

Ultrasonik kayma dalgaları tomografisi ile beton kusurlarının incelenmesinde frekansın etkisi

Effect of frequency on the evaluation of the concrete defects by ultrasonic shear wave tomography

Mustafa Altuğ PEKER^{1*}, Bekir PEKMEZCİ²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Alanya, Türkiye.
altugpeker7@gmail.com

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
pekmezci1@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 23.11.2021
Kabul Tarihi/Accepted: 25.04.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 11.03.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.26225
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Ultrasonik Kayma Dalgaları Tomografisi (UKDT) yapıdaki nesnelere, ara yüzleri ve anomalileri tespit etmek için ultrasonik kayma dalgaları kullanan modern bir tahribatsız yöntemi olarak önerilmektedir. Bu yöntem sayesinde yapının tamamının hızlı ve ekonomik bir şekilde hiçbir elemana zarar vermeden incelenebilmesine olanak tanınmaktadır. Bu şekilde yapı elemanlarında kayma dalgalarının ultrasonik geçiş özellikleri üç boyutlu olarak görselleştirilebilmektedir. Bu çalışmada betonun UKDT ile incelenmesinde frekansın etkisi üzerine yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen bulgular sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazda 24 adet transdüser bulunur ve cihazın çalışma frekans aralığı 25-250 kHz'dir. Deneyler için laboratuvarında 50x50x22 cm boyutlarında üç adet beton numune üretilmiştir. Donatı ve kusurları temsil etmesi amacıyla beton numunelerin içerisine farklı malzemeler yerleştirilmiştir. Her bir numune üzerinde dört farklı frekans değerinde (25-50-100-200 kHz) deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda her bir frekans değerinde elde edilen tomografik kesitler ile numuneler içerisine yerleştirilen, tip, ebat ve yerleşimleri bilinen donatı ve kusurlar eşleştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, uygulanan beton malzemelerde UKDT yöntemi ile yapılacak olan deneylerde, aranan kusurun özelliklerine göre, uygulanan frekans değerinin sonucun doğruluğuna etkisinin değiştiği sonucuna varılmıştır. 25 kHz ve 50 kHz frekanslarında yapılan deneylerde numunelerin içerisine yerleştirilen malzeme boyutlarının belirlenmesi gerçeğe yakın doğrulukla yapılabilmekteyken 100 kHz ve 200 kHz değerleri ise sadece numune boyutlarının yani beton elemanın sınırlarının belirlenmesi için yeterli olabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Ultrasonik kayma dalgası, Ultrasonik tomografi, Betondaki kusurlar, Tahribatsız deney.

Abstract

Ultrasonic Shear Wave Tomography (USWT) is recommended as a modern non-destructive method that uses ultrasonic shear waves to detect objects, interfaces, and anomalies in the structure. The entire structure can be analyzed quickly and economically without destruction of any structural element. Thus, ultrasonic transition properties can be visualized in three dimensions by means of this method. In this work, results of experimental studies conducted on the effect of frequency on the analysis of the concrete by USWT are explained. The test device used in experimental studies has 24 transducers and its operating frequency range is 25-250 kHz. 50x50x22 cm sized three concrete specimens were produced in the laboratory for the experiments. Different materials were embedded in the concrete specimens to represent reinforcement and defects. Experiments were carried out at four different frequency values (25-50-100-200 kHz) on each specimen. The tomographic cross-sections obtained at each frequency value were studied. The reinforcement and defects obtained in tomography sections were tried to match the known properties of placed objects in the concrete specimens. According to the results obtained in this study the accuracy of the results obtained depending on the frequency value varies according to the characteristics of the defect. The materials placed in the specimens tested at 25 kHz and 50 kHz values were determined with high accuracy whereas the values of 100 kHz and 200 kHz were only satisfactory to determine the specimen sizes, in other words, the boundaries of the concrete element.

Keywords: Ultrasonic shear waves, Ultrasonic tomography, Concrete defects, Nondestructive testing.

1 Giriş

Yapılar, hizmet ömürleri süresince üretim yanlışları, aşırı yüklemeler, uygun olmayan yüklemeler ve deprem gibi ani yükler ve çevresel etkilerin sonuçlarından doğan birtakım hasarlar görmektedir. Boşluklar, çatlaklar ve delaminasyonlar bu etkiler sonucu meydana gelen hasarlardan bazılarıdır. Bu tür hasarların belirlenmesi ve değerlendirilmesi için çok sayıda tahribatlı ve tahribatsız deney yöntemleri geliştirilmiştir ve bu yöntemler uygulanmaktadır [1]. Sertleşmiş betona uygulanan tahribatlı deney yöntemlerinin taşıyıcı sisteme zarar verme olasılığı ve pratik olmaması gibi dezavantajları bulunmaktadır [2]. Tahribatsız test yöntemleri; kabul edilebilir düzeyde

doğruluk sağlaması, tehlikesiz yapılması, düşük maliyetleri ve test araç gereçlerinin deney yapılacak alana kolay taşınabilmesi gibi önemli üstünlüklere sahiptir [3]. Tahribatsız yöntemlerden akustik test yöntemlerinin mühendislik yapılarının incelenmesinde kullanılması her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Bu yöntemlerin içerisindeki ultrasonik metotların da bu yapılar üzerinde yapılan incelemelerde kullanılması gelecek adına umut verici bir çözüm olarak gösterilmektedir [4].

Ultrasonik metotlarda genellikle boyuna ve enine dalgalar kullanılmaktadır. Beton elemanlarda, enine dalga kullanılan sistemlerde tek proptan ve boyunda dalga kullanan sistemlerde iki proptan yapılan ölçümlerde dalga doğrultusundaki malzeme

*Yazışılan yazar/Corresponding author

özellikleri dalgaların geçiş sağladığı bölge ile sınırlı olmak şartıyla elde edilmektedir [5]. Bununla birlikte beton elemanlarda boyuna dalgalarla farklı noktalardan yapılan ölçümlerin sonuçları, bir matris üzerine yerleştirilerek beton kütle içindeki farklı noktalardaki ultrases geçiş hızı özellikleri bir matris olarak elde edilebilmektedir. Daha sonra elde edilen değer aralıkları renklendirilerek istenen kesitlerdeki tomografi görüntüleri elde edilebilmektedir. Ancak, bu yöntemde çok sayıda okuma yapılması gerektiğinden elde edilen görüntüler oldukça düşük çözünürlükte elde edilebilmektedir [6]. Kayma dalgaları kullanarak benzer bir matris oluşturmak mümkündür. Bu işlemi yapmak için geliştirilmiş olan çok proplu Ultrasonik Kayma Dalgası Tomografisi (UKDT) yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. Ticari olarak geliştirilmiş çok proplu (transdüserli) tarayıcı ve elde edilen veriyi görselleştiren yazılım aracılığı ile betonda UKDT ölçümleri yaparak istenen noktalardan kesitler almak ve betonun yapısını tahribatsız olarak tahmin etmek mümkün hale gelmektedir [7].

UKDT, beton elemanlardaki yabancı cisimleri, ara yüzleri ve kusurları belirlemek için ultrasonik kayma dalgalarından yararlanan yeni bir akustik tahribatsız yöntem olarak tanımlanabilir. UKDT yönteminde deney cihazının bir yüzeyinde bulunan hem alıcı hem de verici olarak çalışan transdüserler tarafından üretilen ve malzeme içerisinde bulunan çeşitli süreksizlikler vasıtasıyla geri yansıtılan elastik kayma dalgalarının geçiş süreleri ölçülür. Dalga hızının da bilinmesiyle, yansıtıcı süreksizliğin yeri hesaplarla belirlenebilir. Yansıtılan her bir kayma dalgası için uçuş süresi, yansıtıcı süreksizliklerin yerlerinin modelini yaratmak için işlenir [8]. Deney cihazının elde ettiği verilerden bir yazılım yardımıyla 2 ve 3 boyutlu görüntüler oluşturulur ve bu görüntüler üzerinden beton elemanın incelemesi yapılır. İncelenen yansıtıcı süreksizlikler, beton elemanın bitişi yani eleman kalınlığı, donatıların pozisyonu ve daha da önemlisi boşlukların, çatlakların ve delaminasyonların konumları olabilir [9].

UKDT deneylerinde incelenen elemanın kesit görüntülerini yüksek doğruluk oranıyla tespit edebilmek için ölçüm noktaları arası mesafenin kısa olması gereklidir. Deney yapılacak yüzeye çizilen karelerin her bir noktasında ölçüm yapılması gerektiği için büyük yüzey alanlı elemanların incelenmesi zaman alıcıdır. Transdüserlerin yüzeyi pürüzlü elemanlara oturması kolay olmayacağından veri kalitesi bu tip yüzeylerde azalabilir. Yüzeydeki ses dalgaları, kayma dalgası sinyallerini engelleyebileceğinden eleman yüzeyine yakın konumda bulunan kusurlar belirlenemeyebilir [8].

Beton ve betonarme elemanların UKDT yöntemi ile incelenmesiyle ilgili bugüne kadar birçok araştırma ve deneysel çalışma yapılmıştır. Dawood ve diğ. [10] yaptıkları çalışmada UKDT yöntemiyle yapı elemanındaki kusur yerlerinin ve hasarlı bölgelerin tespit edildiğini ortaya koymuştur. Araştırmacılar, cihazdan gönderilen sinyallerin penetrasyon derinliğinin, frekansa oranında oldukça etkilendiğini belirtmiştir. Yapılan çalışmada, frekans arttıkça elemanla ilgili daha az verinin elde edildiği ve 50 kHz frekansının kalın beton elemanların iç detaylarının görselleştirilmesi için en iyi tarama sonuçlarını verdiği ortaya koyulmuştur. Bu yöntemin köprü kirişlerinde tamir planlaması yapılmasında çok etkili ve ekonomik olduğunu vurgulamıştır. Schabowicz [11] laboratuvar ortamında test etmek üzere ürettiği numunelerin birinde kusur olarak merdiven benzeri köpük kullanmış, diğerinde ise numune kalınlığını bölgesel olarak değiştirmiştir. Yaptığı çalışmanın sonucunda bu yöntemle kusurların boyutlarının ve

yerlerinin belirlendiğini ve eleman kalınlığının tespit edildiğini göstermiştir. Sahada yaptığı deneylerde ise bir temel döşemesinin kalınlığını belirlemek için UKDT yöntemini kullanmış ve güvenilir sonuçlar elde ettiğini belirtmiştir. Schabowicz ve Suvorov [4] iki farklı tomografi cihazı kullanarak üç numune üzerinde yaptıkları deneylerde her iki cihazın da numune kalınlığını belirlemede çok başarılı olduğunu vurgulamıştır. Yeni model cihazın numunelerin içerisine yerleştirilen köpük ve top kusurlarını eski model cihaza göre daha yüksek hassasiyetle ölçüm yaptığı için daha doğru tespit ettiğini belirtmiştir. Choi ve diğ. [12] laboratuvar ortamında üretilen bir betonarme kolonun; UKDT yöntemiyle içini görselleştirmiş, bilgisayarlı 3 boyutlu modellemeyle dışını modellemiş ve bunları bilgisayar ortamında birleştirerek kolonun hem yüzey koşullarının hem de iç durumunun aynı anda görülebildiğini gösteren deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada UKDT yönteminin yüksek oranda donatı içeren kolonlardaki kusurları tespit edebildiğini belirtmiştir. Smokotin ve diğ. [13] UKDT yönteminin farklı yüzeylerden erişimi mümkün olmayan betonarme yapılarla bulunan kusurların yeri ve boyutunu belirlemede uygun bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Ayrıca yöntemin olumsuz yönlerini; verilerin yorumlanmasının karmaşık olması ve betonarme yapıların kalite değerlendirilmesinde insan faktörüne oldukça bağlı olması olarak ortaya koymuştur. Choi ve diğ. [9] beton yol ve köprüler üzerinde yaptıkları çalışmada, yöntemin beton içerisindeki çatlak, delaminasyon, topaklanma ve donatı çubuğu gibi süreksizlikleri bulabildiğini belirtmiştir. Bu sayede döşeme kalınlığı, delaminasyon derinliği, topaklanma boyutları, donatı yerleri ve pas payı gibi bilgilerin doğru şekilde tahmin edilebileceğini ortaya koyarak bu yapıların tamir edilmesini kolaylaştırdığını vurgulamıştır. Nguyen ve diğ. [14] yine köprüler üzerinde deneyler yapmış ve köprü tabliyesinde bulunan 80 mm derinlikteki delaminasyonun bu yöntemle tespit edildiğini belirtmiştir. Lin ve diğ. [15] asfalt kaplamalı köprü tabliyeleri gibi çok tabakalı yapılarda uygulanan UKDT deneylerinde tabakalar arası hız değişiminden kaynaklanan hataları azaltmak için yeni bir teknik üretmiştir. Araştırmacılar, iki farklı görüntüleme tekniğini birlikte kullanarak bir yazılım geliştirmiş ve piyasada kullanılan yazılımlara göre hata oranlarını daha da düşürerek önemli bir gelişme kaydetmiştir. Freesean ve diğ. [16] betonarme kolonlarda deprem yüklemesi sonrası hasarların tespit edilmesiyle ilgili çalışmalar yapmıştır. Elde ettikleri sonuçlarda beton içerisindeki hasarların belirlenmesinin yanı sıra kolonun ilk nereden göçeceği tespit edilmesinin de bu yöntemle mümkün olduğunu belirtmiştir. Lipa ve diğ. [17] UKDT yöntemiyle boşluk tespitinde donatıların etkisi üzerine yaptıkları çalışmada bu yöntemin betonarme elemanlarda kusur tespiti için kullanışlı olduğunu fakat 50 mm çapının altındaki boşlukların doğruluk oranlarının düşük olduğunu göz önüne alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Numunelerin içerisine yerleştirilen 50 mm çaplı küresel köpüklerin donatı yönü ve deney yönü aynı değilse ve etriye aralıklarının 100 mm olduğu durumda %81.3 doğruluk oranıyla belirlendiğini tespit etmişlerdir. Villalobos ve diğ. [18] tarafından ön gerilmeli betonarme borular üzerinde yapılan çalışmalarla borularda bulunan kusur boyutlarının UKDT yöntemiyle tespit edilebildiği belirlenmiştir. Bu yöntemin geleneksel ultrases ve gözle muayene yöntemleriyle bulunamayacak kusur boyutlarının belirlenmesinde ve borunun mevcut durumunun incelenmesinde ek veriler sağladığı belirtilmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde UKDT'nin kalite kontrol ve hasar tespiti amacıyla çeşitli beton ve betonarme elemanlarda kullanıldığı anlaşılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar; UKDT yönteminin beton elemanların boyutlarının, donatı yerlerinin ve boşluk, çatlak, delaminasyon gibi kusurların tespit edilmesinde oldukça kullanışlı olduğunu göstermiştir. UKDT yönteminin, köprü döşemeleri, yol betonları, kolonlar, perdeler gibi betonarme yapı elemanlarında üretim sırasındaki hatalardan meydana gelmiş kusurların belirlenmesinde 2.500 mm derinliğe kadar verimli olarak uygulanabilecek bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır [19].

Dünyada UKDT yöntemi kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların giderek artmasıyla birlikte Türkiye'de de bu yöntemle ilgili araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Tavlı [20] ve Peker [21] betonun incelenmesi konusunda yaptıkları deneysel çalışmalar neticesinde gelecek vadede sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Frekans değişiminin beton elemanların UKDT sonuçları üzerindeki etkileri konusunda birkaç bilimsel çalışmaya rastlanmıştır [10],[22]-[24]. Dawood ve diğ. [10] ve Scott [22] tarafından yapılan çalışmada da literatürdeki diğer çalışmalara benzer şekilde 50 kHz değeri üzerinde durulmuştur. Li [23] UKDT ile başka bir akustik deney yöntemini kıyaslamıştır. UKDT yöntemiyle dört farklı frekans değerinde donatı, yapay kusur ve numune sınırlarını incelemiştir. Burada araştırmacı 1200x1200x150 mm'lik tek bir numune üretmiş ve ölçüm aralıklarını 150x100 mm olarak belirtmiştir. Çalışmadaki ölçüm aralıklarının çok büyük olduğu görülmüştür. Dolayısıyla hassas bir ölçüm yapılmadığı düşünülmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar sayısal olarak karşılaştırılmamıştır. Kwon ve diğ. [24] yaptıkları çalışmada ise ultrasonik sinyalleri üç farklı görüntüleme tekniği ve üç farklı frekansta değerlendirerek yeni bir görüntüleme tekniği önermişlerdir. Çalışmada tek bir demir bulduran numune üzerinde ölçümler yapılmış ve görüntüleme teknikleri kıyaslanmıştır. Yapay kusurlar ve numune sınırları incelenmemiştir. Önerilen yeni tekniğin bu çalışmadaki cihaz tarafından da kullanılmakta olan teknikten farklı sonuçlar vermediği görülmektedir.

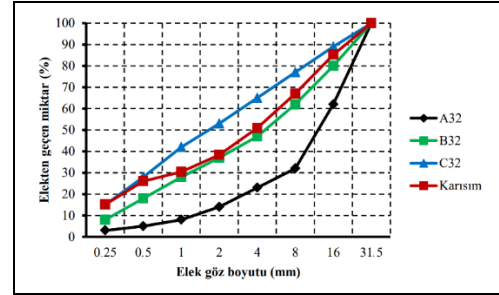
Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde UKDT yönteminde genellikle 50 kHz frekans değerinin kullanıldığı ve farklı frekans değerleriyle incelemeler yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada farklı frekanslardaki uygulamaların kusurların elde edilmesinde nasıl etki göstereceği deneysel olarak araştırılmıştır. Bu etkiyi elde etmek için farklı kusurlar içeren beton ve betonarme elemanlar üretilmiş ve bu numuneler üzerinde küçük ölçüm aralıkları belirlenerek farklı frekanslarla hassas UKDT ölçümleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilecek sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılıp çeşitli kusurlar içeren betonun UKDT yöntemiyle doğru bir biçimde analiz edilmesi için en uygun frekans değerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçların gelecek çalışmalarda kullanılacak frekans değerlerinin belirlenmesinde araştırmacılara yardımcı olacağı düşünülmüştür.

2 Deneysel metot

2.1 Malzemeler

Beton üretiminde doğal kum, kırma kum, kırmataş 1 ve kırmataş 2 olmak üzere dört çeşit agrega ve çimento olarak CEM 1 PÇ 42.5 kullanılmıştır. Kullanılan agregalardaki en büyük boyut 22 mm'dir. Kullanılan agregaların karışım granülometrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Çimento dozajı 387 kg/m³ olarak seçilmiştir. Karışımın su/çimento oranı 0.51'dir.

Üretilen numunelerin hedef basınç dayanım sınıfı C25'tir. Karışımın işlenebilirliğinin sağlanabilmesi için karışımda kullanılan çimentonun ağırlıkça %1'i oranında naftalin sülfonat içerikli bir süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.



Şekil 1. Karışım granülometrisi.

Figure 1. Aggregate gradation.

2.2 Numunelerin tasarımı ve üretimi

Yapılacak çalışmalarda kullanılmak amacıyla üç adet 50x50x22 cm boyutlarında numune tasarlanmıştır. Numune-1, Numune-2 ve Numune-3 olarak adlandırılan numunelerin içerisine kusur ve donatı olarak farklı malzemeler yerleştirilmesi planlanmıştır.

Tasarımları ilerleyen paragraflarda ayrıntılı olarak anlatılan numunelerin üretim aşamasında, beton mikserinde hazırlanan karışım kalıplara dökülürken kusur ve donatılar da numunelerin içerisine yerleştirilmiştir. Bir numunede kusur olarak kullanılan plastik toplar ve bir diğer numunede donatı olarak kullanılan beton çelikleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Numuneler, hazırlanmasını takiben bir gün kalıplarda bekletildikten sonra nihai mukavemetlerine ulaşmaları adına yirmi sekiz gün süreyle sulanarak kür edilmiştir.



(a)

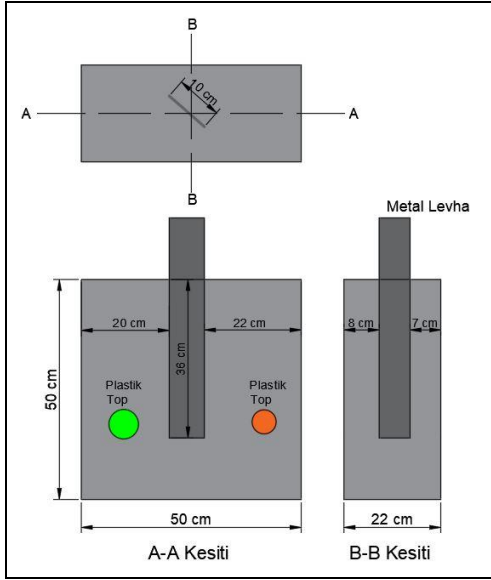


(b)

Şekil 2(a): Plastik topların Numune-1'e yerleştirilmesi. (b): Dikey donatılar yerleştirildikten sonra Numune-2.

Figure 2(a): Placement of plastic balls in the specimen. (b): Specimen-2 after placement of longitudinal bars.

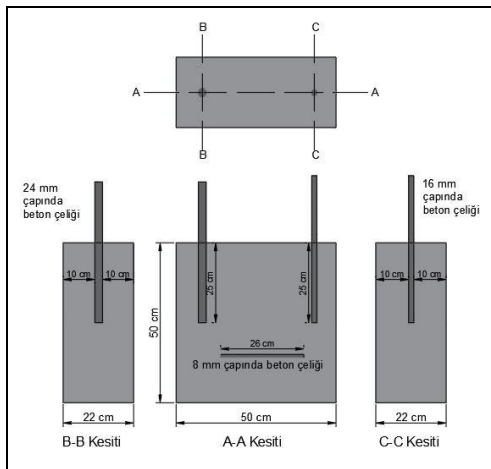
Numune-1'in içerisinde 5.5 cm ve 6.5 cm çaplarında iki adet plastik top yerleştirilmiştir. Bu toplar kalıba sabitlenmemiş, döküm esnasında beton içerisinde bırakılmışlardır. Beton numune içerisinde farklı yerlerde konularak birer süreksizlik noktaları oluşturacak olan plastik topların yerlerinin yapılan UKDT analizleri ile tespit edilmesi amaçlanmıştır. Buna ilave olarak 50x10 cm ölçülerinde ve 1 cm kalınlığındaki bir metal levha, beton içerisine 36 cm derinlikte çapraz bir şekilde yerleştirilmiştir. Numune 1'in plan ve kesit çizimleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Numune-1 plan ve kesitleri.

Figure 3. Plan and cross-sections of Specimen-1.

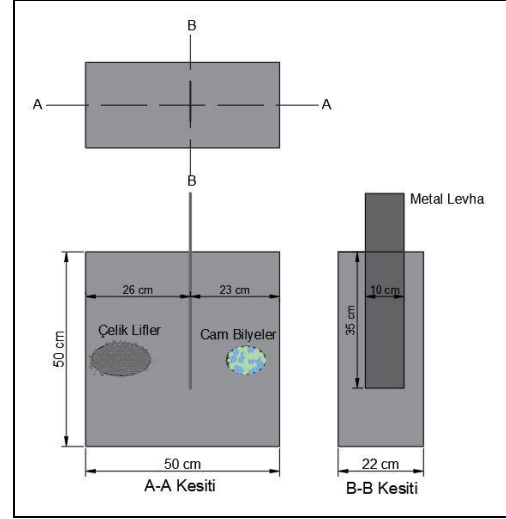
Numune-2'nin içerisine 16 mm ve 24 mm çaplarındaki iki adet donatı 25 cm derinliğinde dikey olarak yerleştirilmiştir Şekil 2(b). 8 mm çaplı ve 26 cm uzunluğundaki bir başka donatı da numune tabanına paralel bir biçimde konumlandırılmıştır. Bu beton çeliği kalıba sabitlenmeden yerleştirilmiş ve beton dökümü sırasında yerinin değişmesi ihtimali göz önüne alınarak yeri çalışma kapsamında gerçekleştirilen UKDT analizleri ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Numune 2'nin plan ve kesit çizimleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Numune-2 plan ve kesitleri.

Figure 4. Plan and cross-sections of Specimen-2.

Numune 3'ün içerisine yaklaşık 10 cm uzunluğundaki bir file içerisinde bulunan cam bilyeler ve yaklaşık 15 cm'lik bir naylon poşet içerisinde çelik lifler yerleştirilmiştir. Beton dökümü bittikten sonra 50x10 cm ölçülerinde ve 1 cm kalınlığındaki metal levha numunenin kısa kenarına paralel olacak biçimde 35 cm derinliğinde yerleştirilmiştir. Numune 3'ün plan ve kesit çizimleri Şekil 5'te gösterilmiştir.

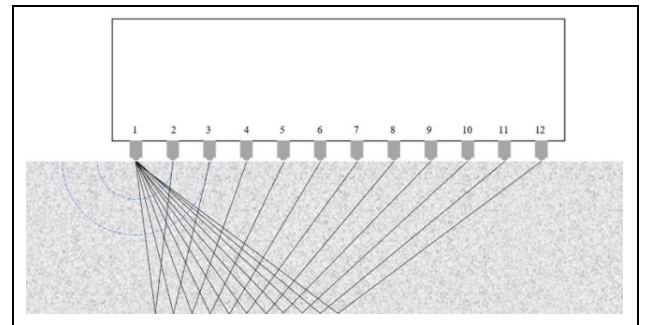


Şekil 5. Numune-3 plan ve kesitleri.

Figure 5. Plan and cross-sections of Specimen-3.

2.3 Ultrasonik kayma dalgası tomografisi (UKDT)

Ultrasonik Kayma Dalgası Tomografisi cihazlarının çalışma prensibinde, transdüserler bir ses dalgası gönderir ve diğer transdüserler yansıtılan dalgaları toplar (Şekil 6). Titreşimin başladığı andan yansıyan dalganın toplanmasına kadar geçen süre cihaz tarafından ölçülür. Dalga hızı bilindiği için yansıtıcı süreksizliğin derinliği hesaplanır. Yansıtıcı süreksizlikler, elemanın bitişi, donatılar, boşluklar, çatlaklar ve delaminasyonlar olabilir. Yansıtılan ses dalgalarının geçiş süreleri, süreksizliklerin konumlarının çeşitli doğrultulardaki modelini oluşturmak için biriktirilir. UKDT cihazlarında transdüserler arası uzaklıklar değişiklik gösterebilir. Transdüserler arası mesafe azaldıkça daha küçük boyuttaki süreksizlikler de tespit edilebilir [10, 11, 21].



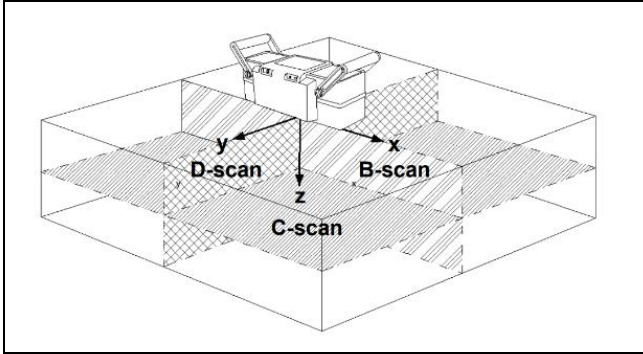
Şekil 6. UKDT yönteminin çalışma prensibi [23].

Figure 6. Working principle of USWT method [23].

Ek olarak, transdüserler betona jel kullanmadan temas edebildiği için neredeyse hiç yüzey hazırlığı yapılmadan bir sonraki pozisyona hareket ettirilebilir. Buna bağlı olarak deney süresi, geleneksel ultrasonik yöntemlere göre daha hızlıdır [7, 9, 21].

2.4 UKDT deneyleri

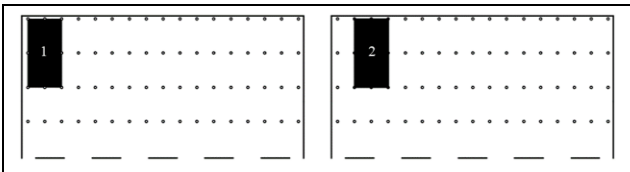
Bu deneysel çalışmada laboratuvar ortamında üretilen numuneler Ultrasonik Kayma Dalgaları Tomografisi yöntemiyle incelenmiştir. İncelemeler sırasında ACS şirketi tarafından üretilen A1220 Monolith cihazı kullanılmıştır. Kullanılan deney cihazında 4 sırada 6'şar tane olmak üzere 24 adet hem alıcı hem verici görevi yapan transdüser vardır. Her bir transdüser arasında iki doğrultuda da 30 mm boşluk bulunmaktadır. Cihaz 25-250 kHz frekans aralığında ve 25 kHz aralıklarla çalışabilmektedir. Ölçüm sonuçları matematiksel bir algoritmayla işlenir ve bilgisayar ortamındaki bir yazılım üzerinden birbirlerine dik düzlemlerde B-taraması, C-taraması ve D-taraması biçiminde görselleştirilir (Şekil 7).



Şekil 7. UKDT yönteminde tarama düzlemleri [25].

Figure 7. Scanning planes of USWT method [25].

Deneylere başlarken her bir numune için cihaz üzerinde 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz ve 200 kHz frekans değerlerinde tarama projeleri oluşturulmuştur. Cihazın çalışabildiği en düşük frekans değeri olan 25 kHz değerinin yanında cihaz üzerinde varsayılan olarak ayarlanmış olan 50 kHz değeri ve bunların aynı oranda yani iki kat artırılmasıyla 100 ve 200 kHz değerleri seçilerek frekans etkisinin eğilimini ortaya çıkarabilmek amacıyla bu çalışmada söz konusu frekanslarda çalışılmıştır. Daha sonra numunelerin yüzeyinde 6 cm'ye 3 cm aralıklarla ölçüm noktaları işaretlenmiş ve numuneler test edilmeye hazır duruma getirilmiştir. Ölçüm noktaları belirlenirken cihazın her bir transdüserinin işaretlenen noktalara tam olarak oturması hedeflenmiştir. İşaretlenen her bir noktada UKDT cihazı kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Numunelerin üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının cihazın transdüserleri arasındaki mesafeye göre seçilmesi sayesinde her bir noktadan birden fazla ölçüm alınmaktadır. Aynı noktalar üzerindeki ölçümler örtüşerek cihaz bir sonraki noktaya ilerletildiği için ölçüm hassasiyeti sağlanmaktadır. Şekil 8'de deney düzeneğinin 1. durumdan 2. duruma hareket şeması gösterilmiştir.



Şekil 8. UKDT deneyi yapılışı.

Figure 8. USWT testing procedure.

Deney düzeneği Şekil 9'da gösterilmiştir. Üretilen üç numune üzerinde belirlenen dört frekans değeri kullanılarak toplam 12 farklı tarama yapılmıştır. Yapılan ölçümler cihaz hafızasına

kaydedilerek bütün numunelerin taranmasıyla deney tamamlanmıştır.

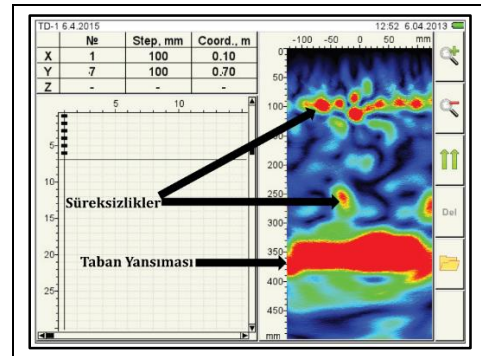
Deneylerin tamamlanmasıyla birlikte cihaz içerisinde her bir numune için oluşturulan tarama projeleri PlaneVisor yazılımı vasıtasıyla incelenmek üzere bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deneyler sonucunda her bir frekans değerinde elde edilen tomografik kesitler ile numuneler içerisine yerleştirilen donatı ve kusurlar eşleştirilmeye çalışılmıştır. Deneyler sırasında oluşabilen kullanıcı hatalarından dolayı yetersiz bulunan görüntüler tekrar ölçülerek en doğru sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Numuneler içerisine yerleştirilen metal levhaların kalınlıkları ve donatı çapları küçük boyutlarda olduğu için doğru bir şekilde belirlenmesi mümkün olmamıştır. Bu kalınlıklar değerlendirilmelerde ihmal edilecektir.



Şekil 9. UKDT deneyi düzeneği.

Figure 9. USWT test device.

Numunelere gönderilip geri yansıyan dalgaların cihaz tarafından toplanmasıyla tespit edilen farklı yoğunluktaki süreksizlikler çeşitli renklerle ifade edilmektedir. Süreksizlikler düşük yansıtıcılıktan yüksek yansıtıcılığa doğru siyahtan koyu kırmızıya kadar renkler ile tarama görüntülerinde temsil edilmektedir (Şekil 10). Bu renkler malzeme veya kusur tipi hakkında net bir bilgi vermediği için beton içerisine yerleştirilen fakat kalıba sabitlenmeyen malzemeler UKDT analizleri ile beton içerisine yerleştirildikleri yerlerden yola çıkılarak tespit edilmiştir. Numune kalınlıkları belirlenirken numunelerin tabanından yansıyan ses dalgaları sonucu oluşan görüntülere taban yansımaları adı verilmiştir.



Şekil 10. A1220 Monolith tarafından yapılan bir B-taraması [26].

Figure 10. A B-Scan by A1220 Monolith [26].

3 Deney sonuçları ve tartışmalar

Numuneler üzerinde yapılan UKDT taramalarının sonuçları bu bölümde gösterilmiştir. Taramalar Planevisor yazılımı yardımıyla her bir numune üzerinde ölçüm yapılan her bir frekans değeri için ayrı ayrı elde edilmiştir. Yazılım sayesinde her bir tarama doğrultusunda 0.5 cm'lik kesitler alınabilmektedir. Numunelerin değerlendirme aşamasında bu 0.5 cm'lik kesitlerin her biri incelenmiştir.

UKDT deneylerinde 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz ve 200 kHz frekanslarında yapılan taramaların sonucunda, elde edilen görüntüdeki ölçek yardımıyla boyutlar ölçülmüştür. Elde edilen boyutlar "l_D"; numune kalınlıkları ve numunelerin içerisine yerleştirilen malzemelerin gerçek boyutları "l_G" ile karşılaştırılarak yüzdesel doğruluk indeksleri belirlenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Doğruluk indeksleri (D.İ.) Denklem 1 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\text{Doğruluk indeksi} = 100 - \frac{|l_D - l_G|}{l_G} \times 100 \quad (1)$$

Hesaplarda levha kalınlıkları ve beton çeliği çapları ihmal edilmiştir. Ayrıca metal levhalarda doğruluk indeksleri belirlenirken deneyler sonucunda tespit edilen uzunluk ve genişliklerin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Örneğin gerçek boyutları 35x10 cm olan metal levhanın deneylerde 33x10 cm tespit edilmesi sonucunda doğruluk indeksi %94 ve %100'ün aritmetik ortalaması alınarak %97 olarak belirlenmiştir.

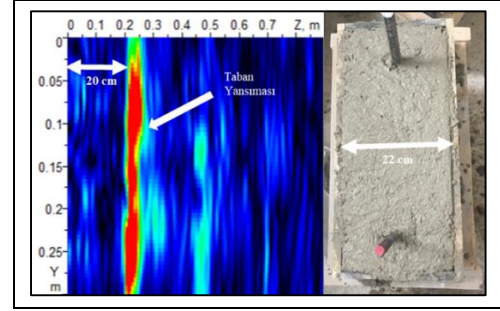
3.1 Numune kalınlıklarının değerlendirilmesi

Aynı boyutlardaki üç numune üzerinde de numune kalınlıklarını belirlemek üzere dört farklı frekans değerinde ölçümler yapılmıştır. Burada kalınlıkların tayini, betonarme elemanlardaki delaminasyon benzeri kusurların tayini ile eşleştirilebilir ve sahada, delaminasyonların tayininde de benzer doğrulukların elde edileceği öngörülebilir. UKDT imajlarından, 25 kHz, 50 kHz ve 100 kHz frekanslarında yapılan deneylerde 22 cm olan numune kalınlıkları 20 cm olarak ölçülmüştür. 200 kHz değerinde ise numune kalınlığı 30 cm olarak tespit edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen kalınlık değerleri ve doğruluk indeksleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ölçülen numune kalınlıkları ve doğruluk indeksi.

Table 1. Measured specimen thickness and accuracy indexes.					
	Kalınlık	25	50	100	200
		kHz	kHz	kHz	kHz
Numune-1	22 cm	20 cm	20 cm	20 cm	30 cm
Numune-2	22 cm	20 cm	20 cm	20 cm	30 cm
Numune-3	22 cm	20 cm	20 cm	20 cm	30 cm
Doğruluk İndeksi (%)		91	91	91	64

200 kHz değerindeki numune kalınlığının daha düşük doğruluk indeksiyle belirlenmesinin sebebinin artan frekans nedeniyle dalga boyunun küçülmesi, bunun sonucunda da dalgaların betonun heterojen yapısı gereği daha fazla süreksizlikle karşılaşarak geri yansımalarından dolayı hassasiyetin düşmesi olduğu düşünülmektedir. Frekans azaldıkça dalga boyu büyüyeceğinden ses dalgaları agrega ve benzeri boyutlardaki süreksizliklerden daha az etkilenmiş ve sadece daha büyük boyuttaki malzemeleri tespit etmiş olabilir. Numune-2'nin kalınlığının 100 kHz frekansında tespit edildiği D-taraması görüntüsü Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Numune-2 kalınlığının 100 kHz ile yapılan ölçümlerde belirlenmesi.

Figure 11. Detection of the thickness of Specimen-2 at 100 kHz.

3.2 Numune-1'in değerlendirilmesi

Numune-1 içerisindeki malzemelerin tespit edilmesi için dört farklı frekansta ölçümler gerçekleştirilmiştir. 25 kHz frekansında gerçekleştirilen ölçümlerde numune içerisine 36 cm derinliğinde yerleştirilen 10 cm genişliğindeki metal levha 33 cm derinliğinde ve 10 cm genişliğinde tespit edilmiştir. Metal levhanın ölçümünde elde edilen doğruluk indeksi %96'dır. Bu değer iki ölçümden hesaplanan doğruluk indeksi değerinin aritmetik ortalamasıdır (%92 ve %100'ün ortalaması). 5.5 cm çapında olan plastik top deneylerde 5 cm çapında %91 doğruluk indeksiyle belirlenmiştir. Gerçek çapı 6.5 cm olan diğer plastik top ölçümlerde 7 cm çapında %92 doğruluk indeksiyle elde edilmiştir. 50 kHz frekansında yapılan ölçümlerde ise metal levha 25 cm derinlikte ve 11 cm genişliğinde tespit edilmiştir. Bu frekansta metal levhadaki doğruluk indeksi %80 olmuştur. Doğruluk indeksi elde edilirken 25 kHz frekansta olduğu gibi iki ölçümün ortalaması alınmıştır (%69 ve %90'ın ortalaması).

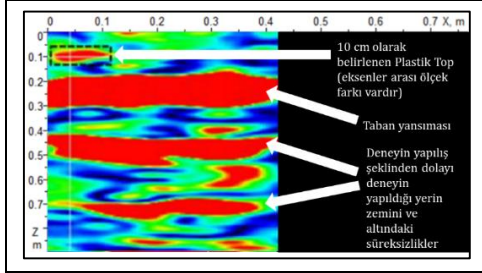
Gerçek çapı 5.5 cm olan plastik top 7 cm çapında ve %73 doğruluk indeksiyle belirlenirken 6.5 cm çaplı diğer plastik top 10 cm boyutunda %46 doğruluk indeksiyle elde edilebilmiştir. İçi boş plastik topların 50 kHz değerinde yeterli doğruluk indeksiyle tespit edilememesi, bu frekans değerinin boşluk gibi kusurların tespitinde yeterli olmadığını göstermiştir. Ayrıca, Lipa ve diğ. [16] 50 kHz frekansını kullanarak yaptıkları çalışmada beton çeliklerine çok yakın konumda bulunan 5 cm çaplı küresel köpüklerin düşük doğrulukla belirlendiğini belirtmiştir. Bu deneyde de metal levhaya çok yakın konumda bulunan plastik topların aynı frekans değerinde düşük doğruluk indeksiyle tespit edildiği görülmüştür.

100 kHz ve 200 kHz frekanslarında Numune-1 içerisindeki hiçbir malzeme tespit edilememiştir. Bu frekans değerlerindeki sonuçların daha düşük doğruluk indeksiyle tespit edilmelerinin sebebi frekansın yükselmesine bağlı olarak dalga boyunun küçülmesi, bunun sonucunda da kayma dalgalarının daha küçük süreksizliklerle karşılaşması sonucu tespit edilmesi beklenen malzemeleri diğer süreksizliklerden ayırt edememesi olabilir. Numune-1 üzerinde yapılan deneyler sonrasında elde edilen malzeme boyutları ve doğruluk indeksleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Numune-1 deney sonuçları ve doğruluk indeksleri.

Table 2. Test results and accuracy indexes of Specimen-1.					
Numune İçeriği	Gerçek Boyut (cm)	25 kHz (cm)	D.İ (%)	50 kHz (cm)	D.İ (%)
Metal Levha	36x10	33x10	96	25x11	80
Plastik Top 1	5.5	5	91	7	73
Plastik Top 2	6.5	7	92	10	46

Numune-1'deki en düşük doğruluk indeksine sahip olan Plastik Top 2'nin 50 kHz frekansında beton yüzeyinden 11 cm derinlikten alınan kesitte belirlendiği B-taraması Şekil 11'de gösterilmiştir. UKDT taramaları gerçekleştirilirken, numune laboratuvar beton çini kaplı zemini üzerine yan olarak yatırılmıştır. Bu şekilde yapılan ölçümlerde, laboratuvar zemin beton çini döşemesi ve bu döşeme altındaki katmanlar da UKDT kesitlerinde görünür hale gelmiştir. Şekil 12'de Z ekseninde 20 cm'nin dışında kalan cisimler numunenin dışında kalan, laboratuvar zemini altındaki katmanları gösteren kısımlardır.



Şekil 12. Numune-1 içerisindeki Plastik topun 50 kHz değerindeki ölçümlerde belirlenmesi.

Figure 12. Detection of the plastic ball in Specimen-1 at 50 kHz.

3.3 Numune-2'nin değerlendirilmesi

Numune-2 içerisindeki beton çeliği boylarının belirlenmesi için dört ayrı frekans değerinde deneyler yapılmıştır. 25 kHz frekansında yapılan ölçümlerde numunenin içerisine dikey olarak yerleştirilen 25 cm uzunluğundaki 24 mm çaplı beton çeliği 23 cm uzunluğunda ve %92 doğruluk indeksiyle tespit edilmiştir. Yine dikey olarak yerleştirilen 16 mm çaplı 25 cm boyundaki çelik ise 20 cm uzunluğunda %80 doğruluk indeksiyle belirlenmiştir. Tabana paralel olarak yerleştirilen 8 mm çaplı ve 26 cm boyundaki beton çeliği ise 30 cm uzunluğunda %85 doğruluk indeksiyle elde edilmiştir.

50 kHz frekansında yapılan ölçümlerde ise 24 mm çaplı beton çeliğinin gerçekte 25 cm olan beton içerisine batırılan boyu 23 cm olarak tespit edilmiştir. Doğruluk indeksi %92'dir. 16 mm çaplı beton çeliğinin ise 25 cm olan boyu 24 cm olarak %96 doğruluk indeksiyle elde edilmiştir. 8 mm çapındaki tabana paralel yerleştirilen çeliğin 26 cm olan boyu %100 doğruluk indeksiyle 26 cm olarak belirlenmiştir.

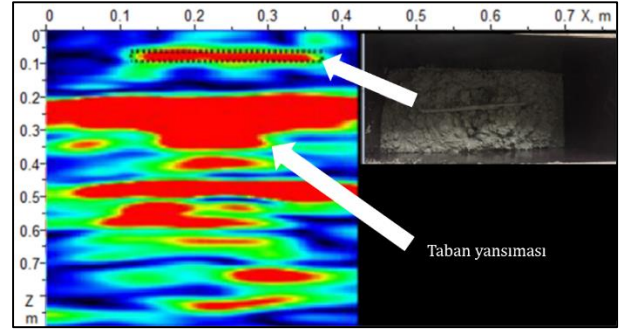
100 kHz ve 200 kHz frekanslarında Numune-2 içerisindeki hiçbir beton çeliği tespit edilememiştir. Bu frekans değerlerindeki sonuçlarda beton çeliklerinin tespit edilememesinin sebebi frekansın yükselmesine bağlı olarak dalga boyunun küçülmesi, bunun sonucunda da kayma dalgalarının daha küçük süreksizliklerle karşılaşması sonucu beton çeliklerini diğer süreksizliklerden ayırt edememesi olabilir. Numune-2 üzerinde yapılan deneyler sonrasında tespit edilen malzeme boyutları ve doğruluk indeksleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Numune-2 deney sonuçları ve doğruluk indeksleri.

Table 3. Test results and accuracy indexes of Specimen-2.					
Numune İçeriği	Gerçek Boyut (cm)	25 kHz (cm)	D.İ (%)	50 kHz (cm)	D.İ (%)
Çelik Φ 24	25	23	92	23	92
Çelik Φ 16	25	20	80	24	96
Çelik Φ 8	26	30	85	26	100

Numune-2'deki 8 mm çaplı beton donatısının 50 kHz frekansındaki ölçümlerle numune yüzeyinden 7.5 cm

derinlikten alınan kesitte tespit edildiği B-taraması Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekildeki kesitte Z ekseninde 20 cm derinliğindeki numune bitişinin dışında kalan süreksizlikler, laboratuvar zemini altındaki katmanları gösteren kısımlardır.



Şekil 13. Numune-2 içerisindeki 8 mm çaplı beton çeliğinin 50 kHz değerindeki ölçümlerde belirlenmesi.

Figure 13. Detection of 8 mm diameter steel bar in Specimen-2 at 50 kHz.

3.4 Numune-3'ün değerlendirilmesi

Numune-3 içerisindeki çelik lifler kümesi, cam bilyeler kümesi ve metal levhanın boyutlarının belirlenmesi için dört ayrı frekans değerinde deneyler yapılmıştır. 25 kHz frekans değerinde yapılan ölçümlerde Numune-3'e yerleştirilen içerisine çelik lifler bulunan 15 cm uzunluğundaki poşet 20 cm boyunda %67 doğruluk indeksiyle belirlenmiştir. Poşetin içerisindeki liflerin taze betonun basıncına bağlı olarak düşey yönde sıkışması sonucu yatay yöndeki 15 cm'lik uzunluğun değiştiği düşünülmektedir. 10 cm boyundaki cam bilye kümesi %90 doğruluk indeksiyle 11 cm boyunda belirlenmiştir.

50 kHz frekansında yapılan ölçümlerde ise çelik lifler kümesi 18 cm uzunluğunda ve %80 doğruluk indeksiyle tespit edilmiştir. Cam bilye kümesi ise 12 cm uzunluğunda %80 doğruluk indeksiyle elde edilmiştir.

100 kHz ve 200 kHz frekanslarında Numune-3 içerisindeki hiçbir malzeme belirlenememiştir. Bu frekans değerlerindeki sonuçlarda beton içerisindeki malzemelerin tespit edilememesinin sebebi frekansın yükselmesine bağlı olarak dalga boyunun küçülmesi, bunun sonucunda da kayma dalgalarının daha küçük süreksizliklerle karşılaşması sonucu malzemelerin diğer süreksizliklerden ayırt edememesi olabilir.

Ayrıca numunedeki metal levha hiçbir frekans değerinde belirlenememiştir. Bunun sebebi Lipa ve diğ.'nin [16] belirttiği gibi deney yapılış doğrultusunun ince sayılabilecek kalınlıktaki levhanın tespit edilmesi için uygun olmamasıdır.

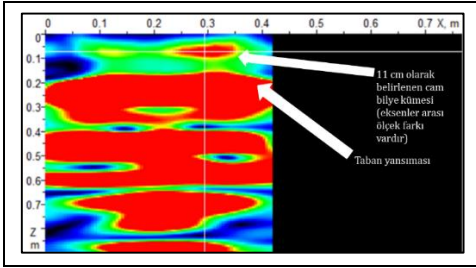
Numune-3 üzerinde yapılan deneyler sonrasında tespit edilen malzeme boyutları ve doğruluk indeksleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Numune-3 deney sonuçları ve doğruluk indeksleri.

Table 4. Test results and accuracy indexes of Specimen-3.					
Numune İçeriği	Gerçek Boyut (cm)	25 kHz (cm)	D.İ (%)	50 kHz (cm)	D.İ (%)
Çelik Lifler	15	20	67	18	80
Cam Bilyeler	10	11	90	12	80
Metal Levha	35x10	-	0	-	0

Numune-3'te bulunan 10 cm boyundaki cam bilye kümesinin 25 kHz frekansındaki ölçümlerle beton yüzeyinden 7 cm derinlikten alınan kesitte tespit edildiği B-taraması Şekil 14'te

gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Z ekseninde 20 cm derinlikte bulunan numune bitişinin dışında kalan zemin ve altındaki süreksizlikler bu frekans değerindeki ölçümlerde de görüntülerde yer almaktadır.

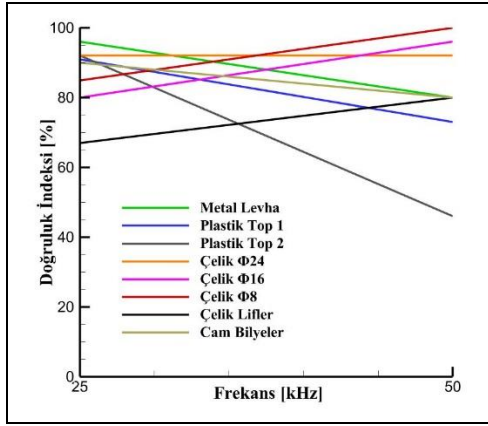


Şekil 14. Numune-3 içerisindeki 10 cm uzunluğundaki cam bilye kümesinin 25 kHz değerindeki ölçümlerde belirlenmesi.

Figure 14. Detection of 10 cm long glass marble group in Specimen-3 at 25 kHz.

3.5 Doğruluk indekslerinin değerlendirilmesi

Bütün numunelerde yapılan UKDT deneyleri sonucunda elde edilen doğruluk indekslerinin birlikte değerlendirilebilmesi için Şekil 15'te gösterilen grafik oluşturulmuştur.



Şekil 15. Doğruluk indekslerinin birlikte değerlendirilmesi.

Figure 15. Evaluation of accuracy indexes.

Grafikten de anlaşılacağı üzere farklı çaplardaki beton çelikleri ve çelik lifler 50 kHz değerinde 25 kHz değerine göre daha yüksek doğruluk vermiştir. Plastik toplar ve cam bilyeler ise 25 kHz değerinde daha doğru sonuç vermiştir.

4 Sonuçlar

Ultrasonik Kayma Dalgaları Tomografisi beton yapılarıdaki kusur ve süreksizliklerin dışında içerisindeki farklı malzemelerin tespit edilmesi için de kullanılması önerilen bir yöntemdir. UKDT yöntemiyle sahada ve laboratuvarında yapılmış olan araştırmalar beton içerisinde bulunan kusurların, yapı malzemelerinin ve bazı yabancı maddelerin yüksek doğruluk indeksleriyle tespit edilebildiğini ortaya koymuştur. Bu doğruluk oranlarının yüksek oluşu UKDT yöntemini diğer tahribatsız deney metodlarının arasında öne çıkarmaktadır.

Bu deneysel çalışma çerçevesinde tasarlanıp üretilen üç beton numunenin içerisine farklı boyutlarda yapı malzemeleri ve bazı yabancı cisimler yerleştirilmiştir. Bu malzemeler; ince kalınlıktaki metal levhalar, farklı boyutlardaki plastik toplar ve üç değişik çaptaki beton çeliklerinden oluşmaktadır. Üretilen üç numunede UKDT deneyleri 25, 50, 100 ve 200 kHz frekanslarında yapılmış ve her bir frekans değerinde belirlenen

boyutlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlarına göre;

- Numune kalınlıkları 25 kHz, 50 kHz ve 100 kHz frekans değerlerinde %91 doğruluk indeksiyle belirlenmiştir. Sadece 200 kHz değerinde doğruluk indeksi düşmüştür,
- 25 kHz ve 50 kHz frekanslarında numuneler içerisindeki -Numune-3'teki metal levha hariç- tüm donatı ve kusurlar belirlenebilmiştir,
- 100 kHz ve 200 kHz değerlerinde sadece numune kalınlıkları elde edilmiş, numunelerin içerisindeki malzemelerle ilgili bir görüntüye rastlanmamıştır.

Yapılan deneysel çalışma kapsamında ortaya çıkarılan kusurlarda, elde edilen sonuçlara göre beton malzemeler üzerinde yapılacak Ultrasonik Kayma Dalgaları Tomografisi deneylerinde düşük frekansların kullanımı daha iyi sonuçlar vermektedir. 25 kHz ve 50 kHz frekanslarında yapılan ölçümlerde beton içerisindeki yabancı malzemelerin boyutları tespit edilmiştir. 100 kHz frekansı ise yapı elemanı boyutlarının tespit edilmesi için uygun olduğu söylenebilir. Yabancı madde veya boşluk olarak nitelendirilebilecek plastik topların tespit edilmesinde 25 kHz frekansı daha yüksek doğruluk indeksleri verirken, beton çeliklerinin boyutları 50 kHz frekansında daha yüksek doğruluk indeksleriyle tespit edilmiştir. Bu durum betonarme yapıların donatıları bakımından incelenmesinde 50 kHz frekansının daha uygun olduğunu göstermektedir.

Bu yöntemle beton ve betonarme yapıların kalınlığının yüksek bir doğrulukla tespit edilebildiği görülmüştür. Beton içerisindeki boşluk ve diğer kusurlar ise daha düşük doğruluklarla ölçülmektedir.

Ultrasonik kayma dalgaları tomografisinin en önemli kullanım amaçlarından biri olan betonarme eleman içindeki boşlukların tespitinde 50 kHz uygulama frekansına göre daha verimli frekansların bulunduğu, bu frekansı kullanmak yerine daha düşük frekanslarda doğruluk oranı daha yüksek sonuçlar alınabileceği sonucuna varılmıştır.

Aranan kusur tipine göre frekans uygulaması yapılmasının kusurların daha net tespit edilebilmesi için daha iyi sonuçlar verdiği, numune kalınlığı ve delaminasyonların daha net olarak belirlenmesi için daha yüksek frekanslar uygulanırken, boşluk, yabancı madde gibi kusurların düşük frekanslarda elde edilebildiği sonucuna varılmıştır.

Beton eleman üzerinde yapılan çalışmalarda metal yabancı maddelerin belirlenmesi ve boşlukların tespiti için 100 kHz değerinin altındaki frekans değerleriyle çalışılması, doğruluk oranı daha yüksek kesitler elde etmeye olanak vermektedir.

Farklı kusur ve/veya malzemelerin çok yakın olarak konumlandığı durumlarda taranan bölgeden elde edilen deney sonuçlarının yorumlanması zorlaşabilir. Ayrıca bu yöntemle yapılan taramaların sonucu ana renkler kullanılarak görselleştirildiği için de sonuçların yorumlanması kolay değildir. Bu renkler sayesinde taranan bölgedeki farklı malzeme ve kusurların konumu tespit edilebilmektedir. Fakat belirlenen malzeme veya kusurun ne olduğu hakkında hiçbir bilgi vermemektedir.

Cihazla birlikte gelen yazılımda kesit aralıkları 0.5 cm olarak verilmektedir. Bu aralığı sıklaştırmak mümkün olmadığı için daha hassas ölçüm yapılamamaktadır. Bundan dolayı beton çeliği ve metal levhaların kalınlık ve çapları tespit

edilememiştir. Dolayısıyla uygulamada beton çeliği çaplarının bu yöntemle belirlenmesi şu an için mümkün olamamaktadır.

Her noktanın taranması sonrasında cihaz ekranında tek bir kesit görülebilmektedir. Detaylı inceleme ancak bilgisayar yazılımından yapılabilmektedir. Bunun için tarama işleminin tamamlanıp bilgisayara aktarılması gerekmektedir. Bu yönden zaman alıcıdır.

Gelecekte araştırmacılar tarafından yapılması planlanacak çalışmalarda; benzer kusurların elde edilmesinde frekansın etkisinin daha net ortaya koyulması için 25-100 kHz arasındaki frekanslarda frekans değerini 10 kHz arttıracak şekilde bir çalışma planlanması önerilmektedir. Bu çalışmada kullanılan frekansların da farklı kusurların elde edilmesindeki etkilerinin araştırılması için delaminasyon benzeri kusurlar ve farklı maksimum tane boyutundaki agregalı betonlar üzerinde araştırmaların yürütülmesi yazarlar tarafından önerilmektedir.

5 Conclusions

Ultrasonic Shear Wave Tomography is a method recommended to be used for detecting different materials in concrete structures as well as defects and discontinuities. Research conducted in the field and in the laboratory with the USWT method has revealed that defects, building materials and some foreign materials in concrete can be detected with high accuracy. The fact that these accuracy rates are high makes the USWT method stand out among other non-destructive testing methods.

Different sizes of building materials and some different objects were placed in three concrete specimens designed and produced for this experimental study. These materials consist of metal sheets of thin thickness, plastic balls of different sizes and concrete steels of three different diameters. In the three specimens produced, USWT experiments were carried out at 25, 50, 100 and 200 kHz frequencies and the dimensions determined at each frequency value were compared with each other. According to the results obtained from the experiments;

- Specimen thicknesses were determined at frequencies of 25 kHz, 50 kHz, and 100 kHz with an accuracy of 91%. Only by 200 kHz the accuracy has decreased,
- At 25 kHz and 50 kHz frequencies, all reinforcements, and defects in the samples -except the metal plate in Sample-3- could be determined,
- Only specimen thicknesses were obtained at 100 kHz and 200 kHz values. No image was found about the materials in the samples.

According to the results obtained, the use of low frequencies in Ultrasonic Shear Wave Tomography experiments to be performed on concrete materials gives better results in the defects revealed within the scope of the experimental study. The dimensions of foreign materials in the concrete were determined in the measurements made at 25 kHz and 50 kHz frequencies. It can be said that the 100 kHz frequency is suitable for determining the dimensions of the building elements. While the 25 kHz frequency gives higher accuracy indices for detecting plastic balls that can be characterized as foreign matter or voids, the dimensions of concrete steels are determined with higher accuracy indices at 50 kHz frequency. This case shows that 50 kHz frequency is more appropriate in the examination of reinforced concrete structures in terms of reinforcement.

It has been observed that the thickness of concrete and reinforced concrete structures can be determined with high accuracy with this method. The voids and other imperfections in concrete are measured with lower accuracy.

It has been concluded that there are more efficient frequencies than 50 kHz application frequency in the detection of voids in reinforced concrete elements, which is one of the most important usage purposes of ultrasonic shear wave tomography, and that higher accuracy results can be obtained at lower frequencies instead of using this frequency.

It has been seen that applying frequency according to the type of defect gives better results to detect the defects more clearly, while higher frequencies are applied to determine the sample thickness and delamination more clearly, defects such as voids and foreign matter can be obtained at low frequencies.

Using frequency values below 100 kHz for the determination of metal materials and the detection of voids in the concrete element allows to obtain cross sections with higher accuracy.

In cases where different defects and/or materials are located very close to each other, it can be difficult to interpret the test results obtained from the scanned area. In addition, since the results of the scans made with this method are visualized using primary colors, the results are not easy to interpret. Thanks to these colors, the location of different materials and defects in the scanned area can be determined. However, it does not give any information about what the material or defect is.

Section intervals are given as 0.5 cm in the software that comes with the device. Since it is not possible to decrease this range, more precise measurements cannot be made. Therefore, the thickness and diameter of the concrete steel and metal plates could not be determined. For this reason, in practice, it is not possible to determine the diameters of concrete steel with this method at this time.

After scanning each point, a single section can be seen on the device screen. Detailed analysis can only be made from computer software. Thus, the scanning process must be completed and transferred to the computer. This aspect is time consuming.

In the studies to be carried out by the researchers in the future; To reveal the effect of frequency more clearly in obtaining similar defects, it is recommended to plan a study to increase the frequency value by 10 kHz at frequencies between 25-100 kHz. To investigate the effects of the frequencies used in this study on obtaining different defects, it is suggested by the authors to conduct research on delamination-like defects and concretes with different maximum grain size of aggregates.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Mustafa Altuğ PEKER tasarımın yapılması, literatür taraması, kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve yazım denetimi başlıklarında; Bekir PEKMEZCİ fikrin oluşması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, sonuçların incelenmesi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında; başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Tayfur S, Alver N. "Imaging of voids in concrete by impact-echo and ultrasonic-echo methods". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 167-176, 2018.
- [2] Yüksel İ. "Bileşik Yıkıntısız yöntemle yerinde beton dayanımının tahmini". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 231-235, 2003.
- [3] Schabowicz, K. "Modern acoustic techniques for testing concrete structures accessible from one side only". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(4), 1149-1159, 2015.
- [4] Schabowicz K, Suvorov VA. "Nondestructive testing of a bottom surface and construction of its profile by ultrasonic tomography". *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 50(2), 109-119, 2014.
- [5] De La Haza AO, Petersen CG, Samokrutov A. "Three dimensional imaging of concrete structures using ultrasonic shear waves". *Structural Faults & Repair -2008: 12th International Conference and Exhibition*, Edinburgh, Scotland, 10-12 June 2008.
- [6] Chai HK, Aggelis DG, Momoki S, Kobayashi Y, Shiotani T. "Single-side access tomography for evaluating interior defect of concrete". *Construction and Building Materials*, 24(12), 2411-2418, 2010.
- [7] Lybaert M. "Ultrasonic tomography, a non-destructive measuring technique for analysis of concrete roads". *Young Researchers Seminar 2015*, Rome, Italy, 17-19 June 2015.
- [8] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. "Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration". Washington, DC, USA, 2013.
- [9] Choi P, Kim DH, Lee BH, Won MC. "Application of ultrasonic shear-wave tomography to identify horizontal crack or delamination in concrete pavement and bridge". *Construction and Building Materials*, 121, 81-91, 2016.
- [10] Dawood N, Marzouk H, Hussein A, Gillis N. "Nondestructive assessment of a jetty bridge structure using impact-echo and shear-wave techniques". *Journal of Bridge Engineering*, 18(8), 801-809, 2013.
- [11] Schabowicz K. "Ultrasonic tomography-the latest nondestructive technique for testing concrete members - Description, test methodology, application example". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(2), 295-303, 2014.
- [12] Choi H, Ham Y, Popovics JS. "Integrated visualization for reinforced concrete using ultrasonic tomography and image-based 3-D reconstruction". *Construction and Building Materials*, 123, 384-393, 2016.
- [13] Smokotin A, Bogatyreva M, Protasova I. "The quality evaluation of concrete structures with the ultrasonic low-frequency tomograph". *Journal of Physics: Conference Series*, 671(1), 1-5, 2016.
- [14] Nguyen TD, Tran KT, Gucunski N. "Detection of bridge-deck delamination using full ultrasonic waveform tomography". *Journal of Infrastructure Systems*, 23(2), 1-9, 2017.
- [15] Lin S, Shams S, Choi H, Azari H. "Ultrasonic imaging of multi-layer concrete structures". *NDT and E International*, 98, 101-109, 2018.
- [16] Freeseaman K, Khazanovich L, Hoegh K, Nojavan A, Schultz AE, Chao SH. "Nondestructive monitoring of subsurface damage progression in concrete columns damaged by earthquake loading". *Engineering Structures*, 114, 148-157, 2016.
- [17] Lipa, L., Navarro, L. M., ve Pasquel, E. N., Influence of steel bars in detection of voids in concrete using ultrasonic pulse-echo method, *ACI Materials Journal*, 116 (4), 223-234, 2019.
- [18] Salvador Villalobos PE, Stark R, Fisk P. "Ultrasonic measurements for condition assessment of prestressed concrete cylinder pipe". *Pipelines 2019*, Nashville, Tennessee, USA, 24 July 2019.
- [19] Pekmezci BY, Şeker DZ, Tavlı E, Yorulmaz B, Arabacı E, Güler F, Gökpınar M. "Ultrasonik kayma dalgaları tomografisi ile betonda kusur tespiti". *Beton 2017 Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 3-14 Nisan 2017.
- [20] Tavlı E. Ultrasonik Tomografi ve Ultrases Geçiş Hızı Yöntemiyle Betonda Kusur Tespiti. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [21] Peker MA. Betonun Ultrasonik Tomografi Yöntemi ile İncelenmesinde Frekansın Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [22] Scott DB. "Internal inspection of reinforced concrete for nuclear structures using shear wave tomography" *Energy Conversion and Management*, 74, 582-586, 2013.
- [23] Li Z. "A study on ultrasonic echo tomography for non-destructive evaluation of hardened cementitious concrete". *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 5(13), 1-18, 2020.
- [24] Kwon H, Joh C, Chin WJ. "Pulse peak delay-total focusing method for ultrasonic tomography on concrete structure". *Applied Sciences*, 11(1741), 1-12, 2021.
- [25] Wimsatt A, White J, Leung C, Scullion T, Hurlebaus S, Zollinger D, Grasley Z, Nazarian S, Azari H, Yuan D, Shokouhi P, Saarenketo T, Tonon F. "Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings". Transportation Research Board, Washington DC, USA, Scientific Report, R06, 2014.
- [26] Srinivasan P. Condition Assessment and Evaluation of Concrete Structures by Advanced Non-Destructive Methods. PhD Thesis, Annamalai University, Tamil Nadu, India, 2013.