

## Özdirenç yöntemi kullanılarak donatılı betonların anizotropisinin belirlenmesi

### Determination of anisotropy of reinforced concretes by using resistivity method

Nevbahar SABBAG<sup>1</sup>, Osman UYANIK<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.  
nevbaharsabbag@sdu.edu.tr, osmanuyanik@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 31.01.2019  
Kabul Tarihi/Accepted: 17.05.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 17.04.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.00008  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Anizotropi, malzeme özelliklerinin yöne bağlı değişmesidir. Betondaki anizotropi derecesinin belirlenmesi beton özelliklerinin ve kalitesinin ortaya konulabilmesi açısından önemlidir. Bu amaçla tahribatsız jeofizik yöntemlerden olan özdirenç yönteminden yararlanılabilir. Yapılan çalışmada donatılı beton üzerindeki özdirenç ölçümlerinin yöne bağımlılığının zamana, kür koşullarına, beton dayanımına ve donatı çapına bağlı değişimi araştırılmıştır. Bu amaçla, çalışma düşük, orta ve yüksek dayanım özelliklerine sahip 3 beton tasarım üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her tasarım 150mm ebatlarında 18'er adet küp numunenin tam ortasında bir adet 10, 14 veya 20 mm çapında ve yaklaşık 250 mm uzunluğunda donatı bulunduracak şekilde hazırlanmıştır. Toplamda 162 numunenin yarısı 90 gün süreyle su kürüne, diğer yarısı da hava kürüne tabi tutulmuştur. Belirli zaman dilimlerinde mukavemetleri farklı olan donatılı betonların her yüzeyinde özdirenç cihazı ile birbirine dik iki ölçü olmak üzere 4 yüzeyde toplam 8 özdirenç değeri belirlenmiştir. Böylece betonun gözeneklerinin su ya da hava dolu olmasına bağlı olarak anizotropi ortaya konulabilir. Özdirenç yöntemi ile havaya doymuş betonlarda anizotropi belirlenebilirken aynı betonun suya doymuş halinde anizotropi ortaya konulamamıştır. Sonuç olarak beton gözeneklerinin doymuşluk türünün özdirenç yöntemi ile anizotropinin belirlenmesini etkilediği anlaşılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Anizotropi, Beton, Donatı, Özdirenç yöntemi, Tahribatsız jeofizik yöntem.

#### Abstract

Anisotropy is the change of material properties depending on direction. Determining the degree of anisotropy in concrete is important in terms of revealing the concrete properties and quality. For this purpose, it can be utilized from the resistivity method which is one of the non-destructive geophysical methods. In this study, the determination of the direction-dependence of the resistivity measurements on reinforced concrete was investigated with respect to time, curing conditions, concrete strength and reinforcement diameter. For this purpose, the study was carried out on 3 concrete designs with low, medium and high strength characteristics. Each design is designed to have a 10, 14 or 20 mm diameter and approximately 250 mm length of reinforcement in the middle of 18 cube samples of 150 mm in sizes. Half of the 162 specimens were subjected to water curing and the other half to air curing for 90 days. At each surface of the reinforced concrete with different strengths in certain time periods, a total of 8 resistivity values were determined from 4 surfaces with two measures perpendicular to each other. Thus, anisotropy can be revealed as depend on filling with water or air of the pores of the concrete. When anisotropy can be determined by means of resistivity method in air saturated concrete, the anisotropy of the same concrete in water has not been revealed. As a result, it is understood that the saturation type of concrete pores affects the determination of anisotropy by the resistivity method.

**Keywords:** Anisotropy, Concrete, Reinforcement, Resistivity method, Non-Destructive geophysical method.

## 1 Giriş

Bazı malzemeler farklı yönlerde farklı özelliklere sahiptir, yani, anizotropiktir. Beton, yapısı ve içeriğindeki bileşenler nedeniyle heterojendir. Anizotropi ve heterojenite birbirleri ile çok yakından ilişkilidir ve aralarındaki farkı açık bir şekilde ortaya koymak önemlidir. Bir malzemede aynı noktadaki özellikler ölçüm yönüne bağlı olarak farklılık gösteriyorsa anizotropiktir. Heterojenite ise, malzemelerin farklı noktalarında ve aynı doğrultuda ölçü alındığı zaman ölçü alınan noktadaki özelliklerin değişmesidir [1],[2]. İnşaat mühendisliği uygulamalarında betonarme bir yapı elemanının her noktasında dayanımın aynı olması istenmektedir. Ancak beton tasarlanırken kullanılan iri ve ince agrega miktarındaki farklılıklar, vibrasyon(karıştırma) işleminin iyi yapılamaması, döküm ve prizlenme esnasında yapılan hatalardan dolayı mikro boşluklar ya da çatlaklar meydana gelebilmektedir. Beton içerisindeki kırık çatlak durumu [3] gibi problemlerin belirlenmesine ek olarak beton dayanımı [4]-[10], kalitesi

[11],[12], beton içerisindeki gözeneklerin doymuşluk türü [13],[14] ve üzerinde ölçü alınan malzemeye ait birçok mekanik, fiziksel ve radyoaktif özellikler [15]-[23] jeofizik yöntemler kullanılarak belirlenebilmektedir. Betonun içyapısında meydana gelebilecek ve betonun özelliklerini etkileyebilecek yöne bağlı değişimler yani anizotropik problemler de farklı yönlerde ölçü alınabilen jeofizik yöntemler kullanılarak belirlenebilmektedir. Anizotropik gevrek bir malzeme olarak tanımlanan beton üzerinde alınan ölçümler yöne bağlı olarak farklı değerler alabilmekte ve üzerine gelen yükler nedeniyle farklı davranışlar gösterebilmektedir. Ayrıca, kompozit bir malzeme olan betonarme bir elemanda bulunan donatıların sayısı, konumu ve yönü gibi parametreler de yöne bağlı farklı sonuçlar elde edilmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla anizotropik bir betonun da elektriksel özellikleri etkilenilmekte ve özdirenç yöntemi ile bu durum belirlenebilmektedir.

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

Elektrik özdirenç yöntemi betonun içerisindeki kırık ve çatlak durumu, hasar derecesi ve nem durumu hakkında bilgi verebilen tahribatsız bir değerlendirme yöntemidir. Beton içerisindeki kırık ya da boşluğa dik olarak gönderilen elektrik akımının sonucunda daha yüksek özdirenç değerleri elde edilirken, paralel alınan ölçümler de daha düşük özdirenç değerleri elde edilmektedir. Kırık ya da boşluklardaki dolgunun hava veya su (az ya da çok iletken su) ile dolu olması da özdirenç değerlerini değiştirmekte ve hava ile dolu olduğunda daha yüksek özdirenç değerleri ölçülmektedir [8],[24]-[27].

Elektrik özdirenç, ortam kuru ise kırıklara paralel elde edilen özdirenç (boyuna), kırıklara dik olan özdirençten (enine) daha küçük elde edilmektedir. Suya doymun ortamda boyuna ve enine özdirençlerin oranı dolgu ile birlikte (büyük oranda boyuna özdirençteki mineralize su içeriğinin daha fazla azalması ile birlikte) artmaktadır [28]. Lane ve diğ. [29] yaptıkları çalışmada kırık varlığı nedeniyle anizotropik özellikler gösteren herhangi bir ortamda Schlumberger veya Wenner dizilimine göre kırığa dik yönde ölçülen görünür özdirenç değerinin, kırığa paralel yönde ölçülenden daha büyük elde edildiğini belirtmişlerdir.

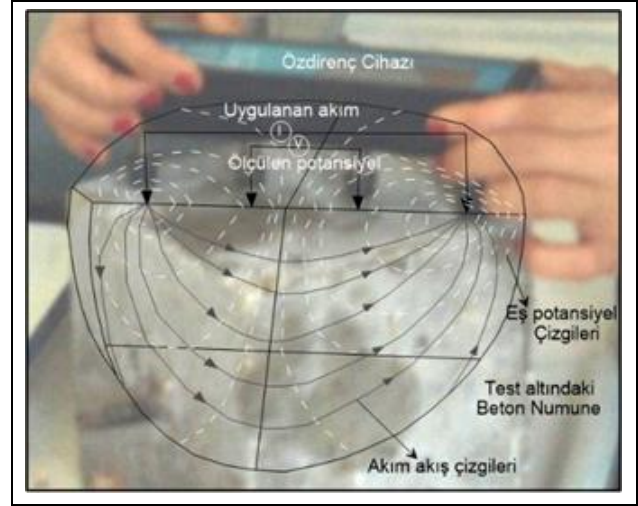
Bu çalışmada kullanılan beton numuneler standartlara uygun olarak küp şeklinde düşük, orta ve yüksek mukavemet özellikleri gösteren 3 farklı tasarım olarak 162 adet hazırlanmıştır. Aynı tasarıma sahip küp numunelerin içerisine, 10, 14 veya 20 mm çapında bir adet donatı konulmuştur. Bilindiği üzere mevcut yapıların konumu, kullanılan betonun suya doygunluğu üzerinde etkilidir. Denize yakın ya da yeraltı suyunun yüzeye yakın olduğu ve su ile teması engellenmemiş yapıların betonlarında suya doygunluk daha fazla iken, deniz ya da yeraltı suyunun etkisinden uzaklaşmış yapılar daha kuru olmaktadır. Bu nedenle numunelerin bir kısmı su kürüne bir kısmı ise hava kürüne tabi tutulmuştur. Böylece, betonun suya doygunluğu ile birlikte özdirenç değerlerinin farklı elde edilmesi yapının suya doygunluğu hakkında da fikir sahibi olmamıza yardımcı olacaktır. Hazırlanan örneklerin üzerinde belirli zaman dilimlerinde ve numune yüzeyinin farklı yönlerinde elektrik özdirenç yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek numunelerin anizotropisi belirlenmiştir.

## 2 Özdirenç yöntemi

Elektrik özdirenç yöntemi "arama jeofizikinde" kullanılan başlıca jeofizik yöntemlerden biridir. Bu yöntemde amaç, araştırılacak yapıyı elektrik özelliğine (özdirenç) göre yorumlamaktır. Yöntem, maden, mineral, jeotermal enerji kaynağı ve petrol aramaları ile hidrojeoloji ve mühendislik jeolojisi problemlerinin çözümünde geleneksel olarak uygulanırken, son yıllarda arkeolojik yapı kalıntılarını araştırmak, restorasyon öncesi araştırma gibi yakın yüzey (near-surface) araştırmalarda da kullanılmaktadır [30]-[34]. Özdirenç yöntemi; kuramı ve uygulamasının kolay olması, ölçü aletinin basit olması ve etkili sonuçlar vermesinden dolayı günümüze kadar yaygın olarak kullanılmıştır [35]. Bu yöntemde, beton üzerinde ölçü alımı için geliştirilen cihazın ölçü düzeneği Şekil 1'de sunulmuştur.

Bu düzende, bir akımölçer ve bir gerilim farkı ölçer gereklidir. Betonun yerinde (in-situ) veya laboratuvarında ölçümleri için geliştirilmiş olan küçük bir gerilim farkı ölçer ile 4 elektrotlu ve elektrotlar arası eşit olan (5 cm) Wenner dizilimi kullanılmaktadır. Wenner dizilimine bağlı nüfuz derinliği 5 cm civarındadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere dıştaki iki elektrottan akım verilerek içteki iki elektrottan potansiyel fark ölçümleri

yapılmaktadır. Elde edilen potansiyel fark, elektrot açıklığına bağlı geometrik faktör ve akım değeri kullanılarak hesaplanan sayısal değer cihaz ekranında kΩcm cinsinden gösterilmektedir. Bu ölçümler tüm elektrotlar arasındaki uzaklığa ve ortamın yapısına bağlı olarak değişim göstermektedir. Ayrıca elektrotların temas ettiği yer de ölçülen gerilim farkını etkilemektedir. Örneğin, akım elektrotları, iki çakıl arasına sıkıştırılırsa, akım geçmez ve ortadaki iki nokta arasında gerilim farkı oluşmaz. Elektrotlardan birinin boşluğa denk gelmesi de yanlış sonuçlar elde edilmesine sebep olabilmektedir.



Şekil 1. Beton üzerinde elektrik özdirenç ölçümü [8]'den düzenlenmiştir.

Figure 1. The electrical resistivity measurement on concrete arranged from [8].

Betonun elektrik direnci; gözeneklilik, nem ve gözeneklerdeki sıvının direncine (gözeneklerdeki suyun tuzluluğu), su/çimento oranına (gözeneklerdeki iletkenlik), çimentonun hacmi ve tipine, sıcaklığa ve neme bağlı olarak büyük ölçüde etkilenmektedir. Gözenekler erimiş tuz içeren su ile dolu olduğunda beton elektriksel olarak daha iletken hale gelmektedir. Ayrıca kullanılan betonun yaşına göre elektrik özdirenç ve dayanıklılık arasında güçlü bir ilişki olduğu bilinmektedir [8],[36],[37].

Tahribatsız bir yöntem olan özdirenç ölçümü; çalışma alanındaki betonun kalitesinin belirlenmesinde kullanılan hızlı ve başarılı bir yöntemdir. Bir eşitlik yardımıyla 7 günlük betondan 28 günlük betonun özdirenci tahmin edilmiş ve hata oranı yaklaşık %5 olarak bulunmuştur [36]. Dört nokta Wenner elektrot dizilimi ile hızlı ve geniş bir alanda ölçüler alınıp değerlendirilebilir. Elektrik özdirenç; difüzyon ve geçirimsizlik katsayıları, kılcal emilim ve gözeneklilik gibi dayanıklılık göstergeleri ile ilişkilendirilebilecek bir parametredir. Böylece yapıdaki geniş alanlar dolaylı yoldan ölçülmüş olmaktadır. Zaman ve sıcaklığa bağlı olarak özdirencin belirlenmesi modern tasarımların dayanıklılık değerlerinin belirlenmesinde kullanılabilir [36],[38].

### 2.1 Betonun özdirencini etkileyen faktörler

Beton üzerinde özdirenç ölçümleri yapılırken ortaya çıkan en önemli problemlerden biri betonun özelliklerinin çevredeki değişikliklerden etkilenmesidir. Betonun özdirencini etkileyen bu faktörler:

- Nem içeriği: Betondaki nem oranı arttıkça özdirenç değeri azalır. Özellikle yerinde yapılan ölçümlerde nem durumundaki değişimler okumalarda çok büyük bir etkiye sahiptir. Buna rağmen, betonun dış kısmındaki nem değişimleri sonuçları önemli bir şekilde etkilemez. Bu nedenle elektrik özdirenç yöntemi betonun doygunluğunun belirlenmesinde dolaylı bir ölçüm yöntemidir,
- Sıcaklık: Beton elektrolitik özelliklere sahiptir. Bu yüzden sıcaklık azaldıkça özdirenç artacaktır. Özellikle ölçümler farklı mevsimlerde alındığında bu etkiye dikkat edilmelidir. Çünkü kış mevsiminde alınan ölçümler yaz mevsiminde alınan ölçümlerden daha yüksek özdirenç değerine sahiptir,
- Klorid içeriği: Betonun içinde klorid ya da diğer herhangi bir inorganik bileşiğin var olması özdirenç değerinde belirli bir düşüğe neden olmaktadır,
- Karbonatlaşma: Beton içerisinde kalsiyum karbonatlarının oluşması genellikle bir sıkılaştırmaya neden olduğu için özdirençte bir artış meydana gelir.
- Çimento tipi: Sıradan Portland çimentosuyla karşılaştırıldığında uçucu kül, cüruf ya da silis dumanı içeren karışık çimentolarda bulunan bu maddeler genelde özdirençte bir artışa neden olur,
- Su/Çimento oranı: S/Ç oranının artması ile iletkenlik artacağından özdirenç azalır,
- Agrega tipi: Agreganın tipinin etkisi genel olarak önceden belirlenemez. Etki agreganın doğasına ve gözenekli yapısına bağlı olarak değişir. Agreganın gözenekliliği özdirenç değerini düşüren bir etmendir [39].

Özdirenç yönteminde veri toplama işlemi özdirenç aletleriyle çok kısa sürede ve kolayca yapılabilir. Ekipman oldukça ucuzdur ve ölçümler hızlı bir şekilde alınabildiği için zaman kaybı olmaz. Yapılan çalışmalarda amaca ve hedef yapıya göre farklı elektrot dizilimleri kullanılabilir. Ayrıca yöntem, doğal potansiyel yöntemi gibi diğer yöntemlerle birlikte kullanıldığında çok daha yararlı olabilir. Yöntemin bu avantajlarına karşılık bazı dezavantajları da vardır. Özellikle ölçüm cihazının konumu, uzunluğu ve ölçü noktalarının yerleri de özdirenç ölçümlerini etkilemektedir. Bu nedenle bunların seçimi oldukça önemlidir. Beton, çimento ve agregalardan yapılmaktadır ve bu malzemeler farklı özdirenç değerlerine sahiptir. Bu nedenden dolayı elektrotlar arası mesafe yeteri kadar büyük olmalı ki ölçülen değer betonun özdirençini ortalama olarak temsil edebilsin. Yöntem, yüzey özdirenç ve nem oranı çok yüksek olan alanlarda hatalı sonuçlar verebilmektedir [40].

## 2.2 Özdirenç ve anizotropi

Beton homojen ve izotrop olmadığı için ölçülen gerilim farklarından elde edilen özdirençler gerçek özdirenç değerleri değildir. Bu nedenle ölçülen özdirenç değerleri görünür özdirenç olarak adlandırılmaktadır. Görünür özdirenç üzerinde ölçü alınan malzemenin özelliklerini belirlemede belirgin sonuçlar verir ve bu nedenle anizotropi de belirlenebilir. Dolayısıyla anizotropi etkisi çoğunlukla tabakalı olan ve homojen olmayan ortamlarda gözlenmektedir [41]. Anizotropi, donatı varlığının ve beton bütünlüğünün (homojen yapı) olup olmadığının somut bir göstergesidir [42],[43]. Donatı olmayan homojen bir beton üzerinde alınan ölçümlerde, ölçümün konumu ve yönü ne olursa olsun, özdirenç değerleri düzenli

sonuçlar verirken donatılı numunelerdeki anizotropi, donatı yoğunluğu ve yönlerine bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir [40]. Anizotropi değerinin %0 olduğu betonun izotrop ve donatısız olduğu kabul edilirse daha büyük değerler donatı varlığını ya da mikro çatlak gibi problemler olduğunu göstermektedir [43]. Ayrıca, görünür özdirenç ölçümleri ile elde edilen anizotropi betondaki kırık varlığı ve yeri hakkında da bilgi vermektedir [44],[45].

Anizotropi ( $A_n$ ) belirli bir noktada birbirine dik olarak yapılan ölçümlerden elde edilen görünür özdirenç değerlerinin birbirine oranlanması ile elde edilmektedir.

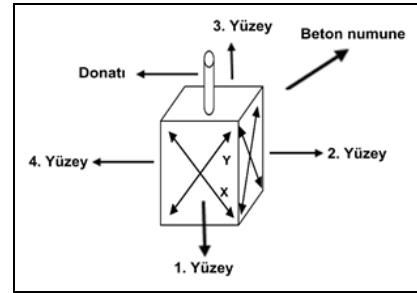
$$A_n = \sqrt{\frac{\rho_{max}}{\rho_{min}}} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'e göre  $A_n$ , farklı yönlerde elde edilen maksimum ( $\rho_{max}$ ) ve minimum ( $\rho_{min}$ ) görünür özdirençlerin oranının kareköküdür. Burada,  $A_n = 1$  olması durumu betonun tamamıyla izotrop, bunun dışındaki değerler ( $A_n \neq 1$ ) betonun anizotrop olduğunu göstermektedir.

Yapılan çalışmada Mailler [46] tarafından önerilen ve Dar Zarrouk parametrelerinden beşincisini temsil eden Eşitlik 1 değerlendirilmelerde kullanılmıştır. Anizotropi, ölçüm yönüne göre elektriksel farklılıkları vurgulamaktadır [43]. Anizotropi yüzde (%) cinsinden de Eşitlik (2) ile belirlenebilir.

$$\% \text{ Anizotropi } (A_n) = \frac{(\rho_{max} - \rho_{min})}{\rho_{max}} \times 100 \quad (2)$$

Yapılan çalışmada Şekil 2'de gösterildiği gibi donatılı numunelerin 4 yüzeyinde X ve Y yönlerinde elektrik özdirenç cihazı ile birbirine dik olacak şekilde çapraz ikişer adet ölçüm yapılmıştır. Böylece her bir numune üzerinde 8'er adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu işlem belirli zamanlarda (7, 28, 41, 56, 65, 72 ve 90. günlerde) su ve hava küründeki bütün numuneler için tekrarlanmıştır.



Şekil 2. Ölçü alım doğrultuları.

Figure 2. Measurement directions.

## 3 Betonların hazırlanması ve kür koşulları

Bu çalışma kapsamında agrega türü olarak kırmataş agrega kullanılmıştır. Taş ocaklarından alınan kayalar konkasörle istenilen boyutlarda ufalanarak kırılmış, böylece agrega oluşturulmuştur. Agregalar %25 iri kırmataş, %23 orta kırmataş ve %52 kum kullanılarak hazırlanmıştır. Tasarımların hazırlanması esnasında çimento çeşidi olarak CEM II/B-LL Portland kompoze çimento [Kalker (toplam organik karbon): %0.2] kullanılmıştır. Kimyasal katkı maddeleri olarak ise hava sürükleyici beton katkısı Aermix ve süper akışkanlaştırıcı beton katkısı Fluicon kullanılmıştır. Karışımlar içilebilir nitelikteki şebeke suyu kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan betonun



kıvam sınıfına karar vermede kullanılan slump (çökme) deneyi değeri tüm karışımlar için 12 cm olarak alınmıştır. Bu tasarımların su/çimento (S/C) oranları ise sırasıyla 2.03, 0.50 ve 0.32 şeklinde belirlenmiştir. Elde edilen betonların mukavemetleri ortalama olarak 4-6MPa (düşük), 17-20MPa (orta) ve 50-60MPa (yüksek) civarındadır. Her tasarım türünde 150 mm ebatlarındaki küp numuneler, tam ortasında bir adet 10, 14 veya 20 mm çapında ve 250 mm uzunluğunda donatı bulunduracak şekilde hazırlanmıştır. Üç farklı tasarım için toplamda 162 adet numune üzerinde çalışılmıştır. Bu numunelerin yarısı su kürüne diğer yarısı ise hava kürüne maruz bırakılmıştır (Şekil 3). 162 adet numunenin 54 adedinde 10mm çapında, 54 adedinde 14mm çapında ve 54 adedinde ise 20mm çapında donatı vardır. Her 54 adet numunenin 18'i düşük, 18'i orta ve diğer 18'i yüksek dayanımlı tasarımlara aittir. Ölçüm süresi 90 gün olarak belirlenmiş, ayrıca 7. ve 28. ölçüm günleri inşaat mühendisliğinde beton dayanımının belirlenmesi veya buna yaklaşım yapılabilmesi amacıyla seçilmiştir. Diğer günlerde ara ölçüm günleri olarak belirlenerek özdirenç değişimi zamana bağlı olarak ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda, 7, 28, 41, 56, 65, 72 ve 90. günlerde maruz bırakıldığı kür koşullarından çıkarılan numunelerin 4 farklı yüzeyinde yapılan özdirenç ölçümlerinden sonra 7., 28. ve 90. günlerde tek eksenli basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Bu deneyde her tasarım için 3'er adet numune kırılmış ve ortalaması dayanım değeri olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Su ve hava küründeki donatılı küp numuneler.

Figure 3. Reinforced cubic samples in water and air curing.

Kür koşulları, elektrik özdirenç değerleri üzerinde çok etkili olduğu düşüncesiyle yapılan çalışmada 90 gün süreyle numunelerin yarısı su kürüne, diğer yarısı ise hava kürüne tabi tutulmuştur. Özellikle düşük dayanımlı numunelerde gözenek miktarlarının fazla olması ve bu gözeneklerin su ya da hava dolgululu olmasına bağlı olarak elde edilen değerler farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca gözeneklerin yönelim doğrultuları da yöne bağlı elde edilen ölçüm sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle de yapılan çalışmada numuneler 2 ayrı grup oluşturularak su ve hava kürüne tabi tutulmuşlardır (Tablo 1).

Tablo 1. Su ve hava küründeki donatılı numunelerin özdirenç değerlerinin istatistik sonuçları.

Table 1. Statistical results of resistivity values of reinforced samples in water and air curing.

Dayanım (MPa)	Donatı çapı (mm)	Su Kürü		Hava Kürü	
		$\rho_{min}$ (kΩcm)	$\rho_{max}$ (kΩcm)	$\rho_{min}$ (kΩcm)	$\rho_{max}$ (kΩcm)
Düşük	10	3.8	6.6	22.0	125.2
	14	4.4	6.5	17.2	96.9
	20	4.5	6.7	11.2	116.5
Orta	10	4.8	7.7	9.8	51.8
	14	5.0	8.1	14.8	79.1
	20	5.1	8.4	18.7	106.4
Yüksek	10	8.6	12.0	13.2	44.4
	14	8.7	12.1	15.4	35.3
	20	9.2	13.1	13.3	35.6

Su küründeki numuneler ölçümlerinin alınacağı günlere kadar sıcaklığı  $20 \pm 2$  °C ve bağıl nemi  $\%60 \pm 5$  olan ortamdaki kür havuzlarında bekletilmiştir. Hava küründeki numuneler ise Antalya'da 2014 yılında Eylül (sıcaklığı 25.1 °C ve bağıl nemi  $\%42$ ), Ekim (sıcaklığı 20.4 °C ve bağıl nemi  $\%48$ ) ve Kasım (sıcaklığı 15.4 °C ve bağıl nemi  $\%54$ ) aylarında ortalama 20.3 °C sıcaklıkta ve nem oranı  $\%48$  olan bir ortama maruz bırakılmıştır. Belirlenen zaman dilimlerinde (7., 28., 41., 56., 65., 72. ve 90. günlerde) görünür özdirenç ölçümleri alınmıştır [47].

#### 4 Değerlendirmeler

Düşük, orta ve yüksek mukavemet özellikleri gösteren 3 farklı tasarım için elde edilen tüm numuneler üzerindeki ölçümlerin yöne bağlı olarak değişip değişmediğini kontrol etmek için küp numunelerin yüzeylerinde 90 gün boyunca belirli zaman aralıklarında özdirenç ölçümleri alınmıştır. Mukavemetleri ortalama olarak 4-6MPa (düşük), 17-20MPa (orta) ve 50-60MPa (yüksek) olan 3 farklı çapta hazırlanan donatılı beton tasarımı için değerlendirme sonuçları Şekil 4-9'da gösterilmiştir. Numune üzerinde ölçüm yapılırken farklı yönlerde birbirine dik iki ölçü olmak üzere donatının bulunmadığı 4 yüzeyden toplam 8 elektrik özdirenç değeri elde edilmiştir (Şekil 2). Bu değerlerin istatistiksel sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre su küründeki numunelerin özdirenç değerleri 3.8-13.1 kΩcm aralığında değişirken aynı tasarıma sahip hava küründe 9.8-125.2 kΩcm aralığında değiştiği görülmektedir.

Su kürüne maruz bırakılmış ve her birinden 27 adet hazırlanmış olan düşük, orta ve yüksek dayanımlı numunelerin 90 günlük sürede ölçülen en büyük ve en küçük özdirençleri arasındaki fark 2.1 kΩcm ile 3.9 kΩcm arasında değişmektedir. Buna karşın hava kürüne maruz bırakılmış numunelerin özdirençlerinde önemli farklar elde edilmiştir. Bu farklar düşük dayanımlı numunelerde ortalama 96.1 kΩcm, orta dayanımlı numunelerde 64.7 kΩcm ve yüksek dayanımlı numunelerde 24.5 kΩcm olarak belirlenmiştir. Bu durumda düşük dayanımlı numunelerde daha fazla yöne bağımlı olarak özdirenç değerinin değiştiği anlaşılmaktadır.

Su ve hava kürüne maruz bırakılmış numuneler üzerindeki anizotropi çalışmasının sonuçları sırasıyla Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.  $A_n(ort)$  değeri bir numunenin 4 yüzeyinde elde edilen özdirenç değerlerinin ortalamasını temsil ederken  $A_n(max)$  ise bu yüzeylerden elde edilen en büyük anizotropi değeri olarak sunulmuştur. Buna göre su küründeki numunelerin ortalama anizotropisi 1.013-1.033 arasında iken hava küründe 1.048-1.159 arasında değişmektedir. Her numunedeki 4 yüzeyden belirlenen anizotropi değerleri karşılaştırıldığında su küründeki düşük dayanımlı numunelerde en yüksek anizotropi değeri 1.097, orta dayanımlı tasarımda 1.094 ve yüksek dayanımlı tasarımda 1.044 olarak bulunmuştur. Yine hava küründeki en yüksek anizotropi değerlerine bakıldığında, düşük dayanımlı tasarımda 1.674, orta dayanımlı tasarımda 1.568 ve yüksek dayanımlı tasarımda bu değer 1.264 olarak belirlenmiştir. X ve Y yönlerinde elde edilen özdirenç değerlerine bağlı karekök ortalama hata (RMSE) değerleri su küründe 0.29-0.50 iken hava küründe 2.90-20.89 arasında değişmektedir. Yine X ve Y yönlerinde özdirenç değişim yüzdesi su küründe  $\%2.43-6.21$  arasında iken hava küründe  $\%8.57-22.02$  arasındadır (Tablo 2 ve 3). Bu değerlerin farklı olmasının nedeni özdirenç, beton gözeneklerinin su ya da hava ile dolu olmasıdır ve gözeneklerin dağılım yönüne duyarlı olmasıdır. Bilindiği üzere elektrik akım

suda çok iletken iken havada yalıtkandır. Dolayısıyla, gözenekleri suya doymuş betonun öz direnci, gaz doymuş haline göre daha düşük elde edilir. Bu yüzden öz direnç yöntemi ile beton anizotropisinin belirlenmesi gaz doymuş betonlarda daha etkindir.

Tablo 2. Su küründeki donatılı betonların anizotropik değişimlerinin istatistiksel sonuçları.

Table 2. Statistical results of anisotropic changes of reinforced concrete in water curing.

Dayanım (MPa)	Donatı çapı (mm)	Su kürü			Aynı yüzeydeki öz direnç farkı (%)
		$A_n$ (ort)	$A_n$ (max)	RMSE (kΩcm)	
Düşük	10	1.031	1.097	0.40	5.70
	14	1.025	1.083	0.34	4.82
	20	1.022	1.061	0.29	4.22
Orta	10	1.033	1.081	0.49	6.21
	14	1.030	1.095	0.50	5.63
	20	1.024	1.084	0.38	4.50
Yüksek	10	1.014	1.044	0.36	2.71
	14	1.013	1.038	0.31	2.43
	20	1.015	1.037	0.38	2.87

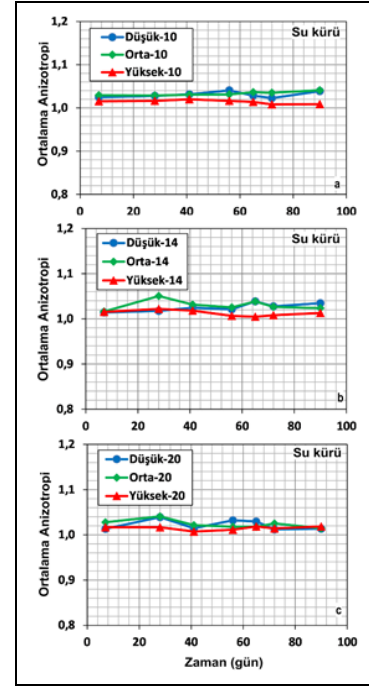
Tablo 3. Hava küründeki donatılı betonların anizotropik değişimlerinin istatistiksel sonuçları.

Table 3. Statistical results of anisotropic changes of reinforced concrete in air curing.

Dayanım (MPa)	Donatı çapı (mm)	Hava kürü			Aynı yüzeydeki öz direnç farkı (%)
		$A_n$ (ort)	$A_n$ (max)	RMSE (kΩcm)	
Düşük	10	1.159	1.514	20.89	22.02
	14	1.111	1.608	15.60	16.80
	20	1.124	1.674	14.07	18.54
Orta	10	1.107	1.568	7.12	16.06
	14	1.090	1.518	6.94	14.23
	20	1.104	1.222	13.8	18.33
Yüksek	10	1.082	1.248	5.02	13.76
	14	1.072	1.264	4.47	12.26
	20	1.048	1.150	2.90	8.57

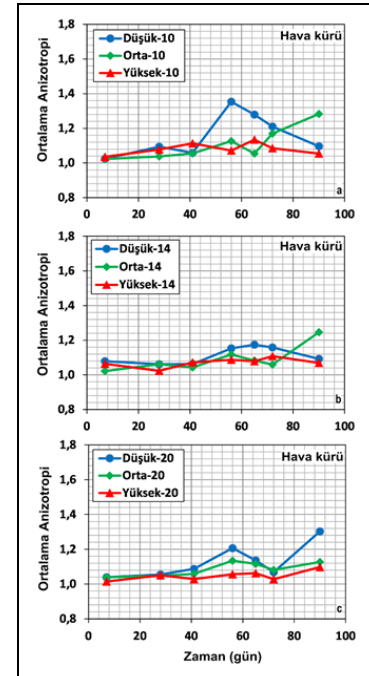
Su ve hava küründeki numunelerin zamana, kür koşullarına, dayanıma ve donatı çapına bağlı ortalama anizotropi değişimi Şekil 4 ve 5'te sunulmuştur. Şekil 4 ve 5 incelendiğinde aynı beton tasarımları için hava küründeki anizotropi değişiminin su kürüne kıyasla çok daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Su küründeki betonlarda anizotropi ( $A_n$ ) yaklaşık olarak 1'e yakın bulunmuştur. Bu durumda, su küründe dayanım farklılığı olmaksızın numunelerin izotrop olduğu sonucuna varılmıştır. Hava küründeki numunelerde ise anizotropi ortalama olarak 1.0-1.4 arasında elde edilmiştir. Bu durum gözeneklerin hava dolgulu olması ve bu nedenle de öz direnç değerlerinde büyük farklılıklar gözlenmesinden kaynaklanmıştır. Aynı zamanda gözenek yayılım doğrultusunun belirli bir yönde olmasının da bu değişim üzerinde etkisi vardır. Ayrıca Şekil 4 ve 5 beton dayanımı açısından incelenirse genel olarak düşük dayanımlı betonların anizotropi değeri daha fazla iken yüksek dayanımlı betonlarda düşük olduğu görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere gözeneklerin fazla olduğu betonların dayanımı gözenegi az olan betonlara nazaran daha düşük beklenir.



Şekil 4. Su küründeki 3 tasarıma ait; (a): 10 mm. (b): 14 mm ve (c): 20 mm çapında donatı içeren numunelerin zamana, dayanıma ve donatı çapına bağlı ortalama anizotropi değişimi.

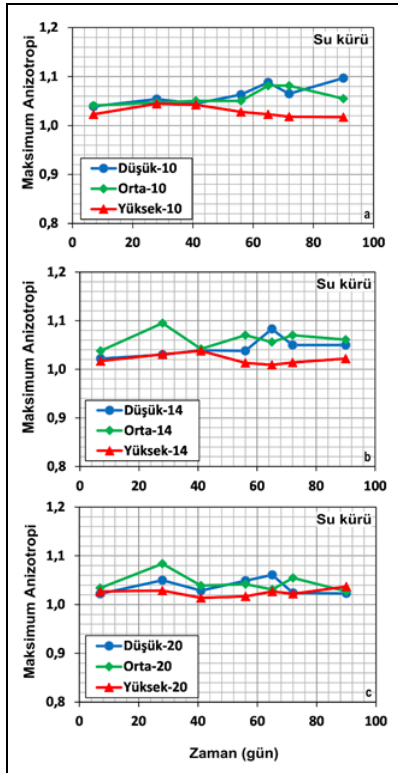
Figure 4. Average anisotropy change of the samples of 3 designs in water cure depending on time, strength and diameter of reinforcement (including (a): 10 mm. (b): 14 mm and (c): 20 mm diameter reinforcement).



Şekil 5. Hava küründeki 3 tasarıma ait; (a): 10 mm. (b): 14 mm ve (c): 20 mm çapında donatı içeren numunelerin zamana, dayanıma ve donatı çapına bağlı ortalama anizotropi değişimi.

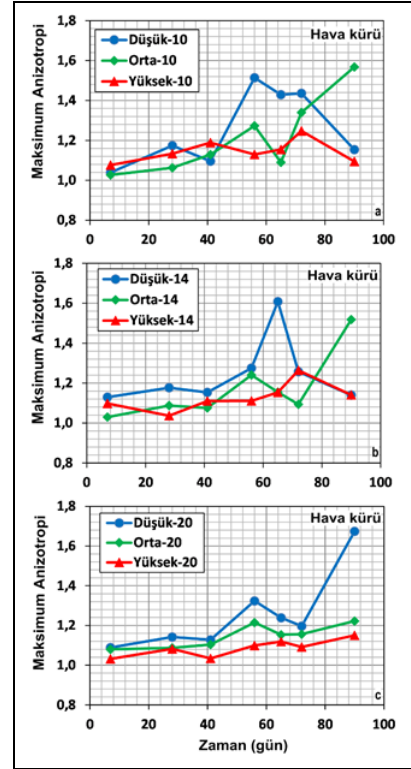
Figure 5. Average anisotropy change of the samples of 3 designs in air cure depending on time, strength and diameter of reinforcement (including (a): 10 mm. (b): 14 mm and (c): 20 mm diameter reinforcement).

Su ve hava küründeki donatılı numunelerin zamana, dayanıma ve donatı çapına bağlı maksimum anizotropi değişimi Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur. Bu şekiller her yüzeydeki anizotropi değişimine bakılıp en yüksek değişimin olduğu yüzeydeki değerlerin kullanılması ile elde edilmiştir. Böylece anizotropi etkisi daha net ortaya konulabilmektedir. Buna göre aynı dayanımlı betonlarda, su küründe 1.0-1.1 arasında değişen bir anizotropi gözlenirken, hava küründe anizotropi değişiminin 1.0-1.7 arasında olduğu görülmektedir. Numunelerin herhangi 2 veya daha fazla yüzeyindeki anizotropi katsayısının düşük çıkması (1'e yakın veya eşit olmasından dolayı izotrop), ortalama anizotropi miktarı belirlenirken diğer yüzey veya yüzeylerdeki anizotropi miktarlarını baskılamaktadır. Bu nedenle aşağıda elde edilen Şekil 6 ve Şekil 7 yardımıyla her numunedeki maksimum anizotropi değerini zamana bağlı olarak gözlemek mümkün olmuştur. Bu şekiller beton dayanımı açısından incelendiğinde yine düşük dayanımlı betonlarda anizotropi değerinin yüksek olduğu ve yüksek dayanımlı betonlarda düşük olduğu görülmektedir. Genellikle 41. günden sonra özellikle hava küründeki numunelerin anizotropi değerlerinde büyük artışlar gözlenmiştir. Bu durumda, laboratuvar koşulları dışında ya da yerinde, özellikle deniz etkisinden uzakta bulunan herhangi bir yapıda zaman geçtikçe betondaki su kaybı nedeniyle gözenekler daha çok hava ile dolacağından anizotropi derecesinin artacağı dolayısıyla da beton dayanımının farklılık göstereceği düşünülmektedir.



Şekil 6. Su küründeki 3 tasarıma ait; (a): 10 mm. (b): 14 mm ve (c): 20 mm çapında donatı içeren numunelerin zamana, dayanıma ve donatı çapına bağlı maksimum anizotropi değişimi.

Figure 6. Maximum anisotropy change of the samples of 3 designs in water cure depending on time, strength and diameter of reinforcement (including (a): 10 mm. (b): 14 mm and (c): 20 mm diameter reinforcement).



Şekil 7. Hava küründeki 3 tasarıma ait; (a): 10 mm. (b): 14 mm ve (c): 20 mm çapında donatı içeren numunelerin zamana, dayanıma ve donatı çapına bağlı maksimum anizotropi değişimi.

Figure 7. Maximum anisotropy change of the samples of 3 designs in air cure depending on time, strength and diameter of reinforcement (including (a): 10 mm. (b): 14 mm and (c): 20 mm diameter reinforcement).

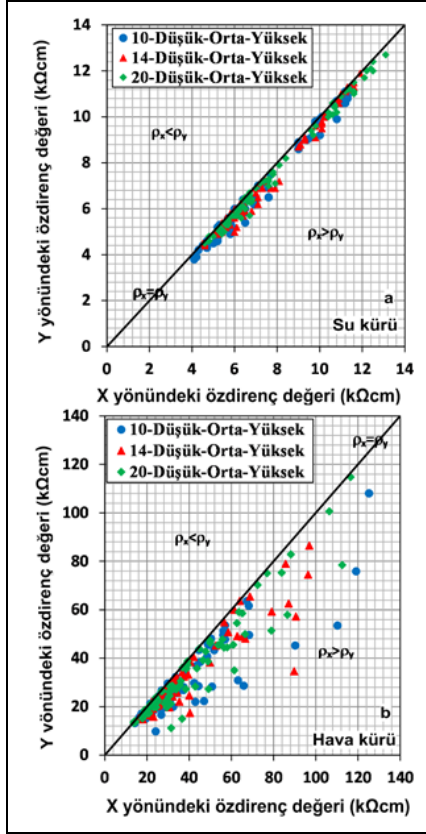
Şekil 8'de ise su ve hava küründeki donatılı numunelerin özdirenç değerlerinin değişimi yönüyle donatı çapına bağlı olarak sunulmuştur. Su küründeki numunelerde X ve Y yönlerinde 4 yüzey üzerindeki ölçülerden elde edilen özdirenç değerleri birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır ve donatı ayırımının yapılamadığı görülmektedir. Bunun sebebi suya doygun numunelerin özdirenç değerinin düşük olması ve iletken olan donatının da özdirenç değerini düşürmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Fakat hava kürüne maruz bırakılmış numunelerde donatı çapına bağlı anizotropi ayrımı daha net görülmektedir. Bu numunelerde gözeneklerin dağılım yönü ve hava dolgulu olmasına bağlı olarak özdirenç değerinde saçılmalar gözlenmiştir.

Burada 10 mm donatı içeren numunelerin yöne bağlı özdirenç değerlerinde oluşan farklılık en fazla, 20 mm donatı içeren numunelerde ise en az olarak bulunmuştur.

İnşaat mühendisliğinde laboratuvar çalışmalarında veya mevcut betonarme yapıların kalite kontrolü yapılırken beton dayanımı ve özelliklerinin belirlenmesi son derece önemlidir. Mevcut yapılarda beton dayanımı için istenilen yerlerden karot alınır ve tek eksenli basınç deneyi yardımıyla dayanımlar belirlenir. Ancak, jeofizik yöntemler yardımıyla yapıya herhangi bir tahribat vermeden dayanımına yaklaşım yapılabilmektedir. Özdirenç yöntemi ile bu yaklaşım yapılırken, betonun su veya havaya doygun olması farklı dayanım değerleri elde edilmesine sebep olmaktadır.

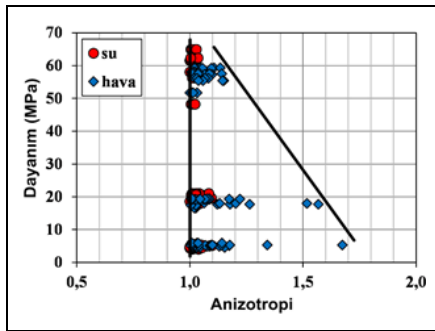


Özellikle düşük dayanımlı betonlarda suya doygunluk ile birlikte öz direnç değerleri çok daha düşüktür [8]. Şekil 9'da donatılı betonların dayanım ve kür koşullarına bağlı anizotropik değişimi gösterilmiştir. Burada beton dayanımları belirlenirken 7., 28. ve 90. günlerde 3'er adet numunenin ortalama basınç dayanımları belirlenerek hesaplamalar yapılmıştır. Anizotropi değerleri de bu günlerdeki ölçümlerden belirlenen öz direnç değerlerinden hesaplanmıştır.



Şekil 8. 3 tasarımın birlikte değerlendirilmesi ile elde edilen; (a): Su ve (b): hava küründeki donatılı (10, 14, 20 mm) numunelerin yön bağımlı öz direnç değerlerinin donatı çapına bağlı değişimi.

Figure 8. The variation of directional dependent resistivity values of reinforced samples (10, 14, 20 mm) in (a): Water and (b): air curing obtained by evaluating 3 designs together depending on the reinforcement diameter.



Şekil 9. Donatılı betonların dayanım ve kür koşullarına bağlı anizotropi ile değişimi.

Figure 9. The variation with anisotropic of reinforced concretes depending on strength and curing conditions.

Şekil 9'da görüldüğü gibi su küründeki numunelerde Anizotropi değeri genellikle 1'e yakın bulunmuştur. Ancak hava küründe anizotropi miktarı dayanımın azalmasıyla artış göstermektedir. Bu durum dayanımın azalmasına bağlı olarak gözenek miktarlarındaki artış, bu gözeneklerin belirli bir yöne bağlı olarak gelişmesi ve hava doygun olması öz direnç değerlerinde büyük farklılıkların oluşmasını doğurmaktadır.

## 5 Sonuçlar

Betonarme bir yapı elemanında boşluk ve çatlak durumu, beton dayanımı ve kalitesi, gözeneklerin su veya havaya doygunluğu, korozyon miktarı, donatıların konumu ve sayısı, kullanılan betonun fiziksel ve mekanik özellikleri, anizotropi derecesi gibi birçok parametre yapıya herhangi bir hasar vermeden tahribatsız jeofizik yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bu parametreler belirlenirken betondaki su/çimento oranı, kür koşulları ve donatı içeriği önemli olmaktadır.

Yapılan çalışmada mukavemetleri farklı 3 tasarıma ait donatılı numunelerin 4 yüzeyinde zamana bağlı olarak gelişen anizotropi değişimi su ve hava kürü için ayrı ayrı ortaya konulmuştur. Buna göre yöne bağlı anizotropi değişimi donatı çapına bağlı olarak su küründe ortalama olarak 1.013-1.033 arasında değişirken (%2 civarında), hava küründe 1.048-1.159 (%10 civarında) arasında değişmektedir. Ayrıca su küründeki numunelerde en büyük anizotropi düşük dayanımlı numunede 1.097 ve hava küründe yine düşük dayanımlı numunede 1.674 değerleri elde edilmiştir.

Elektrik öz direnç yöntemi kür koşullarından etkilenmektedir. Farklı kür koşullarındaki aynı tasarıma ait numunelerin gözeneklerinin su veya hava dolgulu olması öz direnç değerlerini oldukça değiştirmektedir. Özellikle hava küründeki numunelerin öz direnç değerlerinde bariz değişiklikler elde edilmiştir. Bu durum, numuneler içerisindeki gözeneklerin farklı yönlerde gelişmesi ve bu gözeneklerin hava ile dolu olmasının bir sonucudur.

Su ve hava gruplarının öz direnç değerlerinin yöne bağlı değişimi incelendiğinde özellikle hava grubunda büyük RMSE elde edilmiştir. Bunun nedeni gözenekleri hava dolgulu küp numunelerin gözeneklerinin dağılım yönüne öz direnç değerinin daha duyarlı olması olabilir. Su küründe ise yöne bağlı öz direnç değişim farkı, düşük dayanımlı numuneler içerisinde elde edilmiştir.

Sonuç olarak öz direnç yöntemi ile numunelerin yöne bağlı olarak değişimini irdelemek mümkündür. Ancak suya doygun betonarme yapılarda anizotropinin öz direnç yöntemi ile belirlenmesinin zor olduğu düşünülmektedir. Buna karşın hava doygun betonarme yapılarda öz direnç yöntemi ile anizotropi belirlenebilmektedir. Suya doygun yapılarda öz direnç yöntemi yerine Ultrasonik yöntemle belirlenen P ve S dalga hızlarının birlikte kullanımı ile daha yararlı sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

## 6 Conclusions

In a reinforced concrete building element, many parameters such as void and crack condition, concrete strength and quality, water or air saturation of pores, amount of corrosion, location and number of reinforcements, physical and mechanical properties of the concrete used, degree of anisotropy can be determined by non-destructive geophysical methods without damaging the structure. While determining these parameters, water/cement ratio, curing conditions and reinforcement content in concrete are important.

In the study, the change of anisotropy that develops depending on the time on the 4 surfaces of the reinforced samples belonging to 3 designs with different strengths has been separately revealed for water and air curing. Accordingly, while the values of anisotropy depending on the directional of measurement and diameter of the reinforcement vary between 1.013-1.033 (around 2%) in the water cure, they change between 1.048-1.159 (around 10%) in the air cure. In addition, the biggest anisotropy in water curing samples was obtained with 1.097 in low strength samples and in air curing with 1.674 values in low strength samples.

Electric resistivity method is affected by curing conditions. The water or air filling of the pores of the samples in different curing conditions of the same design changes considerably the resistivity values. Especially, significant changes have been obtained in the resistivity values of air curing samples. This situation is a result of being in different directions of the pores of the sample and being filled with air of them.

When the variation depending on measurement directional of the resistivity values of the water and air groups is examined, big RMSE has been especially obtained in the air group. This may be because the resistivity value is more sensitive to the distribution direction of the cube sample pores whose pores are filled with air. In the water cure, the diversity in direction-dependent resistivity values was obtained from low-strength samples.

As a result, it is possible to examine the variation of the samples depending on the direction with the resistivity method. However, in reinforced concrete structures saturated with water, it is thought that anisotropy is difficult to determine by the resistivity method. On the other hand, anisotropy can be determined by the resistivity method in air-saturated reinforced concrete structures. It is thought that more useful results can be obtained by using P and S wave velocities determined by ultrasonic method instead of resistivity method in water saturated structures.

## 7 Kaynaklar

- [1] Winterstein DF. "Velocity anisotropy terminology for geophysicists". *Geophysics*, 55(8), 1070-1088, 1990.
- [2] Thompson TA, Evans B. "Stress-induced anisotropy: the effects of stress on seismic wave propagation". *Exploration Geophysics*, 31(3), 509-514, 2018.
- [3] Uyanık O, Sabbağ N, Çatlıoğlu B, Uyanık NA, Öncü Z. "Sismik ultrasonik hızlardan kayaçların kırıklılık ve fissür indekslerinin belirlenmesi". *1. Yerbilimleri Sempozyumu Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 18-20 Ekim 2012a*.
- [4] Uyanık O, Kaptan K, Gülay FG, Tezcan S. "Beton dayanımının tahribatsız ultrasonik yöntemle tayini". *Yapı Dünyası*, 184, 55-58, 2011.
- [5] Uyanık O. "Sismik hızlardan beton dayanımının belirlenmesi". *Jeofizik Bülteni*. 23, 25-30, 2012.
- [6] Sabbağ N, Uyanık O. "Time-dependent change of seismic velocities on low-strength concrete". *The Online Journal of Science and Technology*, 6(4), 49-57, 2016a.
- [7] Sabbağ N, Uyanık O. "Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities". *Journal of Applied Geophysics*, 141, 13-23, 2017.
- [8] Sabbağ N, Uyanık O. "Determination of the reinforced concrete strength by apparent resistivity depending on the curing conditions". *Journal of Applied Geophysics*, 155, 13-25, 2018a.
- [9] Sabbağ N, Uyanık O. "Determination of reinforced dry concrete strength by electrical resistivity method". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1230-1236, 2018b.
- [10] Kurtuluş C, Çiçek S, Irmak TS. "Experimental study on compressive strength, ultrasonic pulse velocity and water content of concrete at early ages after a 28. day curing period". *Eastern Anatolian Journal of Science*, 6(2), 31-39, 2018.
- [11] Uyanık O, Çatlıoğlu B, Uyanık NA, Öncü Z, Sabbağ N. "Kentsel dönüşüm projelerinde betonarme yapıların beton kalitesinin sismik ultrasonik hızlardan belirlenmesi". *1. Yerbilimleri Sempozyumu Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 18-20 Ekim 2012b*.
- [12] Özçelik E, Gelişli K. "Investigation of concrete quality and structure reinforcement conditions in reinforced concrete structures by geophysical methods". *Journal of Applied Earth sciences*, 17(1), 1-11, 2018.
- [13] Sabbağ N, Uyanık O. "Change of electrical resistivity depending on water saturation of the concrete samples". *European Geosciences Union Conference, Vienna, Austria, 17-22 April 2016b*.
- [14] Sabbağ N, Uyanık O. "Relationship between change of water content and electrical resistivity method in the concrete". *International Conference on Engineering and Natural Science, Bosnahersek, Saraybosna, 24-28 May 2016c*.
- [15] Uyanık O, Çatlıoğlu B, Sabbağ N, Öncü Z, Uyanık NA. "Kayaçların fiziksel özellikleri ile sismik ultrasonik hızlar arasındaki ilişkilendirmeler". *1. Yerbilimleri Sempozyumu Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 18-20 Ekim 2012c*.
- [16] Sabbağ N, Uyanık O. "Doğgun betonların statik ve dinamik elastik parametrelerinin karşılaştırılması". *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18, 1181-1189, 2018c.
- [17] Ceryan Ş, Tüdeş Ş, Ceryan N, Aydın A. "Kürtün granodiyorit'indeki ayrılmış kaya malzemesinin sınıflandırılmasında ve mühendislik özelliklerinin tahmin edilmesinde elastik dalga hızının kullanılması". *PAU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 213-322, 2007.
- [18] Uyanık O, Sabbağ N, Uyanık NA, Öncü Z. "Prediction of mechanical and physical properties of some sedimentary rocks from ultrasonic velocities". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 6003-6016 2019.
- [19] Uyanık O, Ulugergerli E. "Quality control of compacted grounds using seismic velocities". *Near Surface Geophysics*, 6(5), 299-306, 2008.
- [20] Ulugergerli E, Uyanık O. "Statistical correlations between seismic wave velocities and SPT blow counts and the relative density of soils". *Journal of Testing and Evaluation*, 35(2), 187-191, 2007.
- [21] Uyanık NA, Uyanık O, Gür F, Aydın İ. "Natural radioactivity of bricks and brick material in the Salihli-Turgutlu area of Turkey". *Environmental Earth Sciences*, 68(2), 499-506, 2013.
- [22] Uyanık NA, Öncü Z, Uyanık O, Bozcu M, Akkurt İ, Günoğlu K, Yağmurlu F, "Distribution of natural radioactivity from 40K radioelement in volcanics of Sandıklı-Şuhut (Afyonkarahisar) area". *Acta Physica Polonica A*, 128 (2-B), 438-440, 2015.



- [23] Uyanık NA, Öncü Z, Uyanık O, Akkurt İ. "Determination of natural radioactivity from 232Th with gamma-ray spectrometer in Dereköy-Yazır (Southwestern Anatolia)". *Acta Physica Polonica A*, 128(2B), 441-442, 2015.
- [24] Özçep F, Yıldırım E, Aşçı M, Tezel O, Karabulut S. "Correlation between electrical resistivity and soil-water content based artificial intelligent techniques". *International Journal of Physical Sciences*, 5(1), 47-56, 2010.
- [25] Özçep F, Zarif H, Aşçı M, Tezel O. "Correlation between electrical resistivity and soil-water content: Istanbul and Golcuk". *International Journal of Physical Sciences*, 4(6), 362-365, 2009.
- [26] Lataste JF, Sirieix C, Breyse D, Frappa M. "Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering". *NDT & E International*, 36(6), 383-394, 2003.
- [27] Uyanık O. *Klasik ve Jeofizik Yöntemlerle Yapı İncelemeleri (Yapı Jeofiziği)*. 1. Baskı. Ankara, Türkiye, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları, 2014.
- [28] Beres J, Zeyen H, Sénéchal G, Rousset D, Gaffet S. "Seismic anisotropy analysis at the low-noise underground laboratory (LSBB) of Rustrel (France)". *Journal of Applied Geophysics*, 94, 59-71, 2013.
- [29] Lane JW, Haeni FP, Waston WM. "Use of a square-array direct-current resistivity method to detect fractures in crystalline bedrock in New Hampshire". *Ground Water*, 33(3), 476-485, 1995.
- [30] Kaya MA. *Restorasyon Amaçlı Jeofizik Çalışmalar*. Prof. Dr. Rahmi Pınar Kentleşme ve Yapı İncelemeleri Çalıştayı Kitabı, 1. Baskı. İzmir, Türkiye, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayını, 28, 61-70, 2017.
- [31] Kaya MA. *Arkeojeofizik Araştırmalar*, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası, Meslek İçi Eğitim ve Belgelendirme Kurs Notları, 2, Ankara, Türkiye, 2007.
- [32] Akca A, Balkaya Ç, Pülz A, Alanyalı HS, Kaya MA. "Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of side (Antalya, Southern Turkey)". *Journal of Applied Geophysics*, 163, 22-30, 2019.
- [33] Candansayar ME, Uluggerli E, Batmunkh D, Tosun S, Gündoğdu B, "Doğru akım öz direnç verilerinin 2B ters çözümü ve iki yönlü gradyan dönüşümü ile arkeolojik yapıların aranması Moğolistan'daki Türk anıtları etrafında yapılan jeofizik çalışmalar". *Jeofizik*, 15, 105-123, 2001.
- [34] İlkişik OM, Bayrak M, Başaran S, Uluggerli E. "Enez Çataltepe Tümülüs'ünde elektromagnetik VLF ve elektrik araştırmalar". *Jeofizik*, 9, 19-23, 1995.
- [35] Candansayar ME. *Yapı Jeofiziğinde Kullanılan Elektrik ve Elektromanyetik Yöntemler*. Jeofizikte Hasarsız Yapı İnceleme Çalıştayı Kitabı, 1 Baskı. Kocaeli, Türkiye, Jeofizik Mühendisleri Odası Kocaeli Şubesi Yayını, 2015.
- [36] Ferreira RM, Jalali S. "Quality control based on electrical resistivity measurements". In *Proceedings of the European Symposium on Service Life and Service ability of the Concrete Structures*, Helsinki, Finland, 12-14 June 2006.
- [37] Simon TK, Vass V. "The electrical resistivity of concrete". *Concrete Structures*, 13, 61-64, 2012.
- [38] Lim DTY, Divsholi BS, Xu D, Teng S. "Evaluation of high performance concrete using electrical resistivity technique". *36th Conference on Our World in Concrete and Structures*, Singapore, 14-16 August 2011.
- [39] Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations (NEA/CSNI/R). "Electrochemical Techniques to Detect Corrosion in Concrete Structures in Nuclear Installations". Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France, Technical Note, 21, 2002.
- [40] Carino NJ. "Nondestructive techniques to investigate corrosion status in concrete structure". *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 13(3), 96-106, 1999.
- [41] Lataste JF. "Electrical resistivity for the evaluation of reinforced concrete structures". *Non-Destructive Testing Methods, in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 2, 243-275, 2010.
- [42] Chouteau M, Beaulieu S. "An investigation on application of the electrical resistivity tomography method to concrete structures". *Second Annual Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*, Los Angeles, California, 15-19 April 2002.
- [43] Lataste JF, Behloul M, Breyse D. "Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements". *NDT&E International*, 41(8), 638-647, 2008.
- [44] Lataste JF, Sirieix C, Breyse D, Frappa M. "Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering". *NDT & E International*, 36(6), 383-394, 2003.
- [45] Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, Bruand A, Richard G. "Electrical resistivity survey in soil science: A review". *Soil Tillage Research*, 83, 173-193, 2006.
- [46] Mailler R. "The fundamental equations of electrical prospecting". *Geophysics*, 12(4), 637-648, 1974.
- [47] Sabbağ N. *Beton Kalitesinin Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2016.