ثانيا: الأساس النظري والتطبيقي لطرائق السيزمية الانكسارية

٢-١ تمهيد

تعد الطريقة االسيزمية الانكسارية من أكثر التقنيات الجيوفيزيائية تطبيقاً في مجال الهندسة المدنية وخاصة في أعمال التحريات الموقعيه Site investigations للتربة والصخور لامتلاكها دقة عالية في تقدير سمك طبقة التجوية السطحية وإيجاد عمق طبقة صخر الأساس Bed rock بالإضافة إلى تحديد صلابة الطبقة وحساب بعض معاملاتها الجيوتكنيكية.

تعتمد الطريقة السيزمية الانكسارية في عملها على قياس الخواص الفيزيائية للأمواج السيزمية المنكسرة العائدة إلى سطح الأرض من السطوح الفاصلة (Interfaces) بين الأوساط (الطبقات) ذات الصفات الفيزيائية المختلفة، وإيجاد عدم الاستمرارية في الصفات المرنة للتربة والصخور بتسجيل الأمواج السيزمية العائدة من تلك الطبقات إلى سطح الأرض. و يتم هذا بإصدار طاقة (منبع موجي) من المصدر واستقبالها بواسطة لواقط سيزمية بعد مرورها وانكسارها خلال الطبقات المختلفة. وبسبب كون الأنواع المختلفة من التربة والصخور تمتلك معاملات مرونة مختلفة فإن الأمواج السيزمية سوف تسير بسرعات مختلفة في هذه الطبقات، وبقياس سرعات هذه الأمواج يمكن معرفة الخواص الفيزيائية للأوساط التي تمر بها هذه الأمواج كالصلابة والكثافة وكذلك الكشف عن مناطق الشقوق والفجوات والتكهفات. كما يمكن تحديد عمق الاستكشاف المطلوب دراسته وذلك بوساطة التحكم بالمسافة بين مصدر الطاقة(المنبع) واللوافط المنتشرة على طول البروفيل .

إن استخدام التقنيات الجيوفيزيائية المختلفة في دراسة مشاكل الهندسة المدنية يمكن الاطلاع عليها من المنشورات التالية المختلفة التي (Reynolds, 2003; Griffiths and King, 1981; Mooney, 1981; Haeni, 1986; McCann, et. al., 1987)

غير أنه بشكل عام تعد تفسير المعطيات السيزمية الانكسارية الضحلة(shallow seismic) المستحصلة للأغراض الهندسية وتحويلها إلى واقع جيولوجي من الأمور المعقد ة التي تحتاج إلى مهارة في التفسير ومعرفة جيد ة بجيولوجية المنطقة المزمع إجراء المسح السيزمي لها وخصوصاً في حالة وجود شقوق وفجوات تحت سطحية .

٢-٢ نظرية المرونة وخواصها (Properties & Theory of Elasticity):

بسبب الارتباط الوثيق بين خواص الأمواج السيزمية في وسط ما وبين الخواص المرنة لذلك الوسط ، فقد تم التطرق إلى نظرية المرونة في الكثير من المراجع الجيوفيزيائية مثل (Grant and West,1965; Sheriff and Geldart,1991;Parasnis,1967; Sharma , 1997;Dobrin,1976)، وقدم هؤلاء الباحثون شرحاً وافياً لهذه النظرية، وفيما يأتي ملخص لما أجمع عليه هؤلاء الباحثون.

٢-٢-١ المرونة Elasticity

هي خاصية الأجسام على مقاومة التغيير في الحجم والشكل لحظة تسليط قوى خارجية على هذه الأجسام ، ويوصف الجسم بأنه مرن إذا استعاد شكله وحجمه الطبيعيين بعد رفع القوى المؤثر ة عليه، وغير مرن إذا لم يستعد شكله وحجمه بعد زوال المؤثر.

٢-٢-٢ الجهد والتشوه (الانفعال) Stress and Strain

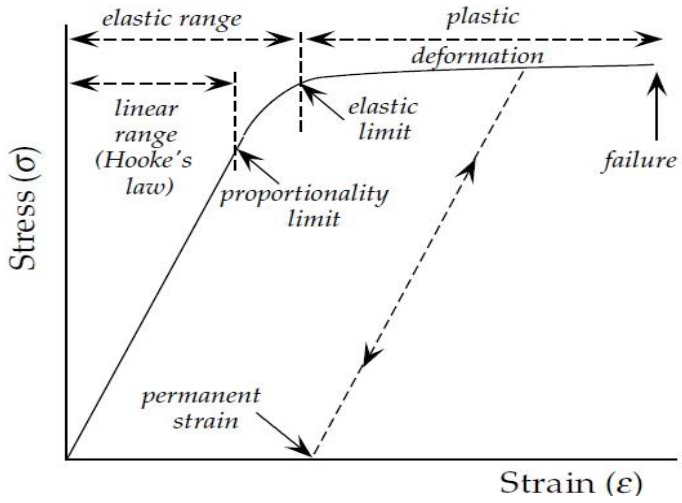
تنتشر الأمواج السيزمية في الأجسام الصلبة على شكل تشوه لجسيمات المواد لتلك الأجسام بسعات تعتمد على خواص تلك الأجسام من حيث المرونة و الكثافة ، ولبيان طبيعة هذه العلاقة يعبر عن هذه التشوهات بمصطلحات القوة المسببة لها من خلال مفهومين أساسيين هما الإجهاد أو الانفعال. أو العلاقة بينهما لمادة معينة يمكن أن تصف الخواص المرنة للمادة التي تتحكم في طبيعة انتشار الأمواج السيزمية في طبقات الأرض بعيداً عن المصدر.

يعرف الإجهاد stress بأنه النسبة بين القوة F إلى وحدة المساحة A المؤثرة فيها. ويمكن أن يحلل الإجهاد إلى مركبتين normal stress وهو الإجهاد العمودي على السطح و الإجهاد الموازي لمستوى السطح (shear stress). من ناحية أخرى يعرف الانفعال strain بأنه التغير في الشكل أو الحجم أو كلاهما نتيجة التعرض للإجهاد.

يعد روبرت هوك Robert Hooke أول من وضع المبادئ الأساسية لنظرية المرونة في عام (١٦٧٨) وسميت فيما بعد بقانون هوك (Hooke's Law) في المرونة. وطبقا لقانون هوك فإن العلاقة بين الإجهاد والانفعال علاقة خطية ويتصرف الجسم تصرفا مرنا حتى يصل الجسم إلى نقطة حرجة من حيث تحمله للإجهاد تسمى Yielding Point شكل (٢-١). هذه العلاقة تنص على أن الانفعال (strain) يتناسب طرديا مع قوى الإجهاد (stress) المسلطة.

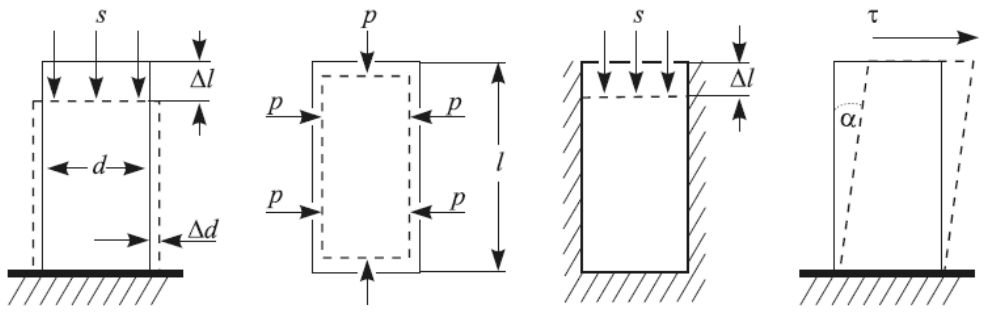
Stress α strain $S = E\varepsilon$

حيث أن: S: الإجهاد، E: معامل المرونة، ε: الانفعال



الشكل (٢-١) العلاقة النموذجية ما بين الإجهاد والانفعال في الأجسام الصلبة (Lowrie,2007)

ان العلاقات التي تربط بين الأنواع المختلفة من الإجهاد والانفعال تسمى معاملات أو ثوابت المرونة (Elastic moduli or constant) شكل (٢-٢) وبهذه المعاملات يمكن وصف مرونة أي جسم في الطبيعة.



a) Poisson's ratio: $\sigma = -\dfrac{\Delta d / d}{\Delta l / l}$

b) bulk modulus: $k = pV / \Delta V$ (p hydrostatic pressure; V volume)

c) Young's modulus: $E = \dfrac{s}{\Delta l / l}$ (s axial stress)

d) shear modulus: $\mu = \tau / \alpha$ (τ shear stress)

الشكل (٢-٢) التشوه المرن لنموذج متناسق لأسطوانة تحت حالة من الاجهادات المختلفة (Knödel,et al.,2007)

وهذه المعاملات هي:

١. نسبة بواصون (σ) Poisson's Ratio :

هي قياس التغير الهندسي (geometrical) في شكل الجسم المرن وتعبر عن النسبة بين الانفعال العرضي (transverse strain) والانفعال الطولي (longitudinal Strain) (Sharma,1986). وتقاس نسبة بواصون بالمعادلة الآتية:

$$\sigma = \frac{\Delta D/D}{\Delta L/L} \qquad \sigma = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{1}{(V_P/V_S)^2 - 1}\right]$$

تكون قيمة σ في الصخور المتبلورة قليلة (٠.٢٥) وتصل قيمتها إلى (٠.٤٥) للصخور غير المتصلبة الهشة والترسبات المشبعة بالماء (Sharma,1997) و٠.٠٥ للصخور القاسية . إن نسبة بواصون بدون وحدات.

٢. معامل يونغ (E) Young's Modulus:

وهو النسبة بين الإجهاد (stress) والانفعال (strain). ويقاس بوحدة الميغا باسكال (Mpa) ويعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/L} \qquad \mathrm{E} = \rho\left[\frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{\left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2 - 1}\right]$$

٣. معامل الحجم (K) Bulk Modulus:

يشير هذا المعامل إلى نسبة التغير في الحجم دون الشكل ويمثل النسبة بين الإجهاد الانضغاطي (Compression Stress) إلى معدل التغير في الحجم (Dobrin and Savit,1988) . ويقاس بوحدة (نيوتن/ م ٢) أو بوحدة ميغا باسكال (Mpa).ويعبر عنه بالمعادلة :

$$K = \frac{E}{3(1-2\sigma)} \qquad K = \frac{F/A}{\Delta V/V}$$

٤. معامل القص أو الصلابة (G) أو (μ) Rigidity or shear modulus:

هو التشويه الحاصل في شكل الجسم دون الحجم ، و يمثل النسبة بين الإجهاد القصي (shear stress) إلى الانفعال القصي (shear strain) . ووحدة قياسه الميغا باسكال (Mpa) ويعبر عنه بالمعادلات:

$$\mu = \frac{F/A}{\emptyset} \qquad \mu = \left[\frac{E}{2(1+\sigma)}\right]$$

إذ أن Ø هي زاوية التشويه التي تمثل الانفعال القصي . أن الغازات والسوائل لا تمتلك معامل قص الموجات القصية في الأوساط السائلة والغازية حسب المعادلة نسبة بواصون لأن قيم معاملات القص لها تساوي صفراً.

٥. ثابت لامي (λ) Lame's Constant:

هو مقياس لمتانة أو قوة الوسط المتجانس (Isotropic) وهو الوسط الذي لا تعتمد فيه صفات المرونة على الاتجاه ويعبر عنه بدلالة σ ، E المعادلة التالية . وحداته وحدات قوة على وحدات مساحة (نيوتن / م ٢) أو الميغا باسكال (Mpa).

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}$$

٢-٣ الأمواج السيزمية Seismic Waves

هنا ك نوعان أساسيان من **الأمواج السيزمية** المرنة هما **الأمواج السيزمية** الجسمية (Body waves) التي تنتقل داخل الجسم و **الأمواج السيزمية** السطحية (Surface waves) التي تنتقل على السطح الحر للجسم (بالقرب من سطح الجسم).

٢-٣-١ الأمواج السيزمية الجسمية (Body Waves)

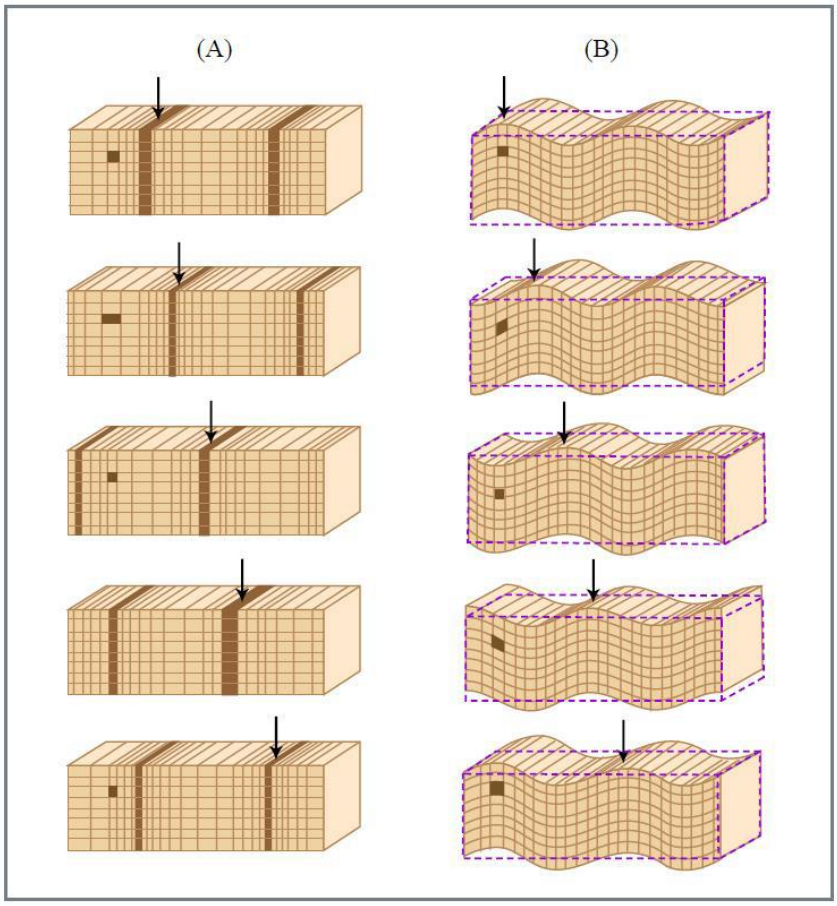
يسمح الجسم الصلب بانتقال نوعين أساسيين من الأمواج المرنة وتنتشر هذه الأمواج في الطبقات تحت السطحية وهي:

٢-٣-١-١ الموجة P أو الأمواج الانضغاطية (Compressional waves)

يطلق عليها الأمواج الابتدائية (Primary waves) كونها أول الأمواج الواصلة إلى المراصد السيزمية أو أول حدث للموجة . وفي هذه الأمواج تكو ن حركة الجزيئات موازية لاتجاه انتشار الموجة وتسمى بالأمواج الطويلة (Longitudinal Waves) لان إزاحة الجزيئات تكون طولية الشكل (٢-٣) وهذا النوع من الأمواج الجسمية هي السائدة في التنقيب السيزمي، الجدول (٢-١) يظهر سرعات الأمواج الانضغاطية في المواد المختلفة . ويعبر عن سرعات هذه الأمواج بالمعادلة الآتية:

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{3}{4}\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)\rho}}$$

V_P : سرعة الموجة الانضغاطية . K : المعامل الحجمي . μ : معامل القص. E : معامل يونغ ρ : الكثافة.



شكل (٢-٣) المراحل المتعاقبة في التشوه المرن لكتلة من المادة بالموجة P (A) والموجة Sv (B) إذ يعاني الوسط تغيير في الشكل والحجم وفي موجة S يبقى الحجم ثابتاً.

جدول (2–1) سرعات الموجات الاضغاطية في المواد المختلفة (Keary,et al,.2002)

P wave Velocity (Km/s)	Material
0.2-1.0	Sand dry& Alluvium
0.25-1.0	Weathered layer
1.5-2.0	Sand (saturated)
1.0-2.5	Clay
1.5-2.5	Glacial till (water –saturated)
2.4-5.0	Slate & shale
2.0-6.0	Sandstone
2.0-2.5	Tertiary sandstone
2.0-6.0	Limestone
2.0-2.5	Cretaceous chalk
5.0-5.5	Carboniferous limestone
2.5-6.5	Dolomite
4.5-5.0	Salt
4.5-6.5	Anhydrite
2.0-3.5	Gypsum
1.4-1.5	Water

٢-٣-١-٢ الموجة S أو الأمواج القصية (Shear waves)

يطلق عليها الأمواج العرضية أو الثانوية (Secondary or Transverse) وهي ثاني موجة سيزمية وصولا للمراصد الزلزالية لذلك تسمى بالأمواج الثانوية. وتكون فيها حركة جزيئات الوسط عامودية على اتجاه انتشار الموجة الشكل (٢-٣) ومن خصائص هذه الموجة انه يمكن استقطابها بالمستوى العمودي (Sv-waves) أو الأفقي ويشار إليها (SH-waves) . وهي أمواج تنتقل خلال المواد الصلبة فقط ولا تنتقل في السوائل ولا في الغازات لأنها لا تمتلك معاملاً قصياً (μ) ويعبر عن سرعات الموجات القصية بالمعادلة :

$$V_P = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

٢-٣-٢ الأمواج السطحية Surface waves

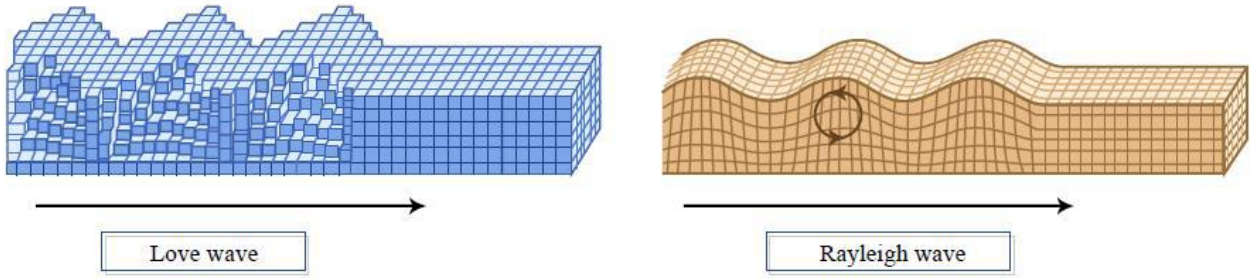
هي الأمواج التي تنتشر بالقرب من سطح الأرض ويمكن تمييزها بترددها وسرعتها القليلتين وسعة الموجة amplitudes تكون كبيرة على السطح وتصغر إذا ما اتجهنا إلى العمق وتضمحل هذه الأمواج أسياً مع العمق (Telford et al.,1990). وغالباً ما تعد هذه الأمواج مصدراً للضوضاء المتجانسة Coherent noise و يطلق عليها Ground Roll في المسوحات السيزمية. وقد استخدمت في السنوات الأخيرة بازدياد في الدراسات الهندسية (Socco and Strobbia ,2004) . وتقسم إلى نوعين بالاعتماد على حركة الجزيئات فيها وهي:

٢-٢-٢-١ أمواج رايلي Rayleigh wave (R-wave or LR-wave)

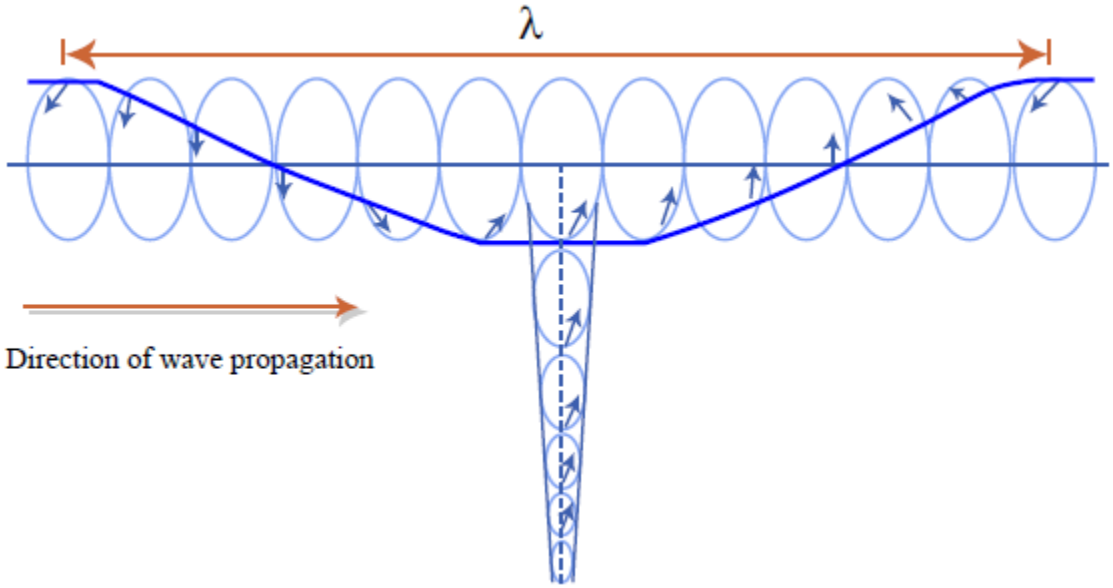
سميت أمواج رايلي نسبة إلى العالم الفيزيائي الانكليزي لورد رايلي Lord Rayleigh(1842-1919) . وتكو ن حركة الجزيئات فيها مركبة نوعاً ما من الاهتزاز العمودي والأفقي مؤدية إلى حركة تراجعية بيضوية (Elliptical and Retrograde Motion) في المستوى العمودي على طول اتجاه تقدم الموجة كما في الشكل (٢-٤). إن سرعة موجة رايلي هي تقريباً ٠.٩١ من سرعة الموجة القصية (Sheriff,2002). إن سعة هذه الموجة تكون كبيرة على السطح وتصغر إذا ما اتجهنا إلى العمق (تضمحل أسيا مع العمق) الشكل (٢-٥).

٢-٢-٢-٢ موجة لف Love wave (LQ or Q-wave)

أطلق عليها موجة لف نسبة لعالم الرياضيات الانكليزي *H. Love* التي تكون فيها حركة الجزيئات على شكل حركة أفقية مستعرضة موازية لسطح الأرض وعامودية على اتجاه تقدم الموجة (مثل المركبة الأفقية للموجة القصية SH-wave) (Telford et al.,1990). الشكل (٢-٤). وهذا النوع من الموجات غير مهم في الاستكشاف السيزمي (Sheriff 2002).



شكل (٢-٤) مجسم يوضح حركة موجة رايلي وموجة لوف .



شكل (٢-٥) الحركة التراجعية البيضوية لموجة رايلي واضمحلالها مع العمق

٢-٤ انتشار الأمواج السيزمية Propagation of Seismic Waves

إن **الأمواج السيزمية** هي أساس تلك الدراسات، لذلك يجب فهم المبادئ الفيزيائية الأساسية التي تحكم انتشار هذه الأمواج. تعتمد الطريقة السيزمية أساسا على انتقال **الأمواج السيزمية** في الأوساط المرنة منذ تولدها من مصدر الطاقة (تفجير وطرق ...الخ) وحتى اضمحلالها حيث تتعرض للانكسار والانعكاس والتشتت عند الحدود الفاصلة بين الأوساط المختلفة في الخواص الفيزيائية. فباطن الأرض مكون من طبقات عديدة تختلف في خواصها الفيزيائية ، وان سرعه تقدم **الأمواج السيزمية** التي تنتقل خلال الطبقات تتغير بتغير الخواص المرنة للصخور. وعندما يتعرض الجسم المرن إلى إجهاد بصورة فجائية ستحصل إزاحة لحظية عند موقع تأثير هذا الإجهاد، وفي الوسط المتجانس تنتقل هذه الإزاحة في الاتجاهات كافة على شكل سطوح كرويه تعرف بجبهة الموجه (wave front). تولد هذه الإزاحة نوعين من الأمواج هما الأمواج الجسمية (Body waves) والأمواج السطحية (Surface waves). إن المفاهيم الأساسية التي تتحكم في انعكاس وانكسار **الأمواج السيزمية** هي المفاهيم نفسها التي تتحكم في انتقال الضوء وتخضع هذه الأمواج لمبادئ الهندسة البصرية (Geometrical optics) مثل:

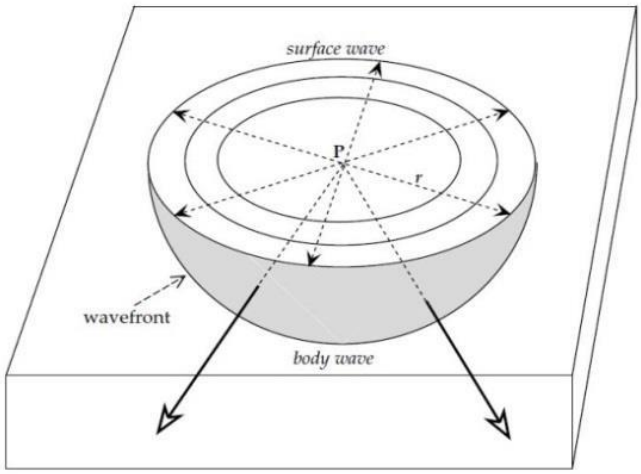
١- مبدأ هايجن (Huygens' principle) و
٢- مبدأ فيرمات (Fermata's principle) و
٣- قانون سنيل (Snell's Law).
٤- مبدأ التبادلية
٥- الانتشار الهندسي للأشعة السيزمية.

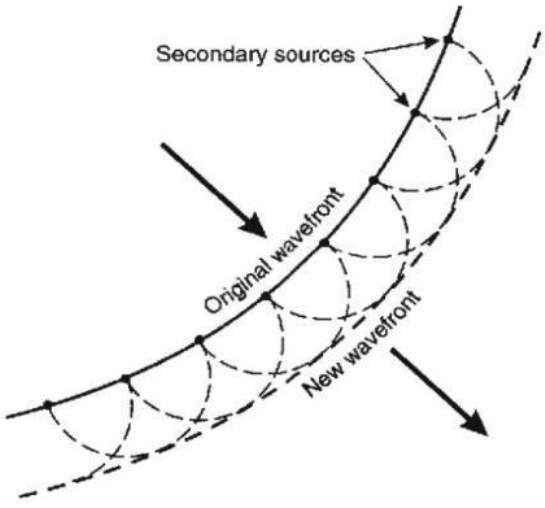
٢-٤-١ مبدأ هايجنز Huygens' principle

و ضع هذا المبدأ عالم الرياضيات الهولندي هايجنز Huygens (١٦٢٩-١٦٩٥) الذي ينص على أن الضوء ينتشر على شكل أمواج تنتشر من المصدر إلى كافة الاتجاهات. كما فرض أن جبهة الموجة عبارة عن كرة مركزها المصدر وأن كل نقطة على جبهة الموجة تعمل كمنبع ثانوي تتولد منه الأمواج الثانوية والتي تعد مصدراً رئيسياً للأمواج التي تولدها في الاتجاهات كافة الشكل (A6-2).

٢-٤-٢ مبدأ فيرمات Fermat's Principle

لقد صاغ هذا المبدأ العالم الفرنسي فيرما *Fermat* (١٦٠١-١٦٦٥) الذي وضعه بالأساس للأمواج الضوئية، وهو ينص على أن الضوء يأخذ اقل وقت ممكن لوصوله من المصدر إلى النقطة الأخرى على الخط نفسه. ويمكن تطبيق هذا المبدأ على **الأمواج السيزمية** لان الموجة السيزمية تسلك الطريق الذي يأخذ أقل وقت ممكن للانتقال من المصدر إلى اللاقط بغض النظر عن الطبيعة الصخرية والتركيبية بين المصدر والمستقبل .





الشكل(٢-٦)A - توليد اضطراب زلزالي من نقطة P القريبة من السطح لوسط متجانس وانتشاره على شكل موجات جسميه تسير خلال الوسط وموجات سطحية على طول السطح الحر للوسط. B - جبهة الموجه طبقاً لمبدأ هايجن .

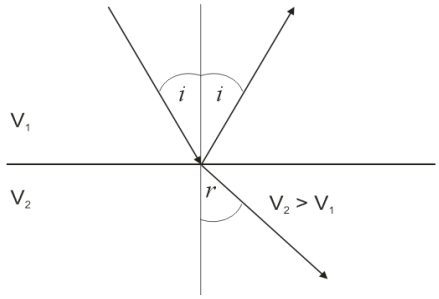
٢-٤-٣ انكسار الأمواج وقانون سنيل Snell's Law

سمي هذا القانون بهذا الاسم نسبة إلى عالم الرياضيات الهولندي W.Snell (١٥٦١-١٦٢٦) وينص هذا القانون على أن الموجة السيزمية التي تعبر الحد الفاصل بين وسطين متجانسين مختلفين في السرعة فان قسماً منها سوف ينعكس وقسماً آخر سوف ينكسر .

والعلاقات الرياضية التي تحكم انتشار الأمواج السيزمية عند انتقالها بين الأوساط المرنة هي:

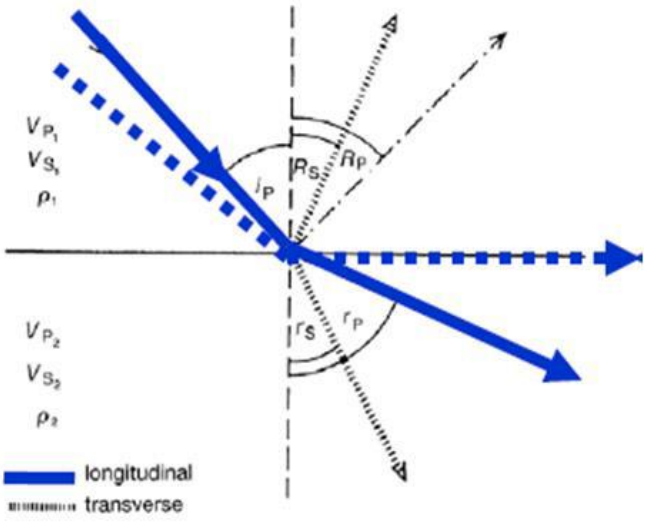
١. عندما ورود الموجة السيزمية بزاوية أقل من الزاوية الحرجة فان جزءا من الشعاع الوارد ينعكس والجزء الأخر ينكسر بزاوية اقل 90°.
٢. عند ورود الموجة السيزمية بزاوية معينة تدعى الزاوية الحرجة i_C فان زاوية الانكسار تكون $i_P = 90^{\circ}$، إذ تسير **الأمواج السيزمية** المنكسرة خلال السطح العلوي للوسط الثاني ذي السرعة السيزمية الأعلى الشكل (٢-٧). ولكي يحصل الانكسار الحرج للأمواج المنتقلة داخل الطبقات الأرضية وتولد الأمواج الرأسية يجب إن تكون هناك زيادة في سرعات **الأمواج السيزمية** مع العمق (Sjogren1984).

$$\sin ic = \frac{V_{P1}}{V_{P2}}$$

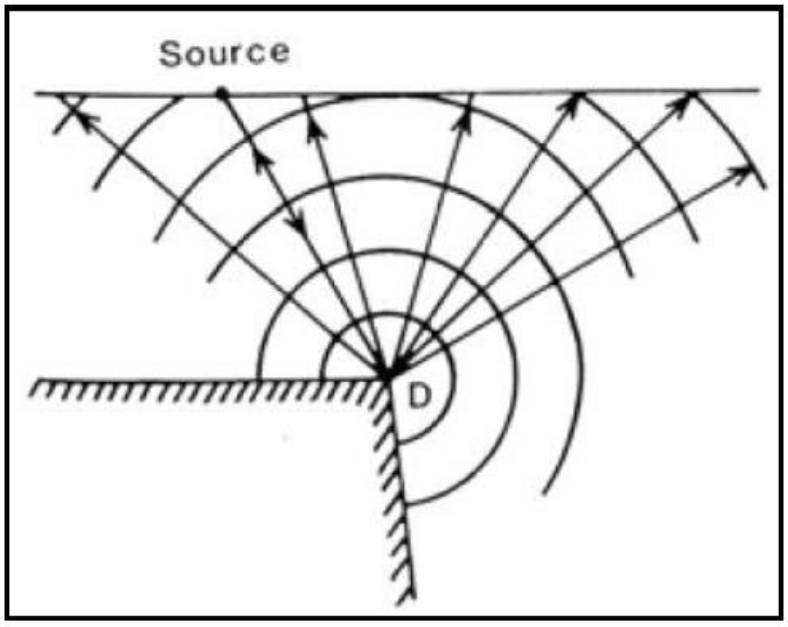


٢-٤-٤ تشتت الأمواج السيزمية Seismic waves diffraction

عندما ترتطم **الأمواج السيزمية** بحافة غير منتظمة مثل حافة حادة أو نقطة تغير مفاجئ في الميل ،فان هذه المنطقة غير المنتظمة تعمل كمنطقة مصدر لتوليد أمواج جديدة في الاتجاهات جميعها شكل (٢-٨). وتلاحظ هذه الحالة عادة في السجلات السيزمية عند وجود فالق رأسي تحت سطحي



شكل (٢-٧) انكسار وانعكاس الأمواج السيزمية عند سقوطها على سطح فاصل بين وسطين مختلفين في السرعة السيزمية.



شكل (٢-٨) تشتت الموجة عند ارتطامها بحافة حادة وانتشارها باتجاهات مختلفة

٢-٥ العوامل التي تؤثر على سرعة انتقال الأمواج السيزمية في الصخور

تتأثر سرعة **الأمواج السيزمية** بعدد من العوامل التي تسبب تغييراً في سرعة تلك الأمواج . ويأتي تأثير العوامل الجيولوجية في سرعات **الأمواج السيزمية** من حقيقة أن السرعة السيزمية تعتمد على الخواص المرنة للوسط التي تسير فيه، وأي عامل يؤثر في الخواص المرنة للأوساط سوف يؤثر بصورة مباشرة على سرعة تلك الأمواج. من أهم العوامل التي تؤثر في سرعة **الأمواج السيزمية** في الصخور هي :

١. الكثافة Density

تعرف الكثافة على أنها صفة فيزيائية للأجسام تعبر عن علاقة وحدة الحجم بوحدة الكتلة لماد ة أو جسم ما، فكلما ازدادت الكثافة ازدادت الكتلة لوحدة الأحجام، وعلى هذا فهي كتلة وحدة الحجوم من المادة. وحدتها الغرام في السنتيمتر المكعب g/cm^3. يرمز لها بالحرف اللاتيني **ρ** ، تناسب سرعة **الأمواج السيزمية** عمليا طرديا مع الكثافة حيث تزداد السرعة مع زياد ة الكثافة ورياضيا يكون التناسب عكسي . يظهر الشكل (٢-٩) علاقة السرعة مع الكثافة للأنواع المختلفة من الصخور (Nafe and Drake,1957).

٢. المسامية Porosity

تعرف المسامية بأنها حجم الفراغات الموجودة في كتلة صخرية على الحجم الكلي للكتلة الصخرية.وهي من الصفات المميزة للصخور. فمسامية بعض الصخور ضئيلة ومثال ذلك (الغرانيت) ومعظم الصخور النارية والمتحولة، أما مسامية بعض الصخور الأخرى عالية ومن أمثلتها (المدملكات والرمال) اللامتلاحمة أي الخالية من المواد المعدنية المتبلورة في مسام بعض الصخور الفتاتية .

تتناسب المسامية عكسيا مع الكثافة وتزداد السرعة مع نقصان المسامية. لقد توصل وايلي وآخرون (Wyllie,et.al.1958) إلى علاقة تربط المسامية والسرعة في الحجر الرملي المشبع بالماء على أعماق متوسطة وتسمى بمعادلة معدل الزمن (Time-average equation) وهي كالآتي:

$$\frac{1}{V} = \frac{\emptyset}{V_f} + \frac{1-\emptyset}{V_m}$$

حيث أن:

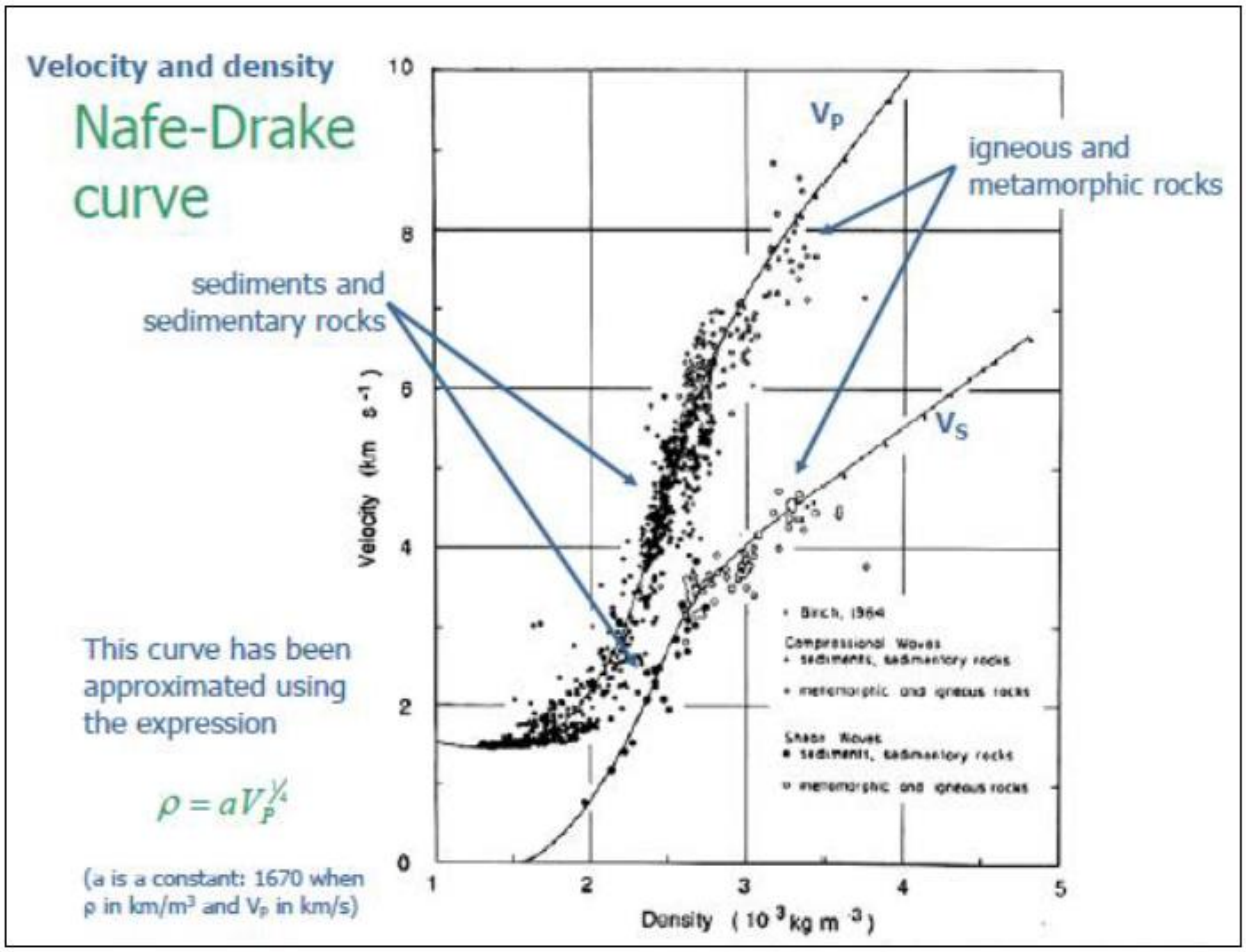
$\emptyset$: المسامية

V_f: السرعة في السائل الموجود في الفراغات البينية.

V_m: السرعة في المادة الصخرية الصلبة

V: السرعة في الصخرة المشبعة

تتأثر سرعة **الأمواج السيزمية** في الصخور ولا سيما الصخور غير المتماسكة تأثير ملحوظا بكمية المحاليل التي تحويها تلك الصخور.
وتؤدي الشقوق والكسور والفجوات إلى زيادة نسبة المسامية في الصخور وبالتالي تؤدي إلى انخفاض سرعة **الأمواج السيزمية** في تلك الصخور وخاصة في الأعماق الضحلة. عموما يقل تأثير الشقوق والكسور مع العمق اذ نجد أن الشقوق الصغيرة تميل إلى الانغلاق مع زيادة العمق تحت تأثير وزن المادة الصخرية التي تعلوها والتي بدورها تزيد من عملية الانضغاط.



شكل (2–9) يبين علاقة سرعة موجات P مقابل الكثافة لمدى واسع من الصخور الرسوبية

(Nafe and Drake,1957)

٣. عمق الطمر Depth of Burial

تعني زيادة عمق الطمر زيادة في انضغاط الصخور نتيجة ازدياد سمك الغطاء الرسوبي وهذه الزيادة في الانضغاط تؤدي إلى تقليل نسبة المسامية وزيادة الكثافة وتحدث هذه العوامل زيادة لمرونة تلك الصخور وبالتالي زيادة سرعتها الزلزالية .

٤. المكونات الصخرية Lithology

تؤثر المكونات المعدنية في الصخور بصورة مباشرة في سرعة الموجات الزلزالية لتلك الصخور اذ تعتمد السرعة الزلزالية للصخور على السرعة الزلزالية للمعادن المكونة لها. ففي الصخور النارية والمتحولة تكون السرعة أكثر اعتمادا على الخواص المرنة للمعادن المكونة لها في حين تعتمد السرعة في الصخور الرسوبية على المكون الصخري وعوامل أخرى مثل المسامية والمحتوى المائي...الخ . لذلك نجد بعض الحالات للصخور

الرسوبية لها التكوين الصخري نفسه ولكنها تختلف في السرعة الزلزالية مثال على ذلك صخور الجير الدولوميتي أعلى سرعة من صخور الجير الكلسي التي لها العمر الجيولوجي نفسه لكن سببها هو الاختلاف في الصفات الفيزيائية لمعادن الدولوميت والكالسيت .

٥. العمر الجيولوجي Geological Time

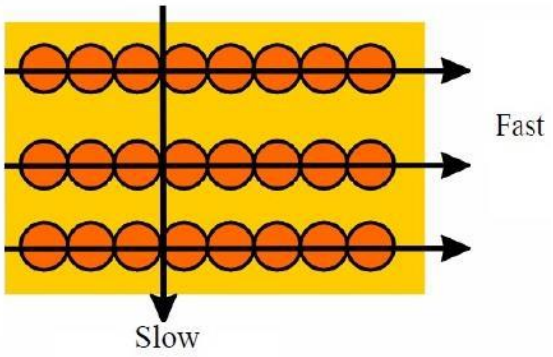
ان تأثير العمر الجيولوجي للصخور على سرعة **الأمواج السيزمية** غالبا ما يكون مرتبطا بعمق هذه الصخور. إذ تكون الصخور القديمة عادة أعمق من الصخور الحديثة لان زيادة تماسك وتلاصق حبيبات الصخور الرسوبية بمرور الزمن يؤدي إلى زيادة الكثافة والسرعة الزلزالية في هذه الصخور. لقد أجرى فاوست (Faust,1951) دراسة إحصائية واسعة النطاق لسرعات الصخور الرسوبية في أمريكا الشمالية وأوضح بأن السرعة للموجات الانضغاطية للحجر الرملي والطين الصفائحي يمكن التعبير عنها بالمعادلة الآتية :

$$V = K(ZT)^{1/6} \quad m/s$$

حيث أن K تساوي ٤٦.٥ عندما يكون عمق الطمر (Z) بالمتر وعمر الصخور الجيولوجي (T) بالسنين فتكون وحدة السرعة عند ذلك متر/ثانية .وهذه المعادلة هي معادلة تجريبية ولا تنطبق على أنواع صخور الحجر الرملي sandstone ولطين الصفائحي Shale جميعها.

٦. تباين الخاصية وفق الاتجاه Anisotropy

إن سرعات **الأمواج السيزمية** تختلف في الصخور المتطبقة في حالة انتشارها بشكل مواز أو عمودي على سطح التطبق . إن سرعة الموجة المتقدمة بموازاة الطبقات او مستوى التطبق تكون دائما أكبر من سرعة الموجة التي تكون عموديا على سطح الطبقة شكل (٢-١٠). فعلى سبيل المثال في صخور shale &slate تكون سرعة الموجة المتقدمة بموازاة مستوى التطبق أكثر تقريباً بخدود (10-20%). يعرف معامل التباين وفق الاتجاه على أنه النسبة بين سرعة الموجة المنتشرة بموازاة الطبقات إلى سرعة الموجة المنتشرة عموديا على الطبقات (Lama and Vutukuri,1978).

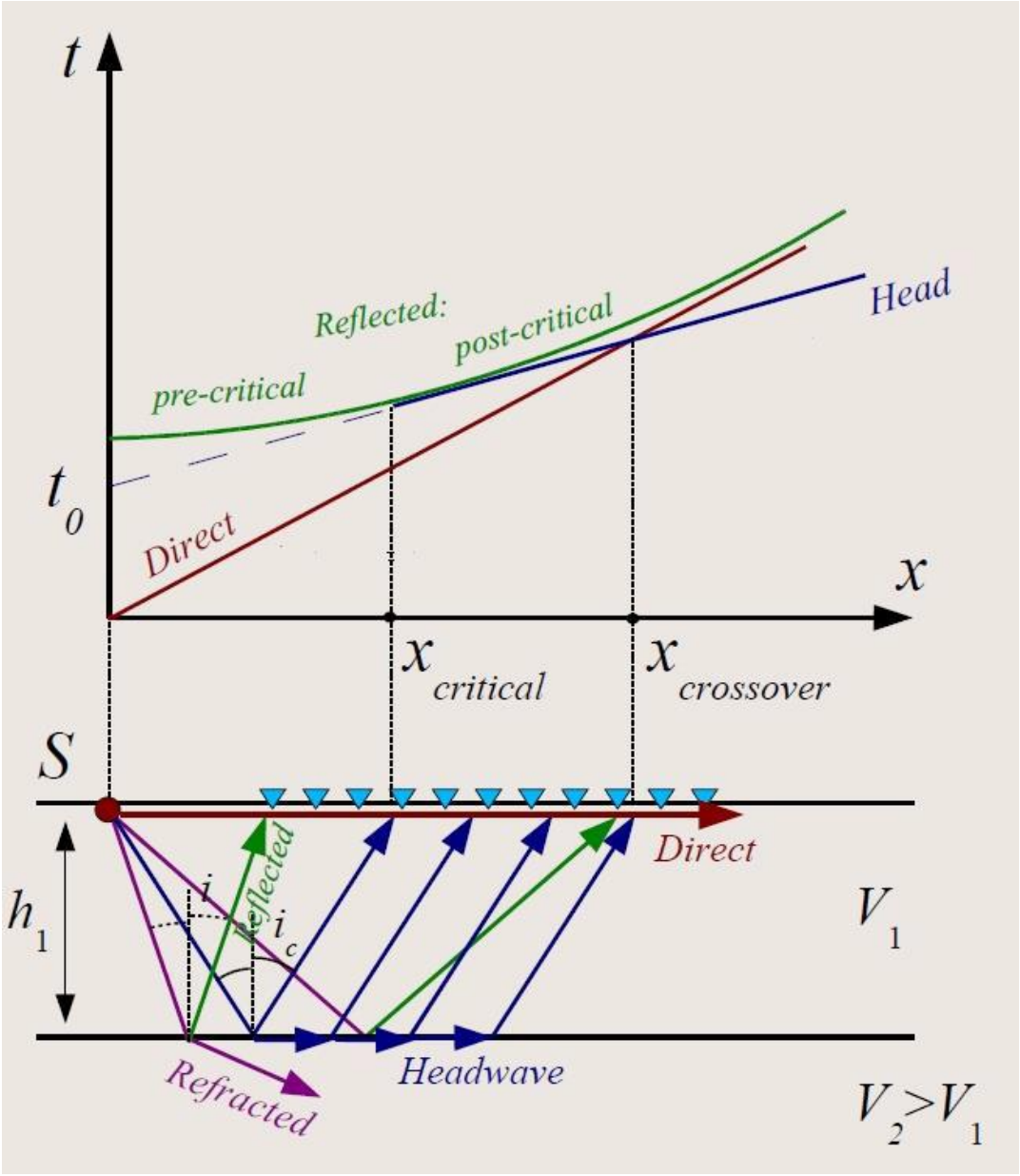


شكل(٢-١٠) التغيير بالسرعة السيزمية بالاعتماد على تباين الاتجاه إدراج شكل حقلي

٢-٦ مبدأ طرائق المسح السيزمي الانكساري Principles of Seismic Refraction Methods

إن مبدأ الطريقة الانكسارية هو توليد **الأمواج السيزمية** عند نقطة معينة على سطح الأرض ومن ثم استقبال تلك الأمواج على سطح الأرض بوساطة اللواقط المغروسة في التربة وقياس أزمنة الوصولات الأولية **للأمواج السيزمية** عند كل لاقط. والتنظيم الشائع في النشر هو النشر على طول خط مستقيم وهناك النشر المروحي الذي يستخدم في الكشف عن القباب الملحية (Keary, et al.,2002).

وتكون نقاط التفجير على نهايتي الخط ، فالمسافات القصيرة القريبة من نقطة التفجير تسجل اللاقطات الأمواج المباشرة في حين بعد المسافة الحرجة تصل الأمواج المنكسرة أسرع ويتم تسجيلها والتقاطها باللواقط البعيدة عن المصدر (Griffith & King ,1981).



شكل (٢-١١) مخطط ومنحي الزمن – المسافة للأمواج المباشرة والمنعكسة والمنكسرة

ومن أهم مميزات هذه الطريقة:

١. تحتاج لأقل عدد ممكن من المنابع والمستقبلات (اللواقط) ولذلك فهي رخيصة نسبيا في جمع البيانات.
٢. تفسير البيانات الانكسارية يكون سهل وغير معقد مقارنة بالطريقة الانعكاسية.
٣. تحديد سمك وسرعة الطبقات تحت السطحية.

أما مساوئ هذه الطريقة:

١. يجب أن تكون مسافة النشر طويلة بعض الشيء حتى نتمكن من دراسة الطبقات الأعمق.
٢. لا تعمل إلا إذا كانت السرعة تزداد مع العمق أي ان (V1>V2) وإذا كانت السرعة الأولى اكبر من الثانية فسوف تظهر لنا مشكلة الطبقة العمياء (Blind Layer).حيث تتحقق الدراسة والمسح بزيادة السرعة مع العمق.

٢-٧ حساب سماكة وسرعة الطبقات تحت السطحية:

تستخدم طرائق عديدة في تفسير منحنيات الزمن– المسافة (time-distance curves) للتسجيلات السيزمية الانكسارية الحقلية ، وتختلف هذه الطرائق بعضها عن البعض الآخر في الافتراض الجيولوجي والأسلوب الحسابي لسرعات وأعماق الطبقات (Kilty,et al.,1986).

ويتم استخدام أزمنة الوصولات الأولية (first arrival time) لحساب سمك وسرعة الطبقات تحت السطحية.

٢-٧-١ في حالة طبقتين أفقيتين:

تحسب أعماق وسرعات الطبقات لمختلف الحالات بالاعتماد على أسلوبين :

استخدام طريقة زمن التقاطع Intercept Time(ti):

يعرف زمن التقاطع (ti) بأنه الزمن الذي يتم الحصول عليه من تقاطع امتداد خط زمن وصول الموجة المنكسرة الى محور زمن عند المسافة صفر (X=0) قيمة t0 في الشكل (٢-١١).

استخدام طريقة مسافة التقاطع Cross-over Distance (Xco)

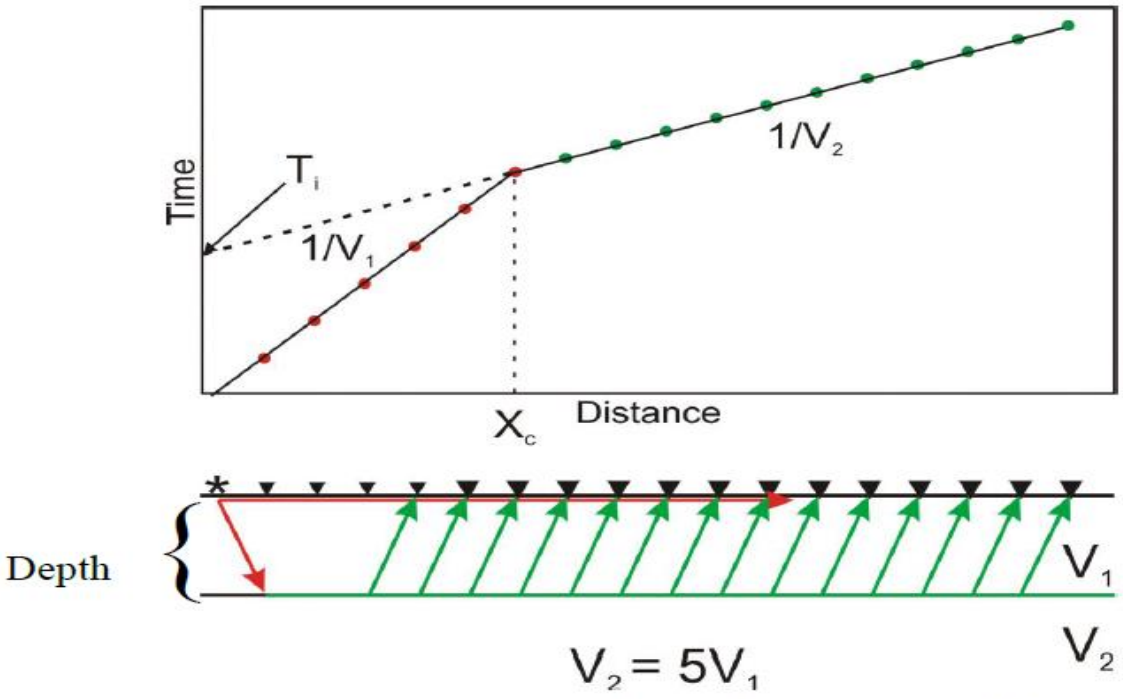
هي المسافة التي يكون فيها زمن الوصول للأمواج المباشرة والمنكسرة متساويا ، وهذه المسافة هي النقطة التي تشير الى حصول انكسار الموجة ووصولها قبل الموجة المباشرة (شكل ٢-١٢) وتعتمد على عمق الكاسر h وعلى سرع الطبقة الأولى والثانية . عادة ما تكون قيمة (X_{co}) اكبر من ضعف عمق الكاسر (Allaby, A.; Allaby M.,1999).

أولا : حساب العمق (h) بواسطة طريقة زمن القطع :

$$ti = \frac{2hcos\theta}{V_1} \qquad t_i = \frac{2h\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2 V_1} \Rightarrow h1 = \frac{ti2\ V1\ V2}{2\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}$$

ثانيا : حساب العمق بوساطة طريقة المسافة الحرجة:

$$X_c = 2h\sqrt{\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1}} \Rightarrow \qquad h = \frac{Xco}{2}\sqrt{\frac{V2 - V1}{V2 + V1}}$$



شكل (2–12) منحي زمن – مسافة للموجات المباشرة والمنعكسة والمنكسرة لطبقتين افقيتين

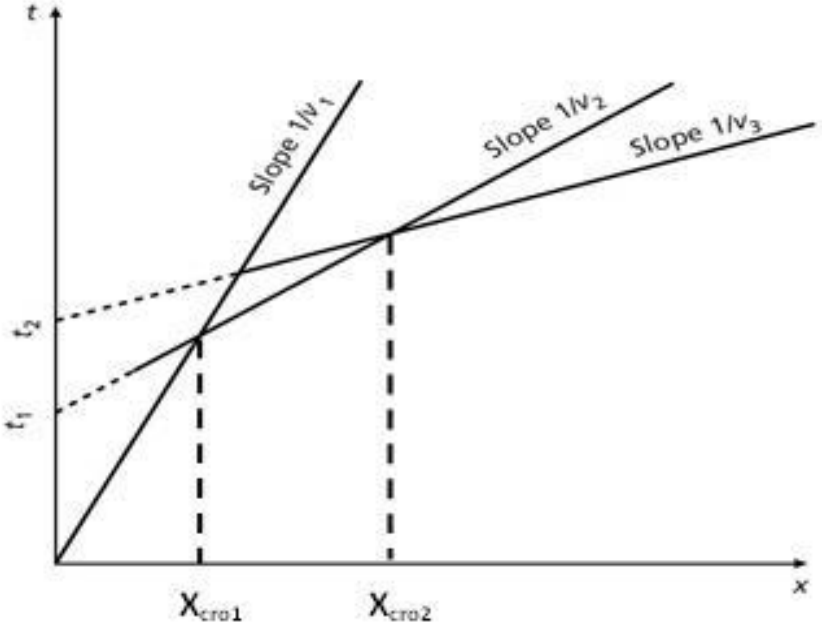
٢-٧-٢ في حالة ثلاثة طبقات أفقية

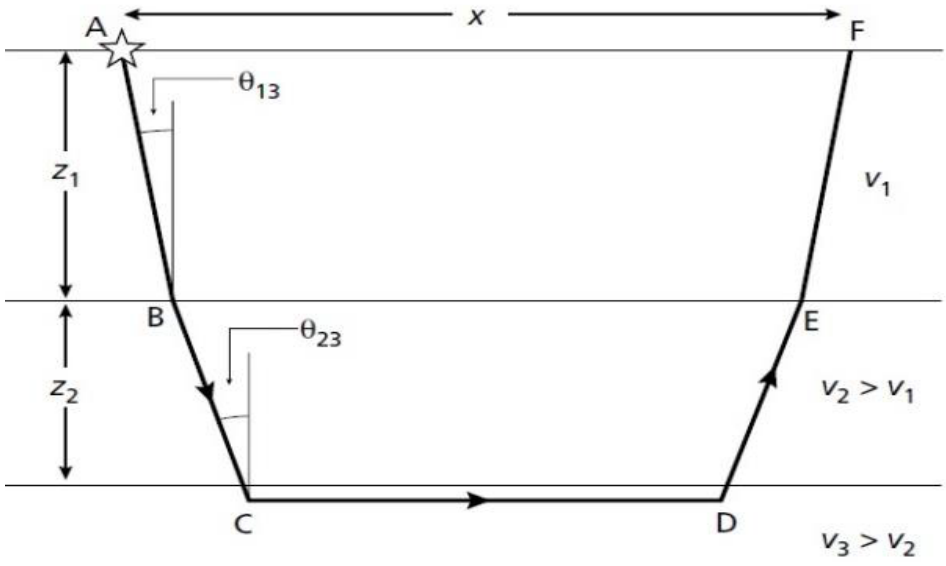
أولا : حساب العمق بواسطة طريقة زمن القطع(هنالك معادلات ابسط بعد تحويلها بدلالة السرعة) وردت اعلاه:

$$h_2 = \frac{ti_2}{2cos\theta_{23}} - \frac{h_1 cos\theta_{13}}{cos\theta_{23} sin\theta_{13}}$$

ثانيا : حساب العمق بوساطة طريقة المسافة الحرجة

$$h_2 = \frac{Xco_2(1 - sin\theta_{23})}{2cos\theta_{23}} - \frac{h1(cos\theta_{13} - cos\theta_{13})}{cos\theta_{23} sin\theta_{13}}$$





شكل (٢-١٣) يوضح مسارات الموجة في حالة ثلاث طبقات أفقية

٢-٧-٣ في حالة الطبقات الأفقية المتعددة:

يمكن حساب الأعماق في حالة الطبقات المتعددة الشكل (٢-١٤) بطريقتين:

أولا : حساب العمق بوساطة طريقة زمن القطع:

$$h_{(n-1)} = \frac{T_{ni} V_{n-1}}{2cosi_{(n-1)n}} - \frac{V_{n-1}}{cosi_{(n-1)n}} \sum_{V=1}^{V=n-2} \frac{h_V cosi_{Vn}}{V_V}$$

ثانيا : حساب العمق بوساطة طريقة مسافة العبور

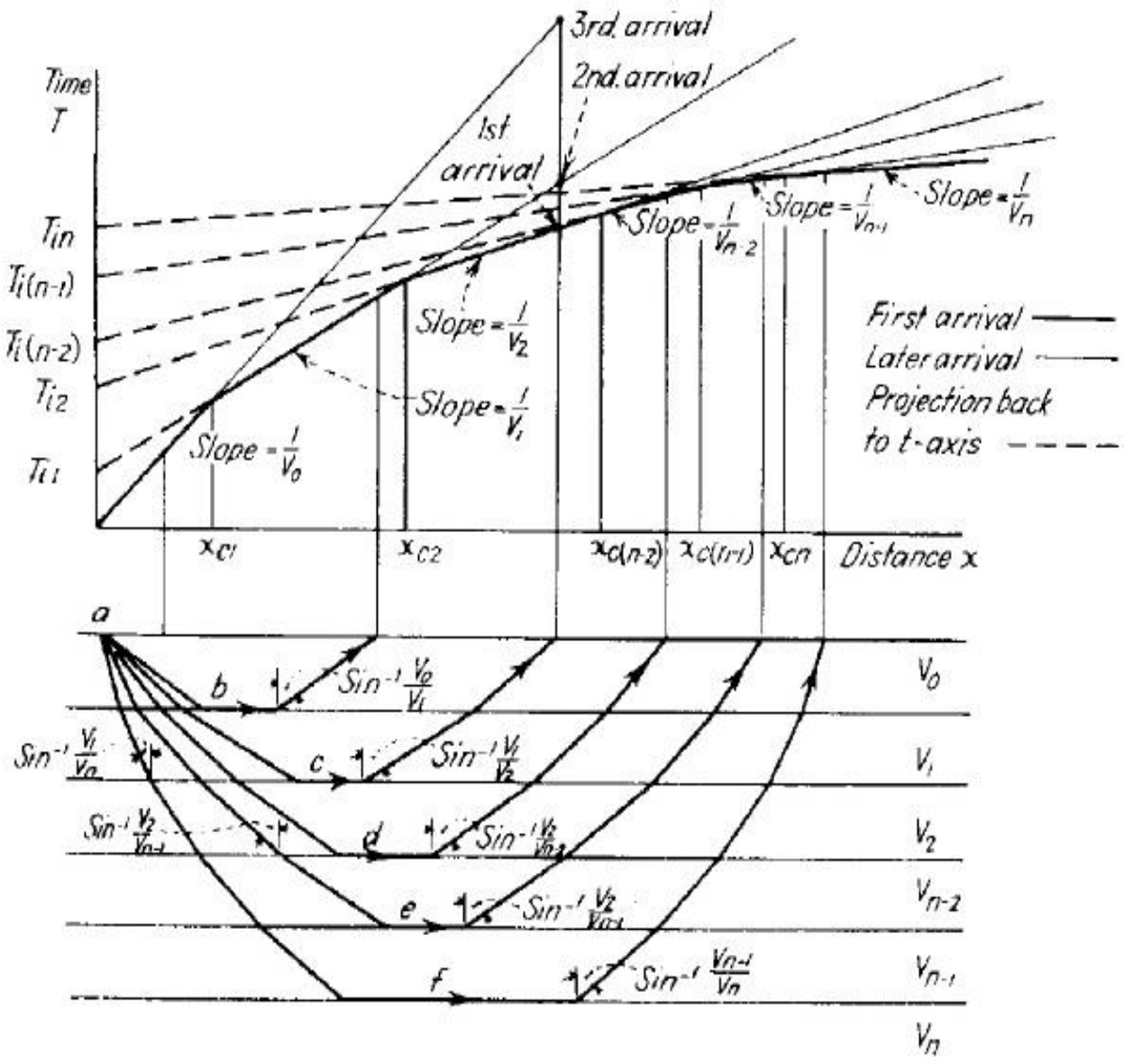
$$h_{(n-1)} = Xi_{(n-1)} \frac{(1 - sini_{(n-1)n})}{2cosi_{(n-1)n}} - \sum_{V=1}^{V=n-2} \frac{h_V \left[cosi_{Vn} - cosi_{V(n-1)}\right]}{cosi_{(n-1)n} sini_{V(n-1)}}$$

حيث أن:

$Ti_{(n-1)}$ = زمن القطع للطبقة رقم n

$Xi_{(n-1)}$ = المسافة الحرجة التي تتقاطع فيها الطبقتين $(n\text{-}1)$ و n.

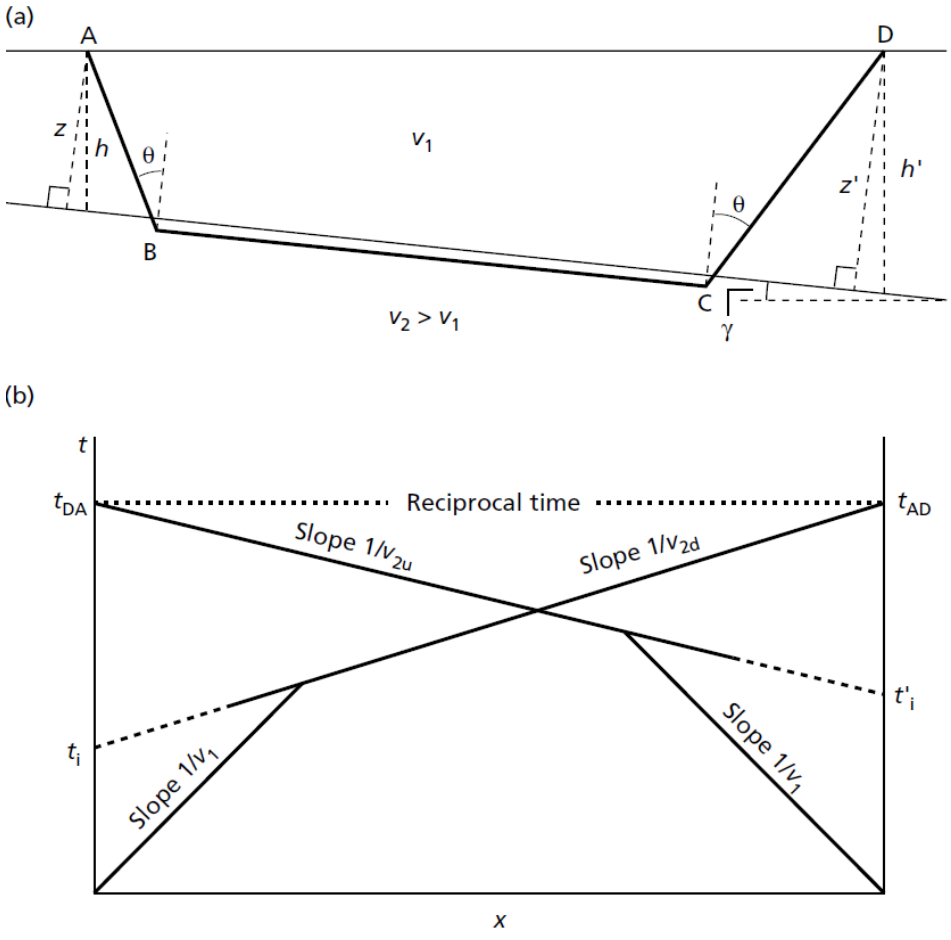
$i_{(n-1)n}$ = الزاوية الحرجة بين الطبقتين $(n\text{-}1)$ و n ، V_n = سرعة الطبقة n.



الشكل (٢-١٤) يمثل حالة طبقات متعددة متوازية مع سطح الأرض (Dobrin,1988)

٢-٧-٤ الطبقات المائلة للسطح الكاسر المستوي Dipping –layer interface

تكون الأسطح الفاصلة بين الطبقات في حالة الطبقات المائلة عبارة عن أسطح مائلة وسوف يؤثر ذلك على سرعة وصول الموجات السيزمية من كلا الجانبين كما في الشكل (٢-١٥). ولحساب السرعة والعمق ودرجة الميل للسطح الكاسر يجب أن تكون هنالك نقطتا تفجير عند نهايتي خط النشر(مباشر وعكسي) وفقاً للمعادلات التالية:



الشكل (٢-١٥) منحني زمن – مسافة في حالة الطبقات المائلة (Keary,2002)

$$\sin(i_C + \gamma) = \frac{V_1}{Vd} \qquad \sin(i_C - \gamma) = \frac{V_1}{V_u}$$

حيث أن (i_c) زاوية الورود الحرجة ، (γ) زاوية الميل أو (α) بمكان أخر.

ومن خلال جمع المعادلتين السابقتين نحصل على زاوية الورود الحرجة (i_c):

$$i_c = \frac{1}{2}\left(sin^{-1}\frac{V_1}{Vd} + sin^{-1}\frac{V_1}{V_u}\right)$$

وبطرح المعادلتين السابقتين نحصل على زاوية الميل (γ):

$$\gamma = \frac{1}{2}\left(sin^{-1}\frac{V_1}{Vd} - sin^{-1}\frac{V_1}{V_u}\right)$$

ويمكن حساب السرعة الحقيقية V_2 للطبقة الثانية من المعادلة الآتية :كما وردت أعلاه معادلات باستخدام V_uوV_d :

$$V_2 = \frac{V_1}{sini_C}$$

ويمكن حساب السمك للطبقة الأولى تحت كل نقطتي تفجير A و D من المعادلات الآتية:

$$Z = t_i \frac{V_1}{2cosi_C} \qquad Z' = t_i' \frac{V_1}{2cosi_C}$$

ولإيجاد العمق للسطح الكاسر تحت كل من A و D تستخدم القوانين الآتية :

$$h = \frac{Z}{cos\gamma} \qquad h' = \frac{Z'}{cos\gamma}$$

٢-٧-٥ الأسطح الكاسرة المتموجة (غير المستوية) Irregular interface

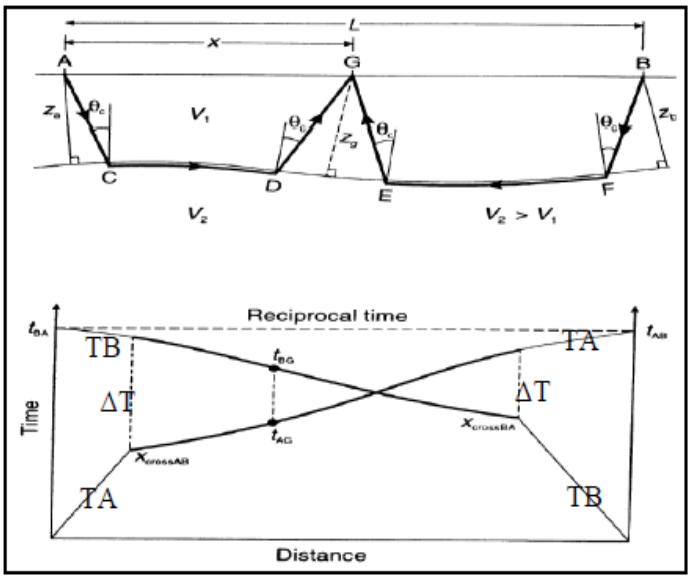
هنالك مجموعة من الطرائق وضعت لحساب سرعة وعمق السطح الكاسر غير المستوي (المتموج) وتعتمد جميعها على أن المسح يتم بالاتجاهين المباشر والعكسي ونذكر منها طريقة **الزائد – ناقص** وطريقة **التبادل العمومية** لكثرة استخدامها في تفسير البيانات السيزمية .

٢-٧-٥-١ طريقة زائد – ناقص (plus – Minus method)

وضع هذه الطريقة هيكدورن (Hagedoorn,1959) وهي طريقة تستخدم لحساب سرع وأعماق السطوح الكاسرة المنتظمة وغير المنتظمة عند مواقع اللواقط شكل (٢-١٦) ويشترط لتطبيقها ما يأتي:

١. وجود تجانس (Homogeneity) للطبقات.
٢. زاوية ميل السطح الانكساري تكون نوعا ما صغيرة (<١٠ درجة).

تستخدم هذه الطريقة مبادئ زمن القطع الزائد Plus time(T+) لحساب الأعماق h وزمن الناقص Minus time (T-) لحساب السرع.



شكل (2-16) مسار الموجة المنكسرة ومنحني زمن – مسافة يوضح مبدأ طريقة plus-minus (Hagedoorn ,1959) .

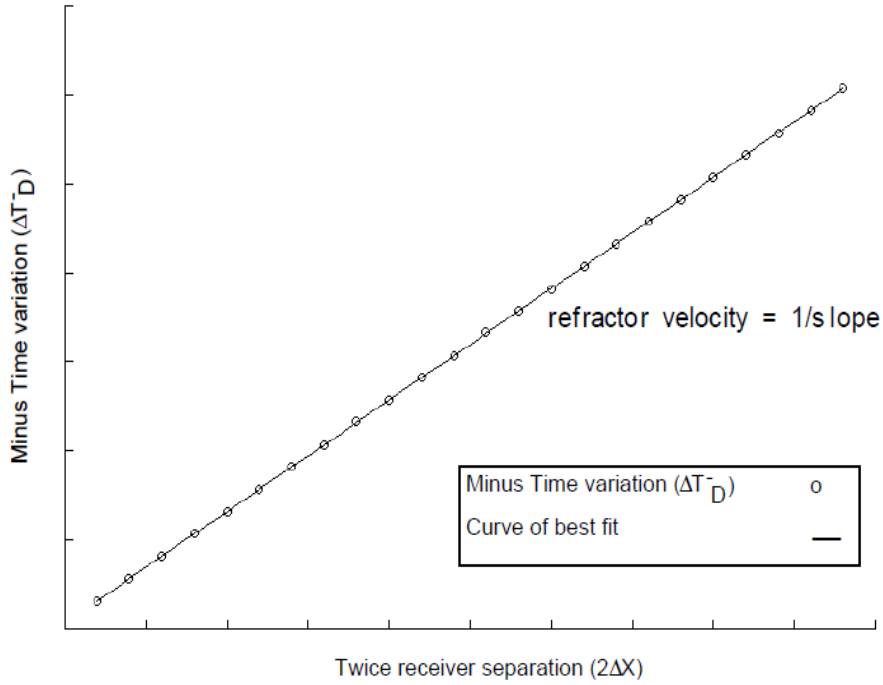
ان زمن الزائد للموجة لكل لاقط في المنطقة الواقعة ضمن منطقة التداخل للتسجيلين المباشر والعكسي يمثل مجموع زمن الوصول الأولي من جهة التفجير المباشر زائداً زمن الوصول الأولي من جهة التفجير العكسي ناقصاً الزمن الكلي كما في المعادلة (٢-٣٤):

$$T^{+} = T_{AG} + T_{BG} - T_{AB}$$

أما زمن الناقص فيحسب بطرح أزمنة الوصول الأول إلى اللاقط نفسها (T_B,T_A) من التفجيرين المعاكسين لبعضهما البعض أي أن:

$$T-= T_{AG} - T_{BG}$$

ويتم رسم هذه القيم مقابل ضعف المسافة بين اللاقطات نسبة إلى خط مرجعي يمثل قيمة الصفر بالنسبة للزمن على ورقة بيانية، المحور السيني X-axis يمثل ضعف المسافة بين اللاقطات و المحور الصادي Y-axis يمثل فرق الزمن (القيمة ΔT) بعد أن تثبت قيمة الصفر عليه. وتحسب السرعة من مقلوب ميل أفضل خط مستقيم يمر بين النقاط المسقطة، وتعد هذه السرعة السرعة الحقيقية للسطح الكاسر وتحت مواقع اللاقطات شكل (٢-١٧). في حين تكون السرعة التي تم الحصول عليها من خلال منحني المسافة– الزمن تكون سرعة ظاهرية.



الشكل (٢-١٧) إسقاط زمن الناقص بدلالة ضعف مسافة اللواقط لحساب السرعة (Jocelyn and Darren,1996)

إذا كانت سرعة الطبقة الثانية تتغاير على طول السطح الكاسر، فان قيم زمن الناقص (-T) لا تقع على استقامة واحدة في منحي (-X-T) عند ذلك نحسب سرعة الطبقة الثانية تحت كل مسافة يتغير فيها ميل الخط المرسوم لقيم (-T).

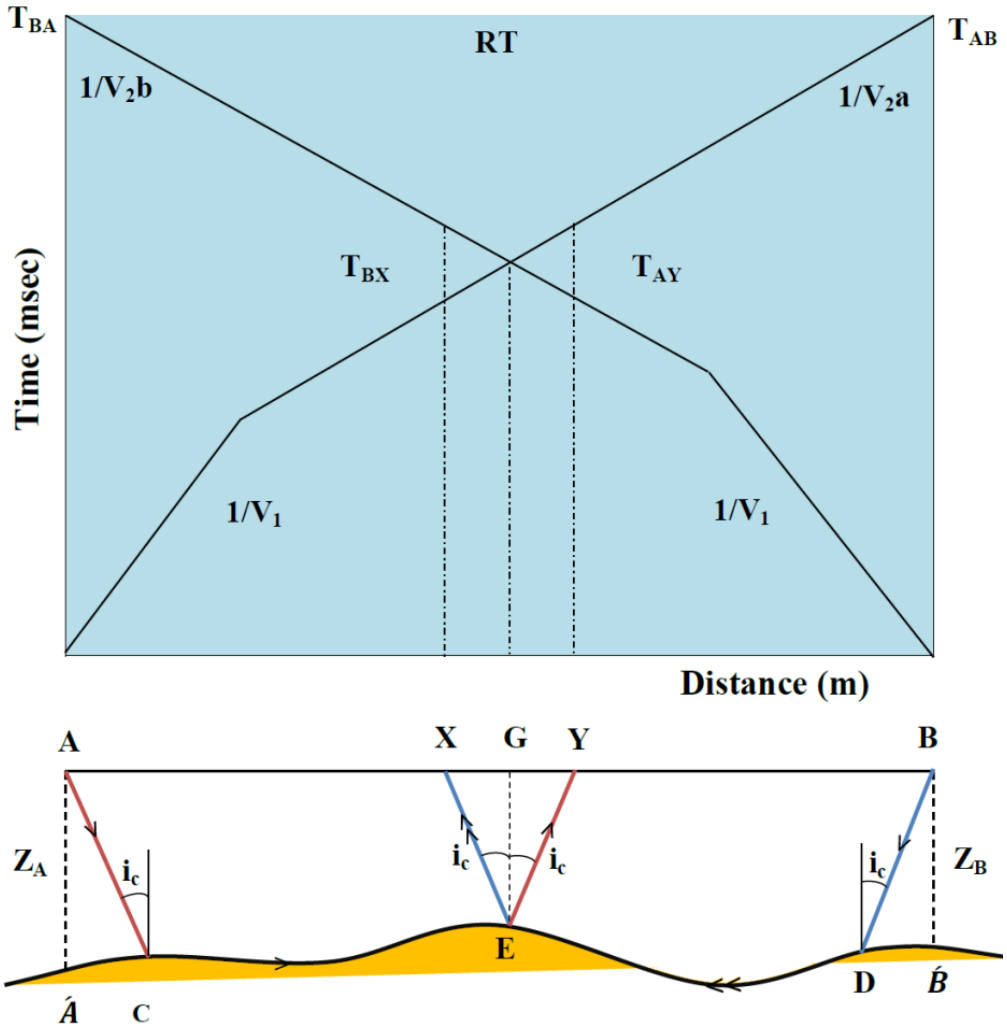
إن عمق السطح الكاسر (h) تحت كل محطة يحسب عن طريق زمن الزائد (+T) وذلك باستخدام المعادلة:

$$h = \frac{T^{+}V_1V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}$$

ولغرض رسم السطح الكاسر على مقطع عمق – سرعة ترسم الدوائر التي أنصاف أقطارها h تحت كل محطة بحيث تمثل مواقع هذه المحطات مراكز هذه الدوائر. يمثل المنحني المماس لهذه الدوائر شكل السطح الكاسر .يمكن إدراج شكل.

٢-٧-٥-٢ طريقة التبادل العمومية Generalized Reciprocal Time Method

و ضعت هذه الطريقة من قبل بالمر Palmer(1981) وهي طريقة ملائمة جدا لتفسير البيانات السيزمية الانكسارية للأسطح الكاسرة غير منتظمة الشكل (المتموجة) ذات التغاير الجانبي في سرعاتها السيزمية يوضح شكل (٢-١٨) مبدأ هذه الطريقة. وقد استخدمت هذه الطريقة للتحريات الموقعية لبعض السدود في العالم
Palmer ,1981; Hatherly and Nevilly ,1986;Lankstone,1989 ;Kilty et al.,1986 ; Abdel (Rahman at al.,1994



شكل (٢-١٨) مسار الأشعة المنكسرة لعدة طبقات يوضح مبدأ طريقة التبادل العمومية (GRM) في تفسير البيانات السيزمية الانكسارية (Palmer,1980)

ولغرض تامين وصول الأمواج من النقطة نفسها على السطح الكاسر يقاس زمن وصول هذه الأمواج عند نقطتين على سطح الأرض (لاقطتين أرضيتين) تفصل بينهما مسافة تحددها السرعة أو العمق التقريبيين للسطح الكاسر تدعى هذه المسافة بالمسافة المناسبة وقد أطلق عليها بالمر مصطلح (Optimum X-Y value) وتعيين هذه القيمة هو العامل المحدد في التفسير.

في الشكل (٢-١٨) محطتان لقياس زمن وصول الموجات (X-Y)، الموجة المتولدة عند النقطة (A) يقاس زمن وصولها إلى سطح الأرض عند المحطة (Y). أما المتولدة عند النقطة (B) فقياس زمن وصولها عند المحطة (X).

ومن ميزات طريقة(GRM) إن عامل تحويل العمق لا يتأثر بالميل حتى 20 درجة بسبب استخدام التسجيلات المباشرة والعكسية.

٢-٧-٦ طريقة المسح التصويري المقطعي Tomography Method

في السنوات العشرين الأخيرة ظهرت طريقة المسح التصويري ((Tomography) وتعد هذه التقنية من التقنيات الحديثة في مجال الجيوفيزياء ، وتعتمد على مبدأ العكس (Inverse). ولوحظ ازدياد استخدام هذه الطريقة في المجالات البيئية والهندسية .

٢-٨ مصادر توليد الأمواج السيزمية (Seismic sources)

أيا كانت الطريقة السيزمية المستخدمة (انعكاسية أو انكسارية) فان مصادر الطاقة تكون مطلوبة وتؤخذ بنظر الحسبان قبل البدء بعملية المسح الزلزالي .

إن المتطلبات الأساسية للمصادر السيزمية هي :

١. أن تكون الطاقة المتولدة من المصدر كافية للهدف الاستكشافي السيزمي الذي نقوم به.
٢. يجب أن يكون المصدر الذي يولد الطاقة السيزمية مقبولا بيئيا ، مع الأخذ بالحسبان الكلفة.

وتقسم المصادر التي تولد **الأمواج السيزمية** إلى نوعين :

١. المصادر التفجيرية (Explosive source):

وهي المصادر الأكثر استخداما لتوليد الأمواج في المسوحات السيزمية وهي عبارة عن استخدام كمية معينة من الديناميت في حفرة ضحلة (حوالي متر) في المناطق التي يمكن الحفر فيها ، ويستخدم نوع آخر من المتفجرات يسمى الحبال المتفجرة (cord explosive) في المناطق التي تكون ذات صعوبة في الحفر، وأي نوع من المتفجرات يكون آمنا يمكن أن يستخدم في العمل السيزمي.

٢. المصادر غير التفجيرية non-explosive source

أ- المطرقة (sledgehammer):

يستخدم هذا النوع من المصادر للمسوحات التي تكون على مسافات قصيرة ، تزن المطرقة عادة بين (٥-١٠) كغم تعتمد الطاقة الناتجة من هذه الأداة على حالة الأرض و المهارة وقوة الطرق ، وتستخدم المطرقة دائما في المسوحات الزلزالية الانكسارية الضحلة .

إن طريقة عمل المطرقة هو تسديد ضربة على صفيحة مستوية (Flat Plate) من الألمنيوم او من الفولاذ يبلغ سمكها حوالي الانش (٢.٤٥) سم. علما بأنه يمكن استخدام الصفيحة بقرص مطاطي سميك يكون أكثر توليد للضوضاء واقل تمييز.

ب- الوزن الهابط (Weight Drop):

يعد هذا المصدر من أكثر المصادر الصدمية ((impact) قوة وتستخدم في المسوحات الكبيرة وهي عبارة عن ثقل يبلغ من الوزن مئات الكيلوغرامات ويمكن رفعه برافعة إلى ارتفاع أكثر من ٣ متر وبعد ذلك إسقاطه على الأرض مولدا بذلك طاقة زلزالية كبيرة.

جـ - الرجاجات الميكانيكية ((Vibrosis):

تعد الرجاجات الميكانيكية من أكثر الطرائق الواسعة الاستخدام وذات شعبية كبيرة في المسوحات السيزمية لكفاءتها ولكونها من المصادر التي تكون صديقة للبيئة ويمكن استخدامها في المناطق المأهولة بالسكان ، تتألف الرجاجات الميكانيكية من هزاز ميكانيكي يثبت على شاحن ثم يجري توليد سلسلة من النبضات ذات ترددات مختلفة تصاعديا من (٦-٦٠ هرتز) في عدة ثوان وجرت العادة على ان يعمل عدد من الهزازات بالمسح بصورة آنية بمنظومات مصدرية مصممة بطرقة ملائمة لتقليل الضوضاء السطحية (Sharma,1986).

٢-٩ الضجيج السيزمي Seismic Noise

تعد الضجيج السيزمي من المشاكل الرئيسية التي تواجه العمل في الطريقة الزلزالية ، حيث أن هذه المشكلة تأخذ مبالغ طائلة من المال وتحتاج إلى جهد كبير لتطوير الأجهزة المستخدمة في المسح السيزمي، الغرض منها تحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N ratio) وزيادة هذه النسبة تمكننا من التوصل إلى نتائج أفضل وأدق في تفسير البيانات السيزمية. تشير كلمة الإشارة إلى أي حدث يمكن تسجيله والاستفادة منه للحصول على معلومات مفيدة في المسح السيزمي، وفي الغالب تكون هذه هي الموجات الانضغاطية والموجات القصية (P and S- waves) المسجلة في

المسوحات الانعكاسية أو الانكسارية وما عدا هذه الموجات يعد ضوضاء في المسح السيزمي (Sheriff and Geldart,1995)، وتقسم الضوضاء إلى نوعين :

٢-٩-١ الضجيج المترابط Coherent noise

وهي الضوضاء التي يمكن في بعض الأحيان حساب سرعتها وهذا النوع يتضمن:

١. الأمواج السطحية (surface waves or Ground roll) وتكون ذات تردد قليل اقل من (٣٠Hz) وسرعة قليلة وتكون سعتها عالية.
٢. الأمواج الصوتية و تكون ذات سرعة معروفة (320-340 m/sec) وتردد أقل من ٢٠Hz.
٣. التشتت الجانبي للموجات (Side scattered) نتيجة وجود عدم تجانس في التضاريس..

إن النوع المهيمن على هذا النوع من الضوضاء هو الأمواج السطحية (ground roll).

٢-٩-٢ الضجيج العشوائي Random or incoherent noise

تكون عشوائية في سعتها وغير متوقعة الحدوث ويطلق عليها أحيانا (Ambient noise) وتتضمن:

١. الحركة المستمرة للاقط عند عدم غرسها بصورة صحيحة يؤدي إلى حركتها المستمرة.
٢. تأثير الهواء على هز اللاقط أو تسبب حركته تحريك أغصان الأشجار ومن ثم انتقال الحركة إلى الأرض من خلال الجذور.
٣. تأثير الحصى المتطاير من التفجير والعائد إلى سطح الأرض بالقرب من اللاقط.
٤. تأثير حركة القطارات والطائرات والمركبات و المحركات الكبيرة ، وحركة الأشخاص بالقرب من الجيوفونات وما إلى غير ذلك .

٢-١٠ الغموض في الطريقة الانكسارية Ambiguity of refraction method

رغم دقة نتائج التفسيرات للطريقة السيزمية الانكسارية في تحديد سماكات الطبقات الأرضية وأعماقها وسرعاتها لكن يصاحبها في بعض الأحيان غموض يؤثر على الدقة في حساب الأعماق بسبب مشكلة الطبقة المخفية (Hidden Layer) التي لا تظهر على منحني زمن – مسافة .

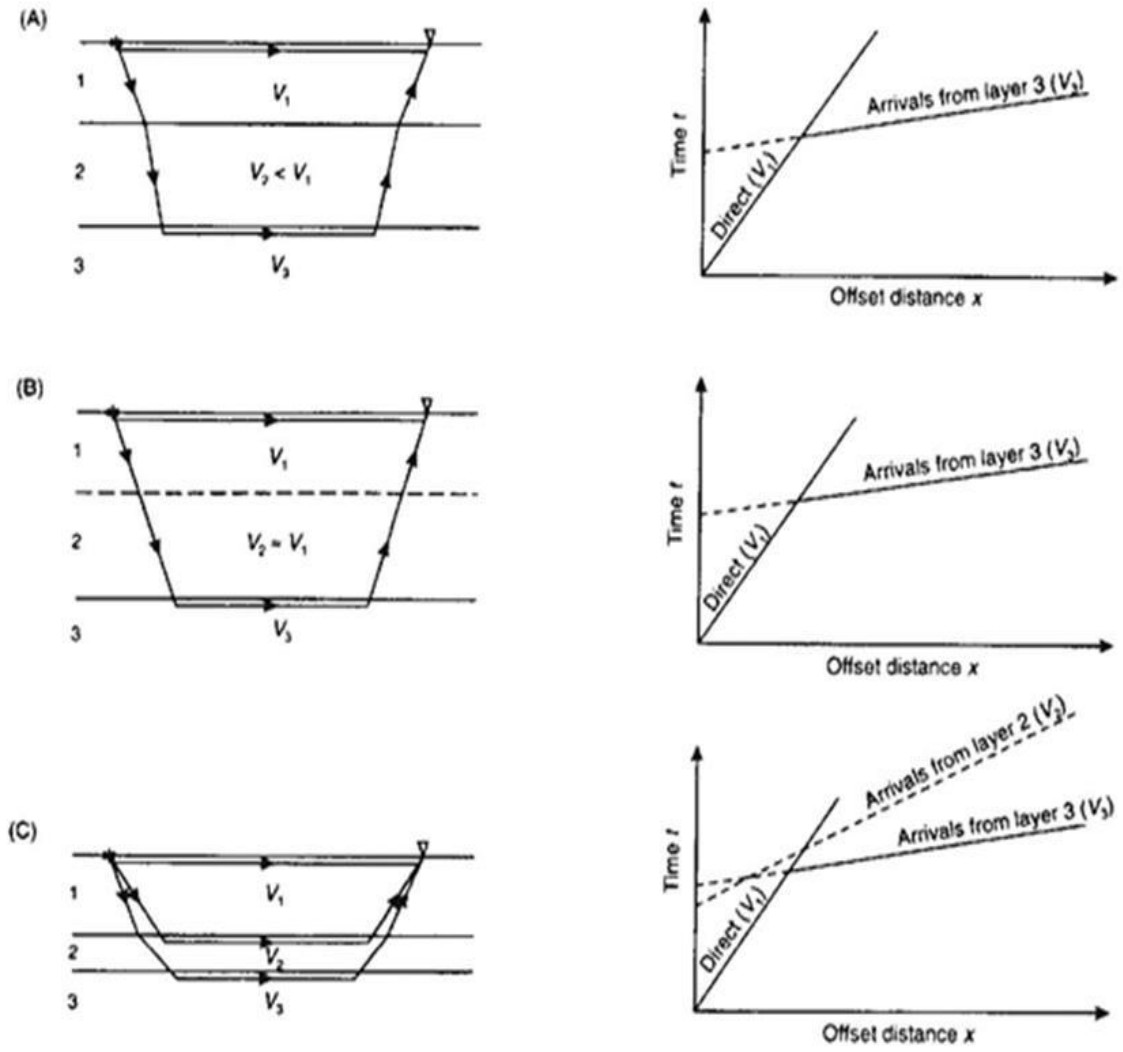
٢-١٠-١ الطبقة المخفية The Hidden Layer

نوقشت حالة الطبقة المخفية وعالجها العديد من الباحثين (Soske,1959) ، (Morgan, 1967) ، (Banerjee and Gupta, 1975) الذين اجمعوا على أن سبب عدم ظهورها على منحني المسافة– الزمن يعود إلى:

١. إذا كانت هناك طبقة في التتابع الطبقي لها سرعة سيزمية أقل من التي تعلوها، لا يمكن كشفها بالتسجيل السيزمي الانكساري على الإطلاق لأن الأمواج التي تدخل مثل هذه الطبقات من أعلى تنحرف دائما في الاتجاه إلى أسفل، كما هو مبين بالسطح الفاصل بين الطبقات V_1 و V_2 كما في الشكل (A19-2) وبذلك لا تنتقل أفقيا خلال الطبقة و تبعا لذلك لن يوجد جزء يمثل V_2 على منحنى زمن – مسافة . يتسبب وجود مثل هذه الطبقات في خطأ تفسير العمق للطبقات السفلى إذ تبدو الطبقات التي تحتها أكثر عمقا عن الحقيقة، ويعتمد قيمة Intercept time للطبقة الثالثة على السمك و السرعة السيزمية للطبقة الثانية.
٢. إذا كان سمك الطبقة التي لها سرعة متوسطة قليل مقارنة بالطبقة التي تعلوها والطبقة التي تحتها صغيرة شكل (C19-2) أو تباين السرعة بينها وبين الطبقة التي تحتها يكون غير كاف كما في الشكل (B19-2). وفي هذه الحالة لا يمكن تسجيل أول وصول من الطبقة الثانية لأن الوصول من الطبقات ذات السرعات V_1 و V_3 يكون مبكراً عند مسافات الاستقبال جميعها.

٢-١١ تخامد الأمواج السيزمية Seismic Waves Attenuation .٣

٤. التخامد او التوهين هو اضمحلال طاقة الموجة أو نقصان سعتها مع المسافة ويعتمد هذا النقصان على الحالة الفيزيائية والجيولوجية للوسط الذي تسير فيه الموجة. ويحدث اضمحلال الموجة لأسباب عديدة منها الانتشار الهندسي والتشتت والانعكاسات المتعددة وعدم التجانس إضافة إلى تحويل جزء من الطاقة المرنة إلى حرارة ، فالرواسب الحديثة الهشة والمفككة غالبا ما تعمل على امتصاص طاقة الموجة السيزمية ، أما الصخور الصلبة فإنها تكون اقل امتصاصا لطاقة الموجة السيزمية . لقد بدأ الاهتمام بالتوهين في الدراسات الزلزالية لقدرته على تحديد نوعية الصخور (Lithology) والتمييز بين الأوساط المشبعة وغير المشبعة. إن قياس التوهين صعب من الناحية العملية بالإضافة الى صعوبة تفسير النتائج بسبب تداخل عدة عوامل تساهم في اضمحلال الموجة وصعوبة تقدير كل عامل من هذه العوامل على انفراد مثل ميكانيكية المصدر وتشتت الموجة والانتشار الهندسي لجبهة الموجة.



شكل (٢-١٩) حالات ظهور الطبقة العمياء في المسح السيزمي الانكساري (Reynold,2003)

الفصل الخامس
المعاملات الجيوتكنيكية
طريقة التحليل متعدد القنوات للأمواج السطحية والتقييم الجيوتكنيكي للمنطقة

٥-١ تمهيد

تعتمد سرعات الموجات السيزمية على معاملات المرونة للطبقات الصخرية التي تنتقل فيها لذلك تم حساب هذه المعاملات اعتمادًا على سرعات الموجة الانضغاطية V_p والقصية V_s والكثافة المحسوبة حقليا للطبقات. استخدمت في العقدين الأخيرين السرعات السيزمية في تحديد الكثير من المعاملات الهندسية التي كان يتم حسابها مخبرياً فقط .
إن الأمواج المستعرضة هي الأمواج الأكثر أهميةً في الدراسات الهندسية لتقدير الخواص الجيوتكنيكية ، بالإضافة لعلاقتها بمعاملات صلابة الصخور Stiffness وتقدير درجة الانضمام consolidation.
بالرغم من بعض الصعوبة في توليد هذه الأمواج والتقاطها إلا أن الدراسات الحديثة أكدت على استخدامها في إيجاد العلاقات الرياضية للعديد من الخصائص الجيوتكنيكية لان سرعات هذه الأمواج دليل مباشر لصلابة التربة التي لوحظ ازدياد تطبيقاتها باستمرار في الهندسة الجيوتكنيكية والدراسات الموقعيه.
إن الأمواج المستعرضة أمواج مستقطبة لذلك تتأثر بالمحتوى الصخري والشقوق والكسور والفواصل فعندما يكون استقطابها بشكل موازي لهذه الكسور فان سرعاتها تكو ن أبطأ منها في حالة استقطابها عمودي على هذه الصخور، لذلك تعكس حالة عدم التجانس Anisotropy بشكل أكفأ من الأمواج الطويلة.
يمكن أن تتحلل حركة الجزيئات في الأمواج القصية إلى مركبتين: مركبة أفقية (V_{Sh}) ومركبة عمودية (V_{Sv}) وتكون موازية أو عمودية على السطح الفاصل Interface على التوالي.
من الممكن أن تتحول المركبة العمودية للموجة المستعرضة (V_{Sv}) إلى موجة طولية وبالعكس عند انعكاسها وانكساره أيضا على السطوح البينية الفاصلة بين الطبقات. أذاً من الأفضل الاعتماد على المركبة الأفقية للأمواج المستعرضة (V_{Sh}) في دراسة الخصائص الهندسية للتربة.

٥-٢ جمع معطيات الأمواج القصية

يتم الحصول على بيانا ت الأمواج القصية بطرائق مختلفه منها:

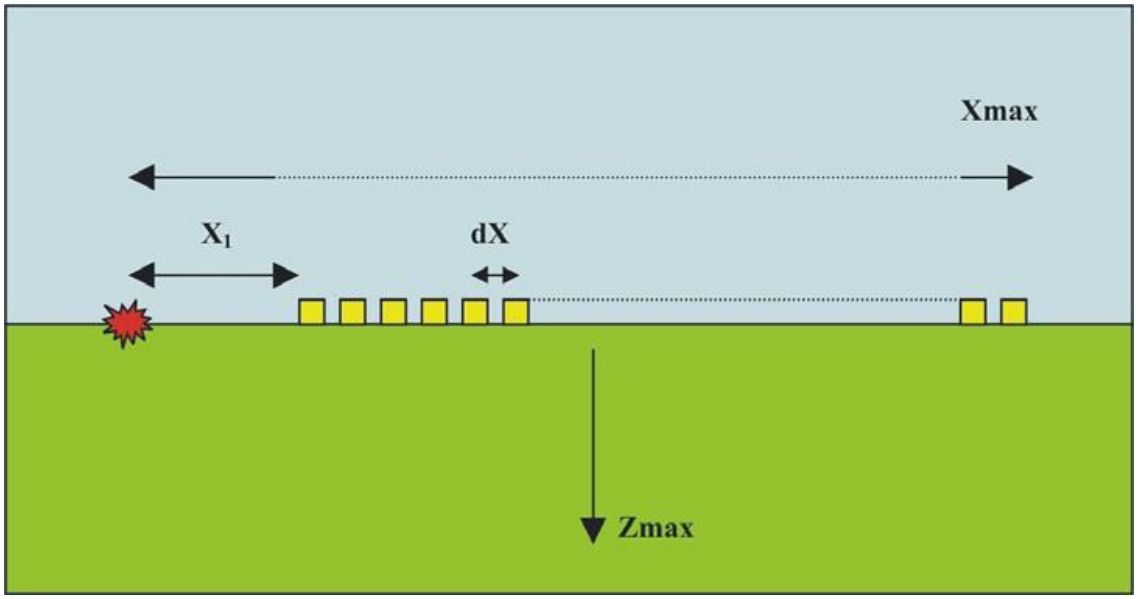
١. إجراء مسح سيزمي انكساري قصي (Shear Refraction) مشابه لطريقة المسح السيزمي الانكساري للأمواج P باستخدام لواقط عرضية مستقطبة الأفقية (V_{SH}-wave).
٢. استخدام تقنية التحليل متعدد القنوات الأمواج السطحية (موجات رايلي) Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW)

إن أسلوب جمع البيانات بطريقة (MASW) ببساطة يمكن وصفها بأنها تسجيل البيانات لأمواج رايلي. الهدف منها تسجيل الأمواج السطحية بنسبة إشارة إلى الضجيج بأكبر مدى ترددي ممكن لكي يمكن نتعرف على درجة التشتت وان نسبة الإشارة إلى الضجيج العالية تتيح لنا عزل الأنواع المختلفة من الأمواج .

تجرى عملية جمع البيانات للأمواج السطحية بتقنية MASW بطريقة مشابهة لطريقة المسح السيزمي الانكساري التقليدي شكل (٥-١) باستخدام هندسية نشر اللواقط العامودية وبمسافات متساوية وتنجز دائما من خلال تفجيرين مباشر و عكسي .

إن أقصى عمق تحري (Z_{max}) يمكن تحقيقه بين (٣٠-٥٠م) يتغير هذا العمق تبعا لتغير مواقع ونوع مصادر الطاقة وطول النشر. إن طول النشر (X_{max}) يكون عادة أكبر أو يساوي العمق الأقصى حسب العلاقة الآتية:

$$X_{max} = mZ_{max} \ (1 \leq m \leq 3)$$



شكل (٥-١) هيكلية القياس ومعاملات جمع بيانات الأمواج السطحية بطريقة MASW تمثل (dx) المسافة بين اللواقط وتمثل (X max) طول النشر وتمثل (Z max) عمق التحري الأعلى.

٥-٣ مبادئ التحليل بطريقة متعدد القنوات للأمواج السطحية Principle of MASW Method

إن طريقة التحليل متعدد القنوات للأمواج السطحية (MASW) هي إحدى الطرائق السيزمية غير التدميرية المبتكرة التي استخدمت في بدايات القرن الواحد والعشرين . وتستخدم هذه الطريقة خصائص موجات رايلي للحصول على سرعات الأمواج القصية . التي تستخدم بشكل كبير في التطبيقات العديدة ذات العمق الضحل والمتعلقة بالأعمال البيئية والهندسة الجيوتكنيكية.

يمكن تقسيم هذه التقنية إلى نوعين: النوع الأول يسمى التحليل الفعال (Active MASW) وتستخدم فيه الطريقة السيزمية التقليدية والنوع الثاني يسمى التحليل السلبي (Passive MASW) حيث تستخدم فيه الضوضاء مصدراً للطاقة .

يتيح النوع الأول لنا قياس منحنيات التشتت الظاهرية (Apparent Dispersion curve) أو السرعة الطورية (phase velocity) ضمن مدى تردد (٥-٧٠ هرتز) التي تعطي معلومات حول الطبقات الضحلة (٣٠-٥٠م) وبالاعتماد على صلابة الأرض وطول النشر. أما النوع الثاني فتتيح القياس ضمن الترددات (١٠-٠ هرتز) التي تعطي معلومات لأعماق اكبر وعادة تكون أكثر من (٥٠م) بالاعتماد أيضا على صلابة الأرض.

٥-٤ معالجة بيانات تقنية MASW وتفسيرها حاسوبيا

Processing and interpretation of MASW by computer

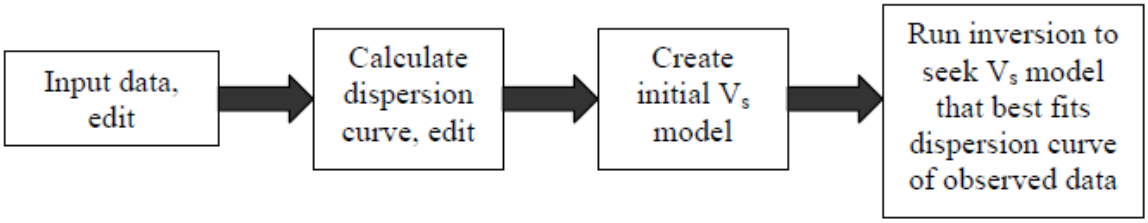
يتم تحليل بيانات MASW باستخدام برنامج مختلفة منها على سبيل المثال لا الحصر SeisImager/SW و Winseis من خلال عملية العكس لحساب الموديل أحادي البعد 1D لسرعات الأمواج القصية ، تتألف عمليات المعالجة من استخلاص خصائص التشتت (طور السرعة لموجات رايلي المهيمنة كدالة للتردد) ويتم ذلك بتحليل البيانات الأولية للمسح التي تكون متأثرة بالأحداث السيزمية الأخرى وباستخدام تحويلات فورييه Fourier transform ثم نرسم منحنيات التشتت باستخدام تحويلات (f-k) التي تتيح لنا رسم البيانات المهيمنة حيث أن التردد والسرعة لكل نقطة يمكن حسابها بسهولة وذلك من خلال العلاقة الآتية:

$$V = \frac{f}{k}$$

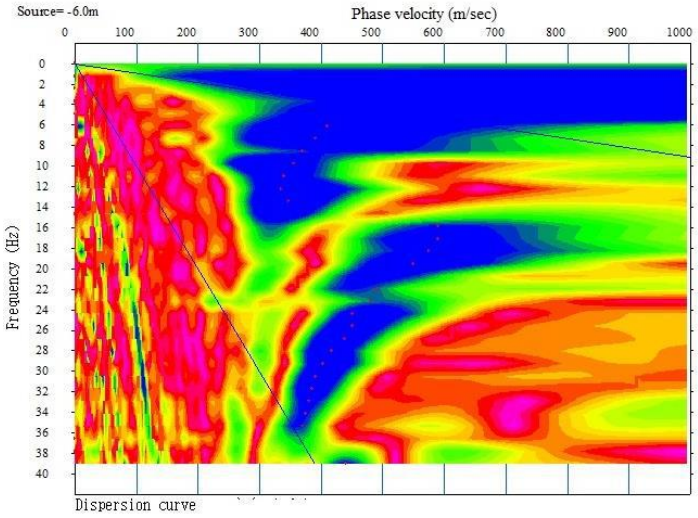
حيث أن: (V) طور السرعة المرتبط بالتردد (f) ، (k) عدد الأمواج .

إن تحويلات (f-k) تعطي صورة شكل انتشار الأمواج السطحية ومنحنيات التشتت تعرض دائماً كطور للسرعة مع التردد الشكل (٥-٣).

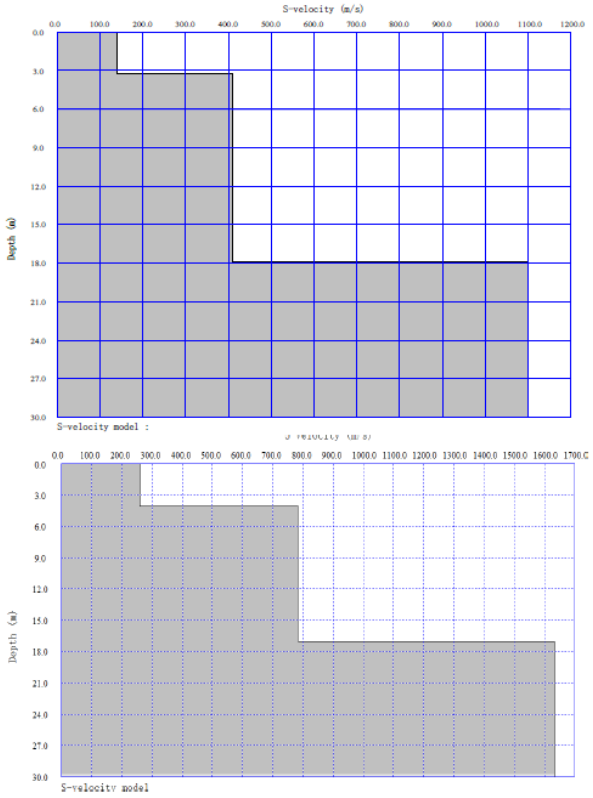
يتم حساب الموديل أحادي البعد للسرعات القصية باستخدام منحنيات التشتت المحسوبة بطريقة المربعات الأدنى اللاخطية (non-linear least square) من خلال عملية العكس التكرارية (Iteration Inversion) لهذا الموديل التي تعتمد على اقل نسبة من (RMS) بين طور السرعات والبيانات الملاحظة . و تعطي عملية العكس لمنحنيات التشتت التغييرات العامودية في سرعات الأمواج القصية (Vs) مع العمق تحت المنطقة الممسوحة . يوضح الشكل (٥-٤) موديل أحادي البعد للسرعات القصية تم حسابه بواسطة برنامج SeismImager/SW.



شكل (٥-٢) مخطط انسيابي لعمليات المعالجة في برنامج SeisImager/SW (OYO Corporation, 2006)



شكل (٥-٣) منحني التشتت Dispersion Curves بين التردد وطور السرعات



شكل (٥-٤) مقطعين أحادي البعد للسرعات القصية للطبقات الثلاث في وسط منطقة الدراسة

٥-٥ حساب سرعات الأمواج القصية Computation of Shear Waves velocity

تم حساب السرعات للمركبة العمودية للأمواج القصية (V_{sv}) بطريقة MASW، يمكن أن تستخدم هذه القيم مباشرة بوصفها سرعا ت للأمواج القصية عندما لا تتوفر لدينا قيمة السرعات للمركبة الأفقية للموجة القصية (V_{sh}) وعندما تتوفر لدينا قيمة (V_{sh}) من مسح آخر مثل (Shear seismic Refraction or cross hole ,etc) يمكن أن تستخدم قيم (V_{sv}) لتصحيح قيم (V_{sh}) اذا كانت نسبة الفرق بينهما أقل من ١٥%. وتصحح السرعات للمركبة الأفقية للأمواج القصية (V_{sh}) بضرب قيم V_{sv} بمعدل النسبة بين المركبتين $\frac{V_{sh}}{V_{sv}}$.

يظهر الجدول (٥-١)مثال لحساب سرعات لكلا المركبتين للموجة القصية لقيم (V_{sv}) المحسوبة بوساطة (SWM) surface wave methods وقيم (V_{sh}) المحسوبة بالمسح القصي الانكساري و قيم (V_{sh}) المصححة.

جدول (٥-١) سرعات الموجات القصية Vsv وسرعات الموجات القصية Vsh والسرعات المصححة لـ Vsh

Layers	SWM Vs_v (m/sec)	Refraction Vs_h (m/sec)	Vs_h/Vs_v Ratio	SWM corr. Vs_h = Vs_v *0.99 (m/sec)
Layer 1	140-260	150-300	1.07-1.15	138-257
Layer 2	410 -790	375-650	0.91-0.82	410-775
Layer 3	1100-1630	-------		1100-1630
			Av.=0.99	

٥-٦ قياسات الكثافة حقلياً و مخبريا:

تمثل العلاقة بين السرعة السيزمية V والمرونة e والكثافة ρ بالمعادلة التالية : $V = \sqrt{\frac{e}{\rho}}$

إن كثافة الوسط المرن الذي تنتشر فيه الأمواج السيزمية هو أحد العاملين المباشرين المؤثرين على تلك السرعات. وأي زيادة في الكثافة بنسبة معينة تؤدي إلى زيادة المرونة أضعاف هذه النسبة وتؤدي بالنتيجة إلى زيادة السرعة ، وأي خطأ في قياس الكثافة للوسط المرن الذي تنتقل خلاله الموجة السيزمية يؤدي إلى أضعاف هذه النسبة من الخطأ في قيم معاملات المرونة. ونسبة الخطأ في قياس الكثافة لنماذج التربة تحت السطحية تزداد إذا ما اقتربنا من سطح الأرض خاصةً للطبقات ذات التغير الجانبي. وأحيانا يحصل عدم الدقة في حساب الكثافة ρ مخبريا وحقليا لأسباب متعلقة بتأخير فحص النموذج مخبريا الذي يفقد بعض خواصه الفيزيائية وخاصةً الرطوبة او عندما تكون النماذج المختارة او المواقع في الحقل لا تمثل الطبقة عموما او جعل قيمة الكثافة لعموم الموقع والأعماق وهذا يعطي أخطاء في حساب معاملات المرونة.

مثال:

تم حساب قيمة الكثافة ρ للطبقة الأولى والثانية بطريقة المخروط الرملي (sand cone) وتمت الاستعانة بجهاز قياس الكثافة من مختبر جيوتكنيك التربة العائد إلى كلية الهندسة المدنية بجامعة الموصل وتتلخص هذه الطريقة بعمل حفرة دائرية الشكل بقطر حلقة الجهاز ووزن كمية التربة المستخرجة منها بميزان اليكتروني ثم تملأ الحفرة برمل معلوم الكثافة والوزن وخلال معادلات رياضية بسيطة تحسب الكثافة الحقلية لكل طبقة .

تم إجراء العديد من القياسات واخذ قيم الوسطية للطبقة الأولى والتي تتراوح ما بين (١.٣١-١.٤٨ غ/سم^٣) التي تمثل الترب السطحية وللطبقة الثانية تتراوح بين (١.٦٢-١.٧٨ غ/سم^٣) تمثل ترسبات المصاطب النهرية ، اما بالنسبة للطبقة الثالثة التي تتكون من صخور المارل Marl فقد تم حسابها مخبريا بطريقة السائل المزاح ولأكثر من نموذج وموقع وبلغت قيمتها بين (١.٩٢-٢.١ غ/سم^٣).

٥-٧ تقييم الخصائص الجيوتكنيكية Evaluation of geotechnical properties

إن عملية التقييم الجيوتكنيكي الموقعي ذات أهمية كبيرة في أعمال الهندسة المدنية كبناء المنشآت الإستراتيجية أو الصناعية المهمة والسدود والمحطات الكهرومائية والجسور والطرق السريعة والمواقع النووية وغيرها ويتم ذلك اعتماداً على قياس الخصائص الجيوتكنيكية للترب والطبقات الجيولوجية التحت سطحية .

بتم قياس الخصائص الجيوتكنيكية اعتماداً على سرعات الموجات الزلزالية (V_P) و (V_S) والكثافة المقيسة حقليا جدول (٥-٢)، وبالاعتماد على العلاقات المبينة بالجدول (٥-٣) و (٥-٤).مثال لنفس الموقع السابق:

جدول (٥-٢) السرعات المتوسطة Mean الأمواج الطولية والقصية للطبقات الثلاث

Velocity	Layer 1	Layer 2	Layer 3
V_p (m/sec)	350-700	840-1700	1900-2800
$Vs_{h(corrected)}$ (m/sec)	138-257	410-775	1100-1630
Density gm/cc	1.31-1.48	1.62-1.78	1.92-2.1

جدول (٥-٣) المعادلات المستخدمة في حساب معاملات المرونة

Elastic Module	Used Formula	Reference
Poisson's Ratio (δ)	$\sigma = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{1}{(V_p/V_s)^2 - 1}\right]$	Adams (1951), Salem (1990)
Young's Modulus (E)	$E = \rho\left[\frac{3Vp^2 - 4Vs^2}{\left(\frac{vs}{vp}\right)^2 - 1}\right]$	Adams (1951)
Lame's Constants (λ)	$\lambda = \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}$	King (1966), Toksoz et al. (1976)
Shear Modulus (μ)	$\mu = \left[\frac{E}{2(1+\sigma)}\right]$	King (1966), Toksoz et al. (1976)
Bulk modulus (K)	$K = \frac{E}{3(1-2\sigma)}$	K. Knödel,et al (2007)

جدول (٥-٤) المعادلات المستخدمة في حساب الخواص الجيوتكنيكية

Dynamic Module	Used Formula	Reference
Stress Ratio (S_i)	$S_i = 1-2\left(V_S/V_p\right)^2$	Abd El-Rahman, (1991)
Index Material (V)	$V = \frac{3-(V_p/V_s)^2}{(V_p/V_s)^2-1}$	Abd El-Rahman, (1994)
Concentration Index (C_i)	$Ci = \left[3-4\left(\frac{V_S^2}{V_P^2}\right)\right]/\left[1-2\left(\frac{V_S^2}{V_P^2}\right)\right]$	Abd El-Rahman, (1991)
Desity Gradient (D_i)	$D_i = \left[\left(\frac{3}{V_P^2}\right)-\left(\frac{4\mu}{E}-1\right)\right]=\left[\left(\frac{3}{V_P^2}\right)-\left(\frac{1-\delta}{1+\delta}\right)\right]$	Abd El-Rahman, (1991)

١- نسبة بواصون (δ) *Poisson's Ratio*

لحساب نسبة بواصون تستخدم العلاقة الرياضية: $\sigma = \frac{1}{2}\left[1-\frac{1}{(V_P/V_S)^2-1}\right]$

تكون قيمها مرتفعة في الطبقة الأولى مما يدل على ضعفها وانخفاض قيمتها في الطبقة الثالثة يدل على صلابتها. وحسب الجدول (٥-٥) فان الطبقة الأولى تصنف على أنها طبقة غير صلبة - قليلة الصلابة اما الطبقة الثالثة فتقع ضمن الطبقات الصلبة.

جدول (٥-٥) وصف نوعية التربة بالاعتماد على نسبة بواصون ومعامل المادة(مثال)
Birch(1966),Gassman(1973),Tatham(1982),Sheriff and Geldart(1986)

Soil description parameter	Incompetent to slightly competent	Fairly to Moderate competent	Competent materials	Very high competent materials
Poisson's Ratio (δ)	0.41-0.49	0.35-0.27	0.25-0.16	0.12-0.03
Material Index (V)	(-0.5)-(-1)	(-0.5)-(0.0)	0.0-0.5	>0.5

١. معامل يونغ (E) Young's Modulus:

حسبت قيم هذا المعامل باستخدام المعادلة (٥-٢) الآتية: $E = \rho\left[\frac{3V_P^2-4V_S^2}{\left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2-1}\right]$

يتناسب معامل يونغ طردياً مع سرعات انتقال الأمواج ، أي أن معامل يونغ يزداد بزيادة سرعات الموجات السيزمية وزيادة صلابة الصخور.

٢. المعامل الحجمي Bulk Modulus (K):

حسب هذا المعامل باستخدام المعادلة (٢-٧) الآتية: $K = \frac{E}{3(1-2\sigma)}$

٣. معامل القص أو الصلابة Rigidity or Shear Modulus (μ):

حسبت قيم هذا المعامل باستخدام المعادلة (٢-٩) وباستخدام العلاقة بين معامل يونغ ونسبة بواسون

$$\mu = \left[\frac{E}{2(1+\sigma)}\right]$$

ان علاقة هذا المعامل مع العمق ومع السرعات السيزمية يزداد بزيادة سرعات الموجات السيزمية ويتناسب طرديا معها ومع العمق.

٤. ثابت لامي Lame's Constant (λ):

تم حساب هذا المعامل من علاقته مع نسبة بواسون ومعامل يونغ: $\lambda = \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}$

تصرف هذا المعامل يكون مشابها لمعامل الصلابة ومعامل يونغ أي يزداد بزيادة صلابة الصخور.

٥. معامل المادة Material Index (V):

يعرف هذا المعامل هندسيا على انه القيمة المستخدمة لتحديد نوعية المواد ودرجة كفاءتها لأسس البناء، أما (Abd Al-Rahman,*1989*) فقد عرفه على انه تعبير عن درجة الصلابة بالاعتماد على معاملاتها المرنة. وهذا المعامل له علاقة مع تركيب المادة ودرجة التماسك والتكسر والفواصل ووجود او عدم وجود السوائل في الفراغات ، وهذا بدوره يوثر على طبيعة الوسط وعلى سرعات الموجات السيزمية . اشتق (Abd Al-Rahman,*1989*) المعادلة (٥-٤) بدلالة سرعات الأمواج الطولية والقصية والتي استخدمت في حساب هذا المعامل في الدراسة الحالية

$$V = \frac{3-(V_P/V_S)^2}{(V_P/V_S)^2-1}$$

بينت هذه القيم انخفاضاً واضحاً عند الطبقة الأولى التي كانت ضعيفة ومفككة وارتفعت قيمتها نسبياً عند الطبقة الثالثة الأكثر صلابة، وعند مقارنة هذه القيم مع القيم المذكورة في الجدول(٥-٥) نرى ان الطبقة الثالثة هي ضمن الطبقات الصلبة.

٦. معامل التركيز Concentration Index (C_i):

من المعاملات الهندسية المهمة التي تدل على درجة رص المادة التي تستخدم في قياس كفاءة الأسس والعديد من أغراض الهندسة المدنية. يعتمد هذا المعامل اساساً على معاملات المرونة للمواد و توزيع الضغط في الأعماق. وضع (Abd Al-Rahman,*1989*) معادلة لحساب هذه المعامل بدلالة قيم سرعات الأمواج الطولية والقصية (V_P and V_S) حسب المعادلة التالية:

$$C_i = \frac{\left[3-4\left(\frac{V_S^2}{V_P^2}\right)\right]}{\left[1-2\left(\frac{V_S^2}{V_P^2}\right)\right]}$$

ان قيم معامل التركيز (C_i) المقاسة تمت مقارنتها مع المديات التي حددها (Abd Al-Rahman,*1989*) الجدول (٤-٦) إذ تزداد قيمته مع زيادة صلابة الصخور واظهر ان الطبقة الثالثة هي طبقة متوسطة الصلابة.

جدول (٥-٦) مديات قيم تركيز المادة ونسبة الاجهاد (الضغط الجانبي) مع درجة صلابة التربة (Abd Al-Rahman,*1989*)

Soil description parameter	Weak		Fair		Good
	Incompetent		*Fairly competent*		*Competent*
	Very soft	Soft	Fairly competent	Moderate competent	Compacted
Concentration Index (C_i)	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0
Stress Ratio (Si)	0.7-0.61	0.61-0.52	0.52-0.43	0.43-0.34	0.34-0.25

٧. معامل نسبة االجهد أو الضغط Stress Ratio (Si)

يعد (Si) من المعاملات الجيوتكنيكية المهمة من الناحية الهندسية وهو النسبة بين الجهد الأفقي إلى الجهد العمودي معادلة (٥-٦) عند عمق معين وهو يمثل مقياس للضغط الجانبي للترب او الصخور تحت الظروف الطبيعية إذ يكون الضغط الهيدروستاتيكي للسوائل متساو في الاتجاهات جميعها.

$$S_i = S_h / S_V$$

حيث أن S_h : الاجهاد الأفقي ، S_V الاجهاد العامودي.

لاحظ (Bowles ,*1982*) ان قيمة هذا المعامل تكون في الترب الناعمة اعلي من الترب الخشنة وان قيمتها في الترب المفككة غير المتماسكة تكون كبيرة وتقل قيمة هذا المعامل مع زيادة الضغط الصخري.
أشار (Bowles ,*1982*) إلى وجود علاقة بين نسبة الجهد (Si) ونسبة بواصون (σ) للصخور المتصلبة طبيعيا معادلة (٥-٧):

$$S_i = \frac{\sigma}{1-\sigma}$$

وأشار Abd El-Rahman(1991) إلى أن وجود علاقة بين سرعات الأمواج الطولية والقصية و تم حساب قيمة هذا المعامل باستخدام هذه العلاقة (٥-٨).

$$S_i = 1 - 2\left(\frac{V_S^2}{V_P^2}\right)$$

إن قيم هذا المعامل للطبقة الأولى كانت مرتفعة نسبيا وتتراوح بين (٠.٦٩-٠.٧٣) وللطبقة الثانية بين (٠.٥٢-٠.٥٨) أما بالنسبة للطبقة الثالثة فكانت قيمتها منخفضة نسبيا وتتراوح بين (٠.٣٣-٠.٣٢) ما يدل على صلابتها وذلك من خلال مقارنتها مع المدى الذي حدده (Abd Al-Rahman,*1989*) جدول (٥-٦) ، ان سلوك هذا المعامل يشبه سلوك نسبة بواصون إذ تزداد قيمته للترب المفككة والمشبعة.

٨. التدرج الكثافي Density Gradient(Di):

لقد عبر Abd El-Rahman(1991) عن هذا المعامل بدلالة مربع السرعة من خلال المعادلة الآتية:

$$D_i = \left[\left(\frac{3}{V_P^2}\right) - \left(\frac{4\mu}{E} - 1\right)\right] = \left[\left(\frac{3}{V_P^2}\right) - \left(\frac{1-\sigma}{1+\sigma}\right)\right]$$

تزداد في الطبقات المفككة وتقل قيمتها في الطبقات الصلبة

٩. زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة (ø) Effective Angle of Internal Friction:

هي أحد العناصر الجيوتكنيكية المهمة التي يمكن أن تقاس مخبريا باستخدام دوائر موهو (Mohr's Circles) للفحص ثلاثي المحاور Triaxial وتمثل (ø) زاوية ميل المماس لدوائر موهو التي هي عبارة عن دوائر أقطارها تمثل الفرق بين الاجهادات الأفقية والعمودية.

تستخدم ø بشكل واسع في تقويم الخواص الهندسية للترب والصخور التي تمثل مقاومتها للأحمال الساكنة و الديناميكية. ويمكن حسابها بدلالة سرعات الأمواج السيزمية الانضغاطية والقصية وحسب العلاقة الآتية:

$$sin\emptyset = 2\left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2$$

ومن العوامل المؤثرة على قيمة ø هي النسيج الكثافة و المحتوى المائي الشكل الحبيبي للمكونات التركيب المعدني، إذ إن ø تزداد بزيادة الكثافة والصلابة وقلة المحتوى المائي .
تراوحت قيم ø من (١٥.٣٧) إلى (٤٢.١٢) إذ تقل في الطبقات المفككة وتزداد قيمتها في الطبقات الصلبة وتصل الى ٤٢ درجة وهذا يعكس صلابة الطبقة الثالثة المكونة من صخور المارل العائدة لتكوين الفتحة.

١٠. سعة التحميل القصوى (qu) Ultimate Bearing Capacity:

وهي من الخصائص المهمة للمشاريع الهندسية التي هي مقياس لتحمل الصخور الموجودة تحت الأساس، وتعبر عن مقاومة التربة للاجهادات الناتجة من الأحمال الديناميكية والثابتة المتولدة من الإنشاءات الهندسية المختلفة. وعند تصميم المنشآت الهندسية تحسب كمية (q_u) لأنه اذا كانت الاجهادات المتولدة أعلى من (q_u) يحصل تشويه وزحف للطبقات مما يؤدي الى حصول مشاكل هندسية مثل الهبوط (Settlment). ان قياس سعة التحميل القصوى (q_u) يتم من خلال إجراء فحص الاختراق القياسي (Standard Penetration Test)(SPT) في الحقل. وتحديد عدد الاختراق القياسي (N-value) ثم تطبيق علاقة باري (Parry,*1977*) الخاصة بالترب غير المتماسكة. لقد حاول عد د من الباحثين الربط بين هذه الصفة الجيوتكنيكية المهمة مع سرعات الموجة القصية لأنها ذات أهمية في الدراسات الهندسية من خلال علاقتها بمعامل الصلابة الذي يحدد صلابة ومتانة الترب والصخور.

واستطاع (Abd-AL-Rahman et al,*1994*) إيجاد العلاقة التالية مع سرعات الموجة القصية (V_s):

$$logq_u = 2.398(logV_S - 1.45)$$

ان هذه المعادلة مهمة جدا لان (SPT) لا ينفذ للطبقات الحصوية أي لا يمكن حساب (q_u) لها بهذا الاختيار ولكن باستخدام (V_s) يمكن قياسها لمثل هذه الطبقات وان قيمة (q_u) تعتمد على (V_s) فقط والمعاملات الباقية تعتمد على نسبة (Vs/Vp). إن (q_u) تقاس بوحدة (كغم/سم^2).

تم حساب سعة التحميل القصوى للطبقات الثلاث اعتماداً على علاقتها مع سرعات الأمواج المستعرضة V_s والمحددة بالعلاقة (٥-١٥) ووجدت إن قيم سعة التحميل القصوى q_u للطبقة الأولى كانت منخفضة وبمعدل (٠.٠٤٥-٠.٢١ كغم/سم^2) وهذا يعزى إلى عدم صلابتها الذي سبب انخفاضا في قيم سرعات الموجة المستعرضة .أما الطبقة الثانية فان قيم سعة التحميل لها كانت أفضل وتتراوح بين (٠.٦١-٢.٨٢ كغم/سم^2) ، وأظهرت الطبقة الثالثة قيما عالية تتراوح بين (٦.٥٤-١٦.٨١ كغم/سم^2) مما يعكس صلابتها العالية وهذا يتوافق مع المعاملات الهندسية الأخرى التي حسبت للطبقات تحت السطحية في منطقة الدراسة.

جدول (5-7) قيم معاملات المرونة والمعاملات الجيوتكنيكية لمنطقة الدراسة

V_p m/s	Vs m/s	ρ gm/cc	σ	Ci	Si	V	Di	E (Mpa)	μ (Mpa)	λ(Mpa)	K	ø	q_u Kg/cm^2
					الطبقة الاولى								
350	138	1.31	0.40	3.45	0.69	-0.63	-0.42	70.25	24.95	110	127	18.6	0.045
700	257	1.48	0.422	3.37	0.73	-0.68	-0.40	278	97.75	529.7	595	15.37	0.21
					الطبقة الثانية								
840	410	1.62	0.34	3.91	0.52	-0.37	-0.49	722.7	269	591	770	28.27	0.61
1700	775	1.78	0.36	3.71	0.58	-0.47	-0.46	2927	1069	3006	3718	24.33	2.82
					الطبقة الثالثة								
1900	1100	1.92	0.247	5.03	0.33	-0.008	-0.60	5798	2323	2285	3833	41.9	6.54
2800	1630	2.1	0.244	5.10	0.32	0.025	-0.61	13878	5579	5305	9025	42.12	16.81

ρ : الكثافة
σ: نسبة بوسون
Ci: معامل التركيز
Si: نسبة الاجهاد
V: معامل المادة
Di: التدرج الكثافي
E: معامل يونك
μ: معامل القص
λ: ثابت لامي
K: المعامل الحجمي
ø: زاوية الاحتكاك الداخلي
Mpa : ميكا باسكال
qu: سعة التحمل القصوى