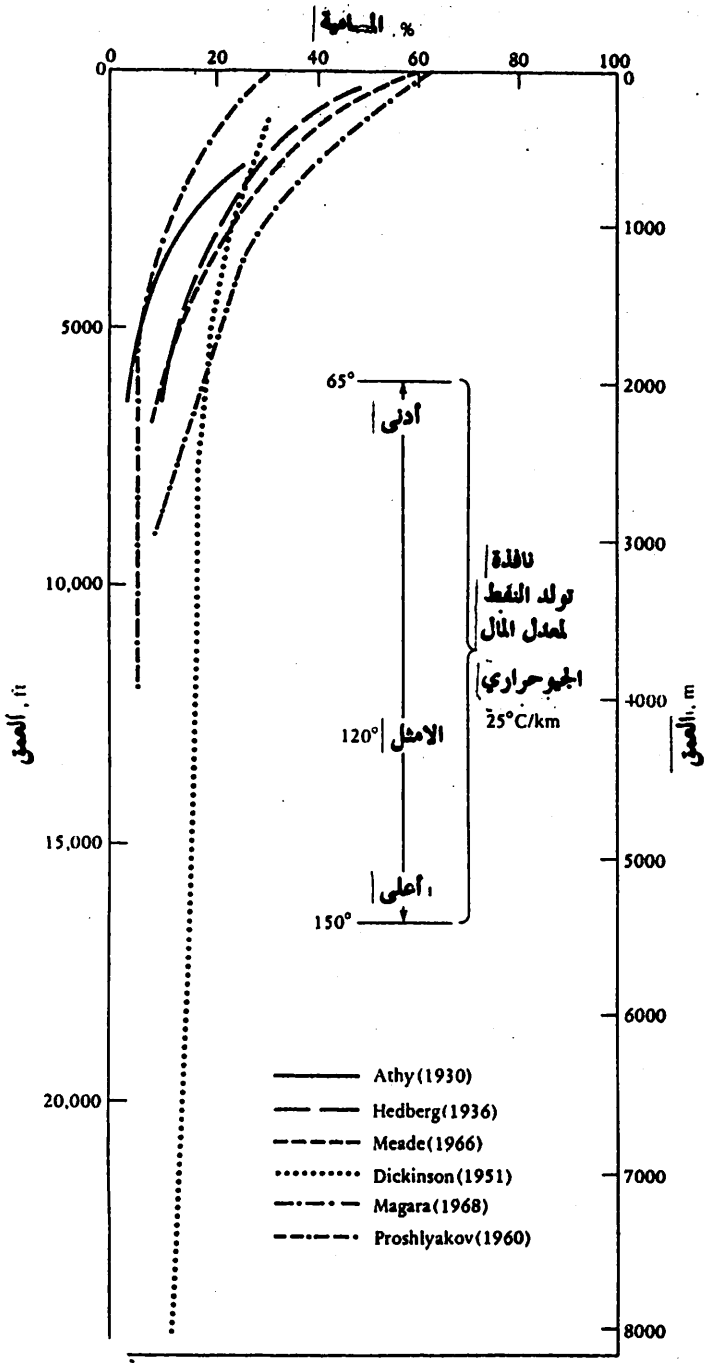
ان الهجرة الاولية ، اي هجرة الهايدروكاربونات من الطبقات المصدرية الى الطبقات الحاملة ما تزال مسألة مثيرة للجدل. وأن الهدف من هذه الفقرة هو تفحص مشكلة هجرة الهايدروكاربونات الاولية والتي تمثل النسبة للعديد من البشر الاحجية العظيمة الاخيرة في جيولوجيا البترول. وتشمل البحوث الاصيلة عن الموضوع تلك التي أجريت من قبل كل من (Barker et al., Tissot and Welte, 1978 Margara, 1977 Roberts and Cordell, 1980 Hunt, 1979 McAuliffe, 1979) وهنالك العديد من الاسئلة التي ما تزال بحاجة للاجابة عليها قبل أن تفهم مشكلة الهجرة الاولية فهما تاما. وتشمل هذه الاسئلة : لماذا تحدث الهجرة؟ ما هي البيئة الفيزيائية (درجة الحرارة والضغط والمسامية والنفوذية) للطبقة المولدة في تلك اللحظة؟ ما هو التركيب الكيميائي للطبقة المصدرية في تلك اللحظة (أن معدنية الاطيان قد تكون احدى العوامل الاساسية ، وقد يكون المحتوى المائي العامل الاخر)؟ ماذا كانت طبيعة الهايدروكاربونات ؟ هل هي في شكل بترول اولي Protopetroleum أم هي مادة سديمية Nebulous وسطية بين الكيروجين والنفط الخام او الغاز؟ هل يهاجر النفط والغاز في حالات منفصلة ، مذابان (واحد في الاخر) ، في مياه المسامات أو بهيئة مركبات عضوية معقدة في موائع المسامات؟ ان هذه الاسئلة كثيرة ، وهي تحتاج الى الكثير من المعطيات الجيولوجية التي يصعب الحصول عليها ، كما يصعب التأكد منها مختبرياً بسبب الزمن ودرجات الحرارة والضغوط التي تشتمل عليها، وفضلا عن ذلك ، فأن الامر يتطلب معرفة بالفيزياء والكيمياء بمستوى اعلى من ذلك

الذي يتوفر عليه الجيولوجي الاعتيادي.

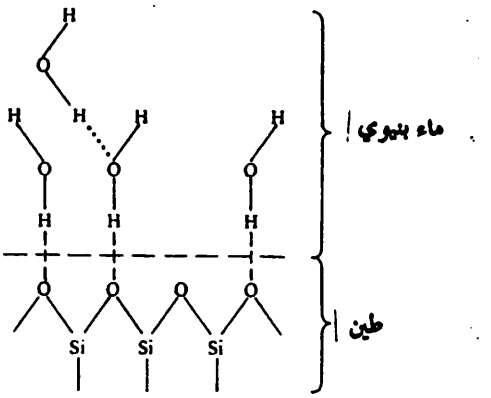
تشتمل دراسة الهجرة الأولية على تناقض Paradox اساسي. اذ يتم اصطياد النفط والغاز في المكامن المسامية والنفاذة. ويمكن تشخيص الصخور المولدة التي هاجرت منها (Flory et al., 1983, Hunt, 1979, Welte et al., 1975) ومع ذلك فان هذه الصخور المصدرية نفسها هي صخور سجيل كتيمه (عديمة النفوذية) ، فكيف هاجرت الموائع اذن؟ سيكون لطيفا الاعتقاد بأن النفط والغاز قد عُصرا Squeezed من الطين المولد اثناء الدفن المبكر قبل أن يدمر الانضغاط Compaction النفوذية. ولكن هذه العملية لا يمكن ان تكون كذلك ، لانه لا يمكن الوصول الى درجة الحرارة اللازمة لتولد الهايدروكاربونات حتى يقلل الرُص النفوذية وتشبع الماء الى حد كبير.

عند هذه النقطة سوف يكون مناسباً القيام بمراجعة للعلاقة بين مسامية الطين والنفوذية والانضغاط وفقدان الماء وهجرة الهايدروكاربونات . ولقد تم نشر العديد من منحنيات الرُص للصخور الصلصالية Argillaceous sediments (الشكل ٥-١٥). وتظهر هذه المنحنيات أن الجزء الاعظم من عملية طرد الماء Water expulsion بالانضغاط تحدث خلال الكيلومترين العلويين من الدفن. ويكون ماء المسامات المطرود بفعل الانضغاط تحت هذا العمق بقيمة الدنيا. لاحظ انه بالنسبة لمال جيوحراري يمثل المعدل (٢٥٠٠م/كم) يبدأ تولد النقط تحت العمق الذي يتم فيه طرد ماء المسامات بالانضغاط . ان هجرة النفط بعملية الشطف Leaching المباشرة لمياه المسامات ليست بالنتيجة مقترحاً قابلاً للتطبيق . ومع ذلك ، فثمة عوامل اخرى لها علاقة بهذه المشكلة ، من بينها تصور دور درجات الحرارة الفائقة وانواع المياه المختلفة الموجودة في الأطيان. ولقد لوحظ بأن العديد من المقاطعات الهايدروكاربونية الرئيسية هي مناطق درجات حرارة وضغوط فائقة. ان ترسبات العصر الثلاثي الفتاتية في خليج المكسيك بالولايات المتحدة الامريكية ، والتي كانت مادة دراسات مكثّفة معمقّة، هي مثال يذكر في هذا الصدد.

أشار (Powers, 1967) الى وجود نوعين من المياه في الأطيان : ماء المسامات الاعتيادي والماء البنيوي Structural Water المرتبط بطبقات الأطيان المونتمورلنايتيه (السمكتايت) كما هو موضح في الشكل (٥-١٦) . وعندما تُدفن الاطيان الأليتيه او الكاؤلينيتيه ، تحدثُ حالة منفردة من تحرر الماء بسبب الرُص في الكيلومترين الاولين من



الشكل ٥-١٥: منحنيات انضغاط السجيل من مصادر مختلفة . لاحظ أن هنالك حدا أدنى من فقدان الماء خلال الرص على مدى عمق نافذة النفط.



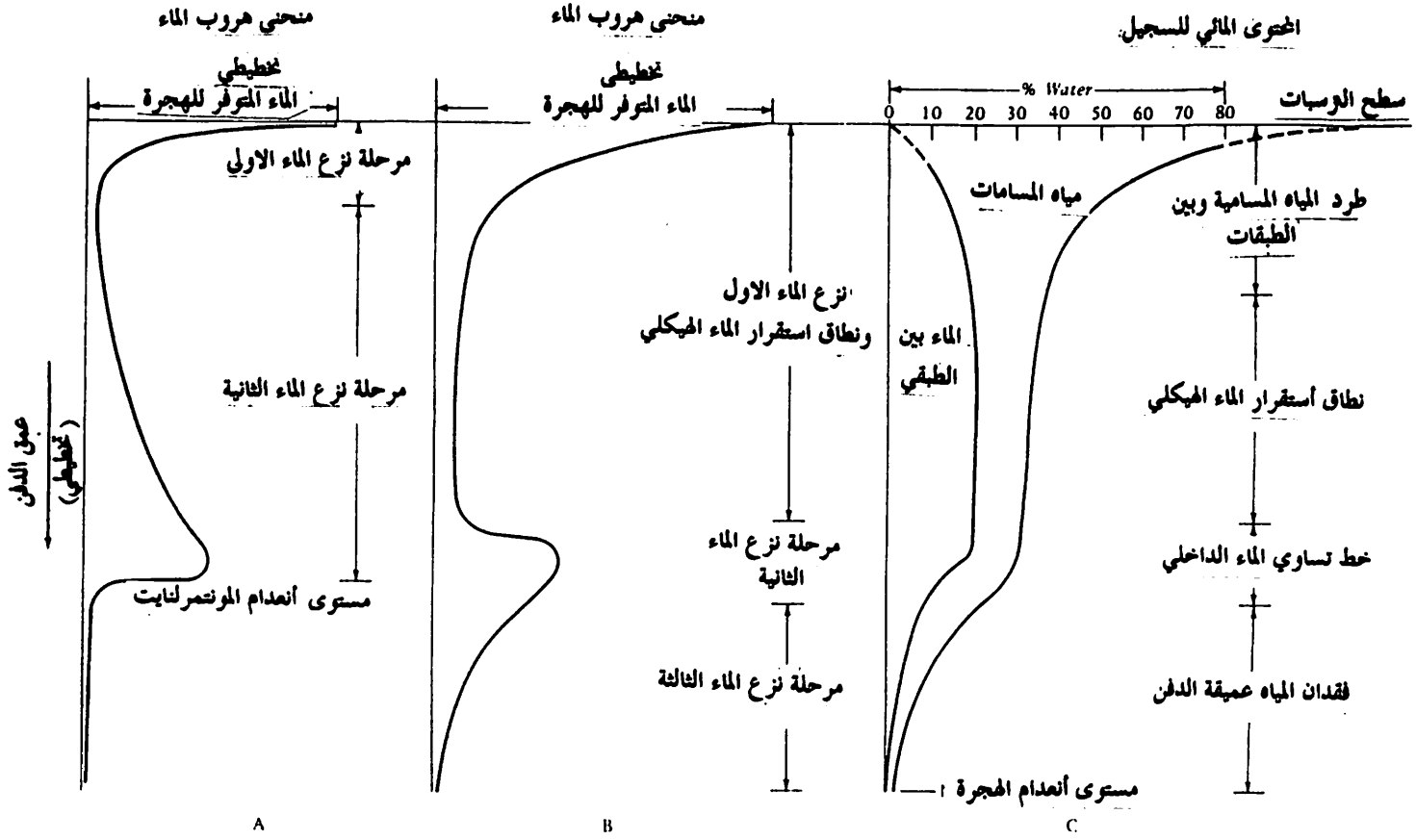
الشكل ٥-١٦: العلاقة بين جزيئات الماء البنيوي وهيكل المعادن الطينية (عن Barker, ١٩٧٨).

الشكل ٥-١٧: مرحلتا نزع الماء من الطين المونتمرلنيتي (عن Powers, ١٩٦٧).

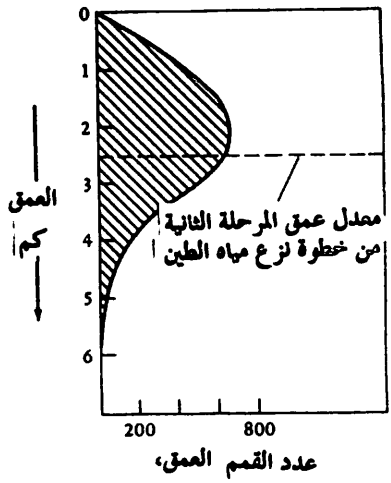
الدفن. وعندما تدفن الأطيان الغنية بالمونتمورلنايت ، مع ذلك ، فانه تحدث فترتان من تحرر الماء: حالة مبكرة، وحالة ثانية متميزة عندما يُطرد الماء البنيوي اثناء تحطم الهيكل المونتمورلينتي عندما يتحول الى الالايت (الشكل ٥-١٧). ولقد فصّل عمل لاحق اجراه (Burst, 1969) تحول المونتمورلنايت الى الالايت وأظهر ان هذا التحول قد حدث عند درجة حرارة تتراوح بين ١٠٠-١١٠م° ، وفي وسط نافذة النفط تماماً (الشكل ٥-١٨) . ان العمق الحقيقي الذي يتم فيه الوصول الى هذه النقطة يتغاير مع المال الجيوحراري ، ولكن (Burst, 1969) كان قادراً على اظهار توزيع اعتيادي لعمق منتج عند نحو ٦٠٠ متر فوق مستوى تميؤ الطين Clay dehydration level (الشكل ٥-١٩). وبضم المعلومات المتعلقة بالمال الجيوحراري والعمق ونقطة تحول الطين ، أصبح ممكناً وضع نموذج توزيع الموائع لمنطقة (الغولف كوست) . كما ذكرت دراسات مشابهة من مناطق أخرى (Fascolos and Powell, 1978).

تابع (Barker et al., 1978) هذه الفكرة مظهراً ان ليس الماء وحده بل الهايدروكاربونات هي الاخرى قد ترتبط بهيكل الطين (الشكل ٥-٢٠). ومن الواضح ان الهايدروكاربونات سوف تنفصل عن سطح الطين عند حدوث التميؤ. ان العملية الفيزيائية الدقيقة التي يُطرد بها النفط من الصخرة المصدرية ما تزال غير واضحة ، ولكن الشكل (٥-١٨) يُظهر علاقة رقمية بين تميؤ الطين وتراكم الهايدروكاربونات. ان رسم خرائط اقليمية للسطح الذي يحدث فيه هذا التغيير يمثل بذلك وسيلة استكشافية نافعة ، رغم ان العمليات المسوولة عن هذه العلاقة ما تزال غير مفهومة تماماً.

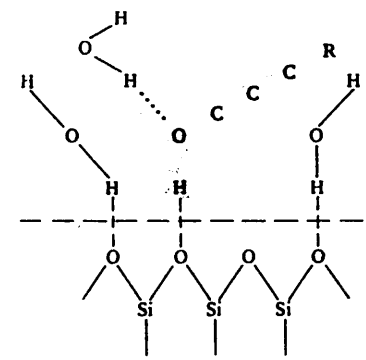
يجب اضفاء العديد من المواصفات على هذه التقنية. وتتعلق هذه المعطيات بصخور العصر الثلاثي في منطقة (الغولف كوست) بالولايات المتحدة الامريكية. وفي العديد من المقاطعات الهايدروكاربونية في العالم ، تكون اطيان السمكتايت مفقودة الى حد كبير. وبذلك فان نزع مياه الأطيان dewatering of clay لا يمكن ان يقترح كعملية سائدة لهجرة الهايدركاربونات من الصخور المصدرية. ومن الواضح ان الضغط الفائق هو عامل قد يساعد في هجرة البترول بمحافظته على المسامية والنفوذية ومنعه تكون هيكل صلب للصخرة. ولقد اقترح العديد من الجيولوجيين ان هجرة الموائع من الاطيان قد تُحفّز بنشوء التكسرات المجهرية Microfractures (على سبيل المثال Palciauskus and Domenico, 1980).



الشكل ٥-١٨: منحنيات نزع الماء لدفن الطين . (عن Burst, ١٩٦٩).



الشكل ٥-١٩: منحنى العمق- التكرار لقمة ٥٣٦٨ مكمن نفطي في منطقة الغولف كوست في الولايات المتحدة الامريكية. يظهر هذا المنحني أن عمق ذروة الانتاج هي نحو ٦٠٠ م فوق معدل العمق التي تحدث عنده المرحلة الثانية من نزع مياه الطين. (عن Burst, ١٩٦٩).



الشكل ٥-٢٠: مرتسم يظهر كيفية ارتباط جزيئات الهايدروكاربونات (في هذه الحالة الكحول نوع R-C-C-C-CoH) الى هيكل المعادن الطينية مع جزيئات الماء . (عن Barker, ١٩٧٨ ، تطبع بموافقة مسبقة).

ان هذه التكسرات المجهرية سوف تسبب زيادة ملحوظة في النفوذية وبذلك تسمح بهروب الموائع. وبعد ذلك ، فأن التكرسات المجهرية سوف تُغلق عند انخفاض ضغط المسامات. ولقد أقترح ان كُريّات البترول Petroleum globules يمكن ان تُهاجر بان تُزيح جانباً Shouldering aside حبيبات الطين غير الثابتة. ولكن تميؤ الطين هو واحد من العديد من أسباب الضغط الفائق. أن منع الرُّص الاعتيادي بسبب الترسيب السريع وتكون السمنت المالىء للمسامات ، يمكن ان يُسبب ضغوط مسامات عالية (أنظر كذلك ص١٨٨). والأكثر من ذلك ، ان بعض المقاطعات الهايدركاربونية الرئيسية لا تحتوي على ضغوط فائقة، ومع ذلك ، فأن طرد الماء اللاحق ، مهما كان اصله ، يمكن ان يؤدي دوراً هاماً في هجرة البترول الأولية.

ويمكن تقسيم نظريات هجرة الهايدروكاربونات الاولية المختلفة على النحو التالي :

١. طرد الهايدروكاربونات على هيئة بترول اولي.

٢. طرد الهايدروكاربونات على هيئة بترول.

أ- طرد الهايدروكاربونات في محلول مائي

- مشتق من الرُّص.

i. مذابة في الماء - مطرود من الاطيان او مذاب من الشطف بالمياه الجوية Meteoric flushing

ii. ضمن المادة الغروية Within micelles.

iii. ذوبان النفط في الغاز.

ب- كريّات النفط في الماء.

جـ- حالة مستمرة.

ولسوف نصف في الفقرات اللاحقة ميزات هذه الآليات المختلفة ومحدودياتها.

طرد الهايدروكاربونات على هيئة بترول أولي.

Expulsion of Hydrocarbons as Protopetroleum

ان ندرس الهايدروكاربونات حقاً وهي في طور الهجرة الأولية يُعَدُّ امرا في غاية الصعوبة. فالتتابع التطوري من الكيروجين الى النفط الخام والغاز لهو معقد جدا. كما ان تخمين ان كان هذا التحول قد اكتمل قبل أو اثناء او بعد الهجرة من الصخرة المصدرية الى الطبقة الحاملة يعد أمرا في غاية الصعوبة.

ان احدى المشاكل الاساسية المتعلقة بفهم هجرة الهايدروكاربونات هي ذوبانيتها الواطئة في الماء. ولقد اقترح (Hunt, 1968) بأن الهجرة تحدث قبل ان تتحول الهايدروكاربونات الى نفط خام مميّز ، أي بينما تكون قابلة للذوبان في الماء، ويطلق على هذه الحالة الانتقالية اسم البترول الأولي Protopetroleum.

تتضمن هذه الالية العديد من المشاكل (Cordell, 1972). فتركيز الكيتونات والاحماض والاستيرات المنظور في الصخور المصدرية يكون منخفضا ، وأن من الصعب ملاحظة الكيفية التي تهاجر فيها الى الطبقات الحاملة ، ومن ثم انفصالها من الماء حال

تواجدها هناك. ان من المحتمل ان هذه المركبات تَمتّز Adsorb على سطوح المعادن الطينية، وتقاوم الطرد من الصخور المصدرية. فاذا ما هاجرت ، مع ذلك ، الى الطبقة الحاملة ، فأن من الصعب تصور الكيفية التي تتحول فيها الى بترول خام غير قابل للامتزاج immiscible، لانها قابلة للذوبان في الماء.

هجرة البترول في الحالة المائعة.

Expulsion of Hydrocarbons in Aqueous Solution

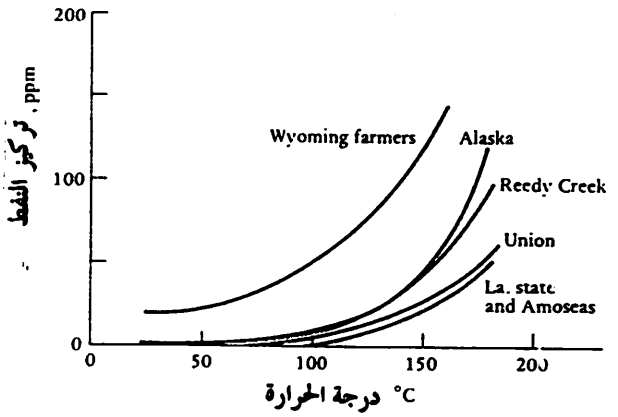
ان احدى الامكانيات التي يمكن أخذها بنظر الاعتبار هو ان الهايدروكاربونات يمكن ان تهاجر من الصخرة المصدرية مكتملة التشكل ، ومع ذلك ، ذائبة في الماء. ان ذوبانية الهايدروكاربونات واطئة جدا على سطح الأرض، ولكن يمكن تسريعها بدرجات الحرارة أو وجود المواد الغروية المشحونة Micelles. وسوف يتم تفحص هاتين الآليتين في الفقرات التالية.

نظرية البترول الساخن The Hot Oil Theory

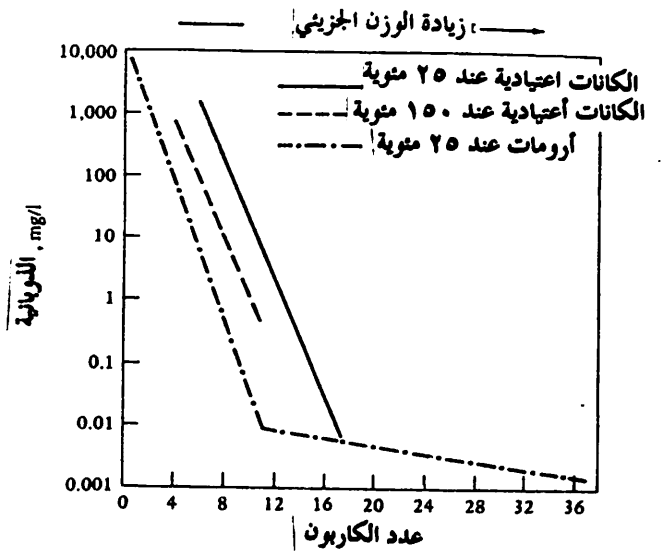
يظهر الشكل (٥-٢١) ذوبانية أنواع النفوط الخام المختلفة مرسومة مقابل درجات الحرارة. ويوضح هذا المرتسم البياني أن الذوبانيات واطئة جدا الى حد يمكن اهمالها تحت درجة حرارة ٧٥ °م. ولا تصبح مهمة الا عند درجة حرارة تصل الى ١٥٠ °م. ومما يستحق التذكر ، أن تحليل درجات الحرارة القديمة يظهر أن تولد البترول الأمثل يحدث عند درجة حرارة تصل الى ١٢٠ °م (صفحة ٢٣٢) ، وعند درجة الحرارة هذه ، تدل المعطيات التجريبية أن معدلات الذوبان تتراوح بين ١٠ الى ٢٠ جزء بالمليون.

أن هذه المعلومات لا تبدو كثيرة النفع ، وأن ذوبانية الهايدروكاربونات تستحق ان يتم تفحصها بتفصيل أكثر. ويظهر الشكل (٥-٢٢) ذوبانية الهايدروكاربونات مرسومة اعتمادا على رقم الهايدروكاربون Hydrocarbon Number. يظهر هذا المرتسم أن ذوبانية الهايدروكاربونات تزداد مع نقصان رقم الكاربون لكل من الالكانات الاعتيادية (البرافينات) والسلسلة الاروماتية (العطرية) . لاحظ بشكل خاص أن قيم قابلية الذوبان مرتفعة جدا ، وتتراوح بين عدة مئات الى عدة الاف من ملغم/ل للغازات البرافينية (C_1-C_5) .ومن

المحتمل ان هذه المعلومات قد حلّت جزءاً من مشكلة الهجرة الاولية. اذ يبدو سهلا تماما بالنسبة للهايدروكاربونات الغازية ان تهاجر من الصخور المصدرية مُذابة في ماء المسامات. ومن المتوقع ان يحدث الانفصال Exsolution عندما يصلان الى درجات الحرارة والضغوط المنخفضة الموجودة في الطبقة الحاملة.



الشكل ٥-٢١: مرتسم بياني للذوبانيات الانواع المختلفة من النفوط الخام مرسومة مقابل درجة الحرارة. (عن Price, ١٩٧٦)



الشكل ٥-٢٢: ذوبانية الهايدروكاربونات مع اعداد كاربون مختلفة. أن الذوبانية تقل مع زيادة الوزن الجزيئي (عن McAuliffe, ١٩٧٩).

ان نحو ٢٥ بالمئة فقط من النفط الخام النموذجي يتكون من الكانات ذات نوبانية متوسطة ، وأن ٢٥ بالمئة الاخرى تتكون من ارومات نافثينية ثقيلة وأصماغ لا تنوب عمليا في الماء. ومع ذلك ، فأن هنالك مناصرون لفكرة هجرة البترول الاولية من خلال الاذابة في الماء (على سبيل المثال Price, 1976, (1977, 1978, 1980, 1981a, 1981b). وتظهر المعطيات التجريبية ان نوبانية الهايدروكاربونات قد تصل الى نحو ١٠ بالمئة وزنا في الماء المالح المضغوط. وتزداد النوبانية بوجود الغاز. وحتى في هذه الحالة ، فأن Price يقترح درجة حرارة بين ٣٠٠ الى ٣٥٠م لتولد النفط. ومثلما لاحظنا مسبقا ، فأن درجات الحرارة هذه هي أعلى بكثير من تلك التي تحددها المقاييس الحرارية القديمة كدرجات حرارة مُثلى لتولد النفط. والأكثر من ذلك ، أنّ من المحتمل أن التحوير ، عند درجات الحرارة هذه ، سوف يؤدي الى تدمير مسامية الصخور المصدرية والحاملة ونفوذيتها. كما تم التشكيك باستقرارية الهايدركاربونات عند درجات الحرارة هذه (Jones, 1978) .

نظرية المادة الغروية Micelle Theory

الطريقة الأخرى التي يمكن بها زيادة نوبانية الهايدروكاربونات في الماء هي بوجود المادة الغروية (Baker, 1962; Cordell, 1973) ، وهذه المادة هي صابون حامضي عضوي غروي Colloidal Organic Acid تكون جزيئاته ذات نهايات غير قابلة للنوبان Hydrophobic وقابلة للنوبان Hydrophylic في الماء. وبذلك فأن وجودها قد يؤدي الى زيادة نوبانية الهايدروكاربونات في الماء وذلك بعملها كحلقة وصل بين جذور OH Radicals على نهاياتها القابلة للنوبان في الماء وبين جزيئات الهايدروكاربونات على نهاياتها غير القابلة للنوبان. ولقد أظهر (Baker, 1962) أن حجم جزيئة المادة الغروية في النفوط الخام ذات توزيع لوغارتمي اعتيادي ثنائي النمط Bimodal Lognormal Distribution. ويرتبط نوع التوزيع هذا مع نوعين أساسين من جزيئات المادة الغروية – الغرويات الايونية Ionic الصغيرة والغرويات المتعادلة Neutral الكبيرة. ان المبدأ الذي يستعمل بموجبه الصابون لزيادة نوبانية الهايدروكاربونات هو تقنية مألوفة عند مهندسي انتاج البترول. ان عملية الفيضان الغروي للمكمن غالبا ما تستعمل لزيادة الاستخلاص Recovery، (ص٣٣٨).

اذا كانت هذه النظرية الغروية صحيحة ، عندها يجب أن ترتبط نوبانية اجزاء الهايدروكاربونات المختلفة في النفط الخام بوجود المادة الغروية ، ولقد أظهرت المعطيات المختبرية صحة ذلك. فالأجزاء النافثينية والاروماتية موجودة وفق توزيعات تكرارية لوغارتمية اعتيادية احادية النمط Monomodel Lognormal Frequency ، وعلى النقيض من ذلك ، فأن البرافينات سواء الاعتيادية Normal أو المتفرعة Branched ، تُظهر توزيعا تكراريا Frequency Distribution مما يدلل على أنها تذاب من قبل كل من الغرويات الايونية والمتعادلة، في حين تظهر الهايدروكاربونات ذات الوزن الجزيئي الواطىء (C_5أو أقل) توزيعا تكراريا اعيتاديا Normal Frequency Distribution ومثلما أوضحنا مسبقا ، فأن من المحتمل أن يرتبط هذا التوزيع بحقيقة انها تذوب طبيعيا في الماء ولا تتطلب وجود المادة الغروية.

استعرض عدد من الكتاب النظرية الغروية . وتضم الاعتراضات الرئيسية التي حددها (McAuliffe, 1979) توفر نسبة عالية جدا من الغرويات قياسا الى الهايدروكاربونات كي توفر عملية مؤثرة . في حين ان من المعتاد الا تتواجد الغرويات الا بمقادير ضئيلة. وفضلا عن ذلك ، فأن حجم جزيئة المادة الغروية اكبر بكثير من قطر عنق المسامة Porethroat في طبقات الطين المصدرية. كما ان العمليات التي تفقد فيها المادة الغروية جزيئات الهايدروكاربونات ، ومن ثم انكسارها المفترض لم تزل غير واضحة.

طرد النفط في محلول غازي Expulsion of Oil in Gaseous Solution

أخذت نظريات هجرة الغازات الهايدروكاربونات الاخرى بنظر الاعتبار دور الغازات في عملها كمعجل Catalyst أو وسط ناقل Transporting Media ولقد ناقش (Momper, 1978) بشكل خاص ، دور ثاني أوكسيد الكاربون ، الذي يعرف بأنه يحرر خارجا أثناء نضوج الكيروجين ، (ص ٣٠٩). وبشكل مباشر أو غير مباشر ، فأن من المحتمل أن يكون لثاني أوكسيد الكاربون تأثير محسوس على هجرة الهايدروكاربونات. فبشكل غير مباشر ، بالترابط مع أيونات الكالسيوم فأنه يرسب سمنت الكالسايت الذي يقلل من حجم المسامات وبالتالي يزيد من ضغط المسامات. ان وجود غاز ثاني أوكسيد الكاربون مذابا يقلل من لزوجة النفط، وبذلك يزيد من حركته وهو يؤدي الى ترسب نهايات البترول N-

S-O الثقيلة، وبذلك يجعل البترول الفضالي أخف ويزيد من نسبة الغاز–النفط.

على جانب المآخذ ، مع ذلك ، فأن ترسب سمنت الكالسايت قد يقلل من النفوذية. والأكثر من ذلك ، ان من المعروف ان عملية نزع كاربوكسيل Decarboxylation الكيروجين تحدث قبل تولد الهايدروكاربونات (صفحة ٣٠٩). وبذلك فأن تركيز ثاني أوكسيد الكاربون في وقت تولد البترول قد يكون بذلك واطئا جدا كي يساعد في هجرة البترول بالطرق التي حددت مسبقا.

ان الغازات قد تؤدي دورا مباشرا في هجرة النفط بطريقة اخرى . اذ من المعروف ان الغازات الهايدروكاربونية في الابار العميقة تحمل النفط في محلول غازي. ويتكاثف النفط عندما ينخفض الضغط ودرجة الحرارة بوصول الغازات الهايدروكاربونية الى السطح. وبذلك فأن من المحتمل أن النفط قد يهاجر بهذه الطريقة من الصخرة المصدرية. ان هذه الالية تُفسر على نحو مقنع الهجرة الثانوية للمكثفات Condensates خلال الطبقة الحاملة والمكمنية. ومثلما أشار (Mcauliffe, 1979) ، مع ذلك ، فانها لا تفسر على نحو مُرْضٍ الهجرة الثانوية للنفط الخام الاعتيادي او الهجرة الاولية لاي نفط. ويبدو ان نوبانية الارومات النافثينية الأثقل والأصماغ ضئيلة جدا الى حد يمكن اهمالها. وان طرد فقاعات الغاز خلال عنق مسامة السجيل هو بصعوبة مرور قطره النفط. ومثلما سنوضح بعد فترة قصيرة، فأن هذا يمثل مشاكل ملموسة للنظريات المتعلقة بالهجرة الاولية لحالة النفط Primary Oil Phase Migration.

الهجرة الاولية للنفط الحر Primary Migration of Free Oil

اقترحت مجموعة واسعة من النظريات أن النفط لا يهاجر من الطبقة المصدرية بأي نوع من المحاليل بل على هيئة حالة نفطية متميزة Discrete Oil Phase . وهنالك نوعان أساسيان من هذا النوع من الهجرة : طرد قطيرات Droplets منفصلة مرتبطة مع ماء المسامات ، وطرد حالة نفطية مستمرة ثلاثية الابعاد Three Dimensional Continuous Phase of Oil.

ولقد أظهر (Hobson and Tiratsoo, 1981) رياضيا استحالة تسلل كُرَيّة من النفط في المسامات المبللة بالماء Waterwet خلال عنق المسامة في صخرة طين

مصدرية، اما بفضل صفاتها الخاصة (على سبيل المثال الطوفانية Buoyancy أو اللامتزاجية Immiscibility) أو بمساعدة الماء المنساب. تستند هذه الفرضية الرياضية على افتراض ان قطر كرية النفط هو أكبر من قطر عنق المسامة. ولقد أورد (Hobson and Tiratsoo, 1981) اقطار اعناق مسامات تتراوح بين ٥٠ الى ١٠٠ أنغستروم للسجيل عند عمق ٢٠٠٠م، ولجزيئات الاسفلتين المفردة والهايدروكاربونات المعقدة حلقية التركيب قطرا يتراوح بين ٥٠ الى ١٠٠ أنغستروم و ١٠ الى ٣٠ أنغستروم على التوالي (Tissot and Wetlet, 1978). وبذلك، فأن من الصعب تصور كيف ان لكريات النفط المنفصلة قطراً أقل من أقطار أعناق المسامات.

ومع ذلك، فأن من المحتمل أن الصخور المصدرية ليست مبللة بالماء بل بالنفط. وفي مثل هذا الوضع، فأن البترول لن يهاجر على هيئة كريات منفصلة من النفط في الماء، بل على شكل حالة مستمرة ثلاثية الابعاد. ويطلق على هذه النظرية اسم الفتيلة المزيتة Greasy Wick في اشارة الى التشابه مع الشمع الذائب الذي يتحرك خلال الألياف او فتيلة الشمعة. أن مثل هذه الآلية قد تعمل في صخرة مصدرية غنية، ولكنها أقل احتمالا في الصخور المصدرية الفقيرة بالمادة العضوية، والتي يحتمل أن تكون مبللة بالماء.

احتساب حجوم البترول.

Estimation of Volumes of Petroleum Generated

ان من المفيد أن نكون قادرين على تخمين مقدار البترول الذي تولد في حوض رسوبي معين. ومن الواضح أن مثل هذه التخمينات صعبة جدا في المناطق البكر حيث لا تتوفر معلومات عنها. أما في المقاطعات البترولية الناضجة حيث تتوفر كميات كبيرة من المعلومات، فأن الأمر يكون أسهل قليلا. أن معرفة مقدار الاحتياطي الذي من المؤمل اكتشافه مهمة في تحديد ان كان الاستمرار في التنقيب يستحق التكاليف، اذا لم يتبق سوى احتياطي صغير ينبغي العثور عليه.

ان حجم النفط المتولد في اية منطقة قد يحتسب باستعمال طريقة توازن المواد الجيوكيميائية Geochemical Material (White and Gehman, 1979) Balance Method ويمكن التعبير عن المعادلات الاساسية على النحو التالي:

حجم النفط المتولد = حجم الصخور المصدرية × حجم المادة العضوية × القدرة النوعية الكامنة × نسبة التحول × جزء النفط في الناتج الهايدروكاربوني × الزيادة الحجمية في الناتج النفطي

$$\text{Volume of oil generated} = \text{volume of source rock} \times \text{volume of organic matter} \times \text{genetic potential} \times \text{transformation ratio} \times \text{fraction of oil in hydrocarbon yield} \times \text{volume increase on oil yield}$$

أمكن احتساب حجم الصخور المصدرية من خرائط تساوي السمك Isopach Map . في حين ان معدل مقدار المادة العضوية يجب ان يحسب من التحليل الجيوكيميائي للباب والفتات الصخري، كما ان الاستقراء من مجسات الابار ممكن ايضا. وتُعرف القدرة النوعية الكامنة Genetic Potential لتكوين ما بأنها مقدار البترول الذي يمكن ان يحرره الكيروجين (Tissot and Welte, 1978). وأن نسبة التحول Transformation Ratio هي نسبة البترول الذي يتكون حقا الى القدرة النوعية الكامنة، ومثلما شرحنا في الصفحة (١٩٥) فأن هذه القيم تحدد من التحلل الحراري لعينات الصخور المصدرية.

نشرت تقديرات لحجوم البترول في أحواض مختلفة من قبل كل من Hunt, 1961, Cony beare, 1965, Pusey, 1973a, Fuller, 1975 and Goff, 1983.

تظهر هذه الدراسات أن معدل التحول يجب الا يتجاوز ١, للحصول على تولد نفطي هام، وهي تتراوح عادة بين ٣,. الى ٧,. في المقاطعات البترولية الرئيسية.

تولد البترول وهجرته: الخلاصة

Hydrocarbon Generation and Migration: Summary

ان فهم الهجرة الاولية للهايدروكاربونات هي احدى آخر المشاكل في جيولوجيا البترول. ان الابحاث في هذا الميدان نشيطة جدا، لذلك فأن اية مراجعة سرعان ما ينتابها القِدَم. ومع ذلك، فأن خلاصة لهذا الموضوع المعقد هي أمر مناسب :

١. تتكون كميات تجارية من النفط والغاز من تحول المادة العضوية.

٢. ان الكيروجين، وهو مادة عضوية تتناثر في العديد من صخور السجيل تتكون من الحطام العضوي المدفون وهي قادرة على توليد النفط والغاز.

٣. يمكن تمييز ثلاثة أنواع من الكيروجين: نوع I (لطحلبي)، نوع II (الشحمي)ونوع III (الدبالي)، ويميل النوع الأول الى توليد النفط، بينما يولد النوع الثالث الغاز.

٤. ان نضوج الكيروجين هو دالة لدرجة الحرارة، والى مدى أقل، الزمن ويحدث تولد النفط بين ٦٠ الى ١٢٠ درجة مئوية، ويتولد الغاز بين ١٢٠ الى ٢٢٥ درجة مئوية.

٥. تحتوي الصخور المولدة عادة على أكثر من ١٥٠٠ جزء بالمليون من الكاربون العضوي، ولكنه لا ينتج الا نسبة مئوية صغيرة من الهايدروكاربونات التي تحتويها.

٦. يمكن استعمال العديد من التقنيات لقياس نضوج الصخرة المصدرية.

٧. ان عمليات الهجرة الاولية الدقيقة، التي يهاجر بها النفط والغاز من الصخور المصدرية ليست واضحة تماما. فذوبانية الهايدروكاربونات في الماء واطئة، ولكنها بالنسبة للهايدروكاربونات الاخف، تزداد بارتفاع درجات الحرارة ووجود الغرويات الصابونية وتقترح علاقة رياضية بين وجود النفط وتميؤ الاطيان ان شطف الماء من الطين المنضغط يؤدي دورا هاما في الهجرة الاولية.

SELECTED BIBLIOGRAPHY

مصادر مختارة

For concise reviews of the geochemistry of source rocks, the problems of migration, and paleothermometers, see:

COOPER, B. S. 1977. Estimation of the maximum temperatures attained in sedimentary rocks. In: *Developments in Petroleum Geology*, vol. 1. G. D. Hobson (ed.). London: Applied Science Publishers, 127–146.

MAGARA, K. 1977. Petroleum migration and accumulation. In: *Developments in Petroleum Geology*, vol. 1. G. D. Hobson (ed.). London: Applied Science Publishers, 83–126.

TISSOT, B. 1977. The application of the results of organic geochemical studies in oil and gas exploration. In: *Developments in Petroleum Geology*, vol. 1. G. D. Hobson (ed.). London: Applied Science Publishers, 53–82.

For papers expounding the various theories of hydrocarbon migration, see:

BARKER, C. et al. 1978. *Physical and Chemical Constraints on Petroleum Migration.* Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 283 pp.

For detailed accounts of the generation and migration of oil, see:

HUNT, J. M. 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology.* San Francisco: Freeman, 617 pp.

KINGHORN, R. R. F. 1983. *Introduction to the Physics and Chemistry of Petroleum.* Chichester: Wiley, 436 pp.

ROBERTS, W. H. and CORDELL, R. J. 1980. *Problems of Petroleum Migration.* AAPG Studies in Geology, No. 10, 273 pp.

TISSOT, B. P. and WELTE, D. H. 1978. *Petroleum Formation and Occurrence.* Berlin: Springer-Verlag, 530 pp.

WAPLES, D. W. 1981. *Organic Geochemistry for Exploration Geologists.* Minneapolis: CEPCO, 144 pp.

REFERENCES

المراجع

AGER, D. V. 1975. The Jurassic world ocean. In: *Jurassic Northern North Sea Symposium.* K. Finstad and R. C. Selley (eds.). Oslo: Norwegian Petrol. Soc. Paper No. 1, 43 pp.

ARTHUR, M. A. and SCHLANGER, S. O. 1979. Cretaceous 'Oceanic Anoxic Events' as Causal factors in Development of Reef-Reservoired Giant Oil Fields. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 870–885.

ATHY, L. F. 1930. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 14,* 1–35.

BAKER, E. G. 1962. Distribution of hydrocarbons in petroleum. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 46,* 76–84.

BARNARD, P. C. and COOPER, B. S. 1981. Oils and source rocks of the North Sea area. In: *Petroleum Geology of the Continental Shelf of North-West Europe.* L. V. Illing and G. D. Hobson (eds.). London: Inst. Petrol., 169–175.

BARNARD, P. C.; COOPER, B. S.; and FISHER, M. J. 1978. Organic maturation and hydrocarbon generation in the Mesozoic sediments of the Sverdrup Basin, Arctic Canada. Lucknow: *Proc. 4th Internat. Palynol. Cong.,* 163–175.

BECKER, G. F. 1909. Relations between local magnetic disturbances and the genesis of petroleum. *Bull. U.S. Geol. Surv., 401,* 23 pp.

BERTHELOT, M. 1860. Sur l'Origine de Carbures et des Combustibles Mineraux. *Compt. Rend., 63,* 949–951.

BRADLEY, W. H. 1948. Limnology and the Eocene lakes at the Rocky Mtn. region. *Bull. Geol. Soc. Am., 59,* 635–648.

BURST, J. F. 1969. Diagenesis of Gulf Coast clay sediments and its possible relation to petroleum migration. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 53,* 73–93.

CLAYPOOL, G. E.; LOVE, A. H.; and MAUGHAN, E. K. 1978. Organic geochemistry, incipient metamorphism, and oil generation in black shale members of Phosphoria formation, western interior, United States. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62,* 98–120.

COHEN, C. R. 1981. Time and temperature in petroleum formation: application of Lopatin's method to petroleum exploration: Discussion. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 65,* 1647–1648.

COLLINGWOOD, D. M. and RETTGER, R. E. 1926. The Lytton Springs oil field, Caldwell County, Texas. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 10,* 1199–1211.

CONNAN, J. 1974. Time-temperature relation in oil genesis. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58,* 2516–2521.

CONYBEARE, C. E. B. 1965. Hydrocarbon-generation potential and hydrocarbon-yield capacity of sedimentary basins. *Can. Petrol. Geol. Bull., 13,* 509–528.

COOPER, B. S. 1977. Estimation of the maximum temperatures attained in sedimentary rocks. In: *Developments in Petroleum Geology I.* G. D. Hobson (ed.). London: Applied Science Publishers, 127–146.

COOPER, B. S.; COLEMAN, S. H.; BARNARD, P. C.; and BUTTERWORTH, J. S. 1975. Palaeo-temperatures in the northern North Sea basin. In: *Petroleum and the Continental Shelf of Northwest Europe.* A. W. Woodland (ed.). London: Applied Science Publishers, 487–492.

CORDELL, R. J. 1972. Depths of oil origin and primary migration: a review and critique. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56,* 2029–2067.

CORDELL, R. J. 1973. Colloidal soap as a proposed primary migration medium for hydrocarbons. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 57,* 1618–1643.

CORNELIUS, C. D. G. 1975. Geothermal aspects of hydrocarbon exploration in the North Sea area. In: Proc. Bergen Conf. Hydrocarbon Geol. *Norsk. Geol. Undersok.,* 26–67.

CURRIE, J. B. and NWACHUKWU, S. O. 1974. Evidence of incipient fracture porosity in reservoir rocks at depth. *Can. Petrol. Geol. Bull., 22,* 42–57.

DEBYSER, J. and DEROO, G. 1969. Faits d'observation sur la genese du petrole. I. Facteurs controlant la repartition de la matiere organiques dans les sediments. *Rev. Inst. Fr. Petr., 24,* 21–48.

DEGENS, E. T. and MOPPER, K. 1976. Factors controlling the distribution and early diagenesis of organic material in marine sediments. *Chem. Oceanog., 6,* 59–113.

DEGENS, E. T. and ROSS, D. A. (eds.). 1974. *The Black Sea—Geology, Chemistry and Biology.* Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No 20, 633 pp.

DEGENS, E. T.; Von HERTZEN, R. P.; and WONG, H. K. 1971. Lake Tanganika: water chemistry, sediments, geological structure. *Naturwissenschaften, 58,* 224–291.

DEGENS, E. T.; Von HERTZEN, R. P.; and WONG, H. K. 1973. Lake Kivu: structure, chemistry and biology of an East African rift lake. *Geol. Rundsch., 62,* 245–277.

DEMAISON, G. J. and MOORE, G. T. 1979. Anoxic environments and oil source bed genesis. *Org. Geochem., 2,* 9–13.

DEMAISON, G. J. and MOORE, G. T. 1980. Anoxic environments and oil source bed genesis. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64,* 1179–1209.

DEUSER, W. G. 1971. Organic-carbon budget of the Black Sea. *Deep Sea Res., 18,* 995–1004.

DICKINSON, G. 1951. Geological Aspects of Abnormal Reservoir Pressures in the Gulf Coast Region of Louisiana, U.S.A. *3rd Wld. Petrol. Cong. Proc.* Section 1, 1–16, and *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 10,* 40–432.

DIETRICH, G. 1963. *General Oceanography, an Introduction.* New York: Wiley, 588 pp.

DOTT, R. H. and REYNOLDS, M. J. 1969. *Sourcebook for Petroleum Geology.* Tulsa: *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.,* Mem. No. 5, 471 pp.

DOW, W. G. 1977. Kerogen studies and geological interpretation. *J. Geochem. Explor., 7,* 79–100.

DOW, W. G. and O'CONNOR, D. I. 1979. Vitrinite reflectance—what, how and why. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 441.

DUNCAN, D. C. and SWANSON, V. E. 1965. Organic-rich shale of the United States and World Land Areas. *U.S. Geol. Surv. Circ., 523,* 30 pp.

DURAND, B. 1980. *Kerogen—Insoluble Organic Matter from Sedimentary Rocks.* London: Graham and Trotman, 550 pp.

DURAND, B.; MARCHAND, A.; AMIELL, J.; and COMBAZ, A. 1970. Etude de Kerogenes par RPE. In: *Advances in Organic Geochemistry.* R. Campos and J. Goni (eds.). London: Pergamon, 154–195.

EMERY, K. O. 1963. Oceanic factors in accumulation of petroleum. Frankfurt: *Proc. 6th World Petrol. Cong.*, Section I, Paper 42, PD2, 483–491.

ERDMAN, J. G. 1975. Geochemical formation of oil. In: *Petroleum and Global Tectonics.* A. G. Fischer and S. Judson (eds.). Princeton Univ. Press, 225–250.

ESPITALIÉ, J.; LAPORTE, J. L.; MADEC, M.; MARQUIS, F.; LEPLAT, P.; PAULET, J.; and BOUTEFOU, A. 1977. Méthode rapide de caracterisation des roches meres, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Rev. Inst. Fr. Petrol., 3,* 23–42.

EVANS, W. D.; MORTON, R. D.; and COOPER, B. S. 1964. Primary investigations of the oleiferous dolerite of Dyvika. In: *Advances in Geochemistry.* U. Colombo and G. D. Hobson (eds.). Oxford: Pergamon, 264–277.

FLORY, D. A.; LICHTENSTEIN, H. A.; BIEMANN, K.; BILLER, J. E.; and BARKER, C. 1983. Computer process uses entire GC–MS data. *Oil & Gas J.*, 17 Jan., 91–98.

FOSCOLOS, A. E. and POWELL, T. G. 1978. Mineralogical and geochemical transformation of clays during burial-diagenesis: relation to oil generation. In: *International Clay Conference.* M. M. Mortland and V. C. Farner (eds.). Amsterdam: Elsevier, 261–270.

FRIEDMAN, G. M. 1972. Significance of Red Sea in problem of evaporites and basinal limestones. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56,* 1072–1086.

FUCHTBAUER, H. 1967. Influence of different types of diagenesis on sandstone porosity. Mexico: *Proc. 7th World Petrol. Cong.*, 353–369.

FULLER, J. G. C. 1975. Jurassic source-rock potential and hydrocarbon correlation, North Sea. In: *Jurassic Northern North Sea Symposium.* K. Finstad and R. C. Selley (eds.). Oslo: Nor. Petrol. Soc., 18 pp.

GILL, W. D.; KHALAF, F. I.; and MASSOUD, M. S. 1979. Organic matter as indicator of the degree of metamorphism of the Carboniferous rocks in the South Wales coalfields. *J. Petrol. Geol., 1,* 39–62.

GOFF, J. C. 1983. Hydrocarbon generation and migration from Jurassic source rocks in the E. Shetland Basin and Viking Graben of the northern North Sea. *J. Geol. Soc. London, 140,* 445–474.

GOLD, T. 1979. Terrestrial sources of carbon and earthquake outgassing. *J. Petrol. Geol., 1,* 3–19.

GOLD, T. and SOTER, S. 1982. Abiogenic methane and the origin of petroleum. *Ener. Explor. and Exploit., 1,* 89–104.

GOLDHABER, M. 1978. Euxinic facies. In: *Encyclopedia of Sedimentology.* R. W. Fairbridge and J. Bourgeois (eds.). Stroudsberg, Pa: Dowdon, Hutchinson & Ross, 296–300.

GORDON, M.; TRACEY, R. I.; and ELLIS, M. W. 1958. Geology of the Arkansas Bauxite Region. *U.S. Geol. Surv.*, Prof. Paper No. 299, 268 pp.

GRANSCH, J. A. and EISMA, E. 1970. Characterization of the insoluble organic matter of sediments by pyrolysis. In: *Advances in Organic Geochemistry.* G. D. Hobson and G. Speers (eds.). Oxford: Pergamon, 407–426.

GRUNAU, H. R. 1983. Abundance of source rocks for oil and gas worldwide. *J. Petrol. Geol., 6*, 39–54.

GRUNAU, H. R. and GRUNER, U. 1978. Source rock and origin of natural gas in the Far East. *J. Petrol. Geol., 1*, 3–56.

GUANGMING, Z. and QUANHENG, Z. 1982. Buried-hill oil and gas pools in the North China basin. In: *The Deliberate Search for the Subtle Trap*. M. T. Halbouty (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 32, 317–336.

HALLAM, A. 1981. *Facies Interpretation and the Stratigraphic Record*. San Francisco: Freeman, 291 pp.

HEDBERG, H. 1936. Gravitational compaction of clays and shales. *Am. J. Sci., 31*, 241–287.

HOBSON, G. D. and TIRATSOO, E. N. 1981. *Introduction to Petroleum Geology*. Beaconsfield: Scientific Press, 352 pp.

HOEFS, J. 1980. *Stable Isotope Geochemistry*. New York: Springer-Verlag, 352 pp.

HOOD, A.; GUTJAHR, C. C. M.; and HEACOCK, R. L. 1975. Organic metamorphism and the generation of petroleum. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 59*, 986–996.

HOYLE, F. 1955. *Frontiers of Astronomy*. London: Heineman, 360 pp.

HUNT, J. M. 1961. Distribution of hydrocarbons in sedimentary rocks. *Geochem. Cosmochem. Acta, 22*, 37–49.

HUNT, J. M. 1968. How gas and oil form and migrate. *World Oil, 167*, No. 4, 140–150.

HUNT, J. M. 1977. Distribution of carbon as hydrocarbons and asphaltic compounds in sedimentary rocks. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 61*, 100–116.

HUNT, J. M. 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology*. San Francisco: Freeman, 617 pp.

HUNT, J. M. and JAMIESON, G. W. 1956. Oil and organic matter in source rocks of petroleum. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 40*, 477–488.

IKORSKIY, S. V. 1967. Organic substances in minerals of Igneous rocks of the Khibina massif. (Translated from Russian by L. Shapino and I. A. Breger, 1976.) McLean, Va: Clark Co., 155 pp.

JOHNSON IBACH, L. E. 1982. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 66*, 170–188.

JONES, R. W. 1978. Some mass balance and geologic constraints on migration mechanisms. In: *Physical and Chemical Constraints on Petroleum Migration*. W. H. Roberts and R. J. Cordell (eds.). Am. Assoc. Petrol. Geol. Course Notes, No. 8, A1–A43.

KIDWELL, A. L. and HUNT, J. M. 1958. Migration of oil in Recent sediments of Pedernales, Venezuela. In: *The Habitat of Oil*. L. G. Weeks (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., 790–817.

LEVORSEN, A. I. 1967. *Geology of Petroleum*. San Francisco: Freeman, 724 pp.

LINK, T. A. 1957. Whence came the hydrocarbons? *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 41*, 1387–1402.

LOPATIN, N. V. 1971. Temperature and geologic time as factors in coalification. *Akad. Nauk SSR Izv. Serv. Geol., 3*, 95–106.

MA LI, GE TAISHENG, ZHAO XUEPING, ZIE TAIJUN, GE RONG, and DANG ZHENRONG. 1982. Oil basins and subtle traps in the eastern part of China. In: *The Deliberate Search for the Subtle Trap*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: *Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 287–316.

MacDONALD, G. J. 1983. The many origins of natural gas. *J. Petrol. Geol., 5*, 341–362.

McAULIFFE, C. D. 1979. Oil and gas migration—chemical and physical constraints. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63*, 761–781.

McTAVISH, R. 1978. Pressure retardation of vitrinite diagenesis, offshore northwest Europe. London: *Nature, 271*, 648–650.

MAGARA, K. 1968. Compaction and migration of fluids in Miocene mudstone, Nagaoka plain, Japan. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 52*, 2466–2501.

MAGARA, K. 1977. Petroleum migration and accumulation. In: *Developments in Petroleum Geology*. G. D. Hobson (ed.)., 83–126.

MAGARA, K. 1979. Structured water and its significance in primary oil migration. *Can. Petrol. Geol. Bull., 27*, 87–93.

MAGARA, K. 1981. Possible primary migration of oil globules. *J. Petrol Geol., 3*, 325–331.

MARCHAND, A.; LIBERT, P. A.; and COMBAZ, Z. 1969. Essai de caracterisation physico-chimique de la diagenesis de quelques roches organique, biologiquement homogenes. *Rev. Inst. Petrol., 24*, 3–20.

MEADE, R. H. 1966. Factors influencing the early stages of the compaction of clays and sands—review. *J. Sedim. Petrol., 36*, 1085–1101.

MENDELEEF, D. 1877. Entstehung und Vorkommen des Mineralols. *Deut. Chem. Ges. Ber., 10*, 229.

MENDELE'EV, D. 1902. *The Principles of Chemistry*, vol. 1. Second English edition translated from the sixth Russian edition. New York: Collier, 552 pp.

MOMPER, J. A. 1978. Oil migration limitations suggested by geological and geochemical considerations. In: *Physical and Chemical Constraints on Petroleum Migration*. W. H. Roberts and R. J. Cordell (eds.). Am. Assoc. Petrol. Geol. Course Notes, No. 8, B1–B60.

MUELLER, G. 1963. Properties of extraterrestrial hydrocarbons and theory of their genesis. Frankfurt: Proc. *6th World Petrol. Cong.*, Section 1, Paper 29, 14 pp.

NEEV, D. and EMERY, K. O. 1967. The Dead Sea—depositional processes and environments of evaporites. *Israel Geol. Surv. Bull., 41*, 147 pp.

NORTH, F. K. 1979. Episodes of source-sediment deposition, Part 1. *J. Petrol. Geol., 2*; 199–218.

NORTH, F. K. 1980. Episodes of source-sediment deposition, Part 2. The episodes in individual close up. *J. Petrol. Geol., 2*, 323–338.

NORTH, F. K. 1982. Review of Thomas Gold's Deep-Earth-Gas hypothesis. *Ener. Explor. & Exploit., 1*, 105–110.

OUDIN, J. L. 1976. Etude geochimique du bassin de la mer du Nord. *Bull. Du Centre de Recherches de Pau., 10*, 339–358.

PALCIAUSKUS, V. V. and DOMENICO, P. A. 1980. Microfracture development of compacting sediments: relation to hydrocarbon-maturation kinetics. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64*, 927–937.

PARRISH, J. T. 1982. Upwelling and petroleum source beds, with reference to Paleozoic. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 66*, 750–774.

PETERSIL'YE, Ya. A. 1962. Origin of hydrocarbon gases and dispersed bitumens of the Khibina alkalic massif. (Translated from Russian.) *Geochem., 1*, 14–30.

PEYVE, A. V. 1956. General characteristics and spatial characteristics of deep faults. *Akad. Nauk. SSSR. Izv., 1*, 90–106.

PHILIPPI, H. W. 1975. On the depth, time and mechanism of petroleum migration. *Geochem. Cosmochem. Acta, 29*, 1021-1049.

PORFIR'EV, V. B. 1974. Inorganic origin of petroleum. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58*, 3-33.

POWERS, M. C. 1967. Fluid-release mechanisms in compacting marine mudrocks and their importance in oil exploration. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 51*, 1240-1254.

PRATT, W. E. 1942. *Oil in the Earth*. Lawrence: University of Kansas Press, 105 pp.

PRICE, L. C. 1976. Aqueous solubility of petroleum as applied to its origin and primary migration. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60*, 213-244.

PRICE, L. C. 1978. New evidence for hot, deep origin and migration of petroleum. In: *Physical and Chemical Constraints on Petroleum Migration*. W. H. Roberts and R. J. Cordell (eds.). Am. Assoc. Petrol. Geol. Course Notes, No. 9, F9-F10.

PRICE, L. C. 1980. Shelf and shallow basin oil as related to hot-deep origin of petroleum. *J. Petrol. Geol., 3*, 91-115.

PRICE, L. C. 1981a. Primary petroleum migration by molecular solution: consideration of new data. *J. Petrol. Geol., 4*, 89-101.

PRICE, L. C. 1981b. Aqueous solubility of crude oil to 400°C and 2,000 bars pressure in the presence of gas. *J. Petrol. Geol., 4*, 195-223.

PRICE, L. C. 1983. Geologic time as a parameter in organic metamorphism and vitrinite reflectance as an absolute paleogeothermometer. *J. Petrol. Geol., 6*, 5-38.

PROSHLYAKOV, B. K. 1960. Reservoir properties of rocks as a function of their depth and lithology. *Geol. Neft. i Gaza, 4*, 24-29. Assoc. Tech. Serv. Translation R. J. 3421.

PUSEY, W. C. 1973a. How to evaluate potential gas and oil source rocks. *World Oil, 176* (5), 71-75.

PUSEY, W. C. 1973b. Paleotemperatures in the Gulf Coast using the ESR-kerogen method. *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans., 23*, 195-202.

ROBERTS, W. H. and CORDELL, R. J. 1980. *Problems of Petroleum Migration*. Studies in Geology No. 10. Am. Assoc. Petrol. Geol., 273 pp.

ROBINSON, W. E. 1976. Origin and characteristics of Green River oil shale. In: *Oil Shale*. G. V. Chilingarian and T. F. Yen (eds.). Amsterdam: Elsevier, 61-80.

ROEDDER, E. 1967. Fluid inclusions in samples of ore deposits. In: *Geochemistry of Hydrothermal Deposits*. H. L. Barnes (ed.). New York: Holt, Rinehart & Winston, 151-172.

SCHIDLOWSKI, M.; EICHMANN, R.; and JUNGE, C. E. 1974. Evolution des iridischen Sauerstof-Budgets und Entwicklung de Erdatmosphare. *Umschau., 22*, 703-707.

SCHLANGER, S. O. and CITA, M. B. 1982. *Nature and Origin of Cretaceous Carbon-Rich Facies*. London: Academic Press, 250 pp.

SELLEY, R. C. 1980. Economic basement in the northern North Sea. In: *Symposium on the Reservoir Rocks of the Northern North Sea*. Oslo: Norweg. Petrol. Soc., *xx*, 22 pp.

STAPLIN, F. L. 1969. Sedimentary organic matter, organic metamorphism, and oil and gas occurrence. *Can. Petrol. Geol. Bull., 17*, 47-66.

STUDIER, M. H.; HAYATSU, R.; and ANDERS, E. 1965. Organic compounds in Carbonaceous chondrites. *Science, 149*, 1455-1459.

SUBBOTIN, S. I. 1966. Upper mantle and inorganic oil. In: *Problems in the Origin of Oil.* Kiev. Izd. Nauk. Dumka., 52–62.

SUGISAKI, R.; IDO, M.; TAKEDA, H.; and ISOBE, Y. 1983. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity. *J. Geol., 91,* 239–258.

TAPPAN, H. and LOEBLICH, A. R. 1970. Geobiologic implications of fossil phytoplankton evolution and time/space distribution. In: *Symp. Palynology of Late Cretaceous and Early Tertiary.* R. M. Kosanke and S. T. Cross (eds.). Michigan State Univ. Geol. Soc., 247–340.

TISSOT, B. P. 1977. The application of the results of organic chemical studies in oil and gas exploration. In: *Developments in Petroleum Geology,* vol. 1. G. D. Hobson (ed.). London: Applied Science Publishers, 53–82.

TISSOT, B. P. 1979. Effects on prolific petroleum source rocks and major coal deposits caused by sea level changes. London: *Nature, 277,* 377–380.

TISSOT, B. P. and WELTE, D. H. 1978. *Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration.* Berlin: Springer-Verlag, 538 pp.

VAIL, P. R.; MITCHUM, R. M.; and THOMPSON, S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 3. In: *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Accumulations.* C. Payton (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. *26,* 63–82.

VAN HINTE, J. E. 1978. Geohistory analysis—application of micropaleontology in exploration geology. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62,* 201–202.

WAPLES, D. W. 1980. Time and temperature in petroleum exploration. *Am. Assoc. Petrol. Geol., 64,* 916–926.

WAPLES, D. W. 1981. Organic Geochemistry for Exploration Geologists. Minneapolis: CEPCO, 144 pp.

WAPLES, D. W. 1983. Reappraisal of anoxia and organic richness with emphasis on Cretaceous of North Atlantic. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 67,* 963–978.

WELTE, D. H. 1972. Petroleum exploration and organic geochemistry. *J. Geochem. Explor., 1,* 117–136.

WELTE, D. H.; HAGEMANN, H. W.; HOLLERBACH, A.; LEYTHAEUSER, D.; and STAHT, W. 1975. Correlation between petroleum and source rock. Tokyo: *Proc. 9th World Petrol. Cong.,* Geology, vol. 2. London: Applied Science Publishers, 179–191.

WHITE, D. A. and GEHMAN, H. M. 1979. Methods of estimating oil and gas resources. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 2183–2203.

WHITE, D. E. and WARING, G. A. 1963. Volcanic emanations. In: *Data of Geochemistry,* Second Edition. U.S.G.S. Prof. Paper 440–K, 29 pp.

الفصل السادس

المكمن Reservoir

أظهر الفصل الأول أن احدى المتطلبات الخمسة اللازمة للتراكم الاقتصادي للهايدروكاربونات هي توفر المكمن البترولي. ومن الناحية النظرية، فان أية صخرة يمكن أن تكون مكمناً للنفط أو الغاز. ولكن في التطبيق العملي، فأن الصخور الرملية والجيرية تحتوي على الاحتياطات الرئيسية المعروفة، رغم أن بعض الحقول قد توجد في صخور السجيل shales وفي صخور نارية متنوعة. وينبغي للصخرة كي تكون مكمنا بتروليا، أن تمتلك صفتين رئيستين، فهي يجب أن تمتلك مسامات كي تحتوي النفط أو الغاز، ويجب أن تكون المسامات مرتبطة مع بعضها كي تسمح بحركة الموائع من خلالها، بكلمات أخرى، يجب أن تتوفر الصخرة على نفوذية.

يتعلق هذا الفصل بطبيعة المكامن الهايدروكاربونية، أي مع صفات المصيدة الداخلية. وهو يبتدأ بوصف المسامية والنفوذية ويناقش علاقتهما بنسيج الرسوبيات. ويُتبع هذا النقاش بوصف للكيفية التي قد تقلل أو تزيد بها العمليات التحويرية أداء المكمن. ويتبع ذلك، فقرة عن استمرارية المكامن الأفقية والعمودية، وحساب الاحتياطي النفطي والغازي. ويختتم الفصل بمعالجة للطرق المختلفة لانتاج الهايدروكاربونات من المكمن.

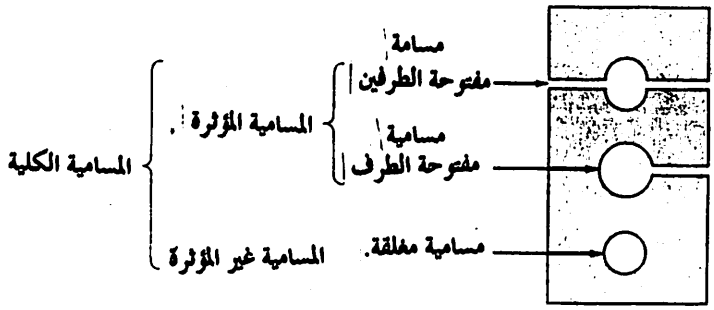
المسامية POROSITY

تعريفات وتسميات

المسامية هي أولى صفتي المكمن الأساسيتين. أن المسامات أو الفراغات داخل الصخرة تملأ عموما بالماء الحبيس Connate Water ولكنها تحتوي على النفط أو الغاز في الحقل البترولي. ويمكن التعبير عن المسامية أما بنسبة الفراغات، التي تمثل نسبة الفراغات الى الصخرة الصلبة، أو الأكثر شيوعا، كنسبة مئوية.

$$\text{المسامية } (\%) = \frac{\text{حجم الفراغات}}{\text{حجم الصخرة الكلي}} \times ١٠٠$$

ويُرمز للمسامية عادة بالحرف الاغريقي (ϕ) فاي Phi. والمسامات ذات ثلاثة أنواع من الناحية الشكلية: مفتوحة الطرفين Catenary ومسدودة الطرف Cul-de-sac والمغلقة Closed (الشكل ٦-١). وتُعرف المسامات مفتوحة الطرفين بأنها تلك التي تتصل مع المسامات الأخرى بأكثر من ممر عنقي Throat Passage. أما المسامات مسدودة الطرف أو المسامات الميّتة فان لها ممراً عُنقياً واحداً يربطها مع مسامة أخرى. وليس للمسامات المغلقة أي اتصال مع المسامات الأخرى.



الشكل ٦-١: أنواع المسامات الثلاثة الاساسية.

تُكّون المسامات مفتوحة الطرفين والمسامات مسدودة الطرف المسامية المؤثرة Effective Porosity، بمعنى أنه يمكن للهايدروكاربونات أن تخرج منها. ويمكن للهايدروكاربونات الموجودة في المسامات مفتوحة الطرفين أن تُشطف خارجاً بقوة دفع الماء الطبيعية أو الاصطناعية. أما المسامات مفتوحة الطرف فأنها لا تتأثر بالشطف Flushing، ولكنها يمكن أن تنتج بعض النفط أو الغاز بالتمدد عند انخفاض ضغط المكمن. والمسامات المغلقة غير قادرة على انتاج الهايدروكاربونات (أن مثل هذا النفط أو الغاز يكون قد احتل مسامة مفتوحة أغلقت لاحقاً بتأثير الرُص Compaction أو التسميت). أن نسبة المسامية الكلية الى المسامية المؤثرة مهمة جدا لأنها ترتبط على نحو مباشر بنفوذية الصخرة.

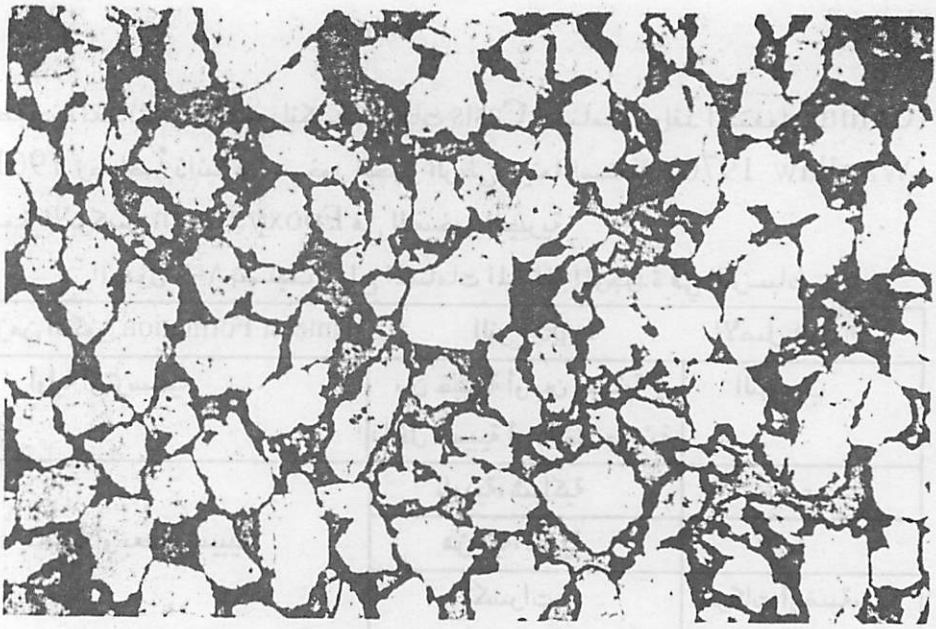
ان حجم المسامات وهندسيتها Geometry وقُطر الممرات العنقية الرابطة ودرجة تشابكها Tortuosity تؤثر جميعا في انتاجية المكمن. ويصعب عادة تحليل هندسية المسامة واستمراريتها. وفي بعض الدراسات تُملأ المسامات بمائع يترك ليتصلب، ثم تذاب

الصخرة بعد ذلك بالحامض لتكشف طبعات Casts المسامات. ولقد استعمل (Collins 1961) رصاصاً ذائباً في صخور الحجر الرملي، بينما استعمل (Wardlaw 1976) صمغ الأبوكسي Epoxy Resin في الصخور الجيرية.

الجدول ٦-١ تصنيف أنواع المسامات المختلفة الموجودة في الترسبات

زمن التكون Time of Formation	النوع Type	الأصل Origin
أولية أو ترسيبية	بين حبيبية أو بين جزيئية داخل حبيبية أو داخل جزيئية	الترسيب
ثانوية أو بعد ترسيبية	بلورية، شباكية	تسميت
	هزيمية، قالبية	اذابة
	تكسرات	حركات أرضية، رَص، تميؤ، تحوير

اقترحت العديد من الخطط لتصنيف أنواع المسامات على سبيل المثال، (Levorsen, 1967, Choquette and Pray, 1970, Robinson, 1966) . ويمكن تعريف نوعين من المسامات اعتمادا على وقت تكونها (Murray, 1960): المسامات الأولية Primary Pores هي تلك المسامات التي تتكون عند ترسيب الترسبات، والمسامات الثانوية Secondary Pores التي تنشأ في الصخرة بعد مرور بعض الوقت من ترسيبها، (الجدول ٦-١). ويمكن تقسيم المسامات الأولية الى نوعين ثانويين: المسامات بين الجزيئية Interparticle (بين الحبيبية Intergranular). والمسامية داخل الجزيئية Intraparticle (أو داخل الحبيبات Intragranular). وتوجد المسامات البينية مبدئيا في كل الترسبات، ولكنها غالباً ما تفقد بسرعة في الأطيان والرمل الجيري بسبب التأثير المترابط لكل من الرَّص والترسيب. ويُحفظ قدرٌ كبيرٌ من المسامية الموجودة في المكامن الرملية على شكل مسامية بينية أولية (الشكل ٦-٢). وتوجد المسامات الداخلية بشكل عام ضمن الحبيبات الهيكلية للرمال الجيرية (الشكل ٦-٢) وبذلك فانها غالباً ما تكون من نوع المسامات مسدودة الطرف. وبسبب الرَّص والتسميت فانها غائبة بشكل عام في المكامن الجيرية.



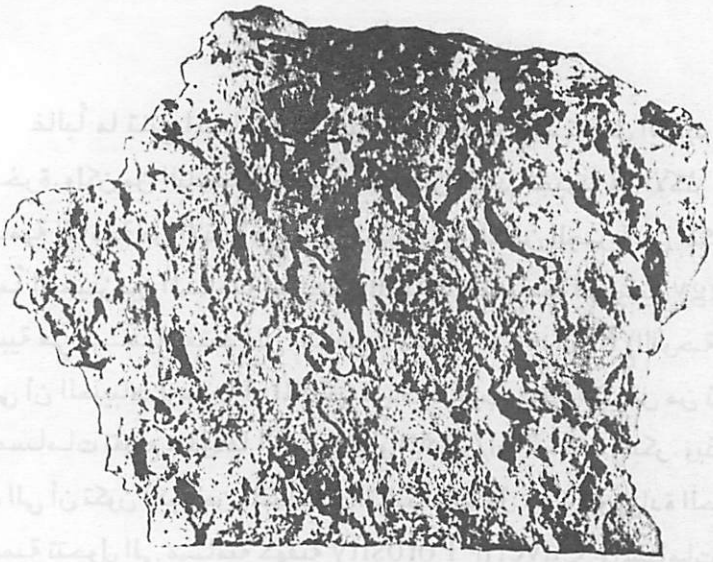
A

B

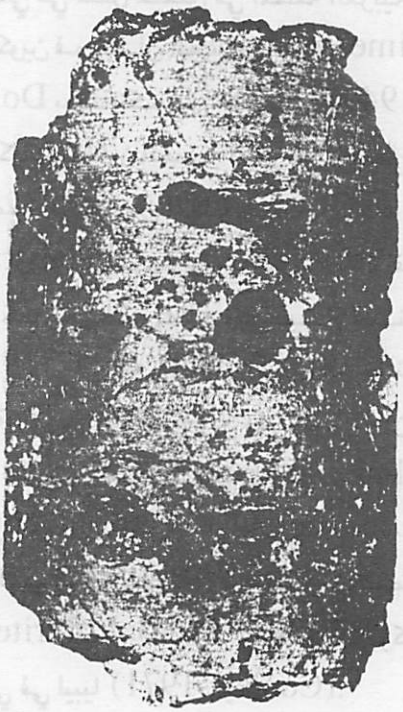
الشكل ٦-٢: شرائح صخرية توضح أنواع المسامية الاولية المختلفة: (أ) المسامية البينية في تكوين برنت الرملي من الجوراسي الوسيط (بحر الشمال، المملكة المتحدة). مساحة الحقل الظاهر نحو ١ سم . (ب) مسامية بينية وداخلية (ضمن المتحجرات) في حجر جيري هيكلي دملقي. مساحة الحقل الظاهرة نحو ١ سم.

غالباً ما تنتج المسامات الثانوية بفعل الاذابة. وقد تغسل العديد من المعادن خارج الصخرة. ولكن من الناحية الحجمية يُعَدّ ذوبان المواد الجيرية هو الأكثر أهمية. وبذلك فان المسامية الناتجة من الاذابة هي أكثر شيوعاً في المكامن الجيرية من المكامن الرملية. ويتمّ عموماً التمييز بين المسامية القالبية Moldic والمسامية الهزيمية Vuggy . فالمسامية القالبية هي مسامية تعتمد على النسيج Fabric-Selective (اللوحة ٤ والشكل ٦-٣)، بمعنى أن الحبيبات لوحدها أو الملاط بمفرده قد أذيب. وعلى النقيض من ذلك، فان الهزيمات هي مسامات تقطع حدودها الحبيبات أو الملاط و/أو السمنت المبكر. وبذلك فان الهزيمات تميل الى أن تكون أكبر من المسامات القالبية (الشكل ٦-٤). وبزيادة الحجم فان المسامية الهزيمية تتحول الى مسامية كهفية Cavern Porosity. والمسامات الكهفية هي تلك المسامات الكبيرة الى حد أنها تسبب سقوط عضد الحفر String مسافة نصف متر أو أن تضم مهندس طين حفر جائم. والأمثلة على المسامية الكهفية معروفة من تكوين (العرب-دي) Arab D الجوراسي في حقل عبقيق في المملكة العربية السعودية (McConnell, 1951) وكذلك من تكوين فوسلمان الجيري Fusselman limestone من حقل دولارهايد Dollarhide بولاية تكساس الأمريكية (Stormont, 1949)، فكلاهما يحتوي على مسامات كهفية تتجاوز الخمسة أمتار في الارتفاع.

ولا تنتج المسامية الثانوية من الاذابة حسب بل كذلك بتأثير التسميت. فالمسامات الشباكية Fenestral Pores توجد حيثما تكون هنالك "فاصلة Gap" أولية أو متزامنة في هيكل الصخرة أكبر من الفراغات حبيبية الاستناد "Grain-supported interstices" (Tebbutt et al., 1965). فاذا ما تحدثنا بشكل محدد، فان هذه المسامات ستبدو أولية أكثر من كونها ثانوية. وفي الحقيقة أن المسامية الشباكية هي صفة مميزة للحجر الجيري المكريتي البلتي المستنقعي Pelmicrites الذي يؤدي فيه نزع الماء (الزموهة) Dehydration الى تقلص الرقاقات Laminae وانبعاجها. ولقد وصف هذا النوع من النسيج من الترسبات الجيرية المستنقعية من العصر الترياسي في منطقة الألب حيث تسمى لوفرايت Loferite (Fischer, 1964) وكذل من الأطيان البلتية المدلتة من العصر الباليوسيني في ليبيا (Conley, 1971).



الشكل ٦-٣: حجر بورتلاند الجيري (الجوراسي الاعلى) يظهر مسامية قالبية أحيائية بسبب ذوبان الاصداف. جزيرة بورتلاند، دورست، المملكة المتحدة.



الشكل ٦-٤: لباب من تكوين دولومايت الزخشتاين (البرمي الاعلى) يظهر مسامية هزيمية (بحر الشمال، المملكة المتحدة).

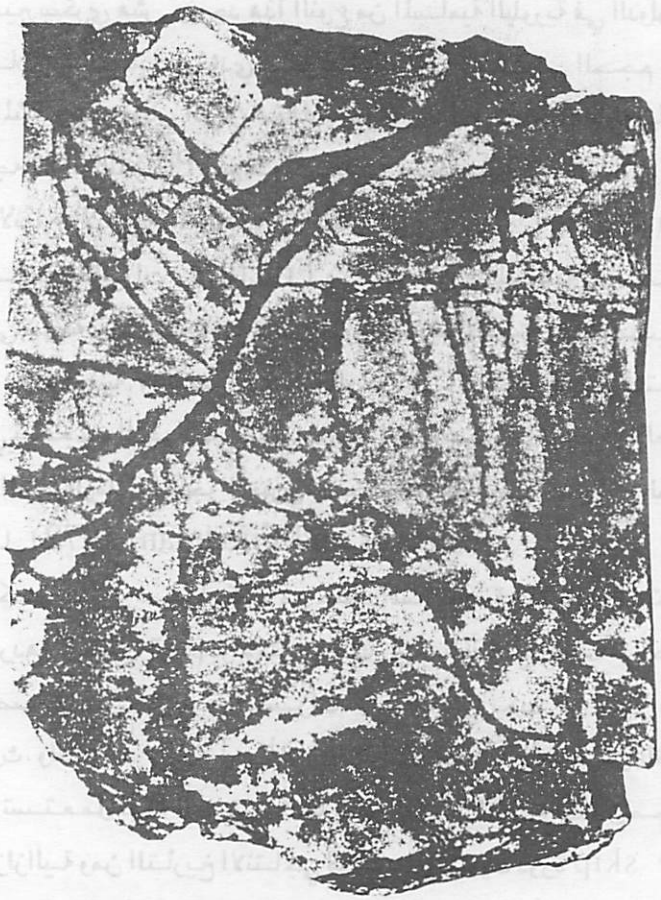
تُعَد المسامية البلورية Intercrystalline التي تطلق على المسامات الموجودة بين الأوجه البلورية للصخور المتبلورة أكثر أنواع المسامية الثانوية أهمية قياساً الى المسامية الشباكية. ولا تحتوي معظم أنواع الصخور الجيرية معادة التبلور أية مسامية مهمة. أما الدولومايت البلوري من جهة أخرى، فغالباً ما يحتوي على مسامية مرتفعة،

مع وجود نسيج سكري هش. ويوجد هذا النوع من المسامية البلورية في الدولومايت البلوري الناتج من احلال الكالسايت. وتؤدي عملية الدلمتة الى تقلص في الحجم الكلي الأصلي بمقدار ١٣ بالمئة، وبذلك يؤدي الى زيادة المسامية. وتميل المسامات البلورية الى أن تكون متعددة الأوجه Polyhedral، مع قنوات عنقية صفيحية الشكل sheet-like على النقيض من الأنواع الأنبوبية Tubular الأكثر شيوعا، (Wardlaw, 1976).

ان مسامية التكسرات Fracture هي آخر أنواع المسامية الرئيسية التي سوف يتم تناوله. وهي مهمة جدا ليس لأنها تُزيد القدرة المخزنية للمكمن ولكن بسبب المقدار الذي يمكن أن تُزيد به النفوذية. والتكسرات نادرة الوجود في الترسبات غير المتماسكة رخوة التسميت التي تستجيب للاجهاد في انسياب مرن، وهي يمكن أن توجد في الصخور الهشة Brittle، لا الحجر الرملي والحجر الجيري حسب، ولكن كذلك في السجيل والصخور النارية والمتحولة أيضا. (Stearns and Friedman, 1972).

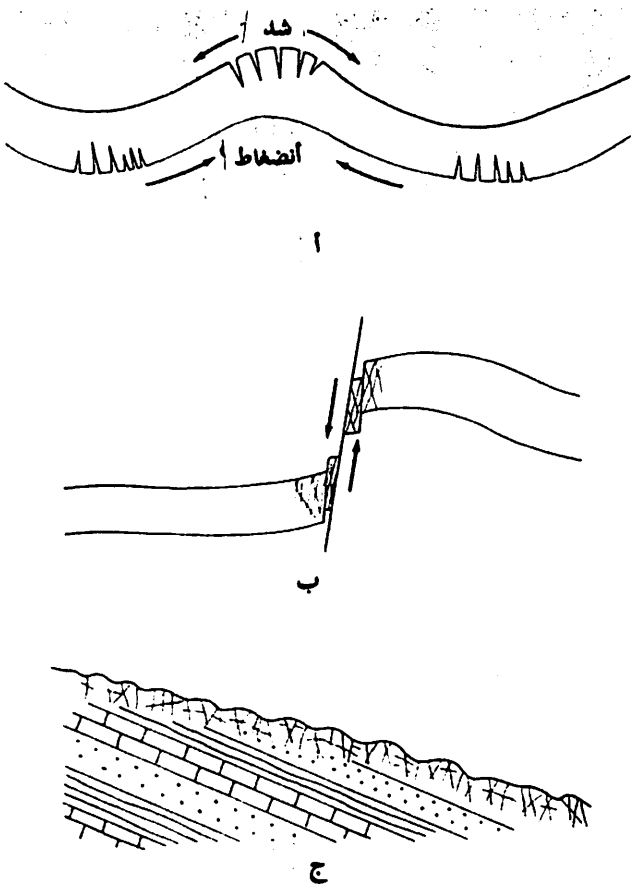
لأن التكسرات أكبر حجما بكثير من معظم المسامات، فانها نادراً ما تصلح للدراسة من اللباب بمفردها (الشكل ٦-٥). والأكثر من ذلك، أن عملية قطع اللباب في حد ذاتها تؤدي الى تكسر الصخور. ان مثل هذه التكسرات الاصطناعية يجب أن تُميز عن المسامات طبيعية الحدوث. ولقد حددّ (Kulander et al., 1979) العديد من الظواهر الهامة التي يمكن أن تستعمل لهذا الغرض. كما يمكن تمييز التكسرات من مجسات الآبار والمعطيات الزلزالية ومن التأريخ الانتاجي للبئر. ان تفويت دورة Cycle skip على المجسات الصوتية يمكن أن تنتج من التكسرات (أو من ظواهر أخرى)، مثلما تمت مناقشة ذلك على صفحة ٩٤. ان نمطاً اعتباطيا من نوع حقيبة المسامير Bag o' nails motif على مجس الميل يمكن ان ينتج بتأثير التكسرات (ومن ظواهر أخرى أيضا)، مثلما تمت مناقشة ذلك في صفحة ٧٤، كما يمكن "رؤية" التكسرات بمجس التلفاز البئري Borehole TV log. وقد تُعزى السرع الواطئة بشكل شاذ في المعطيات الزلزالية الى وجود

التكسرات، رغم أن هذا التأثير، مرة أخرى، قد يعزى الى أنواع أخرى من المسامية و/أو الى وجود الغاز. وغالبا ما يدل الانتاج المبدئي المرتفع المتبوع بانخفاض مفاجئ في الضغط وتناقص مفاجئ في معدل الانسياب في فحوصات الآبار الانتاجية على وجود مسامية تكسرات.



الشكل ٥-٦: لباب متكسر من مجموعة غارغاف الرملية (الكامبرو-أوردوفيشي) .

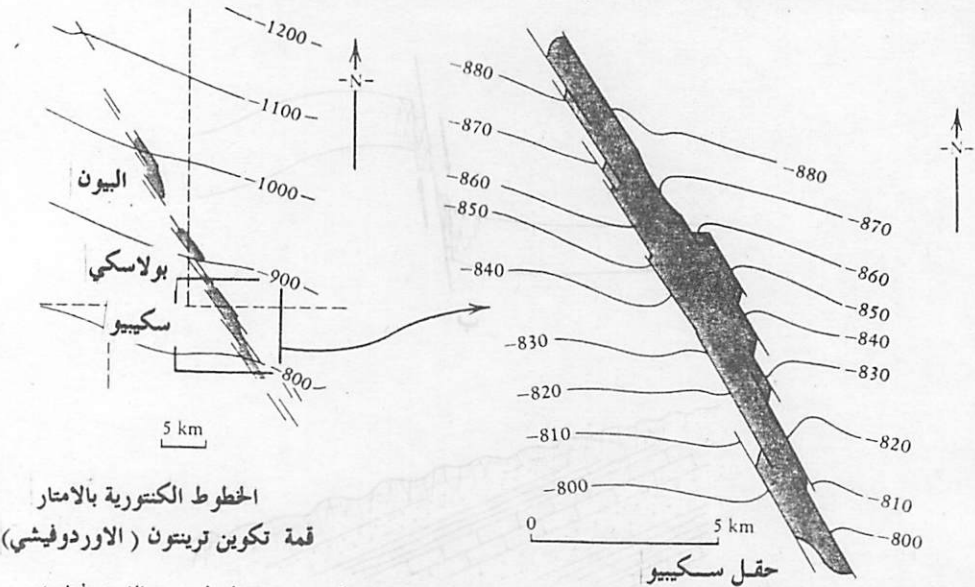
تميل الصخور الهشة الى التكسر في ثلاثة أوضاع جيولوجية، (الشكل ٦-٦). فمنظومات التكسرات قد تتوسع حيثما تتعرض الطبقات الى شد Tension على ذُرى



الشكل ٦-٦: مرتسم تخطيطي للطرق المختلفة التي توجد بها مسامية التكسرات. (أ) قد تنشأ التكسرات على ذرى الطيات المحدبة وعلى قيعان الطيات المقعرة (ب) قد تتكون التكسرات بجوار الفوالق (ج) قد توجد التكسرات تحت سطوح عدم التوافق.

الطيات المحدبة وقيعان الطيات المقعرة. ولقد أظهرت الدراسات التفصيلية التي أجريت على التكشفات الصخرية وجود مضاهاة بين شدة التكسرات وبين توجيه Orientation الطية المحدبة ونمطها البنيوي Structural style واتجاهها Trend (انظر على سبيل المثال Harris et al. 1969) وغالبا ما توجد التكسرات بجوار الفوالق. وفي بعض الحالات قد يرتبط حقل ما على نحو مباشر بفالق رئيسي وبالتكسرات المرتبطة معه (الشكل ٦-٧). كما توجد مسامية التكسرات أيضا تحت سطوح عدم التوافق unconformities، وخصوصا

في الصخور الجيرية حيث يمكن أن تتوسع التكسرات بتأثير الاذابة الكارستية karstic solution. وتوجد مسامية التكسرات كذلك في الصخور الرملية، على سبيل المثال في حقل بوكان Buchan Field في بحر الشمال، حيث تقع فيه مكامن الديفوني الرملية تحت سطح عدم التوافق الكيمرياني Cimmerian (Butler et al., 1976).



الشكل ٦-٧: خارطة لحقل متجه سكيبو-بولاسكي-اليون . ينتج هذا الحقل من تكوين ترينتون الدولوميتي (الاوردوفيشي) .

(ب) تفاصيل المنطقة المحددة في (أ) . (عن Levorsen, ١٩٦٧).

قياس المسامية:

يمكن قياس المسامية بثلاثة طرق: بشكل مباشر من اللباب، وبشكل غير مباشر من مجسات الآبار الجيوفيزيائية ومن المعطيات الزلزالية. ان آخر اثنتين من هذه الطرق قد تم شرحهما على الصفحتين ٩٠ و١٢٠ على التوالي. ويتعامل العرض التالي فقط مع قياس المسامية من اللباب. ان السبب الرئيسي لقطع اللباب هو قياس الصفات البتروفيزيائية للمكمن. ان مسامية عينة اللباب قد تقاس في المختبر باستعمال طرق عديدة (Anderson, 1975, Monicard, 1981). وبالنسبة للصخور المتجانسة، مثل العديد من أنواع الحجر الرملي، فان نموذجاً بمقياس ٣٠ ملم مكعب أو ما يقرب من ذلك، قد يقطع أو يكسر من اللباب. أما بالنسبة للمكامن غير المتجانسة، وبضمنها الحجر الرملي، فان تحليل نموذج

اللباب بأكمله يكون ضروريا عادة. وسوف يتم وصف العديد من طرق قياس المسامية الأكثر شيوعا بشكل مختصر في الفقرات التالية:

طريقة وشبيرن-بنتنغ *Washburn-Bunting Method*

ان احدى أقدم وأبسط الطرق لقياس المسامية هي تقنية تمدد الغاز التي وصفت من قبل كل من وشبيرن وبنتنغ عام ١٩٢٢. والجهاز الرئيسي موضح في الشكل ٦-٨. ويتم استخراج الهواء الموجود داخل المسامات في العينة عندما يخلق تخلخل بخفض ورفع فقاعة الزئبق. ويمكن قياس مقدار الهواء المستخرج في السّحاحة Burette ومن ثم فانّ:

$$\text{المسامية } (\%) = \frac{\text{حجم الغاز المستخرج}}{\text{حجم العينة الكلي}} \times ١٠٠$$

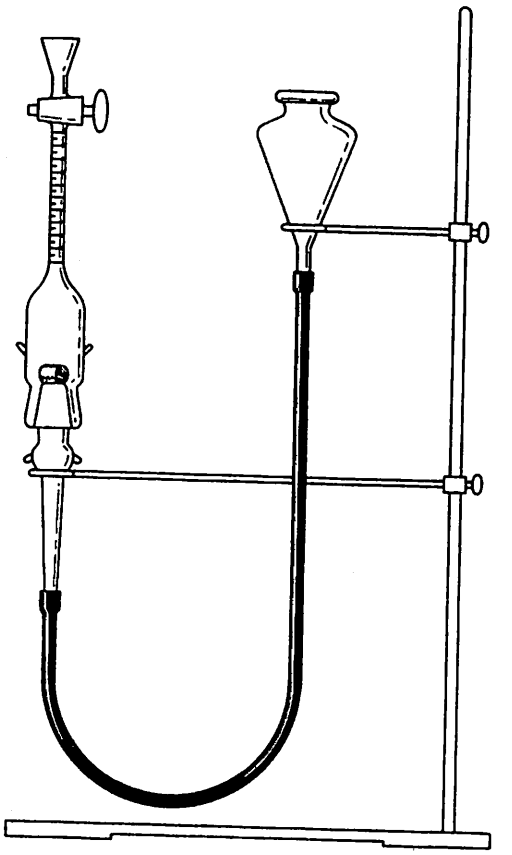
يجب أن يحدد الحجم الكلي بشكل منفصل وفق طريقةأخرى تتضمن تطبيق مبدأ أرخميدس للازاحة على العينة عندما تُغْمس كليا في الزئبق.

طريقة قانون بويل *Boyles Law Method*

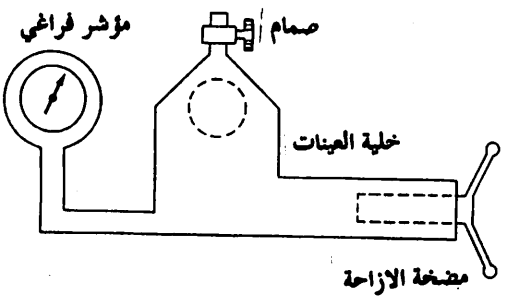
يمكن تطبيق قانون بويل (الضغط × الحجم = ثابت) على قياس المسامية بطريقتين. تتلخص احدى الطرق بقياس حجم المسامات بختم العيّنة في وعاء ضغط، ومن ثم تقليل الضغط بمقدار معين، وقياس الزيادة الحاصلة في حجم الغاز المخزون. وبشكل معكوس، يمكن قياس حجم الحبيبات، واذا عرف الحجم الكلي، عندها يمكن تحديد المسامية. أن مقياس روسكا لقياس المسامية Ruska Porosimeter هو جهاز شائع ويعتمد على هذه التقنية (الشكل ٦-٩).

النفوذية Permeability

المتطلب الأساسي الثاني بالنسبة للصخور المكمنية هو النفوذية، فالمسامية وحدها لا تكفي، بل أن المسامات يجب أن ترتبط مع بعضها. والنفوذية هي قدرة الموائع على المرور خلال المادة المسامية.



الشكل ٦-٨: جهاز واشبيرن-هنتغ لقياس المسامية بطريقة تمدد الغاز.



الشكل ٦-٩: مقياس المسامية حسب قانون بويل.

أنجز العمل الأصلي المتعلق بالنفوذية من قبل هـ. دارسي H. Darcy الذي درس معدلات الأنسياب في ينابيع مدينة ديجون في فرنسا (Darcy, 1856) ولقد تم تطوير عمله من قبل Muskat and Botset, Muskat and (Botset, 1931) Botset, 1931, Muskat, 1973) ولقد تمت صياغة قانون دارسي على النحو التالي:

$$Q=\frac{K(P_1-P_2)A}{\mu L}$$

حيث أن:

حيث: Q = معدل الانسياب.

K = النفوذية.

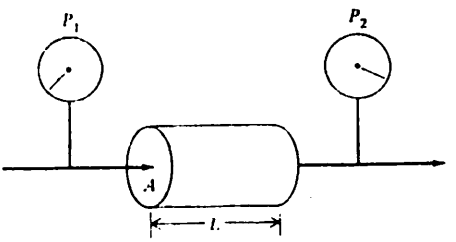
(P_1-P_2) = انخفاض الضغط عبر العيّنة.

A = مساحة المقطع العرضي للعيّنة.

L = طول العيّنة.

m = لزوجة المائع.

يوضح الشكل (٦-١٠) الترتيب الأساسي لقياس النفوذية. ان وحدة قياس النفوذية هي الدارسي، التي تُعرف بأنها النفوذية التي تسمح بانسياب مائع ذي لزوجة تبلغ ١سم/ثانية بتأثير انخفاض في الضغط مقداره ١ ضغط جوي/سنتمتر. ولأن لأغلب المكامن نفوذية أقل بكثير من الدارسي، عندها فان من الشائع استعمال وحدة الملي دارسي (md) . وأن معدلات قيم النفوذية في المكامن هي بحدود ٥ الى ٥٠٠ ملي دارسي. ويرمز للنفوذية عادة بالحدف اللاتيني (K).



الشكل ٦-١٠: الترتيبات الاساسية لقياس النفوذية .

ينطبق قانون بويل عندما لا يكون هنالك تفاعل كيميائي بين المائع والصخرة، وعندما تملأ حالة واحدة من المائع المسامات كليا. ويكون الوضع أكثر تعقيدا بكثيرفي حالات المزج بين النفط والغاز، رغم أنه يفترض أن معادلة من نوع قانون دارسي تنطبق على مثل هذه الحالة. يعتمد معدل الانسياب على نسبة النفوذية الى اللزوجة. وبذلك فان مكامن الغاز قد تكون قادرة على الانسياب بمعدلات تجارية بقيم نفوذية لا تتجاوز بضعة وحدات من الملي دارسي، في حين أن مكامن النفط تحتاج الى قيم نفوذية دنيا بحدود عشرات الوحدات من الملي دارسي. ولهذا السبب تقاس النفوذية في المختبر باستعمال غاز خامل بدلا من المائع. وتحت بعض الظروف مثل صغر أبعاد المسامات، ووجود غازات ذات كثافات واطئة جدا، ووجود ممرات كبيرة حرة لمرور جزيئات الغاز فانه قد لا تتم تلبية ظروف انعدام السرعة الاعتيادية وعدم وجود الانزلاق عند السطح الصلب. أن هذا هو تأثير كلينكبيرغ Klinkenberg effect ويصبح التصحيح ضروريا لاعادة احتساب نفوذية الصخرة بالنسبة للهواء مقاسة في المختبر قياسا الى النفوذية التي تظهرها بالنسبة لمائع أو لغاز عالي الكثافة (Klinkenberg, 1941). وقد يتراوح هذا التصحيح من ١ الى ٢ بالمئة بالنسبة للصخور ذات النفوذية المرتفعة الى ٧٠ بالمئة للصخور ذات النفوذية الواطئة.

يندر أن تكون قيم النفوذية نفسها في كل الاتجاهات داخل الصخرة (أنظر صفحة ٢٣٨). فالنفوذية العمودية بشكل عام أوطأ بكثير من النفوذية الافقية قياسا الى التطبق. وبذلك فأن من المعتاد أن تقاس النفوذية من السدادات في كلا الاتجاهين.

عندما تتشبع الفراغات البينية بحالة منفردة من المائع كليا، يطلق عندئذ على النفوذية اسم النفوذية المطلقة Absolute أو النفوذية المحددة أو المعيّنة Specific وتعطى عادة البعد (L^2). وتشير النفوذية المؤثرة Effective الى التشبعات التي هي أقل من ١٠٠ بالمئة. وتستعمل الرموز ko, kg, kw, للدلالة على النفوذية المؤثرة قياسا الى الماء والغاز والبترول على التوالي. تتراوح النفوذية المؤثرة بين صفر و K عند تشبع مقداره ١٠٠ بالمئة، ولكن مجموع قيم النفوذية لحالتين أو ثلاث هي دائما أقل من واحد. وتعرف النفوذية النسبية Relative بأنها نسبة النفوذية المؤثرة لمائع معين عند تشبع معين الى النفوذية الأساسية Base Permeability. وتتراوح النفوذية النسبية بين صفر الى واحد، وبذلك فأنها بالنسبة للنفط:

$$K_{RO}=\frac{Ko}{K}$$

وبالنسبة للغاز:

$$K_{RG}=\frac{Kg}{K}$$

وبالنسبة للماء:

$$K_{RW}=\frac{Kw}{K}$$

حيث أن:

K = النفوذية المطلقة (أو النفوذية عند تشبع حالة التبلل غير القابل للاستخراج (Irreducible wetting phase saturation).

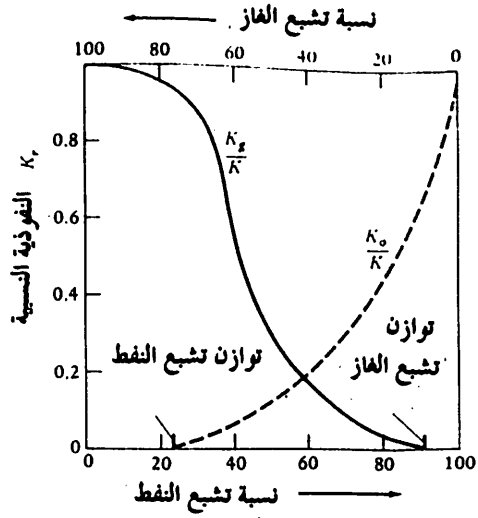
K_r = النفوذية النسبية.

K_g = النفوذية المؤثرة عند تشبع غازي مقداره ١٠٠ بالمئة.

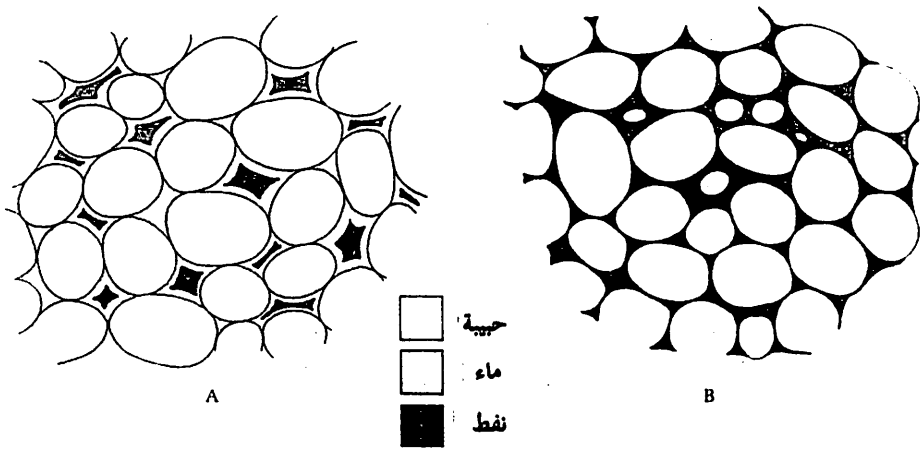
K_w = النفوذية المؤثرة عند تشبع مائي مقداره ١٠٠ بالمئة.

K_o = النفوذية المؤثرة عند تشبع نفطي مقداره ١٠٠ بالمئة.

ويظهر الشكل (٦-١١) علاقة النفوذية النسبية النموذجية للتشبعات المختلفة. أن من الضروري أن نأخذ بنظر الاعتبار التشبعات النسبية، وكيفية توزيع النفط والغاز، ووجود الماء أو غيابه. ان معظم المكامن مبللة بالماء Water-wet، اذ أنها تحتوي على غشاء من الماء الذي يفصل حدود المسامة عن النفط. وهنالك قلة من المكامن التي تكون مبلّلة بالنفط، وتفتقد تماما وجود غشاء من الماء الحبيس عند حدود المسامة (الشكل ٦-١٢). وقد تحدث ظروف تبلل مختلطة أو متوسطة.



الشكل ٦-١١: منحنيات نموذجية للنفوذية النسبية للنفط والغاز للتشبعات المختلفة.

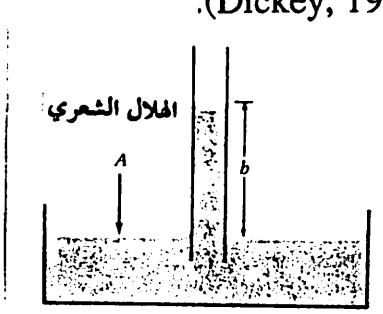


الشكل ٦-١٢: فكرة التبلل في المكامن . (أ) مكمن مبلل بالمياه (شائعة) (ب) مكمن مبلل بالنفط (نادر).

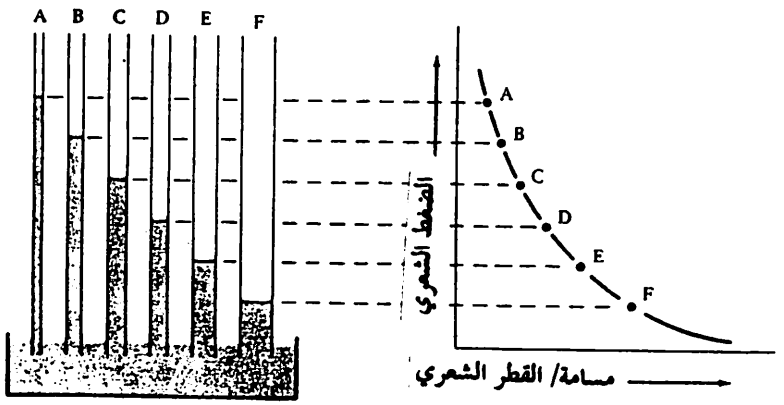
الضغط الشعري Capillary Pressure

تؤدي مناقشة درجة تبلل Wettability المسامات الى فكرة الخاصية الشعرية Capillarity، وهي الظاهرة التي يرتفع بها السائل نحو الأعلى خلال أنبوب شعري

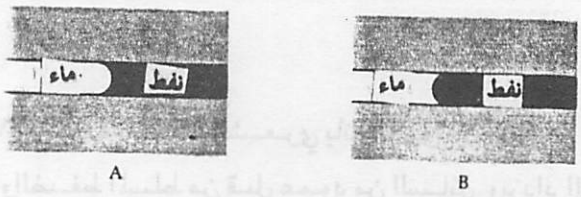
(الشكل ٦-١٣). ويُعرّف الضغط الشعري بأنه الفرق بين الضغط المحيط Ambient Pressure والضغط المسلط من قبل عمود من السائل. ويزداد الضغط الشعري مع النقصان الحاصل في قُطر الأنبوب (الشكل ٦-١٤)، فاذا ما ترجمنا ذلك الى مصطلحات جيولوجية، فانه يعني أن الضغط الشعري للمكمن يزداد مع نقصان حجم المسامة، أو بشكل أكثر تحديدا قُطر عنق المسامة. كما يرتبط الضغط الشعري بالشد السطحي Surface tension المتولد من مائعين متجاورين-وهو يزداد بزيادة الشد السطحي. وفي منظومات المسامات المبللة بالماء، يكون الهلال Meniscus محدبا نسبة الى الماء، وفي الأنظمة المبللة بالنفط فهو مقعر (الشكل ٦-١٥). (للاطلاع على التحليل الرياضي للضغط الشعري، أنظر (Dickey, 1979, Muskat, 1949).



الشكل ٦-١٣: أنبوبة شعرية في خزان مملوء بالسائل. أن الضغط على مستوى الماء (A) يعادل الضغط الناتج من الرأس السكوني- المائي للماء (h) ناقصا الضغط الشعري عبر الهلال الشعري Meniscus .



الشكل ٦-١٤: أنابيب شعرية ذات أقطار (مكبرة) مختلفة تظهر أن أرتفاع أعمدة السوائل تتناسب مع أقطار الانابيب.



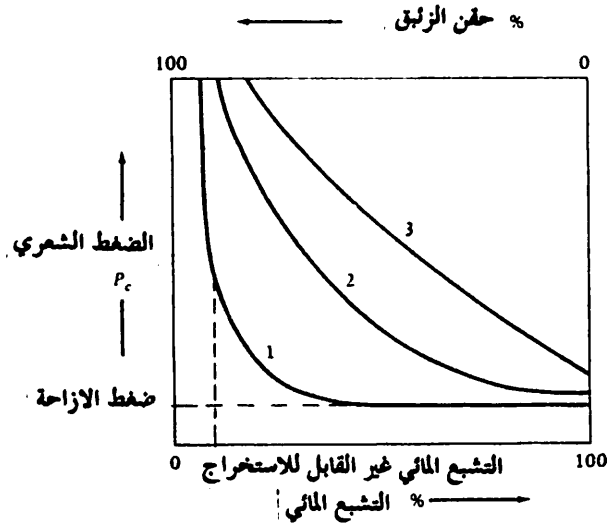
الشكل ٦-١٥: مقاطع عرضية لانابيب شعرية/ مسامات تظهر تأثير الهلال الشعري للمكامن المبللة بالنفط (أ) والمكامن المبللة بالماء (ب) أن المكامن المبللة بالمياة هي القاعدة العامة.

تعّرض المكامن عادة الى فحوصات ضغط شعري، هي فحوصات تحقن فيها عيّنات مشبعة بـ١٠٠ بالمئة من مائع واحد بمائع آخر (قد يُستعمل الغاز أو النفط أو الماء أو الزئبق). يُسمى الضغط الذي يبدأ عنده المائع المحقون باحتلال المكمن بضغط الاحلال Displacement Pressure. وعندما يزداد الضغط، فان نسب المائعين تُعكس تدريجيا حتى يتم الوصول الى نقطة التشبع غير القابل للاستخراج Irreducible Saturation Point والتي يستحيل عندها حدوث المزيد من الاحلال عند أي ضغط كان. ولقد رسمت المعطيات المأخوذة من هذه التحاليل كمنحنيات ضغط شعري (٦-١٦). والمنحنى (١) مميز للمكامن ذات النوعية الجيدة-مسامية ونفاذة. وما أن يتم تجاوز ضغط الدخول أو الازاحة، يزداد احلال السائل بسرعة لأية زيادة طفيفة في الضغط حتى يتم الوصول الى التشبع المائي غير القابل للاستخراج. عند هذه النقطة لا يمكن طرد المزيد من الماء بغض النظر عن الضغط. ويختص المنحنى (٢) بالمكامن ذات النوعية الأردأ ذات ضغط احلال أعلى ومحتوى مائي غير قابل للاستخراج أعلى أيضا. والمنحنى (٣) للمكامن ذات النوعية الرديئة جداً كالرمل سيئ الفرز ذي المحتوى الطيني المرتفع، وبالتالي، مدى واسعاً من حجوم المسامات. وبذلك فان كلا من ضغط الازاحة والتشبع المائي غير القابل للاستخراج يكون عالياً، ويتناقص التشبع المائي بطريقة منتظمة تقريبا مع زيادة الضغط.

العلاقة بين المسامية والنفوذية والنسيج.

Relationship between porosity, permeability, and texture.

هنالك ترابط حميم بين نسيج الترسبات والمسامية والنفوذية. ويرتبط نسيج الصخرة المكمنية بالبنية Fabric الترسيبية الأصلية للترسبات، والتي يتم تغييرها بالعمليات التحويرية اللاحقة. ان التحوير يمكن أن يكون ضئيل التأثير في العديد من الصخور الرملية، ولكنه في



الشكل ٦-١٦: منحنيات الضغط الشعري للمكامن المختلفة . (١) رمل نظيف جيد الفرز ذو أقطار مسامات منتظمة (٢) مكمن ذو نوعية متوسطة (٣) مكمن ذو نوعية سيئة مع مدى واسع من أقطار المسامات.للتفسيرات الكاملة أنظر النص .

الصخور الجيرية قد يكون كافيا لمحو كل بقايا الأشكال الترسيبية الأصلية. وقبل أن نتطرق الى تأثيرات التحوير على المسامية والنفوذية، فأنه ينبغي مناقشة تأثير البنية الترسيبية الأصلية على هذين المعاملين. وتستند المناقشة التالية الى حد كبير على الدراسات التي قام بها كل من (Gaithor, 1953, Krumbein and Monk, 1942, Beard and Weyle, 1973, Chilingar, 1964, Potter and Mast, 1963, Rogers and Heads, 1961, Pryor (1973). ويُعَد عمل Pryor (1973) بشكل خاص مفيداً الى حد كبير.

يمكن تلخيص المعاملات النسيجية للترسبات غير المتماسكة التي يمكن أن تؤثر على المسامية والنفوذية على النحو التالي:-

شكل الحبيبة Grain shape — التدور Roundness
التكور Sphericity

حجم الحبيبة Grain size

الفرز Sorting

البنية Fabric — الرزم Packing

توجيه الحبيبة Grain Orientation

وسوف يتم وصف هذه المعاملات ومناقشتها في الفقرات التالية:

العلاقة بين المسامية والنفوذية وشكل الحبيبات

Relationship Between Porosity, Permeability and Grain Shape.

ان العاملين اللذين ينبغي أخذهما بنظر الاعتبار في شكل الحبيبات هما التكور والتدور (Powers, 1953). ومثلما يُظهر الشكل (٦-١٧)، فان هاتين الصفتين مميزيتين تماما. اذ يصف التدور درجة تزوي Angularity الجسيمات. أما التكور فانه يصف الدرجة التي تقترب فيها الجسيمة من الشكل الكروي.

وتتوفر طرق رياضية لتحليل هذين المتغيرين على سبيل المثال (Friedman and Sanders, 1978).

ان المعطيات المتعلقة بتأثير التكور والتدور على المسامية والنفوذية نادرة. ولقد استنتج (Fraser, 1953) أن المسامية قد تتناقص مع التكّور ذلك لأن الحبيبات الكروية قد تكون أكثر تراصاً من الحبيبات شبه الكروية.

الشكل ٦-١٧: حبيبات رمل تظهر الفرق بين الشكل والتكور.

العلاقة بين المسامية والنفوذية وحجم الحبيبات.

Relationship Between Porosity, Permeability and Grainsize.

من الناحية النظرية، تكون المسامية مستقلة عن حجم الحبيبات بالنسبة للرمال منتظمة الرزم والتدرج، (Rogers and Head, 1961) . ولكن في التطبيق العملي، قد يحتوي الرمل الخشن على مسامية أعلى من الرمال الأدق حجماً أو بالعكس على سبيل المثال (Lee, 1919, Sneider et al, 1977). وقد يُعزى هذا التباين الى عوامل منفصلة ولكن مترابطة مثل الفرز و/أو التسميت.

تتناقص النفوذية مع النقصان الحاصل في حجم الحبيبات ذلك لأن قُطر المسامة يتناقص، وبالتالي، يزداد الضغط الشعري (Krumbein and Monk, 1942)وبذلك فانه قد يكون لكل من الرمل والسجيل مسامية تبلغ ١٠ بالمئة، وبينما تكون الصخرة الأولى مكمناً نفاذاً، فان الثانية قد تكون صخرة غطائية صلدة.

العلاقة بين المسامية والنفوذية وفرز الحبيبات

Relationship Between Porosity, Permeability and Grain Sorting.

تزداد المسامية مع تحسن درجة الفرز. وعندما يتناقص الفرز، فان المسامات بين الحبيبات الكبيرة المكونه للهياكل Framework-forming grains تملأ بجسيمات أصغر. تتناقص النفوذية مع الفرز للسبب نفسه (Bear and Weyl, 1973, Rogers and Head, 1961, Fraser, 1935.

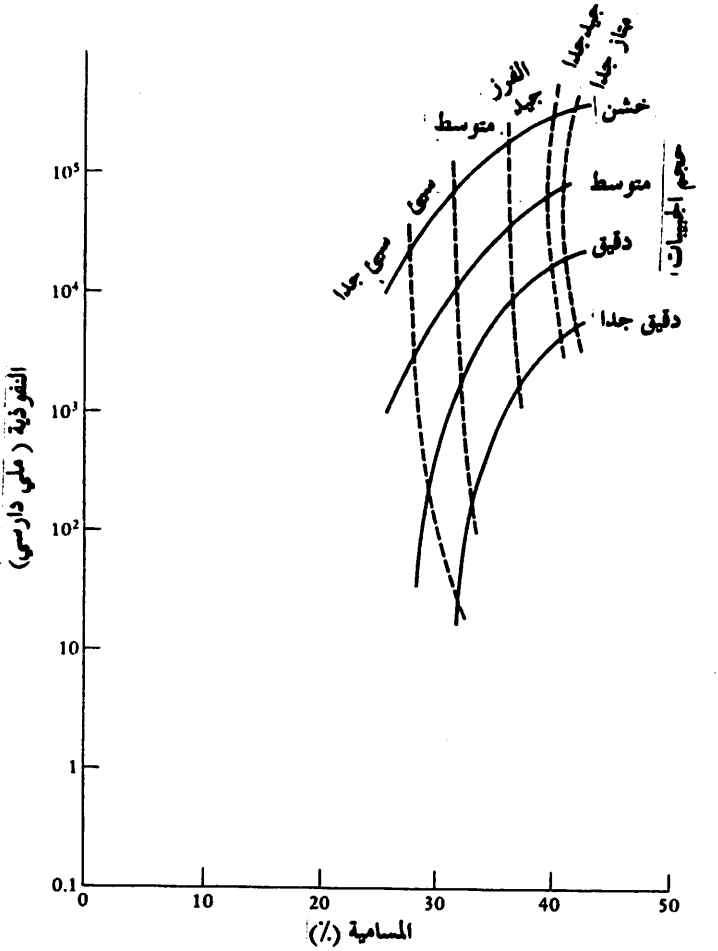
ومثلما ذكرنا مسبقا، فان الفرز في بعض الأحيان يتغير مع حجم الحبيبات لمكمن رملي معين وبذلك يدلل على وجود مضاهاة ممكنة بين المسامية وحجم الحبيبات. ويلخص الشكل (٦-١٨) تأثيرات الفرز وحجم الحبيبات على قيم المسامية والنفوذية في الرمال غير المتماسكة.

العلاقة بين المسامية والنفوذية ورزم الحبيبات

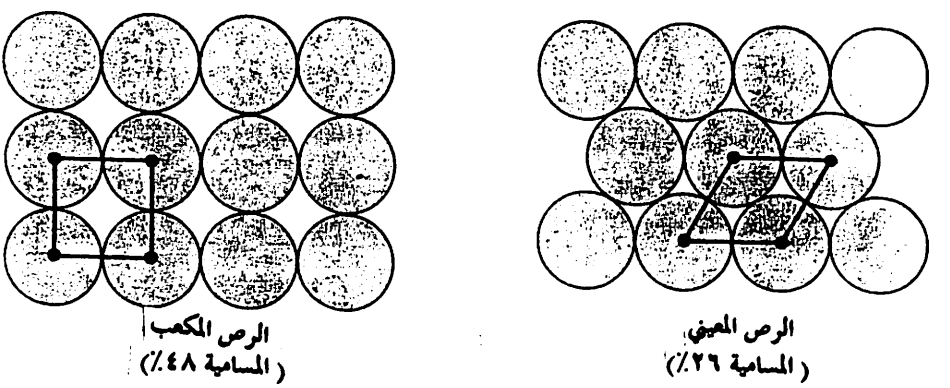
Relationship Between Porosity, Permeability and Grain Packing.

ان الصفتين المهمتين لبنية الترسبات هي الكيفية التي ترزم بها الحبيبات وتتوجه. ولقد وصفت الدراسات الكلاسية المتعلقة برص الترسبات من قبل (Fraser, 1935) وكذلك(Graton and Fraser, 1935)، اذ أظهرا أن للكرات ذات الحجم المنتظم ست هندسيات رزم نظرية. وتتراوح هذه الهندسيات من النمط المكعب Cubic الأكثر ارتخاءاً التي تبلغ مساميتها نحو ٤٨ بالمئة الى النمط المعيني الأكثر تماسكا والذي تبلغ مساميته نحو ٢٦ بالمئة، (الشكل ٦-١٩).

يمكن ملاحظة أهمية الرزم بالنسبة للمسامية عندما نحاول سكب بقايا كيس من السكر في الوعاء. اذ أن السكر المسكوب في الوعاء قد استقر تحت تأثير الجاذبية في حالة



الشكل ٦-١٨: مرتسم بياني للمسامية مقابل النفوذية يظهر علاقتهما بحجم الحبيبات والفرز للرمال غير المسمنة. (عن Beard and Weyl, ١٩٧٣ and Nagtegaal, ١٩٧٨).



الشكل ٦-١٩: الرص النظري الاكثر ضيقا وارتخاء للكرات ذات الاقطار المنتظما

رزم متراخية Loose. ويؤدي الربت على حاوية السكر الى انخفاض مستوى السكر عندما يزداد الرزم تماسكا، مسبباً نقصان المسامية وزيادة الكثافة الكلية.

من الواضح ان للرزم تأثير أساسي على مسامية الترسبات، ولقد حاول العديد من الجيولوجيين اجراء دراسات رقمية، كبديل عن الدراسات النظرية (على سبيل المثال، Kahn, 1956, Morrow, 1971). وشأنه شأن تدور الحبيبات وتكورها، فان الرزمص لا يصلح للتحليل الاحصائي المكثف. ومن البديهي أن يتوقع المرء أن الترسبات التي تتواضع تحت تأثير الجاذبية مثل الانسيابات المسيلة Fluidized Flows والمتعكرات Turbidites، أن تظهر رزم حبيبات أكثر تراخيا من تلك التي ترسبت تحت تأثير عمليات السحب Traction Processes. ومع ذلك، فان الرُص بعد الترسيبي قد يسبب ترتيبات رزم سريعة وفقدان للمسامية أثناء الدفن المبكر.

العلاقة بين المسامية والنفوذية وتوجيه الحبيبات.

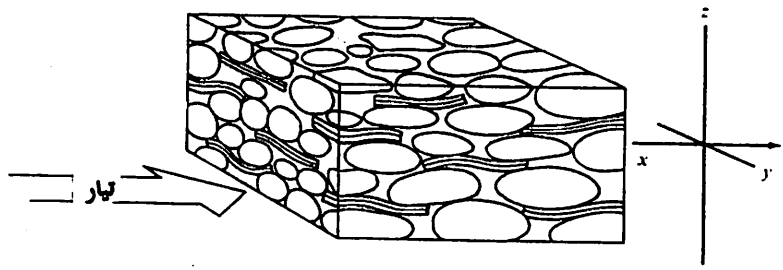
Relationship Between Porosity, Permeability and Grain Orientation

استند التحليل السابق للرزم على الافتراض الذي مفاده أن الحبيبات كروية الشكل، وهو افتراض غير صحيح بشكل عام بالنسبة لمعظم الترسبات باستثناء السرئيات (الأوليتات Ooliths). فأغلب حبيبات المرو (الكوارتز) هي في الحقيقة كريات متطاولة Prolate Spheroids، طولية قليلا باتجاه المحور البلوري الجيمي C-Crystallographic axis، (Allen, 1970). كما يحتوي الرمل أيضا على بعض حبيبات المايكا القشارية Flaky والأطيان والمكونات الأخرى. وتحتوي الصخور الجيرية الهيكلية على حبيبات ذات أشكال أكثر غرابة. وبذلك فأن عنصر البنية الثاني، أي التوجيه، ربما يكون أكثر أهمية للمسامية والنفوذية من الرزم. ان للطريقة التي تتوجه فيها الحبيبات تأثير قليل على المسامية، ولكن لها تأثير أساسي على النفوذية.

تكون أغلب الترسبات متطبقة، وينتج التطبق من وجود الحبيبات القشارية كالمايكا وأصداف المتحجرات وكسارة النباتات، فضلاً عن الرقائق الطينية. وبسبب هذا التطبق، فان النفوذية العمودية تُعّد بشكل عام أقل من النفوذية الأفقية. وتُعد النسبة بين النفوذية العمودية الى النفوذية الأفقية في مكمن ما معاملاً هاماً بسبب تأثيرها على التمخرط

Coningعند انتاج النفط والغاز (أنظر صفحة ٢٦٣).

كما يحدث التغاير في النفوذية أيضاً بموازاة سطوح التطبق. وفي أغلب أنواع الرمال، تظهر الحبيبات عموماً تراصفاً مفضلاً مع المستوى الأفقي. كما يمكن قياس توجيه الحبيبات أيضاً بطرق مختلفة (Sippel, 1971). ولقد أظهرت الدراسات التي أُجريت على الرمال أفقية التطبق أن الحبيبات تكون طولية بموازاة اتجاه التيار (على سبيل المثال (Martins, 1971, Von, 1972, Rad, 1971, Shelton and Mack, 1970) أما في الرمل ذي التطبق المتقاطع فان الوضع يكون أكثر تعقيداً بكثير ذلك لأن الحبيبات قد تكون متراصفة بموازاة مضرب Strike الطقم الأمامي Foreset بسبب التدحرج الجذبي Gravitational Rolling، ويظهر الشكل (٦-٢٠) ان النفوذية تصل الى قيمتها القصوى بموازاة توجيه الحبيبات، لأن هذا التوجيه هو التراصف البنيوي مع الأقل مقاومة لحركة المائع (Schieddegger, 1957).

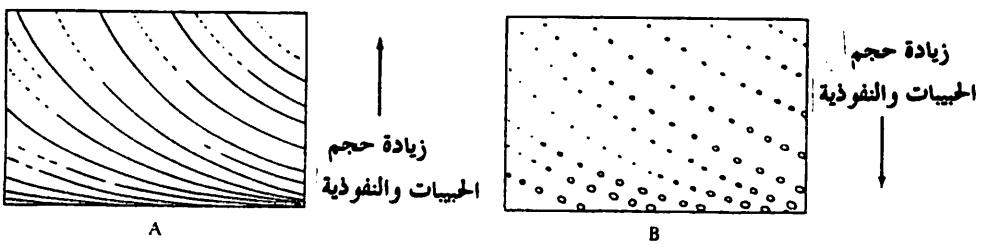


الشكل ٦-٢٠: مجسم من الرمل يظهر نسيجا متطبقا تبدو فيه الحبيبات متجهة بموازاة التيار.

أظهرت الدراسات المتعلقة بالعلاقة بين البنية وتغاير النفوذية نتائج مختلفة على المقياسين الكبير والصغير. ولقد استعرض (Potter and Pettijohn, 1977) النتائج المتعارضة لعدد من الحالات المدروسة، التي يظهر بعضها مضاهاة بين توجيه الحبيبات في حين لا يظهر بعضها الآخرذلك. أن من الضروري أن نأخذ بنظر الاعتبار لا التغيرات على المقياس الصغير في النفوذية الناتجة من تراصف الحبيبات حسب، بل كذل التغيرات الكبيرة الناتجة من التراكيب الرسوبية.

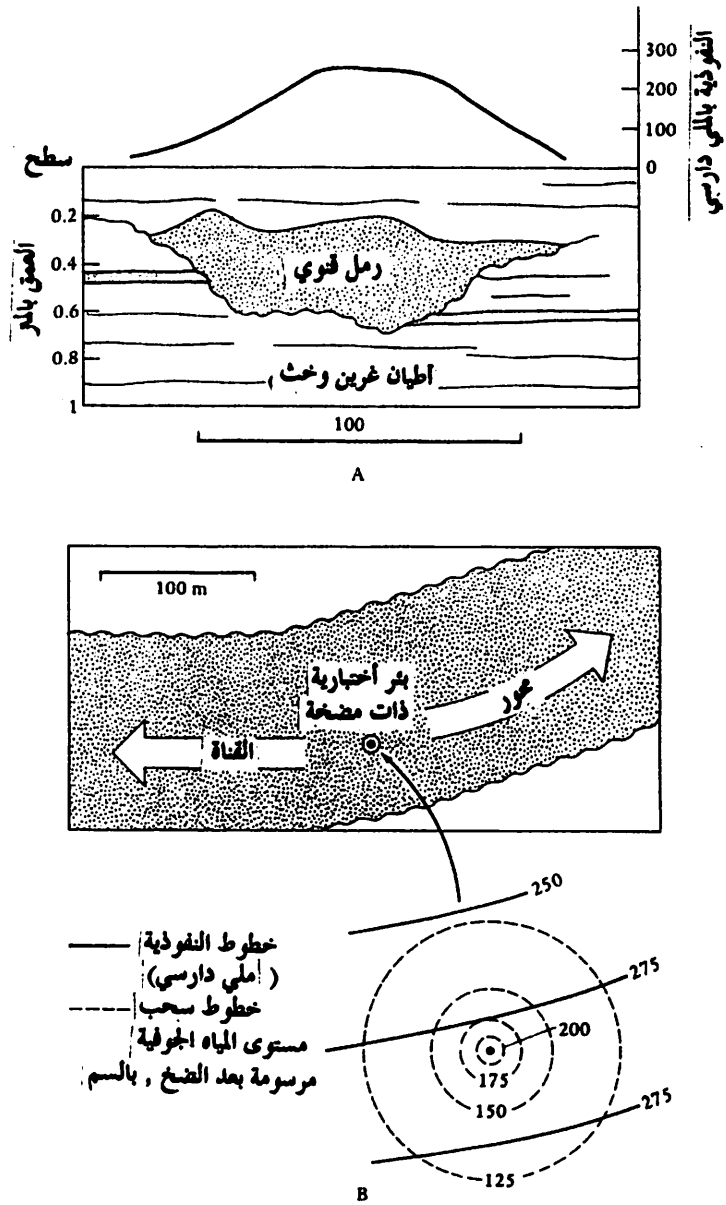
تسبب الفروقات في حجم الحبيبات تغايرات في النفوذية أكثر بكثير من تلك الناتجة من توجيه الحبيبات. وبذلك، ففي الرمال الهوائية ذات التقطع المتطبق في حقل ليمان

Leman Field (في بحر الشمال). تختلف قيم النفوذية الأفقية المقاسة بموازاة المضرب من نحو ٠.٥ الى ٣٨.٥ ملي دارسي بين الأطقم الأمامية المتجاورة. ويُعزى هذا المدى في قيم النفوذية الى التغيرات في حجم الحبيبات والفرز. وبشكل مشابه، ولأن التطبق المتقاطع الهوائي يظهر بشكل عام تناقصاً في حجم الحبيبات من الطقم الأمامي Foreset الى الطقم السفلي toeset، تتضاءل النفوذية باتجاه الأسفل خلال كل وحدة متقاطعة التطبق (Van Veen, 1975). وبشكل معكوس، في العديد من الطبقات المتقاطعة المترسبة تحت سطح الماء، تؤدي الانهيارات Avalanching الى زيادة حجم الحبيبات باتجاه الأسفل، وبذلك تزداد المسامية أيضاً نحو الأسفل بالنسبة لكل طقم أمامي للسبب الآنف الذكر (الشكل ٦-٢١).



الشكل ٦-٢١: تغيرات النفوذية ل (أ) خشونة الحبيبات باتجاه الاسفل (ب) وطبقات متقاطعة أنهيارية تخشن باتجاه الاسفل (Downward coarsening avalanche cross-beds).

على المقياس الأكبر المتعلق بالأجسام الرملية بأكملها، تظهر قيم النفوذية المرتبطة بحجم الحبيبات في الأغلب تغيرات ملموسة. ففي دراسة على ترسبات رملية قنوية Sand-fill channel من العصر الهولوسيني في هولندا، لوحظ أن قيم النفوذية قد ازدادت من ٢٥ ملي دارسي عند الحافة الى ٢٧٠ ملي دارسي في الوسط على مبعدة ١٧٥ متراً (Weber et al., 1972). ولقد أظهرت فحوصات الضخ Pumping tests أن السحب كان متمركزاً Concentric تقريباً حول تجويف البئر، مما يدل على أن ليس للنفوذية سوى اتجاه مفضل ضعيف ضمن المستوى الأفقي (الشكل ٦-٢٢).



الشكل ٦-٢٢: تغيرات النفوذية في رمل دلتا القنوي الهولوسيني . (أ) مقطع عرضي يظهر كيفية زيادة النفوذية بأتجاه محور القناة.

(ب) خارطة تظهر الكيفية التي يكون فيها أنخفاض الخطوط الكنتورية لمستوى الماء متمركزا حول البئر الاختبارية ذات المضخة.

تأثيرات التحوير على المكامن Effects of Diagenesis on Reservoirs

تفحصت الفقرة السابقة تأثير النسيج على بتروفيزياء الترسبات غير المتماسكة. وما أن يبدأ الدفن، مع ذلك، حتى يحدث العديد من التغيرات، معظمها يؤدي الى تضاءل مسامية المكمن المحتمل ونفوذيته. ويطلق على هذه التغيرات معاً اسم التحوير Diagenesis ، وهي متعددة ومعقدة. ويركز الاستعراض التالي بشكل محدد على تأثيرات التحوير على نوعية المكمن. ويمكن العثور على استعراض أكثر تفصيلاً في (Friedman and Sanders, 1978, Selley, 1982, Blatt, Middleton and Murray, 1980). ولأغراض الملائمة سوف يتم تناول تأثيرات التحوير لكل من المكامن الرملية والجيرية على نحو منفصل.

تأثيرات التحوير على المكامن الرملية

Effects of Diagenesis on Sandstone Reservoirs

سوف يتم مناقشة تأثيرات التحوير على المكامن الرملية علي مقياس عام ومن ثم بشيء من التفصيل. ويُعزى أول هذه التأثيرات الى الدفن، أما الثاني فناتج عن التسميت والاذابة.

مجالات المسامية في المكامن الرملية

Porosity Gradients in Sandstone Reservoirs

أظهرت الدراسات التي أُجريت على الرمال الحديثة مثل دراسة (Pryor, 1973) أنّ لها قيم مسامية تتراوح بين ٤٠ الى ٥٠ بالمئة وقيم نفوذية تبلغُ عشرات الملي دارسي. ومع ذلك، فأن أغلب المكامن الرملية لها قيم مسامية تتراوح بين ١٠ الى ٢٠ بالمئة وقيم نفوذية تُقاس بالملي دارسي. ورغم احتمال حدوث تذبذبات، فان قيم مسامية ونفوذية المكامن تتناقص مع العمق. وليس لهذه العلاقة أية عواقب بالنسبة لمهندس الانتاج أو المهندس المهتم بتطوير حقل ما، بيد أنها مهمة بالنسبة للاستكشافي (أو المنقب) الذي ينبغي عليه أن يحدد العمق الأقصى الذي يمكن أن توجد عنده المكامن المناسبة من الناحية الاقتصادية.

ويمكن تحديد مسامية أي صخرة رملية اذا تمت معرفة ممال المسامية والمسامية الأولية:

$$\phi^D = \phi^P - GD.$$

حيث أن:

ϕ^D = المسامية عند عمق معين.

ϕ^P = المسامية الأولية على السطح.

G = ممال المسامية (٪/كم).

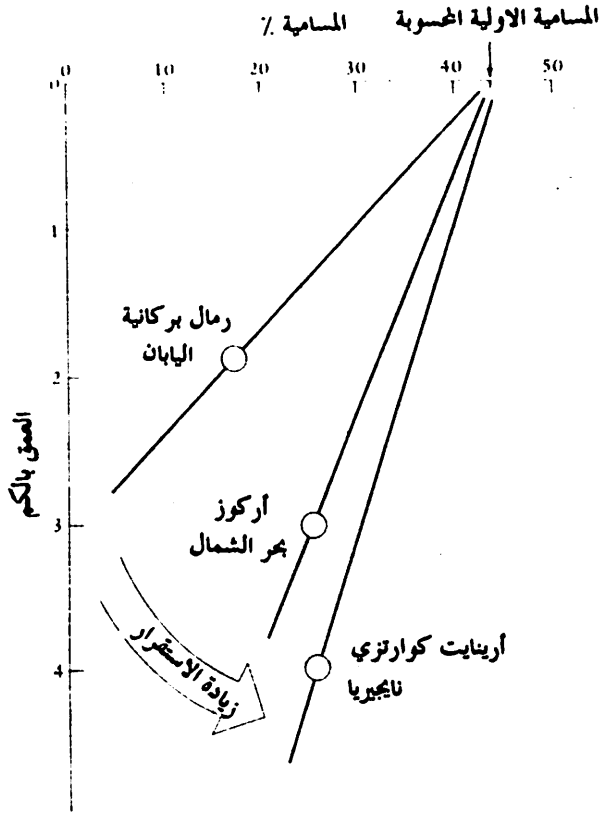
D = عمق الدفن.

تمت مراجعة موضوع ممالات المسامية والعوامل المؤثرة عليها من قِبل (Magara, 1980, Selley, 1978).

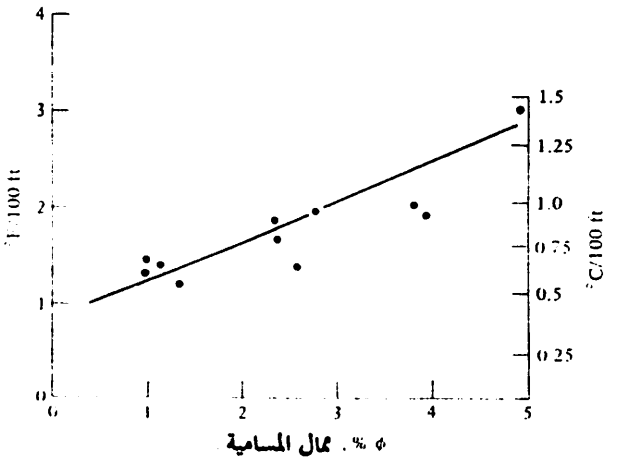
ان المتغيرات الرئيسية التي تؤثر على ممالات المسامية هي معدنية الترسبات ونسيجها وأنظمة الحرارة الأرضية Geothermal regimes والضغط التي تتعرض لها. فكلما ازداد نضوج الرمل، ازدادت قدرته على الاحتفاظ بمساميته (Dodge and Loucks, 1979). فاذا ما أخذنا الحالتين المتطرفتين، فان الرمال البركانية غير المستقرة كيميائيا تميل الى أن تفقد المسامية بشكل أسرع، بينما يميل الرمل الكوارتزي النقي الأكثر استقرارا الى أن يمتلك الممالات الأوطأ (الشكل ٦-٢٣).

كما يؤثر النسيج على الممال، فالرمال سيئة الفرز ذات الملاط الطيني الغزير تنضغط أكثر وتفقد من المسامية أسرع من الرمال النظيفة جيدة الفرز (Rittenhouse, 1971). كما لوحظ تأثير مشابه في الرمل الميكائي Micaceous Sand، كما هو الحال، على سبيل المثال، في ترسبات العصر الجوراسي في بحر الشمال (Hay, 1977).

تؤثر الممالات الجيوحرارية أيضاً على ممال مسامية الرمل، كما هو ظاهر في الشكل (٦-٢٤). ولأن معدلات التفاعل الكيميائي تزداد مع درجة الحرارة، فكلما ازداد الممال الجيوحراري، ازدادت معدلات فقدان المسامية. كما يؤثر ممال الضغط على المسامية،



الشكل ٦-٢٣: مرتسم بياني يظهر كيفية تناقص ممال المسامية مع زيادة النضوج المعدني . (عن Nagtegaal, ١٩٧٨)



الشكل ٦-٢٤: مرتسم بياني للممال الجيوحراري مقابل المسامية لانواع مختلفة من الحجر الرملي تظهر ميلهما للزيادة معا. (عن Selley, ١٩٧٨).

فالضغوط الشاذة Abnormal Pressure تحفظ المسامية، من خلال التقليل المفترض لتأثير الانضغاط (Atwater and Miller, 1965). ولقد لوحظ بشكل شائع أن النفط والغاز يحفظان المسامية في الرمال (على سبيل المثال (Fuchtbauer, 1967). وما أن يدخل البترول المصيدة، ينتهي دوران الماء الحبيس وتتوقف أية عمليات تسميت لاحقة.

فقدان المسامية بالتسميت *Porosity Loss by Cementation*

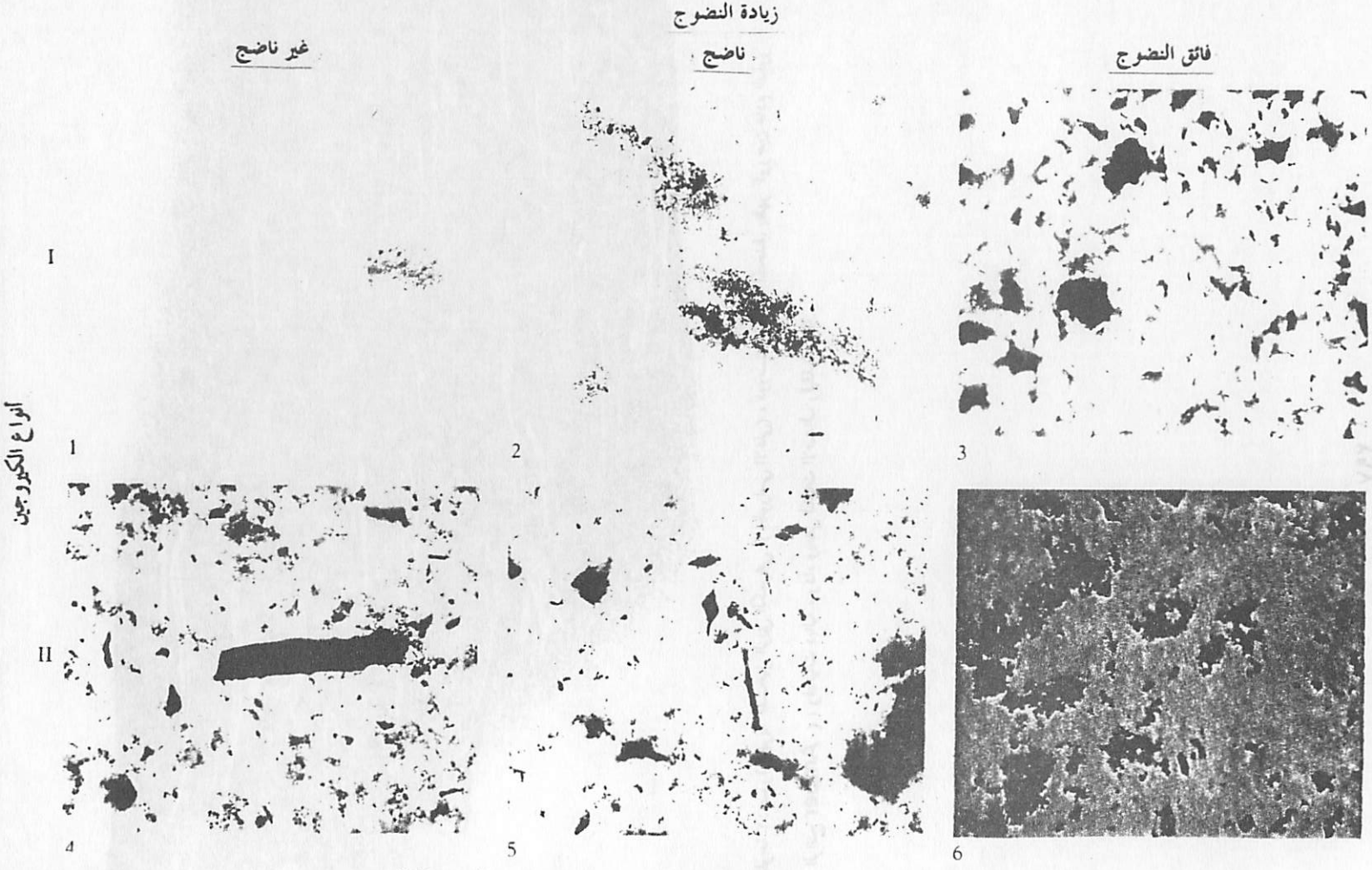
على مقياس اقليمي، تتأثر مسامية الحجر الرملي الى حد كبير بالعوامل التي تم شرحها مسبقاً (المعدنية، النسيج، المال الجيوحراري وممال الضغط). وضمن المكمن نفسه، فأن المسامية والنفوذية تتغيّران على نحو غريب مع التغيرات النسيجية الأولية والتغيرات التحويرية الثانوية. أن تحوير الحجرالرملي هو موضوع أساسي خارج نطاق هذا الكتاب. ولقد تمت معالجته بعمق من قبل (Chilingarian and Wolf, 1975, Blatt et al., 1980, Friedman and Sanders, 1978). وتتعامل المعالجة التالية بايجاز مع تلك الجوانب وخصوصاً المتعلق منها بجيولوجيا البترول. وتشمل التغيرات التحويرية في المكامن الرملية كلاً من التسميت والاذابة اللذين سوف تتم مناقشتهما الآن بالترتيب.

ان درجة قليلة من التسميت ضرورية للمكمن الرملي لأنها تمنع الرمل من أن يخرج مع النفط أثناء الانتاج. فوجود الرمل في النفط لا يؤدي الى تدمير المكمن حسب، بل كذلك منظومة الانتاج والنفوذية. ان العديد من المعادن يمكن أن تنمو في مسامات الحجر الرملي، ولكن من بينها ثلاثة فقط ذات أهمية وهي المرو (الكوارتز) والكالسايت والأطيان موضعية النشأة.

يعد المرو سمنتا شائعا. وهو ينمو بشكل عام على شكل نمو فوقي مستمر ضوئياً Syntaxial Overgrowth على حبيبات الكوارتزالفتاتية (الشكل ٦-٢٥أ). وتزداد ذوبانية السليكا بازدياد الرقم الهايدروجيني pH، وبذلك فان السمنت السليكي يوجد حيثما تحركت الموائع الحامضية خلال المسامات.

ان كاربونات الكالسيوم هي سمنت شائع آخر. وهو يوجد بشكل عام كبلورات كالسايت، والتي أثناء نموّها من مسامة الى أخرى، قد تكون نسيجا مُبرقشا Poikilitic

اللوحة ١: صورة مجهرية للسجيل الزيتي الكمريجي (الجوراسي الاعلى) ، دورست ، المملكة المتحدة، يظهر كيروجين عادم التبلور (الرانج Amber) ، وفتاتيات دبالية سوداء وبعض ثنائيات الاصداف رقيقة الصدفة.

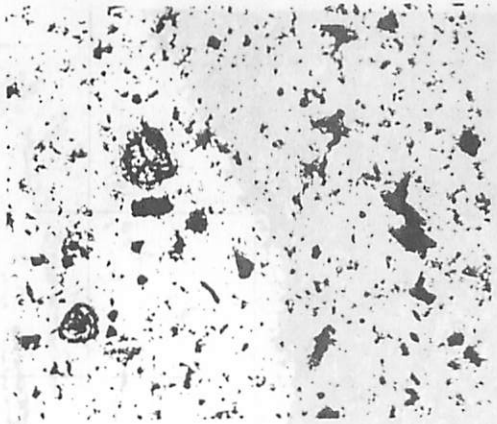


اللوحة ٢: صور فوتوغرافية لانواع مختلفة من الكيروجين عند مستويات مختلفة من النضوج الحراري.

(Courtesy of R. R. F. Kinghorn and F. Rahman).

III

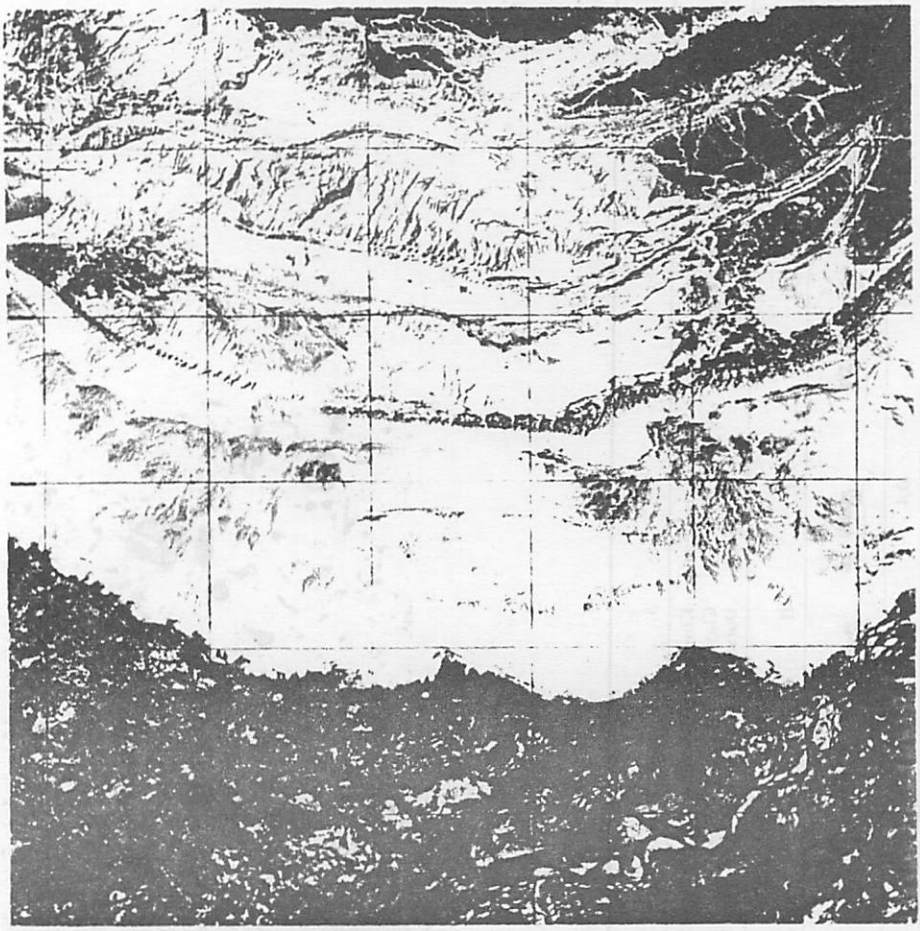
7



8

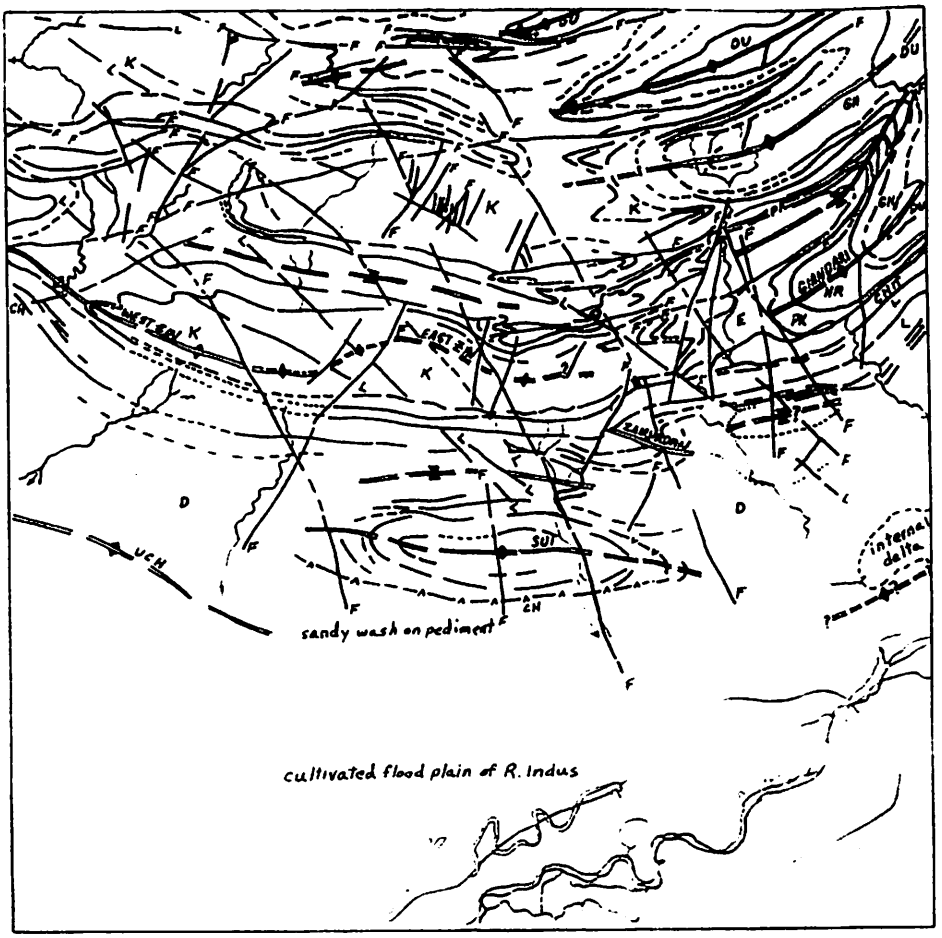
9

رقم الصورة	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Locality	Gurpi Fm. Zagros, Iran	Kazdumi Fm. Zagros, Iran	Garan Fm. Zagros, Iran	Kimmeridge Clay Dorest, UK	Kimmeridge Clay Dorset, UK	Sembar Fm. Lower Indus, Pakistan	Shamser Fm. Alborz, Iran	Coal Measures South Wales	Coal Measures South Wales
نوع الكيروجين	I	I	I	II	II	II	III	III	III
مستوى النضوج	غير ناضج	ناضج	فائق النضوج	غير ناضج	ناضج	فائق النضوج	غير ناضج	ناضج	فائق النضوج
R_0(%)	0.4	0.9	2.0	0.4	0.5	2.0	0.4	1.2	3.0
التكبير	X25	X25	X62	X25	X25	X62	X25	X25	X50



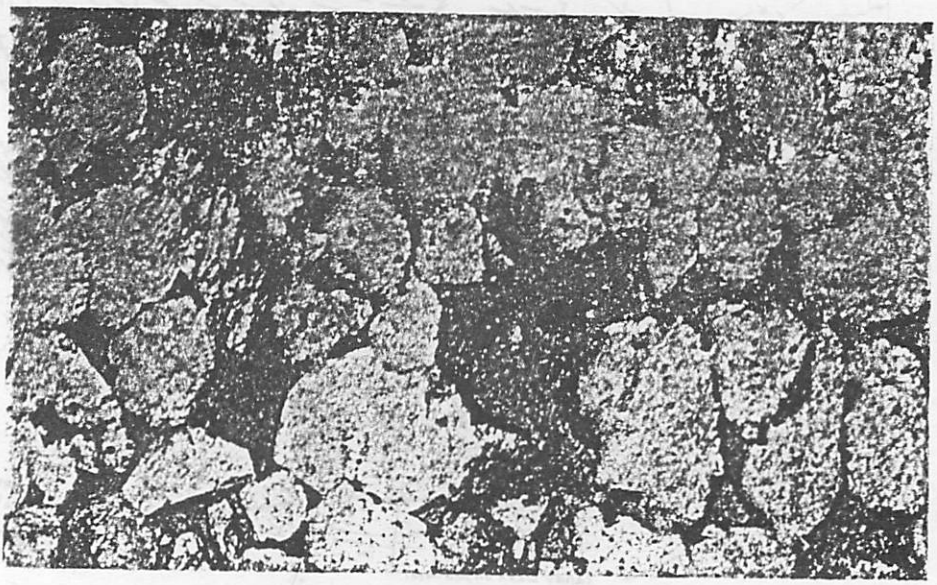
اللوحة ٣: صورة أقمار أصطناعية محسنة وتفسيرها لجزء من الباكستان . وعندما يستعمل بالترابط مع تسجيلات الجاذبية والمغناطيسية ، فأن الاستشعار متعدد الاطياف قد يحدد شواذ تستحق المزيد من الاهتمام على الارض.

(Courtesy of Hunting Geology and Geophysics Limited).

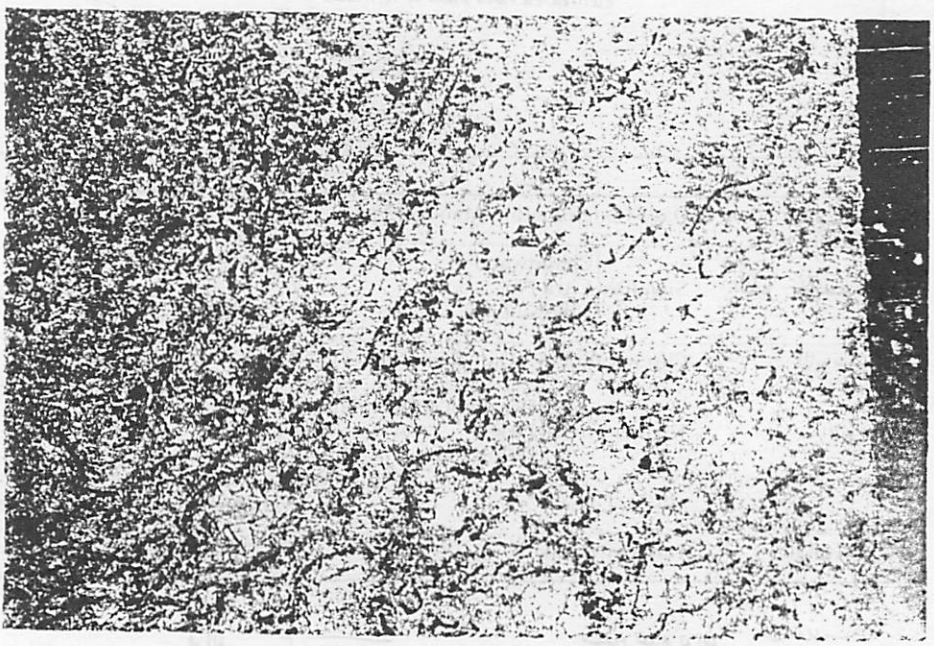


البلايستوسيني	Dada Conglomerate/Manchar Fm	*D*	
البليو–بلايستوسيني	Siwaliks: Chaudwan Fm.	*CH*	حجر حصوي متطبق ...الخ.
	Siwaliks: Litra Fm.	*L*	
	Siwaliks: Vihowa Fm.	*V*	
المايوسيني؟	Chitarwata Fm. (Gaj/ Nari/Sibi)	*CHIT*	حجر رملي/سجيل
الايوسيني	Kirther Fm. *K*: Drazinda & Domanda	*E*	سجيل جيسي
	Kirther Fm. *K*: Pirkoh	*PK*	حجر جيري فاتح
	Kirther Fm. *K*: Habib Rahi	*HR*	حجر جيري صفيحي
	Ghazij Fm	*GH*	سجيل، حجر جيري ...الخ
الباليوسيني	Dungan/Ranikot	*DU*	حجر جيري

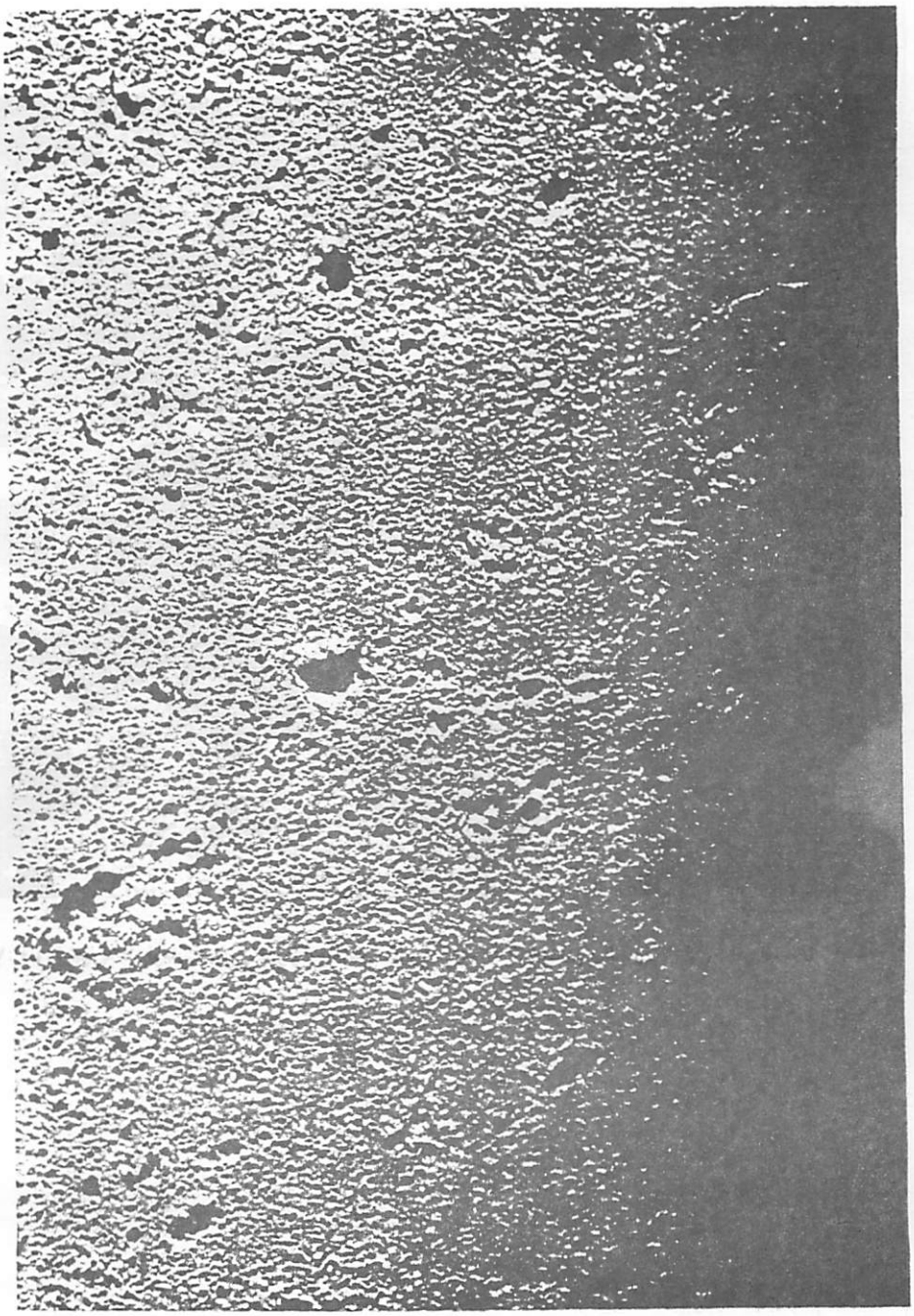
سطح عدم توافق	~U~	فوالق	F
طية محدبة رئيسية		مظاهر خطية	L
طية مقعرة رئيسية		حدود طية مدفونة	



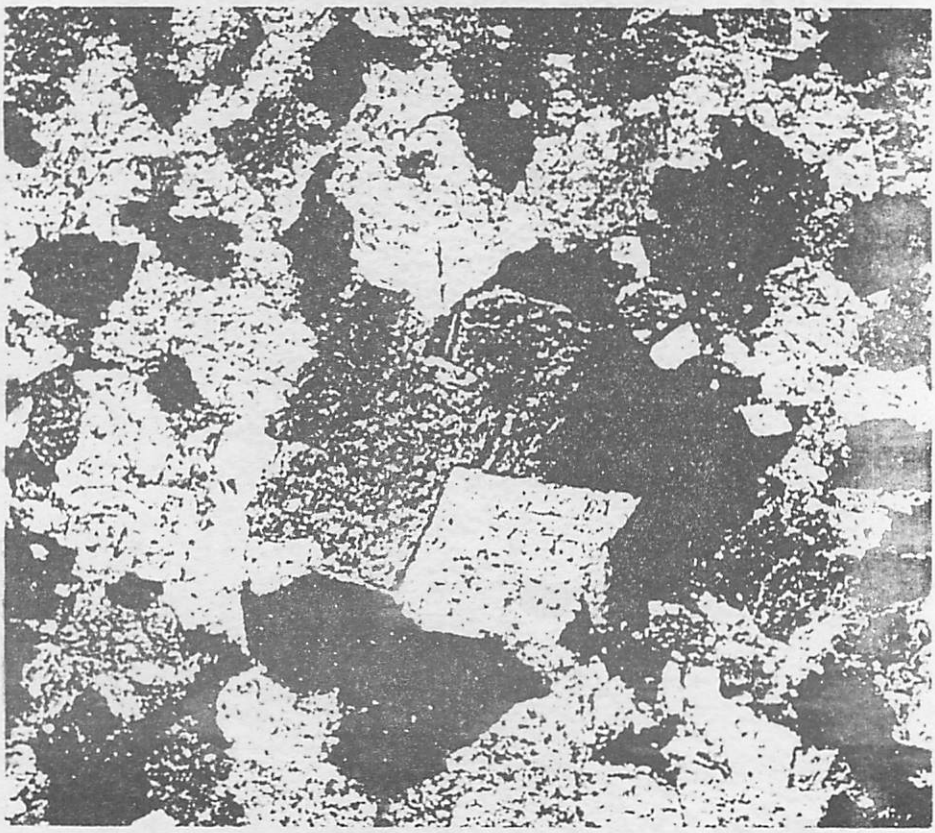
اللوحة ٥: مسامية ثانوية تدل عليها المسامات الكبيرة غير المنتظمة وفرص الحبيبات المواخي في حجر برنت الرملي (الجوراسي) ، بحر الشمال، المملكة المتحدة . حقل الرؤية ٠,٥ سم .



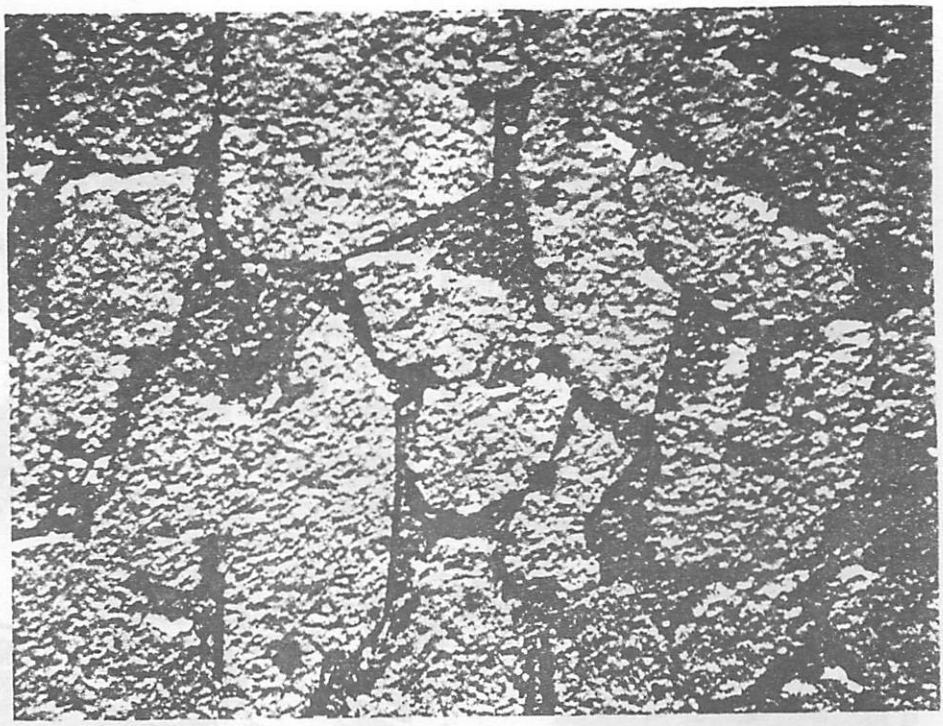
اللوحة ٦: مقطع عرضي لجدران المرجان يظهر المسامية وقد تشوهت بسمنت سباريتي في حجر وينلوك الجيري (السيلوري) ، مقاطعة ويلز ، المملكة المتحدة . حقل الرؤية ٠.٥ سم.



اللوحة ٤: قطعة لباب مقطوعة من الحجر الجيري الباليوسيني من ليبيا يظهر المسامية القالبية الدملقية والهزيلة حقل الرؤية ٣ سم



اللوحة ٧: صورة مجهرية لدولومايت بلوري ثانوي مع مسامية بلورية . مجموعة الزخشتاين (البرمي الاعلى) , بحر الشمال , المملكة المتحدة.

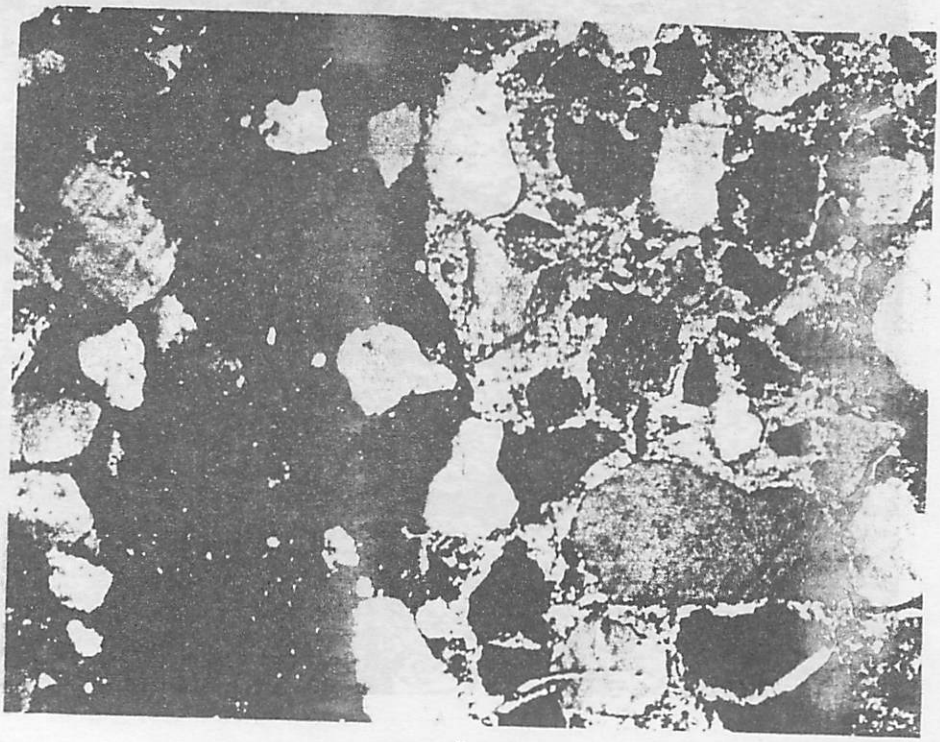


A

الشكل ٦-٢٥: أنواع مختلفة من السمنت في الحجر الرملي. (أ) سمنت سليكي ينمو في أستمرارية بصرية على حبيبات كوارتز فتاتية . (ب) سمنت كالسيتي ذو نسيج مبرقش Poikilitic لبلورات كبيرة تغلف حبيبات كوارتز متاكلة. (ج) بلورات كاؤلينايت موضعية النشأة ضمن المسامات . (د) الايت موضعي النشأة يظهر نسيجا لبغيا . (أ) و (ب) شريحتان صخريتان تم تصويرهما تحت الضوء الاعتيادي والمستقطب على التوالي . (ج) و (د) هي صور مجهرية مأخوذة بالمجهر الالكتروني الماسح (المتفرس).

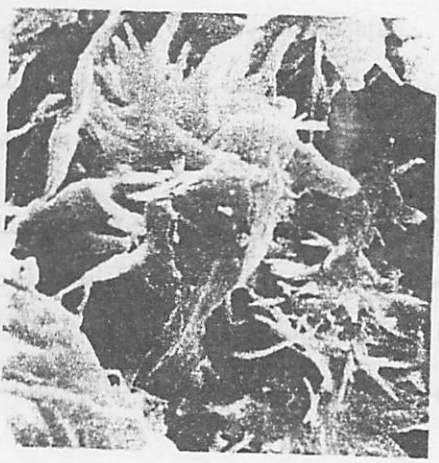
من البلورات يغلف العديد من حبيبات الرمل (الشكل ٦-٢٥ب). وتبدو الجزئيات غالباً وكأنها "تطفو" في البلورات. وغالباً ما تظهر المراقبات التفصيلية أن حدود الحبيبات متاكلة، مما يدل على أن بعض الاحلال قد وقع. ان ذوبانية الكالسايت هي معكوس ذوبانية السليكا، أي أنها تقل مع الرقم الهايدروجيني. وبذلك فان تسميت الكالسايت هو نتيجة وجود موائع قلوية تتحرك خلال المسامات.

من الواضح أن وجود الطين في مكمن ما يُدّمر المسامية والنفوذية. ويوجد الطين أما على شكل ملاط فتاتي Detrital matrix أو كسمنت موضعي النشأة. وعندما يُعاد تبلور الأطيان ويتغير أثناء الدفن، فأنه يصعب دوما اجراء مثل هذا التمييز. ان للأطيان الكاؤلينيتية، والأليتية، والمونتمرلينيتية تأثيرات مختلفة على المكامن وأصول تكون مختلفة.



B

C

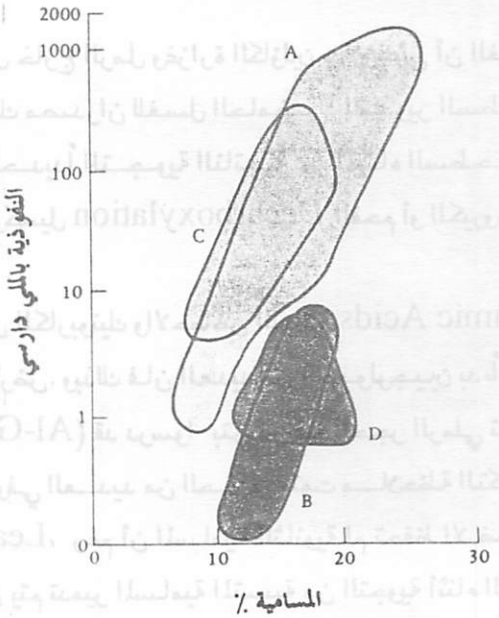


D

يوجد الكاؤلين Kaolin عموما على شكل بلورات كتلية Blocky جيدة التشكل داخل المسامات (الشكل ٦-٢٥ج). ان هذا التكون يقللُ مسامية المكمن، ولكن قد يكون له تأثير ضئيل فقط على النفوذية. يتكون الكاؤلين بوجود السوائل الحامضية ويكون مستقراً

تحتها. وبذلك فانه يوجد على شكل طين فتاتي في الترسبات القارية، وكذلك كسمنت موضعي النشأة في الرمال التي تكون قد غسلت بالمياه الحامضية، مثل تلك التي ذات أصل جوي.

ان الطين الأليتي Illitic مختلف دائماً عن الكاؤلين. اذ ينمو الألايت موضعي النشأة كبلورات ليفية Fibrous، والتي توجد عادة على شكل غطاء يشبه الفراء على الحبيبات الفتاتية (الشكل ٦-٢٥د). وغالباً ما تجسر هذه التراكيب فوق الممرات العنقية بين المسامات في كتلة متشابكة. وبذلك قد يكون للسمنت الأليتي تأثير ضار جدا على نفوذية المكمن. ويظهر هذا التأثير في الشكل (٦-٢٦)، المأخوذ من دراسات على تكوين روتليجند Rotliegende الرملي من البرمي الأسفل في جنوب بحر الشمال من قبل Seemann, 1979) و Stalder, 1973). ومن المعتاد أن تتكون الأطيان الأليتية في بيئات قلوية. وبذلك فأنها الأطيان الفتاتية السائدة في أغلب الترسبات البحرية وتوجد كطين موضعي النشأة في الرمال التي يمكن أن يتحرك خلالها الماء القلوي الحبيس.



الشكل ٦-٢٦: معطيات المسامية- النفوذية للالايت (ب و د) وللكاؤلين (أ) و (ج) من مكمن روتليجندز الرملي المسمت في بحر الشمال (عن ١٩٧٩ and Seemann, ١٩٧٣ Stalder,).

تتكون أطيان المونتمورلنايت أو السمكتايت Smectite من تغير الزجاج البركاني وتوجد في الترسبات القارية أو البحرية العميقة. ولها القدرة على الانتفاخ بوجود الماء.

وبذلك فان المكامن الحاوية على المونتمورلنايت تكون حساسة جداً لتدمير المكمن اذا ما حفرت بالطين التقليدي ذي القاعدة المائية وبذلك فانها يجب أن تحفر بطين ذي قاعدة نفطية. وعندما يبدأ الانتاج، يحل الماء محل النفط مما يؤدي الى تمدد معادن المونتمورلنايت ويدّمرُ نفوذية الجزء الأسفل من المكمن.

تحسين المسامية بالاذابة *Porosity Enhancement by Solution*

يُقلِّل التسميت مسامية الرمل ونفوذيته. ومع ذلك، ففي بعض الحالات، يمكن لذوبان السمنت أو الحبيبات أن يعكس هذا الاتجاه. ولقد حدد (Schmidt et al., 1977) ظواهر صخرية (بتروغرافية) معينة لتمييز مسامية الاذابة الثانوية في الرمال. وهي تشمل بشكل عام ذوبان السمنت والحبيبات الجيرية، بضمنها الكالسايت والدولومايت والسيدرايت وأصداف المتحجرات والمعادن الفتاتية غير المستقرة، وخصوصا الفلدسبار. وترتبط مسامية الغسل في الرمال مع الكاؤلين، الذي يحتل الفلدسبار ويوجد كسمنت موضعي النشأة في الوقت نفسه.

ان حقيقة أن المواد الجيرية تغسل خارج الرمل وغزارة الكاؤلين يدلان على أن الغسل قد نتج بتأثير سوائل حامضية. وهنالك مصدران للغسل الحامضي: التحوير السطحي Epidiagenesis، أو بشكل أكثر تحديداً التجوية الناتجة عن المياه السطحية (Fairbridge, 1967) وطرد كاربوكسيل Decarboxylation الفحم أو الكيروجين (Schmidt et al., 1977).

يؤدي المياه الجوي الغني بحامض الكاربونيك والاحماض الدبالية Humic Acids الى تجوية الحجر الرملي عند سطح الأرض. وبذلك فان العديد من الجيولوجيين بدءاً من (Hea, 1971 الى Al-Gailani, 1981) قد درسوا بتروغرافية الحجر الرملي تحت سطوح عدم التوافق (اللوحة ٥). وفي العديد من الحالات تمت ملاحظة التكلأن Kaolinization والشطف Leaching، رغم أن المسامية الثانوية لم تحفظ الا ضمن المكامن الهايدروكاربونية. ومن المعتاد أن يتم تدمير المسامية المتسببة من التجوية أثناء الدفن بالتحوير الاعتيادي. ولقد تمّ مُسبقاً ملاحظة دور الهايدروكاربونات في حفظ المسامية. وتشمل الأمثلة على مكامن الرمل ذات المسامية الثانوية تحت سطوح عدم التوافق رمل سرير

في ليبيا (والذي شكل الأساس في دراسة Hea)، والرمل الكامبري-الأوردوفيشي في حقل حاسي مسعود في الجزائر (Balducci and Pommier, 1970)، والرمل الجوراسي تحت سطح عدم توافق الكيمرياني Sub-Cimmerian في بحر الشمال (Hancock, 1978) ومن خليج برودو Prudoe في الألاسكا.

وكمصدر بديل للمائع الحامضي هو طرد كاربوكسيل Decarboxylation الفحم أو الكيروجين، مسبباً تحرر موائع حامض الكربونيك (Schmidt et al., 1977). واستناداً الى هذه النظرية، فان السوائل الحامضية تُطرد من صخرة مصدرية في طور النضوج قبل هجرة البترول. وتخلق هذه الموائع الحامضية مسامية ثانوية في الطبقات المكمنية. وتفسّر هذه الآلية Mechanism تكّون المسامية الثانوية التي أمكن ملاحظة وجودها في الصخور الرملية التي لم تتعرض الى الرفع Uplift أو التكشف الهوائي Subaerial exposure.

توقيت الهجرة والتحوير Timing of Migration and Diagenesis

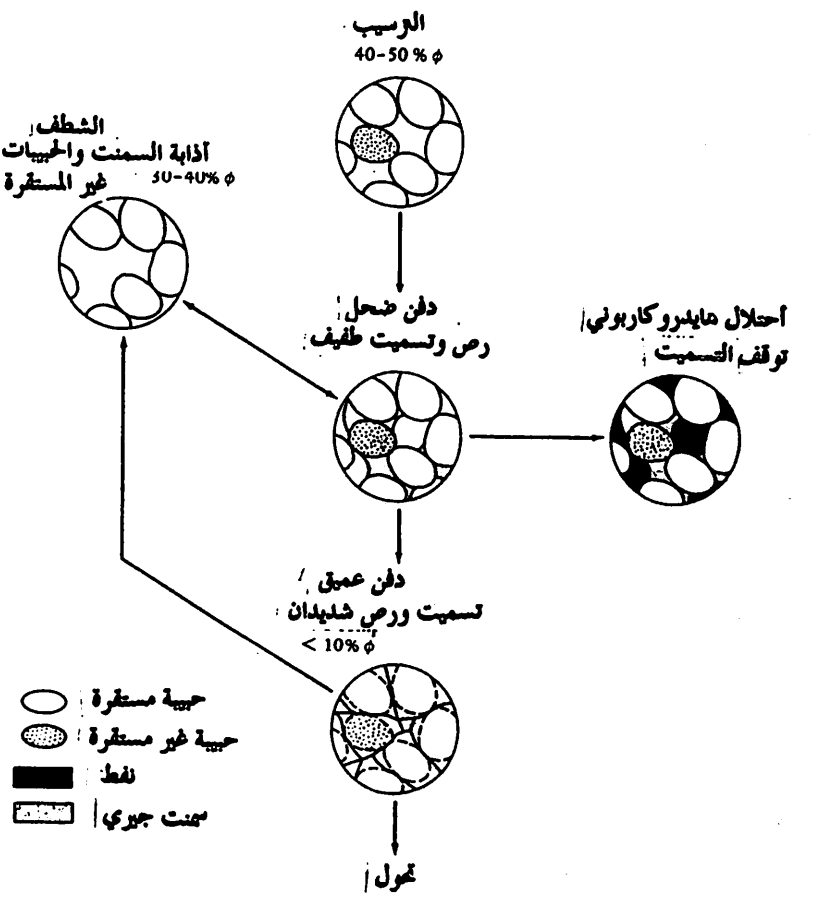
غالباً ما تكون قيم المسامية والنفوذية أعلى في المكامن الهايدروكاربونية منها في الأنطقة المائية الواقعة تحتها. ومثلما شرحنا في الفقرة السابقة، فأن هذا التناقض قد يعزى الى التحوير السطحي حيث يقع المكمن تحت سطح عدم التوافق. وفي مثل هذه الحالات فأن التغير في المسامية والنفوذية قد يكون فوق أو تحت حد تماس النفط-الماء.

ومثلما لاحظنا مسبقا (ص ٢٤١)، فأن وجود الهايدروكاربونات يمنع التسميت من خلال منع الماء الحبيس من الاستمرار في الحركة خلال المصيدة Trap. الا أن الانسياب قد يستمر في النطاق المائي التحتي بحيث تقل المسامية والنفوذية بفعل التسميت بعد أن يكون النفط والغاز قد هاجرا الى المصيدة.

وصف السمنت السليكي اللاحق للهجرة Postmigration Silica Cement في الأنطقة المائية تحت المصائد من رمل كلينتون Clinton السيلوري في أوهايو (Heald, 1940) ومكامن العصر الجوراسي في منخفض غفهورن Gifhorn trough في ألمانيا (Philip et al., 1964) ويسبق الكالسايت والأنهايدرايت الهجرة في رمل لايونز Lyons البرمي في حوض دينفر Denver basin

(Levandowski et al., 1973). وهنالك العديد من حالات التسميت اللاحقة للهجرة المعروفة. وفي الحالات المتطرفة فان التسميت اللاحق للهجرة قد يكون واسع الانتشار الى الحد الذي يقوم بدور ختم مقعدي seal seal ، مؤديا الى نشوء المصائد القديمة المتجمدة Frozen-in-Paleotrap ، كما هو الحال في حقل الروضتين في الكويت 1981 (Al-Rawi).

بسبب التسميت اللاحق للتسميت فأن من المهم قطع اللباب تحت حد تماس- النفط-الماء لحقل معين. فاذا ما تم توقع آلية انتاج بدفع الماء، عندها يجب معرفة نفوذية الخزان المائي. وأنه يجب عدم اسقاط المعطيات من المكمن باتجاه الاسفل. ويلخص الشكل (٦-٢٧) مسالك التحوير المحتملة في الصخور الرملية.



الشكل ٦-٢٧: مخطط أنسيابي للمسارات التحويرية للحجر الرملي .

تأثيرات التحوير على المكامن الجيرية

Effects of diagensis on Carbonate Reservoirs

تضم الصخور الجيرية الحجر الجيري Limestones الذي يتكون الى حد كبير من الكالسايت $CaCO_3$ وصخور الدولومايت $[CaMg(CO_3)_2]$ التي تتكون الى حد كبير من معدن يحمل الاسم نفسه. أن المكامن الجيرية تعد مكامن بنفس أهمية المكامن الرملية، ولكن تطويرها وانتاجها يواجه الجيولوجيين والمهندسين بمجموعة مختلفة من المشاكل. فالسليكا من الناحية الكيميائية أكثر استقرارا من الكالسايت. وبذلك فأن تأثيرات التحوير أكثر وضوحا في الحجر الجيري من الحجر الرملي. وفي المكامن الرملية فأن المشكلة الرئيسية هو تحديد التغيّرات الرسوبية الاصلية، وتحديد البيئة الترسيبية والجغرافية القديمة، واستعمال هذه لتوقع التغيرات الحاصلة في المكمن اثناء حفر الحقل. ان تأثيرات التحوير تعد امرا ثانويا بشكل عام قياسا الى تغيرات المسامية الاولية، وهو امر نادرا ما يصح بالنسبة للمكامن الجيرية. عندما تترسب للمرة الاولى، تكون الترسبات الجيرية عالية المسامية والنفوذية وهي تكون في الأصل غير مستقرة في البيئة تحت السطحية. وبذلك، فأن المعادن الجيرية تذوب ويعاد ترسيبها لتكون الحجر الجيري التي يكون توزيع مساميته ونفوذيته ثانوي الأصل الى حد كبير وغالبا ما يكون غير مرتبط بالمسامية الاولية. وهكذا فأن تحليل سحنات المكامن الجيرية قد يساعد فقط في التطوير والانتاج في تلك الحالات النادرة حيث تكون البصمات التحويرية في حدها الادنى. وبعد أن ناقشنا التأثيرات العامة للتحوير على المكامن الجيرية، فأن من المناسب الان ان نتناولها بشيء من التفصيل.

نُشرت كتب تتعلق بهذا الموضوع من قبل (Bathurst, 1975, Wilson, 1975, Chilingar et al.,1972, Reeckmann and Friedman, 1982). ولقد نوقشت فقرات أقصر تربط على نحو محدد بين تحوير الصخور الجيرية ونشوء المسامية من قبل (Longman, 1980, Purser, 1978). ويستند الوصف الحالي على هذه المصادر، وهو يركز على جوانب التحوير تلك التي تؤثر على نحو مهم في نوعية المكمن. وسوف يتم تناول الشعاب والرمال والاطيان على نحو منفصل.

تحوير الشعاب وصفاتها البتروفيزيائية
Diagenesis and Petrophysics of Reefs

تُعد الشعاب (ويستعمل المصطلح هنا بمعناه العام) مظهرا فريدا بين الترسبات لانها تتكون في الأصل كصخرة بدلا من ان تنتج من تصلب الترسبات غير المتماسكة. ولقد ذكر ان الشعاب الحديثة تحتوي على قيم مسامية تتراوح بين ٦٠ الى ٨٠ بالمئة. ولان الشعاب تتكون متصلبة مسبقا، فانها لا تتعرض الى الرُّص مثل أغلب الترسبات الاخرى. وبذلك يمكن حفظ مساميتها. ومع ذلك فأن هنالك احتمال فقط بحفظ المسامية عندما تبقى الشعاب في بيئة موائع ساكنة مثلما يحدث عندما تدفن بسرعة بالاطيان المصمتة (عديمة النفوذية). وعندما يمر انسياب ثابت من الماء القلوي الحبيس خلال الشعاب، فأن من المحتمل ان يتم فقدان المسامية تدريجيا نتيجة تكون السمنت السباريتي الفسيفسائي Mosaic sparite cement (اللوحة ٦). وحيثما ينساب الماء الجوي الحامضي خلال الشعاب، فأن الشعاب يمكن ان تغسل وتتغيّر بذلك مساميتها.

قبل أن تدفن الشعاب بشكل نهائي، يكون مستوى سطح البحر قد تذبذب عدة مرات. وبذلك فأن العديد من الحالات التحويرية من التسميت والاذابة قد أثرت على البنية الاولية للشعاب ومساميتها. لذلك فأن ليس من المدهش ان لا تكون هنالك أية مضاهاة بين الوحدات المكمنية التي يحددها مهندس في مصيدة شعابية والسحنات التي يعرّفها الجيولوجي. ان هذه الظاهرة موضحة في (شعاب انتصار) في ليبيا التي سوف يتم وصفها في الفصل السابع (ص ٣٩٠).

تحوير الرمال الجيرية وصفاتها البتروفيزيائية
Diagenesis and Petrophysics of Lime Sands

شأنها شأن الشعاب، قد تمتلك الرمال الجيرية قيم مسامية اولية مرتفعة (Enos and Sawatsky, 1979). ولانها ليست متماسكة، فانها تبدأ بفقدان المسامية بسرعة عند الدفن، فيضغط الطين وتتكسر الاصداف مع زيادة ضغط الطبقات الفوقية. ومثل الشعاب، فأن الرمال الجيرية يمكن ان تغسل بموائع متنوعة. فالمياه الجوية الحامضية قد تغسل الرمال الجيرية وتزيد المسامية، في حين ان الموائع القلوية قد تؤدي الى تسميتها.

ويتخذ التسميت المبكر أشكال متميزة مختلفة يُمكن تمييزها تحت المجهر. وتضم هذه الأشكال الليفي Fibrous، المكريتي Micritic ومجهري التبلور Microcrystalline التي تتكون في نطاق الرذاذ Spary Zone (كصخرة شاطئية Beach rock) وعلى قاع البحر (كأرض صلبة Hard Ground). ان انواع السمنت المبكرة هذه تقلل المسامية بعض الشيء وقد تقلل النفوذية الى حد ملموس حيث تجسر ممرات المسامات. ومع ذلك، فأن التسميت المبكر يمكن ان يزيد من قدرة المكمن لانه يصلب الترسبات، ومثلما هو الامر مع الشعاب، يتضاءل عندها تأثير الرُّص. ويعتمد التحوير المتأخر على بيئة الموائع، فالماء الجوي الحامضي قد يزيد المسامية بالغسل، في حين ان الماء القلوي الحبيس قد يؤدي الى ملأها بفسيفساء من بلورات السبارايت. وحيثما لا يكون هنالك انسياب للمائع، فأن المسامية يمكن ان تحفظ وقد تحتل الهايدروكاربونات المكمن.

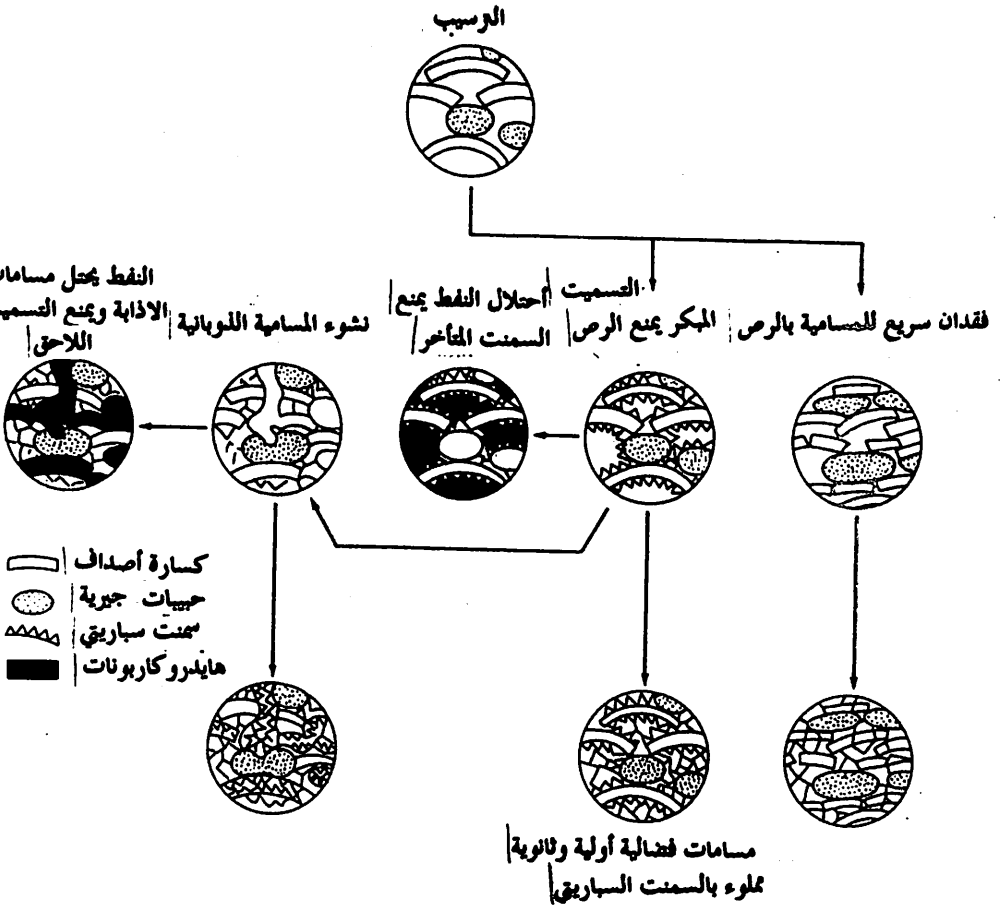
تمتلك الرمال الجيرية التي لم تتعرض الى تسميت ضحل مبكر فرصة اقل للتحول الى مكامن. وعندما تُدفن الرمال، فأنها تفقد المسامية بسرعة بتأثير الانضغاط، رغم أنها مرة أخرى حساسة للغسل الثانوي عندما يتم احتلالها بالماء الجوي الحامضي اثناء عملية التحوير السطحي. ويلخص الشكل (٦-٢٨) المسالك التحويرية للرمال الجيرية.

تحوير الاطيان الجيرية وصفاتها البتروفيزيائية

Diagenesis and Petrophysics of Lime Muds

تتكون الجيريات الحديثة الى حد كبير من معدن الارغونايت Argonite الذي يمثل النوعية المعينية المستقيمة Orthorhombic من كاربونات الكالسيوم. يكون الارغونايت غير مستقر تحت السطح حيث يتحول الى الكالسايت السداسي المنتظم Hexagonal isomorph. يؤدي هذا التغيّر الشكلي الى زيادة قدرها ٨ بالمئة في الحجم الكلي، مما يؤدي الى فقدان المسامية. فاذا ما ترافق مع الرُّص، فأن فقدان المسامية هذا يعني ان أغلب الاطيان الجيرية القديمة هي صخور صلبة كتيمة Tight ومتشظية Splintery ولا تحتوي على أية احتمالية مكمنية ما لم تتعرض الى التكسر او الدلمتة.

هنالك استثناء مهم لهذه القاعدة العامة يحدث عندما يكون الطين الجيري كالسيتي أكثر من كونه ارغونايتي. ان الطرينات (الردغات) الكوكوليثية Coccolithic oozes



الشكل ٦-٢٨: مخطط انسيابي مبسط للمسارات التحويرية في الرمل الجيري .

التي توجد في صخور العصر الطباشيري والصخور الاحدث، ذات تركيب كالسيتي أصلي. وبفقدانها لتفاعل الارغونايت-الكالسايت، تبقى هذه الاطيان الجيرية كطباشير هش مع مسامية تتراوح بين ٣٠ الى ٤٠ بالمئة. ومن المعتاد ان تكون ذات قيم نفوذية واطئة جدا بسبب صغر قطر مساماتها. وليس من المعتاد أن يعد الطباشير صخورا مكمنية وقد يقوم مقام صخور غطائية. ومع ذلك، فأن هنالك بعض الظروف، التي يكون فيها مكامن بترولية، على سبيل المثال، أن التكسرات يمكن ان تحسن نفوذيته كما هوالحال في طباشير أوستن Austin Chalk (الطباشيري الاعلى) في تكساس. وفي ترسبات العصر الطباشيري المشابهة في بحر الشمال، توجد المكامن في حقل أيكوفسك Ekofisk والحقول المجاورة

في سواحل النرويج (أنظر ص ٣٧٧). وهنا منع الضغط الفائق فقدان المسامية بفعل الرص، في حين ادى التكسر فوق القباب الملحية الى زيادة قيم النفوذية (Scholle, 1977). وبسبب انتظامها، فأن ممالات المسامية للطين الجيري يمكن ان ترسم على نحو مشابه لتلك التي تم رسمها للحجر الرملي (Scholle, 1981). ويندر ان يكون بالامكان اعداد ممالات المسامية هذه لصخور الارنايت الجيري Calcarenites غير المتجانسة، رغم ان هنالك بعض الاستثناءات (أنظر Schmoker and Halley, 1982).

المكامن الدولوميتية *Dolomite Reservoirs*

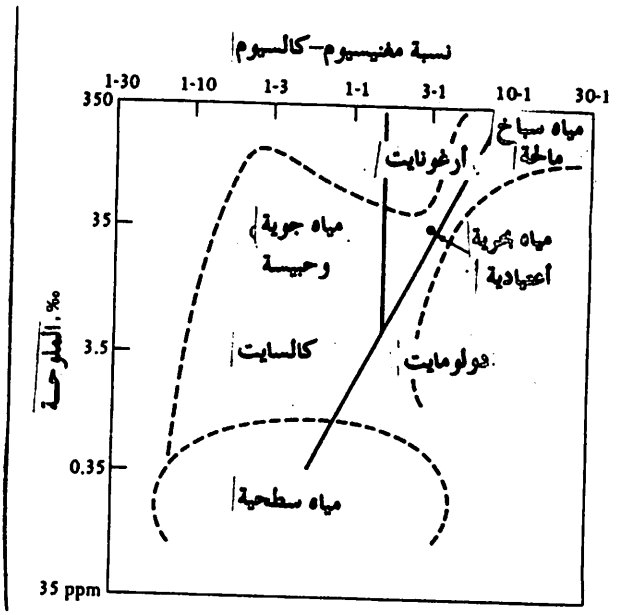
تضم المجموعة الرئيسية الثانية من المكامن الجيرية صخور الدولومايت. ويمكن ان يتكون الدولومايت من الكالسايت (الدلتة Dolomitization) أو بالعكس (طرد او نزع الدولومايت Dedolomitization او الكلسته Calcitization) مثلما هو موضح في التفاعل التالي:

$$2CaCO_3+Mg^{2+} \rightleftharpoons CaCO_3MgCO_3+Ca^{2+}$$

ان الاتجاه الذي يتحرك به هذا التفاعل هو دالة لا لنسبة المغنيسيوم-الكالسيوم حسب بل كذلك للملوحة (الشكل ٦-٢٩).

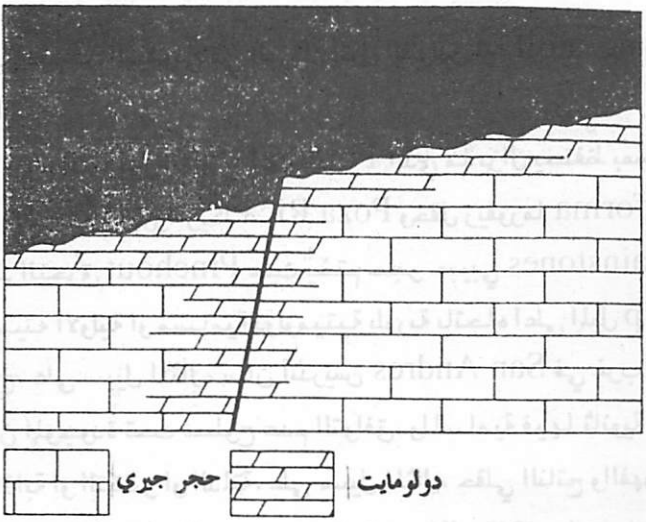
يتم التمييز بين الدولومايت الأولي والثانوي. فالدولومايت الأولي بشكل عام متطبق وغالبا ما يكون وحدات متصلة عرضيا. وبشكل مميز، يوجد في السباخ Sabkha (الاهوار الملحية) حيث تتحول التتابعات الجيرية الى أطيان مستنقعية حاوية على بلتات (دمالق) سلحية Fecal Pellet ومن ثم الى تبخريات فوق مدية Supratidal evaporites. وتكون صخور الدولومايت هذه بشكل عام خفية التبلور Cryptocrystalline ، وذات نسيج طباشيري في الغالب. وبذلك فأنها قد تكون مسامية، ولكن بسبب قطر مساماتها الضيق، فأنها تفتقد النفوذية. ومن الامثلة على صخور الدولومايت الاولية في دورات السباخ تلك التي تم وصفها من تكوين (العرب-درب) الجوراسي في أبو ظبي (Wood and Wolfe, 1969) . ويعتقد ان مثل صخور الدولومايت هذه ذات أصل أولي، أو على الأقل

متزامنة، رغم ان كيمياء تكونها الدقيقة ما تزال جدال.



الشكل ٦-٢٩: مرتسم بياني لنسبة المغنيسيوم- الكالسيوم مرسومة مقابل الملوحة يظهر حقول الاستقرارية للارغونايت والكالسايت والدولومايت. لاحظ كيف أن الدلفة قد تنتج من انخفاض الملوحة حتى في حالة نسب منخفضة من المغنيسيوم- الكالسيوم (عن Folk and Land, ١٩٧٤).

تقطع صخور الدولومايت التطبق وغالبا ما توجد بعدسات غير منتظمة او أنطقة غالبا ما تقع تحت سطوح عدم التوافق او ان تشكل أغلفة حول الفوالق والتكسرات (الشكل ٦-٣٠). ان هذه الصخور الدولوميتية الثانوية تكون في العادة متبلورة وفي بعض الاحيان تمتلك نسيجا سكريا هشاً (اللوحة ٧). وتكون المسامية من النوع البلوري الثانوي وقد تتجاوز ٣٠ بالمئة. وعلى النقيض من الدولومايت الاولي، تكون صخور الدولومايت الثانوية نفاذة. وعندما يتم احتلال الكالسايت بالدولومايت، يقل الحجم الكلي بنحو ١٣ بالمئة، وبالتالي تزداد المسامية تبعا لذلك. وبذلك فأن الدولومايت السكري غالبا ما يكون صخورا مكمنية هامة، كما هو الحال في شعاب العصر الديفوني في البرتا (Toomey et al., 1970). وتوجد صخور الدولومايت تحت سطوح عدم التوافق الاقليمية الواسعة، على سبيل المثال، على اقواس وسكونسن Wisconsin وسان ماركوس San Marcos (Badiozamani, 1973, Rose, 1972).



الشكل ٦-٣٠: مقطع عرضي يظهر الكيفية التي غالبا ما ترتبط بها صخور الدولومايت الثانوية بالفوالق وسطوح عدم التوافق.

تحوير الصخور الجيرية وصفاتها البتروفيزيائية: الخلاصة
Carbonate Diagenesis and Petrophysics: Summary

أعطت الفقرة السابقة استعراضا مبسطا لتعقيدات تحوير الصخور الجيرية ونمو المسامية. ولقد انجزت العديد من الدراسات المختصة في هذه الموضوعات في الجامعات وشركات البترول، ولكن حتى في هذه الاخيرة، فأن من المناسب دوما السؤال عن المساهمة التي قدمتها دراسة معينة في القيام بتوقع Prediction نوعية المكمن. وتميل معظم الدراسات المتعلقة بتحوير الصخور الجيرية ان تكون وصفية بشكل أساسي.

استعرض كل من (Jardine et al., 1977, Wilson, 1981) العلاقات بين نوعية المكامن الجيرية والسحنات والتحوير. ولقد ميز (Wilson, 1981) أنواع المكامن الجيرية الرئيسية الستة التالية التي تتراوح من تلك التي تعتمد مساميتها على السحنات الى حد كبير الى تلك التي تحمل بصمات تحويرية كثيفة.

١. المخاضات Shoals التي ما تزال تحتفظ بمساميتها الاولية، على سبيل المثال، تكوين (العرب دي) في المملكة العربية السعوية وتكوين السماكوفر Smackover في لوزيانا.
٢. البنائيات Buildups التي ما تزال تحتفظ بمساميتها الاولية ، على سبيل المثال بعض

شعاب العصر الديفوني في البرتا وأتول الفولدن لين Golden Lane atoll في المكسيك.

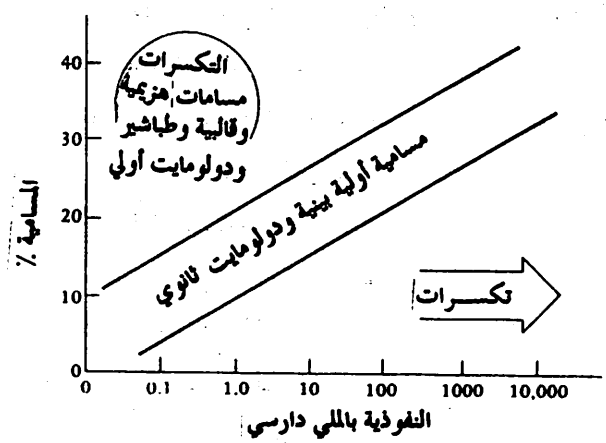
٣. حطام امام الشعاب Forereef talus الذي ما يزال يحتفظ بمساميته الاولية، على سبيل المثال، حقل بوزا ريكا Poza Rica وحقل ريفورما Reforma في المكسيك.

٤. مصائد التحزّق Pinchout حيث يُختم حجر حبيبي grainstones ما يزال يحتفظ بمساميته الاولية او مسامية دولوميتية بلورية باتجاه اعلى الميل Up-dip بتبخريات السباخ، على سبيل المثال، سان أندريس San Andres في غرب تكساس.

٥. المكامن الموجودة تحت سطوح عدم التوافق، والمسامية فيها ثانوية الى حد كبير ناتجة من الاذابة او التكسر او الدلمتة، على سبيل المثال، حقلي الناتح والفهود في عمان.

٦. الطباشير الكالسيتي الذي تحسنت نفوذيته بتأثير التكسرات، على سبيل المثال حقل أيكوفيسك والحقول المرتبطة به في بحر الشمال.

وأخيرا، يظهر الشكل (٦-٣١) العلاقة بين المسامية والنفوذية والانواع المختلفة للمسامات الموجودة في الصخور الجيرية والمكامن الاخرى.



الشكل ٦-٣١: العلاقة بين المسامية والنفوذية للانواع المختلفة من الصخور وأنظمة المسامات.

المكامن غير النموذجية والمكامن المتكسرة

Atypical and Fractrued Reservoirs

يوجد نحو ٩٠ بالمئة من النفط والغاز العالمي في المكامن الرملية او الجيرية. اما العشرة بالمئة المتبقية فانها توجد في ما يعرف بالمكامن غير النموذجية، التي تتراوح من أنواع مختلفة من صخور القاعدة Basement الى السجيل المتكسر. ومثلما شرحنا مسبقا، فأن من الناحية النظرية يمكن لاي صخرة ان تكون مكمنا بتروليا اذا كانت تحتوي على مسامية ونفوذية. ان المكامن غير النموذجية يمكن ان تتكون بعمليتين: التجوية والتكسر.

لقد تمّ مسبقا ملاحظة دور التجوية في تكون المسامية الفوبانية في الصخور الرملية والجيرية (ص٣٠٨). ولتجوية انواع من صخور معينة اخرى تأثيرا مشابها. تتجوى المعادن بمعدلات مختلفة، وبذلك فان الصخور البلورية متعددة المعادن يمكن ان تكون شريطا Veneer مساميا عندما تتجوى المعادن غير المستقرة وتختفي، تاركة بقايا مسامية حبيبية من حبيبات المعادن المستقرة. ويحدث هذا الوضع عادة في صخور الغرانيت والنايس، حيث يغسل الفلدسبار خارجا ليترك الرمل الكوارتزي غير المتماسك. ان غسل الغرانيت Granite wash هذا هو الكابوس الذي يؤرق جيولوجي حفر الابار. فالتحول من الاركوز خلال ترسبات غسل الغرانيت الموضعية الى الغرانيت غير المتجوي قد يكون طويلا وبطيئا.

ينتج عدد من الحقول من مكامن صخور القاعدة المتجوية. ففي حقل البانهاندل-موغرتن في تكساس واوكلاهوما، يبلغ سمك نطاق غسل الغرانيت نحو ٧٠ مترا، رغم ان هذا النطاق يتراوح من السجيل الاحمر، مرورا بالاركوز الى الغرانيت المتكسر (Pippin, 1970). كما ان حقل اوغيلا في حوض سرت في ليبيا، ينتج ايضا من الغرانيت المتجوي والمتكسر. ولقد انتجت بعض الابار في هذا الحقل معدلات تجاوزت ٤٠٠٠٠ برميل في اليوم (Williams, 1972). وينتج حقل لونغ بيتش Long Beach وحقول اخرى في كاليفورنيا من الشست الفرانسيكاني Franciscan schists (الجوراسي) (Truex, 1972).

ان التكسر يمكن ان يحول اية صخرة هشة الى مكمن (ص ٢٧٣). ويمكن للصخور المسامية ولكن غير النفاذة ان تكتسب النفوذية عن طريق التكسر، كما هو الحال، على سبيل

المثال، في الطباشير والسجيل. وحتى الصخور غير المسامية كليا قد تصبح مكامن بتأثير التكسرات. ويمكن تشخيص التكسرات من مجسات الابار، ومن التفحص البصري للباب، ومن الفحوصات الانتاجية. وتضم المعاملات المهمة جدا شدة التكسر Fracture intensity التي تؤثر على المسامية والنفوذية، واتجاه التكسرات Fracture Orientation، التي تؤثر على تجانس Isotropy المكمن (Prison, 1978 ، ص ص ١٨٠-٢٠٦).

يمكن التعبير عن شدة التكسر بمعامل شدة التكسر Fracture Intensity Index (FII):

$$FII=\frac{(\phi_t-\phi_m)}{(1-\phi_m)}$$

حيث أن :

ϕ_t: المسامية الكلية.

ϕ_m: المسامية غير الناتجة من التكسرات.

تمثل المكامن المتكسرة مشاكل خاصة في الانتاج ، ويتمثل الخطر الرئيسي في أن النفط الموجود في التكسرات قد ينتج بسرعة ويستبدل بالماء . وبذلك يمنع الاستخلاص من بقية المسامات(Aguilera and Van Poollen, 1978, Reiss, 1980) . ومن الأمثلة على المكامن التي تنتج كليًا تقريبا من التكسرات صوان مونتيري من العصر المايوسيني Miocene Monterey cherts في كاليفورنيا ، والتي تنتج النفط في حقل سانتا ماريا Santa Maria والحقول الاخرى. ومعدلات الانتاج واطئة ، بحدود ١٥٤٠٠ برميل للاكر الواحد (Eggleston, 1948, Regan and Hughes, 1949). أن السجيل الذي يمثل في العادة صخورا غطائية ، قد يعمل عمل مكامن في حد ذاته عندما يتكسر.

تُنتج بعض صخور السجيل المصدرية نفطاً حرا من التكسرات دون وجود ماء مترابط معه. وكمثال على هذه الظاهرة هو سجيل بيير Pierre Shale في حقل فلورنسا Florence بكلورادو (McCoy et al., 1951) . والانتاج من هذا الحقل غريب الاطوار، رغم انه قد ذكر ان احدى آبار هذا الحقل قد أنتجت مليون ونصف مليون برميل

من النفط ، وانتاج الغاز من السجيل المتكسر أكثر شيوعا، وهنالك العديد من الحقول التي تنتج من سجيل حقبة الحياة القديمة في كنتاكي وكنساس وفي أماكن أخرى في شرقي الولايات المتحدة الامريكية.

يمكن العثور على تفاصيل أكثر تتعلق بالمكامن الشاذة والمتكسرة في (Dott and Reynolds, 1969, Reiss, 1980 and Chung-Hsiang p'An, 1982).

استمرارية المكمن RESERVOIR CONTINUITY

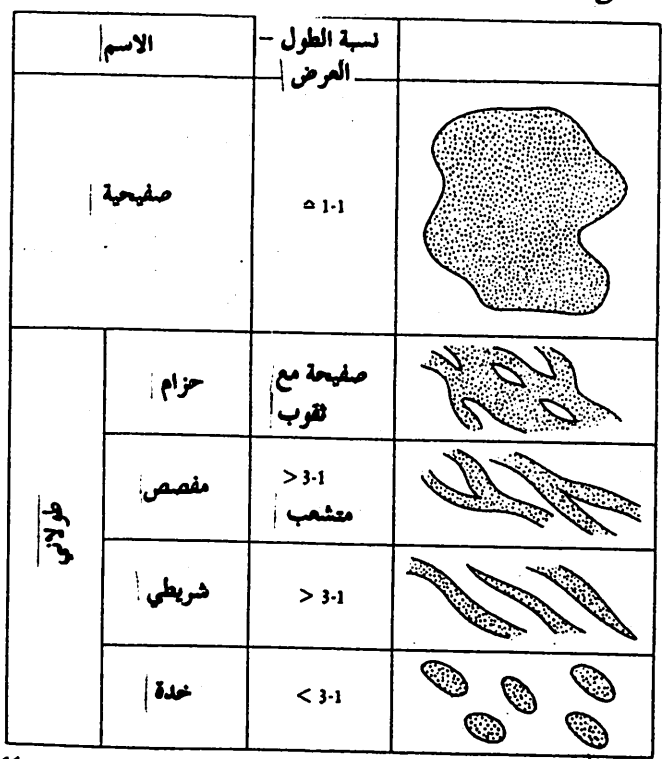
ما ان يتم اكتشاف حقل النفط او الغاز، فأنه يجب ان يتم حساب احتياطية ووضع الطريقة المُثلى لاستخراج النفط او الغاز منه. وتُعَدُّ المعرفة التفصيلية باستمرارية المكمن مُتطلباً مسبقا لحل كلتا المشكلتين. وهنالك قلة من المصائد فقط التي تحتوي على مكامن منتظمة السمك والمسامية والنفوذية ، اذ أن اغلبها غير متجانس بدرجات مختلفة. وبذلك يتم تقسيم المكمن عادة الى عطاء كلي Gross Pay والى عطاء صافي Net Pay. ويمثل العطاء الكلي النطاق العمودي الكلي من قمة المكمن الى حد مستوى تماس النفط مع الماء. أما العطاء الصافي فيمثل السمك العمودي التراكمي الذي ينتج النفط حقا منه. وفي العديد من الحقول يكون العطاء الصافي اقل بشكل ملموس من العطاء الكلي. ويعزى الفرق بين العطاء الكلي والعطاء الصافي الى عاملين هما: المسامية الاولية التي ترسب بها التكوين والعمليات التحويرية التي دمرت المسامية الاصلية بالتسميت او زادتها بعملية الاذابة.

ولقد بذلت العديد من المحاولات بغية التحديد الكمي لاستمرارية المكامن. ولقد وجهت هذه المحاولات الى حد كبير باتجاه هندسية الاجسام الرملية، حيث يكون تأثير العمليات التحويرية في حده الادنى.

الاستمرارية العرضية Lateral Continuity

وضعت الخطط لتصنيف الاستمرارية العرضية للرمال وتقييمها كميا من قبل , Pryor and Fulton, 1976 and Harris and Hewett, 1977) (Potter, 1962, Polasek and Hutchinson, 1967 ويستند الشكل (٦-٣٢) على الخطة التي اقترحت من قبل (Potter, 1962) . ويمكن تمييز مجموعتين رئيسيتين

من الرمال اعتمادا على استمراريتها العرضية وهما: الصفائح Sheets والاجسام الطولية Elongate bodies.



الشكل ٦–٣٢: تسمية هندسية (معمارية) الاجسام الرملية (عن ١٩٦٢ ,Potter).

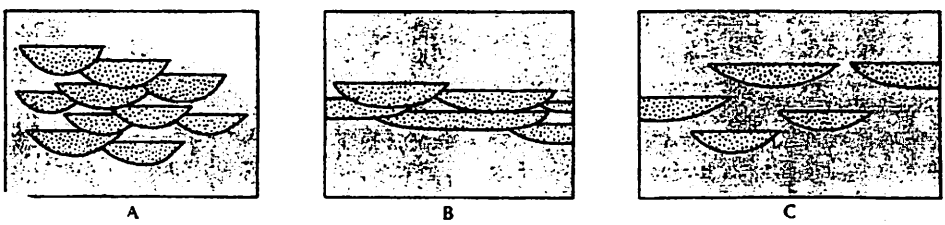
والصفائح مستمرة بشكل او آخر وتبلغ نسب الطول فيها الى العرض ١–١. وتوجد الرمال الصفيحية في العديد من البيئات التي تتراوح من مراوح العكورة Turbidite fans و Crevasse-splays الى الرمال القنوية المتداخلة Coalesced channel sands في السهول النهرية المظفورة Braided alluvial plains ، وقد تكون الصفائح غير مستمرة بسبب انعدام الترسيب او التعرية اللاحقة ، حيث يحتل الرمل موضعيا بالسجيل . وتتحول الصفائح غير المستمرة الى أنطقة من الرمل، والتي رغم أنها ما تزال واسعة الانتشار الا أنها تحتوي على العديد من التجاويف Vacuoles الطولية الموضعية.

ومن بين الرمال الطولية المعروفة التي تزيد نسبة الطول الى العرض فيها عن ٣–١

هي الاشرطة ribbons أو اشرطة الاحذية Shoestrings (Rich, 1923) ، والتي تترسب بشكل عام في بيئات الحواجز Barrier bar environments. أما الاجسام الشجرانية Dendroids فهي اشرطة متشعبة Bifurcating shoestrings وتشمل كلا من رمال قنوات الروافد النهرية Tributary channel sands والقنوات الفرعية المروحية تحت البحرية والدلتائية. في حين أن الخدد (جمع خدة) Pods هي رمال منعزلة تبلغ نسبة الطول الى العرض فيها أقل من ٢-١. وهي تشمل رمال التيارات المدية وبعض الكثبان الهوائية.

الاستمرارية العمودية Vertical Continuity

اذا ما تم تصورها عموديا، فأن من الممكن تقسيم الرمال الى مكامن منعزلة Isolated ومكامن متراكمة Stacked. والرمال المتراكمة هي تلك التي تكون في حالة استمرار مع بعضها اما افقيا او عموديا. وغالبا ما يطلق اسم الرمال متعددة الطوابق Multistorey sands (الشكل ٦-٣٣).



الشكل ٦-٣٣: المصطلحات الوصفية لاستمرارية الجسم الرملي العمودي : (أ) مراكم عموديا (متعدد الطوابق) ، (ب) مراكمة رضيا (ج) منعزلة . (عن Harris and Hewitt, ١٩٧٧).

وضع (Pryor and Fulton, 1976) تحليلا اكثر صرامة لاستمرارية الاجسام الرملية من خلال معامل الاستمرارية العرضية Lateral Continuity (LCI) Index ومعامل الاستمرارية العمودية Vertical Continuity Index (VCI). ويتم حساب معامل الاستمرارية العرضية برسم سلسلة من المقاطع العرضية، وقياس الاستمراريات القصوى والدنيا للاجسام الرملية، وتقسيم ذلك الطول على طول المقطع. اما معامل الاستمرارية العمودية فيتم حسابه بقياس سمك الرمل الاقصى لكل بئر وتقسيمه على

سمك الرمل الاكثر سمكا. ولقد طبق (Pryor and Fulton, 1976) هذه المعاملات على معطيات لباب تفصيلية من رمال العصر الهولوسيني في ريو غراند Rio Grande . ويلخص الجدول (٦-٢) هذه المعطيات.

تمتلك العديد من الحقول مكامن تتكون من تبادل من الرمل المنتج مع السجيل غير المنتج. وفي مثل هذه الحالات تصبح المضاهاة التفصيلية اساسية لاختيار مواقع الابار أثناء الحفر التطويري ولتوقع الكيفية التي تتحرك بها الموائع اثناء انتاج الحقل. ولا تضم هذه الموائع النفط والغاز ذاتا الحدوث الطبيعي بل أي مياه او غاز يتم حقنها للمحافظة على الضغط وتحسين الانتاج.

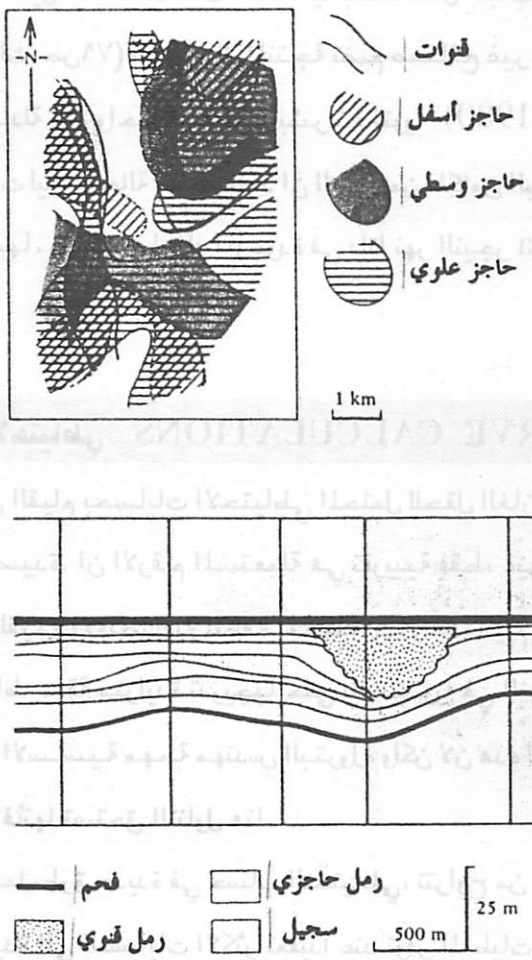
الجدول (٢-٦)

معاملات الاستمرارية العرضية ومعاملات الاستمرارية العمودية القصوى للاجسام الرملية من العصر الهولوسيني في دلتا ريوفراند.

معدل البيئة	معامل الاستمرارية العرضية		معدل معامل الاستمرارية العمودية	معدل سمك الرمل بالامتار
	العمودية	الموازية		
نهرية	٠.٤٩	٠.٨٣	٠.٧٥	٧-٥
النهرية-البحرية	١	١	٠.٨٤	٨-٧
مقدمة الدلتا	٠.٣	٠.١٧	٠.٥٦	١٠٥

عن (Pryor and Futton, 1976)، اعيد نشرها بموافقة.

يوضح الشكل (٦-٣٤) الكيفية التي يكون فيها المكمن غير متجانس. فحقل هانديل Handil في أندنوسيا هو بالدرجة الاساسية مصيدة ناتجة من طية محدبة مع بعض التفلق. ويبلغ سمك العطاء الكلي نحو ١٦٠٠ متر، ومع ذلك، يمكن تقسيمه الى العديد من التراكمات المنفصلة مع قبعاتها الغازية الخاصة بكل واحدة منها وحدود تماس النفط مع قبعاتها الغازية بكل واحدة منها وحدود تماس النفط مع الماء، ويُعزى وجود التراكمات المنفصلة جزئيا الى وجود الفوالق، ولكنها توجد ايضا لان التكوين يحتوي على



الشكل ٦-٣٤: خارطة ومقطع عرضي لجزء من حقل هانديل في أندنوسيا يظهر درجة الاستمرارية العمودية والافقية للمكامن الموجودة في الرمال النهرية البحرية الضحلة. (عن Verdier et al., ١٩٨٠).

نسبة رمل-سجيل في حدود ١-١، في حين يبلغ سمك الوحدات المنفردة بين ٥ الى ٢٠ مترا. ولقد أظهر تحليل السحنات تحت السطحية باستعمال اللباب والفتات (كما تم شرحه في الفصل الثالث، ص٧٩) ان الرمال المنتجة تضم صفائح غير مستمرة وخدّات من الرمل البحري متبادلة مع، واحيانا مقطوعة بشرائط قنوية (Verdier et al., 1980). ان هذه الترتيبات ليست حالة منفصلة، اذ ان العديد من المكامن البحرية الضحلة الاخرى تظهر تعقيدا مشابها، وخصوصا تلك الموجودة في دلتا نهر النيجر (Weber, Niger delta 1971).

حسابات الاحتياطي RESERVE CALCULATIONS

يمكن القيام بحسابات الاحتياطي المحتمل للحقل الغازي او النفطي الجديد قبل أن يتم حفر المصيدة. ان الارقام المستعملة هي تقريبية فقط، غير أنها يمكن ان تعطي بعض الدلائل عن القيمة الاقتصادية لمنطقة الاحتمالات. وعندما يتم تطوير وانتاج حقل مبرهن، يعرف احتياطه بدقة متزايدة تدريجيا حتى يتم نضوبه في النهاية. إنّ حساب الاحتياطي هو بالدرجة الاساسية مهمة مهندس البترول، ولكن لان هذه المهمة تعتمد على المعطيات الجيولوجية، فانها تستحق التناول هنا.

تستعمل طرق عديدة في حساب الاحتياطي، تتراوح من التقريبات العامة قبل أن يتم فحص المصيدة الى الحسابات الاكثر تعقيدا عند توفر المعطيات الاكثر صعوبة.

حسابات الاحتياطي الحجمية الاولية

Preliminary Volumetric Reserve Calculations

يمكن القيام بحساب اولي للاحتياطي قبل حفر المصيدة النفطية على النحو التالي:

الاحتياطي النفطي القابل للاستخراج (بالبرميل) = $Vb.F$

حيث أن: Vb: الحجم الكلي.

F : النفط المستخرج (برميل/أكر- قدم)

تفترض هذه المعادلة ان المصيدة ممتلئة بالنفط الى نقطة الانسكاب Spill point. ويحتسب الحجم الكلي من المساحة، ويحتسب الانغلاق Closure من المعطيات الزلزالية. ويستعمل جهاز البلانيميتر Planimeter لقياس مساحة خطوط المناسيب Contours المختلفة (الشكل ٦-٣٥). وعندها يتم حساب الحجم على النحو التالي:

$$V = h\left(\frac{a_o}{2} + a_1 + a_2 + a_3 + \ldots + a_{n-1} + \frac{a_n}{2}\right)$$

حيث ان :

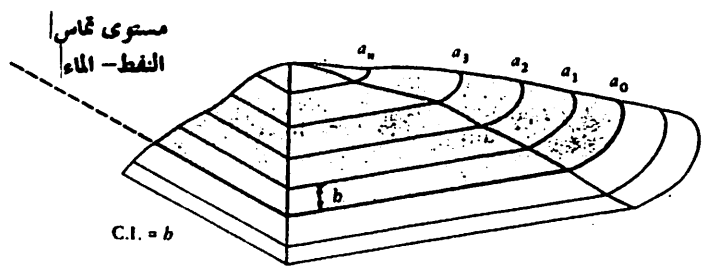
V= الحجم.

h = الفترة الكنتورية.

a_o = المساحة المحصورة بحد تماس النفط-الماء.

a_1 = المساحة المحصورة بخط المنسوب (الكنتور) الاول.

a_n = المساحة المحصورة بخط المنسوب النوني nth Contour .



الشكل ٦-٣٥: مرتسم ايزومتري لمصيدة تظهر الكيفية التي يمكن بها قياس المساحة فوق خطوط كنتورية مختارة باستعمال المسح البلانيمتري . لمزيد من التفاصيل أنظر النص.

من الواضح، أنه كلما ضاقت الفترات الكنتورية المقاسة، كانت النتائج النهائية أكثر دقة.

ان النفط القابل للاستخراج لكل أكر-قدم هو الرقم الاكثر صعوبة الذي ينبغي تخمينه ما لم تتوفر معلومات محلية من حقول مجاورة. ويمكن أن يتم احتسابه اعتمادا على تقدير لمعدل مسامية المكمن (وانقل بين ١٠ الى ٣٠ بالمئة)، وتقدير لمعامل الاستخلاص Recovery Factor (الذي يعادل بشكل عام ٣٠ بالمئة او أكثر للرمال وبين ١٠ الى ٢٠ بالمئة بالنسبة للمكامن الجيرية). ويتغاير معالم الاستخراج اعتمادا على المسافات الفاصلة بين الابار، ونفوذية المكمن، ولزوجة المائع وتاثير آلية الدفع Drive mechanism. وبشكل عام، يمكن استخراج عدة مئات من البراميل-اكر-قدم من البترول.

ان طريقة حساب الاحتياطي هذه طريقة تقريبية جدا، ولكنها يمكن ان تكون الطريقة المتوفرة الوحيدة قبل تقديم العروض للحصول على المنطقة. كما أنها يمكن ان تكون نافعة في وضع أولويات لحفر مناطق الاحتمالات.

حسابات الاحتياطي في مرحلة ما بعد الاكتشاف

Postdiscovery Reserve Calculations

ما ان يتم اكتشاف حقل معين حتى تتوفر المعلومات الدقيقة عنه ويمكن تطبيق معادلات أكثر دقة:

$$\text{النفط القابل للاستخراج (بالبرميل)} = \frac{7758V\phi(1-Sw)R}{FVF}$$

حيث أن :

V = الحجم (المساحة × السمك)　　S_W = التشبع المائي (معدل).

7758 = معامل التحويل من الاكر-قدم الى البراميل.　　R = معامل الاستخراج (مقدّر).

ϕ = المسامية (المعدل).　　FVF = المعامل الحجمي للتكوين.

سوف يتم الان شرح هذه المعاملات بشيء من التفصيل. عندما يتم حفر الابار في الحقل، تصبح التفسيرات الزلزالية أكثر تهذيبا بحيث يمكن رسم خارطة تركيبية دقيقة. وتحدد معطيات الجس والفحوصات حد تماس النفط مع الماء، وبالتالي سمك عمود الهايدروكاربونات (Dahlberg, 1979).

يتم احتساب المسامية من مجسات الابار المعايرة مع معطيات اللباب ويحتسب التشبع المائي من مجسات المقاومية. ومن الصعب عادة احتساب معامل الاستخلاص حتى لو توفرت معطيات اداء المكامن المتشابهة في الحقول المجاورة. وتعطى قيم تقريبية له مسبقا.

يحول معامل التكوين الحجمي (م ت ح) كمية النفط مقاسة ببراميل الخزانات Sock tank barrel of oil الى حجم النفط عند درجة حرارة المكمن وضغطه. وهو يعتمد على تركيب النفط، غير ان هذا الاعتماد يمكن تقريبه بشكل عام باحتساب اعتمادية معاملات التكوينات الحجمية على نسبة الغاز المذاب الى النفط Solution gas-oil ratio وكثافة النفط (كثافة أي.بي.أيAPI). وتتراوح قيمة معامل التكوين الحجمي من ١.٠٨ لنسب الغاز المذاب-النفط المنخفضة والنفط الخام الثقيل الى قيم تتجاوز ٢ للنفوط المتطايرة ونسب الغاز المذاب -النفط المرتفعة.

يمكن حساب نسبة الغاز-النفط من المعادلة التالية:

$$\text{نسبة الغاز = النفط (في المكمن)} = \frac{G_g}{G_o} = \frac{\mu_o K_g}{\mu_g K_o}$$

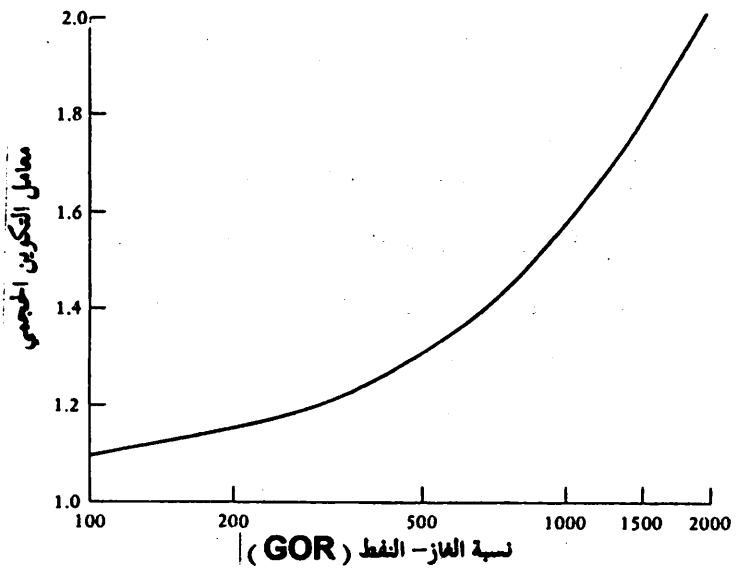
حيث أن:

Q = معدل الانسياب. عند درجات حرارة المكمن وضغوطه

μ = اللزوجة. O = البترول.

K = النفوذية المؤثرة. g = الغاز.

يظهر الشكل (٦-٣٦) العلاقة بين معامل التكوين الحجمي ونسبة الغاز-النفط. ويمكن اجراء قياسات اكثر دقة لمعامل التكوين الحجمي في المختبر. وفي الحالة المثالية، فأن عينة من مائع المكمن تجمع في قنبلة ضغط Pressure bomb ويعاد تسخينها الى درجة حرارة المكمن، ثم تقلل درجة الحرارة والضغط الى درجة حرارة وضغط السطح بحيث يمكن قياس حجوم النفط والغاز ذات العلاقة على نحو دقيق. ويطلق على هذه الطريقة اسم تحليل الضغط-الحجم- درجة الحرارة Pressure-Volume-Temperature (PVT) Analysis.



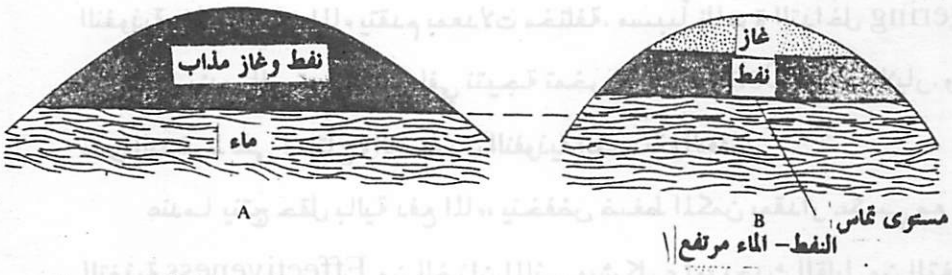
الشكل ٦-٣٦: مرتسم بياني يظهر العلاقة بين المعامل الحجمي للتكوين ونسبة الغاز- النفط.

عندما يتم الانتاج من الحقل، تحدث العديد من التغيرات في المكمن. اذ ينخفض الضغط ويتضاءل معدل الانسياب. وقد تتغاير نسبة الغاز-النفط، رغم ان ذلك يعتمد على نوع آلية الدفع، مثلما سوف يتم شرحه في الفقرة التالية. ان هذه التغيرات موضحة في

الشكل (٦-٣٧). ويمكن صياغة هذه التغيرات بمعادلة توازن المادة material balance equation، والتي مثلما يدلل اسمها توازن حجوم النفط والغاز في المكمن عند الضغوط الاولية مع تلك المنتجة والمتبقية في المكمن في مراحل مختلفة من حياته الانتاجية. وفي ابسط مستوياتها، فأن معادلة توازن المادة هي نسخة من قانون حفظ الكتلة:

وزن الهايدروكاربونات الموجودة في المكمن اساسا = وزن الهايدروكاربونات المنتجة + وزن الهايدروكاربونات المتبقية في المكمن

فاذا تم التعبير عن كافة الاوزان بوحدات براميل الخزن بالنسبة للنفط وقدم الخزن المكعب بالنسبة للغاز، عندها يمكن تعويض الوزن بالحجم.



الشكل ٦-٣٧: التغيرات ضمن مكمن والتي يمكن أن تنتج من الانتاج . (أ) الوضع عند ضغط مبدئي قبل الانتاج (ب) الوضع بوجود ضغط ناضب بعد بدء الانتاج.

لمعادلة حفظ الكتلة العديد من التغيرات المعقدة. ورغم ان حلها يعد احدى مهام مهندس البترول، فأن أغلب المعطيات التي تعتمد عليها يتم توفيرها من قبل الجيولوجي.

طرق الانتاج PRODUCTION METHODS

مثلما ذكرنا عند استعراضنا لمعادلة توازن الكتلة في الفقرة السابقة، يمكن انتاج الهايدروكاربونات بآليات عديدة. فثلاث آليات دفع طبيعية يمكن ان تسبب اندفاع النفط او الغاز الى اعلى البئر، وهي دفع الماء water drive ودفع الغاز gas drive ودفع الغاز المذاب Gas solution drive.

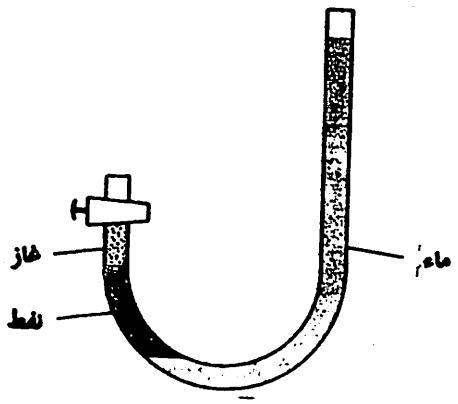
دفع الماء Water Drive

في الانتاج الحاصل نتيجة دفع الماء، يمكن اعتبار اصطياد النفط او الغاز داخل المكمن كما لو أنهما أغلقا داخل أنبوب على شكل الحرف U مملوء بالماء (الشكل ٦-٣٨). وعند فتح صنبور الماء، سوف ينساب النفط والغاز من المكمن بسبب الضغط السكوني للماء (الشكل ٦-٣٩). ولكن ليس لكل الخزانات المائية تغذية مستمرة من سطح الأرض. لذلك فأن معدل طغيان الماء Encroachment وإدامة الضغط سوف يعتمد على حجم الخزان المائي وانتاجيته. لاحظ أنه عندما يبدأ الحقل بالانتاج، يحتل الماء الجزء الأسفل من المصيدة كي يزيح النفط (الشكل ٦-٤٠)، ولكن في المكامن الاكثر انتظاما فقط يحدث أن يرتفع حد تماس النفط-الماء بشكل منتظم. ولان الطبقات المجاورة نادرا ما يكون لها نفس النفوذية، فأن طغيان الماء يتقدم بمعدلات مختلفة، مسبباً ظاهرة التداخل Fingering. ويمكن ان يؤدي الى تعقيد اضافي نتيجة تمخرط الماء Coning بجوار الابار. ويعتمد مدى التمخرط على الانتاج والنسبة بين النفوذية العمودية والافقية.

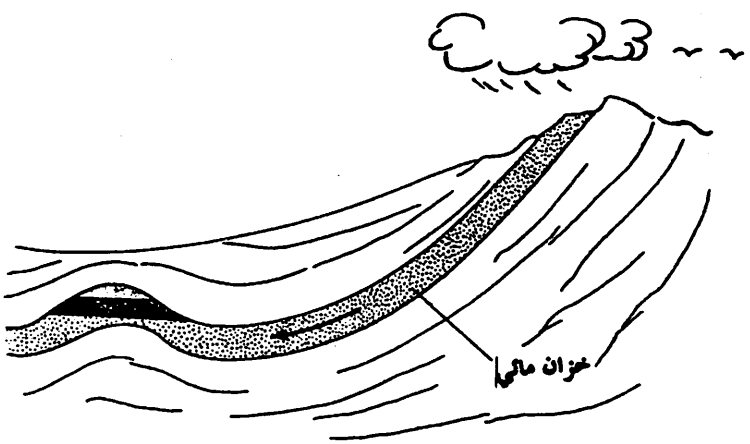
عندما ينتج حقل بالية دفع الماء، ينخفض ضغط المكمن بمقدار عكسي مع فعالية التغذية Effectiveness من الخزان المائي. وبشكل عام، يحدث القليل من التغير في نسبة الغاز-النفط. وبوجود دفع مائي مؤثر، يبقى معدل الانسياب ثابتاً أثناء حياة المانع، ولكن انتاج النفط يتضاءل عكسيا مع الزيادة الحاصلة في انتاج الماء. ان هذه الاتجاهات موضحة في الشكل (٦-٤١). وآلية دفع الماء بشكل عام هي الاكثر تأثيرا، اذ قد يصل معامل الاستخلاص الى نحو ٦٠ بالمئة.

دفع القبعة الغازية Gas Cap Drive

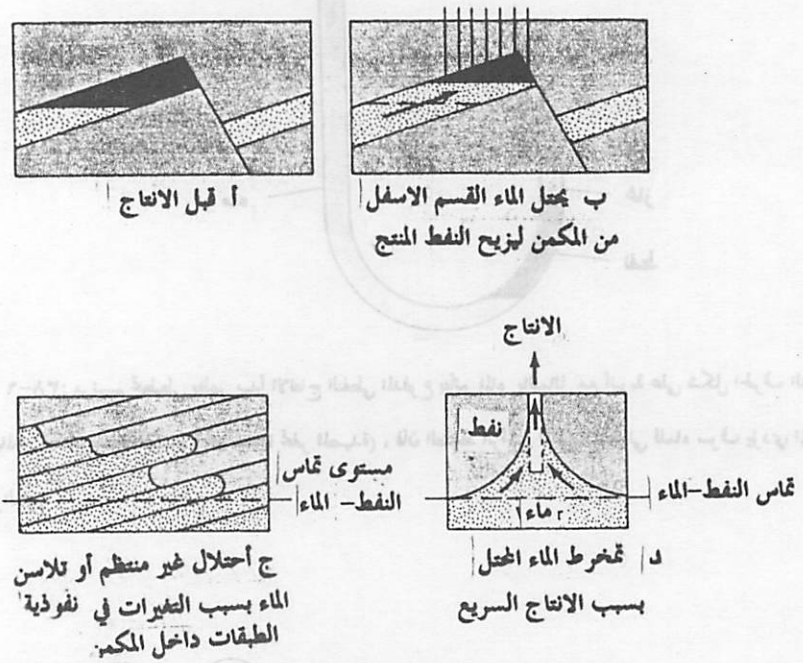
آلية الانتاج الثانية هي دفع القبعة الغازية، التي يحتوي فيها الحقل نطاقي النفط والغاز معا. وحالما يبدأ الانتاج، يؤدي الانخفاض في الضغط الى تحرر الغاز المذاب في



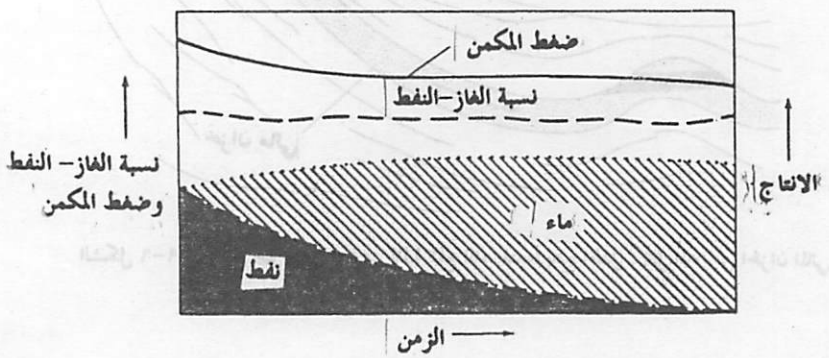
الشكل ٦-٣٨: مرتسم تخطيطي يظهر مبدأ الانتاج النفطي المدفوع بتأثير الماء بالتماثل مع أنبوبة على شكل الحرف اللاتيني U مملوءة بالماء. فعندما يفتح الصمام (أي عندما تحفر المصيدة) ، فان الضغط الرأسي المائي السكوني للماء سوف يؤدي الى انسياب النفط والغاز.



الشكل ٦-٣٩: وضع جيولوجي نموذجي لآلية دفع الماء. عندما ينتج الحقل ، يحل الماء من الخزان المائي محل البترول.

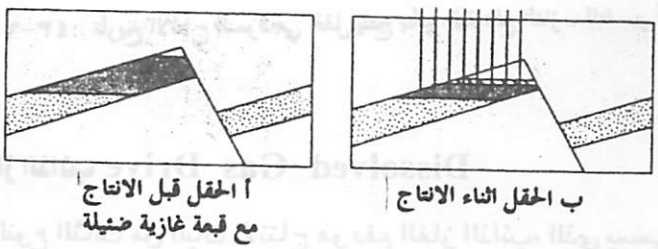


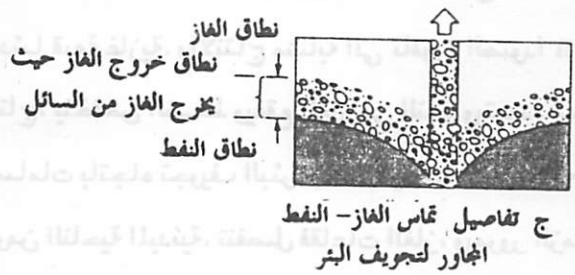
الشكل ٦–٤٠: آلية دفع الماء قبل الانتاج . (أ) وأثناء الانتاج (ب). أما (ج) و (د) فانها توضح مناطق عدم الانتظام المحتملة في مستوى النفط– الماء المرتفع.



الشكل ٦–٤١: تأريخ أنتاج نموذجي لحقل يعمل بتأثير دفع الماء . للتفسير أنظر النص.

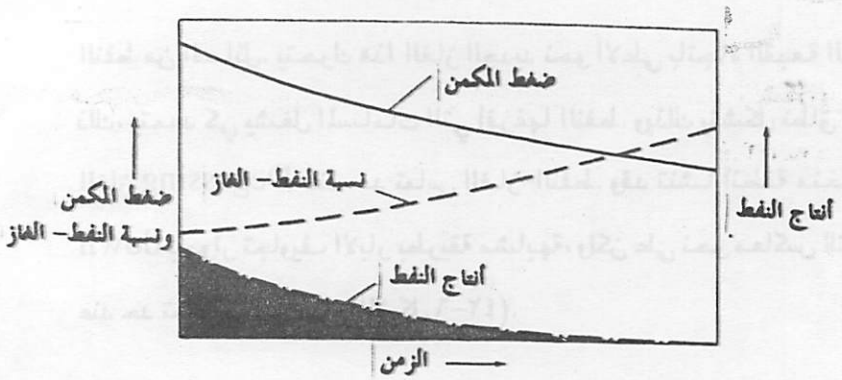
النفط من السائل. يتحرك هذا الغاز الجديد نحو الاعلى باتجاه القبعة الغازية. وفي عمله ذلك، يتمدد كي يشغل المسامات التي أفرغها النفط. وبذلك يتشكل نطاق انتقالي من طرد الغاز Degassing عند حد تماس الغاز–النفط. وقد تنشأ أنطقة منخفضة Draw-down بجوار تجاويف الابار بطريقة مشابهة، ولكن على نحو معاكس للتمخرط الحاصل عند حد تماس النفط–الماء (الشكل ٦–٤٢).





الشكل ٦–٤٢: آلية الدفع الناتجة من تمدد الغاز . ينشأ نطاق أنتقالي عند تماس الغاز– النفط بانخفاض الضغط وينفصل الغاز خارج النفط. لاحظ تأثير الانسحاب نحو الاسفل الذي قد ينشأ بجوار تجاويف الابار (ج).

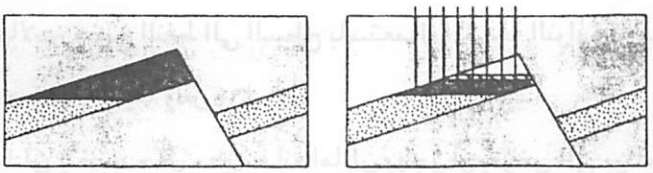
ان التاريخ الانتاجي للحقول العاملة بتأثير دفع القبعة الغازية يكون مختلفا تماما من الحقول العاملة بتأثير دفع الماء فالضغط وانتاج النفط ينخفضان باستمرار، في حين تزيد نسبة الغاز الى النفط (الشكل ٦–٤٣). ان آلية دفع القبعة الغازية هي بشكل عام أقل تأثيرا من آلية دفع الماء، بمعامل استخلاص يتراوح بين ٢٠ الى ٥٠ بالمئة.



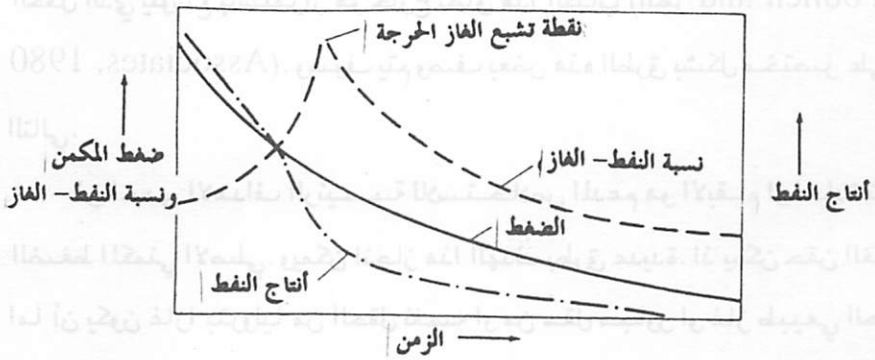
الشكل ٦-٤٣: تاريخ الانتاج النموذجي لحقل ينتج بتأثير الية دفع الغاز . للتفسير أنظر النص.

دفع الغاز الذائب Dissolved Gas Drive

النوع الثالث من آليات الانتاج هو دفع الغاز الذائب، الذي يسمى احيانا دفع الغاز المذاب Solution Gas Drive. ويحدث هذا النوع من الدفع في حقول النفط التي لا تمتلك مبدئيا قبعة غازية. والانتاج مشابه الى نافورة الصودا Soda Fountain . عندما يبدأ الانتاج، ينخفض الضغط ويفقع الغاز في النفط ويتمدد، مجبرا النفط على الخروج من نظام المسامات باتجاه تجويف البئر. وعندما يتمدد الغاز، فأنه يساعد على ديمومة ضغط المكمن. ومن الناحية المبدئية، تنفصل فقاعات الغاز، وبمرور الزمن فأنها تتجمع مع بعضها، وقد تشكل حالة مستمرة من الغاز الحر، التي يمكن ان تتراكم كقبعة غازية في ذروة المكمن. ويطلق على هذه النقطة اسم تشبع الغاز الحرج Critical Gas Saturation، ويجب اتخاذ الحيطة لمنع الوصول اليها. ويمكن تجنبها اما بالمحافظة على معدل انتاج بطيء او من خلال اعادة حقن الغاز المنتج بغية المحافظة على ضغط المكمن الاصلي. ويوضح الشكل (٦-٤٤) ما يحدث في مكمن ذي دفع ناتج من التمدد الغازي، بينما يظهر الشكل (٦-٤٥) تأريخ الانتاج النموذجي. وتعد آلية الانتاج هذه بشكل عام الاقل كفاءة بين الانواع الثلاثة، اذ يبلغ معدل الاستخلاص ضمن المدى ٧ الى ١٥ بالمئة.



الشكل ٦-٤٤: حقل ينتج بآلية الدفع الناتجة من تمدد الغاز. أذا انخفض الضغط بما يكفي كي يجتاز نقطة تشبع الغاز الحرجة , عندها ربما تتكون قبعة من الغاز الحر (ب).



الشكل ٦-٤٥: مرتسم بياني يوضح التأريخ الانتاجي لحقل ينتج بآلية الدفع الناتجة من تمدد الغاز. لاحظ كيفية زيادة نسبة النفط- الغاز حتى يتم الوصول الى نقطة تشبع الغاز الحرجة ، عندها تنخفض بحدة عندما ينفصل الغاز خارجا.

الرفع الاصطناعي والاستخلاص المدعم

Artifical Lift and Enhanced Recovery

لا تنتج كل الحقول بآليات الدفع الطبيعية، وحتى آليات الدفع الطبيعية تلك لا تستخلص النفط كله، لذلك تستعمل الطرق الاصطناعية لانتاج النفط من الحقول التي تفتقد الدفع الطبيعي ، كما تزيد طرق الاستخلاص المدعم الاحتياطي القابل للاستخلاص.

ان النفط سوف يتدفق الى السطح من البئر اذا كان الضغط السكوني عند قاع البئر يتجاوز ضغط عمود الطين وتأثير احتكاك تجويف البئر. وفي العديد من الحقول الضحلة

ذات الضغط المكمني الواطىء وفي الحقول الناضبة، فأن الابار لن تتدفق تلقائيا. وفي مثل هذه الحالات، يضخ النفط الى السطح باستعمال المضّخة النوّادة او مضخات قيعان الابار التي تم وصفها مسبقا (ص ٦٥).

ما ان ينضب حقل معين، فأنه اما ان يهجر أو يعرض الى برنامج استخلاص ثانوي لكي يسرع الانتاج. وفي اثناء ذلك، يمكن حتى البدء ببرنامج استخلاص ثلاثي Tertiary. وفي الوقت الحاضر، فأن المتبع هو البدء ببرنامج استخلاص مدعم عندما يبدأ الحقل بالتدفق للمرة الأولى. وهنالك العديد من تقنيات الاستخلاص المدعم، وان هذا الحقل الذي يتوسع باستمرار هو خارج نطاق هذا الكتاب (أنظر Van Poollen and Associates, 1980). وسوف يتم وصف بعض هذه الطرق بشكل مختصر على النحو التالي.

ان احدى الاهداف الرئيسية للاستخلاص المدعم هو الابقاء او اعادة تأسيس الضغط المكمني الاصلي. ويمكن انجاز هذا الهدف بطرق عديدة. اذ يمكن حقن الغاز الذي اما أن يكون غازا بتروليا من الحقل نفسه او من حقل مجاور او غاز طبيعي الحدوث او غازات خاملة مصنعة، مثل ثاني أوكسيد الكاربون او النتروجين. وكبديل عن ذلك، يمكن حقن السوائل، ويمكن ان تكون السوائل هذه مياها بحرية او مياها حبيسة من الطبقات المجاورة. ان التحليلات الكيميائية الدقيقة ومعالجة المياه المحقونة تعد امورا اساسية لمنع ومراقبة التغيرات الكيميائية غير المرغوب بها التي يمكن ان تحدث في المكمن. وتدمر بعض المياه النفوذية بترسيب الاملاح في الفراغات البينية مسببة انتفاخ الاطيان (Giraud and Neu, 1971). ويجب ان تعامل المياه البحرية لتدمير الجراثيم (البكتيريا). ذلك لانها تؤدي الى تحلل النفط وتزيد اللزوجة. وتشمل طرق الاستخراج المدعم الاكثر تطورا حقن بعض المنظفات Detergents (الطوفان الغروي Micellar Floods) لاستحلاب emulsify النفط الثقيل وتحريكه الى السطح. عن هذا ولمزيد من التفاصيل عن

Van Poollen and Associates, 1980, Latil, الاستخراج المدعم، (انظر 1980).

مصادر مختارة

SELECTED BIBLIOGRAPHY

For details of the petrography of reservoir rocks, see: .

BATHURST, R. G. C. 1975. *Carbonate Sediments and Their Diagenesis*, Second Edition. Amsterdam: Elsevier, 658 pp.

FRIEDMAN, G. H. and SANDERS, J. E. 1978. *Principles of Sedimentology*. New York: Wiley, 792 pp. This major text deals not only with petrography but also with wider aspects of reservoir rocks.

PETTIJOHN, F. J.; POTTER, P. E.; and SIEVER, R. J. 1972. *Sand and Sandstone*. Berlin: Springer-Verlag, 618 pp.

SELLEY, R. C. 1982. *Introduction to Sedimentology*, Second Edition. London: Academic Press, 417 pp.

Friedman and Sanders (1978) deal with carbonates and sandstones in great detail. Pettijohn et al. (1972) and Bathurst (1975) cover sandstones and carbonates in detail, respectively. Selley (1982) covers carbonates and sandstones at a less advanced level, but deals with the application of petrography to porosity and permeability predictions.

For further details on the engineering aspects of reservoirs, see:

CLARK, N. J. 1969. *Elements of Petroleum Reservoirs*. Dallas: Soc. Petrol. Eng., 250 pp.

TIMMERMAN, E. H. 1982. *Practical Reservoir Engineering*, Vols. I and II. Tulsa: Penn Well, 365 and 367 pp.

REFERENCES

المراجع

AGUILERA, R. and VAN POOLLEN, H. K. 1978. Geologic aspects of naturally fractured reservoirs explained. *Oil & Gas J.*, 18 Dec., 47–51.

AL-GAILANI, M. B. 1981. Authigenic mineralization at unconformities: implication for reservoir characteristics. *Sedim. Geol.*, *29*, 89–115.

ALLEN, J. R. L. 1970. The systematic packing of prolate spheroids with reference to concentration and dilatency. *Geol. Mijnb.*, *49*, 211–220.

AL-RAWI, M. 1981. Geological interpretation of oil entrapment in the Dubair Formation, Raudhatain Field. *Soc. Petrol. Eng.*, Preprint No. 9591, 149–158.

ANDERSON, G. 1975. *Coring and Core Analysis Handbook.* Tulsa: Petroleum Publishing Co., 200 pp.

ATWATER, G. I. and MILLER, E. E. 1965. The effect of decrease in porosity with depth on future development of oil and gas reserves in South Louisiana. Abstract. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 49,* 334.

BADIOZAMANI, K. 1973. The Dorag dolomitization model-application to the Middle Ordovician of Wisconsin. *J. Sedim. Petrol., 43,* 965–984.

BALDUCCI, A. and POMMIER, G. 1970. Cambrian oil field of Hassi Messaoud, Algeria. In: *Geology of Giant Petroleum Fields.* M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 477–488.

BATHURST, R. G. C. 1975. *Carbonate Sediments and Their Diagenesis,* Second Edition. Amsterdam: Elsevier, 658 pp.

BEARD, D. C. and WEYL, P. K. 1973. The influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 57,* 349–369.

BLATT, H.; MIDDLETON, G.; and MURRAY, R. 1980. *Origin of Sedimentary Rocks,* Second Edition. New Jersey: Prentice-Hall, 782 pp.

BOTSET, H. G. 1931. The measurement of permeability of porous alundum discs of water and oils. *Rev. Sci. Instr., 2,* 84–95.

BRADY, T. J.; CAMPBELL, N. D. J.; and MAHER, C. E. 1980. Intisar 'D' oil field, Libya. In: *Giant Oil and Gas Fields of the Decade: 1968–1978.* M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 543–564.

BUTLER, M.; PHELAN, M. J.; and WRIGHT, A. W. 1976. The Buchan field, evaluation of a fractured sandstone reservoir. *Trans. 4th Europ. Symp.* London: Soc. Prof. Well Log Anal., 18 pp.

CALHOUN, J. C. 1960. *Fundamentals of Reservoir Engineering.* Norman: Univ. of Oklahoma, 426 pp.

CHILINGAR, G. V. 1964. Relationship between porosity, permeability and grainsize distribution of sands and sandstones. In: *Deltaic and Shallow Marine Deposits.* L. M. J. U. Van Straaten (ed.). Amsterdam: Elsevier, 71–75.

CHILINGAR, G. V.; MANNON, R. W.; and RIEKE, H. 1972. *Oil and Gas Production from Carbonate Rocks.* Amsterdam: Elsevier, 408 pp.

CHILINGARIAN, G. V. and WOLF, K. H. 1975. *Compaction of Coarse-Grained Sediments,* vol. 1. Amsterdam: Elsevier, 552 pp.

CHOQUETTE, P. W. and PRAY, L. C. 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 54,* 207–250.

CHUNG-HSIANG P'AN. 1982. Petroleum in basement rocks. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 66,* 1597–1643.

COLLINS, R. E. 1961. *Flow of fluids through porous media.* New York: Reinhold, 406 pp.

CONLEY, C. D. 1971. Stratigraphy and lithofacies of Lower Paleocene rocks, Sirte Basin, Libya. In: *Symposium on the Geology of Libya.* C. Gray (ed.). Tripoli: Univ. of Libya, 127–140.

DAHLBERG, E. C. 1979. Hydrocarbon reserve estimation from contour maps. *Can. Petrol. Geol. Bull., 27,* 94–99.

DAKE, L. P. 1978. *Fundamentals of Reservoir Engineering.* Amsterdam: Elsevier, 444 pp.

DARCY, H. 1856. *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon.* Paris: V. Dalmont, 674 pp.

DICKEY, P. A. 1979. *Petroleum Development Geology.* Tulsa: Petroleum Publishing Co., 398 pp.

DODGE, M. M. and LOUCKS, R. G. 1979. Mineralogic composition and diagenesis of Tertiary sandstones along Texas Gulf Coast. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 440.

DOTT, R. H. and REYOLDS, M. J. 1969. *Source book for petroleum geology.* Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 5, 471 pp.

EGGLESTON, W. S. 1948. Summary of oil production from fractured rock reservoirs in California. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 32,* 1352–1355.

ENOS, P. and SAWATSKY, L. H. 1979. Pore space in Holocene carbonate sediments. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 445.

FAIRBRIDGE, R. 1967. Phases of diagenesis and authigenesis. In: G. Larsen and G. V. Chilingar (eds.). *Diagenesis in Sediments.* Amsterdam: Elsevier, 19–89.

FISCHER, A. G. 1964. The Lofer cyclothems of the Alpine Triassic. In: *Symposium on Cyclic Sedimentation.* D. Merriam (ed.). *Kans. Univ. Geol. Surv. Bull., 169,* 107–150.

FOLK, R. L. and LAND, L. S. 1974. Mg/Ca ratio and salinity: two controls over crystallization of dolomite. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 59,* 60–68.

FRASER, H. J. 1935. Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments. *J. Geol., 43,* 910–1010.

FRIEDMAN, G. M. and SANDERS, J. E. 1978. *Principles of Sedimentology.* New York: Wiley, 792 pp.

FUCHTBAUER, H. 1967. Influence of different types of diagenesis on sandstone porosity. *Proc. 7th World Petrol. Cong.,* 353–369.

GAITHOR, A. 1953. A study of porosity and grain relationships in sand. *J. Sedim. Petrol., 23,* 186–195.

GIRAUD, A. and NEU, J. M. 1971. Injection d'eau: interaction entre l'eau injectee et le reservoir. *Revue Institute Francaise du Petrole, 26,* 1009–1028.

GRATON, L. C. and FRASER, H. J. 1935. Systematic packing of spheres, with particular reference to porosity and permeability. *J. Geol., 43,* 785–909.

HANCOCK, N. 1978. Diagenetic modelling in the middle Jurassic Brent Sand of the northern North Sea. London: *Europ. Offsh. Petrol. Conf.,* 275–280.

HARRIS, D. G. and HEWITT. 1977. Synergism in reservoir management. The geologic perspective. *J. Petrol. Tech.,* July, 761–770.

HARRIS, J. F.; TAYLOR, G. L.; and WALPER, J. L. 1960. Relation of deformational fractures in sedimentary rocks to regional and local structure. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 44,* 1853–1873.

HAY, J. T. C. 1977. The Thistle oilfield. In: *Mesozoic Northern North Sea Symposium.* Oslo: Norweg. Petrol. Soc., Paper II, 20 pp.

HEA, J. P. 1971. Petrography of the Paleozoic—Mesozoic Sandstones of the Southern Sirte basin, Libya. In: *The Geology of Libya.* C. Gray (ed.). Tripoli: Univ. of Libya, 107–125.

HEALD, K. C. 1940. Essentials for oil pools. In: *Elements of the Petroleum Industry.* E. L. De Golyer (ed.). Am. Inst. Mining and Metall. Eng., 26–62.

JAMISON, H. C.; BROCKETT, L. D.; and McINTOSH, R. A. 1980. Prudoe Bay: A 10-year perspective. In: *Giant Oil and Gas Fields of the Decade: 1968–1978.* M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 289–314.

JARDINE, D.; ANDREWS, D. P.; WISHART, J. W.; and YOUNG, J. W. 1977. Distribution and continuity of carbonate reservoirs. *J. Petrol. Tech.,* July, 873–885.

KAHN, J. S. 1956. The analysis and distribution of the properties of packing in sand size sediments. *J. Geol., 64*, 385–395.

KLINKENBERG, L. J. 1941. The permeability of porous media to liquids and gases. *Drill and Prod. Prac.*, 200–213.

KRUMBEIN, W. C. and MONK, G. D. 1942. Permeability as a function of the size parameters of unconsolidated sands. *Am. Inst. Min. and Metal. Eng., Tech. Pub.* 1492, 1–11.

KULANDER, B. R.; BARTON, C. C.; and DEAN, S. L. 1979. Fractographic distinction of coring—induced fractures from natural cored fractures. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63*, 482.

LANGRES, G. L.; ROBERTSON, J. O.; and CHILINGAR, G. V. 1972. *Secondary Recovery and Carbonate Reservoirs.* Amsterdam: Elsevier, 250 pp.

LATIL, M. 1980. *Enhanced Oil Recovery.* London: Graham and Trotman, 252 pp.

LEE, C. H. 1919. Geology and groundwaters of the western part of the San Diego County, California. Washington: *Water Supply Invig. Papers*, 446–121 p.

LEVANDOWSKI, D. W.; KALEY, M. E.; SILVERMAN, S. R.; and SMALLEY, R. G. 1973. Cementation in Lyons Sandstone and its role in oil accumulation, Denver Basin, Colorado. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 57*, 2217–2244.

LEVORSEN, A. I. 1967. *The Geology of Petroleum.* Oxford: Freeman, 724 pp.

LONGMAN, M. W. 1980. Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64*, 461–487.

LOUCKS, R. G.; DODGE, M. M.; and GALLOWAY, W. W. 1979. Reservoir quality in Tertiary sandstones along Texas Gulf Coast. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63*, 488.

MAGARA, K. 1980. Comparison of porosity-depth relationships of shale and sandstone. *J. Petrol. Geol., 3*, 175–185.

MARTINI, I. P. 1971. Grain size orientation and paleocurrent systems in the Thorold and Grimsby Sandstones (Silurian), Ontario and New York. *J. Sedim. Petrol., 41*, 425–434.

MARTINI, I. P. 1972. Studies of microfabrics: an analysis of packing in the Grimsby Sandstone (Silurian) Ontario and New York State. Montreal: 24. *Internat. Geol. Cong.*, Section 6. *Stratigraphy and Sedimentology*, 415–423.

McCONNELL, P. C. 1951. Drilling and production techniques that yield nearly 850,000 barrels per day in Saudi Arabia's fabulous Abqaiq field. *Oil & Gas J.*, 20 Dec., 197.

McCOY, A. W.; SIELAFF, R. L.; DOWNS, G. R.; BASS, N. W.; and MAXSON, J. H. 1951. Types of oil and gas traps in the Rocky Mountains. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 35*, 1000–1037.

MONICARD, R. P. 1981. *Properties of reservoir rocks: core analysis.* Paris: Ed. Technip, 184 pp.

MORROW, N. R. 1971. Small scale packing heterogeneities in porous sedimentary rocks. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 55*, 514–522.

MURRAY, R. C. 1960. Origin of porosity in carbonate rocks. *J. Sedim. Petrol., 30*, 59–84.

MUSKAT, M. 1937. *Flow of Homogenous Fluids Through Porous Media.* New York: McGraw-Hill, 763 pp.

MUSKAT, M. 1949. *Physical Principles of Oil Production.* New York: McGraw-Hill (reissued by IHRDC, Boston, 1981), 922 pp.

MUSKAT, M. and BOTSET, H. G. 1931. Flow of gas through porous materials. *Physics 1*, 27–47.

NAGTEGAAL, P. J. C. 1978. Sandstone-framework instability as a function of burial diagenesis. *J. Geol. Soc. Lond., 135*, 101–105.

PHILIP, W.; DROUG, H. J.; HADDENBACH, H. G.; and JANKOWSKY, W. 1964. The history of migration in the Gifhorn trough (N. W. Germany). Frankfurt: *Proc. 6th World Petrol. Cong.*, 547–742.

PIPPIN, L. 1970. Panhandle-Hugoton field, Texas-Oklahoma-Kansas—the first fifty years. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 204–222.

PIRSON, S. J. 1978. *Geologic Well Log Analysis*, Second Edition. Houston: Gulf Publishing Co., 385 pp.

POLASEK, T. L. and HUTCHINSON, C. A. 1967. Characterization of non-uniformities within a sandstone reservoir from a fluid mechanics point of view. *Proc. 7th World Petrol. Cong., 2*. Amsterdam: Elsevier, 397–407.

POTTER, P. E. 1962. Late Mississippian sandstones of Illinois Basin. *Illinois Geol. Surv. Circ.*, 340.

POTTER, P. E. and MAST, R. F. 1963. Sedimentary structures, sandshape fabrics and permeability, I. *J. Geol., 71*, 441–471.

POTTER, P. E. and PETTIJOHN, F. J. 1977. *Paleocurrents and Basin Analysis*. New York: Springer-Verlag, 425 pp.

POWERS, M. C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *J. Sedim. Petrol., 23*, 117–119.

PRYOR, W. A. 1973. Permeability—porosity patterns and variations in some Holocene Sand Bodies. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 57*, 162–189.

PRYOR, W. A. and FULTON, K. 1976. Geometry of reservoir type sand bodies in the Holocene Rio Grande Delta and comparison with ancient reservoir analogs. *Soc. Petrol. Eng.*, Preprint 7045, 81–92.

PURSER, B. H. 1978. Early diagenesis and the preservation of porosity in Jurassic limestones. *J. Petrol. Geol., 1*, 83–94.

REECKMANN, A. and FRIEDMAN, G. M. 1982. *Exploration for Carbonate Petroleum Reservoirs*. New York: Wiley, 213 pp.

REGAN, L. J. and HUGHES, A. W. 1949. Fractured reservoirs of Santa Maria district, California. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 35*, 32–51.

REISS, L. H. 1980. *The Reservoir Engineering Aspects of Fractured Formations*. Paris: Ed. Tecnip, 120 pp.

RICH, J. L. 1923. Shoestring sands of eastern Kansas. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 7*, 103–113.

RITTENHOUSE, G. 1971. Mechanical compaction of sands containing different percentages of ductile grains: a theoretical approach. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 52*, 92–96.

ROBINSON, R. B. 1966. Classification of reservoir rocks by surface texture. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 50*, 547–559.

ROGERS, J. J. and HEAD, W. B. 1961. Relationship between porosity median size, and sorting coefficients of synthetic sands. *J. Sedim. Petrol., 31*, 467–470.

ROSE, P. R. 1972. Edwards Group, surface and subsurface, central Texas. Austin: *Bur. Econ. Geol. Univ. Tex.*, 198 pp.

SCHEIDDEGGER, A. E. 1960. *The Physics of Flow Through Porous Media*. New York: MacMillan, 313 pp.

SCHMIDT, V.; McDONALD, D. A.; and PLATT, R. L. 1977. Pore geometry and reservoir aspects of secondary porosity in sandstones. *Can. Soc. Petrol. Geol. Bull., 25,* 271–290.

SCHMOKER, J. W. and HALLEY, R. B. 1982. Carbonate porosity versus depth. A predictable relation for south Florida. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 66,* 2561–2570.

SCHOLLE, P. A. 1977. Chalk diagenesis and its relation to petroleum exploration: oil from chalks, a modern miracle. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 61,* 982–1009.

SCHOLLE, P. A. 1981. Porosity prediction in shallow vs. deepwater limestones. *J. Petrol. Tech.*, Nov., 2236–2242.

SEEMANN, U. 1979. Diagenetically formed interstitial clay minerals as a factor in Rotliegende Sandstone reservoir quality in the North Sea. *J. Petrol. Geol., 1 (3),* 55–62.

SELLEY, R. C. 1978. Porosity gradients in North Sea oil-bearing sandstones. *J. Geol. Soc. Lond., 135,* 119–132.

SELLEY, R. C. 1982. *Introduction to Sedimentology,* Second Edition. London: Academic Press, 417 pp.

SHELTON, J. W. and MACK, D. E. 1970. Grain orientation in determination of paleocurrents and sandstone trends. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 54,* 1108–1119.

SIPPEL, R. F. 1971. Quartz grain orientations, I. (the photometric method). *J. Sedim. Petrol., 41,* 38–59.

SNEIDER, R. M.; RICHARDSON, F. H.; PAYNTER, D. D.; EDDY, R. E.; and WYANT, I. A. 1977. Predicting reservoir rock geometry and continuity in Pennsylvanian reservoirs, Elk City field, Oklahoma. *J. Petrol. Tech., 29,* 851–866.

STALDER, P. J. 1973. Influence of crystallographic habit and aggregate. Structure of authigenic clay minerals on sandstone permeability. *Geol. Mijnb., 52,* 217–220.

STEARNS, D. W. and FRIEDMAN, M. 1972. Reservoirs in fractured rocks. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields—Classification, Exploration Methods, and Case Histories.* Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 82–106.

STORMONT, D. H. 1949. Huge caverns encountered in Dollarhide Field. *Oil & Gas J.* 7 April, 66–68, 94.

TEBBUTT, G. E.; CONLEY, C. D.; and BOYD, D. W. 1965. Lithogenesis of a distinctive carbonate fabric. *Wyoming Univ. Contrib. Geol., 4, (1),* 13 pp.

TOOMEY, D. F.; MOUNTJOY, E. W.; and MACKENZIE, W. S. 1970. Upper Devonian (Frasnian) algae and foraminifera from the Ancient Wall carbonate complex, Jasper National Park, Alberta, Canada. *Can. J. Earth Sci., 7,* 946–981.

TRUEX, J. N. 1972. Fractured shale and basement reservoir Long Beach Unit, California. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56,* 1931–1938.

VAN POOLLEN and ASSOCIATES. 1980. *Fundamentals of Enhanced Recovery.* Tulsa: Pennwell, 155 pp.

VAN VEEN, F. R. 1975. Geology of the Leman gas-field. In: *Petroleum and the Continental Shelf of North-West Europe,* vol. I. Geology. A. E. Woodland (ed.). Barking: Applied Science Publishers, 223–232.

VERDIER, A. C.; OKI, T.; and ATIK, S. 1980. Geology of the Handil field (East Kalimantan, Indonesia). In: *Giant Oil and Gas Fields of Decade 1968–1978.* M. T. Halbouty (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., 399–422.

VON RAD, U. 1971. Comparison between 'magnetic' and sedimentary fabric in graded and cross-laminated sand layers, Southern California. *Geol. Runsch., 60*, 331–354.

WARDLAW, N. C. 1976. Pore geometry of carbonate rocks as revealed by pore casts and capillary pressure. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60*, 245–257.

WASHBURN, E. W. and BUNTING, E. N. 1922. Determination of porosity by the method of gas expansion. *J. Am. Cer. Soc., 5*, 48–112.

WEBER, K. J. 1971. Sedimentological aspects of oil fields in the Niger delta. *Geol. Mijnb., 50*, 559–576.

WEBER, K. J.; EIJPE, R.; LEIJNSE, D.; and MOENS, C. 1972. Permeability distribution in a Holocene distributary channel-fill near Leerdam (the Netherlands). *Geol. Mijnb., 51*, 53–62.

WILLIAMS, J. J. 1972. Augila field, Libya: depositional environment and diagenesis of sedimentary reservoir and description of igneous reservoir. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields*. R. E. King (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 623–632.

WILSON, J. L. 1975. *Carbonate Facies in Geologic History*. Berlin: Springer-Verlag, 471 pp.

WILSON, J. L. 1981. A review of carbonate reservoirs. *Can. Petrol. Geol. Bull., 29*, 95–117.

WOOD, G. V. and WOLFE, M. J. 1969. Sabkha cycles in the Arab/Darb Formation off the Trucial Coast of Arabia. *Sedimentology, 12*, 165–191.

الفصل السابع

المصيدة

THE TRAP

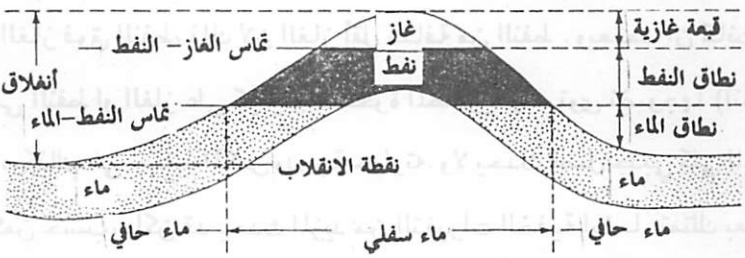
في أيام التنقيب النفطي المبكرة في الولايات المتحدة، لم تكن هناك تشريعات محددة تتحكم في التنقيب عن البترول واستخراجه. وبشكل مبدئي، طبقت المحاكم قانون الطرائد، الذي ينصُّ على ان النفط والغاز هما مواد سريعة الحركة Fugacious (أي انها من المحتمل ان تهرب بعيدا)، متحركة من ملكية الى أخرى، وفي النهاية يتملكها الرجل الذي يحدث في ارضه الاصطياد (Dott and Reynolds, 1969).

طبق المصطلح مصيدة Trap للمرة الأولى على التراكمات الهايدروكاربونية من قبل (Orton, 1889) باعتبارها: «..... كميات من النفط والغاز التي يمكن ان تصطاد في ذُرى الطيات او الاقواس التي تصادفها في مسارها باتجاه الارض المرتفعة». ويمكن العثور على استعراض تأريخي مفصل عن التطور اللاحق للفكرة وتأريخ لفظة مصيدة في (Dott and (Reynolds, 1969).

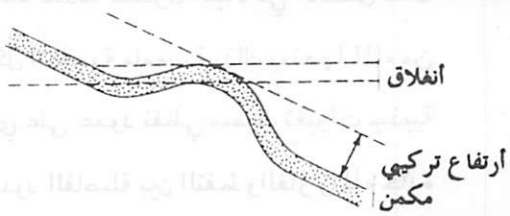
مثلما تم شرحه في الفصل الأول، فأن المصيدة هي احدى المتطلبات الاساسية الخمسة اللازمة للتراكم الاقتصادي للنفط والغاز. ولقد اعطى (Levorsen, 1967) تعريفا دقيقا للمصيدة باعتبارها «المكان الذي يمنع فيه النفط والغاز من المزيد من الحركة» ولكن هذا التعريف يحتاج الى المزيد من المواصفات. فالمنقبون بشكل عام، والجيوفيزيائيون منهم على نحو خاص، يبحثون عن المصائد الهايدروكاربونية. لذلك فقد يكون أكثر دقة القول انهم يبحثون عن المصائد المحتملة Potential Traps. وبعد الحفر والفحص فقط يمكن معرفة ان كانت المصيدة تحتوي على النفط او الغاز. بكلمات اخرى ان المصيدة تظل مصيدة سواء كانت خالية او منتجة.

تسمية المصيدة NOMENCLATURE OF A TRAP

تستعمل العديد من المصطلحات لوصف معاملات المصيدة المختلفة. وتعرف هذه المصطلحات على النحو التالي وتوضح قياسا الى مصيدة الطية المحدبة Anticlinal Trap، التي تمثل ابسط انواع المصائد (الشكل ٧-١). يسمى الجزء الاعلى من المصيدة بالذروة Crest أو الأوج Culmination. وتسمى النقطة الدنيا التي يمكن أن تحتوي الهايدروكاربونات في المصيدة نقطة الانسكاب Spill Point، وتقع هذه على خط منسوب (كنتور) أفقي، يسمى مستوى الأنسكاب Spill Plane. اما المسافة العمودية من الذروة الى مستوى الانسكاب فهو انغلاق Closure المصيدة. وقد تكون المصيدة ممتلئة الى مستوى الانسكاب او لا تكون، وهي نقطة ذات أهمية موضعية او اقليمية (ص ٤٨١). لاحظ انه في المناطق ذات الميل المتماثل (أحادية الميل Monoclinal dip) فان انغلاق المصيدة قد لا يكون مساويا للارتفاع التركيبي Sturctural relief (الشكل ٧-٢). ان هذا الوضع مهم بشكل خاص في المصائد الحركية المائية (الهايدرودينمكية) Hydrodynamic traps (ص ٤٠٤).



الشكل ٧-١: مقطع عرضي خلال مصيدة طية محدبة بسيطة.



الشكل ٧-٢: مقطع عرضي خلال مصيدة يوضح الفرق بين الانغلاق والارتفاع التركيبي.

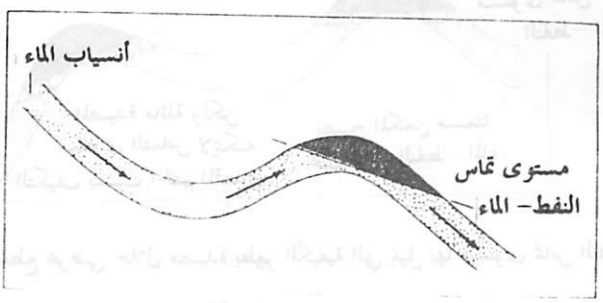
يسمى المكمن المنتج داخل المصيدة بالعطاء Pay. وتسمى المسافة العمودية من قمة المكمن الى حد تماس النفط-الماء باسم العطاء الكلي، وقد يتغاير هذه السمك من متر او مترين فقط في تكساس الى عدة مئات من الامتار في بحر الشمال والشرق الأوسط. وليس بالضرورة ان يتكون كل العطاء الكلي من مكمن منتج، ولذلك يتم تمييز العطاء الكلي عادة عن العطاء الصافي Net Pay. ويعرف العطاء الصافي بأنه السمك العمودي التراكمي للمكمن الذي يمكن انتاج البترول منه. ان تطوير مكمن ما يتطلب بالضرورة رسم خريطة لنسبة العطاء الكلي الى العطاء الصافي عبر الحقل بأكمله.

قد تحتوي المصيدة على النفط او الغاز او كليهما. ويعد حد تماس النفط-الماء (الذي يرمز اليه عادة بالرمز OWC) بأنه المستوى الاعمق للنفط القابل للانتاج. وعلى نحو مشابه، فأن حد تماس الغاز- النفط GOC) أو حد تماس الغاز-الماء GWC)، حيثما تكون الحالة، يمثل النهاية السفلى للغازالقابل للانتاج. أن التقسيم الدقيق لهذه السطوح يعد امرا ضروريا قبل حساب الاحتياطي لحقل معين (ص٣٢٦)، وأن حلها يعد احد الاهداف الاساسية لجس الابار والفحص. وحيثما يتواجد النفط مع الغاز في مصيدة واحدة، يتواضع الغاز فوق النفط، ذلك لان الغاز أقل كثافة من النفط . ويعتمد ان كانت المصيدة تحتوي على النفط او الغاز على كيمياء الصخرة المصدرية ومستوى نضوجها (أنظر الفصل الخامس)، وكذلك على ضغط المكمن ودرجة حرارته. ولا يحدث فصل جذبي كلي للغاز والنفط داخل المكمن حسب، ولكن قد يحدث المزيد من التغيرات الخفية ايضا. تمتلك بعض حقول النفط (حقل سرير في ليبيا على سبيل المثال) سطحا من القار Tar الثقيل عند حد تماس النفط-الماء. وينتج هذه السطح من تحلل النفط عندما تتحرك المياه في الاسفل تحت حد تماس النفط-الماء. وتُسببُ سطوح القار مشاكل انتاجية ملموسة وذلك بمنعها الماء من ازاحة النفط. وقد تظهر بعض الحقول التي تحتوي على عمود نفطي سميك تغيرات جذبية أكثر غموضا خلال العطاء الصافي. وقد تكون الحدود الفاصلة بين النفط والغاز والماء حادة

او انتقالية. وتدل سطوح تماس الموائع المفاجئة على وجود مكامن نفاذة، في حين تدل الحدود التدريجية على نفوذية واطئة مع ضغط شعري عال (ص٢٣٢). ويطلق على النطاق الواقع تحت الهايدروكاربونات مباشرة اسم الماء الاسفل Bottom Water، في حين يطلق على نطاق المكمن المجاور عرضيا الى المصيدة اسم النطاق الحافيّ Edge Zone (الشكل٧-١).

تكون حدود تماس الموائع في المصيدة مستوية Planar، بيد أنها ليست افقية دائما. فالتمييز المبكر لسطح تماس الموائع المائل Tilted fluid contact يعد امرا ضروريا للتقييم الصحيح للمكمن الكفوء للحقل.

هنالك العديد من الاسباب التي تؤدي الى نشوء حدود تماس الموائع المائلة. فهي قد توجد حيثما يكون هنالك انسياب حركي-مائي من المياه السفلى مما يسبب ازاحة الهايدروكاربونات من مواقع الذروة الى الحافات Flanks. ويمكن ان تحدث هذه الازاحة بدرجات مختلفة من الشدة (الشكل ٧-٣). ويمكن تحديد وجود هذا النوع من حدود تماس النفط-الماء المائل من معطيات الضغط التي تظهر منحدرة في سطح الجهد المتري Potentiometric surface. ان العديد من الحقول المائلة حركياً-مائياً ولكن ليس بالضرورة كلها تقع فوق مستوى سطح البحر. وحيثما تكون هذه الحقول ضحلة، فأن وجود سطوح القار ليس أمرا غير مألوف بسبب تحلل النفط الناتج من حركة الماء تحت نطاق النفط..



الشكل ٧-٣: مقطع عرضي خلال مصيدة يظهر مستوى تماس نفط- ماء مائل بسبب الانسياب المائي الحركي (الهايدرودينميكي).

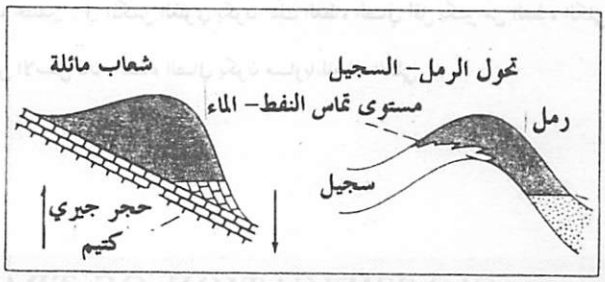
في بعض الحقول يكون حد تماس النفط-الماء قد مال نتيجة الانتاج، على فرض بسبب حركة المائع الناتجة من انتاج النفط من حقل مجاور. ولقد سجلت هذه الظاهرة، على سبيل المثال، من حقل كايرو Cairo Feild في اركنساس (Goebel, 1950). وكتفسير بديل لحد تماس الموائع المنحدر هو أن المصيدة قد تعرضت للميل بعد احتلالها من قبل الهايدروكاربونات، وان حد التماس لم يتحرك. اذا ما أخذت بمفردها، فأن هذا النظرية غير محتملة الوقوع، لانه ضمن الجدول الزمني الجيولوجي، فأن للنفط و / أو الغاز متسع من الوقت كي يتوائم مع المستوى الافقي الجديد.

ان سطح القار قد يقلل النفوذية الى حد انه اذا مالت المصيدة، فأن حد تماس النفط-الماء قد لا يكون قادرا على التكيف للسطح الافقي الجديد. وكحل بديل، فأن التسميت يمكن ان يستمر في المكمن تحت النطاق النفطي بينما يكون متوقفاً داخل المصيدة نفسها (أنظر ص ٣٠٩). ان هذا التسميت نادرا ما يوفر ختما مقعديا Seat Seal كتيماً بما فيه الكفاية لكبح الحركة اللاحقة للهايدروكاربونات. ومع ذلك، فأنه يمكن ان يقلل النفوذية الى حد يكفي لتوفير بعض مشاكل الانتاج المثيرة، فحافة الميل العلوي Up-dip edge للحقل تكون ذات نفوذية واطئة بشكل غريب، في حين ان النطاق المائي على جانب أسفل-الميل Down-dip side يحتوي على نفوذية عالية بشكل غريب (الشكل ٧-٤).

الشكل ٧-٤: مقطع عرضي خلال مصيدة يظهر الكيفية التي يميل بها مستوى تماس النفط - الماء بتأثير تسميت النطاق المائي (أ) متبوع بميلان (ب).

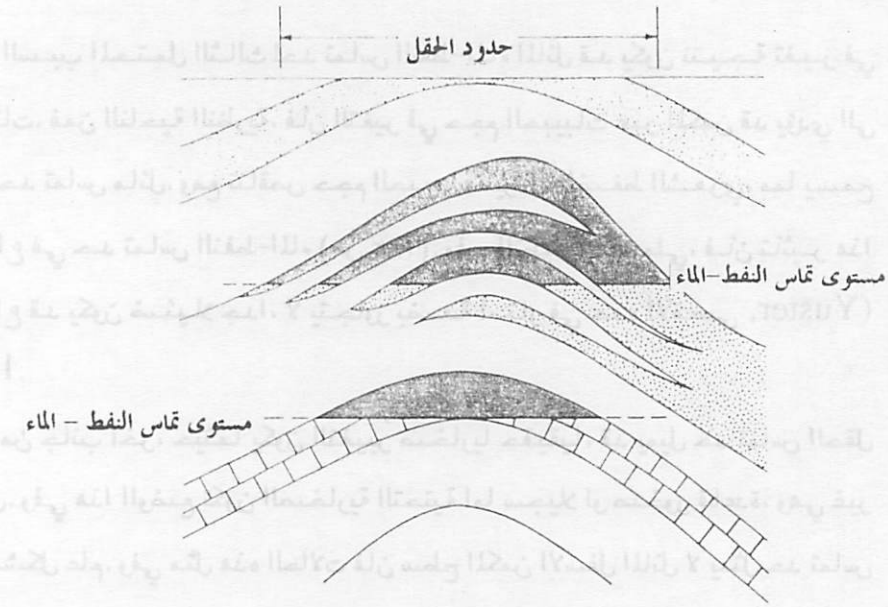
السبب المحتمل الثالث لحد تماس النفط-الماء المائل قد يكون نتيجة تغير في السحنات. فمن الناحية النظرية، فأن التغير في حجم الحبيبات عبر المكمن قد يؤدي الى نشوء حد تماس مائل. ومع تناقص حجم الحبيبات، يزداد الضغط الشعري، مما يسمح بارتفاع في حد تماس النفط-الماء (ص ٢٨٢). وفي التطبيق العملي، فأن تأثير هذا الارتفاع قد يكون ضئيلا جدا، لا يتجاوز بضعة أمتار في حده الأقصى (Yuster, 1953).

من جانب آخر، حيثما يكون التغييرُ صخاريا حقيقيا، قد يميل حد تماس الحقل الاسفل. وفي هذا الوضع تكون الصخارية التحتية اما سجيلا او صخور قاعدة، وهي غير نفاذة بشكل عام. وفي مثل هذه الحالات فان سطح المكمن الاسفل المائل لا يمثل حد تماس النفط -الماء الحقيقي، بل ختما مقعديا (الشكل ٧-٥).



الشكل ٧-٥: مقاطع عرضية خلال مصائد تظهر الكيفية التي قد ينتج بها مستوى تماس نفط-ماء مائل ظاهريا من التغيرات السحنية.

ضمن الحدود الجغرافية لحقل نفطي او غازي، قد يكون هنالك خزان Pool واحد او اكثر. ومصطلح الخزان مصطلح ليس دقيقا، وهو نتاج خيالات الصحفيين عن وجود بحيرات تحت أرضية شاسعة من النفط، غير انه مع ذلك، يستعمل على نطاق واسع. وقد يحتوي كل خزان منفرد على نطاق عطاء واحد او اكثر (الشكل ٧-٦).



الشكل ٧–٦: مقطع عرضي خلال حقل يوضح المصطلحات الجيولوجية المختلفة. يحتوي هذا الحقل على مكمنين , أي تراكمين منفصلين مع حدي تماس نفط–ماء مختلفين . في المكمن العلوي يكون سمك العطاء الصافي أقل بكثير من العطاء الكلي بسبب طبقات السجيل غير المنتجة . أما في المكمن الاسفل فان العطاء الصافي يكون مساويا للعطاء الكلي.

تصنيف المصائد CLASSIFICATION OF TRAPS

ربما تُصطاد الهايدروكاربونات بطرق مختلفة. ولقد اقترحت العديد من الخطط في محاولة لتصنيف المصائد (على سبيل المثال Hobson and Tiratsoo, 1975, Lovely, 1943, Clapp, 1929, 1910). وتمت الموافقة على مجموعتين نوعيتين رئيسيتين من المصائد، المصائد التركيبية (البنيوية Structrual) والمصائد الطبقية (الاستراتغرافية Stratigraphic). وتنتج مجموعة ثالثة، هي المصائد المختلطة Combination traps، من ترابط هذه العمليات. ومع ذلك، يفضّ الاتفاق عندما تبذل المحاولات لتقسيم هذه المجموعات.

يقدم الجدول (٧-١) تصنيفا للمصائد الهايدروكاربونية. ويعتمد الجدول على المعلومات التي ذكرت سابقا في هذا الفصل، ويمكن عدّه محاولة أولية لتثبيت مثل هذه المواد المتحركة كمصائد. وليس للجدول من حسنة جوهرية غير توفير اطار للاوصاف التالية لانواع المصائد الهايدروكاربونية المختلفة.

تعرف المصائد التركيبية بأنها تلك المصائد التي تكونت هندسيتها بفعل العمليات الحركية (التكتونية) بعد ترسيب الطبقات ذات العلاقة. واستنادا الى (Levorsen, 1967) فأن المصيدة التركيبية "هي تلك التي أصبح حدها العلوي مقعرا اذا ما نظر اليه من الاسفل، بفعل بعض التشوهات الموضعية مثل الطي او التفلق او كليهما في الصخرة المكمنية وتتحدد حافات الخزان Pool المتواجد في مصيدة تركيبية كليا، أو جزئيا، من تقاطع مستوى المياه الجوفية في الاسفل مع الصخور السقفية Roof rock التي تتواضع فوق الصخرة المكمنية المحطمة". وبذلك، فأن المصيدة التركيبية تنتج بشكل أساسي من الطي والتفلق.

تنتج مجموعة ثانية من المصائد بتأثير الاقتحامات Diapirs، حيث يتحرك الملح او الطين نحو الاعلى ويؤدي الى تقبب الطبقات الفوقية، مسببا نشوء العديد من أنواع المصائد المختلفة. ويثار جدل مفاده ان المصائد الاقتحامية هي نوعية من المصائد التركيبية، ولكن لانها نتجت بتأثير حركة صخرية سكونية (لثوستاتية Lithostatic) ، وليس قوى حركية اقليمية، لذلك يجب تمييزها.

أما المصائد الطبقية (الاستراتغرافية) فهي تلك المصائد التي تكونت هندسيتها بفعل التغيرات الحاصلة في الصخارية Lithology. وقد تكون التغيرات الصخارية ترسيبية Depositional (على سبيل المثال القنواتChannels، والشعاب Reefs والحواجز Bars) او بعد الترسيبية Postdepositional (على سبيل المثال القطع Truncation والتغيرات التحويرية). توجد المصائد الحركية المائية Hydrodynamic

traps حيثما تمنع حركة المياه باتجاه الاسفل حركة النفط باتجاه الاعلى، وبذلك تصطاد النفط دون انغلاق تركيبي او طبقي اعتيادي. ان مثل هذا النوع من المصائد نادر الوجود. والمجموعة الاخيرة هي المصائد المختلطة، وتتكون بترابط اثنتين او اكثر من العمليات النوعية التي تم تعريفها مسبقا.

الجدول٧-١ تصنيف أولي للمصائد الهايدروكاربونية اعتمادا على خطط مسبقة مذكورة في متن الكتاب.

I. مصائد تركيبية – ناتجة من العمليات الحركية.

مصائد الطي طيات محدبة ناتجة من الانضغاط Compressional anticlines

طيات محدبة ناتجة من الرص Compactional anticlines

مصائد التفلق

II. المصائد الاقتحامية – الناتجة من الانسياب بسبب التناقض بين الطبقات.

اقتحامات ملحية

اقتحامات طينية

III. المصائد الطبقية – الناتجة من الشكل الترسيبي او التحوير (لتصنيف مفصل أنظر الجدول ٧-٣).

IV. المصائد الحركية المائية – الناتجة من انسياب الماء.

V. المصائد المختلطة – الناتجة من ترابط اثنتين او أكثر من العمليات المذكورة في أعلاه.

وسوف يتم الآن وصف أنواع المصائد المختلفة – التركيبية والاقتحامية والطبقية والمائية الحركية والمختلطة بتفصيل أكثر وتوضح بالأمثلة.

المصائد التركيبية (البنيوية) STRUCTURAL TRAPS

مثلما ذكرنا مسبقا، تتشكل هندسية المصائد التركيبية بالتغييرات الحركية ما بعد الترسيبية للمكمن. ويقسم الجدول (٧-١) المصائد التركيبية الى تلك الناتجة من الطي وتلك الناتجة من التفلق. وسوف يتم الآن وصف هذه التصنيفين على التوالي.

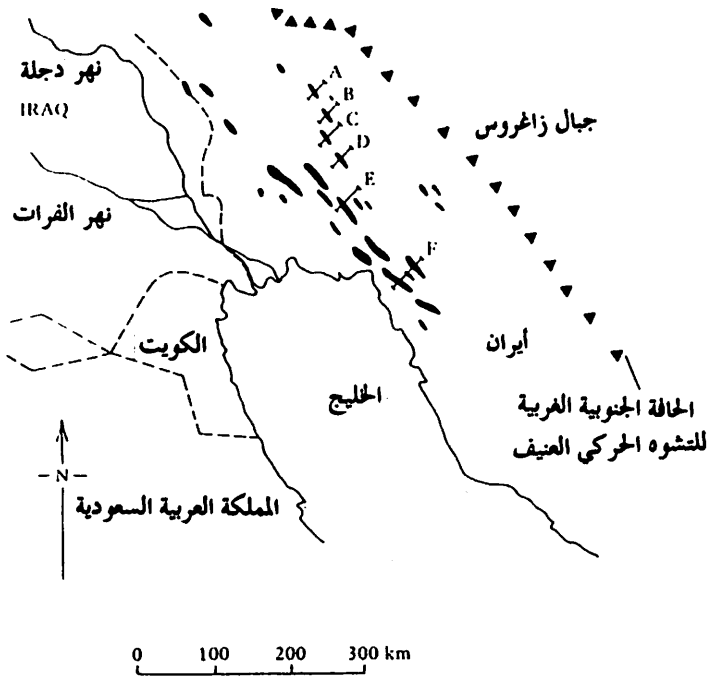
مصائد الطيات المحدبة Anticlinal Traps

يمكن تقسيم مصائد الطيات المحدبة الى شعبتين: طيات محدبة انضغاطية Compressional anticlines (والناتجة من تقصير قشري Crustal shortening) والطيات المحدبة الرّصية (الرخمية) Compactional anticlines استجابة الى شدّ قشري (Crustal tension).

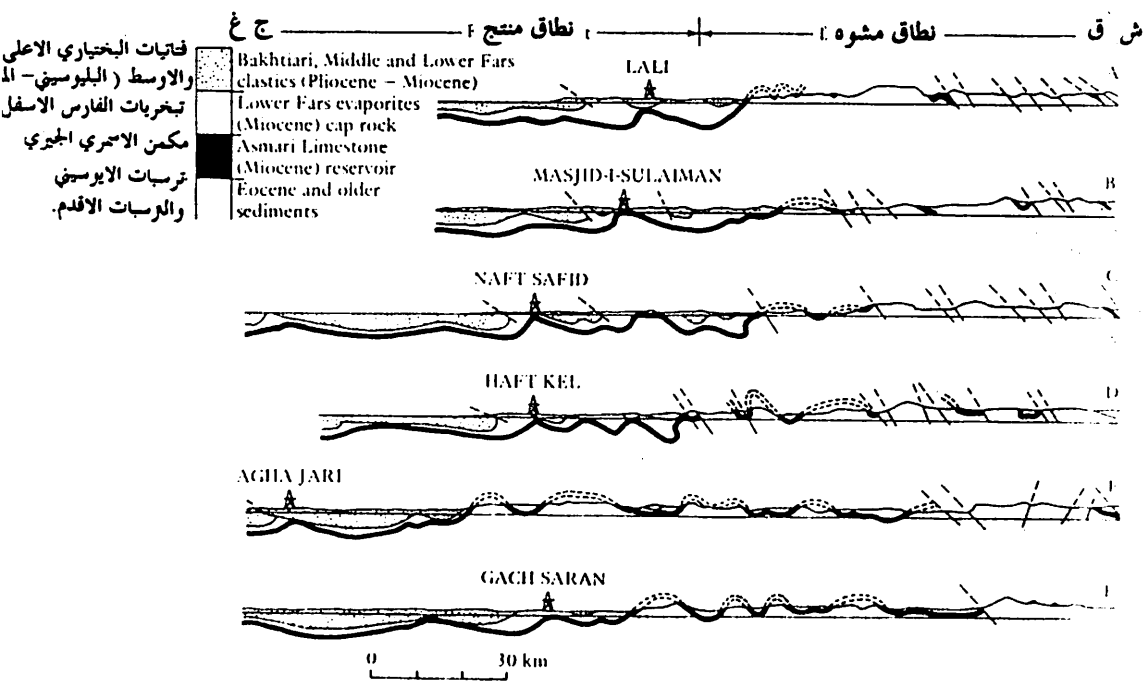
الطيات المحدبة الانضغاطية Compressional Anticlines.

من المحتمل أن توجد مصائد الطيات المحدبة الانضغاطية الناتجة بالانضغاط Compression في الأغلب في أو بجوار المنخسفات الغورية Subductive troughs، حيث يكون هناك قصر نهائي في القشرة الأرضية، وبذلك فان الحقول في مثل هذه المصائد توجد داخل أو بجوار السلاسل الجبلية في العديد من أنحاء العالم.

توجد احدى أفضل أنواع المقاطعات البترولية المنتجة من طيات محدبة انضغاطية في ايران (الشكل ٧-٧). فهنا في مقتربات جبال زاغروس، توجد العديد من مثل هذه الحقول. وتُعد ستة عشرة من هذه الحقول على أنها من النوع "العملاق Giant"، باحتياطي يتجاوز ٥٠٠ مليون برميل من النفط القابل للاستخراج أو ٣.٥ ترليون قدم مكعب من الغاز القابل للاستخراج (Halbouty et al. 1970). ولقد وصفت هذه الحقول بشيئ من التفصيل على مر السنين (Lees, 1952, Hull and Warman, 1970, Slinger and Crichton, 1959, Falcon, 1958, 1969, Colmann-Sadd, 1978). والنطاق الرئيسي المنتج هو تكوين الأسمري الجيري (المايوسيني الأسفل)، وهو مكمن ذو مسامية تكسرات شديدة. ومعدلات الانسياب والانتاجية هائلة، اذ يبلغ انتاج بعض الآبار المفردة ٥٠ مليون برميل (بئر ٧-٧، حقل مسجدي سليمان). ولقد تمثلت الصخور الغطائية بتبخريات مجموعة الفارس الأسفل (المايوسيني)، الذي أدى طيها غير المتساوق Disharmonic الى صعوبة استقراء الوضع من السطح الى المكامن. وتقع المصائد ذاتها الى الجنوب الغربي من حزام جبال زاغروس الصدعي Thrust الرئيسي. ويبلغ طول الطيات المنفردة نحو ٦٠ كيلومتر في الطول وبين ١٠ الى ١٥ كيلومتر في العرض (الشكل ٧-٨). وتمر المستويات المحورية للطيات باتجاه الأسفل الى الفوالق الصدعية، والتي



الشكل ٧-٧: خارطة تظهر مواقع مصائد الطيات المحدبة في أيران. للمقطع العرضي أنظر الشكل ٧-٨ .



الشكل ٧-٨: مقطع عرضي من الجنوب الغربي الى الشمال الشرقي بمقياس صحيح خلال بعض الراكيب المطوية في ايران. المواقع ظاهرة في الشكل ٧-٧ . (عن Falcon, ١٩٥٨).

تختفي في نطاق انزلاقي Decollement ضمن سلسلة ملح هرمز في الأسفل (البريكامبري؟).

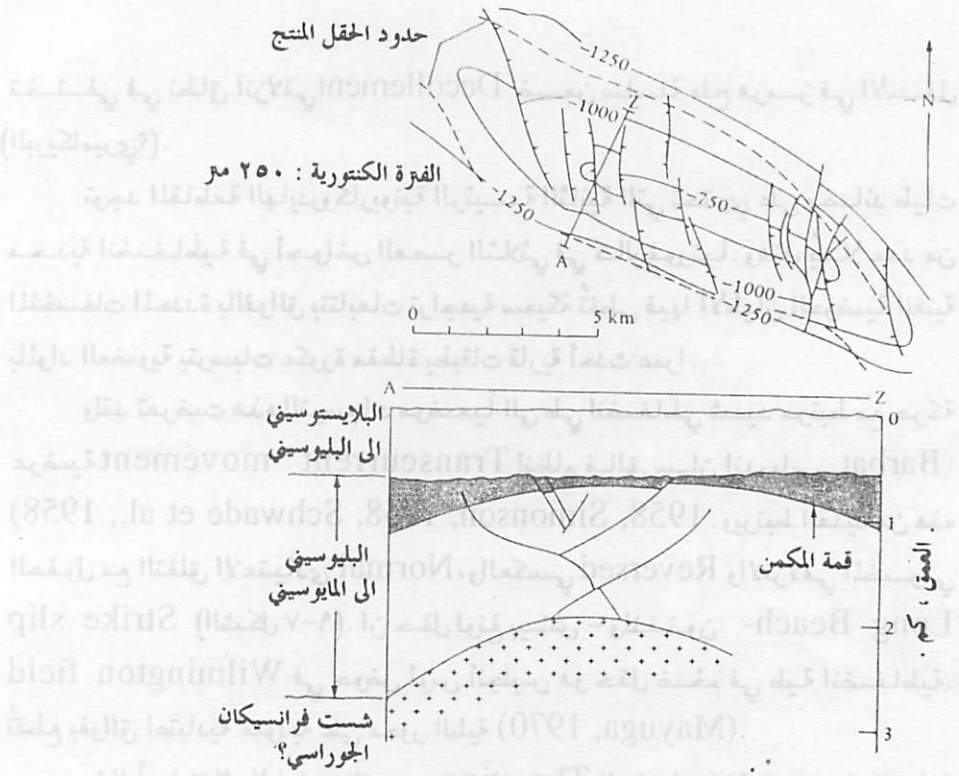
توجد المقاطعة الهايدروكاربونية الرئيسية الثانية التي تحتوي على مصائد طيات محدبة انضغاطية في أحواض العصر الثلاثي في كاليفورنيا. وهنا، يُملأ عدد من المنخسفات المحددة بالفوالق بتتابعات تراجعية سميكة تُغطى فيها الأطيان الحوضية الغنية بالمواد العضوية بترسبات عكورة مغطاة بطبقات قارية أحدث عمرا.

ولقد تعرضت هذه الترسبات موضعياً الى طي انضغاطي شديد مرتبط مع حركة عرضية Transcurrent movement لنظام فالق سان اندرياس (Barbat, 1958, Simonson, 1958, Schwade et al., 1958). ويرتبط العديد من هذه الحقول مع التفلق الاعتيادي Normal، والعكسي Reversed والانزلاقي المضربي Strike slip (الشكل ٧-٩). ان حقل لونغ بيتش - ولنغتون Long Beach-Wilmington field في حوض لوس أنجليس هو حقل ضخم في طية انضغاطية، تُقطع بفوالق اعتيادية عمودية على محور الطية (Mayuga, 1970).

وغالباً ما تتأثر الطيات بالتصدع Thrusting الحاصل داخل السلاسل الجبلية نفسها. وقد تصطاد الهايدروكاربونات في الطيات المحدبة فوق مستويات التصدع في المكامن المختومة تحت الصدع. وتوجد منطقة احتمالات Play من هذا النوع في جبال الروكي الشرقية Eastern Rocky Mountains، وبضمنها حقل تيرنر فالي Turner Valley Field في ألبرتا وحقل مكمن بينتر فالي Painter Valley Reservoir Field في يومنغ (الشكل ٧-١٠). ويصعب عادةً العثور على هذا النوع من الحقول بسبب مشاكل التفسيرات الزلزالية الناتجة من التفلق المعقد والطبقات شديدة الميل. ومع ذلك، وبتوفر التطورات الحديثة في التقنية الزلزالية، فان هذه المهمة تصبح أسهل، فاتحة المناطق المهملة سابقاً أمام الاستكشاف.

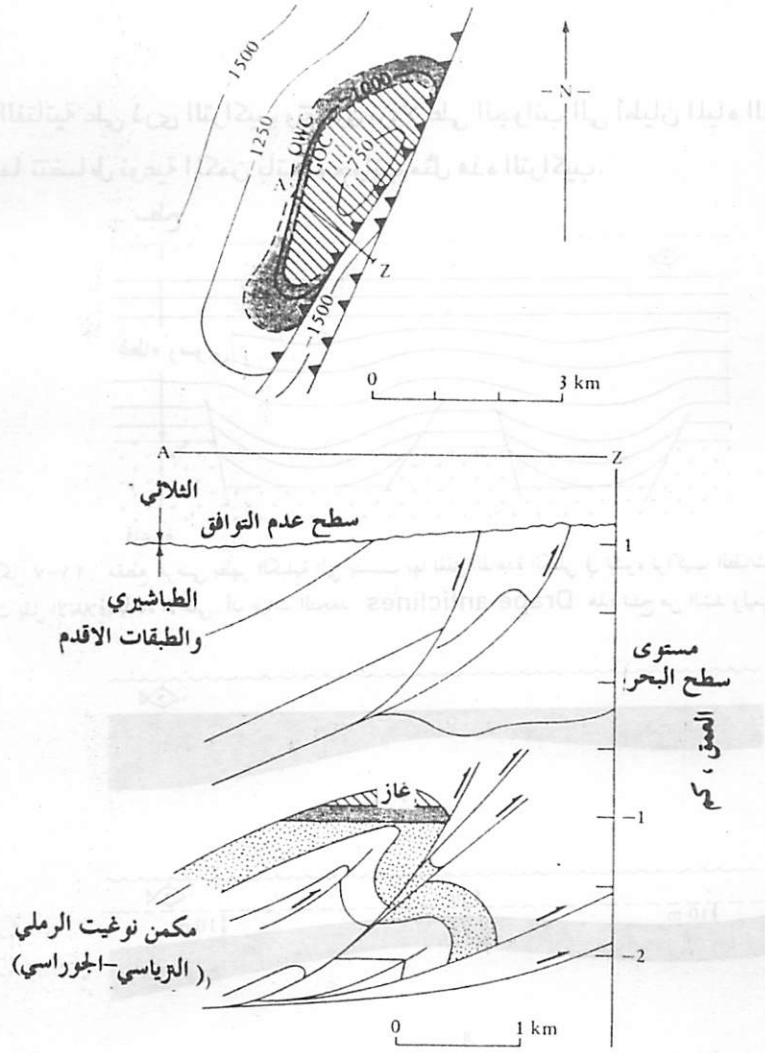
الطيات المحدبة الرصّية (الرضمية) Compactional Anticlines

لا تتكون المجموعة الرئيسية الثانية من مصائد الطيات المحدبة بتأثير الانضغاط ولكن نتيجة الشد القشري Crustal tension. وحيثما يسبب الشد القشري تكون الحوض



الشكل ٧-٩: حقل ويلمنغتن النفطي , لونغ بيتش , كاليفورنيا . (الاعلى) خارطة تركيبية على قمة نطاق الرينجر ، تحت ذروة المكمن تماما . (الاسفل) مقطع عرضي من الجنوب الغربي الى الشمال الشرقي على امتداد الخط A-Z . (عن Mayuga, ١٩٧٠).

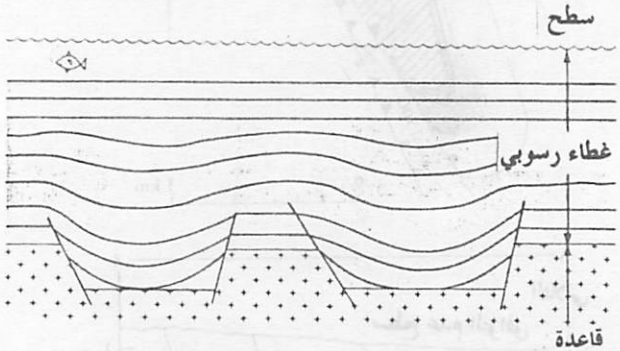
الرسوبي، ينفصل القاع عادة الى فسيفساء من مرتفعات Horsts ومنخفضات Grabens القاعدة. وتملأ المرحلة الأولية من الترسيب هذه الطوبوغرافية غير المنتظمة. وخلال تأريخ الحوض، تقاوم المعمارية التركيبية الأولية عادة مؤثرة على الترسيب اللاحق. وبذلك فان الطيات المحدبة قد توجد في الغطاء الرسوبي فوق المرتفعات المدفونة تحت الأعماق (الشكل ٧-١١). ويمكن تعديل الانغلاق بكل من عمليتي الترسيب والانضغاط. ويؤدي الترسيب التفاضلي للأطيان الى زيادة ارتفاع Amplitude الطية، لأنه رغم أن النسبة المئوية للانضغاط تبقى ثابتة للذروة والمنخفض، فان المقدار الحقيقي للانضغاط يكون أكبر بالنسبة للترسبات السميكة على جانبي الطية (الشكل ٧-١٢).



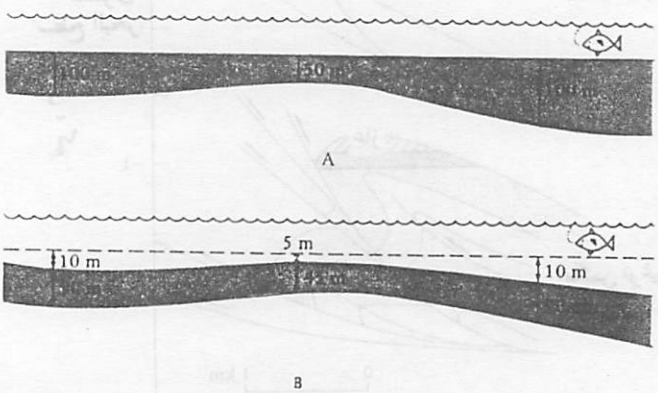
الشكل ٧-١٠: خارطة (في الاعلى) ومقطع عرضي (في الاسفل) لحقل بينو فالي في يومنغ . أن مصائد الطبات المحدبة الانضغاطية المرتبطة مع الدسر مثل هذه أصبحت سهلة العثور عليها بسبب التحسن في المعطيات الزلزالية. (عن Lamb, ١٩٨٠).

تحسن معدلات الترسيب التفاضلية أيضا من الانغلاق التركيبي. اذ يميل ترسيب المواد الجيرية الى أن يكون أعلى في المياه الضحلة بدلا من المياه العميقة، وبذلك فان سحنات المخاضات shoal والسحنات الشعابية قد تتحول بعيدا عن التركيب الى زيادات رقيقة السمك من الطين الجيري الحوضي. وعلى نحو مشابه، قد تنشأ رمال المخاضات

الفتاتية على ذرى التراكيب وتتحول نزولا على الجوانب الى أطيان المياه العميقة، وبذلك غالباً ما تتضاءل نوعية المكمن باتجاه جوانب مثل هذه التراكيب.

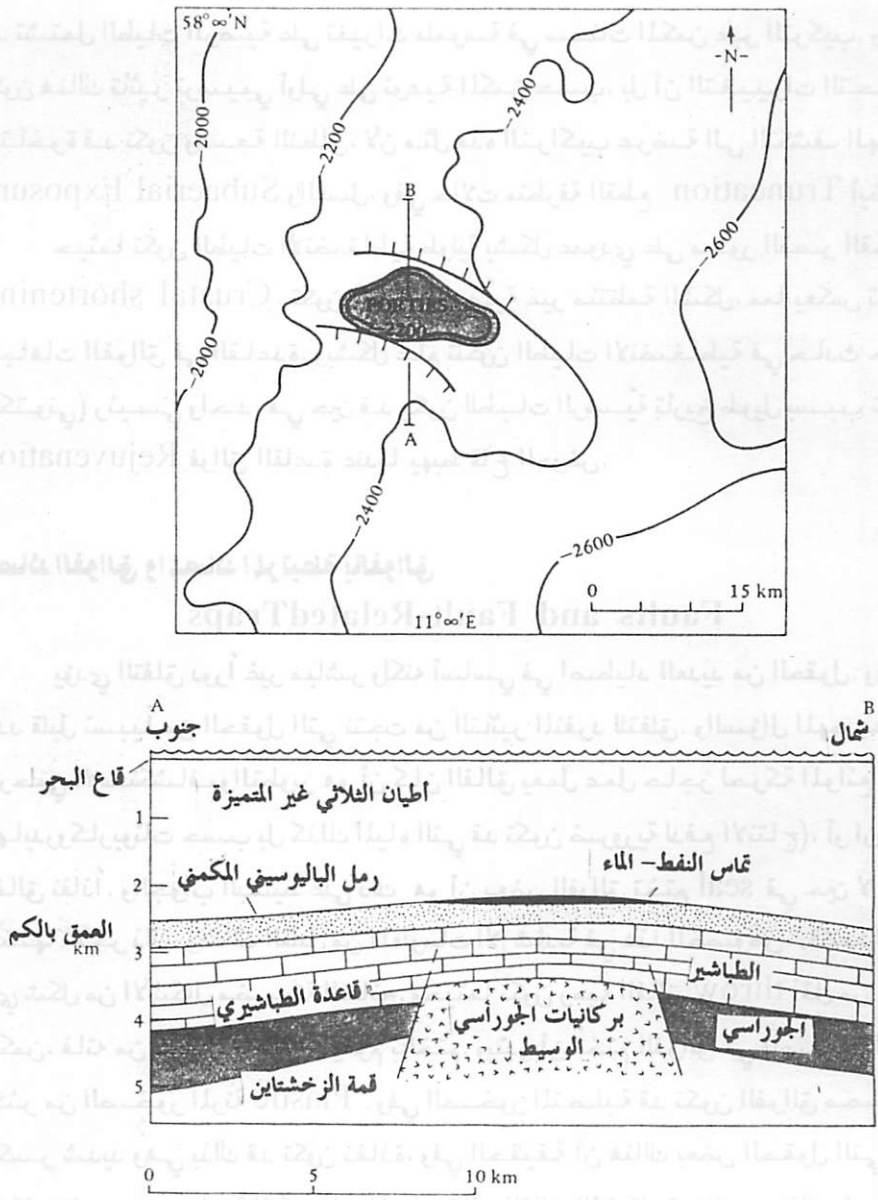


الشكل ٧-١١: مقطع عرضي يظهر الكيفية التي يتسبب بها تفلق القاعدة الكتلي في نشوء تراكيب الطيات المحدبة في الرسبات، حيث يقل الانفلاق باتجاه الاعلى. أن طيات التجعد Drape anticlines هذه تنتج من الشد وليس بفعل الانضغاط .



الشكل ٧-١٢: مقطع عرضي يظهر الكيفية التي يحفز فيها الانضغاط الناتج من الدفن الانفلاق على طيات التجعد المحدبة. (أ) الرسيب (ب) بعد أنضغاط منتظم مقداره ١٠ بالمئة.

توجد أمثلة جيدة على حقول النفط المصطادة في طيات محدبة رصية في بحر الشمال. فهناك تتجعد Draped رمال البحر العميق من العصر الباليوسيني فوق مرتفعات حقبة الحياة الوسطى (Blair, 1975). وتضم هذه الحقول فورتيس Forties ومونتروس Montrose، ومورين Maureen وحقل ايست فريغ East Frigg (الشكل ٧-١٣).



الشكل ٧–١٣: خارطة (في الاعلى) ومقطع عرضي (في الاسفل) لحقل فورتيز في بحر الشمال . أن هذه الحقل بالدرجة الرئيسية هو طية محدبة أنضغاطية متجعدة على مرتفع قاعدي قديم.

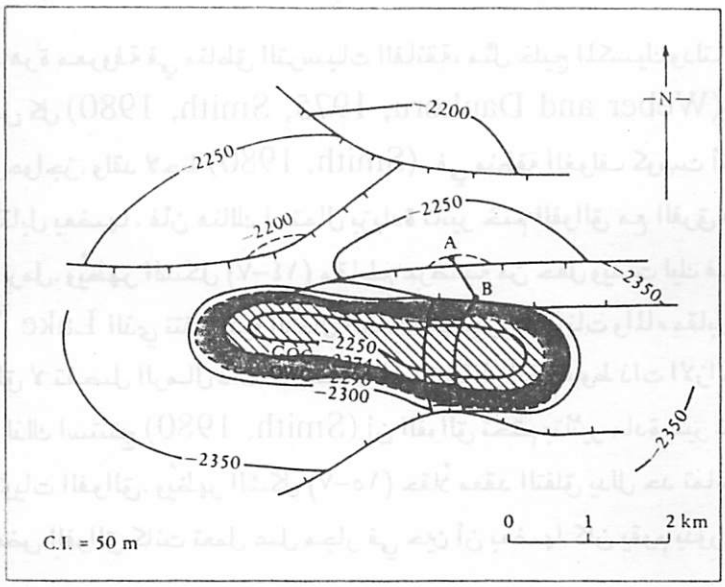
ان مصائد الطيات المحدبة الرصيّة والانضغاطية مختلفة جداً. ومثلما شرحنا مسبقاً، قد تشتمل الطيات الرصيّة على تغيرات ملموسة في سحنات المكمن عبر التركيب. وقد لا يكون هنالك تأثير ترسيبي أولي على نوعية المكمن حسب، بل أن التغييرات التحويرية المتأخرة قد تكون واسعة النطاق، لأن مثل هذه التراكيب عرضة الى التكشف الهوائي Subaerial Exposure والغسل، وفي حالات متطرفة القطع Truncation أيضاً.

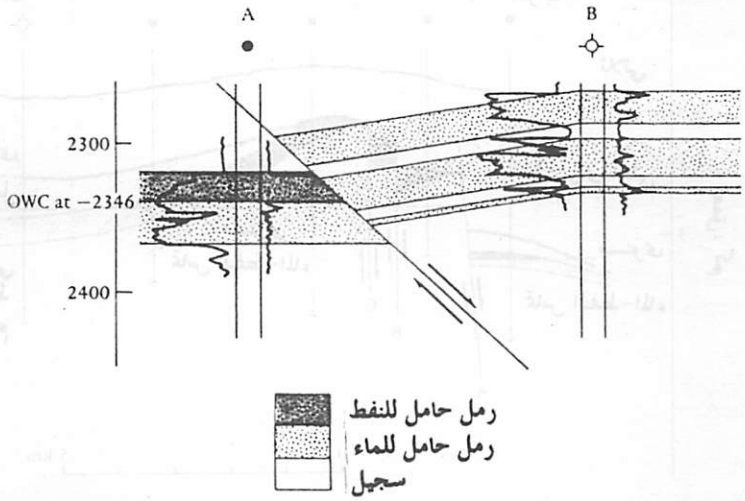
حيثما تكون الطيات الانضغاطية طولية بشكل عمودي على محور القصر القشري Crustal shortening، تكون الطيات الرصيّة غير منتظمة الشكل، مما يعكس تقاطع اتجاهات الفوالق في القاعدة. وبشكل عام تتكون الطيات الانضغاطية في حادث حركي (تكتوني) رئيسي واحد، في حين قد يكون للطيات الرصيّة تأريخ طويل بسبب تجدد Rejuvenation فوالق القاعدة عندما يهبط قاع الحوض.

مصائد الفوالق والمصائد المرتبطة بالفوالق
Faults and Fault-RelatedTraps

يؤدي التفلق دوراً غير مباشر ولكنه أساسي في اصطياد العديد من الحقول. وهنالك عدد قليل نسبياً من الحقول التي نتجت من التأثير المنفرد للتفلق. والسؤال المهم جداً في مرحلتي الاستكشاف والتطوير هو أن كان الفالق يعمل عمل حاجز لحركة الموائع (ليس الهايدروكاربونات حسب بل كذلك المياه التي قد تكون ضرورية لدفع الانتاج)، أو ان كان الفالق نفاذاً. والجواب البسيط على ذلك هو أن بعض الفوالق تختم seal في حين لا يفعل بعضها الآخر ذلك. وهنالك القليل من المعلومات الارشادية في هذا الخصوص، ولكنها ليست بأي شكل من الأشكال مضمونة النتائج. وحيثما تكون رمية الفالق throw أقل من سُمك المكمن، فانه من غير المحتمل أن يقوم بالختم. ويندر أن تُختم الفوالق في الصخور الهشة أكثر من الصخور المرنة Plastic . وفي الصخور المتصلبة قد تكون الفوالق مصحوبة بتكسر شديد وهي بذلك قد تكون نفاذة، وفي الحقيقة أن هنالك بعض الحقول التي تنتج بشكل منفرد من مسامية التكسرات المجاورة الى الفالق (الشكل ٦-٧). ومع ذلك، في بعض الأحيان، قد تتعرض التكسرات الى عمليات تسميت لاحقة.

في صخور السجيل والرمال غير المتصلبة تميل الفوالق الى الختم، وخصوصا حيثما

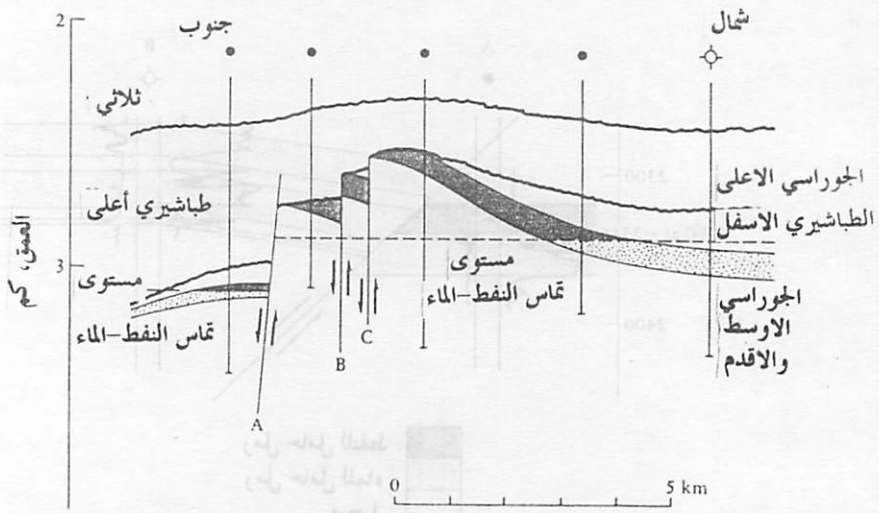




الشكل ٧-١٤: خارطة (في الاعلى) ومقطع عرضي (في الاسفل) لحقل وست ليك فيرت ، الثلاثي ، في لوزيانا. يوفر هذا الحقل مثالا على فالق خاتم لم يتحرك فيه النفط عبر مستوى الفالق رغم وجود رمل نفاذ متوضع بجواره.

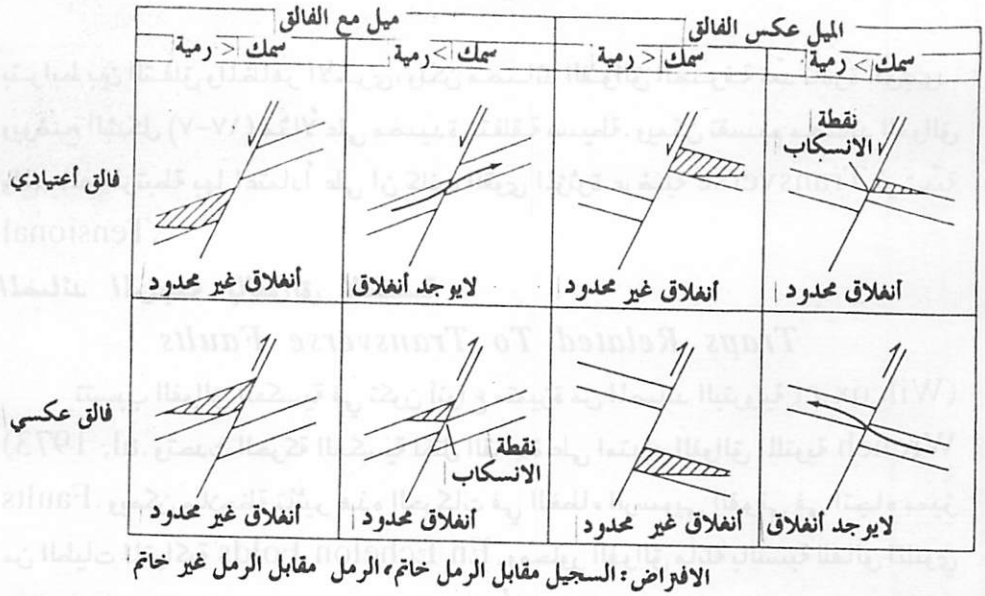
تتجاوز الرمية سُمك المكمن. ومع ذلك، هنالك أمثلة معروفة حيث تقوم الأطيان المحتجزة في مستويات الفوالق بعمل الختم حتى لو تفلقت طبقتا رمل نفاذتين مقابل بعضهما الآخر.

وهذه الظاهرة معروفة في مناطق الترسبات الفائقة، مثل خليج المكسيك ودلتا نهر النيجر، حيث درس كل (Weber and Daukoru, 1975, Smith, 1980). دور الفوالق كخواتم وحواجز. ولقد لاحظ (Smith, 1980) في منطقة الغولف كوست أنه حيث تتفلق الرمال مقابل بعضها، فأن هنالك احتمال بزيادة تأثير ختم الفوالق مع الفرق في العمر بين طبقتي الرمل. ويُظهر الشكل (٧-١٤) مقاطع عرضية من حقل ويست ليك فيريت West Lake Verret الذي تتفلق فيه الرمال الحاملة للهايدروكاربونات والماء مقابل مع بعضها. أن الفوالق لا تفصل الرمال ذات السحنات المختلفة أو الضغوط ذات الازاحة الشعرية المختلفة، لذلك استنتج (Smith, 1980) أن الفوالق تُختم بتأثير مادة غير نفاذة مفروشة على مستويات الفوالق. ويُظهر الشكل (٧-١٥) حقلاً معقد التفلق يدلل حد تماس النفط-الماء فيه أن بعض الفوالق كانت تعمل عمل مجار في حين أن بعضها كان يقوم بدور أختام.

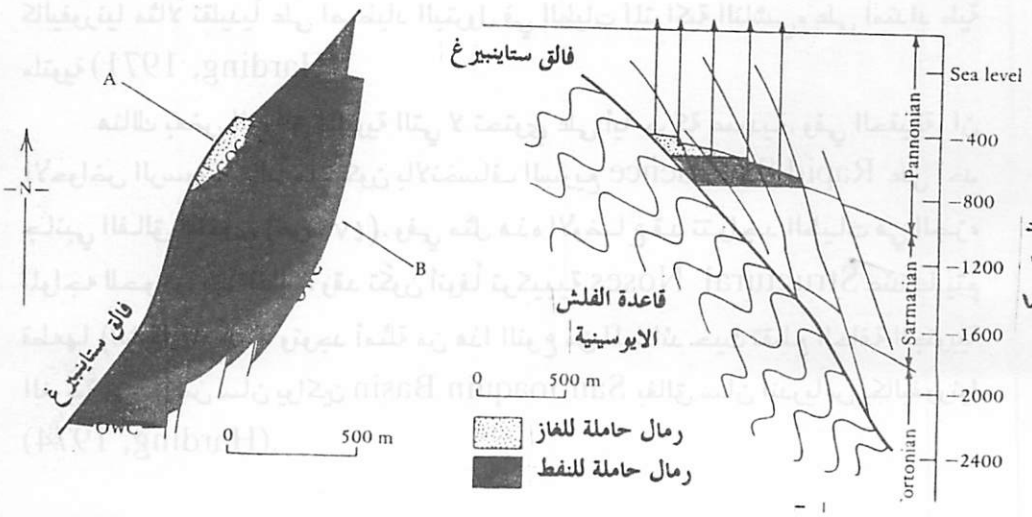


الشكل ٧-١٥: مقطع عرضي خلال حقل بايير في بحر الشمال يظهر كيف أن في حقل واحد تختم بعض الفوالق (أ) في حين لاتختم الفوالق الاخرى (ب و ج). (عن Wiliams et al., ١٩٧٥).

أظهر كل من (Bailey and Stoneley, 1981) أن هنالك تسع هندسيات نظرية لمصائد الفوالق، مفترضين أن الفوالق لا تفصل الطبقات النفاذة المتجاورة (الشكل ٧-١٦). أن ستاً من هذه الهندسيات قد تكون مصائد حقيقية شريطة أن يكون هنالك انغلاق في كلا الاتجاهين بموازاة مستوى الفالق. ورغم أن العديد من هذه الحقول قد اصطيد



الشكل ٧-١٦: الوريثات النظرية الثمانية للمصائد البترولية المرتبطة مع الفوالق. لقد تم رسم هذه الوريثات على أفتراض أن النفط يستطيع الحركة عبر مستوى الفالق ولكن ليس باتجاه أعلاه عندما يتوضع رمل نفاذ الى جواره. (عن Baily and Stoneley, ١٩٨١).



الشكل ٧-١٧: خارطة (الى اليسار) ومقطع عرضي (الى اليمين) خلال مصيدة فالق في حقل غايسبيرغ ، النمسا. (عن Janoschek, ١٩٥٨).

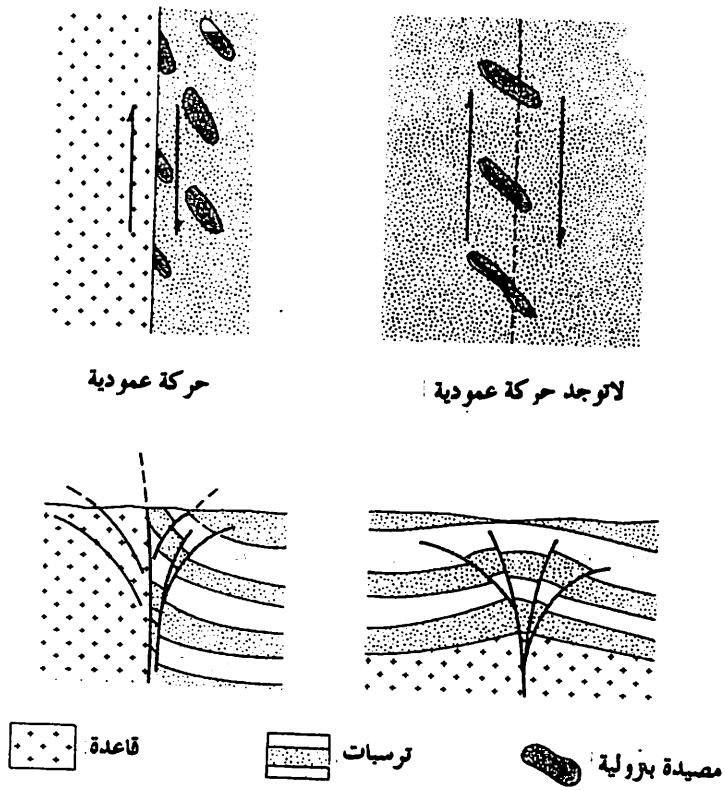
بترابط بين التفلق والمظاهر الأخرى، ولكن مصائد الفوالق الصرفة تُعَد نادرة الوجود. ويوضح الشكل (٧-١٧) مثالاً على مصيدة متفلقة بسيطة. ويمكن تقسيم مصائد الفوالق والمصائد المرتبطة بها اعتماداً على ان كانت القوى المؤثرة عرضية Transverse أو شدّية Tensional.

المصائد المرتبطة بالفوالق العكسية

Traps Related To Transverse Faults

تتسبب الفوالق العكسية في تكون أنواع متميزة من المصائد البترولية (Wilcox et al, 1973). وتحدث الحركة العكسية لكتل القاعدة على امتداد الفوالق الملتوية Wrench Faults. ويمكن ملاحظة تأثير هذه الحركات في الغطاء الرسوبي الفوقي في اتجاه مميز من الطيات المتراكبة En Echelon Folds. ومحاور الفوالق مائلة بالنسبة للفالق الملتوي وتدل على اتجاه حركته. وفي بعض الحالات قد تُزاح محاور الطيات بتأثير الفوالق (الشكل ٧-١٨). وفي المقطع العرضي، تنفصل الفوالق الملتوية باتجاه الأعلى متحولة الى فوالق ذات زاوية واطئة Low-Angle Faults. ويُطلق على هذه الظاهرة أحياناً اسم تركيب الوردة Flower Structure (Gregory, in Harding and Lowell, 1979). ويُمثّل فالق نيوبورت-أنغلود New-Port-Inglewood Fault في حوض فنتورا في كاليفورنيا مثالاً تقليدياً على اصطياد البترول في الطيات المتراكبة الناشيء على امتداد طية ملتوية (Harding, 1971).

هنالك بعض الفوالق الملتوية التي لا تحتوي على أية حركة عمودية. وفي الحقيقة، ان الأحواض الرسوبية غالباً ما تتكون بالانخساف السريع Rapid Subsidence على أحد جانبي الفالق الملتوي (ص ٤٧٦). وفي مثل هذه الأوضاع قد تتواجد الطيات في الجزء المواجه للحوض من الفالق، وقد تكّون أنوفاً تركيبية Structural Noses عندما يتم قطعها (الشكل ٧-١٨). وتوجد أمثلة من هذا النوع من المصائد حيث تقطع الحافة الجنوبية الغربية من حوض سان يواكين San Joaquin Basin بفالق سان اندرياس بكاليفورنيا (Harding, 1974).



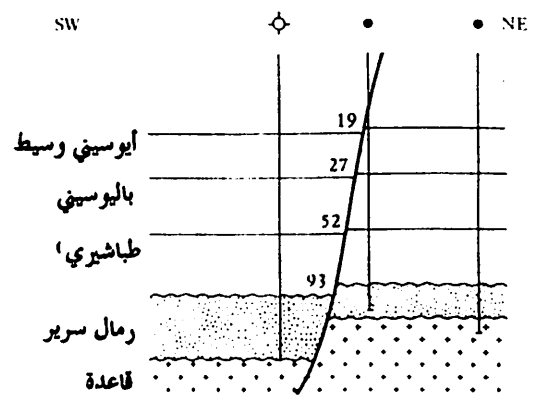
الشكل ٧-١٨: خارطة (في الاعلى) ومقطع عرضي (في الاسفل) يظهر أنواع المصائد البترولية المرتبطة مع الفوالق الانشائية. للامثلة والتفسير أنظر متن الكتاب.

المصائد المرتبطة بالفوالق الشدية

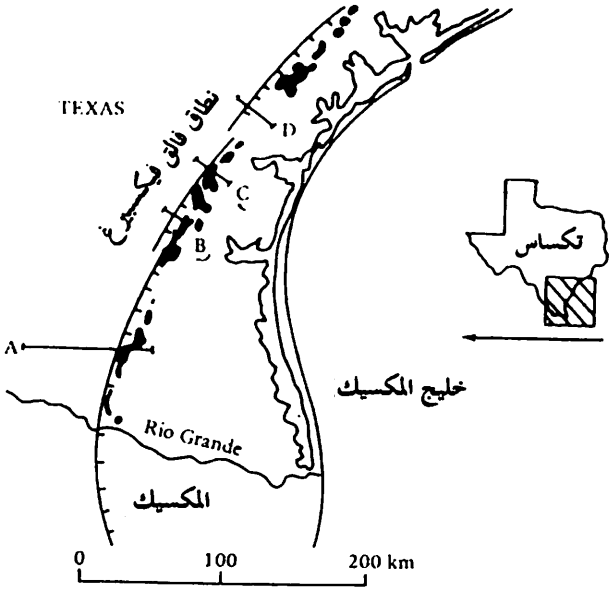
Traps Related To Tensional Faults

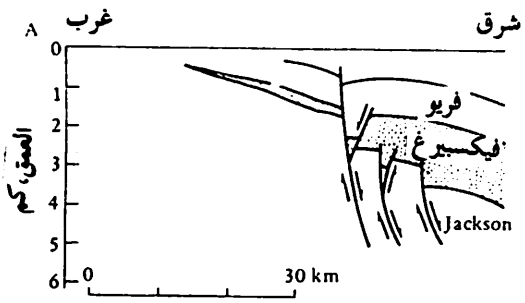
ترتبط مجموعة هامة جداً من المصائد مع الفوالق الشدية. وفي بعض الفوالق تزداد الرمية على نحو متزايد باتجاه الأسفل. أن هذا يوضح أن حركة الفالق كانت متزامنة مع الترسيب. وبذلك يطلق على هذا النوع من الفوالق اسم الفوالق النامية Growth Faults. وفي منظر مستوي يكون أثر Trace الفالق منحنياً عادة، ولكن عندما يُنظر اليه من جانب الرمي الأسفل Downthrown side يبدو مقعراً. وبشكل مشابه، في القطاع Profile، فان زاوية الفالق تتضاءل باتجاه الأسفل.

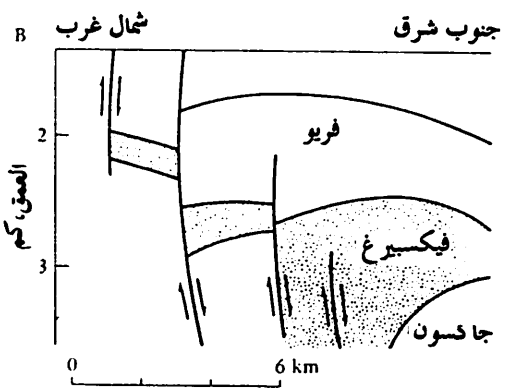
هنالك نوعان من الفوالق النامية. يرتبط أحد النوعين مع القاعدة ويميل الى أن يكون طويلا في المستوى الأفقي وله تاريخ طويل في التأثير على السحنات ومعدلات الترسيب (Shelton, 1968) ويوجد مثالٌ جيد على هذا النوع على منحدر Flank حقل سرير في ليبيا، (الشكل ٧-١٩). ومن أفضل الأمثلة المعروفة على الفوالق النامية كبيرة الحجم هو انثناء فيكسبيرغ Vicksburg Flexure، الذي يمتد مسافة ٥٠٠ كيلومتراً حول الغولف كوست في تكساس. وتبلغ الزيادة القصوى في الترسبات عبر الفالق بحدود ١٥٠٠ متراً قرب الحدود المكسيكية. ويوجد أغلب هذه الزيادة في السمك من مجموعة فيكسبيرغ (الأوليغوسيني)، ويحدث ازدياد أقل في السمك في مجموعة فريو Frio Group (المايوسيني) التي تتواضع فوقها. ولا تحدث زيادة في سُمك التكوينات عبر الفالق باتجاه الخليج حسب ولكن النسبة المئوية للرمل الصافي تزداد أيضاً. أن هذا يدلل على أن الانخساف على جانب الرمية الأسفل من الفالق قد كوّن مصيدة ترسبات طبيعية. وبشكل مميز، هنالك انعكاس Reversal موضعي في ميل الطبقات الاقليمي الشرقي المجاورة لمستوى الفالق، بينما تنشأ الطيات المحدبة المتزحلقة Rollover Anticlines على جانب الرمية السفلى (الشكل ٧-٢٠). تميل الطبقات باتجاه الفالق كي تملأ الفراغ الناتج عن الانفصال على امتداد مستوى الفالق. ان انعكاس ميل الطيات المحدبة غالباً ما يتفاقم نتيجة تأثير الفوالق Antithetic Faults باتجاه الرمية السفلى وتميل باتجاه الفالق الرئيسي.

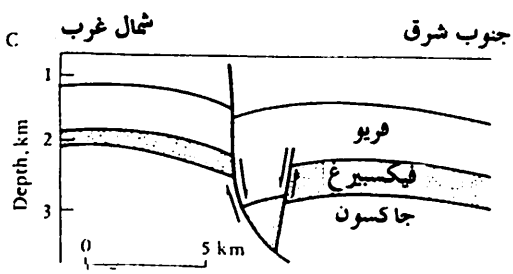


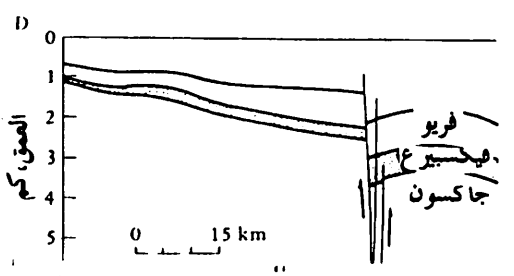
الشكل ٧-١٩: مقطع عرضي خلال فالق نمر
مرتبط بالقاعدة في حقل سرير في ليبيا. أن الارقام
تظهر رمية فوالق الطبقات الدالة المختلفة (بالامتار)
ويوضح زيادة تدريجية باتجاه الاسفل .
(عن Sanford, ١٩٧٠).









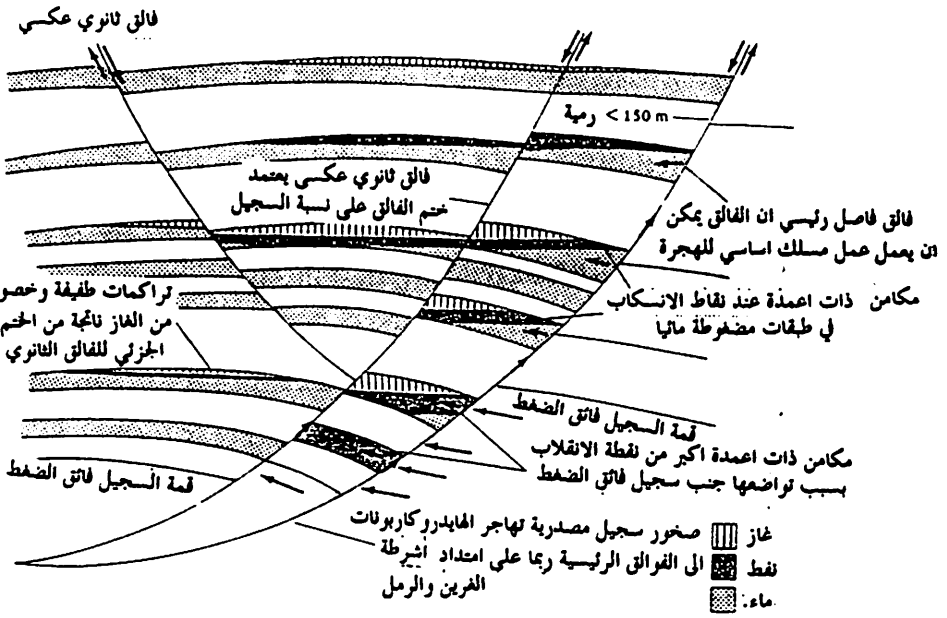


الشكل ٧-٢٠: خارطة ومقطع عرضي لفالق فيكسبرغ النامي في جنوب تكساس. تحتوي المصائد المرتبطة مع هذا التركيب على احتياطي مقدر يبلغ ٣ مليار برميل من النفط و ٢٠ ترليون قدم مكعب من الغاز . لاحظ الكيفية التي يزداد بها سمك التكوينات باتجاه الحوض عبر الفالق والطيات المحدبة المترحلقة والفوالق الثانوية المتعاكسة التي تميل باتجاه الفالق الرئيسي. ويأتي الانتاج من الرمال من كل من مجموعتي فيكسبرغ (الاوليغوسيني) وفريو (الايوسيني). (الخارطة عن Stanley, ١٩٧٠).

يصطاد النفط والغاز في كل من الطيات المحدبة المتزحلقة وفي المصائد الطبقية الناتجة من تناقص سُمك الرمل Sand Pinchout على جانبي الرمية العليا والسفلى من فالق فيكسبيرغ (Halbouty, 1972). ولقد قدر أن هنالك نحو ٣ مليار برميل من النفط و٢٠ ترليون قدم مكعب من الغاز قد تم اصطيادها بجوار فالق فيكسبيرغ، جزئياً في مصائد فالقية صرفة، ولكن الأكثر شيوعاً في طيات محدبة متزحلقة وفي مصائد تناقص سُمك الرمل (التحزّق Pinchouts).

فاذا ما تتبعناه الى لوزيانا، فان فالق فيكسبيرغ يختفي تحت الحافة الفتاتية لدلتا المسيسبي. وتسود المصائد المرتبطة بالفوالق النامية في هذه المقاطعة الهايدروكاربونية أيضاً، غير أنها مختلفة في المقياس وفي طريقة التكون. ويندر أن تتجاوز الفوالق المنفردة بضعة كيلومترات في الطول، رغم أنه مع أثارها المقوسة، يمكن أن توجد أنمطة فوالق مفصصة Scalloped Fault أيضاً. أن هذه الفوالق ليست مرتبطة بالقاعدة، غير أنها تهبط نحو الأسفل كي تختفي كمستويات قص أفقية أما في طبقات السجيل فائقة الضغط أو في ملح لوان Louann Salt الأعمق (الترياسي - الجوراسي).

وبشكل مشابه، في ترسبات العصر الثلاثي في دلتا نهر النيجر، تؤدي الفوالق النامية دوراً رئيسياً في هجرة النفط والغاز واصطيادهما (Evamy et al., 1978). ولقد استند تحليل تفصيلي أنجزه (Weber et al. 1980) على مشاهدة الحقول المرتبطة بالفوالق وعلى التجارب المختبرية. وأستنتجوا أنه في أغلب الحالات لا تقوم الفوالق النامية بالختم، وذلك لأنها ترتبط لا مع الشوائب الطينية حسب بل كذلك مع شظايا من الرمل النفاذ. ويبدو أن هجرة الهايدروكاربونات تحدث باتجاه أعلى مستوى الفالق وعبره، من صخور السجيل المصدرية الناضجة فائقة الضغط الى الرمال ذات الضغط الاعتيادي (أو على الأقل ذات الضغط الواطئ). وفي الجزء الأعلى من الطية المحدبة الانزلاقية، قد تُملأ المصائد الى نقطة الانسكاب ولكن حيثما تتفلق الرمال مقابل السجيل فائق الضغط، قد تُملأ المصائد الى ما تحت نقطة الانسكاب (الشكل ٧-٢١).



الشكل ٧-٢١: نمط تراكم النفط والغاز في مصائد الفوالق النامية في دلتا نهر النيجر. وعلى نقيض الفوالق النامية المرتبطة مع القاعدة , فأن هذا النوع من الفوالق يقص أفقيا الى السجيل ذي الضغط الفائق. (عن ١٩٧٨ ,.Weber et al).

العلاقة بين المصائد التركيبية والوضع الحركي

The Relationship Between Structural Traps and Tectonic Setting

ان التصنيف والعرض المُتعلقين بالمصائد التركيبية الذي قدم للتو هو بشكل أساسي وصفي Descriptive وسكوني Static، بمعنى أن المصائد لم تُفحص ضمن مقامها الحركي. أن المصائد التركيبية لا تحدث على نحو اعتباطي، فنوع المصائد التركيبية وتوزيعها يرتبطان بشكل حميمي مع الوضع الحركي الاقليمي وتأريخ المنطقة التي توجد فيها.

أقترح تصنيف نوعي Genetic للمصائد التركيبية من قبل (Harding and Lowell, 1979)، اذ لاحظا أن المصائد التركيبية يمكن أن تُصنّف اعتماداً على القوى الحركية الفاعلة، واعتماداً على فيما اذا كانت القاعدة أو الغطاء الصخري المنفصل فقط هو

المعني، واعتماداً على موضع نشوئها نسبة الى الصفائح الحركية Tectonic Plates. وتمت تغطية هذا التصنيف الأخير في الفصل الثامن. ويمثل الجدول (٧-٢) تصنيفاً نوعياً للمصائد التركيبية. وهو يظهر أن هنالك تمييزاً رئيسياً بين المناطق التي يكون فيها الغطاء الرسوبي مرتبطاً بالقاعدة وبين المناطق التي يكون فيها الغطاء منفصلاً عنها. (يعزي ذلك عموما الى وجود التبخريات الفاصلة والأطيان فائقة الضغط). ويمكن أن تؤثر القوى الانضغاطية والشدّية في كلا الوضعين، ويحدث الأول عند حدود الصفائح المتلاقية Convergent، أما الثاني فعند الحدود المتباعدة Divergent. أن هذا التصنيف النوعي للمصائد التركيبية أكثر نفعاً من التصنيف الوصفي المجرد. وهو أداة استكشافية تتوقع نوع المصيدة التركيبية التي يُحتمل وجودها في أي وضع حركي معين.

الجدول (٧-٢) تصنيف نوعي للمصائد التركيبية اعتماداً على علاقة الغطاء الرسوبي بالقاعدة، والنمط التركيبي والقوى السائدة.

	النمط التركيبي	القوة السائدة
القاعدة ذات علاقة	فالق ملتوي	قوى مزدوجة
	مرتفعات قديمة اقليمية	عمليات في الوشاح Mantle
	كتل دسرية وفوالق عكسية	انضغاط Compression
	كتل فوالق شدّية وطيات محدبة مجعّدة drape anticlines	شدّ
الغطاء منفصل عن القاعدة	فوالق نامية وطيات انزلاقية	
	تراكيب مرتبطة بالتقوّر Decollement-related	انضغاط
	اقتحامات (ملح وطين)	اختلاف الكثافة

عن (Harding and Lowell, 1979)، منشورة بموافقة مسبقة.

المصائد الاقتحامية DIAPIRIC TRAPS

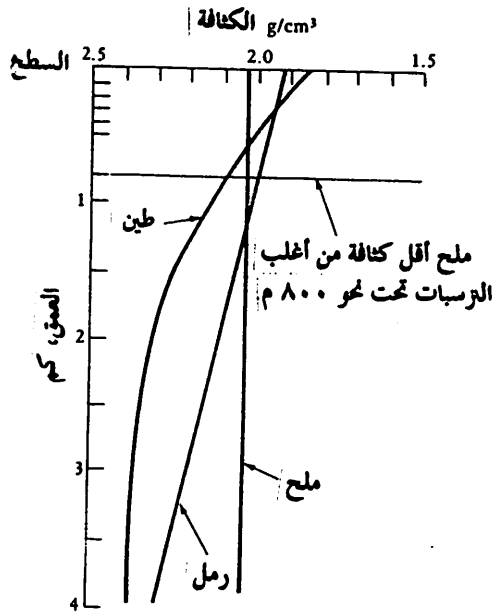
تنتج المصائد الاقتحامية نتيجة حركة الترسبات الأقل كثافة من تلك التي فوقها

باتجاه الأعلى. وفي هذا الوضع تميل الترسبات للحركة نحو الأعلى اقتحامياً، وبفعلها ذلك، فانها قد تكّونُ أنواعاً مختلفة من المصائد الهايدروكاربونية. ولا يمكنُ أن تُعَد مثل هذه المصائد مصائد تركيبية حقيقية، وذلك لأنه ليست هنالك حاجة للقوى الحركية كي تكوّنها (رغم أنه في بعض الحالات قد تفعل ذلك). وعلى نحو مشابه، لا تتكوّن المصائد المرتبطة بالاقتحام بعمليات طبقية، رغم أنه في بعض الأحيان قد تنتج من التغيرات الرسوبية عبر التركيب.

تتسبب المصائد الاقتحامية بشكل عام بحركة الملح أو، أقل حدوثاً حركة الأطيان فائقة الضغط باتجاه الأعلى. تبلغ كثافة الملح ٢.٠٣ غم/سم مكعب. وللأطيان والرمال المترسبة حديثاً كثافات أقل من كثافة الملح. ومع ذلك، عندما يدفن الطين والرمل، فأنها تنضغط وتفقد المسامية وتكتسب كثافة. وفي النهاية، يتم الوصول الى عمق الدفن عندما تكون الترسبات أكثر كثافة من الملح. واعتماداً على عددٍ من المتغيّرات، فانّ هذه النقطة قد تقع بين ٨٠٠-١٢٠٠ م (الشكل ٧-٢٢). وعندما يتم الوصول الى هذه النقطة، يميل الملح الى الانسياب الى الأعلى خلال صخور الغطاء الأكثر كثافة. أن هذه الحركة قد تحفز حركيا، وربما تُظهر التراكيب الناتجة بعض التراصف التركيبي Structural Alignment. ولكن في حالات أخرى، كانت حركة الملح اعتباطية على ما يبدو. ولقد درست الآلية المضبوطة للحركة الاقتحامية بالمراقبة والتجربة والحسابات الرياضية على امتداد سنوات عديدة على سبيل المثال,Bishop, 1978, Berner et al., 1972) .Halbouty, 1967)

في بعض التراكيب الملحية تكون الطبقات الفوقية مقببة نحو الأعلى فقط، في حين في التراكيب الأخرى يقتحم الملح في الحقيقة طريقه نحو الأعلى، ويطلق على الأخيرة اسم التراكيب الخزّية Piercement Structures. وفي بعض الحالات، قد يصل الملح الى السطح، مكوناً حفر اذابة في المناخ الرطب ومجالد الملح Salt Glaciers في المناخات

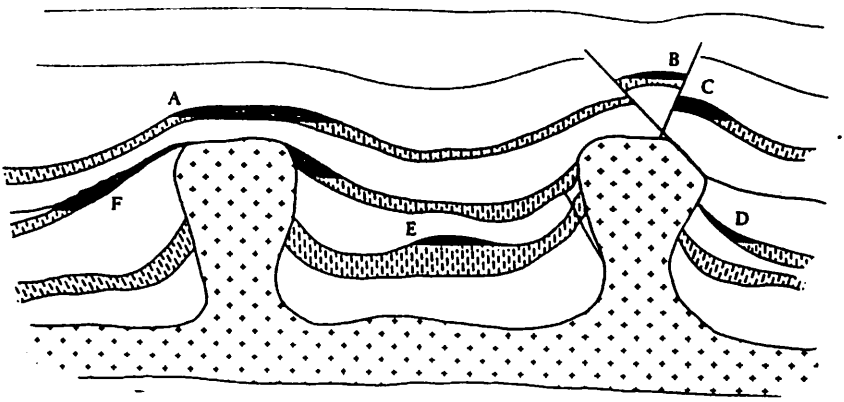
القاحلة (مثل ايران) (Ken,t 1979). وتؤدي حركة الملح أو التحرك الملحي Halokinesis دوراً هاماً في اصطياد البترول والغاز في منطقة الغولف كوست بالولايات المتحدة الأمريكية وايران والخليج العربي وبحر الشمال.



الشكل ٧-٢٢ : منحنيات الكثافة- العمق للرمل والطين والملح. يظهر المرتسم البياني ان الملح اقل كثافة من الترسبات الاخرى تحت نحو ٨٠٠ متر ، وأن حركة الملح بذلك يمكن توقعها حاما يتم الوصول الى عمق الدفن هذا.

وقد يصطاد النفط والغاز بحركة الملح بطرق عديدة (الشكل ٧-٢٣). وفي الحالات الأبسط قد تصطاد الطيات المحدبة شبه الدائرية الهايدروكاربونات فوق ذروة القبة الملحية. وتشمل الأمثلة البارزة على هذا النوع حقل ايكوفسك Ekofisk والحقول المرتبطة به في سواحل النرويج والدنمارك (الشكل ٧-٢٤). وقد تتعقد ذروة القبّة Crestal dome بفوالق شعاعية Radial faults أو منخسف مركزي Central graben. وحول حافة القبة، يمكن أن يصطاد النفط أو الغاز بتأثير الفوالق، في كل من الترسبات مقابل الترسبات والترسبات مقابل الملح، وبالقطع الطبقي، وتناقص السُمك والتراكب. تكون بعض القبب الملحية كُمثرية أو شبيهة بشكل الفطر في مقطعها العرضي، ويصطاد البترول تحت النطاق

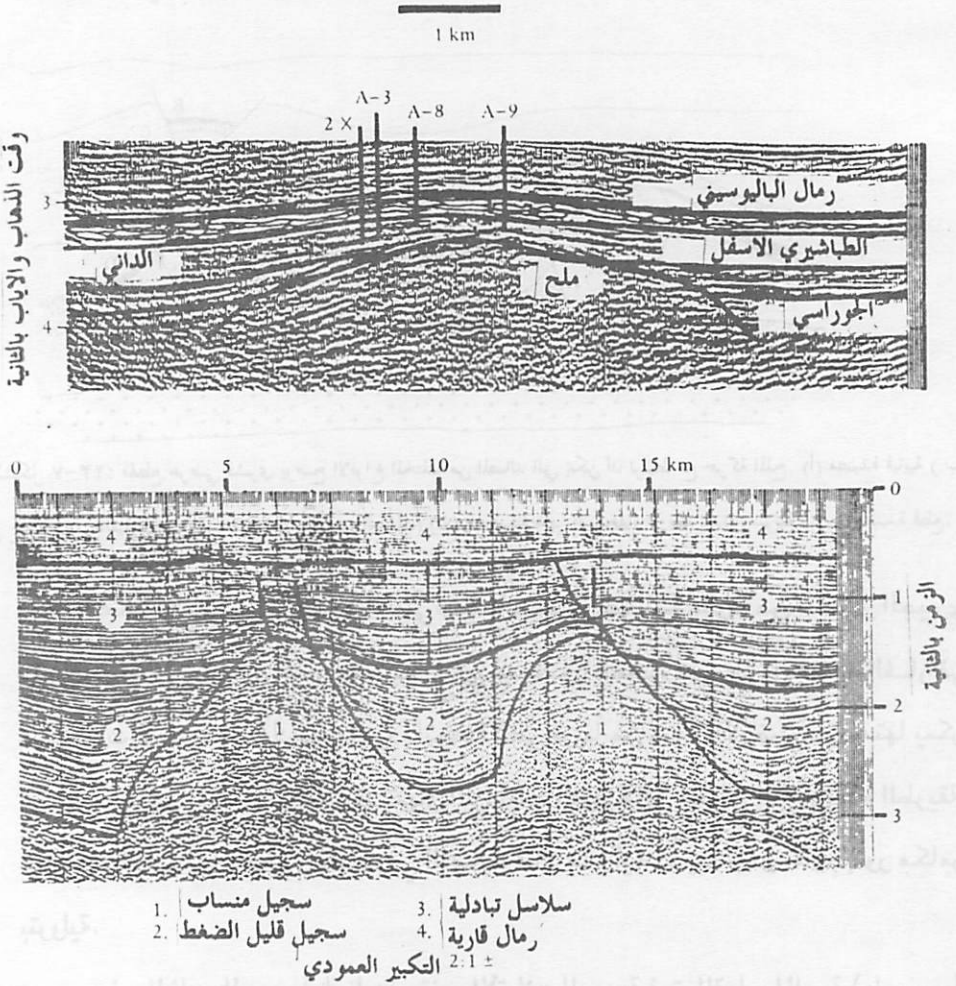
المعلق الحافي Peripheral Overhang Zone.



الشكل ٧-٢٣: مقطع عرضي قشري يوضح الانواع المختلفة من المصائد التي يمكن أن ترتبط مع حركة الملح. (أ) مصيدة قبابية (ب و ج) مصائد فالقية و (د) مصيدة تسفين (تناقص السمك) و (ه) مصيدة ظهر السلحفاة او طية محدبة رسوبية و (و) مصيدة قطع.

عندما يتحرك الملح نحو الأعلى، تنشأ صخور غطائية مكونة من الحجر الجيري والدولومايت والأنهايدرايت. وقد تحتوي صخور الغطاء هذه على النفط أو الغاز في التكسرات. وعندما تتحرك قبة ملحية باتجاه الأعلى قريباً من سطح الأرض، فان قمتها يمكن أن تذوب بتأثير المياه الجوفية. وقد تنهار الترسبات الفوقية الى الفراغ الناتج بهذه الطريقة، مكونةً بذلك بريشة تحطم واذابة. وفي النهاية، فان هذه أيضاً يمكن أن تقوم بدور مكامن بترولية.

وفي الخليج العربي أيامنا هذه تنمو الأتولات الجيرية فوق القباب الملحية (على سبيل المثال جزيرة داس)، وتتواجد شبيهاتها الحاملة للنفط والغاز في المناطق تحت السطحية. عندما تتحرك القبة الملحية باتجاه السطح، قد يتكون حوض حافي متمركز Concentric Rim-Syncline في الأماكن التي تواجد فيها الملح المجاور سابقاً. وفي بعض الحالات قد يُملأ الحوض الحافي بالرمل. وقد تؤدي حركة الملح اللاحقة وانضغاط السجيل في تكون انغلاق تركيبي من الرمل. ويُطلق على هذه الظاهرة في بعض الأحيان اسم الطية المحدبة الرسوبية (Sedimentary anticline)(أي أنه ليست حركية-تكتونية)، أو تسمى أيضاً



الشكل ٧-٢٤: مقطع عرضي زلزالي خلال تراكيب أقتحامية . (في الاعلى) مقطع خلال حقل كود في القاطع النرويجي من بحر الشمال . (عن Kessler et al., ١٩٨٠). أن هذا التركيب هو مثال على مصيدة القبة الملحية. ويأتي الانتاج من رمال الباليوسيني البحرية العميقة. (في الاسفل) مقطع عرضي يظهر اقتحامات طينية فائقة الضغط في تتابع دلتائي تراجعي . (عن Dailly, ١٩٧٦).

مؤخرة السلحفاة Turtle-back. ان هذه التراكيب بشكل أساسي هي مرتفعات فضالية Residual highs ناتجة من حركة الملح المجاور الى القبب. ويُعَد حقل براين Bryan field في المسيسبي مثالاً على مصائد مؤخرة السلحفاة (Oxley and Herliny, 1972).

يبدو واضحاً من العرض السابق أن المصائد المرتبطة مع القباب الملحية هي مصائد معقدة جداً حقاً. ليس هنالك أوضاع مصائد مختلفة حسب ولكن أية قبة ملحية منفردة قد تستضيف العديد من المصائد المنفردة ذات الأنواع المختلفة. وغم أن الاحتياطي الكلي المتعلق باقتحام واحد قد يكون هائلاً، الا أنها يمكن أن تخزن في العديد من التراكمات المنفصلة. وقد يكون لكل تراكم مواصفاته المميزة المتعلقة بالمائع والضغط. وقد تكون الأعمدة النفطية المنفردة مرتفعةً بسبب الطبقات ذات الميل الشديد، وربما تكون الضغوط المنفردة مرتفعة بسبب القوى الناتجة من حركة الملح نفسها. ويمكن تحديد موقع القبة الملحية بسهولة بالطرق الجذبية أو الزلزالية. ومع ذلك، فأنها ما أن يتم العثور عليها، فان المصائد المرتبطة بها قد تكون صغيرة كي تحدد بالقدرة التمييزية الحالية للمسوحات الزلزالية.

يتعامل العرض السابق الى حد كبير مع الاقتحامات المتكونة بتأثير الملح. ولكن التراكيب الناتجة من الطين الاقتحامي Diapiric Mud يمكن أن توجد أيضا، وهي يمكن أن تولد الهايدروكاربونات أيضاً (الشكل ٧-٢٤). أن موضوع الضغط الفائق وصخور السجيل فائقة الضغط قد نوقشت مسبقاً (ص ١٨٧). وبطبيعتها المميزة فان لصخور السجيل فائقة الضغط مسامية أعلى، وبالتالي كثافة أوطأ من الأطيان المتعرضة الى انضغاط اعتيادي.

ومثلما ناقشنا مسبقاً، فأن أطيان مقدمة الدلتا Pro-delta قد تتعرض الى الضغط الفائق بسبب الدفن السريع تحت الترسبات الدلتائية المتقدمة منشورية الشكل. وبذلك فان الترسبات قد تصبح غير مستقرة، وتميل الى الانزلاق باتجاه البحر فوق الأطيان

تحتها. أن هذا الانزلاق يرتبط مع الفوالق النامية.

وفي بعض الأحيان تقتحم اقتحامات من الطين فائق الضغط الغطاء الأحدث الأكثر كثافة، وشأنها شأن القباب الملحية، فأن هذه الفصوص Lumps الطينية قد تصل الى السطح. والاقتحامات الطينية معروفة من المسيسبي والنايجر ومكنزي والدلتاوات الحديثة الأخرى وهي أقل شيوعاً، غير أنها ليست غائبة من الدلتاوات السابقة للعصر الثلاثي. وتحتوي العديد من هذه الاقتحامات الطينية هايدروكاربونات مصطادة بطرق مشابهة الى تلك التي وصفت مسبقاً من القبب الملحية (على سبيل المثال بحر بوفورت في الجزء القطبي من كندا).

المصائد الطبقية STRATIGRAPHIC TRAPS

المجموعة الرئيسية الأخرى من المصائد التي يجب أخذها بنظر الاعتبار هي المصائد الطبقية التي تُعزى هندسيتها الى التغيرات الحاصلة في الصخارية. ان مثل هذه التغيرات يمكن أن تنتج من الترسيب الأصلي للصخرة، كما هو الحال بالنسبة للشعاب أو القناة النهرية. وبشكل بديل، فان التغيرات الصخارية قد تكون بعد ترسيبية، كما هو الحال مع مصائد القطع أو المصائد التحويرية.

طُرحت فكرة المصيدة الطبقية للمرة الأولى من قِبل (Carll, 1880) عندما أدرك أن اصطياد النفط في رمال فينانغو Venango Sands في بنسلفانيا لا يمكن أن يُفسر بنظرية الطيات المحدبة التي كانت سائدة في ذلك الوقت. ولقد ضمن (Clapp, 1917) في تصنيفه الثاني لحقول النفط مصائد الرمل عدسية الشكل Lenticular Sand ومصائد تناقص السُمك Pinchout. ولقد نحت مصطلح المصيدة للمرة الأولى من قِبل Levorsen في خطابه الرئاسي في اتحاد جيولوجيي البترول الأمريكان AAPG في ولاية تلسا عام ١٩٣٦. ولقد عرّف المصيدة الطبقية على أنها "تلك المصيدة التي يمثل

فيها عنصر الاصطياد الرئيسي بعض أنواع التغيرات في الطباقية أو الصخارية أو كليهما في الصخرة المكمنية مثل تغيير السحنات، والتغير الموضعي في قيم المسامية والنفوذية، أو اختفاء المكمن باتجاه أعلى التركيب، بغض النظر عن السبب (Levorsen, 1967). لمراجعة عن نشوء مصطلح المصيدة الطبقية وفكرتها، أنظر (Rittenhouse, 1972, Dott and Reynolds, 1969).

المصائد الطبقية غير معروفة جيداً كما يصعب العثور عليها مقارنة بالمصائد التركيبية، وتُعّد عمليات تكونها أكثر تعقيدا. ومع ذلك، وكما هو الحال مع المصائد التركيبية، يمكن القيام بتصنيف عام للأنواع المختلفة من المصائد الطبقية. ويظهر الجدول (٧-٣) خطة تعتمد على عمل (Rittenhouse, 1972). ومثل أغلب التصنيفات فأنه يعاني من بعض نقاط القصور، ذلك لأن العديد من الحقول تمثل خطوات انتقالية بين الأنواع المعرفة بشكل واضح. ومع ذلك، فأنه يوفر اطاراً مناسباً للعرض التالي عن المصائد الطبقية. ويمكن العثور على المصادر الأساسية عن المصائد الطبقية في كل من (Busch, 1974, Kin, 1972, Conybeare, 1976).

الجدول (٧-٣) تصنيف المصائد الطبقية

I. غير مرتبطة مع سطوح عدم التوافق	ترسيبية	تناقص في السُمك
		قنوات نهرية
		حواجز
		شعاب
	تحويرية	تحول في المسامية و / أو النفوذية
	فوق سطح عدم التوافق	التراكب
II. مرتبطة مع سطوح عدم التوافق		وادي مضربي
		قناة نهرية
	تحت سطح عدم التوافق	القطع

عن Rittenhouse, 1972، ينشر بموافقة سابقة.

المصائد الطبقية غير المرتبطة بسطوح عدم التوافق
Stratigraphic Traps Unrelated To Unconformities

يُظهر الجدول (٧-٣) التمييز الرئيسي الذي يمكن القيام به للتفريق بين المصائد الطبقية المرتبطة مع سطوح عدم التوافق وبين تلك التي تحدث ضمن تتابع متوافق اعتيادي. أن هذا التمييز في حد ذاته لهو أمراعتباطي، ذلك لأن بعض أنواع المصائد، مثل القنوات النهرية والشعاب توجد عند سطوح عدم التوافق وضمن التتابعات المتوافقة ذاتها. وسوف نتناول في هذه الفقرة تلك المصائد التي لا تتطلب بالضرورة وجود سطح عدم توافق. وفي هذه المجموعة يكون التمييز الرئيسي بين المصائد الناتجة من الترسيب والمصائد الناتجة من التحوير. وتضم المصائد الترسيبية (أي مصائد تغير السحنات حسب تصنيف Rittenhouse) القنوات النهرية والحواجز والشعاب، بينما تنتج المصائد التحويرية من تغيرات المسامية والنفوذية الناتجة من الاذابة والتسميت. ولسوف يتم تناول أنواع المصائد المختلفة وتوضيحها على النحو التالي:-

مصائد القنوات النهرية (المصائد القنوية) *Channel Traps*

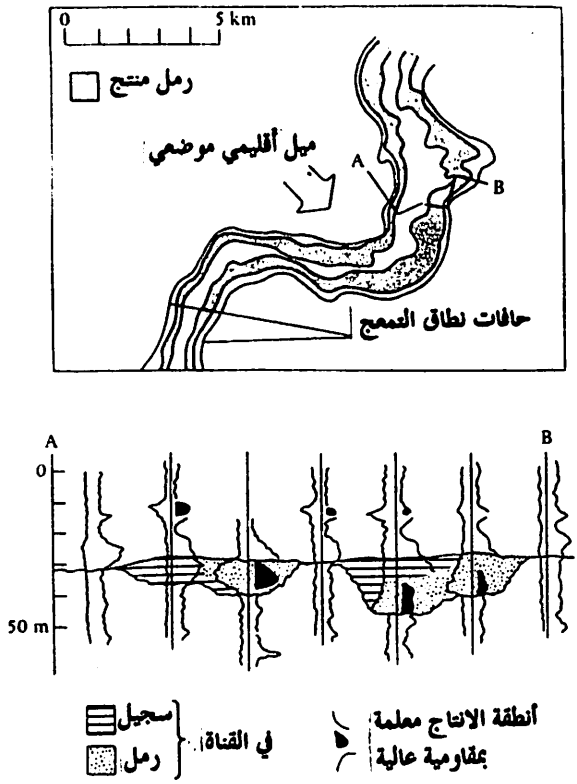
تصطاد العديد من حقول النفط والغاز ضمن أنواع مختلفة من القنوات النهرية. وقبل تفحص أمثلة من هذه الحقول، فأننا نحتاج بعض المعلومات المتعلقة بخلفية الموضوع. تُعرف القناة بأنها بيئة لنقل الرمل يمكن أن تشمل ترسيب الرمل او لا. وبذلك بينما تتكون الجزر الحاجزة من الرمل دائما، فان القنوات غالباً ما تغلق بالأطيان. أن هذا الوضع ليس سيئاً بالضرورة، ذلك لأن الترسبات المالئة للقناة قد تعمل عمل حاجز نفوذية Permeability barrier، وبذلك تصطاد الهايدروكاربونات في الطبقات المسامية المجاورة (على سبيل المثال ص ٤٠٢). وبالتالي، فأن العثور على قناة ليس ضمانة للعثور على مكمن. كما أن القنوات تحدث كقطع في سطوح عدم التوافق وضمن التتابعات المتوافقة (رغم أنه يمكن المجادلة أنه بموجب التعريف فأن القناة هي دليل كاف على وجود نوع من

انقطاع الترسيب).

يوجد العديد من الأمثلة الجيدة من مصائد القنوات الطبقية في أحواض العصر الطباشيري على امتداد الحافات الشرقية من جبال الروكي من ألبرتا مروراً بمونتانا ويومنغ وكولورادو ونيومكسيكو. وتوجد هذه المصائد كقطع في سطح عدم توافق رئيسي تحت ترسبات الطباشيري وضمن طبقات العصر الطباشيري ذاتها. ويمثل حقل ساوث غلينروك South Glenrock في يومنغ مثالاً نموذجياً يوضح العديد من الخواص المميزة لهذه الحقول (Curry and Curry, 1972).

يوجد حقل ساوث غلينروك في طية مقعرة Syncline، تقع جزئياً تحت كتلة دسريه Thrust block من القاعدة البريكامبرية. ويحتوي الحقل على نفط مصطاد في كل من مكامن حواجزية Barrier Bar وقنوات نهرية Fluvial channel. وسوف يتم تناول الأخيرة هنا فقط. للقناة عرض يبلغ نحو ١٥٠٠ متراً وعمق أقصى قدره ١٥ متراً. ولقد تم رسم خارطة له مسافة ١٥ كيلومتراً وأظهر شكلاً متمعجاً Meandering shape (الشكل ٧-٢٥). وتُملأ القناة جزئياً بالرمل وتُغلق بالطين جزئيا. ويظهر مجس الجهد التلقائي S.P. curve في بعض الآبار تتابعات حاجزية نقطية تتضاءل حجوم حبيباتها باتجاه الأعلى Upward-finding point bar sequences (أنظر ص ٩٩). وتقطع القناة في سجيل سكل كريك Skull Creek shale البحري ويغطيه سجيل موري Mowry shale. وفوق رمل القناة مباشرة هنالك مكامن رملية حاجزية بحرية رقيقة السُمك.

ليس هنالك شكوك حول الأصل القنوي للمكمن الأسفل، وبهندسيته المتمعجة، فأن هنالك القليل من الجدل بالنسبة لبيئته النهرية. يظهر هذا المثال نقطتين رئيسيتين، أولهما لاحظ المقياس: فبسُمك يبلغ ١٥ متراً وعرض يبلغ ١٥٠٠ متراً، فأن مثل هذه المكامن ليست مناسبة لاستقبال كميات هائلة من التراكمات النفطية، والأمر الثاني، بسبب الغلق الجزئي بالأطيان، فأن جزءاً من القناة فقط هو الذي يعمل عمل مكمن.



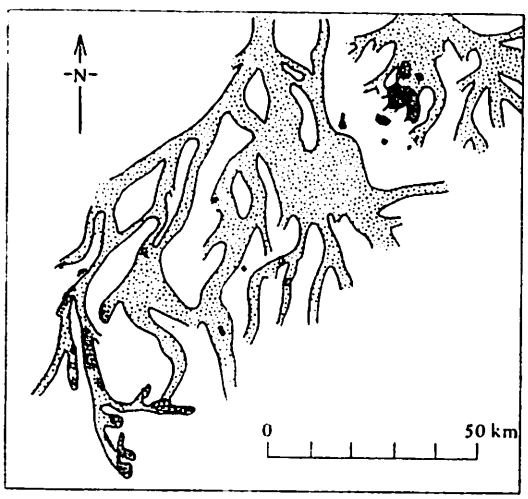
الشكل ٧-٢٥: خارطة ومقطع عرضي لحقل ساوث غلندروك الطباشيري النفطي في حوض باودر ريفر بيومنغ. لاحظ ابعاد المكمن الصغيرة وأن ليس كل القنوات تحتوي رملا. (عن Curry and Curry, ١٩٧٢).

يصطاد النفط أيضاً في القنوات غير النهرية. ولعل أحد أفضل الأمثلة على ذلك هو صورة (Bush, 1960, 1971) لحقول نفط في قنوات روافدية دلتائية Deltaic distributary channels في أوكلاهوما (الشكل ٧-٢٦).

مصائد الحواجز *Barrier bar traps*

تكون رمال الحواجز البحرية غالبامكامن بترولية ممتازة بسبب نسيجها النظيف جيد الفرز. وقد تشكل الرمال الحاجزية المتجمعة رمال الفريش Blanket sands التي يمكن للنفط ان يُصطاد داخلها تركيبيا. ومع ذلك، ففي بعض الاحيان، قد تغلق بعض الحواجز

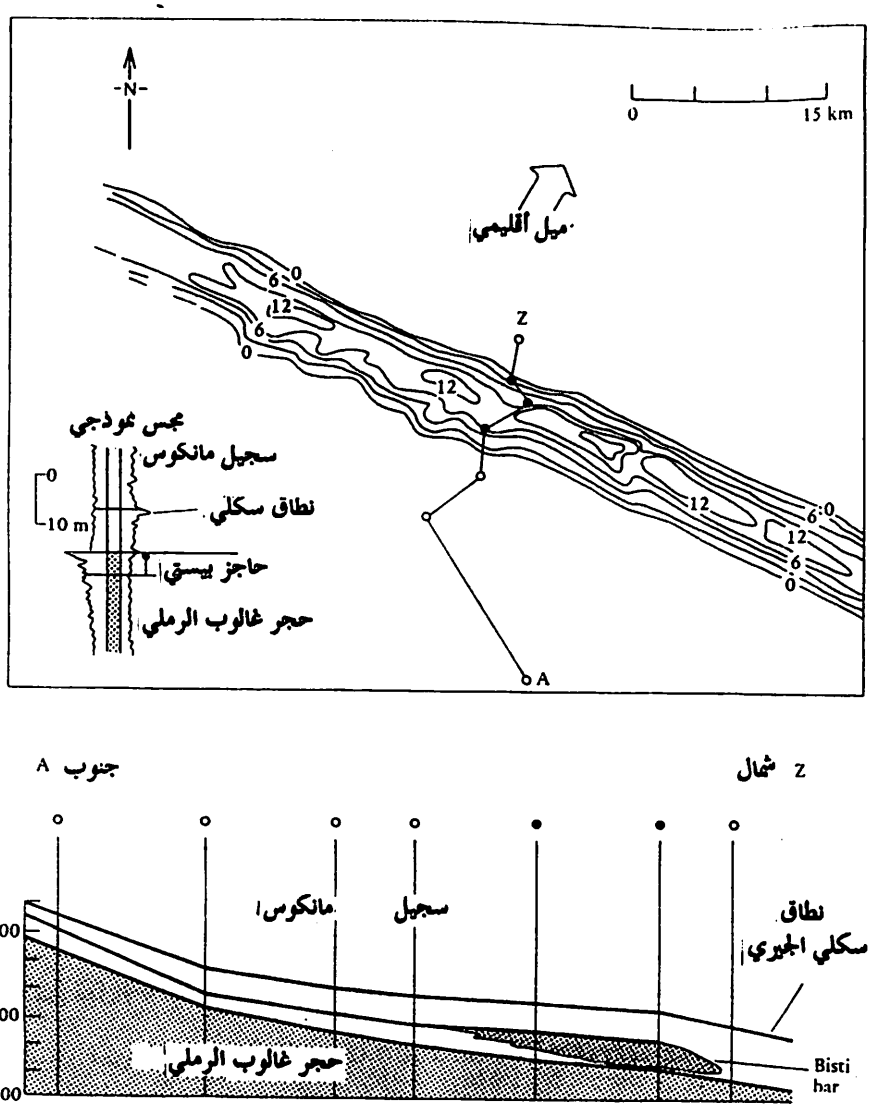
تماما في سجيل بحري او مستنقعي. وقد تكون هذه الحواجز مصائد طبقية شريطية Shoestring موازية الى خط الساحل القديم.



الشكل ٧-٢٦: خارطة لدلتا بوك ، مقاطعة سمينول، في ولاية أوكلاهوما. أن هذه الدراسة المشهورة تظهر الكيفية التي أصطيد فيها النفط طبقيا في محاور منظومة روافد دلتا رئيسية (الكاربوني الاعلى) . أن هذا النوع من الخرائط لايمكن أن يرسم دون خيال وعدد كاف من الابار . (عن Busch, ١٩٦٠).

هنالك العديد من الامثلة المعروفة على هذا النوع، ولقد وصف أحد الامثلة التقليدية عليها من قبل (Sabins, 1963, 1977). ويوجد هذا الحقل في صخور العصر الطباشيري لحوض سان خوان San Juan basin ، في نيومكسيكو. فهنالك ثلاثة حواجز رملية متراكمة يبلغ حجمها الكلي نحو ١٥ مترا فقط، توجد منغلقة تماما في سجيل مانكوس Mancos Shale البحري. ويبلغ طول الحقل نحو ٦٥ كيلومترا وعرضه ٧ كيلومترا. وفي بعض الابار تتحد وحدات الرمل الثلاث مع بعضها كليا ولا يمكن تمييزها عن بعضها. ويظهر مجس الجهد التلقائي انمطة رمال حاجزية مثالية تخشن حبيباتها باتجاه الاعلى في

بعض الابار (الشكل ٧-٢٧).



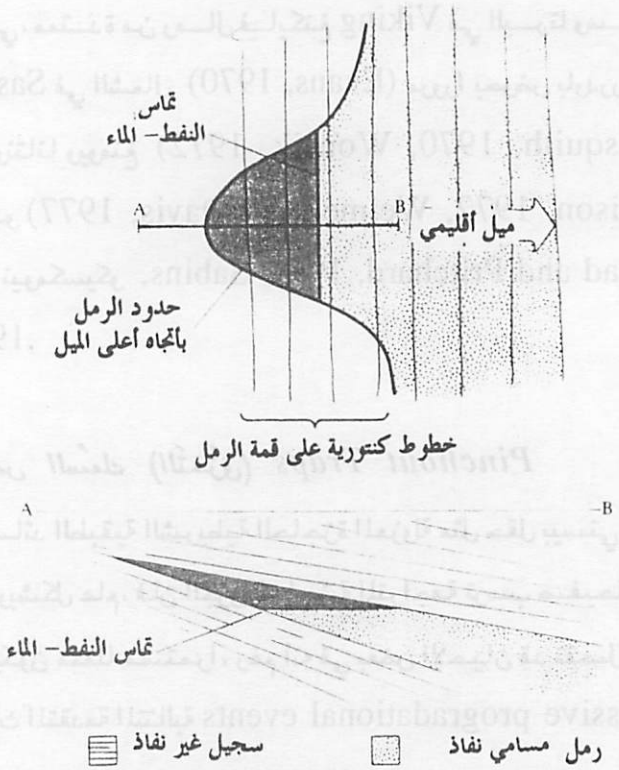
الشكل ٧-٢٧: خارطة تساوي السمك لمجس نموذجي ومقطع عرضي في حقل بيستي (الطباشيري) في حوض سان خوان ، نيومكسيكو. أن هذا الحقل هو مثال كلاسي (تقليدي) على مصائد الحواجز الطبقية. لاحظ نمط الخشونة باتجاه الاعلى الراجعة في حجم الحبيبات الظاهرة على مجس الجهد الذاتي. (عن Sabins, ١٩٧٢).

توجد مصائد رمال الحواجز في العديد من احواض العصر الطباشيري في منطقة جبال الروكي، ممتدة من رمال فايكنغ Viking في البرتا وساسكاتشوان Saskatchewan في الشمال (Evans, 1970) مرورا بحوض باودرريفر Powder River في مونتانا ويومنغ (Asquith, 1970, Woncik, 1972) الى حوض دنفر في كلورادو (Tobison, 1972, Weimer and Davis, 1977) وحوض سان خوان في نيومكسيكو (Hollenshead and Pritchard, 1961, Sabins, 1963, 1972).

مصائد تناقص السُمك (التَحزّق) *Pinchout Traps*

ان المصائد الطبقية الشريطية الحاجزة المعزولة مثل حقل بيستي Bisti field نادرة الوجود. وبشكل عام، فأن الجزر الحاجزية المتراجعة ترسب صفيحة من الرمال. أن هذا الرمل قد يكون مكمنا مستمرا، رغم أنه في بعض الاحيان قد تفصل حواجز نفوذية سجيلية الاحداث المتقدمة المتتالية successive progradational events وحيثما تتحول هذه الصفائح الرملية باتجاه اعلى الميل الى سجيل مستنقعي او بين مدي، فأنها قد تؤدي الى تكون مصائد تناقص السمك، او مصائد حافة الريشة Feather edge. لاحظ انه كي تكون هذه المصائد مناسبة، فأنها يجب ان تحتوي على انغلاق في كلا الاتجاهين على امتداد المضرب القديم Paleostrike. وقد يكون هذا الانغلاق طبقيا (كما هو ظاهر في المثال الموضح في الشكل ٧-٢٨)، فخط الساحل يحتوي على تخلج (Embayment) او تركيبياً، وفي كلتا الحالتين يجب ان يصنف الحقل بشكل اكثر مناسب على انه مصيدة مترابطة وليس مصيدة طبقية (ص٢٨١).

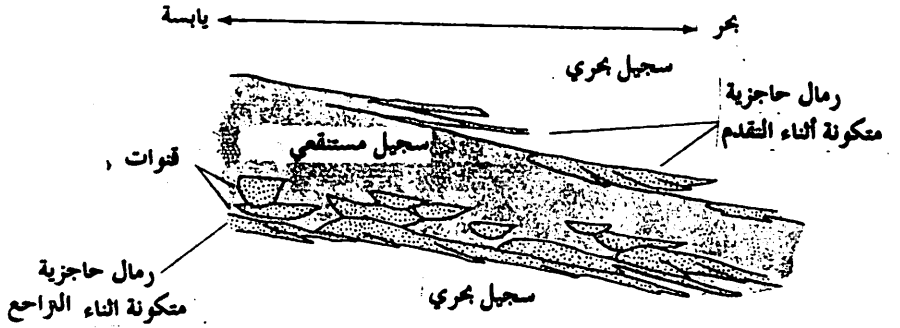
غالبا ما توجد رمال الحواجز والرمال الصفيحية والشريطية كجزء مكمل من دورات تقدمية- تراجعية رئيسية. وتكون الرمال افضل تطورا وأسمك في الحالة التراجعية، وتميل



الشكل ٧–٢٨: مقطع عرضي وخارطة تظهر مصيدة تسفين طبقية. لاحظ أن هذا المثال هو مصيدة طبقية صرفة بسبب تخلج الساحل. ومن المعتاد ان تكون بعض الانغلاقات التركيبية على قمة الرمل مصيدة مترابطة.

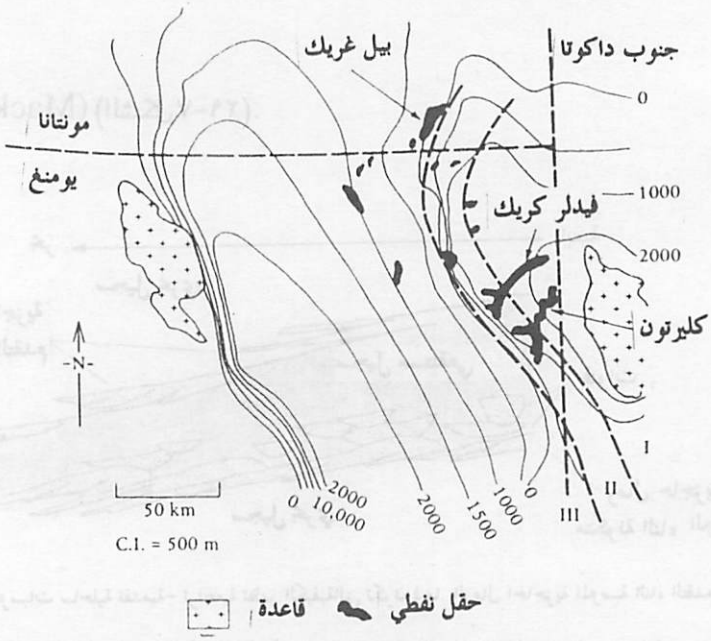
الى ان توجد كأشرطة منفصلة خلال فترات التراجع. ويظهر تفحص أحواض العصر الطباشيري في جبال الروكي ان الرمال تميل الى ان تكون أفضل المصائد. في حين ان الرمال التراجعية تميل الى فقدان الصخور الغطائية باتجاه اعلى الميل عندما تتحول من رمال قنوية باتجاه الساحل. اما الرمال التقدمية، فانها على النقيض من ذلك، تتحول باتجاه اعلى الميل، الى صخور سجيل غطائية مستنقعية او مترسبة في منبسطات الميل

(Mackenzie, 1972) (الشكل ٧-٢٩).

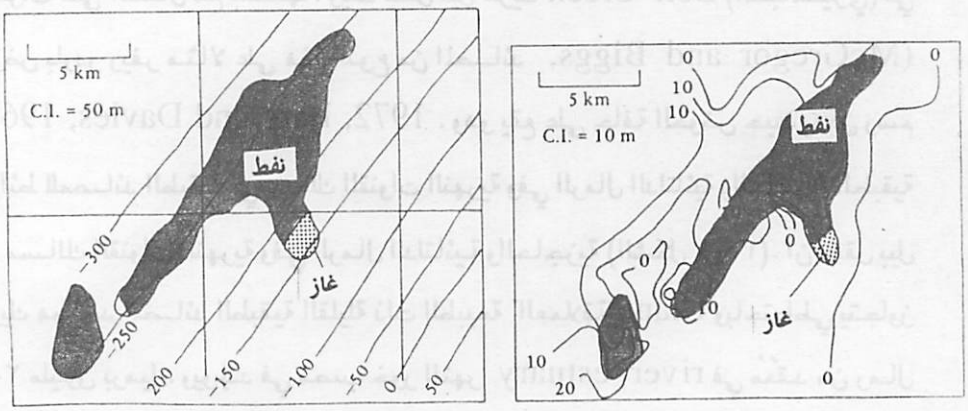


الشكل ٧-٢٩: مقطع عرضي لترسبات ساحلية تقدمية- تراجعية تظهر الكيفيةالتي تكون فيها الرمال الحاجزية المترسبة اثناء التقدم البحري مصائد طبقية بسبب ختم السجيل المستقعي باتجاه أعلى الميل. أن الرمال الحاجزية المترسبة اثناء التراجع البحري تفتقد الاختام باتجاه أعلى الميل لكونها على أتصال مع رمال القنوات. (عن Mackenzie, ١٩٧٢)

يمكن ان توجد مصائد تناقص سمك اكثر تعقيدا حيثما تكون رمال الحواجز ورمال القنوات على اتصال مع بعضها. ويعد حقل بيل غريك Bell Creek (الطباشيري) في حوض باودر ريفر مثالا على هذا النوع من المصائد (McGregor and Biggs, 1972, Berg and Davies, 1968) . وهو يقع على حافة الحوض حيث يمكن رسم خرائط للمصائد الطبقية في مسالك القنوات النهرية وفي الرمال الدلتائية والحاجزية الطبقية في مسالك القنوات النهرية وفي الرمال الدلتائية والحاجزية (الشكل ٧-٣٠). ان حقل بيل غريك هو أحد المصائد الطبقية القليلة ذات الطبيعة "العملاقة" Giant وباحتياطي يتجاوز ٢٠٠ مليون برميل. ويوجد في مصب خور النهر river estuary في مُعقد من رمال الحواجز والقنوات الذي يتداخل مع رمال واطيان هورية marsh ومستنقعية Lagoon (الشكل ٧-٣١). ولقد أدى تعقد هندسية المكمن هذا الى تواجد العديد من حدود تماس الغاز-النفط -الماء.



الشكل ٧-٣٠: خارطة لحوض باودر ريفر مع خطوط كنتورية على قمة تكوين فول ريفر الرملي (الطباشيري) تظهر المسالك المنتجة للمصائد الطبقية: (١) قنوات نهرية (١١) روافد دلتائية و (١١١) رمال حاجزية بحرية . (عن Woncik, ١٩٧٢ and McGregor and Biggs, ١٩٧٠).



الشكل ٧-٣١: خارطة لمصيدة بيل كريك الطبقية العملاقة (للمواقع أنظر الشكل ٧-٣٠) . (أ) خارطة كنتورية تركيبية على قمة رمل مدي (المكمن الرئيسي) تظهر فقدان السيطرة التركيبية على حدود الحقل . (عن McGregor and Biggs, ١٩٧٠). (ب) خارطة تساوي السمك الكلي للرمل. أن مكمن بيل كريك الذي هو في الاساس مصيدة طبقية أسفينية باتجاه أعلى الميل يتكون من معقد من الرمال القنوية البحرية وجه الشاطئية والنهرية الدلتائية مع مستويات موانع متعددة.

الشعاب *Reefs*

تتميز الشعاب او البنائيات الجيرية Carbonate buildup (اذا ما استعملنا مصطلحا غير نوعي)، منذ فترة طويلة على أنها احدى اهم انواع المصائد الطبقية. ولقد درست الشعاب الحديثة بكثافة من قبل علماء الاحياء والجيولوجيين (على سبيل المثال Jones and Endean, 1973, Maxwell, 1968)، كما يمكن العثور على وصف للشعاب القديمة في معظم الكتب المنهجية بعلم الرسوبيات (أنظر كذلك Laporte, 197).

تنشأ الشعاب في هيئة اشكال antiforms قبابية Domal (برجية Pinnacle) واشكال طولية (حاجزية Barrier). وهي تفرز هيكلا صخريا صلدا ذا مسامية اولية مرتفعة، وغالبا ما يتقدم عليها سجيل بحري، قد يؤدي دور صخور مصدرية مولدة للهايدروكاربونات. لذلك فان ما يثير العجب ان قلة من الشعاب المرجانية المشخصة قد تركت دون ان تحفر. ولكي توضح الصفات المميزة لهذا النوع من المصائد الطبقية، سوف يتم تفحص أمثلة من حقول الشعاب على النحو التالي.

توجد العديد من الحقول الشعابية في حوض سرت في ليبيا، رغم ان هذه لم تنشر جميعها. ومن بين هذه المجاميع حقول الانتصار (ادريس سابقا) التي وصفت من قبل (Terry and Williams, 1969) وكذلك من قبل (Brady et al., 1980). ولقد شخصت خمس شعاب برجية في منطقة امتياز تبلغ مساحتها نحو ١٨٨٠ كيلومترا مربعا. ولا يتجاوز قطر كل شعاب منفردة الخمسة كيلومترات، ولكنها قد تصل الى ٤٠٠ مترا في السمك، أي ان الشعاب قد بنت باتجاه الاعلى سمكا يتراوح بين صفر الى ٤٠٠ مترا في مسافة مقدارها نحو ٢٥٠٠ مترا. من بين الشعاب الخمس التي تم تشخيصها وفحصها، عثر على النفط في اثنتين منها فقط (الشكل ٧-٣٢). ويظهر الشكل (٧-٣٣) الشعاب (أ) في مقطع عرضي، مظهرا الكيفية التي بدأت فيها الشعاب بتكوين شعاب صفيحية (بايوستروم) من الحجر الجيري الواكي الطحلبي-الحامل للمنخربات (الفورامنفيرا) على

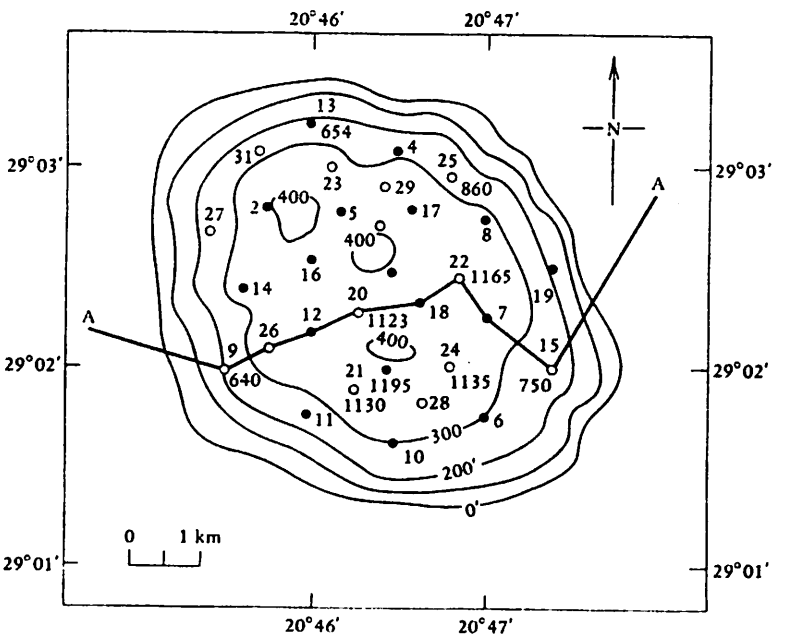
منصة Platform من الحجر الجيري الكتيم غير المرجاني. تبدأ الشعاب (مكونة بشكل رئيسي من المرجان والطحالب المغلفة) بالنمو عند احدى النقاط على البايوستروم. وفي البداية تنمو نحو الاعلى ومن ثم تتقدم Prograde على حجر جيري احيائي مرجاني Coralline Biomicrite تكون كحطام امام شعابي Forereef talus من كسارتها الخاصة بها. والان قارن بين النصفين الاعلى والاسفل في الشكل (٧-٣٣). هنالك القليل من المضاهاة الواضحة بين السحنات والبتروفيزياء. ومثلما أوضحنا في الفصل السادس، فأن التحوير الشديد صفة مميزة للمكامن الجيرية. ولذلك فأن من الشائع العثور على مسامية ثانوية لا يرتبط توزيعها بالمسامية الاولية التي ترسبت بها الترسبات.

وبذلك تظهر شعاب الانتصار المشكلتين الرئيسيتين المتعلقتين بالمصائد الطبقية الشعابية وهما: (١) ان ليس كل الشعاب تحتوي على الهايدروكاربونات (٢) ان تلك التي تحتوي على الهايدروكاربونات لها صفات مكمنية لا ترتبط مع السحنات الترسيبية. ومع ذلك، توجد العديد من المقاطعات الهايدروكاربونية الشعابية في ارجاء مختلفة من انحاء العالم، وبشكل خاص في منطقة الخليج العربي وغرب كندا والمكسيك.

المصائد التحويرية Diagenetic Traps

يؤدي التحوير دورا ملموسا في السيطرة على نوعية المكمن داخل المصيدة. ومثلما شرحنا في الفصل السادس، فأن الاذابة يمكن ان تحسن نوعية المكمن بتوليد المسامية الثانوية، في حين ان التسميت يمكن ان يؤدي الى تدميرها. وفي بعض الحالات، فأن التحوير يمكن في الواقع ان يخلق مصيدة تحويرية(Rittenhouse 1972) . ان النفط او الغاز الذي يتحرك نحو الاعلى في طبقة حاملة نفاذة قد يصل الى نطاق مسمت يمنع المزيد من الهجرة (الشكل ٧-٣٤أ). وبشكل معكوس، فأن النفط قد يصطاد في أنطقة حيث تكون المسامية الذوبانية قد نشأت موضعيا في صخور مسمتة (الشكل ٧-٣٤ب). ويمكن

للدلتة الثانوية ان تولد مصائد تحويرية غير منتظمة حيث يحتل الدولومايت فراغا اقل من الحجم الاصلي للحجر الجيري (أنظر ص٣١٦).



الشكل ٧-٣٢: خارطة تساوي السمك لشعاب الانتصار (أ) في حوض سرت بليبيا. (عن Terry and Williams, ١٩٦٩).

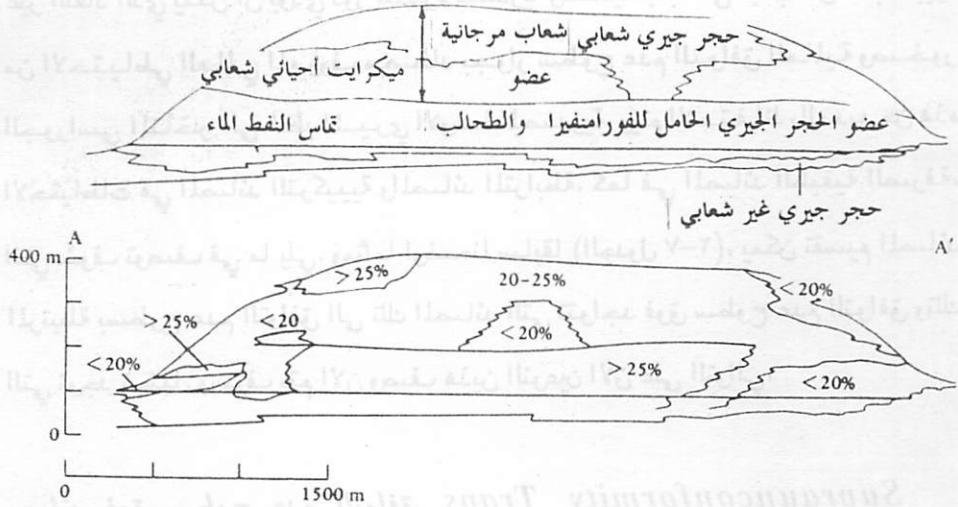
لا تتكون المصائد التحويرية بتأثير اذابة السمنت المعدني او ترسيبه حسب. فعندما يهاجر النفط الى السطح، فانه قد يتحلل ويتأكسد بتأثير البكتيريا اذا ما وصل الى نطاق الماء الجوي الضحل Meteoric water. وهنالك حالات معروفة تؤدي فيها هذه الفضالة القارّية Tarry residue دور غطاء مانع للمزيد من هجرة النفط باتجاه اعلى الميل (الشكل ٧-٣٤ج). ويُعدُّ حقل شوغيونغ Shuguang oil field في حوض لايوهي Liaohe basin كمثال على المصيدة التحويرية الناتجة من تحلل النفط الضحل (Ma li et al., 1987).

ان المصائد التي يعزى اصلها الى التحوير بشكل صرف تكون نادرة الوجود، رغم ان هنالك ربما عددا من المصائد التحويرية حول العالم التي ما يزال اصلها مجهولا، كما ان هنالك العديد من المصائد التي يتوجب العثور عليها (Wilson, 1977). ومع ذلك، فان هنالك العديد من المصائد التي تعزى الى التأثير المترابط للتحوير وواحد او اكثر من الاسباب الاخرى. ان هذا النوع من الاصل صحيح بشكل خاص قدر تعلق الامر بالمصائد تحت سطح عدم التوافق التي سوف يتم شرحها في الفقرة التالية.

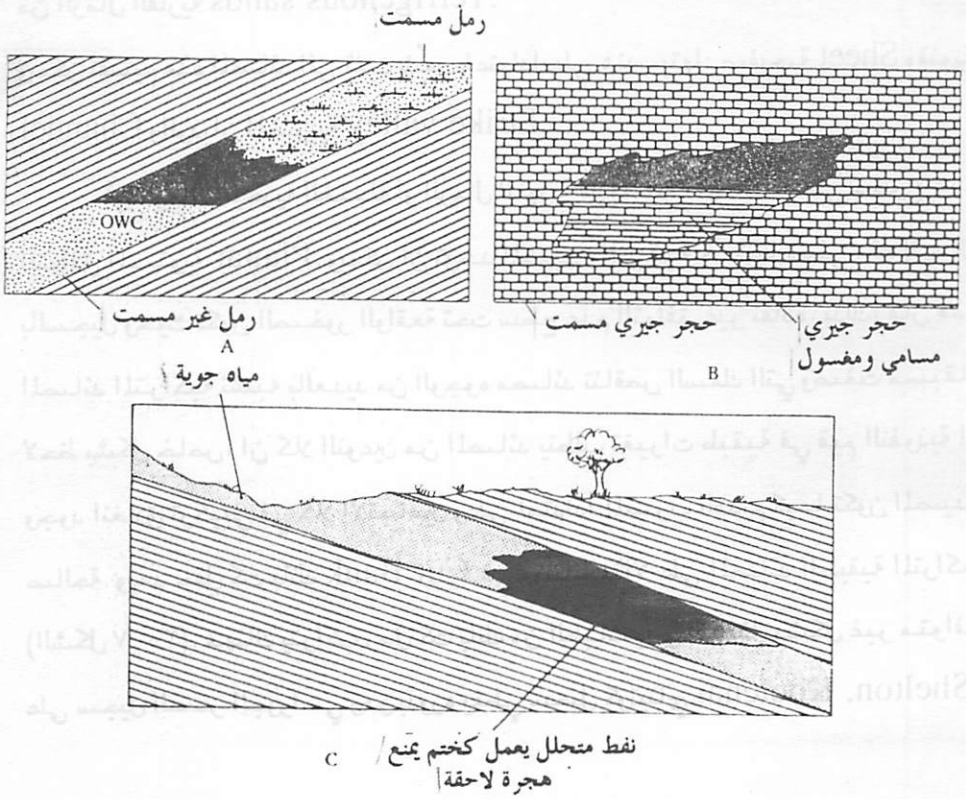
المصائد الطبقية المرتبطة بسطوح عدم التوافق
Stratigraphic Traps Related to Unconformities

ان مصائد القنوات النهرية والحواجز والشعاب والمصائد التحويرية التي وصفناها للتو يمكن ان تحدث في كل من التتابعات المتوافقة وسطوح عدم التوافق. ان الانواع الثلاثة الاولى غالبا ما تتواضع فوق سطوح عدم التوافق، في حين ان المصائد المتأثرة بالتحوير تقع تحتها.

ولقد اشير الى دور سطوح عدم التوافق في اصطياد الهايدروكاربونات من قبل الجيولوجيين بدءا من (Levorsen, 1934, 1964 الى Chenoweth, 1972 و Bushnell, 1981). ان سطوح عدم التوافق تسهل توضع المكامن المسامية والسجيل



الشكل ٧-٣٣ : مقطع عرضي في شعاب الانتصار (أ) تظهر السحنات (في الاعلى) وتوزيع المسامية (في الاسفل). لاحظ فقدان المضاهاة بين المقطعين العرضيين وهي مشكلة شائعة في المكامن الجيرية (عن Terry and Williams, 1969).



الشكل ٧-٣٤: ترتيبات لمصيدة تحويرية ناتجة من (أ) التسميت (ب) الاذابة و (ج) تحلل النفط الضحل.

غير النفاذ الذي يمكن ان يؤدي دور صخرة مصدرية وغطائية جنبا الى جنب. أن نسبة كبيرة من الاحتياطي العالمي المعروف مصطاد بجوار سطوح عدم التوافق العالمية وصخور الجوراسي المتأخر الى الطباشيري الاوسط المصدرية. ويتم الاحتفاظ بالعديد من هذه الاحتياطات في المصائد التركيبية والمصائد المترابطة، كما في المصائد الطبقية الصرفة، التي سوف توصف في ما يلي. ومثلما اوضحنا سابقا (الجدول ٧-٢)، يمكن تقسيم المصائد المرتبطة بسطوح عدم التوافق الى تلك المصائد التي تتواجد فوق سطوح عدم التوافق وتلك التي توجد تحتها. وسوف يتم الان وصف هذين النوعين الان على التوالي.

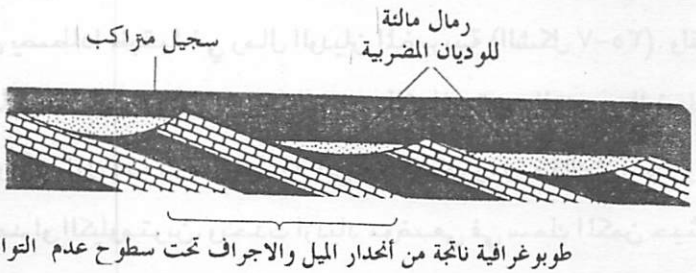
مصائد فوق سطوح عدم التوافق *Supraunconformity Traps*

تضم المصائد الطبقية التي تقع فوق سطوح عدم التوافق الشعاب والانواع المختلفة من الرمال القارية Terrigenous sands.

ويمكن تقسيم هذه المصائد الى ثلاث شُعب اعتمادا على هندسيتها: صفيحية Sheet وقنوية Channel والوديان المضربية Strike valley.

أن الرمال البحرية الضحلة او الرمال النهرية قد تتراكب Onlap على سطوح عدم التوافق المستوية Planar. ويمكن ان توجد المصيدة الطبقية حيثما تغطى هذه الرمال بالسجيل وحيث تكون الصخور الواقعة تحت سطح عدم التوافق غير نفاذة. بذلك، فأن هذه المصائد المتراكبة تشبه بالعديد من الوجوه مصائد تناقص السمك التي وصفت مسبقا. لاحظ بشكل خاص، ان كلا النوعين من المصائد يتطلب تغيرات طبقية في قيم النفوذية او وجود انغلاق تركيبي في كلا الاتجاهين وعلى امتدادا المضرب القديم كيما تكون المصيدة صالحة. ويعد حقل كت بانك Cut Bank في مونتانا مثالا على المصائد الطبقية المتراكبة (الشكل ٧-٣٥). فهناك يتراكب رمل كت بانك من الطباشيري الاسفل بشكل غير متوافق على سجيل العصر الجوراسي وهو بدوره يغطي سجيل كوتيناي (Shelton, Kootenai

(1967). ويحتوي الحقل على احتياطي قابل للاستخلاص يتجاوز ٢٠٠ مليون برميل من البترول و ٣٠٠ مليار قدم مكعب من الغاز. وفي هذه الحالة فأن المكمن هو رمل نهري، ولكن في المصائد المتراكبة الاخرى تكون المكامن ذات اصل بحري.



الشكل ٧-٣٥: مقطع عرضي يظهر تواجد رمال الوديان المضربية. أن من الامثلة على النفط المصطاد في هذه الرمال معروف من العصر البنسلفاني في أوكلاهوما والطباشيري في نيومكسيكو.

حيثما يكون سطح عدم التوافق غير منتظم، فأن الرمل غالبا ما يملأ الوديان التي تقطع في سطح الارض القديم. ان موقع هذه الوديان واتجاهها يمكن ان يرتبط بمقاومة تجوية الطبقات المختلفة التي كانت متكشفة في يوم من الايام على سطح الارض القديم. ان هذه العملية تتسبب في نشوء المصائد الجيومورفولوجية القديمة Paleogeomorphic traps (Martin, 1966). ان المجموعتين الرئيسيتين من المصائد الجيومورفولوجية القديمة هما القنوات والوديان المضربية. ان الانهار التي تجري على سطح الارض قد تقطع الوديان وصولا الى الصخور التحتية، ومن ثم تُملأ هذه الوديان بالطمى Alluvium (كلا من الرمل المسامي والسجيل غير النفاذ). ولقد وصف حقل غلن روك في يومنغ مسبقا كمثال على مصائد القنوات النهرية الطبقية. وهنالك القليل من الفروقات بين الوديان التي تقطع في سطوح عدم التوافق وتلك الموجودة في التتابعات المتوافقة. في حين ان حقلي فيدلر كريك Fiddler Creek وكليرتون Clareton (الشكل ٧-٣٠) يعدان امثلة على المصائد القنوية الجيومورفولوجية القديمة. ان هنالك العديد من مثل هذه المصائد تتراوح من القنوات النهرية الى المصائد البحرية العميقة مثل تلك التي تعود الى المايوسيني في كاليفورنيا

.(Matin, 1963)

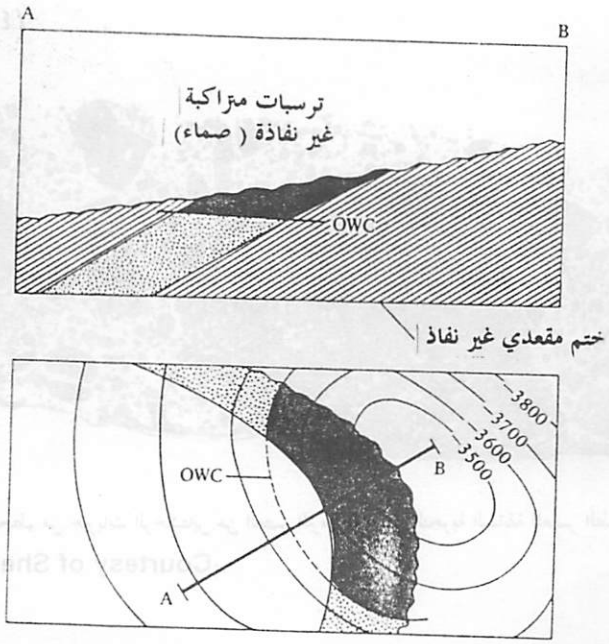
حيثما تتجوى الطبقات المتبادلة من الصخور الهشة والصلبة وتتعرى، تكون الطبقات الهشة وديااناً مضربيةً بين البروزات المقاومة المتكونة من الصخور الصلبة. وقد تغطى الرمال النهرية، والبحرية في بعض الاحيان، داخل الوديان المضربية بسجيل تقدمي بحري. ويمكن للنفط والغاز ان يصطادا طبقيا في رمال الوديان المضربية (الشكل ٧-٣٥). ولقد وصف هذا النوع من المصائد للمرة الأولى من سطح عدم التوافق تحت العصر البنسلفاني في اوكلاهوما. ويتراوح طول هذه الرمال بين ٦٠ الى ٧٠ كيلومتر، ومع ذلك لا يتجاوز عرضها الكيلومتر الواحد او الكيلومترين. ويحدث ازدياد موضعي في سمك المكمن حيثما تقطع الوديان الاولية اللاحقة Consequent الوديان المضربية (Andresen, 1974, 1962, Busch, 1959, 1961, 1974). وتم تشخيص أمثلة اخرى في رمال نيوبارا Niobrara القاعدية (الطباشيري الاعلى) في حوض سان خوان في نيومكسيكو (McCubbin, 1969). ان هذه الرمال اقل طولا واكثر عرضا من رمال اوكلاهوما. ومع ذلك، ففي كلتا الحالتين، تكون الاجسام الرملية عموما أقل من ٣٠ مترا في السمك.

مصائد تحت سطوح عدم التوافق Subunconformity Traps

توجد المصائد الطبقية ايضا تحت سطوح عدم التوافق حيث تكون الطبقات النفاذة والمسامية قد قطعت وتمت تغطيتها بطين غير نفاذ. وفي العديد من الحالات يتم توفير ختم مقعدي Seat Seal بالطبقات غير النفاذة تحت المكمن. وكما هو الحال مع مصائد تناقص السمك والتراكمات، تتوفر حاجة الى شيء من الانغلاق في كلا الاتجاهين على امتداد المضرب القديم. ان هذا الانغلاق قد يكون تركيبيا او طبقيا، ولكنه بالنسبة للعديد من مصائد القطع يتم توفيره بالطوبوغرافية غير المنتظمة لسطح عدم التوافق (الشكل ٧-٣٦).

ان اغلب مصائد القطع، ان لم تكن جميعا، تتحسن نوعية المكامن فيها بالتحوير

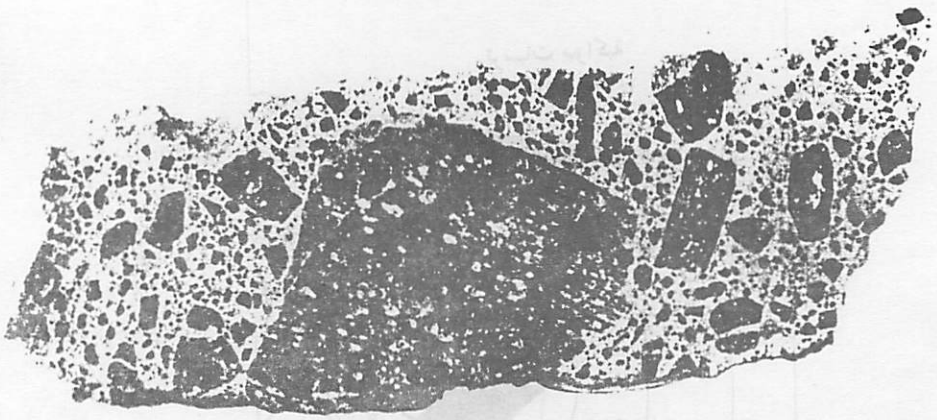
السطحي Epidiagenesis (انظر ص ٢٤٦). ان هذه المسامية الثانوية الناتجة من التجوية معروفة بشكل خاص في الصخور الجيرية، غير انها توجد ايضا في الرمال وصخور القاعدة.



الشكل ٧-٣٦: مقطع عرضي (الاعلى) وخارطة (الاسفل) توضح هندسة مصيدة القطع. أن الخطوط الكنتورية المرسومة على سطح عدم التوافق للخارطة تحدد التل المدفون.

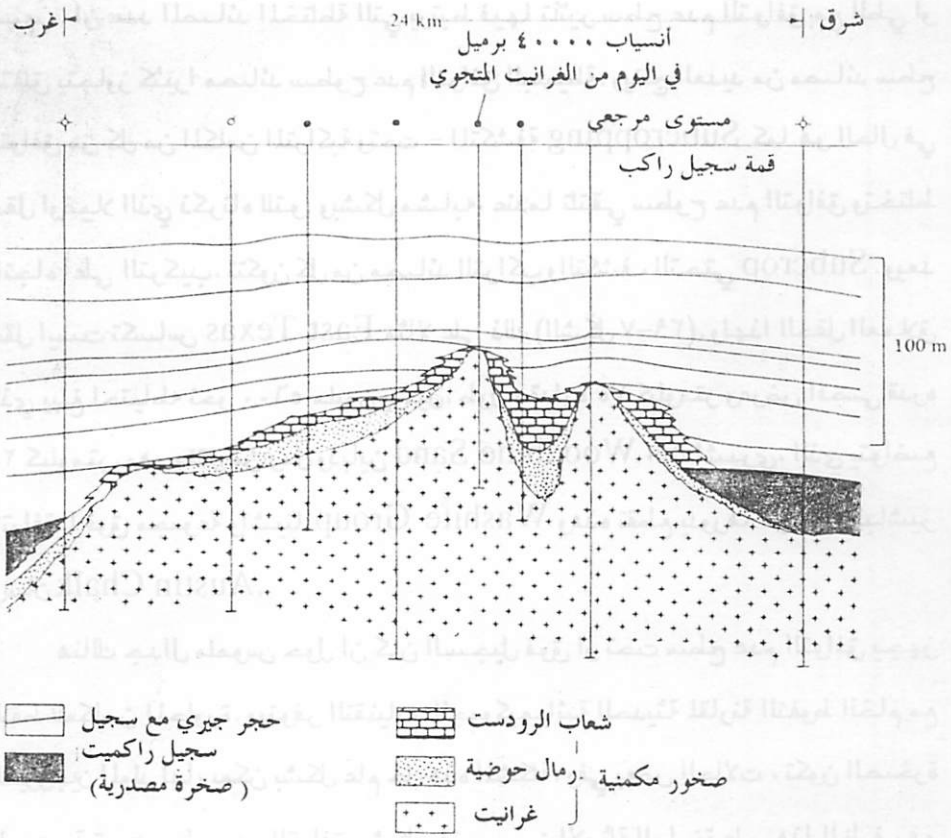
تتراوح تجوية الصخور الجيرية من تكوين المسامية القالبية والهزيمية الطفيفة الى تولد انطقة الكارست وبريشة الانهيار Collapse breccia ذات الاحتمالات المكمنية الهائلة. والامثلة على تجوية الكارست معروفة من التجوية السابقة للعصر البنسلفاني لصخور الكامبرو-الاوردفيشي في كنساس (Walters and Price, 1948) ومن حقل كاستلان Castellan Field في سواحل اسبانيا ويظهر الشكل (٧-٣٧) بريشة انهيار الزيخشتاين Zechstein Collapse breccia بسبب التجوية السابقة للعصر

الطباشيري في حقل اوكAuk Field في بحر الشمال (Brennand and Van Veen, 1965). ان المسامية الذوبانية تحت سطوح عدم التوافق مهمة في العديد من المكامن الرملية مثل مجموعة سرير في ليبيا ورمل برنت Brent Sand في بحر الشمال (أنظر ص ٤٧٣).



الشكل ٧-٣٧:بريشة التحطم من جيريات الزخشتاين من العصر البرمي ناتجة من التجوية السابقة للعصر الطباشيري في حقل أوك ، بحر الشمال (Courtesy of Shell, U.K.).

مثلما شرحنا مسبقا (ص ٢٠٨)، ينتج عدد من الحقول من صخور القاعدة. وفي كل حالة تقريبا، يغطى المكمن لا توافقيا بصخور السجيل التي عملت كصخرة مصدرية وغطائية. ويأتي الانتاج من التكسرات والمسامات الذوبانية حيث تتجوى المعادن غير المستقرة (عموما المعادن المافية Mafics والفلسبار في بعض الاحيان) وتغسل خارجا. ومن الامثلة الواضحة على هذا النوع من المصائد هو حقل اوغيلا في ليبيا، حيث انتجت بئر واحدة ٤٠٠٠٠ برميل/يوم من الغرانيت (Williams, 1968, 1972). ان هذه المصيدة الطبقية المميزة تنتج ايضا من الرمال والجيريات التي تتراكب على التل الغرانيتي المدفون (الشكل٧-٣٨).



الشكل ٧-٣٨: مقطع عرضي خلال حقل أوغبلا في ليبيا. أن هذا الحقل يمثل مصيدة معقدة تنتج جزئيا من الرمال والجيريات الشعابية وجزئيا من الغرانيت المتكسر والمتجوي. (عن Williams, 1968).

المصائد المرتبطة بسطوح عدم التوافق: الاستنتاجات

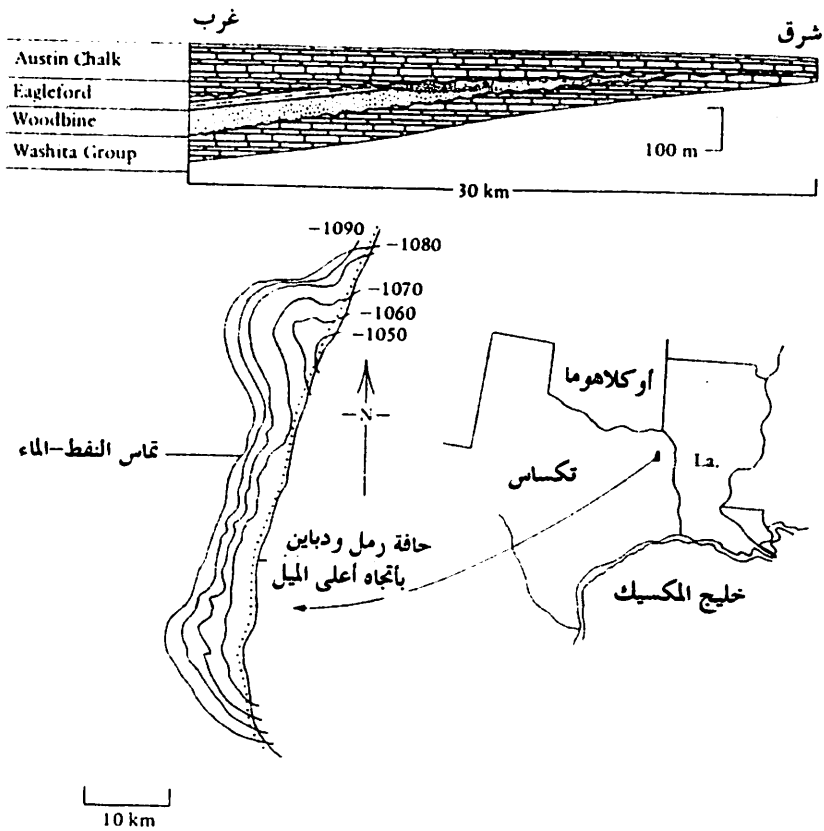
Unconformity-Related Traps: Conclusion

وصفت الفقرات السابقة الطرق المختلفة التي يمكن لسطوح عدم التوافق ان تصطاد فيها الهايدروكاربونات. ويجب ان نؤكد ان هنالك قلة من المصائد التي تكون بسيطة واحادية

السبب. ان عدد المصائد المختلطة التي يرتبط فيها تأثير سطح عدم التوافق مع الطي او التفلق يتجاوز كثيرا مصائد سطوح عدم التوافق البسيطة. وينتج العديد من مصائد سطح التوافق من كل من المكامن المتراكبة وتحت - المتكشفة Subcropping كما هو الحال في حقل اوغيلا الذي ذكرناه للتو. وبشكل مشابه، عندما تلتقي سطوح عدم التوافق وتختلط باتجاه أعلى التركيب، تتكون كل من مصائد التراكب والتكشف التحتي Subcrop. ويعد حقل ايست تكساس East Texas مثالا على ذلك (الشكل ٧-٣٩). ولهذا الحقل العملاق الذي يبلغ احتياطه نحو ٥٦٠٠ مليون برميل، طول مقداره ٧٥ كيلومتر وعرض اقصى قدره ٢٥ كيلومتر. وهو ينتج من رمل ودباين Woodbine Sand الطباشيري، الذي يتواضع لاتوافقيا فوق مجموعة واشيتا Washite Group وهذه تقطع بدورها من قبل طباشير اوستن Austin Chalk.

هنالك جدال ملموس حول ان كان السجيل فوق او تحت سطح عدم التوافق يجهز النفط للمكامن المجاورة. ويتوفر التقنيات الجيوكيميائية الحديثة لمقارنة النفوط الخام مع الكيروجين المولد لها، يمكن بشكل عام حل هذه المشكلة. وفي بعض الحالات ، تكون الصخرة المصدرية تحت سطح عدم التوافق بشكل واضح. ومن الامثلة البارزة على هذا الظرف هو حقل حاسي مسعود، الذي تحتوي فيه رمال الكامبرو-اوردفيشي نفطاً مشتقاً من سجيل تانزوفت Tannezuft Shale (السيلوري) على مرتفع قديم كبير وختم بتبخريات العصر الترياسي. والمثال الاخر هو حقل برنت والحقول المرتبطة به في بحر الشمال. فهناك يختم سطح عدم توافق الكيمرياني من الطباشيري المبكر العديد من المصائد التي تتراوح في العمر بين الجوراسي والديفوني. وجميعها تغذى بالبترول من طين كيمرج Kimmeridge Clay من الجوراسي الاعلى (أنظر كذلك ص ٤٧٣).

وبشكل معكوس، في العديد من الحقول يقوم السجيل فوق سطح عدم التوافق مقام صخرة مصدرية وغطائية في آن واحد. ان هذا الوضع يحدث، على سبيل المثال، في برودو



الشكل ٧-٣٩: خارطة ومقطع عرضي خلال حقل (إيست تكساس) ، وهو مثيدة طبقية عملاقة تحت وفوق سطح عدم التوافق . الخطوط الكنتورية بالامتار. (عن Minor and Hanna, 1941).

بي Prudhoe Bay في الالاسكا (Jones and Speers, 1976, Morgridge and Smith, 1972) وحقل سرير في ليبيا (Sandford, 1970). ان فكرة ان يقوم السجيل غيرالنفاذ مقام صخرة مصدرية وغطائية في الوقت نفسه قد تبدو غير مفهومة في البداية. وفي الحقيقة، يمكن ذكر تفسيرين لهذه الظاهرة. فالنفط المصطاد في الذروة التركيبية Structrural Culmination لا يتطلب بالضرورة ان يكون قد تحرك نحو

الاسفل بالمعنى الفيزيائي، ولكنه ربما يكون قد تحرك باتجاه أعلى حافة التركيب من المنخفضات المجاورة، وبفعله ذلك يتحرك باتجاه الاسفل فقط بالمعنى الطبقي. وكذلك فأن بمقدور اي مهندس جيد ان يبرهن رياضيا ان المائع يمكن ان يتحرك باتجاه الاسفل اذا كان هنالك ما يكفي من الفرق في الضغط Pressure Differential.

العلاقة بين المصائد الطبقية والسحنات الرسوبية

Relationship Between Stratigraphic Traps and Sedimentary Facies

غالبا ما ترتبط المصائد الطبقية بالبيئات الرسوبية بالطريقة نفسها التي ترتبط بها المصائد التركيبية بالنمط التكتوني (الحركي). ان التجمع النوعي للمصائد الطبقية والسحنات قد يكون أكثر نفعا كعامل مساعد في توقع الاحتمالات من التصنيف الشكلي المستعمل في الفقرة الوصفية السابقة. ان هذه المعالجة تحتاج الى برهان. ومثلما ناقشنا في الفصل السادس، فأن توزيع المسامية نادرا ما يرتبط بالسحنات في المكامن الجيرية. وبذلك، فجانبا من السيطرة البيئية الواضحة للشعاب، فأن من النادر ان ترتبط المصائد الطبقية الجيرية بالسحنات. ان العمليات التحويرية وموقع سطوح عدم التوافق هو بشكل عام أكثر اهمية من العوامل البيئية المسيطرة المبكرة.

فاذا ما تحولنا الى الحجر الرملي، فلقد ذكر في الفصل السادس ان نوعية المكمن ترتبط عموما بالسحنات وان تأثير العمليات التحويرية هو بشكل عام أقل أهمية. وأن مصائد تناقص السمك، سواء كانت ناتجة من التراكيب او القطع، يمكن ان توجد في الرمل الفريشي المترسب في اية بيئة. وان كل ما تحتاجه هو الالتواء التركيبي Structural tilt الضروري والختم الكافي. ان للعديد من نوعيات المصائد الطبقية الرملية توزيعات ترتبط الى حد كبير بالسحنات، كما هو موضح في كل بيئة تقريبا من البيئة النهرية والى البيئة البحرية العميقة، كما لاحظنا ذلك مسبقا. وأن رمال الوديان المضربية هي ذات أصل قاري بشكل عام. وأن المصائد المرتبطة بالفوالق النامية مثل الطيات المحدبة المنزلقة ومصائد الاقتحامات

الطينية ليست ذات أصل طبقي، غير ان تواجدها يرتبط بشكل حميمي مع البيئة. فهي محصورة بالحافات Wedges التراجعية المترسبة بسرعة في الرمال الدلتائية والاطيان فائقة الضغط.

وتوجد المصائد الاقتحامية بشكل شائع في الجانب القريب من الحوض من الفوالق النامية. وفي الاوضاع البحرية العميقة يمكن ان توجد المصائد الطبقية في القنوات تحت البحرية والمراوح تحت البحرية. وتضم الاخيرة تناقص السمك باتجاه اعلى الميل فضلا عن التراكيب المغلقة حيث يتم حفظ الجغرافية القديمة للمراوح.

تظهر هذه المراجعة المختصرة ان العديد من المصائد الطبقية يرتبط بالبيئة الترسيبية. ان من الواضح ان هذه المضاهاة تساعد في تحديد نوع المصيدة المتوقعة في سحنة رسوبية معينة.

الجدول (٧-٤)

العلاقة بين المصائد الطبقية والبيئات الرسوبية للمكامن الرملية

البيئة		نوع المصيدة
القارية	الهوائية	تناقص السمك (التحزّق)
	النهرية	القنوات
		الوديان المضربية
الساحلية	الحواجز	الشريطية
	الدلتا	القنوات تكسر السبلى وحواجز المصب المرتبطة بالفوالق النامية بالاقتحامات
البحرية العميقة		تناقص سمك المراوح تحت البحرية او الانغلاقات الطوبوغرافية القديمة. الاقنية تحت البحرية.

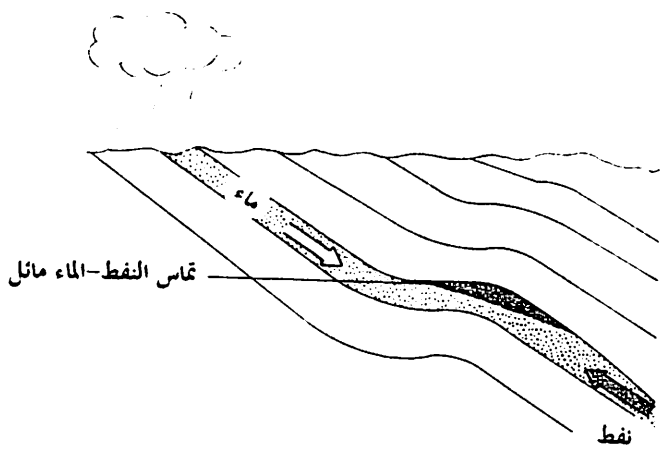
المصائد الحركية المائية (الهايدرودينمكية) HYDRODYNAMIC TRAPS

النوع الثالث من المصائد الذي ينبغي تناوله، فضلا عن المصائد التركيبية والطبقية هو المصائد الحركية المائية. وفي هذا النوع من المصائد تكون حركة المياه الهايدرودينميكية ضرورية لمنع حركة النفط او الغاز باتجاه الاعلى. ولقد صيغت الفكرة للمرة الاولى من قبل (Hubbert, 1953) وتم تحسينها من قبل (Levorsen, 1966) والفكرة الاساسية هو ان النفط او الغاز سوف يتحرك عموما باتجاه الاعلى على امتداد الطبقات الحاملة النفاذة الى سطح الأرض الا عندما يصادف حاجز نفوذية سواء كان ذلك تركيبيا أو طبقيا وبذلك تصطاد تحته.

حيثما يتحرك الماء هايدرودينمكيا أسفل الطبقات النفاذة، فانه قد يصادف نفطاً متحركاً نحو الأعلى. وعندما تكون القوة الهايدرودينمكية للماء أعظم من القوة الناتجة من طفو Buoyancy قطيرات النفط، فأن النفط سوف يُمنع من الحركة باتجاه الأعلى ويُصطاد ضمن الطبقة دون حاجز نفوذية. ولقد أوضح Levorsen هذه الفكرة باستعمال تشبيه قطع الفلين في أنبوبة زجاجية ينساب الماء أسفلها. اذ سوف تميل قطع الفلين الى التراكم حيث تكون الأنبوبة ضيقة، مسببّة زيادة موضعية في ممال المائع الكامن Fluid Potential Gradient. وفي العالم الحقيقي، قد تحدث هذه الزيادة حيثما يكون هنالك انعكاس موضعي في الميل أو تغير في السحنات، أو حتى تذبذبات موضعية في ممال الجهد المتري Potentiometric Gradient (الشكل ٧-٤٠). ولقد قدّم (Hubbert, 1953) النظرية على أساس فكرة المصيدة الحركية المائية (الهايدرودينمكية).

لقد نوقش الانسياب الهايدرودينميكي في التسبب في ميل حدود تماس النفط-الماء مبكرا في هذا الفصل (ص ٢٧٨). ورغم أن هذه الظاهرة توجد في العديد من الحقول، الا أن المصائد الهايدردينميكية الصرفة نادرة الوجود جدا. ومن أحد هذه الأمثلة هو حقل ويت Wheat Field في حوض ديلوير، غرب تكساس، الذي وصف من قبل (Adams,

(1936). ويوجد هذا الحقل في انثناء Flexure ذو ميل واطئ في طبقات أحادية الميل، تحتوي على انغلاق ولكن لاتحتوي على ارتفاع عمودي (الشكل ٧-٤١). ان حد تماس النفط الماء المائل بوضوح يشير الى دور الانسياب الهايدرودينميكي. فلو لم



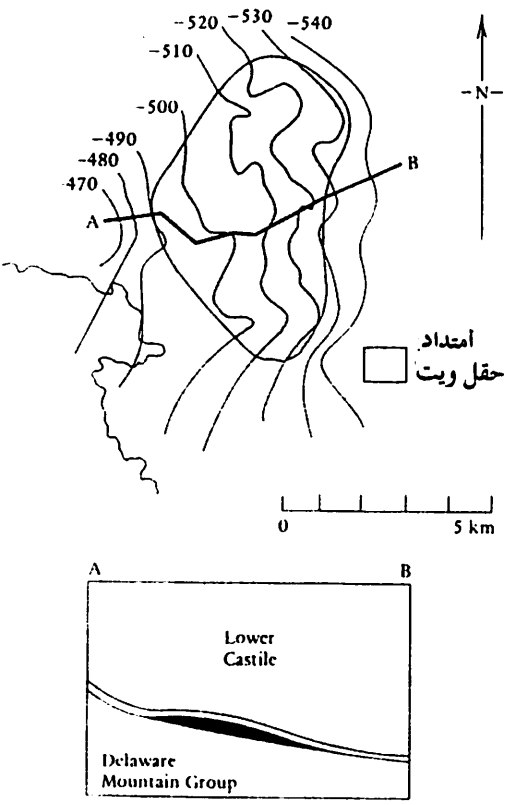
الشكل ٧-٤٠: مقطع عرضي قشري يظهر المصائد الحركية المائية الصرفة. ليس هنالك أرتفاع تركيبي عمودي. والنفط المهاجر عموديا يصطاد في متجانس ميل بانسياب الماء باتجاه الاسفل.

يكن هنالك انسياب، وكان الضغط سكونياً-مائياً، لم يكن بمقدور النفط أن يُصطاد لأن المصيدة تفتقد الانغلاق التركيبي ذي الطرق الأربعة Four-Way Structural Closure. ان المصائد الشبيهة بحقل ويت نادرة الوجود، ولا تعد هدفاً أولياً للتنقيب، رغم أن دور الانسياب الهايدرودينميكي في ازاحة الحقول باتجاه أسفل منحدرات التراكيب يجب أن يتم تذكره دوماً.

المصائد المختلطة COMBINATION TRAPS

هنالك العديد من حقول النفط والغاز في مختلف أنحاء العالم التي لا تعزي بشكل منفرد لتأثير التركيب أو الطبقية أو الانسياب الهايدرودينميكي، بل الى ترابط من اثنتين أو

أكثر من هذه القوى. ان مثل هذه الحقول يمكن أن تسمى على نحو مناسب باسم المصائد المختلطة. وينتج أغلب أنواع هذه المصائد من ترابط العمليات التركيبية والطبقية. والمصائد التركيبية–الهايدروداينميكية والمصائد الطبقية–الهايدروداينميكية نادرة الوجود. وبسبب تعدد الأنواع المختلفة من المصائد المترابطة، فان مناقشتها ضمن مجاميع أو وفق أي ترتيب منطقي يعد أمرا غير عملي. وأن مثالاً أو اثنين ربما يكون كافيين.

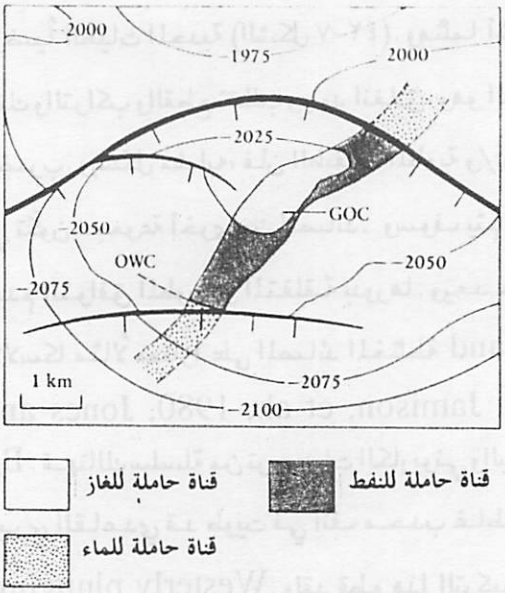


الشكل ٧-٤١: خارطة (الاعلى) ومقطع عرضي (الاسفل) خلال حقل ويت فيلد في حوض ديلوير بمقاطعة تكساس. أن هذا الحقل يعد مثالا على المصائد الحركية المائية. أن الخطوط الكنتورية التركيبية على الخارطة مرسومة على قمة مكمن ويت فيلد. عن Adams, 1936)

على مقياس صغير. فأن النفط يمكن أن يُصطاد في الرمال الشريطية (القنوات أو

الحواجز) التي تقطع عرضياً الطيات المحدبة (الشكل ٧-٤٢). ومثلما أشرنا من قبل، فأن كل مصائد تناقص السمك والتراكب والقطع تتطلب وجود انغلاق، وهو الذي غالباً ما يكون تركيبيا، على امتداد المضرب. وبشكل مشابه، فأن الطبقات المطوية و/أو المتفلقة قد تختم بسطوح عدم التوافق كي تكّون مجموعة أخرى من المصائد. وسوف يتم الآن مناقشة أمثلة على مصائد سطوح عدم التوافق المطوية أو المتفلقة بدورها. ويعد حقل برودو بي في المنحدر الشمالي من الالاسكا مثالاً ممتازاً على المصائد المختلطة (Morgridge and Smith, 1972, Jamison, et al., 1980, Jones and Spears, 1976, Bushnell, 1981). فهنالك سلسلة من ترسبات الكاربوني والبرمي والترياسي والجوراسي والطباشيري القاعدي قد طويت في أنف محدب غاطس باتجاه الغرب Westerly plunging anticlinal nose. ولقد قطع هذا التركيب على نحو تقدمي باتجاه الشمال الشرقي وغُطي بصخور سجيلية من العصر الطباشيري، تؤدي دور صخور مصدرية وغطائية للمصيدة. ويصطاد النفط والغاز في الطبقات الأقدم التي تقع تحت سطوح عدم التوافق. والمكمن الرئيسي هو تكوين سادلروكت الرملي النهري Fluvial Sadlerochit Sandstone (الترياسي). ويتم توفير انغلاق اضافي من قبل الفوالق الرئيسية على الجانبين الشمالي والجنوبي الغربي من التركيب (الشكل ٧-٤٣).

تُميز مصائد سطوح عدم التوافق المتفلقة مقاطعة برنت من العصر الجوراسي في شمال بحر الشمال. والمكمن هو مجموعة برنت الرملية الدلتائية من الجوراسي الأوسط، التي تغطيها صخور السجيل من الجوراسي الأعلى. وتشمل هذه تكوين كمرج الطيني الذي هو الصخرة المصدرية. ولقد خلقت الحركة الكيميرية التي حدثت في الجوراسي المتأخر-الطباشيري المبكر العديد من الكتل المتفلقة التي ثنيت وقطعت وغطيت بشكل غير متوافق بصخور السجيل من العصر الطباشيري. وبذلك فأن المصائد الناتجة والتي تضم حقولاً مثل برنت وستاتفيورد وموركسون وهتن وتيسل وبايبر (الشكل ٧-١٦) هي بذلك جميعا مصائد سطوح عدم توافق متفلقة ذات درجات متغايرة من قطع المكمن.



الشكل ٧-٤٢: مصيدة ناتجة من ترابط القناة- الطيات المتزحلقة، حقل المين باس بلوك ٣٥ ، سواحل لوزيانا. الخطوط الكنتورية مرسومة على قمة الرمل (G). (الفاصلة الكنتورية =٢٥م). (عن Hartman, 1972).

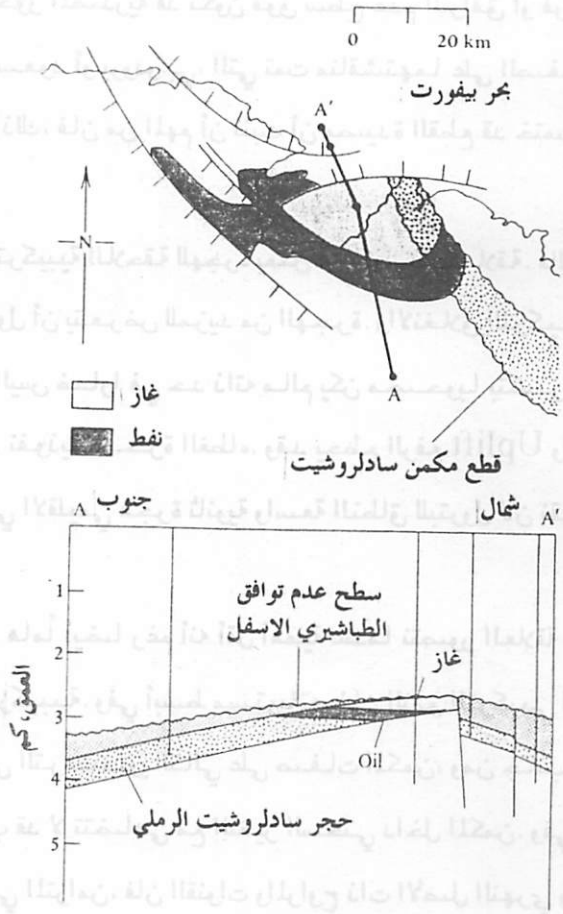
ان قائمة المصائد المختلطة لا نهاية لها. والأمثلة السابقة توضح بعضا من تغيرها وتعقيدها.

المصائد: استنتاجات TRAPS : CONCLUSION

توقيت نشوء المصيدة نسبة الى هجرة البترول وترسيب المكمن.

Timing of Traps Development Relative to Petroleum Migration and Reservoir Deposition.

من الواضح أن وقت نشوء المصيدة نسبة الى هجرة البترول يعد أمرا في غاية الأهمية. فاذا كانت المصائد تسبق الهجرة، فانها سوف تكون منتجة. أما اذا كانت قد



الشكل ٧-٤٣: خارطة (الاعلى) ومقطع عرضي (الاسفل) لحقل برودهوي في الالاسكا. (عن Jamison et al., 1980).

تكونت بعد الهجرة فأنها سوف تكون خالية. وأن الأسئلة المتعلقة بمنطقة الاحتمالات يجب أن تشمل ما يلي: ما هي الأنطقة المعروفة أو التي يفترض أنها الصخور المصدرية؟ هل يمكن استعمال منحنيات الزمن-عمق الدفن لتحديد زمن هجرة البترول؟ اذا كانت منطقة الاحتمالات تركيبية، فهل تكونت الطية المحدبة أو الفالق قبل الهجرة أو بعدها؟ وفي حالة

مصائد القطع فأن الصخور المصدرية قد تكون فوق سطح عدم التوافق أو فوقه (كما هو الحال في حقل حاسي مسعود أو بروبو بي، التي تمت مناقشتهما على الصفحات ٣٠٩ و ٤٠٧ على التوالي). ورغم ذلك، فان من المهم أن نثبت أن مصيدة القطع قد ختمت تماما قبل أن تبدأ هجرة البترول.

كما أن الحركة التركيبية اللاحقة للهجرة يمكن أن تكون ذات علاقة. فالفوالق يمكن أن تفتح كي تسمح للبترول أن يتعرض للمزيد من الهجرة. والانغلاق التركيبي يمكن أن يضيق. أن هذا التضيق ليس ضارا في حد ذاته مالم يكن مصحوبا بتكسرات في ذروة الطية التي يمكن أن تزيد نفوذية صخرة الغطاء. وقد يحطم الرفع Uplift والتعرية قمم المصائد، وربما يحفز الثني الاقليمي هجرة ثانوية واسعة النطاق للبترول لأن نقاط انسكاب المصائد قد تتغير.

ويُعّد الزمن عاملا هاماً أيضا رغم أنه أقل أهمية عندما نتصور العلاقة بين ترسيب المكمن وتكون المصائد التركيبية. وفي أبسط مستوياته، فان النمو التركيبي المتزامن مع الترسيب سوف يؤثر على الترسيب وبالتالي على صفات المكمن، ومن جانب آخر، فان التراكيب اللاحقة للترسيب قد لا تتضاهى مع التغير السحني داخل المكمن. وفي الأحواض الفتاتية ذات النمو التركيبي المتزامن، فان القنوات والمراوح ذات الأصل النهري والدلتائي أو تحت البحري سوف تنشأ في المنخفضات. وعلى نحو متزامن. فان رمال المخاضات البحرية المغربلة Winnowed marine shoal sands قد تكون موجودة على المرتفعات التركيبية، رغم أنها حيثما تكون مرتفعة جداً، فان القطع قد يحدث. وفي الأحواض الجيرية، ربما يتوقع نشوء مخاضات السرئيات والشعاب على المرتفعات التركيبية، ولكن لأسباب شرحناها مسبقاً، فان المسامية نادراً ما ترتبط بالسحنات في الترسبات الجيرية.

وقد يكون الوضع مختلفاً تماماً في المناطق التي تنشأ فيها المصائد التركيبية بعد الترسيب. فما أن تتصلب الترسبات، فأنها تستجيب للاجهاد بالتكسر. وبذلك، في كل من

المكامن الرملية والجيرية، فان المسامية والنفوذية الناتجة من التكسرات قد ترتبط على نحو حميم بالتركيب. ان شدة التكسرات، وبالتالي، أداء المكمن، قد يتحسن على ذرى الطيات المحدبة وقمم الاقتحامات وكذلك تلك المجاورة للفوالق.

ان هذه المراجعة لوقت تكون المصيدة نسبة الى ترسيب المكمن وهجرة البترول يؤكد أهميتها. وبشكل عام فان العلاقة بين الحركة التركيبية وهجرة البترول هي أكثر أهمية من مسألة أن تكون التراكيب متزامنة أو لاحقة للترسيب.

التكرار النسبي لأنواع المصائد المختلفة

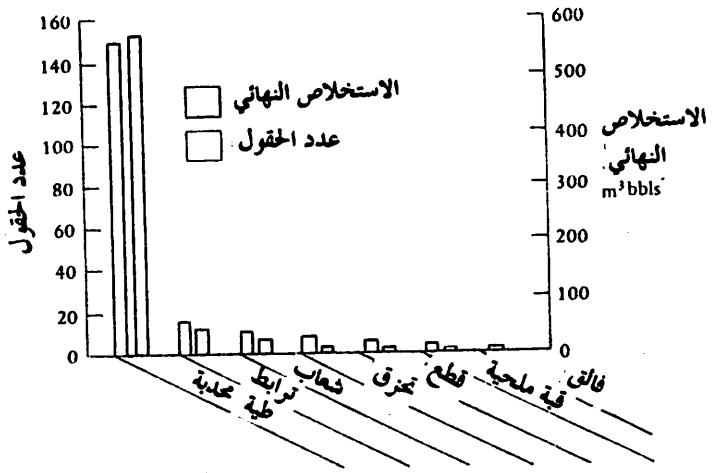
Relative Frequency of the Different Types of Trap

غطى هذا الفصل قدراً كبيراً من المعطيات. وبذلك فان من المناسب أن نختتمه بمحاولة لترتيب أنواع المصائد المختلفة وفق تسلسل معين حسب الأهمية. ولقد مثل التحليل الكوني لآليات الاصطياد للحقول العملاقة من قِبل (Moody, 1975) مساعدة كبيرة في هذا التصنيف. اذ أظهرت دراسته أن أغلب الحقول النفطية العملاقة، الى حد كبير، هي طيات محدبة، متبوعة بعدها بفترة طويلة وحسب تناقص الأهمية، بالمصائد المختلطة والشعاب وتناقص السمك والقطع والقباب الملحية والفوالق (الشكل ٧-٤٤).

تستحق هذه المعطيات المثيرة تحليلاً متأنياً. وهي تتعلق بالحقول العملاقة حسب، والتي تُعرف بأنها ذات الاحتياطي الذي يتجاوز ٥٠٠ مليون برميل من الاحتياطي القابل للاستخراج. لقد أظهر هذا الفصل أن النفط المصطاد طبقياً يميل الى التواجد في حقول صغيرة بسبب الامتداد المحدود للمكامن القنوية والحواجز والشعاب. وكذلك، فان هذه المعطيات تتعلق بحقول النفط وليس حقول الغاز. رغم أن من البديهي أن تكون متشابهة.

لاحظ أن هذه الأرقام قد جمعت منذ فترة طويلة نسبياً. وبالتحسن المستمر للتقنيات الزلزالية، فان النسبة المئوية للمصائد الطبقية الخفية Subtle ربما تكون قد ازدادت بالنسبة للطيات المحدبة. والأكثر أهمية من ذلك، فان هذه الأرقام توثق اصطياد حقول النفط

العملاقة. أن النسب المئوية المختلفة لأنواع المصائد العملاقة المختلفة التي توجد حقيقة تحت الأرض قد تكون مختلفة تماماً.



الشكل٧-٤٤ : مرتسم تكراري يظهر نمط اصطياد الحقول النفطيه العملاقه في أرجاء العالم. (عن Moody, 1975).

لذلك فان هذه الأرقام تعكس قدرة الانسان على العثور على النفط، وليس العدد الكلي للحقول في العالم. أن العثور على النفط في الطيات المحدبة يُعَد أمراً سهلاً. اذ أن بالامكان رسم خرائط لها عند السطح أو تكتشف زلزالياً تحت السطح. أن فكرة مصيدة الطيات المحدبة سهلة الفهم بالنسبة للمدراء والمهندسين والمزارعين الذين يتخذون القرارات بالحفر أم لا اعتماداً على توصية الجيولوجي.

من جانب آخر فان من الصعب تحديد المصائد الطبقية. فقلة منها فقط يمكن أن تلتقط من المقاطع الزلزالية الملونة بألوان براقة، وأغلبها يتطلب تكامل المعطيات الزلزالية والجسية مع معطات الصخور الحقيقية مع الأفكار الجيولوجية المتطورة، وبذلك فان الاستكشافيين يجدون صعوبة في تطوير منطقة احتمالات ذات مصيدة طبقية، والأصعب من ذلك تفسيرها للمستمع العادي الذي يمتلك المحفظة ولقد صدق Pratt 1942 عندما قال "أن النفط يوجد في عقول الرجال".

SELECTED BIBLIOGRAPHY

مراجع مختارة

For major compilations of oil field case histories, see:

HALBOUTY, M. T. (ed.). 1970. *Geology of Giant Petroleum Fields.* Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 575 pp.

HALBOUTY, M. T. (ed.). 1980. *Giant Oil and Gas Fields of the Decade: 1968–1978.* Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 30, 596 pp.

KING, R. E. (ed.). 1972. *Stratigraphic Oil and Gas Fields.* Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 685 pp.

For an elegant review of the relationship between trap types, sedimentary basins, and plate tectonics, see:

HARDING, T. P. and LOWELL, J. D. 1979. Structural styles, their plate tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 1016–1058.

REFERENCES

المصادر

ADAMS, J. E. 1936. Oil pool of open reservoir type. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 20,* 780–796.

ANDRESEN, M. J. 1962. Paleodrainage patterns: their mapping from subsurface data, and their paleogeographic value. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 46,* 398–405.

ASQUITH, D. O. 1970. Depositional topography and major marine environments, late Cretaceous, Wyoming. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 54,* 1184–1224.

BAILEY, R. J. and STONELEY, R. 1981. Petroleum: entrapment and conclusion. In: *Economic Geology and Geotectonics*. D. H. Tarling (ed.). Oxford: Blackwell, 73–97.

BALDUCCHI, A. and POMMIER, G. 1970. Cambrian oil field of Hassi Massaoud, Algeria. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 477–488.

BARBAT, F. W. 1958. The Los Angeles basin area, California. In: *The Habitat of Oil*. L. G. Weeks (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 62–77.

BERG, R. R. and DAVIES, D. K. 1968. Origin of Lower Cretaceous Muddy sandstone at Bell Creek field, Montana. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 52*, 1888–1898.

BERNER, H.; RAMSBERG, H.; and STEPHANSSON, O. 1972. Diapirism in theory and experiment. *Tectonophysics, 15*, 197–218.

BISHOP, R. S. 1978. Mechanism for emplacement of piercement diapirs. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62*, 1561–1584.

BLAIR, D. G. 1975. Structural styles in North Sea oil and gas fields. In: *Petroleum and the Continental Shelf of Northwest Europe*, vol. 1. A. W. Woodland (ed.). London: Applied Science Publishers, 327–338.

BRADY, T. J.; CAMPBELL, N. D. H.; and MAHER, C. E. 1980. Intisar 'D' Oil Field, Libya. In: *Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1968–78*. M. T. Halbouty (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 30, 543–564.

BRENNAND, T. P. and VAN VEEN, F. R. 1975. The Auk oil field. In: *Petroleum and the Continental Shelf of Northwest Europe*. A. W. Woodland (ed.). London: Applied Science Publishers, 275–284.

BUSCH, D. A. 1959. Prospecting for stratigraphic traps. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 43*, 2829–2843.

BUSCH, D. A. 1961. Prospecting for stratigraphic traps. In: *Geometry of Sandstone Bodies*. J. A. Peterson and J. C. Osmond (eds.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 220–232.

BUSCH, D. A. 1971. Genetic units in delta prospecting. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 55*, 1137–1154.

BUSCH, D. A. 1974. *Stratigraphic Traps in Sandstones—Exploration Techniques*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 21, 174 pp.

BUSHNELL, H. 1981. Unconformities—key to N. slope oil. *Oil & Gas J.*, 12 Jan., 112–118.

CARLL, J. F. 1880. The geology of the oil regions of Warren, Venango, Clarion and Butler Counties. *Penns. Geol. Surv., 3*, 482 pp.

CHENOWITH, P. A. 1972. Unconformity traps. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields*. R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 15, 42–46.

CLAPP, F. G. 1910. A proposed classification of petroleum and natural gas fields based on structure. *Econ. Geol., 5*, 503–521.

CLAPP, F. G. 1917. Revision of the structural classification of the petroleum and natural gas fields. *Geol. Soc. Am. Bull., 28*, 553–602.

CLAPP, F. G. 1929. Role of geologic structure in the accumulation of petroleum. In: *Structure of Typical American Oil Fields*, vol. 2. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 667–716.

COLMANN-SADD, S. P. 1978. Fold development in Zagros simply-folded belt, southwest Iran. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62*, 984–1003.

CONYBEARE, C. E. B. 1976. *Geomorphology of Oil and Gas Fields in Sandstone Bodies*. Amsterdam: Elsevier, 341 pp.

CURRY, W. H. and CURRY, W. H. III. 1972. South Glenrock oil field, Wyoming: prediscovery thinking and postdiscovery description. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields*. R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 415–427.

DAILLY, G. C. 1976. A possible mechanism relating progradation, growth faulting, clay diapirism and overthrusting in a regressive sequence of sediments. *Bull. Can. Petrol. Geol., 24*, 92–116.

DOTT, R. H. and REYNOLDS, M. J. 1969. *Sourcebook for Petroleum Geology*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 5, 471 pp.

EMERY, K. O. 1980. Continental margins—classification and petroleum prospects. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64*, 297–315.

EREMAKO, N. A. and MICHAILOV, I. 1974. Hydrodynamic pools at faults. *Bull. Can. Petrol. Geol., 22*, 106–118.

EVAMY, D. D.; HAREMBOURE, J.; KAMERLING, P.; KNAPP, W. A.; MOLLOY, F. A.; and ROWLANDS, P. H. 1978. Hydrocarbon habitat of Tertiary Niger delta. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62*, 1–39.

FALCON, N. L. 1958. Position of oil fields of southwest Iran with respect to relevant sedimentary basins. In: *The Habitat of Oil*. L. G. Weeks (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 1279–1293.

FALCON, N. L. 1969. Problems of the relationship between surface structure and deep displacements illustrated by the Zagros Range. In: *Time and Place in Orogeny*. P. E. Kent (ed.). Geol. Soc. Lond., Sp. Pub. No. 3, 9–22.

GOEBEL, L. A. 1950. Cairo field, Union County, Arkansas. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 34*, 1954–1980.

HALBOUTY, M. T. 1967. *Salt Domes, Gulf Region, United States and Mexico*. Houston: Gulf Publishing Co., 425 pp.

HALBOUTY, M. T. 1972. Rationale for deliberate pursuit of stratigraphic, unconformity and paleogeomorphic traps. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56*, 537–541.

HALBOUTY, M. T.; MEYERHOFF, A. A.; KING, R. E.; DOTT, R. H.; KLEMME, H. D.; and SHABAD, T. 1970. World's giant oil and gas fields, geologic factors affecting their formation, and basin classification. Part I, Giant Oil and Gas Fields. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 502–556.

HARDING, T. P. 1973. Newport-Inglewood fault zone, Los Angeles basin, California. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 57*, 97–116.

HARDING, T. P. 1974. Petroleum traps associated with wrench faults. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58*, 1290–1304.

HARDING, T. P. and LOWELL, J. D. 1979. Structural styles, their plate-tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63*, 1016–1058.

HARMS, J. C. 1966. Valley Fill, Western Nebraska. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 50*, 2119–2149.

HARTMAN, J. A. 1972. "G_2", channel sandstone, Mainpass Block 35 field, offshore Louisiana. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56*, 554–558.

HAY, J. T. C. 1977. The Thistle oilfield. In: *Mesozoic Northern North Sea Symposium*. K. Finstad and R. C. Selley (eds.). Oslo: Norweg. Petrol. Soc., *11*, 1–20.

HOBSON, G. D. and TIRATSOO, E. N. 1975. *Introduction to Petroleum Geology*. Beaconsfield: Scientific Press, 300 pp.

HOC, A. 1979. *Continental Margins Geological and Geophysical Research Needs and Problems.* Washington: Nat. Acad. Sci., 302 pp.

HOLLENSHEAD, C. T. and PRITCHARD, R. L. 1961. Geometry of producing Mesaverde Sandstones, San Juan basin. In: *Geometry of Sandstone Bodies.* J. A. Peterson and J. C. Osmond (eds.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 98–118.

HUBBERT, M. K. 1953. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 37,* 1454–2026.

HULL, C. E. and WARMAN, H. R. 1970. Asmari oil fields of Iran. In: *Geology of Giant Petroleum Fields.* M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 428–437.

JAMISON, H. C.; BROCKETT, L. D.; and McINTOSH, R. A. 1980. Prudhoe Bay: a 10-year perspective. In: *Giant Oil and Gas Fields of the Decade: 1968–78.* M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 289–314.

JANOSCHEK, R. 1958. The Inner Alpine Vienna Basin, an example of a small sedimentary area with rich oil accumulation. In: *The Habitat of Oil.* L. G. Weeks (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 1134–1152.

JONES, H. P. and SPEERS, R. G. 1976. Permo-Triassic reservoirs on Prudhoe Bay Field, North Slope, Alaska. In: *North American Oil and Gas Fields.* J. Braunstein (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 24, 23–50.

JONES, O. A. and ENDEAN, R. 1973. *Biology and Geology of Coral Reefs* (2 vols). London: Academic Press, 410, 435.

KENT, P. 1979. The emergent Hormuz salt plugs of southern Iran. *J. Petrol. Geol., 2,* 117–144.

KESSLER, L. G.; ZANG, R. D.; ENGLEHORN, J. A.; and EGER, J. D. 1980. Stratigraphy and sedimentology of a Palaeocene submarine fan complex, Cod Field, Norwegian North Sea. In: *The Sedimentation of North Sea Reservoir Rocks.* Oslo: Norweg. Petrol. Soc., *VII,* 19 pp.

KING, R. E. (ed.). 1972. *Stratigraphic oil and gas fields—classification, exploration methods, and case histories.* Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 687 pp.

LAMB, C. F. 1980. Painter reservoir field—giant in Wyoming thrust belt. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64,* 638–644.

LAPORTE, L. F. (ed.). 1974. *Reefs in Time and Space.* Tulsa: Soc. Econ. Pal. and Min., Spec. Pub. No. 18, 255 pp.

LEES, G. M. 1952. Foreland folding. *Quart. J. Geol. Soc. Lond., 108,* 1–34.

LEHNER, P. and DE RUITER, P. A. C. 1977. Structural history of Atlantic margin of Africa. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 61,* 961–981.

LEVORSEN, A. I. 1934. Relation of oil and gas pools to unconformities in the mid-Continent region. In: *Problems of Petroleum Geology.* R. E. Wrather and F. H. Lahee (eds.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 761–784.

LEVORSEN, A. I. 1964. Big geology for big needs. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 48,* 141–156.

LEVORSEN, A. I. 1966. The obscure and subtle trap. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 50,* 2058–2067.

LEVORSEN, A. I. 1967. Geology of Petroleum, Second Edition. San Francisco: Freeman, 724 pp.

LOVELY, H. R. 1943. Classification of oil reservoirs. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 27,* 224–237.

MACKENZIE, D. B. 1972. Primary stratigraphic traps in sandstone. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields*. R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 47–63.

MA LI; GE TAISHENG; ZHAO XUEPING; ZIE TAIJUN; GE RONG; and DANG ZHENRONG. 1982. Oil basins and subtle traps in the eastern part of China. In: *The Deliberate Search for the Subtle Trap*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 287–316.

MARTIN, D. B. 1963. Rosedale channel: evidence for late Miocene submarine erosion in Great Valley of California. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 47*, 441–456.

MARTIN, R. 1966. Paleogeomorphology and its application to exploration for oil and gas (with examples from Western Canada). *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 50*, 2277–2311.

MAXWELL, W. G. H. 1968. *Atlas of the Great Barrier Reef*. Amsterdam: Elsevier, 242 pp.

MAYUGA, M. N. 1970. California's giant—Wilmington oil field. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 158–184.

McCUBBIN, D. G. 1969. Cretaceous strike-valley sandstone reservoirs, northwestern New Mexico. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 53*, 2114–2140.

McGREGOR, A. A. and BIGGS, C. A. 1970. Bell Creek field, Montana: a rich stratigraphic trap. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 128–146.

McGREGOR, A. A. and BIGGS, C. A. 1972. Bell Creek field, Montana: a rich stratigraphic trap. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields*. R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 367–375.

MINOR, H. E. and HANNA, M. A. 1941. East Texas oil field. In: *Stratigraphic Type Oil Fields*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 600–640.

MOODY, J. D. 1975. Distribution and geological characteristics of giant oil fields. In: *Petroleum and Global Tectonics*. A. G. Fischer and S. Judson (eds.). Princeton: Princeton Univ. Press, 307–320.

MORGRIDGE, D. L. and SMITH, W. B. 1972. Geology and discovery of Prudhoe Bay field, eastern Arctic Slope, Alaska. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields*. R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 489–501.

ORTON, E. 1889. The Trenton limestone as a source for petroleum and inflammable gas in Ohio and Indiana. *U.S. Geol. Surv. Ann. Rep. 8*, 475–662.

OXLEY, M. L. and HERLING, D. E. 1972. The Bryan field—a sedimentary anticline. *Geophysics, 37*, 59–67.

PRATT, W. E. 1942. *Oil in the Earth*. Lawrence: Univ. of Kansas Press, 105 pp.

RITTENHOUSE, G. 1972. Stratigraphic trap classification. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields—Classification, Exploration Methods and Case Histories*. R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 14–28.

SABINS, F. F. 1963. Anatomy of a stratigraphic trap. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 47*, 193–228.

SABINS, F. R. 1972. Comparison of Bisti and Horseshoe Canyon stratigraphic traps, San Juan basin, New Mexico. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields*. R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 10, 610–622.

SANFORD, R. M. 1970. Sarir oil field, Libya—desert surprise. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 449–476.

SCHWADE, I. T.; CARLSON, S. A.; and O'FLYNN, J. B. 1958. Geologic environment of Cuyuma Valley oil fields, California. In: *The Habitat of Oil.* L. G. Weeks (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 78–98.

SHELTON, J. W. 1967. Stratigraphic models and general criteria for recognition of alluvial, barrier bar and turbidity current sand deposits. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 51,* 2441–2460.

SHELTON, J. W. 1968. Role of contemporaneous faulting during basinal subsidence. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 52,* 399–413.

SIMONSON, R. R. 1958. Oil in the San Joachim Valley. In: *The Habitat of Oil.* L. G. Weeks (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 99–112.

SLINGER, F. C. P. and CRICHTON. 1959. The geology and development of the Gachsaran field, southwest Iran. New York: *Proc. 5th World Petrol. Cong.,* Section 1, 349–375.

SMITH, D. A. 1980. Sealing and non-sealing faults in Louisiana Gulf Coast salt basin. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64,* 145–172.

STANLEY, T. B. 1970. Vicksburg fault zone, Texas. In: *Geology of Giant Petroleum Fields.* M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 301–308.

TERRY, C. E. and WILLIAMS, J. J. 1969. The Idris "A" bioherm and oilfield, Sirte basin, Libya. In: *The Exploration for Petroleum in Europe and North Africa.* P. Hepple (ed.). London: Inst. Petrol., 31–48.

TOBISON, N. H. 1972. Boxer field, Morgan County, Colorado, 1972. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields.* R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 10, 383–388.

TSCHOPP, R. H. 1967. Development of the Fahud field. Mexico: *Proc. 7th World Petrol. Cong., 2,* 243–250.

WEBER, K. J. and DAUKORU, E. 1975. Petroleum geology of the Niger delta. Tokyo: *Trans. 9th World Petrol. Cong., 2,* 209–221.

WEBER, K. J.; MANDL, G.; PILAAR, W. F.; LEHNER, F.; and PRECIOUS, R. G. 1980. The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth fault structures. Houston: *Offshore Technol. Conf.,* Paper 3356, 2643–2651.

WEIMER, R. J. and DAVIS, T. L. 1977. Stratigraphic and seismic evidence for late Cretaceous faulting, Denver basin, Colorado. In: *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration.* C. E. Payton (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 26, 277–300.

WILCOX, R. E.; HARDING, T. P.; and SEELY, D. R. 1973. Basic wrench tectonics. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 57,* 74–96.

WILLIAMS, J. J. 1968. The stratigraphy and igneous reservoirs of the Augila field, Libya. In: *Geology and Archeology of Northern Cyrenaica, Libya.* T. F. Barr (ed.). 197–206.

WILLIAMS, J. J. 1972. Augila field, Libya: depositional environment and diagenesis of sedimentary reservoir and description of igneous reservoir. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields.* R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 623–632.

WILLIAMS, J. J.; CONNOR, D. C.; and PETERSON, K. E. 1975. The Piper oil-field, U.K. North Sea: A fault-block structure with Upper Jurassic beach-bar reservoir sands. In: *Petroleum and the Continental Shelf of North West Europe, vol. I, Geology.* A. W. Woodland (ed.). London: Applied Science Publishers, 363–378.

WILSON, H. H. 1977. 'Frozen-in' hydrocarbon accumulations in diagenetic traps—exploration targets. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 61*, 483–491.

WONCIK, J. 1972. Recluse field, Campbell County, Wyoming. In: *Stratigraphic Oil & Gas Fields*. R. E. King (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 16, 376–382.

YUSTER, S. T. 1953. Some Theoretical Considerations of Tilted Water Tables. Tech. Paper 3564. *Trans. Amer. Inst. Min. Engrs.* 198, 149–153.

الفصل الثامن

الأحواض الرسوبية SEDIMENTARY BASINS

المصطلحات والأفكار الأساسية BASIC CONCEPTS AND TERMS

يُعرف الحوض الرسوبي بأنه ذلك الجزء من القشرة الأرضية الذي يتواضع تحته تتابع سميك من الصخور الرسوبية. وتتواجد الهايدروكاربونات عادة في الأحواض الرسوبية وهي غائبة في المناطق الفاصلة المتكونة من الصخور النارية والمتحولة. ان هذه الحقيقة الأساسية هي احدى أحجار الأساس في النظرية الرسوبية-العضوية لأصل الهايدروكاربونات (أن هذه النظرية على تناقض مع النظرية الكونية-النارية التي تمت مناقشتها في الفصل الخامس). وبذلك، فأن من المهم أن نوجه اهتمامنا لا الى تفاصيل المصائد والصخور المكمنية حسب، بل كذلك الى الجوانب الأوسع من تحليل الأحواض الرسوبية.

قبل تأجير منطقة احتمالات نفطية جديدة، وقبل فترة طويلة جداً من محاولة تحديد مناطق الاحتمالات الصالحة للحفر، فأن من الضروري تحديد نوع الحوض الذي يجب تقييمه، وأن نأخذ بنظر الاعتبار الممرات الانتاجية التي يحتويها وأين يكثر تركزها. يصف هذا الفصل أنواع الأحواض المختلفة مع الاشارة الى أمثلة من أنحاء مختلفة من العالم، ويناقش العلاقة بين تكون الحوض وتطوره واحتمالاته الهايدروكاربونية.

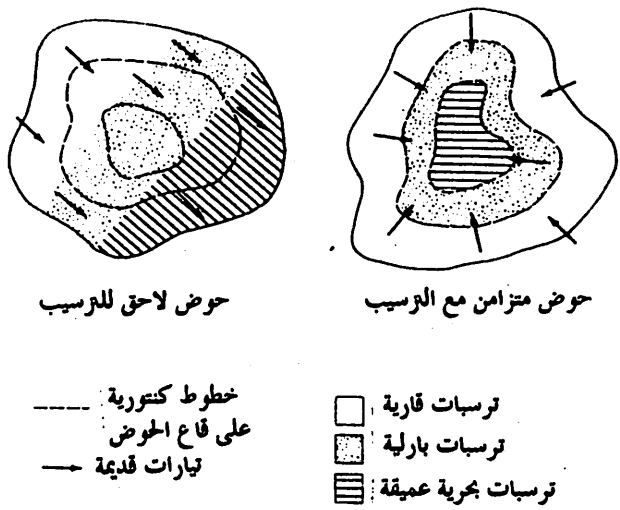
ومع ذلك، فإن من المناسب أولا أن يتم تعريف بعضا من المصطلحات والأفكار الأساسية. فالحوض الرسوبي هو منطقة على سطح الأرض حيث تتراكم الترسبات الى سماكات مرتفعة أكثر منها في المناطق المجاورة. وليس هنالك من حد فاصل بين الحد الأدنى لحجم الحوض وبين الحد الأعلى لحجم الطية المقعرة Syncline. أن العديد من الجيولوجيين ربما يتبنون وجهة النظر التي تقول بأن طولا يتجاوز ١٠٠ كيلومترا وعرضا يفوق ١٠ كيلومترا سوف يكون خطا فاصلا مفيدا. تغطي معظم الأحواض الرسوبية

عشرات الآلاف من الكيلومترات المربعة، وقد تحتوي على أكثر من خمسة كيلومترات من الترسبات المالئة. لاحظ أن الحوض الرسوبي يعرف بأنه منطقة ذات ترسبات سميكة، دون الاشارة الى طوبوغرافيته. فالحوض الرسوبي يمكن أن يوجد كجزء من سلسلة جبلية تحت سطح التهضب القاري Continental Peneplain أو في محيط. وعلى النقيض من ذلك، فأن الحوض المحيطي في أيامنا هذه لا يتطلب بالضرورة أن يكون حوضاً رسوبياً، بل في الواقع، أن العديد منها ذات قيعان مغطاة بالصخور النارية مع أشرطة veneer من الترسبات حسب.

ان هذه التمييز بين الأحواض الطوبوغرافية والرسوبية يحتاج الى المزيد من التعليق. فكلا النوعين من الأحواض له قاعدة خاسفة Depressed Basement. والأحواض الرسوبية ربما كانت أو لم تكن أحواضا طوبوغرافية واضحة أثناء تأريخها. وهنالك العديد من الترسبات التي امتلأت بالترسبات القارية والبحرية الضحلة وتفتقد تماما الترسبات البحرية العميقة.

وعلى نحو مشابه، يجب اجراء تمييز بين الأحواض المتزامنة مع الترسيب Syndepositional والأحواض اللاحقة للترسيب Postdepositional. ويدل معظم الأحواض الرسوبية على أن الانخساف Subsidence والترسيب قد حدثا على نحو متزامن. ينعكس هذا التواجد المتزامن بالتغير السحني والتيارات القديمة المتوافقة مع التركيب. من جانب آخر، في بعض الأحواض، تكون اتجاهات التيارات القديمة والسحنات غير متوافقة مع وتسبق بشكل واضح التركيب الحالي (الشكل ٨-١). أن هذا بشكل خاص صفة مميزة للأحواض داخل الرواسخية Intracratonic Basins، كما سوف نوضح لاحقاً. ان التمييز بين هذين النوعين من الأحواض هو عامل مهم في التنقيب عن البترول بسبب الحاجة الى مصائد تكونت قبل تولد الهايدروكاربونات وهجرتها. أن المصائد الطبقية تتكون بشكل عام قبل الهجرة، ما عدا في المصائد التحويرية النادرة. أما المصائد التركيبية

فـانها قـد تسبق الهـجرة أو تتكون بعـدها، وأن وضع الترتيب الزمني لهذه الأحداث بشكل صحيح يعد أمرا أساسيا.

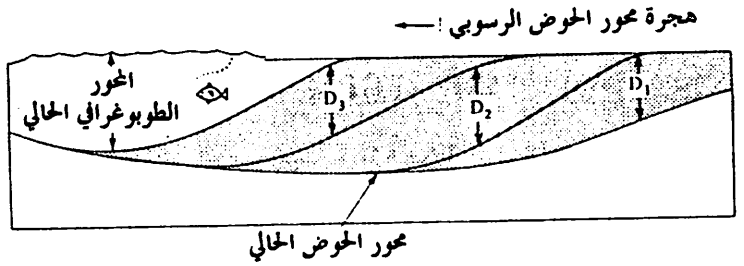


الشكل ٨-١ :الفروقات بين الاحواض الرسوبية اللاحقة والمتزامنة مع الترسيب.

هنالك تمييز مـهم آخر ينبـغي القيام به بين الطوبوغرافـية وسمك الترسبـات. وعند تفحص خرائط السمك أو سمك العطاء Isochron الاقليمية، فأن من المغري الافتراض بأنها تعد دلائل على طوبوغرافية الحوض القديمة. ولكن هذا ليس صحيحاً على الدوام بأي حال من الأحوال. فالمحور الترسيبي Depocenter (منطقة الترسبات الأكثر سمكاً) لا يوجد دوما في حضيض Nadir الحوض، بل أنه ربما تكون نطاقا خطيا على امتداد حافة الحوض. ان هذا الأمر صحيح بالنسبة للترسبات الفتاتية حيث يصل الترسيب حده الأقصى على امتداد حافة الدلتا. ويقل سمك الترسبات من الدلتا باتجاه كل من حافة الحوض وكذلك باتجاه البحر. وبشكلٍ مشابه، يحدث معظم الترسيب في الأحواض الجيرية على امتداد حافات الجرف، حيث تزدهر الكائنات الحية في الظروف الضحلة جيدة التهوية مع الكثير من

المواد الغذائية. وبذلك فان الشعاب والرمال الهيكلية والسرئية يقل سمكها باتجاه السباخ الموجودة على حافات الأحواض (السباخ الساحلية) وباتجاه البحر الى تتابعات مكثفة Condensed Sequences من الطين الجيري.

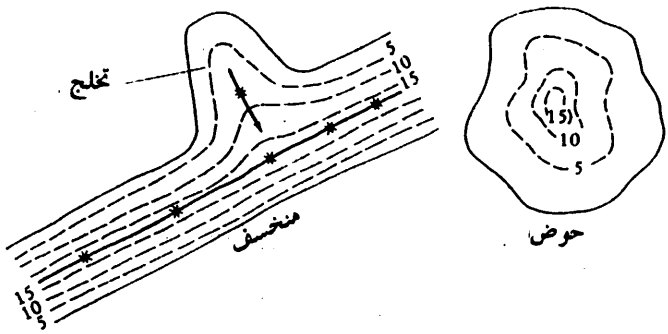
أظهرت العديد من الدراسات أن المحور الترسيبي قد يهاجر عبر الحوض. وليس بالضرورة أن يتحرك المحور الطوبوغرافي للحوض معه. ولقد وثقت أمثلة على هذه الظاهرة من الغابون، حوض مارانو maranhao Basin في البرازيل ومن العراق (Belmonte et al., 1963 Ibrahim, 1979, Mesner and Woodridge, 1964) على التوالي. لاحظ أن سُمك كل من التكوينات المقاسة عند التكشفات يجب ألاّ يُضاف الى بعضه كي يحدد السمك الكلي للترسبات داخل الحوض. أن هذا القياس يمكن انجازه من معطيات الحفر أو المعطيات الجيوفيزيائية فقط (الشكل ٨-٢).



الشكل ٨-٢: مقطع عرضي يوضح محاور الاحواض الرسوبية المهاجرة. لاحظ كيف أن قياس السمك الظاهري على كل وحدة على السطح يؤدي الى سمك كلي خاطئ لملء الحوض الرسوبي.

الآن وقد تناولنا الأحواض بمفهوم الزمن والقطاع Profile، فانه يجب ينظر اليها على المستوى الأفقي Plan. للمصطلح حوض تفسيران. ففي المعنى الأشمل، ومثلما تم تعريفه، فان الحوض الرسوبي هو جزء من سطح الأرض تتواضع تحته الترسبات. وفي المعنى الضيق، فان الحوض يمكن أن يقسم الى أحواض حقيقية، وهي تلك التي تكون شبه دائرية في المستوى الأفقي والطولية المنخفضات (troughs)، أما التخلجات

Embayments التي تفتقد الانغلاق المركزي، فهي أحواض تنفتح في أحواض أكبر (الشكل٨-٣).



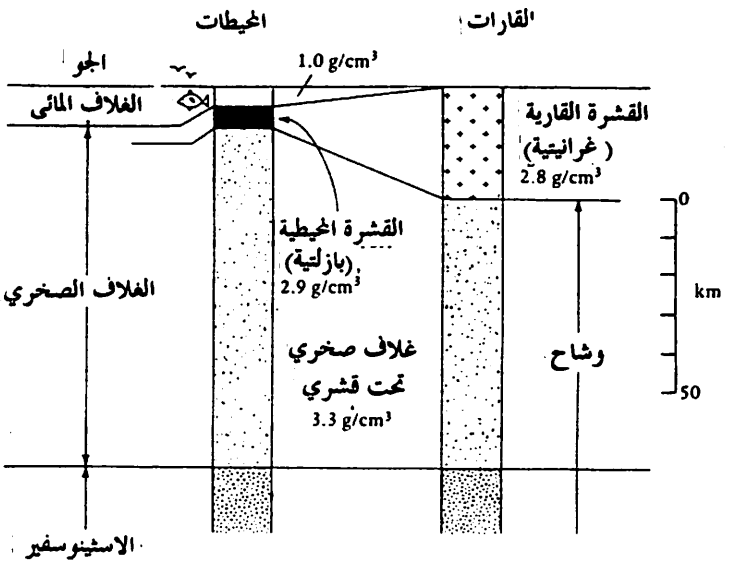
الشكل ٨-٣: تعرف الاحواض بأنها مساحات على سطح الارض تتواضع تحتها ترسبات. ويمكن أن تقسم الى أحواض حقيقية وتخلجات ومنخسفات . قيم الخطوط الكنتورية بالكيلومترات.

آليات تكون الاحواض MECHANISMS OF BASIN FORMATION

تشكل الأحواض الرسوبية جزءاً من قشرة الأرض أو الغلاف الصخري Lithosphere، ويمكن تمييزها بشكل عام من القشرة القارية الغرانيتية والمحيطية البازلتية بكثافاتها الواطئة وسرعها الزلزالية البطيئة. وتحت هذه العناصر القشرية يأتي الغلاف الصخري تحت القشري الأكثر استمراراً. والقشرة رقيقة السُمك وكثيفة وهي واطئة طوبوغرافياً عبر الأحواض المحيطية ولكنها سميكة وذات كثافة واطئة، وبالتالي، مرتفعة فوق القارات (الشكل٨-٤). ويتكون الغلاف الصخري من سلسلة من الصفائح الصلدة Rigid Plates التي تغطي الاستينوسفير Asthenosphere الكثيف واللزج.

تنزاح الصفائح القشرية (اللثوسفيرية) ببطء عبر الاستينوسفير. أن المعرفة بنظرية حركية (تكتونية) الصفيح ذات أهمية أساسية في فهم الأحواض الرسوبية. أن التناول التفصيلي لهذا الموضوع هو خارج نطاق هذا الكتاب، ولكن خلاصة قصيرة للموضوع

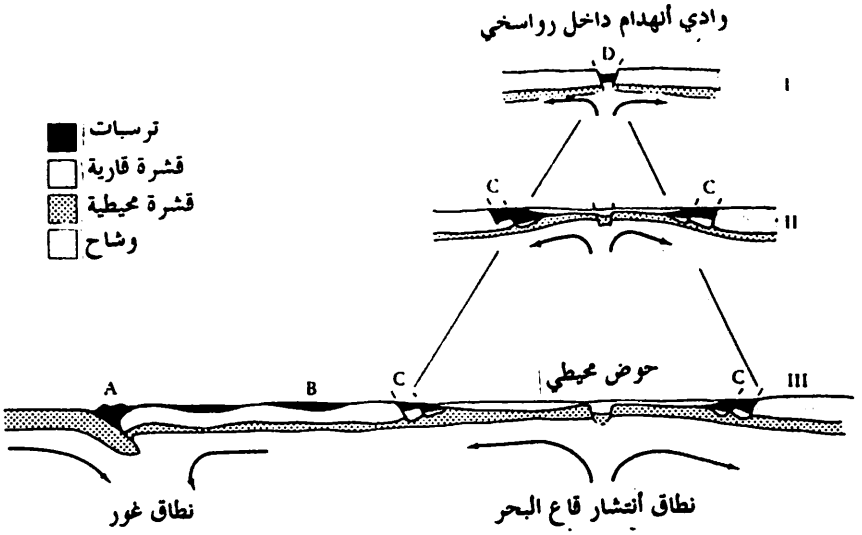
ضرورية قبل تناول آلية تكون الأحواض الرسوبية. ويمكن العثور على تفاصيل أكثر في كل من (Fischer and Judson, 1975, Seyfert and Sirkin, 1973, Davies and Runcorn, 1980, Tarling and Runcorn, 1973, Tarling, 1981). ويمكن العثور على مراجعة متشككة لهذه الأفكار في (Meyerhoff and Meyerhoff, 1972).



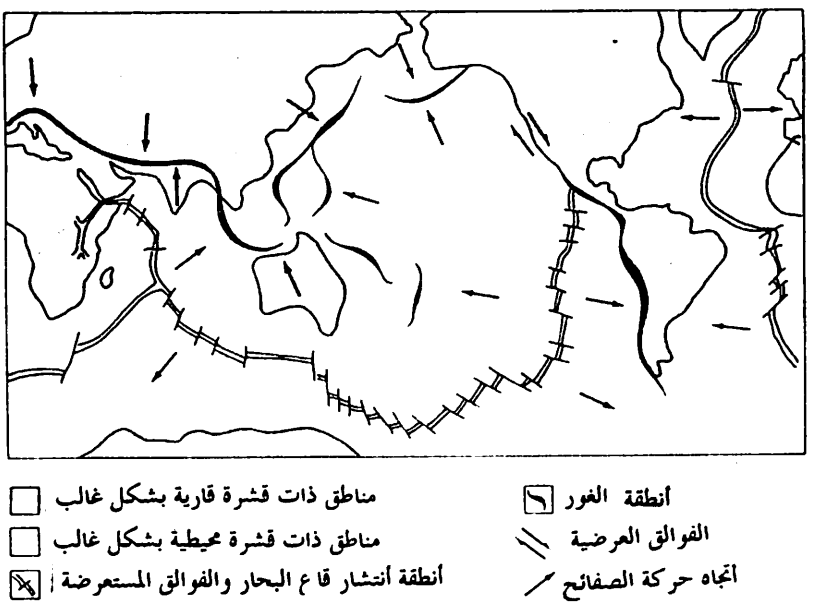
الشكل ٨-٤: أعمدة مقارنة للقشرة المحيطية والقارية تظهر معدلات الكثافة.

يمكن التعبير عن الفكرة الأساسية لنظرية حركية الصفيح على النحو التالي: أن المحيطات حديثة التكون (تفتقد بشكل عام الصخور التي هي أقدم من ٢٠٠ مليون سنة). في حين أن القارات هي بشكل عام أقدم من ذلك بكثير. وتغطي قيعان المحيطات بالصخور البركانية البازلتية مع أشرطة من الترسبات البلاجية Pelagic Sediments (الغورية). وتقطع المحيطات بانهدامات Rifts بركانية فعالة زلزالياً يطلق عليها اسم البروزات المحيطية

Midocean Ridges. أن الانعكاسات المغناطيسية القديمة Paleomagnetic reversals وتحديد الأعمار يظهر أن الصخور تصبح أقدم تدريجاً بعيداً عن البروزات وباتجاه الحافات القارية. ويمكن تتبع البروزات المحيطية باتجاه اليابسة في الانزياحات المتلئة بالترسبات داخل القشرة الغرانيتية القارية. لذلك فان الأدلة تقترح أن القشرة الجديدة ذات التركيب البازلتي الى حد كبير، تتكون حيثما يحدث الشد Tension والتدفق Upwelling على امتداد أنطقة تمدد قيعان البحار هذه. وعلى نحو متزامن، تسحب القشرة نحو الأسفل الى الأسثينوسفير عند مظاهر خطية تكميلية تُعرف بأنطقة الغور Zones of Subduction. وتظهر هذه الأنطقة كمنخسفات مطوية من الترسبات داخل أو بجوار الكتل القارية وكأقواس جزرية بركانية Volcanic island Arcs داخل المحيطات. ويوضح الشكل (٨-٥) عملية الحمل والهضم القاري Gestation and Digestion، بينما يُظهر الشكل (٨-٦) حدود الصفائح الأرضية المميزة. ورغم أنه ليس هنالك اجماع عام حول تشخيص حدود الصفائح الرئيسية، فان التفاصيل المتعلقة ببعض الصفائح الصغيرة (الصفائح الصغيرة microplates) ما تزال غير واضحة بعض الشيء. تم تمييز ثلاثة أنواع من الحدود : الزاحفة Trailing والغورية Subductive والمستعرضة Transcurrent. وتوجد حدود الانهدام Rift حيثما تتشكل القشرة الجديدة وتبتعد Diverge الصفائح. بينما توجد الصفائح الغائرة حيث تلتقي Converge الصفائح. في حين يكون بعض حدود الصفائح مستعرضا عندما تتحرك صفيحتان مقابل احداهما الاخرى. وتتميز حدود الصفائح المستعرضة بوجود تفلق مستعرض واسع النطاق Extensive Transform Faulting مصحوبا بنشوء أحواض عميقة وانطقة دسرية Thrust Belts ذات امتداد محلي ولكن ذات تعقيد شديد (Dickinson and Seely, 1979, Crowell, 1974).



الشكل ٨-٥: مقطع عرضي يوضح الافكار الاساسية لنظرية حركية الصفيح. (١) ينشأ محور لانتشار قاع المحيط في هذه الاثناء تحت القشرة القارية. يحدث تقبب ويتكون واد أنهدامي (د). وتعد الانهدامات الافريقية مثالا حديثا على ذلك.



الشكل ٨-٦: خارطة الارض تظهر التوزيع التقريبي للقشرات المحيطية والقارية وحدود الصفائح. (عن Heirtzler, 1968; Vine, 1970 وآخرون).

يمكن ان تتكون الاحواض بأربع طرق رئيسية (Fischer, 1975). أن ثلاثا من هذه العمليات ملخصة في الشكل (٨-٧). وتتكون مجموعة رئيسية من الاحواض، وهي الاحواض الانهدامية Rift Basins، كنتيجة مباشرة للشد القشري عند أنطقة انتشار قاع البحار. وتوجد المجموعة الرئيسية الثانية من الاحواض نتيجة للانضغاط القشري Crustal Compression عند حدود الصفائح المتلاقية. ويمكن ان يتكون النوع الثالث من الاحواض لا استجابة للقوى العرضية Lateral Forces ولكن نتيجة للحركات القشرية العمودية. ولاسباب غير مفهومة تماما، يمكن ان يحدث تحول في الحالات تحت الغلاف الصخري (اللثوسفير). ان هذه التغيرات قد تتخذ شكل تبريد موضعي، وبالتالي تقلص، مما يؤدي الى تكون تجويف سطحي يُملأ بالترسبات لاحقا. وعلى نحو معكوس، فأن الغلاف الصخري قد يسخن موضعيا ويتمدد مما يؤدي الى تقوس القشرة. وعندها تحدث تعرية لهذا النطاق. وفي بعض الاحيان، قد يُمثل هذا التقبب القشري متطلبا سابقا لعملية الانهدام والزحف Rifting and Drifting. وبدلاً من ذلك، فأن التبريد اللاحق والانخساف Subsidence قد يؤدي الى تكون التجاويف داخل الرواسخية Interacratonic Hollow التي تُملأ بالترسبات بعدئذ.

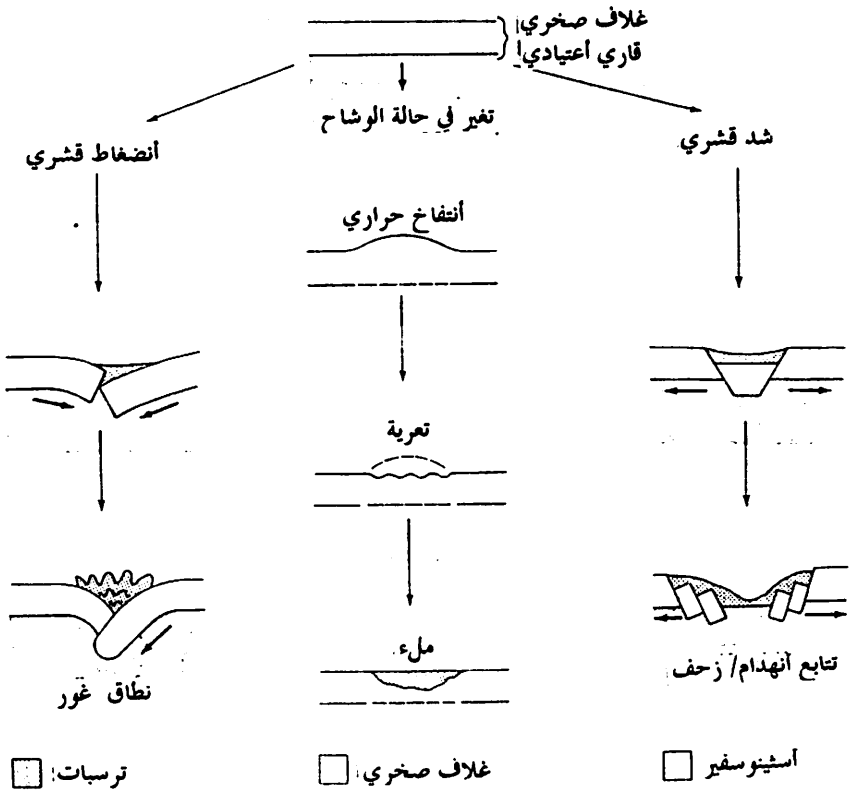
الالية الرابعة لتكون الاحواض الرسوبية هي الحمل القشري البسيط Simple Crustal Loading بسبب الترسيب. ان هذه العملية شبيهة بمسألة (البيضة والدجاجة). فالاحواض من هذا النوع تتطلب انخفاضا مبدئيا في القشرة قبل بدء الترسيب. وبذلك، فأن الاحواض المحملة تميز الحافات القارية حيث بمقدور الدلتاوات ان تنشأ انخفاض القشرة المحيطية المجاورة ومن ثم تديمه.

تصنيف الأحواض الرسوبية

CLASSIFICATION OF SEDIMENTARY BASIN

اقترحت العديد من الخطط لتصنيف الاحواض الرسوبية. وكانت الخطط المبكرة

وصفية الى حد كبير. وفي ايامنا هذه، ومع فهمنا الحالي لنظرية حركية الصفائح، أصبح ممكنا الان ان نقترح خططا ليست وصفية حسب بل نوعية ايضا. ولقد اقترحت التصنيفات من قبل كل من (Selley, 1975, Perrodon, 1978, 1971, Klemme, 1980, 1975, Halbouty et al., 1970, Uspenskaya, 1967, Olening, 1957, Weeks, 1958).



الشكل ٨-٧: مقطع عرضي يظهر الانواع المختلفة من آليات تكون الاحواض التي شرحت في متن الكتاب.

يحاول الجدول (٨-١) ان يجمع بين الخطط التصنيفية التي اقترحت من قبل كل من Selley, Klemme, Halbouty. ان من الصعب تصنيف الاحواض الرسوبية لان

الحوض قد يكون له تأريخ معقد يكون قد تطور خلاله من نوع لاخر. ويمكن وضع عدد من الاحواض في أكثر من مرتبة على نحو يثير الجدل. ويجب عدم اعطاء أهمية كبيرة للجدول (٨-١)، وميزته الاساسية أنه يظهر الكيفية التي يمكن ان تربط بها الاحواض بطريقة تكونها، موفراً هيكلا منطقيا للوصف الناتج للانواع المختلفة من الاحواض (الشكل ٨-٨).

الاحواض الرواسخية CRATONIC BASINS

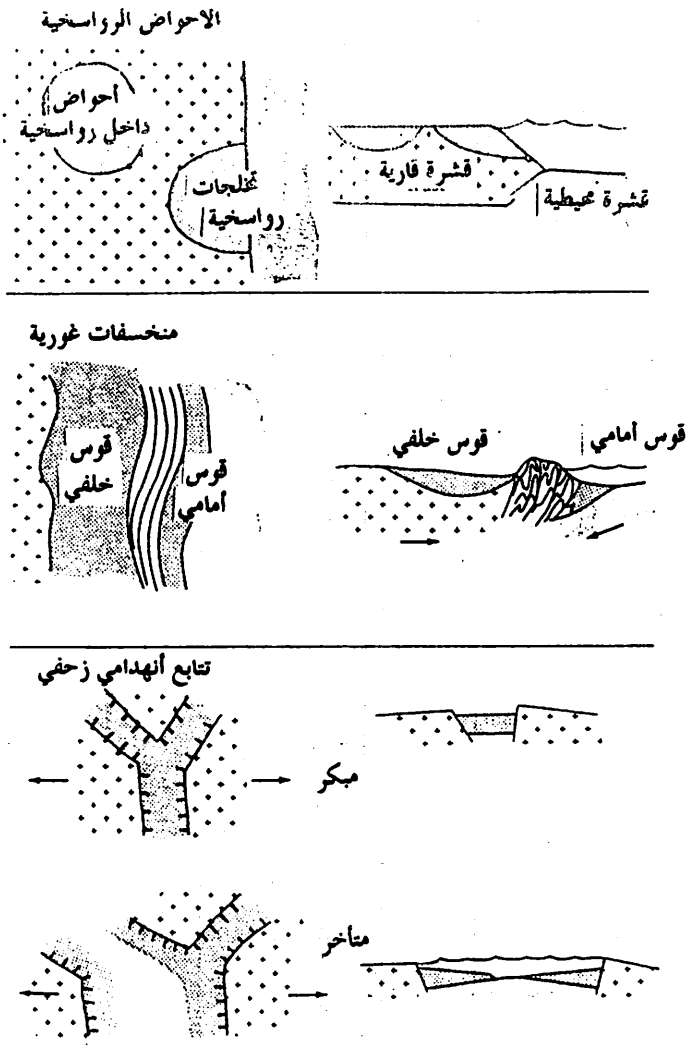
الاحواض الرواسخية، بشكل اساسي، أحواض شبه دائرية تتواضع كليا او على نحو غالب على قشرة قارية غرانيتية. أن أرضية مثل هذه الاحواض يمكن ان تتكسر الى فسيفساء من المنخفضات والمرتفعات Horsts and Grabens ولكن الانهدام الرئيسي يكون مفقودا. ويمكن تقسيم الاحواض الرواسخية الى الاحواض داخل الرواسخية Interactratonic Basins التي تتواضع كليا على القشرة الارضية والاحواض فوق الرواسخية Epicratonic Basins التي تتواضع جزئيا على القشرة القارية وجزئيا على القشرة المحيطية. ان هذه التصنيفات ترتبط مع الاحواض من نوع I والنوع II حسب تصنيف Halbouty and Klemme (الجدول ٨-١) ان هذا التجميع لا يستند على تمييز مصطنع. ويختلف هذان النوعين من الاحواض اختلافا بيّناً في السحنات والتركيب والاحتمالات الهايدروكاربونية، كما ستظهره الفقرات التالية.

الاحواض داخل الرواسخيه Interacratonic Basins

الاحواض داخل الرواسخية احواض عريضة، ضحلة، شبيهة بالصحن. ويمكن اجراء تفريق اساسي بين الاحواض داخل الرواسخية الفتاتية والجيرية. وتغلُب في النوع الاول الفتاتيات القارية مع مقادير ضئيلة من السجيل البحري او انه قد يكون مفقوداً تماماً، اما الثانية فهي أكثر بحرية، رغم أنها قد تكون تبخرية. وسوف يتم الان وصف هذين النوعين ومناقشة أمثلة عليهما.

الجدول (٨-١) : تصنيف الاحواض الرسوبية في محاولة لربط الاحواض مع حركية الصفائح.

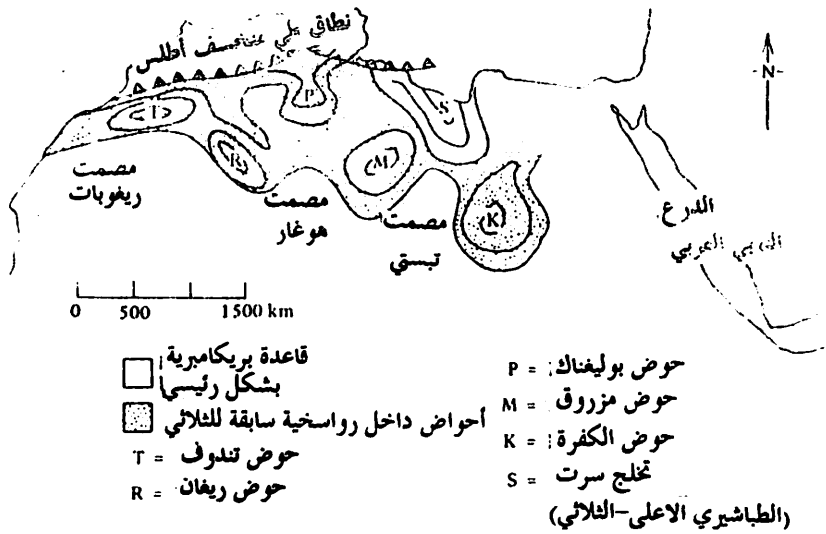
خطة Selley (1975)			خطة Halbouty (1970) و Klemme (1975, 1980)
مجاميع رواسخية مرتبطة مع استقرار قشري	أحواض I	داخل رواسخي فوق رواسخي	نوع (١) أحواض داخلية بسيطة، صحنية الشكل نوع (٢) أحواض اجراف الارض المتقدمة المركبة داخل الرواسخية
مجاميع حوضية اقليمية عند حدود الصفائح المتلاقية	منخسفات II	مايوجيوسنكلايني ايوجيوسنكلايني مولاس	نوع (٣) احواض بين جبلية نوع (٤) الانثناء السفلي خارج القاري نوع (٥) احواض بين جبلية
حدود صفيحية مستعرضة	إنهدامات III	إنزلاق مضربي	نوع (٦) انهدامات
مجاميع انهدام - زحف عند حدود الصفائح المتباعدة		احواض بين جبلية (لاحقة للحركة الاوروجينية)	
		داخل رواسخي بين رواسخي	نوع (٧) تباعد المنخسفات الساحلية
	احواض الحافات المحيطيه (انثناءات حافية قارية)		نوع (٨) دلتات العصر الثلاثي



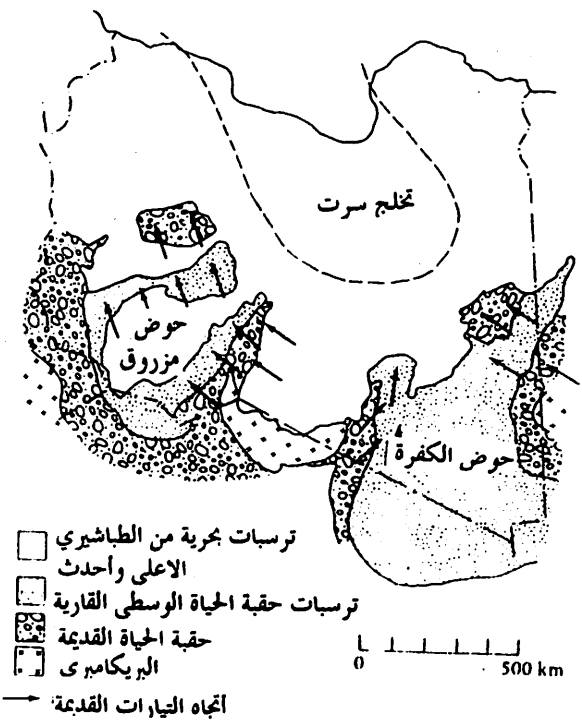
الشكل ٨-٨: أشكال تصورية تظهر هندسية الانواع المختلفة من الاحواض. أحذر من هذا الرسم . لاحظ أن تحولات تحدث بين الانواع المختلفة وأن حوضا يمكن أن يتطور من نوع لآخر.

تو**جد سلسلة من الاحواض داخل الرواسخية في شمال افريقيا بين المحيط الاطلسي والبحر الاحمر. ان هذه الاحواض مفصولة بعضها عن الاخر ببروزات من صخور القاعدة**

النارية والمتحولة من ما قبل الكامبري، وتميل الى ان تغطس باتجاه الشمال صوب البحر الابيض المتوسط (الشكل ٨-٩). وتظهر هذه الاحواض طباقية منتظمة على نحو ملفت للنظر في صخور حقبة الحياة القديمة، غير ان صفاتها تصبح متغيرة على نحو متميز خلال حقبة الحياة الوسطى. وتُعَد أحواض المرزوق والكفرة في جنوب ليبيا أمثلة على الاحواض داخل الرواسخية (الشكل ٨-١٠). وكلاهما تُغطى قيعانه بتتابع حقبة الحياة القديمة الممتد عبر الصحراء الكبرى. وتتغاير الاسماء من حوض لاخر، وتكون حدود السحنات ثنائية العمر Diachronic، ولكن الطباقية منتظمة على نحو ملفت للنظر من المحيط الاطلسي حتى جزيرة العرب (أنظر Selley, 1972, Beuf et al., 1971 على التوالي). ويتغطى فريش من رمال الانهار المظفورة Blanket of Braided Alluvial Sands يبلغ سمكه عدة مئات من الامتار، بطبقة أقل سمكا ولكن تشبهه في الانتظام تتكون من فريش من رمال المخاضات البحرية. ان عمر هذه الرمال غير مؤكد بسبب فقدان المتحجرات، ولكنها عادة تُعزى الى العمر الكامبري-الاوردفيشي. وتتبع هذه الطبقات بسجيل غرابتوليتي بحري Marine Graptolitic هو سجيل تانزوفت Tannezuft Shale (السيلوري) في الجزائر وليبيا وسجيل ارينغ من مجموعة خريم في الاردن. ان هذا السجيل هو صخرة مصدرية غنية بالمواد العضوية في شمال غرب الجزائر، غير انها تصبح أقل سمكا وتزداد نسبة الغرين Silt فيها وتقل نسبة المواد العضوية عندما نتبعها باتجاه الجنوب والشرق صوب الراسخ. وبعد ذلك رَسَبٌ تراجُع رئيسي تكوين الاكاكاوس Acacus Sandstone الرملي الدلتائي (السيلوري) وتكوين تادرارات الرملي النهري (الديفوني) في شمال أفريقيا ومكافئة مجموعة خريم وتكوين الجوف الرملي في الجزيرة العربية. ويتحول الحجر الجيري والسجيل البحري من العصر الكاربوني الذي يتواضع فوق هذه الترسبات في الجزائر وشمال غرب ليبيا باتجاه الجنوب الشرقي الى رمل وسجيل بارلي Paralic Sands وفي النهاية يتحول الى رمال نهرية في الجزء الجنوبي الشرقي من حوض الكفرة. وبعد التراجع



الشكل ٨-٩: خارطة تظهر توزيع الاحواض الرسوبية في شمال أفريقيا.



الشكل ٨-١٠: خارطة ليبيا تظهر أحواض المزروق والكفرة داخل الرواسخين. لاحظ كيف أن معطيات التيارات القديمة تظهر ان انسياب الحوض بعيد الترسيب

البحري الواسع عند نهاية العصر الكاربوني، لم يعد البحر مطلقا الى حوض مرزوق والكفرة (Klitzsch, 1970, Lestang, 1965).

يظهر تحليل السحنات انه خلال حقبة الحياة القديمة، كان حوضا مرزوق والكفرة يقعان في جرف يميل على نحو منتظم تقريبا صوب الشمال. كما أظهر تحليل التيارات القديمة ان الحوضين كانا مفصولين ببروزات تغطس باتجاه الشمال. ولقد استمرت هذه المظاهر الارضية بينما كان الحجر الرملي القاري من حقبة الحياة الوسطى في طور الترسيب (حجر ميساك الرملي "النوبي") (Van Houten, 1980, Klizsch, 1972, Mckee, 1965). تضم الصخور الرملية هذه ترسبات قارية متنوعة، نهرية بشكل غالب، ولكنها تضم الشاطئية Fanglomerate والبحيرية Lacustrine والهوائية Eolian. ومرة اخرى أظهر تحليل التيارات القديمة بشكل أساسي منحدرا قديما يميل نحو الشمال عبر كلا الحوضين. ولم يصبح حوضا مرزوق والكفرة حوضين منغلقين تركيبيا، مقارنة بالتخلجات، الاّ بعد ترسيب صخور حقبة الحياة الوسطى القارية. ان هذه الترسبات خالية من المتحجرات الى حد كبير وتعد أنها تتراوح في العمر من الترياسي(؟) الى الطباشيري الاسفل (الولديني Wealden). وعلى مستوى اقليمي فأن انغلاق الحوضين بارتفاع حافاتهما الشمالية سوف يبدو وكأنه حدث نحو نهاية العصر الطباشيري.

وبذلك فأن حوضي الكفرة ومرزوق يوفران مثالا جيدا للاحواض داخل الرواسخية. وصفاتهما الاساسية هو الشكل شبه الدائري بينما تكون الترسبات المالئة قليلة السمك (ربما بحدود ٢ كيلومتر في حوض مرزوق و ٣ كيلومتر في حوض الكفرة)، وهما يظهران انتظاما ملفتا للنظر في الطباقية مع كميات ضئيلة من الرمال والسجيل والصخور الجيرية البحرية. وهنالك نقص في الصخور المصدرية الغنية بالمادة العضوية وهو أمر يعكس جزئيا نقصان كمية السجيل البحري، غير أنه يعكس أيضا المناخ الجاف السائد خلال حقبة الحياة الوسطى والذي لم يكن مناسباً لترسيب السجيل البُحيري الزيتي. وتظهر قيعان الحوضين

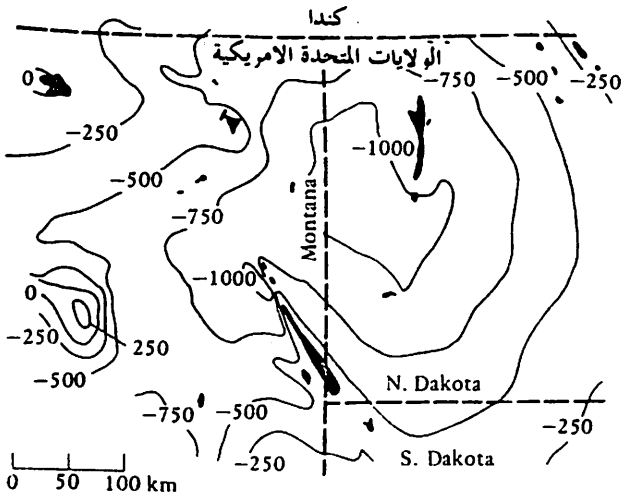
انتظاما في الميل وغياباً للشواذ التركيبية. وتكون المالات الجيوحرارية واطئة فوق القشرة الفرانيتية القديمة غير المشوشة.

تُعَد الاحواض داخل الرواسخية من هذا النوع مناطق احتمالات فقيرة بالنسبة للتنقيب الهايدروكاربوني. وهي تحتوي على احتياطات كامنة كافية، غير أنها ذات عمر نضوج قصير بالنسبة للصخور المصدرية الناضجة والتراكيب. ان الهايدروركاربونات التي يمكن ان تكون قد تحررت جاءت من الصخور المصدرية البحيرية واصطيدت طباقيا حول حافة الحوض. أن هذه الفكرة موضحة بتكوين الغرين ريفر من حوض العصر الثلاثي في يومنغ ويوتا (Surdam and Wolfbauer, 1975, Eugster and Surdam, 1973, Picard, 1967).

النوع الثاني من الاحواض داخل الرواسخية يسود فيه الترسيب الجيري. ان هذا التغير لا يعزى الى الفرق التركيبي التحتي، بل بالاحرى الى العوامل المناخية والعوامل الاخرى، والتحول بين النوعين موجود أيضا. أن أحواض ولستون Williston وحوض ميشغن Michigan في امريكا الشمالية تُعَد أمثلة جيدة على الاحواض الجيرية داخل الرواسخية. ويشغل حوض ولستون أجزاء من ساسكاتشيوان ومونتانا ونورث داكوتا. ويبلغ قطره نحو ٤٠٠ كيلومتر ويحتوي على نحو ٣ كيلومتر من الترسبات، تتراوح في العمر من الكامبري الى الثلاثي (Harding and Lowell, 1979, Dalmus, 1958, Smith etal., 1958, Darling and Wood, 1958).

يبدأ تتابع حقبة الحياة القديمة برمل مخاضي Shoal Sand بحري قاعدي من العصر الكامبري، متبوع بصخور من السجيل البحري وحجر جيري مترسب في مياه ضحلة مع تبخريات السباخ وطبقات حمر في الديفوني والكاربوني الاسفل. أن طباقية الحياة القديمة المنتظمة بشكل أو اخر تصبح متغيرة على نحو اقليمي خلال حقبة الحياة الوسطى. ويتناقص سمك ترسبات العصرين الترياسي والجوراسي باتجاه حافة الحوض، وهنالك

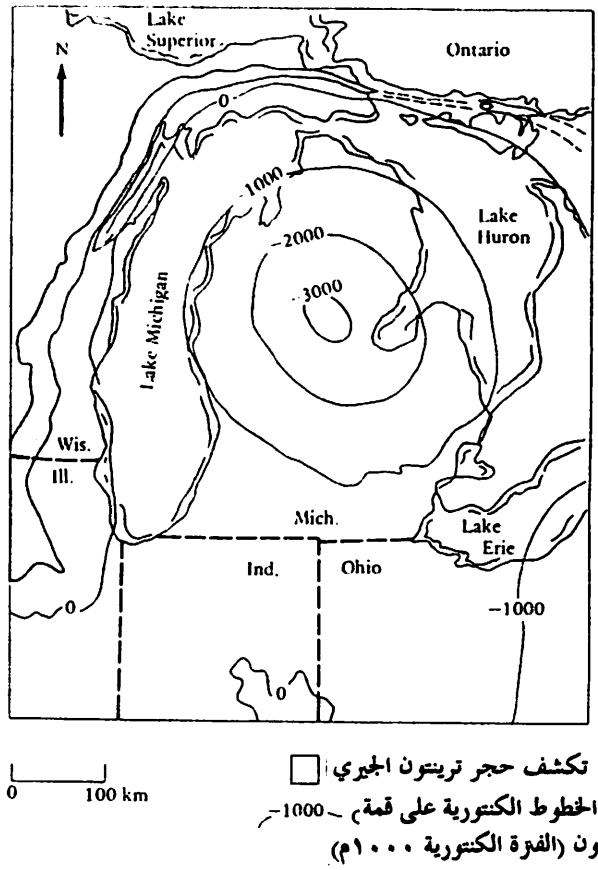
سطح عدم توافق تحت الطباشيري يقطع الصخور الاقدم وصولا الى صخور القاعدة. أن هذه العملية تؤدي دورا هاما في ختم مصائد القطع تحت التكشفات Subcrop Truncation Traps . على امتداد كيلومتر، ترسب السجيل وفتاتيات الطباشيري والثلاثي عندئذ في بيئات بحرية ضحلة وبيئات قارية (الشكل ٨-١١). ان هذه الطبقات رغم انها ليست مهمة من الناحية البترولية، الا انها تؤدي دورا هاما لا كختم فقط بل كغطاء فريشي ايضا، مما يمكن صخور السجيل المصدرية من حقبة الحياة القديمة على النضوج وتوليد النفط والغاز.



الشكل ٨-١١: خارطة كنتورية تركيبية على قمة الطباشيري في حوض ويلستون (الخطوط الكنتورية ذات فترة ٢٥٠ م). يمثل هذا الحوض مثالا جيدا على الاحواض داخل الرواسخية المغلقة ذات ماء يتجاوز الثلاثة كيلومترات من الرسبات البحرية الضحلة والقارية. (عن Harding and Lowell, 1979).

أن حوض ولستون ليس مقاطعة نفطية هامة ولا يحتوي على حقول نفطية او غازية عملاقة. ومع ذلك، فهي تنتج النفط والغاز من العديد من التراكمات الصغيرة نسبيا. والمصائد ذات نوعين رئيسيين (١): عدد من الاقواس الاقليمية الواسعة مثل قوس مايلز ستي Miles City Arch وقبة بوركيوباين Porcupline Dome و(٢) العديد من الاتجاهات الموجبة التي ترتبط بفوالق القاعدة مثل طية سيدار غريك المحدبة Cedar Creek anticline. ولا تظهر الثنيات Warps او الفوالق اي اتجاه مفضل. أن النفط المهاجر من الصخور المصدرية للطباشيري في الجزء الاعمق من الحوض قد اصطيد في المكامن السابقة للطباشيري في مصائد الطيات المحدبة ومصائد القطع والمصائد المختلطة (انغلاق تركيبي زائداً سطح عدم توافق) تحت كل من سطوح التعرية للطباشيري والجوراسي.

المثال الجيد الاخر عن الاحواض الجيرية داخل الرواسخية هو حوض مشيغان الى الجنوب الشرقي من حوض ولستون (Mesolella et al., 1974, Delwig and Evans, 1969, Cohee and Landes, 1958). ان هذا الحوض هو شبه دائري في المستوى الافقي ايضا، ويبلغ سمك الترسبات فيه نحو ٥ كيلومترات. وعلى النقيض من حوض ولستون، يتكون المقطع الى حد كبير من صخور حقبة الحياة القديمة السفلى مع أشرطة من طبقات تتراوح في العمر بين الديفوني الى الجوراسي، والسحنات بحرية ضحلة الى حد كبير، مع وجود رمل مخاضي قاعدي كامبري مغطى بالسجيل والصخور الجيرية والتبخريات (الشكل ٨-١٢). ولقد تركز اهتمام خاص على صخور العصر السيلوري. وتتكون هذه الصخور من صخور جيرية حوضية محاطة بدورها بشعاب برجية Pinnacle reefs على منحدر منصة Platform slope، وشعاب حاجزية وصخور جيرية من نوع خلف شعاب المنصة Platform back-reef. ولقد ملأت هذه الطوبوغرافية الترسيبية بتبخريات السيلوري الاسفل مع كمية ضئيلة من الترسبات الجيرية.



الشكل ٨-١٢: خارطة كنتورية تركيبية على قمة حجر ترينتون الجيري (الاوردوفيشي) تظهر شكل حوض مشيغان الداخل رواسخي في منطقة الغريت ليك في أمريكا الشمالية. (عن Cohee and Landes, 1958).

وشأنه شأن حوض وإستون، فأن حوض مشيغان ليس مقاطعة هايدروكاربونية هامة ولا يحتوي على حقل نفطي او غازي عملاق واحد. ومع ذلك، وعلى نحو مشابه، فأنه يحتوي على العديد من مئات الحقول النفطية والغازية الصغيرة. ان هذه الحقول قد اصطيدت بشكل رئيسي في عدد كبير من الشعاب البرجية وعلى ذرى الشعاب الحاجزية المتمركزة. كما تم

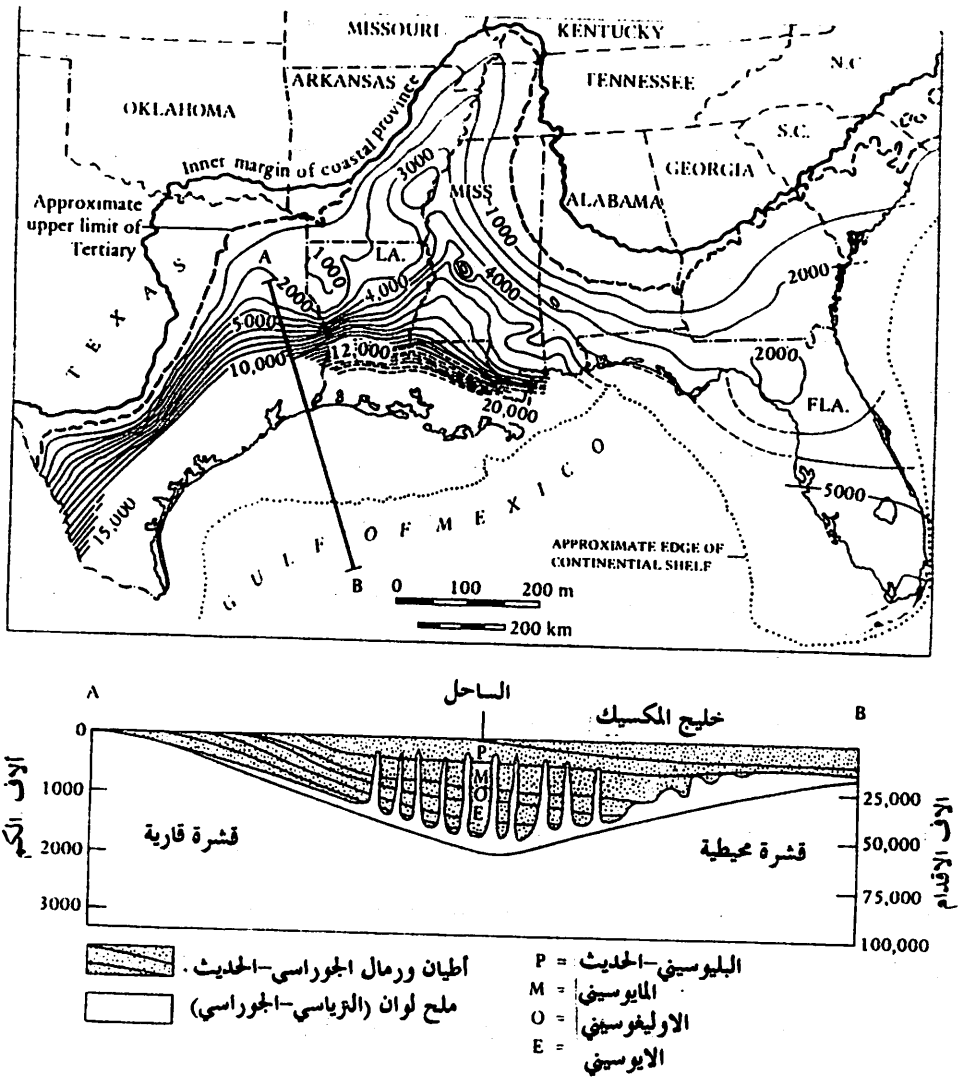
العثور على احتياطات صغيرة تتراوح في العمر بين تكوين ترينتون الجيري Trenton Limestone من العصر الديفوني الى رمال الكاربوني الاعلى (البنسلفاني) القاعدية.

كي نختم هذه المراجعة المتعلقة بالاحواض داخل الرواسخية يجب ملاحظة النقاط التالية. ان الاحواض داخل الرواسخية تحتوي بشكل عام على العديد من الصخور المكمنية في كل من السحنات الفتاتية والجيرية. وتميل الصخور المصدرية الى ان تكون سيئة التطور ما عدا في الاحواض الجيرية الاكثر بحرية. ولان هذه الاحواض توجد على القشرة الغرانيتية المستقرة، فأن معدلات انسياب الحرارة تكون واطئة وان تولد النفط الرئيسي ربما لم يحدث. وللاسباب نفسها هنالك ندرة في المصائد التركيبية، والاصطياد طبقي بشكل مميز ناتج عن القطع او التراكب. وحيثما تكون الصخور المصدرية الناضجة موجودة، توجد العديد من الحقول الصغيرة بدلا من عدد قليل من الحقول العملاقة.

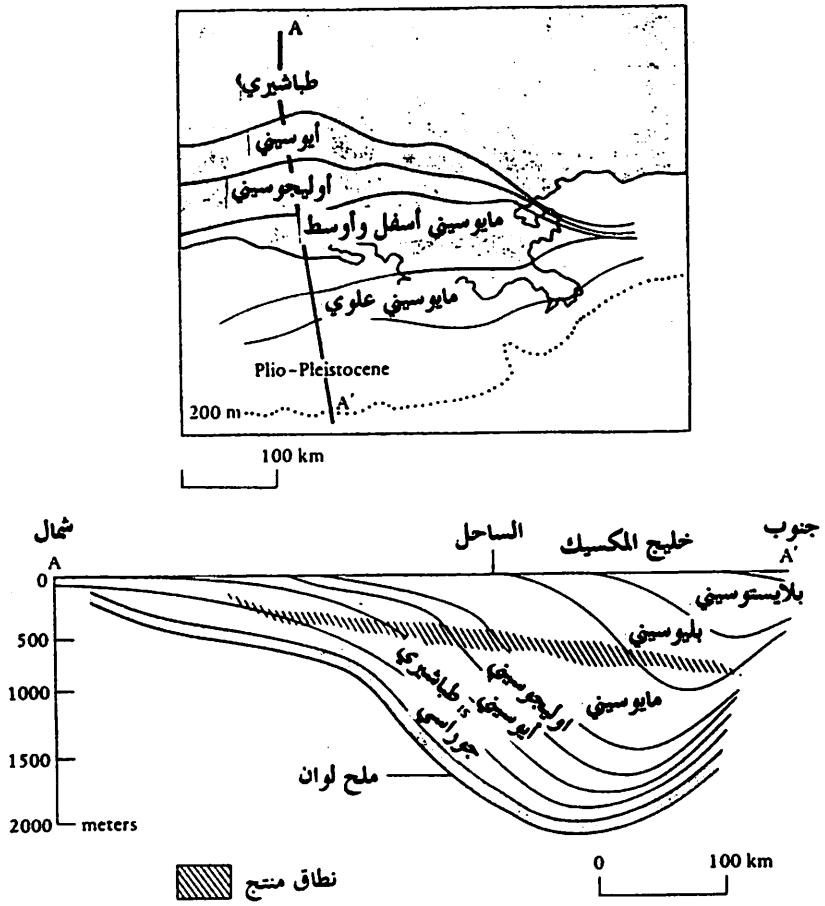
التخلجات فوق الرواسخية Epicratonic Embayments

التخلجات فوق الرواسخية أحواضٌ تقع على حافة القشرة القارية انها ليست احواضاً حقيقية مغلقة، غير انها تغطس plunge نحو المناطق المحيطية الرئيسية المغطاة بقشرة محيطية. تشابه التخلجات فوق الرواسخية النوع II أي أحواض اجراف الارض المتقدمة المركبة داخل الرواسخية Intracontinental Composite Foreland Shelf Basins حسب تصنيف (Halbouty and Klemme, 1970). وكما هو الحال مع الاحواض داخل الرواسخية، يمكن القيام بتمييز واضح بين التخلجات المملوءة كليا بالترسبات الفتاتية والتخلجات المملوءة بالترسبات الجيرية. أن ترسبات العصر الثلاثي في منطقة الغولف كوست في الولايات المتحدة الامريكية وتخلج دلتا النيجر يمثلان حوضين فتاتيين في حين ان تخلج سيرت في ليبيا يعد مثالا على الاحواض المملوءة بالترسبات الجيرية.

أن تخلج الغولف كوست في جنوب الولايات المتحدة الامريكية هو تخلج رئيسي يحتوي على نحو ١٥ كيلومتر من الترسبات (الشكل ٨-١٣). وتُغطى القاعدة بطبقة ملح لوان Louann Salt ذات العمر الجوراسي (؟) (Dow, 1978, Antoine, 1974, Wilhelm and Ewing, 1972, Murray, 1960). ان هذا الملح متبوع بسلسلة من الاسافين (الحافات Wedges) المتقدمة التي تتراوح في العمر بين الطباشيري والعصر الحديث. وتتكون كل حافة من رمل نهري رقيق السمك باتجاه اعلى الميل يزداد في السمك باتجاه البحر الى أطيان ورمال دلتائية. أن هذه الرمال والاطيان الدلتائية تقل في السمك باتجاه البحر، وبدورها الى أطيان بحرية عميقة في خليج المكسيك (٥ . ٢١ مليار برميل من النفط القابل للاستخلاص و ١٧ ألف قدم مكعب من الغاز القابل للاستخلاص اعتمادا على(Ivanhoe, 1980). توجد هذه الاحتياطات في سلسلة من المسالك Fairways التي تقل في العمر باتجاه الخليج (الشكل ٨-١٤). وضمن كل مسلك، يحدث الانتاج حيث تتقاطع نافذة النفط Oil Window مع نقاط الكسر Break-up Zone حيث يحدث تلاسن بين طبقات المنحدر الطينية المصدرية والرمال الدلتائية. ولقد تم تسريع تولد الهايدروكاربونات بالترسيب السريع وبالتالي الضغط الفائق. ولقد أدت هذه العملية الى تكون ممالات جيوحرارية واطئة على نحو استثنائي على امتداد منطقة المحور الترسيبي في الغولف عندما تتصاعد درجات الحرارة في "مطبخ الشيطان Devil's Kitchen" في الاعماق السحيقة جدا (Jones, 1969). وضمن المسالك المنتجة توجد الهايدروكاربونات في انواع مختلفة من المصائد. وتضم هذه المصائد الطيات المنزلقة Rollover anticlines المرتبطة مع انثناء فكسبيرغ Vicksburg Flexure (ص٣٦٧)، وترتبط الطيات المنزلقة مع الفوالق الموضعية النامية في الاطيان فائقة الضغط والمصائد الاقتحامية الناتجة من كل من قباب ملح لوان والاقتحامات الطينية الاحدث عمرا.

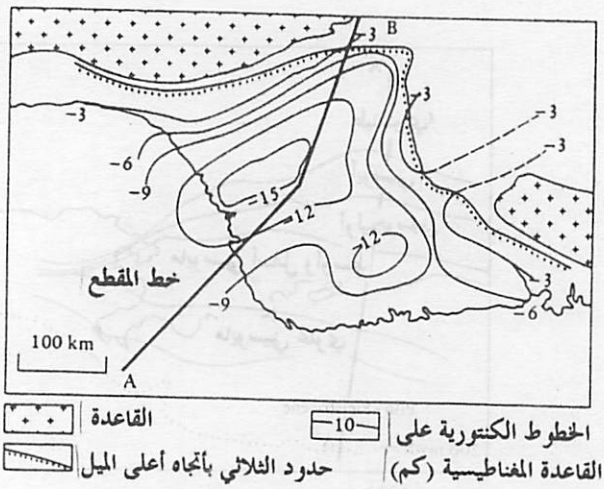


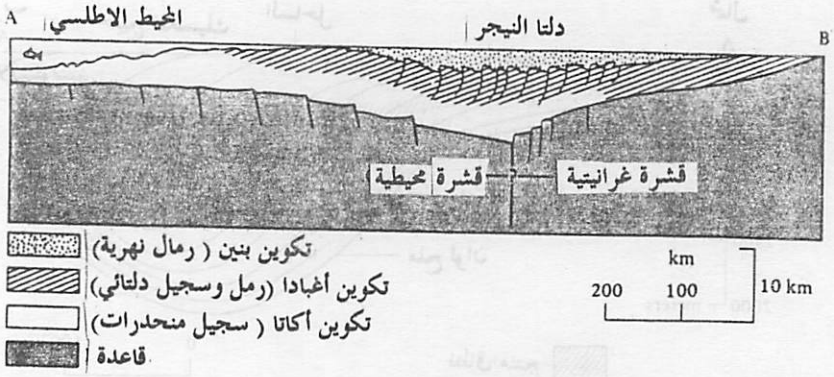
الشكل ٨–١٣: خارطة ومقطع عرضي لحوض شمالي خليج المكسيك الساحلي. الخارطة تعتمد على Murray, 1960 وتظهر سمك ترسبات حقبة الحياة الحديثة.



الشكل ٨-١٤: (في الاعلى) خارطة تظهر المسالك المنتجة لتخلج الفولف كوست. (في الاسفل) مقطع عرضي يظهر الطبيعة التقدمية لملء الحوض وعلاقته بأنتاج الهايدروكاربونات.(عن Dow, 1978).

ان تخلج النيجر بغرب افريقيا شبيه في العديد من الاوجه بتخلج المسيسبي. فهو ايضا يغطس من القشرة المحيطية الي القارية، ولكن الانخساف الذي بدأ الترسيب يرتبط على نحو واضح مع انهدام الراسخ الافريقي عند تطور المحيط الاطلسي. ويتحد التخلج باتجاه اعلى الميل مع انهدامات بينو وتشاري Benue and Chari Rifts التي تمتد





الشكل ٨-١٥: (في الاعلى) خارطة لدلتا النيجر تظهر العمق الى القاعدة المغناطيسية.(في الاسفل) مقطع عرضي على أمتدا الخط أ-ب.(عن Evamy et al, 1978).

حتى النيجر وتشاد (الشكل ٨-١٥). ومثل المسيسبي، فأن تخلج النيجر يحتوي على سلسلة من الحافات الفتاتية المتقدمة التي تتراوح في العمر من الطباشيري الاعلى الى العصر الحديث. تم تمييز ثلاث طبقات ثنائية العمر Diachronous هي، تكوين بنينBenin Formation الذي تغلب عليه السحنات النهرية، وترسبات الرمل والسجيل الدلتائية التي

تعود الى تكوين اغبادا Agbada Formation وأطيان المنحدر العائدة لتكوين أكاتا (Akata Formation) (Avbobo, 1978, Evamy et al., 1978, Weber and Daukoru, 1975, Short and Stauble, 1967). ومثل دلتا المسيسبي فأن الاطيان معرضة لضغط فائق، مما يؤدي الى نشوء الفوالق النامية والطيات المنزلقة التي تكون المصائد الرئيسية (صفحة ٣٧١). ان دلتا النيجر لا تظهر سلسلة من المسالك المنتجة التي تقل في العمر باتجاه البحر، رغم ان النفط والغاز موزعان على نحو منتظم ضمن كل وحدة تركيبية ذات فالق نام رئيسي. وتصادف ممالات جيوحرارية واطئة جدا فوق المحور الترسيبي، وفوق قمة نافذة النفط مرتفعة من نحو ٥ كيلومتر في الوسط الى نحو ٣ كيلومتر حول الحافة. ان كلا من تخلجي المسيسبي والدلتا يتميزان بنسب غاز - نفط مرتفعة وخامات شمعية ذات محتوى كبريتي واطيء. ان هذه المميزات ربما تعكس المحتوى الدبالي العالي للكيروجين.

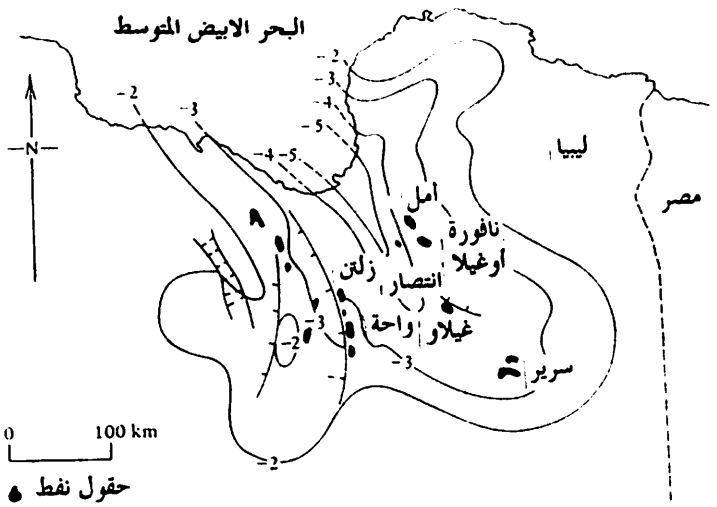
هنالك العديد من التخلجات فوق الرواسخية ذات الترسبات الفتاتية التي توجد في انحاء مختلفة من العالم، وخصوصا في جنوب شرقي آسيا وفي الجزء الكندي من القطب الشمالي (Bruce and Parker, 1975). ومع ذلك، فأن القليل منها فقط هو الذي تم توثيقه جيدا، والذي على ما يبدو غني بالبترول مثل تلك التي وصفناها للتو.

ليس كل التخلجات فوق الرواسخية ذات ترسبات فتاتية، فبعضها يحتوي، على نحو غالب، ترسبات جيرية مالئة. ويُعدُّ تخلج سرت (Salem and Sirte (embayment) Busrewil, 1918, Grey, 1970, Conant and Goudarzi, 1967). ولقد أظهر تحليل التيارات القديمة أنه بدءا من العصر الكامبري والى الطباشيري المبكر. فأن المنطقة التي يشغلها الان تخلج سرت كانت بروزا يفطس باتجاه الشمال وكان يفصل بين تخلجي مرزوق والكفرة، حيثما كانا عندئذ . ولقد تحطم هذه البروز في الطباشيري الاوسط.

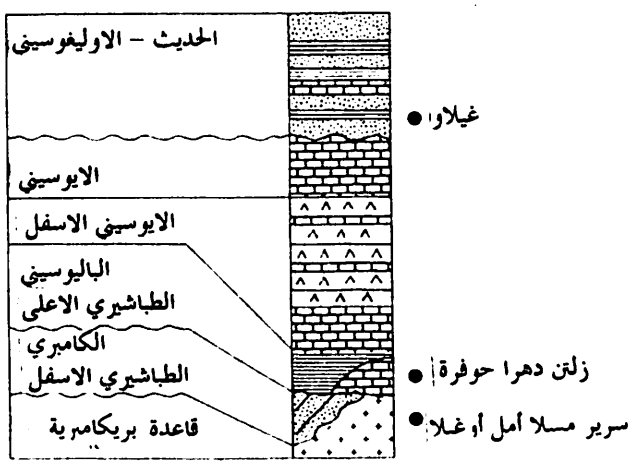
ويتواضع سطح عدم توافق سرت على نحو مباشر فوق القاعدة ما قبل الكامبرية في وسط التخلج وفوق الصخور الاحدث عمرا تدريجا كلما ابتعدنا من مركز الحوض. وهنالك رمل قاعدي موضعي النشوء مُغطى، فوق كتل فوالق ملتوية، بشعاب تتراوح من الطباشيري الاعلى الى الباليوسيني، وفي المنخسفات بسجيل غني بالمواد العضوية الذي يتراكب موضعيا ويغطي المرتفعات. وتتكون ترسبات الايوسيني الاسفل من نحو كيلومتر من ترسبات التبخريات والجيريات المتبادلة. ولقد استمر ترسيب المواد الجيرية في المايوسيني الاوسط، كي يتبع برمال بحرية ضحلة وترسبات رملية وسجيلية نهرية بدءا من الاوليغوسيني والى العصر الحديث (الشكل٨-١٦).

يحتوي حوض سرت على ثلاثة انطقة منتجة رئيسية. والعديد من الحقول هي مصائد مختلطة على مرتفعات تركيبية مختومة بسطح عدم توافق سرت. وتتراوح المكامن في العمر من غرانيت الكامبري (اوغيلا) مرورا بالصخور الرملية المختلفة التي تتراوح في العمر من الكامبري الى الطباشيري الاسفل (ميسلا وسرير). والاحتمال البترولي الثاني والاكثر اهمية يشتمل على الانتاج من الصخور الجيرية الشعابية التي تتراوح في العمر بين الطباشيري الاعلى والباليوسيني على ذرى الكتل المتفلقة (زلتن، واحة، ظهرة ...الخ). ويوجد الاحتمال الثالث الاقل اهمية في رمال الاوليغوسيني حيث يقع حقل غيالو في فئة الحقول العملاقة، (الشكل٨-١٧). ولقد قُدّر الاحتياطي الكلي لتخلج سرت بنحو ٣٠ مليار برميل من النفط القابل للاستخراج و ٣٢ ترليون قدم مكعب من الغاز (Ivanhoe, 1980). وهو يحتوي على أكثر من ١٣ حقلا من فئة الحقول العملاقة (Halbouty et al., 1970).

يظهر هذا العرض للتخلجات فوق الرواسخية أنها ذات احتمالات أكثر من الاحواض داخل الرواسخية. وتصح هذه العبارة على كل من التخلجات الجيرية والفتاتية. فهي لا تحتوي على ترسبات بحرية أكثر، وبذلك على صخور مصدرية أفضل، فحسب ولكنها توجد أيضا حيثما تكون القشرة الارضية اقل سمكا واقل استقرارا. وبذلك يكون الانسياب



الشكل ٨-١٦: خارطة لتخلج سرت تظهر توزيع حقول النفط (السوداء) والخطوط الكنتورية التركيبية (بالكيلومترات) على سطح عدم توافق سرت (ماقبل الطباشيري الاعلى). (عن Sanford, 1970).



الشكل ٨-١٧: خلاصة طباقية تخلج سرت تظهر التكوينات المكمنية الرئيسة. يوفر سجيل الطباشيري الاعلى – الباليوسيني الصخور المصدرية الرئيسة.

الحراري عاليا، وهو مما يشجع على تولد الهايدروكاربونات في المناطق ذات المالات الجيوحرارية المرتفعة بسبب الضغط الفائق. كما ان عدم استقرار القشرة يشجع ايضا الاصطياد التركيبي للنفط، وكذلك الطبقي (الشعابي) وسطوح عدم التوافق والمصائد المرتبطة بالفوالق النامية.

المنخسفات TROUGHS

الأحواض الاقليمية وحركية الصفائح Geosyncline and Plate Tectonics

النوع الرئيسي الثاني من الأحواض الذي يجب أخذه بنظر الاعتبار هي المنخسفات. وهذه أحواض خطية أكبر كثيراً وأكثر تعقيداً من حيث التركيب والسحنات من أنواع الأحواض التي تطرقنا اليها لحد الآن. ولقد أُطلق على هذه المنخسفات منذ فترة طويلة اسم الأحواض الاقليمية (الجيوسنكلاين)، وهي فكرة عُرفت من قبل (Hall, 1859) وطُورت من قبل سلسلة من العاملين بضمنهم (Dana, 1873, Glaessner and Teichert, 1947, Kay, 1944, 1947, Schuchert, 1923, Haug, 1900) قبل التوصل الى صياغة فرضيتها في عمل (Aubouin, 1965) الجبار. في ذلك الوقت – فجر ثورة نظرية حركية الصفائح – يمكن تلخيص فكرة الأحواض الاقليمية على النحو التالي: تتكّون الأحواض الاقليمية من منخسفين متوازيين. الأول هو المايوجيوسنكلاين Miogeosyncline الذي يقع على القشرة القارية ويتكون من حافة يزداد سُمكها باتجاه المحيط تتكّون من صخور الحجر الرملي والحجر الجيري والسجيل البحرية. وينفصل هذا المنخسف عن المنخسف الثاني الأيوجيوسنكلاين Eugeosyncline، بالبروز المايوجيوانتكلايني Miogeanticlinal ridge. والأيوجيوسنكلاين أعمق من المايوجيوسنكلاين ويُملأ بشكل رئيسي بالترسبات البحرية العميقة. ومن الناحية المبدئية قد تكّون هذه الترسبات أطياناً غورية Bathyal Muds، ولكن بتطور الجيوسنكلاين، تملأه رمال العكورة من قوس من الجزر المرتفعة على جانبه

القريب من المحيط.

ولقد أُطلق على الترسبات الاسفينية الفتاتية هذه اسم الفلش Flysch (Hsu, 1970). ويترافق إنضغاط منخسف الفلش مع اقتحامات نارية وتحول اقليمي وطي ودسر Thrusting. أن كل مرحلة من مراحل الانضغاط أو الحركات البانية للجبال (الأورجينيه) Orogenesis تخلق توازناً قشرياً Isostatic adjustment مُسَبّبة ارتفاع ترسبات المنخفضات لتكّون السلاسل الجبلية. ويقاوم المايوجيوسنكلاين المجاور ويُملأ بالترسبات الأسفينية ذات الطبيعة القارية اللاحقة للحركات البانية للجبال التي يُطلق عليها عادة اسم المولاس Molasse (Van Houten, 1973). ان هذه العملية، الدورة الجيوسنكلانية التقليدية قد تمثلت على نحو مُصغّر للجيولوجيين الأوروبيين في جبال الألب التي يمكن فيها بوضوح ملاحظة أن الجبال قد تكوّنت من منخسف من الترسبات التي ضغطت بين الراسخين الأوروبي والأفريقي. أما الجيوسنكلاينات الموجودة على حافات القارات مثل الأبلاشيان Appalachians، فلقد كان تخيلّها أمراً أكثر صعوبة، ذلك لأن جانباً من المنخسف يبدو مفقوداً. ومع تطور الأفكار المتعلقة بانتشار قاع المحيط والغور القشري Crustal subduction، أعاد الجيولوجيون وبسرعة تقييم نظرية الجيوسنكلاينات التقليدية (Coney, 1970, Mitchell and Readign, 1969, Ahmad, 1968, Reoding, 1972, Schwab, 1971). وتُعّد الأيوجيوسنكلاينات الآن أنطقة غور حيث تلتقي حافات الصفائح.

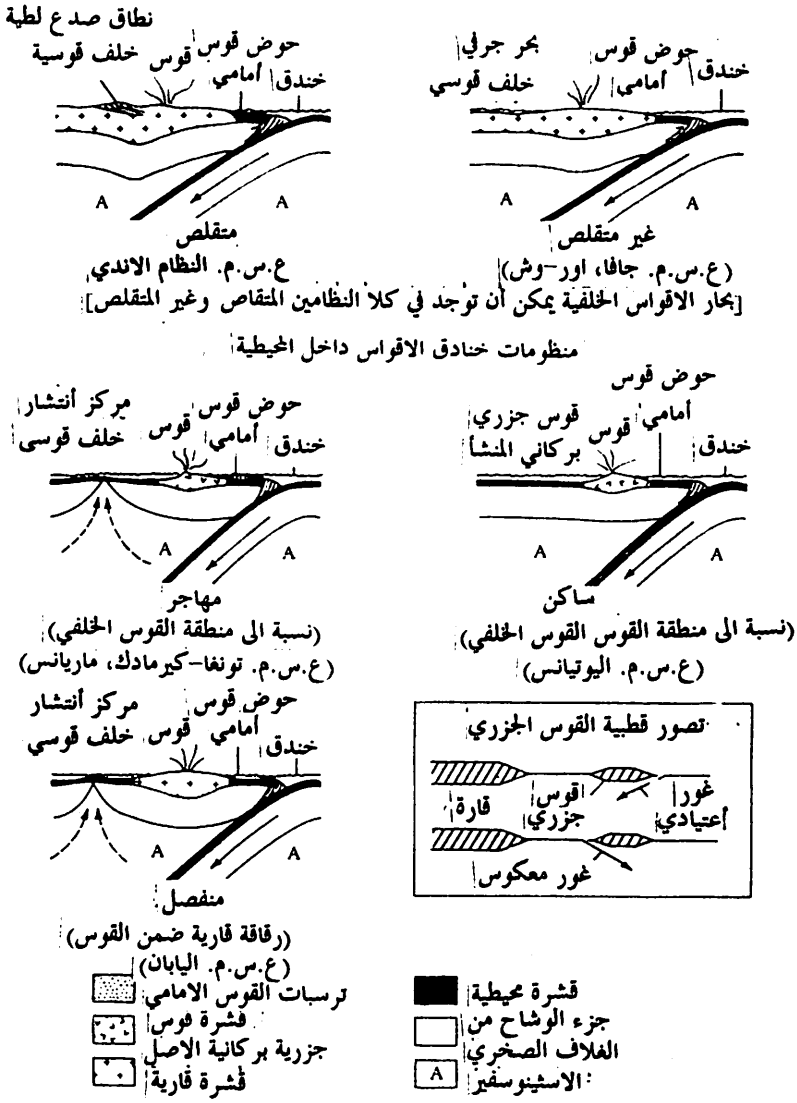
هنالك ثلاثة أنواع من أنطقة الغور. يحدث أحد هذه الأنواع بين مناطق القشرة القارية، كما هو الحال في جبال الألب وزاغروس والهملايا. وفي النوع الثاني، ينشأ المنخسف عند الحد الفاصل بين القشرة القارية والمحيطية. وتمثل جبال الكورديلار في أمريكا الشمالية والأنديز والباندا آرك في جنوب شرقي آسيا هذا النوع. ويوجد النوع الثالث حيثما يحدث الغور بين صفيحتين ذاتي قشرة محيطية بشكل أساسي، كما هو الحال

في الأقواس اليابانية ونيوزلندا. أن هذه الأنواع الثلاثة من أنطقة الغور قد تشكل جزءاً من تتابع تطوري ينغلق فيه محيط عندما تلتقي صفائح ذات قشرة محيطية، مما يؤدي في النهاية الى ترتيب الكتل القشرية القارية الى جانب بعضها. ويوضح الشكل (٨-١٨) الأنواع الثلاثة من أنطقة الغور. لاحظ التغير الحاصل في المصطلحات: فمصطلحات القوس الخلفي Back-arc والقوس Arc والقوس الأمامي Fore-arc تعني بشكل عام المصطلحات القديمة المايوجيوسنكلاين، الجيانتكلاين والأيوجيوسنكلاين على التوالي.

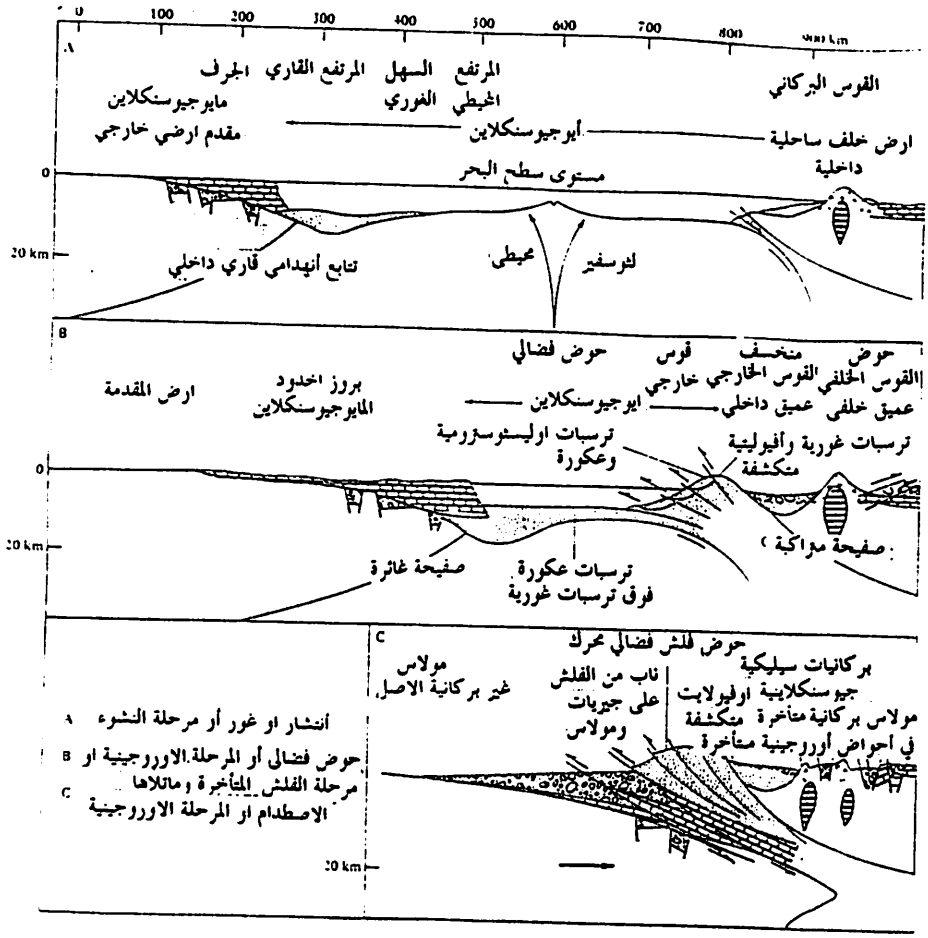
لقد تعقد هذا التفسير الجديد للمنخسفات الرسوبية بحقيقة أن بعض المنخسفات التي يجب أن تكون من الناحية النظرية أنطقة غور تحتوي في الحقيقة انهدامات Rifts مع ترسبات أفقية التوضع، مما يدلل على فقدان الانضغاط، أن لم يكن الشد. ويُعَد أخدود البيرو Peruvian trench أحد هذه الأمثلة المسببة للحرج (Scholl et al., 1968). ولقد قادت هذه الظاهرة الى فكرة أن حركة الصفائح قد تنعكس في الحقيقة بحيث أن أنطقة الغور قد تصبح أنطقة تباعد لو لفترات متقطة. ولقد فسّرت جبال الألب الآن وفق هذه الطريقة من قبل (Wilson, 1966, 1968)، كما هو موضح في الشكل (٨-٩١).

المنخسفات خلف القوسية Back-Arc Troughs

أن تعقد السحنات والتركيب والتأريخ يجعل من الصعب جداً اطلاق التعميمات حول الاحتمالات البترولية للمنخسفات الغورية. تصوّر أولاً المنخسفات خلف القوسية أو المايوجيوسنكلاين. أن هذه المنخسفات هي أجراف غير متناظرة يزداد سُمك الترسبات فيها نحو القوس. ويمكن أن يُعامل مثل هذا النوع من الأحواض على أنه تخلج فوق رواسخي طولي، وهو بشكل أو آخر مرادف لمصطلح Klemme الانثناء السفلي خارج القاري Extracontinental downwarp. وتتكّون ترسبات هذه الأحواض من سجيل بحري ضحل الى حد كبير وترسبات جيرية (شعابية في الغالب) ورمال جرفية مدية ناضجة مع



الشكل ٨–١٨: مقطع عرضي يوضح الانواع المختلفة من أنطقة الغور والمنحسفات الرسوبية المرتبطة معها. (عن Dickinson and Seely, 1979).

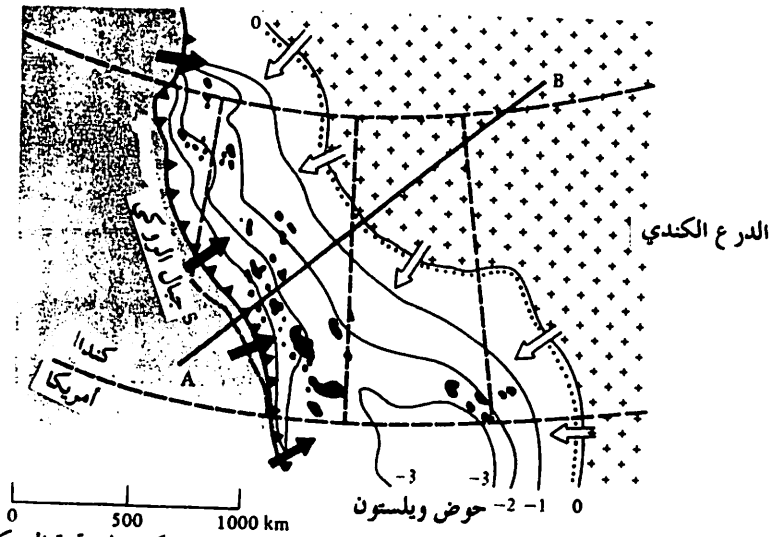


الشكل ٨-١٩: مقطع عرضي يوضح تفسير Wilson, 1968 لنشوء الالب. حالة أنتشار قاع البحر الاصلي (أ) معكوس كيف يصبح نطاق غور (ب) يؤدي الى أصطدام الصفيحتين القاريتين (ج). (عن Mitchell and Reading, 1978).

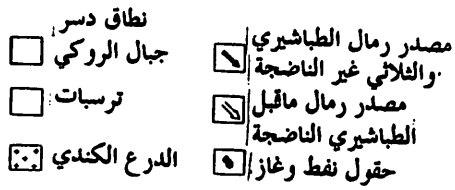
احتمال ترسيب حافة ريشية Feather edge من الترسبات غير البحرية، وبين فترات الغور الرئيسية، يمكن أن تترسب صخور مصدرية واسعة على امتداد حافة الحوض المواجهة للبحر. تترك الحركات البانية للجبال (الأورجينية) هذه الأحواض خلف القوسية منتهية على جانبها الخارجي بنطاق دسري. وتوضح مناطق الخليج العربي وسومطرة وغرب كندا هذا النوع من الأحواض. وهنالك خارطة ومقطع عرضي للخليج العربي موضحان في الشكل (٧-٧). وللمزيد من التفاصيل أنظر (Murris, 1980, 1981, Kamem-Kaye, 1970).

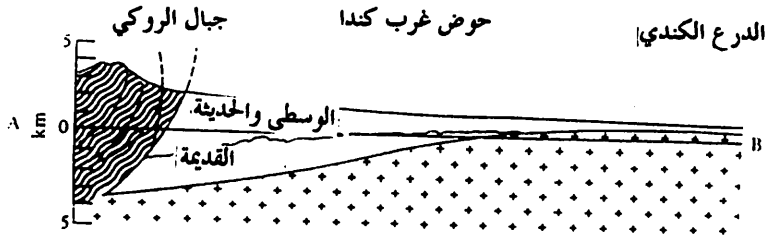
يوضح الشكل (٨-٢٠) الملامح البارزة لحوض غرب كندا. ويحتوي هذا الحوض على ترسبات أسفينية يزداد سُمكها باتجاه الغرب الى نحو ٥ كيلومتر حتى تنقطع فجأة بنطاق دسر الروكي ماونتن. وتضم صخور حقبة الحياة القديمة المبكرة الرمال والصخور الجيرية (مع شعاب الديفوني المذهلة) والسجيل الغني بالمواد العضوية والتبخريات. ويأتي الانتاج الرئيسي من النفط والغاز من شعاب الديفوني (Klovan, 1974, Evans, 1972, Barss et al., 1970, Illing, 1959)، وفي رمال الفايكنغ Viking والكارديوم Cardium البحرية الضحلة (الطباشيري). ويُقدر الاحتياطي القابل للاستخراج بنحو ١٦.٣ مليار برميل من النفط ونحو ٩٤ ترليون قدم مكعب من الغاز (Ivanhoe, 1980).

ان أصل الحطام الفتاتي Terrigenous detritus مهم في الأحواض مثل حوض غرب كندا. وفي معظم الأوقات تنتج الرمال بالتجوية البطيئة للراسخ، متبوعة باعادة تدوير Reworking وترسيب في البيئات البحرية ذات الطاقة العالية بشكل رئيسي. وبذلك فان هذه الرمال ناضجة من الناحية المعدنية والنسيجية ولها قيم مسامية ونفوذية جيدة. ومع ذلك، عندما يرتفع القوس، فأنه يبدأ بتحرير الفتات الصخري الى حوض القوس الخلفي. أن هذا النوع الأخير من الرمال غالباً ما يكون غير ناضج من الناحية المعدنية، وخصوصاً اذا كان مشتقاً من الصخور البركانية. ولكونها ترسبت في بيئات نهرية دلتائية، فأن عدم



الخطوط الكنتورية بالكم على قمة البريكامبري

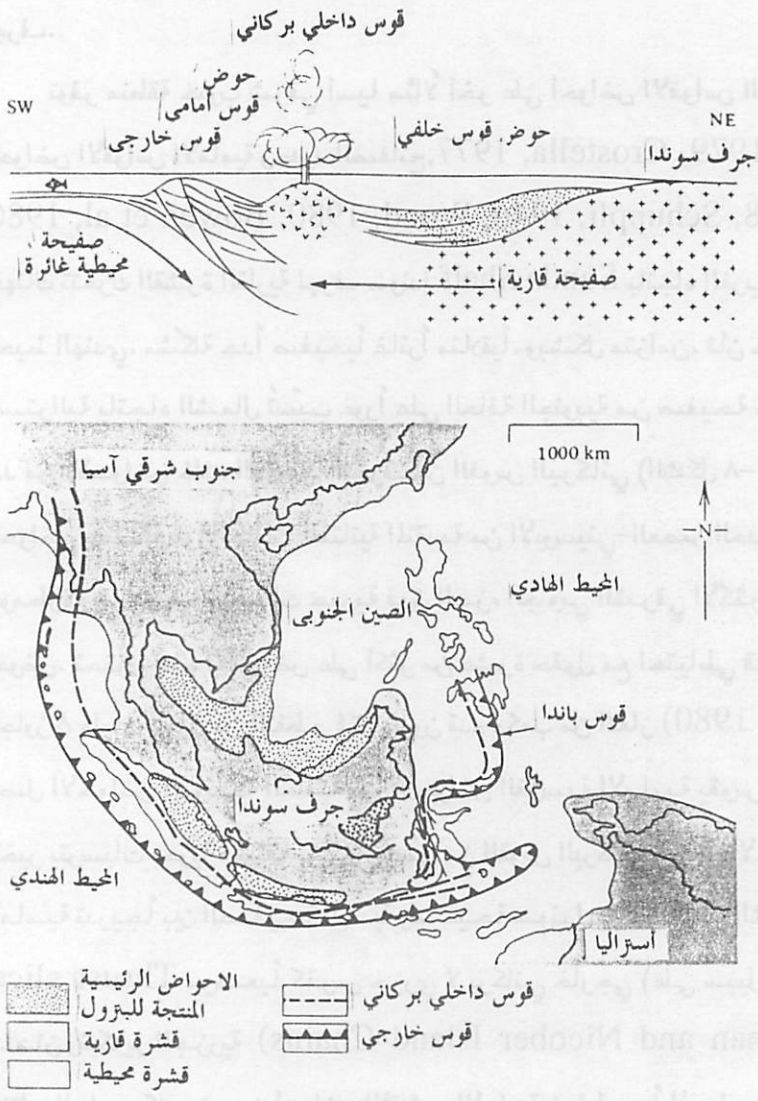




الشكل ٨-٢٠: خارطة ومقطع عرضي لمنخسف غرب كندا (البرتا) وهي مقاطعة هايدروكاربونية هامة في وضع قوس خلفي.

نضوجها المعدني والنسيجي قد يجعلها مكامن سيئة قياساً بالرمال الأولى المشتقة من الجرف.

توفر منطقة جنوب شرقي آسيا مثالاً آخر على أحواض الأقواس الخلفية وعلاقتها بأحواض الأقواس الأمامية وحدود الصفائح (Ranneft, 1979, Crostella, 1977, Haile, 1968, Schuppli, 1946, Wood, 1980, Bowen et al, 1980). فهناك تتحرك القشرة القارية لجرف سوندا Sunda Shelf باتجاه الغرب صوب صفيحة المحيط الهندي، مشكّلة حداً صفيحياً غائراً متلاقياً. وبشكل متزامن، فإن حركة الصفيحة الاسترالية باتجاه الشمال تُسبّب غوراً على الحافة الجنوبية من صفيحة سوندا. ويفصل عدد من الأحواض خلف القوسية الجرف من القوس البركاني (الشكل ٨-٢١). وتُملأ هذه الأحواض بسلسلة من الحافات الفتاتية المتقدمة من الأيوسيني-العصر الحديث في أحواض سومطرة وبورنيو مع ترسبات جيرية فوق الجزء الجنوبي الشرقي الأكثر استقراراً من الحوض. تحتوي هذه الأحواض على أكثر من عشرة حقول مع احتياطي قابل للاستخراج يتجاوز ٨ مليار برميل من النفط و ٢٤ ترليون قدم مكعب من الغاز (St. John, 1980). تُفصل الأحواض القوسية الخلفية عن الأحواض القوسية الأمامية بقوس بركاني. ويُملأ الأخير بترسبات بحرية مشتقة بشكل رئيسي من القوس البركاني. وتغور الأحواض القوسية الأمامية تدريجاً بين الصفيحة الهندية وصفيحة سوندا. وبذلك تظهر الشرائح الدسرية Thrust slices موضعياً كقوس جزري لا بركاني خارجي (على سبيل المثال سلاسل أندامان ونيكوبر الجزرية (Andaman and Nicober Island Chains). ان الانتاج الهايدروكاربوني من أحواض الأقواس الأمامية ضئيل جداً لأسباب عديدة، بضمنها الطبيعة البركانية الفتاتية للترسبات التي لا تحفظ المسامية بشكل جيد. والممالات الجيوحرارية الواطئة والتركيب المعقد (Kenyon and Beddoes, 1977).



الشكل ٨-٢١: مقطع عرضي وخارطة لجنوب شرقي آسيا يظهران العلاقة بين منخسفات القوس الامامي والقوس الخلفي. أن منخسفات القوس الخلفي هي الاحواض الرئيسية المنتجة للنفط (عن Haile, 1968; Crostella, 1977; Rannetft, 1979; Bowen et al., 1980 and Wood, 1980).

لأحواض الأقواس الخلفية امكانية جيدة لترسيب الصخور المصدرية المناسبة. ويُمكن أن يحتوي جرف بحري واسع على ترسبات طينية فريشية مترسبة أثناء فترات التقدم البحري. وعندما تتطابق هذه الترسبات الفريشية الطينية مع ارتفاع القوس لتكوين الحاجز، قد تنشأ ظروف محددة لا هوائية بسبب دوران الماء السيئ. أن السجيل الطباشيري الذي ترسب في الممر البحري العظيم الذي امتد من المنطقة القطبية الشمالية الى خليج المكسيك في أحواض الأقواس الخلفية في الروكي ماونتن يوضح هذه النقطة.

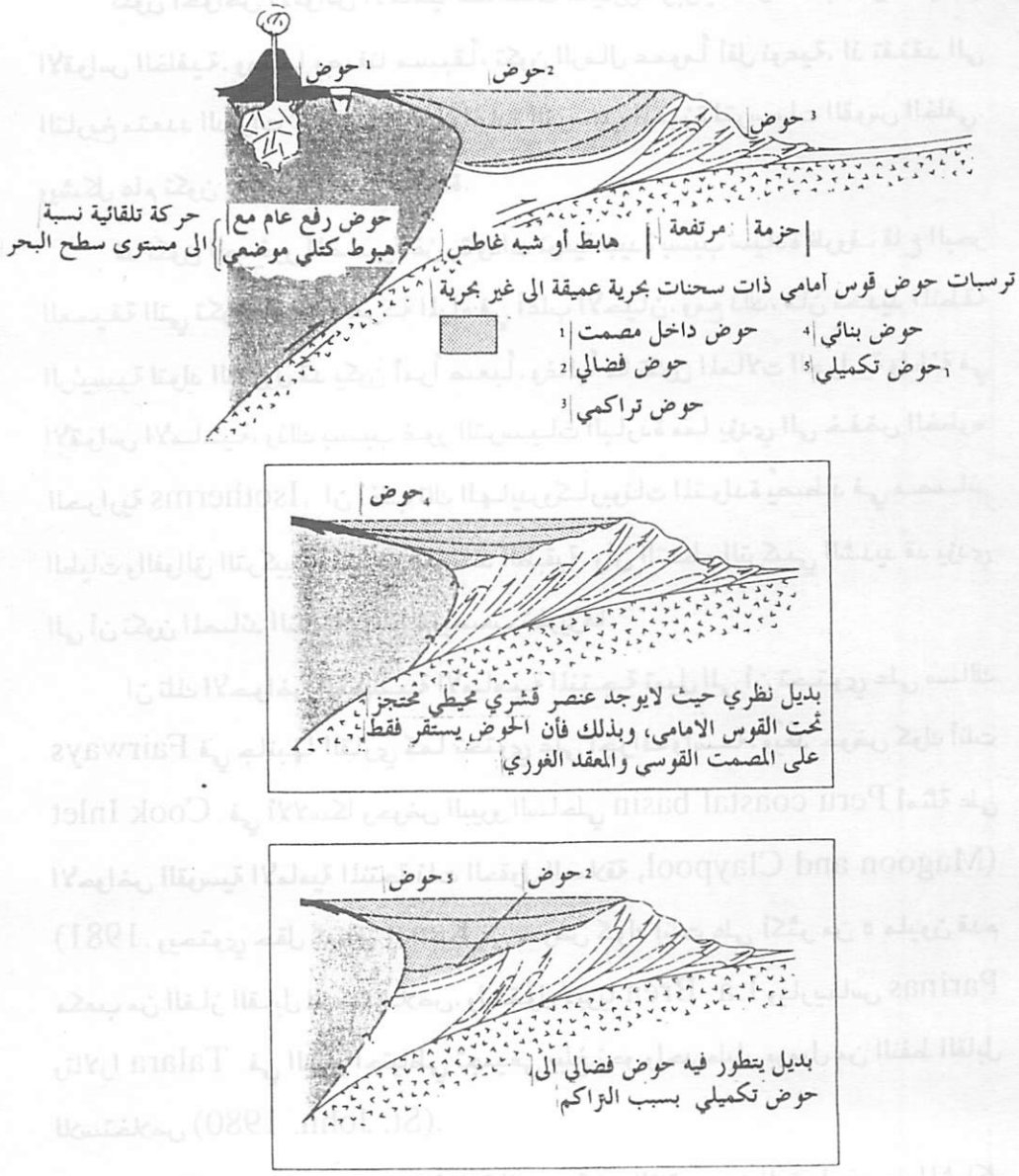
ان المصائد في أحواض الأقواس الخلفية متعددة ومتنوعة. فالطيات المحدبة التقليدية قد تنشأ بجوار مقدمة الجبال مثلما ناقشنا ذلك عندما تحدثنا عن ايران (ص ٣٥٥). ومن الناحية التقليدية، فلقد أهملت الأنطقة الدسرية في التنقيب عن الهايدروكاربونات، بسبب الاحتمالات البترولية المحتملة الفقيرة والمشاكل المتعلقة بالحصول على المعطيات الزلزالية وتفسيرها. ومع ذلك، وبتطور التقنية. فأن استكشاف الأنطقة الدسرية في تزايد، كما هو الحال، على سبيل المثال، في الأبلاشيان والروكي والألب (أنظر Backman, 1979) Anon, 1980, McCaslin, 1981) على التوالي). وبعيداً عن الأنطقة الدسرية، فأن الاصطياد قد يكون طبقياً، ويشمل ذلك الشعاب واحتمالات الرمال الشريطية فضلاً عن مصائد التراكب والقطع. أن مسالك مناطق الاحتمالات هذه قد تكون موازية لحافة الحوض أو أن تكّون هالات حول الأقواس الاقليمية.

بهذا الترابط من الصخور المكمنية المناسبة والصخور المصدرية وتنّوع المصائد، فأن ليس مدهشاً أن تكون أحواض الأقواس الخلفية، بشكل شائع، مقاطعات هايدروكاربونية رئيسية.

منخسفات الاقواس الامامية Fore-Arc Troughs

على النقيض من أحواض الأقواس الخلفية، فأن أحواض الأقواس الأمامية أكثر تعقيداً في كل من التركيب والسحنات. وبذلك فأنها أكثر تنوعاً سواءاً في طبيعتها ومقدار

انتاجيتها البترولية. ولقد أشرنا مسبقاً الى أحواض الأقواس الأمامية في شمال شرق المحيط الهندي. ولقد أعطى (Dickinson and Seely, 1979) تحليلاً مُفصلاً لأحواض الأقواس الأمامية، وأعادا النظر في احتمالاتها البترولية. ويُظهر الشكل (٨-٢٢) العناصر التركيبية الأساسية للقوس الأمامي. وقد تتوضع الترسبات الفتاتية في المنخسفات في مدى واسع من البيئات تتراوح من القارية الى البحرية العميقة. ومن الناحية المبدئية، تشتق الرمال من الصخور النارية الموجودة في الأقواس البركانية. وبذلك فأنها تميل الى أن تكون غير ناضجة من الناحية المعدنية وتفقد المسامية بمعدلات سريعة أثناء الدفن. ولقد لاحظ (Dickinson and Seely) أن للأقواس الأمامية طوبوغرافيات ذات أجراف Shelved و منحدرات Sloping وذات شرفات Terraced وذات بروزات Ridged. أن الأجراف العريضة تمكن الرمال من النضوج معدنياً ونسيجياً قبل الترسيب. وعلى النقيض من ذلك، فأن الأجراف الضيقة، تتميز بالترسيب السريع للرمل غير الناضج مع الحد الأدنى من اعادة الترسيب Reworking. وعندما تغور الصفائح المحيطية، فأن حافات الترسبات القوسية الأمامية تندفع نحو الأعلى Thrust up كي تكّون القوس الجزري غير البركاني الخارجي. ولسوف يتكّون هذا القوس من الحافة البعيدة من الموشور الرسوبي القوسي الأمامي Fore-Arc Sedimentary Prism الذي يتكّون الى حد كبير من ترسبات قاع المحيط. وبذلك فأن الشرائح الدسرية تتكّون من سربنتنايت متحوّل فضلاً عن الصوان والحجر الجيري الغوري وترسبات العكورة. وعندما يرتفع هذا القوس الخارجي، فأنه سوف يحرر ترسبات الى منخسف القوس الأمامي. ان عدم النضوج المعدني والترسيب السريع لهذه الرمال قد يُدّمر نوعيتها المكمنية كما هو الحال بالنسبة لتلك الترسبات المشتقة من القوس البركاني.



الشكل ٨-٢٢: مقطع عرضي خلال منخسف قوسي امامي نشأ حيث تراكبت صفيحة قارية على صفيحة محيطية غائرة. (عن Dickinson and Seely, 1979).

تكّون أحواض الأقواس الأمامية مقاطعات هايدروكاربونية أقل انتاجاً من أحواض الأقواس الخلفية. ومثلما وصفنا مسبقاً، تكون الرمال عموماً أقل نوعية، اذ تفتقد الى التاريخ متعدد الدورات Polycyclic واعادة الترسيب المميزة لترسبات القوس الخلفي. وبشكل عام تكون المكامن الجيرية مفقودة.

قد تكون الصخور المصدرية غزيرة وذات نوعية جيدة بسبب سيادة ظروف قاع البحر العميقة التي تكون محددة حركة المياه في أغلب الأحيان. ومع ذلك، فأن تحديد المنطقة الرئيسية لتولد البترول قد يكون أمراً صعباً. وغالباً ما تكون المالات الحرارية واطئة في الأقواس الأمامية، وذلك بسبب غور الترسبات الباردة مما يؤدي الى خفض الخطوط الحرارية Isotherms. ان أغلب تلك الهايدروكاربونات المتولدة يُصطاد في مصائد الطيات والفوالق التركيبية أكثر من المصائد الطبقية. وأن التحطم التركيبي الشديد قد يؤدي الى أن تكون المصائد الناتجة صغيرة ويصعب تطويرها.

ان تلك الأحواض القوسية الأمامية المنتجة تميل الى أن تحتوي على مسالك Fairways في جانبها القاري كما تحتوي على أجراف واسعة. ويُعّد حوض كوك أنلت Cook Inlet في ألاسكا وحوض البيرو الساحلي Peru coastal basin أمثلة على الأحواض القوسية الأمامية المنتجة ذات الحقول العملاقة (Magoon and Claypool, 1981). ويحتوي حقل كيناي Kenai في حوض كوك أنلت على أكثر من ٥ مليون قدم مكعب من الغاز القابل للاستخلاص. ولحقول لابريا La Brea وبارياس Parinas وتالارا Talara في البيرو احتياطي تجميعي يبلغ نحو واحد مليار برميل من النفط القابل للاستخلاص (St. John. 1980).

ولقد كان من المعتاد تجنب الأنطقة الدسرية في التنقيب عن البترول بسبب المشاكل المتعلقة بتفسير المعطيات الزلزالية في مناطق التعقيد التركيبي، وكذلك لأن المكامن لم يكن توقعها تحت الكتل المتحولة المنقولة Metamorphic nappes. ولقد تم حل المشكلة

الأولى الى حد كبير بمساعدة التقنيات الزلزالية الحديثة عالية القدرة التمييزية. أما المشكلة الثانية فلقد عُرف الآن أنها مجرد تصور خاطئ في العديد من الحالات، اذ تجدد الاهتمام بالتنقيب عن البترول في الأنطقة الدسرية في جبال الألب والروكي ماونتن والأبلاشيان في السنوات الأخيرة. وفي جميع هذه المناطق اخترقت الآبار كتلاً متحولة وصادفت ترسبات ذات احتمالات مكمنية وذات مستويات واطئة من نضوج الكيروجين بشكل ملحوظ (Bachmann et al., 1982, Lamb, 1980, Anon, 1980) ومن الأمثلة المحددة على هذا التواجد هو بئر فورديس Vordriss رقم واحد، الذي بعد اختراقه لكتل متحولة ذات قيم Ro تصل الى ٢، عُثر على قيم Ro تتراوح بين ٠.٥ الى ٠.٦ عند أعماق ٥ كيلومترات (Bachmann, 1979). وبذلك يتم استكشاف الأنطقة الدسرية بحماسة أكثر الآن من الماضي.

مجاميع أحواض الانهدام-الانزياح

THE RIFT-DRIFT SUITE OF BASINS

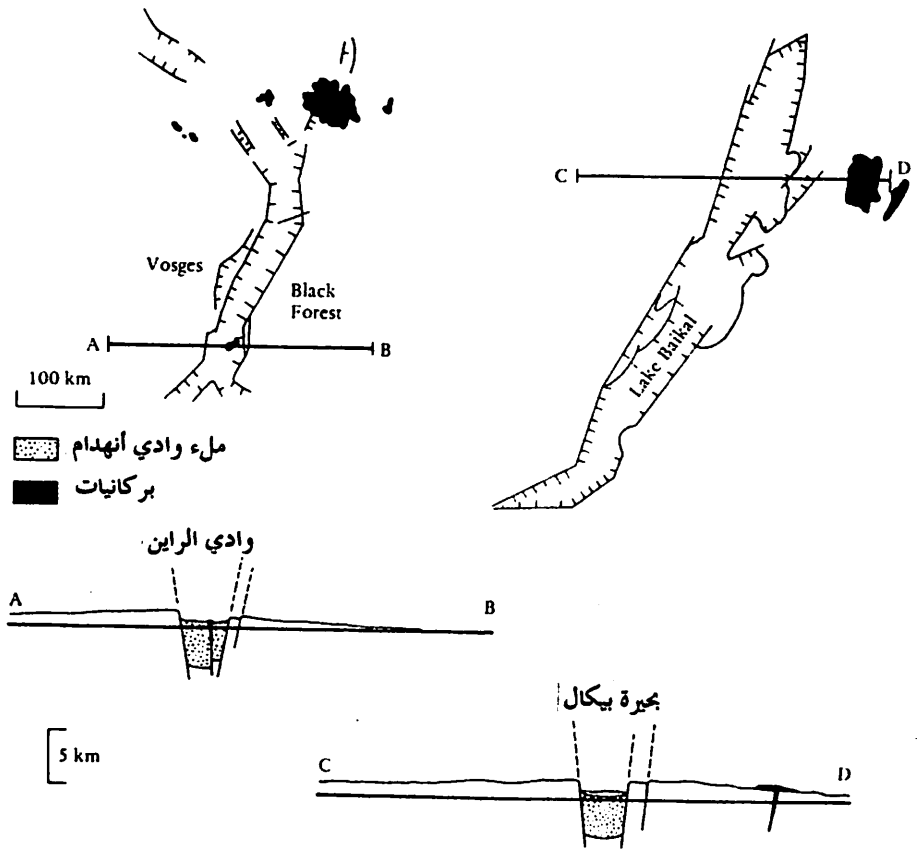
يُحاط حوض الانهدام Rift basin بمنظومة فوالق رئيسية. وتُحاط أحواض الزحف غير المتناظرة وأنصاف المنخسفات Half-grabens بمجموعة واحدة من الفوالق. وتُناقش مقدمة هذا الفصل كيفية نشوء أحواض الانهدام على نحو مميز على امتداد ذُرى الأقواس الاقليمية على القشرة الأرضية وذُرى البروزات نصف المحيطية التي تمثل محاور انتشار قيعان المحيطات. وتُوجد أحواض الزحف غير المتناظرة أو أنصاف المنخسفات على امتداد حافات العديد من القارات. وبشكل ملحوظ تلك التي تحد المحيط الأطلسي الشمالي والجنوبي. وتُظهر فكرة حركية الصفائح كيفية ارتباط هذه الأحواض نوعياً في ما يمكن تسميته بمجموعة الهدم-الانزياح. وسوف يتم وصف هذه الفكرة وفق تتابع تطوري في الفقرة التالية.

أحواض الانهدام Rifts

تُوجد أحواض الانهدام على امتداد البروزات وسط المحيطية، التي تُفسر الآن على أنها أنطقة انتشار قيعان المحيطات. وتتشكل هذه الأحواض استجابة للاجهاد الحاصل في القشرة عند انفصال الصفائح. وتُملأ المنخسفات الناتجة بصهارة بازلتية متبادلة مع أطيان بلاجية وحجر جيري وصوان. وبسب ملأها وموقعها الجغرافي، فأن أحواض انهدام البروزات وسط المحيطية ليست مناطق جذب للتنقيب عن الهايدروكاربونات.

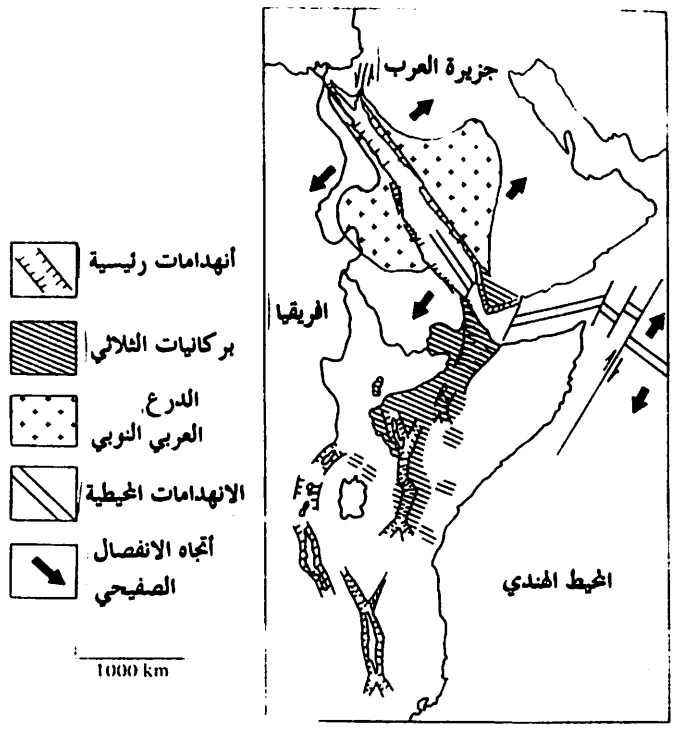
يُوجد عدد من أحواض الانهدام على القشرة القارية، بضمنها وادي الراين في ألمانيا وانهدام بيكال في روسيا (Salop, 1967, Illies and Mueller, 1970). يقطع كلا الحوضين مناطق من القشرة المتقوسة وتظهر ميلاً لأن تتفرع الى أحواض انهدام ضئيلة عند كلا من نهايتي الانهدام الرئيسي. وهي تُملأ بما يصل الى ٥ كيلومترات من الترسبات، وتحتوي على اقتحامات بركانية ترتبط معها (الشكل ٨-٢٣)، ومن الأحواض الأخرى المعروفة بالقدر نفسه، والشبيهه لهذه الأحواض في العديد من الأوجه، هي وديان الانهدام العظيم في أفريقيا. فمن المعروف أن وسط أفريقيا يُقطع بأحواض انهدام تمتد داخل اليابسة من نايجيريا الى موزامبيق والصومال وتتقاطع في السودان وتشاد والنيجر. وتتراوح هذه الأحواض في العمر بين الطباشيري والثلاثي المبكر، وهي مغطاة الى حد كبير بترسبات أحدث عمراً، لم تُعرف الاّ مبكراً، نتيجة للتنقيب عن البترول في هذه البلدان. وأكثرها وضوحاً هي سلسلة من أحواض الانهدام الحديثة في شرق أفريقيا (Baker et al., 1972, UNESCO, 1965, Veevers, 1981, Darrcott at al., 1973). أن أحواض الزحف هذه شبيهه بأحواض انهدام الراين والبيكال، وهي تُظهر تقبباً قشرياً مع نظام تصريف محلي معكوس Local reversal of drainage. وتتشعب أحواض الانهدام الرئيسية في نهاياتها، وهي فعالة بركانياً وزلزالياً، ومملوءة بالترسبات البركانية والنهرية والبحيرية من المايوسيني الى العصر الحديث. وعندما نتبع أحواض الانهدام باتجاه الشمال الشرقي صوب منخفض أومو Omo depression على

الساحل الأثيوبي من البحر الأحمر، فان الانهدام ابتدأ هناك مبكراً (الأيوسيني)، وكان تدفق الصهارة البازلتية واسع النطاق في الزمان والمكان، وتضم الترسبات ترسبات تبخرية واسعة (الشكل٨-٢٤).



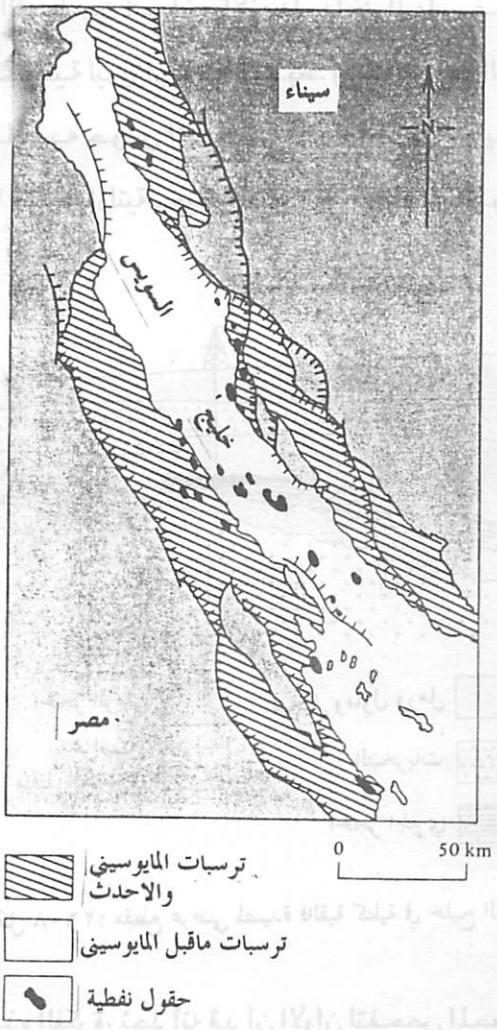
الشكل ٨-٢٣: خرائط ومقاطع عرضية لانهدام الراين في ألمانيا (اليسار) وأنهدام بحيرة بيكال في روسيا (اليمين). (عن Selley, 1975).

يمثل البحر الأحمر في حد ذاته حوض انهدام معقد يوفر علاقة نوعيّة بين أحواض الانهدام فوق الرواسخية التي وصفناها للتو وأحواض انهدام حافات المحيطات Ocean (Heybroek, 1965, Thieband and Robson, 1979, -margin rifts



الشكل ٨-٢٤: خارطة لشرق أفريقيا والبحر الاحمر توضح التحول من الانهدامات الداخل رواسخية في الجنوب الى الانهدامات المحيطية في الشمال.

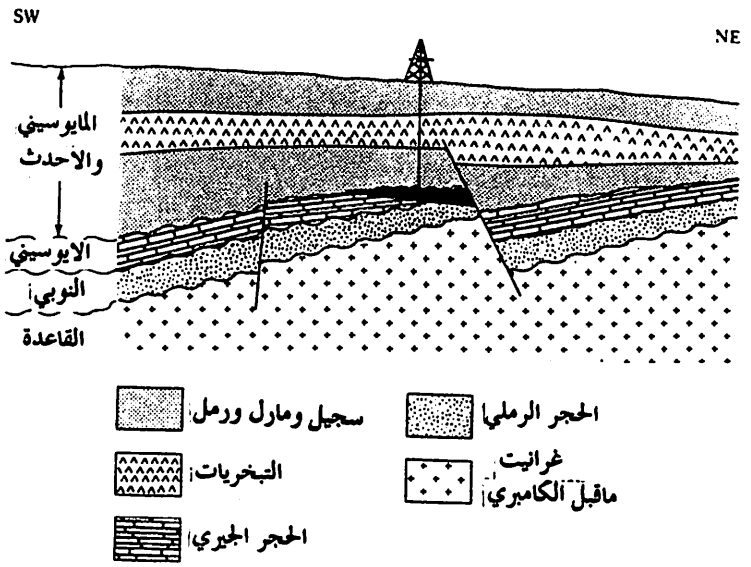
(Lowell at al., 1975, Lowell and Genik, 1972). ان حافتي البحر الأحمر هما نصفا منخسفين ذاتا حافتين متوازيتين، تكون رمية فوالقهما الرئيسية باتجاه البحر. وعلى جوانب الرمية العليا من الفوالق تتكشف صخور غرانيت الدرع العربي-النوبي مع أشرطة من الصهارة البازلتية بين الحين والآخر (الشكل ٨-٢٥). وضمن الأحواض الساحلية فان صخور الحجر الرملي النوبي من حقبة الحياة القديمة والحجر الجيري من الطباشيري والأيوسيني تقطع موضعياً على العديد من الكتل المتفلقة. أن قيعان هذه المرتفعات والمنخسفات الى الأحواض الساحلية تتراكب من قِبل تبخريات العصر المايوسيني، والحجر الجيري الشعابي والرمال الأحدث عمراً. ولقد تم اكتشاف العديد من حقول النفط في الصخور الجيرية والرملية وفي مكامن الحجر الرملي النوبي في الكتل المتفلقة في خليج السويس (الشكل ٨-٢٦).



الشكل ٨-٢٥: خارطة حوض أنهدام خليج السويس تظهر موقع الفوالق والحقول النفطية. (عن Thiebaud and Robson, 1979).

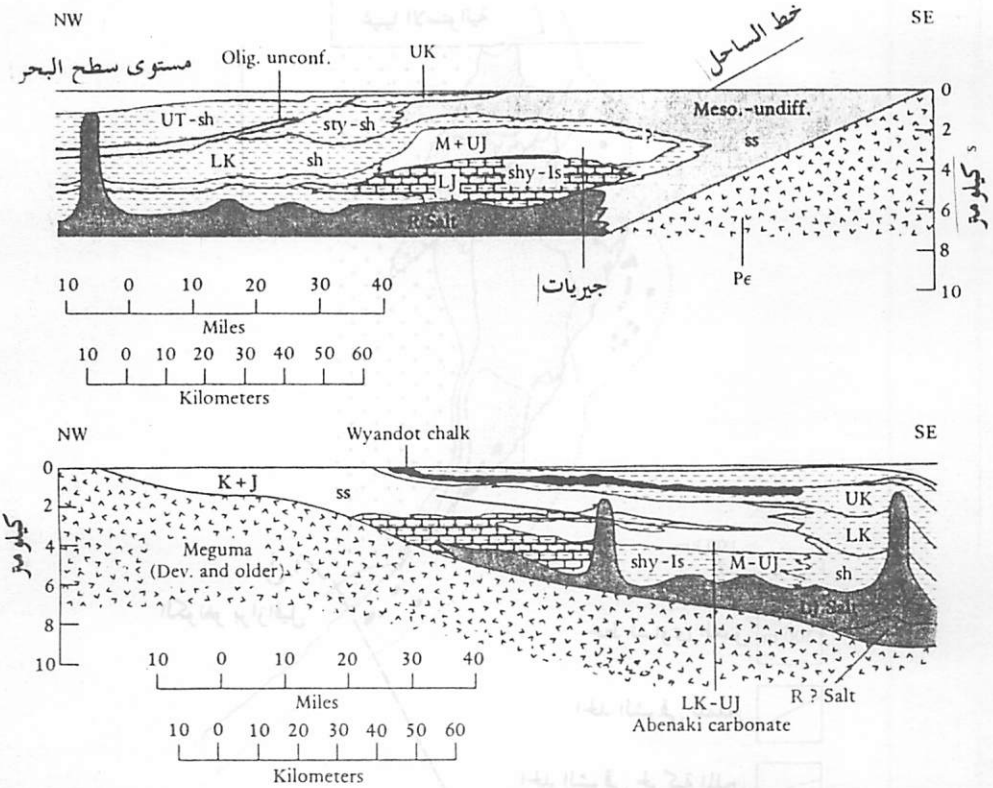
يتكّون الجزء الوسطي الأعمق من البحر الأحمر من قشرة محيطية بازلتية مع شريط من الترسبات البحرية العميقة الأحدث عمراً، فهي تحتوي على حوض انهدام محوري طولي يمكن تتبعه وهو مُزاح Offset بالعديد من الفوالق المستعرضة Transform Faults الى حوض الانهدام وسط المحيطي في المحيط الهندي (الشكل ٨-٧). وبذلك فأن البحر

الأحمر يوفر حلقة الوصل بين أحواض الانهدام داخل الرواسخية في شرق أفريقيا وأحواض الانهدام المحيطية لبروزات وسط المحيط. ويمكن أن يُعَدّ البحر الأحمر كحوض محيطي أولي ينفصل فيه حوض انهدام في الدرع العربي النوبي الى حوضين نصف منخسفين تنمو بينهما قشرة بازلتية محيطية جديدة في الوقت الحاضر.



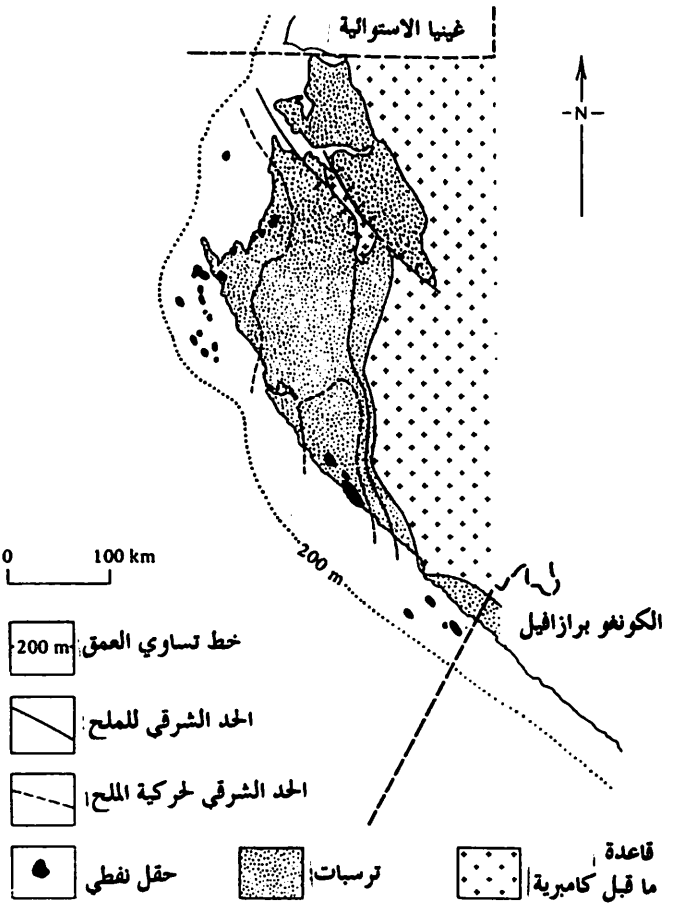
الشكل ٨-٢٦: مقطع عرضي لمصيدة فالقية كلية في خليج السويس.

متسلحون بهذه الفكرة، نجد أنه قد آن الأوان لتفحص المحيط الهندي. هنالك بروز واضح الملامح مع حوض انهدام محوري من المنطقة القطبية الشمالية خلال ايسلندا ومن ثم صوب المحيطين الأطلسي الشمالي والجنوبي قبل التوجه شرقاً الى المحيط الهندي (الشكل ٨-٦). أن جانبي المحيط الأطلسي من اللابرادور الى جزر فولكلاند ومن بحر بارينتز Barents Sea الى حاجز أوغلاس Agulhas Bank مُحاطة بأحواض نصف منخسف غير متناظرة تكون رمية فوالقها المحيطة الرئيسية السفلى باتجاه المحيط (Drake et al., 1968, Pratsch, 1978, Lehner and Ruiter, 1977, Burk and

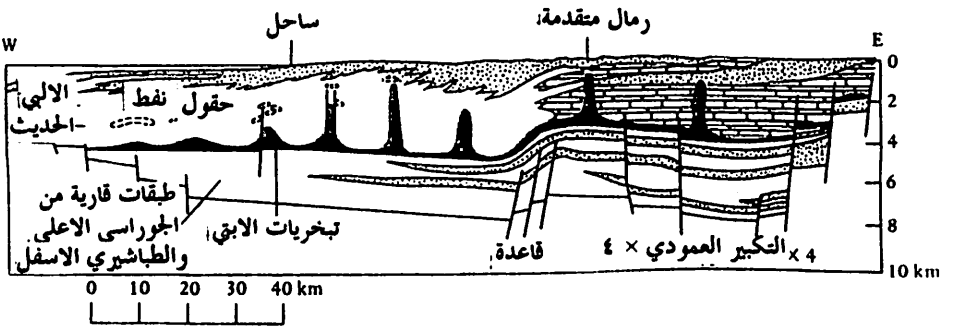


الشكل ٨-٢٧: مقطع عرضي خلال الجرفين القاريين المغربي (الاعلى) والسكوتلندي (الاسفل) يظهران تناظر التركيب وتشابه الطباقية لحوضي نصف المنخسفين على حافة المحيط الاطلسي. (عن Bhat et al., 1975).

(Drake, 1974, Emery, 1980, Hoc, 1979). تُظهر هذه الأحواض تشابهاً مثيراً في الطباقية وتناظر التركيب (الشكل ٨-٢٧). وحوض الغابون مثال معروف جداً وسوف يُستعمل كمثال محدد (Belmonte at al,. 1965, Vidal, 1980, Brink, 1974). أنه نموذج مثالي لهذا النوع من الأحواض من الناحية الجيولوجية، ولكنه غير اعتيادي في كونه مقاطعة هايدروكاربونية متواضعة (الشكلان ٨-٢٨ و ٨-٢٩). وتظهر الخطوط الزلزالية لأحواض الساحل الأطلسي أنها نصف منخسفات. ويُمكن تمييز سطحي عدم توافق رئيسيين. أحدهما بشكل عام هو العاكس الأوطأ القابل للرسم وهو متفلق بدرجة ملحوظة. أن هذا يؤشر بداية الانهدام. وتحت سطح عدم التوافق هذا، تُوجد القاعدة والترسبات النادرة السابقة للانهدام (Prerift Sediments).



الشكل ٨-٢٨: خارطة جيولوجية لحوض الغابون، مجمعة من مصادر مختلفة



الشكل ٨-٢٩: مقطع عرضي خلال حوض الغابون (عن Brink , 1974).

توضّعت الترسبات الفوقية أثناء الانهدام الفعّال. وهي تتكوّن الى حد كبير من فتاتيات قارية، ولكن عندما تهبط الكتل المتفلقة تدريجاً صوب القارة، ينشأ حاجز بين الانهدام والقشرة المحيطية الجديدة. وخلف هذا الحاجز قد يتكوّن سجيل بحيري سابروبولي Sapropelic في المناخات الرطبة. وفي مجموعة كوكوبيتش Cocobeach Group في حوض الغابون انتجت صخور السجيل هذه الهايدروكاربونات. ولكن في المناخات القاحلة، قد تتكوّن التبخريات في الحوض الخلفي، أن هذه التبخريات شائعة الوجود في أحواض المحيط الأطلسي الساحلية. وعندما فُتح المحيط من الشمال الى الجنوب، فأن بداية نشوء التبخريات تُصبح أحدث عمراً باتجاه الجنوب: أي العصر البرمي في شمال أوروبا والترياسي في حاجز جورجيس Georges Bank وأحواض السنغال، والجوراسي في خليج المكسيك والأبتي في أحواض البرازيل والغابون وكوانزا والكونغو (Evans, 1978).

يتوضّع سطح عدم التوافق الرئيسي الثاني فوق التبخريات. وهو يؤشر نهاية حالة الانهدام وبداية الانزياح عند توسّع المحيط الأطلسي. وتختفي فوالق الزحف عادة عند هذا السطح ما عدا عند حافة الحوض. وتبدأ الترسبات الفوقية بسجيل غني بالمواد العضوية ترسب عندما احتل البحر المحيط الأطلسي الذي كان في بداية تكوّنه ومن ثم غُطي هذا السجيل بترسبات أسفينية رئيسية. وفي بعض الأحيان تتكوّن هذه الترسبات من صخور جيرية مع تناقص ملحوظ من الحافة الجرفية الشعابية باتجاه المارل الحوضي. وبدلاً من ذلك، هنالك مواد فتاتية تتقدم حيث يتحول السجيل الحوضي فيها باتجاه الساحل ونحو الأعلى الى ترسبات عكورة وترسبات قارية وبارلية Paralic.

ان الأحواض من نوع نصف المنخسف هذا مع تتابعات من الانهدام-الانزياح شبيهة بتلك التي وصفناها للتو ليست محصورة بالمحيط الأطلسي فقط بل أنها تُوجد أيضاً حول المحيطات المفتوحة الأخرى. وتُعدّ هضبة اكسماوث Exmouth Plateau في شمال غرب استراليا مثالاً على ذلك (Exxon and Willcox, 1978). وبشكل تجميعي يُطلق

على هذه السواحل اسم أجراف قارية سالبة Passive أو زاحفة Trailing على النقيض من الأجراف القارية الفعّالة Active أو الهادئة Pacific حيث تُوجد الأقواس الغائرة.

أظهرت المراجعة السابقة أن أحواض الأطلسي الساحلية قد نشأت من أحواض الانهدام داخل الرواسخية التي نشأت على محاور الابتعاد القشري Crustal divergence وابتعاد مبدئي لقاع البحر. ولسنوات عديدة فان الأحواض من نوع سواحل المحيط الأطلسي بقيت تُستكشف فقط على امتداد حافاتها ذات الاحتمالات البترولية الأقل باتجاه أعلى الميل. وخلال السنوات القليلة الماضية أظهر التنقيب في المياه الساحلية أن العديد من هذه الحافات يحتوي على احتياطي ملموس من النفط والغاز، وتضم المصائد الكتل المتفلقة الملتوية (مختومة بالتبخريات أو سطوح عدم التوافق الناتجة من الانزياح) والقباب الملحية والطيات المحدبة المتجعّدة فوق مرتفعات القاعدة. ولأسباب ما تزال غير واضحة، يبدو أن معظم الأحواض المنتجة يقع في نصف الكرة الجنوبي.

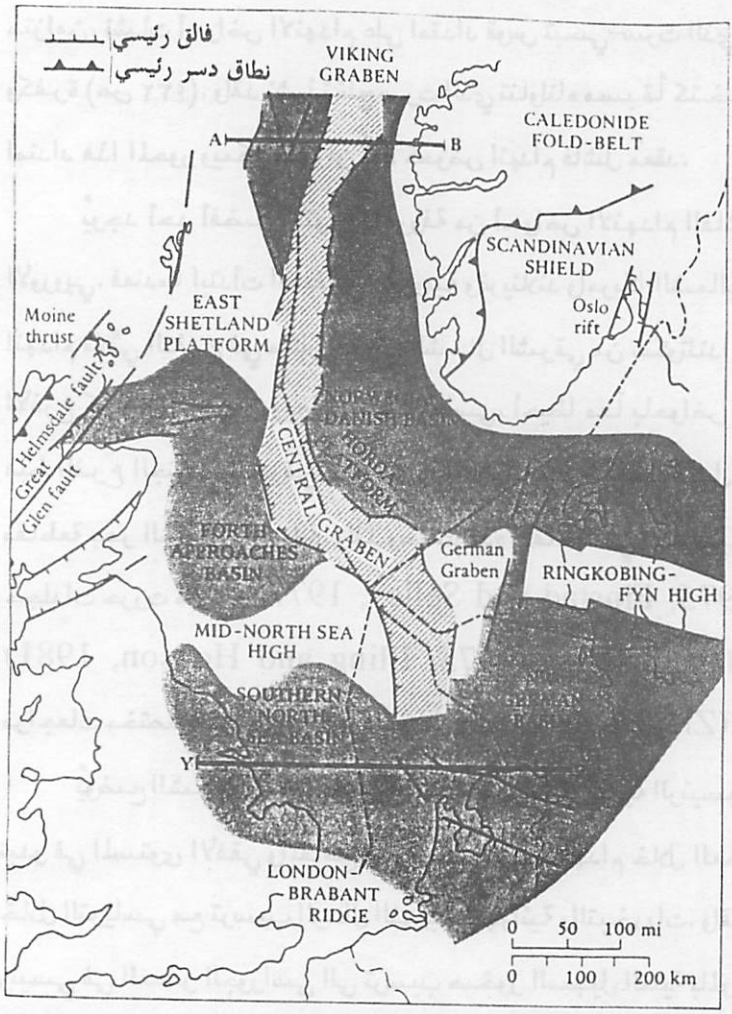
أحواض الانهدام الفاشلة: الأولاكوغينات: Failed Rift Basins: Aulacogens

هنالك نوع أخير من أحواض الانهدام يجب تناوله. ولقد لوحظ مسبقاً أن أحواض الانهدام داخل الرواسخية تخلق نمطاً ثلاثي التفرع Triradite Pattern وغالباً ما يكون ذلك مصحوباً بانهدام ثلاثي Triple-rift أو تفرعات عند نهاية كل انهدام رئيسي. وعندما تنفصل القشرة منسحبة عن بعضها، فأن انهدامين فقط من تفرع الانهدام الثلاثي ينفصلان في الحقيقة ويتحولان الى أنصاف منخسفات حافية محيطية. ولقد فشل أحد أحواض الانهدام في الانفتاح. أن أحواض الانهدام المجهضة هذه التي تُسمى أيضاً الأذرع الفاشلة أو الأولاكوغينات، هي أهداف أولية للتنقيب عن البترول وتستحق تفحصاً ممعنا. أن منخسف بنيو في نايجيريا الذي ذكرناه مسبقاً، هو ذراع فاشل لتفرع الانهدام الثلاثي تطور على موضع دلتا النيجر الحالي. وعندما ابتدأت قارة بانغيا الجنوبية القديمة

في التكسر، نشأت أحواض الانهدام من منخسف بنيو شمالاً الى النيجر وتشاد. وعلى نحو متزامن، نشأت أحواض الانهدام على امتداد قوس تبسي-سرت الذي فصل حوض مرزوق وكفرة (ص ٤٣٢). ولقد نشأ تخلج سرت الذي تناولناه مسبقاً كتخلج فوق رواسخي على امتداد هذا المحور ويمكن بذلك أن يُعَدّ كحوض انهدام فاشل مُعقد.

يُوجد أحد أفضل الأنواع المعروفة من أحواض الانهدام الفاشلة في بحر الشمال الأوروبي. فعندما ابتدأت الصفائح الأوروبية وغرينلاند وأمريكا الشمالية في الانفصال، نشأ انهدام ثلاثي التفرع في مكان ما الى الشمال الشرقي من سكوتلندا. فُتح فرعان من هذه الأذرع كي يكوّنا بحر النرويج والمحيط الأطلسي، أحيطا معاً بأحواض نصف منخسفة. ولقد هبط الفرع الجنوبي الشرقي من الانهدام ثلاثي التفرع ولكنه فشل في الانفتاح، مكوناً مقاطعة بحر الشمال البترولية. ولقد وُصفت هذه المقاطعة في العديد من الأوراق العلمية في مجلدات حُررت من قِبل (Woodland, 1975, Finstad and Selley, 1977, Finstad and Selley, 1975, Illing and Hobson, 1981). وأعطيت مراجعات مختصرة من قِبل (Ziegler, 1975, Selley, 1976).

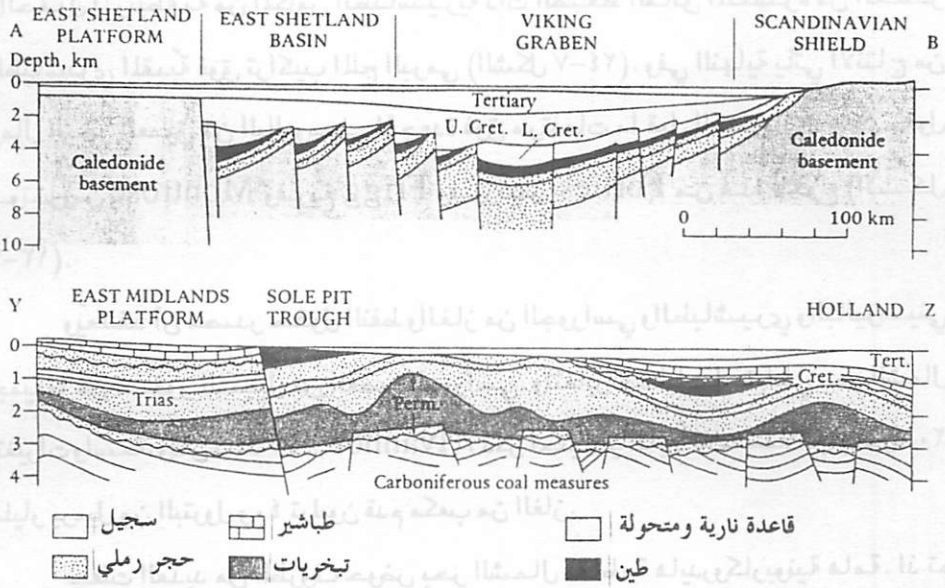
يُوضح الشكلان (٨-٣٠) و (٨-٣١) الملامح التركيبية الرئيسية لبحر الشمال كما تبدو في المستوى الأفقي والمقاطع العرضية. ابتدأ الانهدام خلال العصر البرمي واستمر خلال الترياسي مع ترسيب الرمال النهرية والهوائية والتبخريات. ولقد أدى تراجع بحري رئيسي في العصر الجوراسي الى ترسيب صخور السجيل الغنية بالمواد العضوية والرمال البارلية. وباستمرار الانهدام ولدّت الأجراف Scraps المتفلقة تحت البحرية على امتداد حافات الزحف الحجر الحصوي وترسبات العكورة على قاع البحر. وعند نهاية الجوراسي، أشّر سطح عدم توافق رئيسي، يُطلق عليه الحادث الكميريانيCimmerian event، نهاية الانهدام وبداية الانزياح عندما انفتح المحيط الأطلسي الى الغرب. ولقد تراكبت صخور الرمال والسجيل من الطباشيري الأسفل على كتل ما قبل الكميرياني المتفلقة. ولهذه



الشكل ٨-٣٠: خارطة لبحر الشمال تظهر العناصر التركيبية الاساسية. أن هذه المقاطعة الهايدروكاربونية الرئيسية لهي مثال على منظومات الانهدام الفاشلة التقليدية.

الكتل ارتفاع تركيبي ملموس، وتعرّضت موضعياً الى تعرية على ذُرى التراكيب. ولقد سمح السكون الذي حدث خلال الطباشيري المتأخر بالترسيب واسع النطاق للطباشير الكوكوليثي.

بينما سبّب الانهدام المتجدد خلال الباليوسيني الى القاء ترسبات الطباشير العكرة ومزيج من الترسبات في المنخسف الوسطي، ولقد تبع ذلك تقدم معقد دلتائي رئيسي نحو الشرق والجنوب الشرقي من اسكوتلندا. ولقد ترسبت رمال قنوية تحت بحرية ومراوح عكورة عند أسفل المعقد الدلتائي. واستمر الحوض بالامتلاء بالأطيان البحرية، وبين الحين والآخر، برمال بحرية ضحلة حتى يومنا هذا.



الشكل ٨-٣١: مقاطع عرضية خلال بحر الشمال. المواقع ظاهرة في الشكل ٨-٣٠.

يحتوي بحر الشمال على أربع مناطق احتمالات هايدروكاربونية رئيسية. ففي حوض جنوب بحر الشمال يُوجد الغاز في الطيات المحدبة المتفلقة كتلياً تحت ملح زيخشتاين من البرمي الأعلى. والمكمن هو رمال الكثبان الرملية من البرمي الأسفل، وتوفر طبقات الفحم من العصر الكاربوني في الأسفل المصدر لهذا الغاز. وتحتوي منطقة الاحتمالات هذه العديد من الحقول الغازية من فئة الحقول العملاقة، بضمنها غرونننغن Groningen، وهيوت Hewett وليمان Leman و أندفاتيغابل Indefatigable. وتُوجد منطقة الاحتمالات

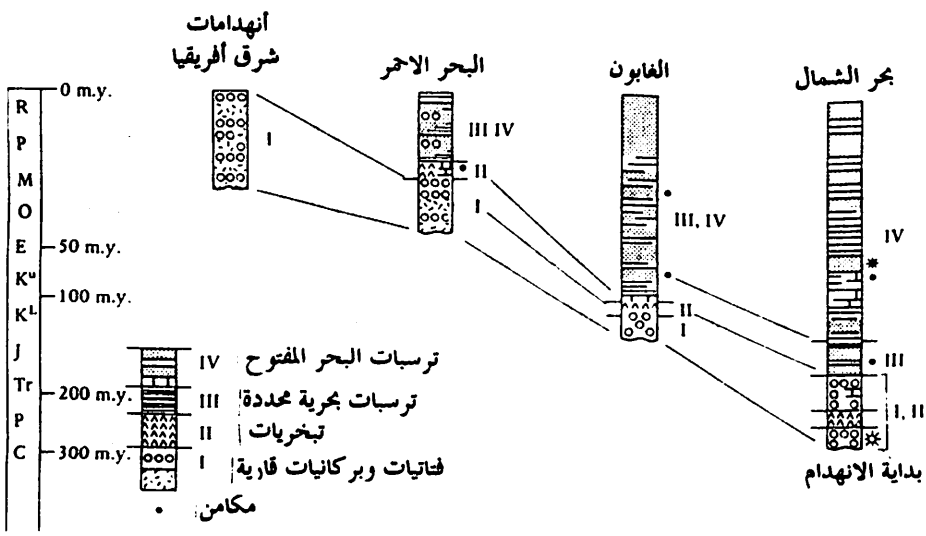
الرئيسية الثانية في رمال الجوراسي في الكتل المتفلقة الملتوية المختومة بصخور السجيل والحجر الجيري من العصر الطباشيري التي تتراكب فوق سطح عدم توافق الكيمرياني.

وتعُد حقول برنت Brent وستاتفيورد Statfjord وبايبر Piper وهيثر Heather من هذا النوع (الشكل ٧-١٦). وتُوجد منطقة الاحتمالات الرئيسية الثالثة في المنطقة الساحلية الجنوبية الغربية من النرويج. وهناك ينتج حقل ايكوفسك Ekofisk والحقول المرتبطة به من المكامن الطباشيرية ذات الضغط الفائق المتكسرة من العصر الطباشيري المقببّة فوق تراكيب الملح البرمي (الشكل ٧-٢٤). وفي النهاية يأتي الانتاج من رمال البحر العميق من الباليوسيني المجعّدة فوق مرتفعات ما قبل الكمبرياني. وتُعّد حقول مونتروس Montrose وفريغ Frigg وفورتيس Forties من هذا النوع (الشكل ٧-١٣).

ويُعتقد أن مصدر حقول النفط والغاز من الجوراسي والطباشيري والباليوسيني جميعها من صخور السجيل من العصر الجوراسي. وتتغاير حسابات احتياطي بحر الشمال تغيرات واسعة، ولكن (Ivanhoe, 1980)، ذكر احتياطياً قابلاً للاستخلاص بحدود ٢٠ مليار برميل من البترول و٤٠ ترليون قدم مكعب من الغاز.

جعلت العديد من الظروف حوض بحر الشمال مقاطعة هايدروكاربونية هامة. اذ تم توفير المكامن الممتازة ممثلة بالرمال متعددة الدورات Polycyclic sands التي غالباً ما تحتوي على مسامية غسل تحت سطح عدم التوافق Subunconformity-Leached Porosity. وتتداخل طبقات مصدرية سميكة غنية ضمن محور الانهدام مع المكامن التحتية. والمصائد عديدة ومتغايرة، وتضم المرتفعات وترابط قطع الكتل المتفلقة والقبب الملحية وطيات الرُّص المحدبة. ورغم أن الممالات الجيوحرارية هي قرب المعدل في الوقت الحاضر، فانها كانت مرتفعة بشكل استثنائي في يوم من الأيام مما ساعد على تولد الهايدروكاربونات وهجرتها.

لذلك فأننا نستطيع أن نلاحظ أسباب فشل أحواض الانهدام في تكوين مقاطعات بترولية رئيسية. ولقد أظهر (Schneider, 1972) أن تتابعات منتظمة من السحنات تميل الى التواجد ضمن مجموعات الانهدام-الانزياح من الأحواض. المرحلة الأولى، عندما كان الانهدام ما يزال فوق مستوى سطح البحر، وتتكوّن من فتاتيات قارية غالباً ما ترتبط مع البركانيات. وفي النهاية وصل قاع الانهدام الهابط مستوى سطح البحر. أن هذه الظروف تشجع ترسيب التبخريات عندما يتذبذب سطح المنخسف فوق وتحت مستوى سطح البحر. وعندما يغطس قاع الانهدام، تُغطى التبخريات بأطيان بحرية غنية بالمواد العضوية مترسبة في منخسف محدد حركة المياه. وفي النهاية، فأن الانهدام يتوسع متحولاً الى بحر مفتوح، وتتراكم الأجراف الجيرية والحافات الفتاتية المتقدمة على قاع الانهيار القديم على القشرة المحيطية. ويُظهر الشكل (٨-٣٢) كيفية تطبيق هذا التتابع المثالي على أمثلة تتابع الانهدام-الانزياح من الأحواض التي وصفناها للتو.



الشكل ٨ - ٣٢: مقاطع مقارنة خلال أحواض أنهدام متنوعة تظهر التتابعات الرسوبية المميزة وتوزيع الصخور المصدرية.

احواض الانزلاق المضربي Strike-Slip Basins

استعرضنا الآن أنواع الأحواض المختلفة المرتبطة مع حدود الصفائح الملتقية والمتباعدة. ولكن بعض حدود الصفائح تكون عرضية Transcurrent وتخلق نوعاً مميزاً من أحواض الانهدام. وتُحدّد حافات الصفائح المستعرضة بفوالق ملتوية Wrench رئيسية. وعندما تتحرك أمام بعضها، فأن من النادر أن تكون الحركة متوازية كلياً، اذ أن مكونة مائلة تُسبب عادة انضغاطاً قشرياً. وبشكل مشابه، فأن الحالات الانضغاطية قد تتبادل مع حالات من الانفصال. وتحدث هذه التغيرات في كل من الزمان والمكان. وبذلك، على سبيل المثال، فأن بالامكان تتبع حد صفيحة البحر الأحمر المتباعدة باتجاه الشمال الشرقي نحو انهدام البحر الميت. ولقد فهمت الطبيعة المستعرضة لفوالق البحر الميت من أيام الانجيل الى وقتنا الحاضر (أنظر نبوءة زكريا، الفصل الرابع عشر، الآية ٤ ، Quennell, 1958, على التوالي). وعلى النقيض من ذلك فأن فالق سانت أندرياس المعكوس في كاليفورنيا يمرُّ الى حدود صفائح انضغاطية عند كلا النهايتين (الشكل ٨-٦).

تُؤدي منظومات الفوالق المستعرضة الى تكّون أنواع متميزة من أحواض الانهدام، وأحواض الزحف هذه عموماً عميقة جداً، تهبط بسرعة، ولها معدلات من الانسياب الحراري المرتفع. ويُعَد انهدام البحر الميت مثالاً على ذلك. ويبلغ طوله نحو ١٥٠ كيلومتر وعرضه نحو ١٥ كيلومتر. ولقد قُدّرت الازاحة العرضية-اليسارية بحدود ٧٠ الى ١٠٠ كيلومتر (Wilson, Kashai and Croker, 1983). ولقد حدث هبوط يتجاوز الستة كيلومترات منذ فترة المايوسيني. ولقد عُرف وادي البحر الميت منذ فترة طويلة بنضوحاته البترولية، مما يؤدي بين فترة وأخرى الى تحرر كتل طافية من الاسفلت (Nissenbaum, 1978). ومن المؤمل العثور على كميات تجارية من النفط ضمن حافات الانهدام.

وعلى النقيض من ذلك فان أحواض الانزلاق المضربي المرتبطة مع منظومات الفوالق

« وتقف قدماه ذلك اليوم على جبل الزيتون الذي قبالة أورشليم من الشرق فينشق جبل الزيتون من نصفه نحو الشرق ونحو الغرب وادياً عظيماً جداً وينفصل نصف الجبل الى الشمال ونصفه الى الجنوب » - هامش المترجم.

المستعرضة في كاليفورنيا هي ذات احتمالات بترولية عالية جداً (الشكل ٨-٣٣). أن هذه الانهدامات بشكل رئيسي ذات عمر ثلاثي متأخر. وهي تتميز بتتابعات سميكة (أكثر من ١٠ كيلومتر) من الفتاتيات المترسبة بسرعة التي يتحول فيها السجيل الأبسالي (الصخور المصدرية) خلال مراوح تحت بحرية سميكة (المكامن) الى ترسبات بارلية وقارية. وغالباً ما تكون الأحواض غير متناظرة يترسب فيها حجر حصوي طموي وتحت بحري بجوار فوالق الحدود الفعّالة (Crowell, 1974). ويصطاد البترول في الطيات المحدبة المتفلقة من نوع تركيب الوردة والطيات المتناسقة en echelon (أنظر ص ٢٩٢) ولقد أُعطيت أمثلة على هذا النوع في (Weeks, 1958). والاصطياد الطبقي في القنوات والمراوح تحت البحرية أقل شيوعاً (ص ٣٠٢). أن الاحتياطي القابل للاستخلاص النهائي المقدّر في أحواض كاليفورنيا هو أكثر من ١٥ مليارBOE (St. John, 1980), . ويُمكن العثور على معلومات اضافية عن أحواض الانزلاق المضربية في (Reading, 1972).

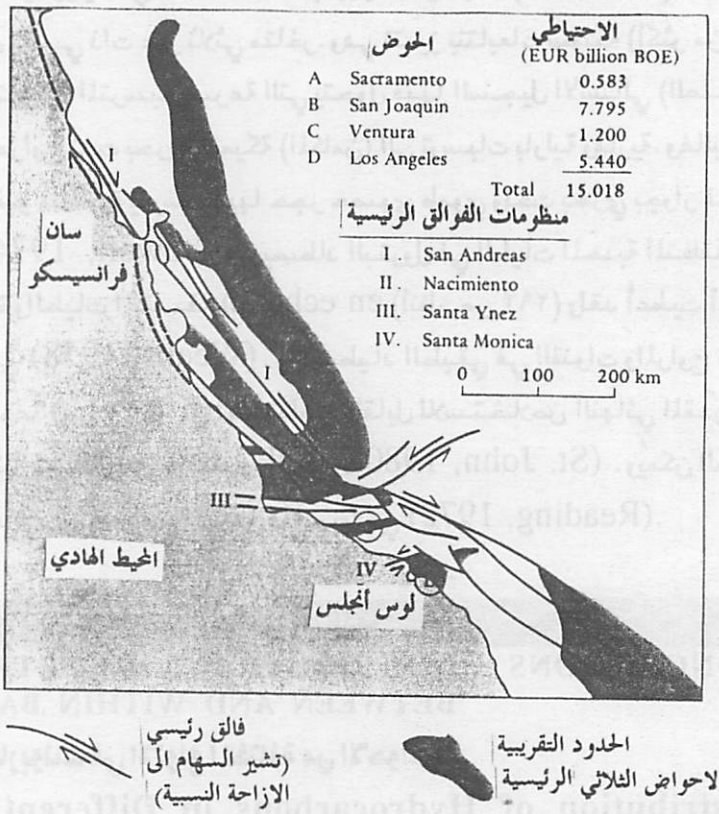
الاستنتاجات: توزيع البترول بين الأحواض وداخلها

CONCLUSIONS :DISTRIBUTION OF PETROLEUM BETWEEN AND WITHIN BASINS

توزيع الهايدروكاربونات في الأنواع المختلفة من الأحواض

Distribution of Hydrocarbons in Different Types of Basin

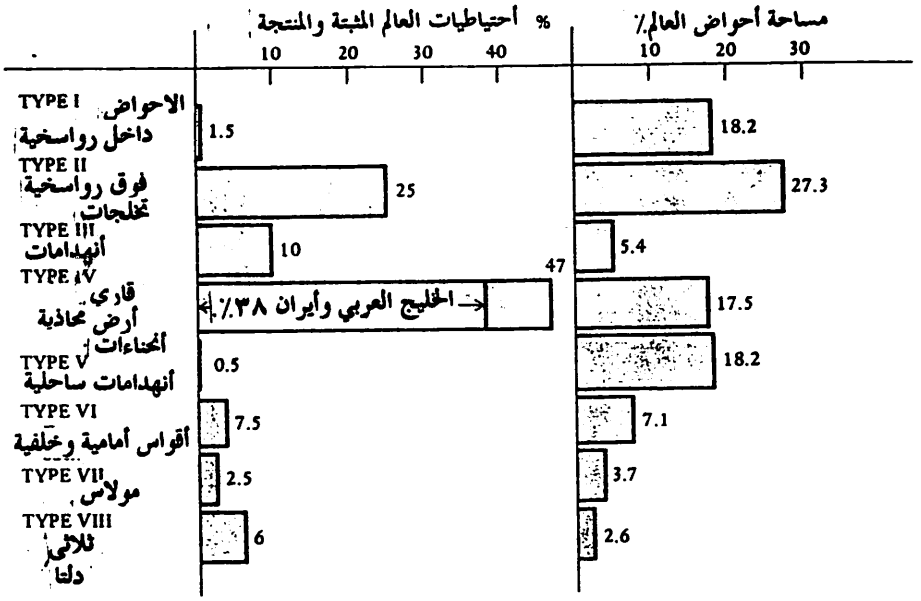
استعرض الجزء السابق من الفصل أنواع الأحواض المختلفة وتناول بالتحليل الظروف التي تؤثر على قدرتها في التحوّل الى مقاطعات هايدروكاربونية رئيسية. ولقد استعرض العديد من الجيولوجيين نوعياً التوزيع العالمي للاحتياطي الهايدروكاربوني. أن هذه المراجعة يمكن أن توفر دليلاً مرشداً الى التنقيب المستقبلي من خلال تأسيس الانتاجية النسبية للأنواع المختلفة من الأحواض (Klemme, 1975, 1980, Halbouty et al., 1970).



الشكل ٨-٣٣: خارطة لجزء من كاليفورنيا تظهر أحواض الانزلاق المضربي الرئيسية والفوالق المرتبطة معها.

يُمثل الشكل (٨-٣٤) المعطيات المستقاة من دراسة Klemme عن التوزيع العالمي للهايدروكاربونات في الأحواض المختلفة. أن تصنيفه للأحواض الرسوبية يختلف بعض الشيئ عن التصنيف الذي أُستعمل في هذا الفصل، وهو لا يرتبط أيضاً بدقة مع نسخته المبكرة (أنظر الجدول ٨-١)، ولكن الرقم يُظهر العديد من الملامح المثيرة للانتباه. لاحظ بشكل خاص أن الخليج العربي الذي يحتوي على ٣٨ بالمئة من الاحتياطي العالمي (Ivanhoe, 1980) له تأثير رئيسي على النوع IV أي شعبة الانثناءات المحاذية

القارية Continental borderland downwarp. عند دراسة هذه الأرقام، تذكّر أنها لا تدل على توزيع الاحتياطي الحقيقي بل الاحتياطي المعروف فقط. وبذلك فأنها تعكس عوامل الجغرافية والاقتصاد والسياسة والتقنية، فضلاً عن قدرتنا كاستكشافيين.



الشكل ٨-٣٤: مرتسمات تكرارية تقارن بين المساحة السطحية للانواع المختلفة من الاحواض الرسوبية وأحتياطياتها البترولية المعروفة. (أعتمادا على معطيات من Klemme, 1980).

لاحظ بشكل خاص أن النسبة المئوية للاحتياطي الموجود في دلتاوات العصر الثلاثي والأحواض الساحلية سوف تزداد بتوسع التنقيب في المياه الاقليمية ليشمل المياه الأعمق فالأعمق.

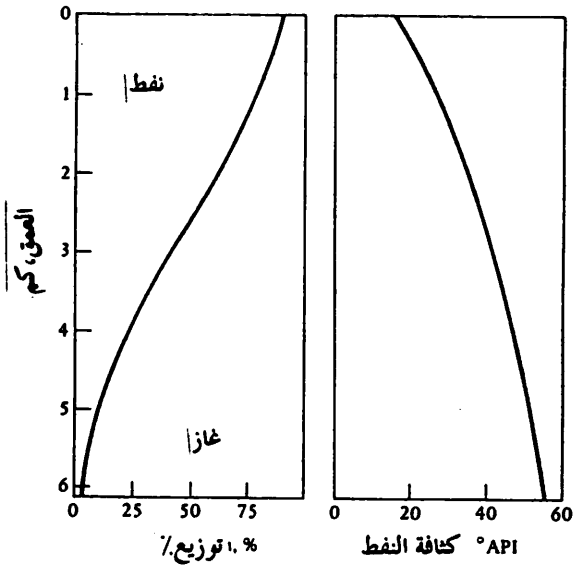
توزيع الهايدروكاربونات ضمن الاحواض

Distribution of Hydrocarbons Within Basins

يميل كل من النفط والغاز الى التواجد في الأحواض الرسوبية وفق نمط منتظم. فاذا ما تصورناها بشكل عمودي، فان كثافة النفط تتناقص مع العمق. فالنفط الثقيل يميل الى التواجد في الأعماق الضحلة، ومع زيادة العمق، يتحوّل الى نفوط خفيفة ثم مكثفات وبالنتيجة الى الغاز وصولاً الى النقطة التي تختفي فيها الهايدروكاربونات والمسامية. ولقد قام (Hunt, 1979) بأخذ جميع المعلومات المتعلقة بكثافات النفط (وحدات API) من موسوعة البترول العالمية طبعة ١٩٧٥ كي يرسم خطاً بيانياً يظهر في الشكل (٨-٣٥). أن هذا الشكل يحمل العبارة التي ذكرناها للتو. ورغم أن وحدات معهد البترول API تزدادا مع العمق (تقل الكثافة)، فان العديد من الظروف الموضعية قد يُخرّب هذا النمط، على سبيل المثال، وجود العديد من الصخور المصدرية في حوض معين، وانسياب الهايدروكاربونات على امتداد الفوالق، والغسل والتحلل والرفع والتعرية.

يميل النفط الى أن يُصبح أخف لا باتجاه الأسفل حسب بل عرضياً أيضاً باتجاه مركز الحوض. ومن الناحية النموذجية، يُوجد النفط الثقيل حول حافات الحوض، بينما تُوجد المكثفات والغاز في وسطه. أن سبب أو أسباب هذه التغيرات العمودية والأفقية للغاز والنفط لهي ذات أهمية ملموسة. ولقد قدم تفسير عبقري من قِبل (Gussow, 1954) ومنذئذ لاقى القبول باسم مبدأ غسّو.

ويُمكن تلخيص هذه النظرية باختصار على النحو التالي: تصوّر حوضاً رسوبياً معيناً، تمتد الى حافاته العليا طبقات مكمنية نفاذة مستمرة تحتوي على العديد من المصائد. وتصوّر أيضاً أن الهايدروكاربونات، النفط والغاز، يهاجران من "مطبخ الشيطان" الى مركز الحوض العميق صعوداً الى حافاته". عند وصوله الى المصيدة الأولى، فأن الغاز يُمكن أن يزيح كل النفط الذي سوف يُجبر تحت نقطة الانسكاب ومن ثم الى الأعلى باتجاه المصيدة التالية حيث سوف تُعاد العملية ذاتها مرة أخرى. وفي النهاية، فأن كل الغاز يتم الاحتفاظ

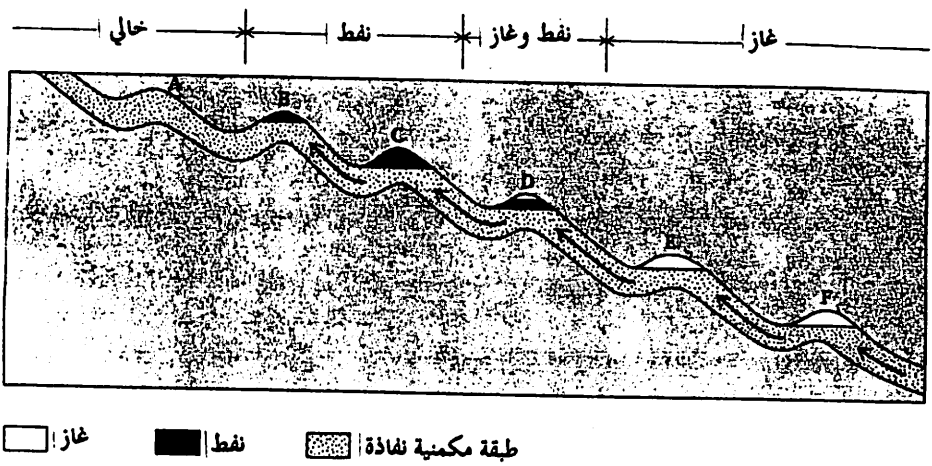


الشكل ٨-٣٥: التنوع العمودي في توزيع كثافات النفط والغاز. أن هذه المنحنيات أعدت من معطيات موسوعة البترول العالمية طبعة ١٩٧٥. ولهذه الاتجاهات الكرنية العديد من الاستثناءات المحلية. (عن Hunt, 1979).

به، وبذلك تكون هنالك مصيدة ذات قبعة غازية وعمود نفطي. وسوف تكون المصيدة مملوءة الى نقطة الانسكاب، وسوف يهاجر النفط المُجبر الى ما تحت نقطة الانسكاب الى الأعلى مالئاً مصيدة بعد أخرى حتى يتم احتواء جميع النفط. ولن تُملأ المصيدة النهائية الى نقطة الانسكاب، وأن أية مصائد اضافية قد تكون أعلى تركيبياً سوف تبقى فارغة (الشكل ٨-٣٦).

لقد أشرنا مُسبقاً الى أن بعض الحقول تُظهر انفصالاً جذبياً للنفط (ص ٣٤٨). لذلك فليس من الصعب التصور بأن مبدأ غسو لا يُفسر التوزيع العام للنفط والغاز في حوض مُعين حسب بل كذلك التغيّرات الأقل وضوحاً في جاذبية النفط. لقد أسس غسو مبدأه في العمل على مُعقّد بوني-غلين-ويزرد ليك الشعابي من العصر الديفوني في البرتا Bonnie-Glenn-Wizard Lake Devonian reef complex، على امتداد مسافة

Glenn-Wizard Lake Devonian reef complex، على امتداد مسافة قدرها نحو ١٦٠ كيلومتراً. ولوحظت أمثلة ممتازة أخرى على الاصطياد التفاضلي من الشعاب النياغرية Niageran reefs في ميتشفان (Gill, 1979) ومن مجموعة ماردين Mardin Group في الأناضول (Erdogan and Akgul, 1981).



الشكل ٨-٣٦: مقطع عرضي خلال حوض رسوبي أفتراضي ذي طبقة مسامية مستمرة عرضيا مطوية الى عدة مصائد ذات مواضع مختلفة. ويوضح هذا المرتسم مبدأ Gussow.

ومع ذلك، هنالك مشاكل في تطبيق مبدأ غسو على امتداد مسافات كبيرة وفي الأحواض ذات المكامن المتقطعة. وبذلك أظهر (Bailey et al., 1974) الكيفية التي يمكن بها رسم توزيع النفط والغاز مع استمرارية هائلة عبر حوض ألبرتا حيث أن العديد من المكامن هي شعاب معزولة وحيث توفر سطوح عدم التوافق حواجز نفوذية ذات توزيع شاسع. أن تنطق الغاز والنفط الخفيف والنفط الثقيل من مركز الحوض الى الحافات قد يُعزى الى ترابط النضوج الحراري والتحلل بتأثير المياه الجوية.

تُظهر العديد من الأحواض الأخرى في أنحاء مختلفة من العالم تنطق جانبية منتظم للهايدروكاربونات، ومع ذلك فانها تفتقد الى استمرارية المكمن من مصيدة الى أخرى. فعلى

سبيل المثال تُظهر حقول الطباشير في منطقة ايكوفسك ببحر الشمال زيادة في وحدات معهد البترول API Units باتجاه المنخسف المركزي، ومع ذلك فانها تفتقد أية نفوذية اقليمية. لذلك فأن تفاضل النفط والغاز الموجودين في العديد من الأحواض يعكس في الأغلب مستويات النضوج الحراري للطبقات المصدرية. اذ يتحرّر الغاز عند درجات حرارة مرتفعة وبالتالي عند أعماق أعلى من النفط (أنظر صفحة ٢٣٦) لذلك فأن من المحتمل أن تتعرّض المصائد الأضحل حول حافة الحوض الى الغسل بالمياه الجوية كما يُمكن التأكد من ذلك من قياس ملوحتها. ومن المحتمل أن يكون النفط الموجود في الأعماق الأقل ثقيلاً اذ يتحرك النفط الى الأعلى من مركز الحوض وبذلك يتحلّل بفعل التماس مع المياه الجوية.

يجب استعمال مبدأ غسو بحذر. وهو نافعٌ علي نحو خاص عندما يترابط مع فكرة نقطة الانسكاب. أن هذا الاستعمال يُمكن أن يُوضحْ في الشكل (٨-٣٦). فاذا كانت المصيدة (ج) الأولى التي يجب حفرها وكانت مملوءة الى نقطة الانسكاب، عندها فأن المصيديتين (ب) و (د) سوف تكونان ذاتا احتمالات بترولية. وبذلك فأن بأمكاننا أن نتوقع أن مصيدة (د) مملوءة الى نقطة الانسكاب، ولكننا يمكن أن نقدر فقط سُمك العمود النفطي في المصيدة (ب). تصور من جانب آخر، أن المصيدة (ج) قد حُفرت أولاً ووُجدت أنها ليست مملوءة الى نقطة الانسكاب. عندها يكون من الحكمة حفر المصيدة (ج) ولكن المصيدة (أ) يجب أن تُستبعد عند أول فرصة لأن ليس من المحتمل أن تكون قد استلمت أي نفط.

SELECTED BIBLIOGRAPHY

مراجع مُختارة:

كتب وأبحاث تصف الأحواض الرسوبية.

Books and papers that describe sedimentary basins:

BURK, C. A. and DRAKE, C. L. 1974. *The Geology of Continental Margins.* Berlin: Springer-Verlag, 1009 pp.

DAVIES, P. A. and RUNCORN, S. A. 1980. *Mechanics of Continental Drift and Plate Tectonics.* London: Academic Press, 362 pp.

DICKINSON, W. R. and SEELY, D. R. 1979. Structure and stratigraphy of fore-arc regions. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 2–31.

MITCHELL, A. H. G. and READING, H. G. 1978. Sedimentation and tectonics. In: *Sedimentary Environments and Facies.* H. G. Reading (ed.). Oxford: Blackwell, 439–476.

كتب وأبحاث تربط الأحواض الرسوبية مع تواجد البترول.

Books and papers that relate sedimentary basins to petroleum occurrence:

FISCHER, A. G. and JUDSON, S. (eds.). 1975. *Petroleum and Global Tectonics.* Princeton: Princeton Univ. Press, 322 pp.

HARDING, T. P. and LOWELL, J. D. 1979. Structural styles, their plate tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 1016–1058.

NORTH, F. K. 1971. Characteristics of oil provinces: a study for students. *Can. Petrol. Geol. Bull., 19,* 601–658.

PRATSCH, J. C. 1978. Future hydrocarbon exploration on continental margins, and plate tectonics. *J. Petrol. Geol., 1,* 95–105.

REFERENCES

المراجع

AHMAD, F. 1968. Orogeny, geosynclines and continental drift. *Tectonophysics, 5,* 177–189.

ANON, 1980. Overthrust belt action hot in and out of fairway. *Oil and Gas J.,* July, 123–125.

ANTOINE, J. W. 1974. Continental margins of the Gulf of Mexico. In: *The Geology of Continental Margins.* C. A. Burk and C. L. Drake (eds.). New York: Springer-Verlag, 683–693.

AUBOUIN. 1965. *Geosynclines.* Developments in Geotectonics, vol. I. New York: Elsevier, 335 pp.

AVBOBO, A. A. 1978. Tertiary lithostratigraphy of Niger delta. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62,* 295–306.

BACHMANN, G. H. 1979. Das stratigraphische und tektonische Ergebnis der Erdgastiefengufschlub—Bohring. Vorderiss 1. *Erdol-Erdgas Z. V., 95*, 209–214.

BACHMANN, G. H.; DOHR, G.; and MULLER, M. 1982. Exploration in a classic thrust belt and its foreland: Bavarian Alps, Germany. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 66*, 2529–2542.

BAILEY, N. J. L.; EVANS, C. R.; and MILNER, W. D. 1974. Applying petroleum geochemistry to search for oil: examples from Western Canada basin. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58*, 2284–2294.

BAKER, B. H.; MOHR, P. A.; and WILLIAMS, L. A. J. 1972. Geology of the eastern rift system of Africa. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Spec. Pub. No. 136.

BARSS, D. L.; COPLAND, A. B.; and RITCHIE, W. D. 1970. Geology of Middle Devonian reefs Rainbow area, Alberta, Canada. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 8–19.

BELMONTE, Y.; HIRTZ, P.; and WENGER, R. 1965. The Salt basin of the Gabon and Congo (Brazzaville). In: *Salt Basins Around Africa*. London: Inst. Petrol., 55–78.

BEUF, S.; BIJU-DUVAL, B.; O de CHARPAL; and BENNACEF, A. 1971. *Les Grès du Paleozoique Inferior au Sahara*. Paris: Ed. Technip, 480 pp.

BHAT, H.; McMILLAN, N. J.; AUBERT, J.; PORTHAULT, B.; and SURIN, M. 1975. North American and African drift—the record in Mesozoic coastal plain rocks. Nova Scotia and Morocco. In: *Canada Continental Margins and Offshore Petroleum Exploration*. C. J. Yorath (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 4, 375–390.

BOWEN, C.; PURDY, G. M.; JOHNSTON, C.; SHOR, G.; LAWVER, L.; HARTANO, H. M. S.; and JEZEK, P. 1980. Arc-continent collision in Banda Sea region. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64*, 868–915.

BRINK, A. H. 1974. Petroleum geology of Gabon basin. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58*, 216–235.

BRUCE, C. J. and PARKER, E. H. 1975. Structural features and hydrocarbon deposits in the Mackenzie delta. In: *Ninth World Petrol. Cong. Tokyo, vol. 2. Geology*. London: Applied Science Publishers, 251–261.

BURK, C. A. and DRAKE, C. L. (eds.). 1974. *The Geology of Continental Margins*. New York: Springer-Verlag, 1009 pp.

COHEE, G. V. and LANDES, K. K. 1958. Oil in the Michigan basin. In: *The Habitat of Oil*. L. G. Weeks (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 473–493.

CONANT, L. C. and GOUDARZI, G. H. 1967. Stratigraphic and tectonic framework of Libya. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 51*, 719–730.

CONEY, P. J. 1970. The geotectonic cycle and the new global tectonics. *Geol. Soc. Am. Bull., 81*, 739–747.

CROSTELLA, A. 1977. Geosynclines and plate tectonics in Banda arcs, eastern Indonesia. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 61*, 2063–2081.

CROWELL, J. C. 1974. Origin of late Cenozoic basin in southern California. In: *Tectonics and Sedimentation*. W. R. Dickinson (ed.). Spec. Pub. Soc. Econ. Pal. Min., *22*, 190–204.

DALLMUS, K. F. 1958. Mechanics of basin evolution and its relation to the habitat of oil. In: *The Habitat of Oil*. L. G. Weeks (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 883–931.

DANA, J. D. 1873. On some results of the earth's contraction from cooling, including a discussion of the origin of mountains and the nature of the earth's interior. *Am. J. Sci., 5*, 423–443; *6*, 6–14, 104–115, 161–172.

DARLING, G. B. and WOOD, P. W. J. 1958. Habitat of oil in the Canadian portion of the Williston basin. In: *Habitat of Oil.* L. G. Weeks (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 129–148.

DARRCOTT, B. W.; GIRDLER, R. W.; FAIRHEAD, J. D.; and HALL, S. A. 1973. The East African rift system. In: *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences.* D. H. Tarling and S. K. Runcorn (eds.). London: Academic Press, 757–766.

DAVIES, P. A. and RUNCORN, S. A. 1980. *Mechanics of Continental Drift and Plate Tectonics.* London: Academic Press, 362 pp.

DELWIG, L. F. and EVANS, R. 1969. Depositional processes in Salina salt of Michigan, Ohio, and New York. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 53,* 949–956.

DICKINSON, W. R. and SEELY, D. R. 1979. Structure and stratigraphy of forearc regions. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 2–31.

DOW, W. C. 1978. Petroleum source beds on continental slopes and rises. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62,* 1584–1606.

DRAKE, C. L.; EWING, J. I.; and STOKAND, H. 1968. The continental margin of the United States. *Can. J. Earth Sci., 5,* 99–110.

EMERY, K. O. 1980. Continental margins—classification and petroleum prospects. *Bull. Amer. Assoc.*

ERDOGAN, L. T. and AKGUL, A. 1981. An oil migration and re-entrapment model for the Mardin Group reservoirs of Southeast Anatolia. *J. Petrol. Geol., 4,* 57–75.

EUGSTER, H. P. and SURDAM, R. C. 1973. Depositional environment of the Green River Formation of Wyoming. A preliminary report. *Geol. Soc. Am. Bull., 84,* 115–1120.

EVAMY, B. D.; HAREMBOURNE, J.; KAMERLING, P.; KNAPP, W. A.; MOLLOY, F. A.; and ROWLANDS, P. H. 1978. Hydrocarbon habitat of Tertiary Niger delta. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62,* 1–39.

EVANS, H. 1972. Zama—a geophysical case history. In: *Stratigraphic Oil and Gas Fields.* R. E. King (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Spec. Pub. No. 10, 440–452.

EVANS, R. 1978. Origin and significance of evaporites in basins around Atlantic margin. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.,* 62–234.

EXXON, N. F. and WILCOX, J. B. 1978. Geology and petroleum potential of Exmouth plateau area off western Australia. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62,* 40–72.

FINSTAD, K. G. and SELLEY, R. C. (eds.). 1975. *Proceedings: Jurassic Northern North Sea Symposium.* Stavanger: Norsk Petroleumsforening, 340 pp.

FINSTAD, K. G. and SELLEY, R. C. (eds.). 1977. *Proceedings of the Second Jurassic Northern North Sea Symposium.* Oslo: Norweg. Petrol. Soc. 270 pp.

FISCHER, A. G. 1975. Origin and growth of basins. In: *Petroleum and Global Tectonics.* A. G. Fischer and S. Judson (eds.). Princeton: Princeton Univ. Press, 47–82.

FISCHER, A. G. and JUDSON, S. (eds.). 1975. *Petroleum and Global Tectonics.* Princeton: Princeton Univ. Press, 322 pp.

GILL, D. 1979. Differential entrapment of oil and gas in Niagaran pinnacle—reef belt of Northern Michigan. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63,* 608–620.

GLAESSNER, M. F. and TEICHERT, C. 1947. Geosynclines: a fundamental concept in geology. *Am. J. Sci., 245,* 465–482, 571–591.

GREY, C. 1972. *The Geology of Libya.* Tripoli: Univ. of Libya, 435 pp.

GUSSOW, W. C. 1954. Differential entrapment of oil and gas: a fundamental principle. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 38,* 816–853.

HAILE, N. S. 1968. Geosynclinal theory and the organizational pattern of the northwest Borneo geosyncline. *Quart. J. Geol. Soc. Lond., 124*, 171–194.

HALBOUTY, M. T.; MEYERHOFF, A. A.; KING, R. E.; DOTT, R. H.; KLEMME, H. D.; and SHABAD, T. 1970. World's giant oil and gas fields, geologic factors affecting their formation and basin classification. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 502–555.

HALL, A. J. 1859. *Natural History of New York*, vol. 3. Paleontology. New York: Appleton and Coy, 1–96.

HARDING, T. P. and LOWELL, J. D. 1979. Structural styles, their plate-tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63*, 1016–1058.

HAUG, E. 1900. Les geosynclinaux et les aires continentales. *Geol. Soc. France Bull., 28*, 617–711.

HEIRTZLER, J. R. 1968. Sea floor spreading. *Sci. Am., 219*, 60–70.

HEYBROEK, F. 1965. The Red Sea Miocene evaporite basin. In: *The Salt Basins Around Africa*. London: Inst. Petrol., 17–40.

HOC, A. 1979. *Continental Margins Geological and Geophysical Research Needs and Problems*. Washington: Nat. Acad. Sci., 302 pp.

HSU, K. J. 1970. The meaning of the world flysch, a short historical search. In: *Flysch Sedimentology in North America*. Geol. Assoc. Can., Spec. Paper 7, 1–11.

HUNT, J. M. 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology*. San Francisco: Freeman, 617 pp.

IBRAHIM, M. W. 1979. Shifting depositional axes of Iraq: an outline of geosyncline history. *J. Petrol. Geol., 2*, 199–218.

ILLING, L. V. 1959. Deposition and diagenesis of some Upper Paleozoic carbonate sediments in Western Canada. New York: *Proc. 5th World Petrol. Cong.*, 23–52.

ILLING, L. V. and HOBSON, G. D. 1981. *Petroleum Geology of the Continental Shelf of Northwest Europe*. London: Heyden & Son, 521 pp.

ILLIES, J. H. and MUELLER, S. T. 1970. *Graben Problems*. Stuttgart: Slucheizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 316 pp.

IVANHOE, L. F. 1980. World's giant petroleum provinces. *Oil and Gas J.* 30 June, 146–147.

JAMISON, H. C.; BROCKETT, L. D.; and McINTOSH, R. A. 1980. Prudoe Bay—a 10-year perspective. In: *Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1968–78*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 30, 289–314.

JODRY, R. L. 1969. Growth and dolomitization of Silurian reefs, St. Clair County, Michigan. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 53*, 957–981.

JONES, P. H. 1969. Hydrodynamics of geopressure in the northern Gulf of Mexico. *J. Petrol. Tech., 17*, 803–810.

KAMEN-KAYE. 1970. Geology and productivity of Persian Gulf synclinorium. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 54*, 2371–2394.

KAY, M. 1944. Geosynclines in continental development. *Sci., 99*, 461–462.

KAY, M. 1947. Geosynclinal nomenclature and the craton. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 31*, 1289–1293.

KENYON, C. S. and BEDDOES, K. 1977. Geothermal gradient map of southeast Asia. Singapore: *S.E. Asia Petrol. Explor. Soc.*, 50 pp.

KLEMME, H. D. 1975. Geothermal gradients, heat flow, and hydrocarbon recovery. In: *Petroleum and Global Tectonics*. A. F. Fischer and S. Judson (eds.). Princeton: Princeton Univ. Press, 251–306.

KLEMME, H. D. 1980. Petroleum basins—classification and characteristics. *J. Petrol. Geol., 3*, 187–207.

KLITZSCH, E. 1970. Die Strukturgeschichte der Zentral Sahara. *Geol. Rundsch., 59*, 459–527.

KLITZSCH, E. H. 1972. Problems of continental Mesozoic strata of southwestern Libya. In: *African Geology*. A. J. Whiteman and T. F. J. Dessauvagie (eds.). Ibadan Univ., 483–493.

KLOVAN, J. E. 1974. Development of Western Canadian Devonian reefs and comparison with Holocene analogues. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58*, 787–799.

LAMB, C. F. 1980. Painter reservoir field—giant in Wyoming thrust belt. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64*, 638–644.

LEHNER, P. and DE RUITER, P. A. C. 1977. Structural history of Atlantic margin of Africa. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 61*, 961–981.

LESTANG, J. DE. 1965. Das Palaozoikum am Rande des Afro-Arabischen Gondwanakontinentes. *Z. dtsch. Geol. Ges., 117*, 479–488.

LOWELL, J. D. and GENIK, G. J. 1972. Sea floor spreading and structural evolution of the southern Red Sea. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56*, 247–259.

LOWELL, J. D.; GENIK, G. J.; NELSON, T. H.; and TUCKER, P. M. 1975. Petroleum and plate tectonics of the southern Red Sea. In: *Petroleum and Global Tectonics*. A. G. Fischer and S. Judson (eds.). Princeton: Princeton Univ. Press, 129–156.

McCASLIN, E. 1981. Hot overthrust belt exploration continues. *Oil & Gas J.* 12 Jan., 113–114.

McKEE, E. D. 1965. Origin of Nubian and similar sandstones. *Geol. Runsch., 52*, 551–587.

MAGOON, L. B. and CLAYPOOL, G. E. 1981. Petroleum geology of Cook Inlet basin—an exploration model. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 65*, 1043–1062.

MESNER, J. C. and WOODRIDGE, L. C. P. 1964. Maranhao Paleozoic basin and Cretaceous coastal basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 48*, 1475–1512.

MESOLELLA, K. J.; ROBINSON, J. D.; McCORMICK, L. M.; and ORMISTON, A. R. 1974. Cyclic deposition of Silurian carbonates and evaporites in Michigan basin. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58*, 34–62.

MEYERHOFF, A. A. and MEYERHOFF, H. A. 1972. The new global tectonics: major inconsistencies. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56*, 269–336.

MITCHELL, A. H. and READING, H. G. 1969. Continental margins, geosynclines, and ocean floor spreading. *J. Geol., 77*, 629–646.

MITCHELL, A. H. G. and READING, H. G. 1978. Sedimentation and tectonics. In: *Sedimentary Environments and Facies*. H. G. Reading (ed.). Oxford: Blackwell, 439–476.

MURRAY, G. E. 1960. Geologic framework of Gulf Coastal Province of United States. In: *Recent Sediments, Northwestern Gulf of Mexico*. F. P. Shepard (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 5–33.

MURRIS, R. J. 1980. Middle East: stratigraphic evolution and oil habitat. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64*, 597–618.

MURRIS, R. J. 1981. Middle East: stratigraphic evolution and oil habitat. *Geol. Mijnb., 60*, 467–480.

NISSENBAUM, A. 1978. Dead Sea asphalts—historical aspects. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 62*, 837–844.

NORTH, F. K. 1971. Characteristics of oil provinces: a study for students. *Can. Petrol. Geol. Bull., 19*, 601–658.

OLENIN, V. B. 1967. The principles of classification of oil and gas basins. *Austr. Oil and Gas J., 13*, 40–46.

PERRODON, A. 1971. Classification of sedimentary basins: an essay. *Sci. Terre., 16*, 193–227.

PERRODON, A. 1978. Coup d'oil sur les provinces geantes d'hydrocarbures. *Rev. Inst. Franc. du Petrole., 33*, 493–513.

PICARD, M. D. 1967. Paleocurrents and shoreline orientations in Green River Formation (Eocene). Raven Ridge and Red Wash areas, Northeastern Uinta Basin. Utah. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 5*, 383–392.

PRATSCH, J. C. 1978. Future hydrocarbon exploration on continental margins and plate tectonics. *J. Petrol. Geol., 1*, 95–105.

QUENNELL, A. M. 1958. The structural and geomorphic evolution of the Dead Sea rift. *Quart. J. Geol. Soc. Lond., 114*, 1–24.

RANNEFT, T. S. M. 1979. Segmentation of island arcs and application to petroleum geology. *J. Petrol. Geol., 1*, 35–53.

READING, H. G. 1972. Global tectonics and the genesis of flysch successions. *24. Intermat. Geol. Cong. Montreal, 1972. Section 6, Stratigraphy and Sedimentology*, 59–66.

SALEM, M. J. and BUSREWIL (eds.). 1981. *The Geology of Libya*, 3 vols. London: Academic Press, 1155 pp.

SALOP, L. I. 1967. *Geology of the Baikal Region*, vol. 2. Moscow: Izd Nedva, 502 pp.

SANFORD, R. M. 1970. Sarir oil field, Libya—Desert surprise. In: *Geology of Giant Petroleum Fields*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 14, 449–476.

SCHNEIDER, E. D. 1972. Sedimentary evolution of rifted continental margins. *Geol. Soc. Am.*, Mem. No. 132, 109–118.

SCHOLL, D. W.; VON HUENE, R.; and RIDLON, J. B. 1968. Spreading of the ocean floor: undeformed sediments in the Peru-Chile trench. *Sci., 159*, 869–871.

SCHUCHERT, C. 1923. Sites and nature of the North American geosynclines. *Geol. Soc. Am. Bull., 34*, 151–230.

SCHUPPLI, H. M. 1946. Geology of the oil basins of East Indian archipeligo. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 30*, 1–22.

SCHWAB, F. L. 1971. Geosynclinal compositions and the new global tectonics. *J. Sedim. Petrol., 41*, 928–938.

SELLEY, R. C. 1972. Diagnosis of marine and non-marine environments from the Cambro-Ordovician sandstones of Jordan. *J. Geol. Soc. Lond., 128*, 109–117.

SELLEY, R. C. 1975. *Introduction to Sedimentology*. London: Academic Press, 408 pp.

SELLEY, R. C. 1976. The habitat of North Sea oil. *Proc. Geol. Ass. Lond., 87*, 359–388.

SEYFERT, C. K. and SIRKIN, L. A. 1973. *Earth History and Plate Tectonics*. New York: Harper & Row, 544 pp.

SHORT, K. C. and STAUBLE, A. J. 1967. Outline of geology of Niger delta. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 51*, 761–779.

SMITH, G. W.; SUMMERS, G. E.; WALLINGTON, D.; and LEE, J. L. 1958. Mississippian oil reservoirs in Williston basin. In: *Habitat of Oil*. L. G. Weeks (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., 149–177.

ST. JOHN, B. 1980. *Sedimentary Basins of the World and Giant Hydrocarbon Accumulations*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Map + 23 pp.

SURDAM, R. C. and WOLFBAUER, C. A. 1975. Green River Formation, Wyoming: A playa-lake complex. *Geol. Soc. Am. Bull., 86*, 335–345.

TARLING, D. H. (ed.). 1981. *Economic Geology and Geotectonics*. London: Blackwell, 213 pp.

TARLING, D. H. and RUNCORN, S. K. 1973. *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences*, vols. I, II. London: Academic Press, 1184 pp.

THIEBAUD, C. E. and ROBSON, D. A. 1979. The geology of the area between Wadi Warden and Wadi Gharandal, East Clysmic Rift, Sinai, Egypt. *J. Petrol. Geol., 1*, 63–75.

UNESCO, S. 1965. *East African Rift System, Upper Mantle*. Committee. Nairobi: University College, 91 pp.

USPENSKAYA, N. YU. 1967. Principles of oil and gas territories subdivisions and the classification of oil and gas accumulations. Mexico: Proc. *7th World Petrol. Cong.*, vol. 2. Amsterdam: Elsevier, 961–969.

VAN HOUTEN, F. B. 1973. Meaning of molasse. *Geol. Soc. Amer. Bull., 84*, 1973–1976.

VAN HOUTEN, F. D. 1980. Latest Jurassic—Cretaceous regressive facies, northeast African craton. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64*, 857–867.

VEEVERS, J. J. 1981. Morphotectonics of rifted continental margins in embryo (East Africa), youth (Africa-Arabia) and maturity (Australia). *J. Geol., 89*, 57–82.

VIDAL, J. 1980. Geology of Grondin field. In: *Giant Oil and Gas Fields of the Decade: 1968–1978*. M. T. Halbouty (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 30, 577–590.

VINE, F. J. 1970. The geophysical year. *Nature, 227*, 1013–1017.

WALTERS, R. F. and PRICE, A. S. 1948. Kraft-Prusa oilfield, Barton County, Kansas. In: *Structure of Typical American Oil Fields*. J. V. Howell (ed.). Am. Assoc. Petrol. Geol., 249–280.

WEBER, K. J. and DAUKORU, E. 1975. Petroleum geology of the Niger delta. Tokyo: *Proc. 9th World Petrol. Cong., vol. 2. Geology*. London: Applied Science Publishers, 209–221.

WEEKS, L. G. 1958. Factors of sedimentary basin development that control oil occurrence. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 32*, 1093–1160.

WILHELM, O. and EWING, M. 1972. Geology and history of the Gulf of Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull., 83*, 575–600.

WILSON, J. E.; KASHAI, E. L.; and CROKER, P. 1983. Hydrocarbon potential of Dead Sea rift valley. *Oil & Gas J.*, 20 June, 147–154.

WILSON, J. T. 1966. Did the Atlantic close and then re-open? *Nature*, London, *211*, 676–681.

WILSON, J. T. 1968. Static or mobile earth: the current scientific revolution. *Proc. Am. Phil. Soc., 112*, 309–320.
WOOD, P. W. J. 1980. Hydrocarbon plays in Tertiary S.E. Asia basins. *Oil & Gas J.*, 21 July, 90–96.
WOODLAND, A. W. (ed.). 1975. *Petroleum and the Continental Shelf of North West Europe*, vol. I. Geology. London: Applied Science Publishers, 501 pp.
ZIEGLER, P. A. 1975. Geologic evolution of North Sea and its tectonic framework. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 59*, 1073–1097.

الفصل التاسع

الرمل القيري والسجيل الزيتي

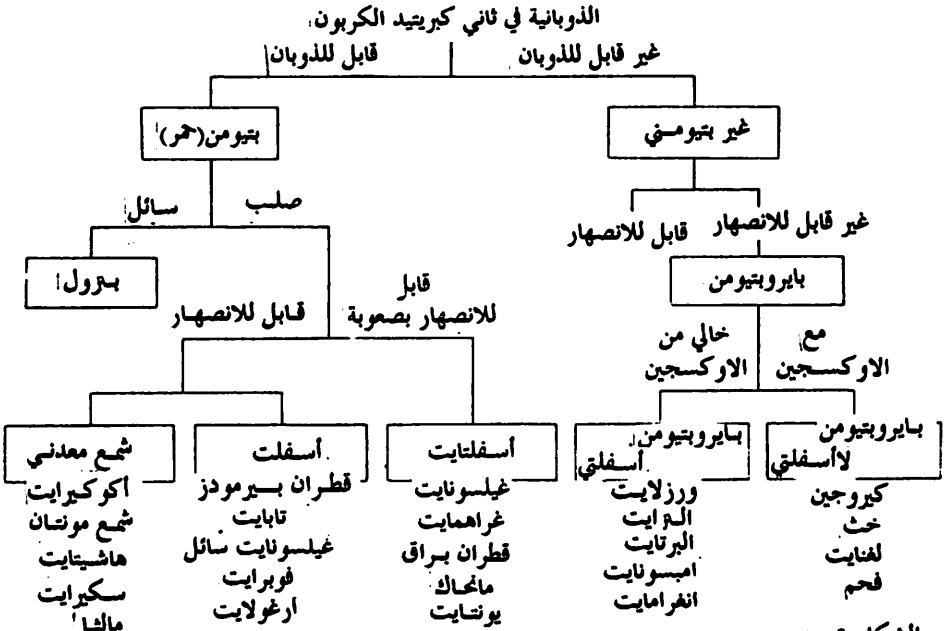
TAR SANDS AND OIL SHALES

يُعنى جيولوجي البترول الى حد كبير باستكشاف النفط الخام والغاز الطبيعي، والجزء الأكبر من هذا الكتاب مكرّس الى هذه الموضوعة. ولكن هنالك احتياطيات كبيرة من الطاقة مُحتجزة في الرمل القيري والسجيل الزيتي، ولقد كان من الصعب استخلاص هذه الاحتياطيات، ذلك أن الكلفة المنخفضة نسبياً للنفط والغاز منعت البحث التقني لاستخلاص النفط من هذه المصادر. ولقد أعطت الكلفة المتزايدة لانتاج الهايدروكاربونات التقليدية مُؤخراً زخماً لتطوير طرق لاستخلاص النفط من الرمل القيري والسجيل الزيتي. ويتعامل هذا الفصل مع الهايدروكاربونات المرنة والصلبة (باستثناء الفحم)، واصفاً تركيبها وأصلها وتوزيعها، ويُراجع بشكل مختصر عمليات الانتاج.

ان الهايدروكاربونات المرنة والصلبة شائعة الوجود في الصخور الرسوبية من أجزاء مختلفة في العديد من أنحاء العالم. وهي مُتميّزة عن النفوط الخام التي تكون سائلة تحت الضغوط ودرجات الحرارة الاعتيادية، رغم أن العديد من هذه الهايدروكاربونات يكون لزجاً، وتقلّ لزوجتها مع زيادة درجة الحرارة. ويُقدّم الشكل (٩-١) تصنيفاً للهايدروكاربونات الصلبة.

كانت تجربة الانسان الأولى مع الهايدروكاربونات مع التواجدات السطحية للقار الصلب واللزج أكثر من النفط الخام السائل، الذي لم يكن ممكناً العثور عليه بكميات كبيرة حتى تم حفر الآبار. ويُطلق على الهايدروكاربونات الثقيلة تسميات عامية من بينها الزفت Pitch والاسفلت Asphalt والحمّر أو البتيومن Bitumen والقار Tar وغالباً ما يتم استعمال هذه المصطلحات على نحو متبادل. ورغم أن المصطلحات الثلاثة الأولى مترادفة، فأن القار، اذا ما توخينا الدقة، هو سائل ذو لون بني غامق لزج ينتج من التقطير الاتلافي للمادة العضوية-كالخشب والفحم أو السجيل. ان هذا التقطير يُمكن أن يحدث طبيعياً تحت السطح أو صناعياً من قِبل الانسان. وكان قار استكهولم أو أركانغيل يجمع من التجاويف

الموجـودة تحت المداخن Meilers حيث يحرق فيها فحم القار. وكان هذا يُستعمل على نطاق واسع في السفن الخشبية عند الأمم البحرية في شمال أوروبا.



الشكل ٩-١: تسميات وتصنيف الهايدروكاربونات المرنة والصلبة. (عن Abraham, 1945).

تصف الفقرات التالية طريقة التواجد والتركيب والأهمية الاقتصادية للهايدروكاربونات الصلبة.

الهايدروكاربونات المرنة والصلبة PLASTIC AND SOLID HYDROCARBONS

التواجد Occurrence

تتواجد الهايدروكاربونات الصلبة والثقيلة واللزجة كبحيرات أو برك على سطح الأرض وتنتشر في عروق ومسامات تحت السطح. ويمكن تمييز نمطي تكّون متميزين نوعياً:

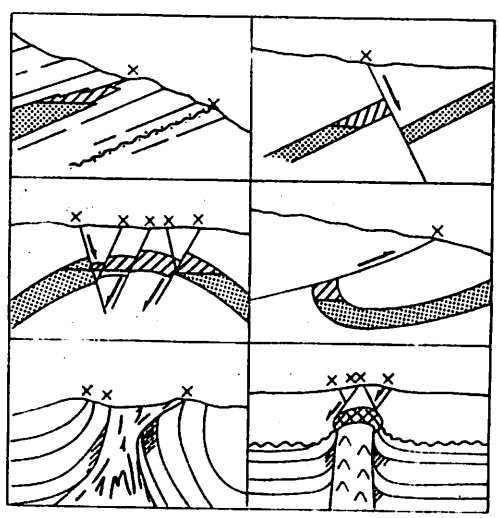
١. الترسبات المتكثفة Inspissated deposits

٢. الترسبات الثانوية Secondary deposits

الترسبات المتكثفة *Inspissated Deposits*

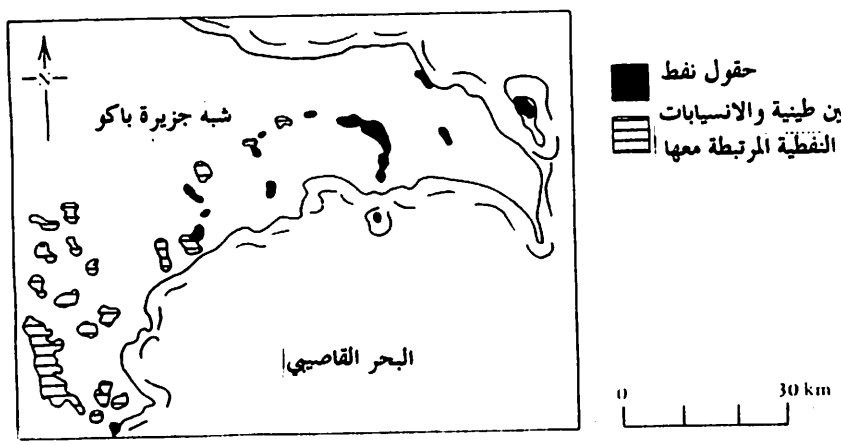
الترسبات المتكثفة هي هايدروكاربونات ثقيلة أزيل منها الجزء الخفيف. أن هذا الوضع يُمكن أن يحدث حينما يُجلب تراكمٌ من النفط السائل الى سطح الأرض نتيجة لترابط الرفع والتعرية. وعندما تحدث هذه العملية، فأن النفط سوف يكون عرضة للغسل بتأثير المياه الجوية، مما يؤدي الى الأكسدة والى التحلل البكتري. وقد تخرج الهايدروكاربونات الأخف من السائل عند هبوط الضغط وربما تُفقد من خلاله الى السطح خلال التكسرات عند قطع الصخور الغطائية. وبذلك فأن تراكمات النفط سوف تغتني على نحو متزايد بالهايدروكاربونات الثقيلة اللزجة.

ان التواجدات السطحية للاسفلت لا تقتصر على حقول النفط المتحجر التي تفتقد صخور الغطاء، ولكن العديد منها يمكن أن ينتج من النضوحات الهاربة من حقل النفط تحت السطح. أن هذه النضوحات الهايدروكاربونية يمكن أن توجد في العديد من الطرق، ولكنها توجد بشكل رئيسي حيثما تسمح الفوالق والتكسرات للهايدروكاربونات بالهجرة الى الأعلى خلال الصخور الغطائية للمكمن (الشكل ٩-٢). أن النضوحات قد تكون طينية، أو من الماء المالح أو الغاز أو النفط، رغم أن للنفط ميل لأن يُصبح قارياً للأسباب التي أوجزناها مسبقاً.



الشكل ٩-٢: مقاطع توضح الطرق المختلفة التي تحدث بها النضوحات النفطية. (عن Levorsen, 1967).

ان هذه الأنواع المختلفة من النضوحات الهايدروكاربونية معروفة جيداً من كل أنحاء العالم، وهي مميزة للعديد من المقاطعات الهايدروكاربونية الرئيسية ولكن ليس بالضرورة جميعها. وتوجد الأمثلة البارزة عليها في كل من أوكلاهوما وفنزويلا وترينداد وبورما وايران والعراق وفي أماكن أخرى من الشرق الأوسط. أن الاشارات العديدة للزفت والبتيومن في الانجيل قد ذكرت مسبقاً. وفي البحر الميت، فأن كتلاً من الزفت كبيرة الى حد أنها تكفي لأن يقف عليها رجال تتحرر بين فترة وأخرى من مستويات الفوالق (Spiro et al., 1983, Nissenbaum, 1978). ولقد أثارت النضوحات الموجودة على شواطئ البحر القاصيبي الاهتمام منذ فترة طويلة من الزمن، وخصوصاً في منطقة باكو في ما كان يُعرف باسم الاتحاد السوفيتي (الشكل ٩-٣). وهناك، ليس النفط وحده هو الذي يتدفق خارجاً على سطح الأرض بل الطين والغاز أيضاً. وغالباً ما يحدث اشتعالٌ تلقائي، لذلك فأنه غالباً ما يطلق على هذه المنطقة اسم أرض النار الأزلية Land of Eternal Fires. ولقد اقترح أن هذه المنطقة والنضوحات المحترقة الأخرى في المنطقة قد كونت أساس الديانة الزرادشتية التي ازدهرت في بلاد فارس لعدة مئات من السنين. وخلال القرن الثالث عشر الميلادي، كتب ماركو بولو عن أحد النضوحات في منطقة باكو: "عند أراضي التخوم باتجاه غيرنغة Geirgene ثمة نافورة يتدفق منها النفط بغزارة (ترجمة: Yule, 1871).



الشكل ٩-٣: خارطة لجزيرة أسفيرون في مقاطعة باكو تظهر ترابط الحقول النفطية مع الانسيابات الطينية والبراكين الطينية. (عن Levorsen, 1967).

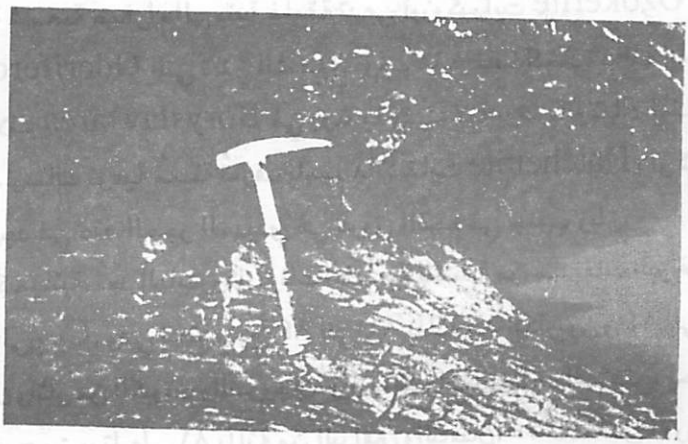
تحدث النضوحات الهايدروكاربونية أيضاً في المناطق الساحلية، وبشكل ملحوظ في قنال سانتا باربرا في كاليفورنيا (حيث أتهمت شركات البترول في التسبب بحدوث التلوث) وفي سواحل تريندادد وبوكتاون والأكوادور. كما سجلت نضوحات غازية، ربما ذات أصل أحيائي ضحل خلال مسوحات الشررSparker surverys وبشكل ملحوظ عند حافات دلتا نهر المسيسبي.

ان النضوحات الهايدروكاربونية بالطبع ليست ظاهرة حديثة فقط بل هي شكل من أشكال تلوث الطبيعة لنفسها، وهي ظاهرة مستمرة منذ الفانيروزوي Phanerozoic. ونضوحات البلايستوسيني في كاليفورنيا معروفة بسبب محتوياتها من الحيوانات الفقرية. ولأن الهايدروكاربونات عرضة للتحلل الاحيائي، فأن النفط القديم المتكاثف يوجد على امتداد الفوالق وسطوح عدم التوافق. كما توجد نضوحات قارية تتراوح في العمر بين المايوسيني والبليوسيني في ايران (Elmore, 1979).

الترسبات الثانوية Secondary Deposits

يؤدي الانسياب السريع للنفط من نضح نفطي الى تكّون ترسبات ثانوية. أن هذه الترسبات هي خليط من الترسبات والنفط الثقيل المتحلّل أحيائياً. أن ترسبات البترول الثانوية الشاسعة نادرة جداً بسبب ميل النفط الى التحلّل والاكسدة في الجو وتحت سطح الماء.

تتواجد الترسبات الثانوية في بعض الأحيان حول النضوحات النفطية والبراكين الطينية. وفي حالات نادرة من الحجر الحصوي موضعي النشأة Intraformational conglomerates، تتواجد الحصى وحتى الجلاميد في رملٍ مسّمت بالنفط الهامد Dead Oil. ويوجد أحد الأمثلة المعروفة على هذا النوع في القنوات النهرية من الطباشيري الأسفل في خليج موب Mupe Bay على الساحل الجنوبي لانكلترا (Lees and Cox, 1937) (الشكل ٩-٤). أن هذا النوع من الترسبات ذو أهمية اقتصادية محدودة. ومع ذلك فأنه قد يكون في غاية الأهمية بسبب الكيفية التي يؤرخ فيها هجرة البترول في المنطقة. أن العلاقة بين هجرة البترول وتكّون المصيدة هي أمر في غاية الأهمية (أنظر صفحة ٤٠٨).



الشكل ٩-٤: صورة فوتوغرافية وتخطيط لرمل ويلدن النفطي (الطباشيري الاسفل) من خليج ميرب في دورست ، المملكة المتحدة. رمل قنوي نهري ذو تطبق متقاطع مشبع بنفط خفيف "حلو". وقاع القناة مبطنة بجلاميد من الرمل المسمت بالنفط الهامد. كانت القناة تعري نصوحا نفطيا متزامنا. يظهر هذا التكشف أن تولد النفط وهجرته قد بدأ في الطباشيري الاسفل. أن تشبع النفط الخفيف يدلل على هجرة النفط الحالية الى السطح.

التركيب

عندما ينتشر النفط الخام على سطح الأرض، يتغير تركيبه الكيميائي تدريجاً عندما يفقد مكوناته الأخف ويتحول الى هايدروكاربونات صلبة. ومثلما ذكرنا، رغم أن مصطلحات الزفت والقار والاسفلت قد أستعملت باعتبارها من المترادفات لمثل هذه المواد، الا أن تركيبها يمكن أن يوصف بشكل أكثر تحديداً. ان هذا التصنيف يعتمد على نوع النفط

الخام الأصلي وعلى درجة التكثف Inspissation.

تتحلّل النفوط البرافينية الى بقايا شمعية، في حين أن النفوط النافثية تتحرك بمسار أكثر تعقيداً. ولسوف يناقش هذان النوعان الرئيسيان من الهايدروكاربونات الصلبة في الفقرات التالية.

الهايدروكاربونات الصلبة الشمعية *Waxy Solid Hydrocarbons*

تُنتج الهايدروكاربونات الصلبة الشمعية من تكاثف النفوط البرافينية الخام. وهي بشكل عام مادة مرنة شمعية صفراء الى بنية غامقة تُدعى أوزوكيرايت Ozokerite (من الكلمة الاغريقية Oderiferous التي تعني الشمع). توجد هذه المادة كمادة مالئة للعروق في منطقة بوري سلاف Boryslav area في روسيا وفي ولاية يوتا بالولايات المتحدة الأمريكية وفي الهند. وهنالك نوعية مُعيّنة تُعرف باسم هاتشتايت Hatchettite، أو شحم Tallow معدني يوجد في عقد الحجر الحديدي في عروق الفحم في جنوب ويلز.

من الناحية الكيميائية، تُعَدّ الهايدروكاربونات الشمعية الصلبة من مشتقات البرافينات وتتراوح بين C_{22} الى C_{29}. وهي تحتوي بين ٨٤ الى ٨٦ بالمئة من الكاربون و ١٤ الى ١٦ بالمئة من الهايدروجين وآثار من الكبريت والنتروجين. وبمصطلحات التركيب الجزيئي، يحتوي الأوزوكيرايت المستخرج من يوتا على ٨١ بالمئة من البرافين والنافثين، ١٠ بالمئة من الأرومات و٩ بالمئة من مركبات الأوكسجين والنتروجين والكبريت (Hunt et al., 1954).

الهايدروكاربونات الاسفلتية الصلبة *Asphaltic Solid Hydrocarbons*

تنتج الهايدروكاربونات الصلبة من تكاثف النفوط النافثينية الخام. ومصطلحات كيمياء العناصر فأن هذه المركبات مشابهه للهايدروكاربونات الشمعية الصلبة. وهي تحتوي على ٧٩.٥ الى ٨٧.٢ بالمئة من الكاربون و ٨.٩ الى ١٣.٢ من الهايدروجين والى ما يقرب من ٨ بالمئة من الكبريت، ومن الشائع أن تحتوي على آثار من النتروجين والأوكسجين والمركبات اللاعضوية (عموماً المعادن المكونة للصخور). ان تركيبيها الجزيئي، مع ذلك، يختلف تماماً عن تركيب الهايدروكاربونات الشمعية الصلبة. ويحتوي الاسفلت المستخرج من يوتا على ١٨ بالمئة من البرافين والنافثين و ٤٨ بالمئة من الأرومات و ٣٤ بالمئة من مركبات

الأوكسجين والنتروجين والكبريت. ولقد نشرت تفاصيل تركيب هذه المواد من قبل (Hobson and Tiratsoo, 1981).

عندما يتعرض الاسفلت الى التكاثف، فانه يتحلل مروراً بالاسفلتايت Asphaltites الى البايروبتيومن الاسفلتي Asphaltic pyrobitumen. والاسفلت (من الاغريقية بتيومن) هو مادة صلبة الى شبه صلبة ذات لون بني غامق الى أسود ذات وزن نوعي أقل من ١.١٥ ونقطة نوبان تتراوح بين ٦٥ الى ٩٥ درجة مئوية. وتتراوح نسبة نوبانه بين ١٠ الى ٧٠ بالمئة في النافثا وهو يذوب تماماً في ثاني كبريتيد الكاربون Carbon disulfide.

للاسفلتايت وزن نوعي أقل من ١.٢٠ ونقطة نوبان تتراوح بين ١٢٠ الى ٣٢٠ درجة مئوية. وتتراوح نسبة نوبانه ٦٠ بالمئة في النافثا وبين ٦٠ الى ٩٠ بالمئة في ثاني كبريتيد الكاربون والغلسونايت Gilsonite هو اسفلتايت يتواجد في التكسرات في صخور السجيل من العصر الثلاثي في حوض يونتا في يوتا وكولورادو. ومن الأماكن المحلية الأخرى للاسفلتايت هي غلانس بيتش ومانجاك وغرامايت.

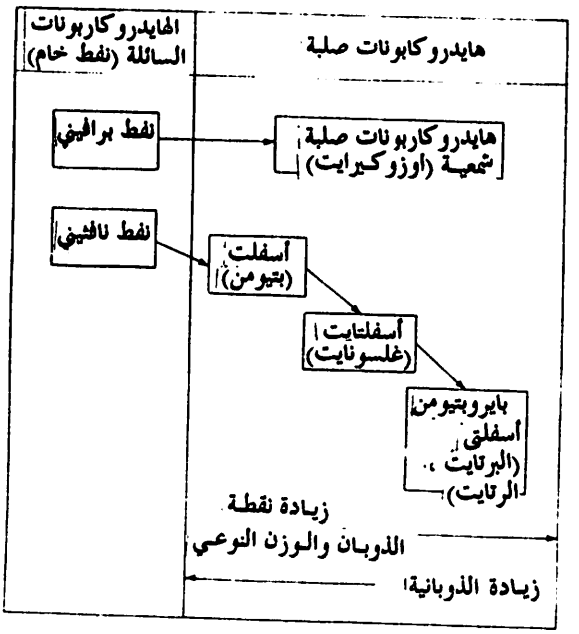
والبايروبتيومن الاسفلتي هو مواد مطاطية ذات لون بني يبلغ وزنه النوعي أقل من ١.٢٥ وهي لا تذوب ولكنها تنتفخ وتتفكك بالتسخين. وهي غير قابلة للذوبان في النافثا وقليلة الذوبان فقط في ثاني كبريتيد الكاربون. وتضم الأسماء المختلفة الأخرى للبايروبتيومن الاسفلتي البرتايت والأرتايت والأمبسونايت والورتزيلايت (الجدول ٩-١). وترتبط أكثر الترسبات المدروسة من هذه المعادن مع سجيل الغرين ريفر (Hunt et al., 1954).

يلخص الشكل (٩-٥) تركيب الهيدروكربونات الصلبة ونشوءها.

الرمل القاري TAR SANDS

التركيب والتوزيع والاصل

تُوجد ترسبات ثقيلة لزجة من النفط على أو قرب سطح الأرض في العديد من أنحاء العالم (الجدول ٢-٧). ولهذه الترسبات وحدات كثافة API تتراوح بين ٥ الى ١٥ درجة، وهي توجد عادة ضمن الرمال مرتفعة المسامية، ويطلق عليها اسم الرمل القاري أو الرمل النفطي. ومثلما يظهر الجدول (٩-٢) فان احتياطياً هائلاً من الهايدروكاربونات موجود في هذه



الشكل ٩-٥: مرتسم يوضح نشوء الهايدروكاربونات الشمعية والاسفلتية.

الجدول ٩-١: مواصفات بعض أنواع البتيومن والشمع. TABLE 9.1

الاسم	نسبة H-C	النسبة المئوية الوزنية S	النسبة المئوية الوزنية N	الاصل
أوزوكيرايت	1.96-1.89	0.1	0.1	نفط برافيني
تابيات	1.62			
ألجرانيت	1.62			
ويرتزلايت	1.6 -1.59	4.0	2.2	زيادة تحلل النفط النافثيني
غلسونايت	1.47-1.42	0.4	2.8	
البرتايت	1.32-1.24	0.7	1.0	
الرتايت				

المعطيات الكيميائية من Hunt et al., ١٩٥٤ ينشر بموافقة مسبقة.

الطبقات. وطوال سنوات عديدة، كان الرمل القاري يمثل موضوعاً مثيراً للفضول. ولقد افتقدت الصناعة النفطية الدافع، وبالتالي، التقنية اللازمة لاستخراج النفط. ولقد ارتفعت أسعار النفط العالمية في السبعينيات فتغيرت هذه الصورة. ويجرى الآن قدر كبير من البحوث عن طرق الاستخلاص.

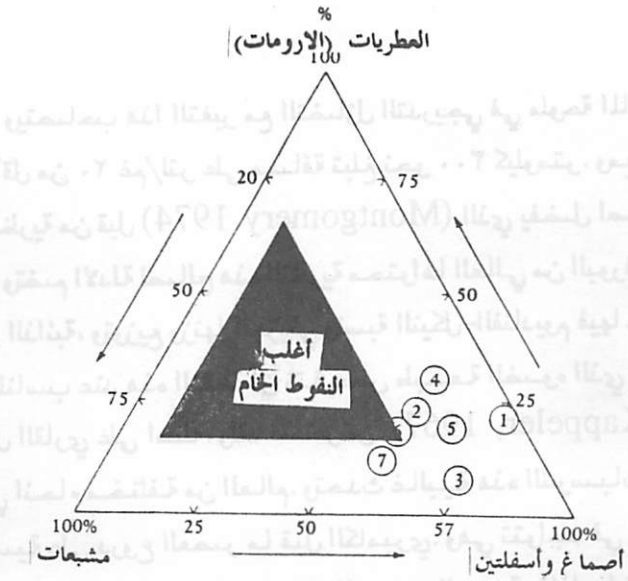
الجدول ٩-٢: معطيات بعض الرمال القارية الرئيسية.

الموقع	العمر	الاحتياطي الموضعي	كثافة	المصدر
Albania				
Selenizza	Miocene	371 × 10^6 bbl	4.6–13.2	Iniechen, 1951
Canada				
Melville	Permian	50–100 × 10^6 bbl	7	Sproule, 1963
Kindersley	Mississip.–L. Cret.	410,432,000 bbl	13–15	White, 1974
Athabaska				
Surface	L. Cret.	120 bbl	6–8	Jardine, 1974
Subsurface	L. Cret.	505 bbl	8–10	Jardine, 1974
Peace River	L. Cret.	50 bbl	8–23	Jardine, 1974
Cold Lake	L. Cret.	164 bbl	10–12	Jardine, 1974
Wabaska	L. Cret.	53 bbl	10–13	Jardine, 1974
Malagasy				
Bemolanga	Trias	1.75 bbl	?	Spraggins, 1973
Rumania				
Derna	Pliocene	25 × 10^6 bbl	?	Walters, 1974
Trinidad				
La Brea	Miocene	60 × 10^6 bbl	1–2	Kugler, 1961
United States				
California	Mioc.–Plioc.	200 × 10^6 bbl	4–13	Burk, 1971
Kansas	Penns.	750 × 10^6 bbl	15	Banks and James, 1974
Kentucky	Miss.–Penns.	75 × 10^6 bbl	?	Burk, 1971
New Mexico	Triassic	57 × 10^6 bbl	?	Walters, 1974
Utah	Cret.–Olig.	17.7–27.5 × 10^9 bbl	8–12	Walters, 1974
USSR				
Kobystan	Miocene	24 × 10^6 bbl	?	Walters, 1974
Olenek	?	?	?	Walters, 1974
Venezuela				
Orinoco	Olig.–Mioc.	26,064 × 10^6 bbl	9–12	Alayeto and Louder, 1974

تتفحص هذه الفقرة تركيب الرمل القاري والنفوط الثقيلة المرتبطة معه وطرق تواجدها وأصلها وطرق استخراجها. ولقد أعطيت تفاصيل أخرى عن الموضوع من قبل (Phizacherley and Scott, 1967) و (Hills, 1974). أن التغير من النفط الخام الاعتيادي مروراً بالنفط الخام الى القار هي عملية تدريجية بمصطلحات الصفات الفيزيائية والكيميائية معاً. فمن الناحية الفيزيائية، يصبح النفط أثقل وأكثر لزوجة. ومن الناحية الكيميائية، يميل النفط الذي يحتوي على كميات أكبر من الشوائب اللاعضوية، ويصبح أكثر احتواء على المواد الكبريتية والأروماتية. وتتغاير نسبة الكبريت في الرمل النفطي من نحو ٠,٥ الى ٥ بالمئة، ولكنها في بعض الأحيان تتجاوز هذا المدى، مرتفعة الى ٦ الى ٨ بالمئة في ترسبات لابريا La Brea في ترينداد. ان هذه القيمة تقارن مع معدل تبلغ قيمته نحو ١ بالمئة في النفوط الخام الاعتيادية. ويظهر الشكل (٩-٦) تركيب عدد من ترسبات الرمل القاري مقارنة مع النفوط الخفيفة. وكما هو موضح في الشكل، مقارنة مع النفوط الاعتيادية، يميل الرمل القاري الى أن يكون غنياً بالأصماغ والاسفلتين بينما يفتقر الى الهايدروكاربونات المشبعة. وهنالك القليل من الفروقات الهامة في محتواها من الأرومات.

اقترح تفسيران ممكنان لتفسير هذه الفروقات بين النفوط الخام الاعتيادية الخفيفة والرمل القاري. ان النفوط الثقيلة قد تكون حديثة التكوّن ولم تنضج بعد لتتحول الى نفط خفيف. أو كتفسير بديل، ان النفوط الثقيلة ربما تكون قد نتجت من تحلل النفط الخفيف الناضج. ولقد ناقش العديد من الجيولوجيين التطور الكيميائي للنفوط الناضجة عندما تهاجر النفوط الى النضوحات على المصائد الضحلة وتتعرض الى الغسل بالمياه الجوية (على سبيل المثال (Byramjee, 1983, Evans et al., 1971). يحدث التحلل بكلا العمليات العضوية واللاعضوية. ان العديد من الهايدروكاربونات المشبعة تكون قابلة للذوبان في الماء، وخصوصا الاعضاء الاخف من سلسلة البرافين. ويحدث التحلل العضوي خلال عمل البكتيريا. كما ان البكتريا المختزلة للكبريتات قد تكون مسؤولة ايضا عن سحب ايونات الكبريتات من المياه الجوية وتربط معها الهايدروكاربونات لتكون الاوثيوفينات البنزية Benziothiophenes والاوثيوفينات البنزية الثنائية Dibenzothiophenes.

ومع ذلك، فأن اصل النفوط الثقيلة مسألة تثير الجدل. وتعد الرمال القارية الطباشيرية من البرتا حالة تثبت ذلك، رغم انها ربما افضل الامثلة المدروسة في العالم. ولقد



1 = Aquitaine
2 = Switzerland
3 = Cherokee, Kansas
4 = Athabaska, Canada
5 = Cold Lake, Canada
6 = Lloydminster, Canada
7 = Medicine River, Canada

الشكل ٩-٦: مثلث يوضح تكوين الانواع المختلفة من الرمل القاري. (المعطيات من Hills, 1974).

ذكرت نظرية مبكرة ان النفط قد تكون في الحقيقة في الرمال التي تحتويه الان (Ball, 1935). وتضم الاسباب التي أدت الى اقتراح هذه النظرية الطبيعة المستوية للترسبات والغياب الظاهري للنفوط الخام الاعتيادية في المنطقة. ولقد عرف الان ان هذه الفكرة ليست صحيحة. ويعتقد الان عموما ان هايدروكاربونات اثاباسكا قد هاجرت الى مكمنها الحالي بالطريقة التقليدية.

اقترح العديد من الجيولوجيين والكيميائيين ان النفوط الثقيلة هي نفوط ناضجة تعرضت الى التحلل بغسل المياه الجوية. ولقد أظهر (Deroo et al., 1974) الكيفية التي يمكن بها تتبع هذه النفوط تدريجيا نحو الاعلى باتجاه حافة الحوض من مكامن النفط

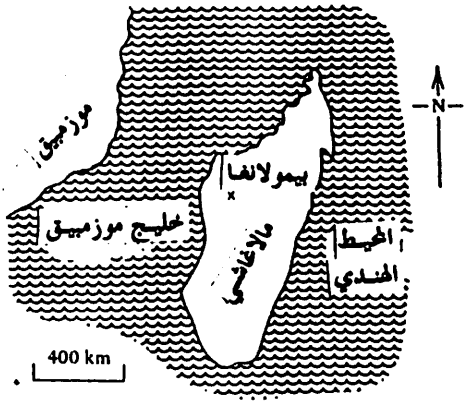
الخفيف العميقة. ويتصاحب هذا التغير مع التضاؤل التدريجي في ملوحة الماء من أكثر من ٨٠ غم/لتر الى أقل من ٢٠ غم/لتر على مسافة تبلغ نحو ٣٠٠ كيلومتر. ومع ذلك، فلقد تم التشكيك بهذه النظرية من قبل (Montgomery 1974) الذي يفضل اصلا غير ناضج لهذه الترسبات. وتضم الادلة لصالح هذه النظرية محتواها العالي من البورفرينات وغياب مادة البنزين غير الذائبة، وتوزيع وزنها الجزيئي ونسبة النيكل-الفناديوم فيها.

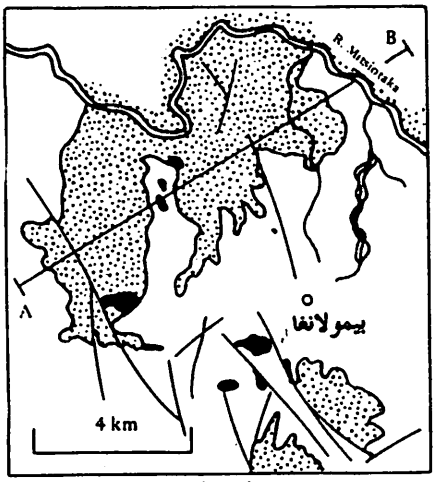
لعل من المناسب عند هذه النقطة ان نتفحص طبيعة الضوء الذي يلقيه الوضع الجيولوجي للرمل القاري على اصله. ولقد استعرض (Kappeler, 1967) طرق تكون الرمل القاري في انحاء مختلفة من العالم. وتحدث غالبية هذه الترسبات حيث تتقدم الاحواض الرئيسية على دروع العصر ما قبل الكامبري. وهي تتواجد في الرمال النهرية والدلتائية، ونادرا ما توجد في الرمال البحرية والصخور الجيرية. فاذا ما تصورناها على نطاق صغير، فأن الرمال القارية توجد بطريقتين: امّا موضعياً في المصائد المكسرة بفعل التعرية، او أنها هاجرت من المصائد العميقة الى النضوحات السطحية، وتُعَّد رمال بيمولانغا النفطية Bemolanga Oil Sands في مالاغاشي مثالا جيدا على الأولى،وترسبات لابريا في ترينداد على الثانية.

أن رمال بيمولانغا النفطية هي ثالث اكبر مثل هذه الترسبات في العالم (الشكل ٩-٧). وهي تتواجد في مجموعة اسالو Isalo Group (الترياسي) في منظومة كارو Karroo System، مغطية مساحة قدرها ٣٨٨ كيلومتراً مربعا ويصل سمك الترسبات الفوقية الى اكثر من ١٠٠ متر. والرمال القارية موجودة في طيات متفلقة معقدة حيث ازيلت الطبقات الغطائية من طين بيمولانغا بالتعرية الحديثة.

ويبلغ معدل سمك الغطاء نحو ٣٠ متراً، وقُدّرَ سمك الاحتياطي الموضعي بحدود ١.٧٥ مليون برميل. والرمال ذات تطبق متقاطع خشنة وذات اصل نهري. ولقد ادت قواطع موضعية من العصر الطباشيري الى التحول الموضعي للقار. ويعتقد ان سجيل ساكامينا Sakamena Shale التحتي قد وفر مصدر النفط (Kamen-kaye, 1983, kent, 1954).

توضح بحيرة اسفلت لا بريا في ترينداد النوع الثاني من الرمل القاري، حيث هاجر النفط من تراكم في طية محدبة من العصر الطباشيري الى الاعلى خلال صخور غطائية



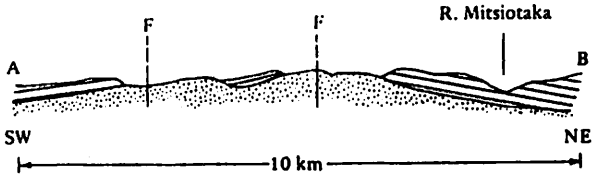


خارطة موقعية

طين بيمولانغا (صخور الغطاء)

رمال بيمولانغا النفطية

سدادات بتيومينية



مقطع عرضي على امتداد **A-B**

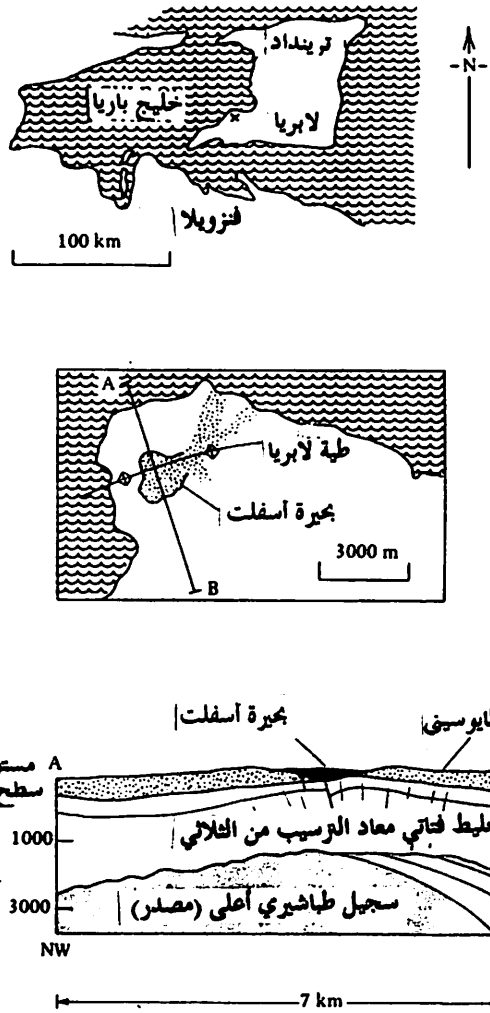
الشكل ٩-٧: خرائط ومقاطع عرضية توضح تواجد رمال بيمولانغا القارية في مالاغاشي. (عن Kent, 1954).

غير مكتملة كيما يصل السطح (الشكل ٩-٨). ويقع القار في منخفض ضمن رمال المايوسيني. وله كثافة جذبية تتراوح بين ١ الى ٢ وحدة من وحدات API من تشبع البتيومن وبين ٦ الى ٨ بالمئة من الكبريت. وتغطي البحيرة مساحة تبلغ نحو ١٢٦ أكراً وله احتياطي مقدر يبلغ نحو مليونٌ برميل (Walters, 1974, Sutor, 1951).

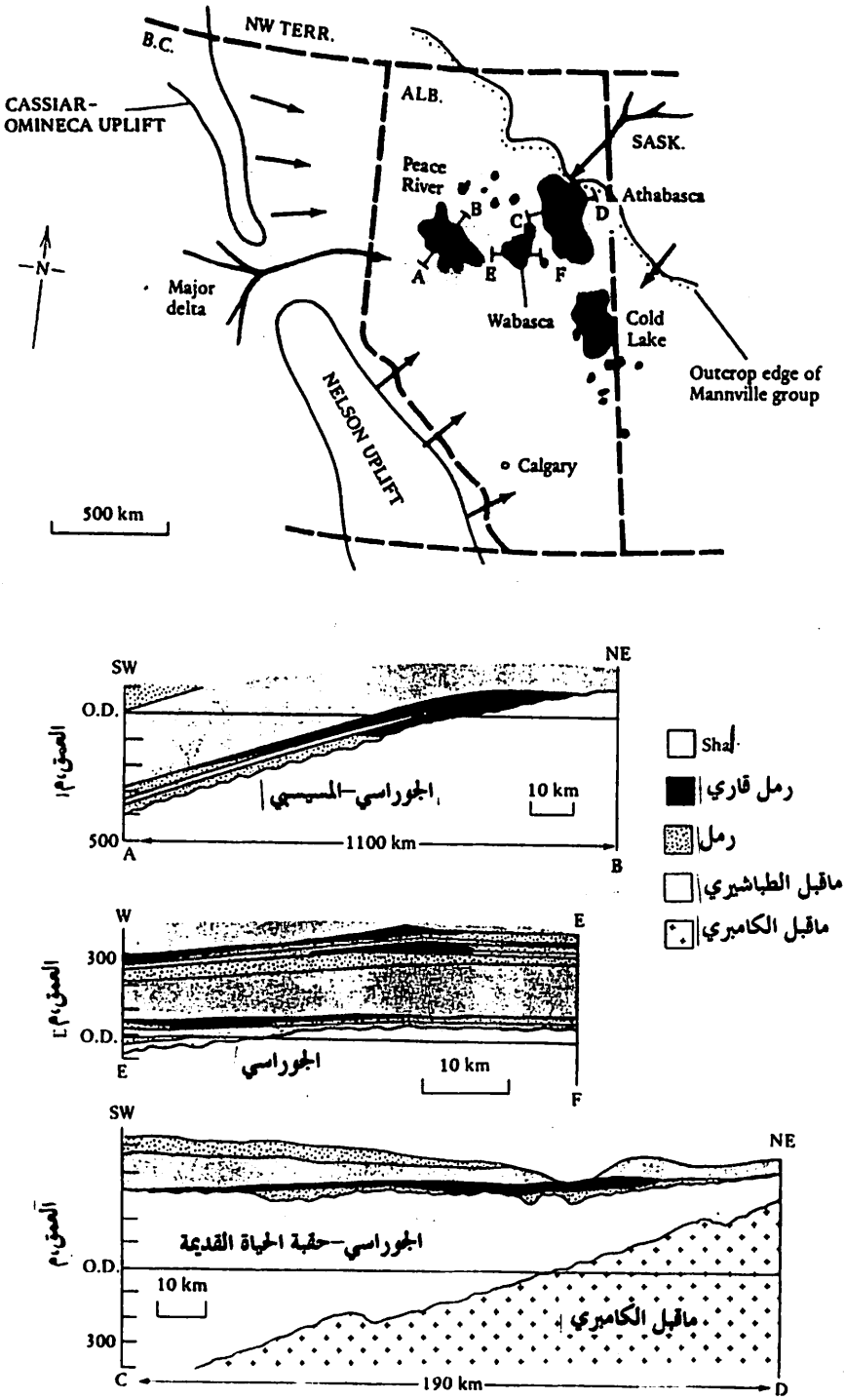
أن اصل تكون هذين النوعين من الرمل القاري واضح الى حد ما. ولعل من المفيد ان نقارنها مع ترسبات البرتا في كندا التي ما يزال اصلها مثيراً للجدل. أن الاحصائيات الاساسية والمعطيات الجيولوجية لرمال الطباشيري الاسفل القارية في البرتا معطاة في الجدول (٩-٢) والشكل (٩-٩). وهي توجد في ترسبات رمال نهرية دلتائية ضمن مجموعة مانفيل Manville Group، التي اشتقت بالدرجة الاساسية من الغرب، ولكن مع انتشار دلتائي موضعي من الرمال من اتجاه الشرق. وبعد ذلك، أنثنت الطبقات اقليمياً باتجاه الغرب وطويت طيا خفيفا. وتحررت نفوط خفيفة اعتيادية (بين ٣٥-٤٠ وحدة API) من الجزء الغربي من حوض البرتا، ولكن الرمال القارية تُصادف الآن في مصائد تناقص السمك الطباقي والمصائد المترابطة (الطيات وتناقص السمك) على امتداد الحافة الشرقية. ومثلما لاحظنا مسبقا، فأن أصل هذه الرمال القارية ما يزال مثيراً للجدل. ويدور الجدل حول مسألة ان كان النفط غير ناضج أو ناضج ومن ثم تعرض لاحقا الى التحلل. ان مؤيدو فكرة الاصل غير الناضج يعتقدون ان التركيب الكيميائي للنفط يظهر أنه لم يتعرض الى نضوج حراري هام. اما مؤيدو فكرة التحلل فأنهم يشيرون الى الخفة التدريجية للنفط باتجاه الحوض مصحوبةً بزيادة في ملوحة مياه التكوين. كما أنهم وجدوا ايضا ان من الصعب فهم الكيفية التي يهاجر بها نفط ثقيل لزج الى المكامن. في حين ان من السهل تفسير هجرة النفط الخفيف الى اعلى حافة الحوض وتحلله اللاحق. ومع ذلك فان الرمال عالية المسامية (١-٥ دارسي). لذلك اذا ما توفر الوقت الكافي فان حتى النفط الثقيل يمكن ان يتحرك خلالها. وليس اصل الرمل القارئ وحده هو الذي يثير للجدل ولكن قيمته الاقتصادية ايضا.

استخلاص النفط من الرمال القارية Extraction Of Oil From Tar Sands

خلال نصف القرن الماضي، منع السعر المنخفض للنفط الخام التقليدي الخفيف الاهتمام بانتاج النفط الثقيل. وبغياب الحافز لانتاج النفط من الرمل القاري، كُرِّس اهتمام



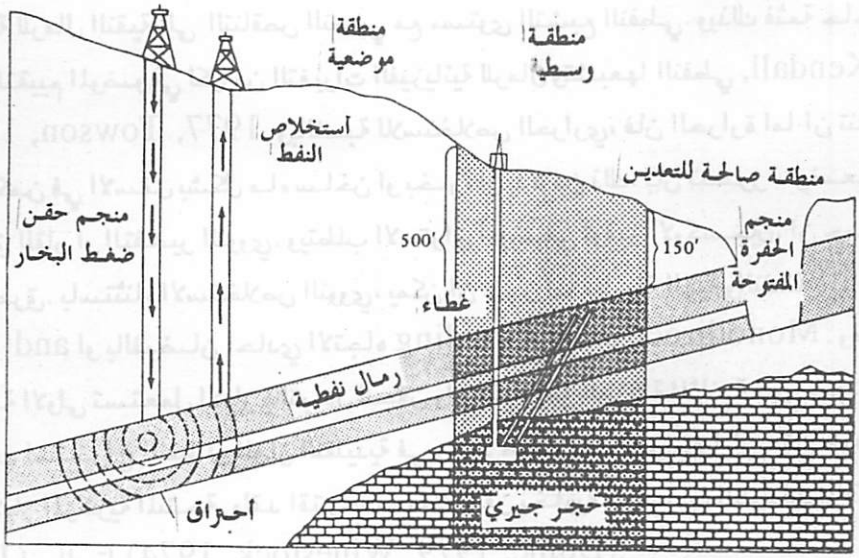
الشكل ٩-٨: خرائط ومقاطع عرضية توضح رمال لابريا القارية في ترينداد. (عن Kugler, 1961).



الشكل ٩-٩: خارطة ومقطع عرضي لرمال الطباشيري الاسفل القارية في البرتا. (عن Jardine, 1974).

ضئيل بالابحاث المتعلقة بتقنية استخلاص النفط. ولقد تغير كل ذلك بعد الارتفاع الهائل في اسعار النفط الخام في أوائل السبعينات، الذي تزامن مع النقصان العالمي المهدد في امدادات النفط التقليدي.

طُورت الان خططٌ عديدةٌ لاستخلاص النفط من الرمال القارية، يعملُ بعضها على اساس تجاري او كمحطات رائدة، وسوف يليها الكثير. ويظهر الشكل (٩-١٠) الطرق الرئيسية لاستخلاص النفط الثقيل.



الشكل ٩-١٠: طرق أستخلاص النفط من رمال أثاباسكا القارية. (عن Wennekers, 1981)

والطريقتان الرئيسيتان هما التعدين السطحي Surface mining والاستخلاص تحت السطحي Subsurface extraction. ان تقنية التعدين النزعي Strip mining للرمل القاري مشابهة الى تقنية استخلاص الحفرة المفتوحة open-cast extraction للصخور الاقتصادية الاخرى. وهي تمثل ايضا مشاكل مشابهة، وبشكل خاص، السمك الاقتصادي للصخور الفوقية التي قبولها ودرجة المعارضة البيئية من قبل السكان المحليين.

ما ان يتم استخراج الرمل القاري حتى يجب استخلاص النفوط التي تحتويها. وفي

الوقت الحاضر، تتكون الطريقة التقليدية من تفكيك الرمل وفصل النفط بالماء الساخن و / او البخار، ويتم الان استعمال نوعيات مختلفة من هذه التقنيات على الرمل القاري في البرتا.

حينما تكون الصخور الفوقية سميكة جدا قياسا الى تعدين الحفرة المفتوحة التقليدي، يجب تطوير طرق استخلاص موضعي. ومن الناحية الاساسية، يتم استعمال نوعين من طرق الاستخلاص: احداهما تشتمل على حقن مذيب لكي يذوب النفط، والاخرى تهدف الى تقليل لزوجة النفط من خلال التسخين. وكلا الطريقتين يعاقان بميل النفوذية المرتفعة للرمال النقية الى التناقص النسبي مع مستوى التشبع النفطي. وبذلك فثمة حاجة هائلة للتقييم الموضوعي لكل من التغيرات الفيزيائية للرمال وتشبعها النفطي (Kendall, 1977, Towson, 1977). وبالنسبة للاستخلاص الحراري، فأن الحرارة اما ان تنقل الى المكمن في الاسفل بشكل ماء ساخن او بخار، او بدلا من ذلك، بأن تتحرر موضعيا بأحراق القار او التفجير النووي. ويتطلب الاحتراق الموضعي توفير الاوكسجين. ان جميع هذه الطرق، باستثناء الاستخلاص النووي، يمكن ان تنجز اما بطريقة الهبة والنفخة Huff and puff او بالفيضان احادي الاتجاه Monodirectional Flodding. وفي الطريقة الاولى تستعمل الابار بالتبادل للحقن والانتاج. اما الطريقة الثانية فهي شبيهة بتقنيات استخراج النفط او الغاز التقليدية في وجود طوفان مستمر من ابار حقن طرفية الى الابار المركزية المنتجة. ولقد اقترحت محطة حقن بخارية لترسبات الكولدليكCold Lake في البرتا (Dome, 1979, Winestock, 1974).

في عام ١٩٥٦ ابتدأت شركة شل برنامجا يمتد لعشر سنوات لحقن البخار في رمال اثاباسكا القارية (Doscher, 1967). ولقد تم ضخ هايدروكسيد الصوديوم الساخن الى قاعدة الطبقة المنتجة على امتداد تكسرات أفقية تربط الابار المنتجة وابار الحقن. ولقد ادت هذه العملية الى استحلاب emulsified النفط مما يسمح له بالانتاج وعندما تسخن الصخور، تنخفض لزوجة النفط بحيث انه يبدأ بالانسياب الى التكسرات. وما ان يتم استكمال العملية، فان من الممكن ازالة سائل هايدروكسيد الصوديوم ويحقن بدلا منه الماء الساخن او البخار.

وفي المنطقة نفسها، جربت شركة امكو طريقة يتبادل فيها الاحتراق مع فيضان الماء. ومن الناحية المبدئية يتم تكسير الرمال هايدروليكياً لزيادة النفوذية. وتتبادل حالات

الاحتراق مع فترات يحقن فيها خليط من الهواء-الماء (Anon, 1972).

استعمل عدد من طرق الاستخراج الموضعي على رمال اورينوكو Orinoco tar sands القارية في فنزويلا (Finken and Heldau, 1972). وتشتمل احدى أبسط الطرق على حقن نفط الديزل المصفى لكي يذّوب النفط الخام الثقيل وينقله. ولقد نفذت مشاريع استخلاص موضعية في الولايات المتحدة الامريكية في ميزوري وكاليفورنيا. كما جربت عمليات احتراق عكسي في بلمي في ميزوري (Trantham and Marx, 1966). وفي اوائل الستينات اجريت طريقة حقن الهبة والنفخة في رمل فاكا القاري Vaca tar sands في كاليفورنيا. ان جميع طرق الاستخراج الموضعي هذه ما تزال في مرحلة التطوير. ولمراجعة لطرق الاستخراج المختلفة، أنظر (Ali, 1974).

وفي الختام، فان استخلاص النفط من انواع الرمال القارية في الوقت الحاضر نو وضع اقتصادي هامشي، لكن هذا الوضع سوف يتغير تدريجيا بسبب الترابط بين التقنية المطورة والارتفاع العالمي طويل المدى في اسعار الطاقة.

السجيل الزيتي OIL SHALES

السجيل الزيتي صخرة رسوبية دقيقة الحبيبات تنتج النفط بعد التسخين. وهي تختلف عن الرمل القاري في أكثر من حجم الحبيبات. وفي الرمل القاري يكون النفط حرا ويوجد داخل المسامات، ولكن في السجيل الزيتي يندر ان يتواجد النفط حرا ولكنه موجود ضمن التركيب المعقد للكيروجين الذي يمكن تقطيره منه. وينتشر السجيل الزيتي في انحاء مختلفة من العالم وقد يَحتجز داخله من الطاقة أكثر من كل الطاقة التي تم اكتشافها من احتياطات النفط التقليدية وقد يحتوي السجيل العالمي على نحو ٣٠ ترليون من النفط، منها ٢ بالمئة فقط يمكن استخراجها باستعمال التقنية الحالية (Yen and Chilingarian, 1976).

كان السجيل الزيتي معروفا للانسان منذ عدة قرون. اذ استعملت قبائل المنغول رؤوس سهام السجيل الزيتي المحترق لاثارة الرعب في قلوب الحراس الصينيين على سور الصين العظيم خلال القرن الثالث عشر (Naasiam, 1937). وفي عام ١٦٩٤ اصدر التاج البريطاني ترخيصاً باسم مارتن ايل لاستخلاص النفط من السجيل (صفحة ٢). وبَعد

ذلك، نشأت صناعة استخراجية محسوسة رغم انها خاملة مؤقتاً في الوقت الحاضر.

تراجع الفقرات التالية تركيب السجيل الزيتي وتوزيعه واصله واستخراجه، ويمكن العثور على تفاصيل اكثر في كل من (Russell, 1980, Burger, 1973, Yen and chilingarian, 1976).

التركيب

ان اغلب السجيل الزيتي هي صخور طينية وغرينية ولكن المارل البتيوميني والحجر الطيني الجيري معروفة ايضا. ويمكن تقسيم المكونات الاساسية للسجيل الزيتي على النحو التالي:-

١. المكونات اللاعضوية (اقل من ٩٠٪)

فتاتية: الكوارتز (المرو)، الفلسبار، المايكا

موضعية النشأة: المعادن الثانوية، الجيريات(الكاربونات)، الاطيان، البايرايت

٢. المكونات العضوية (١٠-٢٧٪)

البتيومن (الهايدروكاربونات تذوب في ثاني كبريتيد الكاربون = ٢٪

الكيروجين (لا تذوب في ثاني كبريتيد الكاربون) = ٨٪

ان المقدار المضبوط للمادة العضوية المطلوب قبل ان يصبح بالامكان تصنيف الصخرة كسجيل زيتي هو امر اعتباطي. ويؤخذ حد قطع قدره ١٠ بالمئة عادة. وبزيادة المحتوى العضوي، يتحول السجيل الزيتي الى فحم قنوات Cannel Coals. ولقد أخذ الرقم ٢٧ بالمئة كقيمة حرجة بين السجيل الزيتي وبين فحم القنوات (Shanks et al., 1976).

يختلف المكون اللاعضوي للسجيل الزيتي قليلا عن ذلك الموجود في السجيل اللاعضوي. وهنالك هيكل من الحبيبات الفتاتية من الكوارتز والفلسبار والمايكا والمعادن الاضافية الاخرى. وهنالك كميات كبيرة من الطين موجودة ايضا على شكل بلورات موضعية النشأة او كتل فتاتية. وتوجد معادن جيرية مختلفة سواء كانت كسارة هيكلية من الكالسايت

والكالسايت موضعي النشأة والدولومايت والالكرايت والسيدرايت. والبايرايت الموضعي النشأة بشكل خاص صفة مميزة لصخور السجيل الزيتي بسبب اصله غير اللاهوائي وبسببٌ وجود هذا الكبريت احدى المشاكل الرئيسية في تصفية السجيل الزيتي.

يُعدُّ الكيروجين هو المكون الاساسي للسجيل الزيتي. وفي دراسة عن السجيل الزيتي من العصر الكاربوني (الفحمي) الاسكتلندي، عرف (Stewart, 1912) الكيروجين على أنه "اسم اعطي للمادة الكاربونية اثناء التقطير". ولقد اقترح المصطلح (كيروجين) من قبل البروفيسور كروم براون Crum Brown. وبعد ذلك، اقترحت تعريفات أكثر صرامة (أنظر على سبيل المثال Dott and Reynolds, 1969). ان تعريف ستيوارت القديم للكيروجين يُعَدّ الان تعريفا فضفاضا بالنسبة للعديد من الجهات، لانه سوف يضم الجزء البتيوميني. وفي الوقت الحاضر، يعرف الكيروجين ويميز عن البتيومن بانعدام ذوبانيته في ثاني كبريتيد الكاربون. وهنالك مناقشة اكثر استفاضة عن الاصل الكيميائي للكيروجين واهميته معطاة في صفحة ١٨٧.

يصعب تحديد السلف العضوي للكيروجين في السجيل الزيتي. ومع ذلك، هنالك نوعان معينان من السجيل العضوي اللذان عرف أصلهما الاحيائي تماما وهما التوربنايت Torbonite والتسمنايت Tasmanite. أشتق اسم توربنايت من قرية توربان في وادي المدلاند باسكوتلندا حيث توجد هذه النوعية من السجيل الزيتي في عروق الفحم من العصر الكاربوني. كما يسمى التوربان ايضا باسم الفحم القيري الوقاد Bog head او فحم القنوات Cannel Coal وهو يتكون من مادة طحلبية، ويحتوي على بقايا طحالب المياه العذبة الزرقاء-الخضراء بوتريوكوكس Botryococcus. ويبدو ان التوربنايت مرادف للكوسيرايت Kukuserite، وهو سجيل زيتي من الاوردوفيشي الذي يوجد في استونيا.

وصفت ترسبات طحلبية حديثة مشابهة للتوربنايت من بحيرة بالكاش Balkash في سيبيريا ومن مستنقع كورونغ Coorong Lagoon في جنوب استراليا. وتعرف هذه التواجدات طبيعياً باسم البالكاشايت Balkashite والكورنغايت Coorongite على التوالي. والكورونغايت هي خليط هلامي أخضر مصفر وعندما يجف يتحول الى مادة غامقة مطاطة (Broughton, 1920). ويمكن ملاحظة تركيبه الطحلبي تحت المجهر.

التسمنايت نوعية نادرة من السجيل الزيتي الذي يوجد بشكل رئيسي في تسمانيا

باستراليا (الموقع النموذجي) وفي بروكس رينج Brooks Range في شمال الاسكا. وهو يتكون من ليوسفورات Leiosphores الطحلب تسمنايت Tasmanites. ورغم أنه مشابه للتوربنايت في التركيب الا انه يوجد في الترسبات البحرية.

أن كلا من التوربنايت والتسمنايت يمثلان نوعيتين نادرتين من السجيل الزيتي. وان مصدر المادة العضوية لاغلب السجيل الزيتي يعد امراً غير محسوم، ولكن يعتقد بشكل عام انه في الاصل خليط من المواد الطحلبية والارضية الدبالية Terrestrial Humic .

التوزيع

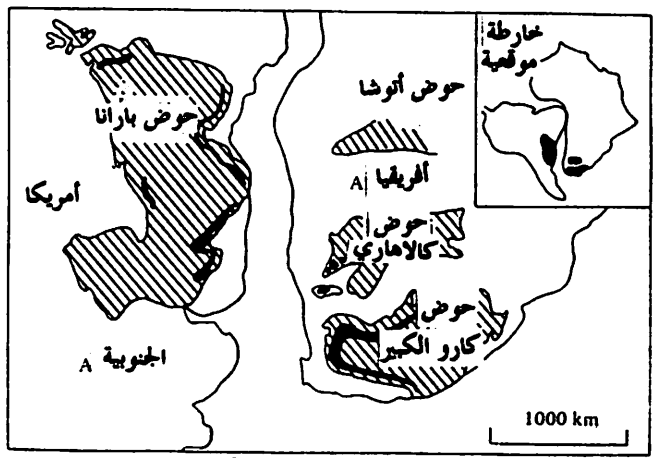
ان العرض الحالي لبيئة السجيل الزيتي وتوزيعه العالمي الزمني يستند على المسوحات التي أجراها (Schlatter, 1969)، (Duncan, 1976, Cane, 1965, Duncan and Swanson, 1965).

رغم أن السجيل الكاربوني والصخور المصدرية الهايدروكاربونية معروفة (صفحة ١٨٣)، الا ان هنالك، على ما يبدو، القليل من السجيل الزيتي الاصلي من عصر ما قبل الكامبري. ولكن في حقبة الحياة القديمة السفلى، ترسب السجيل الزيتي السليكي على الاجراف البحرية في نصف الكرة الشمالي. وتُعد ترسبات سجيل الوم Alum Shale وكوكيرسايت Kukersite في الدرع البلطيقي أمثلة على ذلك. وفي حقبة الحياة القديمة العليا، ترسب السجيل الزيتي البحري الجرفي في اواسط روسيا الاوربية وفي الاجزاء الوسطى والشرقية من الولايات المتحدة الامريكية وكندا. وبعد سجيل شاتانغوا Chattangooa Shale مثالا على النوع الاخير، ورغم انه يغطي نحو ٥٠٠.٠٠٠ كيلومتر مربع الا ان له طباقية منتظمة بشكل يثير الاهتمام.

يبدو ان البيئات المكونة للسجيل الزيتي قد تغيرت بشكل هام عند الحد الفاصل البارلي الدلتائي-البحيري صفة مميزة لترسبات العصر الكاربوني في جميع انحاء العالم. ويعود سجيل المدلاند الزيتي في اسكوتلندا الذي يضم التوربنايت الى هذا العمر والنوع مثلما هو الامر مع الامثلة الاخرى في فرنسا واسبانيا وجنوب افريقيا واستراليا وروسيا. ومع ذلك فان سجيل البرت الزيتي Albert Oil Shale في نوفا سكوتيا هو بحيري الاصل كليا.

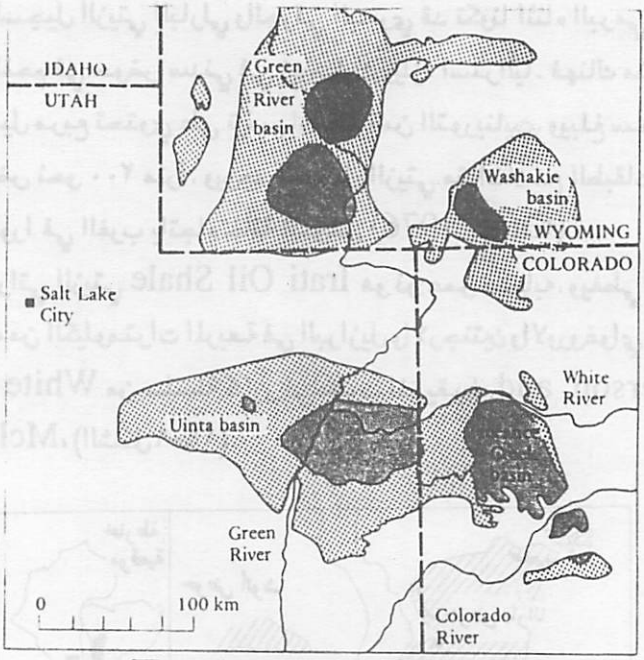
ان كلا من السجيل الزيتي البارلي والجرفي البحري قد تكونا اثناء البرمي. ويشمل النوع الاول عروق الفحم في حوض سدني في نيوساوث ويلز، استراليا. فهناك منطقة تبلغ مساحتها ٣٠٠٠ ميل مربع تحتوي على ترسبات غنية من التوربنايت. ويبلغ سمك عروق الفحم في هذه الحوض نحو ٢٠٠ مترا. ويوجد السجيل الزيتي متداخلا مع الطبقات الحاملة للفحم ولكنه أكثر تطورا في الغرب باتجاه حافة الحوض (Cane, 1976).

ان سجيل أراتي الزيتي Irati Oil Shale هو ذو عمر مشابه. ويغطي السجيل الزيتي مئات الالاف من الكيلومترات المربعة في البرازيل والارجنتين والاوروغواي ومكافئه وايت باند White Band من سلسلة كارو في جنوب افريقيا (Anderson and Mclachlan, 1979)، (الشكل٩-١١).



الشكل ٩-١١: تكشف السجيل الزيتي البرمي في أمريكا الجنوبية وجنوب أفريقيا. أن ترسبات السجيل الزيتي هذه ترسبت في العديد من البحيرات الشاسعة. (عن Anderson and McLachlan, 1979).

شهدت حقبة الحياة الوسطى المتأخرة تَكَوّن العديد من طبقات السجيل الزيتي في البيئات البحرية والدلتائية والبحيرية. وفي شمال غرب اوربا بشكل خاص، ابتدأت مرحلة من ترسيب السجيل الزيتي والسجيل الغني بالمواد العضوية في شمال المانيا خلال الياسي



الشكل ٩-١٢: تكشفات تكوين الغرين ريفر الحامل للسجيل الزيتي (الايوسيني) في وسط الولايات المتحدة الامريكية. ترسب التكوين في سلسلة من البحيرات المرتبطة بين فترة وأخرى مع البخريات. (عن Knutson, 1981).

وتحركت خلال عمر مزدوج Diachronically باتجاه الشمال على امتداد بحر الشمال الى حوض شرق غرينلاند من حقبة الحياة الوسطى، حيث استمر ترسيب الاطيان الغنية بالمواد العضوية الى السينوماني. وتضم هذه الترسبات سجيل كيمرج الزيتي لساحل دورست. وهناك تم تعدين "فحم كيمرج" الذي يبلغ سمكه نحو مترين باعتباره سجيلا زيتيا طوال سنين عديدة. ورغم انه كان يستعمل محليا كوقود منزلي، الا ان محتواه الكبريتي المرتفع لم يكن ليتوامم مع التقاليد السياحية. ان المادة العضوية في طين كيمرج هي نوع II من الكيروجين المزيج، رغم ان السجيل الزيتي نفسه كان من نوع I من الكيروجين الطحلبي (اللوحة ١). وتعد صخور السجيل العضوي الكميرجي هي الصخرة المصدرية الرئيسية لنفط بحر الشمال، ويزداد غناها كلما تم تتبعها من مناطق الجرف الى منخسفات نظام الانهدام

المحوري (Goff, 1983, Barnard and Cooper, 1981). وتوجد ترسبات سجيل زيتي بحرية متكونة في منصات Platform مشابهة في كل من الالاسكا وفي ساسكاتشيوان ومانيبوتا وكندا ونايجيريا.

شهدت حقبة الحياة الحديثة عودة اخرى الى ترسيب السجيل الزيتي البحيري، رغم ان السجيل الزيتي البحري يوجد ايضا. ان افضل مثال على الترسيب البحيري للسجيل الزيتي هو تكوين الغرين ريفر (الايوسيني) في كولورادو ويومنغ (الشكل ٩-١٢). وفي هذه المنطقة تُغطي صخور السجيل الزيتي مساحة تبلغ ١٦.٥٠٠ ميلاً مربعاً ويصل سمكها الى نحو ٧٠٠ متر (Knutson, 1981, Duncan and Swanson, 1965). وقدر الاحتياطي الكلي، اذا ما أمكن استخلاصه، بنحو ١.٨ ترليون برميل (Yen and Chilingerian, 1976). ولقد اعطت تحليلات السجيل الزيتي لتكوين الغرين ريفر التركيب التالي (Yan and Chilingerian).

الكيروجين	١١.٠٤٪
البتيومن	٢.٧٦٪
مجموع المادة العضوية	١٤.١٦٪
الدولومايت والكالسايت	٤٣.١٪
الفلسبار	٢٠.٧٪
المايكا والاطيان	١٢.٩٪
الكوارتز	٨.٦٪
البايرايت	٠.٨٦٪
مجموع المادة غير العضوية	٨٥.٨٪
المجموع الكلي	٩٩.٩٦٪

تُظهر هذه المراجعة ان وجود السجيل الزيتي وتوزيعه واسع الانتشار في كل من الزمان والمكان. وهنالك ثلاث بيئات ترسيبية رئيسية مناسبة لتولد السجيل الزيتي: وهي البحيرات والدلتات التي يسودها النظام النهري وبعض الاجراف البحرية المعينة.

يُميّز التوربنايت والسجيل الزيتي ذو الاصل الخليط من الدبالي والطحلبي غير البحري ترسبات السجيل البحيرية والدلتائية. ويكون السجيل البحري الضحل ذو تركيب

خليط من الدبالي والطحلبي البحري ويضم نوعية التسمنايت النادرة التي تغلب عليها الطبيعة الطحلبية. يرتبط السجيل الزيتي سواء البحيري والبحري في بعض الاحيان مع الترسيب الكيميائي الموضعي. وتنتمي الترسبات الجيرية والتبخريات من تكوين الغرين ريفر الى الانواع البحيرية، في حين ان الفوسفات والصوان من تكوين فسفوريا تعود الى الانواع البحرية.

استخلاص النفط من السجيل الزيتي Extraction of Oil from Oil Shale

تناولت الفقرة السابقة التوزيع الواسع للسجيل الزيتي في انحاء العالم. ولقد قُدِّر الاحتياطي العالمي من السجيل الزيتي بحدود ٣٠ ترليون برميل، وتحتوي الولايات المتحدة بمفردها على أكثر من ٧٠٠ مليار برميل (Yen and Chilingarian, 1976).

ابتدأ الاستخراج الاقتصادي للنفط من السجيل من قبل جيمس يونغ James Young في اسكوتلندا عام ١٨٦٢ بعد ثلاث سنوات من حفر بئر دريك في بنسلفانيا في كل من انكلترا وفرنسا واسبانيا والسويد واستراليا وجنوب افريقيا. وفي كل هذه البلدان انهارت هذه الصناعة.

وفي ولاية بارانا في البرازيل، ابتدأت محطة تبلغ طاقتها ٢٥٠٠ طن/يوم معتمدة على سجيل أراتي الزيتي الانتاج في اواسط السبعينات. وتنتج شركة بتروبراس البرازيلية حاليا نحو ٢٢٠٠ طن/يوم من فحم المعوجات Retort في ساوماتيوس. وتُبنى محطة تبلغ طاقتها ٤٤٠٠ برميل/يوم، وهنالك خطط توضع لبناء محطة اخرى تبلغ طاقتها ٥٠.٠٠٠ برميل/يوم. وفي مناطق سجيل الغرين ريفر هنالك نحو ١٠ محطات لاستخراج النفط في مختلف مراحل التخطيط والانشاء. وتضم هذه المحطات التعدين النزعي وتعدين الحجرات والاعمدة Room and Pillar Mining وكذلك التقطير الموضعي In Situ Retorting (الشكل ٢-١٢). وخلال السنوات الثلاثين الاخيرة، كانت هنالك محطتان تعملان في الغراند فالي في كولورادو.

وفي الوقت الحاضر، فأن الصين وروسيا هما الدولتان الوحيدتان اللتان تمتلكان صناعات كبيرة لاستخراج السجيل الزيتي. وفي روسيا تعمل محطات الاستخراج في استونيا (قرب لينغراد-بطرسبيرغ حاليا) او في حوض الفولغا. وفي الصين هنالك

محطات في فوشون في منشوريا وفي ماومنغ في مقاطعة كوانتونغ (أنظر Prien, 1976 لمراجعة تاريخية).

أن اسباب نشوء صناعة استخراج السجيل الزيتي وانهيارها ذات وجهين: اقتصادية وتقنية. فما ان ابتدأت تقنية استخراج النفط من الابار، فأن التوسع السريع في صناعة النفط التقليدية وضع استخراج السجيل الزيتي خارج السوق. فالنفط الخام يمكن ان يوجد وينتج وينقل ويُصفى ويسوق بأسعار ادنى من السجيل الزيتي. ومع ذلك، ففي الوقت الحاضر، فأن صناعة السجيل الزيتي هي في موقف مشابه لصناعة الرمل القاري. فأسعار النفط التقليدي هي في تصاعد مستمر، في حين ان تقنية الحصول على النفط غير التقليدي في تحسن. ولسرعان ما يحين الوقت الذي يصبح فيه سعر استخراج السجيل الزيتي موازيا لأسعار النفط التقليدي.

ومرة أخرى، وشأنه شأن الرمل القاري، هنالك طريقتان اساسيتان في الحصول على النفط من السجيل وهما:

(١) بالتقطير العوجي Retorting للسجيل المستخرج عند السطح.

(٢) بالاستخراج تحت السطحي الموضعي (Dinneen, 1976).

تعتمد أغلب طرق الاستخراج السطحي على تعدين الحفر المكشوفة Open-cast للسجيل، رغم ان "فحم" كيمرج قد تم تعدينه على امتداد السرب الافقية Adits التقليدية. يوضع بعد ذلك السجيل المسحوق في معوجة Retort ويسخن. ويمكن استعمال العديد من مصادر الحرارة، ولكن المصدر الاكثر كفاءة هو احراق الغاز الذي تمّ توليده من السجيل مسبقاً وعندما يسخن السجيل (عموما في حدود ٤٢٥ الى ٤٧٥ درجة مئوية) يتحرر النفط والغاز بالتحلل الحراري Pyrolysis للكيروجين. ويتجمع السجيل المستنفد عند قاع المعوجة. ويصفى النفط بينما يعاد حقن الغاز ويبرد الرماد ويتم التخلص منه، بأمل اعادته ولو جزئيا في البئر من حيث جاء.

ان طرق التقطير الموضعي مختلفة جدا. والمشكلتان الاساسيتان مشابهتان لتلكما اللتين تمت مواجهتهما عند استخراج الرمل القاري، فاولاً هنالك ضرورة لتوفير طريقة تسخين مؤثرة للسجيل والامر الثاني هو ان الصخرة يجب ان تبقى نفاذة. وفي السويد، خلال الاربعينات، أستعملت عملية لاينفستروم (Salomonsson, Ljungstrom

(1951). ولقد حفرت العديد من الابار المتقاربة الضحلة في السجيل الزيتي، وأقحمت عناصر التسخين ورفعت درجة حرارة الصخور الى ٤٠٠ درجة مئوية. وتم ضخ النفط الذي تم تحريره من الابار. ان مقدار الطاقة المستعمل لاستخراج النفط ربما كان اكبر من ذلك المستخرج من النفط نفسه.

ولقد جربت شركة سنكلير للنفط والغاز طريقة استخراج موضعية اخرى عام ١٩٥٣ على سجيل الفرين ريفر في حوض بايسنيس (Grant, 1964). ولقد حفرت سلسلة من الابار في السجيل الزيتي وتم تكسيره صناعيا لتوليد النفوذية. وتم ضخ هواء مضغوط الي بعض الابار ومن ثم اشعالها بعد ذلك. وتحرك غاز الاحتراق من هذه الابار خلال السجيل وادى الى تقطير النفط، وتم استخلاص النفط من الابار المنتجة.

طورت تقنية مختلفة من قبل شركة اكويتي Equity Oil Co. للنفط والغاز في المنطقة نفسها (Dougan et al., 1970). وكان السجيل الذي تم اختياره موضعيا نفاذا مسبقا بسبب ذوبان الملح. وتم حقن الغاز الطبيعي واشعل في الابار. ولقد جربت شركة شل للنفط حقن الابار بمذيبات هايدروكاربونية ساخنة مثل ثاني كبريتيد الكاربون. ويمكن العثور على مزيد من التفاصيل عن تقنية استخراج السجيل الزيتي في (Dinneen, 1976).

ان مسألة ان كانت ميزانية الطاقة هي موجبة في كل هذه الطرق يعد امرا مشكوك فيه. بكلمات أخر، إن كان مقدار الطاقة المشتق من السجيل الزيتي أكبر من تلك التي انفقت في استخراجه. وحتى لو كانت الطاقة المشتقة أقل من الطاقة المصروفة، الا ان هذه العمليات قد تصبح اقتصادية في يوم من الايام. وسوف يحدث هذا عندما يتجاوز سعر النفط الخام التقليدي المتصاعد سعر السجيل الزيتي. كما ان من المتوقع ان تنخفض تكلفة الثاني مع تطور تقنية استخراجه.

SELECTED BIBLIOGRAPHY

مصادر مختارة:

Solid hydrocarbons and oil seeps: الهايدروكاربونات الصلبة والنضوحات النفطية

HUNT, J. M. 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology.* San Francisco: Freeman. A good review of seeps and the degradation of oil is given on pages 409–433.

TISSOT, B. P. and WELTE, D. H. 1978. *Petroleum Formation and Occurrence.* Berlin: Springer-Verlag. Chapter 5, Petroleum Alteration, covers the degradation of oils to form asphalts.

Tar sands: الرمل القاري

CHILINGARIAN, G. V. and YEN, T. F. (eds.). 1978. *Bitumen Asphalts and Tar Sands.* Amsterdam: Elsevier, 331 pp.

HILLS, L. V. (ed.). 1974. *Oil Sands: Fuel of the Future.* Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 263 pp. This volume contains many papers on the occurrence of tar sands and the technology of extracting oil from them. Most of the papers concentrate on the Athabaska deposits.

السجيل الزيتي

Oil shales:

TISSOT, B. P. and WELTE, D. H. 1978. *Petroleum Formation and Occurrence.* Berlin: Springer-Verlag. Chapter 8, pages 225–236, deals with oil shales.

YEN, T. F. and CHILINGARIAN, G. V. (eds.). 1976. *Oil Shale.* Amsterdam: Elsevier, 292 pp. This volume contains many papers on the occurrence of oil shales and the technology of extracting oil from them. A large part of the text is concerned with the oil shales of the Green River Formation.

REFERENCES

المراجع:

ABRAHAM, H. 1945. *Asphalts and Allied Substances,* Sixth Edition. New York: Van Nostrand, 432 pp.

ALAYETO, M. B. E. and LOUDER, L. W. 1974. The geology and exploration potential of the heavy oil sands of Venezuela (the Orinoco Petroleum Belt). In: *Oil Sands: Fuel of the Future.* L. V. Hills (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 1–18.

ALI, S. M. F. 1974. Application of in situ methods of oil recovery to tar sands. In: *Oil Sands: Fuel of the Future.* L. V. Hills (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 199–211.

ANDERSON, A. M. and McLACHLAN, I. R. 1979. The oil-shale potential of the Early Permian White Band Formation in southern Africa. In: *Some Sedimentary and Associated Ore Deposits of South Africa.* A. M. Anderson and W. J. van Biljon (eds.). Geol. Soc. S. Africa, Spec. Pub. No. 6, 83–90.

ANON, 1972. Wet in situ combustion aid recovery of oil. *Oil & Gas J.,* 3 Apr., 50–53.

BALL, M. W. 1935. Athabaska oil sands: apparent example of local origin of oil. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 19,* 153–171.

BANKS, W. J. and JAMES, G. W. 1974. Heavy-crude bearing sandstones of the Cherokee Group (Desmoinesian) in Southeast Kansas. In: *Oil Sands: Fuel of the Future*. L. V. Hills (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 19–34.

BARNARD, P. C. and COOPER, B. S. 1981. Oils and source rocks of the North Sea area. In: *Petroleum Geology of the Continental Shelf of North-West Europe*. L. V. Illing and G. D. Hobson (eds.). London: Inst. Petrol., 169–175.

BROUGHTON, A. C. 1920. 'Coorongite.' *Trans. Proc. Roy. Soc. S. Austral., 44*, 386–395.

BURGER, J. 1973. L'exploitation des pyroschistes on schistes bitumineux. *Rev. Instit. Francais du Petrol., 28*, 315–372.

BURK, R. O. 1971. Tar sands task group report. In: *U.S. Energy Outlook—An Initial Appraisal. 1971–5*. J. G. McLean (ed.). Natl. Petrol. Council's Comm. on U.S. Energy Outlook, Summ. Task Group Repts., *1*, 209–252.

BYRAMJEE, R. J. 1983. Heavy crudes and bitumen categorized to help assess resources, techniques. *Oil & Gas J.* 4 July, 78–82.

CANE, R. F. 1976. The origin and formation of oil shale. In: *Oil Shales*. T. F. Yen and G. V. Chilingarian (eds.). Amsterdam: Elsevier, 27–60.

CONNAN, J. and YAN DER WEIDE, B. M. 1974. Diagenetic alteration of natural asphalts. In: *Oil Sands: Fuel of the Future*. L. V. Hills (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 134–147.

DEROO, G.; TISSOT, B.; McCROSSAN, R. G.; and DER, F. 1974. Geochemistry of the heavy oils of Alberta. In: *Oil Sands: Fuel of the Future*. L. V. Hills (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 148–167.

DINNEEN, G. V. 1976. Retorting technology of oil shale. In: *Oil Shale*. T. F. Yen and G. V. Chilingarian (eds.). Amsterdam: Elsevier, 181–198.

DOME, K. 1979. Cold comfort for Alberta's oil industry. London: *Financial Times*, 8 May, 32.

DOSCHER, T. M. 1967. Technical problems in in-situ methods for recovery of bitumen from tar sands. Mexico City: *7th World Petrol. Cong.*, Session 13, Paper 6.

DOTT, R. H. and REYNOLDS, M. J. 1969. *Sourcebook for Petroleum Geology*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. No. 5, 471 pp.

DOUGAN, P. M.; REYNOLDS, F. S.; and ROOT, P. J. 1970. The potential for in situ retorting of oil shale in the Piceance Creek basin of Northwestern Colorado. *Qu. Colorado Sch. Mines, 65 (4)*, 57–62.

DUNCAN, D. C. 1976. Geological setting of oil-shale deposits and world prospects. In: *Oil Shale*. T. F. Yen and G. V. Chilingarian (eds.). Amsterdam: Elsevier, 13–26.

DUNCAN, D. C. and SWANSON, V. E. 1965. Organic-rich shale of the United States and world land areas. Washington: *U.S.G.S. Circular 523*, 30 pp.

ELMORE, R. D. 1979. Miocene-Pliocene syndepositional tar deposit in Iran. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63*, 444.

EVANS, C. R.; ROGERS, M. A.; and BAILEY, N. J. L. 1971. Evolution and alteration of petroleum in western Canada. *Chem. Geol., 8*, 147–170.

FINKEN, R. E. and HELDAU, R. F. 1972. Phillips solves Venezuelan tar-belt producing problems. *Oil & Gas J.* 17 July, 108–114.

GOFF, J. C. 1983. Hydrocarbon generation and migration from Jurassic source rocks in the E. Shetland Basin and Viking Graben of the northern North Sea. *J. Geol. Soc. Lond., 140*, 445–474.

GRANT, B. F. 1964. Retorting oil shale underground—problems and possibilities. *Qu. Colorado Sch. Mines, 59 (3)*, 39–46.

HILLS, L. V. 1974. *Oil Sands: Fuel of the Future*. Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 263 pp.

HOBSON, G. D. and TIRATSOO, N. 1981. *Introduction to Petroleum Geology*, Second Edition. Scientific Edition. London: Scientific Press, 352 pp.

HUNT, J. M.; STEWART, F.; and DICKEY, P. A. 1954. Origins of hydrocarbons of Uinta-basin, Utah. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 38*, 1671–1698.

INIECHEN, G. 1951. Petrole, gas naturels et asphales du Geosynclinal Adriatic. *Proc. World Petrol. Cong., 3*, Section 1, 199–219.

JARDINE, D. 1974. Cretaceous oil sands of Western Canada. In: *Oil Sands: Fuel of the Future*. L. V. Hills (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 50–67.

KAMEN-KAYE, M. 1983. Mozambique-Madagascar geosyncline, vol. II. Petroleum Geology. *J. Petrol. Geol., 5*, 287–308.

KAPPELER, J. H. 1967. Discussion on paper by Phizackerly and Scott. *Proc. World Petrol. Cong., 3*, 551–71.

KENDALL, G. H. 1977. Importance of reservoir description in evaluating *in situ* recovery methods for Cold Lake heavy oil. Part I—Reservoir Description. *Can. Petrol. Geol. Bull., 25*, 314–317.

KENT, P. E. 1954. A visit to Western Madagascar. *B. P. Unpublished Report.*

KNUTSON, C. F. 1981. Oil shale. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 65*, 2283–2289.

KUGLER, H. G. 1961. Geological map and section of Pitch Lake Morne l'Enfer area. *Petrol. Assoc. Trinidad.*

LEES, G. M. and COX, P. T. 1937. The geological basis of the present search for oil in Great Britain by the D'Arcy Exploration Co., Ltd. *Quar. J. Geol. Soc. Lond., 93*, 156–194.

LEVORSEN, A. I. 1967. *Geology of Petroleum*, Second Edition. San Francisco: Freeman, 724 pp.

MONTGOMERY, D. S. 1974. Geochemistry of the heavy oils of Alberta: discussion. In: *Tar Sands: Fuels of the Future*. L. V. Hills (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 184–185.

NAASIAM, O. W. T. 1937. Early use of hydrocarbons in the Imperial Chinese Empire. In: *Professor Li Lo Memorial Volume*. Univ. of Peiping, 301–331.

PHIZACKERLY, P. H. and SCOTT, L. O. 1967. Major tar sand deposits of the world. *Proc. World Petrol. Cong. No. 7, 3*, 551–71.

PRIEN, C. H. 1976. Survey of oil shale research in the last three decades. In: *Oil Shale*. T. F. Yen and G. V. Chilingarian (eds.). Amsterdam: Elsevier, 235–267.

RUSSELL, P. L. 1980. *History of Western Oil Shale*. Barking: Applied Science Publishers, 152 pp.

SALOMONSSON, G. 1951. The Ljungstrom in situ method for oil-shale recovery. In: *Oil Shale and Cannel Coal*, vol. 2. London: Inst. of Petrol., 260–280.

SCHLATTER, L. E. 1969. Oil shale occurrences in Western Europe. In: *The Exploration for Petroleum in Europe and North Africa*. P. Hepple (ed.). London: Inst. Petrol., 251–258.

SHANKS, W. C.; SEYFRIED, W. E.; MEYER, W. C.; and O'NEIL, T. J. 1976. Mineralogy of oil shale. In: *Oil Shale*. T. F. Yen and G. V. Chilingarian (eds.). Amsterdam: Elsevier, 81–102.

SPIRO, B.; WELTE, D. H.; RULLKOTTER, J.; and SCHAEFER, R. G. 1983. Asphalts, oils and bituminous rocks from the Dead Sea area—a geochemical correlation study. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 67*, 1163–1175.

SPRAGINS, F. K. 1973. Outlook for tar sands and other bitumens. *Quar. J. Colorado Sch. of Mines, 68*, No. 2.

SPROULE, J. C. 1963. Five factors govern the future of the oil sands on Melville Island. *Can. Oil and Gas Indust., 16*, No. 9.

STEWART, D. R. 1912. *The Oil Shales of the Lothians*, Part III. Scotland: Mem. Geol. Surv., 199 pp.

SUTER, H. H. 1951. The general and economic geology of Trinidad. *Col. Geol. and Min. Res.* London: H.M.S.O., *2*, 271–307.

TOWSON, D. E. 1977. Importance of reservoir description in evaluating *in situ* recovery methods for Cold Lake heavy oil, Part II. In situ application. *Can. Petrol. Geol. Bull., 25*, 328–340.

TRANTHAM, J. C. and MARX, J. W. 1966. Bellamy field tests: oil from tar by counterflow underground burning. *J. Petrol. Tech.*, Jan., 109–115.

WALTERS, E. J. 1974. Review of the world's major oil sands deposits. In: *Oil Sands: Fuels of the Future*. L. V. Hills (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 240–263.

WENNEKERS, J. H. N. 1981. Tar sands. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 65*, 2290–2293.

WINESTOCK, A. G. 1974. Developing a steam recovery technology. In: *Oil Sands: Fuel of the Future*. L. V. Hills (ed.). Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. No. 3, 190–198.

YEN, T. F. and CHILINGARIAN, G. V. (eds.). 1976. *Oil Shale*. Amsterdam: Elsevier, 292 pp.

الفصل العاشر
الاستنتاجات

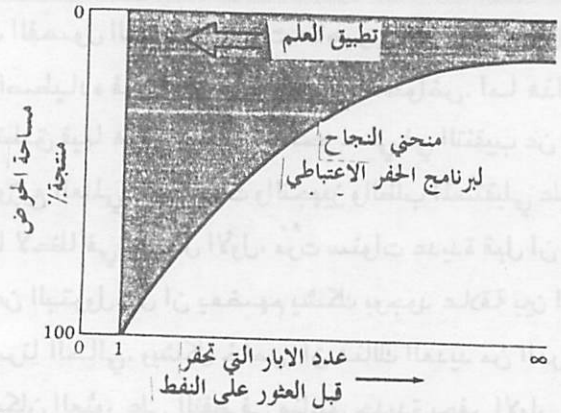
مناطق الاحتمالات والاحتمالية Prospects and Probabilities

وصلت الفصول السابقة وناقشت عناصر جيولوجيا البترول: بدءا من تولد البترول وهجرته الى اصطياده في المكامن وتوزيعه في الاحواض. اما هذا الفصل فأنه يتفحص الكيفية التي تطبق فيها هذه الافكار على نحو عملي في التنقيب عن البترول وانتاجه، وكذلك يستعرض التوزيع العالمي للاحتياطات والتجهيز والطلب المستقبلي عليها.

ومثلما لاحظنا في الفصل الأول، مَرّت سنوات عديدة قبل ان يتم تطبيق الجيولوجيا في التنقيب عن البترول، بل ان بعضهم يشكك بوجود علاقة بين الاثنين بين فينة واخرى حتى في عصرنا الحالي. وبشكل خاص، ان هنالك العديد من الدراسات التي توهم بأنها تظهر ان بالامكان العثور على النفط في مناطق جديدة بحفر الابار على نحو اعتباطي بدلا من تطبيق العلم. ولقد استعرض (Harbaugh et al., 1977) العديد من هذه الدراسات.

قدر تعلق الامر بالنظرة الاعتباطية للتنقيب عن البترول. فان من المناسب ذكر ثلاث ملاحظات بهذا الشأن. أولهما ان المرء يجب ان يتذكر حكاية الاحصائي الذي غرق وهو يحاول عبور نهر يبلغ معدل عمقه نحو متر واحد. وثانيهما، أن المرء يجب ان يلاحظ ان النجاح في الحفر الاعتباطي من المحتمل ان يزيد نسبة الى مقدار النسبة المئوية للمساحة المنتجة من الحوض (الشكل ١٠-١)، وبذلك فأن اي امرىء (حتى ولو كان في عجالة من أمره) يمكن ان يجد النفط في اجزاء من تكساس واوكلاهوما، ولكنه قد يكون أقل حظا في سواحل اللابرادور. لقد ارتبط التنقيب عن البترول بالمراهنات على الخيول. اذ ان بمقدور المرء ان يلتقط اسما على نحو اعتباطي او أن يدرس شكل السباق. وبشكل مشابه، فأن مواقع الحفر يمكن ان يتم اختيارها اعتباطيا او بتطبيق الجيولوجيا في محاولة لتقليل الاحتمالات. النقطة الثالثة هو ان ليس هنالك منشأة اقتصادية يمكن ان توظف اموالا على برنامج حفر اعتباطي اذا كان بمقدور الطرق الجيولوجية تقليل عدد الابار المحفورة قبل العثور على النفط وانتاجه وبدء الانسياب النقدي. أن الجيولوجيا الجيدة ضرورية بالنسبة

لشركة صغيرة يمكن ان تمثل سلسلة من الابار الجافة كارثة لها . أنّ الشركات الحكومية وحدها ذات التجهيز غير المحدود من اموال دافع الضرائب هي التي يمكن ان تطبق فلسفة الحفر الاعتباطي.



الشكل ١٠-١: مرتسم بياني يظهر أنه كلما كانت منطقة الانتاج في الحوض أصغر، كانت الحاجة أعظم لتطبيق العلم.

تقييم منطقة الاحتمالات Prospect Appraisal

بعد أن برهنّا على ان الجيولوجيا مناسبة اكثر من الحفر الاعتباطي، نتحول الان الى تقييم منطقة الاحتمالات النفطية. ان جانبي تقييم منطقة الاحتمالات هما الجيولوجيا والاقتصاد. ان الاسئلة التي يتوجب الاجابة عليها هي: هل من المحتمل العثور علي النفط و / او الغاز؟ واذا كان الأمر كذلك فهل سوف يكون مجديا من الناحية الاقتصادية؟

الجوانب الجيولوجية *Geological Aspects*

تتراوح نسبة ان تعثر بئر على النفط او الغاز بين ١ (أي ان من المؤكد وجود النفط او الغاز) الى صفر (أي ان من المؤكد ان لا وجود للنفط او الغاز). ولقد قدم الفصل الأول المعاملات الخمسة التي ينبغي توفرها كي يوجد حقل تجاري من النفط او الغاز:

١. صخرة مصدرية.

٢. مكمن.

٣. مصيدة.

٤. صخرة غطائية.

٥. ما يكفي من الحرارة لتوليد النفط او الغاز ولكن دون تدميرهما.

وبذلك فبدلا من التقييم غير الموضوعي لاحتمالية العثور على نفط أو غاز على مقياس واحد أو صفر، يمكن عندها تقييم احتمالية كل ظرف يتم توفره، وبعدها يتم إحتساب الاحتمالية الكلية من حاصل ضرب العوامل المختلفة :

احتمالية إحتواء منطقة معينة على النفط أو الغاز = $(P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \times P_5)$

حيث أن:

P_1 = إحتمالية وجود الصخرة المصدرية.

P_2 = إحتمالية وجود الصخرة المكمنية.

P_3 = إحتمالية وجود المصيدة.

P_4 = إحتمالية وجود الصخرة الغطائية.

P_5 = إحتمالية حدوث النضوج الحراري المناسب.

جدول (١٠-١) مصفوفة لحساب احتمالية النجاح لأربع مناطق إحتمالات بترولية.

الاحتماليات	المناطق المحتملة			
	أ	ب	جـ	د
احتمالية الصخرة المصدرية	0.9	0.6	0.7	0.3
احتمالية المكمن	1.0	0.7	0.5	0.4
احتمالية المصيدة	0.7	0.6	0.5	0.6
احتمالية الختم	0.8	0.5	0.6	0.0
احتمالية مستوى النضوج المناسب	0.6	0.4	0.4	0.1
احتمالية النجاح	0.302	0.050	0.042	0.000

← تناقص احتمالية النجاح

حيثما يتم تحديد العديد من مناطق الاحتمالات فإنها قد تحلل منفردة ثم ترتب في مصفوفة ويتم احتساب احتمالية النجاح وبالتالي احتمالية العثور على نفط وفق ترتيب معين كما هو موضح في الجدول (١٠-١).

الجوانب الاقتصادية Economic Aspects.

ان احتمالية ان تجد بئر ما النفط او الغاز هو احد جوانب التنقيب الناجح حسب. فلان هدف اية شركة شركة نفط هو تحقيق الربح، فانه يجب الاخذ بنظر الاعتبار المجازفة الاقتصادية والربح المحتمل في مثل هذه العمليات سواء لمنطقة الاحتمالات الواحدة او السلسلة من الابار. واستنادا الى قانون "خراب المقامر Gambler's ruin" هنالك احتمال الافلاس بسبب دورة من الحظ السيء بغض النظر عن احتمالات النجاح على المدى البعيد. وتعتمد مسألة ان كانت الشركة (او المقامر) سوف يتحطم قبل ان ينجح تجاريا على كل من احتمالية النجاح الجيولوجي (الذي ناقشناه مسبقا) واربعة معاملات تجارية:

١. الربحية المحتملة للمشروع.

٢. الاعتمادات الاستثمارية الداعمة المتوفرة.

٣. مقدار الاعتمادات الكلي.

٤. مقدار تحمل الخسارة.

ولقد اظهر (Greenwalt, 1982) الكيفية التي يمكن ان تحتسب فيها هذه المعاملات كميا:

$$1 - S = (1 - P_S)^N$$

حيث ان:

S = مقدار تحمل الخسارة.

P_S = احتمالية النجاح الجيولوجي.

N = عدد المشاريع اللازمة لتجنب خراب المقامر.

والاكثر من ذلك، والاكثر تفصيلا، ان الامور المساعدة في اتخاذ القرارات المتعلقة بالتنقيب تشمل التحويل الكمي الاكثر تطورا لهذه المعاملات التجارية. وبعد ذلك يمكن

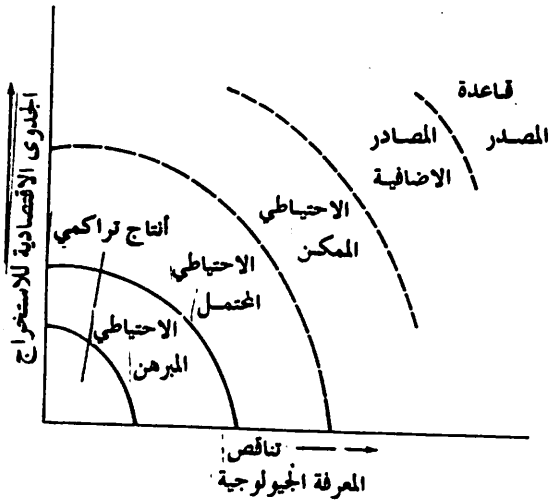
استعمال تقنيات المحاكاة بالحاسوب Computer simulation techniques للمساعدة في اتخاذ القرار المتعلق بالقيام بانجاز مشروع استكشافي معين من عدمه، واذا كان الامر كذلك، ينبغي تحديد مقدار الخسارة التي يمكن ان تتحملها الامكانيات المالية للمستثمر. ان مثل هذا التصور الاقتصادي يقع خارج علم الجيولوجيا، رغم انها تمثل جانبا مهما جدا من التنقيب عن البترول. وللمزيد من المعلومات أنظر (Megill, 1979, Newendorp, 1976).

الاحتياطات والمصادر RESERVES AND RESOURCES

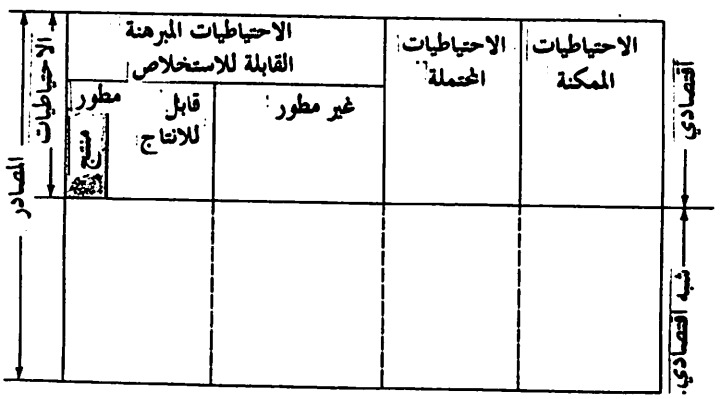
بعد ان تم تفحص احتمالية العثور على البترول في مناطق الاحتمالات المنفردة، فأن من المناسب ان نناقش الاحتياطي المحتمل الذي يمكن ان يوجد في الاحواض الرسوبية، وبالنتيجة النهائية في العالم كله. لقد استعرض الفصل السادس باختصار الطريقة التي يقاس فيها احتياطي حقل معين، بينما اظهر الفصل الثامن الطريقة التي يمكن ان تتغاير فيها الاحتمالات النفطية في انواع الاحواض المختلفة. ان من المناسب ان نكون قادرين على احتساب الاحتياطي الذي يمكن ان يحتويه حوض معين. ومع ذلك، فأننا يجب ان نتناول اولا بعض المصطلحات.

المصادر هي مواد طبيعية ذات فائدة اقتصادية، وليس البترول وحده بل الماء والمعادن والركام Aggregate تعد مصادر طبيعية. ويمكن تعريف المصادر وفق ظاهرتين: الجدوى الاقتصادية للاستخراج والمعرفة الجيولوجية (الشكل ١٠-٢). اما الاحتياطات فهي تلك المصادر التي يمكن استخراجها اقتصاديا من المصدر (McKelvey, 1975). وبذلك عندما ترتفع اسعار النفط وتنخفض، فأن النفط الموجود في حقل على حافة الربح التجاري قد يمثل احتياطيا في يوم من الايام، بينما يكون مصدرا في يوم آخر. وبشكل مشابه، حالما تتحسن تقنية الاستخراج، تصبح مصادر السجيل الزيتي والرمل القاري احتياطيات.

تقسم الاحتياطيات الى عدة مراتب، كما هو موضح في الشكل (١٠-٣) ولقد اقترحت تعريفات حديثة بشكل مترابط من قبل كل من جمعية مهندسي البترول ومؤسسة البترول الامريكية واتحاد جيولوجيي البترول الامريكان: "فالاحتياطيات المثبتة Proved Reserves هي مقدار الهايدروكاربونات التي تستخرج بدءا من تأريخ معين فصاعدا".



الشكل ١٠-٢: الافكار المتعلقة بالاحتياطيات والمصادر. (عن Ion, 1979).



الشكل ١٠-٣: أنواع الاحتياطي المختلفة. للتعريفات أنظر متن الكتاب. (عن McKelvey, 1975).

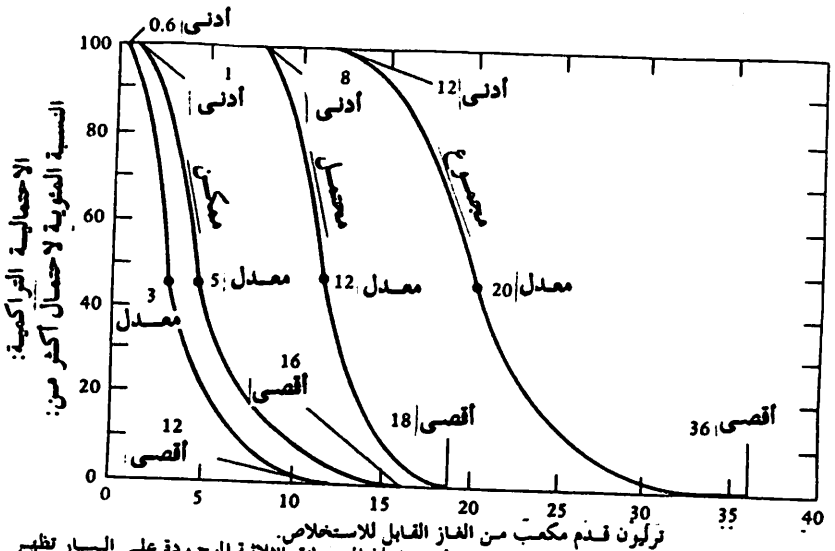
وهي تقسم الى احتياطي مطّور مثبت Proved Developed Reserves (تلك الاحتياطيات التي يتوقع استخراجها من الابار الموجودة)، والاحتياطي المثبت غير المطّور Proved Undeveloped Reserves (تلك الاحتياطيات الاضافية التي يتوقع استخراجها من (١) الحفر المستقبلي للابار، (٢) تعميق الابار الموجودة الى مكامن مختلفة، أو (٣) نصب مشروع استخلاص محسن).

من التعريفات السابقة، يبدو واضحا ان هنالك انواع مختلفة من الاحتياطيات. ان اي حسابات لاحتياطي حقل او حوض رسوبي معين يجب ان تُحدِّد ان كان احتياطيا كليا او قابلا للاستخلاص او مثبتا او محتملا او ممكنا وهكذا.

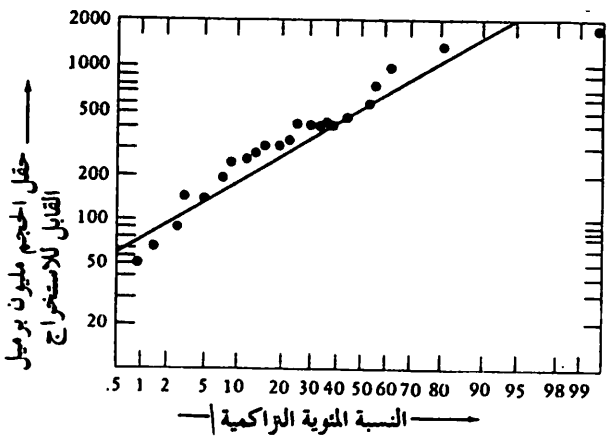
تخمين احتياطيات الاحواض Assessment of Basin Reserves

وَجّهت الشركات والبلدان اهتماما ملحوظا لحساب الاحتياطي الكلي القابل للاستخلاص الذي يمكن العثور عليه في حوض معين (Harbaugh et al., 1977, Moody, 1977, Hubbert, 1967). ولقد وصفت طريقة شائعة من قبل (White et al., 1975). ففي دراسة على جنوب لويزيانا، قسمت احتياطيات الغاز الى مراتب هي احتياطي تنظيري Speculative وممكن ومحتمل. ولقد رسم معدل الاحتياطي الممكن والاحتياطي الممكن الاقصى والادنى على منحنى احتمالية تراكمي (يتراوح بين صفر = احتمال ان يكون التقدير مخطوءا تماما الي ١ = ان يكون التقدير صحيحا تماما). ولقد دمجت المنحنيات الثلاثة بعد ذلك لانتاج منحني يمثل المجموع للاحتياطي الكلي (الشكل ١٠-٤). ولقد تحققت هذه النتيجة بتقنية احصائية تتطلب وقتا طويلا تدعى تقنية مونت كارلو، يمكن للحاسوب ان يجريها خلال ثوان. وتم تطبيق الطريقة ذاتها في اجزاء عديدة اخرى من الولايات المتحدة الامريكية (Miller et al., 1975).

أظهرت العديد من الدراسات ان توزيع تكرار -الحجم Size - Frequency Distribution للحقول في حوض رسوبي معين يقترب من التوزيع الاعتيادي اللوغارتمي Lognormal Distribution. أي يمكن القول ان عدد الحقول يزداد مع حجم الحقل المتناقص. وعندما ترسم حجوم الحقول على مقياس لوغارتمي مقابل النسبة المئوية التراكمية، فأن الخط الناتج يقترب من الخط المستقيم. ولقد لوحظ التوزيع الاعتيادي اللوغارتمي لحجوم الحقول في شمال لويزيانا(Kaufman, 1963) وفي كنساس (Griffiths, 1966) وحوض دنفر (Haun, 1971) وغرب كندا (kaufman et al., 1975). ويوثق الجدول (١٠-٢) تقديرات الاحتياطي للحقول التي اكتشفت في بحر الشمال حتى عام ١٩٨١، ويرسم الشكل (١٠-٥) هذه المعطيات كنسب مئوية تراكمية مقابل احتمالية اللوغارتم Probability. ورغم ان بحر الشمال ما يزال مقاطعة لم تستكشف



الشكل ١٠-٤: حسابات احتياطي الغاز القابل للانتاج في جنوب لوزيانا. ان المنحنيات الثلاثة الموجودة على اليسار تظهر احتياطيات الغاز المحتملة والممكنة والمتوقعة التي تم حسابها من قبل شركة أكسون Exxon. أما المنحنى الموجود على اليمين فهو مجموع المنحنيات الثلاثة نتج من استعمال طريقة مونت كارلو. (عن White et al., 1975).



الشكل ١٠-٥: احتياطيات بحر الشمال في المملكة المتحدة مبينة من مرتسم لحجم الحقل مقابل الاحتمالية التراكمية استنادا على المعطيات الواردة في الجدول ١٠-٢.

جيدا بعد، فأن الاتجاه المستقيم للخط يدلل على ان هذه الحقول تقترب من التوزيع اللوغارتمي الاعتيادي الذي اكتشف في الاحواض الاخرى. ان هذا النوع من المعلومات مفيد لانه يعطي احتمالية اكتشاف حقل ذي حجم معين. وعندما يعرف الحجم الادنى لحقل

مُجدٍ من الناحية الاقتصادية، تعرف عندئذ احتمالية العثور على مثل هذا الحقل ولسوف يتغير انحدار الخط المبين في الشكل (١٠-٥) بالنسبة للاحواض الاخرى، ولكن ما ان يتم تحديد الانحدار من بضعة حقول، /حتى يمكن/ عندها حساب الاحتياطي النهائي القابل للاستخراج للحوض.

الحقل	الاحتياطي القابل للاستخراج مليون برميل bbl m	النسبة المئوية من المجموع	النسبة المئوية التراكمية
Forties	1918	.176	100.0
Brent	1610	.148	81.8
Ninian	1007	.092	67.0
Piper	647	.059	57.8
Statfjord	573	.053	51.9
Beryl	485	.045	46.6
Thistle	441	.041	42.1
Magnus	441	.041	38.1
Fulmar	434	.040	34.4
Cormorant N	412	.038	30.4
Claymore	419	.038	26.6
Murchison	318	.029	22.8
Dunline	294	.027	19.9
Brae	294	.027	17.2
Beryl B	293	.027	14.5
Hutton NW	276	.025	11.8
Hutton	257	.023	9.3
Cormorant S	191	.018	7.0
Beatrice	154	.014	5.2
Maureen	154	.014	3.8
Montrose	89	.008	2.4
Heather	73	.007	1.6
Auk	59	.005	0.9
Argyll	48	.004	0.4
المجموع	10,887		

من معطيات تعود الى عام ١٩٨١ نشرت من قبل وزارة الطاقة البريطانية.

الجدول ١٠-٢: الاحتياطيات النفطية في بحر الشمال (القطاع البريطاني).

تخمين الاحتياطيات العالمية Assessment of Global Reserves

أنجز العديد من المحاولات لحساب الاحتياطي العالمي من النفط والغاز من خلال تقييم الاحواض واحدا بعد آخر. وتقوم اغلب شركات النفط باستمرار بتجميع هذه الحسابات لكل من الاحتياطيات العالمية القابلة للاستخلاص، والطلب العالمي المستقبلي على النفط والغاز ومصادر الطاقة الاخرى. ولعل من غير الضروري ان نذكر ان مثل هذه الحسابات تتغير تغيرا واسعا. ويمثل الجدول (١٠-٣) تجزيئا لتوزيع احتياطيات النفط والغاز في الاحواض الرسوبية الرئيسية في العالم. والمعطيات مقدمة في مكافئات الغاز-النفط Gas-Oil Equivalents (GOE)، على اساس ان ٦ مليون قدم مكعب من الغاز يعادل ١ برميل من النفط. ويمثل الشكل (١٠-٦) توزيعا للاحتياطيات المعروفة حسب القارات. ولقد نشرت العديد من الاحصاءات المشابهة (الشكل ١٠-٧) وحلل (Tippee, 1981) معطيات مشابهة من نحو ٢٠٠٠ شركة رئيسية. واستنتج أنه منذ عام ١٩٨٥ الى ٢٠٠٠ فأن متطلبات العالم غير الشيوعي سوف تقفز من نحو ١٢٠ مليون برميل/يوم من مكافئات النفط الى ١٤٠ الى ١٧٠ مليون برميل/يوم من مكافئات النفط. ان هذا الطلب سوف يزداد في البلدان النامية من ضعفين الى اربعة أضعاف اسرع من البلدان المتطورة واسوف تبقى صادرات اوبك ثابتة تقريبا، ويعزى ذلك جزئيا الى الزيادة في الطلب الداخلي، اما الانتاج خارج الاوبك فانه مرشح للزيادة.

الاكثر وضوحا هي محاولات Ion لتوقع استعمالات الطاقة ما بعد العام ٢٠٠٠ (Ion, 1981, 1979). وتقترح تحليلاته ان انتاج النفط والغاز سوف يزداد حتى نحو ٢٠١٠، حيث يبدأ بالانخفاض التدريجي بعد ذلك (الشكل ١٠-٨). من الواضح ان النفط والغاز مصادر ناضبة. والى وقت قريب، اظهر العديد من التنبؤات المتعلقة بانتاج النفط والغاز زيادة طوال السنين العديدة التي تلت الدراسة متبوعة بانخفاض. ويوضح الشكل (١٠-٩) انه خلال العقدين الاخيرين فأن نسبة الاحتياطي المثبت الى الانتاج قد انخفضت. وللابقاء على تقدم مقداره ٣٠ عاما بين اكتشاف النفط وانتاجه، فان العالم بحاجة الى العثور على حوض جديد مشابه الى بحر الشمال في كل عام (Pearce, 1980). ولكن هذا المعدل لم يتحقق. واسوف تتوفر حاجة الى جيولوجيي بترول مدربين جيدا في السنوات القادمة خشية ان يتجمد احفادنا من البرد في الظلام. فأهرعوا بحثا عنها!.

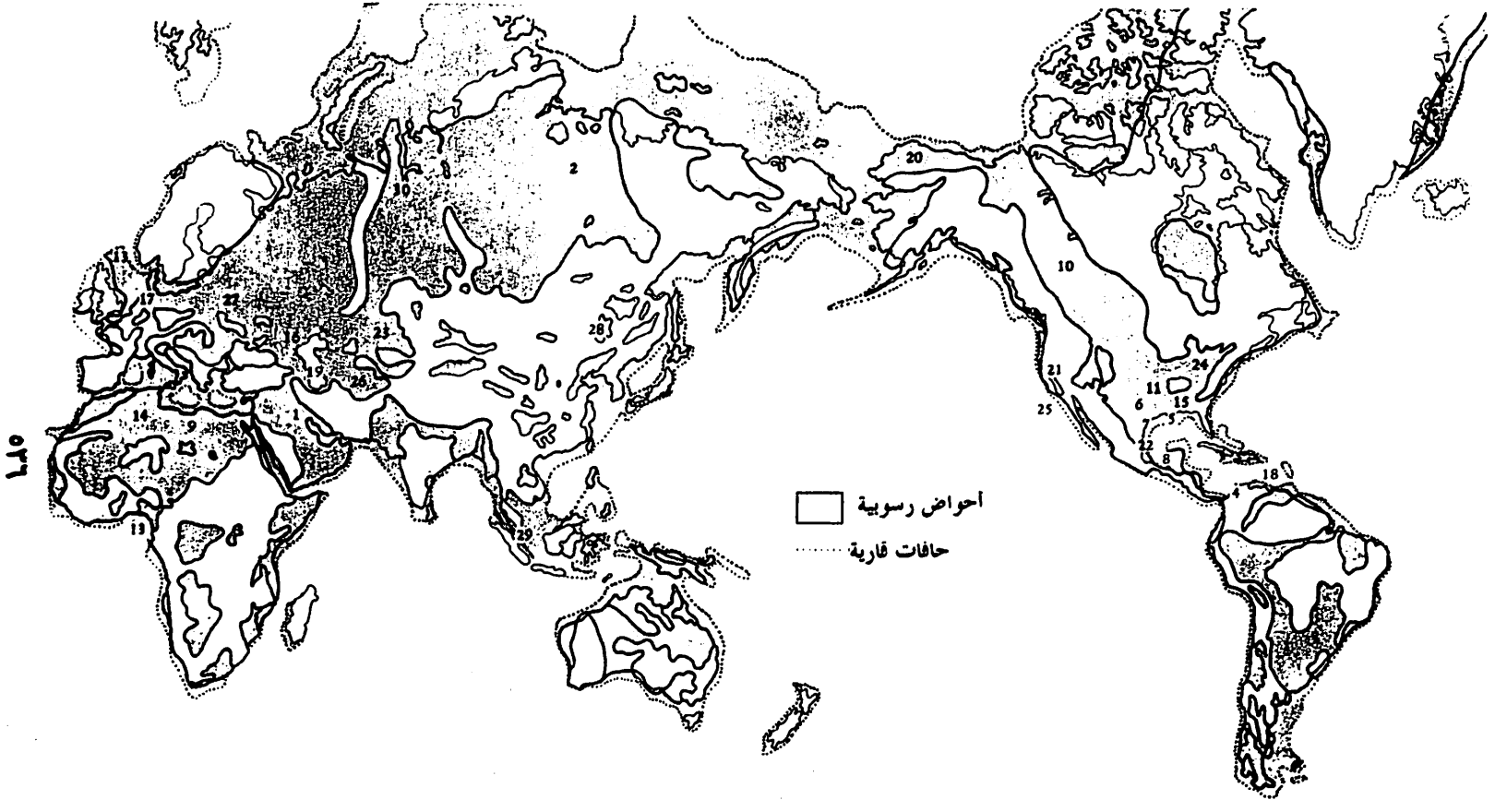
الحوض	البترول الكلي um, 10^9 BOE[a]	المرتبة العالمية
Arabian/Iranian[b]	651	1
West Siberian	167	2
Volga-Ural	58	3
Maracaibo (Venezuela)	50.2	4
Mississippi delta	49.7	5
Permian basin (USA)	42.3	6
Texas Gulf Coast (USA and NE Mexico)	41.6	7
Reforma-Campeche (Mexico)	40.6	8
Sirte (Libya)	35.3	9
Alberta (Canada)	32.0	10
Amarillo-Anadarko-Ardmore (USA)	29.2	11
Niger delta	29.0	12
Northern North Sea (UK and Norway)	26.7	13
Triassic (Algeria)	25.8	14
E. Texas-Arkla (USA)	23.7	15
N. Caucasus-Mangyshlak (USSR)	20.8	16
Netherlands and NW Germany	17.5	17
E. Venezuela and Trinidad	16.6	18
South Caspian (USSR)	14.5	19
North Slope Alaska (USA)	14.2	20
San Joaquin (USA)	13.6	21
Tampico-Misantla (Mexico)	12.2	22
Amu Daryu (USSR)	10.5	23
Appalachian (USA)	10.4	24
Los Angeles (USA)	10.0	25
المجموع ١	1700.0	

[a]BOE = barrels of oil equivalent.

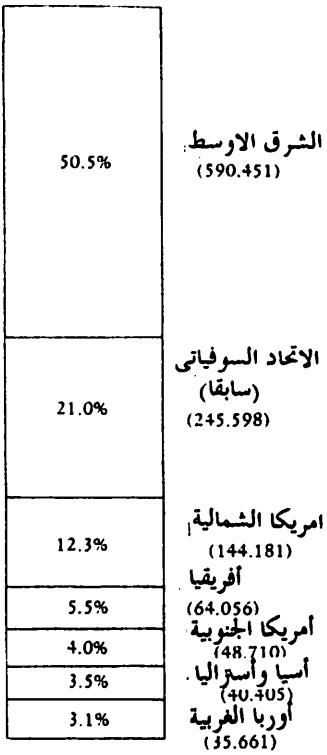
[b]لاحظ أن نحو ٤٠٪ من الاحتياطي العالمي المعروف يوجد في الحوض العربي/الايراني. للمواقع أنظر الشكل ١٠-٧

عن Nehring; in Ivanhoe, 1980 ، ينشر بموافقة مسبقة

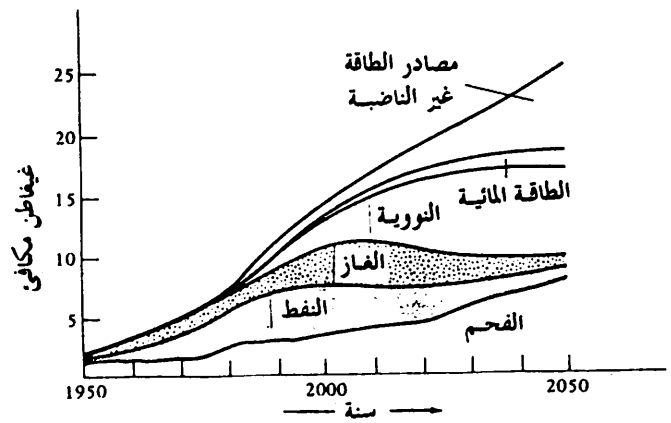
الجدول ١٠-٣: الاحتياطيات المعروفة المنتجة والمبرهنة والمحتملة القابلة للاستخلاص في أكبر ٢٥ حوض هايدروكاربوني في العالم.



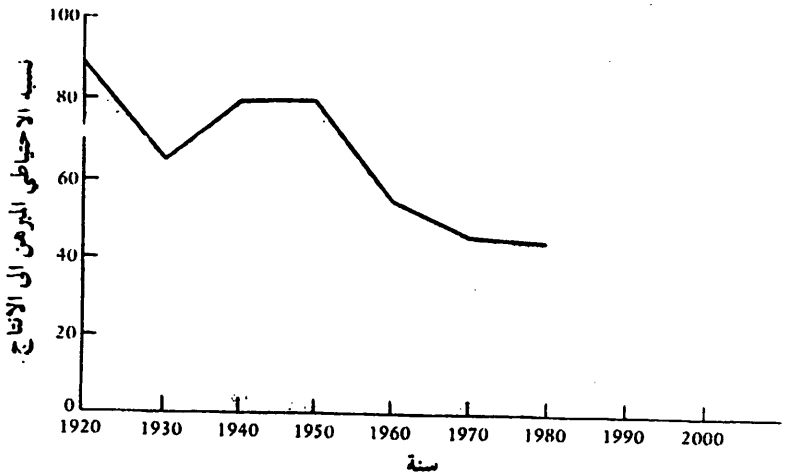
الشكل ١٠-٦: خارطة تظهر توزيع الاحواض الرسوبية الرئيسية في العالم. تشير الارقام الى الاحواض المدرجة في الجدول ١٠-٣ مرتبة حسب تناقص الحجم.



الشكل ١٠-٧: التوزيع الجغرافي للاحتياطيات المعروفة والقابلة للاستخراج. (عن St.John, 1980).



الشكل ١٠-٨: التجهيز والطلب العالمي المحتمل على الطاقة من ١٩٥٠ الى ٢٠٥٠. لاحظ أن: الغيغاطن يساوي ١٠٠٠ مليون طن متري ويساوي مليار طن متري أمريكي (عن Ion, 1979).



الشكل ١٠-٩: مرتسم بياني يظهر كيف أن نسبة الاحتياطي المعروف الى القابل للاستخلاص المنتج قد تناقصت طوال العشرين سنة الماضية. (المعطيات عن Warman, 1971 and Pearce, 1980).

مصادر مختارة

SELECTED BIBLIOGRAPHY

For an exposé of statistical techniques applied to prospect evaluation, see:

HARBAUGH, J. W.; DOVETON, J. H.; and DAVIS, J. C. 1977. *Probability Methods in Oil Exploration.* London: Wiley, 269 pp.

For methods of assessing the economics of oil prospects, see:

MEGILL, R. E. 1979. *Exploration Economics.* Tulsa: Petroleum Publishing Co., 180 pp.

NEWENDORP, P. D. 1976. *Decision Analysis for Petroleum Exploration.* Tulsa: Petroleum Publishing Co., 750 pp.

For discussions and predictions of future demand/production of oil, gas, and other energy sources, see:

ION, D. C. 1981. *Availability of World Energy Resources.* London: Graham and Trotman, 248 pp.

REFERENCES المراجع

GREENWALT, W. A. 1982. Determining venture participation. *J. Petrol. Tech., 33,* 2189–2195.

GRIFFITHS, J. C. 1966. Exploration for natural resources. *Oper. Res., 14(2),* 189–209.

HARBAUGH, J. W.; DOVETON, J. H.; and DAVIS, J. C. 1977. *Probability Methods in Oil Exploration*. London: Wiley, 269 pp.

HAUN, J. D. 1971. Potential oil and gas resources. *Colorado School of Mines*, unpublished progress report. 18 pp.

HAUN, J. D. (ed.). 1975. Methods of estimating the volume of undiscovered oil and gas resources. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., *Studies in Geology*, No. 1, 206 pp.

HUBBERT, M. K. 1967. Degree of advancement of petroleum exploration in the United States. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 51*, 2207–2227.

ION, D. C. 1979. World energy supplies. London: *Proc. Geol. Assoc., 90*, 193–203.

ION, D. C. 1981. *Availability of World Energy Resources* (and supplements). London: Graham and Trotman, 248 pp.

IVANHOE, L. F. 1980. World's giant petroleum provinces. *Oil & Gas J.*, 30 June, 146–7.

KAUFMAN, G. M. 1963. *Statistical decision and related techniques in oil and gas exploration*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 307 pp.

KAUFMAN, G. M.; BAKER, Y.; and KRUYT, D. 1975. A probabilistic model of oil and gas discovery. In: *Methods of Estimating the Volume of Undiscovered Oil and Gas Resources*. J. D. Haun (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., *Studies in Geology*, No. 1, 113–142.

McKELVEY, V. E. 1975. Concepts of reserves and resources. In: *Methods of Estimating the Volume of Undiscovered Oil and Gas Resources*. J. D. Haun (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., *Studies in Geology*, No. 1, 11–14.

MEGILL, R. E. 1979. *Exploration Economics*, Second Edition. Tulsa: Petroleum Publishing Co., 180 pp.

MILLER, B. M. et al. 1975. Geological estimation of undiscovered recoverable oil and gas resources in the United States. *U.S. Geol. Surv. Circ., 725*, 78 pp.

MOODY, J. D. 1977. Perspectives on energy problems. In: *Exploration and Economics of the Petroleum Industry*. V. S. Cameron (ed.). New York: Bender, 1–16.

NEWENDORP, P. D. 1976. *Decision Analysis for Petroleum Exploration*. Tulsa: Petroleum Publishing Co., 750 pp.

PEARCE, A. E. 1980. Oil: hydrocarbons or B.T.U.'s. *Esso Magazine, 113*, 3–8.

ST. JOHN, B. 1980. *Sedimentary Basins of the World and Giant Hydrocarbon Accumulations*. Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., Map + 23 pp.

TIPPEE, R. T. 1981. The oil surplus—a fleeting phenomenon? *Oil & Gas J.* 9 Nov., 141–148.

WARMAN, H. R. 1971. Why explore for oil and where? *Austr. Petrol. Explor. Assoc. J.*, 9–13.

WHITE, D. A.; GARRETT, R. W.; MARSH, G. R.; BAKER, R. A.; and GEHMAN, H. M. 1975. Assessing regional oil and gas potential. In: *Methods of Estimating the Volume of Undiscovered Oil and Gas Resources*. J. D. Haun (ed.). Tulsa: Am. Assoc. Petrol. Geol., *Studies in Geology*, No. 1, 143–159.

WHITE, D. A. and GEHMAN, H. M. 1979. Methods of estimating oil and gas resources. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 63*, 2183–2203.

الملحق (أ):

الخطوط الارشادية لتصنيف الابار Well Classification Guidelines

جهزت لجنة احصائيات الحفر في اتحاد جيولوجيي البترول الامريكان الخطوط الارشادية التالية حول تصنيف الابار (تثبت بموجب موافقة مسبقة).

١. بئر استكشافية لحقل جديد *New-field wildcat*

البئر الاستكشافية لحقل جديد هي بئر تحدد على مظهر تركيبي او اي نوع اخر من المصائد التي لم تنتج نفطا او غازا. وفي المناطق التي يكون فيها للظروف الجيولوجية الموضعية تأثيرا قليلا او ليس لها تأثير ابدا على التراكمات، تحدد هذه الأنواع من الابار على مسافة لا تقل عن ميلين عن أقرب منطقة منتجة. ومع ذلك، فأن المسافة ليست بالعامل المحدّد. وتعد درجة المجازفة التي تفترضها الجهة المستكشفة ذات أهمية قصوى، وكذلك نيتها في فحص التركيب او الظروف الطباقية التي لم يثبت انها منتجة من قبل.

٢. بئر استكشافية لمكمن جديد *New-pool wildcat*

البئر الاستكشافية لمكمن جديد هي تلك البئر التي تُحدّد لاستكشاف مكمن جديد على ظاهرة تركيبية او نوع آخر من المصائد المنتجة مسبقا للنفط والغاز، ولكن خارج الحدود المعروفة للمنطقة المنتجة. وفي بعض المناطق، حيث تؤثر الظروف الجيولوجية الموضعية تأثيرا ضئيلا على التراكمات، فأن هذا النوع من الابار الاستكشافية قد يسمى "البئر الاستكشافية القريبة near wildcats. ان مثل هذا النوع من الابار يكون على مبعدة اقل من ميلين من اقرب منطقة منتجة.

٣. بئر اختبارية لمكمن اعمق *Deeper pool test*

البئر الاختبارية لمكمن اعمق هي بئر استكشافي يحدد ضمن المنطقة المنتجة لمكمن او مكامن تم تطويرها جزئيا او كليا مسبقا. وهي تحفر تحت اعمق مكمن منتج لاستكشاف الاحتمالات الاعمق غير المعروفة.

٤. بئر اختبارية لمكمن أضحل *Shallower pool test*

البئر الاختبارية لمكمن أضحل هي بئر استكشافية تحفر بحثا عن مكمن منتج غير معروف ولكن يشك بوجوده من المعطيات التي تم الحصول عليها من الابار الاخرى وهو أضحل عمقا من المكامن المنتجة المعروفة. وتحدد هذه البئر الاختبارية ضمن المنطقة المنتجة لمكمن او مكامن تم تطويرها مسبقا.

٥. بئر اختبارية خارجية او تمديدية *Outpost, extension,test*

البئر الاختبارية الخارجية بئر تحدد وتحفر على امل توسيع المنطقة المنتجة او المكمن شبه المطور مسافة ملموسة وهي تبعد عادة مسافة موقعين او اكثر من اقرب موقع منتج.

٦. بئر تطويرية *Developmentwell*

البئر التطويرية هي بئر تحفر ضمن منطقة مبرهنة ذات مكمن نفطي او غازي الى عمق النطاق الطباقي الذي يعرف بأنه النطاق المنتج. فاذا اكملت البئر لاغراض الانتاج فأنها تصنف على انها بئر تطويرية غازية او نفطية. اما اذا لم تكمل البئر لاغراض الانتاج وهجرت فأنها تصنف على انها بئر تطويرية جافة.

٧. بئر اختبارية طباقية *Stratigraphic test*

البئر الاختبارية الطباقية هي جهد حفر موجه جيولوجيا للحصول على معلومات متعلقة بظروف جيولوجية محددة يمكن ان تؤدي الى اكتشاف تراكمات هايدروكاربونية. ومن المعتاد ان يحفر هذا النوع من الابار دون ان يكون الهدف هو اكمالها لانتاج الهايدروكاربونات. وتضم هذه المجموعة ايضا الابار الاختبارية مثل ابار اللباب

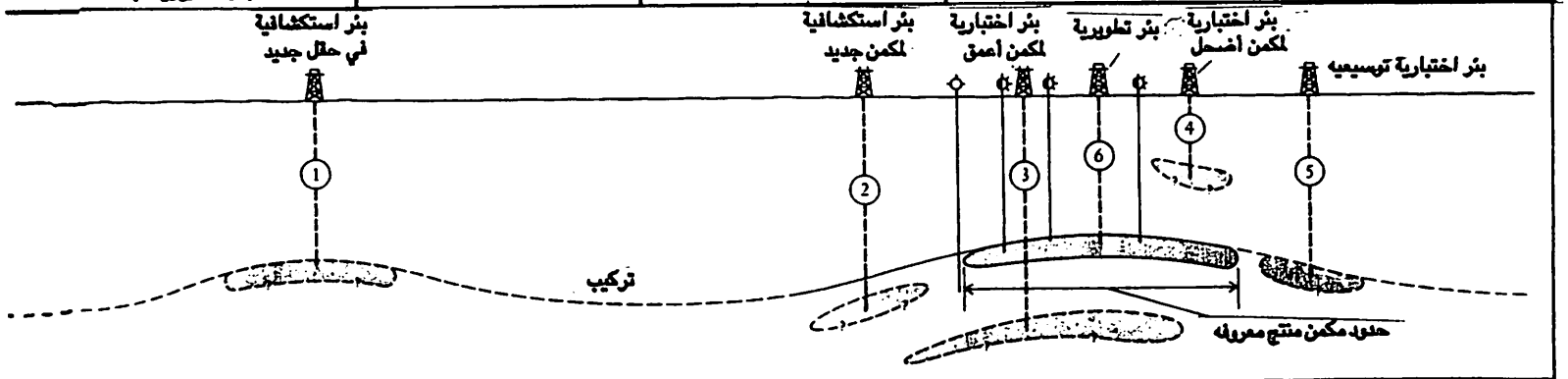
الاختبارية وكل انواع الابار التي ينفق عليها لاغراض استكشاف الهايدروكاربونات.

٨. بئر خدمية *Service well*

البئر الخدمية بئر تحفر او تكمل لاغراض مساندة الانتاج في حقل موجود مسبقا. وتحفر هذه المجموعة من الابار للاغراض المحددة التالية: حقن الغاز (الغاز الطبيعي، البروبان، البيوتان، او غاز المداخن)، حقن الماء وحقن الهواء، التخلص من الماء المالح، توفير المياه لاغراض الحقن، المراقبة، والحقن لاغراض الاحتراق الموضعي، والبئر القديمة المعمقة هو تجويف محفور مسبقا ومن ثم يعاد الدخول اليه ويعمق بحفر اضافي. ويوصف هذه النوع من الابار على انه: (١): ابار نفط او غاز اذا ما اكملت لانتاج النفط او الغاز (٢): ابار جافة اذا لم يتم العثور على كميات كافية من النفط والغاز كي تبرر اكمال البئر عند اعماق اكثر. والعمق الاضافي تحت العمق الكلي القديم يصنف تحت التصنيف البئري المناسب.

ويوضح الشكل (أ) اصناف الابار المختلفة.

هدف الحفر				التصنيف الاولي عند بدء الحفر	التصنيف النهائي بعد إكمال البئر أو هجرها	
					ناجحة ☼	غير ناجحة ◇
حفر حقل جديد في تركيب أو مقاطعه لم تنتج من قبل				١- بئر إستكشافية لحقل جديد	بئر إكتشافية في حقل جديد	بئر إستكشافية جافة في حقل جديد
حفر مكمن جديد في تركيب أو مقاطعه جيولوجيه منتجه مسبقا	آبار اختبارية لمكمن جديد	الحفر خارج حدود منطقة مكمن معروف		٢- بئر إستكشافية لمكمن جديد	بئر إستكشافيه اكتشافية لمكمن جديد	آبار اختبارية لمكمن جديد
		الحفر ضمن حدود منطقة مكمن معروف	لمكمن جديد تحت أعمق مكمن معروف	٣- بئر اختبارية لمكمن أعمق	بئر اكتشافية لمكمن أعمق	آبار اختبارية جافة لمكمن أعمق
			لمكمن جديد فوق أعمق مكمن معروف	٤- بئر اختبارية لمكمن أضحل	بئر اكتشافية لمكمن أضحل	آبار اختبارية جافة لمكمن جديد
حفر لإمتداد طويل لمكمن مطور جزئياً				٥- بئر اختبارية خارجية (توسعية)	بئر توسيعيه	بئر توسيعيه جافة
الحفر لاستخلاص أو تطوير تراكمات اكتشفت بحفر سابق				٦- بئر تطويرية	بئر تطويرية	بئر تطويرية جافة



الملحق (ب) : معاملات التحويل

TABLE A.1 Oil field units and SI units

	لتحـول	الى	أضـرب ب
الطول , L	feet	inches	12.0
	feet	meters	0.3048
	meters	feet	3.280
	inches	meters	2.54×10^{-2}
	meters	inches	39.7
المساحة , L^2	acres	hectares	0.4046
	hectares	acres	2.471
	square meters	square feet	10.76
	square feet	square meters	9.290×10^{-2}
الحجم , L^3	acre-feet	barrels	7758.4
	barrels	cubic meters	0.1590
	barrels	cubic feet	5.615
	cubic meters	barrels	6.290
	cubic meters	cubic feet	35.31
	cubic feet	barrels	0.1781
	cubic feet	cubic meters	2.832×10^2
معدل الانسياب, L^3/T	bbl/day	m^3/s	1.8401×10^{-6}
	m^3/s	bbl/day	0.5434×10^6
الكتلة , M	pounds	kilograms	0.4536
	kilograms	pounds	2.205
الكثافة, M/L^3	g/cm^3	kg/m^3	10^3
	g/cm^3	lb/ft^3	62.43
	kg/m^3	g/cm^3	10^{-3}
	kg/m^3	lb/ft^3	6.243×10^{-2}
	lb/ft^3	g/cm^3	1.602×10^{-2}
	lb/ft^3	kg/m^3	16.02
الضغط $M/(L)(T^2)$	atm	psi	14.7
	atm	dyn/cm^2	1.0133×10^6
	atm	N/m^2	1.0133×10^5
	psi	atm	6.805×10^{-2}
	psi	dyn/cm^2	6.895×10^4
	psi	N/m^2	$6.895 \times 10^{+3}$
	N/m^2	atm	9.869×10^{-6}
	N/m^2	psi	1.450×10^{-4}
	N/m^2	dyn/cm^2	10

continued

TABLE A.1 Continued

	لتحول	الى	اضرب بـ
اللزوجة المطلقة ,	centipoise	g/(cm)(s) (poise)	1×10^{-2}
M/(L)(T)	centipoise	kg/(m)(s) (= N · s/m²)	1×10^{-3}
النفوذية , L^2	Darcy	square centimeters	9.869×10^{-9}
	Darcy	square meters	9.869×10^{-13}
	square centimeters	Darcy	1.013×10^{8}
	square centimeters	square meters	10^{-4}
	square meters	Darcy	1.013×10^{12}
	square meters	square centimeters	10^{4}
طاقة حرارة الشغل ,	gram calorie	Joule	4.186
ML^2/T^2	Joule	gram calorie	0.2389
	cal/(g)(mol)	J/(kg)(mol)	4186
	J/(kg)(mol)	cal/(g)(mol)	0.2389×10^{-3}

الملحق (ج): المعجم

بعض المختصرات والتعريفات والعبارات العامية الشائعة:

AAPG : اتحاد جيولوجيي البترول الامريكان.

ADMA : شركة مناطق ابو ظبي البحرية، كارتل من شركة البترول البريطانية وشوكة البترول الفرنسية وشركة ابو ظبي الوطنية للنفط.

ADNOC : شركة ابو ظبي الوطنية للنفط.

ADPC : شركة بترول ابو ظبي، كارتل من شركة البترول البريطانية وشل وشركة ابو ظبي الوطنية للنفط.

AFE : سلطة الانفاق: تقدير لكلفة حفر البئر.

API : مؤسسة البترول الامريكية (أنظر كذلك وحدات API والكثافة).

API gravity : كثافة API: هي كثافة النفط محسوبة اعتمادا على القانون التالي:

$$\text{كثافة API} = \frac{١٤١,٥}{\text{الوزن النوعي عند درجة حرارة ٦٠م}} - ١٣١,٥$$

API units : وحدات مؤسسة النفط الامريكية، احدى اكثر المقاييس شيوعا في قياس الاشعاعية على مجس أشعة غاما.

ARCO : شركة اتلانتك ريتشفيلد للنفط.

Barrel : برميل، واحد برميل= ١٥٩ لتر او ٣٥ غالون انجليزي او ٤٢ غالون امريكي.

bbl : برميل

BCPD : برميل من المكثفات في اليوم.

BD or B/D : برميل (من النفط) في اليوم.

BHT : درجة حرارة قاع البئر.

BNOC : اتحاد النفط البريطاني الوطني.

BOPD : برميل من النفط في اليوم.

BOPs : مانعات الانفجار (على البرج).

btu : وحدة الحرارة البريطانية.

BWPD : برميل من الماء في اليوم.

CDP : نقطة العمق المشتركة (أنظر صفحة١١٨).

CFP : شركة البترول الفرنسية، تمتلك الحكومة الفرنسية ٣٥ بالمئة منها. وغالبا ما تعمل تحت اسم توتال.

Chrismas tree : شجرة عيد الميلاد: مجموعة الصمامات على رأس البئر.

Condensate : المكثفات: الهايدروكاربونات الخفيفة التي تتكاثف عندما تبرد الى درجة حرارة السطح، الغاز الطبيعي السائل.

CONOCO : شركة كونينتال للنفط.

DEMINEX : شركة النفط الالمانية الغربية، تمتلك الحكومة الالمانية معظم اسهمها.

Dry gas : غاز جاف: غاز بدون مكثفات، ويقصد به بشكل عام الميثان النقي.

Driller : الحفار: الشخص المسؤول عن طقم الحفر.

Dry hole : بئر جافة: بئر لا تحتوي على النفط او الغاز.

DST : فحص جذع الحفر (انظر صفحة ١٧٩).

Duster : غباري: بئر دون انتاج تجاري من النفط او الغاز.

ESSO : شركة ستاندرد للنفط في نيوجيرسي، تغير الاسم الان الى EXXON في اليوم الأول من تشرين الثاني ١٩٧٢.

EXXON : كانت تسمى ESSO سابقا.

Fairway : مسلك : اتجاه منتج في حوض معين.

FARO : انساب بمعدل قدره ..... (على سبيل المثال انساب DPOB).

GCM : طين ذو قطع غازي.

GOC : حد تماس النفط مع الغاز.

GOR : نسبة الغاز الى النفط.

GUPCO : شركة خليج السويس للبترول، كارتل من امكو وشركة النفط المصرية العامة.

GWC : حد تماس الغاز مع الماء.

IFP : مؤسسة البترول الفرنسية، مؤسسة للبحث والتدريس في علوم البترول أسست من قبل الحكومة الفرنسية.

ISP : الغلق المبدئي في الضغط.

IP : مؤسسة البترول، مؤسسة بريطانية مستقلة اسست لتشجيع دراسة البترول.

Jack-up : برج رفاع: برج حفر يرفع فوق البحر على عوارض فولاذية.

KB : الرحى (النضد) الدوار.

Kerosene : الكيروسين: مصطلح امريكي يستعمل للدلالة على البرافين.

Kill : أقتل (البئر) منع البئر من الانسياب.

KOC : شركة نفط الكويت، مشروع مشترك بين شركة البترول البريطانية وشركة غولف للنفط.

Lead : دليل: دليل يشير الى احتمال وجود مصيدة نفطية، مرشد الى منطقة احتمالات.

LOM : مستوى النضوج العضوي (يشير الى الكيروجين في الصخرة المصدرية).

LPG : الغازات البترولية المسيلة.

LASMO : شركة لندن والاسكتلندية البحرية للنفط.

MBD (also mb/d) : مليون برميل في اليوم.

md : ملي دارسي: مقياس للنفوذية (أنظر صفحة ٢٧٧).

MFIC : مراقب الحفر او اي شخص مسؤول آخر.

Mudlogger : جيولوجي (بشكل عام) يقوم بمراقبة طين الحفر بحثا عن شواهد غازية او نفطية، ويقوم بوصف العينات وما شابه ذلك اثناء حفر البئر.

NGL : الغازات الطبيعية السائلة، على سبيل المثال البروبان والبيوتان والبنتان.

NIOC : شركة النفط الوطنية الايرانية.

OAPEC : منظمة الاقطار العربية المصدرة للبترول.

OASIS : شركة نفط اوسيس (الواحة) الليبية، كارتل من ماراثون، اميرادا وكونكو وشل.

OPEC : منظمة الاقطار المصدرة للبترول (أنظر صفحة ٥).

OWC : تماس النفط مع الماء.

P & A : (بئر) مغلقة ومهجورة.

Paraffin : الكلمة الانجليزية للكيروسين.

Pay : عطاء: نطاق منتج (انظر صفحة ٣٥١).

PEMEX : شركة النفط الوطنية المكسيكية.

PERTAMINA : شركة النفط الاندنوسية الحكومية.

PETRONAS : شركة النفط الوطنية الماليزية.

Play : مصائد بترولية من صنف نوعي محدد، على سبيل المثال احتمال شعابي او احتمال فالق نامي.

Pool : خزين: تراكم نفطي منفرد.

Prospect : منطقة الاحتمالات: موقع حيث يمكن فيه حفر بئر لتحديد وجود النفط او الغاز.

PRT : ضريبة العائدات البترولية.

PSI : باوند لكل انج مربع (مقياس للضغط).

Psia : باوند لكل انج مربع مطلق.

PVI : ضغط-حجم-حرارة (تحليل موائع المكمن).

ROP : معدل الاختراق (للبريمة اثناء الحفر).

Roughneck : فرد من افراد طاقم الحفر ممن يعملون على ارضية البرج.

Roustabout : عامل برج حفر.

RT : الرحى (النضد) الدوار (انظر صفحة ٥٣).

Scout : موظف شركة يتعامل مع تجميع المعلومات الاستخبارية عن فعاليات الشركات المنافسة.

Show : شواهد: دلائل على وجود النفط/الغاز اثناء الحفر.

semi : برج حفر شبه غاطس.

shut-in field/well : حقل/بئر لم ينتج منه غاز/نفط.

SL : مستوى سطح البحر.

SDEKOR : اتحاد الاستكشاف النفطي الجنوبي، شركة النفط الحكومية في جنوب افريقيا.

sour gas/oil : غاز او نفط حامض: غاز او نفط يحتوي على كبريتيد الهايدروجين.

SP : مجس الجهد التلقائي (مجس/منحني).

SPE : جمعية مهندسي البترول.

SPWLA : جمعية محللي مجسات الابار المحترفين.

SSL : شركة سايزموغراف للخدمات.

STATOIL : شركة النفط النرويجية الحكومية.

Stripper well : بئر عارية: بئر ذات انتاج متدني من حقل ناضب.

TD : العمق الكلي.

Tool Pusher : مراقب الحفر: شخص مسؤول عن كافة عمليات الحفر في البرج.

TOTAL : اسم تستعمله شركة النفط الوطنية الفرنسية.

TRICENTROL : شركة حقول نفط ترينداد الكندية، تعمل الآن في بحر الشمال

ومناطق اخرى.

TVD : العمق العمودي الصحيح.

UKOA : اتحاد مشغلي المملكة المتحدة.

Wet gas : غاز رطب يحتوي على جزء متكاثف (الايثان والبروبان والبيوتان).

Well-site geolgist : جيولوجي يعمل على البرج موظف من قبل الشركة المشغلة لحماية مصالحها.

Wildcat: بئر استكشافية في منطقة جديدة.

Wild well : بئر فقدت السيطرة عليها –بسبب انسياب النفط، الغاز، او الماء.

Workover rig : برج اصلاحي: برج خفيف يستعمل لاعمال الصيانة على الابار المنتجة.

WOW : بانتظار تحسن الجو.

المحتويات

الإهداء

مقدمة المترجم

توطئة

الفصل الأول: المقدمة ١

مراجعة تاريخية للتنقيب عن البترول ١

البترول من نوح الى الاوبك ١

تطور أفكار التنقيب عن البترول وتقنياته ٦

مقام جيولوجيا البترول بين العلوم الأخرى ١٢

علاقة جيولوجيا البترول بالتنقيب عن البترول وانتاجه ١٤

الفصل الثاني: الصفات الفيزيائية والكيميائية للنفط والغاز ١٨

الغازات الطبيعية ٢٠

الغازات الهايدروكاربونيه ٢٠

الغازات اللاهايدروكاربونيه ٢٢

هايدرات الغاز ٣٢

التركيب الكيميائي والتواجد ٣٢

التشخيص والأهمية الإقتصاديه ٣٤

النفط الخام ٣٧

كيمياء النفط الخام ٣٨

التصنيف ٤٤

الفصل الثالث: طرق الإستكشاف ٥١

حفر الآبار وإكمالها ٥١

الحفر الدّقاق ٥٣

الحفر الدوراني (الرحوي) ٥٣

أنواع وحدات الحفر المختلفة ٦١

أنواع وحدات الانتاج المختلفة ٦٣

تقييم المكمن ٦٧
المجسات الكهربائية ٧٠
الحسابات الكمية لتحديد التشبع الهايدروكاربوني ٧٧
مجسات الاشعاعية ٨١
المجلس الصوتي ٨٧
مجسات المسامية المترابطة ٨٩
مجس قياس الميل ٩٣
استعمال المجسات في التحليل البتروفيزيائى : الخلاصة ٩٦
تطبيق المجسات في تحليل السحنات ٩٩
الطرق الجيوفيزيائية في التنقيب ١٠٤
المسوحات المغناطيسية ١٠٧
المسوحات الجذبية ١١٠
المسوحات المغناطيسيه والجذبيه : الخلاصة ١١٦
المسوحات الزلزالية ١١٦
الجيولوجيا تحت السطحيه ١٣٨
المقاطع العرضية الجيولوجيه ١٣٨
الخرائط الجيولوجية تحت السطحية ١٤٢
الإستشعار عن بعد ١٥٠
الإستشعارعن بعد البصري ١٥٢
الرادار ١٥٦
المسح متعدد الأطياف ١٥٧
الإستنتاجات ١٥٨
الفصل الرابع : البيئة تحت السطحية ١٦١
المياه تحت السطحية ١٦١
كيمياء المياه تحت السطحية ١٦٣
درجات الحرارة تحت السطحية ١٧١

المبادىء الأساسية ١٧١
التغيرات الحرارية الوضعية ١٧٤
التغيرات الحرارية الإقليمية ١٧٦
الضغوط تحت السطحية ١٧٨
القياسات ١٧٨
المبادىء الأساسية ١٨٠
الضغوط الفائقة ١٨٧
الضغوط المنخفضة ١٩٠
حركة (داينميكية) الموائع تحت السطحية ١٩٢
علاقة الضغط- درجات الحرارة ١٩٢
هجرة البترول الثانوية ١٩٤
الخلاصة : حركية الموائع في الاحواض الحديثة والهرمة ١٩٧
الفصل الخامس : نولد البترول و هجرته ٢٠٣
أصل البترول : عضوي ام لا عضوي ٢٠٦
العمليات العضوية الحديثة على سطح الارض ٢١٢
انتاجية المادة العضوية وحفظها ٢١٥
حفظ المادة العضويه في الترسبات القديمة ٢٢٣
تكون الكيروجين ٢٢٤
التحوير الضحل للمادة العضوية ٢٢٥
كيمياء الكيروجين ٢٣٢
مقاييس الحرارة القديمة ٢٣٦
هجرة البترول ٢٤٢
طرد الهايدروكاربونات على هيئة بترول اولي ٢٥١
هجرة البترول في الحالة المائعة ٢٥٢
طرد النفط في محلول غازي ٢٥٥
الهجرة الأولية للنفط الحر ٢٥٦

احتساب حجوم البترول ٢٥٧
تولد البترول وهجرته : الخلاصة ٢٥٨
الفصل السادس : المكمن ٢٦٧
المسامية ٢٦٧
تعريفات وتصنيفات ٢٦٧
قياس المسامية ٢٧٦
النفوذيه ٢٧٧
الضغط الشعري ٢٨٢
العلاقة بين المسامية والنفوذية والنسيج ٢٨٤
العلاقة بين المسامية والنفوذية وشكل الحبيبات ٢٨٦
العلاقة بين المسامية والنفوذية وحجم الحبيبات ٢٨٦
العلاقة بين المسامية والنفوذية وفرز الحبيبات ٢٨٧
العلاقة بين المسامية والنفوذية ورزم الحبيبات ٢٨٧
العلاقة بين المسامية والنفوذية وتوجيه الحبيبات ٢٨٩
تأثير التحوير على المكامن ٢٩٣
تأثير التحوير على المكامن الرمليه ٢٩٣
تأثير التحوير على المكامن الجيرية ٣١١
استمرارية المكمن ٣٢١
الإستمرارية العرضيه ٣٢١
الإستمرارية العمودية ٣٢٣
حسابات الاحتياطي ٣٢٦
حسابات الاحتياطي الحجميه الأوليه ٣٢٦
حسابات الاحتياطي في مرحلة ما بعد الاكتشاف ٣٢٨
طرق الإنتاج ٣٣١
دفع الماء ٣٣٢
دفع القبعة الغازية ٣٣٢

دفع الغاز الذائب ٣٣٦
الرفع الاصطناعي والاستخلاص المدعم ٣٣٧
الفصل السابع : المصيدة ٣٤٦
تسمية المصيدة ٣٤٧
تصنيف المصائد ٣٥٢
المصائد التركيبيه (البنيويه) ٣٥٤
مصائد الطيات المحدبة ٣٥٥
مصائد الفوالق والمصائد المرتبطة بالفوالق ٣٦٢
العلاقة بين المصائد التركيبية والوضع الحركي ٣٧١
المصائد الاقتحاميه ٣٧٢
المصائد الطبقيه ٣٧٨
المصائد الطبقيه غير المرتبطة بسطوح عدم التوافق ٣٨٠
المصائد الطبقيه المرتبطة بسطوح عدم التوافق ٣٩٢
العلاقة بين المصائد الطبقية والسحنات الرسوبية ٤٠٢
المصائد الحركيه المائيه (الهايدرودينميكيه) ٤٠٤
المصائد المختلطة ٤٠٥
المصائد : استنتاجات ٤٠٨
توقيت نشوء المصيدة نسبة الى هجرة البترول وترسيب المكمن ٤٠٨
التكرار النسبي لانواع المصائد المختلفة ٤١١
الفصل الثامن : الاحواض الرسوبية ٤٢٠
المصطلحات والافكار الاساسيه ٤٢٠
آليات تكون الاحواض ٤٢٤
تصنيف الاحواض الرسوبيه ٤٢٨
الاحواض الرواسخيه ٤٣٠
الاحواض داخل الرواسخيه ٤٣٠
التخلجات فوق الرواسخيه ٤٤٠

المنخسفات ٤٤٨
الاحواض الاقليميه وحركة الصفائح ٤٤٨
المنخسفات خلف القوسية ٤٥٠
منخسفات الاقواس الامامية ٤٥٧
مجامع احواض الانهدام- الانزياح ٤٦١
أحواض الإنهدام ٤٦٢
أحواض الإنهدام الفاشلة ٤٧٠
أحوض الإنزلاق المضربي ٤٧٦
الاستنتاجات : توزيع البترول بين الاحواض وداخلها ٤٧٧
توزيع الهايدروكاربونات في الأنواع المختلفة من الأحواض ٤٧٧
توزيع الهايدروكاربونات ضمن الأحواض ٤٧٩
الفصل التاسع : الرمل القيري والسجل الزيتي ٤٩٢
الهايدروكاربونات المرنة والصلبة ٤٩٣
التواجد
التركيب ٤٩٧
الرمل القاري ٤٩٩
التركيب والتوزيع والاصل ٤٩٩
استخلاص النفط من الرمال القاريه ٥٠٦
السجيل الزيتي ٥١١
التركيب ٥١٢
التوزيع ٥١٤
استخلاص النفط من السجل الزيتي ٥١٨
الفصل العاشر : الاستنتاجات
مناطق الاحتمالات والاحتماليه ٥٢٥
تقييم منطقة الاحتمالات ٥٢٦
الاحتياطات والمصادر ٥٢٩

تخمين احتياطات الاحواض ٥٣١
تخمين الاحتياطات العالميه ٥٣٤
الملاحق : ٥٤٠
الملحق (أ) : الخطوط الارشادية لتصنيف الابار ٥٤٠
الملحق (ب) : معاملات التحويل ٥٤٤
الملحق (جـ) : المعجم ٥٤٥

دار الأمل للنشر والتوزيع
اربد - ص.ب ٤٦٩
تلفون - ٢٧٦١٧٤
الاردن
١٩٩٤