٨-٣ توصيات لقياس سرعة النبضات فوق الصوتية فى الخرسانة

Recommendations for Measurement of Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete

٨-٣-١ عـــام

يمـثل قـياس سـرعة انتقال النبضات فوق الصوتية فى الخرسانة أحد الأسس للاختبارات غير المـتلفة للعناصر والعينات من الخرسانة العادية والمسلحة وسابقة الإجهاد . وترتبط هذه السرعة عادة بـالخواص الميكانيكـية المرنة للخرسانة لذلك تستخدم أساساً لمقارنة جودة النوعيات المختلفة أو لتقييم جـودة نفـس العنصـر عند أعمار وظروف مختلفة. كما قد تستخدم – إذا توافرت منحنيات المعايرة المناسـبة – لـتقدير بعـض الخواص الميكانيكية للخرسانة. وبالإضافة إلى ما سبق يمثل الكشف عن العيوب السطحية والعميقة أحد التطبيقات المهمة لهذا الاختبار.

٨-٣-٢ الهدف

يهـدف هـذا الاختـبار إلى قياس سرعة انتقال النبضات فوق الصوتية خلال العناصر والعينات الخرسـانية عـن طريق قياس الفترة الزمنية اللازمة لكى تقطع النبضات مسافة محددة عبر الخرسانة المختـبرة. وذلـك يُمكّن – عند توافر منحنيات المعايرة المناسبة – من تقدير الخواص الميكانيكية مثل مقاومـة الضـغط ، معاير المرونة الإستاتيكى والديناميكى ، نسبة بواسون الديناميكية. كما أن ارتباط الفـترة الزمنية المقيسة بتكامل ووحدة العنصر المختبر – فى موقع الاختبار – يساعد فى تحديد مواقع بعض العيوب بالعنصر المختبر.

٨-٣-٣ تعريفات

زمن الانتقال Transit Time

الزمـن الذى تستغرقه نبضـة من الموجات فوق الصوتيـة لتنتقل من محول الطاقـة المرسل (Transmitting Transducer) إلـى محول الطاقة المستقبل (Receiving Transducer) خلال الخرسانة المختبرة.

بداية الموجة Onset

هى مقدمة الموجة المرسلة أو المستقبلة بواسطة أى من محولات الطاقة (Transducers).

٨-٣-٤ الجهاز

يتكون الجهاز المستخدم لقياس سرعة انتقال النبضات فوق الصوتية من الأجزاء الآتية:

١ – مولد نبضات فوق صوتية.

٢ – زوجان من محولات الطاقة (مرسل ومستقبل).

٣ – مكبر للنبضات المستقبلة.

٤ – دائـرة توقيـت إلكترونية لقياس الفترة الزمنية بين بداية النبضة المرسلة وبداية تلك المستقبلة عند محولى الطاقة.

ويوجـد عموماً نوعان من الأجهزة : الأول ذو شاشة عرض رقمية توضح زمن الانتقال (وهو الأكـثر شيوعاً) والثانى ذو شاشة عرض من نوع أنبوبة الأشعة المهبطية (CRT) وهى توضح شكل النبضـة المسـتقبلة بالنسبة للزمن. ويفيد هذا النوع الأخير فى الحالات التى يحدث فيها إضعاف كبير للموجـات فـى الخرسـانة خصوصاً عندما يكون مسار النبضات قصيراً نسبياً والتردد المستخدم غير مناسب. و يوضح الشكل (٨-٣-١) دائرة قياس سرعة الموجات فوق الصوتية.

ويجب أن يتمتع الجهاز بالمميزات التالية:

١ – القدرة على قياس زمن انتقال النبضات لمسارات ذات أطوال تتراوح من ١٠٠مم إلى ٣٠٠٠ مم بدقة ±١ %.

٢ – ألا يـزيد زمن صعود (Rise Time) النبضة المرسلة على ٠,٢٥ الفترة الطبيعية لمحول الطاقة المرسل.

٣ – تكـون الفـترة الزمنـية بين النبضات طويلة بدرجة كافية لتجنب التداخل مع انعكاسات النبضات السابقة فى عنصر مختبر صغير الأبعاد.

٤ – أن يعمل الجهاز بكفاءة فى مدى درجات الحرارة والرطوبة المحدد بواسطة المنتج.

كمـا يجب أن تكون محولات الطاقة (المرسل والمستقبل) ذات ذبذبة طبيعية بتردد يتراوح من ٢٠ إلـى ١٥٠ كيلوهرتز. وقد تستدعى بعض التطبيقات الخاصة استخدام ترددات منخفضة حتى ١٠ كـيلوهرتز (فـى حالـة المسـارات الطويلة جداً) أو مرتفعة حتى ١ ميجاهرتز (فى حالة اختبار مواد الحقـن). غير أن مدى الترددات المناسب لمعظم التطبيقات العملية فى مجال الخرسانة هو ٥٠ – ٦٠ كيلوهرتز.

٨-٣-٥ الإجراءات

٨-٣-٥-١ ضبط صفر الجهاز

يتأثر زمن انتقال الموجات بكل من المادة المختبرة ومادة محولات الطاقة وكذلك مادة الالتحام. ولتلافى تأثير المحولات بجهاز القياس يتم إجراء عملية ضبط صفر الجهاز ، حيث تزود الأجهزة بدائرة تأخير زمنية. ويورد مع الجهاز قضيب معدنى (طوله حوالى ٢٥٠مم) محدد له بدقة زمن انتقال الموجات فوق الصوتية من خلاله – ومطبوع عليه. وتتم العملية كالآتى:

١ – يوصل الجهاز بالتيار الكهربائى – أو تستخدم البطارية إذا كانت تامة الشحن.

٢ – يوصل كل من محولى الطاقة بجهاز القياس مع التأكد من سلامة وجودة الوصلات.

٣ – يتم ضغط مفتاح توصيل التيار إلى وضع التشغيل.

٤ – توضع طبقة رقيقة من مادة التحام مناسبة على النهايتين الدائريتين للقضيب المعدنى لتغطيهما بالكامل.

٥ – يثبت كل من محولى الطاقة على إحدى نهايتى القضيب بالدفع مع مراعاة عدم حدوث أى انزلاق على سطح التماس.

٦ – تسجل قراءة الشاشة بالجهاز وإذا كانت مطابقة للزمن المطبوع على القضيب فيعنى ذلك عدم وجود خطأ صفرى. أما إذا اختلفت القراءة عن تلك المحددة للقضيب فيتم إدارة مسمار ضبط الصفر فى الاتجاه المناسب حتى تتساوى القراءتان.

تجرى عملية ضبط الصفر بالضرورة عند تغيير أى من محولى الطاقة أو الكابلات. ويفضل إجراؤها قبل كل استخدام لاعتبار تأثير اتزان الدوائر الكهربية بالجهاز.

٨-٣-٥-٢ التحقق من دقة قياس زمن الانتقال

تجرى هذه العملية عادة بواسطة المنتج كجزء من برنامج ضبط الجودة. غير أنه يمكن الاستفادة منها لتقييم سلامة الجهاز عند وجود شك فى بعض النتائج. وتتم العملية باستخدام قضيبين مرجعيين محدد بدقة لكل منهما زمن انتقال الموجات فوق الصوتية من خلاله. ويكون أحد القضيبين قصيرا (طوله حوالى٢٥٠ مم) ويستخدم لضبط الصفر كما فى البند السابق. بينما يكون القضيب الآخر طويلاً (طوله حوالى ١٠٠٠ مم) ويستخدم لتحديد دقة القراءة. يجرى اختبار تحديد سرعة انتقال الموجات فى القضيب الطويل بنفس الخطوات فى ضبط الصفر (عدا تعديل القراءة). وتسجل القراءة ثم تقارن بتلك المطبوعة على القضيب المرجعى. ويجب ألا يزيد الفارق بين القراءتين على ± ٠,٥ % لكى تكون القياسات ذات دقة مقبولة.

٨-٣-٥-٣ الكشف عن مواضع وأقطار صلب التسليح ومعاملات التصحيح

يؤثـر وجـود أسياخ صلب التسليح بالقرب من مسار النبضات فوق الصوتية على زيادة سرعة انـتقالها ، حيث تنتقل جزئياً فى صلب التسليح بدلا من الخرسانة. وحيث أن سرعة انتقال الموجات فى الصـلب تصل إلى ضعف قيمتها فى الخرسانة فإن الناتج هو زيادة ظاهرية فى سرعة انتقال الموجات. ويمكـن إجراء عملية تصحيح للقراءات المأخوذة بالقرب من أسياخ صلب التسليح – كما سيلى ذكره. غـير أن النتائج – بالرغم من تصحيحها – تكون غير ممثلة بدقة للخرسانة المختبرة. لذلك يجب تجنب إجـراء القياسـات بالقـرب من أسياخ صلب التسليح كلما أمكن. ويكون ذلك بواسطة استخدام أجهزة كهرومغناطيسـية (مثل جهاز الكشف عن صلب التسليح "بروفوميتر") لتحديد مواضع صلب التسليح والابتعاد عنها أثناء الاختبار.

أ – تصحيح القراءات بالقرب من أسياخ صلب محورها موازى لاتجاه انتقال النبضات

يعـتمد معامل التصحيح على المسافة بين الخط الواصل بين طرفى المحولين وسطح السيخ كما يعتمد على قطر القضيب وسرعة انتقال الموجات فى الخرسانة المجاورة للسيخ . وتقاس سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية فى الأحوال العادية حسب المعادلة:

$$v = \frac{L}{T} \qquad (8\text{-}3\text{-}1)$$

حيث:

L = طول مسار الموجات

T = زمن انتقال الموجات (المسجل بواسطة الجهاز).

وفـى حالـة وجـود أسياخ صلب محورها مواز لاتجاه انتقال الموجات تكون سرعـة الانتقال كالآتى:

$$v_c = \frac{2av_s}{\sqrt{\left(4a^2 + \left(Tv_s - L\right)\right)}} \qquad (8\text{-}3\text{-}2)$$

حيث :

a = المسافة بين الخط الواصل بين طرفى المحولين و سطح السيخ

v_s = سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية فى سيخ الصلب.

v_c = سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية فىالخرسانة المجاورة لأسياخ الصلب.

ويمكن إهمال تأثير الأسياخ على السرعة عندما يتباعد موقع الاختبار عنها بمقدار

$$\frac{a}{L} > \frac{1}{2}\sqrt{\frac{(v_s - v_c)}{(v_s + v_c)}} \qquad (8\text{-}3\text{-}3)$$

كما ينعدم تأثير أسياخ التسليح أيضاً إذا كان قطرها ٦مم أو أقل. وتكمن الصعوبة فى تطبيق المعادلة (٨-٣-٢) فى إيجاد قيمة v_s . غير أنه يمكن تقديرها بوضع محولى الطاقة بحيث ينطبق محوراهما على محور سيخ صلب التسليح وأخذ قياس زمن الانتقال ومنه حساب السرعة حسب المعادلة (٨-٣-١) مع الأخذ فى الاعتبار سمك الغطاء الخرسانى للسيخ . ويمكن وضع المعادلة (٨-٣-٢) فى الصورة التالية:

$$v_c = k.v_m \qquad (8\text{-}3\text{-}3\text{-}a)$$

$$k = \gamma + 2\left(\frac{a}{L}\right)\sqrt{(1-\gamma^2)} \qquad (8\text{-}3\text{-}3\text{-}b)$$

حيث v_m هى سرعة انتقال النبضات فوق الصوتيه المقاسة من زمن الانتقال المسجل مباشرة. ويكون (k) هو معامل التصحيح للسرعة، ويوضح الشكل (٨-٣-٢) قيم المعامل (γ) لأقطار مختلفة من صلب التسليح وسرعات مختلفة لانتقال الموجات فى الخرسانة (وذلك فى حالة موجات ذات تردد ٥٤ كيلوهرتز)، أما الشكل (٨-٣-٢) فيعطى قيم معامل التصحيح للسرعة.

ويجدر بالذكر أن المعادلة (٨-٣-٢) تكون صحيحة فقط عندما تكون المسافة (a) أكبر من ضعف الغطاء الخرساني لصلب التسليح وإلا يعتبر مرور الموجات على طول محور السيخ مباشرة ، ويكون معامل التصحيح فى هذه الحالة وفقاً للمعادلة التالية:

$$k = 1 - \frac{L_s}{L}(1-\gamma) \qquad (8\text{-}3\text{-}4)$$

حيث :

L_s = طول السيخ (يساوى (طول المسار – ضعف الغطاء الخرساني))

وتكون عملية التصحيح باستخدام المحاولة والخطأ بسبب وجود سرعة انتقال الموجات فى الخرسانة كأحد المؤثرات فى معامل التصحيح. وتكون دقة تقدير السرعة المصححة فى حدود ٣% بشرط وجود تماسك تام بين قضيب التسليح والخرسانة المجاورة.

ب – تصحيح القراءات بالقرب من أسياخ صلب التسليح محورها عمودى على اتجاه انتقال النبضات

يكون تأثيرقضبان التسليح فى هذه الحالة قليلاً بسبب نقص سرعة انتقال الموجات فى اتجاه قطر القضيب عنها فى حالة محوره الطولى. وينعدم هذا التأثير عملياً فى حالة محولات طاقة ذات ذبذبة بتردد ٥٤ كيلوهرتز عند نقص قطر الأسياخ المستعرضة عن ٢٠مم. ويتم تصحيح القراءات بتطبيق المعادلة (٨-٣-٣) بعالية مع استخدام قيم المعامل (γ) من الشكل (٨-٣-٤). ويراعى أن معاملات التصحيح تفرض الحالة الأسوأ ألا وهى مرور الموجات على كامل قطر الأسياخ . وإذا كانت الأسياخ لاتقع على مستو واحد فإنه يصعب تحديد تأثيرها على السرعة بأى درجة من الدقة.

٨-٣-٥-٤ التحام محولات الطاقة بالسطح الخرسانى المختبر

لضمان التصاق محولات الطاقة مع السطح المختبر ينبغى وجود درجة دنيا من استواء السطح ثم نستخدم مادة وسيطة لضمان الالتصاق التام بين المحول والسطح. وفى معظم الأحوال يكفى وجود طبقة رقيقة من مادة مثل الشحم أو عجينة الجلسرين والكاولين لضمان هذا الالتصاق وانتقال الموجات بكامل طاقتها بين المحول وسطح العنصر المختبر. وينبغى أن يكون سمك هذه الطبقة أقل ما يمكن حتى لاتؤثر على سرعة انتقال الموجات. ويساعد الضغط على المحولات عند أخذ القراءات على انتشار المادة الوسيطة وإقلال سمكها لذلك تؤخذ عدة قراءات متتالية حتى نصل إلى الحد الأدنى من زمن الانتقال. وإذا كانت درجة عدم استواء السطح كبيرة بحيث احتاج الأمر إلى وضع طبقة سميكة من المادة الوسيطة فينبغى أخذ تأثيرها فى الاعتبار عند حساب سرعة انتقال الموجات. ويزداد هذا التأثير عند قصر طول الانتقال لذلك يفضل ألا يقل طول الانتقال عن١٥٠مم (للقياس المباشر) و ٤٠٠ مم (للقياس الغير مباشر).

ويظهر تأثير الالتصاق الصوتى بين الأسطح على قراءة الجهاز حيث تستقر بسرعة فى حالة الالتصاق الجيد بينما تتذبذب بوضوح فى حالة الالتصاق غير الجيد. وقد ظهرت فى الأسواق بعض المحولات الخاصة ذات المسطح الصغير والذي يتناهى حتى يصبح نقطة فى حالة المحولات نصف الكروية ، غير أن صغر سطح التماس يؤثر سلباً على كمية الطاقة المنتقلة من المرسل إلى المستقبل.

٨-٣-٥-٥ وضع محولات الطاقة وقياس سرعة الانتقال

يقوم محول الطاقة المرسل بإرسال نبضة فوق صوتيه خلال الجسم المختبر ويستقبلها محول الطاقة المستقبل فى موقع آخر. وتنتقل أقصى طاقة من المرسل فى اتجاه عمودى على السطح ، غير أن النبضات تنتقل أيضاً– بطاقة أقل – فى اتجاهات أخرى ، كما يمكن للمستقبل أن يستقبل نبضات غير عمودية على سطحه. ومن ثم يمكن عمل قياسات سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية بوضع محولى الطاقة فى أحد الأوضاع التالية:

أ – علـــى وجهين متقابلين من العنصر (ومركزيهما على خط واحد متعامد مع السطح) ويسمى انتقال الموجات بالانتقال المباشر (Direct Transmission)

ب – علـــى وجهيـــن متجاوريـــن من العنصر ويســـمى انتقال الموجات بالانتقال شبـــــه المباشر (Transmission Semi-direct)

جـــ – على نفـــس الســـطح من العـــنصر ويســـمى انتقال الموجـــات بالانتـــقال غير المباشـــر (Indirect Transmission) ويوضح الشكل (٨–٣–٥) الترتيبات المختلفة لمحولات الطاقة.

ويـــتم حســـاب سرعة الانتقال فى الحالتين ا ، ب بعاليه عن طريق قسمة طول المسار للموجات على زمن الانتقال المحدد بواسطة الجهاز. وتكون دقة الحساب محكومة بالدقة فى تعيين طول المسار. ويؤخذ طول المسار مساوياً للمسافة بين مركزي سطحى المرسل والمستقبل.

وفـــى حالـــة الانـــتقال غير المباشر تكون الموجات المنتقلة ذات طاقة ضعيفة حيث تكون سعة الموجة فى حدود ٢–٣ % من تلك فى حالة الانتقال المباشر ، كما تكون السرعة معتمدة على خواص الطـــبقة السطحية (التى تنتقل فيها غالباً الموجات) وتكون السرعة السطحية عادة من ٥–٢٠ % أقل مـــن الســـرعة المقاســـة فى حالة الانتقال المباشر. ذلك يؤدى إلى ... القياس غير المباشر أقل أنواع القـــياس دقـــة وينـــبغى تجنبه إلا فى الحالات التى يكون فيها سطح واحد فقط من الخرسانة مكشوفاً. ولـــزيادة الدقـــة فـــى النتائج يكون تحديد السرعة بإجراء الاختبار عند عدة نقاط على نفس الخط (فى مـــنطقة ذات جودة ظاهرية واحدة) حيث يحدد خط قياس يثبت فى إحدى نقاطه المرسل ويتحرك عليه المســـتقبل بعـــيداً عن المرسل بزيادة ثابتة وتسجل قراءات زمن الانتقال. يتم توقيع النقاط المعبرة عن زمـــن الانتقال والمسافة بين المرسل والمستقبل ويكون ميل أفضل خط يمر بها معبراً عن سرعة انتقال الموجـــات فوق الصوتية فى الخرسانة المختبرة. ويوضح الشكل (٨–٣–٦) هذه العملية ، ويراعى أنه عند وجود عدم استمرارية (قفزة) واضحة فى نقاط الخط يكون ذلك معبراً عن وجود شرخ سطحى فى المســـار المختـــبر ، وعـــند وجـــود (كسرة) فى نقاط الخط يعنى ذلك وجود طبقة سطحية ذات جودة منخفضة.

٨–٣–٥–٦ قياس عمق واتجاه الشروخ السطحية

تتســـبب الشـــروخ المملـــوءة بالهواء فى معاوقة مرور الموجات فوق الصوتية من خلالها لذلك تعـــانى هذه الموجات من انعكاسات عند أسطح الشروخ تزيد من زمن انتقالها بداخل العنصر المختبر. ويمكـــن اســـتخدام هـــذه الظاهرة للكشف عن وجود الشروخ السطحية والعميقة وتحديد اتجاهات ميول الأولى. وحيـــث أن الكشف عن العيوب الداخلية من شروخ وفراغات يتطلب كونها ذات مقاسات كبيرة

(أكـبر من مقاس محول الطاقة على الأقل وعملياً أكبر من ١٠٠ مم) كما يتطلب إجراء قياسات عديدة ومتقاربة ، سيقتصر التوضيح فى هذا البند على حالة الشروخ السطحية فقط.

يتم قياس عمق الشروخ السطحية بإحدى طريقتين :

- **الطريقة الأولى**

يوضـع كـل مـن المرسـل والمستقبل على جانبى الشرخ (المحدد بالعين) بحيث يكون الخط السطحى الواصل بين مركزى المحولين عمودياً على اتجاه الشرخ. وتؤخذ قراءتان الأولى (T_1) عندما يكون كل من المرسل والمستقبل يبعدان عن الشرخ نفس المسافة (عادة ١٥٠مم) والثانية (T_2) عندما تزاد المسافة إلى ٣٠٠ مم. ويحسب عمق الشرخ (C) بالملليمتر من المعادلة التالية:

$$C = 150\sqrt{\frac{\left(4T_1^2 - T_2^2\right)}{\left(T_2^2 - T_1^2\right)}} \qquad (8\text{-}3\text{-}5)$$

وتبـنى هذه المعادلة على فرض أن مستوي الشرخ عمودى على سطح العنصر وللتأكد من ذلك يـتم تحـريك كـل من محولى الطاقة (بالتبادل) بعيداً عن الشرخ مع رصد قراءة الزمن من الجهاز، ويكون الشرخ مائلاً فى اتجاه المحول الذي تسبب حركته السابقة نقصاً فى زمن الانتقال.

- **الطريقة الثانية**

لقياس عمق الشرخ السطحى تكون بوضع المرسل على بعد 2.5y من الشرخ.ثم يتم أخذ قراءات لزمـن الانتقال بوضع المستقبل على مسافات y و 2y و 3y بعد من المرسل على خط سطحى متعامد مـع اتجـاه الشرخ وفى اتجاهه (ولتكن القراءات T_1 و T_2 و T_3 على الترتيب). توقع القراءات لزمن الانـتقال مع المسافة من المرسل وإذا كان الخط الواصل بين القراءتين الأوليين يمر بنقطة الأصل دل ذلك على عدم وجود شروخ مختفية ، ويحدد عمق الشرخ (C) من المعادلة التالية:

$$C = \frac{y}{2}\sqrt{\left[\left(\frac{2T_2^2 + 3T_3^2}{T_3 T_2}\right) - 25\right]} \qquad (8\text{-}3\text{-}6)$$

ويوضـح الشـكل (٨-٣-٧) خطـوات تحديد عمق واتجاه شرخ سطحى باستخدام جهاز قياس سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية.

٨-٣-٥-٧ قياس سمك طبقة سطحية ذات جودة منخفضة

يتعرض سطح الخرسانة للتلف بعض الأحيان بسبب مهاجمة العوامل البيئية من حرارة وأملاح ، ويكـون مـن المفـيد لتقييم كفاءة العنصر الخرسانى معرفة عمق التلف الناتج. ويمكن أن يكون قياس سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية (الانتقال غير المباشر) مفيداً لتحقيق ذلك. حيث تمر الموجات فى الطبقة السطحية فقط عند تقارب وضعى المرسل والمستقبل وباستمرار أخذ القراءات لزمن الانتقال مع وضـع المستقبل بعيداً عن المرسل (الممارسة العادية فى هذا النوع من القياسات) تمر الموجات جزئياً ثم أساسياً فى الطبقة السليمة تحت السطحية. توقع النتائج (الزمن مع المسافة بين محولى الطاقة) ، وإذا لوحـظ وجود ميلين للخط الواصل بين النقاط يكون ذلك دليلاً على وجود تغير فى نوعية للخرسانة مع العمـق (كمـا فى الشكل (٨-٣-٦)). أما إذا كان الخط وحيد الميل فيدل ذلك على عدم تغير النوعية (عدم حدوث تلف). ويقاس عمق الطبقة السطحية التالفة بتطبيق المعادلة التالية:

$$t = \frac{x_0}{2}\sqrt{\frac{(v_s - v_d)}{(v_s + v_d)}} \qquad (8\text{-}3\text{-}7)$$

حيث :

x_0 = المسافة التى يحدث عندها تغير الميل (مقيسة من مركز موقع المرسل)

v_d = سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية فى الطبقة السطحية (تحسب من الميل الأول للخط).

v_s = سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية فى الطبقة تحت السطحية (تحسب من الميل الثانى للخط).

٨-٣-٥-٨ تحديد معاير المرونة ونسبة بواسون الديناميكية:

ترتـبط سـرعة انـتقال الموجات فوق الصوتية بالثوابت المرنة للخرسانة ويمكن تحديد معاير المرونة الديناميكى لوسط مرن متماثل الخواص ذى أبعاد لانهائية من المعادلة:

$$E_d = \rho v^2 \frac{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}{(1-\upsilon)} \qquad (8\text{-}3\text{-}8)$$

حيث:

E_d = معاير المرونة الديناميكى (ميجانيوتن/م^2).

υ = نسبة "بواسون" الديناميكية.

ρ = الكثافة (كجم/م^3).

v = سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية (كم/ثانية).

وحيث أن السرعة لا تتأثر بشكل أو مقاس العينة –إلا إذا كان طول أصغر بعد لها أقل من الطول الموجى المستخدم – يمكن عند معرفة الكثافة و نسبة "بواسون" الديناميكية ، تحديد معاير المرونة الديناميكى عن طريق قياس سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية خلال الخرسانة.

وتجرى اختبارات الرنين الطولية– وفقاً للمواصفات المعنية– لتحديد نسبة معاير المرونة الديناميكى إلى الكثافة من المعادلة.

$$\frac{E_d}{\rho} = 4n^2L^2 * 10^{-6} \qquad (8\text{-}3\text{-}9)$$

حيث:

n = تردد ذبذبة الرنين (هرتز).

L = طول العينة (م).

وبدمج المعادلتين (٨–٣–٨) و (٨–٣–٩) نحصل على المعادلة التالية ومنها يمكن تحديد قيم نسبة "بواسون" الديناميكية كما فى الجدول (٨–٣–١) .

$$\frac{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}{(1-\upsilon)} = \frac{4n^2L^2}{v^2} \times 10^{-6} \qquad (8\text{-}3\text{-}10)$$

ولا تجرى غالباً اختبارات الرنين لذلك يمكن استخدام العلاقات التجريبية لتحديد معاير المرونة الاستاتيكى والديناميكى (الذي قد يختلف من نقطة لأخرى فى نفس المنشأ). الجدول (٨–٣–٢) يوضح مثالا لتلك العلاقة التجريبية بين سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية ومعاير المرونة الإستاتيكى والديناميكى ، والمستنتجة لخرسانة ذات نوعيات شائعة من الركام . ويجدر بالذكر أن القيم المحددة من هذا الجدول تكون دقيقة فى حدود ±١٠ % .

٨–٣–٦ إيجاد العلاقة بين المقاومة وسرعة انتقال النبضات

تتأثر العلاقة بين المقاومة وسرعة انتقال النبضات بعدة عوامل منها نسب مكونات الخرسانة ونوعياتها، ومحتوي الرطوبة وطريقة المعالجة وعمر الخرسانة، لذلك ينبغى استنتاج علاقة لكل نوعية محددة من الظروف. وتعتمد دقة الاستنتاج من هذه العلاقة على درجة تمثيل الظروف المستنتجة منها العلاقة لتلك بالمنشأ المختبر. كما تعتمد دقة العلاقة نفسها على عدد الاختبارات التى أجريت لاستنتاجها. ويمكن استنتاج العلاقة باستخدام عينات معملية أو قلوب خرسانية من منشأ، وقد أثبتت الخبرة العملية أن استخدام العينات المعملية يعطى تقديراً أكثر تحفظاً للمقاومة.

وفى حالة استخدام العينات المعملية يتم تغيير مقاومتها حسب الغرض من العلاقة: فيكون التحكم فى المقاومة بتغيير العمر عند دراسة اكتساب المقاومة بينما يكون التحكم فى المقاومة عن طريق تغيير نسبة الماء/ الأسمنت لأغراض ضبط الجودة. وتختبر عينات فى الضغط أو الانحناء تعد وتختبر وفقاً للمواصفات المختصة. وتكون نتائج كل ثلاث عينات ممثلة لنقطة واحدة فى العلاقة المطلوبة. كما ينبغى ألا يزيد مدى الاختلاف فى المقاومة على ± ٥ % وإلا تستبعد النتائج من الاعتبار فى العلاقة.

فى حالة استنباط العلاقة من المنشأ ينبغى إجراء اختبارات قياس سرعة الموجات على العينات فى موقعها بالمنشأ قبل القطع والغمر فى الماء حيث يتسبب عدم مراعاة ذلك فى الحصول على قيم أعلى للسرعات. ولا يمكن فى حالة المنشأ تغطية مدى واسع من المقاومة لذلك تستنبط العلاقة للمدى المحدود فى المنشأ ثم يتم عمل امتداد لها حسب الحاجة.

٨-٣-٧ مصادر محتملة للخطأ وكيفية تجنبها

أ – انزلاق المحول على السطح أثناء القياس فى الاختبار أو عند ضبط الصفر يؤدى إلى عدم ثبات القراءة مع وجود خطأ عند الثبات (حيث يتغير الموقع النسبى للمحولات) لذلك يضغط المحول بقوة ناحية السطح المختبر فى الموقع المحدد.

ب – لا يستخدم القضيب المرجعى الطويل لضبط الصفر حيث يغطى تأثير طول القياس على العيوب المحتملة فى الدوائر وأدوات القياس ويكون الطول المناسب هو حوالى ٢٥٠ مم لحالة تردد الموجات فى حدود ٥٤ كيلوهرتز.

جـ – فى حالة عدم إمكان قياس طول الانتقال بدقة على العنصر يمكن استخدام الأبعاد الاسمية (حسب الرسومات) مع ذكر السماحية فيها ولا يستخدم ذلك على الإطلاق فى حالة الأطوال الأقل من ٣٠٠ مم بسبب احتمالات الخطأ المتزايدة. وعموماً يجب أن تكون الدقة فى قياس طول المسار أفضل من ± ١ % .

د – عند تصحيح السرعات بسبب وجود صلب تسليح قريب من موقع الاختبار يجب مراعاة أن النتائج تمثل الصلب والخرسانة المحيطة به وليست الخرسانة فى الخط الواصل بين مركزى المحولين، لذا يجب الحذر عند تفسير النتائج.

هـ – السطح الممسوس والمسوى بعد الصب قد تكون له خواص مغايرة لخرسانة القلب. وعلى ذلك ينبغى تجنب إجراء القياسات عليه. وعند حتمية إجراء الاختبار على مثل هذا السطح يجب مراعاة تأثير ذلك العامل – عن طريق إجراء قياسات لمسافات طويلة فى حالة الانتقال غير المباشر مثلاً.

و – الشرخ السطحى المغلق بالضغط أو المملوء بالماء يكون غير مرئى بالنسبة للنبضات ، لذلك يجب مراعاة حالة الإجهادات فى العنصر وكذلك محتوى الرطوبة عند محاولة استنتاج عمق شرخ سطحى.

ز – قياس سمك الطبقة السطحية ذات النوعية الرديئة يكون فى حالة وجود مسطح كبير تالف من الخرسانة ولا يستخدم لحالة التعشيش المحدود مثلاً.

ح – تتأثر سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية بدرجة حرارة الخرسانة المختبرة إذا كانت خارج المدي (± ٣٠ °م) ولذلك يجرى تصحيح للسرعات حسب الجدول (٨–٣–٣).

ط – لاتتأثر سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية بشكل ومقاس العنصر الخرسانى المختبر إلا إذا كانت قيمة أقل بعد للعنصر أقل من الطول الموجى للنبضة المستخدمة فى الاختبار. حيث يتسبب ذلك فى نقص واضح للسرعة المحددة. لذلك يجب ألا يقل الحد الأدنى لبعد العنصر المختبر عن القيم الموضحة فى الجدول (٨–٣–٤).

ى – عند مقارنة نوعيات خرسانة فى منشآت مختلفة أو عناصر مختلفة فى نفس المنشأ ينبغى مراعاة تشابه الظروف فى جميع الحالات من حيث تكوين الخرسانة و محتوي الرطوبة والعمر ودرجة الحرارة ونوع الأجهزة المستخدمة وترتيب المحولات وإلا لاتصح المقارنة.

٨–٣–٨ التقرير

يجب أن ينص التقرير على المواصفة القياسية التى تم إجراء اختبار قياس سرعة الموجات فوق الصوتية وفقاً لها ، كما يجب أن يحتوى على البيانات التالية:

١ – تاريخ وتوقيت ومكان الاختبار.

٢ – وصف المنشأ أو العينة المختبرة.

٣ – التركيب الاسمى للخرسانة ويشمل:

- نوع الأسمنت
- محتوى الأسمنت
- نسبة الماء إلى الأسمنت
- نوع الركام ومقاسه
- الإضافات المستخدمة (إن وجدت)

٤ – نوع وظروف المعالجة– درجة الحرارة وعمر الخرسانة عند الاختبار.

٥ – مواصفات البيئة التى صممت لها الخرسانة.

٦ – اســكتش يوضــح وضع محولات الطاقة ومسار الموجات. كما يوضح عليه ترتيب صلب التسليح وأية فتحات مجاورة لموقع الاختبار.

٧ – حالة السطح (من حيث النعومة ووجود الشروخ أو الفجوات السطحية من أى نوع).

٨ – حالة الرطوبة الداخلية وظروف المعالجة الطويلة (بقدر الإمكان).

٩ – نوع الجهاز ومنشأه ودقة قراءته للسرعة وتردد الموجات المستخدمة ومميزات الجهاز الأخرى.

١٠ – القيم المقاسة لسرعة النبضات.

١١– القيم المصححة لسرعة النبضات (بسبب وجود صلب التسليح مثلاً) إذا لزم الأمر.

٨–٣–٩ المراجع

- BS 1881 Testing Concrete

Part 5 Methods for testing hardened concrete for other than strength.

Part 108 Methods for making test cubes from fresh concrete.

Part 109 Methods for making test beams from fresh concrete.

Part 110 Methods for making test cylinders from fresh concrete.

Part 114 Methods for determination of density of hardened concrete.

Part 116 Methods for determination of compressive strength of concrete cubes.

Part 119 Methods for determination of compressive strength using portions of beams broken in flexure (equivalent cube method).

Part 120 Methods for determination of compressive strength of concrete cores.

Part 201 Guide for use of non-destructive methods of test for hardened concrete.

Part 202 Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer.

Part 204 Recommendations for the use of electromagnetic cover measuring devices.

BS 6100 Glossary of building and civil engineering terms

Part 6 Concrete and Plaster.

- BS 1881 Testing Concrete

Part 203 Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete

- BS 3683 Glossary of terms used in non-destructive testing

Part 4 Ultrasonic flaw detection.

- BS 6089 Guide to assessment of concrete strength in existing buildings
- ACI 228-R-89 In-place methods for determination of strength of concrete.
- ACI Monograph No. 9 - Testing hardened concrete: nondestructive methods.

جدول (٨-٣-١) قيم نسب "بواسون" الديناميكية

$\frac{nL}{v}$	υ
0.257	0.45
0.342	0.40
0.395	0.35
0.431	0.30
0.456	0.25
0.474	0.20
0.487	0.15
0.494	0.10
0.499	0.05

جدول (٨-٣-٢) قيم تجريبية لمعاير المرونة الإستاتيكى والديناميكي بدلالة سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية

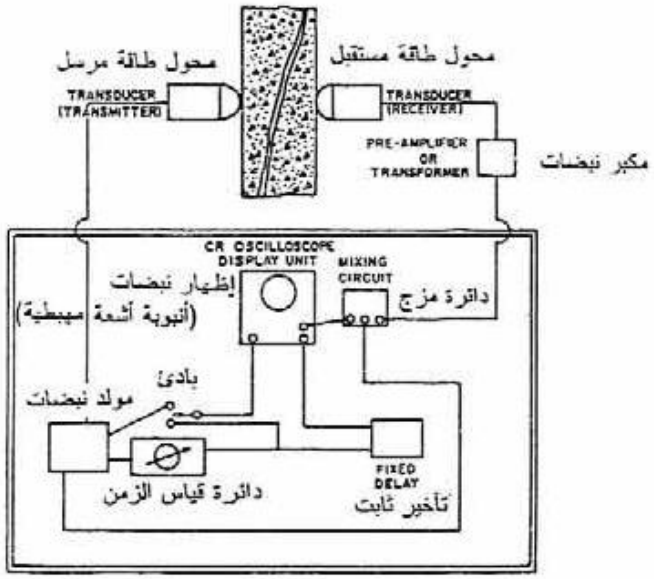
سرعة انتقال النبضات (كم/ثانية)	معاير المرونة (ميجانيوتن/مم^2)	
	ديناميكى	استاتيكى
3.6	24 000	13 000
3.8	26 000	15 000
4.0	29 000	18 000
4.2	32 000	22 000
4.4	36 000	27 000
4.6	42 000	34 000
4.8	49 000	43 000
5.0	58 000	52 000

جدول (٨-٣-٣) تأثير الحرارة على انتقال النبضات

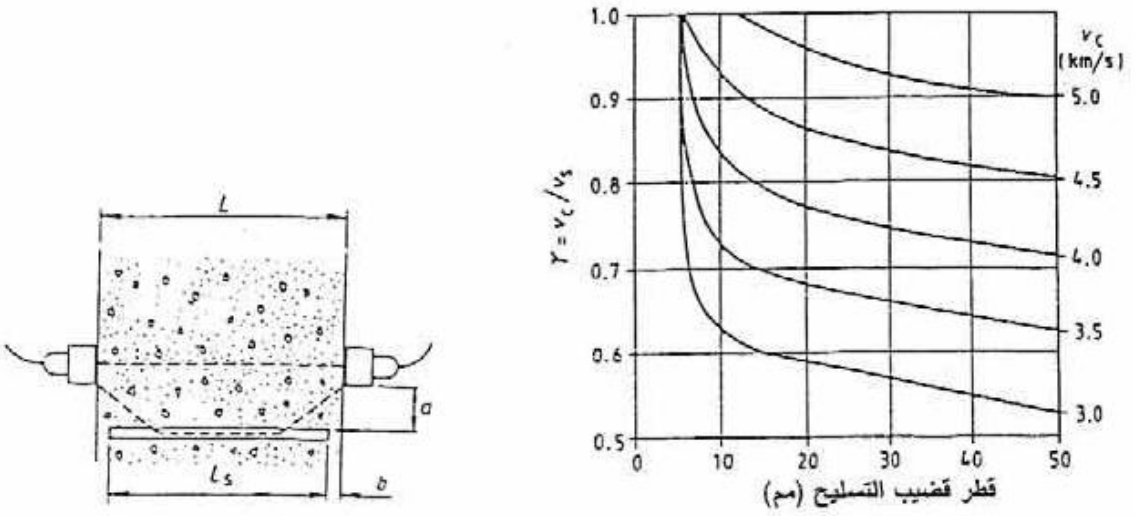
درجة الحرارة (° م)	التصحيح فى سرعة النبضات المقاسة (%)	
	خرسانة جافة فى الهواء	خرسانة مشبعة بالماء
60	+5	+4
40	+2	+1.7
20	0	0
0	-0.5	-1
-4	-1.5	-7.5

جدول (٨-٣-٤) تأثير أبعاد العينة على انتقال النبضات

تردد محول الطاقة (كيلوهرتز)	سرعة انتقال النبضات فى الخرسانة (كم/ثانية)		
	3.5	4.0	4.5
	أقل بعد عرضى (مم)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30



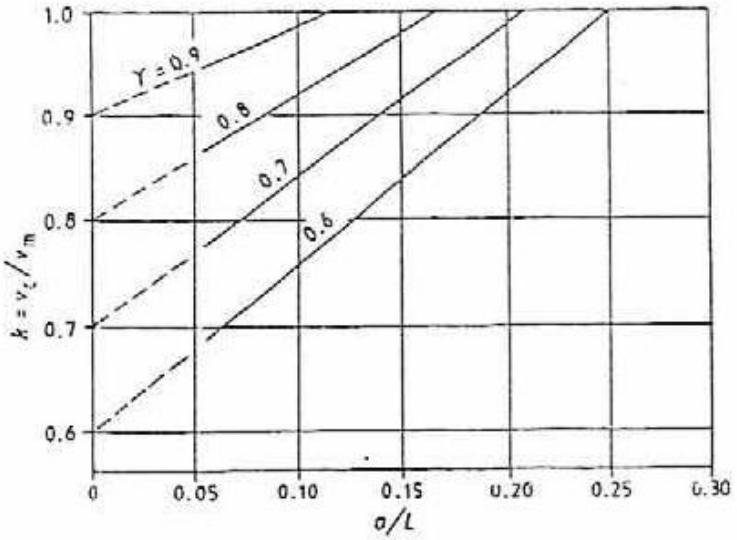
شكل (٨-٣-١) دائرة قياس سرعة الموجات فوق الصوتية خلال الخرسانة



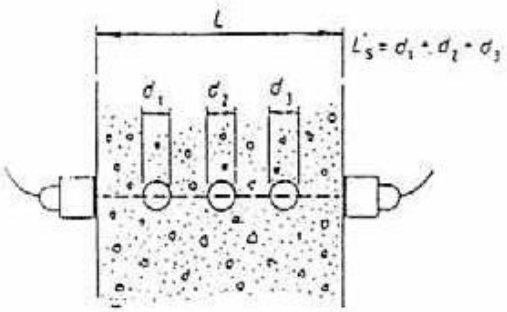
(أ) العلاقة بين قطر قضيب التسليح ونسبة السرعة.

(ب) قطاع عرضي في خرسانة بها تسليح عرضي.

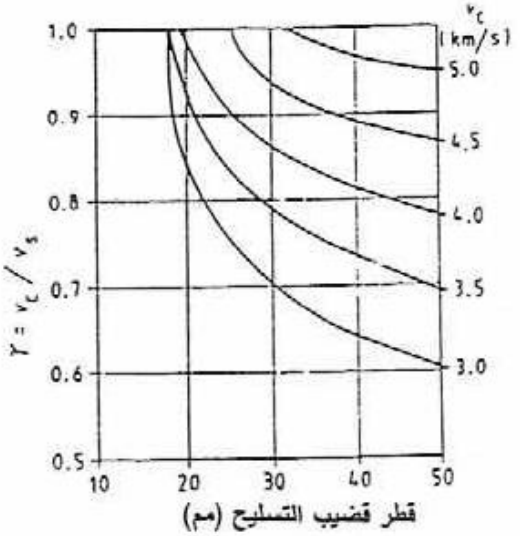
شكل (٨-٣-٢) تأثير صلب التسليح على سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية خلال الخرسانة (حالة مسار الموجات موازى لمحور صلب التسليح)



شكل (٨-٣-٣) معامل التصحيح للسرعة (k) لحالة مسار الموجات موازى لمحور صلب التسليح

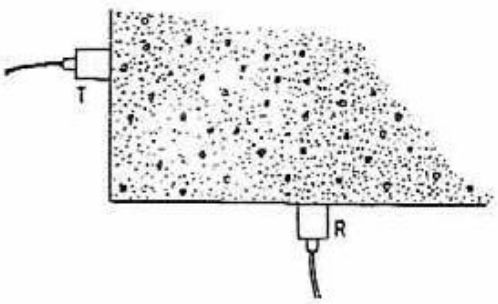


(ب) قطاع عرضي فى خرسانة بها تسليح طولى.

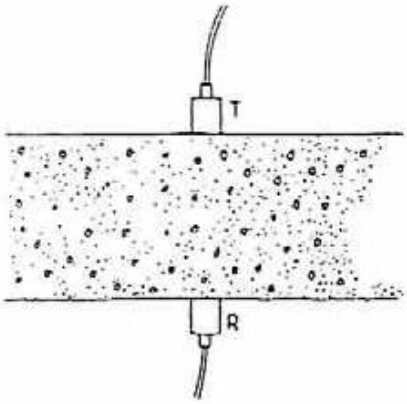


(أ) العلاقة بين قطر قضيب التسليح ونسبة السرعة.

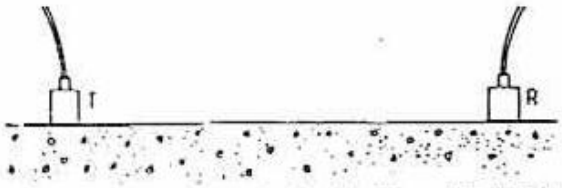
شكل (٨-٣-٤) تأثير صلب التسليح على سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية (v_c) خلال الخرسانة لحالة مسار الموجات عمودى على محور صلب التسليح



الانتقال شبه المباشر



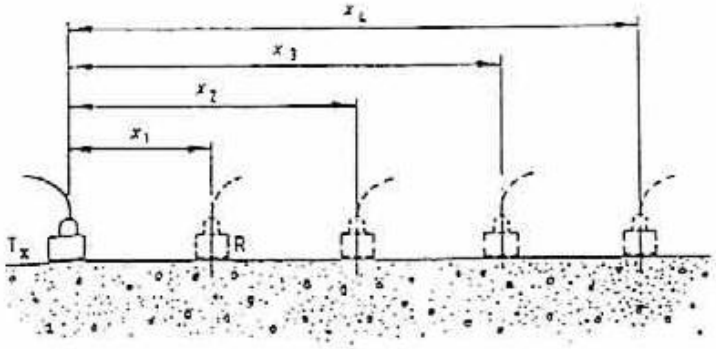
الانتقال المباشر

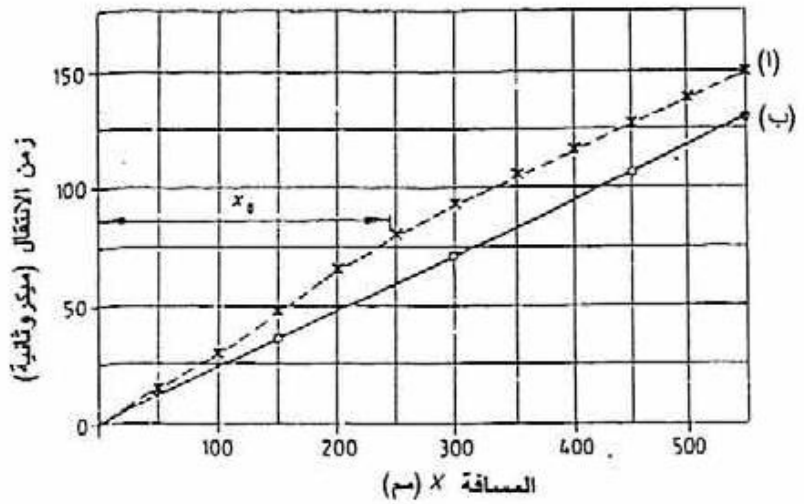


الانتقال الغير مباشر (السطحى)

المرسل (T)
المستقبل (R)

شكل (٨-٣-٥) الطرق المختلفة لوضع محولات الطاقة على العنصر المختبر

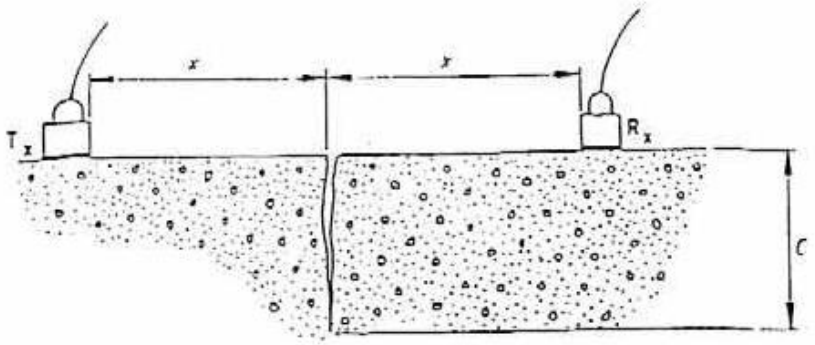




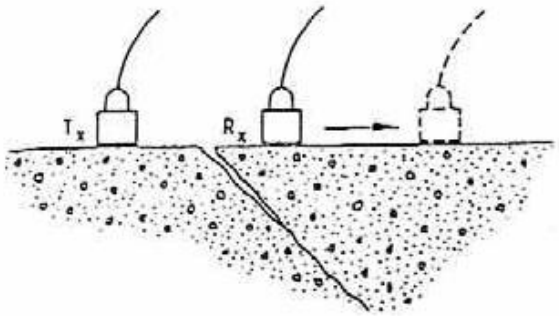
(ا) القراءات لخرسانة بها ٥٠ مم العليا ذات جودة منخفضة.

(ب) القراءات لخرسانة متجانسة.

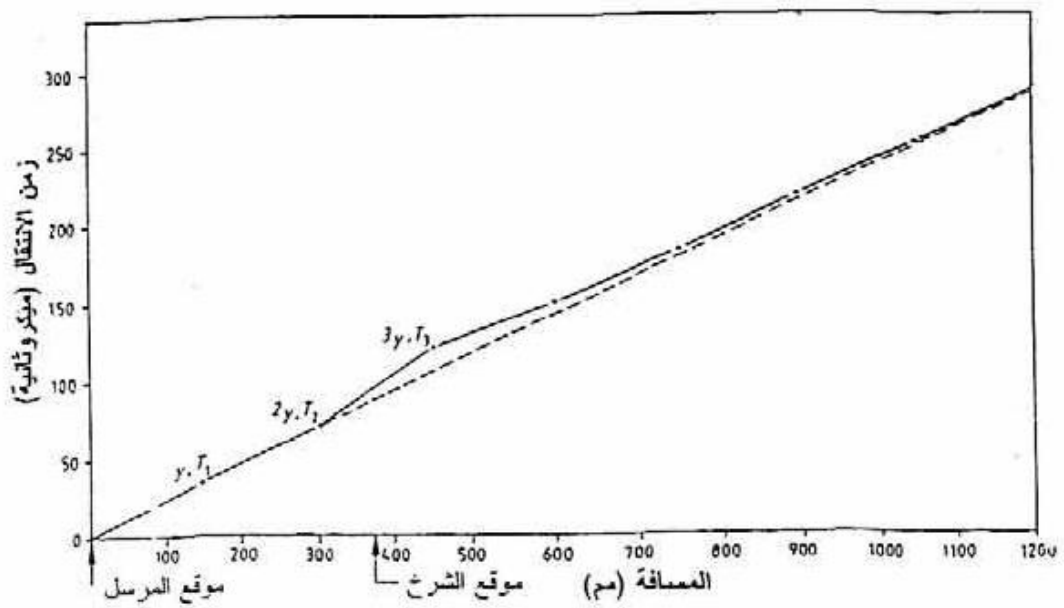
شكل (٨–٣–٦) تحديد سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية خلال الخرسانة (الطريقة غير المباشرة)



(أ) شرخ عمودي علي السطح.



(ب) شرخ مائل.



(جـ) تأثير الشرخ على القياسات السطحية.

شكل رقم (٨-٣-٧) تحديد عمق واتجاه شرخ سطحى