الأسبوع العاشر (٩٠-١٠٥)

4-1- مقدمة:

تُولد في الطرائق السيسمية موجة مرنة (elastic wave) قرب سطح الأرض، وتكشف في نقاط قريبة بواسطة مسجلات اهتزازات (جيوفونات) (geophones). يعطي قياس الفترات الزمنية الفاصلة بين توليد الموجة واستقبالها في الجيوفونات على مسافات مختلفة، سرعة انتشار الموجة في الأرض. إن الأرض غير متجانسة بخواص مرونتها، لذلك فإن تلك السرعة تتغير نحو العمق وجانبياً بناء على التغيرات الجيولوجية وسطوحها الفاصلة.

طبقت الطرائق السيسمية بالشكل الأكبر في البحث عن النفط، بالرغم من إنها لا تكتشف النفط بشكل مباشر، لكنها تكتشف التراكيب الأكثر ملائمة لتجمعاته. أما في استكشاف المواقع الهندسية وبدرجة أقل في الأعمال السيسمية الكبيرة، تكون قيم السرعات السيسمية المقاسة مفيدة بحد ذاتها، لأنها تقدم الأساس لتقدير الخواص الأخرى للصخور، مثل المسامية وثوابت المرونة والمحتوى السائل، ذات الاهتمام المباشر من قبل المهندس، مع أن السرعة لوحدها لا يمكن أن تكون وسيلة التشخيص لنوع محدد من الصخر.

4-2- توليد الأمواج المرنة وانتشارها:

تعتمد الطريقة العادية لتوليد موجة سيسمية صنعية على تفجير شحنة من مادة متفجرة في حفرة عمقها 30 متراً مملوءة بالماء. ومن أجل التحريات الضحلة يمكن تفجير شحنة صغيرة في حفرة عمقها عدة أمتار فقط، أو يمكن توليد الموجة بالضرب بمطرقة على صفيحة من الفولاذ ملقاة على الأرض أو بإلقاء وزن على هذه الصفيحة. يمكن كذلك استخدام الرجاجات (Vibrators) الميكانيكية أو الكهرطيسية لتوليد أمواج مستمرة.

مع هذا بعد توليد الموجة، تتولد أنواع مختلفة من الموجات المرنة وتنتشر بسرعات مختلفة. ينعكس وينكسر كل نوع من هذه الموجات على السطوح الفاصلة ويتبع مسارات مختلفة للوصول إلى الجيوفون. يسجل السجل السيسمي (seismogram) حركة الأرض لكل نوع من هذه الأمواج.

4-2-1- ثوابت المرونة:

يعتمد انتشار الأمواج المرنة على مرونة مواد الأرض، التي يمكن التعبير عنها بما يقال له ثوابت المرونة (elasticity constants) التي يمكن تلخيصها بما يلي:

1- معامل يونغ (E) Young's modulus:

هو النسبة بين الإجهاد الطولي (longitudinal stress) والانفعال الطولي (longitudinal strain)

$$E = \frac{F / A}{\delta L / L}$$

حيث F هي القوة، A مساحة السطح الخاضع للقوة، L هي الطول، δL هي التغير الطولي.

2- المعامل الحجمي (k) Bulk Modulus:

هو نسبة الإجهاد إلى الانفعال أو نسبة الإجهاد الحجمي إلى الانفعال الحجمي

$$k = \frac{P}{\delta V / V}$$

حيث P هو الضغط، V الحجم، δV هي التغير بالحجم.

3- نسبة بواصون (σ) Poisson ratio:

تصف نسبة بواصون مدى تشوه المواد بالاتجاه المعامد للإجهاد المطبق

$$\sigma = \frac{e(normal)}{e(parallel)}$$

حيث e هي الانفعال، $e(normal)$ الانفعال الناظمي، $e(parallel)$ الانفعال الموازي.

4- معامل القص (η) shear modulus، أو ثابت لامي (μ) Lame's constant:

هو النسبة بين الإجهاد القصي (shearing stress) وانفعال القص (shear strain)

$$n = \frac{\frac{1}{2}E}{1+\sigma}$$

حيث E معامل يونغ، σ هي نسبة بواصون.

5- ثابت لامي (λ) Lame's constant:

$$\lambda = \text{Bulk modulus} - \tfrac{2}{3} \text{ of the Shear modulus} = k - \tfrac{2}{3} n$$

تعطى العلاقات بين هذه الثوابت كما يلي:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \qquad (4\text{-}1)$$

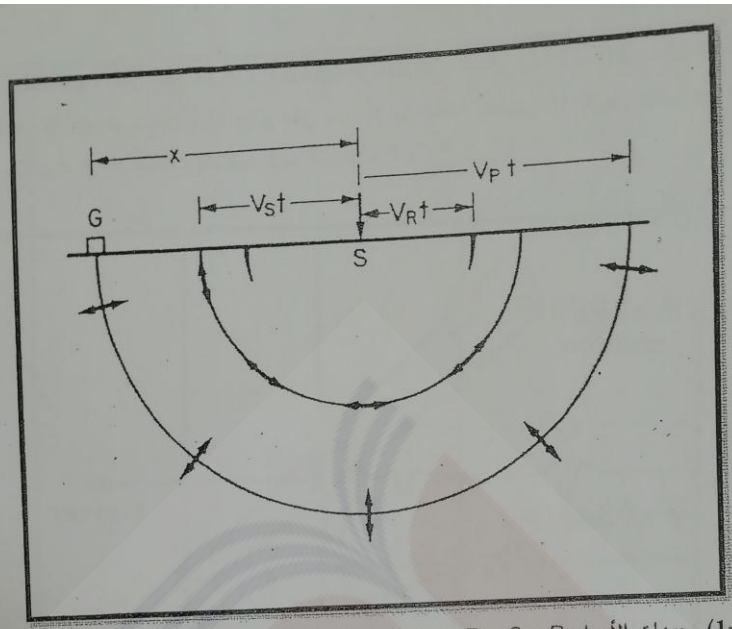
$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \qquad (4\text{-}2)$$

$$k = \frac{3\lambda + 2\mu}{3} \qquad (4\text{-}3)$$

4-2-2- أنواع الأمواج:

عند حدوث إجهاد مفاجئ في نقطة S القريبة من السطح (الشكل 4-1) ترحل ثلاث موجات مرنة بسرعات مختلفة. اثنتان منها أمواج جسمية (body waves)، أي أنها تنتشر على جبهة موجة كروية، والثالثة موجة سطحية (surface wave) تنحصر في المنطقة القريبة من السطح الحر.

تختلف الأمواج الجسمية بأن حركة الأرض ضمن الموجة هي باتجاه الانتشار (شعاعي) في الموجة الأولية "P" (primary wave) (أولية)، وناظمية عليها (مماسية على جبهة الموجة) في الموجة البطيئة "S" (secondary wave) (ثانوية). تكون الإجهادات أحادية المحور (uniaxial) في الموجة الأولية P مثل الموجة الصوتية في الهواء، بينما يخضع الوسط أثناء انتقال الموجة S إلى إجهادات قصية.



الشكل (4-1). جبهات الأمواج P و S و R بعد زمن t ميللي ثانية من بدء انتشار الأمواج على السطح.

ترتبط سرعات الأمواج الأولية والثانوية V_p و V_s بثوابت المرونة وكثافة الوسط بالمعادلات التالية:

$$V_p = \sqrt{((k + \frac{4}{3}n)/\rho)} \qquad (4\text{-}4)$$

$$V_s = \sqrt{(n/\rho)} \qquad (4\text{-}5)$$

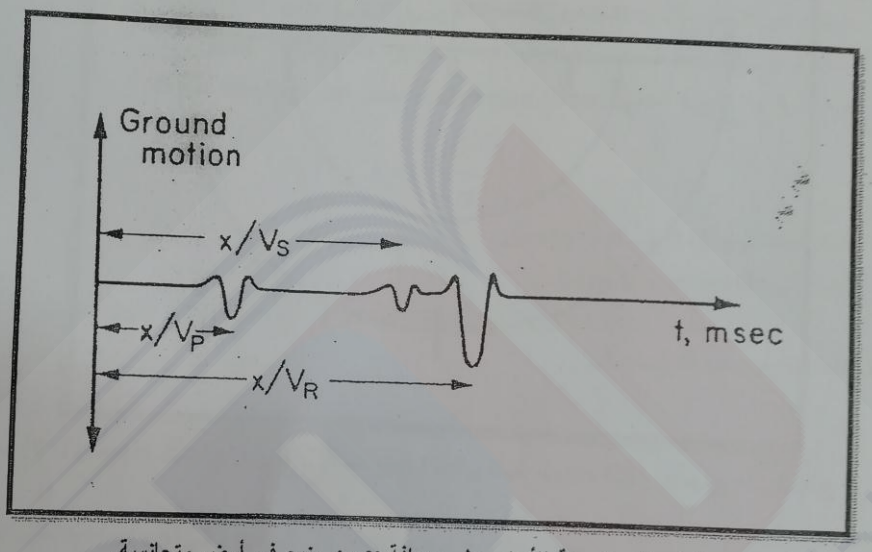
حيث k المعامل الحجمي، n معامل القص، ρ الكثافة. هكذا تنتقل الموجة القصية S في معظم الصخور بأكثر قليلاً من نصف سرعة الموجة الأولية P وتعتمد القيمة الفعلية لـ V_s/V_p على نسبة بواصون σ.

إذا كانت $r = V_s/V_p$ عندئذ تساوي نسبة بواصون ما يلي:

$$\sigma = \frac{1-2r^2}{2-2r^2} \qquad (4\text{-}6)$$

تنتشر الأمواج السطحية بسرعة أقل من سرعات الأمواج الجسمية، وهي عموماً معقدة. ففي الأراضي المتجانسة يكون انتشارها وفق ما يسمى موجة رايلي (Rayleigh wave)، التي توجد فيها مركبات شاقولية وأفقية لحركة الأرض. ويكون مسار حركة أي عنصر من الوسط أثناء دورة موجة رايلي بشكل إهليلج (ellipse) واقع في مستوى الانتشار. تكون سرعة موجة رايلي V_R أقل بحدود 10 بالمائة من سرعة موجة القص الجسمية، إي أن النسبة V_R/V_s تعتمد أيضاً على نسبة بواصون σ.

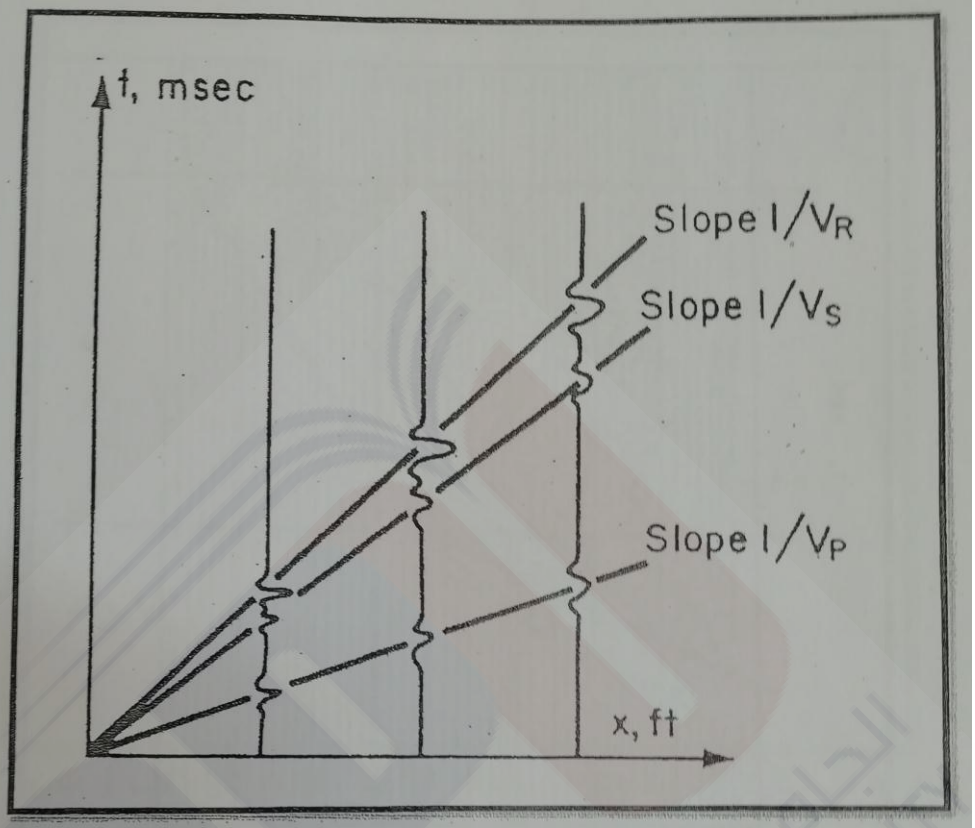
تظهر السرعات الثلاث على السيسموغرام (seismogram) في الشكل (4-2)، الذي يمثل منحنياً لحركة الأرض بالنسبة للزمن في جيوفون G واقع على بعد x من نقطة التفجير S. الزمن صفر هو طبعاً زمن التفجير، ومن الواضح بأنه يمكن إيجاد السرعات الثلاث V_P و V_S و V_R.



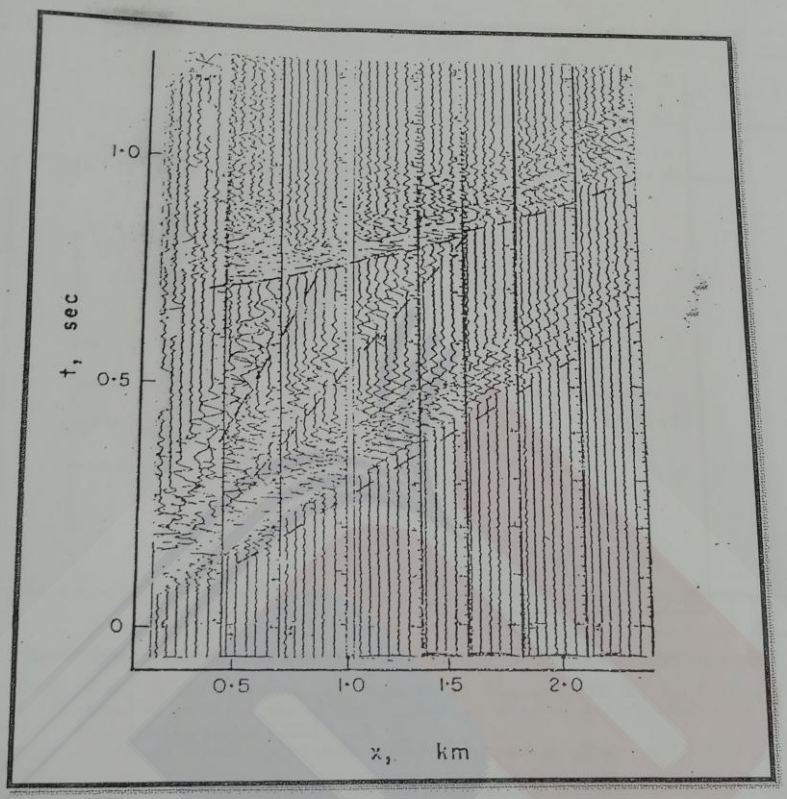
الشكل (4-2). سيسموغرام مثالي لحركة الأرض على مسافة x من منبع في أرض متجانسة.

يمكن القيام بتحديد أفضل بوضع المعلومات على منحني للزمن-المسافة الواردة من عدة جيوفونات على أبعاد متعددة من نقطة التفجير. سيعطي كل سيسموغرام ثلاثة مخططات للزمن-المسافة لكل قيمة من x، ويجب أن تقع النقاط على ثلاثة مستقيمات تمر من مبدأ الإحداثيات. من المعتاد أخذ محور مسافة المنحني أفقياً، لذا فإن ميول المنحنيات المقاسة من هذا المحور ستساوي $1/V_P$ و $1/V_S$ و $1/V_R$. يمكن إيجاد السرعات نفسها بسرعة من قراءة السرعة على المنحني لنقل مثلاً 10، 50 أو 100 ميللي ثانية.

إذا وضعت سيسموغرامات من مجموعة من الجيوفونات بجانب بعضها البعض ومحاورها الزمنية شاقولية ومتباعدة بمسافات أفقية متناسبة مع تباعد الجيوفونات الفعلية على الأرض، يمكن تتبع منحني الرحيل-الزمن مباشرة من خلال الأمواج المتعددة الظاهرة على السيسموغرامات (الشكلين 4-3 و 4-4). إن الأمواج القصية (S)، الأفقية، غير مهمة جداً في الجيوفيزياء التنقيبية لأن الجيوفونات حساسة للمركبة الشاقولية لحركة الأرض. لذلك يفرض عموماً بأن الحوادث هي إما أمواج P أو أمواج S. ستعتبر الأمواج P فقط في المعالجة التالية.



الشكل (4-3). منحني الرحيل-الزمن مبني من مجموعة من السيسموغرامات كما في الشكل (4-2) والمسجلة على مجالات مختلفة لـــ x.

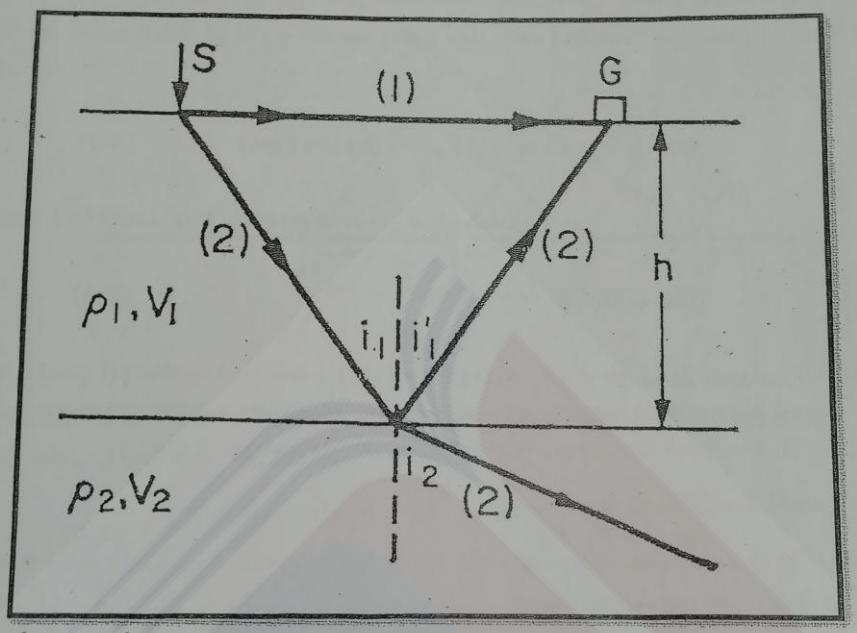


الشكل (4-4). منحني الرحيل-الزمن مبني من مجموعة من السيسموغرامات المسجلة على الجليد. رسمت الخطوط المتقطعة عبر الحوادث الرئيسية المسجلة، مما يعطي منحنيات رحيل-زمن للأمواج P و S والسطحية. أما الخط المنحني في الأعلى فقد رُسِمَ عبر الحدث الذي يمكن تمييزه كموجة P انعكست على سطح الطبقة الواقعة تحت الجليد.

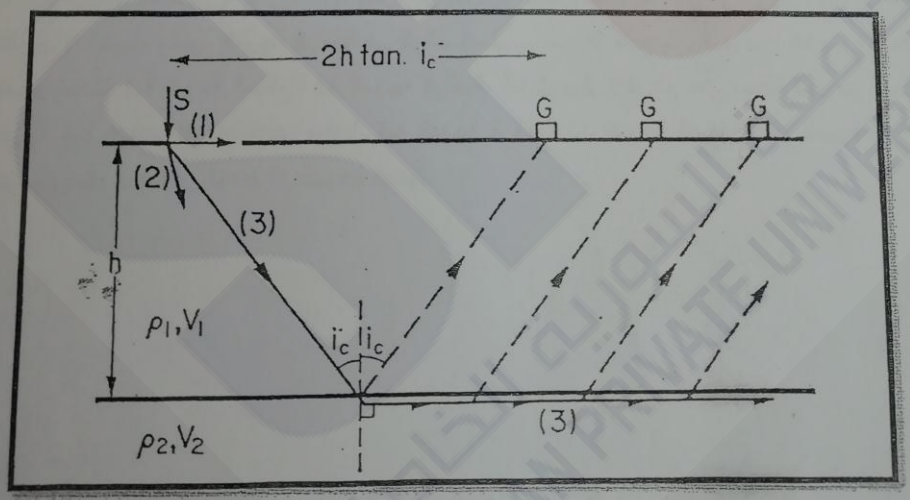
4-3- مسار الشعاع في وسط متطبق:

من المناسب تمثيل مسار الموجة بأشعة. هذا الشعاع هو مستقيم متعامد دوماً مع جبهة الموجة، وتنتشر طاقة الموجة عليه.

تعتبر الأرض عادة كوسط متطبق، لكل طبقة سرعة ثابتة. يمكن للحد الفاصل بين طبقتين أن يميل بأي زاوية على الأفق أو بين الطبقات. الحالة الأولى التي ستعتبر هي حالة سطح فاصل (interface) أفقي واقع على عمق h بين وسطين سرعة الموجة P هي V_1 و V_2، حيث V_2 هي الأكبر. يمثل كل من الشكلين (4-5) و (4-6) مخططاً شعاعياً يظهر المسارات الثلاثة المحتملة للأمواج الجسمية بين نقطة التفجير والجيوفون.



الشكل (4-5). مسارات الشعاع المباشر *(1)* والشعاع *(2)* لنفس الموجة، لكن منعكساً أو منكسراً على السطح الفاصل.



الشكل (4-6). مسار الشعاع المنكسر انكساراً حدياً (الخط المستمر)، ومجموعة من الأشعة المنطلقة من "الموجة الرأسية" (الخطوط المتقطعة).

تنعكس جزئياً وتنكسر جزئياً أي موجة تقابل سطحاً فاصلاً (الشكل 4-5). تشبه قوانين انعكاس وانكسار الأمواج القوانين المطبقة في الضوء، لذلك يطبق قانون سنيل (Snell's Law) على الشعاع (2) في الشكل (4-5):

$$\text{Sin } i_1/V_1 = \sin i_2/V_2 \quad \text{(Snell's Law)} \qquad (4\text{-}7)$$

وتكون قرينة الانكسار (refraction index) على السطح الفاصل

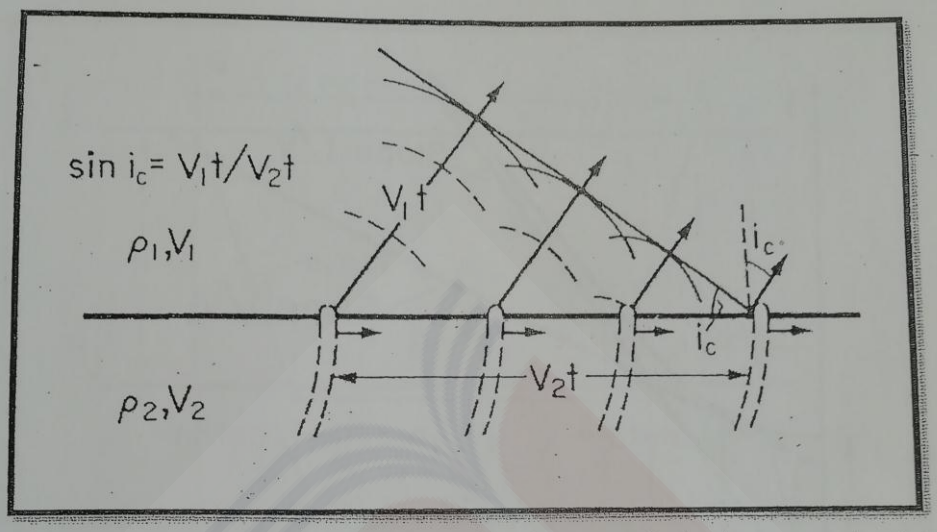
$$\text{Sin } i_1/\sin i_2 = V_1/V_2 \qquad (4\text{-}8)$$

يعطي الشعاع (2) شعاعين: شعاع منعكس (reflected ray) يعود إلى السطح ليسجل بالجيوفون G، وشعاع منكسر (refracted ray) في الوسط الثاني. إذا قابل شعاع منكسر السطح الفاصل (الشكل 4-6) بزاوية ورود عظمى i_c بحيث أن $\sin i_2 = 1$ لذا:

$$\sin i_c = V_1/V_2 \qquad (4\text{-}9)$$

تدعى i_c بالزاوية الحرجة (critical angle)

سيرحل الشعاع المنكسر على السطح الفاصل. وبينما يرحل هذا الشعاع بسرعة V_2 على الوجه الأسفل من السطح الفاصل، سيولد في الوسط العلوي موجة بسعة (amplitude) صغيرة تعرف باسم الموجة الرأسية (head wave) (الشكلين 4-6 و 4-7). يمكن لأي جيوفون موجود على بعد أكبر من $2h \tan i_c$ من نقطة التفجير S تسجيل وصول الموجة الرأسية في الوقت المناسب. من الواضح بأن الجيوفون القريب من نقطة التفجير ستصل إليه الموجة المباشرة قبل الموجة الرأسية، أما الجيوفون الواقع على مسافة أكبر من المسافة الحرجة (x_c critical distance) ستصل إليه الموجة الرأسية قبل الموجة المباشرة لأن الموجة الرأسية ستمضي معظم الوقت في الوسط ذو السرعة العالية.

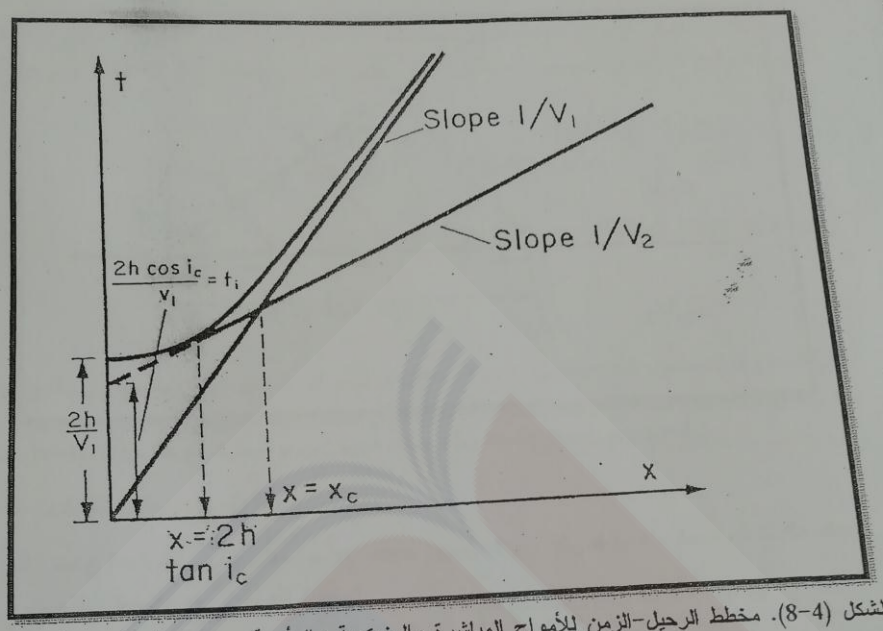


الشكل (4-7). توليد الموجة الرأسية بمرور موجة منكسرة في السطح الفاصل بين الوسطين.

4-4- مخطط الرحيل-الزمن لوسط متطبق:

1- حالة سطح فاصل أفقي وحيد: كيف سيبدو مخطط الرحيل-الزمن على طول هذه المسارات الثلاثة عندما ترسم مقابل المسافة على طول هذا السطح؟

أعطي مخطط الموجة المباشرة P سابقاً بالشكل (4-3) والشكل (4-8) هو المخطط الكامل للحد الفاصل الأفقي الوحيد للشكلين (4-5) و (4-6).



الشكل (4-8). مخطط الرحيل-الزمن للأمواج المباشرة والمنعكسة والرأسية. يوجد سطح فاصل أفقي على عمق h يقسم وسط علوي السرعة فيه V_1 عن الوسط السفلي ذو السرعة V_2.

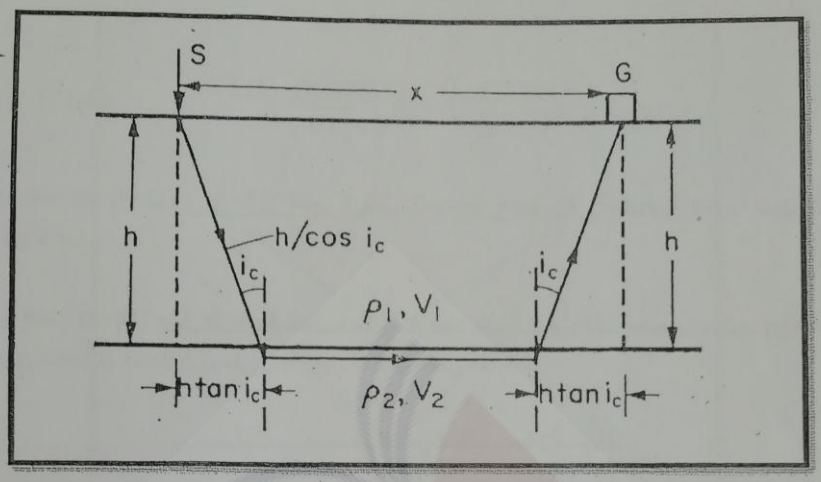
من السهل رؤية مخطط الشعاع وبأن جيوفون واقع بالقرب من نقطة التفجير سيسجل وقت الموجة المنعكسة بعد زمن $2h/V_1$، سيكون طول المسار الفعلي للموجة المنعكسة مساوياً:

$$2\sqrt{((x/2)^2+h^2)} \qquad (4\text{-}10)$$

وستكون علاقة الزمن-المسافة للموجة المنعكسة كالتالي:

$$t=\frac{2\sqrt{((x/2)^2+h^2)}}{V_1}=\frac{\sqrt{(x^2+4h^2)}}{V_1} \qquad (4\text{-}11)$$

مما يعطي علاقة قطع زائد بين x و t. سيمر المخطط من مركز الإحداثيات، كما بالنسبة للموجة المباشرة، لأن الموجة تخضع لتأخير للمرور نحو الأسفل إلى الطبقة الكاسرة السريعة ولتأخير ثاني في العودة إلى السطح. ليس للمخطط وجود فيزيائي لزاوية ورود أقل من الزاوية الحرجة (أي لقيم x أقل من $2h \tan i_c$)، لأن الموجة الرأسية لا توجد مطلقاً للمجالات القصيرة (الشكل 4-9).



الشكل (4–9). المسار الهندسي للموجة الرأسية.

يمكن إيجاد معادلة مستقيم الزمن–المسافة للموجة الرأسية مباشرة بإضافة الأزمنة المنقضية على الأجزاء الثلاثة للمسار:

$$t=\frac{1}{V_1}.\frac{h}{\cos i_c}+\frac{1}{V_2}(x-2h\tan i_c)+\frac{1}{V_1}.\frac{h}{\cos i_c}=\frac{x}{V_2}+2h(\frac{1}{V_1\cos i_c}-\frac{\tan i_c}{V_2}) \quad (4\text{-}12)$$

بما أن

$$\sin i_c = V_1/V_2 \quad (4\text{-}13)$$

نجد

$$t=\frac{x}{V_2}+\frac{2h\cos i_c}{V_1} \quad (4\text{-}14)$$

أي أن

$$t=\frac{x}{V_2}+t_i \quad (4\text{-}15)$$

هذا يمثل معادلة خط ميله $1/V_2$ وزمن تلاقي "intercept time" $t_i = 2h\cos i_c/V_1$، أي تلاقي الخط مع محور الزمن. المسافة الحرجة x_c هي قيمة x التي تحقق هذه المعادلة ومعادلة خط الموجة المباشرة حيث $t = x/V_1$ بحيث أن

$$x_c/V_1 = x_c/V_2 + t_i \quad (4\text{-}16)$$

ولذلك

$$x_c = t_i /(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2}) = 2h\sqrt{\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1}} \qquad (4\text{-}17)$$

تشكل المعادلات (4-13) و (4-15) أسس طريقتي السيسمية الانعكاسية والانكسارية لتعيين العمق إلى السطح الفاصل.

يظهر الشكل (4-10) مسار الشعاع المنعكس ومخطط الرحيل-الزمن لأرض ذات سطحين فاصلين. يوجد هنا موجتان منعكستان محتملتان ويعطى زمن رحيل أصغري للثاني كما يلي:

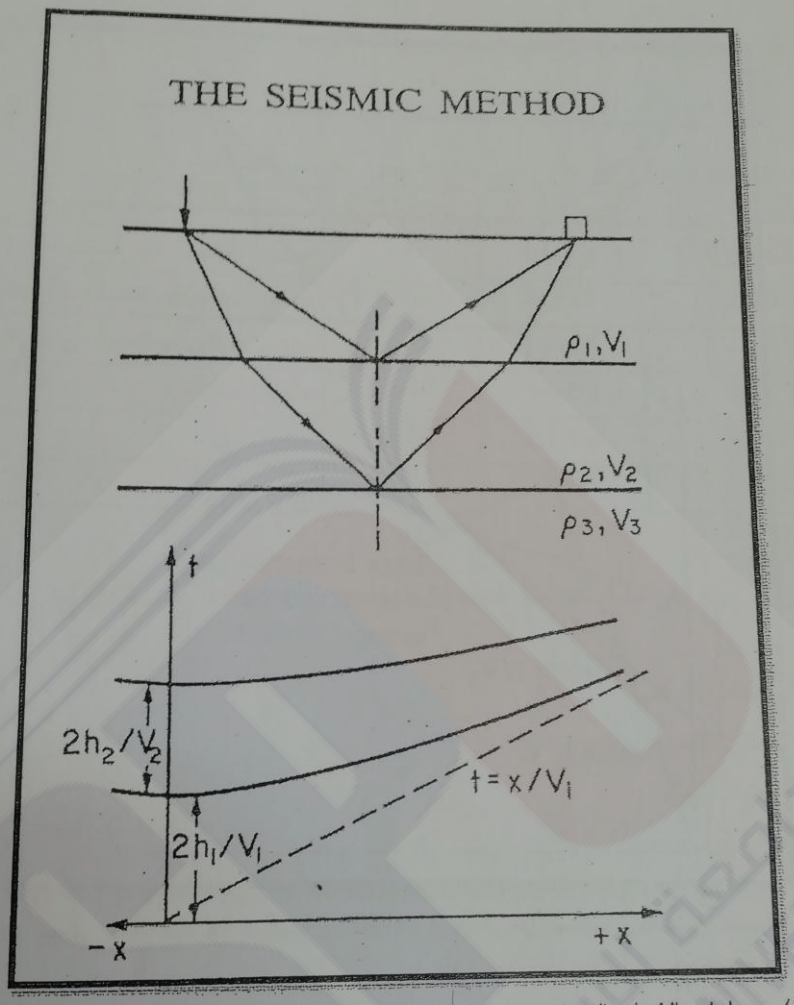
$$t = \frac{2h_1}{V_1} + \frac{2h_2}{V_2} = \frac{2(h_1 + h_2)}{\overline{V}} \qquad (4\text{-}18)$$

$\overline{V}$ هي المتوسط الموزون بالنسبة لسماكة الطبقات وتعطى بما يلي:

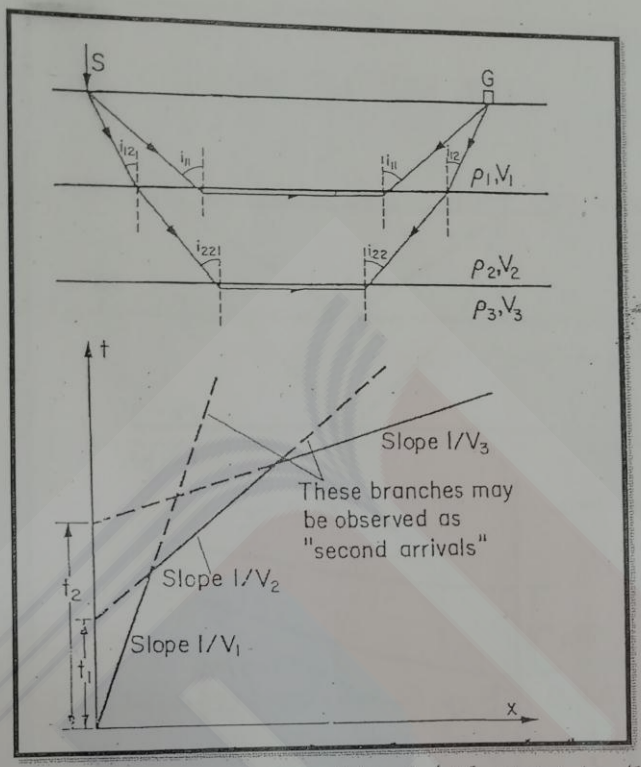
$$\overline{V} = (h_1 + h_2)/(\frac{h_1}{V_1} + \frac{h_2}{V_2}) \qquad (4\text{-}19)$$

يمثل المخطط في الشكل (4-11) الوصول الأولي ويتألف من ثلاثة فروع التي تعطي ميولها مقلوب السرعات V_1 و V_2 و V_3. ويمكن ملاحظة أن t_1 و t_2 تعطيان بالعلاقتين التاليتين:

$$t_1 = 2h_1 \cos i_{11} / V_1 \qquad (4\text{-}20)$$
$$t_2 = 2h_1 \cos i_{12} / V_1 + 2h_2 \cos i_{22} / V_2$$



الشكل (4-10). مسارات الشعاع المنعكس ومخططات زمن الرحيل عند وجود سطحين فاصلين أفقيين.



الشكل (4-11). مسار شعاع الموجة الرأسية ومخططات زمن الرحيل لسطحين فاصلين أفقيين.

4-5- العلاقات بين السرعات السيسمية وخواص مرونة الصخور:

تهدف معظم التحريات السيسمية إلى إيجاد الحدود الفاصلة بين الأوساط مختلفة السرعات التي يمكن أن تخبرنا بشيء ما عن طبيعة تلك الصخور.

تكون سرعة الموجة الانضغاطية مساوية:

$$V_p = \sqrt{((k + \frac{4}{3}n)/\rho)} \qquad (4\text{-}21)$$

حيث k المعامل الحجمي (أو اللاانضغاطية)، n المعامل القصي و ρ الكثافة.

هنالك علاقة تجريبية بين السرعة والكثافة (المرتبطة بالمسامية لكثافة أي فلز). إذا قيست السرعة نحتاج لتقدير إما التركيب الفلزي أو السمنتة (cementation) أو درجة التشقق للقيام بتقدير مسامية الصخور. كما في معظم الخواص الفيزيائية للصخور، من الممكن وضع مجال للسرعات لتغطية التقسيمات الليتولوجية

المعتادة، تم ذلك في الجدول (4-1) الذي يبين المنحى العام لتزايد السرعة مع نقصان المسامية (مثلاً ازدياد الكثافة).

جدول (4-1). يعطي سرعة الموجة مع تغير كثافة الصخور لعدد من الصخور.

نوع الصخر	V ft/msec	V km/sec	P g/cm^3
صخور حطامية غير متصلبة	1-6	0.3-1.8	1.5(peat 1.0)-2.2
صخور حطامية متصلبة قليلة الالتواء	5-12	1.5-3.7	2.0-2.6
صخور حطامية متصلبة في حزام ملتوي	10-20	3.1-6.2	2.5-2.8
صخور استحالية	15-20	4.6-6.2	2.7-3.0
حجر كلسي	10-20	3.1-6.2	2.4-2.7
صخور نارية	15-20	4.6-6.2	2.4-3.0

تحدد خواص المرونة لأي مادة متجانسة متساوية الخواص (isotropic) بأي اثنين من ثوابت المرونة، وهي:

k المعامل الحجمي.

n معامل القص.

E معامل يونغ.

σ نسبة بواصون.

بناء على العلاقات الموجودة بين هذه الثوابت يمكن إعادة كتابة المعادلات (4-4) و (4-5) بدلالة هذه المقادير كما يلي:

$$\rho V_p^2 = E(1-\sigma)/(1+\sigma)(1-2\sigma) \qquad (4\text{-}22)$$

$$\rho V_s^2 = E/2(1+\sigma) \qquad (4\text{-}23)$$

إذا استبدلت Vs/Vp بـ r يمكن كتابة العلاقة التالية:

$$\sigma = (1-2r^2)/(2-2r^2) \qquad (4\text{-}24)$$

4-6- القياسات السيسمية وتفسيرها:

إن الطريقة الانعكاسية موجهة لإيجاد القبب، والمنحدرات الصغيرة والأرصفة، والقبب الملحية، وعدم التوافق الزاوي الصغير والمعالم القابلة لحمل النفط في الأحواض الرسوبية، وبشكل عام فهي الأكثر تطبيقاً في استكشاف النفط. لذا سنناقش من هذا المنظور.