الجامعة السورية الخاصة
SYRIAN PRIVATE UNIVERSITY

كلية هندسة البترول

Faculty of Petroleum Engineering

صفات الخزانات المتشققة

السنة الخامسة

م ١٢و١٣

الدكتور نضال شقير

2019 - 2018

مرجع هذه المحاضرة من كتاب ترجمة

الأستاذ المرحوم الدكتور فارس شقير

شلومبرغر

تفسير التسجيلات البئرية

مبادئ وتطبيقات

الفصل 13

الصفات الميكانية للصخور

التشققات الطبيعية

تُعَدُّ النطاقات المُشَقَّقة، طبيعياً، في الصخور الخازنة، هامة وواعدة، يجري البحث عنها واستكشافها، بسبب الصرف drainage الإضافي والزيادة الكبيرة في النفاذية التي توفرها. وبالرغم من أن للشقوق تأثيراً مميزاً جداً على النفاذية الكلية للصخر، فهي في العادة، ذات تأثير قليل جداً على المسامية، وعلى الإشباعات، وغيرها من الصفات الفيزيائية للصخور.

إذ تبدي الشقوق الطبيعية، بشكل عام، مزايا ثابتة معينة:

- فهي في العادة عمودية تقريباً على الميل، وهذا لاينفي، على كلِّ حال، وجود شقوق أفقية، ولكن أقل انتشاراً وشيوعاً بكثير، من الشقوق الشاقولية.
- وتتوجه، عادة، باتجاه سائد واحد (أو أكثر)، يتطابق بشكل عام مع اتجاه الفوالق والكسور في المنطقة، نظراً لأن الشقوق، في الغالب، تنشأ نتيجة للضغوط التكتونية.
- كما تتسبب الشقوق، في الكثير من الأحيان، بسقوط كميات قليلة من الكَسِرات الصخرية من جدار البئر، أثناء عملية الحفر، وعند احتكاكها مع رأس الحفر أو كبل الحفر.
- تَحْدُث الشقوق عادة في الصخور الصلدة والمتماسكة، حيث يفترض أن تكون البئر اسطوانية وقياسية (نظامية)، في حال غياب الشقوق.

ولكن فقط الشقوق المفتوحة جزئياً، على الأقل، تبقى وحدها، هي المفيدة من وجهة نظر الإنتاج.

اكتشاف الشقوق

قد صُمِّمَت سوابر التسجيل البئري، لتستجيب للصفات المختلفة التابعة لمحيط ثقب البئر، إذ تستجيب بعض السابرات، بشكل رئيس، للتكوين الصخري، وبعضها للمسامية، على حين يستجيب بعضها الآخر لموائع الإشباع. ولكن أيّاً منها، لسوء الحظ، لايستجيب للشقوقية بشكل أساسي، بالرغم من أن الشقوق، ولاسيَّما المفتوحة منها، يمكن أن تؤثر في استجابة بعض السوابر البئرية، ويكون هذا التأثير، على أي حال، كبيراً إلى حد بعيد في العادة. وهكذا يلزم، عند البحث عن الشقوق بواسطة القياسات البئرية، تَفَهُّم كلٍّ من: الفيزياء الأساسية للسابرة البئرية، وهندسية جميع القياسات التي تتضمنها هذه السابرة. إذ أنّ الخبرة وحدها، على العموم، هي التي تُمَكِّننا من تحديد الطرائق، التي تقدِّم النتائج الافضل في موقع معين.

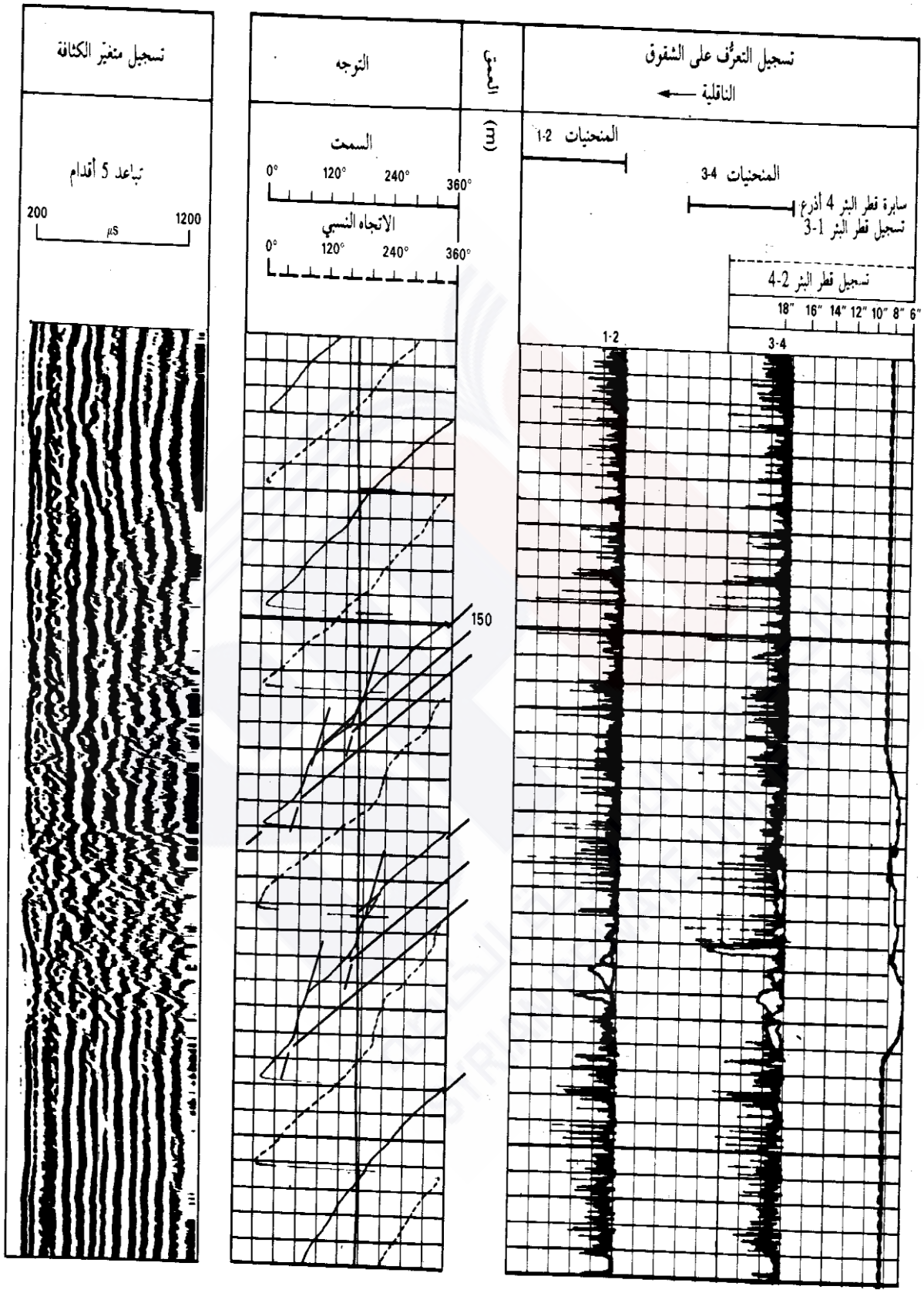
وعند البحث عن القطاعات المشققة في التسجيلات البئرية، يتم التركيز على المناطق، التي يشتبه بوجود الشقوق فيها، للأسباب التالية:

- التاريخ المحلِّي للشقوق الطبيعية.
- النقص في دقة التسجيلات السيزمية.
- استقراء المشاهدات المأخوذة من التكشفات outcrops الصخرية على سطح الأرض.
- ازدياد وتيرة تقدُّم رأس الحفر.
- وجود بعض البلورات في فتات الحفر.
- ضياع سائل الحفر أثناء عملية الحفر.
- فقر في استخراج (استرجاع) اللباب poor core recovery.
- وجود العينات الصخرية المشققة.
- نتائج الاختبار، التي لاتتوافق مع ماهو معلوم، أو مُقدَّر من قيم المسامية والنفاذية.
- تداخل الضغط بين الآبار (المنتجة، والمخصصة للحقن).

القياسات الصوتية

يعَدُّ اهتزاز الأمواج الصوتية، في داخل وجوار ثقب البئر، أحد أقدم كواشف التشقق، إذ تستجيب القياسات، التي تستند إلى انتشار الموجة الصوتية، للصفات الميكانية للصخر، ولا تتأثر إلاّ قليلاً ببيئة البئر.

وتظهر على صورة القطار الموجي المقيس في القطاعات المشققة، كما هو مبيّن في التسجيل الصوتي المتغيِّر الكثافة Variable Density* Log (VDL)، تغيرات مفاجئة على شكل قطاعات ضبابية غير واضحة، أو أشكال متعرجة شبيهة بالشارات العسكرية، وغيرها (كما في الشكل 13-1). وتوحي هذه الظواهر بوجود سطوح فاصلة بين أوساط، تتباين فيها المعاوقة الصوتية acoustic impedance، وتقع بين المرسل واللاقط في السابرة الصوتية. حيث يمكن، أن تتسبب هذه الشذوذات في انتشار الأمواج الصوتية، عن حضور الشقوق المفتوحة. ولكن تحدث، لسوء الحظ، شذوذات مشابهة أيضاً، بسبب تغيُّرات قطر البئر، أو بسبب طبيقات رقيقة مختلفة في تكوينها الصخري، بل حتى بسبب أنظمة من الشقوق المُنْدَمِلة (المُغْلَقة) أيضاً.

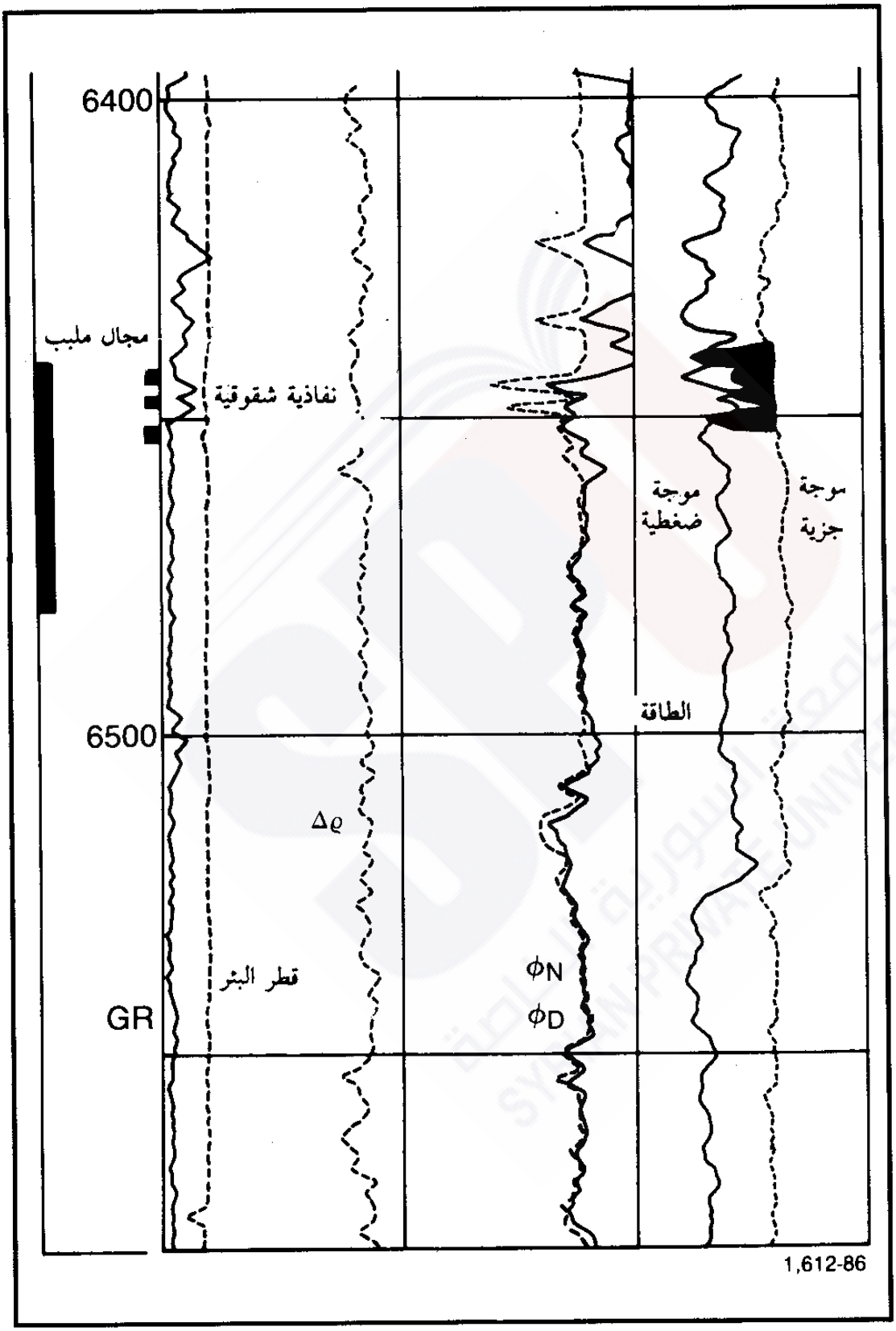


الشكل (1-13): تعرّف الشقوق، بواسطة تسجيل (VDL)، وتسجيل تَعَرُّف الشقوقية (FIL) fracture identification log.

وحديثاً، أصبحت السابرة الصوتية الطويلة *LSS وسابرة الصفيف الصوتي *Array Sonic، معروفتين جيداً، بتسجيلهما للقطار الموجي الصوتي wavetrain. فهما تسجِّلان أيضاً، إضافة لزمني ارتحال الموجتين الجزِّية والضغطية، طاقة كل من رزمتيهما الموجية، والمحتوى الترددي لكلٍّ منهما، على التوالي. وتُصْدِر سابرة الصفيف الصوتي مقداراً معيناً من الطاقة، يُعَدُّ الجزء، الذي يصل منها إلى اللاقط (المُسْتَقبل)، مقياساً لتجانس وتماسك الطبقة. حيث توحي الإشارة القوية، المقيسة عند اللاقط، بوجود صخر متماسك واحتمالية قليلة للشقوقية، على حين توحي الإشارة الضعيفة جداً باحتمالية عالية للشقوقية، شرط أن تبقى جميع العوامل الأخرى ثابتة. ويقدِّم الشكل (2-13) مثالاً لتناقص الطاقة الجزِّية shear energy

مقابل قطاع، يُشتبه باحتوائه على الشقوق. إذ تنعكس بعض الطاقة الجزِّية على سطح الشق، ويتحول بعضها إلى أنماط أخرى من الانتشار الموجي، وينكسر بعضها الآخر، مما يُخْفِض بالنتيجة، وبشكل واضح، كمية الطاقة الجزِّية الواصلة إلى اللاقط.

هناك أيضاً تقنية أخرى واعدة، تتمثل بدراسة مظاهر انقلاب نمط الموجة، الذي يحدث عند اصطدام الطاقة الصوتية بشقوق مملوءة بالموائع. إذ يتعزز التماس بين ثقب البئر والطبقة، عند تقاطع البئر مع الشق، بسبب ازدياد مساحة سطح التماس بينهما، مما يسهِّل كثيراً انقلاب الطاقة الصوتية، من أحد الأنماط الطبقية (الخاصة بالطبقة) إلى أحد الأنماط البئرية (أمواج ستونلي Stonely الإنبوبية وأنماط متنوعة نظامية أخرى،



الشكل (2-13): هبوط في الطاقة الجزّية يشير إلى التشققات.

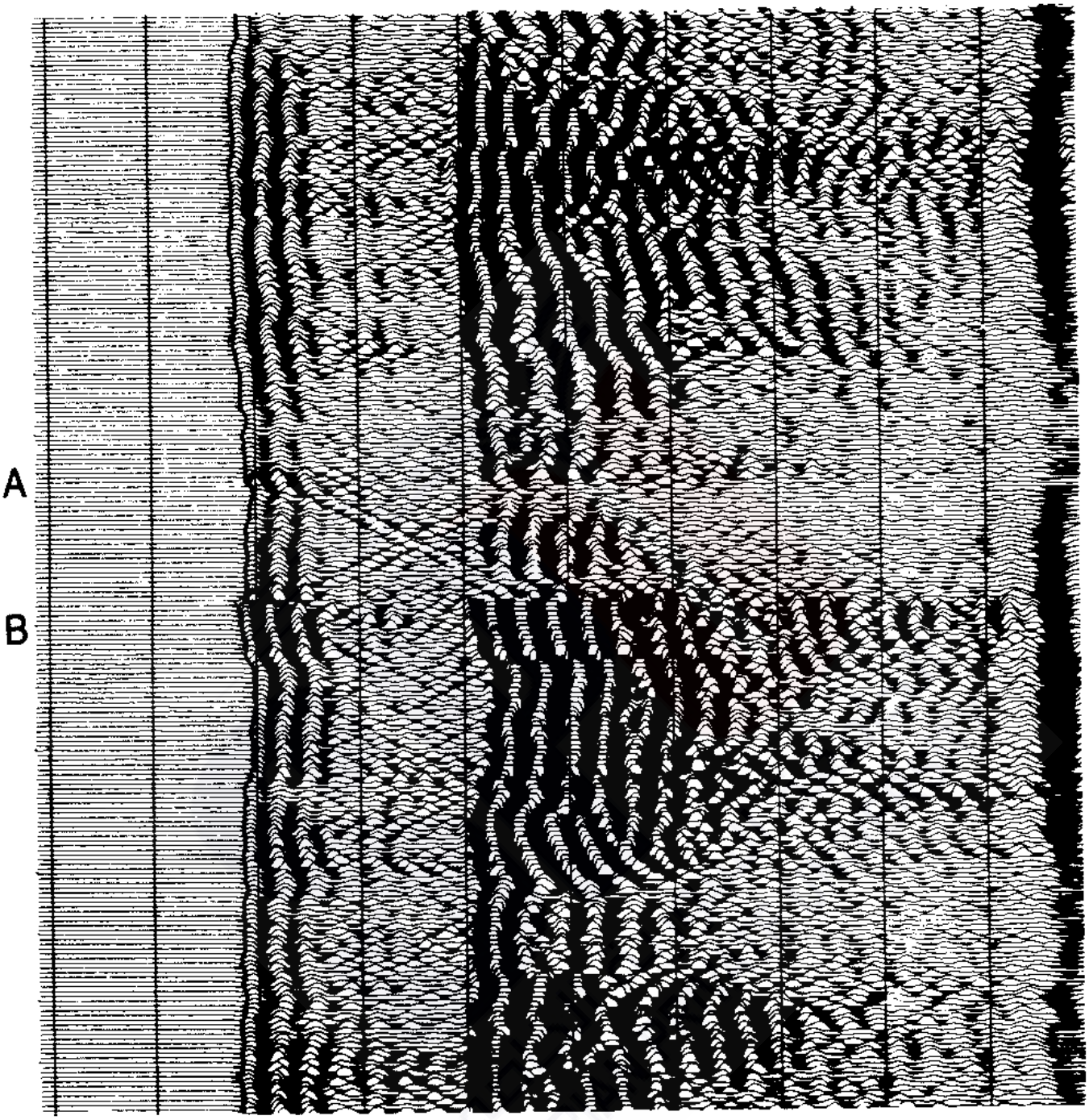
شبيهة بنمط رايلي (Rayleigh)، والعكس بالعكس. وتتسبب ظاهرة انقلاب النمط هذه، بازدياد مفاجيء (نتوء) في مطال النمط الموجي الخاص بالطبقة. وذلك عندما يصبح موقع اللاقط على سوية الشق، إذ يزوِّد نتوءان منها، يتباعدان بمقدار تباعد اللاقط عن المُرْسِل، بوسيلة موثوقة للكشف عن الشقوق.

يبيّن الشكل (3-13) شكل الموجة الصوتية، المقيسة بتباعد 3,6 م (12 قدم) بجوار شق أفقي كبير، حيث تشير النقطتان A و B إلى الموقعين، اللذين يقع فيهما المرسل واللاقط مباشرة مقابل الشق، على التوالي، وحيث تُلاَحَظ، بسهولة، الزيادة الحادة في أزمنة ارتحال الوافد الأول لكلٍّ من: الموجة الضغطية والموجة الجزِّية.

ظاهرة أُخرى، يمكن ملاحظتها بوضوح، تتمثل بنمط التشابُك criss-cross mode أو التصالب، الناشيء في الأمواج الضغطيــة والجــزِّيــة، وتكــون الشــذوذات المتسببــة عنها،

والناجمة عن التشققات الشاقولية، أكثر رقة على أي حال.

كذلك يمكن حساب نسبة بواسون Poisson's ratio من سرعات الأمواج الضغطية والجزّية (أو من أزمنة ارتحالها)، حسب المساواة (13-1). إذ تكون الصخور، ذات القيم العالية لنسبة بواسون، أكثر احتمالاً لأن تحوي قطاعات مشققة، من تلك ذات القيم المنخفضة. وهكذا، يمكن الحصول بواسطة نسبة بواسون على رؤية داخلية، إلى حد ما، لاحتمالية التشقق. كما يمكن الاستفادة من هذه التقنيات الصوتية، ولاسيما بعد إدخال سابرة الصفيف الصوتي Array Sonic، وغيرها من التقنيات المعقدة، من أجل تحديد الشقوقية في كلٍّ من الآبار المفتوحة والمكسوة.



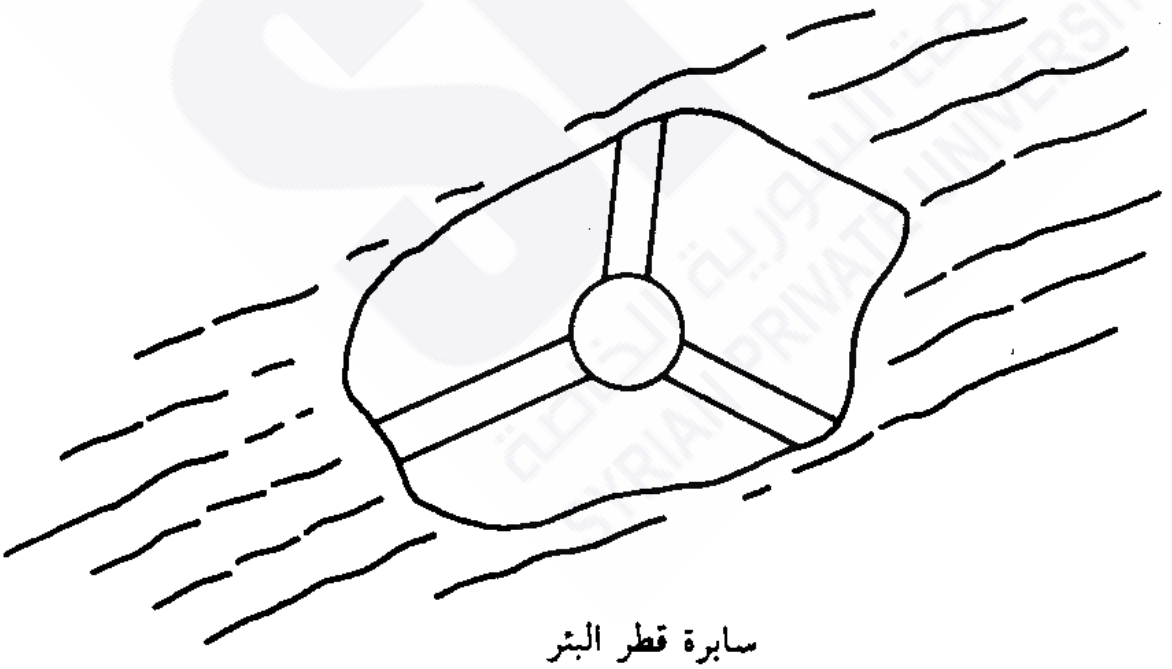
الشكل (3-13) : استجابة شكل الموجة الصوتية مقابل شق أفقي كبير.

قياسات قطر البئر Caliper Log

تتشظّى غالباً الحواف الصخرية للشقوق، جَرَّاء عملية الحفر في القطاع المتشقق، ويتوسّع بذلك قطر البئر في المستوى الحاوي نظام الشقوق. لهذا يمكن لبئر، ذات مقطع متطاول، في طبقة يُتَوقَّع فيها أن يكون المقطع قياسياً ودائرياً، أن تشير إلى وجود تشققات. ويُفَضَّل من أجل اكتشاف الشقوق بواسطة تسجيل قطر البئر، الاستعانة بسابرة متعددة الأذرع أو الاتجاهات. مثال ذلك تسجيلات قطر البئر، المقيسة بسابرة HDT* ذات المَيْز الشديد، أو بسابرة الميل المزدوجة Dual Dipmeter(SHDT)، التي تسجِّل بأذرعها الأربع قطرين للبئر، باتجاهين متعامدين. إذ يبقى أحد الزوجين من الأذرع، دائماً تقريباً، باتجاه القطر الأعظم للبئر الإهليلجي، على حين يأخذ الزوج الثاني اتجاه القطر الأصغر. ويَسْهُل بذلك تمييز البئر إذا كانت إهليلجية أو متطاولة.

وفي حال غياب تسجيل قطر البئر، ذي الأذرع الأربع، يتم غالباً تَعَرُّف استطالة البئر من مقارنة تسجيل قطر البئر، ذي الذراعين (كما هو متوفر في سابرة الكثافة وسابرة المقاومية الدقيقة)، مع تسجيل قطر البئر ذي الأذرع الثلاث (من السابرة الصوتية). ومن جديد، تتبع، دائماً تقريباً، السابرة ذات الذراعين القطر الأعظم للبئر، على حين تتأثر ذات الأذرع الثلاث، بشدة، بالقطر الأصغر (انظر الشكل 13-4).

سابرة قطر البئر
ذات ذراع واحدة



سابرة قطر البئر
ذات ثلاث أذرع

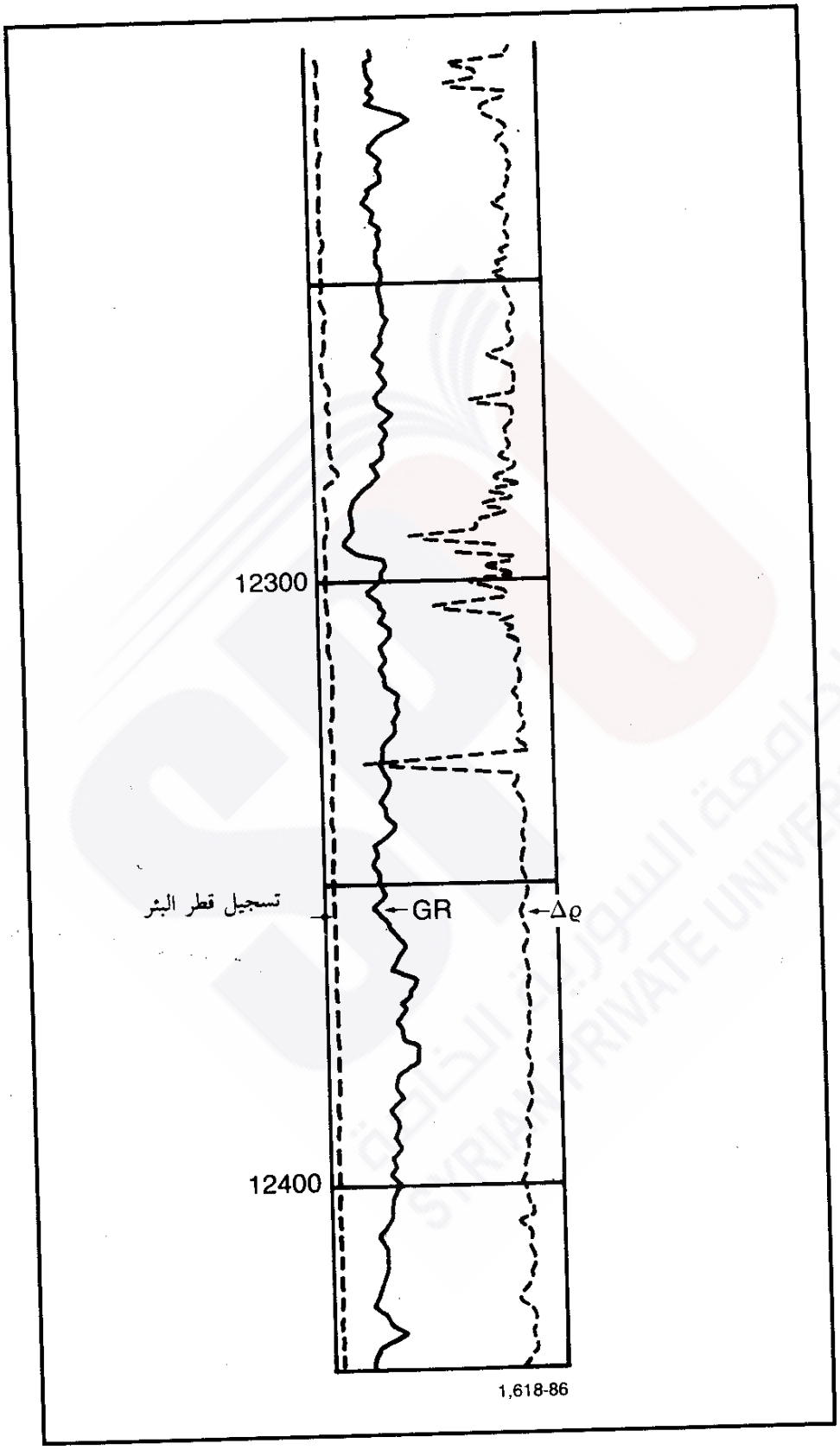
1,613-86

ولكن، يجب الحذر الشديد، عند إستخدام قطر البئر للكشف عن التشققات، لأن إهليلجية البئر، يمكن أن تتسبب عن عوامل أخرى غير الشقوق. إذ يمكن أن يؤدي الحفر الموَجّه، وانحراف البئر، والحفر عبر الطبقات ذات الميول الحادة، أو عندما تكون البنى المسامية مُوَجَّهة، وغير ذلك من الأحداث، لاستطالة مقطع البئر. كما يمكن أن يكون مفعول الشقوق عكسياً، على قطر البئر، إذا اُستخْدِمت أثناء الحفر مواد مانعة لتسرب سائل الحفر (أي ضياع دورة السائل)، حيث يقرأ تسجيل قطر البئر، في القطاعات المُشَققة، مقادير أقل، من قطر رأس الحفر، وذلك بسبب احتشاء الشقوق بالمواد المانعة للتسرب (إنظر الشكل 13-1).

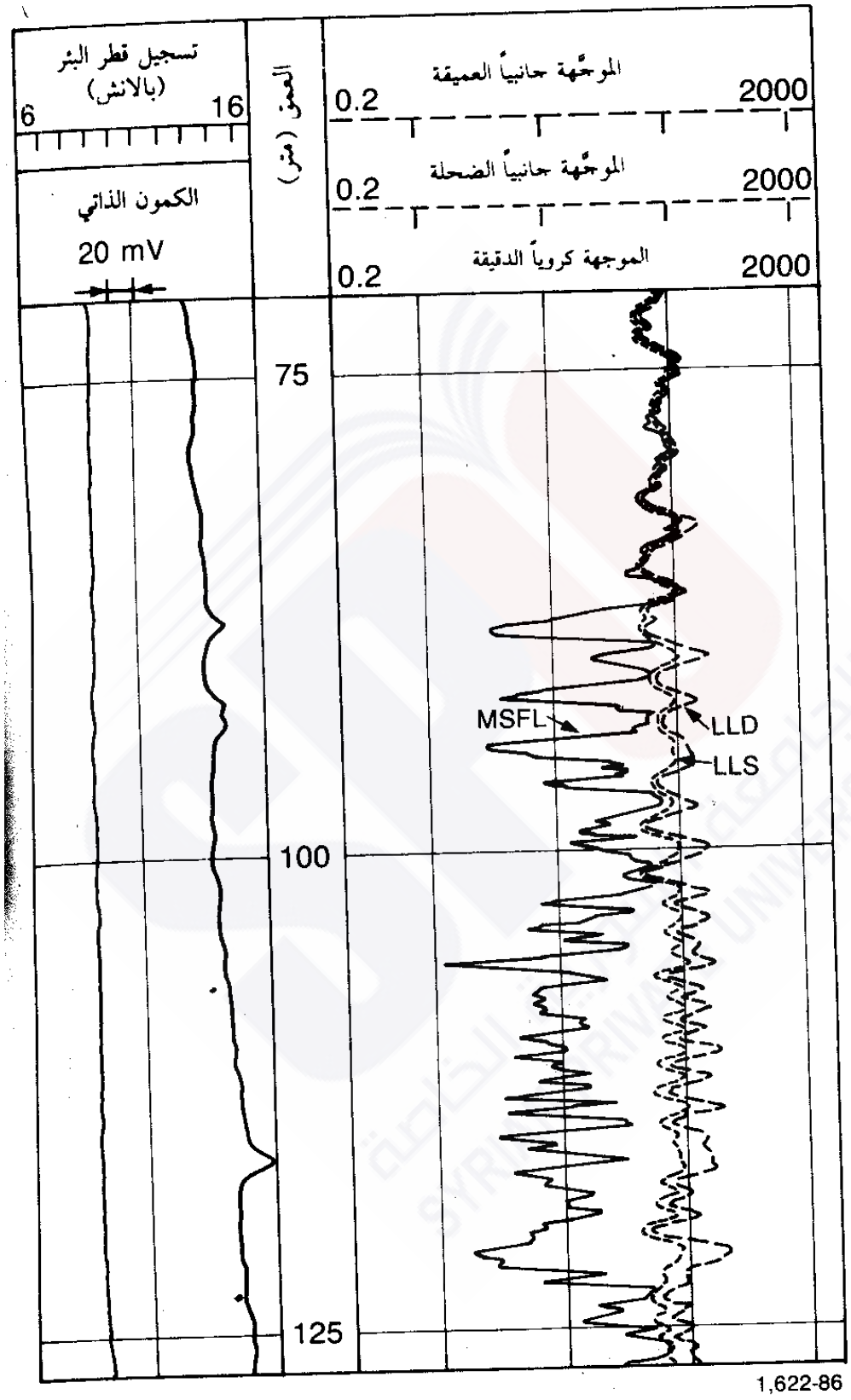
يُعَدُّ منحنى تصحيح الكثافة $\Delta\varrho$، المرافق للتسجيل الكثافي، كاشفاً أساسياً (كمونياً) آخر للشقوقية، إذ تمثِّل $\Delta\varrho$ التصحيح المطبَّق على كثافة الصخر المقيسة، للتعويض من أجل الكعكة الطينية ومن أجل ابتعاد سابرة الكثافة، عن أن تكون لاصقة لجدار البئر. وهي تستجيب، عادة، لوعورة البئر وسماكة الكعكة الطينية، كما تستجيب أيضاً للشقوق المملوءة بالمائع (ولاسيما، بعد أن تكون قد تَشَظَّت حواف الشقوق، بسبب عملية الحفر). لهذا، يمكن لمنحني تصحيح الكثافة الناشط والعشوائي، أن يكشف وجود التشققات، إذا كانت البئر نظامية (قياسية in guage)، كما في المثال المعروض في الشكل (5-13). ولكن من مساوىء منحني $\Delta\varrho$ في تحديد الشقوقية، هو أنه لايرى إلاّ جزءاً من جدار البئر، ويمكن بذلك أن يُغفل الشقوق. ولما كانت سابرة الكثافة، تتوجه عادة، باتجاه القطر الأطول للبئر، فإن منحني التصحيح $\Delta\varrho$، يتبع أيضاً سطح التشقق. كما تستجيب $\Delta\varrho$ أيضاً إلى الانجرافات (الغُسولات washouts)، التي لا ترتبط بالشقوق، وهذا يوجب الحذر الشديد، عند استخدامها دليلاً للشقوقية.

وعلى العموم، لا تساهم الشقوق جديًّا في مسامية الصخر (مع أنها قد تساهم في بعض الأحيان). كذلك يمكن أن يزيد تشظي حواف الشقوق، جَرّاء الحفر، قليلاً في المسامية الظاهرية، المقيسة بإحدى سوابر المسامية ذات الاستكشاف الضحل، مثل سابرة الكثافة. لهذا، يمكن للتباين في قيم المسامية المقيسة، بين وجهين متجاورين من البئر، أن يكشف وجود التشققات، ويقدم إضافة لذلك قيماً للمسامية الشقوقية. وهذا يتطلب، طبعاً، قياسين منفصلين بسابرة الكثافة، أحدهما بالتَوَجُّه التقليدي مع القطر الأعظم، والآخر مع القطر الأصغر.

في الشروط المناسبة، تكون سوابر المقاومية فعّالة، إلى حد بعيد، في تحديد القطاعات المشققة، حيث يستند اكتشاف الشقوق إلى مبدأ فحواه: أن السابرة التي تنظر عميقاً (ذات الاستكشاف العميق) في الطبقة، تتأثر بوجود الشقوق أقل من تلك، ذات الاستكشاف الضحل. وعلى سبيل المثال، يمكن اكتشاف الشقوق في التسجيل التحريضي المزدوج dual-induction log (DIL)، عندما يبدي منحني SFL، أو منحني LL-8، قراءات مقاومية منخفضة كاذبة، لا تؤكدها القراءات التحريضية العميقة والمتوسطة. حيث يكبر الفاصل (بين المنحنيين: العميق والضحل)، كلما ازدادت شدة التشقق، إذا بقيت المتغيرات الأخرى ثابتة. ويمثّل الشكل (13-6) تطبيقاً للكشف عن التشققات، بواسطة التسجيل المزدوج المُوجَّه جانبياً، والتسجيل الدقيق المُوجَّه كروياً DLL*-MSFL.



الشكل (5-13): نشاطية عالية في Δϱ مقابل الشقوق المحتملة.



الشكل (13-6): تحديد الشقوقية، بواسطة السابرة المزدوجة ـ الموجهة جانبياً، والدقيقة الموجهة كروياً DLL-MSFL.

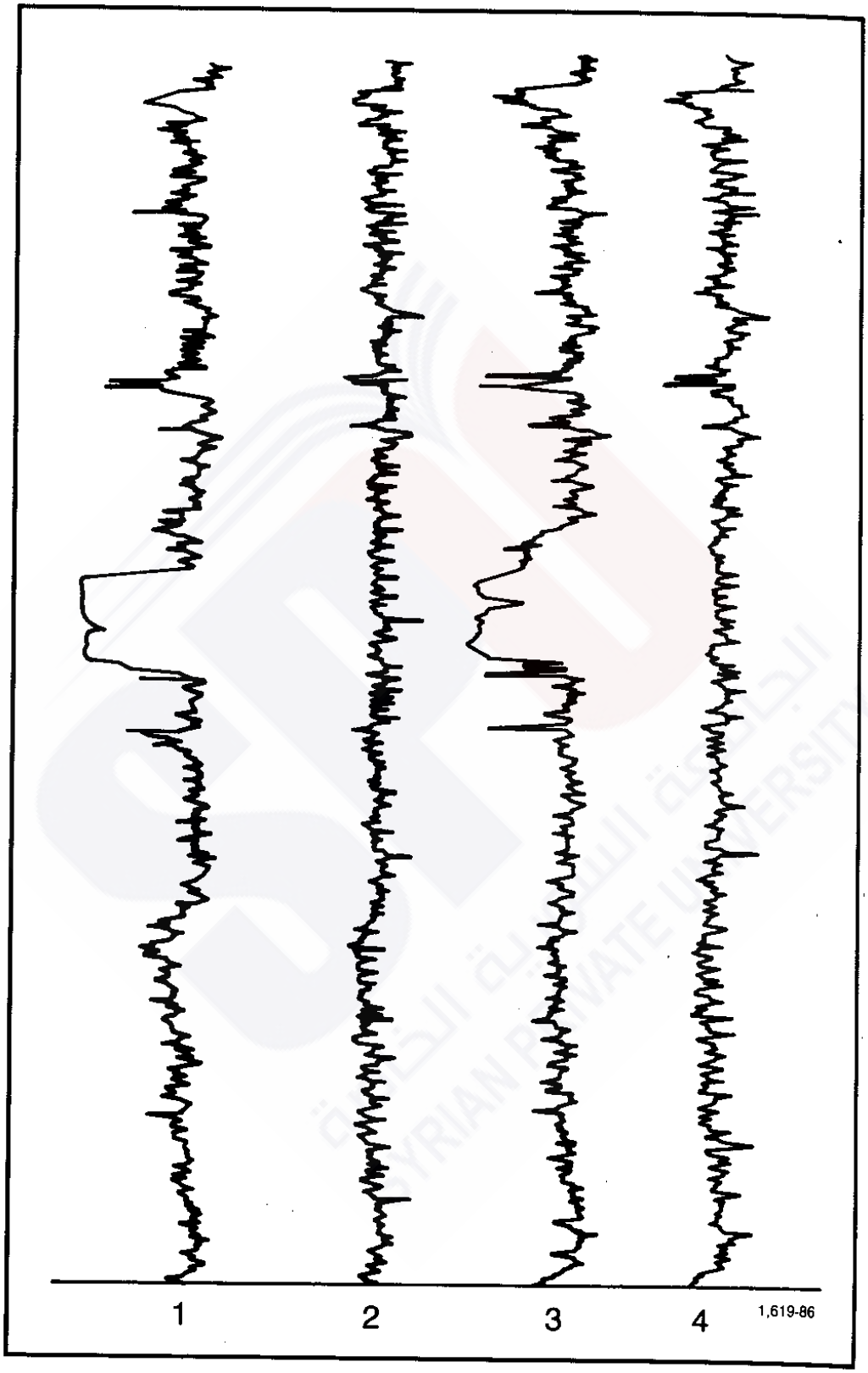
قياسات الامتصاص الكهرضوئي

يمكن الاستفادة أيضاً من مقطع الامتصاص الكهرضوئي P_e ، المقيس بسابرة الكثافة الصخرية (LDT) في سوائل الحفر الثقيلة، الحاوية على الباريت barite، للكشف عن الكعكة الطينية وعن ضياع سائل الحفر، في القطاعات ذات المسامية المنخفضة. يكون مقطع الامتصاص الكهرضوئي عالياً جداً: (267) في الباريت، مقابل: (4.9) في الحجر الكلسي و (1.85) في الحجر الرملي، وهذا يجعل الشقوق المعبأة بسائل الحفر قابلة للاكتشاف مباشرة، عن طريق قياس P_e أي ، يمكن أن تكون القراءات العالية لـ P_e ، في حال تحقيق التماس الجيد مع جدار البئر، بواسطة منحنيات $\Delta\varrho$ أو قطر البئر، دليلاً جيداً على الشقوقية.

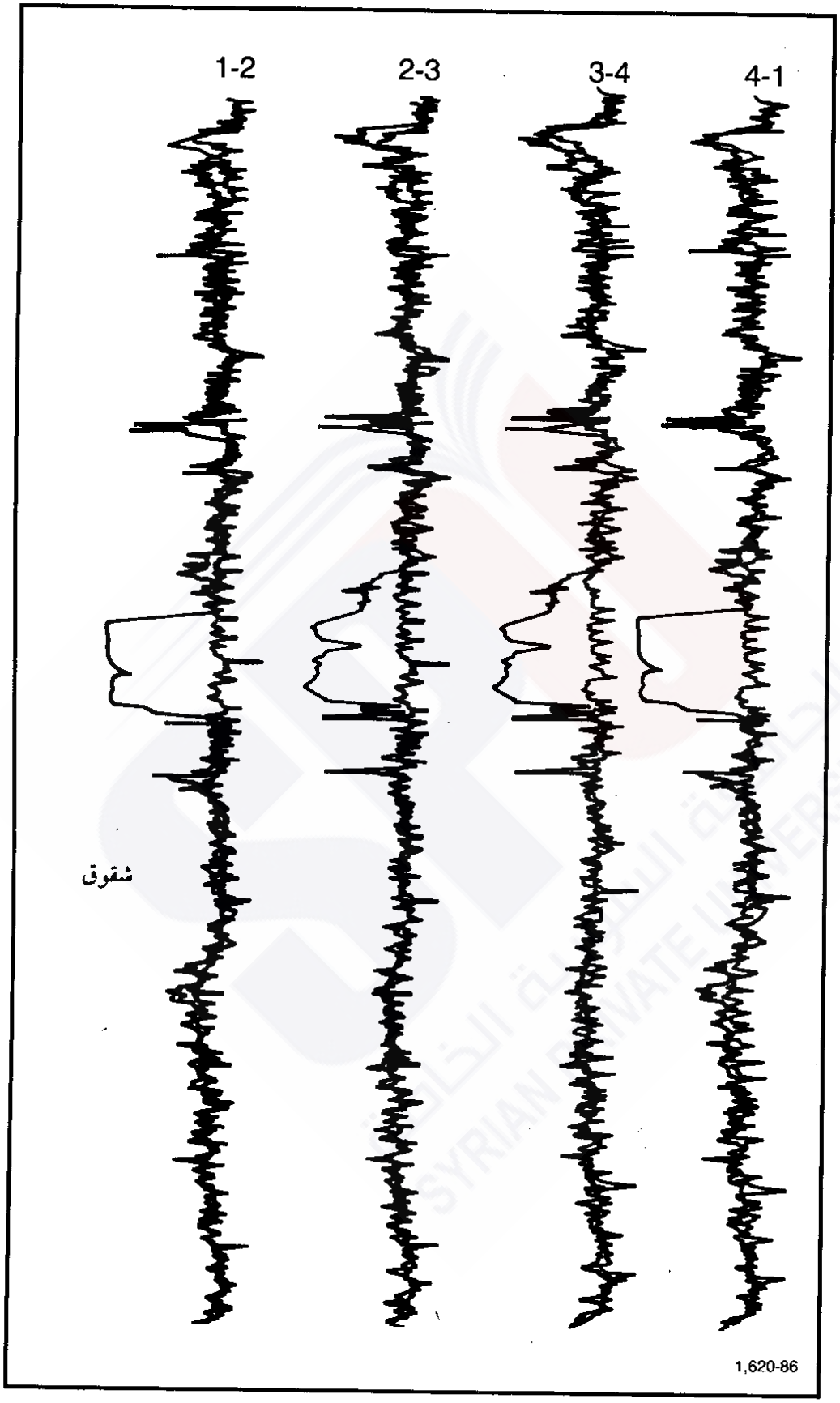
قياسات ميل الطبقة

قد يكون الإظهار الخاص لقياسات المقاومية الدقيقة الميلية، المسمى بتسجيل تعرُّف الشقوقية fracture identification (FIL*)، إحدى أبسط وأكثر الطرائق فعالية في الكشف عن الشقوق. حيث يسبب، عادة، اجتياح سائل الحفر لنظام من الشقوق، قراءات منخفضة للمقاومية الدقيقة الميلية، من قبل الوسادة المقابلة للشقوق، وحيث تدل مقارنتها مع

قراءات الوسائد المجاورة (التي تنحرف عنها بمقدار 90 درجة)، على وجود الشقوق. إذ تكون احتمالية وجود الشقوق ضعيفة، إذا كان البون بينها معدوماً، على حين تُصْبِح احتمالية الشقوقية عالية، إذا كان البون بينها كبيراً. ويبدو مثل هذا التباين واضحاً في الشكل (13-7) حيث يقيس منحنيا الميل 1 و 3 مقاوميات أخفض جداً، مما يقيس المنحنيان 2 و 4، على طول مجال قصير من المثال المعروض. كما توضح جيداً مطابقة overlaying منحنيات المقاومية الدقيقة (FIL)، المقيسة بوسائد متجاورة، والمعروضة في الشكل (13-8)، القطاع ذا الشقوقية المحتملة. هذا وقد ورد عرض FIL آخر في الشكل (13-1).[٢٢]



الشكل (13-7): تشير معطيات ميل الطبقة إلى اللاتجاهي anisotropy، وربما إلى الشقوقية.



الشكل (13-8): اكتشاف الشقوقية، عن طريق عرض FIL لمعطيات الميل الطبقي.

لاتبلغ هذه الطريقة الكمال، لأن الوسائد لا تغطي سوى 40% من سطح جدار البئر ذي القطر 20 سم ("8 إنش)، فيصعب بواسطتها اكتشاف الشقوق الرقيقة في الطبقات ذات الميل الحاد، وفي المجالات المهشمة جداً، حيث يمكن أن تقرأ جميع الوسائد نفس القيم.

ولعملية اكتشاف الشقوق بواسطة تسجيل ميل الطبقة وتسجيل الشقوقية (FIL) مَزيّةٌ إضافية، ذلك لأنها قادرة بسهولة: على تحديد اتجاه نظام التشقق في باطن الأرض، من معرفة اتجاه وسائد مقياس الميل بالنسبة للشمال، إضافة لمعرفة الوسادة المقابلة للشقوق.

إذ إن الأخاديد التي تنشأ أحياناً في جدار البئر بفعل رأس الحفر وكبل الحفر في المجالات المشقَّقَة، تكون من الشدة بمكان، فتحدّ من حركة الدوران المعهودة في السابرة ذات الوسائد، أثناء صعودها. وتُعدُّ منحنيات مقياس الميل، التابعة لسوابر مقياس الميل dipmeter وهندسية البئر Borehole Geometry (BGT)، كواشف جيدة لهذه الظاهرة. إذ، عندما تدخل وسادة مقياس الميل، أو ذراع سابرة قطر البئر، أحد هذه الأخاديد، يتعدَّل دوران السابرة النظامي، إلى أن تخرج الوسادة من الأخدود، وتغادر السابرة القطاع المشقق، لتعود لها حركتها الدورانية النظامية. وتلاحظ هذه الظاهرة طوال المجالات المشققة في الشكل (13-1).

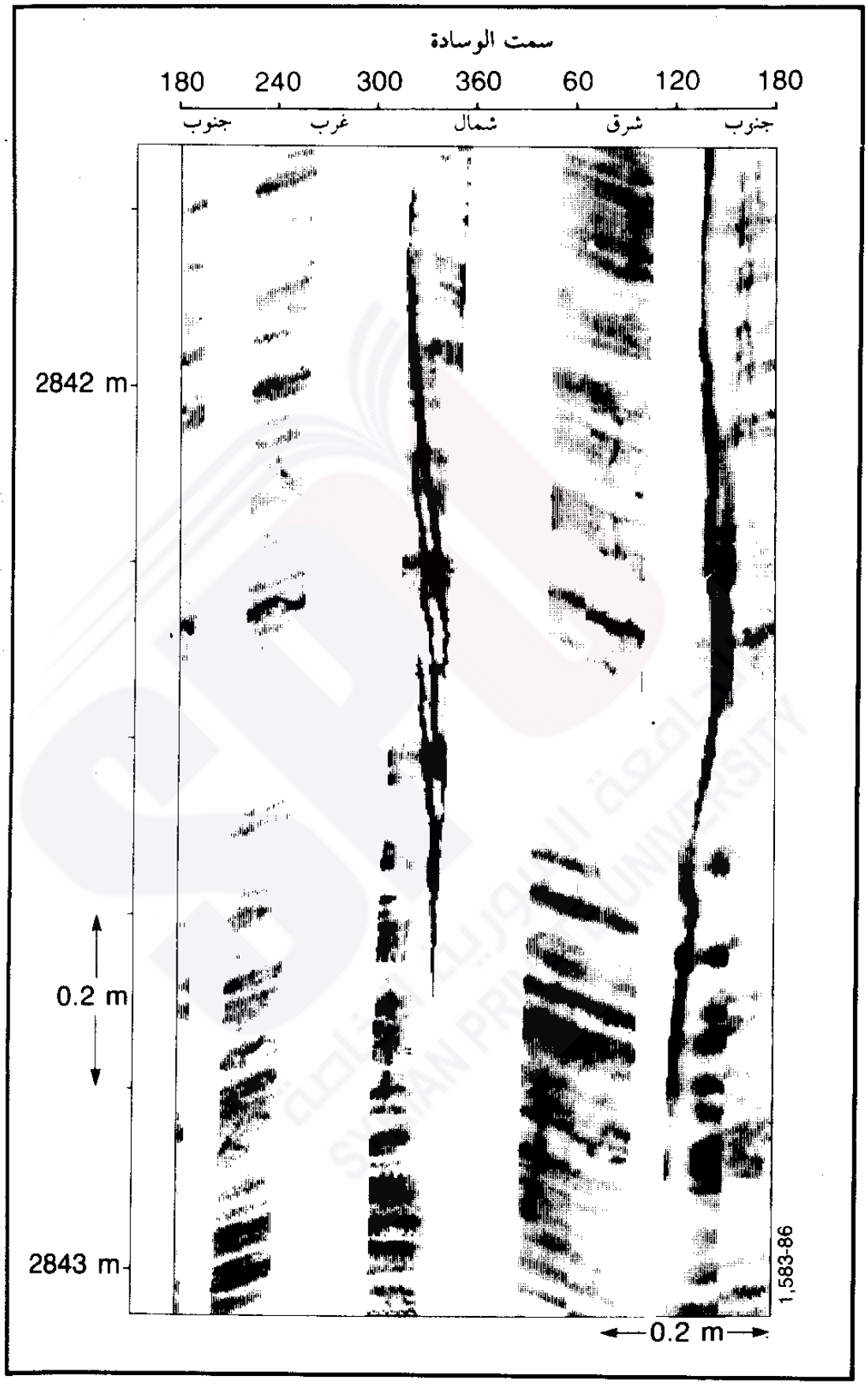
السابرة التلفزيونية البئرية

يعتبر التلفزيون البئري ماحصاً (ماسحاً ـ فاحصاً) صوتياً acoustic scanner، يَتمحَّص جدار البئر، أثناء سَحْبِه نحو الأعلى، بواسطة محوِّل للطاقة transducer، يُصْدِر، نبضياً، شعاعاً من الأمواج فوق الصوتية. ويتم إظهار أنماط pattern الإنعكاسية الصوتية على جدار البئر، بشكل مرئي، على راسم اهتزاز (إنبوبة الأشعة المهبطية cathode-ray tube)، حيث تَظْهر صورة جدار البئر، وكأنه مقطوع (مفصوم) شاقولياً، وموضوع بشكل منبسط. وتظهر الشقوق الشاقولية، وكأنها خطوط مستقيمة، أما الشقوق التي تميل بين الشاقول والأفق، فتظهر كمنحنيات جيبية.

وقد بَهُتَتْ الشعبية الأصلية لهذه السابرة، بسبب المصاعب العملية والتقييدات limitations البيئية، التي تواجهها في الآبار المتطاولة أو الوعرة rugose أو المتداعية، حيث تُصبح نتائجها رديئة في هذه الظروف، التي تسود بخاصة في المجالات المشققة. ولكن السابرة ومعالجة الإشارة، تم تحسينهما للدرجة، التي أعادت الآن لهذه القياسات بعضاً من شهرتها المفقودة.

سابرة الماحص الطبقي الدقيق (FMS)

يعتبر اكتشاف التشققات الطبيعية أحد التطبيقات، الأكثر أهمية لسابرة الماحص الطبقي الدقيق formation microscanner tool (FMS)، الذي سبق وصفه في الفصل 12، والذي يقيس الناقلية الكهربائية بواسطة صفيف من الأزرار (المساري) الكهربائية، المثبتة على وسادتين، تنحرف إحداهما عن الأخرى بمقدار 90 درجة. ويستطيع الماحص الطبقي الدقيق اكتشاف الشقوق، التي يراوح اتساعها بين أجزاء الميليمتر وبضعة سنتيمترات، ويتمتع بميز شاقولي ممتاز، يستطيع التمييز بين شقين، لا يفصل بينهما أكثر من سنتيمتر واحد (0.4 إنش). كما تستطيع سابرة الماحص الطبقي الدقيق (FMS) التمييز بين الشقوق المفتوحة والمغلقة. ويبين الشكل (9-13) الطبقات الأمامية المائلة للحجر الكلسي الحُبيبي، حيث تظهر بوضوح أيضاً سلاسل من ظواهر خطية ناقلة، تميل بشكل حاد، وتُمَثِّل شقوقاً مفتوحة ومملوءة بسائل الحفر الناقل. على حين يشير النقص في انزياح سطح التطبق عبر هذه الشقوق، إلى أنها نشأت بسبب الجهد الضغطي، وليس بسبب الجهد الجزِّي.



الشكل (13-9) عرض لتسجيل FMS، يُظْهِر الشقوق المفتوحة.

قياسات أُخرى

هناك طرائق أُخرى عديدة، تزوِّد أحياناً بالرؤية الداخلية اللازمة، عبر المجالات الصخرية، التي يُحْتَمل أن تكون مشققة في مواقع خاصة. وتتضمن هذه الطرائق تحديد رقاقات صخرية مُشِعَّة، بواسطة سوابر اشعاعات غاما الطبيعية: العادية أو الطيفية NGS، وتقنيات النبض النيوتروني، وتسجيل استجابة سابرة EPT، وتسجيل درجة الحرارة، والشذوذات الضوضائية.

ولما كانت الشقوق المملوءة بالسائل، يمكن أن تسبب قراءات شذوذية للعديد من التسجيلات البئرية في الآبار المفتوحة، فقد تم تطوير برنامج لتقدير احتمالية وجود الشقوق، يستفيد من 16 كاشفاً للشقوقية بآن معاً، من أجل حساب احتمال وجود القطاعات المشققة طبيعياً.

استنتاجات

يُستخْلَص من الشروح السابقة، أنه لا يوجد تسجيل بئري وحيد، يقدّم بمفرده، برهاناً قاطعاً عن وجود الشقوقية، وتكون مهمة الكشف على الشقوق أكثر وثوقية، كلّما أكَّد وجودها عدد أكبر من التسجيلات والتقنيات البئرية، على أن يتم تحديد التقنيات المشاركة، والمعتمدة في حلّ المسائل المتعلقة بتعرّف الشقوقية المحلية، بعد بعض التجريب، والدراسة، والتحليل الدقيق لمعظم التسجيلات البئرية الواعدة.

ثوابت المرونة Elastic Constants

تسمَّى الصفات الميكانية، المستخلصة من اختبارات العينات الصخرية في المختبر، مثل قياس التمدد عند تطبيق إجهاد معيّن، ثوابت سكونية، على حين تُسْتَخلص الثوابت المرونية الدينامية من قياس السرعات الموجية في المواد. وتزوِّد التسجيلات الصوتية، وتحليلات شكل الموجة، بالوسائل اللازمة، للحصول على قياسات مستمرة لسرعات الموجة الضغطية والجزِّية. حيث تسمح هذه المعطيات، المُلازمة لقياسات الكثافة الاجمالية، بقياس وحساب الصفات الميكانية للصخر في موقعه الطبيعي in-situ. ويعرض الجدول (1-13) علاقات المعاملات المرونية elastic moduli بتعابير السرعات الموجية المرونية (أو بأزمنة الارتحال) مع الكثافة الحجمية الاجمالية bulk density.

الجدول (13-1) : صفات مرونية دينامية .

صفات مرونية دينامية			
ν	نسبة بواسون	التمدد العرضي / التمدد الطولي	$\frac{\frac{1}{2}(l_s/l_c)^2 - 1}{(l_s/l_c)^2 - 1}$
G	معامل الجزّ	الاجهاد المطبّق / التمدد الجزي	$\frac{\varrho_b}{l_s^{\nu}} \times a$
E	معامل يونغ	الاجهاد وحيد المحور / التمدد الناظمي	$2G(1+\nu)$
K_b	المعامل الحجمي	الضغط الهيدروسكوني / التمدد الحجمي	$\varrho_b\left(\frac{1}{l_c^2} - \frac{4}{3l_s^2}\right) \times a$
C_b	الانضغاطية الحجمية (مع المسامية)	التشوه الحجمي / الضغط الهيدروسكوني	$\frac{1}{K_b}$
C_r	إنضغاطية الصخر (عديم المسامية)	تغيّر الحجم الهيكلي / الضغط الهيدروسكوني	$\frac{1}{\varrho_g\left(\frac{1}{l_{ma}^2} - \frac{4}{3l_{sma}^2}\right) \times a}$
α	ثابت بيوت Biot المروني	تناسبية الضغط المسامي	$1 - \frac{C_r}{C_b}$

ويتمثل التطبيق المعياري لهذه العلاقات، باعتماد القيم المقيسة لأزمنة ارتحال الموجة الضغطية t_c والموجة الجزِّية t_s. أما عندما يكون زمن ارتحال الموجة الجزِّية غير قابل للقياس (كما هو الحال مثلاً في الطبقات الطرِّية أو في الصبات الاسمنتية الرديئة)، فلا يُنصح بالحصول عليه عن طريق نسبة بواسون أو المعاملات المرونية. ولكن يمكن، على كلِّ حال، استبدال أزمنة ارتحال الموجة الجزِّية t_s بأزمنة ارتحال صنعية، محسوبة بناء على نماذج صخرية، وباستخدام أزمنة ارتحال الموجة الضغطية t_c، إضافة للكثافة الحجمية (الاجمالية) المصححة إزاء تأثير الفحوم الهيدروجينية. ويجب التنبيه إلى أنه، بالرغم من تطبيق تصحيحات الفحوم الهيدروجينية على مداخل النموذج الصخري، المستخدم في حساب t_s الصنعية، فإنَّ هذه التصحيحات، لاتطبّق على المعطيات الأولية (الخام)، عند حساب الصفات المرونية. كما أن العلاقات التقليدية المُدوَّنة في الجدول (13-1)، لا تاخذ بالحسبان تأثير نوع المائع على استجابات التسجيل الصوتي البئري، مع أنه لايتسبب، على العموم، إلاّ بفوارق قليلة فقط في حال الصخور الفحماتية، حيث تُصَادف سطوح التماس الكبيرة، الناجمة عن

التحامها بالمحاليل، أو بسبب تمعدنها. لكن هذه الظاهرة، على ضآلتها في الحجر الرملي ذي المسامية المنخفضة، فإنه لا يمكن اغفالها، إذا كانت موائع الطبقة الخازنة ذات انضغاطية عالية. ويبرز ذلك جلياً، إذا كان الغاز حراً في ظروف الطبقة الخازنة.

ويمكن نمذجة تأثير المائع رياضياتياً، انطلاقاً من النسبة t_s/t_c، المشتقة من الصيغ الخاصة بالمعامل الحجمي bulk modulus والمعامل الجزّي، حسب العلاقة التالية:

$$t_s/t_c = (4/3 + K/G)^{1/2} \qquad (1\text{-}13)$$

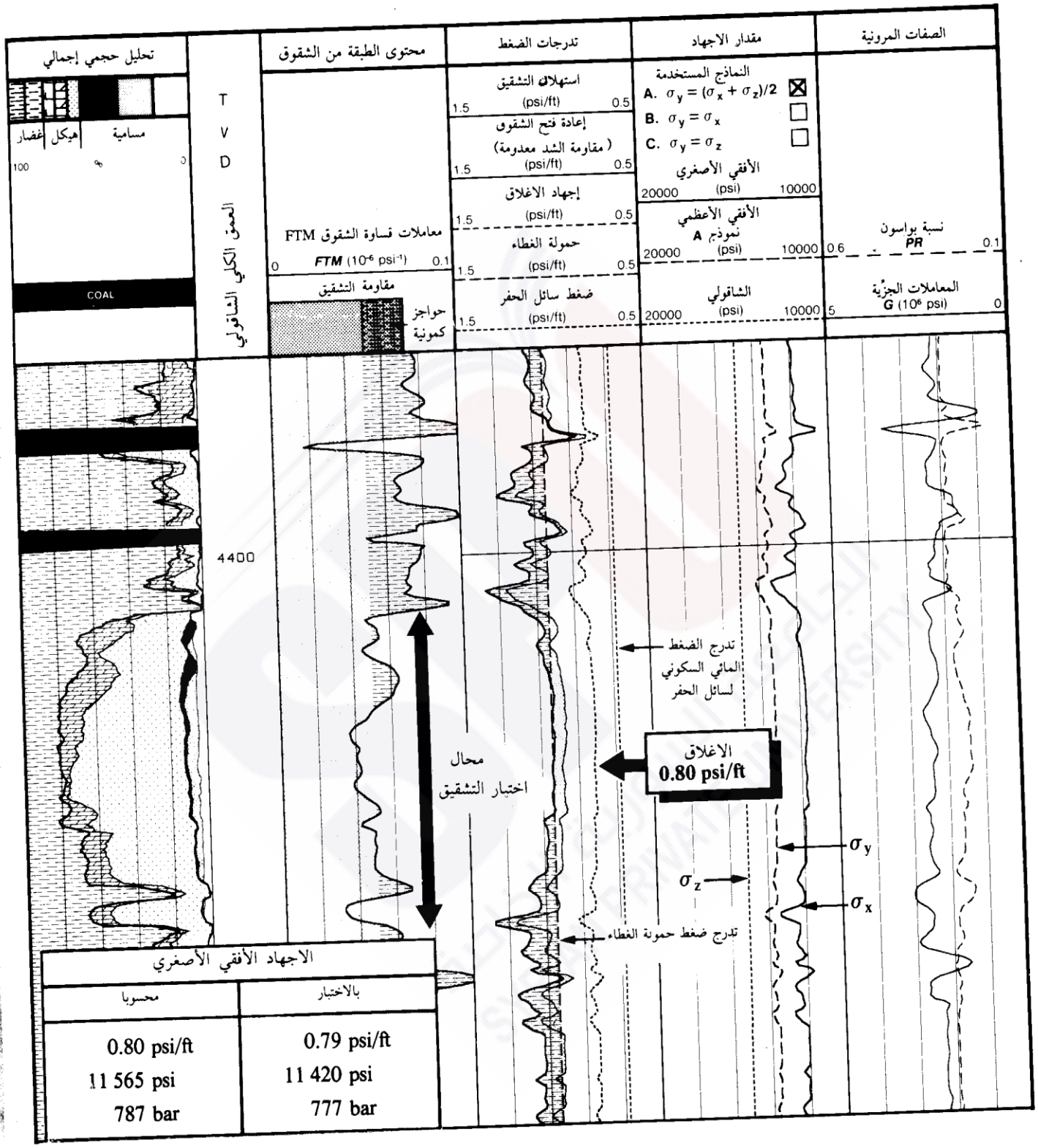
وتكون كلٌّ من K و G في الصخر الخالي من الموائع (حيث المسامات فارغة)، مساوية للمعاملات الهيكلية الجافة K_{dry} و G_{dry}. ولكن المسامات، في الموقع الطبيعي للصخر، تمتلىء فعلياً دائماً بالموائع، مما يستلزم إضافة حد تقوية (تيبيس stiffening) Kp لتصبح: $K = K_{dry} + K_p$. كذلك، يمكن اعتبار G و G_{dry} متساويتين في حال الترددات الصوتية المنخفضة، مما يسمح بالتعبير عن النسبة الجزّية ـ الضغطية المذكورة أعلاه، كما يلي:

$$t_s/t_c = \left(4/3 + \frac{K_{dry} + K_p}{G_{dry}}\right)^{1/2} \qquad (2\text{-}13)$$

حيث تكون Kp (استناداً إلى نظرية بيوت وغاسمان Biot & Gassman) تابعةً للمسامية، وللمعامل الحجمي لكلٍّ من: الهيكل الصخري الجاف، وللحبيبات، ولانضغاطية المائع. وبفرض أن $G_{dry} = G = \rho_b/t_s^2$، وعند معرفة المتغيرات اللازمة من أجل K، يصبح اشتقاق المعامل الحجمي للهيكل الجاف أمراً سهلاً، وكذلك حساب نسبة بواسون.

تحليل هندسية التشقيق الهيدرولي

قد أثبت التحفيز الهيدرولي hydraulic stimulation أنه العامل المهيمن في إنجاح الآبار النفطية الهامشية marginal، المحفورة في طبقات صخرية كثيفة، ضعيفة النفاذية والمسامية. حيث يُنفق عشرون بالمئة، أو أكثر، من التكلفة الاجمالية للبئر، على عملية التشقيق، وحيث يُعتبر التصميم الصحيح للمعالجة أمراً لازماً، إذا رغبنا أن تصبح الآبار، ذات الانتاج الضعيف، اقتصادية. إذ قد يصبح تصميم المعالجة أمراً حرجاً: لأن الإقلال من المعالجة التشقيقية، يمكن أن يتسبب بصرف غير مناسب للمخزون النفطي، ينتهي بجعل البئر غير مُرْبِحة. وقد تُصبح، بالمقابل، المعالجة الكبيرة جداً هدراً غير مبرر لمخصصات الانهاء completion funds، وقد يجعل البئر غير مُرْبِحة أيضاً. والأسوأ من ذلك هو، أنها قد تتسبب بارتحال الشقوق إلى طبقة خازنة مجاورة.



الشكل (13-18): مثال يبيّن إمكانية إهمال المركبة التكتونية T_x خلال مجال اختبار التشقق.

ارتفاع الشقوق

يحدث، عند ارتفاع الضغط في البئر، تَمزُّق في المستوى العمودي على اتجاه الاجهاد الضغطي الأصغري (σ_x أو σ_y). ويسمى الضغط اللازم لتحريض هذا التشقق بضغط التداعي أو الضغط البدئي initial or breakdown pressure، إذ يساوي (حسب أحمد Ahmed 1988) الضغط اللازم للمحافظة على الشق مفتوحاً، بعد استهلال انفتاحه (في حالة الشق الشاقولي)، الاجهاد الأفقي الأصغري الكلّي. ويُطلق على هذا الاجهاد، غالباً، إسم اجهاد الاغلاق closure stress. كذلك يكون الاجهاد الرئيس الأصغري في المناطق ذات التكتونية الهادئة أفقياً، بشكل عام، فتحدث، نتيجة لذلك، التشققات على طول المستويات الشاقولية.

يعتمد تصميم التشقيق الهيدرولي على مجموعتين من المتغيِّرات، هي: توزع ومقدار الضغط الأفقي الأصغري في داخل الطبقات المنتجة، وتلك المحيطة بها، والسلوك الجرياني للمائع المستخدم في التشقيق، وتُحدِّد هذه المتغيرات:

- اتجاه وهندسية (ارتفاع وطول وعرض) الشقوق الناجمة عن عملية التشقيق.
- الحكم على القطاعات المُرَكَّبة multiple zones، أيجب تشقيق كلِّ قطاع منها في وقته على حدة، أم يُعْمَد إلى تشقيقها جميعاً، في آن واحد؟.
- تصميم متغيّرات التشقيق الهيدرولي مثل: الاستطاعة بالأحصنة، وضغط الضخ، ونقل البروبانت proppant (مادة رملية تحافظ على الشقوق مفتوحة، بعد زوال الضغط المستخدم للتشقيق)
- سلوكية الجريان التابعة لمائع التشقيق وفعاليته.

يولِّد مائع التشقيق، أثناء تنفيذ مهمة التشقيق، توتراً، يُعاكس، في الشقوق الشاقولية، الاجهاد الضغطي الأفقي للأرض. إذ ينمو الشق شاقولياً، إذا تجاوز عامل شدة الاجهاد K، في السقف أو القاع، متانة شقوقية الطبقة (K_{Ic}) formations fracture toughness. وهكذا، يعتمد التنبؤ بانتشار الشقوقية شاقولياً، على حساب عامل شدة الاجهاد في النهايات الشاقولية للشق.

أما المتغيّرات الحاسمة، أو المقرِّرة، في هذه الحسابات فهي: ارتفاع الشق، وضغط المائع في الشق، ومقدار الاجهاد الأفقي الأصغري، الذي يتغيَّر مع العمق z. وقد برهن نظريون theorists عديدون على النتيجة الأساسية التالية:

$$K_{top} = \frac{1}{\pi\sqrt{2h}} \int_{-h}^{h} (S_H(z) - p_{wf}) \frac{\sqrt{h - z}}{h + z} dz \qquad (35\text{-}13)$$

وكذلك:

$$K_{bot} = \frac{1}{\pi\sqrt{2h}} \int_{-h}^{h} (S_H(z) - p_{wf}) \frac{\sqrt{h + z}}{h - z} dz$$

حيث K_{top} و K_{bot}، تمثلان عاملي شدة الاجهاد عند سقف وقاع الشق على التوالي، وحيث يكون ارتفاع الشق 2h معامداً للاجهاد الأفقي الأصغري.

ويُفْتَرض، في حال إهمال الفاقد بالاحتكاك في الشق، أن يكون ضغط المائع مساوياً لضغط مائع البئر p_{wf}. أما الحكم على الشق الشاقولي، فيما إذا كان سيمتد، فهو أمر يتعلق بحساب K_{top} و K_{bot}، وتحديد المكان، الذي تم فيه، إذا حدث ذلك في الأصل، تجاوُزٌ لمتانة الشق. على أن تتم إعادة حساب عوامل شدة الاجهاد، كلّما أمتد الشق وانتشر.

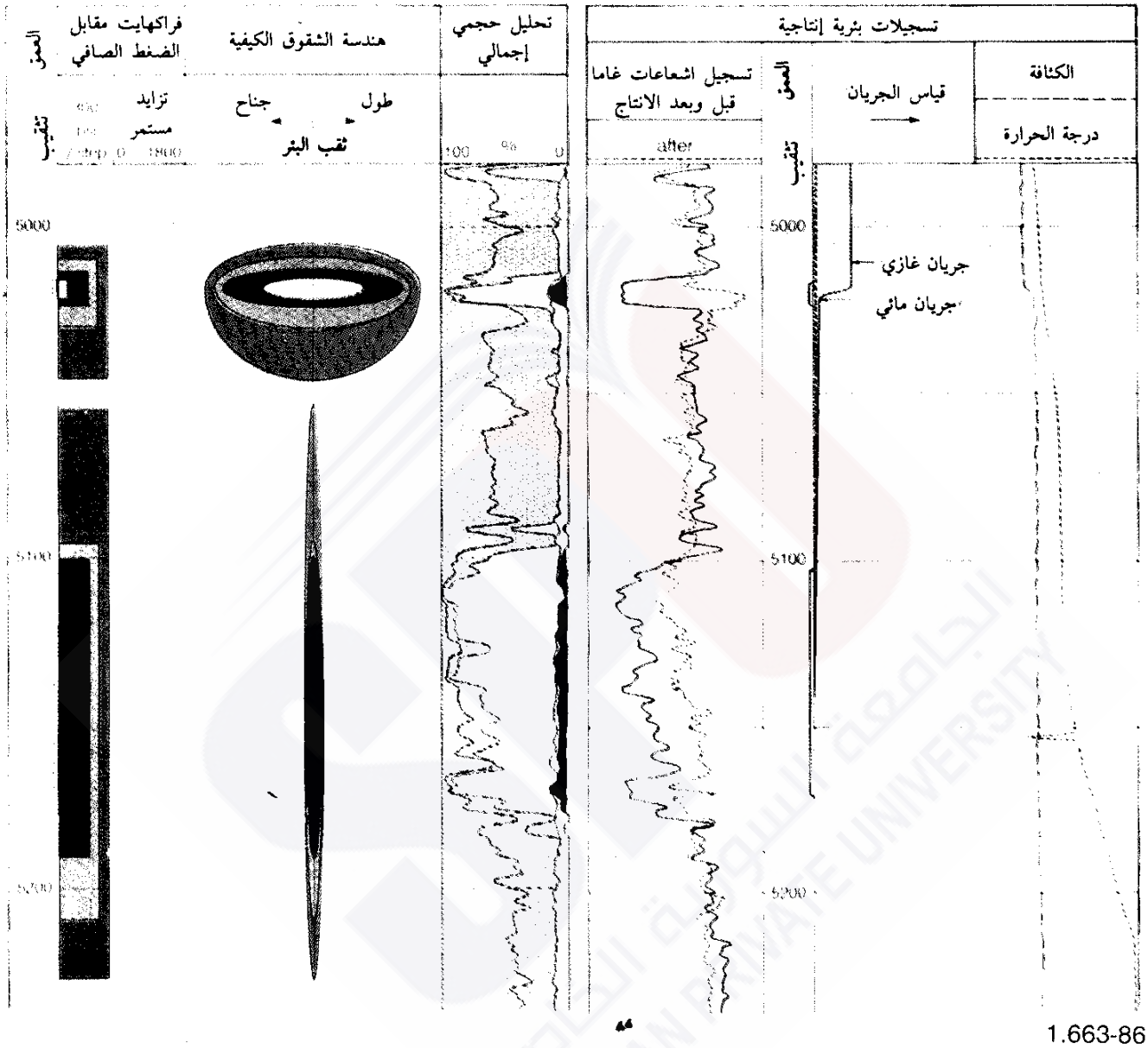
برنامج ارتفاع الشقوق (فراكهايت *FracHite)

يَحْسِب برنامج فراكهايت الامتداد الشاقولي للشقوق، مستعيناً بالقيم المتواصلة للاجهاد الأفقي، التي يُقدِّمها برنامج ميكبرو MeckPro، وبتقريبٍ للتكاملات، الحاوية تأثيرات كثافة المائع ضمن الشقوق، التي تم توليدها. على أن يقوم بذلك، من أجل سلسلة من ضغوط الضخ المتزايدة. كما يزوِّد برنامج فراكهايت، أيضاً، بصورة عن هندسية الشقوق، بافتراضها ثنائية البعد واسفينية الشكل. أما إذا تم تشقيق أكثر من قطاع بآنٍ معاً، فَيحْسب البرنامج النسبة المئوية من مائع التشقيق، التي تدخل إلى كل شق، استناداً إلى سماكة القطاع وموازنة المواد، ويزوِّد بصورة عن هندسية كلِّ شق.

ويبيِّن الشكل (13-19) نتائج تسجيل فراكهايت FracHite

لبئر في شرق تكساس، تحوي قطاعين منتجين، تم تشقيقهما بآن معاً. فيعرض المسلك الأيسر الانتشار الشاقولي المتوقَّع، حين كان ضغط التشقيق، يتزايد بخطوات مقدارها 300 رطل على الانش المربع (psi). اما المسلك الأوسط فيقرأ الامتداد الشاقولي والأفقي لكل شق. في حين يُمثِّل المسلك الأيمن تحليل التكوين الصخري Lithologic، المستخلص من التسجيلات البئرية، التي اجريت في البئر المفتوحة. واستناداً إلى البرنامج المذكور بَلَغ الضغط، اللازم لاستهلال التشقيق في القطاع العلوي، 600 رطلاً على الانش المربع (psi)، وهو أخفض من الضغط السائد في القطاع السفلي. وتتنبأ نتائج برنامج فراكهايت بعواقب هذا الفارق، حيث ينفتح القطاع العلوي أولاً، ويستوعب معظم سائل التشقيق. وهو ماحصل بالضبط أثناء مهمة التشقيق مع مائع التشقيق، الذي تمَّ ضخُّه تحت ضغط، مقداره 900 رطلاً على الانش المربع (psi).

ولتحديد الامتداد الشاقولي للشق، جرى وَسْم البروبانت proppant بعلاّم اشعاعي، وتم تسجيل اشعاعات غاما، قبل وبعد، تنفيذ عملية التشقيق. حيث تشير الاشعاعية المتزايدة، المقيسة في المجالات الشاقولية، إلى استهلالِ initiation ناجح للشقوق، توقَّعها أيضاً تسجيل فراكهايت عند ضغط لمائع البئر، قدره 900 رطلاً على الانش المربع (psi). كذلك يشير تسجيل وتيرة الانتاج، إلى القطاع العلوي، على أنه الوحيد، الذي يساهم في الانتاج، مثلما توقع ذلك أيضاً تسجيل فراكهايت. كذلك تشير نتيجة ثانية من نتائج فراكهايت (الشكل 13-20)، إلى ماكان سيحدث، لو تم تشقيق القطاعين بآنٍ معاً.

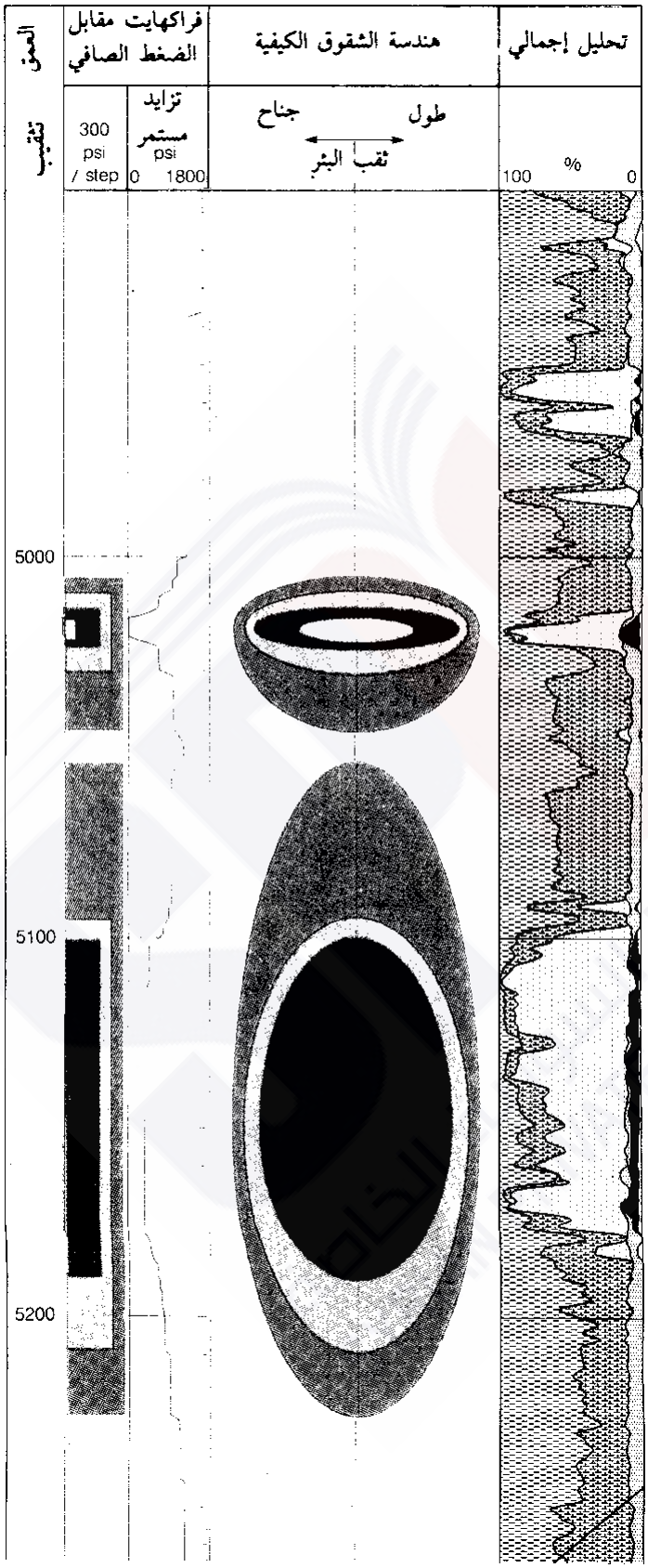


الشكل (13-19): تسجيل فراكهايت FracHite log وتسجيل الانتاج، يبيّنان نتائج تشقيق القطاعين بآنٍ واحد.

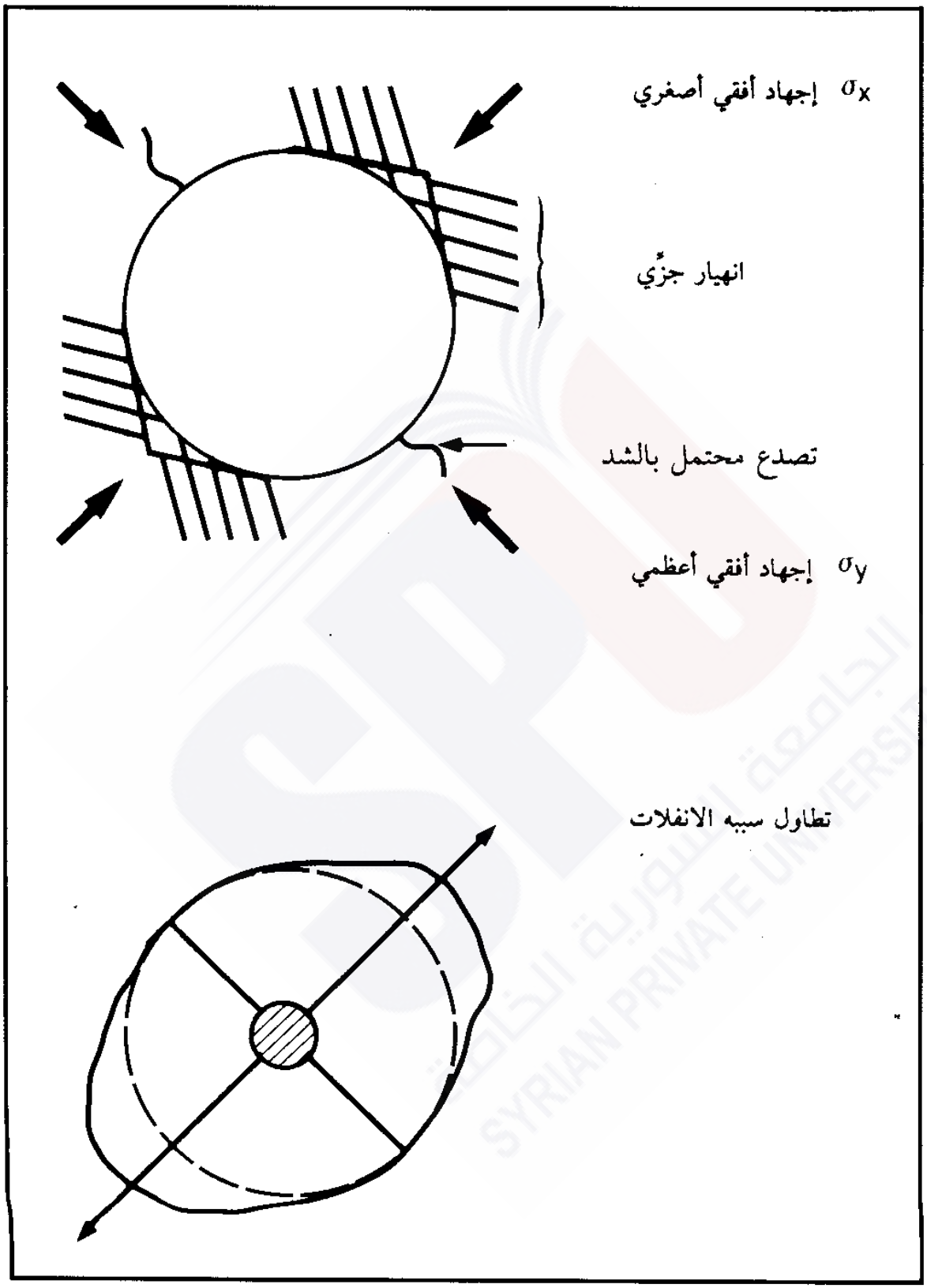
سمت انتشار التشقق

في المناطق، التي يفوق فيها ضغط الحمولة الغطائية الاجهاد الأفقي الأصغري، ينحو مستوى التشقيق الهيدرولي، لأن يكون شاقولياً، ولأن ينتشر عمودياً على اتجاه الاجهاد الأصغري. حيث يمكن استخلاص اتجاه الاجهاد الأصغري من تَوَجُّه الانفلات breakout orientation (الشكل 13-21). وتتوفر الآن البرامج، التي تساعد على تَعُّرف مواقع الانفلات وسموتها من: القياسات المتعددة لميل الطبقة، والقياسات الموجهة لقطر البئر. ويبيّن الشكل (13-22) مثالاً لتسجيل توجُّه الانفلات محسوباً من سابرة الميل، ذات الأذرع الأربع.

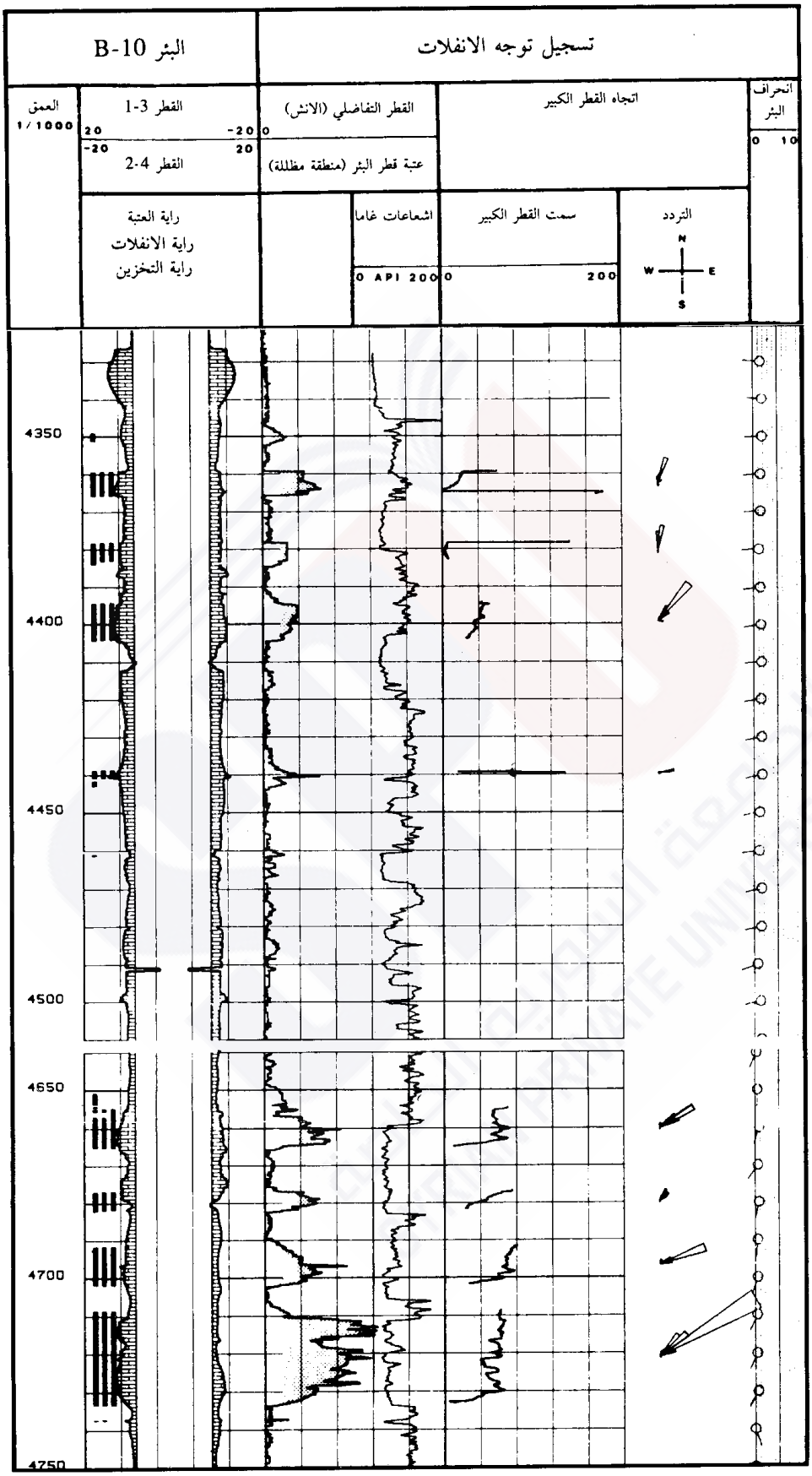
أما في الآبار الضحلة جداً، فَيُرَجَّح أن يكون الاجهاد الرئيس الأصغري هو الاجهاد الشاقولي، وأن ينحو التشقيق فيها ليكون أفقياً. ويكفي، عندها، أن يكون ضغط التشقيق قادراً على رفع حمولة الغطاء.



الشكل (13-20): تسجيل فراكهايت FracHite، يتنبأ بنتائج تشقيق كل قطاع على حده.



الشكل (13-21) : آلية الانفلات breakout في استطالة مقطع البئر.



الشكل (22-13): تسجيل توجه الانفلات brekout orientation log، محسوباً من سابرة الميل ذات الأذرع الأربع.