



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Yüksek fırın cüruf katkılı çimento pastalarının elektriksel özdirençlerinin araştırılması

Investigation of electrical resistivity of cement paste blended with blast furnace slag

Yazar(lar) (Author(s)): İlker Bekir TOPÇU¹, Tayfun UYGUNOĞLU², İsmail HOCAOĞLU³

ORCID¹: 0000-0002-2075-6361

ORCID²: 0000-0003-4382-8257

ORCID³: 0000-0001-9294-1120

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Topçu İ. B., Uygunoğlu T. ve Hocaoglu İ., “Yüksek fırın curuf katkılı çimento pastalarının elektriksel özdirençlerinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 257-264, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.403970

Yüksek Fırın Cüruf Katkılı Çimento Pastalarının Elektriksel Özdirençlerinin Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

İlker Bekir TOPÇU¹, Tayfun UYGUNOĞLU², İsmail HOCAOĞLU³

¹Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

^{2,3}Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 10.10.2016 ; Kabul/Accepted : 15.12.2016)

ÖZ

Bu çalışmada çimento pastalarında yüksek fırın cürufu içeriği ve su/çimento oranının elektriksel öz direnç üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı su/çimento oranlarında ve farklı oranda bağlayıcı içeren karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlarda çimento yerine ağırlıkça %0, %10, %20, %30 oranlarında yüksek fırın cürufu konulmuştur. Taze haldeki çimento pastalarına kalıp içerisinde elektrik akımı uygulanmış, ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır. Elektrik akımı uygulanmış ve elektrik akımı uygulanmamış numunelerdeki hidrasyon zamanı ile elektriksel öz direnç arasındaki farklar araştırılmıştır. Sonuç olarak, çimento pastalarına yüksek oranda yüksek fırın cürufu konulması ve elektrik akımı uygulanması ile priz süresi kısalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Beton bileşen, çimento pastası, elektriksel öz direnç, yüksek fırın cürufu.

Investigation of Electrical Resistivity of Cement Paste Blended with Blast Furnace Slag

ABSTRACT

In this study, the effects of blast furnace slag content and water/cement ratio at cement pastes on the electrical resistivity were investigated. Admixtures having different water/cement ratios and admixtures having binder at different dosage levels were prepared. The blast furnace slag was used in the admixtures by replacing the cement in ratio of 0%, 10%, 20% and 30% by weight. Electrical current was applied to the fresh cement pastes in the molds. The measurements were done at room temperature. The differences between electrical resistivity and hydration time with and without electric current application on the specimens were investigated. As a result, adding blast furnace slag at a high proportion and application of electrical current to the cement pastes shorten the setting time.

Keywords: Concrete structures, cement paste, electrical resistivity, blast furnace slag.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnşaat sektöründe artan talebi, en kısa zamanda ve ekonomik biçimde karşılayabilmek amacıyla seri üretim ve sanayileşme gereksinimi artmaktadır. Beton üretiminde Yüksek Fırın Cürufu (YFC) kullanılması evrensel olarak bilinmekte ve kazanç sağlamaktadır. Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu, yüksek fırınlarda daha hafif olmasından dolayı ham demirin üzerinde kalır. Demir filiz gangi, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC)'nu meydana getirir [1]. ÖYFC'nun hızlı soğutma uygulaması sonucunda camsı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruf lar granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılırlar [2]. Genelde yüksek fırın cürufunun %95'i veya daha fazlası silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijenden oluşmaktadır [3].

Genel olarak hidrasyon ısısının düşmesiyle puzolonik reaksiyon yavaşlamaktadır [4]. Puzolonik reaksiyonun yavaşlaması daha geç sertleşme görülmesi gibi sorunları doğurmaktadır. Diğer yandan sıcaklığın artması ile

puzolonik reaksiyon hızlandırılabilir. YFC kullanımının bir diğer faydası hidrasyonun ilk aşamalarında termal kırılmayı engellemesidir [5].

Çimento pastasının sertleşme işleminin gözlemlenmesinde elektriksel öz direnç bir parametre olarak kullanılabilir [6-7]. Elektrik iletkenlik, boşluk solisyonlarındaki çimento bazlı sistemlerde iyon transferi sebebiyle meydana gelmekte, çimento pastasında çimento ile suyun karıştırıldıktan hemen sonra (plastik şekil verilebilir durumda) hidrasyon işlemleri çalışmalarında önemli bir parametre olmuştur [8-9]. Karıştırma işleminden hemen sonra çimento pastasının hidrasyon süresince kalsiyum (Ca) ve hidroksil (OH) iyonları solisyona ilk 10 dakika içerisinde girmektedir [10]. Daha sonra kalsiyum ve hidroksil iyon konsantrasyonları yavaş bir şekilde artmaya devam ederken, yarı kristal kalsiyum silika hidrat jelinin (C-S-H) çökmesi dışında küçük değişiklikler meydana gelir [11-12]. Hidrasyonun derecesi hidrasyon işlemiyle tanımlanmakla birlikte çimento bazlı yapıların sistemlerindeki boşluk yapısıyla veya hidrasyon ürünlerinin miktarıyla ilişkilidir [13]. İletkenliliğin çeşitliliği zamanla bir fonksiyon olmasıyla, çimento pastasının zamanla boşluk solisyonlarının iç yapısında

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : afyonbeton@hotmail.com

değişiklikler meydana getirebilmektedir [14]. Bilindiği gibi çimento pastasındaki hidratasyon ürünleri C-S-H jelleri, etrenjit ve diğer bileşenlerden oluşmaktadır. Hidratasyon süresince sertleşen çimento pastalarının kapiler boşlukları gittikçe hidratasyon ürünleriyle dolmakta ve mikro yapının sıvı fazının dayanımı artmaktadır. Daha sonra çimento pastasının elektriksel direnci artmaktadır [15]

Xiao, ve Li [16], yaptıkları çalışmada elektriksel direncin ölçülmesiyle betonda uygun süper akışkanlaştırıcının seçilmesinin kolaylaştığı sonucuna ulaşmışlardır [16]. Xiao, ve Li [16], beton karışımının elektriksel direncini ölçmüşler, boşluk solüsyonunun karışımındaki elektriksel öz direnç aparatıyla ilişkili olmadığı, elektriksel öz direnç ölçümü ile sertleşmemiş betonda hidratasyon hareketinin gözlenebileceği sonucuna ulaşmışlardır [16]. Chung [17] elektriksel öz direnç ölçümü ile çimento bazlı malzemelerin zarar görme potansiyelini araştırmıştır. Direncin artmasıyla zarar kanıtlanmıştır. Çimento bazlı malzemelerin zararını tespit etmek için elektriksel öz direnç miktarı parametre olarak kullanılabilirliği, öz direnç miktarının arttıkça çimento bazlı malzemelerin zarar görme potansiyelinin artacağı sonucuna ulaşmışlardır [17]. Tamaas vd [18] çimento pastasının zamana bağlı elektriksel tepkisinin su içeriği, sıcaklık, klinker, alçı taşı ve karışım içeriği gibi çeşitli unsurlara bağlı olduğunu belirlemişlerdir [18]. Zhiyong, vd. araştırmalarında çimento pastasının relatif direnci ve C-S-H jellerini gösteren analitik model geliştirmişlerdir. Sonuç olarak hidratasyonun ileri aşamasında relatif direncin artmasıyla kapiler boşlukların kritik basıncını azalttığını düşünmüşlerdir [19]. Hongyan vd.[20] Relatif elektriksel iletkenlik ile C-S-H jelleri arasındaki ilişkiyi yaklaşık olarak belirleyen bir denklem elde etmişlerdir. Hidratasyon tamamen gerçekleştiğinde C-S-H jellerinin relatif elektriksel iletkenlik değerleri yaklaşık olarak 0.00775 olduğunu tahmin etmişlerdir [20]. Topçu vd. farklı su/çimento oranlarına sahip (0.40, 0.45, 0.50, 0.55) ve mineral katkı çimento pastalarına elektrik akımı uygulamışlar, çimento pastalarına hem mineral katkı konması hem de elektrik akımı uygulanması ile priz süresinin kısaltılabileceğini belirlemişlerdir [21-22].

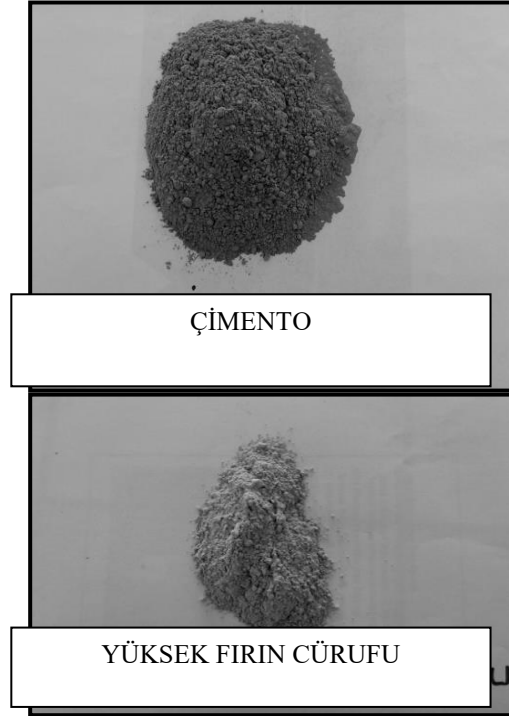
Bu çalışmada çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda Yüksek Fırın Cürufu (YFC) (%0, %10, %20, %30) konulmuş ve farklı su/çimento oranlarında (0.40, 0.45, 0.50, 0.55) sahip çimento pastalarının elektriksel öz dirençleri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri (Material used and their properties/features)

Çimento pastalarının hazırlanmasında çimento olarak Afyon Çimento Sanayi Fabrikasının üretimi olan TS EN 197-1' e uygun CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmış [23], Yüksek fırın cürufu ise Bursa çimento fabrikasından temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan çimento ve yüksek fırın cürufu Şekil 1.'de gösterilmiştir.

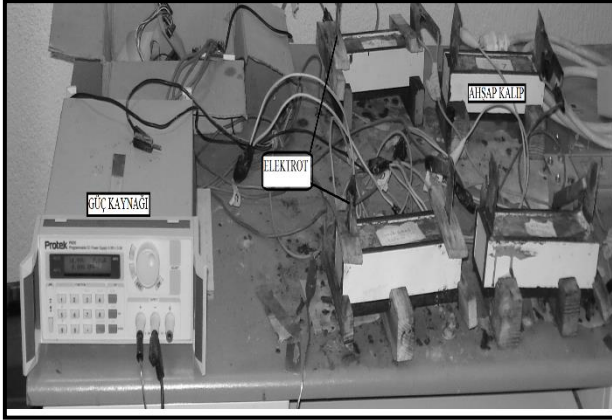
Çimentonun ve yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Çimentonun içerisindeki C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF ana bileşenleri oranları sırasıyla % 60.11, %11.02, %6.97 ve %9.95'tir. Portland çimentosunun priz başlama ve priz sona erme süreleri ise sırasıyla 182 ve 310 dakikadır. Elektrik akımı uygulanmış çimento pastaları Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çimento ve YFC'nin görüntüsü (A view of cement and blast furnace slag)

Çizelge 1. Çimento ve YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical features of cement and blast furnace slag)

İçerik, %	CEM I 42.5 R	YFC
CaO	63.6	39.8
SiO ₂	19.6	32.8
Al ₂ O ₃	4.72	11.8
Fe ₂ O ₃	3.27	1.45
MgO	1.91	4.15
Na ₂ O	0.34	0.51
K ₂ O	1.06	0.91
SO ₃	4.72	2.06
Cr ₂ O ₃	0.04	0.02
TiO ₂	0.41	0.63
KK	2.69	2.2
Özgül ağırlık	3.07	2.8
İncelik, cm ² /g	3312	4982



Şekil 2. Elektrik akımı uygulanmış çimento pastalarının görünüşü (A view of cement pastes which electrical current applied to)

2.2. Numune Üretimi ve Yapılan Deneyler

(Production of specimen and the experiments conducted)

Çimento pastalarına sırasıyla %0 (kontrol), %10, %20, %30 oranlarında çimento yerine ağırlıkça yüksek fırın cürufu katılarak ve su/çimento oranları sırasıyla 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan karışımlar hazırlanmıştır. Çimento, su ve yüksek fırın cürufu mikserde 5 dakika süreyle karıştırılmıştır.

Hazırlanan karışımlar 40 x 40 x 160 mm boyutlarındaki elektriksel yalıtımlı ahşap kalıplara konulmuştur. Kalıplar, sertleşen numunelerin kalıplardan daha kolay çıkartabilmek amacıyla yağlanmıştır. Kalıplara konulan karışımlarda hava boşluğu kalmaması için vibratör kullanılmıştır. Taze haldeki çimento pastalarının iki ucuna sabit uzaklıkta ve sabit bakır levhalar yerleştirilmiştir. Numunelere oda koşullarında 24 saat süresince DC güç kaynağından 15 Volt akım uygulanarak numunelerin elektrik akım geçişlerinin her 2 dakikada bir ortalaması alınarak veri kaydedici vasıtasıyla kaydedilmiştir. Ölçümler numunelerin elektrik akımı uygulandıktan hemen sonra başlamıştır (ilk 2 dakika içerisinde). Deneylerin daha kısa sürede bitirebilmek için hazırlanan düzeneğe 4 farklı numune bağlanmıştır. Her çimento pastasının elektriksel direnci aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$R = \frac{A}{l} \times \frac{U}{I}$$

Formülde 1; Elektrotlar arasındaki mesafeyi (metre), A ; Numunenin kesit alanını (m²), I; Numunenin içinden geçen akım şiddetini (amper), U; Elektrotlar üzerindeki gerilim değeri (volt) ifade etmektedir. Formül yardımıyla ohm.m birimi ile çimento pastalarının elektriksel öz dirençleri hesap edilmiştir.

Priz süresi deneyleri için normal kıvamda hazırlanan çimento pastaları Vicat halkasının içine yerleştirildikten sonra aletin iğnesi halka içindeki çimento pastasının üst yüzeyine indirilerek ayarlanmıştır. Daha sonra da hareket edebilir çubuk serbest bırakılarak kendi ağırlığının

etkisiyle iğnenin çimento pastasının içerisine dalması sağlanmıştır. Vicat iğnesinin ucu camın üzerine kadar indirilerek aletin göstergesi sıfıra getirilmiştir. Daha sonra, iğnenin ucu çimento pastasının üst yüzeyine dokunacak kadar indirilerek serbest bırakılmıştır. Sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından itibaren iğne ile taban arasındaki mesafe 3–5 mm uzaklıkta kaldığı an priz başlamıştır. İğnenin ucu çimento pastasının içerisine giremediği veya en çok 0.05 mm girebildiğinde priz sona ermiştir. Çimento pastalarındaki priz süresi tayini TS EN 196-3 ve ASTM C 191 standartına uygun yapılmıştır. Priz süresi deneyleri ağırlıkça belirli oranlarda YFC konulmuş (%10, % 20, % 30) ve elektrik akımı uygulanmayan çimento pastalarında yapılmıştır.

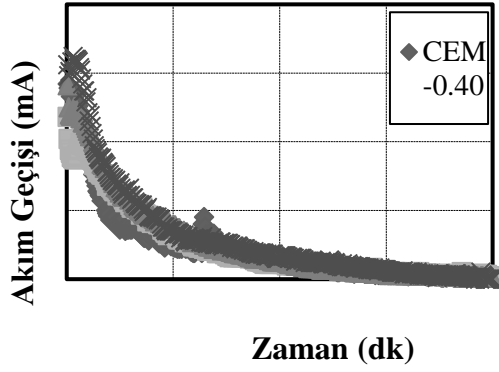
3. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

3.1. Yüksek Fırın Cürufunun ve Miktarının Elektrik Akımı Üzerindeki Etkisi (The impact of blast furnace slag and its amount on electrical current)

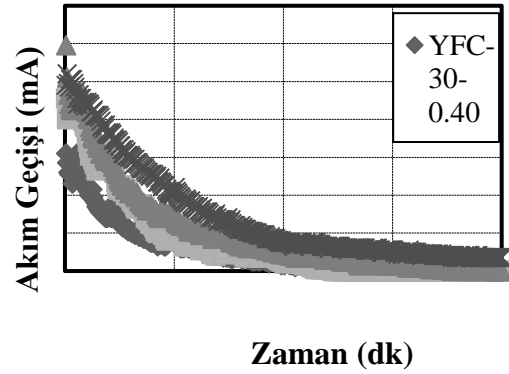
Çimento pastalarına yerleştirilmiş olan iki elektrot arasındaki akım geçişi ilk olarak sıvı fazda bulunan çimento pastasının içinde bulunan su sayesinde gerçekleşmektedir. Hidratasyonun ilk aşamasında tüm boşluklar birbiriyle bağlantılıdır. Bu sebeple elektrotlar arasındaki elektroliz olayı boşluklarda bulunan su ile doğru orantılıdır. Çimentonun ana bileşenleri ve su arasındaki tepkime zamanla meydana geldikçe birbirleriyle bağlantılı olan kapiler boşluklar birbirlerinden ayrılmaya başlarlar. Dolayısıyla çimento pastasının elektriksel direnci zamanla artar, çimento pastasının sertleşmesinden sonra ise elektriksel öz direnç en yüksek seviyelere ulaşır. Sonuç olarak çimentonun hidratasyon süresi ile çimentonun elektriksel direnci ilişkilendirilebilir.

Bu çalışmada farklı su/çimento oranlarında (0.40, 0.45, 0.50, 0.55) katkısız olarak ve farklı oranlarda YFC (%10, %20, %30) içeren çimento pastalarının priz alma süreleri boyunca elektrik akımının ve YFC'nin hidratasyon süresine etkisi üzerinde araştırma yapılmıştır. Deneyler 1 gün süresince uygun laboratuvar koşullarında yapılmıştır.

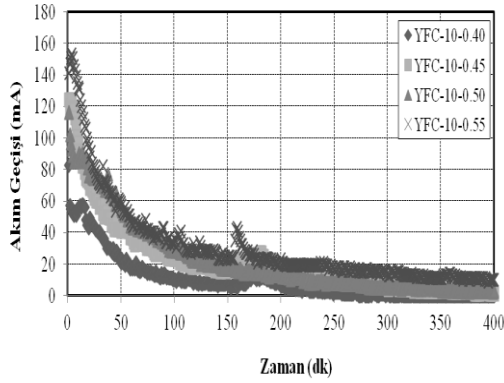
YFC katkısız çimento pastalarının elektriksel akım geçişleri karışımdaki su/çimento ile doğru orantılıdır. En büyük su/çimento oranına sahip (0.55) çimento pastasında en fazla elektrik akım geçişi meydana gelmiştir (Şekil 3). Su/çimento oranları sırasıyla 0.55 ve 0.40 olan çimento pastalarının elektriksel akım geçişleri karşılaştırılırsa su/çimento oranı 0.55 olan karışımın su/çimento oranı 0.40 olan karışıma göre 10 ila 30 dakika arasında ortalama % 21.46 kadar daha fazla akım geçişi gerçekleşmiştir. Mineral katkı olarak çimento yerine YFC konulduğunda mineral katkısız çimentoya göre akım geçişi daha az olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3-6).



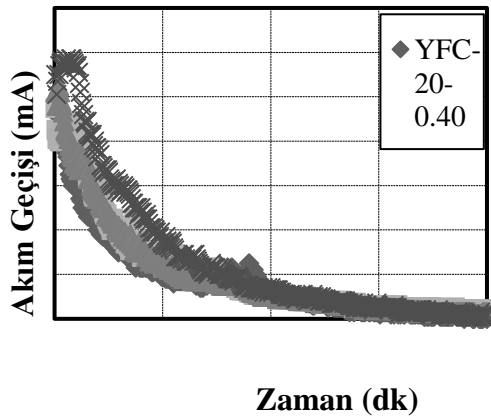
Şekil 3. Farklı su/çimento oranlarına sahip mineral katkısız çimento pastalarında zamana bağlı akım geçişleri (Current passes in cement pastes without mineral admixture on different water/cement proportions depending on time)



Şekil 6. Farklı su/çimento oranlarına sahip % 30 YFC katkılı çimento pastalarında zamana bağlı akım geçişleri (Current passes in cement pastes blended with 30% blast furnace slag on different water/cement proportions depending on time)



Şekil 4. Farklı su/çimento oranlarına sahip % 10 YFC katkılı çimento pastalarında zamana bağlı akım geçişleri (Current passes in cement pastes blended with 10% blast furnace slag on different water/cement proportions depending on time)



Şekil 5. Farklı su/çimento oranlarına sahip % 20 YFC katkılı çimento pastalarında zamana bağlı akım geçişleri (Current passes in cement pastes blended with 20% blast furnace slag on different water/cement proportions depending on time)

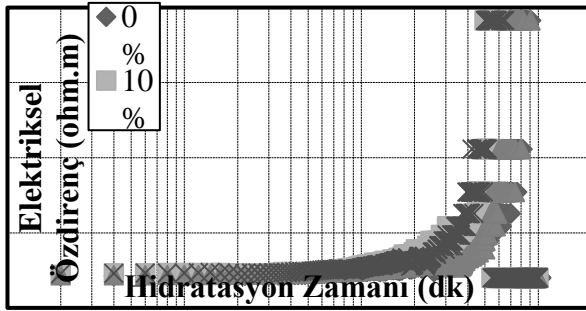
3.2. Yüksek Fırın Cürufunun ve Miktarının Elektriksel öz direnç Üzerindeki Etkisi (The impact of blast furnace slag and its amount on electrical resistance)

Şekil 7-10' den görüleceği üzere çimento yerine aynı ağırlıkta YFC konularak ve su/çimento oranları değiştirilerek yapılan incelemede çimento pastasının sıvı halinde iken (priz alırken) elektriksel öz direnç ile hidrasyon zamanı arasında ilişki kurulabileceği gözlemlenmiştir. Bütün su/çimento oranlarında hidrasyonun ilk aşamasında karışımdaki çimento miktarı arttıkça elektriksel öz direnç azalmıştır. Genel olarak hidrasyonun 10 ile 100 dakika arasında elektriksel direncin kayda değer şekilde arttığı gözlenmiştir. Hidrasyonun ilk aşamasında elektrik akımı taşıma kapasitesine sahip Ca^{+2} , OH^- , SO_4^{-2} ve alkali iyonları çok az olduğu için elektriksel öz direnç en düşük değerleri alır [24]. Çimento pastalarında iyonik konsantrasyonun azalmasıyla iyonik birleşme meydana gelir. Bu iyonik birleşmelerin sonucunda elektriksel öz direnç artmaktadır.

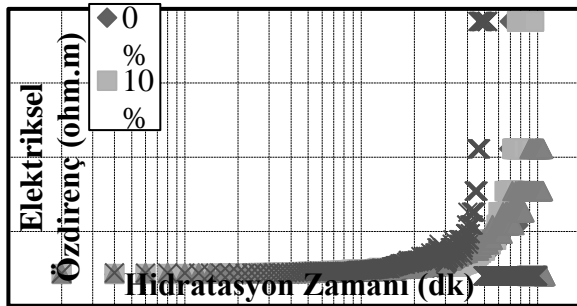
Şekil (7 -10)' de yüzde olarak farklı YFC içeriğinin ve farklı su/bağlayıcı içeriğine sahip (0.40, 0.45, 0.50, 0.55) elektrik direnci üzerindeki etkisi gözükmektedir. Hidrasyonun 10 ile 30 dakika aralığında YFC oranı %0' dan %30'a kadar artırılmasıyla elektriksel öz direnç artmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi elektriksel direncin artması çimento pastasının priz alma süresini kısalttığına göstergesidir. Elektrik akımı uygulanmayan (kontrol numunesi) ile elektrik akımı uygulanan numuneler karşılaştırıldığında elektrik akımı uygulanan numunede sertleşme (priz alma) daha kısa sürede meydana gelmiştir. Bu durum elektriksel direncin artmasıyla açıklanabilir.

Sonuçlar bazı özelliklere bağlıdır. Şöyle ki; çimentonun hidrasyon süresince iyonların filtrelenmesi ile karışımdaki miktarlarının azalmasına, hidrasyon süresince puzolanik mineral karışımdaki mineral içeriği

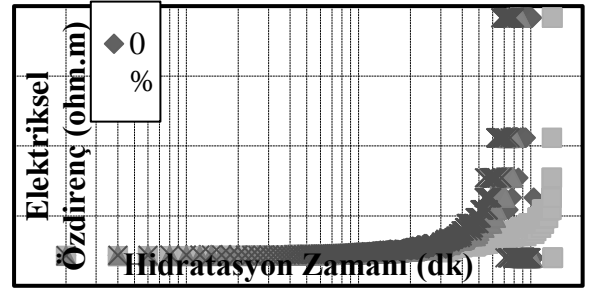
artıkça serbest Ca(OH)_2 ' nin azalma derecesi ile ilişkili olup [23,24], diğer bir yandan tüm karışımlar için hidrasyon gerçekleşikçe elektriksel öz direnç artar. Karışımın yüksek oranda YFC içermesi ile en yüksek elektriksel öz dirençlere ulaşılır. Puzolonik mineral karışımların (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 vb. içeren) ve serbest haldeki Ca(OH)_2 ' nin etkileşimi ile hidrasyonu sonucu C-S-H jellerinin çimento pastasındaki su içeriğini azaltması ile etrenjit-monosülfat oluşumunu hızlandırır [24,25]. Bu nedenle çimento pastasına YFC konulması karışımların elektriksel direncini arttırmaktadır. Hidrasyon süresince YFC taneciklerinin reaksiyonu sonucu Ca(OH)_2 içeriğinin azalmasına ve C-S-H jellerinin artmasına neden olur. Böylece C-S-H jellerinin oluşumunda YFC tanelerinin katkısının bulunduğu anlaşılmıştır. Yüksek elektriksel dirence ulaşılması ile sertleşme (priz alma) meydana gelmektedir. Bu nedenle çimento pastalarına hem YFC konulması (çimento yerine ağırlıkça aynı oranda) hem de elektrik akımı uygulanması ile hızlandırılmış kür yapılabilir.



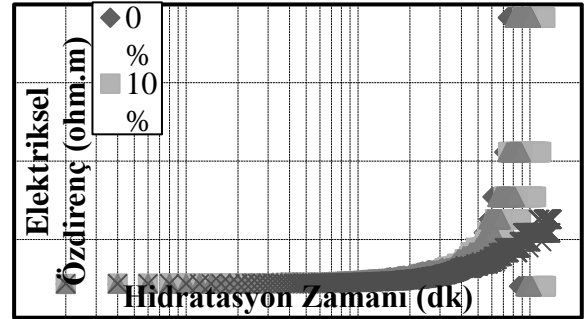
Şekil 7. Farklı oranlarda YFC konulmuş su/çimento oranı 0.40 olan çimento pastalarının elektriksel öz dirençlerinin hidrasyon zamanına göre değişimi (The change of electrical resistance of cement pastes blended with blast furnace slag on different proportions and whose water/cement proportion 0.40, according to hydration time)



Şekil 8. Farklı oranlarda YFC konulmuş su/çimento oranı 0.45 olan çimento pastalarının elektriksel öz dirençlerinin hidrasyon zamanına göre değişimi (The change of electrical resistance of cement pastes blended with blast furnace slag on different proportions and whose water/cement proportion 0.45, according to hydration time)



Şekil 9. Farklı oranlarda YFC konulmuş su/çimento oranı 0.50 olan çimento pastalarının elektriksel öz dirençlerinin hidrasyon zamanına göre değişimi (The change of electrical resistance of cement pastes blended with blast furnace slag on different proportions and whose water/cement proportion 0.50, according to hydration time)



Şekil 10. Farklı oranlarda YFC konulmuş su/çimento oranı 0.55 olan çimento pastalarının elektriksel öz dirençlerinin hidrasyon zamanına göre değişimi (The change of electrical resistance of cement pastes blended with blast furnace slag on different proportions and whose water/cement proportion 0.55, according to hydration time)

3.3. Yüksek Fırın Cürufunun ve Miktarının Priz Süresi Üzerindeki Etkisi (The impact of blast furnace slag and its amount on setting time)

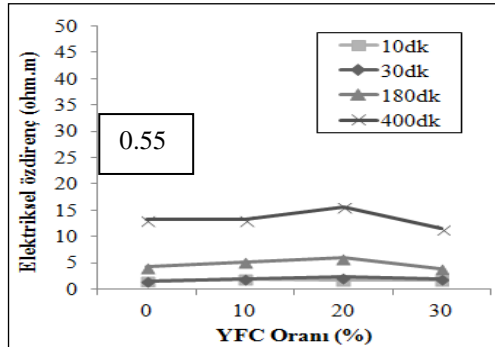
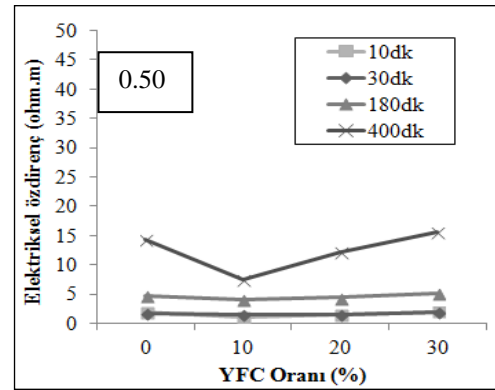
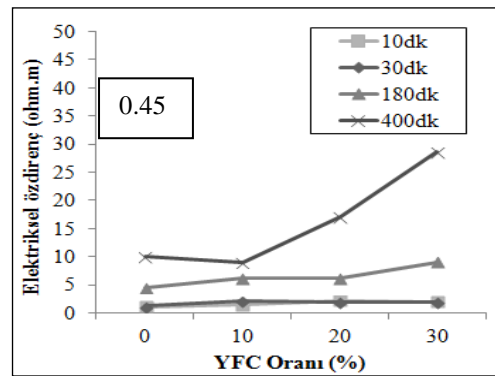
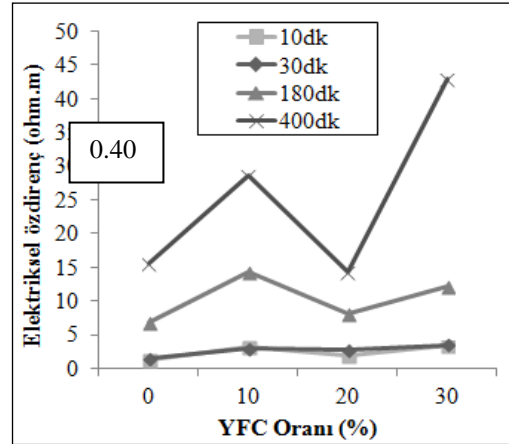
Çimento pastalarındaki elektrik akım geçişinin yüksek olması başlangıçta sıvı fazdaki su sayesinde meydana gelmektedir. Hidrasyonun ilk aşamasında tüm boşluklar birbirleriyle bağlantılıdır. Hidrasyon ürünleri gerçekleşikçe başlangıçta birbirleriyle bağlantılı olan boşluklar birbirinden ayrılmaktadır. Bu sebepten çimento pastalarının elektriksel direnci çimento pastası prizini tamamladığında maksimum seviyelere ulaşır. Sonuç olarak elektriksel öz direnç ile priz süresi arasında yakın bir ilişki vardır.

Genel olarak karışımlardaki su/çimento oranlarının artmasıyla priz sona erme süresi artmaktadır. Ayrıca çimento yerine ağırlıkça konulan YFC miktarı arttıkça da priz sona erme süresi artmaktadır. Priz sona erme süresinin kısılması çimento ile yüksek fırın cürufunun ağırlıkça belirli oranlarda yer değiştirildiğinde, çimentodan gelen C_3A miktarının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak karışımlara

elektrik akımı uygulandığında ve YFC oranının artmasıyla kontrol karışımlara göre sertleşmenin daha kısa sürede gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç çimento'nun hidratasyon sırasında iyon sayısındaki azalması ile açıklanabilmektedir [8].

Su/çimento oranına ve YFC oranına göre elektriksel öz direnç incelemesi yapmak için Şekil 11 çizilmiştir. Tüm su/çimento oranlarında hidratasyon zamanına göre karışımdaki YFC oranı arttıkça elektrik akım geçişi azalmış, elektriksel öz direnç artmıştır. Hidratasyonun 10. 30. 180. ve 400. dakikalarında su/çimento oranı 0.40 olan ve sırasıyla ağırlıkça %0, %10, %20, %30 YFC konulmuş çimento pastalarındaki elektriksel öz dirençleri Şekil 11' den görüleceği üzere YFC oranı arttıkça artmaktadır. Ancak; Çimento yerine %10 YFC konulan karışımda 10. 30. 180. dakikadaki elektriksel öz dirençleri %20 ve %30 YFC içeren karışıma göre daha yüksek değerler almıştır. Bu durum genel olarak diğer su/çimento oranlarında da benzer özellik göstermesi dikkat çekmiştir. Bunun sebebi YFC' nin içeriğinde bulunan silika ve alumina gibi yabancı maddelerin elektrik akımını iletmesi ancak YFC' nin %10' dan fazla kullanıldığı durumda portland çimentosunun hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)' in yeteri kadar olmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çimento pastalarına çimento yerine ağırlıkça %10 oranında YFC konulması ile çimento pastalarının priz başlama süresi kısaltılabilmektedir. Karışımdaki en uygun YFC içeriğinin %10 olması Emiroğlu vd. yapmış olduğu araştırmayla örtüşmektedir [26].

Tüm su/çimento oranları için hidratasyonun 10. ila 30. dakikalar arasında çimento yerine ağırlıkça konulan YFC miktarı %10' dan %30' a kadar artırılmasıyla elektriksel öz direncin arttığı görülmüştür (Şekil 11). Genel olarak su/çimento oranı arttıkça priz başlama sürelerinde düşüşler meydana gelmektedir. Örnek olarak su/çimento oranı 0.40 olan çimento pastasına %10 oranında YFC konulmasıyla 180. dakikadaki elektriksel öz direncin YFC' siz çimento pastasına göre % 51.99 daha yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak çimento pastasına ağırlıkça %10 oranında YFC konulması ve elektrik akımı uygulaması ile priz başlama süresi olması gerekenden daha kısa sürede tamamlandığı görülmüştür. Hidratasyonun 400. dakikasında ise genel olarak karışım içindeki YFC oranının %0' dan %30' a kadar artmasıyla elektriksel öz dirençte artışlar meydana gelmiştir. Özellikle su/çimento oranları 0.40 ve 0.45 olan çimento pastalarında bu artış kayda değerdir. Örnek olarak su/çimento oranı 0.40 olan YFC' siz çimento pastasının 400. dakikadaki elektriksel öz direnci 15.6 ohm.m iken çimento yerine ağırlıkça %30 oranında YFC konulması ile elektriksel öz direnç 42.9 ohm.m olarak ölçülmüştür.



Şekil 11. YFC oranına bağlı elektriksel öz dirençlerin karşılaştırılması (Comparison of electrical resistivity on different ratios of blast furnace slag)

3.4. Su/çimento Oranının Elektrik Akımı ve Elektriksel öz direnç Üzerindeki Etkisi (The impact of water/cement ratio on electrical current and electrical resistivity)

YFC içeren çimento pastaları sıvı fazda iken (hidratasyonun ilk aşamasında) su/çimento oranının artmasıyla elektrik akımını kolay iletirler. Elektriksel öz direnç ise en düşük seviyededir. Hidratasyon ürünlerini üretmek için elektrik akımının iletilmesi karışımlardaki boşluklarda bulunan serbest suyun kimyasal reaksiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple su/çimento oranının artmasıyla hidrolik reaksiyon hızlanır. Çimento pastalarının elektriksel iletkenlik kabiliyetleri su/çimento oranı arttıkça artmaktadır [27]. Su/çimento oranı 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan ve %10 oranında YFC konulan çimento pastalarında priz başlangıç sürelerine karşılık gelen elektriksel öz dirençleri sırasıyla 14.29, 6.13, 3.98 ve 5.20 (ohm.m) olarak ölçülmüştür. Buradan düşük su/çimento oranında priz başlangıç süresine göre elektriksel öz direnç değeri en yüksek değerler aldıkları görülmüştür. Yüksek su/çimento oranında (0.55 vb.) çimento yerine yüksek miktarda YFC konulması sonucu su ile reaksiyona girecek çimento miktarı azalmasından ve karışımdaki su miktarı artması neticesinde hidratasyonun daha yavaş gerçekleştiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu araştırmanın sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Karışımlardaki elektriksel öz direnç değeri su/çimento oranının azalmasıyla artmaktadır. Hidratasyon zamanına bağlı olarak en düşük su/çimento oranına sahip çimento pastaları en yüksek elektriksel öz direnç göstermiştir.
- Çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda YFC konulması çimento pastalarının elektriksel öz direncini arttırmaktadır. Bunun sebebi karışımdaki su içeriğinin azalmasıdır. Sonuç olarak çimento yerine YFC konulması ile çimento pastasındaki kimyasal reaksiyonlar hızlandırılabilir düşülmektedir.
- Hidratasyonun 10 ila 30 dakika aralığında çimento yerine %0'dan %30'a kadar YFC konulması ile elektriksel öz direnç artmaktadır. Elektriksel öz direncin artma oranı çimento pastalarının erken priz almasında bir parametre olarak kullanılabilir.
- Farklı oranlarda YFC (%0, %10, %20, %30) içeren çimento pastalarının elektriksel öz dirençleri karşılaştırıldığında; En yüksek elektriksel öz direncin %10 oranında YFC içeren karışım göstermiştir.
- Elektriksel öz dirençle hidratasyon arasında bir bağlantı bulunmaktadır. Çimento yerine YFC konulması ve elektrik akımı uygulanmasıyla hidratasyon süresi olması gerekenden daha kısa sürmektedir. Başka bir deyişle kür süresi kısalmaktadır.

Sonuç olarak çimento pastası kompozitlerinin elektriksel öz direnç davranışları çimento yerine YFC konulmasıyla geliştirilebilir. YFC konulmuş çimento pastasının hidratasyonu elektrik akımı iletilmesi sonucu hızlandırdığı düşünülmektedir. Çalışmanın farklı gerilim şiddeti uygulanması ve farklı içerikli karışımlar üzerinde araştırmalar yapılmasıyla daha kapsamlı sonuçlar elde edilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Öner A., Yıldırım T. "Öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren ve içermeyen betonlarda kırılma kumu içeriğinin beton özelliklerine etkisi", *Deprem Sempozyumu Kocaeli*, Kocaeli, (2005).
- [2] Tokyay M., Erdoğan K., "Cüruflar ve cürufli çimentolar", *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, (2002).
- [3] ACI 233.R-95, "Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete reported by ACI committee 233, *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan.
- [4] Morsy M.S., "Effect of temperature on electrical conductivity of blended cement pastes", *Cem Concr Res*, 29: 603-606, (1999).
- [5] Yio M.H.N., Phelan J.C., Wong H.S., Buenfeld N.R., "Determining the slag fraction, water/binder ratio and degree of hydration in hardened cement pastes", *Cement and Concrete Research*, 56: 171-181, (2014).
- [6] Backe K.R., Lile O.B. Lyomov, S.K., "Characterizing curing cement slurries by electrical conductivity", *SPE Drilling & Completion*, 201-207, (2001).
- [7] Whittington H.W., McCart J., Forde M.C., "The conduction of electricity through concrete", *Mag Concr Res*, 33: 48-60, (1981).
- [8] Xiao L., Li Z., Wei X., "Selection of superplasticizer in concrete mix design by measuring the early electrical resistivities of pastes", *Cem Concr Comp*, 29: 350-356, (2007).
- [9] Schwarz N., DuBois M., Neithalath N., "Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes", *Cem Concr Comp*, 29: 656-666, (2007).
- [10] Wei X., Li Z., "Early hydration process of portland cement paste by electrical measurement", *J Mater Civ Eng*, 18, 1: 99-105, (2006).
- [11] Buenfeld N.R. Newman J.B., "Examination of three methods for studying ion diffusion in cement pastes", *Mortars and Concrete. Mater Struct*, 20: 3-10, (1987).
- [12] Li Z., Xiao, L., Wei X., "Determination of concrete setting time using electrical resistivity measurement", *Journal of Mater Civ Eng*, 19, 5: 423-427, (2007).
- [13] Levita G., Marchetti A., Gallone G., Princigallo A., Guerrini G.L., "Electrical properties of fluidified portland cement mixes in the early stage of hydration", *Cem Concr Res*, 30: 923-930, (2000).
- [14] Rajabipour F., Weiss J., "Electrical conductivity of drying cement paste", *Mater Struct*, 40: 1143-1160, (2007).

- [15] Koleva D.A., Copuroglu O., Breugel K.V., Ye G., Wit J.H.W. de., “Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow”, *Cem Concr Comp*, 30: 731-744, (2008).
- [16] Xiao L., Li Z., “Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement”, *Cem Concr Res*, 38: 312-319, (2008).
- [17] Chung D.D.L.R., “Damage in cement-based materials studied by electrical resistance measurement”, *Mater Sci Eng*, 42: 1-40, (2003).
- [18] Tamaás F.D., Farkas E., Vörös M., Roy D.M., “Low-frequency electrical conductivity of cement, clinker and clinker mineral pastes”, *Cem Concr Res*, 17: 340-348, (1987).
- [19] Zhiyong L., Yunsheng Z., Laibao L., Qian J., “An analytical model for determining the relative electrical resistivity of cement paste and C-S-H Gel”, *Construction and Building Materials*, 48, 647-655, (2013).
- [20] Maa H., Hou D., Liu J., Li Z., “Estimate the relative electrical conductivity of C-S-H gel from experimental results”, *Construction and Building Materials*, 71: 392-396, (2014).
- [21] Topçu İ.B., Uygunoğlu T., Hocaoğlu İ., “Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures”, *Construction and Building Materials*, 28: 414-420, (2012).
- [22] Topçu İ.B., Uygunoğlu T., Hocaoğlu İ., “Electrical resistivity of fly ash blended cement paste at hardening state”, *Materials Science*, 22: 458-462, (2016).
- [23] EN 197-1/A3, “Cement- Part 1: Compositions and Conformity Criteria for Common Cements, TSE Ankara”, Turkey; [in Turkish] (2010).
- [24] Salem T.M., “Electrical conductivity and rheological properties of ordinary portland cement-silica fume and calcium hydroxide-silica fume pastes”, *Cem Concr Res*, 32: 1473-1481 (2002).
- [25] McCarter W.J., Starrs G., Chrisp T.M., “Electrical conductivity, diffusion, and permeability of portland cement-based mortars”, *Cem Concr Res*, 30: 1395-1400, (2000).
- [26] Emiroğlu M., Koçak Y., Subaşı S., “Yüksek fırın çürüfunun beton fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi”, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, (2011).
- [27] Heikal M., Morsy M.S., Aiad I., “Effect of treatment temperature on the early hydration characteristics of superplasticized silica fume blended cement pastes”, *Cem Concr Res*, 35: 680- 687, (2005).