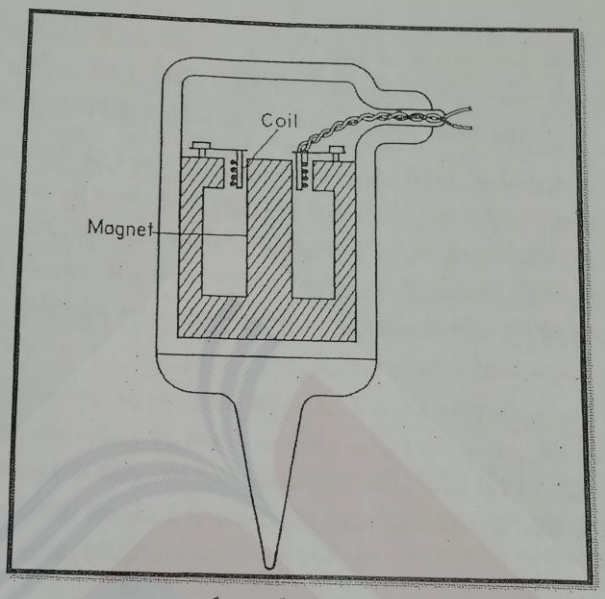
الأسبوع الحادي عشر (١٠٥-١١٤)

سيناقش تفسير السيسموغرامات الانكسارية ومنحنيات الزمن-المسافة في هذا الفصل بشكل رئيس مع تطبيقات متعلقة بالتنقيب النفطي، لكن عموماً فإن الطرائق الانكسارية مستخدمة كذلك على نطاق واسع في التنقيب عن النفط، أو في المراحل الأولى من استكشاف الحوض الرسوبي وفي تحديد القبب الملحية أو في توضيح البنيات حيث تعطي الطرائق الانعكاسية القليل من المعطيات المفيدة.

4-7- أجهزة المسح السيسمي الحقلية:

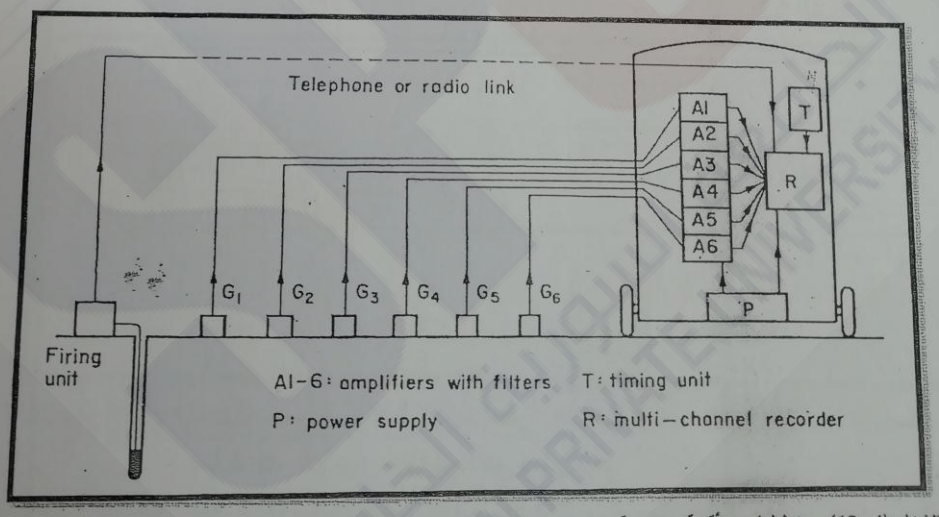
يدعى الجهاز المستخدم لالتقاط الأمواج السيسمية وتسجيلها بالسيسموغراف (seismograph)، أما الرأس اللاقط فهو مُحَوِّل للطاقة (transducer) كهربائي-ميكانيكي يدعى مقياس سيسمي (سيسموميتر) (seismometer). يدعى السيسموميتر القاري بالجيوفون والسيسموغراف البحري بالهيدروفون (hydrophone). يعطي الجيوفون خرجاً (output) كهربائياً متناسباً مع المركبة الشاقولية لسرعة تحرك الأرض. إن جسم الجيوفون هو مغنطيس دائم مع فجوة داخلية بين القطع القطبية (الشكل 4-12). يوجد في الفجوة وشيعة مرتبطة بنابض يسمح للوشيعة بالحركة شاقولياً. تسبب أية حركة شاقولية للأرض تحرك الوشيعة في وسط الحقل المغنطيسي، وتتحرض قوة محركة كهربائية (e.m.f) شدتها متناسبة مع سرعة حركة الوشيعة. يعتمد هذا الخرج الكهربائي على تردد حركة الأرض بالنسبة للتردد الطبيعي للوشيعة.

يتم تضخيم الإشارة الضعيفة الواردة من الجيوفون قبل تسجيلها. وتستخدم مرشحات (مصافي) (filters) لفصل الإشارة (signal) عن الضجيج (noise). يجب تزويد مضخمات التسجيل الانعكاسي بجهاز تحكم ذاتي بالربح (automatic gain control device)، الذي يزود ربحاً منخفضاً للإشارة القوية جداً الواردة من الموجة المباشرة، وربحاً عالياً للإشارة الضعيفة الراحلة بمسارات طويلة، بحيث يمكن وضع مجالاً عريضاً من سعات الحركة الأرضية على سجل الإشارات. يمكن أن يكون التسجيل على غلفانوميتر يعكس بقعة ضوء على فيلم تصوير متحرك، أو تسجيل على شريط مغنطيسي، لكنه من المعتاد الآن التسجيل على حاسوب بحيث يمكن إعادة عرض التسجيل بمميزات تضخيم مختلفة، أو بزمن تأخير مختلف بين الأقنية، وهكذا. لكن هنالك حاجة لتسجيل مرئي دوماً.



الشكل (4-12). منظر مبسط لمقطع في جيوفون ذو وشيعة متحركة.

يتألف سيسموغراف التنقيب من 12 إلى 24 قناة كاملة (مشابهة لما في الشكل 4-13 الحاوي على 6 أقنية) موضوعة على سيارة شاحنة.

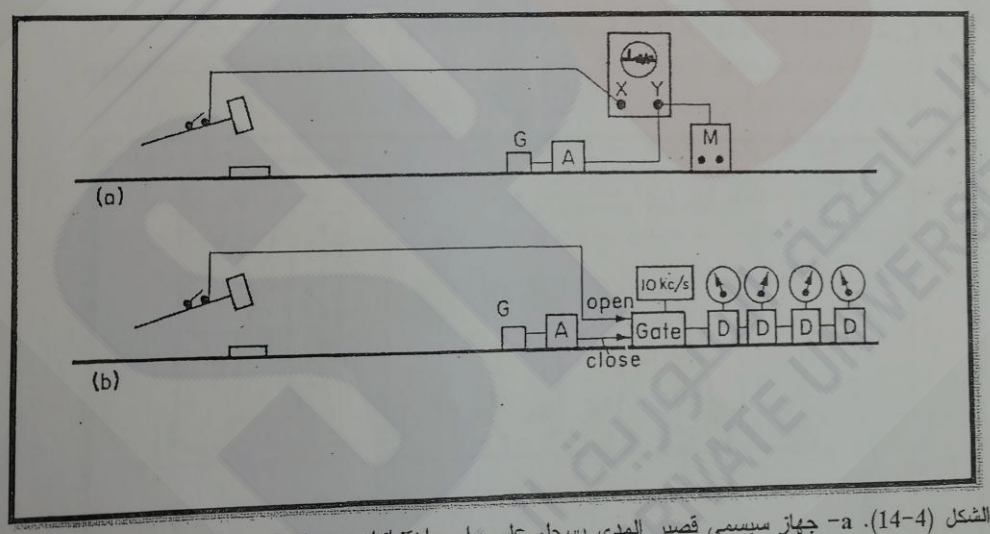


الشكل (4-13). مخطط لست أقنية سيسمية.

في الماضي كان مصدر الموجة السيسمية هو تفجير شحنة في حفرة على عمق مناسب. قد يصل وزن الشحنة إلى طن واحد لتحري أعماق تتراوح بين 5000-10000 قدم بالطريقة الانكسارية، لكن على المستوى الهندسي من الأعماق تكفي عدة كيلوغرامات من الجيليغنيت (gelignite).

لقد تم استخدام مطرقة كبيرة بنجاح لتوليد الموجة السيسمية في الأعماق السطحية. يعطي الشكل (4-14) مخططاً مبسطاً لمثل هذا الجهاز، إذ يتم إغلاق دارة كهربائية عند اصطدام المطرقة بصفيحة فولاذية ملقاة على الأرض، وبالتالي تتولد نبضة كهربائية تشير إلى بدء زمن إرسال الموجة، وهذه بدورها تُشَغّل راسم اهتزاز مرتبط بالجيوفون الذي يسجل الاهتزازات الواردة من الأرض. تعاد العملية بعد إبعاد المطرقة والصفيحة إلى مسافات أكبر مما يسمح برسم منحني زمن الرحيل. تم تطوير هذا النوع من الأجهزة وهو متوفر تجارياً الآن.

استخدمت كذلك منابع صدم على مقياس كبير للتنقيب عن النفط بالطريقة الانعكاسية. حيث يتم إسقاط وزن يتراوح بين 2-3 طناً، موضوع على شاحنة، من ارتفاع حوالي 10 أقدام. تدعى هذه الأجهزة بالرجاجات (vibroseis). تكون طاقة الصدم كافية لتعطي انعكاسات من مصادر عميقة قابلة للتسجيل. هذه الطريقة ذات قيمة خاصة في المناطق التي يصعب أو يستحيل الحفر فيها، وبالحقيقة فإنها مستخدمة حاليا على نطاق واسع في المسح من أجل التنقيب عن النفط.



الشكل (4-14). a- جهاز سيسمي قصير المدى يسجل على راسم اهتزازات. حيث G جيوفون، A مضخم إشارة، M علاّم مولد موجة مع تأخير زمني مُرَقّم.

b- جهاز قراءة مباشرة لقياس "الوصول الأول" لزمن الرحيل، حيث D عداد مدَّرج.

4-8- الطريقة الانعكاسية:

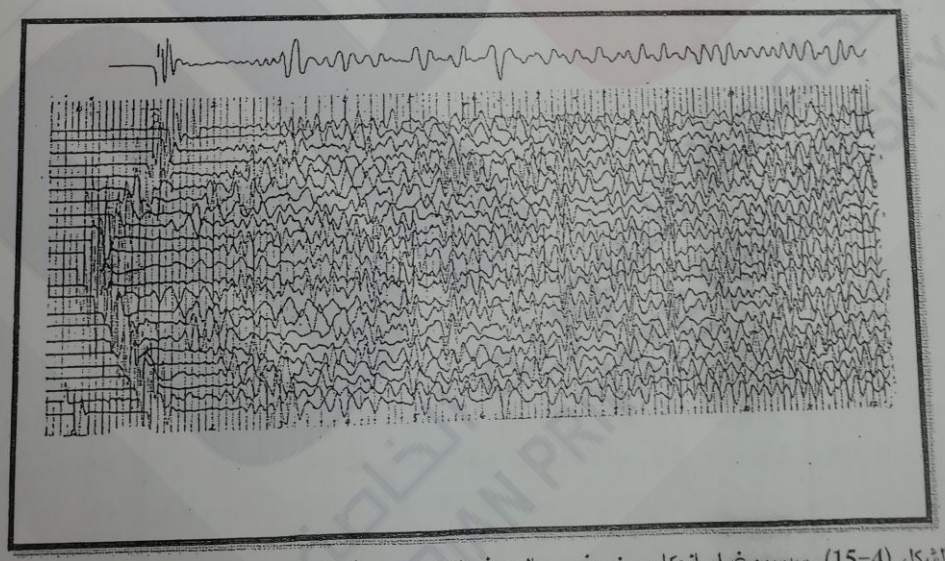
يمكن اعتبار السيسموغرام الوارد في الشكل (4-15) نموذجياً للسيسموغرامات المسجلة بالأعمال الروتينية. تقع حفرة التسجيل بين الجيوفونين المركزيين من الأربع وعشرين جيوفوناً، وينزاح قليلاً الخط الواصل بينهما، وتسجل لحظة التفجير كانقطاع على الأثر الثاني من حافة التسجيل. لا يكون الوصول الأول للإشارات الواردة من الموجة المباشرة، بل من الانكسارات الحرجة على قاعدة الطبقة منخفضة السرعة (low velocity layer) والمعروفة باسم الطبقة المجواة (weathered layer). هذه الطبقة التي تكون السرعة بها بين 1000 إلى 5000 قدم/ثانية موجودة دوماً تقريباً وتمتد من السطح إلى عمق 10 إلى 100 قدماً. تحدد قاعدتها إما بالمستوى المائي (water table) أو بالنقصان الحاد للمسامية. غالباً ما تكون مشاكل المهندس المدني متعلقة مباشرة بطبيعة الطبقة المجواة وعمقها.

تكون بقية السيسموغرام هي معقد الانعكاسات المطلوبة (الواضح منها ثلاثة) وهي الأمواج الجسمية الواصلة إلى الجيوفون من مسارات مختلفة، والأمواج السطحية، والضجيج (noises).

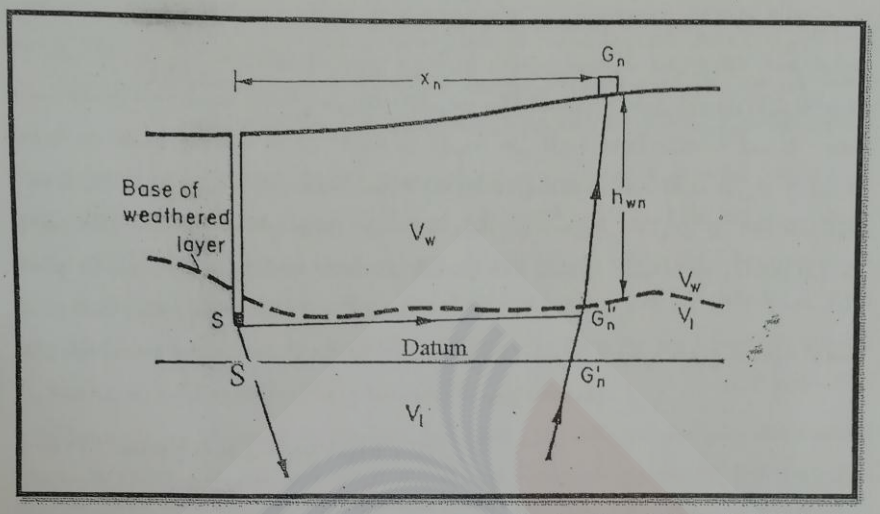
4-8-1- تصحيح مستوى مرجع الوصول الأولي:

يؤدي تغير الطبقة المجواة إلى تبعثر أزمنة الانعكاسات المسجلة والتي يجب حذفها إذا أريد تحقيق دقة عالية للطريقة. من المتبع عملياً التصحيح للطبقة المجواة، وطبوغرافية الأرض، بخطوة واحدة معروفة بتصحيح المستوى المرجع (datum correction)، التي ترجع كل الأزمنة الملاحظة إلى قيم وكأن كل من نقطة التفجير والجيوفون واقعين على S' و G' (الشكل 4-16) على مستوى واحد أفقي عادة وعلى عمق قليل من أخفض نقطة من قاعدة الطبقة المجواة.

يدعى "تصحيح المستوى المرجع" أحياناً بالتصحيح السكوني (static correction)، لأنه يجب تطبيقه بشكل متساوي على كل أزمنة الانعكاسات الملتقطة بجيوفون خاص، وهو مهم جداً لكنه عمل ممل للإنجاز.



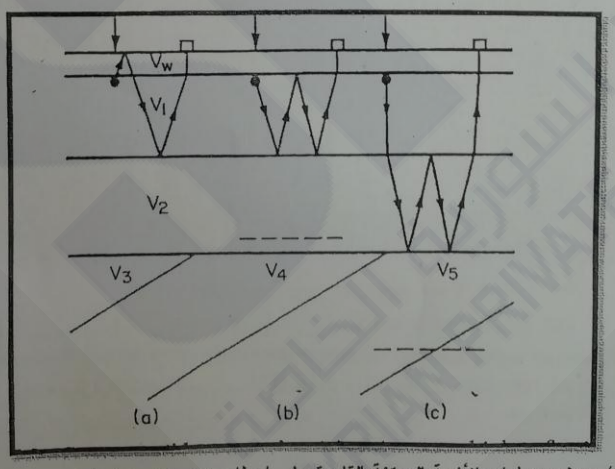
الشكل (4-15). سيسموغرام انعكاسي نموذجي. الجيوفونات موضوعة على تباعد 100 قدم وحتى 1000 قدم على كل جهة من نقطة التفجير المركزية.



الشكل (4-16). التوزيع الهندسي للمستوى المرجع.

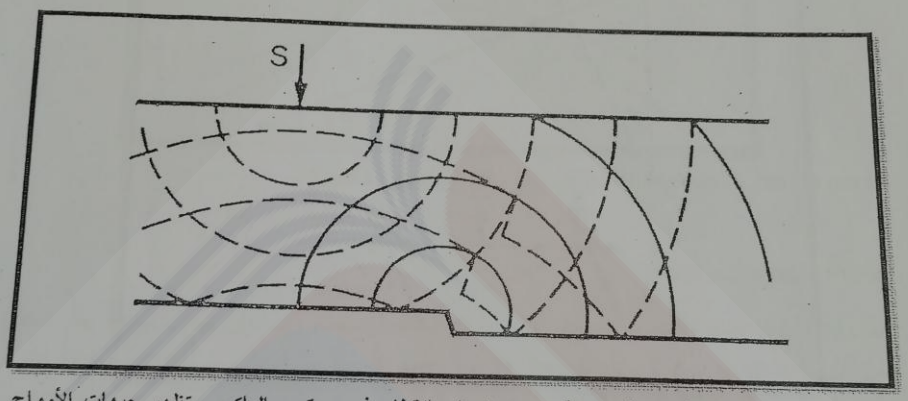
4-8-2- تمييز الانعكاسات والتقاطها:

إلى جانب الأمواج السطحية "الضجيج" التي يمكن إرجاعها بجمع مناسب لخرج عدة جيوفونات على قناة تسجيل واحدة، يحتوي كذلك السيسموغرام الانعكاسي على عدد من الحوادث الأخرى التي تم تصنيفها أصلاً على إنها "ضجيج". من المعروف الآن بأن العديد من هذه الحوادث هي بالحقيقة انعكاسات متكررة (multiples)ترحل بواسطة أحد المسارات المقترحة في الشكل (4-17). يمكن أحياناً تمييز هذه المتكررات بالأخذ بالاعتبار زمن رحيلها، سعاتها وأطوارها أو الشكل العاكس الذي يمكن الحصول عليه برسمها وكأنها عاكس وحيد.



الشكل (4-17). بعض مسارات الأشعة الممكنة القادرة على إعطاء متكررات منعكسة.

إذا وجدت سطوع انقطاع مثل الفوالق، يمكن أن تظهر ليس فقط بانقطاع بزمن رحيل الموجة المنعكسة بل بتوليد جبهة موجة كروية أو أسطوانية منعرجة، متمركزة على الانقطاع الظاهر في الشكل (4-18). يمكن تمييز ذلك عن الانعكاس من حقيقة كون التحدب أكبر بمرتين من ذلك الانعكاس الوارد من ذلك العمق، وقد أثبتت الانعراجات بأنها مفيدة جداً كمؤشرات على الفوالق الصغيرة التي بغير ذلك صعبت الالتقاط بالطريقة الانعكاسية.



الشكل (4-18). توليد جبهة موجة مختلفة متمركزة على انقطاع في مستوى العاكس. تظهر جبهات الأمواج المباشرة والمنعكسة على شكل خطوط متقطعة.

4-8-3- رسم مواقع العواكس:

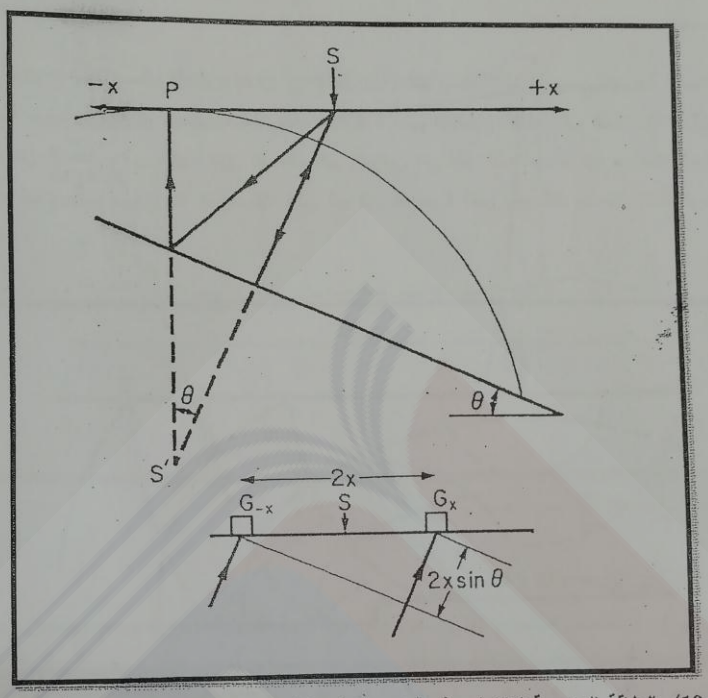
بعد حذف الانعكاسات الكاذبة، يتم حساب الزمن للانعكاسات المتبقية وتستخدم لحساب عمق العاكس وميله. إذا كانت السرعة V_1 ثابتة حتى السطح العاكس، عندئذ يعطى العمق الشاقولي h إلى العاكس كما يلي:

$$h = V_1 t_0 / 2 \qquad (4\text{-}25)$$

حيث t_0 هو زمن الانعكاس المقاس لـ $x = 0$، أي إلى الأثر المركزي للتشكيل.

إذا كان العاكس يميل في الاتجاه الموجب $x +$ بزاوية θ، فمن الواضح من الشكل (4-19) بأن الموجة المنعكسة متمركزة في نقطة S' من الشكل، ستصل إلى السطح أولاً في نقطة P وعلى مسافة $2h \sin\theta$ من نقطة S وفي هذه النقطة ستكون جبهة الموجة أفقية والسرعة الظاهرية لا نهائية. في S ستكون الجبهة مائلة على زاوية الميل θ عن الأفق، وإذا كان طول التشكيل الكلي $2x$ صغيراً بالنسبة لـ $h\ \theta$ لتحدب جبهة الموجة بما يكفي لإهماله، و t_x و t_{-x} هي أزمنة الانعكاس المسجلة بالجيوفونين الأول والأخير، عندئذ

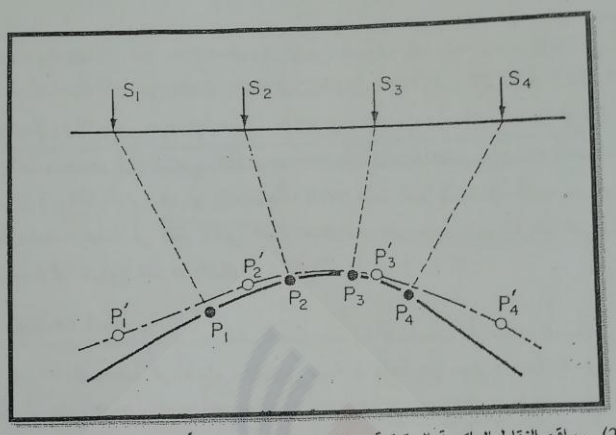
$$t_x - t_{-x} = 2x \sin\theta / V_1 \qquad (4\text{-}26)$$



الشكل (4–19). العلاقة الهندسية لتشكيل واقع فوق عاكس مائل. الشكل هو تكبير للمنطقة القريبة من نقطة التفجير، حيث يمكن ضمنها اعتبار جبهة الموجة مستوية.

هكذا ستعطي أزمنة الانعكاس (المصححة للسطح المرجع) للأثرين النهائيين ميل السطح الحارف إن كانت V_1 معروفة، فمنها ومن زمن الأثر المركزي t_0 يمكن مبدئياً رسم موقع الجزء من العاكس على مقطع عرضي. سيكون طول هذا الجزء نصف طول التشكيل أو أكثر قليلاً إذا كان الميل معتبراً، وسيكون مركزه على الميل الصاعد من النقطة الواقعة شاقولياً فوق S.

إذا وضع سجل سيسمي انعكاسي بحيث يتوجه محور الزمن شاقولياً نحو الأسفل، فيمكن اعتباره وكأنه تقريب لمقطع جيولوجي خام. يمكن تحسين التماثل، بإجراء كافة التصحيحات، وكذلك وضع عدد من السجلات تغطي مقاطعاً متجاورة من العواكس، جنباً إلى جنب، ثم تصويرها بمقياس مصغر. يظهر هذا في الشكل (4–20) الذي يبين مسارات أشعة عادية من أربع نقاط تفجير، ومواقع النقاط المماثلة المرسومة شاقولياً $P_1' - P_4'$. إن المنحني المجهز مباشرة من السيسموغرام هو طبعاً مقطع زمني (time section) وذو قيمة عملية مهملة لكل الأهداف حتى يتم تحويله إلى مقطع عمقي (depth section)، وهذا التحويل قد يغير شكله كثيراً، خاصة إذا تغيرت السرعة جانبياً، كما هي الحالة عادة. علاوة على ذلك، قد تكون الانعكاسات المتكررة والحوادث الزائفة (spurious) الموجودة في السجلات المنفردة، بارزة كذلك في المقطع كما بالنسبة للانعكاسات المطلوبة، مما قد يؤدي إلى احتمال تفسير خاطئ.



الشكل (4-20). مواقع النقاط العاكسة الحقيقية وتلك "المرسومة شاقولياً".

4-9- تحديد السرعات:

لقد رأينا بأن المعطيات الأساسية المطلوبة لرسم موقع العاكس السيسمي (إذا كان ميله باتجاه المسار تماماً) هي الأزمنة الثلاثة t_0 و t_x و t_{-x} والسرعة V_1. هذه الكمية الأخيرة هي الأكثر صعوبة بالتحديد بدقة عالية، بحيث أن المرحلة النهائية للتفسير السيسمي، التي يتم فيها تحويل أزمنة الرحيل إلى عمق، هي على الأغلب عرضة للخطأ أكثر من المراحل السابقة لتعيين العواكس وقراءة أزمنة الرحيل. إذا كانت الأرض متجانسة وأفقية التطبق فعلى الأغلب أن السرعة ستتغير مع العمق (على العموم ازدياد) بحيث أن V_1 ليست كمية بسيطة، وإنما سرعة متوسطة (average velocity) تتغير إلى الأسفل حتى الوصول إلى السطح العاكس أو الكاسر. طبعاً سيقود خطأ في تحديد السرعة إلى خطأ مطلق في تحديد العمق.

4-9-1- حساب السرعات من أزمنة الانعكاس:

إن السرعة المتوسطة المطلوبة، التي يرمز لها بـ $\overline{V}$ لتمييزها عن السرعة V_1 التي تستعمل للطبقة الأولى المتجانسة، مرتبطة بزمن رحيل الموجة المنعكسة بالعلاقة:

$$\overline{V}t_x = \sqrt{(x^2 + 4h^2)} \qquad (4\text{-}27)$$

وبتربيع هذه المعادلة نجد أنه إذا تم رسم مربع مسافة الجيوفون بالنسبة لمربع زمن رحيل الانعكاس لذلك الجيوفون، نحصل على خط مستقيم ميله يعطي مربع السرعة المتوسطة.

4-9-2- القياسات في الآبار:

إن أي تفسير لمسح جيوفيزيائي سيكون أكثر موثوقية إذا أمكن ربطه ببئر واحدة على الأقل، وكثيراً ما تجرى المسوح السيسمية الانعكاسية في حقول بترول معروفة. لذا يتم التسجيل البئري (well logging) بواسطة

سابرة (sonde) بإنزالها في البئر. طورت السوابر لقياس السرعة السيسمية بالتسجيل الزمني لمرور نبضة فوق صوتية لمسافة عدة أمتار من بالصخر. هذه المسافة قصيرة جداً بحيث أن الجهاز يسجل السرعة بشكل مستمر كتابع للعمق، ولذا يدعى سجل السرعة المستمر (continuous velocity log) أو (C.V.L). يمكن جمع النتائج لتعطي سيسموغرام تركيبي (synthetic seismogram) الذي يمكن مقارنته بالتفصيل بالنتائج الحقلية. يمكن أن يتم ذلك بالرمي البئري (well shooting) حيث تفجر الشحنات بالقرب من فوهة البئر ويتم تسجيلها بهيدروفونات معلقة في البئر وعلى أعماق متغيرة. يعطي سجل السرعة المستمر والرمي البئري التحديد الأكثر موثوقية لتوزيع السرعة الشاقولية في نقطة ما.

4-9-3- القياسات المخبرية:

يمكن قياس السرعة السيسمية في المخبر، بتجهيز عينة مسطحة مع سطوح متوازية، وتبث نبضة فوق صوتية عبرها ثم يقاس الزمن وتحسب السرعة بدقة 1 بالمائة أو أفضل، لكن من الضروري قياس السرعة لعدد كبير من العينات الممثلة قبل استعمال السرعة في التفسير السيسمي.

4-10- الطريقة الانكسارية:

الهدف في الطريقة الانكسارية هو بناء منحني الزمن-المسافة بعدد كافٍ من النقاط على فروع تماثل كل السطوح الكاسرة موضع الاهتمام.

4-10-1- منحنيات الزمن-المسافة من السطوح الفاصلة:

إن السرعة الظاهرية المسجلة على سطح الأرض لموجة رأسية من سطح فاصل يميل بزاوية مقدارها α باتجاه الأسفل نحو الاتجاه الموجب لـ x ليست هي السرعة الحقيقية V_2 للوسط الأدنى، بل هي

$$V_d = V_1 / sin(i_c + \alpha) = V_2 \, sin\, i_c / sin(i_c + \alpha) \qquad (4\text{-}28)$$

وهي أقل من V_2. إذا كان الميل بزاوية α باتجاه الأعلى نحو الاتجاه الموجب لـ x، فتكون السرعة الظاهرية V_u هي المسجلة

$$Vu = V_1 / sin(i_c - \alpha) = V_2 \, sin\, i_c / sin(i_c - \alpha) \qquad (4\text{-}29)$$

نظراً لأننا لا نعلم عادة قيمة زاوية الميل α، فيمكن إيجاد السرعة الحقيقية وزاوية الميل إذا عكسنا المسار، أي إذا تم تسجيل منحني زمن-مسافة جديد، بحيث يكون المبدأ في النقطة الأخيرة. فمن ذلك تعرف V_d و V_u إذا كان السطح العاكس هو مستوي تحت المسار، أي

$$i_c + \alpha = sin^{-1}(V_1 / V_d) \qquad (4\text{-}30)$$

$$i_c - \alpha = sin^{-1}(V_1 / V_u) \qquad (4\text{-}31)$$

ويمكن منها إيجاد α و i_c (وبالتالي V_2). يظهر بالتفصيل عكس المسار في الشكلين (4-21) و (4-22).