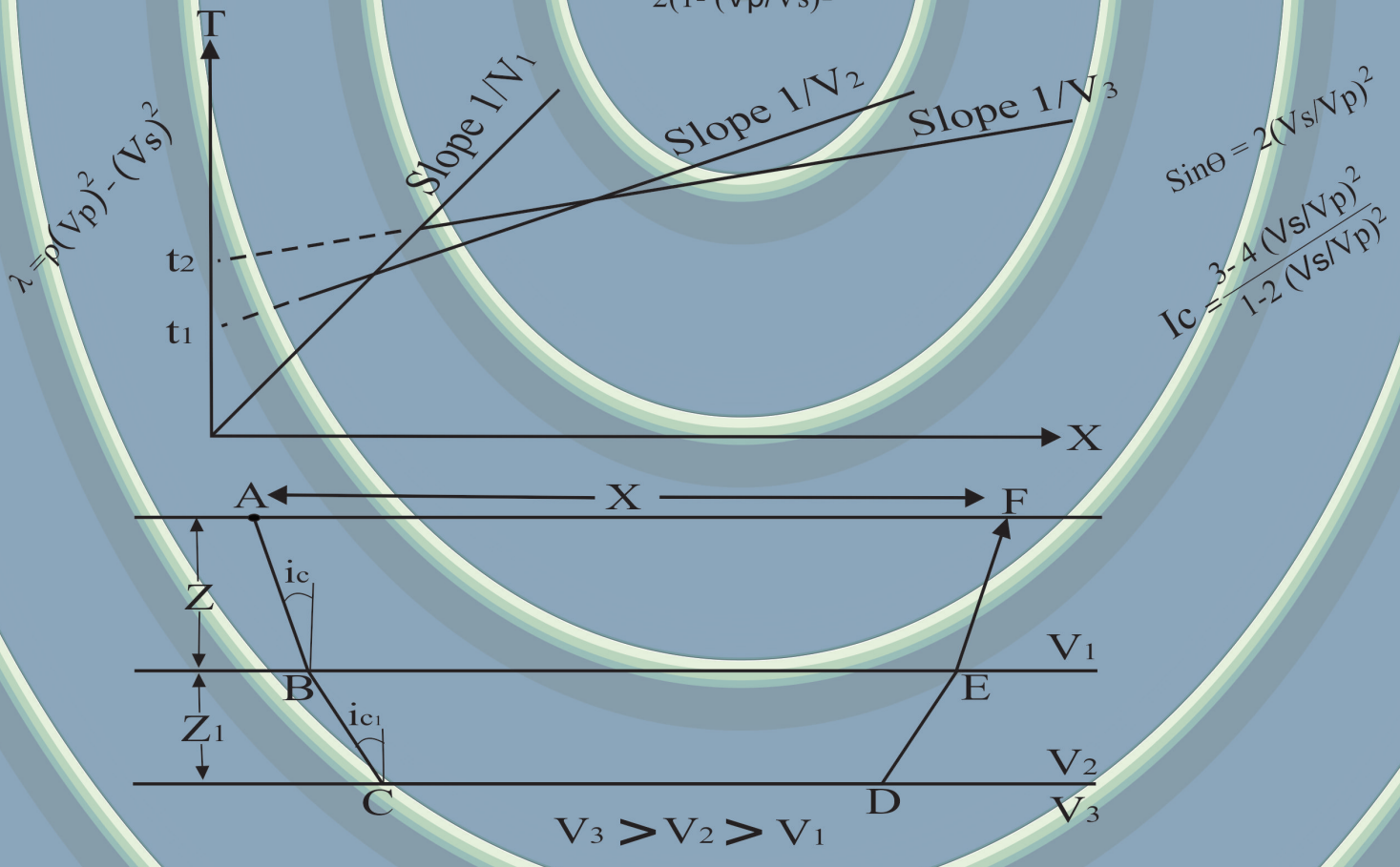
مبادئ
الطريقة الزلزالية الانكسارية

د. احمد سرداح كاظم الزبيدي

$$\sigma = \frac{2-1(Vp/Vs)^2}{2(1-(Vp/Vs)^2}$$



$$\lambda = \rho(Vp)^2 - (Vs)^2$$

$$Sin\theta = 2(Vs/Vp)^2$$

$$Ic = \frac{3-4(Vs/Vp)^2}{1-2(Vs/Vp)^2}$$

مبادئ الطريقة الزلزالية الانكسارية
الطبعة الاولى 2020

مبادئ
الطريقة الزلزالية الانكسارية

أعداد وتأليف

د. احمد سرداح كاظم الزبيدي

بغداد – 2020

الطبعة الاولى

هذا الكتاب مخصص لطلبة المراحل الاولية في اقسام علوم الارض واقسام الجيوفيزياء

الكتاب وقف في سبيل الله ولا يجوز التربح بطبعة وبيعه

مبادئ الطريقة الزلزالية الانكسارية
كتاب جيوفيزياء
الدكتور : احمد سرداح كاظم الزبيدي
الطبعة الاولى : 2020
عدد الصفحات : 82
الاخراج الفني : طالب جواد كاظم
آراء للطباعة والنشر والتوزيع
رقم الايداع في دار الكتب والوثائق ببغداد (1326) لسـ 2020 ـنة

ISBN-978-9922-9346-0-0

جميع الحقوق محفوظة للمؤلف
ولا يجوز الطبع والاستنساخ إلاّ بإذن من المؤلف

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

تلقيت ومازالت لهذه اللحظة اتلقى من زملائي من العراق والوطن العربي رسائل كثيرة ومناشدات عديدة لأعداد وتأليف كتاب باللغة العربية مشابه لكتابي الثاني تقنيات طريقة المقاومة النوعية الكهربائية، يتحدث عن مبادئ الطريقة الزلزالية الانكسارية اوالطرائق الجيوفيزيائية الاخرى ، لأن المكتبة العربية تخلو من أي كتاب يتحدث عن مبادئ الطرائق الجيوفيزيائية وتقنياتها ، خصوصا الحديثة منها ، ولكن التزاماتي الكثيرة، كانت تقف عائقا امام تنفيذ هذه الطلبات ، فجاءت فترة الحجر الصحي بسبب انتشار فايروس كورونا ،لأجد نفسي متفرغا كليا لتنفيذ ما طلب مني الزملاء. فتوكلت على بركة الله بالشروع في أعداد وتأليف فصول هذا الكتاب معتمدا على متوفر لدي من مصادر تخص هذه الطريقة من كتب ورسائل ماجستير ، وكذلك ما توفر لدي من محاضرات اساتذتي الاستاذ طارق صفاء الدين - رحمة الله - والاستاذ الدكتور سلمان زين العابدين....فالحمد لله الذي وفقني لهذا.

زملائي واساتذتي الجيوفيزيائيين في كل مكان ، يشرفني ويسعدني ان اضع بين ايديكم هذا الكتاب، راجيا ان يكون عونا لكم في مسيرتكم العلمية والعملية ، وان لا يكون بديلا عن المصادر المتوفرة باللغة الانكليزية، وانما مكملا لها. لأنني تعمدت في هذا الكتاب ان ابتعد عن الاسهاب وان اركز على المبادئ الاساسية وان لا اكثر من الاشتقاقات الرياضية التي قد تسبب الملل لدى القارئ ، وانما فضلت ان اشتق معظم المعادلات بأسلوب بسيط وبعيدا عن التعقيد ، فالكثير من المعادلات التي كانت اشتقاقاتها تشغل اكثر من اربع صفحات من الكتاب ، حاولت اختصارها الى اقل ما يمكن مع التركيز على وصف كل خطوة من خطوات الاشتقاق حتى يفهم القارئ اصل المعادلة الناتجة. لذا فقد احتوى هذا الكتاب في فصلة الاول على المبادئ العامة لنظرية المرونة ومعاملاتها وانواع الموجات الزلزالية وهندسة انتشارها وانعكاسها وانكسارها والعوامل المؤثرة على سرعتها . اما الفصل الثاني منه، فقد تضمن شرحا وافيا عن التقنيات المستخدمة في جمع البيانات الحقلية احادية وثنائية وثلاثية الابعاد واساليب تنفيذها ومعالجة نتائجها وتفسيرها. بينما احتوى الفصل الثالث من هذا الكتاب على تطبيقات هذه الطريقة في المجال الهندسي ، حيث ناقشنا بإيجاز علاقة السرع الزلزالية بمعاملات المرونة وكيفية حسابها اعتمادا على هذه السرع ، ثم تحدثنا عن احدث التقنيات المستخدمة حاليا لإيجاد سرع الموجات القصية Vs ، وقد ختمنا هذا الفصل بالتركيز على طرائق حساب المعاملات الجيوتكنيكية المستخدمة في مجال الهندسة المدنية . اما المصادر، التي احتلت الجزء الاخير من هذا الكتاب، فقد فضلنا كتابتها باللغة الانكليزية.

اساتذتي زملائي ... ان هذا الكتاب لا يمثل جهدي الشخصي فقط ، وانما هو حصيلة جهود زملائنا واساتذتنا وكل انسان ساعدني في الحصول على المعلومة الدقيقة خلال فترة انجازه واخص بالذكر استاذي الدكتور سلمان زين العابدين واخي وصديقي الاستاذ احمد رضا جدوع الهيتي. كما يسعدني ان اقدم شكري الجزيل للزميلين الدكتور عباس العيثاوي والاستاذ صلاح شعبان لمراجعتهما العلمية لفصول هذا الكتاب .

احمد

2020/5/ 2

الفهرس

رقم الفقرة	العنوان	الصفحة
	الفصل الاول - المبادئ الاساسية	
	المقدمة.....	1
1-1	الجهد والاجهاد	2
2-1	معاملات المرونة.....	3
3-1	الموجات المرنة.....	6
	1- 3 -1 الموجات الجسمية.....	7
	1- 3 -2 الموجات السطحية.....	9
4-1	الموجات الزلزالية	10
5-1	انعكاس وانكسار الموجات الزلزالية.....	12
6-1	تشتت الموجات الزلزالية.....	15
7-1	العوامل المؤثرة على سرعة الموجات الزلزالية.....	16
	الفصل الثاني – مبادئ الطريقة الانكسارية	
	المقدمة	22
1-2	جمع البيانات	23
	A- مصادر الطاقة.....	23
	B- جهاز التسجيل.....	24
	C- اللاقطات.....	24
	2-1-1 انواع المسح الزلزالي الانكساري.....	28
	1- ترتيب الضربة المركزية.....	28
	2- الترتيب الامامي	28
	3- الترتيب المعكوس.....	28
	4- الترتيب الامامي – المعكوس.....	29
	5- الترتيب المروحي.....	29
2-2	معالجة بيانات المسح الزلزالي الانكساري.....	29
3-2	تفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري.....	31
	1- في حالة وجود طبقتين افقتين.....	33

رقم الفقرة	العنوان	الصفحة
	2- في حالة وجود ثلاثة طبقات افقية.....	37
	3- في حالة وجود الطبقات المائلة ضمن موديل متكون من طبقتين.....	38
4-2	طرائق تفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري.....	41
	1- Plus – Minus Method.....	41
	2- Mean Minus Time Method.....	44
	3- ABC Method.....	45
	4- Generalized Reciprocal Time Method.....	47
5-2	الطبقة المخفية والنطاق الاعمى.....	48
6-2	تقنية المسح الزلزالي الانكساري المقطعي ثنائي الابعاد.....	50
	1-6-2 جمع البيانات.....	50
	2-6-2 معالجة البيانات.....	51
	3-6-2 تفسير البيانات.....	51
7-2	تقنية المسح الزلزالي الانكساري المقطعي ثلاثي الابعاد.....	53
	الفصل الثالث – التطبيقات الهندسية	
	المقدمة	56
1-3	العلاقة بين معاملات المرونة والسرع الزلزالية.....	57
2-3	تحديد سرعة الموجات القصية (V_S).....	58
	1-2-3 المسح الانكساري القصي.....	58
	2-2-3 مسح الموجات السطحية	59
	3-2-3 طرائق مسح الابار.....	59
3-3	المعاملات الجيوتكنيكية.....	61
	1-3-3 معامل المادة	62
	2-3-3 معامل نسبة الاجهاد.....	65
	3-3-3 معامل التركيز	66
	4-3-3 زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة	67
	5-3-3 سعة التحمل القصوى	69
	المصادر.....	72

الفصل الاول

المبادئ العامة

المقدمة Introduction

تصنف الطرائق الجيوفيزيائية Geophysical Methods الى نوعين رئيسين ، النوع الاول يسمى الطرائق الخاملة Passive Methods؛ وهي الطرائق التي يتم فيها قياس الخواص الفيزيائية الطبيعية للأرض ؛ مثل الطريقة الجذبية (التثاقلية) Gravity Method ،الطريقة المغناطيسية Method Magnetic و طريقة الجهد الذاتي Self-Potential Method ، كما يمكن اضافة طريقة دراسة ازمنة الوصول لموجات الهزات الارضية Seismic Arrivals - Earthquakes ضمن هذا النوع من الطرائق . تتميز هذه الطرائق بانها لا يتم بوساطتها ارسال اشارات من مصادر اصطناعية الى داخل الارض ومن ثم اعادة استلامها على السطح ، وانما يتم بوساطتها قياس الاشارات المتولدة طبيعيا من الارض ، مثل قياس المجال الجذبي في الطريقة الجذبية وقياس المجال المغناطيسي الطبيعي المتولد داخل الارض في الطريقة المغناطيسية، وقياس فرق الجهد بين نقطتين على سطح الارض في طريقة الجهد الذاتي. اما بالنسبة للموجات الزلزالية المتولدة نتيجة الزلازل فيتم قياس سرعة وصولها الى سطح الارض لتحديد موقع البؤرة الزلزالية وعمقها ، بالإضافة الى معرفة نوعية وخواص الطبقات التي مرت بها ابتداء من لحظة تولدها وحتى وصولها الى سطح الارض.

النوع الثاني من الطرائق الجيوفيزيائية يسمى الطرائق الفعالة Active Methods ، وهي الطرائق التي يتم بوساطتها ارسال اشارات من مصادر اصطناعية الى داخل الارض ومن ثم اعادة استلامها على السطح ، مثل الطرائق الزلزالية الانعكاسية والانكسارية Seismic Reflection and Refraction Methods ، طرائق الجس البئري Well Log Methods. والطرائق الكهربائية Electrical Methods؛ التي تشمل طريقة المقاومة النوعية Resistivity Method، الطرائق الكهرومغناطيسية Electromagnetic Methods (من ضمنها طريقة الرادار الارضي Ground Penetrating Radar Method) ، و طريقة الاستقطاب المحتث Induced Polarization Method.

تعد الطريقة الزلزالية الانكسارية Seismic Refraction Method واحدة من اهم واقدم الطرائق الجيوفيزيائية المستخدمة في التحريات الجيوفيزيائية الضحلة Near Surfaces Geophysical Investigations في مجال الهندسة المدنية والهندسة البيئية والمياه الجوفية. بنيت هذه الطريقة اعتمادا على قانون انعكاس وانكسار الموجات لسنل Snell's Law. المعلومات التاريخية تشير الى ان منتروب L.Mintrop سجل براءة اختراع بهذه الطريقة في المانيا عام 1919 ، وبعد ذلك اسست اول شركة استكشافية زلزالية ليبدآ عصر التطور لهذه الطريقة في التحري عن القباب المحلية (Sharma,1986) . في هذا الكتاب سوف نتناول هذه الطريقة بإسهاب مبتدئين بالمبادئ العامة للموجات الزلزالية في الفصل الاول ، ومن ثم ننتقل في الفصول الاخرى لشرح مبادئ هذه الطريقة ، وطرائق استخدامها في التحريات الجيوفيزيائية.

1-1 الجهد والاجهاد Stress and Strain

تحمل الموجات الزلزالية المنعكسة والمنكسرة Reflected and Refracted Waves الكثير من المعلومات عن الخواص الفيزيائية للأوساط التي مرت بها، ابتدأ من مصدر انطلاقها حتى نقطة استلامها على سطح الارض، هذه المعلومات يمكن تحديدها من خلال الخواص الفيزيائية لهذه الموجات، مثل السرعة Velocity ، التردد Frequency ، السعة Amplitude ، الطول الموجي Wavelength ، الفترة الموجية Period ، الطور Phase وغيرها من الخواص الاخرى. ان الخواص الفيزيائية للموجات الزلزالية ترتبط بشكل مباشر بالخواص الفيزيائية للأوساط التي مرت بها ؛ مثل معاملات المرونة Elastic modules والكثافة Density ، المسامية Porosity وغيرها من الخواص. لذا من الضروري التعرف على الخواص الفيزيائية لهذه الموجات والقوانين والعلاقات التي تربطها مع الخواص الفيزيائية للصخور والمعادن قبل ان ندخل في شرح الطريقة الزلزالية الانكسارية.

تتولد الموجات المرنة بوساطة اضطراب ناتج عن حركة (قوة Force) ، وتنتشر في الوسط على شكل دوائر متحددة المركز ، وهي تشابه الموجات المائية المتولدة عند رمي حجر على سطح بركة ماء هادئ. ان الاضطراب الذي ولد هذه الموجات هو قوة سلطت على وحدة مساحة معينة ، لذا فيزيائيا هو **جهد Stress**، والجهد هو مقدار القوة المسلطة على وحدة المساحة ، ويمكن التعبير عنه رياضيا بالعلاقة الآتية :-

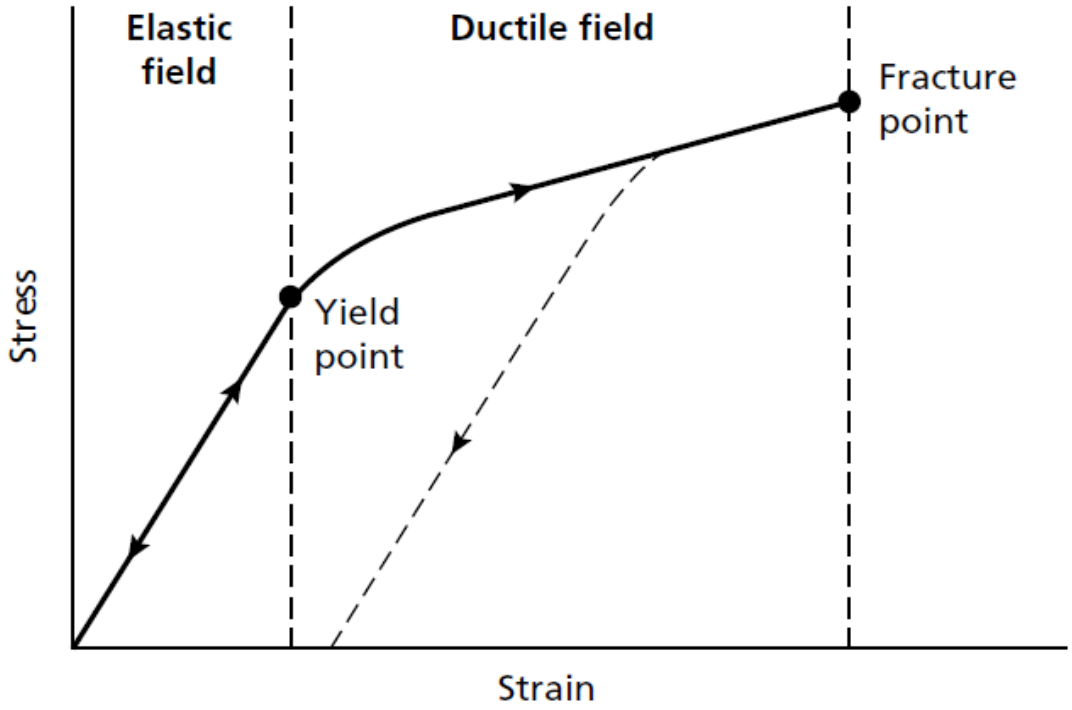
$$\mathbf{P} = \frac{F}{A} \qquad \text{.....(1)}$$

حيث F القوة و A المساحة .

ان هذا الجهد احدث تأثيرا في الوسط (بركة الماء مثلا) جعل من جزئيات الماء تتحرك بعيد عنه ، وهذا التأثير يمكن ان نسميه **اجهادا Strain** ، والذي يمكن تعريفه بانه مقدار التغير في الحجم او الشكل نتيجة تأثير الجهد. يرتبط الجهد بالإجهاد بوساطة علاقة رياضيه وضعها العالم Robert Hooke تسمى **بقانون هوك Hooke's Law** ، والتي تنص على ان الاجهاد يتناسب طرديا مع الجهد ، حيث تظهر الاجسام المرنة الواقعة تحت تأثير الجهد علاقة خطية مع الاجهاد ، الى ان تصل تلك الاجسام الى نقطة حرجة لا يمكنها بعدها تحمل هذا الجهد، فتتعرض الى التشوه ؛ اما بالشكل او الحجم، (Grant and West,1965)، وتسمى تلك النقطة بنقطة الخضوع Yield Point، كما في الشكل (1-1). يستمر التغير في الحجم او الشكل للأجسام المرنة نتيجة تأثير الجهد بعد هذه النقطة ، الى ان تصل تلك الاجسام الى نقطه التهشم او التكسر Fracture Point التي تسبب تهشم او تكسر تلك الاجسام ، وهذا ما يحدث تحت سطح الارض مولدا الهزات الارضية والزلازل ، حيث يؤدي زيادة الجهد على الطبقات الصخرية الى تشوها بالشكل او الحجم اولا، ثم مع زيادة الجهد (الانضغاط) تتكسر تلك الطبقات ويحدث الصدع

(الفالق) Fault ، مولدا الزلزال او الهزات الارضية مع تحرر طاقة كبيرة تنتشر على شكل موجات زلزالية في جميع الاتجاهات.

ان الاجهاد الذي يسبب تغيرا في الشكل فقط دون حصول أي تغير في الحجم، يسمى اجهادا قصيا Shear Strain ناتج عن قوة مماسيه Tangential على وحدة المساحة ، وليست عمودية عليها ، لذا فان الجهد في هذه الحالة يكون قصيا Shearing Stress ، اما الاجهاد الذي يسبب تغيرا في الحجم فيسمى بإجهاد التمدد Dilatation او اجهاد التقلص Contraction ، وكلا النوعين تسببهما قوى عمودية تنتج جهدا عموديا يسمى Normal Stress ، والذي يمكن ان يكون تضاغطيا Compressive اذا كانت القوة متجه نحو الجسم ، او شديا Tensile اذا كان اتجاه القوة المسلطة من الجسم والى الخارج (قوة سحب) .



شكل (1-1) :- العلاقة بين الجهد والاجهاد، (Kearey, *et. al.*,2002).

2-1 معاملات المرونة Elastic moduli

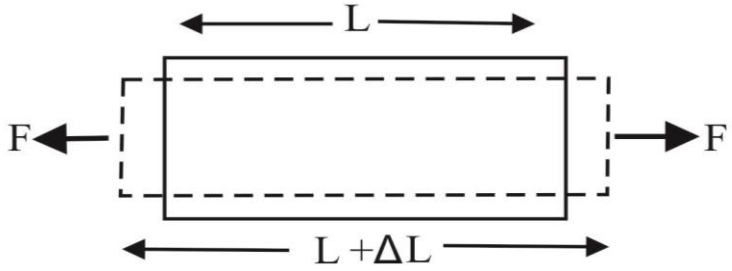
ان العلاقة بين الجهد والاجهاد والاجسام المرنة مثل الصخور والترسبات، حددت من خلال معاملات او ثوابت المرونة Elastic moduli or constants ، حيث يمكننا تقيم سلوك الاجسام المرنة الواقعة تحت تأثير الجهد بوساطة هذه المعاملات ، فالجهد الناتج عن ارسال موجات مرنة الى داخل الارض عن طريق التفجير مثلا ، سوف يولد اجهادا على الصخور والترسبات . ان هذا الاجهاد سوف يكون مختلفا من طبقة صخرية الى اخرى اعتمادا على معاملات مرونتها ، بمعنى اخر ان هذه

المعاملات هي التي سوف تحدد نوع الاجهاد الذي سوف تظهره هذه الطبقات الصخرية، نتيجة تأثير مرور الموجات المرنة خلالها . من هذا نستنتج ان الموجات المرنة المنعكسة والمنكسرة من الطبقات الصخرية يمكن ان تحمل لنا معلومات عن معاملات المرونة لهذه الطبقات ، وبالتالي يمكن لنا تحديد نوعها ، و مثلما ذكرنا ان لكل نوع من الصخور او الترسبات معاملات او ثوابت مرونة خاصة بها، وفي ادناه اهم هذه المعاملات :-

A – معامل يونك Young's Modulus (E) :- هو النسبة بين جهد الشد Tensile Stress واجهاد الشد Tensile Strain ، وكما في الشكل (2-1)، ويمكن التعبير عنه رياضيا بالعلاقة الآتية :-

$$\mathbf{E} = \frac{P}{\Delta L/L} \qquad \text{.....(2)}$$

ان معمل يونك هو مؤشر لحصول تغير في الحجم للجسم المرن ؛ نتيجة حدوث تغير في الطول، ويقاس بوحدة (نيوتن/م^2) او ميكا باسكال (Mpa).

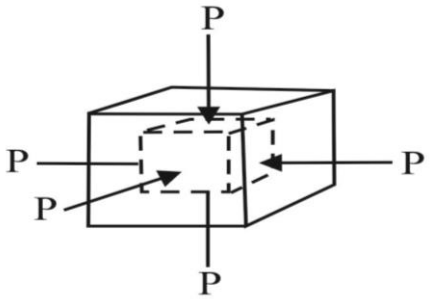


شكل (2-1) :- يوضح معامل يونك لجسم مرن.

B – المعامل الحجمي Bulk Modulus (K) :- هو النسبة بين الضغط الى التغير الجزئي في الحجم،(Dobrin and Savit,1988) ، وكما في الشكل (3-1)، ويمكن التعبير عنه رياضيا بالعلاقة الآتية :-

$$\mathbf{K} = -\frac{P}{\Delta V/V} \qquad \text{.....(3)}$$

ان الاشارة السالبة في هذه العلاقة تشير الى نقصان الحجم نتيجة زيادة الضغط . يقاس المعامل الحجمي بوحدة ميكا باسكال (Mpa).



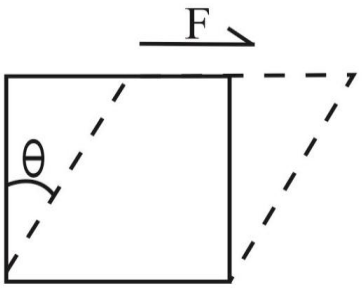
شكل (3-1) :- يوضح معامل الحجم لجسم مرن.

C – معامل القص او الصلابة (μ) Rigidity or Shear Modulus :- هو النسبة بين الجهد الى الاجهاد في حالة الجهد المماس (جهد قصي Shearing Stress)، ويقاس بوحدة ميكا باسكال (Mpa). ان الجهد القصي - كما ذكرنا سابقا- يولد اجهادات قصية والتي تمثل تغيرا في الشكل دون اي تغير في الحجم ، كما في الشكل (4-1)، ويمكن التعبير عنه رياضيا بالعلاقة الآتية :-

$$\mu = \frac{P}{\Phi} \qquad \text{.....(4)}$$

حيث ان Φ هي زاوية التشوه التي تمثل الاجهاد القصي .

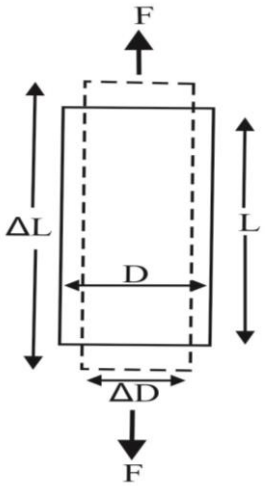
ان قيمة معامل القص μ للسوائل يساوي صفرا ، لان السوائل لا تمتلك شكلا معينا ، بل تأخذ شكل الحيز الذي توضع فيه.



شكل (4-1) :- يوضح معامل الصلابة لجسم مرن.

D – نسبة بوزون (σ) Poisson's Ratio :- هي النسبة بين مقدار التغير في القطر الى مقدار التغير في الطول ، وكما في الشكل (5-1)، ويمكن التعبير عنها رياضيا بالعلاقة الآتية :-

$$\sigma = \frac{\Delta D/D}{\Delta L/L} \qquad \text{.....(5)}$$



شكل (5-1) :- يوضح نسبة بوزون لجسم مرن.

ان نسبة بوزون هي مقياس للتغير الهندسي Geometrical للجسم المرن ، وهي بدون وحدات ، وتبلغ قيمتها العظمى (0.5) عندما يكون الجسم المرن سائلا ، لكون السوائل تتغير طوليا ضعف ما تتغير جانبيا ، حيث كلما ضغطنا المياه جانبيا ترتفع نحو الاعلى. على اي حال ، يبلغ مقدار نسبة بوزون للأجسام الصلبة المرنة مثل الصخور (0.25) تقريبا، (Sharma, 1986).

ترتبط معاملات المرونة مع بعضها البعض بعلاقات رياضية كثيرة جدا ، ويمكن التعبير عن كل من هذه المعاملات الاربعة بدلالة اي اثنين منها، (Sharma, 1986) وكما يلي :-

$$E = \frac{9\mu K}{(\mu+3K)}$$

$$K = \frac{E/3}{(1-2\sigma)}$$

$$\mu = \frac{E/2}{(1+\sigma)}$$

$$\sigma = \frac{(3K-2\mu)}{(6K+2\mu)}$$

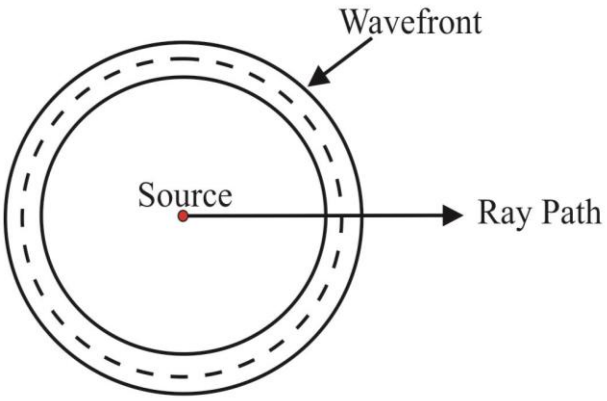
كما يمكن ايجاد معامل مهم من معاملات المرونة يسمى ثابت لامي (λ) Lame's Constant او معامل التماثل Isotropic، وهو مقياس لخصائص الوسط مع الاتجاه ، اي ان خصائص الوسط بالاتجاه العمودي هي نفسها في الاتجاه الافقي، ويحسب اعتمادا على قيم معاملي يونك E ونسبة بوزون σ ، وكما في العلاقة الآتية :-

$$\lambda = \frac{6E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \quad \text{.....(6)}$$

3-1 الموجات المرنة Elastic Waves

تتولد الموجات المرنة - كما ذكرنا سابقا - عند حدوث اضطراب للجسم المرن نتيجة تعرضه الى جهد فجائي ، مما يؤدي الى اهتزاز هذا الجسم مولدا موجات مرنة تقوم بنقل هذا الاهتزاز (طاقة الجهد) بعيدا عن مركز حدوث الجهد على شكل دوائر (او كرات) متحدده المركز وفي جميع الاتجاهات ، كما في الشكل (6-1). ان كل دائرة من هذه الدوائر تسمى جبهة الموجة Wavefront . واستنادا الى مبدأ هايجن Huygens' principle الذي وضع لوصف انتشار الموجات الضوئية ، فأن كل نقطة على جبهة الموجة تمثل مصدرا لموجة ثانوية جديده تنتقل ايضا على شكل دوائر متحدة المركز في جميع الاتجاهات ؛ لاحظ الدائرة المتقطعة في الشكل (6-1). ان النظرة الثلاثية الابعاد 3D لانتشار الموجات في الاوساط المرنة تظهر انتشارها على شكل كرات ، لذلك سوف نستخدم احيانا مصطلح الانتشار الكروي للموجات لوصف انتشار هذه الموجات في جميع الاتجاهات.

ان الخط العمودي (الوهمي) على جبة الموجة يسمى الشعاع Ray ويمثل اتجاه تقدم الموجة في الوسط فيزيائيا. وطبقا لمبدأ فيرمات Fermat's Principle فان هذا الشعاع يأخذ المسار الاقل زمنا بين اي نقطتين.



شكل (1-6) :- يوضح كيفية تولد الموجات المرنة،(Kearey, *et. al.*,2002).

بهذه الالية يتولد في الطبيعية نوعان رئيسيان من الموجات المرنة ؛ الاول يسمى الموجات الجسمية Body waves التي تنتقل داخل الجسم المرن فقط ، والنوع الثاني يسمى الموجات السطحية Surface waves وتنتقل على السطح الحر للجسم المرن.

1-3-1 الموجات الجسمية Body Waves :- وهي الموجات التي تنتشر داخل الجسم المرن ، وتصنف الى نوعين اعتمادا على نوع الجهد المسبب لتولد هذه الموجات ، وكما يلي :-

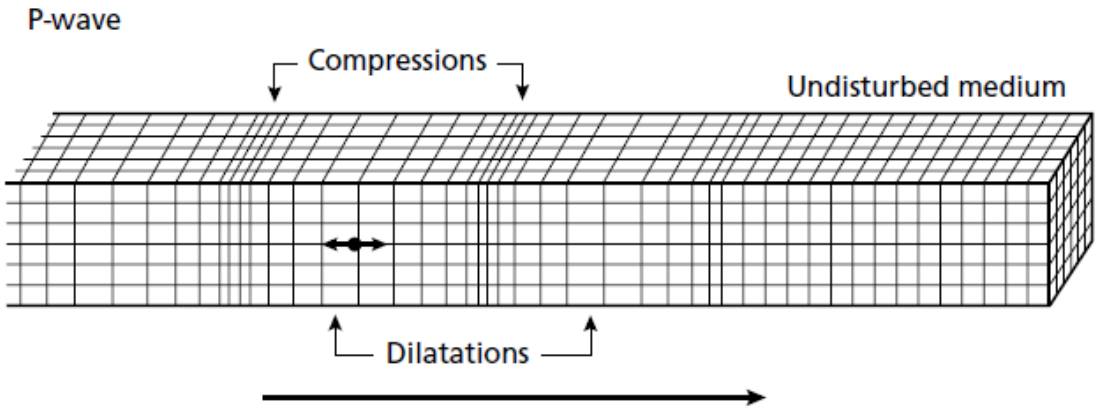
1- الموجات الابتدائية Primary Waves (P) :- وهي الموجات التي تسبب تحرك جزيئات الوسط المارة خلاله باتجاه مواز الى اتجاه تقدم الموجة ، وهي اول الموجات المتولدة وصولا ، لذلك سميت بالموجات الابتدائية ، (Dobrin,1976 ;Telford, *et. al.*, 1981). تسمى هذه الموجات ايضا الموجات الطولية Longitudinal Waves لأنها تسبب اهتزازا طوليا في جزئيات الوسط ، الذي يسبب تمددا وتقلصا (تخلخلا وتضاغطا) متعاقبا للوسط المرن ، لذلك تسمى ايضا بالموجات التضاغطية Compressional Waves، وكما في الشكل (1-7). اعتمادا على معاملات المرونة التي شرحنها سابقا ، نستطيع ايجاد سرعة هذه الموجات من خلال العلاقة الآتية :-

$$\mathbf{Vp} = \sqrt{\frac{K+4/3\mu}{\rho}} \qquad \text{.....(7)}$$

حيث $\boldsymbol{\rho}$ هي كثافة الجسم المرن .

تعتبر موجات (P) هي الموجات الاكثر استخداما في الطرائق الزلزالية ، لذلك من الضروري التعرف على سرع هذه الموجات في الصخور والترسبات ، والجدول التالي يوضح سرع هذه الموجات

لمجموعة من الصخور والترسبات الاكثر شيوعا في القشرة الارضية، بالإضافة الى مجموعة من المواد الاخرى.



شكل (1-7) :- يوضح طريقة انتشار الموجات الابتدائية P-wave، (Kearey, *et. al.*,2002).

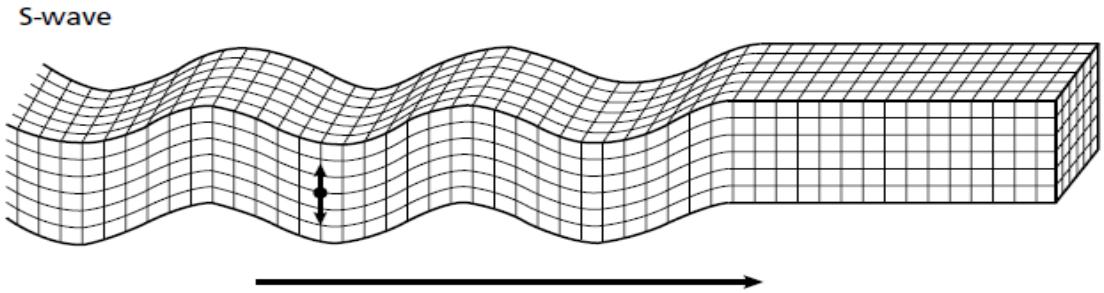
جدول (1-1) :- سرع الموجات الابتدائية لبعض الصخور والترسبات والمواد.

Material	Vp (km/s)
Weathered layer	**0.25–1.0**
Sand (dry)	**0.2 –1.0**
Sand (water-saturated)	**1.5 –2.0**
Clay	**1.0 –2.5**
Sandstones	**2.0– 6.0**
Limestone	**2.0– 6.0**
Dolomites	**2.5–6.5**
Shale	**2.4–5.0**
Anhydrite	**4.5–5.0**
Gypsum	**2.0–3.5**
Granite	**5.5–6.0**
Gabbro	**6.5–7.0**
Water	**1.4–1.5**
Concrete	**3.6**

2- الموجات القصية Shear Waves (S) :- وهي الموجات التي تسبب تحرك جزيئات الوسط المارة خلاله باتجاه عمودي على مسار تقدم الموجة (اعلى - اسفل) مسببة تغيرا في شكل الجسم المرن فقط دون حجمه (لكونها موجات قصية) ، حيث تشبه في حركتها تحريك سلك او حبل نحو الاعلى والاسفل، وكما في الشكل (1-8). تسمى هذه الموجات ايضا بالموجات الثانوية Secondary Waves لأنها تتولد بعد الموجات P-Waves وتصل بعدها الى سطح الارض. تتميز هذه الموجات بأنها ذات

استقطاب Polarization في مستوين عمودي S_V وافقي S_H. ان الاستقطاب في المستوى العمودي S_V هو اهتزاز جزيئات الوسط في المستوى العمودي على مسار تقدم الموجة ، اما الاستقطاب الافقي S_H فهو اهتزاز جزيئات الوسط في المستوى الافقي (الجانبي) العمودي ايضا على مسار تقدم الموجة. يمكن حساب سرعة هذه الموجات بالاعتماد ايضا على معاملات المرونة وفق العلاقة الآتية :-

$$Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \qquad \text{.....(8)}$$

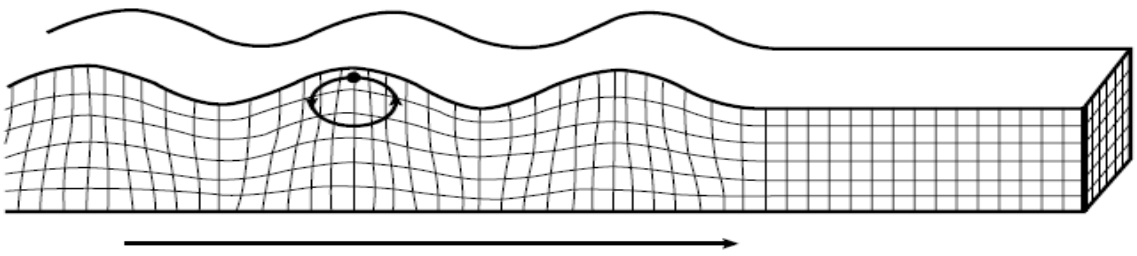


شكل (1-8) :- يوضح طريقة انتشار الموجات القصية S-wave، (Kearey, *et. al.*,2002).

نلاحظ من المعادلة (8) ان سرعة هذه الموجات تعتمد بشكل اساسي على معامل القص والصلابة μ، وبما ان قيمة هذا المعامل للسوائل يساوي صفرا ؛ فأن سرعة هذه الموجات في السوائل ستكون صفرا ايضا. بمعنى اخر، ان هذه الموجات لا تسير او تنتشر في السوائل ؛انها تسير وتنتشر في الاوساط الصلبة فقط.

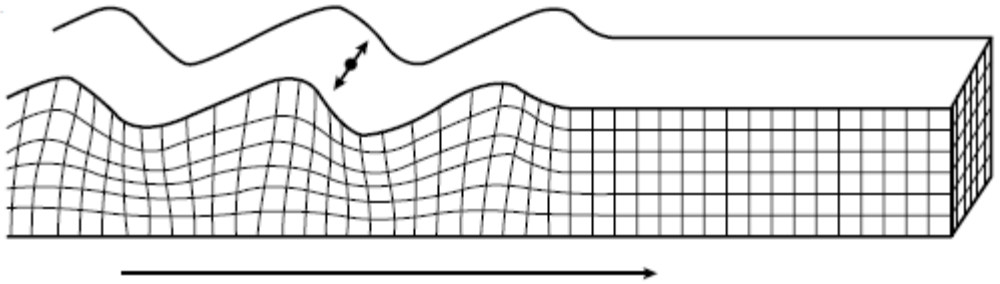
1-3-2 الموجات السطحية Surface Waves :- وهي الموجات التي تسير على سطح الجسم المرن وليس داخله ، ولهذا تسمى بالموجات السطحية، وهذه الموجات هي المسؤولة عن الدمار الذي يحصل بسبب الهزات الارضية ،وهي على نوعين :-

1- موجات رايلي (L_R) Rayleigh Waves :- وهي الموجات التي تسبب حركة مركبة للجزئيات الوسط المارة على سطحه من الاهتزاز العمودي والافقي ، مؤدية الى حركة تراجعية بيضوية Elliptical and Retrograde Motion في المستوى العمودي لمسار تقدم الموجة، (Sharma,1986)، وكما في الشكل (1-9).



شكل (1-9) :- يوضح طريقة انتشار موجات رايلي Rayleigh Waves، (Kearey, et. al.,2002).

2- موجات لف (Love waves (L_Q) :- وهي الموجات التي تسبب حركة افقية وعمودية للجزيئات الوسط المارة على سطحه في المستوى العمودي على مسار تقدم الموجة، (Telford, *et. al.*,1990) كما في الشكل (10-1). ان هذه الموجات تسير فقط على اسطح الاجسام غير المتجانسة Inhomogeneous ، لذلك فهي دائما تسير على سطح الارض في طبقة التربة غير المتجانسة.



شكل (10-1) :- يوضح طريقة انتشار موجات لف Love waves، (Kearey, *et. al.*,2002).

1- 4 الموجات الزلزالية Seismic Waves

الموجات الزلزالية هي احدى اهم انواع الموجات المرنة ؛ وتخضع لنفس مبادئ الهندسة البصرية Geometrical Optics التي تطبق على موجات الضوء، لكونهما يمتلكان نفس الخواص الفيزيائية. حيث ان المبادئ والقوانين التي تتحكم في انتشار Propagation وانعكاس Reflection وانكسار Refraction الموجات الزلزالية ؛ هي نفسها التي تتحكم في انتشار موجات الضوء وانعكاسها وانكسارها عبر الاسطح الفاصلة. لذا فأن فهم الخواص الفيزيائية للموجات الزلزالية هو اساس فهم الطرائق الزلزالية الانعكاسية والانكسارية وكذلك علم الزلازل Seismology، (Dobrin,1976).

ان اهم الخواص الفيزيائية للموجات الزلزالية هي :-

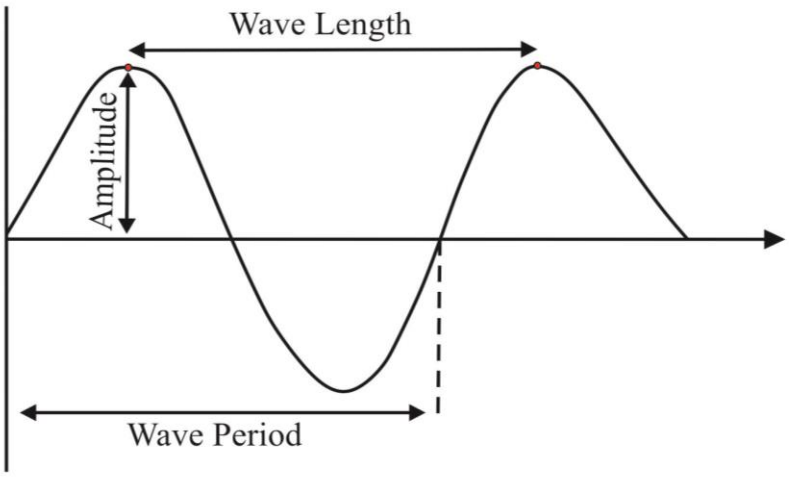
A- التردد (*f*) Frequency :- وهو عدد الدورات (الذبذبات) في الثانية الواحدة ، ويقاس بوحدة الهرتز Hertz ، والتي تساوي ($\frac{1}{\text{ثانية}}$) أي 60 دورة في الثانية مثلا . يعتبر التردد دالة (مؤشر) للوسط المنعكسة او المنكسرة منه الموجات الزلزالية ، وتسمى التقنية التي تعتمد على التردد كدالة في تحديد نوع الطبقات الصخرية المنعكسة او المنكسرة منها الموجات بتقنية الملامح الزلزالية Seismic Attribute Technique وهي من اكثر التقنيات استخداما في الوقت الحاضر في تحديد سمك الطبقات الصخرية.

B- الطول الموجي (λ) Wave Length :- هو المسافة بين قمتين او تقعرين متجاورين، ويقاس بوحدات المتر او أجزائه، كما في الشكل (11-1).

C- السعة Amplitude :- وهي اقصى ازاحة تصل اليها الموجة من خط انتشارها ، وتقاس بوحدة الديسبل Decible (dB) ، كما في الشكل (11-1).

D – الفترة الموجية (*T*) Wave Period :- وهي الزمن اللازم لإكمال دورة واحدة ، وتقاس بوحدات الزمن مثل الثانية او الملي ثانية ، كما في الشكل (11-1). ترتبط الفترة الموجية بالتردد من خلال العلاقة الآتية :-

$$T = \frac{1}{f} \qquad \text{.....(9)}$$



شكل (11-1) :- يوضح بعض الخواص الفيزيائية للموجات.

E – التوهين Attenuation :- وهو مصطلح يستخدم لوصف ظاهرة نقصان طاقة الموجات الزلزالية اثناء تقدمها في الوسط ، كنتيجة لتحول جزء من هذه الطاقة الى حرارة بسبب اللامرونة للوسط المارة به هذه الموجات ، بالإضافة الى ذلك تعاني الموجات من نقصان في طاقتها كلما ابتعدت عن مصدر تولدها (مفهوم التباعد او الانتشار الكروي Spherical Divergence) ، حيث ان طاقة الموجة تهبط بسرعة مع مربع المسافة (المسافة تربيع) ، بينما تتناقص سعتها تدريجيا مع زيادة مسافة السير، (Sharma, 1986).

ان الموجات ذات الترددات العالية (ذات الاطوال الموجية القصيرة) هي اكثر توهينا من الموجات ذات الترددات الواطئة (ذات الاطول الموجية الطويلة)، لذلك هي ذات قدرة قليلة على اختراق اعماق كبيرة من القشرة الارضية. لكن ما يميز هذه الموجات ذات الترددات العالية هي انها ذات قدرة تحليله عالية Resolution ، بمعنى انها اكثر دقة في نقل الخواص الفيزيائية للطبقات الصخرية التي تنعكس او تنكسر منها، بالإضافة الى قدرتها على تحديد الطبقات قليلة السمك.

1- 5 انعكاس وانكسار الموجات الزلزالية Reflection and Refraction of Seismic Waves

تنتشر الموجات الضوئية في الفراغ على شكل كرات ، وعندما تصطدم جبهات هذه الموجات بالحدود الفاصلة بين الاوساط (زجاج شباك النافذة مثلا)، ينعكس جزء منها ، بينما ينفذ (ينكسر) جزء منها عبر زجاج النافذة ويدخل الى الغرفة ، طبقا لقانون سنل Snell's Law في الهندسة البصرية. اما بالنسبة للموجات الزلزالية فالوضع اعقد بقليل، لذلك سنستبدل جبهة الموجة Wavefront بالشعاع Ray الذي هو عمودي على جبهة الموجة ، ويمثل اتجاه تقدمها لتبسيط هذه الحالة وكما يلي:-

تنتشر الموجات الزلزالية من منطقة تحرر الجهد على سطح الارض او داخلها في جميع الاتجاهات على شكل كرات، وعندما يصطدم الشعاع Ray (الذي يمثل اتجاه تقدم الموجة) بزاوية اقل من الزاوية الحرجة Critical Angle بالحد الفاصل بين وسطين مختلفين في الخواص الفيزيائية مثل الطبقات الصخرية او الترسبات ، سوف ينعكس جزءا منه مولدا نوعين من الامواج المنعكسة هما P-Wave و S-Wave ، اما الجزء الاخر منه ، فانه سوف ينفذ (ينكسر) عبر الحد الفاصل مولدا ايضا نوعين من الموجات المنكسرة P-Wave و S-Wave التي تستمر في التقدم والانتشار داخل الوسط المرن (الطبقات الصخرية او الترسبات). اما اذا انكسر شعاع الموجة الساقط بالزاوية الحرجة Critical Angle (تساوي 90^{o})، فانه سوف يمر بموازاة الحد الفاصل بين الوسطين (الطبقتين الصخريتين) ويسير بسرعة الطبقة الصخرية الثانية ، ثم ينكسر مرة اخرى ليرجع الى سطح الارض . في الطريقة الزلزالية الانكسارية نحن ندرس الموجات المنكسرة بالزاوية الحرجة فقط.

ويمكن تعريف **الزاوية الحرجة Critical Angle** بأنها زاوية السقوط التي لها زاوية انكسار تساوي 90^{0} ، اي ان الشعاع المنكسر يمر بموازاة الحد الفاصل بين الوسطين وبسرعة الوسط الثاني، وبعد هذه الزاوية يحصل انعكاس كلي للشعاع.

لتبسيط انعكاس وانكسار الموجات طبقا لقانون سنل Snell's Law اكثر؛ سوف نستخدم الاشكال (12-1) و(13-1)، وكما في العلاقات الرياضية التالية :-

A- قانون الانعكاس :-

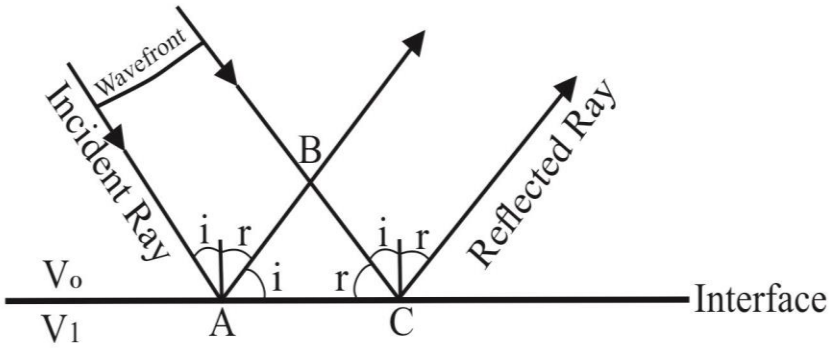
ينص قانون سنل في انعكاس الموجات على ان جيب زاوية السقوط للشعاع الساقط يساوي جيب زاوية الانكسار للشعاع المنكسر اي $\sin i = \sin r$ ؛ لنبرهن ذلك رياضيا وكما في الشكل (12-1) :-

لحساب مقدار زاوية السقوط i سوف نستخدم الدوال المثلثية ، حيث :-

$$\sin i = \frac{\text{المقابل}}{\text{المجاور}} = \frac{BC}{AC} \qquad \text{.....(10)}$$

لان زاوية السقوط i تساوي قيمة الزاوية المحصورة بين السطح الفاصل Interface وبين الشعاع المنعكس بالتبادل ، وكذلك الحال بالنسبة لزاويه الانعكاس r تساوي قيمة الزاوية المحصورة بين السطح الفاصل Interface والشعاع المنعكس الثاني.

$$\sin r = \frac{\text{المقابل}}{\text{المجاور}} = \frac{AB}{AC} \qquad \text{.....(11)}$$



شكل (12-1) :- يوضح انعكاس الموجات طبقا لقانون سنل.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\frac{BC}{AC}}{\frac{AB}{AC}} \qquad \text{.....(12)}$$

يمثل الحد AC حدا مشتركا في المعادلة (12) ، لذلك من الافضل اختصار المعادلة بحذفة ، لتصبح المعادلة الجديدة ، كالاتي :-

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{BC}{AB} \qquad \text{.....(13)}$$

ان الحد BC يمثل جزء من شعاع الموجة الساقطة وهو يمثل مسافة قد قطعت بسرعة مقدارها (V_0) خلال زمن معين t ، وكذلك الحال بالنسبة للحد AB يمثل جزءا من الشعاع المنعكس و يمثل مسافة قطعت بسرعة مقدارها (V_0) خلال زمن معين هو t ايضا. وبما ان المسافة تساوي السرعة مضروبة في الزمن ($x= v*t$) ، اذن يمكن كتابة الحدين وفق الصيغة :-

$BC = v_0*t$ و $AB = v_0*t$ على التوالي ، لتصبح المعادلة الجديدة ، كالاتي :-

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{BC}{AB} = \frac{v_0 t}{v_0 t} \qquad \text{.....(14)}$$

وباختصار قيمة v_0*t لكونها متساوية في الحدين ، فان المعادلة النهائية لقانون سنل في حالة انعكاس الموجات تكون :-

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{1} \longrightarrow \sin i = \sin r \qquad \text{.....(15)}$$

اي ان قيمة زاويه الانعكاس تساوي قيمة زاويه السقوط (i = r) في حالة انعكاس الموجات وفقا لقانون سنل.

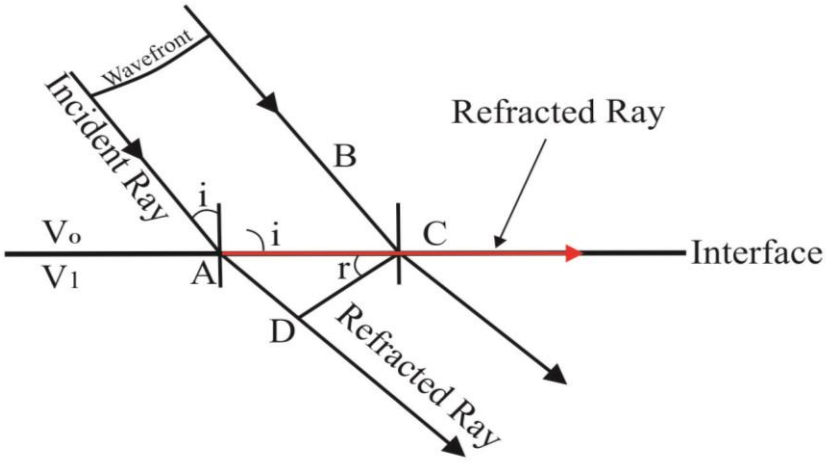
B- قانون الانكسار :-

ينص قانون سنل في انكسار الموجات على ان $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_o t}{v_1 t}$ ؛ لنبرهن ذلك رياضيا اعتمادا على الشكل (13-1) :-

لحساب مقدار زاوية السقوط i وزاوية الانكسار r سوف نستخدم الدوال المثلثية ايضا ، حيث :-

$$\sin i = \frac{\text{المقابل}}{\text{المجاور}} = \frac{BC}{AC} \qquad \text{.....(16)}$$

$$\sin r = \frac{\text{المقابل}}{\text{المجاور}} = \frac{AD}{AC} \qquad \text{.....(17)}$$



شكل (13-1) :- يوضح انكسار الموجات طبقا لقانون سنل.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\frac{BC}{AC}}{\frac{AD}{AC}} \qquad \text{.....(18)}$$

يمثل الحد AC حدا مشتركا في المعادلة (18) ، لذلك من الافضل اختصار المعادلة بحذفة ، لتصبح المعادلة الجديدة ، كالاتي :-

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{BC}{AD} \qquad \text{.....(19)}$$

ان الحد BC يمثل جزء من شعاع الموجة الساقطة وهو يمثل مسافة قد قطعت بسرعة مقدارها (V_0) خلال زمن معين هو t ، اما بالنسبة للحد AD فانه يمثل جزءا من الشعاع المنكسر وهو ايضا مسافة قطعت بسرعة مقدارها (V_1) خلال زمن معين هو t. وبما ان المسافة تساوي السرعة مضروبة في الزمن ($x= v*t$) ، اذن يمكن كتابة الحدين وفق الصيغة :-

$BC = v_0*t$ و $AD = v_1*t$ على التوالي ، لتصبح المعادلة الجديدة ، كالاتي :-

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{BC}{AD} = \frac{v_o t}{v_1 t} \qquad \text{.....(20)}$$

وباختصار قيمة t لكونها متساوية في الحدين ، فان المعادلة النهائية لقانون سنل في حالة انكسار الموجات تكون :-

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_o}{v_1} \qquad \text{.....(21)}$$

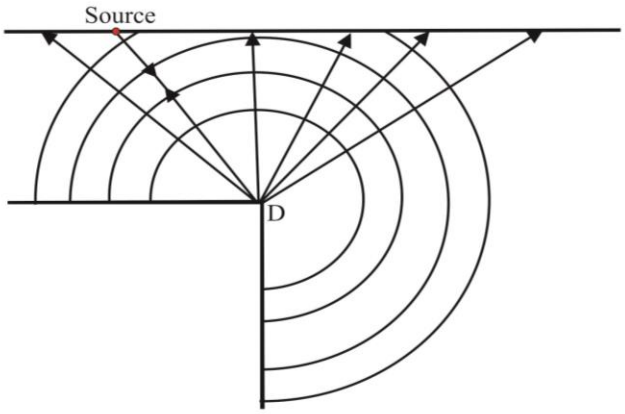
وعندما تكون زاوية الانكسار تساوي 90^0 لان الموجة سقطت بزاويه حرجة ، فان جيب زاويه 90^0 يساوي 1 ($\sin r = 1$) ، لذا المعادلة النهائية لانكسار الموجات ستكون بالصيغة الاتية :-

$$\sin i = \frac{v_o}{v_1} \qquad \text{.....(22)}$$

وهذا يعني ان جيب زاويه السقوط يساوي مقدار سرعة الموجات في الوسط الاول مقسوما على مقدار سرعة الموجات في الوسط الثاني ، اي اذا عرفنا السرع في الوسطين سوف نعرف مقدار زاوية السقوط والعكس صحيح.

1- 6 تشتت الموجات الزلزالية Seismic Waves Diffraction

تسير الموجات الزلزالية داخل الارض وتتعرض الى الانعكاس والانكسار عندما تصطدم بالحدود الفاصلة بين الطبقات ، وفي بعض الحالات عندما يوجد تغير حاد في الخواص الفيزيائية ضمن الطبقة الواحدة او مجموعة من الطبقات الصخرية نتيجة وجود فالق Fault ، او حافة نهر مطمور ، فأن جبهة الموجة الساقطة على الحافة الحادة لهذا الفالق ، كما في الشكل (14-1) سوف تتحول الى مركز لتوليد موجات جديدة تنتشر في جميع الاتجاهات طبقا لمبدأ هايجن Huygens' principle الذي ينص على ان كل نقطة على جبهة الموجة تمثل مصدرا لموجات ثانوية جديده تنتقل ايضا على شكل دوائر متحدة المركز في جميع الاتجاهات. لقد كان للموجات المشتتة فائدة عظيمة في تحديد الفوالق تحت السطحية في المسوحات التي اجريت باستعمال الطرائق الزلزالية، (Sharma,1997).



شكل (1-14) :- يوضح تشتت الموجات الزلزالية Seismic Waves Diffraction، مطور عن (Sharma,1997).

1- 7 العوامل المؤثرة على سرعة الموجات الزلزالية

Factors Affecting the Velocities of Seismic Waves

علمنا من خلال المواضيع السابقة ان سرعة الموجات الزلزالية هي دالة للوسط الذي تسير فيه هذه الموجات (نوع الطبقة الصخرية او الترسبات) ، فقد لاحظنا ان لكل نوع من الصخور سرعة معينة تسير داخلها هذه الموجات، واطلعنا على جدول بسيط (1-1) يتضمن نوع الصخور او المواد وسرعة الموجات فيه. والان سنتطرق الى العوامل التي تؤثر على السرع الزلزالية والتي جعلت السرعة دالة لنوع الطبقات الصخرية او المواد التي تسير داخلها الموجات ، وكما يلي :-

1- المكونات الصخرية ونوع المواد الرابطة Compositions and Matrix:- تعتمد السرع الزلزالية بشكل رئيس على نوع المعادن المكونة للطبقة الصخرية ونوع المواد الرابطة بين هذه المعادن، لكون ان هذه المكونات هي من تحدد معاملات المرونة للطبقة الصخرية ، فقد اثبت ان السرعة تتناسب مع الجذر التربيعي لنسبة المرونة على الكثافة ، وهذا يشير الى ان تأثير المرونة على السرعة هو اكبر من تأثير الكثافة ، وكما ذكر في المعادلتين (7و8) لحساب السرعة باستعمال معاملات المرونة (Al-Bahadily,1997).

$$Vp = \sqrt{\frac{K+4/3\mu}{\rho}}$$

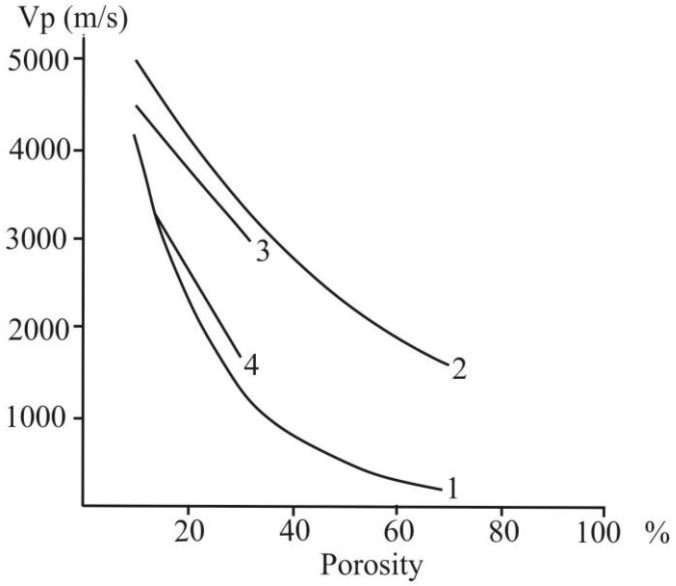
$$Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

2- الكثافة Density :- تتناسب السرعة وفقا للمعادلتين (7و8) عكسيا مع السرعة ، ولكن عمليا تتناسب طرديا ، حيث تزداد السرع الزلزالية بزيادة الكثافة ، والسبب في ذلك ان معاملات المرونة هي اكثر تأثيرا على سرع الموجات الزلزالية من الكثافة، وكما تم ذكره بالفقرة السابقة. من خلال الدراسات

التي قام بها (Nafe and Drake, 1957) و (Gardenar, *et. al*. 1974) وجد ان الكثافة (**ρ**) ترتبط بالسرعة (V) بوساطة العلاقة الآتية :-

$$\rho = 0.23\ V^{0.25}\ (m/sec) \qquad \text{.....(23)}$$

3- المسامية Porosity :- تقل سرع الموجات الزلزالية مع زيادة نسبة المسامية في الطبقات الصخرية والترسبات ، حيث تعمل المسامية على تقليل مرونة وكثافة هذه الطبقات او الترسبات ، وهنالك علاقات كثيرة تربط المسامية مع السرع الزلزالية ؛ والتي تظهر جميعها نقصان السرع الزلزالية مع زيادة نسبة المسامية وكما في الشكل (15-1). كما توصل (Wyllie, *et.al.*,1958) الى علاقة خطية بسيطة بين مقلوب السرعة والمسامية للحجر الرملي المشبع بالماء وعلى اعماق متوسطة ، تسمى بمعادلة متوســط



شكل (15-1) :- يوضح نقصان قيم السرع الزلزالية لموجات P-wave مع زيادة نسبة المسامية ، 1- منحني يمثل الصخور غير المشبعة مقاس بوساطة المسح الزلزالي الانكساري، 2- منحني يمثل الصخور المشبعة مقاس بوساطة موديل , 3- منحي يمثل صخور مشبعة مقاسة مختبريا . 4- منحني يمثل صخور غير مشبعة مقاسة مختبريا. المنحنيان (1و2) يمثلان نماذج خالية من المحتوى الطيني ، المنحنيان (3و4) يمثلان نماذج تحتوي على 20% من المحتوى الطيني، (Kirsch,2006).

الزمن Time-average equation ، التي تشير الى نقصان السرعة مع زيادة نسبة المسامية والتشبع المائي.

$$\frac{1}{V} = \frac{\emptyset}{Vf} + \frac{1-\emptyset}{Vm} \qquad \text{.....(24)}$$

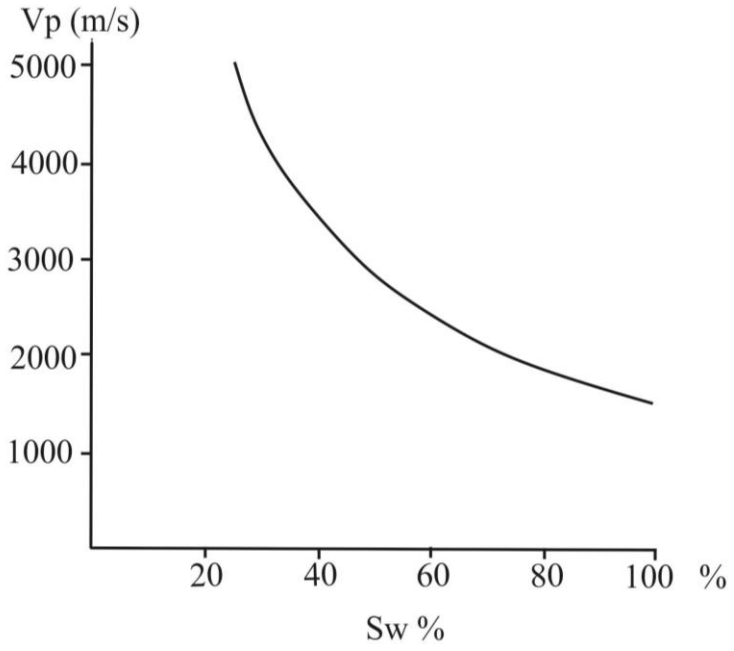
حيث Vf سرعة الموجات في السائل الموجود في المسامات و Vm هي سرعة الموجات في المادة الصخرية والمواد الرابطة Matrix ، تم تطوير هذه المعادلة من قبل (Pickett, 1963) لتشمل مدى اوسع من الصخور الرسوبية وكما يلي :-

$$\frac{1}{V} = A + B.\emptyset \qquad \text{.....(25)}$$

حيث (A وB) عوامل تعتمد على نوع الصخاريه وعمق الدفن على التوالي .

4- شكل المسامات Pores Shape :- تتحكم اشكال المسامات بمعاملات المرونة للطبقات الصخرية وهذا يؤدي الى التأثير على السرعة ضمن هذه الطبقات ، وقد اثبت ان المسامات ذات الاشكال المفلطحة Oblate Spheroid لها تأثير اكبر على معاملات المرونة وبالتالي على السرعة من المسامات ذات الاشكال الكروية Spherical في حالة ثبات العوامل الاخرى المؤثرة على السرعة ، وكما ورد في (Al-Bahadily,1997).

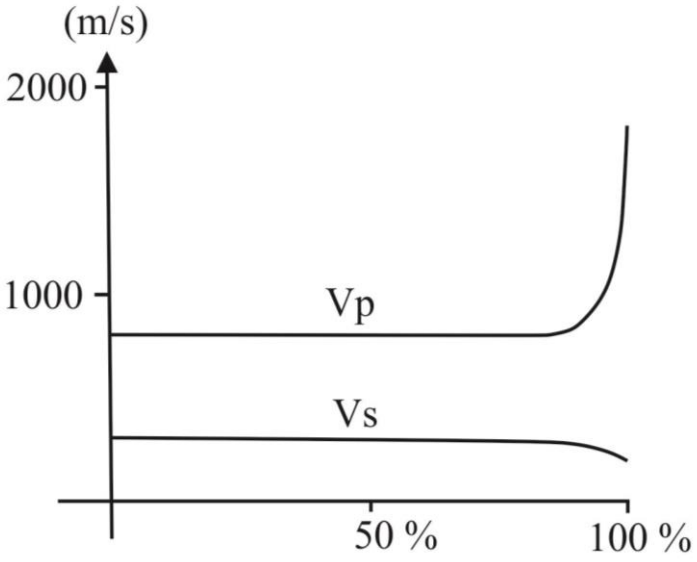
5- نسبة الاشباع المائي Water Saturation Ratio :- تقل سرعة الموجات الزلزالية في الصخور الرسوبية - بشكل عام - مع زيادة نسبة التشبع المائي ، لاحظ شكل (16-1) ، حيث اثبت (Al-Zubedi,2011) ان الصخور الرملية المتصلبة المشبعة بالمياه تتصرف كسائل اذا كانت نسبة الاشباع 100% ، وبالتالي تقلل من سرعة الموجات الزلزالية P-Waves.



شكل (16-1) :- يوضح العلاقة بين النسبة المئوية للإشباع المائي SW% وسرعة الموجات الزلزالية P-Waves، (Al-Zubedi,2011).

اما بالنسبة للرسوبيات غير المتصلبة مثل طبقات الحصى والرمل ، فقد لوحظ ان نسبة الاشباع لا تؤثر على سرعة الموجات الزلزالية قبل نسبة الاشباع الحرجة والتي تساوي 90% ، وتبدأ سرعة

الموجات P-Waves تزداد في الترسبات بعد زيادة نسبة الاشباع عن هذه القيمة ، بينما تقل سرعة الموجات S-Waves بعد هذه القيمة ، كما في الشكل (17-1) ، (Kirsch,2006).



شكل (17-1) :- يوضح تأثير نسبة الاشباع المائي في الترسبات غير المتصلبة على سرعة الموجات الزلزالية P-Waves و-S Waves ، (Kirsch,2006).

6- المحتوى الطيني Clay Content :- اشارات جميع الدراسات الى ان وجود كمية قليل من الطين ضمن الطبقات الصخرية يؤدي الى نقصان في قيم السرع الزلزالية ، وان تأثير المحتوى الطيني القليل على سرعة الموجات الزلزالية S-Waves هو اكبر بكثير من تأثيره على الموجات الزلزالية P-Waves،(Han, et. al.,1986).

7- الشقوق والكسور Cracks and Fractures :- تزداد المسامية في الصخور مع زيادة نسبة الشقوق والكسور، وبالتالي تقلل من قيمة السرع الزلزالية ، ويقل تأثير هذه الشقوق والكسور مع زيادة العمق تحت تأثير وزن الطبقات التي تعلوها، (Dobrin and Savit,1988).

8- معامل اللاتماثل في الخواص Anisotropy :- يختلف تأثير هذا العامل باختلاف نوع الصخور ، ففي الصخور المتطبقه ، مثل بعض الصخور المتحولة وبعض الصخور الرسوبية ، تكون سرعة الموجات الزلزالية في الاتجاه الموازي لمستوى التطبق (V_l) اكبر منها في الاتجاه العمودي على مستوى التطبق (V_t) ، وتبلغ قيمة معامل اللاتماثل في الخواص (1.5) وفق العلاقة الآتية :-

$$\text{Anisotropy} = \frac{Vl}{Vt} \qquad \textbf{.....(26)}$$

9- الضغط Pressure :- تزداد السرع الزلزالية مع زيادة الضغط بمعدل عالي في الاعماق الضحلة ويقل تأثير الضغط تدريجيا مع زيادة العمق، (Al-Bahadily,1997).

10- العمق Depth :- تزداد سرعة الموجات الزلزالية مع زيادة عمق الطبقات الصخرية ، نتيجة زيادة سمك الغطاء الرسوبي الذي يؤدي الى زيادة الانضغاط وتقليل نسبة المسامية وزيادة الكثافة ، ولهذا تزداد سرعة الموجات الزلزالية مع العمق بشكل عام.

اضافة الى هذا كله، هنالك العديد من العوامل الاخرى التي تؤثر على سرعة الموجات الزلزالية داخل الارض ، مثل الاجهادات التكونية التي تسبب الانضغاط وخصوصا عند الاعماق الكبيرة ، كما ان تردد الموجات المستخدمة يعلب دورا اساسيا في التأثير على سرعة هذه الموجات داخل الارض.

د. احمد سرداح الزيدي

الفصل الثاني

مبادئ الطريقة الانكسارية

المقدمة Introduction

تستند الطريقة الزلزالية الانكسارية Seismic Refraction Method في الجانب التطبيقي ؛ على توليد موجات زلزالية (اهتزازية) في منطقة محددة على او قرب سطح الارض ، ومن ثم استلام الموجات المنكسرة العائدة الى السطح بوساطة لاقطات ارضية Geophones ، وحساب زمن الوصول الاولي First Arrival Time لهذه الموجات وتحديد قيم السرعة لها . لقد استخدمت هذه الطريقة بشكل واسع للتنقيب عن النفط من خلال تحديد مواقع القباب الملحية في ساحل خليج تكساس ولويزيانا في الولايات المتحدة في ثلاثينيات القرن الماضي . كما استعملت هذه الطريقة في دراسة التطبق الداخلي للأرض ، واصبحت في العقود الماضية وسيلة فعالة في علم الزلازل التفجيري Explosion Seismology لاستكشاف تراكيب باطن الارض، (Sharma, 1986). وقد اظهرت هذه الطريقة منذ استعمالها لأول مرة قدرتها الفائقة في تحديد اعماق وانواع الصخور تحت سطح الارض في الاعماق الضحلة، خصوصا في المناطق غير المستكشفة سابقا او المناطق التي تكون معلوماتنا الجيولوجية عنها قليلة جدا ، حيث تزودنا هذه الطريقة بالمعلومات الآتية :-

1- عمق الطبقة الصلبة (طبقة الاساس) Bed Rock التي تستند عليها اسس المنشآت الهندسية.

2- نوع ووضعية الصخور تحت السطحية افقية او مائلة.

3- عمق وامتداد مناطق التكهف او الفجوات تحت سطح الارض.

4- قدرة تحمل الصخور للضغط.

5- عمق وامتداد خزانات المياه الجوفية Aquifers.

تنفذ الاعمال الجيوفيزيائية باستعمال الطريقة الزلزالية الانكسارية Seismic Refraction Method من خلال ثلاثة مراحل رئيسية ،المرحلة الاولى تتضمن جمع البيانات Data Acquisition بوساطة اجراء المسوحات الزلزالية الانكسارية في الحقل ، اما المرحلة الثانية فهي مرحلة معالجة البيانات Data Processing بوساطة برامج خاصة بالمعالجة ؛ تتضمن تحسين وتهذيب الاشارة الزلزالية المستلمة. بينما تكون المرحلة الثالثة والاخيرة هي مرحلة تفسير البيانات Data Interpretation بوساطة برامج التفسير . سابقا كانت معظم عمليات المعالجة والتفسير تتم يدويا ، لكن من خلال التطور الهائل في مجال البرمجيات واجهزة الحاسب الالي اصبحت هاتان المرحلتان تنفذ من خلال برامج الحاسبة الالكترونية Computer Software.

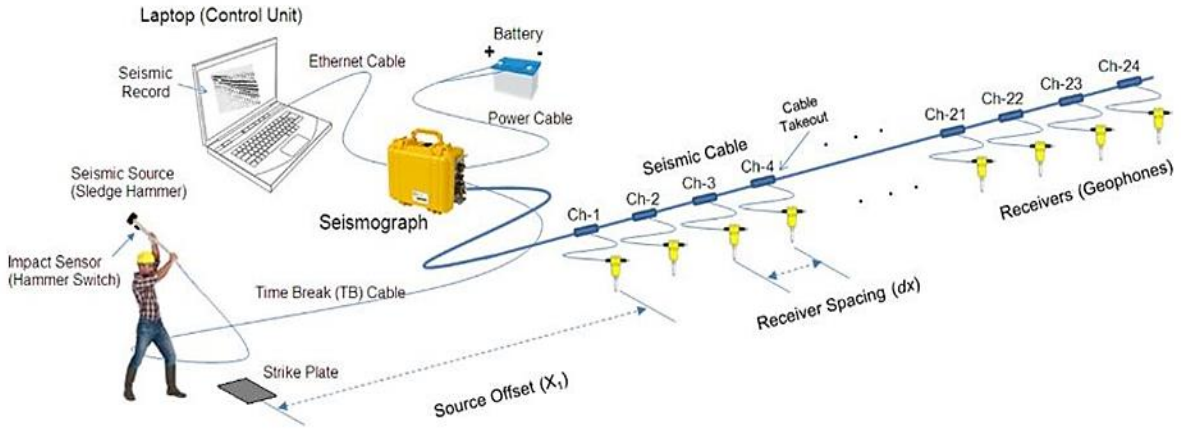
في هذا الفصل سنلقي الضوء على المراحل الثلاثة وكيفية انجازها ، مع التركيز على المبادئ الاساسية التي تم شرحها وبيانها في الفصل الاول لأنها تمثل الاساس الذي تستند علية هذه المراحل.

1-2 جمع البيانات Data Acquisition

تنفذ المسوحات الزلزالية الانكسارية Seismic Refraction Surveys لجمع البيانات الحقلية باستعمال معدات واجهزة خاصة بالمسح الانكساري الزلزالي، تربط مع بعضها البعض ، وكما في الشكل (2-1)، وتتكون بشكل رئيسي من :-

A- مصدر الطاقة :- تولد الموجات الزلزالية في المسوحات الزلزالية الانكسارية برية كانت ام بحرية بوساطة احد مصادر الطاقة الآتية :-

1- **مطرقة كبيرة Hammer** :- وهي احدى مصادر توليد الموجات الزلزالية في مناطق المسح الصغيرة. يتراوح وزن المطرقة المستخدمة في هذه المسوحات بين 2 الى 16 كيلوغرام ، ويتم استخدامها من خلال الطرق على صفيحة من الفولاذ Flat Plate دائرية او مستطيلة الشكل موضوعة على سطح الارض وكما في الشكل (2-1)، وحاليا يتم استخدام قرص سميك من المطاط لتجنب الضوضاء التي تحدثها الصفيحة.



شكل (2-1):- يوضح طريقة اجراء المسح الزلزالي الانكساري، www.masw.com.

2- المتفجرات Dynamite :- تستخدم المتفجرات عادة عندما يراد التخلص من تأثير طبقة التربة المتجوية ذات السرعة الزلزالية الواطئة Low Velocity Layer ؛ لأنها تمتص طاقة الموجات ذات الترددات العالية ، لذا يتم حفر حفرة صغيره بعمق قليل ، وتوضع داخلها كمية محدده من المتفجرات. في المناطق التي يصعب الحفر فيها تستخدم الحبال المتفجرة Cord Explosive لتوليد الموجات الزلزالية.

3- الاوزان الساقطة Drop Weight :- يستخدم هذا النوع من المصادر في المسوحات الكبيرة ، وينفذ بوساطة اسقاط جسم ذو وزن كبير يبلغ مئات الكيلوغرامات على الارض من ارتفاع ثلاثة امتار او اكثر، لتوليد طاقة زلزالية كبيرة.

4- الهزازات الميكانيكية Vibrators :- وهي احدى مصادر الطاقة الاكثر استخداما في المناطق المأهولة بالسكان ، لكونها لا تسبب ضوضاء كبيرة اثناء العمل. يتكون جهاز الاهتزاز الميكانيكي من

هزاز مثبت على شاحنة (سيارة) يولد سلسلة من النبضات التصاعدية ذات ترددات من 6 الى 60 هيرتز في ثوان عدة. ان الهزازات ذات الاهتزاز الجانبي تولد موجات S-Waves ، اما الهزازات ذات الاهتزاز العمودي فتولد موجات P-Waves.

5- مسدس الهواء Air gun :- وهو احد مصادر الطاقة الاكثر استخداما في المسوحات البحرية ، حيث يعمل على تفريغ الهواء المضغوط في الماء مولدا طاقة صوتية كبيرة . في المسوحات البحرية يتم استلام الموجات المنكسرة على سطح الماء من خلال لاقطات مائية Hydrophones.

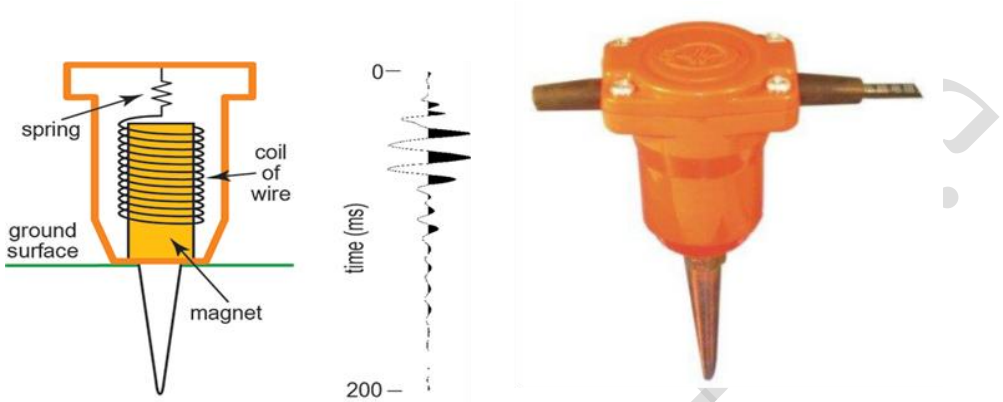
B- جهاز التسجيل Seismograph :- وهو جهاز تسجيل الموجات الزلزالية ، الذي يستخدم في تسجيل وعرض الموجات المستلمة وازمنة وصولها ، وكافة المعلومات والبيانات المتعلقة بالعمل الحقلي. ان اجهزة التسجيل الحالية هي عبارة عن حاسبة (كمبيوتر) تضم العديد من البرامج التي تساعد في تحسين ومعالجة الاشارة الزلزالية المستلمة، فهي تحتوي على مضخمات Amplifier تقوم بتكبير وتضخيم النبضة او الاشارة المستلمة ، وكذلك على مرشحات (فلاتر Filters) لتحسين نسبة الاشارة الى الضوضاء. يربط جهاز التسجيل بحاسبة محمولة Laptop Computer لغرض معالجة وتفسير البيانات، ويربط ايضا هذا الجهاز مع اللاقطات Geophones من خلال كابل يسمى Seismic Cable لنقل وتسجيل بيانات الموجات المستلمة، وكما في الشكل (1-2). كما يربط جهاز التسجيل بمصدر توليد الموجات بوساطة حساس Impact Sensor لتسجيل زمن الضربة Time Break الذي يمثل الزمن صفر لتولد الموجات. يجهز جهاز التسجيل بالطاقة الكهربائية بوساطة بطارية سيارة في معظم الحالات او بوساطة مولد كهربائي Generator.

C- اللاقطات Geophones :- وهي اجهزة استلام الموجات المتولدة من مصادر الطاقة ، وتتكون على اختلاف اشكالها وانواعها بشكل رئيس من صندوق من البلاستك محكم الاغلاق ذو طرف معدني مدبدب يغرس في الارض. يحتوي الصندوق على لب مغناطيسي Magnet مثبت بأحكام داخل الصندوق ، وملفوف حوله ملف Coil متصل بنابض Spring مثبت بالجزء العلوي من الصندوق ، كما في الشكل (2-2)، يتصل الملف باسلاك كهربائية تربط بالكابل Seismic Cable ، شكل (2-2).

ان اساس عمل اللاقطة هو استلام الاهتزازات التي تولدها الموجات الصوتية (طاقة ميكانيكية) اثناء وصولها الى سطح الارض ، فعند اهتزاز اللاقطة بسبب هذه الموجات سوف يتحرك النابض محركا معه الملف ، هذه الحركة سوف تولد مجالا مغنطيسيا والذي يولد بدورة تيارا متناوبا داخل الملف، هذا التيار سوف ينقل الى الكابل Cable ومن ثم الى جهاز التسجيل Seismograph على شكل نبضات تمثل الموجة الملتقطة.

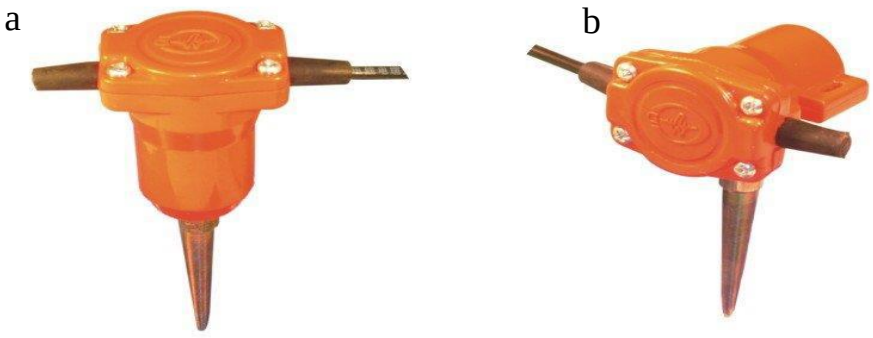
في المسوحات الزلزالية الانكسارية ينشر عدد محدد من اللاقطات يتراوح بين 24 الى 120 لاقطة على خط مستقيم يسمى المسار الزلزالي Traverse ، وقد يتكون هذا المسار من عدة خطوط نشر

متداخلة مع بعضها Overlapping او متصلة. يعتمد طول المسار الزلزالي على عمق الهدف Target المراد دراسته ، والذي يجب ان يكون طوله بين 3 الى 5 اضعاف عمق الهدف ، (Redpath,1973). فاذا كان عمق الهدف المراد دراسته على سبيل المثال، 200م ، فيجب ان يكون طول المسار بين 600 الى 1000م. هذه اللاقطات تكون متصلة مع بعضها بوساطة كابل Cable متعدد الأسلاك ، يربط مع جهاز التسجيل Seismograph كما ذكرنا سابقا.



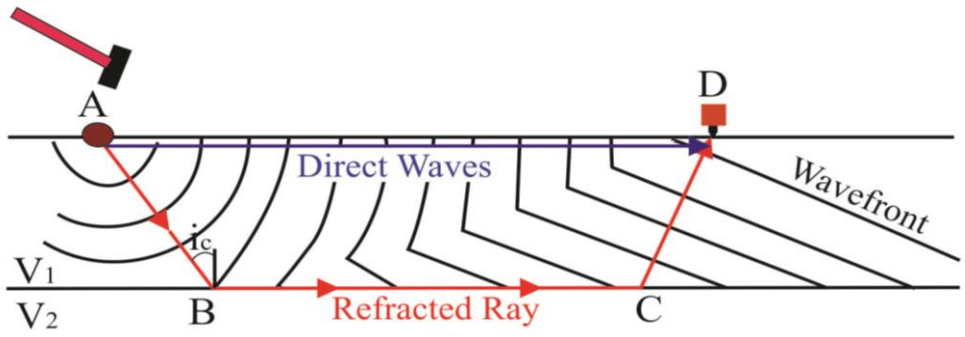
شكل (2-2) :- يوضح لاقطة استلام الموجات الابتدائية P-waves مع مقطع عرضي يظهر مكوناتها، (Peterie, *et. al.*,2014).

تسمى المسافات البينية بين لاقطة واخرى Receiver Spacing وتحدد اعتمادا على ابعاد الهدف المراد دراسته (الطول والعرض او الحجم) ، فاذا كانت ابعاد الهدف صغيرة تكون المسافة الفاصلة بين لاقطة واخرى صغيره بحدود المتر او اقل، بينما تسمى المسافة بين اول واخر لاقطة Offset. كما تسمى المسافة بين نقطة المصدر وأول لاقطة Source Offset. هنالك نوع اخر من اللاقطات المخصصة لاستلام الموجات الثانوية S-waves لا تختلف كثيرا في تصميمها عن اللاقطات الخاصة باستلام الموجات الابتدائية P-waves الا في وضعية لب المغناطيس الذي يكون افقيا فيها وليس عموديا، لاستلام الاهتزاز العمودي الذي تولده هذه الموجات ، كما في الشكل (2-3).



شكل (2-3) :- يوضح انواع اللاقطات ، a- لاقطة استلام الموجات الابتدائية P-waves ، b- لاقطة استلام الموجات الثانوية (القصية) S-waves، (Al-Heetty,2014).

بعد الانتهاء من ربط الاجهزة والمعدات ونشر اللاقطات ضمن خط المسح او المسار الزلزالي ، يتم توليد الموجات الصوتية ، من خلال احد مصادر الطاقة التي ذكرت في اعلاه ، فتنتشر جبهات الموجات داخل الارض على شكل انصاف كرات (انصاف دوائر) لان النصف الاخر من هذه الجبهات سوف ينتشر فوق سطح الارض، وكما في الشكل (4-2). ان اول الموجات الواصلة الى اللاقطات القريبة، سوف تكون الموجات المباشرة Direct Waves التي تتحرك من المصدر الى اللاقطات مباشرة بدون انكسار او انعكاس، ثم بعد ذلك تصل الموجات المنكسرة التي انكسرت بالزاوية الحرجة ، فيسجل زمن وصولها الاولي ثم تحسب سرعتها اعتماد على العلاقة (السرعة = $\frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}}$) بعد حساب المسافة التي قطعتها الموجة من نقطة المصدر وسقوطها على الحد الفاصل، ومن ثم انكسارها بالزاوية الحرجة وتقدمها بموازاة الحد الفاصل بين الطبقات الصخرية ، ثم انكسارها مره اخرى وصعودها الى سطح الارض والتقاطها باللاقطة، ثم تصل الموجات المنعكسة. اما في اللاقطات البعيدة عن مصدر الضربة Shot Point فتصل اليها غالبا الموجات المنكسرة اولا ثم الموجات المباشرة ثم الموجات المنعكسة.

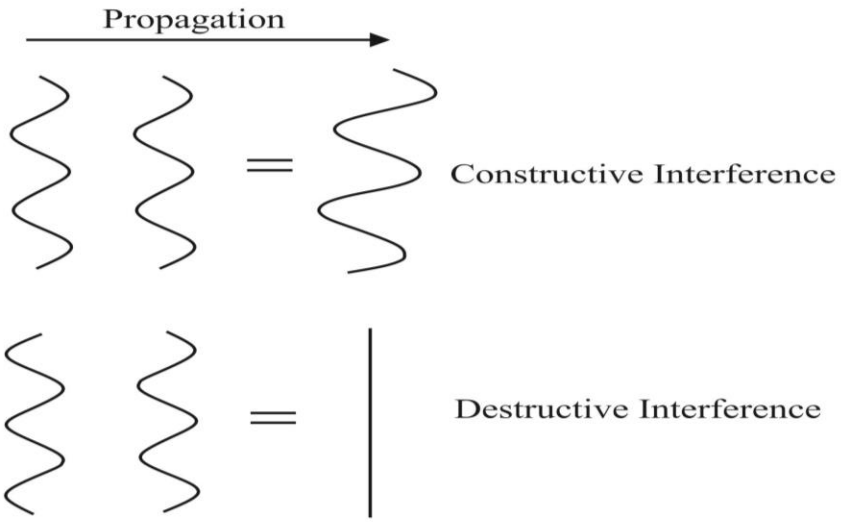


شكل (4-2) :- يوضح انتقال جبهات الموجات داخل الارض وانكسارها عبر السطح الفاصل بين الطبقات.

عند استخدم احد المصادر التالية ؛ المطرقة Hammer ، الاوزان الساقطة Drop Weight ، الهزازات الميكانيكية Vibrators وهي الاكثر استخداما في المسوحات الزلزالية الانكسارية ، يتم تنفيذ سلسلة من الضربات Shot Points المتعاقبة لتوليد الموجات الصوتية وليس ضربة واحدة، وذلك للحصول على افضل البيانات ، وكذلك للاستفادة من تقنية التنضيد Stacking التي تساهم في زيادة طاقة الموجات المتولدة من خلال عملية التداخل البناء الذي يحدث للموجات المتولدة تباعا ، مما يزيد من طاقتها ويسهم في انتقالها عبر الترسبات قليلة التماسك او الطبقات الصخرية ذات الصلابة القليلة. هنالك نوعين من التداخل Interference يحصل للموجات اثناء انتقالها عبر الطبقات الصخرية ، النوع الاول

يسمى تداخل بناء Constructive ، ويحصل عندما تصطدم موجتان لهما نفس الطور Phase فتقوي احدهما الاخرى وتزيد من طاقتها، اما النوع الثاني فيسمى تداخل هدام Destructive ويحصل عندما تصطدم موجتان لهما طورين مختلفين فتلغي (تمحي) احدهما الاخرى ، وكما في الشكل (2-5)، وهذا النوع من التداخل مهم جدا في التخلص من الضوضاء Noise.

اما بالنسبة لتوليد الموجات الثانوية (القصية) S-waves فأنه يتم من خلال الضرب جانبيا على وتد من الخشب مغروس جزئه الاعظم في الارض. ويحدد نوع الاستقطاب المراد توليده لهذه الموجات افقي S_H او عمودي S_V من خلال تحديد اتجاه الضربة على الوتد نسبة الى اتجاه خط النشر، فاذا كانت الضربة عمودية على اتجاه خط النشر ستتولد موجات ثانوية ذات استقطاب افقي S_H ، وكما في الشكل (2-6)، اما اذا كانت الضربة موازية لخط النشر فسوف تتولد موجات ثانوية ذات استقطاب عمودي S_V.



شكل (2-5) :- يوضح انواع التداخل للموجات الزلزالية.

شكل (2-6) :- طريقة توليد الموجات الثانوية ذات الاستقطاب الافقي S_H، (Al-Heetty,2014).

2-1-1 انواع المسح الزلزالي الانكساري Seismic Refraction Survey

اعتمادا على موقع نقطة توليد الموجات Position shot بالنسبة الى موقع اللاقطات يمكن تنفيذ المسوحات الزلزالية الانكسارية بخمسة ترتيبات Arrangements تسمى هندسية النشر، وهي كالاتي:-

1- ترتيب الضربة المركزية Center Shooting Arrangement

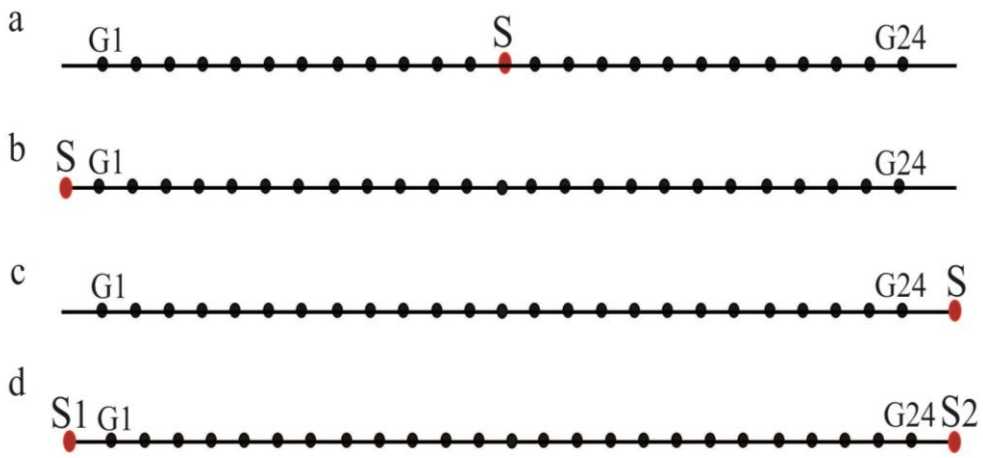
في هذا النوع من الترتيبات يكون موقع نقطة توليد الموجات Position shot في مركز خط المسح، وتنشر اللاقطات على جانبيها بنفس العدد والمسافات وعلى خط مستقيم ، شكل (2 -7a). هذا الترتيب مفيد جدا في تحديد العمق والسمك الحقيقي للطبقات الصخرية ووضعيتها، بسبب ان ازمنة الوصول للموجات المنكسرة يجب ان تتساوى عند وصولها للاقطات على جانبي موقع نقطة الضربة Shot Point، فاذا اختلفت فهذا مؤشر على ان الطبقة الصخرية ليست افقية او انها تزداد سمكا في احد الاتجاهات او انها تحتوي على تغير ليثولوجي ساهم في تأخر وصول الموجات المنكسرة.

2- الترتيب الامامي Forward Arrangement

في هذا النوع من الترتيبات يكون موقع نقطة توليد الموجات في بداية خط المسح، وكما في الشكل (2-7b)، ولهذا يسمى في بعض المصادر بالاعتيادي Normal ، ويستخدم عندما تكون منطقة المسح صغيرة ، والمعلومات الجيولوجية المتوفرة تؤكد بأن الطبقات افقية.

3- الترتيب المعكوس Reverse Arrangement

وهو اقل الترتيبات استخداما بمفرده في المسوحات الزلزالية الانكسارية، لكون نقطة توليد الموجات يكون موقعها في نهاية خط المسح ، وكما في الشكل (2-7c)، ولهذا يسمى في بعض المصادر بالطرفي او النهائي End Shot.



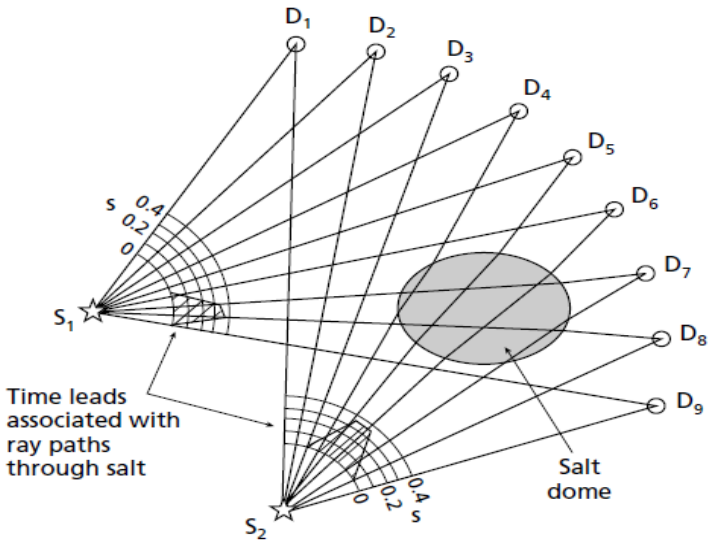
شكل (2-7) :- يوضح انواع الترتيبات المستخدمة في المسح الزلزالي الانكساري ، a- المركزي ، b- الامامي، c- المعكوس، d- امامي- معكوس.

4- الترتيب الامامي – المعكوس Forward- Reverse Arrangement

وهو اكثر الترتيبات استخداما في جمع البيانات في المسوحات الزلزالية الانكسارية ، وينفذ بوساطة نقطتين للتوليد الموجات Shot Point، الاولى في بداية خط المسح والثانية في نهايته، وكما في الشكل (2-7d)، ويستخدم هذا النوع لغرض تحديد السمك والعمق الحقيقي للطبقات الصخرية وكذلك لمعرفة وضعيتها مائلة ام افقية.

5- الترتيب المروحي Fan Arrangement

وهو واحد من اهم ترتيبات جمع البيانات في المسوحات الزلزالية الانكسارية، والذي ينفذ من اجل التحري عن القباب الملحية لاستكشاف الهيدروكربونات (نفط). في هذا النوع من الترتيبات يتم نشر اللاقطات على شكل خطوط مستقيمة تشبه المروحة ، شكل (2-8) ، وقد استخدم هذا النوع في بداية انتشار الطريقة الزلزالية الانكسارية فى ثلاثينيات القرن الماضى، (Sharma, 1986).



شكل (2-8) :- الترتيب المروحي المستخدم في جمع البيانات الحقلية في المسوحات الانكسارية، (Kearey, *et. al.*,2002).

2-2 معالجة بيانات المسح الزلزالي الانكساري Data Processing of Seismic Refraction Survey

يقصد بالمعالجة تحسين وتهذيب الاشارة الزلزالية Signal المستلمة وازالة تأثير الضوضاء Noise منها او تقليله ، وهذا ما يعرف بتحسين نسبة الاشارة الى الضوضاء ($\frac{S}{N}$) ، ونقصد بالإشارة الزلزالية الموجة المستلمة. اما الضوضاء فهي موجات متولدة من مصادر اخرى ، من غير المصدر المستخدم في

تنفيذ المسوحات ، وهذه الموجات تسبب عدم دقة البيانات المسجلة ، لكوننا لانعرف مصدر وزمن تولدها ، وهل هي موجات منعكسة ام منكسرة. وتصنف الضوضاء بشكل عام الى نوعين ، وهما:-

1- الضوضاء المتجانسة Coherent Noise

وهي الضوضاء التي يتكرر حدوثها بشكل منتظم ، وتسمى ايضا في بعض المصادر بالضوضاء النظامية Systematic . الموجات في هذا النوع من الضوضاء يمكن قياس سرعتها ، وهي في الاغلب موجات سطحية Surface Waves or Ground roll ذات ترددات قليلة ، اقل من 20 هرتز ، وذات سرع واطئة (Al-Sadi,1982) ، وهي الاكثر شيوعا في المسوحات الزلزالية. كذلك يضم هذا النوع من الضوضاء الموجات المتولدة من حركة الرياح ، وهي ذات سرع معروفه مثل سرعة الصوت في الفراغ 300m / sec وذات ترددات ايضا اقل من 20 هرتز . في بعض الاحيان عندما تكون منطقة المسح تحتوي على تضاريس غير متجانسة ، فأنها تسبب حصول تشتت جانبي للموجات يسمىSide Scattered ويولد هذا النوع من التشتت موجات الضوضاء ، (Al-Heetty,2014).

2- الضوضاء العشوائية Random Noise

وهي الضوضاء التي لا تحدث بشكل متكرر وانما تكون عشوائية الحدوث ، مثل حركة السيارات او الاشخاص اواي حركة تولد موجات صوتية في منطقة المسح ، كما ان اهتزاز اللاقطات بوساطة الرياح نتيجة عدم تثبيتها بشكل جيد في الارض يسبب تولد هذا النوع من الموجات. يسمى هذا النوع من الضوضاء ايضا بالضوضاء غير المتجانسة Incoherent Noise.

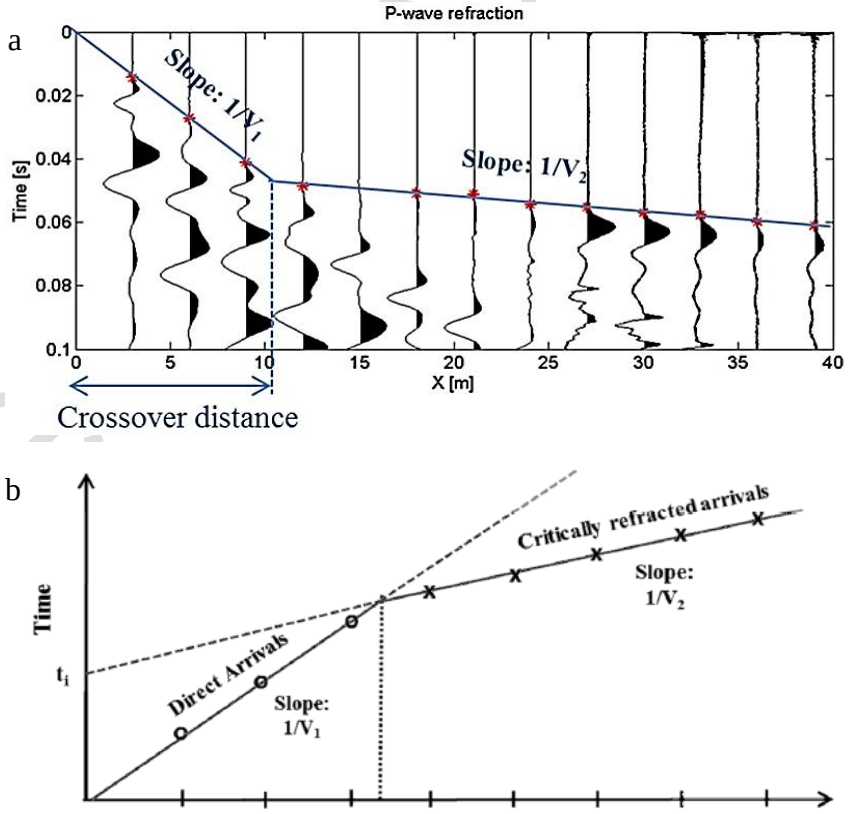
كلا النوعين من الضوضاء يتم معالجتها من خلال برامج عديدة بعضها موجود ضمن جهاز التسجيل Seismograph ، وبعضها الاخر ينصب على اجهزة الحاسوب Computer . يستند عمل هذه البرامج على وجود مرشحات Filters يتم من خلالها ازالة الموجات غير المرغوب فيها من خلال تحديد ترددها ، واكثر المرشحات شيوعا في الاستخدام هي مرشحات القطع العالي High cut Filters وهذه المرشحات مصممة على ازالة موجات الضوضاء ذات الترددات العالية ، ومرشحات القطع الواطئ Low cut Filters والمصممة على ازالة الموجات ذات الترددات الواطئة.

المرشحات المستخدمة في معالجة بيانات المسح الزلزالي الانكساري هي اقل تعقيدا من المرشحات المستخدمة في معالجة بيانات المسح الزلزالي الانعكاسي، فبالإضافة الى مرشحات التردد هنالك مرشحات تسمى المرشحات المعكوسة Inverse filtering (Deconvolution) وتستخدم عندما تتساوى الترددات للموجات الاعتيادية مع موجات الضوضاء، كما ان هناك نوع اخر ايضا من المرشحات يسمى مرشحات السرعة Velocity filtering وفية يتم ترشيح الموجات اعتمادا على سرعتها.

3-2 تفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري Interpretation of Seismic Refraction Data Survey

تتضمن عملية تفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري تحديد ازمنة الوصول الاولي First Arrival Time في السجل الزلزالي Seismic Recorder بعملية التقاط أزمنة الوصول الأولي للموجات الزلزالية لكل آثر زلزالي ، كما في الشكل (2-9a)، فأول تغير First Break مفاجئ للأثر الزلزالي سوف يكون سهل الالتقاط. بعد التقاط جميع ازمنه الوصول الاولي يتم حساب سرعة وعمق وسمك كل طبقة من الطبقات الصخرية ، ثم مقارنة ومضاهاة هذه المعلومات المحسوبة مع المعلومات الجيولوجية المتوفرة من حفر الابار بشكل رئيسي، او المعلومات المتوفرة من مسوحات جيوفيزيائية او جيولوجية سابقه ، لتحديد الوضع الجيولوجي تحت السطحي في منطقة المسح بشكل دقيق.

في بداية ظهور الطريقة الزلزالية الانكسارية ، كانت بياناتها تفسر يدويا وبطرائق بسيطة من خلال تمثيل زمن الوصول الاولي First Arrival Time لكل موجة من الموجات الملتقطة (الاثر الزلزالي Seismic Trace) مع المسافة والزمن بين اللاقطات ضمن مرتسم يسمى منحي مسافة - زمن Time – Distance Curve ، كما في الشكل (2-9b). حيث تسجل اللاقطات الوصول الاولي للموجات المباشرة Direct Waves اولا ، ثم الموجات المنكسرة عبر الحد الفاصل بين الطبقتين الصخريتين .



شكل (2-9) :- (a) يوضح الوصول الاولي للموجات المباشرة والمنكسرة في السجل الزلزالي،(b) منحي مسافة – زمن Time – Distance Curve للموجات المستلمة، (Garofalo,2014).

ان الموجات المباشرة Direct Waves هي الموجات التي انتقلت ضمن الطبقة الاولى من نقطة الضربة Shot Point الى اللاقطات مباشرة دون ان تعاني من اي انكسار او انعكاس وبسرعة الطبقة الاولى V_1. على اي حال ، بعد رسم منحني مسافة – زمن Time – Distance Curve الذي يمثل احداثيه العمودي الزمن T ، واحداثيه الافقي المسافة بين اللاقطات x ، سوف يظهر منحني الزمن للموجات المباشرة بشكل قطعة مستقيم تتقاطع مع قطعة مستقيم اخرى لها ميل مختلف يمثل زمن وصول الموجات المنكسرة، ان نقطة تقاطع قطعتي المستقيم تمثل زمن وصول الموجات المباشرة والمنكسرة معا ، اي بنفس الزمن. ان المسافة المحصورة بين المحور العمودي عند الزمن صفر (موقع الضربة Shot Point) و امتداد نقطة التقاطع على المحور الافقي x ، تسمى مسافة العبور (Cross-over Distance (Xco او المسافة الحرجة Critical Distance، كما في الشكل (2-9a) ، ويمكن تعريفها بأنها المسافة على سطح الارض التي تصل عندها الموجات المباشرة والمنكسرة بنفس الزمن، وبعد هذه المسافة تصل الموجات المنكسرة فقط كوصول اولي First Arrival.

اما امتداد قطعة المستقيم التي تمثل زمن الموجات المنكسرة وتقاطعها مع محور الزمن T عند نقطة معينة سوف يكون لنا ما يعرف بنقطة زمن القطع Intercept Time (ti) ، شكل (2-9b)، ويمكن تعريفها بانها نقطة تقاطع قطعة المستقيم لزمن الموجات المنكسرة مع محور الزمن T ، اي انها تمثل الزمن الذي تكون عنده المسافة بين نقطة الضربة Shot Point واول لاقطة صفر (X= 0) ، وهذا افتراض نظري وغير موجود في الواقع .ان الفائدة من نقطة زمن القطع Intercept Time (ti) هو ايجاد ميل Slope قطعة المستقيم بدقة عالية بوساطة معادلة الخط المستقيم (y = a + bx) حيث y تمثل محور الزمن T وa تمثل نقطة زمن القطع Intercept Time (ti) وb تمثل الميل Slope ، اما x فتمثل محور المسافة.

يمكننا حساب سرعة الموجات الزلزالية التي تمثل سرعة الطبقات الصخرية من خلال منحي مسافة – زمن ، بوساطة حساب ميل قطعتي المستقيم للموجات المباشرة و للموجات المنكسرة اعتمادا على العلاقة الفيزيائية التي تنص على ان السرعة تساوي مقلوب الميل $V = \frac{1}{Slope}$، وبهذا تكون سرعة الطبقة الاولى التي تقدمت خلالها الموجات المباشرة تساوي $V_1 = \frac{1}{Slope}$ ، اما سرعة الطبقة الثانية التي انكسرت عبر حدها الفاصل الموجات المنكسرة فستكون $V_2 = \frac{1}{Slope}$.

نلاحظ من خلال الشرح ان منحني مسافة – زمن Time – Distance Curve لا يعطينا اي معلومات عن سمك وعمق الطبقات الصخرية ، وانما فقط سرعتها ، لذا حاول المختصون ايجاد علاقات رياضية لتحديد سمك وعمق الطبقات الصخرية ، فوضعوا عدة فرضيات تمكنهم من ذلك ، الفرضية الاولى تنص على ان الطبقات الصخرية تحت سطح الارض اما ان تكون افقية او تكون مائله، اما

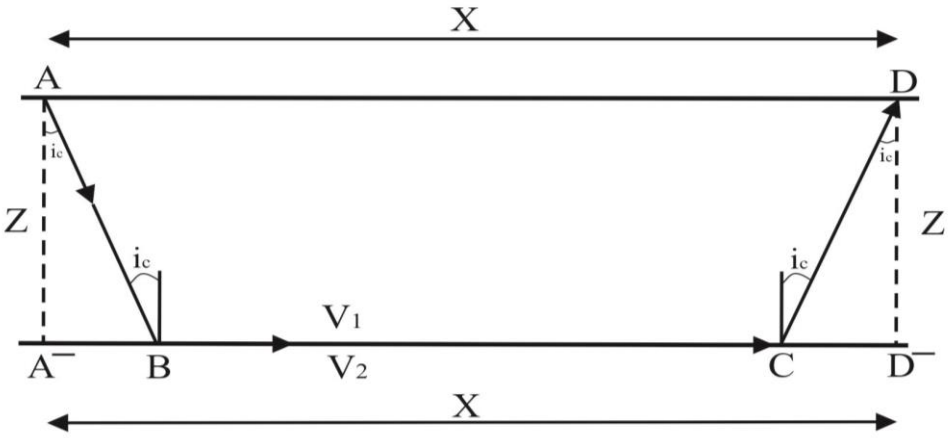
الفرضية الثانية فتنص على ان ابسط موديل يمكن اعتماده لحساب عمق وسمك الطبقات الصخرية يتضمن طبقتين فقط ، ومن ثم اعتماد نتائجه لحساب عمق وسمك الطبقات الصخرية الاخرى. لقد استندت هذه الفرضيات في الحساب على العلاقات الرياضية للدوال المثلثية ، وكما يلي :-

1- في حالة وجود طبقتين افقتين :-

في هذه الحالة تحسب سرعة الطبقة الصخرية الاولى وسمكها، وسرعة الطبقة الثانية وعمقها بوساطة حساب زمن المسار الكلي Total Time للموجة المنكسرة اعتمادا على الشكل (10-2) ووفق الخطوات التالية :-

ان الزمن الكلي الذي قطعته الموجه او (الشعاع) من نقطة توليدها A وانكسارها عند النقطة B ، ومن ثم انكسارها مرة اخرى عند النقطة C ، ومن ثم وصولها الى موقع اللاقطة عند النقطة D ، يحسب بواسطة العلاقة الآتية :-

$$T_{total} = T_{AB} + T_{BC} + T_{CD} \quad \text{.....(27)}$$



شكل (10-2) :- يوضح مسار الموجة المنكسرة من نقطة الضربة (A) وحتى وصولها الى اللاقطة نقطة (D).

بما ان الزمن يساوي $\frac{\text{المسافة}}{\text{السرعة}}$ و ان الموجة سارت ضمن المسافة AB بسرعة الطبقة الاولى والتي تساوي V_1 ، اذن :-

$$T_{AB} = \frac{\boldsymbol{AB}}{\boldsymbol{v_1}}$$

لو افترضنا ان الموجة لم تسقط على الحد الفاصل بين الطبقتين بشكل مائل (بزاوية اقل من الزاوية الحرجة)، وانما سقطت بشكل عمودي وسارت بموازاة الحد الفاصل ضمن الطبقة الثانية وبسرعة V_2 ، اي اتخذت المسار AA^- بدل المسار AB ،اذن سيصبح الزمن T_{BA}^- زمن تأخير

Delay Time ، لأننا اضفنا مسافة جديده هي BA^- ، لذا يجب طرح هذا الزمن T_{BA}^- من الزمن T_{AB} وكما يلي :-

$$\text{Delay Time} = T_{AB} - T_{BA}^-$$

وبما ان

$$T_{BA}^- = \frac{BA^-}{v_2}$$

وبالتعويض تصبح معادلة زمن التأخير Delay Time ، كما يلي :-

$$\text{Delay Time} = T_{AB} - T_{BA}^- = \frac{AB}{v_1} - \frac{BA^-}{v_2} \quad \textbf{.....(28)}$$

بالاعتماد على الدوال المثلثية يمكن ايجاد قيمة حدود المعادلة اعلاه ، حيث ان جيب تمام الزاوية ic يساوي المجاور على الوتر ، وكما في المعادلة الآتية :-

$$\cos i_c = \frac{AA^-}{AB} = \frac{Z}{AB}$$

حيث Z تساوي سمك الطبقة الاولى وهي تساوي المسافة AA^- ايضا ، لاحظ الشكل (2-10). ولإيجاد قيمة المسافة AB ستكون المعادلة بالصيغة الآتية :-

$$AB = \frac{Z}{\cos ic}$$

الان نجد المسافة BA^- بوساطة ظل الزاوية i ، وكما في المعادلة الآتية :-

$$\tan i_c = \frac{BA^-}{Z}$$

$$BA^- = Z \tan i_c$$

بتعويض قيم AB و BA^- في المعادلة رقم (28) سوف تكون قيمة زمن التأخير Delay Time ، كما في المعادلة الآتية :-

$$\text{D. T.} = T_{AB} - T_{BA}^- = \frac{AB}{v_1} - \frac{BA^-}{v_2} = \frac{z}{v_1 \cos ic} - \frac{z \tan ic}{v_2} \quad \textbf{.....(29)}$$

استنادا الى قانون سنل للموجات المنكسرة ، فان جيب زاوية السقوط i_c تساوي :-

$$\sin ic = \frac{v_1}{v_2} \quad \rightarrow \quad \mathbf{V_2} = \frac{V_1}{\sin ic} \quad \textbf{.....(30)}$$

وبتعويض معادلة (30) في المعادلة (29)، وبعد تحليل ظل الزاوية i ($\tan i_c = \frac{\sin ic}{\cos ic}$) ، تكون معادلة زمن التأخير D. T. بالصيغة الآتية :-

$$D.\ T. = \frac{z}{v_1 \cos ic} - \frac{z \sin ic}{\frac{v_1 \cos ic}{\sin ic}} \qquad \text{.....(31)}$$

وبرفع $\sin i_c$ من المقام للبسط في الحد الثاني، ستكون المعادلة (31) بالصيغة الآتية :-

$$D.\ T. = \frac{z}{v_1 \cos ic} - \frac{z \sin^2 ic}{v_1 \cos ic} \qquad \text{.....(32)}$$

وبأخذ الحد $\frac{z}{v_1 \cos ic}$ كعامل مشترك بين طرفي المعادلة ، ستكون المعادلة (32) بالصيغة الآتية :-

$$D.\ T. = \frac{z}{v_1 \cos ic}\ (1 - sin^2 ic) \qquad \text{.....(33)}$$

وبما ان قيمة الحد $(1 - sin^2 ic)$ يساوي $\cos^2 ic$ ، اذن المعادلة (33) ستصبح بالصيغة الآتية :-

$$D.\ T. = \frac{z}{v_1 \cos i}\ \cos^2 ic \qquad \text{.....(34)}$$

وباختصار قيمة $\cos i_c$ ستكون المعادلة النهائية لزمن التأخير D. T. بالصيغة الآتية :-

$$D.\ T. = \frac{z \cos i}{v_1} \qquad \text{.....(35)}$$

وبنفس الخطوات يتم حساب زمن التأخير للمسافة $\bar{C}D$ ، وهذا يعني لدينا زمني تأخير ، لذا ستكون قيمة زمن التأخير للمسافتين $\bar{B}A$ و $\bar{C}D$ ، حسب المعادلة الآتية :-

$$2D.\ T. = \frac{2z \cos ic}{v_1} \qquad \text{.....(36)}$$

اذن قيمة الزمن T_{AB} و الزمن T_{CD} هما زمني التأخير الذي تم حسابة في المعادلة (36) ، اما الزمن T_{BC} فيمكن حسابة اعتمادا على العلاقة الفيزيائية الزمن = $\frac{\text{المسافة}}{\text{السرعة}}$ ، حيث ان المسافة من نقطة مصدر الضربة الى موقع اللاقطة تساوي X ، وهي نفس المسافة التي قطعتها الموجات المباشرة بسرعة V_1 ، اذن تصبح معادلة الزمن T_{BC} بالصيغة الآتية :-

$$T_{BC} = \frac{X}{v_1}$$

وبالتعويض في المعادلة (28) ستكون المعادلة النهائية لحساب زمن المسار الكلي للموجة المنكسرة لإيجاد قيمة سمك الطبقة الأولى Z بالصيغة الآتية :-

$$T_{total} = \frac{X}{v_1} + \frac{2z \cos ic}{v_1} \qquad \text{.....(37)}$$

ولتبسيط المعادلة (37) بإيجاد قيمة $\cos^2 i_c$ وذلك بتحليله الى $(1- \sin^2 i_c)$، وباستخدام قانون سنل للانكسار تصبح قيمة $\cos^2 i_c$ كالاتي :-

$$\cos^2 i_c = 1 - sin^2\, ic = 1- \frac{v_1^2}{v_2^2} \qquad \textbf{.....(38)}$$

وبتحليل هذه المعادلة ، تصبح القيمة النهائية لـ $\cos i_c$ كالاتي :-

$$\cos^2 i_c = \frac{V_2^2 - V_1^2}{V_2^2} \qquad \textbf{.....(39)}$$

ويمكن اعادة كتابتها بالصيغة الآتية :-

$$\cos i_c = \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2} \qquad \textbf{.....(40)}$$

وبتعويض المعادلة (40) في المعادلة (37)، يمكن اعادة كتابة وتبسيط معادلة حساب الزمن الكلي للمسار (37) لتكون بالصيغة النهائية الآتية :-

$$T_{total} = \frac{X}{v_1} + \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{v_2 v_1} \qquad \textbf{.....(41)}$$

ان قيمة الحد زمن التأخير .D.T الذي هو $\frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{v_2 v_1}$ مساو لقيمة زمن القطع Intercept Time (ti) لقطعة المستقيم التي تمثل زمن الموجات المنكسرة عند المسافة (x= 0) ولها ميل مقداره $\frac{1}{v_2}$ ، لذا فأن قيمة زمن المسار الكلي T_{total} هي نفس قيمة زمن القطع عندما تكون المسافة بين اللاقطة ومصدر الضربة تساوي صفرا ، وبهذا يمكن اعادة كتابة المعادلة بدلالة Intercept Time (ti) بعد ازالة الحد الاول لان المسافة x تساوي صفر ، وكما يلي:-

$$ti = \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{v_2 v_1} \qquad \textbf{.....(42)}$$

الان من خلال المعادلة (42) يمكننا ايجاد سمك الطبقة الاولى Z من خلال منحي مسافة – زمن Time – Distance Curve بوساطة قيمة .من القطع (ti).

كذلك استطاع المختصون من ايجاد سمك الطبقة الاولى Z من خلال منحي مسافة – زمن Time – Distance Curve بوساطة استخدام مسافة العبور Cross-over Distance (Xco) او المسافة الحرجة Critical Distance من خلال اعادة اشتقاق معادلة حساب زمن المسار الكلي T_{total} معادلة

(41) باستخدام هذه المسافة. وهنا لا يسع المجال لذكر كل خطوات الاشتقاق حتى لا نسبب للقارئ الملل بكثرة الاشتقاقات وسنكتفي بالمعادلة النهائية التي هي :-

$$T_{total} = \frac{Xco}{v_1} + \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{v_2 v_1} \quad \text{.....(43)}$$

حيث استبدلنا المسافة x في المعادلة (41) بمسافة العبور Xco وبعد اجراء الاشتقاقات اصبحت المعادلة النهائية لحساب سمك الطبقة الاولى كالاتي :-

$$Xco = 2z\left(\sqrt{\frac{v_2+v_1}{v_2-v^1}}\right) \quad \text{.....(44)}$$

الان اصبحت لدينا ثلاثة معادلات يمكن بوساطتها حساب سمك الطبقة الاولى z وهي المعادلات (41) و(42) و(43) على التوالي، اثنان منها يمكن استخدامهما من خلال منحي مسافة – زمن Time – Distance Curve بإيجاد قيم زمن القطع Intercept Time (ti) ومسافة العبور Cross-over Distance (Xco) على التوالي .

2- في حالة وجود ثلاثة طبقات افقية :-

في حالة وجود ثلاث طبقات افقية تحت سطح الارض في منطقة المسح ، كما في الشكل (2-11) ، نقوم بأجراء كافة الاشتقاقات السابقة لإيجاد زمن التأخير Delay Time للطبقة الاولى، ثم نحسب ونضيف زمن التأخير للطبقة الثانية ، حيث ان زمن المسار الكلي لشعاع الموجة المنكسرة يمكن حسابة كالاتي :-

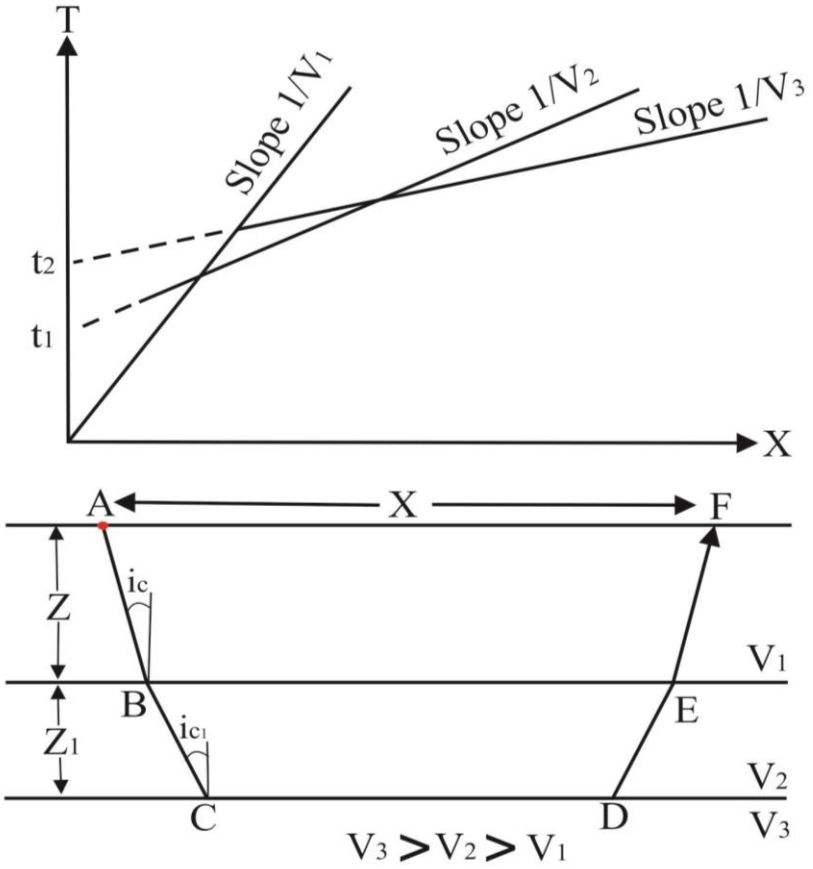
$$T_{total} = T_{AB} + T_{BC} + T_{CD} + T_{DE} + T_{EF} \quad \text{.....(45)}$$

وبما ان $T_{AB} = T_{EF}$ و $T_{BC} = T_{DE}$ ، لذا فأن زمن التأخير للطبقة الثانية يضاف الى المعادلة (41) لتصبح المعادلة النهائية لإيجاد سمك الطبقة الاولى z وسمك الطبقة الثانية z_1 في حالة وجود ثلاث طبقات افقية بالصيغة الآتية :-

$$T_{total} = \frac{X}{v_2} + \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{v_2 v_1} + \frac{2z_1\sqrt{V_3^2 - V_2^2}}{v_3 v_2} \quad \text{.....(46)}$$

وبدلالة استخدام زمن القطع Intercept Time (ti) تصبح المعادلة النهائية لحساب سمك الطبقة الاولى والثانية ، بالصيغة الآتية :-

$$t_{i2} = T - \frac{X}{v_2} + \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{v_2 v_1} + \frac{2z_1\sqrt{V_3^2 - V_2^2}}{v_3 v_2} \quad \text{.....(47)}$$



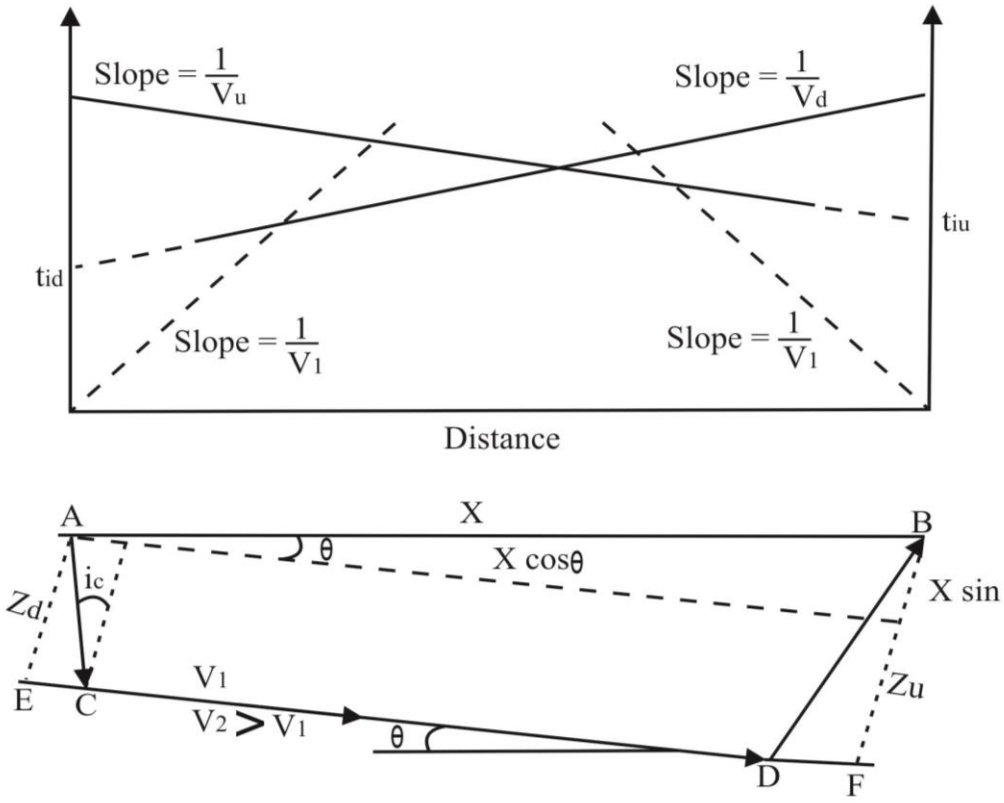
شكل (2-11) :- منحي مسافة – زمن لنموذج من ثلاث طبقات افقية.

وهكذا بالنسبة الى الموديل الذي يتكون من اربع طبقات نحسب ونضيف فقط زمن التأخير Delay Time للطبقة الثالثة في المعادلة (46)، وهكذا بالنسبة الى بقية الموديلات التي تتكون من اكثر من اربع طبقات.

3- في حالة وجود الطبقات المائلة ضمن موديل متكون من طبقتين:-

وضعت فرضية لحساب سمك الطبقات المائلة Dipping - layers ضمن موديل متكون من طبقتين، وكما في الشكل (2-12). في حالة وجود طبقة تحت سطح الارض مائلة Dipping –layer ، فأن المسوحات الانكسارية تنفذ بوساطة استخدام الترتيب الامامي - المعكوس Forward – Reverse Arrangement ، وذلك لتحديد زاوية الميل θ، حيث يتم توليد الموجات في نقطتين على طرفي خط النشر ، كما اشرنا الى ذلك في النقطة (4) ضمن الفقرة 2-1-1 ، وهذا سوف يؤدي الى ظهور اربعة قطع مستقيم ضمن منحي مسافة – زمن Time – Distance Curve اثنان تمثلان زمن وصول الموجات المباشرة والمنكسرة نتيجة توليد موجات عند بداية خط النشر Forward، والاثنان الأخيرتان تمثلان زمن وصول الموجات المباشرة والمنكسرة نتيجة توليد موجات عند نهاية خط النشر Reverse

وكما في الشكل (12-2). عندما تتقاطع قطعتي المستقيم اللتان تمثلان زمن الموجات المنكسرة في منتصف المرتسم فأن الطبقات افقية، اما اذا كانت نقطة التقاطع ليست في المنتصف فأن الطبقات مائلة.



شكل (12-2) :- يوضح موديل لطبقات مائلة متكون من طبقتين مع منحني مسافة – زمن Time – Distance Curve، مطور عن (Lowrie, 2007).

في مثل هذه الحالة فأن مقلوب ميل قطعة المستقيم لزمن الموجات المباشرة في كلا الاتجاهين يعطي نفس السرعة وهي V_1 ، والتي تمثل سرعة الطبقة الاولى ، على العكس من ذلك، فان مقلوب ميل قطعتي المستقيم اللتان تمثلان زمن الموجات المنكسرة لكل اتجاه سيعطي سرع ظاهرية، سوف نطلق عليهما V_d و V_u ، حيث V_d تمثل سرعة الموجة اسفل ميل الطبقة (Down) و V_u تمثل سرعة الموجة في اعلى ميل الطبقة ، وكلا السرعتين ترتبطان بالسرعة الحقيقة للطبقة الثانية V_2 بالمعادلات التالية ، (Sharma, 1986) :-

$$V_u = \frac{V_1}{\sin(ic+\theta)} = \frac{V_2 \sin ic}{sin(ic+\theta)} \qquad \textbf{.....(48)}$$

$$V_d = \frac{V_1}{\sin(ic-\theta)} = \frac{V_2 \sin ic}{sin(ic-\theta)} \qquad \textbf{.....(49)}$$

حيث θ هي زاوية الميل ، والزاوية i_c هي زاوية السقوط والتي تم توضيحها في المعادلة (21) وتساوي :-

$$\sin ic = \frac{v_1}{v_2}$$

$$ic = \text{Sin}^{-1}[0] = \frac{v_1}{v_2}$$

وبالتعويض في المعادلة (49) ، يمكن ايجاد زاوية الميل θ ، وزاوية السقوط i_c وكما يلي :-

$$\theta = \frac{1}{2}\left(\text{Sin}^{-1}\ \frac{V1}{Vd} - \text{Sin}^{-1}\ \frac{V1}{Vu}\right) \qquad \textbf{.....(50)}$$

$$i_c = \frac{1}{2}\left(\text{Sin}^{-1}\ \frac{V1}{Vd} + \text{Sin}^{-1}\ \frac{V1}{Vu}\right) \qquad \textbf{.....(51)}$$

بعد حساب كل من زاوية الميل θ ، وزاوية السقوط i_c من المعادلتين (50) و(51) ، يمكن الحصول على قيمة سرعة الطبقة الثانية V_2 بوساطة قانون سنل للانكسار معادلة (22)، $\sin ic = \frac{v_1}{v_2}$ ، ويتم تحديد سمك للطبقة الاولى Z_d و Z_u بوساطة تحديد ازمانه القطع المتعاقبة (t_{id}) و (t_{iu}) من منحي مسافة – زمن او رياضيا ، وكما يلي:-

$$t_{id} = \frac{2Zd\ cos\ ic}{V_1}$$

$$t_{iu} = \frac{2Zu\ cos\ ic}{V_1}$$

$$Z_d = \frac{v_1\ tid}{2cos\ ic}$$

$$Z_u = \frac{v_1\ tiu}{2cos\ ic}$$

اي هنالك سمكين للطبقة ، السمك الاول يمثل السمك في اعلى الميل ، والسمك الثاني يمثل سمكها في اسفل الميل.

هنالك طرائق اخرى لحساب سمك الطبقة الاولى او الثانية او الثالثة عندما تكون هذه الطبقات مائلة وليست افقية ، كما ان هنالك الكثير من الفرضيات الاخرى لحساب سمك الطبقات في حالة وجود فالق او قباب ملحية ، اوفي حالة كون طبوغرافية السطح الكاسر (السطح البيني بين طبقتين) غير منتظمة . كثرة هذه الفرضيات دفعت المختصين لإيجاد طرائق تفسير شاملة ممكن ان تعالج اكثر من فرضية

باستخدام طريقة تفسير واحدة ، وفي ادناه سنتطرق الى اهم طرائق التفسير المستخدمة في تفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري.

2- 4 طرائق تفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري Interpretation Methods of Seismic Refraction Data Survey

كثرة الفرضيات التي وضعت لتفسير الحالات المختلفة في بيانات المسوحات الزلزالية الانكسارية ، دفعت العديد من علماء هذه الطريقة لإيجاد طرائق تفسير شاملة وغير معقدة تساهم في تفسير هذه البيانات. بعض هذه الطرائق اندثر ولم تعد تستعمل لصعوبتها او لعدم دقتها وبعضها طور واصبح من اكثر الطرائق استخداما، وسنوجز في ادناه اهم هذه الطرائق.

1- Plus – Minus Method

2- Mean Minus Time Method

3- ABC Method

4- Generalized Reciprocal Time Method

5- Abem- Correction Method

6- Least Square Method

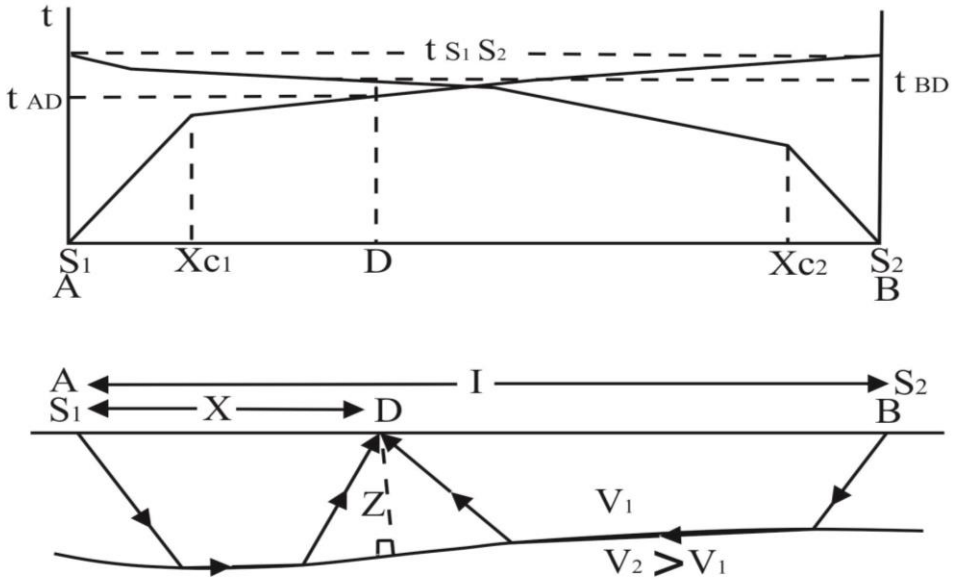
سنتناول بالشرح والتفصيل اربع من هذه الطرائق لكونها من اكثر الطرائق استخداما في تفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري ، وكما في ادناه :-

1- طريقة زائد – ناقص Plus – Minus Method :-

وضع هذه الطريقة العالم Hagedoorn (Hagedoorn,1959) ، لتفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري وإيجاد سرع وسمك واعماق الطبقات تحت سطح الارض في حالة كون السطح الكاسر (السطح البيني او الحد الفاصل بين الطبقات) منتظم او غير منتظم ؛ على ان لا يتجاوز ميل هذا السطح عن 10 درجة (بمعنى $\theta < 10$).

بعد اكمال المسح الزلزالي الانكساري المنفذ بوساطة ترتيب الامامي - المعكوس – Forward Reverse Arrangement، يرسم منحني مسافة – زمن Time – Distance Curve ، وكما في الشكل (13-2). يتم طرح الزمن بين منحني النشر الامامي Forward و منحني النشر المعكوس للطبقة الثانية، وذلك لإيجاد قيمة الزمن الناقص Minus Time Value ، وكما في الجدول (1-2) كنموذج ، اما الزمن الزائد Plus Time عند كل لاقطة فيحسب من خلال جمع زمن النشر الامامي وزمن النشر المعكوس ناقصا الزمن الكلي للنشر الامامي والمعكوس (Cummings,1979)، وكما في المعادلة :-

$$\text{Plus Time} = T_{AD} + T_{BD} - T_{AB} \quad \text{.....(52)}$$



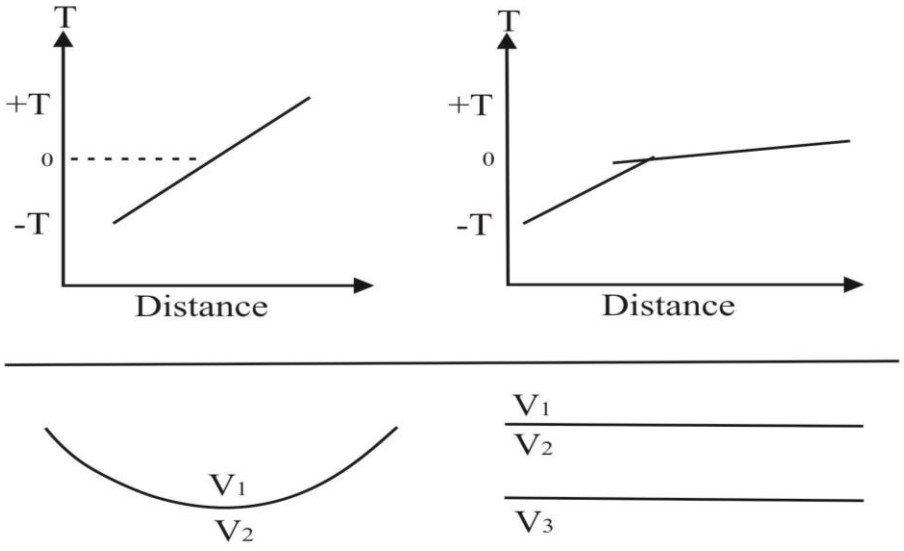
شكل (2-13) :- يوضح منحي مسافة – زمن ومسارات الموجات المنكسرة لترتيب الامامي – المعكوس لنموذج من طبقتين بينهما سطح بيني غير منتظم ، مطور عن (Kearey, *et. al.*,2002).

جدول (2-1) :- يوضح طريقة حساب Minus Time.

X (المسافة بين اللاقطات)	**T_{AD}** ملي ثانية	**T_{BD}** ملي ثانية	**$T_{AD} - T_{BD}$** ملي ثانية
20	14	35	35-14= - 21
30	17	33	33-17= -16
40	20	31	31-20= -11
50	23	29	29-23= -11
60	26	26	26-26 = 0
70	29	23	23-29 = + 6
80	31	20	20-31= +11
90	33	17	17-33= +16
100	35	14	14-35= + 21

ترسم قيم فرق الزمن $T_{AD} - T_{BD}$ التي تم حسابها في الجدول اعلاه مع المسافة بين اللاقطات X ، فاذا كان الشكل الناتج من المرتسم قطعة مستقيم واحده ، فان المنحني الانكساري يمثل وجود طبقتين افقيتين وان السطح الكاسر للطبقة الثانية مقعر نحو الاسفل، اما اذا كان المرتسم يظهر قطعتي مستقيم فانه يمثل ثلاث طبقات افقية وسطحين كاسرين ،وكما في الشكل (2-14).

يمكن حساب عمق السطح الكاسر وسمك الطبقة التي تعلوه تحت كل لاقطة بوساطة الخطوات والمعادلات الآتية :-



شكل (2-14) :- يوضح اشكال قطع المستقيمات الناتجة من رسم قيم Plus – Minus Time مع المسافة بين اللاقطات مع التفسير.

$$h = k * \text{Plus Time} \qquad \text{.....(53)}$$

حيث ان قيمة k ثابتة Constant ويتم حسابها بواسطة ايجاد السرع من منحني مسافة – زمن (وكما مر بنا سابقا حيث تساوي مقلوب الميل)، وفق المعادلة الآتية :-

$$K = \frac{V_1}{\sqrt{1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}}}$$

يمكن حساب عمق السطح الكاسر وسمك الطبقة التي تعلوه تحت اللاقطة الاولى التي تبعد (20م) عن المصدر في نقطة A ، بعد حساب قيمة Plus Time كما في المعادلة (52) وتعويض قيم T_{AD} و T_{BD} المأخوذة من الجدول ، و كما يلي :-

$$\text{Plus Time} = T_{AD} + T_{BD} - T_{AB}$$
$$= 35 + 14 - 35$$
$$= 14 \text{ m.sec}$$

وبتعويض هذه القيمة في المعادلة (53) نحصل على عمق السطح الكاسر وسمك الطبقة الاولى تحت اول اللاقطة :-

$$h = k * 14$$

وهكذا بالنسبة الى بقية اللاقطات الى ان يتم تحديد عمق السطح الكاسر وسمك الطبقة التي تعلوه تحت جميع اللاقطات.

Mean Minus Time Method -2

تعد هذه الطريقة واحدة من اهم طرائق تفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري المنفذ بوساطة الترتيب الامامي - المعكوس Forward – Reverse Arrangement ، خصوصا في المناطق التي يعتقد بوجود فوالق تحت سطحية فيها، حيث تتميز هذه الطريقة بقدرتها على حساب التغاير الجانبي Lateral variation في سرع الطبقات الكاسرة للموجات الزلزالية. تختلف هذه الطريقة عن الطريقة السابقة Plus – Minus Method بكونها تعتمد على متوسط الزمن وليس Plus Time، حيث يتم في هذه الطريقة حساب معدل زمن الوصول الاولي $\frac{\Delta T}{2}$ ، وكما في الجدول (2-2).

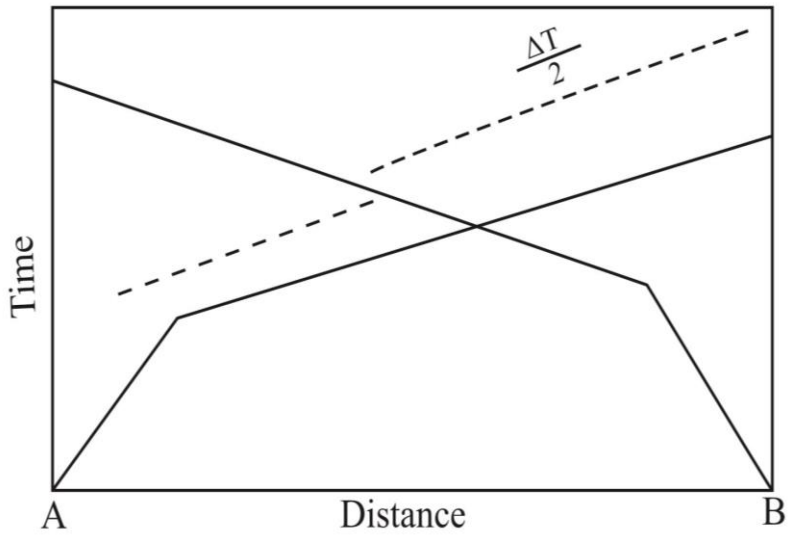
جدول (2-2) :- يوضح طريقة حساب $\frac{\Delta T}{2}$ Mean Minus Time.

X **(المسافة بين اللاقطات)**	$\mathbf{T_A}$ ملي ثانية	$\mathbf{T_B}$ ملي ثانية	$\frac{\Delta T}{2} = \frac{T_A + T_B}{2} - T_A$ ملي ثانية
20	14	35	….
30	17	33	….
40	20	31	….
50	23	29	….
60	26	26	….
70	29	23	….
80	31	20	….
90	33	17	….
100	35	14	….

بعد حساب قيم $\frac{\Delta T}{2}$ لجميع اللاقطات ، يتم رسم هذه القيم على منحني مسافة – زمن Time – Distance Curve، (Sjogren, 1984) ، وكما في الشكل (2-15)، فاذا كانت هذه القيم تظهر على شكل قطعة مستقيم ، فان الطبقات التحت سطحية افقية ، اما اذا كان هناك انقطاع في قطعة المستقيم فهذا يؤشر الى وجود فالق في منطقة المسح . وتحسب السرع الحقيقة للطبقات بوساطة العلاقة الآتية :-

$$\frac{1}{V_2} = = \frac{1}{S}\left(\frac{T_{Bn} - T_{Bn-1}}{2} + \frac{T_{An-1} - T_{An}}{2}\right)$$

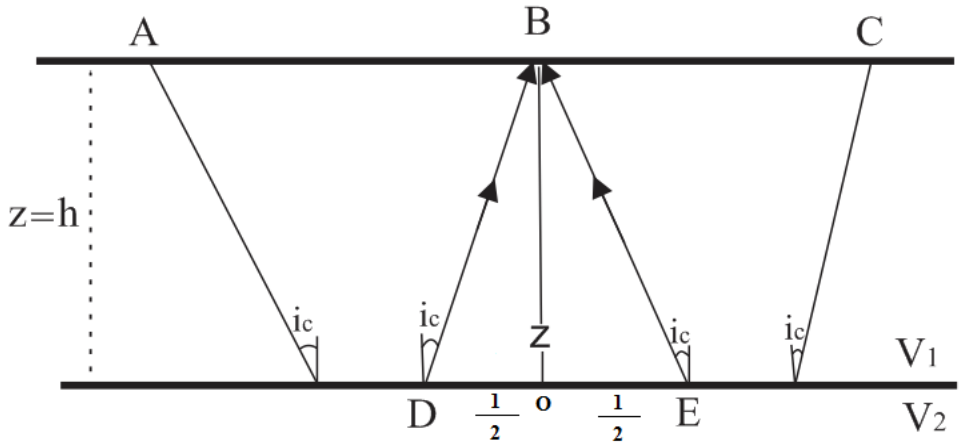
حيث S المسافة بين لاقطتين متجاورتين ، وn هي رقم اللاقطة ، والحد $\frac{T_{Bn} - T_{Bn-1}}{2}$ مثلا، يمثل متوسط فرق زمن الوصول عند لاقطتين متجاورتين بينهما مسافة S .



شكل (15- 2) :- يوضح منحي مسافة – زمن ومرتسم ΔT الذي يمثل قطعة مستقيم ذات انقطاع مما يشير الى وجود فالق في منطقة المسح .

-: ABC Method -3

تعتبر هذه الطريقة واحدة من اكثر الطرائق استخداما لإيجاد العمق الكلي للطبقة العليا من سطح الارض والتي تسمى بطبقة التعرية ، لذلك تستخدم هذه الطريقة في تفسير نتائج المسح الانكساري المنفذ من اجل المسوحات الزلزالية الانعكاسية لأجراء تصحيح المنسوب Static Correction. ان هذه الطريقة ايضا تستخدم في تفسير نتائج المسوحات الانكسارية المنفذة بوساطة ترتيب الامامي - المعكوس Forward – Reverse Arrangement ، وكما في الشكل (16-2).



شكل (16-2) :- يوضح مسارات الموجات المنكسرة من نقاط Shot Points وحتى نقطة الاستلام عند اللاقطة في نقطة D.

الاشتقاق الرياضي لهذه الطريقة يتعمد على حساب زمن المسار الكلي للموجات المنكسرة وزمني التأخير Delay Time الاول والثاني والذي يمكن توضيحه من خلال الخطوات الاتية :-

$$T_{AB} + T_{CB} - T_{AC} = T_{BD} + T_{EB} - T_{DE} \quad \text{.....(54)}$$

$$\text{Delay Time 1} = T_{BD} - \frac{1}{2} T_{DE}$$

$$\text{Delay Time 2} = T_{EB} - \frac{1}{2} T_{DE}$$

يتم حساب زمن التأخير بنفس الخطوات والاشتقاقات السابقة التي تمت ، حيث تكون القيمة النهائية وفق المعادلة (35) كالاتي :-

$$\text{Delay Time 1} = \frac{z \cos ic}{v_1}$$

$$\text{Delay Time 2} = \frac{z \cos ic}{v_1}$$

اذن بإعادة كتابة زمن المسار الكلي للموجات المنكسرة والمسجلة عند اللاقطة D في المعادلة (54) بعد حساب زمني التأخير الاول والثاني ، (Sjogrin, 1984)، ستكون المعادلة بالصيغة الآتية :-

$$T_{AB} + T_{CB} - T_{AC} = T_{BD} + T_{EB} - T_{DE}$$

$$T_{AB} + T_{CB} - T_{AC} = \frac{z \cos ic}{v_1} + \frac{z \cos ic}{v_1}$$

$$= \frac{2z \cos ic}{v_1}$$

وبإعادة كتابة المعادلة بدلالة السمك Z الذي يمثل سمك الطبقة تحت كل لاقطة ستكون المعادلة النهائية كالاتي :-

$$Z = \frac{(TAB + TCB - TAC)\, V_1}{2COS\, Ic} \quad \text{.....(55)}$$

وبحساب سمك الطبقة تحت كل لاقطة يتم حساب سمك الطبقة وتحديد عمق السطح الكاسر ، الذي يمثل العمق الذي تنتهي عنده الطبقة ، على سبيل المثال ، اذا كان سمك الطبقة 10 م من سطح الارض ، فأن السطح الكاسر يكون على عمق 10م وهو يمثل عمق الطبقة الثانية.

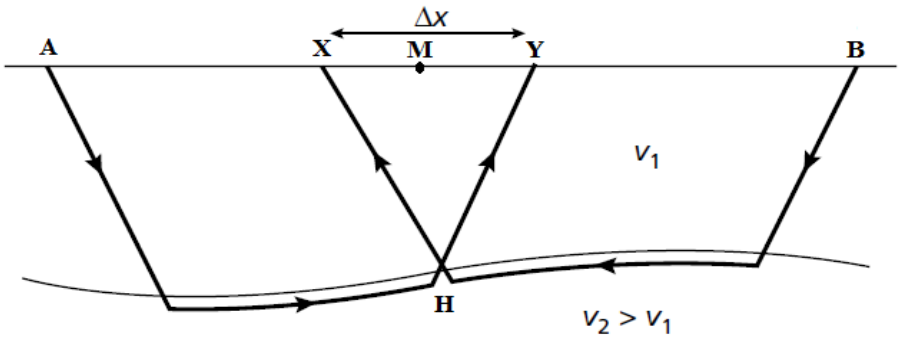
Generalized Reciprocal Time Method -4

تعد طريقة التبادل العمومية Generalized Reciprocal Time Method التي اكتشفها العالم Palmer عام 1980 ، واحدة من اكثر الطرائق استخداما لتفسير بيانات المسح الزلزالي الانكساري عندما تكون الاسطح الكاسرة متموجة ذات تغاير جانبي في سرعاتها الزلزالية. تسند هذه الطريقة على حساب زمن الوصول الاولي عند لاقطتين متجاورتين تفصل بينهما مسافة ΔX تسمى المسافة المثالية (Optimum X-Y value)، وتحدد قيمة هذه المسافة على العمق المخمن للسطح الكاسر (السطح البيني الفاصل بين الطبقات) ، وكما في الشكل (17-2). في هذه الطريقة تحسب دالتين هما :-

1- دالة تحليل السرعة Velocity analysis function (Tv) بوساطة العلاقة الآتية :-

$$Tv = \frac{T_{AY} - T_{BX} + T_{AB}}{2} \qquad \text{.....(56)}$$

ان قيمة Tv المحسوبة تمثل زمن الانتقال من نقطة A الى نقطة H ، انظر الشكل (2-16).



شكل (17- 2) :- يوضح مسارات الموجات المنكسرة من نقاط Shot Points وحتى نقطة الاستلام عند اللاقطات في النقاط X و Y.

2- دالة زمن – عمق Time-depth function (T_G) وتحسب بوساطة العلاقة الآتية :-

$$T_G = \frac{T_{AY} - T_{BX} + T_{AB}\left(\frac{XY}{V^-}\right)}{2} \qquad \text{.....(57)}$$

تمثل قيمة T_G الزمن بين نقطتي H و M ، اما قيمة V^- فهي تمثل السرعة الظاهرية للسطح الكاسر (بمعنى السرعة الظاهرية للطبقة الثانية)، والتي يمكن حسابها بالاعتماد على دالة Tv .

بعد حساب هاتين الدالتين لجميع اللاقطات اعتمادا على المسافة المثالية(Optimum X-Y value) بينهما ، ترسم قيمتي الدالتين Tv وT_G مع المسافة Offset AG. ثم تحسب السرعة الظاهرية V^- على طول السطح الكاسر لكل قطع المستقيم التي نتجت عن رسم Tv مع المسافة Offset AG ، والتي

تمثل مقلوب ميل Tv لكل قطعة مستقيم، وبهذا هي تبادلية Reciprocal مع قيم Tv ، و ان هذه القيمة سوف تظهر مقدار التغير بالسرعة الظاهرية على طول السطح الكاسر. بعد ذلك يحسب معدل السرعة Va لكل السرع الظاهرية V^{-} بوساطة المعادلة الآتية :-

$$Va = \sqrt{\frac{V^{-2}\,XY}{XY+2TGv^{-}}} \qquad \text{.....(58)}$$

ثم يحسب السمك للطبقة الاولى ، ويحدد عمق السطح الكاسر على طول خط النشر بوساطة المعادلة الآتية :-

$$Z= \frac{TG\,Va\,V^{-}}{\sqrt{V^{-2}-Va^{2}}} \qquad \text{.....(59)}$$

تتم عمليات التفسير حاليا ومنذ اكثر من ثلاثين سنه تقريبا بوساطة الحاسبة الالكترونية من خلال برامج التفسير، التي تسند على هذه الطرائق في عمليات حساب السرع الزلزالية للطبقات وكذلك سمكها وعمقها.

2- 5 الطبقة المخفية والنطاق الاعمى Hidden Layer and Blind Zone

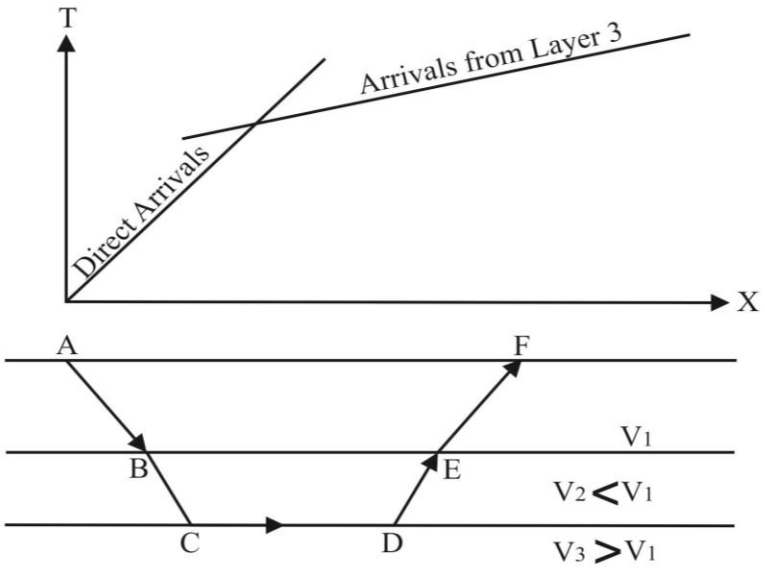
واحدة من اكبر واعظم سلبيات الطريقة الزلزالية الانكسارية هو عدم قدرتها على تشخيص وتحديد بعض الطبقات الصخرية ذات السمك القليل او ذات السرعة الاقل من سرع الطبقات التي تعلوها ، مما يجعلها طريقة غير فعالة في المناطق التي تتميز بتغير ليثولوجي كبير، حيث ان احد مبادئ هذه الطريقة هي وجوب حصول زيادة في سرعة الموجات مع زيادة عمق الاختراق. يمكن تعريف الطبقة الخفية Hidden Layer بانها الطبقة التي لا تظهر على المقطع الانكساري (منحي مسافة - زمن) للأسباب التالية ، (Soske,1959 ; Morgan, 1967; Banerjee and Gupta, 1975) :-

1- سرعة الطبقة الاولى اكبر من سرعة الطبقة الثانية ، لذا لا يحصل انكسار بالزاوية الحرجة عند السطح الكاسر للطبقة الثانية. حيث ان من شروط انكسار الموجات بالزاوية الحرجة هو زيادة السرعة مع العمق ، واذا لم تحصل زيادة بالسرعة بين الطبقات المتعاقبة فلن يحصل انكسار للموجات عبر الحدود الفاصلة بينها ، وكما في الشكل ، (18-2).

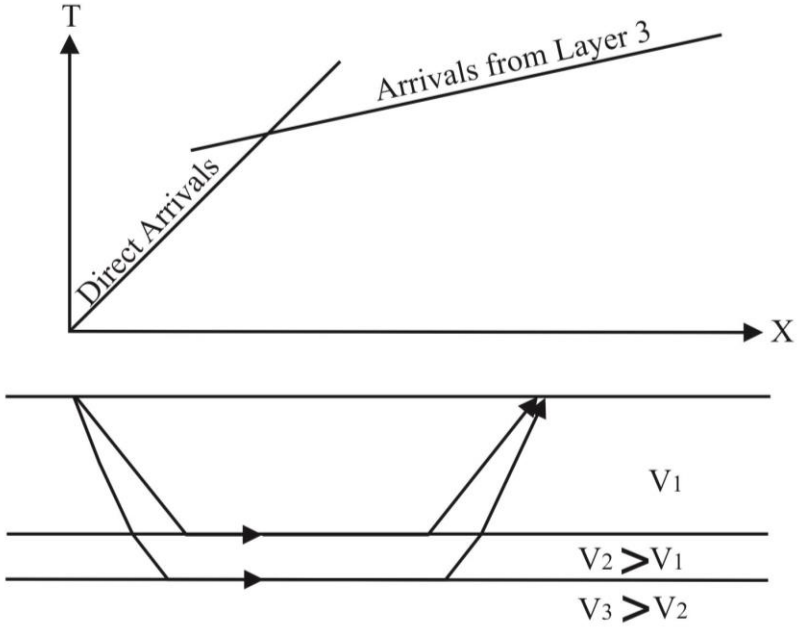
2- فرق السرعة بين طبقتين متعاقبتين صغير جدا ، لذا لا يحصل انكسار للموجات عند الحد الفاصل بينهما.

3- سمك الطبقة اقل من سمك الطبقة التي تعلوها ، لذلك لا تظهر هذه الطبقة على المقطع الانكساري، وكما في الشكل (19- 2).

اما النطاق الاعمى Blind Zone فيمكن تعريفة بانه السمك الاعظم Maximum Thickness والذي عنده لا تظهر الطبقة الخفية على المقطع الانكساري ، وبعد هذا السمك تبدء الطبقة بالظهور على المقطع الانكساري (منحي مسافة - زمن).



شكل (2-18) :- يوضح عدم ظهور الطبقة الثانية (الطبقة الخفية Hidden Layer) على منحي مسافة – زمن ، لكون سرعتها اقل من سرعة الطبقة الاولى ، حيث $V_2 < V_1$ ، (Kearey, *et. al.*,2002).



شكل (2-19) :- يوضح عدم ظهور الطبقة الثانية (الطبقة الخفية Hidden Layer) على منحي مسافة – زمن ، لكون سمكها اقل من سمك الطبقة الاولى ، معدل عن (Kearey, *et. al.*,2002).

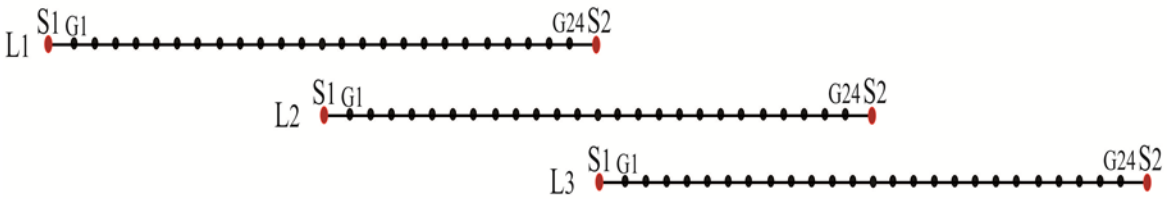
6-2 تقنية المسح الزلزالي الانكساري المقطعي ثنائي الابعاد 2D Seismic Refraction Tomography Survey Technique

ان التطور الحاصل في تصميم وتصنيع اجهزة المسح الخاصة بالطريقة الزلزالية الانكسارية والتقدم الهائل في مجال برامج الحاسبة الإلكترونية ، قد قاد الى ظهور تقنيات المسح الزلزالي الانكساري المقطعي Seismic Refraction Tomography Survey Technique ثنائية وثلاثية الابعاد في بداية عقد التسعينات من القرن الماضي. تعرف التقنية المقطعية الزلزالية Seismic Tomography Technique على انها تقنية تصوير تحت سطحية تعتمد على توزيع سرعات الموجات الزلزالية للصخور والترسبات بالاتجاهين العمودي والافقي لرسم مقاطع تحت سطحية ثنائية او ثلاثية الابعاد باستخدام تقنية الموديلات العددية المعكوسة الاتوماتيكية Automatic Inverse Numerical Modeling ، والتي يمكن اختصارها الى الموديل المعكوس Inverse Modeling، حيث تستخدم تقنية العكس Inversion لتحويل ازمنة الوصول الاولي المقاسة الى موديل سرع ثنائي الابعاد، والذي يحول الى موديل طبقي Layered Model يستخدم في تفسير الوضع الجيولوجي تحت السطحي.

تعطي تقنية المسح الزلزالي الانكساري المقطعي Seismic Refraction Tomography Survey Technique ثنائية الابعاد معلومات اكثر دقة من تقنيات المسح الزلزالي الانكساري التقليدية، نتيجة كثافة القياسات التي يتم الحصول عليها من خلال هذه التقنية وبالاتجاهين العمودي والافقي، حيث تكون هذه التقنية مثالية عندما يكون هنالك تباين جانبي (افقي) كبير او تدريجي في قيم السرع الزلزالية للطبقات الصخرية او الترسبات في المناطق ذات التضاريس الوعرة او ذات التراكيب تحت السطحية المعقدة، (Al-Nuaiemy,2018).

1-6-2 جمع البيانات Data Acquisition

تستخدم في تنفيذ العمل الحقلي للمسوحات الخاصة بالمسح الزلزالي المقطعي Seismic Refraction Tomography Survey أجهزة تسجيل زلزالي Seismograph رقمية وعالية الدقة ، وتكون هندسية نشر اللاقطات الارضية مشابه لهندسية النشر المستخدمة في المسوحات التقليدية احادية البعد ، ويفضل استخدام الترتيب الامامي – المعكوس Forward- Reverse Arrangement مع التركيز على زيادة عدد اللاقطات المستخدمة وان يتم النشر بطريقة التداخل Overlapping ضمن نفس خط النشر، ويجب أن يكون التداخل ضمن خط النشر بنسبة 25٪ إلى 50٪، وتنفذ طريقة التدخل كما في الشكل (2-20).



شكل (2-20):- طريقة تنفيذ طريقة التداخل Overlapping في تنفيذ المسح الزلزالي الانكساري المقطعي.

2-6-2 معالجة البيانات Data Processing

بعد تنفيذ المسح الزلزالي بتقنيه المسح الزلزالي المقطعي Seismic Refraction Tomography Survey، تنقل البيانات الى الحاسبة لغرض البدء بأجراء عملية المعالجة. وعملية المعالجة مشابه لعملية المعالجة التي تجري على البيانات المستحصلة من المسوحات التقليدية مع الاشارة الى وجوب إجراء تطبيق استعادة او تعويض السعة Amplitude Recovery على البيانات الزلزالية من خلال زيادة درجة الكسب Gain، حيث كما اشرنا سابقا الى ان طاقة الموجات الزلزالية تعاني من التوهين Attenuation كلما ابتعدت عن مصدر تولدها (التباعد او الانتشار الكروي Spherical Divergence) مما يؤدي الى تتناقص في سعاتها تدريجيا مع زيادة مسافة السير، لذلك يجب تقوية ورفع سعات الموجات المستلمة عند اللاقطات البعيدة من مصدر الطاقة باستخدام هذا التطبيق، بحيث تكون سعة الموجة المستلمة عند اللاقطة القريبة من مصدر الطاقة مساوية لسعة الموجة المستلمة عند اخر للاقطة.

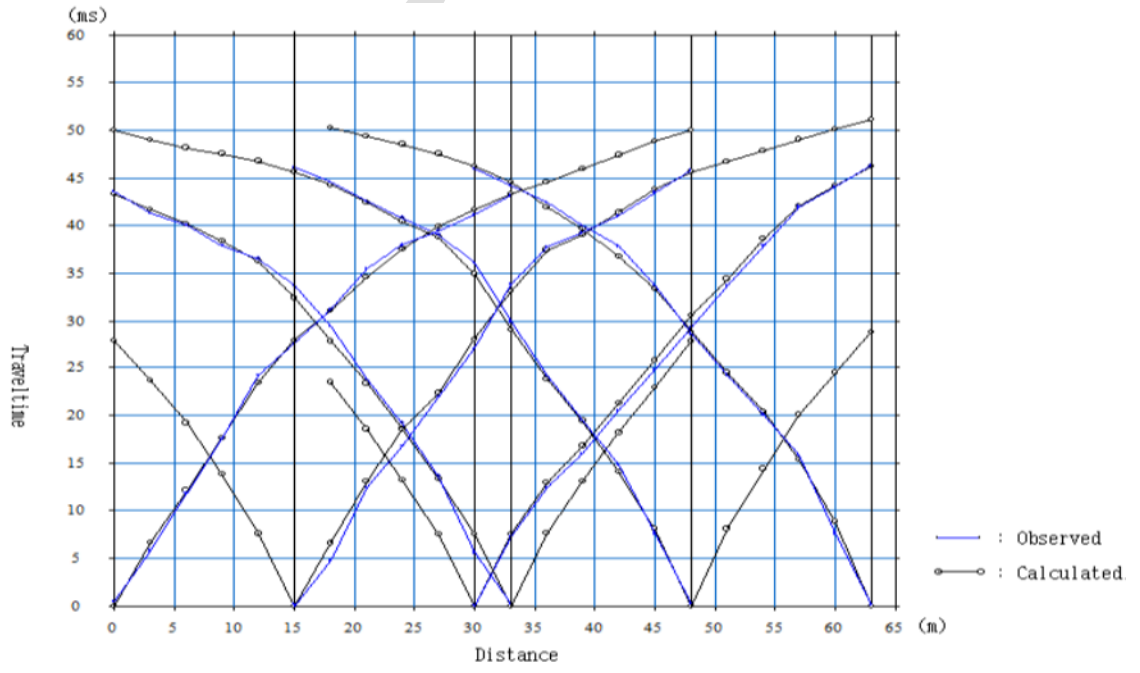
2-6-3 تفسير البيانات Data Interpretation

بعد معالجة البيانات وازالة الضوضاء منها ، تتم عملية التقاط أزمنة الوصول الأولي للموجات الزلزالية و لكل آثر زلزالي أوتوماتيكا عن طريق برامج خاصة مثل برنامج Pickwin ثم يتم التعديل عليها يدويا و تحفظ ضمن ملف خاص في الكمبيوتر. تستند عملية تفسير بيانات المسح المقطعي Tomography Survey Data على أنشاء موديل سرعة اولي Initial Velocity Model من قبل برامج التسفير، واكثر البرامج استخداما هو برنامج Plotrefa (Analysis Refraction). ان انشاء الموديل الاولي يتم بالاعتماد على عدة معاملات Parameters مثل الحد الأدنى والأعلى لسرعة الموجات الزلزالية لكل الطبقات الصخرية او ترسبات والتي تم حسابها من خلال منحنيات مسافة – زمن ، وكذلك الحد الأقصى لعمق الطبقة الأخيرة والذي يتم تخمينه بالاعتماد على قيمة طول خط النشر

كما ذكرنا سابقا ، ويجب أن تكون هذه المعاملات ضمن الحد المعقول حتى نضمن الحصول على موديل دقيق للسرع .

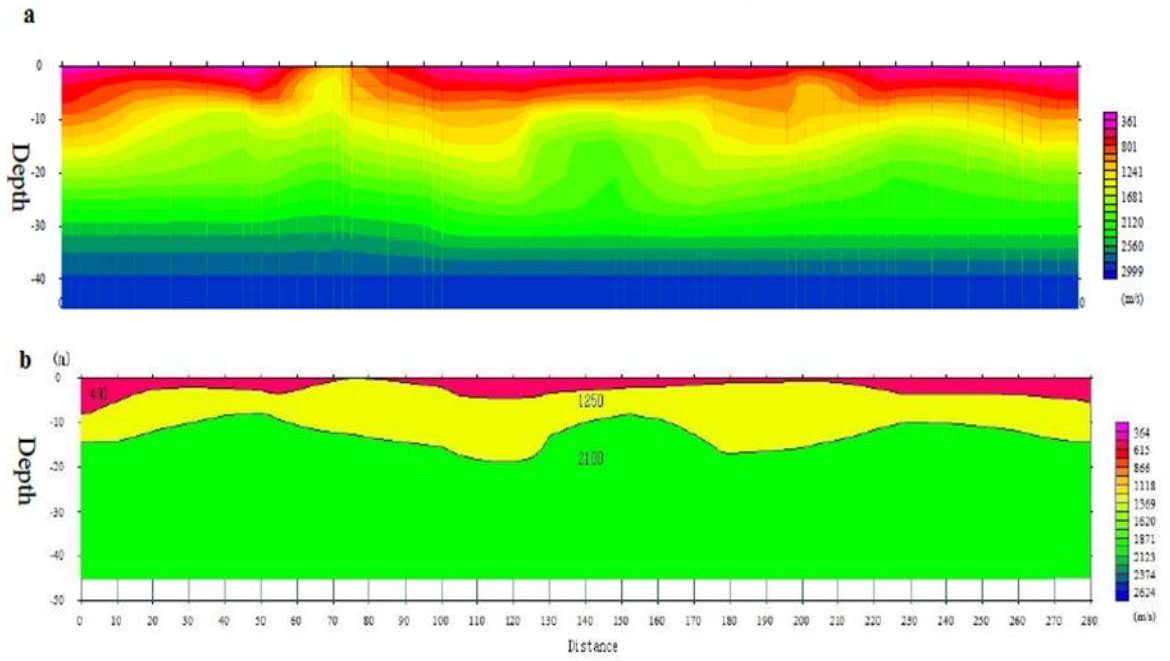
بعد ان أنشاء الموديل الاولي يقول البرنامج بتقسيم هذا الموديل الى خلايا Cells ذات سرع ثابتة تتضمن زمن الوصول الاولي المقاس Observed والذي يرسم على شكل منحنيات مسافة - زمن لكل خط مسح، ثم يقوم البرنامج بأنشاء موديل رياضي بواسطة عملية المحاكاة Simulate لحساب قيم زمن الوصول الاولي رياضيا Calculated من خلال نوعين من العمليات الخوارزمية Algorithm وهما Ray-Tracing و Finite-Difference ، (Kirsch,2006). بعد هذه العملية اصبح الموديل الاولي يتضمن قيمتان لزمن الوصول الاولي واحدة مقاسة Observed والثانية محسوبة Calculated ومرسومتان مع بعضهما على شكل منحنيات مسافة – زمن ، وكما في الشكل (21-2). بعد ذلك يقوم البرنامج بتحسين وتهذيب Smooth هذا الموديل الاولي بوساطة عملية التهذيب Smoothing لزيادة درجة التطابق بين زمن الوصول الاولي المقاس حقليا وزمن الوصول الاولي المحسوب رياضيا من خلال سلسلة من عمليات تسمى التكرار Iterations او عملية تتبع الأشعة التكراري Iteratively Tracing Ray ، والتي يجب ان لا تزيد عن 10 مرات .

ان الاختلاف في درجة التطابق بين هذين الموديلين تسمى بنسبة الخطأ المئوية – Root (RMSE) Mean Square-Error % ، والتي يجب ان لا تتجاوز نسبة 5% في معظم الحالات، فكلما قلت هذه النسبة كلما زادت درجة التطابق بين الزمنين المقاس والمحسوب.



شكل (21- 2) :- يوضح موديل الازمنة المقاسة والمحسوبة ، (Al-Nuaiemy, 2018).

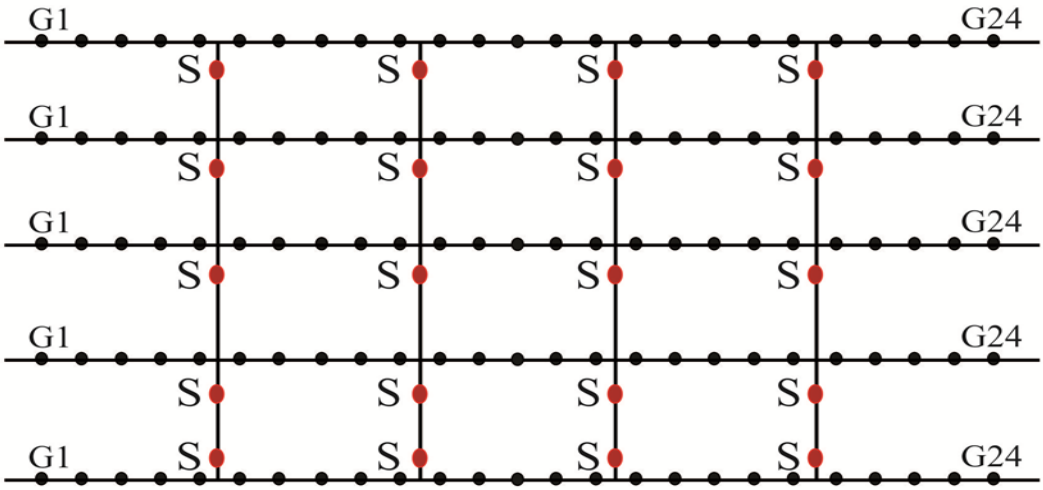
يقوم البرنامج بعد اعتماد درجة التطابق الافضل بين الزمنين في الموديل الاولي بحساب الموديل المعكوس من الموديل الاولي بوساطة عملية العكس Inverse Modeling. ان الموديل المعكوس Inverse Model يمثل الناتج النهائي لعملية العكس التي تم خلالها تحويل ازمنة الوصل الاولي الى قيم لسرع الموجات الزلزالية تحت سطح الارض بالاتجاهين الافقي والعمودي ، وفي نهاية العملية يتم تحويل هذا الموديل المعكوس الى موديل طبقي Layered Model لتوضيح الوضع الجيولوجي تحت السطحي للمنطقة الممسوحة، وكما في الشكل (22-2).



شكل (22-2) :- (a) الموديل الزلزالي المعكوس Inverse Model الذي يمثل توزيع قيم السرع للطبقات الصخرية او الترسبات ،(b) الموديل الطبقي Layered Model ، (Al-Heety,2014).

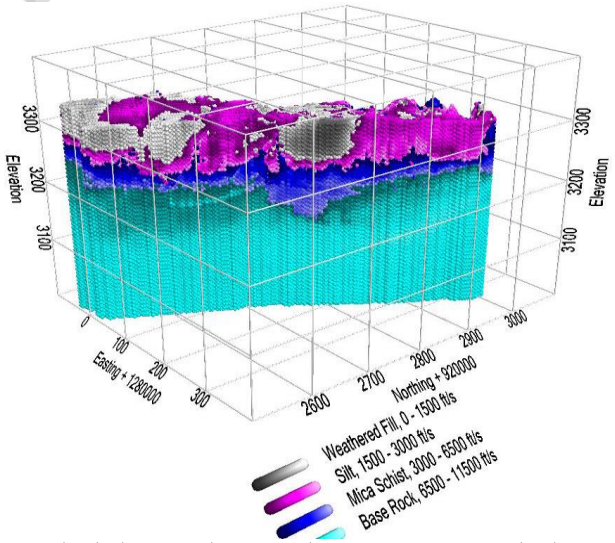
7-2 تقنية المسح الزلزالي الانكساري المقطعي ثلاثي الابعاد 3D Seismic Refraction Tomography Survey Technique

تعد تقنية المسح الزلزالي الانكساري المقطعي ثلاثي الابعاد من التقنيات القليلة الاستخدام في المسوحات الزلزالية الانكسارية مقارنة بالتقنيات الاخرى احادية وثنائية الابعاد ، لكونها تحتاج الى اجهزة عالية الدقة والحساسية ،وكذلك الى حاسبات متطورة جدا بسبب كمية البيانات الكبيرة الناتجة عن هذه المسوحات . تجمع البيانات بوساطة هذه التقنية من خلال نشر اللاقطات على شكل شبكة Grid من خطوط استلام وخطوط مصدر ، بحيث تكون خطوط المصدر عمودية على خطوط الاستلام ، وكما موضح في الشكل (23-2).



شكل (2-23):- هندسية النشر (الترتيب) في تنفيذ المسح الزلزالي المقطعي الانكساري ثلاثي الابعاد 3D.

اما عملية المعالجة والتفسير فهي مشابه لعمليات المعالجة والتفسير لبيانات المسح المقطعي ثنائي الابعاد ، مع اختلاف بسيط هو ان الموديل المعكوس سيكون على شكل مكعب زلزالزلي ثلاثي الابعاد لتوزيع السرع الزالزالية، وكما في الشكل (2-24)، كما يمكن انتاج مقاطع ثنائية الابعاد لاي طبقة ضمن المكعب الزلزالي ثلاثي الابعاد. يمكن تحويل نتائج المسح الزلزالزلي ثنائي الابعاد الى موديل مقطعي معكوس ثلاثي الابعاد ايضا ، (Flinchum et al., 2015) وهذه الطريقة مستخدمة حاليا بشكل واسع. تحول الموديلات الزالزالية المكعبة ثلاثية الابعاد الى موديلات طبقية Layered Models ايضا كما للموديلات ثنائية الابعاد او يتم دمجها في موديل واحد ، وكما في الشكل(2-24).



شكل (2-24):- مكعب زلزالي ثلاثي الابعاد لتوزيع السرع الزلزالية مع نوع الطبقات الصخرية (Sirles and Rock, 2014).

الفصل الثالث

التطبيقات الهندسية

المقدمة

تتميز الطريقة الزلزالية الانكسارية عن باقي الطرائق الجيوفيزيائية المستخدمة في التحريات الضحلة، بانها اكثر الطرائق استخدما في التحريات الهندسية Engineering Investigations وخصوصا في مجال الهندسة المدنية Civil Engineering لتقيم الخصائص الجيوتكنيكية Evaluation of Geotechnical Properties للصخور والترسبات وبالأخص طبقة التربة . كما تستخدم هذه الطريقة بشكل محدود في التحري عن الخزانات الجوفية Groundwater Aquifers ، حيث تتميز الطبقات الحاملة للمياه والمشبعة كليا (Sw =100%) بأن سرعة موجاتها الابتدائية Vp تبلغ 1500 m/sec ، وتزداد قيمة السرعة هذه مع نقصان نسبة التشبع المائي ، وكما مر بنا في الفصل الاول من هذا الكتاب.

لذا ستناول في هذا الفصل التطبيقات الهندسية للطريقة الزلزالية الانكسارية فقط دون غيرها من التطبيقات وذلك لكونها الاكثر استعمالا. فقد أصبحت التطبيقات الجيوفيزيائية الهندسية وسيلة مهمة وأساسية لفهم طبيعة الطبقات تحت السطحية، فهي تعطي معلومات أساسية لا غنى عنها للمهندس المدني في مجال تقييم الخصائص الجيوتكنيكية Geotechnical Properties لمواقع المباني والمشاريع الهندسية الكبيرة، مثل السدود والجسور والانفاق . إن أهمية المسح الزلزالي الانكساري في الهندسة المدنية قد تطور بشكل كبير في العقود الأخيرة، فقد اثبتت هذه الطريقة قدرتها العالية في تقييم المواقع الهندسية مثل؛ تحديد مواقع التكهف والضعف في التربة والطبقات الصخرية وتحديد سمكها و التغير في نوعيتها ، بالإضافة الى تحديد مواقع التصدعات والتشققات الأرضية. وتتميز الطريقة الزلزالية الانكسارية بأنها صديقة للبيئة، وبإمكانها تعيين موقع المشكلة الهندسية دون القيام بالحفر في الموقع.

سنتكلم اولا في بداية هذا الفصل عن علاقة معاملات المرونة بالسرع الزلزالية وكيفية تحديد هذه المعاملات اعتمادا على السرع الز لزلزالية فقط ، ثم نتكلم عن بعض التقنيات المهمة التي تستخدم في ايجاد السرع الزلزالية للموجات القصية S-Waves ، مثل تقنية التحليل متعدد القنوات للموجات السطحية (موجات رايلي)(Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW ، ثم نختم هذا الفصل بالتكلم عن طرائق حساب المعاملات الجيوتكنيكية المستخدمة في تقيم الخصائص الجيوتكنيكية Evaluation of geotechnical properties للصخور والترسبات في المواقع الانشائية.

1-3 العلاقة بين معاملات المرونة والسرع الزلزالية The Relationship Between Elastic Modules and Seismic Velocities

ترتبط السرع الزلزالية للصخور والترسبات بمعاملات المرونة بشكل رئيسي ، وتعتمد قيمة السرع للموجات الابتدائية P-Waves والقصية S-Waves على هذه المعاملات. ان القياس الموقعي لهذه المعاملات صعب ومكلف جدا ، لذا حاول المختصون البحث عن طرائق تمكنهم من حساب هذه المعاملات بجهد وكلفة اقل وبالاعتماد على السرع الزلزالية ، وقاد هذا البحث الى التوصل للعديد من العلاقات التي يمكن بوساطتها حساب معاملات المرونة باستخدام سرع الموجات الزلزالية ، وبالاعتماد على معادلتي حساب السرعة للموجات لابتدائية P-Waves والقصية S-Waves وكما يلي :-

بما ان $Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$

حيث ρ هي الكثافة ،وبتربيع الطرفين للتخلص من الجذر ، ستكون هذه المعادلة بالصيغة الآتية :-

$$Vs^2 = \frac{\mu}{\rho}$$

ويمكن اعادة كتابتها بالصيغة الآتية :-

$$\mu = Vs^2 \rho \qquad \text{.....(60)}$$

وبما ان $Vp = \sqrt{\frac{K+4/3\mu}{\rho}}$

وبتربيع الطرفين للتخلص من الجذر ، ستكون هذه المعادلة بالصيغة الآتية :-

$$Vp^2 = \frac{K+4/3\mu}{\rho} \qquad \text{.....(61)}$$

وبتعويض معادلة (60) في المعادلة (61) ، ستكون المعادلة النهائية لحساب المعامل الحجمي Bulk Modulus (K) اعتمادا على السرع الزلزالية بالصيغة الآتية :-

$$\frac{K}{\rho} = (Vp^2 - \frac{3}{4} Vs^2) \qquad \text{.....(62)}$$

وبطرق اشتقاق مشابه تم اشتقاق المعادلات الاخرى التي يمكن بوساطتها حساب معاملات المرونة اعتمادا على قيم سرع الموجات الزلزالية الابتدائية P-Waves والقصية S-Waves، وسندرج في الجدول التالي نموذجا من هذه المعادلات ولكل معامل مرونة .

جدول (3-1) :- المعادلات المستخدمة في حساب معاملات المرونة اعتمادا على السرع الزلزالية.

Elastic Modules	Formula
Young's Modulus (E)	$E = \rho \left(\frac{3Vp^2 - 4Vs^2}{\left(\frac{Vs}{Vp}\right)^2 - 1} \right)$
Bulk Modulus (K)	$\frac{K}{\rho} = (Vp^2 - \frac{3}{4} Vs^2)$
Rigidity or Shear Modulus (μ)	$\mu = Vs^2 \rho$
Poisson's Ratio (σ)	$\sigma = \frac{\left(1 - 2\left(\frac{Vs}{Vp}\right)^2\right)}{2\left(1 - \left(\frac{Vs}{Vp}\right)^2\right)}$
Lame's Constant (λ)	$\lambda = \rho(Vp)^2 - 2(Vs)^2$

2-3 تحديد سرعة الموجات القصية (Determination of Shear Waves Velocity (V_S)

يتضح مما تقدم اهمية سرعة الموجات القصية S-Waves في حساب معاملات المرونة Elastic Modules لكونها ترتبط بعلاقات رياضية مع جميع هذه المعاملات ، وان تقييم الخصائص الجيوتكنيكية Geotechnical Properties للتربة والطبقات الصخرية يتعمد على هذه المعاملات بشكل اساسي، لذا لابد لنا من التطرق الى الطرق المستخدمة في تحديد وحساب سرعتها.

يعد المسح الزلزالي الانكساري باستخدام الموجات القصية S-Waves في الموقع وسيلة جيوفيزيائية مهمة في تقييم الخصائص الجيوتكنيكية Geotechnical Properties للتربة والطبقات الصخرية . يمكن قياس سرعة الموجة القصية من خلال العديد من الطرائق والتقنيات المختلفة ؛ مثل طريقة المسح الانكساري القصي Share Refraction Survey، وطريقة مسح الموجات السطحية Surface Waves Survey وطريقة مسح الابار مثل Up – Hole، Down-Hole ، Cross-Hole.

1-2-3 المسح الانكساري القصي Share Refraction Survey

يمكن الحصول على الموجات القصية S-Waves بطرقتين ، الاولى هي المسح الانكساري القصي Shear Refraction Survey والتي تكون مشابهة لطريقة المسح الزلزالي الانكساري التقليدي، والثانية هي طريقة المسح الزلزالي الانكساري ثنائي الابعاد 2D Seismic Refraction Survey،

حيث يتم لتوليد الموجات الثانوية (القصية) S-waves من خلال الضرب جانبيا على وتد من الخشب مغروس جزئه الاعظم في الارض. ويحدد نوع الاستقطاب المراد توليده لهذه الموجات افقي S_H او عمودي S_V من خلال تحديد اتجاه الضربة على الوتد نسبة الى اتجاه خط النشر، فاذا كانت الضربة عمودية على اتجاه خط النشر ستتولد موجات قصية ذات استقطاب افقي S_H ، وكما في الشكل (2-6) في الفصل الثاني، اما اذا كانت الضربة موازية لخط النشر فسوف تتولد موجات ثانوية ذات استقطاب عمودي S_V، يتم توليد الموجات القصية S_H احيانا بأسقاط المطرقة بشكل افقي على قرص معدني او مطاطي مثبت داخل حفرة صغيرة، وكما في الشكل (1-3).

شكل (1-3):- طريقة توليد الموجات القصية S_H-Waves في الحقل باستخدام القرص البلاستيكي، (Al-Heetty,2014).

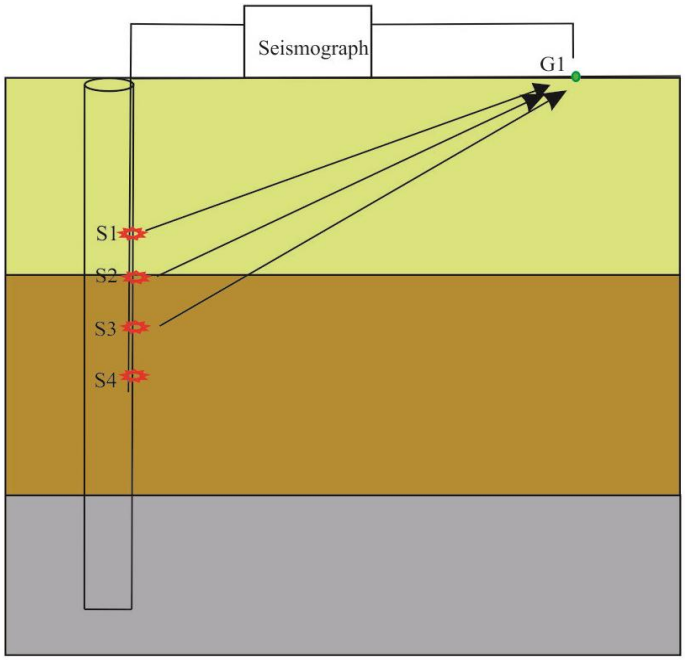
2-3 -2 مسح الموجات السطحية Surface Waves Survey

يتم تحديد سرعة الموجات القصية S-Wave من خلال تقنيتين ، الاولى تسمى تقنية التحليل الطيفي للموجات السطحية Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) (Heisey et. al., 1982) ، والثانية تسمى تقنية التحليل متعدد القنوات للموجات السطحية Multi-Channel Analysis of Surface Waves (M**ASW**) ، وكلتا الطريقتين تعتمدان على توليد موجات ريلي Rayleigh Waves (L_R) .

3-2-3 طرائق مسح الابار Up – Hole ، Down - Hole ، Cross - Hole

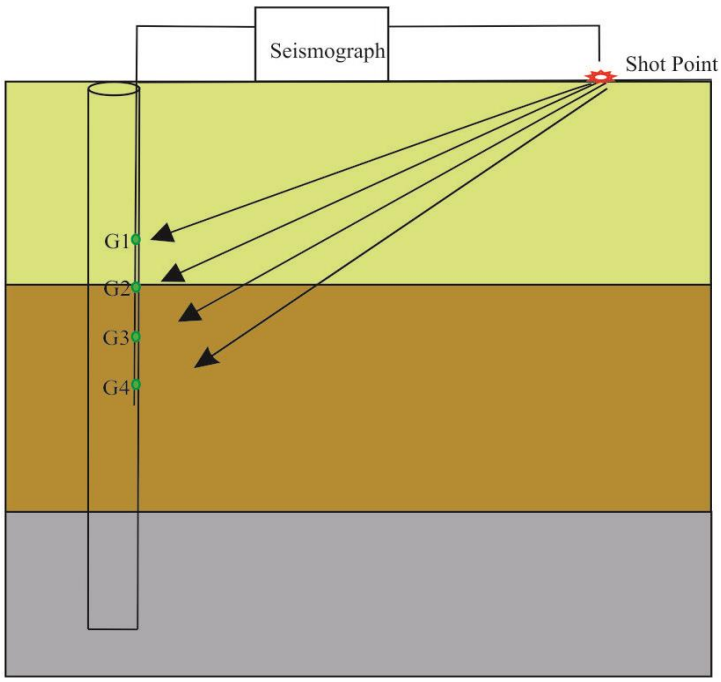
وهذه الطرائق تعمد على حفر بئر او ابار في الموقع واجراء القياسات داخلها ، وتستخدم لتحديد المشاكل الهندسية التي تعاني منها بعض المنشآت المشيدة ، والتي يصعب اجراء القياسات او المسوحات داخلها ،(Mc Cann, *et. al.*,1986 ; Hamdi, *et. al.*,1996) . ففي طريقة Up – Hole ، يكون

مصدر توليد الموجات الزلزالية داخل البئر وعلى اعماق مختلفة، بينما تكون اللاقطات على سطح الارض، وكما في الشكل (2-3).



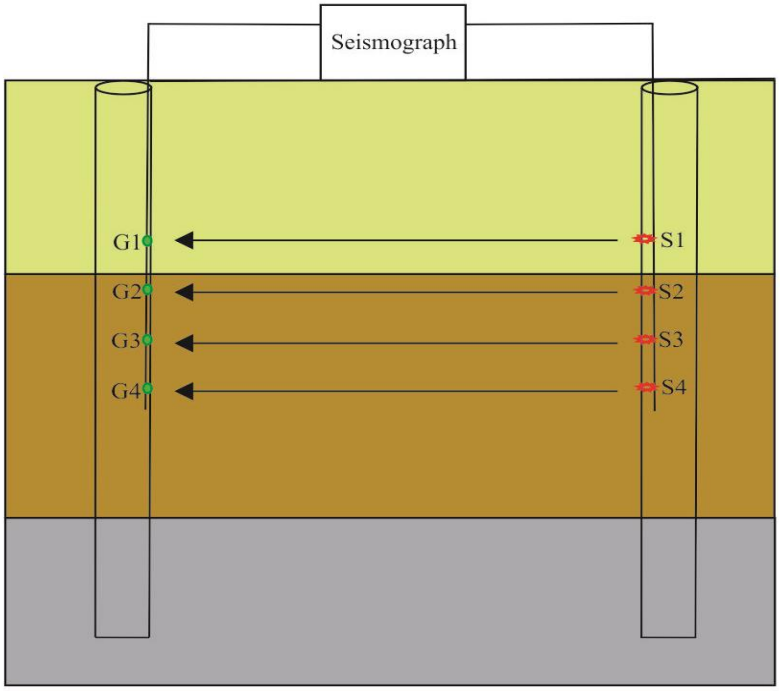
شكل (2-3):- يوضح طريقة مسح الابار Up –Hole.

اما بالنسبة لطريقة Down-Hole فيكون مصدر توليد الموجات الزلزالية على سطح الارض ، بينما تسجل أزمنه وصول الموجات المستلمة بواسطة اللاقطات التي تثبت داخل البئر وعلى أعماق مختلفة ، وكما في الشكل (3-3).



شكل (3-3):- يوضح طريقة مسح الابار Down-Hole .

تعتبر الطريقة المسح الثالثة Cross – Hole الاكثر استخدام في تحديد سرعة الموجات القصية S-Waves حيث يتم توليد الموجات الزلزالية داخل احد الابار وعلى اعماق مختلفة ، في حين يتم تثبيت اللاقطات في احد الابار المجاورة لاستلام الموجات المباشرة وقياس سرعتها، وكما في الشكل (4-3).



شكل (4-3):- يوضح طريقة مسح الابار Cross – Hole .

3 -3 المعاملات الجيوتكنيكية Geotechnical Indexes

ان التقييم الجيوتكنيكي للتربة والطبقات الصخرية للأغراض الهندسية كان ينفذ سابقا ومازال من خلال اجراء القياسات المختبرية لنماذج التربة والطبقات الصخرية لحساب المعاملات الجيوتكنيكية . ان هذه الطريقة ليست دقيقة لأسباب عديده يمكن ايجازها من خلال النقاط التالية والتي حددت من قبل (Swain, 1962) ، والتي اوجزت من قبل (Al- Khafaji,2004) و كالاتي :-

1- ان القوى المؤثرة على النموذج في المختبر تكون مصطنعة ولأتعكس القوى الحقيقية المؤثرة على النموذج في الواقع .

2- حجم النموذج يكون صغيرا جدا ولا يمثل جميع اجزاء التربة او الطبقات الصخرية في الواقع.

3- المواد كبيرة الحجم من اللباب يمكن قياس خواصها الفيزيائية والكيميائية في المختبر، أما المواد صغيرة الحجم (الناعمة) فتفقد أثناء عملية النمذجة.

4- الصفات الفيزيائية للنموذج ممكن أن تتغير مع الزمن او تتغير نتيجة التجفيف وفقدان محتوى الرطوبة.

5- صعوبة تحديد صفات المرونة للمواد الغرينية والمواد الغير متماسكة في المختبر.

6- صعوبة تحديد تأثر المواد غير المتجانسة في المختبر.

لهذه الاسباب ولأسباب اخرى يتم حساب المعاملات الجيوتكنيكية حقليا من خلال العلاقات التي تربط معاملات المرونة بالسرع الزلزالية ، وهذه المعاملات الجيوتكنيكية هي :-

1-3-3 معامل المادة (I_m) Material Index

وهو واحد من اهم المعاملات التي يمكن حسابها اعتمادا على نتائج المسح الزلزالي الانكساري بوساطة ايجاد السرع الزلزالية Vp و Vs للصخور والترسبات، وحساب معاملات المرونة لها اعتمادا على هذه السرع، حيث ان هذا المعامل يرتبط مع نسبة بوزون ومع مربع السرعة النسبية $\frac{Vp^2}{Vs^2}$ بعلاقات خطية ، يمكن بوساطتها تصنيف هذه الصخور والترسبات حسب صلابتها. ان هذا التنصيف مهم جدا في مجال الهندسة المدنية لتحديد نوع الاساسات للمباني والمنشآت الهندسية ، فالمباني الكبيرة تحتاج الى صخور صلبة تستند عليها اساستها ، وبوساطة هذا المعامل يمكن لنا تحديد صلابة هذه الطبقة الصخرية التي تسمى هندسيا Bed Rock ، لذلك فأن معامل المادة (I_m) يعرف على انه مقياس لدرجة صلابة الصخور والترسبات. رياضيا يشتق هذا المعامل من النسبة بين معاملي ثابت لامي Lame's Constant (λ) ومعامل القص او الصلابة Rigidity or Shear Modulus (μ)، وفق الخطوات الآتية :-

بما ان

$$K = \frac{E/3}{(1-2\sigma)} \qquad \text{و} \qquad \mu = \frac{E/2}{(1+\sigma)}$$

$$\therefore \frac{\mu}{K} = \frac{\frac{E/2}{(1+\sigma)}}{\frac{E/3}{(1-2\sigma)}} \qquad \text{.....(63)}$$

وبالاختصار والتعويض ، يمكن اعادة كتابة المعادلة بالصيغة الآتية :-

$$\frac{\mu}{K} = \frac{3(1-2\sigma)}{2(1+\sigma)} \qquad \text{.....(64)}$$

وبما ان

$$\frac{\mu-\lambda}{K} = \frac{3}{2}\left(\frac{(1-2\sigma)}{(1+\sigma)}\right) - \frac{3\sigma}{1+\sigma} \qquad \text{.....(65)}$$

وبالاختصار والتعويض ، يمكن اعادة كتابة المعادلة (65) بالصيغة الآتية :-

$$\frac{\mu-\lambda}{K}=\frac{3}{2}\left(\frac{(1-4\sigma)}{(1+\sigma)}\right) \qquad \textbf{.....(66)}$$

وبما ان

$$\frac{\mu+\lambda}{K}=\frac{3}{2}\left(\frac{(1-2\sigma)}{(1+\sigma)}\right)+\frac{3\sigma}{1+\sigma} \qquad \textbf{.....(67)}$$

وبالاختصار والتعويض ، يمكن اعادة كتابة المعادلة (67) بالصيغة الآتية :-

$$\frac{\mu+\lambda}{K}=\frac{3}{2}\left(\frac{1}{(1+\sigma)}\right) \qquad \textbf{.....(68)}$$

وبقسمة معادلة (66) على معادلة (68) ، يمكن ايجاد معامل المادة بوساطة المعادلة الآتية :-

$$\frac{\mu-\lambda}{\mu+\lambda}=\frac{\frac{3}{2}\left(\frac{1-4\sigma}{1+\sigma}\right)}{\frac{3}{2}\left(\frac{1}{(1+\sigma)}\right)} \qquad \textbf{.....(69)}$$

وبالاختصار ، يمكن اعادة كتابة معادلة معامل المادة (69) بوساطة المعادلة الآتية :-

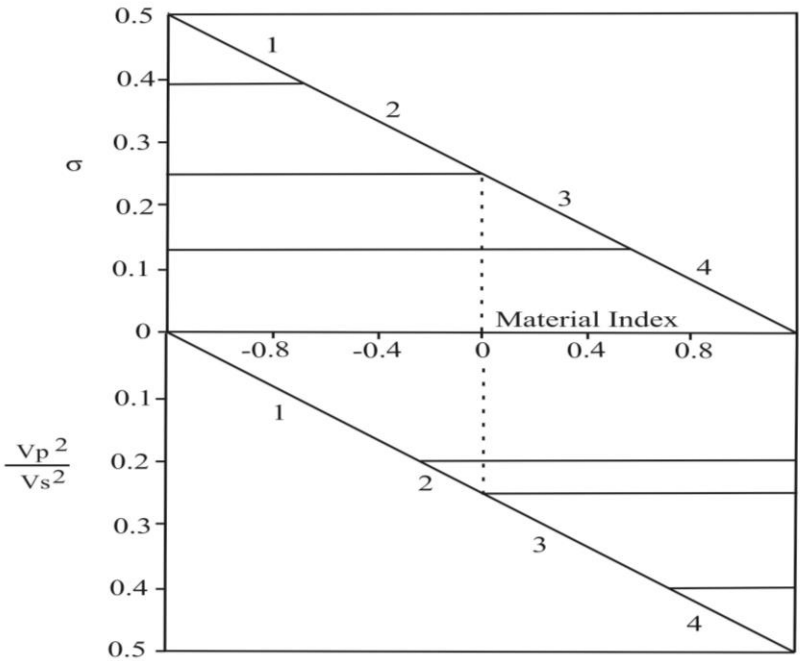
$$\frac{\mu-\lambda}{\mu+\lambda}=1-4\sigma \qquad \textbf{.....(70)}$$

كما اشتق (Abd Al-Rahman, *el. al.*, 1994) هذا المعامل اعتمادا على قيم سرعة الموجات الزلزالية Vp و Vs وتوصل الى المعادلة الآتية :-

$$\mathrm{I_m}=\frac{3-\left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2}{\left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2-1} \qquad \textbf{.....(71)}$$

ان معامل المادة Material Index ($\mathrm{I_m}$) هو مؤشر لدرجة التماسك ومقدار المسامية ودرجة التشبع المائي في الصخور والترسبات ، وكذلك هو مقياس لتواجد الكسور فيها ، وتتراوح قيمة بين (1-) الى (1+) ، اما وحداته فهي ميكا باسكال (Mpa). اعتمادا على العلاقات الخطية التي تربط هذا المعامل مع نسبة بوزون Poisson's Ratio (σ) ومع مربع السرعة النسبية $\frac{Vp^2}{Vs^2}$ صنفت الصخور والترسبات من ناحية الصلابة الى اربع مجاميع رئيسية لأغراض البناء والإنشات والتي تعرف بنسبة التربة الى الصخور Soil / Rock ، وكما في الشكل (3-5).

1- المجموعة الاولى :- وهي المجموعة التي تتراوح فيها قيمة Material Index (I_m) بين (-1) الى (-0.5) وتضم الترسبات الحديثة لمجاري الانهار وترسبات الرياح والرماد البركاني ، حيث تتميز هذه الترسبات بكونها ذات صلابة قليلة الى عديمة الصلابة . تكون قيمة نسبة بوزون Poisson's Ratio (σ) لهذه الترسبات بين 0.36 الى 0.5. بعض انواع هذه الترسبات التي لها نسبة بوزون تساوي 0.5 تتصرف كسائل اثناء تعرضها الى ضغط عالي ، مما يجعلها غير صالحة من الناحية الهندسية.



شكل (3-5) :- يوضح العلاقة بين معامل المادة Material Index (I_m) و نسبة بوزون Poisson's Ratio (σ) ومع مربع السرعة النسبية $\frac{Vp^2}{Vs^2}$.

2- المجموعة الثانية :- وهي المجموعة التي تتراوح فيها قيمة Material Index (I_m) بين (-0.5) الى (0) ، وتمثل الصخور والترسبات ذات الصلابة المتوسطة و المسامية العالية ؛ مثل الترسبات النهرية ، الحجر الجيري Carbonate Rocks الحاوي على الشقوق والتكسرات والفجوات. هذه الصخور والترسبات تتميز بان قيمة نسبة بوزون Poisson's Ratio (σ) لها بين 0.35 الى 0.27 . اما قيمة مربع السرعة النسبية $\frac{Vp^2}{Vs^2}$ لها فتتراوح بين 0.25 الى 0.2.

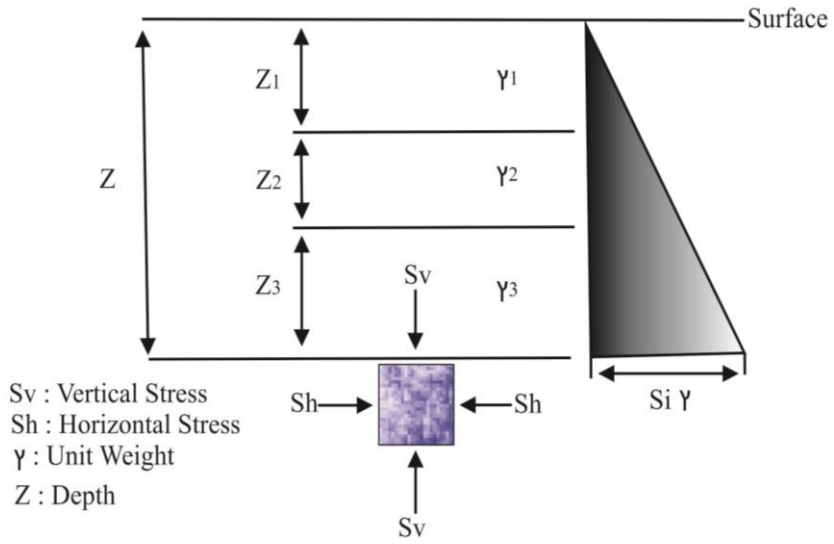
3- المجموعة الثالثة :- وهي المجموعة التي تتراوح فيها قيمة Material Index (I_m) بين (0) الى (0.5) ، وتمثل الصخور عديمة المسامية ذات الصلابة العالية ، مثل الحجر الجيري Carbonate Rocks ، وبعض انواع الصخورالمتحولة و النارية. هذه الصخور تتميز بان قيمة نسبة بوزون

Poisson's Ratio (σ) لها بين 0.18 الى 0.25 . اما قيمة مربع السرعة النسبية $\frac{Vp^2}{Vs^2}$ لها فتتراوح بين 0.25 الى 0.4.

4- المجموعة الرابعة :- وهي المجموعة التي تتراوح فيها قيمة Material Index (I_m) بين (0.5) الى (+1) ، وتمثل الصخور عديمة المسامية ذات الصلابة العالية جدا ، مثل الصخور الرملية، الصخور المتحولة و الصخور النارية. هذه الصخور تتميز بان قيمة نسبة بوزون Poisson's Ratio (σ) لها بين 0.15 الى 0 . اما قيمة مربع السرعة النسبية $\frac{Vp^2}{Vs^2}$ لهذه الصخور فتتراوح بين 0.4 الى 0.5.

2-3-3 معامل نسبة الاجهاد Stress Ratio Index (Si)

وهو واحد من المعاملات الهندسية المهمة لحساب الضغط الجانبي للصخور والترسبات تحت الظروف الطبيعية وبدون تأثير للمنشأ الهندسي او تغير الاحمال حيث يكون الضغط الهيدروستاتيكي للسوائل متساو في جميع الاتجاهات ، أي انه مقياس لمقاومة التربة او الترسبات على عمق معين والمعرضة لضغط جيوستاتيكي Geostatic Pressure ثابت ناتج عن وزن الرسوبيات فوق نقطة معينة ، (Al- Khafaji,2004)، ويعرف على انه النسبة بين الاجهاد الافقي الى الاجهاد العمودي على عمق معين ، (Hunt,1986) وكما في الشكل (3-6) . ويسمى ايضا في بعض المصادر **معامل ضغط الأرض الجانبي في حالة الاستقرار Coefficient of Lateral Earth Pressure at Rest (K_o)**. لوحظ ان قيمة هذا المعامل في الترب الناعمة اعلى من قيمته في حالة الترب الخشنة ، (Bowles,1984) ، وان قيمته في الترب المفككة غير المتماسكة تكون كبيرة وتقل مع زيادة الضغط الصخري (زيادة العمق).



شكل (3-6) :- يوضح العلاقة بين معامل المادة Material Index (I_m) و نسبة بوزون Poisson's Ratio (σ) ومع مربع السرعة النسبية $\frac{Vp^2}{Vs^2}$ ، (Hunt,1986).

سلوك هـذا المعامل يشابه سلوك نسبة Poisson's Ratio (σ) حيث تزداد قيمته للمواد الأقل صلابة وتماسكا وذات المحتوى المائي العالي، (Al-Fahdawi,2000). يعبر عن هذا المعامل رياضيا بالعلاقة الآتية :-

$$Si = \frac{Sh}{Sv}$$

وباستخدام قانون هوك بالأبعاد الثلاثة يمكن اشتقاق النسبة Si بدلالة نسبة بوزون Poisson's Ratio (σ) ، وكما يلي :-

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

تحسب قيمة هذا المعامل اعتمادا على مربع السرع النسبية $\left(\frac{Vs}{Vp}\right)^2$ من خلال المعادلة الآتية ، (Abd Al-Rahman,1991) :-

$$Si = 1 - 2\left(\frac{Vs}{Vp}\right)^2 \qquad \textbf{.....(72)}$$

استنادا الى (Hunt, 1986) يستخدم معامل نسبة الاجهاد Stress Ratio (Si) او معامل ضغط الأرض الجانبي في حالة الاستقرار (K_o) في :-

1- حساب مقدار الزحف الجانبي للتراكيب الجاهزة .

2- حساب مقدار الهبوط للمواقع المختلفة.

3- تحليل الفشل في المنحدرات الطينية.

4- حساب الضغط الجانبي للتربة القابلة للزحف.

5- تحليل مقاومة زحف دعامات الاسس.

3-3-3 معامل التركيز Concentration Index (I_c)

يعد معامل التركيز واحد من اهم المعاملات الهندسية المستخدمة في تحديد كفاءة الاسس ضمن مجال الهندسية المدنية ، حيث انه يستخدم في المواقع التي تكون فيها التربة ذات امتداد واسع ومعرضة الى ضغوط مختلفة ، (Bowles,1984). يعتمد هذا المعامل بشكل رئيسي على معاملات المرونة للصخور والترسبات وتوزيع الضغوط عليها مع الاعماق. رياضيا تحسب قيمة هذا المعامل بدلالة معامل نسبة الاجهاد Stress Ratio (Si)، (Abd Al-Rahman,1991)، وكما يلي :-

$$I_c = 2 + \frac{1}{Si} \qquad \textbf{.....(73)}$$

وتحسب ايضا بدلالة السرعة النسبية $\frac{Vs}{Vp}$ وكما يلي ، (Abd Al-Rahman,1991) :-

$$I_c = \frac{3 - 4\left(\frac{Vs}{Vp}\right)^2}{1 - 2\left(\frac{Vs}{Vp}\right)^2} \qquad \textbf{.....(74)}$$

ان قيمة معامل التركيز للترسبات الهشة وغير المتصلبة ، اي التي تسلك سلوكا يشابه سلوك السوائل عند تعرضها الى الضغط تساوي (3)، و في الأعماق الضحلة تكون قيمته محصورة ما بين (3-6) ، اما بالنسبة للصخور الصلبة فأن قيمة هذا المعامل تكون اكبر من (6) ، أي هناك علاقة طردية ما بين معامل التركيز Ic وصلابة الصخور والترسبات ،, وكما في الجدول (2-3). يرتبط هذا المعامل مع معاملات المرونة بعلاقات عديدة ، منها على سبيل المثال علاقته بثابت لامي (λ) Lame's Constant والمعامل الحجمي Bulk Modulus (K) ، وكما يلي :-

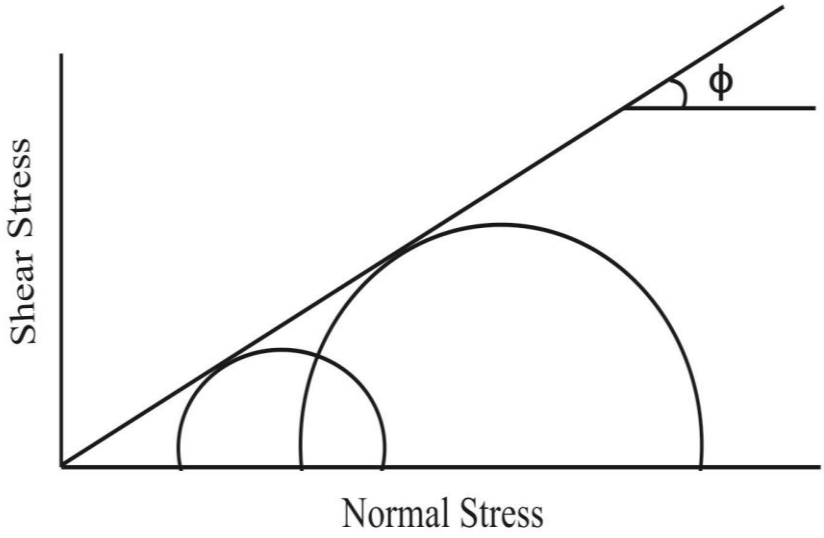
$$Ic = (k + \lambda) + 2$$

جدول (2-3) :- تصنيف الترب حسب قيم معامل التركيز Ic ومعامل نسبة الاجهاد Si (Abd Al-Rahman,1989).

Soil Description Parameter	Weak		Fair		Good
	Incompetent		Fairly Competent		Competent
	Very Soft	Soft	Fairly Competent	Moderate Competent	Compacted
Concentration Index (Ic)	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

4-3-3 زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة (Φ) Effective Angle of Internal Friction

تمثل زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة Φ عنصرا مهما من عناصر التقييم الجيوتكنيكي للصخور والترسبات، وتقاس مختبريا باستعمال دوائر موهو (Mohr's Circles) لفحص القص المباشر (Triaxial) ، حيث تمثل هذه الزاوية ميل المماس لدوائر موهر ، والتي هي عبارة عن دوائر أقطارها تمثل الفرق بين الاجهادات الأفقية والعمودية ، وكما في الشكل (3-7).



شكل (7-3) :- زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة Φ (Bowles, 1984).

تستعمل هذه الزاوية كمقياس لتحمل الترب والصخور او الترسبات للأحمال الساكنة والديناميكية ، وترتبط مع معامل نسبة الاجهاد Stress Ratio (Si) او معامل ضغط الأرض الجانبي في حالة الاستقرار(K_o) بالعلاقة الآتية :-

$$\text{Sin } \Phi = 1 - \text{Si} \qquad \textbf{.....(75)}$$

وبالتعويض عن قيمة Si بدلالة السرعة النسبية $\frac{Vs}{Vp}$ نحصل على العلاقة الآتية :-

$$\text{Sin } \Phi = 2\left(\frac{Vs}{Vp}\right)^2 \qquad \textbf{.....(76)}$$

يتضح من المعادلة (75) بأن هذه الزاوية لها سلوك معاكس لمعامل نسبة الاجهاد Stress Ratio (Si) او معامل ضغط الأرض الجانبي في حالة الاستقرار(K_o) ، حيث تزداد قيمتها بزيادة صلادة الترسبات وتماسكها وقلة محتوها المائي. لذا فأن العوامل التي تؤثر على قيمة هذه الزاوية هي النسيج، الكثافة ، درجة التشبع المائي، الشكل الحبيبي والتركيب المعدني للمكونات. والجدول التالية يوضح قيمة هذه الزاوية لبعض انواع الترب.

جدول (3-3) :- يوضح قيم زاوية الاحتكاك الداخلي لبعض انواع الترب، (Bowles, 1984).

Soil Type	Φ
Gravel	32-36
Clayey Sand	28-32
Silty Sand	28-32
Sandy Gravel	30-38
Gravel Sandy	30-38
Silt	20-30

ان اهمية زاوية الاحتكاك الداخلي Φ دفعت المختصين للبحث عن علاقات رياضية ترتبط هذه الزاوية مع الخصائص الجيوتكنيكية للصخور والترسبات ،لإيجاد علاقات بين هذه الخصائص وبين السرع الزلزالية وحساب قيم بعض المعاملات الجيوتكنيكية المهمة ، مثل معامل الاجهاد الانفعالي Coefficient of Active Stress (Ka) ، ومعامل الاجهاد المنفعل Coefficient of Passive Stress (Kp) ، ومعامل التماسك Coefficient of Cohesion و معامل الاحتاك Coefficient of Friction الذي يساوي ظل زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة Φ، وكذلك حساب قيمة الجريان Flow Value (NQ) الذي يستعمل في المناطق الجليدية.

4-3-3 سعة التحمل القصوى Ultimate Bearing Capacity (Qu)

تعد سعة التحمل القصوى واحدة من اهم معاملات التقييم الجيوتكنيكي في المشاريع الهندسية ، وتظهر اهميتها في المواقع المعرضة للحمل المستقر (الساكن) Static Loading الناتج عن ثقل البناء او الحمل الحركي الدوري Cyclic Dynamic Loading الناتج عن (Bowles,1984) :-

A- الفعاليات الزلزالية في المناطق (الانطقة) النشطة زلزاليا.

B- الفعاليات الاصطناعية الناتجة عن اهتزاز المكائن .

فعندما يكون مجموعة الاجهادات المتولدة من هذه الاحمال اكبر من سعة التحمل القصوى للترسبات او التربة يحصل تميع وسيولة التربة مما يؤدي الى حدوث مشاكل في الإنشاءات الهندسية المقامة مثل الهبوط (التجلس) Settlement، لذلك من الضروري حساب هذا المعامل عند تصميم المنشآت الهندسية (Bowles,1984). تقاس سعة التحمل القصوى (Qu) موقعيا بوساطة اجراء فحص الاختبار القياسي Standard Penetration Test (SPT) وحساب قيمة عدد الاختراق القياسي N-Value بعلاقة باري (Parry) الخاصة بالترب غير المتماسكة (Bowles,1984) ، وكما يلي :-

$$Q_u = 30\ N \qquad \text{.....(77)}$$

كما ان هنالك علاقة تجريبية بين عدد الاختراق القياسي N وسرعة الموجة القصية Vs للترب الرملية كآلاتي، (Al- Khafaji,2004) :-

$$V_s = 89.8\ N^{0.341} \qquad \text{.....(78)}$$

كما يمكن حساب سعة التحمل القصوى Q_u مباشرة من سرعة الموجة القصية Vs بوساطة المعادلة اللوغاريتمية (Abed Rahman,*el. al.*, 1994)، الآتية :-

$$\text{Log } Q_u = 2.398\ (\text{Log } V_s - 1.45) \qquad \text{.....(79)}$$

وكذلك يمكن حساب قيمة هذه السعة بوساطة سرعة الموجات الابتدائية V_p ،(NCCL,1997b).

$$Q_u = \frac{1}{3}\left(\frac{V_p}{240}\right)^{2.38} \qquad \text{.....(80)}$$

تستعمل المعادلة (80) للترب غير المتصلبة ، و يفضل في الترب المشبعة استخدام المعادلة (79) لأن Vs تكون اقل تأثرا بالمحتوى المائي من V_p. وبشكل عام يفضل استخدام هذه المعادلات لحساب قيمة سعة التحمل القصوى Q_u بدلا من فحص الاختبار القياسي Standard Penetration Test (SPT) ، لان هذا الاختبار ينفذ في مساحة صغيرة من الارض لا تتجاوز قدم مربع واحد ولنقاط متفرقة ضمن الموقع الانشائي ، بينما يمكن حساب سعة التحمل القصوى بوساطة هذه المعادلات وعلى امتداد المسارات الزلزالية. بالإضافة الى ذلك ، ان قياس SPT لا يمكن اجراءه في المناطق ذات الطبقات الحصوية ، ولكن يمكن قياس قيمة Q_u لهذه الطبقات اعتماد على سرعة الموجات القصية Vs.

ان ما يميز معامل سعة التحمل القصوى Q_u عن باقي المعاملات الجيوتكنيكية هو اعتمادها على سرعة الموجات القصية Vs بشكل رئيسي ، في حين تعتمد باقي المعاملات على النسبة $\frac{Vs}{Vp}$ ، كما يمكن من خلال العلاقة بين سعة التحمل القصوى Q_u و سرعة الموجات القصية Vs ايجاد سعة الدعامات (الركائز) المسموح بها Allowable Pillars Capacity (Qa) التي تستخدم في حساب اهم المعاملات الجيوتكنيكية الا وهو معامل الامان Safety Factor (F) للمنشأ الهندسي ، وكما يلي :-

$$F = \frac{Qu}{Qa}$$

علاوة على ذلك كله ، فأن جميع المعاملات السابقة هي بدون وحدات قياس ، بينما وحدة قياس سعة التحمل هي كغم/ سم^2.

المصادر

Abd El-Rahman, M. (1989). "Evaluation of the Kinetic Elastic Moduli of the Surface Materials and Application to Engineering Geologic Maps at Maba-Risabah Area (Dhamar Province), Northern Yemen", Egypt. *Journal of Geology*. Vol. 33, No. 1–2, pp. 229–250.

Abd El-Rahman, M. (1991). "The Potential of Absorption Coefficient and Seismic Quality Factor in Delineating Less Sound Foundation Materials in Jabal Shib Az Sahara Area, Northwest of Sanaa, Yemen Arab Republic", Egypt, M.E.R.C. Earth Sciences ,Vol. 5. Ain Shams University, pp. 181–187.

Abdel- Rahman, M.; Helal, A.N.M.A., Mohamed, H.C. and Al-Malqi, I. (1994), Exploration Seismic for Site evaluation of the new city of El-Minya, Egypt- E.G.S. proc. of the 12th Ann. Meet. 59-74p.

Al- Fahdawi, Salah, S.j.,(2000), The Use of Seismic Refraction and Cross-Hole Methods for Geotehnical Evaluation of Engineering Site in Al-Madain Archaeological Area – South Baghdad. Unpublished M.Sc. Thesis, Collage of Science, Baghdad University,165p.

Al- Khafaji, Ammar, J. M.,(2004), The Use of Seismic Methods for Investigating Weak Zones, and Geotechnical Evaluation of Al- Hussain Pure Water Site- Kerbala. Unpublished M.Sc. Thesis, Collage of Science, Baghdad University,165p.

Al-Bahadily, Haydar, A. (1997).The Use of Seismic Velocity Data for the Study of Stratigraphic Variation at Jambur Area. Unpublished M.Sc. Thesis, Collage of Science, Baghdad University,136p.

Al-Heetty, Ahmed J.,(2014), Seismic Refraction Survey for Teachings Hospital Project site of the Mosul University. Unpublished M.Sc. Thesis, Collage of Science, Mosul University,126p.

Al-Nuaiemy, Ali, Z.,(2018), The Use of The Seismic Refraction Tomography Survey Method and The Multi-Channel Analysis Technique of Surface

Waves In The Geotechnical Assessment of The Al-Amal Apartments Site In Kirkuk. Unpublished M.Sc. Thesis, Collage of Science, Mosul University,124p.

Al-Sadi, H.N. (1982), Seismic Exploration. Birkhauser Verlag ,Basel ,215p.

Al-Zubedi, Ahmed S., (2011), Determination of Water Saturation (SW%) by Using P-wave Velocities for Saturated Sandstone. *Journal of Environmental Science and Engineering,* Vol.5 , pp. 253-255.

Banerjee, B and Gupta, S.K (1975): The hidden layer problem in seismic Refraction work .*Geophysics Prospecting*, Vol.23, pp. 642-651.

Bowles, J.E. (1984), Physical and geotechnical properties of Soils. McGraw-Hill International Book Co., London, 578p.

Cummings, D.,(1979), Determination of Depths To An Irregular Interface In Shallow Seismic Refraction Surveys. Using A pocket Caclator Commuter Programs. *Geophysics* , Vol. 44 , No.12 ,pp. 1987-1998.

Dobrin, M. B. (1976). Introduction to Geophysical Prospecting. McGraw Hill Book Co., 3rd edition. New York, 630p.

Dobrin, M.B. Savit, C.H,(1988) , Introduction To Geophysical Prospecting .4th Ed., McGraw Hill ,New York 867 p.

Flinchum, B. A., Steven Holbrook, W., Rempe, D., Moon, S., Riebe, C. S., Carr, B. J., ... and Peters, M. P., (2018), Critical Zone Structure Under A Granite Ridge Inferred From Drilling and Three-Dimensional Seismic Refraction Data. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 123(6),pp. 1317-1343.

Gardner, G.H., Gardner, I.W., and A.R., Gregory,(1974), Formation Velocity and Density – The Diagnostic Basis for Stratigraphic Traps, *Geophysics*, Vol.39, pp. 770-780.

Garofalo, Flora,(2014), Physically constrained joint inversion of seismic and electrical data for near-surface applications. Ph.D. Thesis, Politecnico di Torino.

Grant, F.S. and West, G.F.,(1965),"Interpretation Theory In Applied Geophysics " Mchill,New York , 583 p.

Haeni, F.P., (1986) , Application of Seismic Refraction Method in Ground Water Modeling Studied in New England . *geophysics.* Vol.51,pp.236- 249.

Hagedoorn ,J.G.,(1959) ,"The Plus-Minus Method Of Interpreting Seismic Refraction Section" , Geophysical Prospecting ,Vol.7 ,pp. 158-182.

Hamdi, F.A.I., Said,I &Qasim, I.S., (1996) , Application of Geophysical Method Singeotechnical Engineering . National Center for Construction labs. Soil Investigation Report,(no published).

Han, D., Nur, A., and Morgan, D.,(1986), Effects of Porosity and Clay Content on Waves Velocities in Sandstone. *geophysics.* Vol.51,pp.2093- 2105.

Heisey ،J. S. ،Stokoe ،K. H. ،and Meyer ،A. H. (1982), ‘‘Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves.’’ Transportation Research Record 852 ،Transportation Research Board ،Washington ،D.C. ،22–31.

Hunt,R.E.,(1986):Geotechnical engineering analysis and evalution . MC Graw- Hill Book Co.,730p.

Kearey P, Brooks M, Hill I., (2002), Introduction to Geophysical Exploration (3rd ed.). Blackwell, Oxford.

Kearey, Ph., Brooks, M., Hill, I.,(2002),"An Introduction To Geophysical Exploration", 3rd Ed. Blackwell Science Limited , 281 p.

Kirsch, R., (2006), Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology, Springer Berlin Heidelberg, New York, p. 500.

Lowrie,W.,(2007),"Fundamentals Of Geophysics "2nd Edition, Cambridge University Press.

McCann, D.M., Baria, R. Jackson, P.D. andGreen, A.S.P.,(1986), Application of Cross – Hole Seismic Measurements in Site in Investigation Surveys. *Geophysics*. 51, 914- 929.

Morgan, N.A (1967) The use of the continuous seismic profiler to solve hidden layer problems, Geophysical prospecting ,Vol.15,pp.35-43.

Nafe JE, Drake CL (1957), Variation with Depth in Shallow and Deep Water Marine Sediments of Porosity, Density and the Velocities of Compressional and Shear Waves. *Geophysics* Vol.22,pp.523-552.

NCCL,(1997), Geotechnical and Geophysical Investigations for Al-Safeer Hotel. Report. (Un published).

Peterie, Shelby L., Richard D. Miller and Julian Ivanov, (2014), Seismology and Its Applications in Kansas. Public Information Circular 37.

Pickett, G.R., (1963), Acoustic Character Logs and Their Application in Formation Evaluation. Journal of Petroleum Technology, June, pp. 659-667.

Redpath, B.B., (1973), Seismic refraction exploration for engineering site investigations, Technical Report E-73-4, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station Explosive Excavation Research Laboratory, Livermore, California.

Sharma P.V., (1997). Environmental and Engineering Geophysics, Cambridge University Press, 475 pp.

Sharma, P.V., (1986) ,"Geophysical Method In Geology '",2nd Edition Elsevier, New York , 428 pp.

Sirles, Phil And Rock, Alan, (2014), Advancements In 3D Subsurface Modeling Using Seismic Refraction Data – A New Perspective. https://www.researchgate.net/publication/228999901.

Sjogren, B., (984), Shallow Refraction Seismic Champman and Hall London, 270P.

Soske ،J. L. ،(1959): The blind zone problem in engineering geophysics. Geophysics Vol.24 ,pp. 163- 180.

Swain,R.J.,(1962), Recent Techniques for Determination of In-Situ Elastic Properties and Measurement of Motion Amplification in Layered Media. *Geophysics* 27, 237-241.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 770 p.

Telford,W., Geldard, L., Sheriff,R. and Keys,D.,(1981):Applied geophysics. Cambridge University press, 6th edition. New York, 860pp.

Wyllie ,M.R.J. ,Gregory ,A.R. And Gardener ,G.H.F.,(1958) ,"An Experimental Investigation Of Factor Affecting Elastic Wave Velocity In Porous Media " ,*Geophysics* .Vol.23 ,pp.459-493.

www.masw.com.

Principles of Seismic Refraction Method

احمد سـرداح كاظم الزبيدي , بكلوريوس في علوم الارض من كلية العلوم/جامعة بغداد, ماجستير ودكتوراه في الجيوفيزياء من الجامعة ذاتها, باحث وله العديد من البحوث المنشوره في مجلات علميه عالمية رصينه, له مشاركات في العديد من المؤتمرات العالمية والعربية والمحلية , مكتشف معادلة لحساب التشبع المائي للصخور الرملية بواسطة استخدام الموجات الطولية , صدر له كتاب عن دارالنشر الالمانية LAP بعنوان Principles of Electrical ResistivityTechniques وصدر له في بغداد كتاب تقنيات طريقة المقاومة النوعية الكهربائية باللغة العربية
يعمل حاليا رئيس جيولوجيين أقدم في الهيئة العامة للمياه الجوفية - وزارة الموارد المائية العراقية
Ahmed.srdah@yahoo.com

رقم الأيداع في دار الكتب والوثائق ببغداد 1326 لسنة 2020

9 789922 934600