

Kendiliğinden Yerleşen Harçların Elektriksel Özdirenci Üzerine Mineral Katkıların Etkisi

Tayfun UYGUNOĞLU*¹, İlker Bekir TOPÇU², Barış ŞİMŞEK³, Emriye ÇINAR¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

³Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Çankırı

(Alınış / Received: 12.06.2017, Kabul / Accepted: 04.01.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 17.04.2018)

Anahtar Kelimeler

Mineral katkı,
Harç,
Elektriksel özdirenç

Özet: Elektriksel özdirenç ölçümleri farklı mühendislik dallarında ihtiyaç duyulan bilgilerin bir kısmının sağlanması için oldukça fayda sağlamaktadır. Bu çalışmada kendiliğinden yerleşen harçlarda kullanılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, tuğla tozu ve kırmataş tozu gibi mineral katkıların elektriksel özdirenç değerine etkisi araştırılmıştır. Her bir mineral katkı %0, %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek farklı seriler tasarlanmıştır. Laboratuvar ortamında beş yıl kür edilen harçların elektriksel özdirençleri iki plaka yöntemine göre belirlenmiştir. Elektriksel özdirenç değerleri 0.1, 0.12, 1, 10 ve 100 kHz olmak üzere farklı frekans değerleri için elde edilmiştir. Etüv kurusu harçlarda elde edilen elektriksel özdirenç sonuçlarına göre silis içeriği yüksek olan mineral katkıların kullanımı elektriksel özdirenç değerini düşürürken, kalsiyum oksit içeriği yüksek olan mineral katkıların kullanımı ile harçların özdirenç değerinin önemli derecede arttığı gözlenmiştir.

Effect of Mineral Additives on Electrical Resistivity of Self Consolidating Mortars

Keywords

Mineral admixture,
Mortar,
Electrical resistivity

Abstract: Electrical resistivity measurements are very useful for providing some of the information needed in different engineering disciplines. In this study, the effect of mineral admixtures, such as blast furnace slag, fly ash, silica fume, brick dust and crushed stone dust used in self-consolidating mortars, on electrical resistivity was investigated. The different series are designed by replacing of each mineral additive with cement in ratio of 0%, 10%, 20% and 30%. The electrical resistivity values of the mortars that cured for five years in the laboratory environment were determined according to the two plate method. The electrical resistivity values were obtained for different frequency values of 0.1, 0.12, 1, 10 and 100 kHz. According to the electrical resistivity results obtained from the mortar samples, it was observed that the use of mineral admixtures with high silica content reduced the electrical resistivity value while the resistivity of the mortars increased significantly by the use of mineral admixtures with high calcium oxide content.

1. Giriş

Bir yapı malzemesi olarak betonun özdirenci, elektriği geçirme yeteneği olan iletkenlik kuramıyla bağlıdır. Betonda akım, gözeneklerdeki sıvıda çözülmüş iyonlar tarafından taşınır. Hem doygunluk oranı yüksek, hem de daha fazla ve geniş çaplı gözeneklere sahip betonlar (su/çimento oranı yüksek) daha düşük bir özdirence neden olur [1]. Diğer bir ifadeyle, betonun sabit bir nem durumu için, su/çimento oranının azaltılması ile elektriksel

özdirenç değeri daha yüksek değerler alır [2]. Maddenin fiziksel bir özelliği olan elektriksel özdirenç, çeşitli elektriksel ve elektromanyetik yöntemlerle belirlenebilir. Örneğin malzemenin özdirenç değerinin elde edilebilmesi için iki noktadan akım verilir ve diğer iki nokta arasındaki gerilim farkı ölçülerek, görünür özdirenç değerleri hesaplanır. Görünür özdirenç bir fiziksel kavram olup, ölçülen veriyi daha anlaşılabilir biçime dönüştüren bir düzleştirme işlemidir. Bir diğer yöntem de malzemenin elektriksel direncinin ölçülmesi ve buna

*İlgili yazar: uygunoglu@aku.edu.tr

bağlı olarak malzemenin fiziksel özellikleri de kullanılarak elektriksel özdirencinin belirlenmesidir.

Elektrik iletkenliği çimento bazlı sistemlerde iyonların boşluk solüsyonlarında hareket etmeleriyle meydana gelir. İletkenlik hem poroziteye hem de boşluk solüsyonu iletkenliğine bağlıdır. Bazı araştırmacılar betonun elektriksel özdirenci ile diğer özellikleri arasında bağıntı kurmaya çalışmışlardır. Layssi vd. [3] yaptıkları çalışmada betonların elektriksel özdirenci ile dayanımı arasında bir ilişki kurmayı hedeflemişlerdir. Elektriksel özdirenç ölçümlerinde hem Wenner prob hem de karşılıklı plaka tekniklerini kullanıp dayanım ile arasında güçlü bir korelasyon bulmuşlar, beton dayanımının belirlenmesinde tahribatsız bir deney yöntemi olarak kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir. Gongu vd. [4] karbon siyahı ile karıştırılmış 0-3 mm agregalı çimento esaslı kompozitlerin piezoelektrik ve dielektrik özelliklerini incelemişlerdir. Karbon siyahının iletken özelliği ile az miktarda kullanılması durumunda bile kompozitlerin piezoelektrik hassasiyetini önemli ölçüde arttırdığını göstermişlerdir. Mancio vd. [5] yaptıkları çalışmada betonun su/çimento oranı ile elektriksel özdirenç arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Elektriksel özdirenç yöntemi ile taze betonun su/çimento oranının belirlenebileceğini ve aralarında kuvvetli bir ilişki olduğunu saptamışlardır. Silva vd. [6] betonun mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile betonun elektriksel özdirenci arasındaki ilişkiyi araştırmışlar, betonun diğer özellikleri ile elektriksel özdirenci arasında iyi bir korelasyon gözlemlemişler, elektriksel iletkenliğin betonun dayanım ve dayanıklılığını saptamada ek bir model olabileceği sonucuna varmışlardır. Şengül vd. [7] ise uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren betonlarda klor iyon geçirgenliği ve elektriksel özdirenç deneyleri yapmışlardır. Elde sonuçlar cüruf ilave edilmesinin betonların klor iyonu geçirimsizliklerinin önemli oranda azalttığını ortaya koymuştur. Cüruf içeren betonların elektriksel özdirençlerinin, sadece Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre büyük oranda arttığı gözlenmiştir. Elektriksel özdirenç ölçümlerinin, yapım sürecinde, elde edilen beton klor geçirimsizliklerinin izlenmesi ile kalite kontrolü için uygun bir yöntem olduğu sonucuna varıldığı belirtilmiştir. Polder [2] betonun elektrik direncinin, donatının paslanmasını içeren; i) başlama (klorür penetrasyonu) ve ii) yayılma (korozyon hızı) gibi iki işlemle ilgili olabileceğini belirtmiştir: Betonun düşük özdirenç değeri hızlı klorür penetrasyonu ve yüksek korozyon hızıyla ilgili olduğundan, klorüre maruz kalan bir yapının elektriksel özdirencinin erken korozyon hasarı riskini ortaya koyacağı da belirtilmiştir [2].

Birçok özellikle ilişkilendirilebilen betonun veya harcın elektriksel özdirenci beton bileşenlerinin

değişkenliği ile de farklı değerler olacaktır [8]. Çimento gibi öğütölmüş veya toz halde silolarda depolanan uçucu kül, silis dumanı, taş unu, cüruf vb. çeşitli maddelere mineral katkı adı verilmektedir. Mineral katkılar tek başlarına bağlayıcılık özelliği göstermezler, fakat çimentoyla birlikte kullanıldıklarında bazıları puzolanik özelliklerinden dolayı çimentoya benzer görev yaparlar, dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katkılar gibi düşük enerjili yoğun malzemeler, Portland çimentosunun neden olduğu ekonomik ve çevreye olan etkilerinin azaltılması amacıyla ya doğrudan ya da çimento yerine ikame edilerek çimento esaslı kompozitlerin üretiminde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır [9]. Bu ürünlerin başında çimento ve mineral katkıların bir arada kullanıldığı ve yüksek akışkanlığa sahip olan kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) gelmektedir. KYB'nin yüksek akışkanlığa sahip olabilmesi için, harcının (KYH) özel reolojik gereksinimlere sahip olması gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi yüksek akışkanlık sağlayan kimyasal katkıların yanı sıra, yine normal betonla karşılaştırıldığında fazla miktarda ince malzeme kullanılmasıdır. Bu ince malzemeler hem çimentonun miktarını azaltarak hidrasyon ısısını düşürmek hem de daha ekonomik beton elde etmek için genellikle uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı tozu ve tuğla tozu gibi malzemelerdir [10]. Beton veya harç gibi çimentolu malzemelerde farklı amaçlarla kullanılan bu mineral katkıların olumlu özellikleri yanı sıra fazla miktarda kullanılmaları durumunda, özellikle SiO₂ açısından zengin olanlar yani puzolanik özeliğe sahip olanlar donatı üzerindeki çökelmiş Ca(OH)₂'leri (CH) bağlayarak pasivasyon tabakasının ortadan kalkmasına ve korozyon sürecinin başlamasına neden olmaktadır [11]. Bu süreçte bazen yıllar sonra görülebilmektedir. Beton içine gömölü donatıların korozyon durumları da genellikle betonun elektriksel özdirencinin ölçülmesine dayanmaktadır. Şöyle ki, betonun içerisindeki CH'ların varlığı betonun pH değerinin yüksek olmasını sağlamakta ve bu da betonu bazik halde tutarak elektriksel özdirencinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Şayet çeşitli nedenlerle CH miktarında azalma olursa betonun pH değeri de azalacak ve elektriksel özdirenç değeri de düşerek donatı korozyonunun başlaması hızlanacaktır. Mineral katkıların beton veya harçtaki etkilerinin tam olarak ortaya çıkması için uzun bir zaman gereklidir. Özellikle KYB ile üretilmiş mevcut yapıların ileriki yıllarda donatı korozyonu açısından değerlendirilebilmesi amacıyla içerisindeki mineral katkı tipine bağlı olarak elektriksel özdirenç değerlerinin nasıl değişeceği bilinmelidir. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen harçlarda kullanılan mineral katkıların farklı tipte ve oranda kullanılması durumunda ileriki yaşlarda harcın elektriksel özdirencine olan etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan malzemeler

Kendiliğinden yerleşen harçların üretiminde kullanılan mineral katkılardan kırma-taş tozu (TAS) Afyonkarahisar'da bulunan Kolsan Hazır Beton Tesislerinden alınmıştır. Bunlardan çimento (Ç), CEM I 42.5/R tipinde Afyon Set Çimento fabrikası ürünüdür. Uçucu kül (UK) ve silis dumanı (SD) sırasıyla Tunç bilek Termik Santrali ve Etibank Antalya Elektrometalurji Sanayi İşletmesi'nden temin edilmiştir. Tuğla tozu (TU), Afyonkarahisar'da bulunan bir tuğla fabrikasının kırık ve atık tuğlalarının bilyalı değirmende öğütülerek 125 µm'den elenmesiyle elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufu da Bolu Çimento'dan getirilmiştir. Portland çimentosunun ve mineral katkıları olan uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, tuğla tozu ve kırmataş tozunun kimyasal analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi, Doğaltaş Analiz Laboratuvarında yaptırılmış olup, sonuçlar Tablo 1'de toplu bir şekilde sunulmuştur. Tablo 1'de ayrıca bağlayıcı ve mineral katkılara ait özgül ağırlık ve incelik değerleri de verilmiştir. Mineral katkıların tane boyutu analizi ise malzemelerin %10, %50 ve %90'ının geçebildiği elek aralıkları olarak Tablo 2'de verilmiştir.

2.2. Harç üretimleri

Agregadan kaynaklanan betonun heterojenliğini azaltmak için deneyler harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Harç üretimleri 0.50 su/bağlayıcı oranında ve %2 kimyasal katkı içeriğinde üretilmiştir. Mineral katkı tipi olarak da uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC), tuğla tozu (TU) ve kırma-taş tozu (TAS) kullanılmış olup bu katkıların karakteristik özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Mineral katkılar, %0, %10, %20 ve %30 oranlarında çimentoyla yer değiştirilerek

Tablo 2. Mineral katkıların %10, %50 ve %90'ının geçtiği elek aralıkları

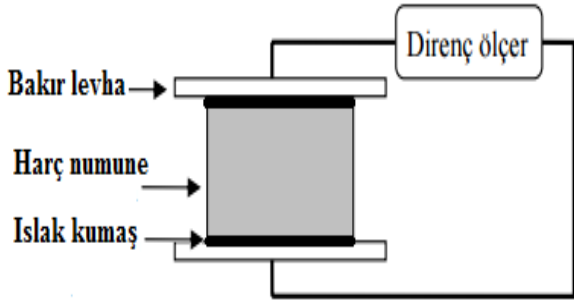
Mineral Katkı	d(10)	d(50)	d(90)
	Elek aralığı (µ)	Elek aralığı (µ)	Elek aralığı (µ)
Çimento	2.96	20.95	53.54
Uçucu K.	6.9	34.14	113.78
Silis D.	1.06	10.84	29.16
YFC	0.84	8.55	27.57
Tuğla T.	1.24	11.25	65.89
Taş Tozu	4.95	66.51	125.61

kullanılmıştır. Harçların üretimlerinde çimento ve mineral katkıların toplamı olan bağlayıcı miktarı tüm serilerde 500 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Agregada olarak da 0-1 mm elek aralığında kırma kum kullanılmıştır. Beş farklı mineral katkı ve dört farklı mineral katkı içeriği olmak üzere toplam 20 farklı kendiliğinden yerleşen harç (KYH) serisi tasarlanmıştır.

Harç üretimleri, kapasitesi yaklaşık 5 l olan harç mikseri ile gerçekleştirilmiştir. Harçların karışımında, agregada ve ince malzemeler ile 1 dakika boyunca kuru karışım yapıldıktan sonra karışım suyunun yaklaşık üçte ikisi karışıma ilave edilmiştir. Kalan su içerisinde kimyasal katkı çözülerek karışıma katılmış ve 3 dakika daha karışıma devam edilmiştir. Hazırlanan karışımlar 40x40x160 mm boyutlu prizmatik kalıplara konulmuştur. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan alınarak 20±2°C kirece doygun su içerisinde 28 gün kür edilmiştir. Daha sonra kür havuzundan çıkarılan harçlar, mineral katkıların hidratasyon üzerindeki etkilerinin tam olarak belirgin hale gelmiş olması ve mevcut yapılarıdaki etkiyi görebilmek amacıyla laboratuvar ortamında 5 yıl boyunca bekletilmişlerdir. Nem koşullarının etkisinden bağımsız halde ölçüm yapabilmek için

Tablo 1. Çimento ve mineral katkıların karakteristik özellikleri

Bileşen %	Ç	YFC	UK	SD	TU	TAS
CaO	63.6	39.8	6.66	1.48	4.56	51.4
SiO ₂	16.6	32.8	47.4	74.7	50.7	2.96
CaO/ SiO ₂	3.83	1.21	0.14	0.02	0.09	17.36
Al ₂ O ₃	4.72	11.8	19.8	0.46	23.8	1.13
Fe ₂ O ₃	3.27	1.45	11.8	0.84	8.32	0.2
S+A+F	-	46.05	79.0	76.0	82.8	4.3
MgO	1.91	4.15	4.76	3.64	2.28	1.0
Na ₂ O	0.34	0.51	0.57	0.85	0.98	0.03
K ₂ O	1.06	0.91	2.62	5.05	4.34	0.14
SO ₃	4.72	2.06	1.86	2.48	0.98	0.03
K.K.	2.69	2.2	2.76	5.97	2.45	42.9
Özgül ağırlık	3.07	2.8	1.99	2.44	2.73	2.72
Özgül yüzey, cm ² /g	3312	4982	3126	14000*	3954	2427



Şekil 1. Elektriksel direnç ölçüm düzeneği

etüv kurusu duruma getirilmiş harç numuneler üzerinde ASTM C 1760 [12] standardına uygun olarak direnç ölçer (ohm-metre) ile iki plaka yöntemine göre elektriksel direnç değeri (R) ölçülmüştür (Şekil 1). Her seriden üç tekrarlı ölçüm yapılarak aritmetik ortalama değerleri alınmıştır.

Direnç değerleri (R) ölçülen harçların elektriksel özdirenç değerleri de aşağıda verilen denklem (1) ile belirlenmiştir.

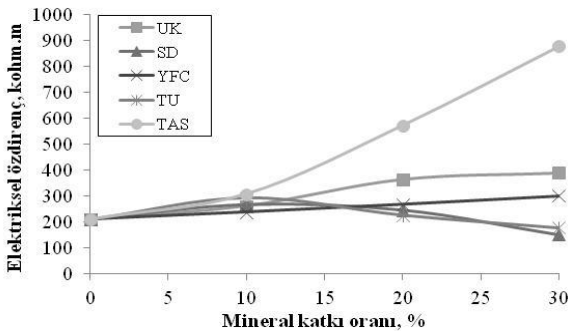
$$\delta = R \frac{A}{L} \quad (1)$$

Denklemde, δ , elektriksel özdirenç (kohm.m); R, direnç (kohm); A, numune yüzey alanı (m²) ve L, plakalar arası mesafeyi (m) simgelemektedir.

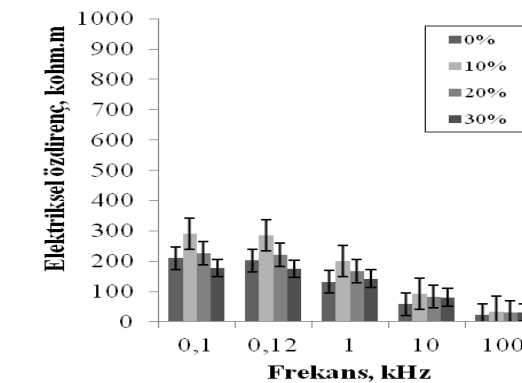
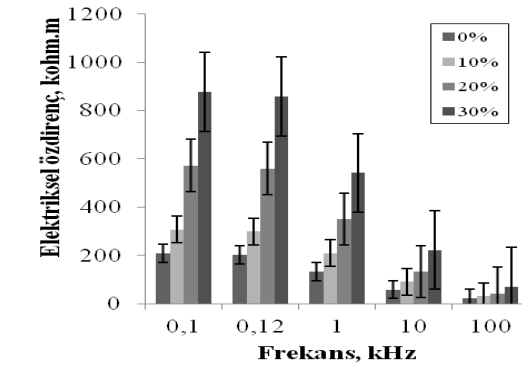
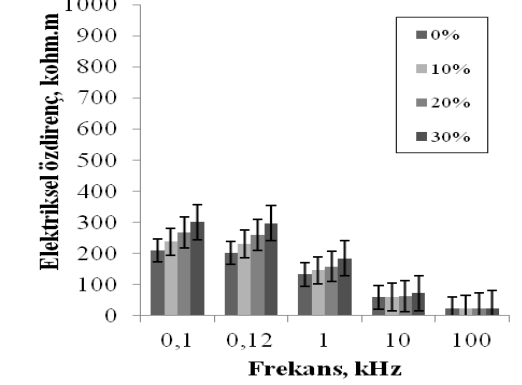
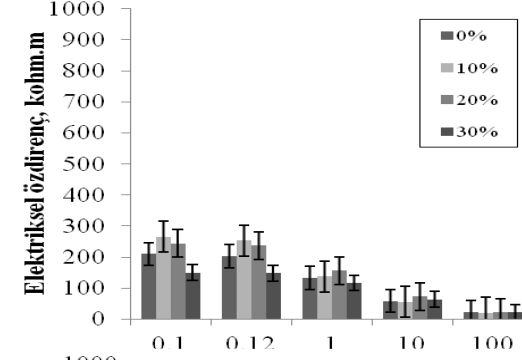
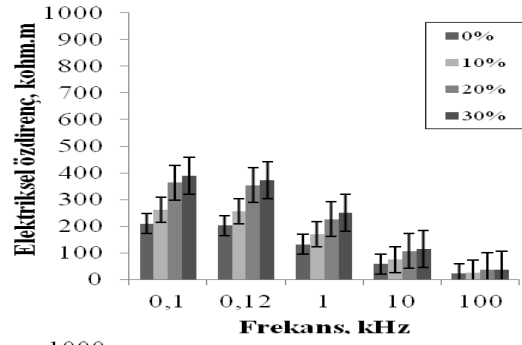
3. Bulgular

Farklı tipte ve farklı oranlarda mineral katkıların kullanımıyla üretilmiş kendiliğinden yerleşen harçların elektriksel özdirenç değerleri frekansa bağlı olarak Şekil 2'de verilmiştir. Bilindiği gibi frekans, bir AC sinyalin saniyedeki periyot sayısıdır. Çimento esaslı sistemlerde elektrik iletkenliği boşluk solüsyonlarındaki iyon transferi sebebiyle meydana gelmekte ve frekansın artışıyla birlikte iyon transferi hızlanmaktadır. Dolayısıyla direnç azalmaktadır.

KYH'lara uygulanan frekans değerinin artırılmasıyla harç içerisindeki iyonların transfer hızının artması



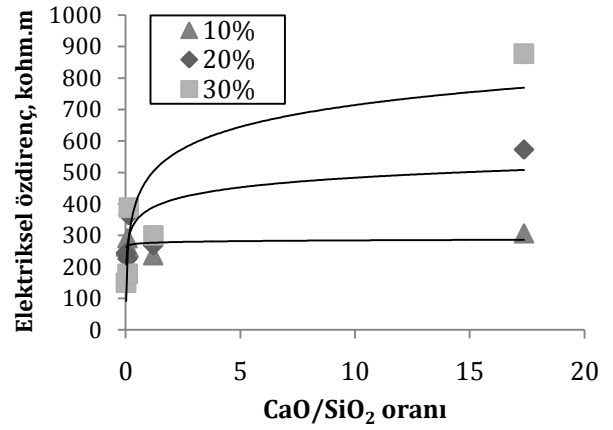
Şekil 3. Elektriksel özdirenç açısından mineral katkılı harçların karşılaştırılması



Şekil 2. Kendiliğinden yerleşen harçların frekansa bağlı elektriksel öz dirençleri

sonucu daha düşük elektriksel özdirenç değerleri elde edilmiştir. KYH'lara farklı frekanslarda elektriksel özdirencin belirlenmesinin amacı, ölçüm frekansına bağlı olarak elde edilebilecek özdirenç değerinin belirlenmesidir. Diğer bir ifadeyle, malzemelerin özdirenç değerlerinin belirlenmesi sırasında seçilen frekans değeri sonuçları doğrudan etkilemektedir. Yüksek frekanslı gerilim altında KYH'lar düşük frekans gerilim altında bulunma durumuna göre daha az dirence sahip olacaklardır. Şekil 2'de verilen farklı mineral katkılı harçların elektriksel özdirenç değerlerinden harçlar kendi aralarında karşılaştırıldıklarında, en yüksek elektriksel özdirenç değeri taş tozu katkılı KYH'larda elde edilirken en düşük özdirenç değerleri de tüm frekans değerleri için SD katkılı harçlarda elde edilmiştir. KYH'larda kullanılan mineral katkıların içerisinde silis dumanı elektrik iletkenliğinin artışına neden olmuştur. Frekans değeri 0.1 kHz olan elektriksel ölçümlerin mineral katkı oranına göre karşılaştırması Şekil 3'te verilmiştir.

Tüm mineral katkı tipleri için %10 oranına kadar kullanılması durumunda harçların özdirenç değerleri katkısız harçlara göre artmıştır. Ancak mineral katkının bu orandan daha fazla kullanılması durumunda mineral katkının etkisi daha belirgin olmuştur. Özellikle SD ve TU mineral katkılarının %20 ve üzerinde kullanılması durumunda harçların elektriksel özdirenç değerleri azalmaya başlamış ve kontrol harçlarından daha düşük değerler almıştır. Diğer mineral katkıların kullanım oranlarının artırılmasıyla harçların özdirenç değerleri de artış göstermiştir. En yüksek elektriksel özdirenç değeri de %30 oranında TAS katkılı harçlarda 888 kohm.m olarak belirlenmiştir. KYH'larda mineral katkı tipi dikkate alındığında, taş tozu mineral katkısının CaO esaslı olması ve en büyük özdirenç değerinin bu harçlarda olması; diğer yandan en düşük elektriksel özdirenç değerinin %30 SD ve TU katkılı serilerde elde edilip bu katkıların kimyasal bileşiminin de SiO₂ açısından zengin olması kimyasal bileşimin iyon transferi üzerindeki etkisini ortaya çıkarmıştır. Çimentolu sistemlerde elektrik iletkenliği hidroksil (OH⁻) iyonları tarafından sağlanır ve bu iyonların artması ortamın pH değerinin azalmasına neden olmaktadır. Silika açısından zengin olan mineral katkıların kullanılmaları durumunda CH'lar SiO₂ ile bağ yaparak tobermorit jelleri (CSH) oluşur ve bu durumda ortamın pH seviyesi azalmaya diğer bir ifadeyle OH⁻ iyonları artmaya başlar [13]. Burada kullanılan mineral katkının inceliği de puzolanik aktivite açısından önem teşkil etmektedir. Kullanılan mineral katkılardan SD ve TU diğer mineral katkılara göre daha fazla silis içermesi yanı sıra daha yüksek yüzey alanına sahiptirler ve bunun sonucu olarak da daha iyi puzolanik aktivite göstererek diğer harçlara göre daha yoğun CSH jellerinin oluşumuna imkan sağlamışlardır. Sonuç itibarıyla donatı etrafına çökelmiş pasivasyon tabakası daha önce de belirtildiği gibi silis tarafından bağlanarak ortadan kalkacak ve



Şekil 4. Elektriksel özdirencin CaO/SiO₂ oranına bağlı değişimi

korozyon süreci hızla başlayacaktır. Ortamda Ca⁺⁺ iyonlarının artması ise pH seviyesini yükselterek elektriksel iletkenliği azaltmakta ve donatılı betonlarda pasivasyon tabakasının korunduğunu göstermektedir [14, 15]. Dolayısıyla betonarme donatısı veya özellikle ön gerilme donatısı içerecek betonlarda, KYB kullanılması durumunda, bileşen olarak ilave edilecek ince toz mineral katkının seçiminde mümkünse CaO açısından zengin olan malzemelerin seçilmesi; ya da silika açısından zengin ise özellikle yüzey alanları çimentodan yüksek olanların kullanım oranlarının %10'dan daha fazla seçilmemesi önerilmektedir. Aksi durumda, kuru halde bile elektriksel dirençleri düşük olan harç/betonların nem veya suyla temasları durumunda elektriksel dirençleri daha fazla düşerek korozyonun hızlanmasına katkı sağlayacaklardır. Buradan yola çıkılarak Şekil 4'te verilen CaO/SiO₂ oranına bağlı elektriksel özdirenç değerinin değişimini gösteren eğriler elde edilmiştir.

Harç içerisinde mineral katkıların %30 oranında kullanılmaları, harçların elektriksel özdirençleri üzerinde daha etkili olmuştur. Bunun iki nedeni olabilir; i) mineral katkılardan gelen silikaların portlanditleri (CH) bağlayarak tobermorit jelleri oluşturmaları ve ii) kimyasal bileşimindeki oksitlerin tamamen hidrasyon ürünü olarak kullanılmayıp serbest miktarda kalmalarıdır. Her iki durumda da ortamın iletkenliği iyonların varlığına göre değişecektir. Mineral katkı oranının yüksek olması ve kür süresinin uzun tutulması sonucunda iyon varlığını arttırarak etkilerini daha belirgin hale getirmişlerdir. Bunun sonucu olarak da mineral katkıların %30 oranında kullanıldıkları harçlarda CaO içeriğinin yüksek olması harçların elektriksel dirençlerinin de artmasını sağlarken SiO₂ oranının yüksek olması da elektriksel dirençlerinin azalmasına yol açtığı gözlenmiştir. Bu durum da yukarıdaki olguları doğrular niteliktedir. Betondaki CaO miktarının artırılmasıyla elektriksel özdirencinin arttığı Şengül [16] tarafından da belirtilmiş ve bu çalışmayla aynı sonuca ulaşılmıştır. KYB üretiminde kullanılacak mineral katkının kimyasal analizindeki CaO/SiO₂ oranı elde edilerek beş yıl sonrası gibi

ileriki zamanlarda betonun elektriksel direncinin nasıl bir değer alacağı ve bunun sonucu olarak da düşük elektriksel özdirenç değerine sahip olacağına karşı ek önlemlerin başlangıçta alınmasını sağlayarak yapıların servis ömürlerinin daha uzun olması sağlanabilir.

4. Tartışma ve sonuç

Çalışmada, farklı tipte ve oranda mineral katkı içeren kendiliğinden yerleşen harçların ileriki yaşlardaki elektriksel özdirençlerindeki değişimler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Çimento esaslı sistemlerde elektrik iletkenliği boşluk solüsyonlarındaki iyon transferi sebebiyle meydana gelmekte ve frekansın artışıyla birlikte iyon transferi hızlanmaktadır. İyon transferinin hızlanması nedeniyle de harçlarda yüksek frekanslarda daha düşük elektriksel direnç değerleri elde edilmiştir.
- Mineral katkının elektriksel özdirenç üzerindeki etkisi %20 ve %30 oranlarında kullanılması durumunda daha belirgin olmuştur. Özellikle %30 oranında mineral katkılı harçlardaki oksitlerin reaksiyonlarda görev almayarak serbest halde bulunmaları ile elektriksel özdirenç değeri daha belirgin değişmiştir.
- En yüksek elektriksel özdirenç değeri %30 oranında taş tozu katkılı harçlarda elde edilirken en düşük elektriksel özdirenç değeri de %30 oranında silis dumanı içeren harçlarda elde edilmiştir.
- Harç veya betonda Ca^{++} iyonlarının artırılması (CaO içeriği yüksek katkıların kullanılmaları) ile pH seviyesini yükselterek elektriksel iletkenliği azaltmakta ve donatılı betonlarda pasivasyon tabakasının korunduğunu göstermektedir. Diğer yandan SiO_2 içeriği ve yüzey alanı yüksek mineral katkıların kullanımıyla, özellikle %10 üzerinde, elektriksel özdirenç değeri azalmakta ve pH'nın seviyesini düşürerek donatı korozyonunun oluşumuna katkı sağlayacaktır.
- Betonarme donatısı veya özellikle ön gerilme donatısı içerecek betonlarda, KYB kullanılması durumunda, bileşen olarak ilave edilecek ince toz mineral katkının seçiminde mümkünse CaO açısından zengin olan malzemelerin seçilmesi; ya da silika açısından zengin malzemenin seçilmesi durumunda ise kullanım oranlarının %10'dan daha fazla seçilmemesi sonucunda elektriksel özdirenç değeri yüksek tutularak donatının korozyon sürecini uzatacak veya önleyecektir.
- Mineral katkıların CaO/SiO_2 oranına bağlı olarak harçların elektriksel özdirenç değerinin değişimini gösteren eğriler elde edilmiştir. Buna göre CaO içeriğinin yüksek olması harçların elektriksel dirençlerinin de artmasını sağlarken SiO_2 oranının yüksek olması da elektriksel dirençlerinin azalmasına yol açtığı gözlenmiştir.

Sonuç olarak, mineral katkı içeren harçlarda elektriksel özdirenç değerinin yüksek frekans değerlerinde ölçülmesi gerektiğinde düşük değerler alacağı, elektriksel özdirenç değerinin harç içerisindeki mineral katkının kimyasal içeriğinin oldukça etkili olduğu görülmüş olup, ileriki yaşlarda KYB ile üretilen yapıların donatı korozyonuna uğramaması için bileşimlerinde mineral katkı olarak CaO içeriği yüksek olanlar tercih edilmelidir. Böylece korozyon riski açısından daha uzun servis ömürlü yapılar inşa edilebilecektir.

Teşekkür

Yazarlar, bu makalede kullanılan harç numunelerinin üretilmesi aşamasıyla çalışmanın bir bölümünü 110M246 nolu projeye destekleyen Tübitak'a teşekkürlerini sunarlar.

Kaynakça

- [1] Das, B.B., Pandey, S.P. 2011. Influence of Fineness of Fly Ash on the Carbonation and Electrical Conductivity of Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(9), 1365-1368.
- [2] Polder, R.B. 2001. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC – 154 technical recommendation, *Construction and Building Materials*, 15, 125-131.
- [3] Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A.R., Salehi, M. 2015. Electrical Resistivity of Concrete, *Concrete International*, 41-45.
- [4] Gong, H., Li, Z., Zhang, Y., Fan, R. 2009. Piezoelectric and dielectric behavior of 0-3 cement based composites mixed with carbon black, *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 2013-2019.
- [5] Mancio, M., Moore, J. R., Brooks, Z., Monteiro, P. J. M., Glaser, S. D. 2004. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results, *Cement and Concrete Research*, 34, 537-545.
- [6] Silva, P.C., Ferreira, R.M., Figueiras, H. 2011. Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure, *International Conference on Durability of Building Materials and Components*, April 12-15, Portugal, 2-8.
- [7] Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Gjørv, O.E. 2007. Puzolanik malzemelerin betonun mekanik özellikleri ve klor iyonu yayılımına etkisi, *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, 6(1), 53-64.
- [8] Princigalloa, A., Breugelb, K.V., Levitaa, G. 2003. Influence of the aggregate on the electrical

- conductivity of Portland cement concretes, *Cement and Concrete Research*, 33, 1755–1763.
- [9] Topçu, İ.B., Ünal, O., Uygunoğlu, T. 2007. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Mineral Katkıların Taze Beton Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, *Yapıda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 23-24 Nisan, Ankara, 181-193.
- [10] Okamura, H., Ouchi, M. 2003. Self-compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5-15.
- [11] Azarsa, P., Gupta, R. 2017. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review, *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 8453095, 1-30.
- [12] ASTM C 1760, 2012. Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete. West Conshohocken (PA): ASTM.
- [13] Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T., Hocaoğlu, İ. 2016. Electrical Resistivity of Fly Ash Blended Cement Paste at Hardening Stage, *Materials Science, Kuans University of Technology*, 22(3), 458-462.
- [14] Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T., Hocaoğlu, İ. 2012. Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, 28, 414-420.
- [15] Gesoğlu, M, Özbay, E. 2007. Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems, *Materials & Structures*, 40(9), 923-937.
- [16] Sengul, O. 2014. Use of electrical resistivity as an indicator for durability, *Construction and Building Materials*, 73, 434–441.