DSİ Teknik Bülteni
Sayı: 139, Ocak 2022

BETON DÖŞEMELERDE YÜZEY ÇATLAK DERİNLİĞİ TAHMİNİ İÇİN ULTRASONİK ATIMLI DALGA HIZI ÖLÇÜM TEKNİKLERİNİN VERİMLİLİĞİNİN BİR ARAŞTIRMASI

Mehmet Emin UYANIK
DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı, 06100 Yücetepe ANKARA
meuyanik@dsi.gov.tr

(Makalenin geliş tarihi: 11.05.2020, Makalenin kabul tarihi: 10.12.2021)

ÖZ
Beton, inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesidir. Ana karışım unsurları agrega, çimento ve su olan, bu unsurlar ile birlikte kimyasal katkılar, uçucu kül gibi bağlayıcı malzemelerin belirli bir oranda karıştırılması ile üretilebilen kompozit bir malzemedir. Yüksek basınç dayanımı ve durabilite, yangına karşı dayanıklılık gibi birçok avantaja sahiptir. Ayrıca hemen hemen her geometrik şekilde kalıplara dökülerek farklı yapı elemanı tasarım gereksinimlerini karşılayabilmektedir. Ancak deprem, çatlak oluşumu, korozyon, karbonasyon, pullanma ve kimyasal ve fiziksel bozulma gibi farklı çevre etkileri nedeniyle betonun yapısında hasarlar meydana gelebilir. Bu faktörler betonun yapısında kusur ve süreksizliklere yol açmaktadır. Bunların sonucunda yapının hizmet ömrü önemli ölçüde kısalabilmektedir. Bu sebeple betonun yapısındaki kusur ve hasarların tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri ile erken teşhis edilmesi, hızlı önlem ve iyileştirme faaliyetleri gerçekleştirilebilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu çalışma sertleşmiş betonda yüzeye dik ve içi hava dolu çatlak derinliğinin tahmini için uygulanan bazı ultrasonik atımlı dalga hızı ölçüm tekniklerinin konvansiyonel betonlarda verimliliğinin araştırmasını içermektedir. Böylece atım geçiş mesafesi ve çatlak derinliğindeki değişimin derinlik ölçüm verimliliğine etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaç için laboratuvar ortamında üretilmiş beton döşeme numunesi ve kullanılmakta olan beton yaya yolu üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle beton yüzeye dik çatlak modelinin elde edilmesi için bir beton döşeme numunesi dökülmüş ardından taze halde döşeme yüzeyine dik iki farklı derinliğe sahip plastik bir malzeme batırılarak numune sertleşmeye bırakılmıştır. Bir gün sonra, dikey çatlak modelini tamamlamak için plastik eleman döşeme numunesinden çıkarılmıştır. Böylece boyutları, karışım tasarımı, dayanımı ve çatlak derinliği önceden bilinen numuneye ultrasonik atımlı dalgalar yüzeyden iletim yöntemi ile uygulanmıştır. Bunun dışında, kullanılmakta olan ve elmas kesici ile daha önceden belirli bir derinliğe kadar kesilmiş beton bir yaya yolu yüzeyinde düşük kaliteye sahip beton konumlarının saptanması için yüzey haritalandırma uygulaması gerçekleştirilmiştir. En önemlisi, bu dikey kesikler birer çatlak gibi düşünülmüş, çatlak derinliğinin tahmini için laboratuvar ortamında döşeme numunesi üzerinde uygulanan ve verimliliği yüksek olduğu görülen olası yüzeyden iletim tekniklerinin sahada kullanılmakta olan bu beton yol üzerinde de yüksek verimlilikle uygulanabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, Muayene, Ultrasonik atımlı dalga hızı, Çatlak derinliği, Yüzeyden iletim

AN INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF ULTRASONIC PULSE VELOCITY MEASUREMENT TECHNIQUES FOR DEPTH ESTIMATION OF SURFACE CRACK IN CONCRETE SLABS

ABSTRACT
Concrete is the most used material in the construction industry. It is a composite material made by mixing aggregate, cement and water, which are the main components, sometimes including chemical admixtures and cementitious substances such as fly ash. It has numerous advantages such as high compressive strength, exceptional durability and fire resistance. Significantly, it is able to mold into almost any shape of a structural component to comply with diverse design requirements. On the other

hand, due to numerous external and internal factors such as earthquake, storm, excessive loading, aging, thermal stresses, carbonation and AAR, crack formation may occur in concrete structure. These factors are the cause of discontinuity and defects in concrete. At the end, service life of the structure will drastically decrease. Therefore, early detection of the concrete damage by using non-destructive and together with destructive inspection techniques are vital important to take rapid prevention and treatment actions. This research study involves an investigation of efficiency of ultrasonic pulse velocity measurement techniques to estimate depth of crack perpendicular to the surface inside hardened concrete. Thus, It was aimed to investigate the effects of transmission distance change during the crack depth measurement. For this purpose, experiments were conducted using a concrete slab specimen and an in-situ plain concrete pathway. First of all, the slab specimen was prepared to replicate vertical crack by inserting a vertical plastic material having two different depths in the fresh concrete surface while casting. After one day, the plastic component was removed from the slab to simulate the vertical crack. In this way, it was objected to investigate the most efficient vertical crack depth measurement technique by applying surface transmission of ultrasonic pulsed waves on the specimen, whose dimensions, mixture content, compressive strength and crack depth were known. Apart from these, experiments such as surface mapping were performed to detect inferior quality locations on the surface of an in-situ plain concrete pathway cut to a certain depth by diamond type cutter. Most significantly, perpendicular cut of the pathway was considered vertical crack and it was aimed to investigate reliability and applicability of the most efficient techniques from the studies to estimate the in-situ concrete crack depth.

Keywords: Concrete, Inspection, Ultrasonic pulse velocity (UPV), Crack depth, Surface transmission

1 GİRİŞ

Kompozit bir malzeme olan beton, bina, köprü, baraj, regülatör, kanal, yol gibi yapılarda çok amaçlı yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Fakat deprem, fırtına, taşkın ve heyelan gibi dinamik etkiler veya yaşlanma, sülfat atağı, klor penetrasyonu gibi içsel ve dışsal faktörlere bağlı yapısal bozulmalar sertleşmiş betonun yapısında süreksizlik (çatlak oluşumu) ve çeşitli kusurların oluşmasına neden olmaktadır [1]. Bu sebeple bir yapının hizmet ömrü boyunca yapısındaki beton veya betonarme elemanların kalite ve durabilite açısından denetimine ihtiyaç duyulabilir. Örneğin yapıda bir doğal afet sonucu oluşan kusur ve hasarlar zamanında tespit edilip onarım veya iyileştirme faaliyetleri gerçekleştirilmezse yapının hizmet ömrü hızla kısalabilir.

Günümüzde yapı elemanlarında kalite, durabilite ve mukavemet gibi parametrelerin denetlenmesi amacı ile tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılmaktadır. Genel olarak tahribatsız deney yöntemleri yapıda ilave hasara yol açmadan boşluk, çatlak, segregasyon gibi çeşitli yapısal bozulmalar, kusurlar ve süreksizliklerin konum ve boyutlarının tespit edilmesi için kullanılır [2]. Bunlara ek olarak sertleşmiş betonun doğal rezonans frekansı, boyuna, enine dinamik elastisite ve rijitlik modülü gibi dinamik parametrelerin tayini için de kullanılmaktadır [3]. Ultrasonik yöntemlere dayanan tahribatsız deney yöntemleri oldukça önemlidir. Madde atomlardan meydana gelir ve bu atomlar tıpkı bir yay gibi atomlar arası kuvvetler ile birbirlerine bağlıdır. Bu atomlar titreşime maruz kaldıklarında bağlı oldukları atomlara da titreşimi iletirler. Bir malzemeye uygulanan ultrasonik atımlı ses dalgaları da malzeme yapısındaki atomlar arasında iletilerek hareket eder. Atomlar birbirlerine rijit bir şekilde bağlı olduklarında titreşim hareketlerine eş zamanlı olarak başlarlar ve aynı faz içerisinde bitirirler. Fakat atomlar zayıf olan elastik kuvvetler ile birbirlerine bağlı olduklarında uygulanan titreşimin atomlar arasındaki iletimi belirli bir zaman alır ve birbirlerinin gerisinde olan fazlarda titreşimi bitirirler [4]. Bu temel prensiplerden yola çıkıldığında beton gibi bir malzemeye uygulanan ultrasonik atımlı ses dalgaları da titreşim yaratır. Betonun yapısında bulunan atomlar arasındaki bağların rijitliği arttıkça dalga iletim hızı da artmaktadır. Genel olarak beton kalitesi arttıkça ultrasonik dalgaların geçiş hızında artış gözlemlenir. Fakat içerisindeki boşluk, çatlak, segregasyon gibi farklı kusur ve süreksizliklerin artması ile atım geçiş hızında ani düşüşler görülür [5-7]. Ayrıca süreksizlik ve kusurlara çarpan ses dalgalarında yön, hız, genlik, frekans gibi parametrelerin değişime uğraması kusurların konum ve boyutlarının tahmin edilebilmesine olanak sağlar [8-10].

Araştırma kapsamında öncelikle laboratuvar ortamında konvansiyonel betondan meydana gelen döşeme numunesi hazırlanmıştır (Şekil 1 ve 2). Bu numune sayesinde yüzeye dik, içi hava dolu ve iki farklı derinliğe sahip çatlak modellenmiştir. Daha sonra, günümüzde betonda içi hava dolu ve yüzeye dik çatlak derinliğinin tahmininde kullanılan ve verimli sonuçlar elde edilebileceği düşünülen üç farklı yüzeyden iletim yöntemi döşeme numunesi yüzeyine uygulanmıştır. Bu yöntemlerde tavsiye

edilen algılayıcı (transdüser) konumları ile birlikte farklı konumlar da (Şekil 3) belirlenmiştir. Snell Yasası, Pisagor ve Öklid bağıntıları yardımı ile hesaplanan atım geçiş mesafelerinde ölçülen atım geçiş süreleri kullanılarak atım hızları ve tahmini çatlak derinlikleri hesaplanmıştır [11-14]. Yöntemlere ve algılayıcı konumlarına bağlı olarak elde edilecek tahmini çatlak derinliği sonuçlarını (dö) gerçek çatlak derinlikleri (dg) ile karşılaştırarak yöntemlerin verimliliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bununla birlikte iki farklı derinliğe sahip çatlak modellenerek çatlak derinliğindeki artış veya azalışın verimliliğe etkisinin gözlemlenmesi hedeflenmiştir.

Araştırmanın son kısmında ise laboratuvar ortamında güvenilirliklerinin yüksek olduğu tespit edilen yöntemler ve algılayıcı konumlarının sahada da verimlilik analizlerinin yapılması amacı ile konvansiyonel beton yaya yolu üzerinde de deneyler gerçekleştirilmiştir. Yol önceden belirli bir derinliğe kadar yüzeye dik bir biçimde elmas kesici bıçaklarla kesilmiştir. Derinliği ve genişliği bilinen bu kesikler (derzler) düşey çatlak gibi düşünülerek yöntemlerin verimliliğinin sahada da geçerliliği araştırılmıştır. Bunlara ek olarak, beton yoldaki iki kesiğin olduğu bölgede yöntemlerin verimliliğini veya ultrasonik atımlı dalganın yüzeyden iletimini etkileyebileceği düşünülen olası kusur ve süreksizliklerin varlığının araştırılması amacı ile ultrasonik yüzey haritalandırma uygulaması gerçekleştirilmiştir.

2 MATERYAL VE METOT

Laboratuvar ve arazi uygulamalarında algılayıcı (transdüser) yüzeyi ile beton yüzeyi arasında atım geçişinin azami düzeyde sağlanabilmesi amacıyla endüstriyel vazelin kullanılmıştır. 54 kHz algılayıcıların çapı 50 mm'dir. Deneylere başlamadan önce ve belirli zaman aralıklarında, cihazın kalibrasyon çubuğu üzerinde bulunan referans değeri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiş ve gerektiğinde zaman sıfırlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.1 Beton Karışım Tasarımı

Döşeme numunesi beton tasarımında CEM I 42,5 R tipi dökme portland çimentosu ve Çizelge 1'de gösterildiği gibi üç farklı boyut aralığına sahip dört sınıf agrega kullanılmıştır. Bu agregalar doğal kırma taş ve dere kumundan meydana gelmiştir. Hava içeriği dikkate alınarak hesaplanan tasarımda su/çimento oranı 0,62 ve hedef dayanım C30/37 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 1 – Döşeme numunesi taze betonu karışım miktarları

Karışım Hacmi	140 dm^3	
Karışım Suyu	30,3 lt	
Çimento Tipi ve Miktarı	CEM I 42,5 R	49,0 kg
İri Agrega Sınıfları	Çakıl 2: 12,5 – 31,5 mm	62,3 kg
	Çakıl 1: 5 – 12,5 mm	62,2 kg
İnce Agrega Sınıfları	Dere Kum: 0 – 5 mm	18,5 kg
	Kırma Kum: 0 – 5 mm	43,2 kg
Hedef Dayanım	C30/37	
28 Günlük Ortalama Kübik Basınç Dayanımı	40,3 MPa	

2.2 Yüzeye Dik Çatlak Modeli

İki farklı yönteme dayalı yüzeye dik çatlak benzetimi gerçekleştirilmiştir.

2.2.1 Beton Döşeme Numunesi

Öncelikle Şekil 1 ve 2' de gösterildiği gibi laboratuvar ortamında hazırlanan 1000 x 1000 x 200 mm boyutlara sahip kare tabanlı dikdörtgen prizma döşeme numunesi kalıbı hazırlanmıştır. Daha sonra, şekilde görülen PVC membran döşemenin perdahlanmış yüzeyine dik olacak biçimde yerleştirilmiştir. 2,0 mm et kalınlığına sahip PVC elemanın kalıp içerisinde kalan kısımları 115 mm ve 60 mm uzunluğunda iki farklı derinliğe sahiptir. PVC eleman kalıba sabitlenerek hareket kabiliyeti engellenmiştir.

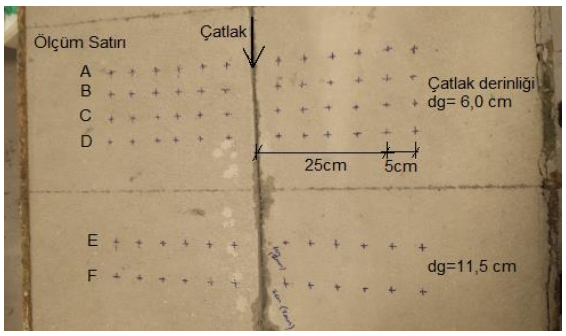


Şekil 1 – Döşeme numunesi kalıp elemanları



Şekil 2 – Taze beton döküm işleri

Taze betonun kalıba dökümü ve perdahlama işlemleri tamamlanıp 20 ± 2 °C sıcaklıkta sertleşmeye bırakıldıktan 24 saat sonra numune içerisine batırılmış membran çıkarılarak Şekil 3' te gösterildiği gibi 2 farklı derinliğe sahip içi hava dolu ve yüzeye dik çatlak modeli elde edilmiştir.



Şekil 3 – İçerisinde iki farklı derinlikte çatlak modeli bulunan döşeme numunesi, ölçüm satırları, transdüser konumları ve çatlak derinlikleri

2.2.2 Beton Yaya Yolu

Çalışmanın devamında döşeme numunesi üzerinde verimliliklerinin yüksek olduğu gözlemlenen olası çatlak derinliği ölçüm yöntemleri ve transdüser konumlarının sahada da verimliliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için Şekil 4' te gösterildiği gibi elmas kesici bıçak ile 10 cm derinliğe kadar perdahlanmış yüzeye dik yönde kesilmiş, C20/25 hedef dayanıma ve yaklaşık 2,5 m genişliğe sahip beton yaya yolu seçilmiştir. 1,20 m aralıklarla yolu kesen iki kesik derz birer çatlak modeli gibi düşünülmüştür. Ayrıca, bu derzlere yakın yüzeylerde yöntemlerin verimliliğini veya ultrasonik atımlı dalganın yüzeyden iletimini etkileyebileceği düşünülen olası kusur ve süreksizliklerin varlığının araştırılması amacı ile ultrasonik yüzey haritalandırma uygulaması gerçekleştirilmiştir. Deneyler uygulanırken algılayıcı konumlarında yüzeyde pürüz, toz gibi unsurların bulunmaması için önlemler alınmıştır.



Şekil 4 – 1,2 m kesik aralığına sahip beton yol

3 DENEYLER

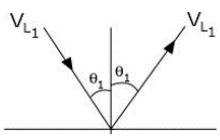
Şekil 3' te gösterilen döşeme numunesi üzerinde 6 adet ölçüm satırı belirlenmiştir. A' dan D' ye kadar olan ölçüm satırlarının orta noktasından gerçek derinliği (dg) 6,0 cm olan perdahlanmış yüzeye dik çatlak modeli geçmektedir. Yine aynı model E ve F ölçüm satırlarının orta noktasından 11,5 cm derinlikte (dg) geçmektedir. Her bir satır üzerine 5 cm aralıklarla işaretlenmiş 12 adet transdüser konumu belirlenmiştir. Bu uygulama noktaları, yöntemlerin tavsiye ettiği transdüser konumlarından farklı olan konumları da içermektedir. Böylece, farklı transdüser konumlarından elde edilecek deney sonuçlarının da verimliliklerinin araştırılması hedeflenmiştir. Numune üzerinde yukarıda bahsedilen farklı atım geçiş mesafelerine ve 3 farklı yüzeyden iletim yöntemine dayanan 78 adet ultrasonik dalga atım geçiş süresi ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Yöntemlerin sahada da geçerliliği ve Yöntemlerin sahada da geçerliliği ve uygulanabilirliğinin araştırılması amacı ile döşeme numunesi üzerinden elde edilen 78 adet ölçüm sonucuna göre verimli olduğu belirlenen yöntemler beton yol üzerinde de uygulanmıştır. Yolun perdahlanmış yüzeyinde bulunan, yüzeye dik ve 10 cm derinliğe sahip 2 farklı derz çatlak gibi düşünülmüş ve bu çatlakları ortalayacak şekilde 2 ayrı (X ve Y) ölçüm satırı belirlenmiştir. Derz genişliğinin 3 mm civarında olduğu belirlenmiştir. Yüzeyden iletim tekniği ile elde edilen haritalandırma uygulaması ile birlikte beton yoldan toplamda 174 adet atım geçiş süresi ölçüm değeri elde edilmiştir. Transdüserin konumlandığı ve ölçümlerin yapıldığı yerlerde yüzey pürüzlülüğü giderilmiş ve uygun bir couplant kullanılarak işlemler gerçekleştirilmiştir.

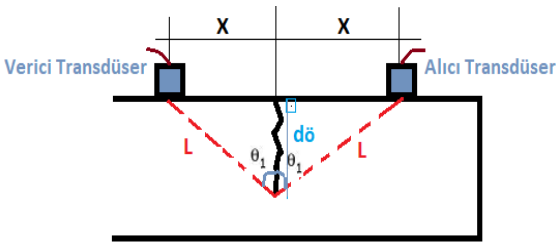
3.1 Deney Yöntemleri

Beton döşeme numunesi ve yaya yolu üzerinde yüzeye dik çatlak derinliği tahmini için 3 farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerde kullanılan atım geçiş yolunun hesaplanması genel olarak Snell Yasası, Pisagor ve Öklid bağıntılarına dayandırılmıştır [12-14].

Şekil 5' te gösterildiği gibi Snell Yasası'na göre değişiklik göstermeyen ortamda (malzeme doğası aynı) boyuna dalga düzgün yansımaya uğrarsa normal ile yaptığı açı değişmez [14-15].



Şekil 5 - Snell' e göre aynı ortamdaki düz bir yüzeyde meydana gelen yansıma ve normali ile yaptığı açı [14-15]



Şekil 6 - Snell Yasası yardımı ile atım geçiş yolunun belirlenmesinin bir örneği

Bu araştırmada, Şekil 6' da ki örnekte gösterildiği gibi ultrasonik atımlı dalganın çatlağın bitim noktasındaki düz bir yüzeyde yansımaya uğradığı varsayılmıştır. Böylece yansıma açısının (Θ1) değişime uğramadığı kabul edilmiştir. Ayrıca, verici transdüserden alıcı transdüsere gidecek olan boyuna dalganın hipotenüslerinin toplanması ile elde edilen ve en kısa yol olan 2L uzunluğundaki atım geçiş yolunu takip ettiği varsayılmıştır.

3.1.1 Yöntem 1

Bu tekniğe dayalı deney prosedürü Şekil 7 ' de gösterildiği gibi transdüserler çatlağı ortalayacak şekilde konumlandırılarak çatlak transdüser arası ''X'' mesafesinde atım geçiş süresi ölçülür [16]. Daha sonra mesafe 2 katına çıkarılarak (2X) son ölçüm elde edilir. Bu yöntemde tavsiye edilen X mesafesi 150 mm dir.

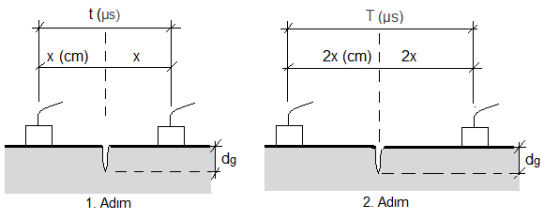
$$d_{ö} = X_i \times \sqrt{\frac{4t^2 - T^2}{T^2 - t^2}}$$

$d_{ö}$: Tahmini çatlak derinliği, cm

X_i: Transdüserler arası mesafe, cm

t: X konumunda ölçülen atım geçiş süresi, µs

T: 2X konumunda ölçülen atım geçiş süresi, µs



Şekil 7 – Yöntem 1' e göre deney süreci ve transdüser konumları [16]

3.1.2 Yöntem 2

Bu tekniğe dayalı deney süreci Şekil 8' de gösterilmiştir [17]. Öncelikle çatlak olmadığı bilinen ve önceden belirlenmiş transdüserler arası mesafede (Li) geçiş süresi (To) ölçülür. Ardından transdüserler arası mesafe sabit tutularak çatlak merkeze alınır ve çatlak içeren bu bölgede de geçiş süresi (Tc) ölçülür. Bu yönteme dayanan tahmini çatlak derinliğini ($d_{ö}$) gösteren ampirik formül aşağıda verilmiştir.

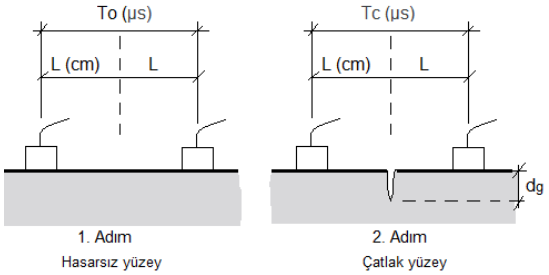
$$d_{ö} = L_i \times \sqrt{\frac{Tc^2}{To^2} - 1}$$

$d_{ö}$: Tahmini çatlak derinliği, cm

Li: Transdüserler arası mesafe, cm

To: Hasarsız konumdaki atım geçiş süresi, µs

Tc: Hasarlı konumdaki atım geçiş süresi, µs



Şekil 8 - Yöntem 2' ye göre deney süreci ve transdüser konumları [17]

3.1.3 Yöntem 3

Bu tekniğe dayalı deney süreci Şekil 9' da gösterilmiştir [18]. Bu yöntemde ölçüm satırı değişmediği sürece atım hızının (V) sabit olduğu kabul edilerek aynı satır üzerinde en az 2 farklı transdüser konumundan elde edilen atım geçiş süreleri kullanılarak hesaplanmıştır. Derinlik tahmini (dö) sayfanın devamında verilen formüllere dayanır.

Toplam atım geçiş yolu $= 2L = V \times t$,

$$L_i^2 = X_i^2 + d_{ö}^2$$

$$X_i^2 = t^2 \frac{V^2}{4} - d_{ö}^2$$

$$V^2 = \frac{{X_2}^2 - {X_1}^2}{(\frac{t_2}{2})^2 - (\frac{t_1}{2})^2}$$

$$d_{ö} = \sqrt{t_i^2 \frac{V^2}{4} - X_i^2}$$

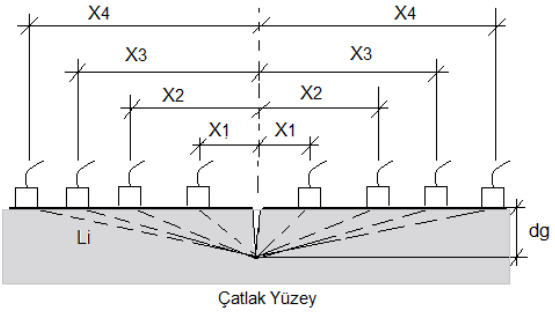
$d_{ö}$:Tahmini çatlak derinliği, cm

X_i :Transdüserler arası mesafe, cm

2Li :Atım geçiş yolu uzunluğu, cm

V :2Li atım yolunda ölçülen atım hızı, cm/µs

t :2Li atım yolunda ölçülen atım geçiş süresi, µs



Şekil 9 – Yöntem 3' e göre 4 ayrı deney süreci ve transdüser konumları [18]

4 BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Döşeme Numunesi Deney Sonuçları ve Sonuçların Tartışılması

Çizelge 2' de çatlak derinliklerinin (dg) yöntem 1' e göre tahmin edilmesi (dö) amacı ile x ve 2x mesafelerdeki atım geçiş sürelerine bağlı olarak elde edilen dö değerlerinin yüzdesel olarak doğruluktan sapma miktarları verilmiştir.

Çizelge 2'de görüldüğü gibi ölçüm satırlarının tamamında transdüser merkezi ve çatlak arasındaki mesafe (x) 5,0 cm belirlenerek gerçekleştirilmiş deneyler neticesinde tutarlı atım süresi ve çatlak derinliği tahmini elde edilememiştir. Transdüser çapı 50 mm olduğu düşünüldüğünde transdüser merkezi ile çatlak arasındaki mesafenin de (x) 5 cm olarak konumlandırılması, transdüser uygulama yüzeyinin bitim noktası ile çatlak merkezi arasında sadece 2,5 cm mesafe kalmasına neden olmuştur. Transdüserlerin çatlağa bu şekilde yakın konumlandırılması sağlıklı atım geçiş süresi ölçülememesine neden olduğu düşünülmektedir. Böylece 5,0 cm x mesafesinin yöntem 1 için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Aynı çizelgede çatlak derinliğinin 6,0 cm' den 11,5 cm' ye artış gösterdiğinde x mesafesinin artırılmasının sonuçlardaki verimliliği artırdığı gözlemlenmiştir. Çatlak derinliği 11,5 cm ye göre düşük olduğu (6,0 cm) satırlarda ise x mesafesinin azaltılması, sonuçlardaki verimliliği artırmıştır. Örneğin çatlak derinliğinin 11,5 cm olduğu ölçüm satırı E için x mesafesi 10,0 cm den 15 cm ye çıkarıldığında sapma miktarının +%179,1 den +%17,4' e düştüğü görülmüştür. Benzer durum satır F için de tecrübe edilmiştir. Derinliğin 6,0 cm olduğu satırlarda (A, B, D) ise x mesafesinin azaltılması ile genellikle (C satırı hariç) sapma yüzdesinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Çizelge 3'te ise gerçek çatlak derinliklerinin (dg) tahmin edilmesi (dö) için verimli olabileceği düşünülen ve yöntem 2' ye dayandırılan 2 farklı atım geçiş mesafesi (L) araştırılmıştır. Çatlak üzerinde (Tc) ve hasarsız beton konumunda (To) ölçülen atım geçiş sürelerine bağlı olarak elde edilmiş dö değerlerinin yüzdesel olarak sapma miktarları verilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında çatlak derinliği 6,0 cm olduğu

Çizelge 2 – Yöntem 1'e göre döşeme numunesi deney sonuçları

Yöntem 1	**d_g**	**X**	**T(2x) t (x)**	**$d_ö$**	**Sapma**
Ölçüm Satırı	cm	cm	µs	cm	%
A	6,0	x_1: 5	t: 72,1	-	-
		x_2: 10	T: 57,2		
A	6,0	x_1: 10	t: 57,2	7,35	+22,5
		x_2: 20	T: 98,2		
A	6,0	x_1: 15	t: 79,5	9,53	+58,8
		x_2: 30	T:140,8		
B	6,0	x_1: 5	t: 74,2	-	-
		x_2: 10	T: 60,4		
B	6,0	x_1: 10	t: 60,4	8,06	+34,3
		x_2: 20	T:101,4		
B	6,0	x_1: 15	t: 79,3	8,33	+38,8
		x_2: 30	T:143,9		
C	6,0	x_1: 5	t: 74,2	-	-
		x_2: 10	T: 57,8		
C	6,0	x_1: 10	t: 57,8	8,24	+37,3
		x_2: 20	T: 96,5		
C	6,0	x_1: 15	t: 76,9	7,54	+25,7
		x_2: 30	T:141,7		
D	6,0	x_1: 5	t: 74,7	-	-
		x_2: 10	T: 60,1		
D	6,0	x_1: 10	t: 60,1	8,73	+45,5
		x_2: 20	T: 98,8		
D	6,0	x_1: 15	t: 79,3	8,86	+47,7
		x_2: 30	T:142,4		
E	11,5	x_1: 5	t: 91,7	-	-
		x_2: 10	T: 90,8		
E	11,5	x_1: 10	t: 90,8	32,1	+179,1
		x_2: 20	T:102,1		
E	11,5	x_1: 15	t: 88,4	13,5	+17,4
		x_2: 30	T:144,1		
F	11,5	x_1: 5	t: 92,8	-	-
		x_2: 10	T: 92,1		
F	11,5	x_1: 10	t: 92,1	32,2	+180,0
		x_2: 20	T:103,5		
F	11,5	x_1: 15	t: 92,2	14,75	+28,3
		x_2: 30	T:146,5		

ölçüm satırlarında (B, C, D) transdüser ve çatlak arasındaki mesafenin (L) 10,0 cm belirlenerek gerçekleştirilen deney sonuçlarının 15,0 cm

alınarak elde edilen sonuçlardan genel olarak daha tutarlı olduğu görülmüştür. Fakat derinliğin 11,5 cm olduğu satırlarda (E, F) L değerinin azaltılmasının hata miktarını artırdığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 3 – Yöntem 2' ye göre döşeme numunesi deney sonuçları

Yöntem 2	d_g	L	T_C T_O	$d_{ö}$	Sapma
Ölçüm Satırı	cm	cm	µs	cm	%
A	6,0	10	T_C: 57,2	4,98	-17,0
			T_O: 51,0		
A	6,0	15	T_C: 79,5	5,14	-14,3
			T_O: 75,2		
B	6,0	10	T_C: 60,8	6,96	+16,0
			T_O: 49,9		
B	6,0	15	T_C: 79,3	4,95	-17,5
			T_O: 75,3		
C	6,0	10	T_C: 57,8	5,7	-5,0
			T_O: 50,2		
C	6,0	15	T_C: 76,9	3,58	-40,3
			T_O: 74,8		
D	6,0	10	T_C: 60,1	6,66	+11,0
			T_O: 50,0		
D	6,0	15	T_C: 79,3	3,93	-34,5
			T_O: 76,7		
E	11,5	10	T_C: 90,8	15,1	+31,3
			T_O: 50,1		
E	11,5	15	T_C: 88,4	9,5	-17,4
			T_O: 74,6		
F	11,5	10	T_C: 92,1	15,5	+34,8
			T_O: 49,8		
F	11,5	15	T_C: 92,2	10,3	-10,8
			T_O: 76,1		

Araştırma çalışmasının devamında, döşeme numunesi üzerinde her bir satır üzerinde yöntem 3' e göre ölçümler gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4). Bu yöntemde en az 4 farklı ölçüm sonucu elde edilmesi ve bu sonuçlara göre çatlak derinliğinin tahmin edilmesi tavsiye edilmiştir. Bu çalışmada her bir çatlak konumu için farklı transdüser konumlarında (xi, Li) 6 adet ölçüm sonucu elde edilerek verimli atım geçiş mesafelerinin araştırılması amaçlanmıştır.
Çizelge 4' te çatlak derinliğinin 11,5 cm olduğu E ve F satırlarındaki deney sonuçlarına bakıldığında belirgin bir sonuç karakteristiği gözlemlenmese de Xi mesafelerinin artırılması ile sapma yüzdesinin kısmen düşme eğiliminde olduğu tecrübe edilmiştir.

Çizelge 4 – Yöntem 3' e göre döşeme numunesi deney sonuçları

Yöntem 3	d_g	x_i	t_i	$d_{ö}$	Hata
Ölçüm Satırı	cm	cm	µs	cm	%
A	6,0	x_1: 10	57,2	5,8	-3,3
		x_2: 15	79,5		
A	6,0	x_1: 10	57,2	7,35	+23,3
		x_3: 20	98,2		
A	6,0	x_1: 10	57,2	7,7	+28,3
		x_4: 25	118,5		
A	6,0	x_2: 15	79,5	10,38	+73,0
		x_3: 20	98,2		
A	6,0	x_2: 15	79,5	10,1	+68,3
		x_4: 25	118,5		
A	6,0	x_3: 20	98,2	9,65	+60,8
		x_4: 25	118,5		
B	6,0	x_1: 10	60,4	8,53	+42,2
		x_2: 15	79,3		
B	6,0	x_1: 10	60,4	8,06	+34,3
		x_3: 20	101,4		
B	6,0	x_1: 10	60,4	10,2	+70,0
		x_4: 25	121,7		
B	6,0	x_2: 15	79,3	7,1	+18,3
		x_3: 20	101,4		
B	6,0	x_2: 15	79,3	8,38	+39,7
		x_4: 25	121,7		
B	6,0	x_3: 20	101,4	10,5	+75,0
		x_4: 25	121,7		
C	6,0	x_1: 10	57,8	7,89	+31,5
		x_2: 15	76,9		
C	6,0	x_1: 10	57,8	8,24	+37,3
		x_3: 20	96,5		
C	6,0	x_1: 10	57,8	8,52	+42,0
		x_4: 25	116,2		
C	6,0	x_2: 15	76,9	8,92	+48,7
		x_3: 20	96,5		
C	6,0	x_2: 15	76,9	9,31	+55,2
		x_4: 25	116,2		
C	6,0	x_3: 20	96,5	10,0	+66,7
		x_4: 25	116,2		
D	6,0	x_1: 10	60,1	8,29	+38,2
		x_2: 15	79,3		
D	6,0	x_1: 10	60,1	8,73	+45,5
		x_3: 20	98,8		
D	6,0	x_1: 10	60,1	8,84	+47,3
		x_4: 25	119,4		
D	6,0	x_2: 15	79,3	9,58	+59,7

		x_3: 20	98,8		
D	6,0	x_2: 15	79,3	9,52	+58,7
		x_4: 25	119,4		
D	6,0	x_3: 20	98,8	9,41	+56,8
		x_4: 25	119,4		
E	11,5	x_1: 10	90,8	-	-
		x_2: 15	92,4		
E	11,5	x_1: 10	90,8	32,17	184,3
		x_3: 20	102,1		
E	11,5	x_1: 10	90,8	23,39	103,4
		x_4: 25	122,2		
E	11,5	x_2: 15	92,4	23,81	107,0
		x_3: 20	102,1		
E	11,5	x_2: 15	92,4	17,58	+52,9
		x_4: 25	122,2		
E	11,5	x_3: 20	102,1	10,97	+4,6
		x_4: 25	122,2		
F	11,5	x_1: 10	92,1	-	-
		x_2: 15	92,2		
F	11,5	x_1: 10	92,1	32,27	180,6
		x_3: 20	103,5		
F	11,5	x_1: 10	92,1	23,57	105,0
		x_4: 25	123,6		
F	11,5	x_2: 15	92,2	23,78	106,8
		x_3: 20	103,5		
F	11,5	x_2: 15	92,2	16,64	+44,7
		x_4: 25	123,6		
F	11,5	x_3: 20	103,5	11,31	-1,7
		x_4: 25	123,6		

4.1.1 Sonuçların Karşılaştırılması

Araştırılan 3 farklı yönteme ve atım geçiş mesafelerine bağlı olarak döşeme numunesinden elde edilen (Çizelge 2, 3 ve 4) en verimli sonuçların karşılaştırması Çizelge 5' te verilmiştir.

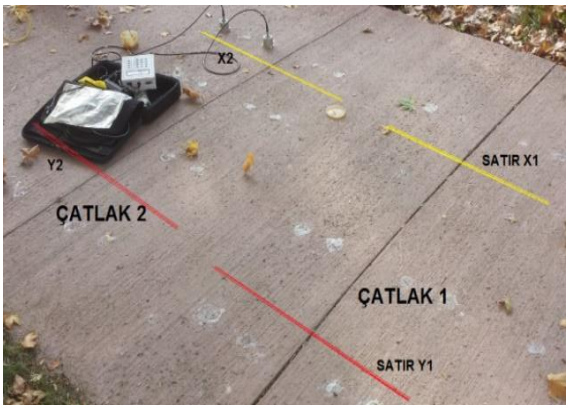
Çizelge 5' e bakıldığında ölçüm satırı A için en tutarlı sonucu (-%3,3) yöntem 3' ün (X1=10, X2=15cm) verdiği görülmektedir. Satır B' de ise yöntem 1 ve 2' nin kullanılması sonucunda birbirine yakın sonuçların elde edildiği anlaşılmıştır. Fakat çatlak derinliğinin yine 6,0 cm olduğu diğer satırlarda ise (C, D) en verimli sonucu yöntem 2 ile elde edilmiştir (L=10,0 cm). Derinliğin 11,5 cm olduğu E ve F satırlarında ise en verimli sonuçların yöntem 3 takip edilerek X3=20 cm ve X4=25 cm transdüser konumlarında ölçülen atım geçiş süresi değerleri ile elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5 – Döşeme numunesinin verimli deney sonuçlarının karşılaştırılması

Döşeme Numunesi							
dg (cm)	**SATIR**	**Yöntem 1**		**Yöntem 2**		**Yöntem 3**	
		dö cm	**Sapma %**	**dö cm**	**Hata %**	**dö cm**	**Sapma %**
6,0	**A**	7,4	22,5	5,14	14,3	***5,8***	***-3,3***
	B	8,1	34,3	***7,0***	***16,0***	7,1	18,3
	C	7,5	25,7	***5,7***	***-5,0***	7,9	31,5
	D	8,7	45,5	***6,7***	***11,0***	8,3	38,2
11,5	**E**	13,5	17,4	9,5	17,4	***11,0***	***-4,6***

4.2 Beton Yaya Yolu Deney Sonuçları ve Sonuçların Tartışılması

Araştırmanın son kısmında beton döşeme numunesi üzerinde uygulanan üç farklı yöntemde verimliliği yüksek olduğu belirlenen atım geçiş mesafesi veya transdüser konumlarının sahada da uygulanabilirliği ve geçerliliğinin araştırılması amaçlanmıştır.



Şekil 10 – Beton yaya yolu üzerinde bulunan çatlak modelleri ve belirlenen ölçüm satırları

Yol önceden belirli bir derinliğe kadar yüzeye dik bir biçimde elmas kesici bıçaklarla kesilmiştir. 10 cm derinliğe sahip bu kesikler düşey çatlak gibi düşünülerek 2 farklı çatlak modeli üzerinde 4 farklı (Xi ve Yi) ölçüm satırı belirlenmiştir.

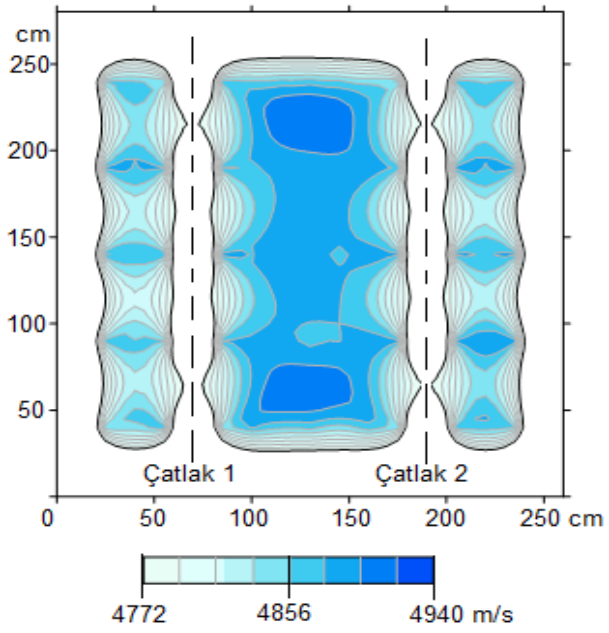
Çizelge 6'da, Çizelge 5'te sapma miktarı düşük olduğu görülen yöntem ve algılayıcı konumlarının beton yolda da uygulanması neticesinde elde edilen sonuçların karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 6 – Beton yaya yolu verimli deney sonuçlarının karşılaştırılması

Beton Yaya Yolu							
dg (cm)	SATIR	Yöntem 1		Yöntem 2		Yöntem 3	
		dö cm	Sapma %	dö cm	Sapma %	dö cm	Sapma %
dg= 10 (Çatlak 1)	X_1	6,5	-35	***9,2***	***-8***	8,2	-18
	Y_1	***9,7***	***-3***	7,2	-28	11,3	+13
dg= 10 (Çatlak 2)	X_2	13,2	+32	***9,6***	***- 4***	10,7	+7
	Y_2	11,7	+17	8,9	-11	***11,0***	***+10***

Kullanılan yöntemlerde, Çizelge' 6 da koyu renk ile gösterilen ve beton yol üzerinde tutarlılığı yüksek sonuçların elde edilmesini sağladığı düşünülen transdüser ile çatlak arasındaki mesafeler; yöntem 1 için X değeri 15cm, yöntem 2 için Li değeri 10 cm ve yöntem 3 için X1 ve X2 değeri sırası ile 20 ve 25 cm'dir.

Bunlara ek olarak, beton yoldaki iki derzin olduğu bölgede yöntemlerin verimliliğini veya ultrasonik atımlı dalganın yüzeyden iletimini etkileyebileceği düşünülen olası kusur ve süreksizliklerin varlığının araştırılması amacı ile ultrasonik atımlı ses dalgalarının yüzeyden iletim yöntemi ile yüzey haritalandırma uygulaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11 – Beton yol üzerinde gerçekleştirilen ultrasonik yüzey haritalandırma uygulaması sonucu

Şekil 11' de transdüserler arası mesafe 10,0 cm sabit tutularak TS EN 12504-4 standardı yüzeyden iletim yöntemi ile elde edilen dalga hızı sonuçlarının bir yazılım yardımı ile elde edilen beton yolun yüzeyine ait ultrasonik haritalandırma sonucu ortaya çıkarılmıştır.

Bu sonuca bakıldığında yüzeyden iletim yöntemi ile elde edilen atım geçiş hızı sonuçlarının ağırlıklı olarak 4700 ile 4900 m/s aralığında olduğu görülmüştür. Atım hızlarında belirgin miktarlarda değişim gözlenmediği için beton yolun yüzeyi ve yüzeyine yakın beton derinliklerinde (yaklaşık 0-12 cm) çatlak, boşluk, segregasyon gibi kusur ve süreksizliklerin bulunmadığı çıkarımında bulunulmuştur. Böylece, beton yolda bulunan kesik derinliği tahmininde kullanılan yöntemlerin verimliliğini etkileyebilecek herhangi bir ilave kusur ve süreksizliğin bulunmadığı anlaşılmıştır.

5 SONUÇ

Bu araştırmada yöntem 1 uygulanarak, daha yüksek olan çatlak derinliklerinin (11,5 cm) tahmin edilmesinde transdüser konumlarını ifade eden x mesafesinin artırılmasının çoğunlukla verimli sonuçların elde edilmesini sağladığı anlaşılmıştır. Diğer taraftan, derinlik daha düşük ise (6,0 cm), x mesafesinin azaltılmasının ölçüm verimliliğini artıran bir unsur olduğu görülmüştür. Benzer bir biçimde, yöntem 2'de çatlak derinliğindeki artışa karşın L mesafesinin de artırılmasının genel olarak ölçüm verimliliğinin artmasına neden olmuştur. Yöntem 3' te ise derinliğin 6,0 cm olduğu satır sonuçlarında (A, B, C, D) Xi mesafelerindeki azalışın bazı satırlardaki (A, D) sapma yüzdelerinde kısmen azalma eğilimine neden olduğu görülse de sonuçların verimliliği ile Xi mesafeleri arasında genel ve belirgin bir ilişki gözlenmemiştir.

Araştırmanın devamında, yöntemlerin tamamı için transdüserin merkezi ile çatlak arasındaki mesafe 5 cm olduğunda (transdüser bitimi ile çatlak arası 2,5 cm mesafede) tutarlı sonuç elde edilememiştir. Çatlak derinliği tahmininde, transdüserlerin bu şekilde çatlağa oldukça yakın konumlandırılmasının uygun olmadığı ortaya çıkarılmıştır.

Cihaz operatöründe değişiklik olmadan, aynı deney yöntemi ve aynı transdüser X veya L mesafesi farklı ölçüm satırlarında uygulandığında deney sonuçlarında kısmi sapmalar görülmesinin sertleşmiş betonun heterojen yapısından kaynaklanabileceği çıkarımında bulunulmuştur.

Çalışmanın son kısmında bahsi geçen 3 yöntemin verimliliğinin sahada da (yerinde) uygulamalı araştırılması amaçlanmıştır. Beton yolda bulunan 10 cm derinliğe sahip çatlak modelinin derinlik tahmininde 3 farklı yöntemle

de tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sebeple yöntemlerin sahada da verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat sapma miktarı yüksek olan ölçümlerin, betonun heterojen yapısından kaynaklanabileceği gibi hali hazırda kullanılmakta olan bu yolun çatlak modeli olarak düşünülen derzlerinde laboratuvar ortamında olduğu gibi sabit derinlikte olamayabileceği, yolun kenarlarda çatlak derinliği 10 cm olduğu bilinse de merkezine doğru bu derinliğin değişiklik gösterebileceğinin de göz önünde bulundurulması gerektiği çıkarımında bulunulmuştur. Bununla birlikte, TS EN 12504-4 standardı yüzeyden iletim yöntemi ile elde edilen ultrasonik atımlı dalga hızı sonuçlarının ‘’surfer’’ isimli yazılıma işlenmesi ile beton yolun yüzeyine ait ultrasonik haritalandırma sonucu ortaya çıkarılmıştır (Şekil 11). Böylece beton yolun incelenen yüzey alanında, kesik derinliği tahmininde kullanılan yöntemlerin verimliliğini etkileyebilecek herhangi bir ilave kusur ve süreksizliğin bulunmadığı sonucuna varılmıştır.

Araştırma çalışmasının bu kısmında, yapı yüzeylerinin kısa sürede taranabildiği ve yüzeye yakın kusurların konumlarının belirlenebildiğini gösteren verimli bir çalışma ortaya konmuştur.

Bu araştırma, konvansiyonel betonda yüzeyden iletim yöntemi ile çatlak derinliğinin tahmin edilmesinde günümüzde kullanılan 3 yöntemin verimlilik analizlerinin gerçekleştirildiği ve konvansiyonel beton yüzeyinde ultrasonik haritalandırma sonucunun elde edildiği bir çalışmadır. Gelecekte, benzer bir araştırmanın daha büyük boyutlarda (örn. 50 mm) agregalar içeren kütle beton sınıfındaki bir betonda meydana gelen model üzerinde de gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

6 KAYNAKLAR

[1] John H Bungey, Stephen G Millard, M G Gratham ‘’Testing of concrete in structures’’ ,London 2006.

[2] M.E. Uyanik ‘’An Investigation of Non-destructive Testing Techniques for Concrete Structures’’, The University of Birmingham, April 2019.

[3] ‘’Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens’’ ASTM C215, 2019.

[4] ‘’Ultrasonic testing of materials”, International Atomic Energy Agency Technical Document - 462, Vienna, June 1988.

[5] Malhotra M ‘’Testing hardened concrete’’, American Concrete Institute (ACI) Materials Journal M 6, Detroit, 1976.

[6] Jones, R. Facaoaru, I. ‘’Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method’’, Materials and Structures, 1969.

[7] Bungey, J.H. ‘’The validity of ultrasonic pulse velocity testing of in-place concrete for strength’’, NDT International, IPC Press, Dec. 1980.

[8] Jones, R. and I. ‘’Factory: Testing of concrete by the ultrasonic pulse method, Materials and Structures’’, Volume. 2, No: 10, 1969.

[9] Bungey J.H.: ‘’The Testing of Concrete in Structures’’, Surrey University Press, 1982.

[10] Malhotra V.M.: ‘’Testing hardened concrete: Non-destructive methods’’, Monograph 9, American Concrete Institute, Detroit, 1976.

[11] Jean François, Chainx Vincent, Garnier Gilles Corneloup, ‘’Ulrasonic wave prorapagation in heterogeneous solid media: Theoretical analysis and experimental validation, Ultrasonics’’, Volume 44, Issue 2, Pages 200-210, Feb. 2006

[12] Drury, J. ‘’NDT Fundamentals: Ultrasonics, Part 3. Basic principles of sound’’, Insightwingston Then Northampton, 46, Pages 650-652, 2004

[13] Rokhlin, S. Wang, ‘’Critical angle measurement of elastic constants in composite material’’. The Journal of the Acoustical Society of America, 86, 1876-1882

[14] ‘’Schematic of the behaviour of longitudinal wave incident on a boundary at an oblique angle: (A) reflection and refraction and (B) mode conversion’’, Carino, 2004

[15] Jose M. Carcione, ‘’Wave Fields in Real Media: Wave Propagation in Anisotropic, nelastic, Porous and Electromagnetic Media’’, 2015

[16] ‘’Recommendations for measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete’’, BS 4408: Part 5, BS 1881: Part 203, London, 1974, 1986

[17] Ogata, H Hattori, K Hirashi, “Consideration of the Estimating Method of Crack Depth of Concrete by USPV Method”, The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering (JSIDRE), 2006

[18] N Yesiller, H M Aktan, I O Yaman, G Inci, “Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission,” ACI Materials Journal, 2001