



ULTRASONİK YÖNTEM İLE ASFALT BETONLARDA KONTROLLÜ ÇENTİK İLE ÇATLAK ANALİZİ

Sercan SERİN*

Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
Ultrases geçiş hızı, Asfalt beton, Tahribatsız test, Çatlak analizi.	Bu çalışmada, asfalt betonu kaplamalarda ultrases geçiş hızı test cihazı kullanılarak çatlak derinliği tahmini yapılmıştır. Testler, dolaylı okuma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel işlemlerde kontrollü çatlak oluşumunu elde etmek amacıyla, numunelere elmas testere yardımıyla farklı derinliklerde çentikler açılmıştır. Böylece çentiksiz ve 5, 10, 15, 20 cm derinliklerde çentikli numune grupları oluşturulmuştur. Deneysel veriler kullanılarak literatürde bulunan ve çatlak tahmininde kullanılan ampirik formüle ek olarak, bu çalışmada malzemenin fiziksel özelliklerinin analize dahil edildiği yeni istatistiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modeller ile sonuçlar, çentiksiz numunelerin analize dahil edildiği ve dahil edilmediği olmak üzere iki ayrı grupta incelenmiştir. Böylece, her iki modelde gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki determinasyon katsayıları (R^2) sırasıyla 0,95 ve 0,91 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, asfalt betonu kaplamalarda çatlak derinliğinin önerilen model ile başarılı bir şekilde tahmin edilebileceği tespit edilmiştir.

CRACK ANALYSIS WITH CONTROLLED NOTCHES ON ASPHALT CONCRETES VIA ULTRASONIC METHOD

Keywords	Abstract
Ultrasonic pulse velocity, Asphalt concrete, Non-destructive testing, Crack analysis.	In this study, the ultrasonic pulse velocity measurement device was used to predict crack depth in asphalt concrete layers. The tests were carried out using the indirect reading method. In experimental procedures, notches were opened with the help of a diamond saw to obtain controlled crack formation at different depths. In this way, un-notched and 5, 10, 15, 20 cm deeply notched sample groups were constituted. In addition to the empirical formulas used in the literature for the prediction of cracks using experimental data, new statistical models were developed in which the physical properties of the material are analyzed. These developed statistical models were examined in two separate groups for analyses by considering with and without un-notched situations. Thus, in both models, the determination coefficients (R^2) between the actual values and the predicted values were obtained as 0,95 and 0,91 respectively. As a result, it was determined that crack depth can be successfully predicted by the proposed model in asphalt concrete layers.

Alıntı / Cite

Serin, S., (2018). Ultrasonik Yöntem ile Asfalt Betonlarda Çatlak Analizi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(2), 310-315.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Serin, 0000-0001-6025-6233

Başvuru Tarihi / Submission Date	24.02.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	17.05.2018
Kabul Tarihi / Accepted Date	28.05.2018
Yayın Tarihi / Published Date	23.06.2018

* İlgili yazar / Corresponding author: sercanserin@duzce.edu.tr, +90-380-542-1133

1. Giriş

Ülkemiz karayolu ağının büyük çoğunluğunun bakım ve onarımına gereksinimi vardır. Ancak zamanında bakım yapılsa yolların ömrü uzatılabilir. Yeni yollar yapmak oldukça pahalı bir iştir. Bakım ihtiyacı duyan üstyapı ağının büyüklüğü ve bütçelerdeki sınırlamalar dikkate alındığında, üstyapı yönetiminden sorumlu kurumların üstyapı mühendisleri için tahribatsız test metotları önem kazanır (Serin, 2014).

Tahribatsız testler üstyapının mevcut yapısal durumu hakkında yapılan değerlendirmeler için kolektif bir terimdir ve üstyapının hali hazırdaki durumunu tespit etmek için daha evvel gerçekleştirilmiş bakım çalışmaları gibi bilgilere ihtiyaç duymaz (Russel vd., 2011). Tahribatsız deney yöntemleri tahribatlı deneylere göre iki önemli faydaya sahiptir. Birincisi, tahribatlı deneyler üstyapıya zarar verir veya deney için üstyapı malzemesinin çıkarılmasını gerektirir. Oysa tahribatsız deneyler üstyapıya zarar vermeden üstyapının değerlendirilmesini sağlar. İkinci faydası ise, tahribatlı deneylere göre trafiğin daha az kesintiye uğraması ve ucuz olmasıdır (Shahin, 2002).

Arazide asfalt tabakaların çatlak derinliklerinin tahribatsız bir şekilde tespit edilmesi bakım-onarım planlamasındaki mühendisler için değerli bir araç olabilir. Bu tür ölçümler günümüzde yaygın olarak tahribatlı yöntemler ile elle tespit edilmektedir. Bunun yanında bu görevi üstyapı tam bozulmadan gerçekleştirmek için tahribatsız iki farklı yöntem de mevcuttur. Bunlar; yüzey dalga metodu ve ultrasonik yöntemlerdir (Underwood vd., 2003).

Ultrasonik test tekniği, mekanik parametrelerin ve mikro yapının değerlendirilmesinde kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir (Abi, 2007). Son yıllarda yapılan çalışmalar, Ultrasonik yöntemlerin asfalt karışımının dinamik elastisite modülünü makul bir doğrulukla hesaplanabileceğini göstermektedir (Pellinen ve Witczak 2002; Jiang vd., 2006). Ultrasonik yöntemlerden ultrases geçiş hızı (UGH) testi betonun homojenliği, betonun dayanım tahminini, yukarıdan aşağıya çatlak takibini (Khazanovich vd., 2005), yorulma hasarını, asfalt kaplamalarda çatlak tespiti (Abo-Qudais ve Suleiman, 2005; Al-Qadi ve Riad 1996), malzeme içindeki bozulmaların karakteristiklerinin belirlenmesinde, katı bir cismin kalınlığının ve mekanik özelliklerinin tespiti (Garbacz vd., 2003) gibi çalışmalarda uygulanmıştır.

Ultrasonik ölçüm yöntemi yalnızca kalite kontrol testinde değil aynı zamanda kalınlık ölçülmesi, yüzey düzgünlüğü ve çatlak kontrolü yapmak amacıyla da kullanılmaktadır (Abi, 2007).

Bu çalışma, ülkemizde en yaygın yol kaplaması olarak kullanılan esnek üstyapılarda ultrasonik yöntemlerden ultrases geçiş hızı yardımıyla bozulma

kaynaklı oluşan çatlaklar hakkında tahribatsız olarak bilgi edinilmesi, çatlakların derinliklerin tespit edilmesi ve bozulmanın önem derecesinin ortaya koyulabilmesi için yapılmıştır. Bu kapsamda laboratuvar koşullarında hazırlanan numuneler üzerinde kontrollü çentikler oluşturularak çatlak simülasyonları yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları analiz edilerek çatlak derinliğinin doğru tahmini için tahmin modelleri kurulmuştur.

2. Ultrases Geçiş Hızı (UGH)

Ultrasonik yöntemlerden ultrases geçiş hızı (UGH) deneyi darbe alıcı transdüserle yüksek frekanslı ultrasonik enerji üretmesini sağlayan yüksek voltajlı elektrik darbesi üretebilen bir elektronik alettir. Ultrasonik dalgalar ses frekanslarını (20 kHz üzerinde) elastik dalgalar olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla ses enerjisi numune boyunca bir çeşit dalga boyunda iletilmektedir (Özen, 2011; Dunning, 2006). Şekil 1’de UGH deney aleti görülmektedir.

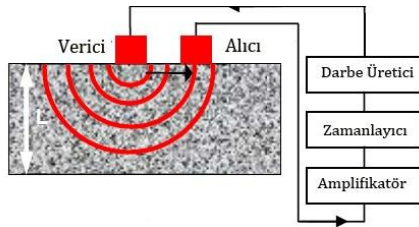


Şekil 1. Ultrases geçiş hızı deney aleti

Bir madde içinde ilerleyen bir ultrasonik dalgasının dört özelliğinden geçiş süresi, soğurulma, saçılması ve frekans içeriği bileşenlerinden birindeki ve birden fazlasındaki değişiklik, maddelerin bazı özellikleri hakkında genel bir bilgi vermektedir (Abi, 2007). Tahribatsız olan bu yöntem, birden fazla nokta üzerinden okuma yapılabilmesi ve zamandan tasarruf sağlanması gibi avantajları sebebiyle tercih edilmektedir (Anonim, 2017).

Ultrasonik yöntemle ölçümler direkt, yarı direkt, endirekt olmak üzere üç şekilde yapılır (Anonim, 2017). Çalışma kapsamında çatlak derinliği tespiti yapılacağı için endirekt okuma yöntemi uygun bulunmuş ve tüm ölçümler bu şekilde yapılmıştır (Şekil 2).

Endirekt okumada aynı yüzeyde vericinin sabit, alıcının ise eşit aralıklarla belirlenen noktalarda hareket ettirilmesiyle okumalar yapılır. Elde edilen veriler ışığında numunenin homojenliği, içeriğindeki olası çatlak ya da boşluklar hakkında yorum yapılabilir (Anonim, 2017).



Şekil 2. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği (Dolaylı sensör konfigürasyonu) (Dunning, 2006).

3. Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde çalışmada kullanılan malzeme özellikleri ve laboratuvar çalışmaları ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan karışım Düzce Belediyesine ait bitümlü sıcak karışım plantinden temin edilmiş olup; karışımda kullanılan agregra gradasyonu ve bitüm oranı Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Karışım gradasyonu ve bitüm içeriği

	MALZEME	KARIŞIMDAKİ ORAN (%)
Agregra Boyutu	19-12 (mm)	30
	12-5 (mm)	27
	5-0 (mm)	42
	Filler (%)	1
	Bitüm (%)	4,3

Bu çalışma için plantlerden temin edilen bitümlü sıcak karışım malzemesi (30x30x6 cm) boyutlarında hazırlanan kalıplarda elle silindirme işlemine tabi tutularak yoğunluk kontrollü olarak üretilmiştir. Hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Numunelere ait fiziksel özellikleri gösterir bilgiler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Numunelere ait fiziksel özellikler

DENEYİN ADI	ORTALAMA
Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	2,177
Özgül Ağırlık	2,323
Porozite (%)	8,533
Komposite (%)	93,707
Su Emme Oranı (%)	2,905

Hazırlanan numuneler her grupta 3 adet numune olacak şekilde beş gruba ayrılmıştır. Numunelerin bir grubu şahit olarak belirlenmiş, diğerleri ise 5, 10, 15 ve 20 cm’lik çentik oluşturulacak şekilde ayrılmıştır. Gruplandırılan numuneler üzerinde elmas testere yardımıyla farklı derinliklerde (5, 10, 15, 20 cm) çentikler açılmıştır (Şekil 3). Hazırlanan her numune çentik açılmadan önce ve sonra ultrases deneyine tabi tutulmuş; sonuçlar değerlendirilirken ortalama değerler esas alınmıştır.



Şekil 3. Numunelerin hazırlanması

Açılan çentiklerin her iki yanında 5 cm olacak şekilde (x uzaklığı 10 cm olacak şekilde) işaretlenen noktalar üzerinde ultrases cihazı ile ölçümler yapılmış, ultrases geçiş süreleri tespit edilmiştir. Çalışmada özellikle tek bir “x” mesafesi arazi uygulamalarında kolaylık sağlayacağı için tercih edilmiştir. Bu ölçümlerden alınan veriler ile geçiş hızları formül (1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$V = \frac{x}{t} \quad (1)$$

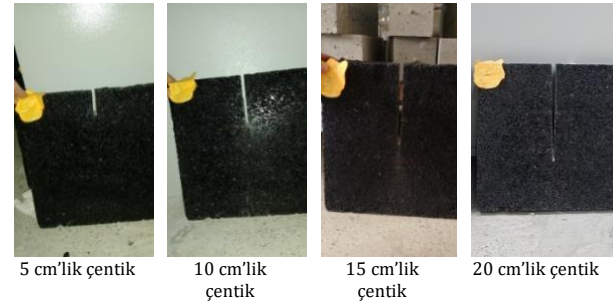
Burada;

X: İki prob merkezinin arasındaki uzaklığı,

t: Geçiş sürelerini (µsn cinsinden),

V: Geçiş hızlarını (m/sn cinsinden), ifade eder (Bungey, vd., 2006).

Farklı derinliklerde çentik açılan numunelere ait görseller Şekil 4’de sunulmuştur.



Şekil 4. Numunelerde farklı çentik derinlikleri

Hazırlanan her numune hem kesim işlemi öncesi hem de kontrollü çatlak oluşumu için yapılan kesim sonrası ultrases geçiş hızı deneyine tabi tutulmuş ve her çentik derinliği için aşağıdaki formül yardımı ile çentik derinliği hesabı yapılmıştır (Formül 2).

$$h = x \sqrt{\left(\frac{tc^2}{ts^2} - 1 \right)} \quad (2)$$

Burada;

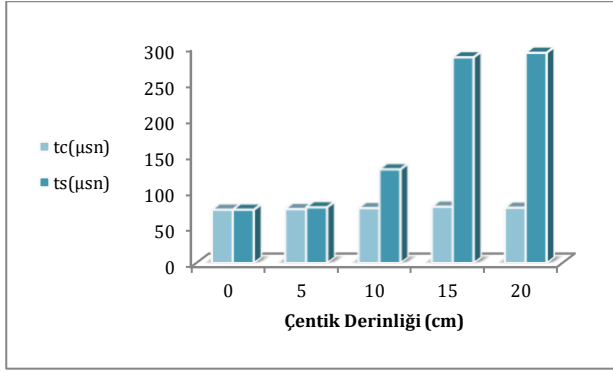
x: İki prob arası mesafenin yarısı

tc: Çatlak ortamda dalga iletim süresi

ts: Çatlaksız kısımda dalga iletim süresidir (Bungey, vd., 2006).

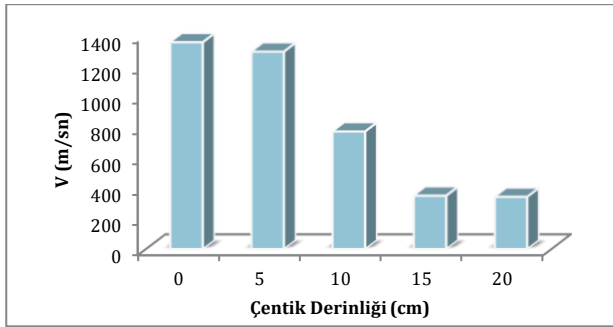
4. Araştırma Bulguları

Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan UGH deneyleri sonunda elde edilen veriler analiz edilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır. Farklı çentik derinliğine göre dalga iletim süreleri (tc) Şekil 5’de sunulmuştur. Şekil 5 incelendiğinde çentiğin derinliğine bağlı olarak dalga iletim süresinde de artış olmuştur. Dalga iletim süresinin 20 cm çentik derinliğine ulaşıldığında en yüksek değeri aldığı görülmektedir.



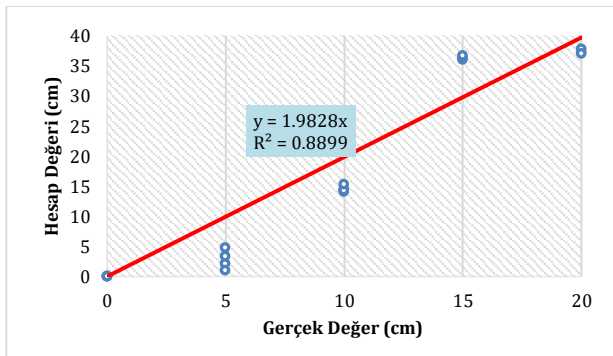
Şekil 5. Çentik derinliğine bağlı dalga iletim süresi değişimi

Şekil 6 farklı çentik derinliğine karşılık geçiş hızlarını (V) yansıtmaktadır. Çentik derinliğinin artışı ile birlikte hızın düştüğü ve numuneler içindeki en düşük geçiş hızına 20 cm çentik derinliğinde, en yüksek geçiş hızının ise çentik bulunmayan numunede olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Farklı çentik derinliklerinde geçiş hızı değişimi

Deneysel çalışmalar sonucunda hazırlanan asfalt numunelerinden elde edilen UGH süreleri kullanılarak çatlak simüle etmek için numunelerde kontrollü olarak açılan çentik derinlikleri formül (2) ile hesaplanmıştır. Hesaplanan ve gerçek çentik derinlikleri arasındaki ilişkiyi yansıtan grafik Şekil 7'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde gerçek değerler ile hesap değerleri arasında %88,99 R² değeri ile lineer bir ilişki olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7. Çentik derinliği hesabı ve gerçek değerler arasındaki ilişki

Ancak hesap değerleri incelendiğinde gerçek değerlerden oldukça uzaklaştığı tespit edilmiştir. Hazırlanan deney numunelerinin farklı fiziksel özelliklere (birim hacim ağırlık, porozite vb.) sahip olduğu için tespit edilen UGH sürelerinin bundan etkilendiği düşüncesi ile fiziksel özellikler ve hesaplanan çatlak derinlikleri kullanılarak istatistiksel modeller kurulmuştur. SPSS istatistik programı kullanılarak çoklu lineer regresyon analizi yapılmış ve çatlak derinlikleri için iki farklı tahmin modeli oluşturulmuştur. Çatlak derinliğinin tahmin edildiği birinci modelde çentik açılmamış (h=0 olan) numuneler de analize dahil edilmiş, ikinci modelde ise çentik açılmamış şahit numuneler analize dahil edilmemiştir. Çatlak derinliğinin (çentik derinliği; ÇD) tahmin edildiği modelde birim hacim ağırlık (BHA), porozite (P) ve hesaplanan derinlik değeri (h) kullanılmıştır. Geliştirilen her iki modele ait formül 3'de sunulmuştur.

$$\text{ÇD} = a + BHA * b + P * c + h * d \quad (3)$$

Burada; ÇD çatlak derinliği (cm), a sabit, b , c , d regresyon katsayısı BHA birim hacim ağırlık (g/cm³), P porozite (%), h hesaplanan çentik derinliğini (cm) ifade eder.

SPSS istatistik programı kullanılarak kurulan modellere ait regresyon değerleri incelendiğinde her iki modelin de yüksek bir korelasyonla tahmin yaptığı; birinci modelin R² değerinin 0,906 ikinci modelin ise 0,91 R² değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. Modellere ait istatistiksel sonuçlar

Regresyon İstatistikleri

Model	R	R Kare	Ayarlanmış R kare	Tahminin Standart Hatası
1	,952 ^a	0,906	0,882	1,98076
2	,954 ^a	0,91	0,893	2,36909

Varyans Analizi

Model	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık
1	Regresyon	452,919	150,973	38,48
	Artan	47,081	3,923	
	Toplam	500		
2	Regresyon	910,198	303,399	54,057
	Artan	89,802	5,613	
	Toplam	1000		

Katsayılar^a

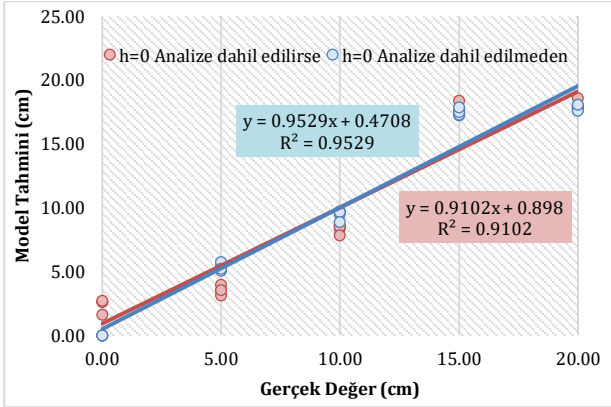
Model	Katsayılar
1*	(Sabit)
	BHA
	Porozite
	h
2**	(Sabit)

BHA	-5,255
Porozite	-0,141
h	0,409

* h=0 analize dâhil, ** h=0 analize dâhil değil

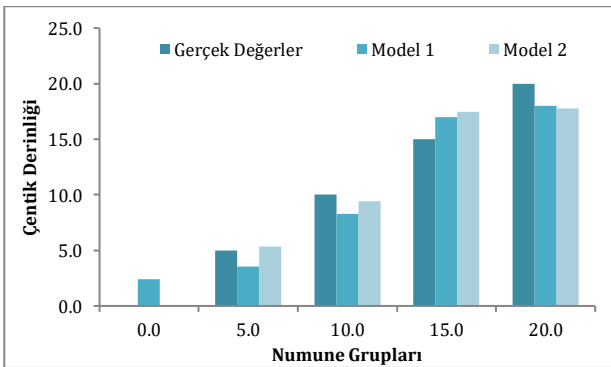
Kurulan istatistiksel modeller ile tahmin edilen çatlak derinliği değerleri ve gerçek çentik derinlikleri arasındaki ilişki irdelenmiştir. Şekil 8'de analize çentiksiz numunelerin ilave edildiği ve edilmediği duruma göre tahmin edilen değerlerin gerçek değerler ile korelasyon grafikleri verilmiştir.

Kurulan her iki modelde de elde edilen tahmin değerleri ile gerçek çentik derinliği değerleri arasındaki güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. Grafikte çentiksiz numunelerin modele dahil olduğu (h=0 analize dahil edilirse) durumda gerçek değerlerle tahmin değerleri arasındaki R^2 değerinin 0,91 olduğu, çentiksiz numunelerin modele dahil olmadığı (h=0 analize dahil edilmezse) durumda gerçek değerlerle tahmin değerleri arasındaki R^2 değerinin 0,95 olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Model tahmini ve gerçek değerler arasındaki ilişki

Şekil 9'da istatistiksel analiz sonunda kurulan her iki model ve gerçek çentik derinlikleri sütun grafikler halinde verilmiştir. Grafik incelendiğinde sıfır çentik durumu için Model 2 gerçek değerle aynı sonucu tahmin etmiş (0 cm), ancak Model 1'de sıfırın üzerinde bir değer tahmin edilmiştir. Diğer gruplar da incelenirse Model 2 tüm gruplarda gerçeğe daha yakın sonuçlar tahmin ettiği görülecektir.



Şekil 9. Model ve gerçek değerlere ait sonuçlar

Yapılmış olan bu çalışmada tüm veriler laboratuvar ortamında hazırlanan numuneler üzerinden temin edilmiştir. Ancak arazide gerçekleştirilecek ultrases geçiş hızı ile çatlak analizlerinde benzer modeller geliştirilebilir. Arazide analiz edilecek çatlak gözlemlendiği bölge yakınında aynı arazide çatlaksız noktalardan alınacak sonuçlar ile çatlak bölgeden alınan sonuçlar kıyaslanarak tahmin modelleri geliştirilebilir. Devam eden güzergâh boyunca aynı özelliklere sahip malzemeler ve karışım tasarımı kullanıldığı varsayılırsa sonuçların da gerçeğe çok değerler vereceği düşünülmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada asfalt betonlarda ultrases geçiş hızı test cihazı yardımıyla dolaylı okuma metodu kullanılarak çentiksiz ve çatlaklı simüle etmek için oluşturulan 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm derinlikte çentikli numunelerden elde edilen geçiş süresi ve geçiş hızı değerleri yardımı ile çatlak derinliği tahmini yapılmıştır. Yapılan ilk analizler sonunda çatlak derinliğini doğru tahmin etmede yaşanan problemler nedeni ile malzemenin fiziksel özelliklerinin analize dahil edildiği istatistiksel modeller geliştirilmiş ve bulunan model tahmin değerleri ile gerçek değerler ilişkilendirildiğinde çatlak derinliğinin yüksek korelasyonda tahmin edildiği görülmüştür.

Numunelerin çentik oluşturulmadan önce ultrases geçiş süresi (t) değerlerinin 66,6-78 μ s, geçiş hızı (V) değerlerinin ise 1282-1501 m/sn arasında değiştiği görülmüştür. 5 cm'lik çentik oluşturulmuş numunelere ait geçiş süresi (tc) değerlerinin 73,7-80,1 μ s, geçiş hızı (V) değerlerinin ise 1248-1357 m/sn arasında değiştiği, numunelerin 10 cm'lik çentikli hallerine ait; geçiş süresi (tc) 121,2-135,6 μ s, geçiş hızı (V) değerlerinin ise 737-825 m/sn arasında değiştiği, 15 cm'lik çentikli hallerinde geçiş süresi (tc) değerlerinin 278,5-296,3 μ s, geçiş hızı (V) değerlerinin ise 337-359 m/sn arasında olduğu, çentik derinliği 20 cm olan numunelerde ise geçiş süresi (tc) değerlerinin 284,8-298,4 μ s ve geçiş hızı (V) değerlerinin 335-351 m/sn arasında değiştiği görülmüştür.

Yapılan ölçümlere göre çatlak derinliği arttıkça problemler arasında hesaplanan geçiş süreleri de artmakta ve geçiş hızı değerleri ise ters orantılı bir şekilde azalmaktadır. Çatlak derinliğinin yüksek olduğu numunelerde geçiş hızı değerlerinde ani düşüşler gözlenmiştir.

Çalışmada çatlak derinliğinin belirlenmesi iki aşamada gerçekleştirilmiş olup ilk aşamada elde edilen ultrases geçiş hızı ve geçiş süreleri esas alınarak formül yardımı ile h çatlak derinliği hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler ile gerçek değerler arasında 0,88 bir korelasyon olmasına rağmen önemli bazı sapmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle çalışmada numunelere ait fiziksel özelliklerin de

kullanıldığı istatistiksel modeller kurulmuştur. Kurulan iki farklı modelin birinde çentiksiz numuneler analize dahil edilmemiş ($h=0$ analize dahil değil), diğer modelde ise çentiksiz numuneler de analize dahil edilerek ($h=0$ analize dahil) model performansı analiz edilmiştir. Çentiksiz numunelerin analize dahil olmadığı modelde korelasyon değerinin diğerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir ($0,95 R^2$). Sonuçlar göstermiştir ki asfalt betonlarında çatlak derinliğinin ultrasonik yöntemlerle tahmininde ultrases geçiş hızı ve geçiş sürelerinin yanı sıra numunelere ait fiziksel özelliklerin de analize dahil edildiği modellerin çatlak derinliğini tahmin etmede daha başarılı sonuç verdiği gözlenmiştir.

Bu çalışma laboratuvar ortamında kontrollü olarak gerçekleştirilen farklı çentik derinliklerinin tahribatsız bir yöntem olan ultrases geçiş hızı deneyi ile başarılı bir şekilde tahmin edilebildiğini göstermiş olup; arazi koşullarında pratik bir şekilde çatlak derinliği tahmin etmede yol bakım onarım ekiplerine önemli veriler sunacağı düşünülmektedir.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

Abi, E., 2007. Yapı seramiklerinde ultrases geçim hızı ile malzeme parametreleri ilişkisinin incelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

Abo-Qudais, S., Suleiman, A., 2005. Monitoring Fatigue Damage and Crack Healing by Ultrasound Wave Velocity, Nondestructive Testing and Evaluation, 20(2), 125-145.

Al-Qadi, I.L., and Riad, S.M., 1996. Characterization of Portland Cement Concrete: Electromagnetic and Ultrasonic Measurement Techniques. Report Submitted to The National Science Foundation.

Anonim(2017):
<http://insaatteknigi.blogspot.com.tr/2014/06/ultrasonik-test-cihaz.html>

Bungey, J.H., Millard, S.G., Grantham, M.G., 2006. Testing of Concrete in Structures, Fourth edition published by Taylor & Francis, Abingdon, Oxon.

Dunning, M.R., 2006. Feasibility for the Use of Non-contact Ultrasound for Application in Asphalt Concrete Materials. PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Las Vegas, 32812 p. U.S.A.

Garbacz, A., Garboczi, E.J., 2003. Ultrasonic Evaluation Methods Applicable to Polymer Concrete Composites. NISTIR 6975; 73 p. National Institute

of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.

Jiang, Z.Y., Ponniah, J., Cascante, G., Charlottetown, P.E.I., 2006. Improved Ultrasonic Pulse Velocity Technique for Bituminous Material Characterization, Annual Conference & Exhibition of the Transportation Association of Canada, Charlottetown, Prince Edward Island, Canada.

Khazanovich, L., Velasquez, R., Nesvijski, E.G., 2005. Evaluation of Top-Down Cracks In Asphalt Pavements by Using A Self-Calibrating Ultrasonic Technique, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1940, 63-68.

Özen, F. S., 2011. Karayolları Esnek Üstyapılarında Tabaka Ara Yüzeylerindeki Süreksizliklerin Sismik Yöntemle Belirlenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta.

Pellinen, T.K., Witczak, M.W., 2002. Use of Stiffness of Hot-Mix Asphalt as A Simple Performance Test. Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, 1789, 80-90.

Russel W. Lenz, P.E., 2011. Pavement Design Guide. Texas Department of Transportation.

Serin, S., 2014. Tahribatsız Test Yöntemleri ile Esnek Üstyapıların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Modellenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.

Shahin, M.Y., 2002. Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, U.S.A.

Underwood, S., Kim, Y.R., 2003. Determination of Depth of Surface Cracks in Asphalt Pavements, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Volume 1853