

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BETONLARIN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

Şakir Erdoğan¹

Ş. Kurbetci², U. Kandil³, S. Nayır⁴, M. Nas⁵

Özet

Beton inşaat mühendisliğinde hâlen en önemli yapı malzemesi olma özelliğini sürdürmektedir ve bu nedenle de dünyada sudan sonra en çok tüketilen malzeme durumundadır. Buna ilişkin olarak betonun performansını geliştirici ve iyileştirici çalışmalar devam etmektedir. Betonda mineral katkı maddesi kullanmanın öncelikli nedeni de betonun performansını iyileştirmek ve geliştirmektir.

Bu çalışmada betonun performansına sağladığı katkıyı görmek amacıyla mineral katkı olarak yüksek fırın cürufu değerlendirilmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen deneysel çalışmada toplam 7 üretim yapılmış ve her bir üretimde bağlayıcı dozajı 300 kg/m³ katkısız ve %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 yüksek fırın cürufu ikame betonlar üretilmiştir. Her bir üretimde su/bağlayıcı oranı 0,6 olarak sabit tutulmuştur. Hazırlanan numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, kılcallık, su emme ve hızlı klor geçirimsizliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu karışımlardan hazırlanan numuneler farklı kür koşullarında farklı sürelerde

Some Mechanical and Durability Properties of Concrete Containing Blast Furnace Slag

In this study, blast furnace slag as a mineral additive was evaluated in relation with its contribution to the performance of concrete. To accomplish this purpose, in addition to plain mixture, concrete mixtures were produced in the experimental program by replacing cement with blast furnace slag at 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, and 60%, replacement ratios. Water to binder ratio was kept constant as 0.60 for each mixture. Compressive and flexural strengths, capillarity, water absorption and rapid chloride permeability tests were performed on the samples prepared. Samples prepared from these mixtures were kept in different curing conditions with different periods. To make comparison, samples were produced and kept in standard curing conditions as well.

Although compressive and flexural strengths decreased as the replacement ratio of the blast furnace slag increased, a significant improvement in the durability properties of concrete has been observed. In addition to the improving effects of blast furnace slag on concrete, the economic benefits of using blast furnace slag instead of cement should not be ignored.

tutulmuştur. Karşılaştırma yapmak için 28 gün standart kür gören numuneler de hazırlanmıştır.

Yüksek fırın cürufu ikamesinin artışı ile betonun basınç ve çekme dayanımlarında bir miktar azalma meydana gelmesine karşın durabilite özelliklerinde belirgin bir iyileşme kaydedilmiştir. Yüksek fırın cürufunun betonun bu özelliği üzerindeki iyileştirici etkisinin yanı sıra çimentodan sağlanan tasarruf itibarıyla ekonomik yararının da göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

1. GİRİŞ

Agrega, çimento ve su karışımından meydana gelen beton inşaat sektöründe yaygın kullanım alanına sahiptir. Beton hizmet verdiği ortamlarda çeşitli risklere maruz kalabilmektedir. Bu nedenle betonun bu risklere karşı yeterli dayanıklılığa sahip olması istenir. Servis koşullarında maruz kaldığı etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik

ve mekanik kökenli olabilir [1].

Arzu edilen dayanıklılığı sağlamak amacıyla başvurulacak çözümlerden bir tanesi çimento ile ikame edilen çeşitli puzolan-

1) shake@ktu.edu.tr 2) skurbetci@ktu.edu.tr 3) ukandil@ktu.edu.tr 4) safanayir@ktu.edu.tr 5) memduhnas@ktu.edu.tr Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon
(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

lar kullanmaktır. Puzolanlar betonun geçirimsizliğini azaltarak dış ortamda mevcut sülfat ve klor iyonu girişine karşı önemli bir direnç gösterir. Puzolan kullanımı aynı zamanda hem ekonomi hem de çevresel yarar sağlamaktadır [2]. Beton üretiminde doğal puzolan olarak volkanik kül, volkanik tüf, ısı işlem görmüş killeri ve yapay puzolan olarak uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmaktadır [3].

Yüksek fırın cürufu doğal malzemelere kıyasla daha sabit kalite ve özelliktedir. Enerjinin korunumu ve CO₂'in azaltılması bakımından çevre dostu olan yüksek fırın cürufu artan bir ilgi çekmektedir [4]. Yüksek fırın cürufu silis, kalsiyum alumino silis ve bazik esaslı bileşikler içeren ve yüksek sıcaklıklarda demir üretimi sırasında ergimiş hâlde elde edilen atık bir üründür [5-6]. Esas bileşimi CaO, SiO₂ ve Al₂O₃'ten oluşmaktadır. Yüksek fırın cürufunun kristal yapısı da kimyasal bileşimi kadar önemlidir [7]. Yüksek fırından alınan cürufun puzolan olarak kullanılabilmesi için hızlı bir şekilde soğutulması gerekir. Uygulanan soğutma yöntemi ve hızına bağlı olarak yüksek fırın cürufu değişik yapısal özellikler gösterebilir [5].

Yüksek fırın cürufu çimento ile ikame edilerek inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Bu bağlamda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Yüksek fırın cürufunun betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada betonda yüksek fırın cürufu ikame oranı arttıkça sertleşmiş betonun birim ağırlığının azaldığı, su emmesinin ikame oranı ile arttığı ve basınç dayanımında azalma meydana geldiği belirtilmektedir [8].

Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cüruf içeren betonların durabilite özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada yüksek fırın cürufunun dayanıma ve dayanıklılığa olumlu katkı yaptığı, mineral katkıların ikili ve üçlü kullanımının ise tek başına kullanılmaları ile ortaya çıkan eksiklikleri giderdiği belirtilmiştir [9].

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun betonun klor geçirimsizliği ve basınç dayanımına etkisi üzerine yapılan bir çalışmada ise mineral katkıların zamanla artan puzolanik reaksiyonu nedeniyle betonun klor geçirimsizliğinin zamanla azaldığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada çimentonun ağırlıkça %50 oranında ince öğütülmüş uçucu kül veya yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesi hâlinde belli su/bağlayıcı oranında 34 MPa'nın üzerinde basınç dayanımına ulaşan betonlar elde edilmiştir [10].

Bu çalışmada betonun performansına sağladığı katkıyı görmek amacıyla mineral katkı olarak yüksek fırın cürufu de-

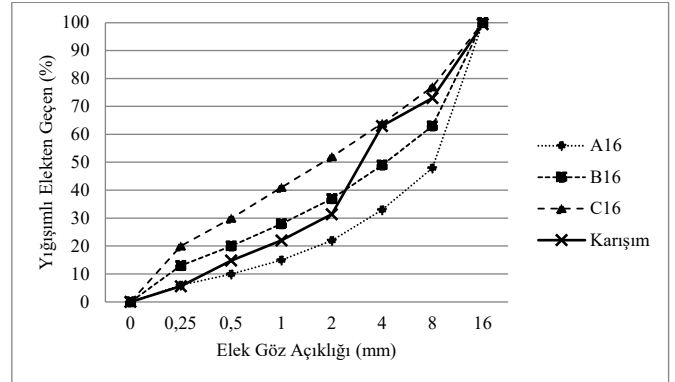
lendirilmiştir. Yüksek fırın cürufu farklı oranlarda çimento ile ikame edilerek beton karışımları hazırlanmış ve hazırlanan numuneler farklı kür koşullarında farklı sürelerde bekletilmiştir. Farklı her bir kür koşulu için basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiş ve bu numuneler üzerinde kılcallık, su emme ve hızlı klor geçirimsizliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla 28 gün standart kür gören numuneler de üretilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Agrega

Çalışmada en büyük tane boyutu 16 mm olan kalker esaslı kırma taş ve kırma kum kullanılmıştır. Agregalara ait doymuş kuru yüzey özgül ağırlık ve su emme değerleri Tablo 1'de, granülometri eğrisi ve ilgili sınır eğrileri Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Karışım agregasına ait granülometri eğrisi ve ilgili sınır eğrileri

Tablo 1. Agregalara ait özgül ağırlık ve su emme değerleri

Agrega	Özgül ağırlık, g/cm ³	Su emme, %
Kırma taş	2,75	1,1
Kırma kum	2,59	2,5

2.1.2. Çimento

Üretimlerde Aşkale Trabzon Çimento Fabrikası üretimi CEM I 42.5 R tip çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait bazı fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler Tablo 2'de verilmektedir.

2.1.3. Yüksek Fırın Cürufu

Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Ereğli Demir Çelik Fabrikasından temin edilmiş olup kimyasal bileşimi Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Çimento ve yüksek fırın cürufuna ait bazı özellikler

	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu
Kimyasal Bileşim (%)		
SiO ₂	19,46	39,18
Al ₂ O ₃	5,11	9,81
Fe ₂ O ₃	3,31	1,9
CaO	60,23	32,52
MgO	2,08	9,94
SO ₃	3,05	---
Na ₂ O	0,27	---
K ₂ O	0,69	---
Kızdırma kaybı	3,00	---
Fiziksel Özellikler		
Özgül ağırlık, g/cm ³	3,12	2,53
Özgül yüzey, cm ² /g	4126	---
Mekanik Özellikler		
Basınç Dayanımı MPa	2 gün	28
	7 gün	40,4
	28 gün	51,5

2.1.4. Kimyasal Katkı Maddesi

Deneysel çalışmada çökme 15±2 cm olacak şekilde polikarboksilik eter esaslı bir süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır.

2.2. Beton Tasarımı

Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen üretilere ait karışım oranları Tablo 3'te verilmektedir. Toplam 7 karışım hazırlanmış olup tüm karışımlar için su/bağlayıcı oranı 0,6 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Gerçekleştirilen üretilere ilişkin karışım oranları

Üretim No	Yüksek Fırın Cürufu İkame Oranı (%)	Malzeme Miktarları (kg/m ³)				Çökme (cm)
		Çimento	Su	Agrega	Uçucu Kül	
1	0	300	180	1905	0	13
2	10	270		1904	30	15
3	20	240		1903	60	15
4	30	210		1901	90	15
5	40	180		1900	120	15
6	50	150		1899	150	13
7	60	120		1897	180	13

Her bir karışım için 18 adet 10 cm'lik küp numune, 3 adet 10x10x40 cm boyutlarında prizmatik numune ve 1 adet 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindirik numune üretilmiştir. Uygulanan kür koşulları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Uygulanan kür koşulları

Numune Kodu	Kür Koşulları
28W	28 gün boyunca standart su kürü
7W21A	7 gün standart su kürü sonrasında 21 gün laboratuvar ortamında kür
28A	28 gün boyunca laboratuvar ortamında kür
7W	7 gün boyunca standart su kürü
7A	7 gün boyunca laboratuvar ortamında kür

2.3. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı ölçümleri için 10 cm küp numuneler kullanılmıştır. Deneyde numuneler TS EN 12390-3 uyarınca aksel yük altında kırılarak basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

2.4. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme deneyi 10x10x40 cm boyutlu prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney, TS EN 12390-5 uyarınca numunenin orta noktasından yükleme ile gerçekleştirilmiştir.

2.5. Kılcal Su Geçirirliiliği Deneyi

Kılcal su geçirirliiliği deneyi ASTM C1585'e göre gerçekleştirilmiştir. Bir gün süreyle 100°C fırında bekletilen numuneler fırından çıkarılarak laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Numuneler alt yüzünden suya değecek şekilde deney düzeneğine yerleştirilmiş, yan kısımlarından su girişini engellemek için numune yan yüzeyleri geçirimsiz hâle getirilmiştir. Numunelerin ağırlıkları 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60 ve 120 dakikalık süreler sonunda ölçülerek zamanla kılcal yolla emilen su miktarı belirlenmiş ve kaydedilmiştir. Ölçüm değerleri kullanılarak kılcallık katsayısı değerleri her bir numune için $cm/dk^{0.5}$ cinsinden belirlenmiştir.

2.6. Su Emme Deneyi

24 saat boyunca 105°C sıcaklıkta etüvde kurutulan numuneler tartılmış ve 2 cm yüksekliğinde su dolu kaba konularak 24 saat boyunca bekletilmiştir. Daha sonra kabın tamamı su ile doldurularak 3 gün boyunca bekletilen numuneler doymuş kuru yüzey hâle getirilerek su emme yüzdeleri belirlenmiştir.

2.7. Hızlı Klor Geçirirliiliği Deneyi

İlgili deney ASTM C 1202'ye göre gerçekleştirilmiştir. Suyla doymuş hâle getirilen numunenin bir yüzeyi %3'lük NaCl diğer yüzeyi 0,3M NaOH çözeltisine temas edecek şekilde düzeneğe yerleştirilmiştir. Doymuş hâldeki numunelerden su sızmasını engellemek için numunelerin cihaz ile temas etmeyen yüzeyleri silikon ile yalıtılmıştır. 6 saat süresince 60 V gerilime maruz bırakılan numunelerden geçen elektriksel yük Coulomb (C) cinsinden kaydedilmiştir. Deney düzeneği Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Hızlı klor geçirirliiliği aparatı ve deney düzeneği

Tablo 5. ASTM C 1202'ye göre klorür geçirirliilik sınıflaması

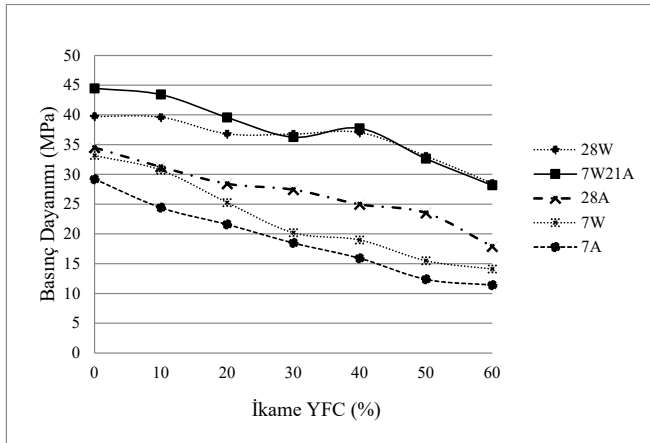
Geçen Yük (Coulomb)	Klorür Geçirirliilik Sınıfı
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

ASTM C1202 standardına göre ölçülen yüke tekabül eden betonun klor geçirirliilik sınıfları Tablo 5'te verilmektedir.

3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME

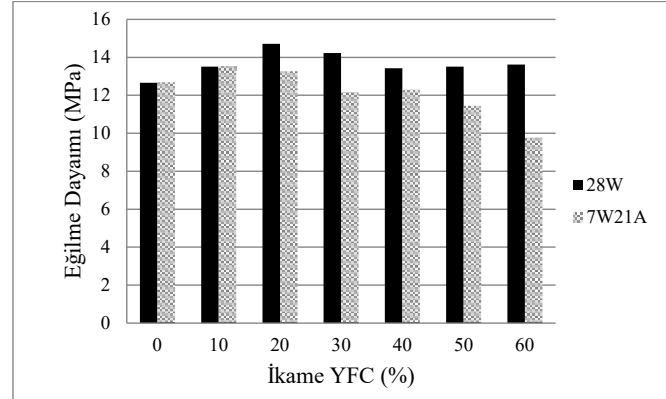
Şekil 3, 10 cm küp numuneler üzerinde elde edilen 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri vermektedir. Şekilden görüleceği üzere kür koşulundan bağımsız olarak karışımlarda yüksek fırın cürufu ikamesi arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Bu sonuç yapılan başka bir çalışmada elde edilen sonuç ile uyum içindedir [11,12]. Çalışmamızda %60 YFC içeren betonların basınç dayanımları standart betonlara kıyasla %30-50 arasında bir azalma söz konusudur. Benzer bir çalışmada [11] %50 YFC ikameli betonların dayanımlarının standart betonlarınkine kıyasla %38 oranında bir azalmanın söz konusu olduğu belirtilmektedir. 7 gün su ve akabinde 21 gün havada kür gören

numuneler düşük YFC ikame oranlarında standart kür (28W) görenlere kıyasla daha yüksek dayanım verirken yüksek YFC ikame oranlarında ise dayanım eşit düzeyde olmaktadır. Bunun anlamı üretimden sonra ilk 7 gün su kürünün basınç dayanımı açısından öneminin ortaya çıkmasıdır. Katkısız betonlarda 7 gün süresince su kürü gören numunelerin basınç dayanımlarının 7 gün su ve akabinde 21 gün havada kür görenlere göre %33 oranında artış göstermektedir. YFC ikame oranı arttıkça bu artış daha yüksek değerler almaktadır. Bunun nedeni 20°C ve %60 bağıl neme sahip laboratuvar ortamının hidratasyon gelişimi için uygun olduğu ve dolayısıyla dayanım gelişiminin sürdürülmesine olanak sağlamış olmasıdır. 7 gün su kürü ve akabinde 21 gün havada kür gören numunelerin deney esnasında nem içeriklerinin 28 gün boyunca suda kür görenlere göre düşük olması da dayanımlarının yüksek çıkmasının bir nedeni olabilir. %20'den düşük YFC ikame oranlarında 7 gün süreyle suda kür gören betonun basınç dayanımının 28 gün boyunca havada kür gören betonunkine eşit olması ilginç bir husus olarak değerlendirilebilir.



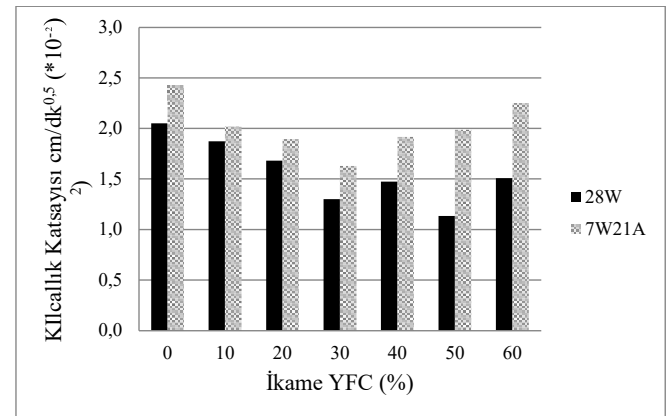
Şekil 3. Basınç dayanımı deney sonuçları

Şekil 4, 10x10x40 cm prizmatik numuneler üzerinde elde edilen eğilme dayanımlarını göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere standart kür gören numunelerin eğilme dayanımları tüm YFC ikame oranlarında ciddi bir değişim göstermemektedir. Yapılan başka bir çalışmada eğilme dayanımlarının YFC ikame oranına bağlı olarak dalgalı bir seyir gösterdikleri ve genelde bir azalma veya artma eğiliminin olmadığı ifade edilmektedir [13]. Buna karşın 7 gün süreyle suda ve akabinde 21 gün havada kür gören numunelerin eğilme dayanımları %20 ve üzerindeki YFC ikame oranlarında hatırı sayılır azalma göstermektedir. Örneğin, %60 YFC ikameli betonların eğilme dayanımı %20 YFC ikameli olanlara göre %26 oranında azalma göstermektedir.



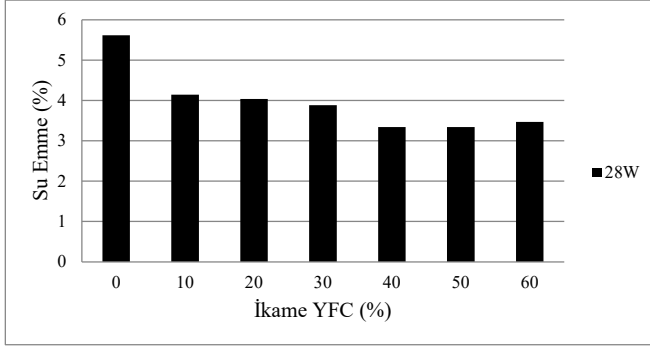
Şekil 4. Eğilme dayanımı deney sonuçları

Şekil 5, 10 cm küp numuneler üzerinde gerçekleştirilen kılcal geçirimlilik değerlerini vermektedir. Şekil incelendiğinde %30 YFC ikamesine sahip betonların tüm kür koşullarında en düşük kılcal geçirimlilik katsayısına sahip oldukları görülmektedir. Çok küçük fark ile birlikte sadece 28 gün standart kür gören %50 ikameli beton için bu durum istisnaidir. Bir diğer dikkat edilecek husus, her bir ikame oranı için genel olarak 28 gün standart kür gören numuneler en az kılcal geçirimlilik katsayısına sahiptir. Gerçekleştirilen başka bir çalışmada %25 ve %40 YFC ikameli betonların kılcallık katsayılarının standart ve %60 YFC ikameli betonlarınkine nazaran daha düşük olduğu ifade edilmektedir [14]. Bu sonuç çalışmamızda elde edilen sonuçla örtüşmektedir.



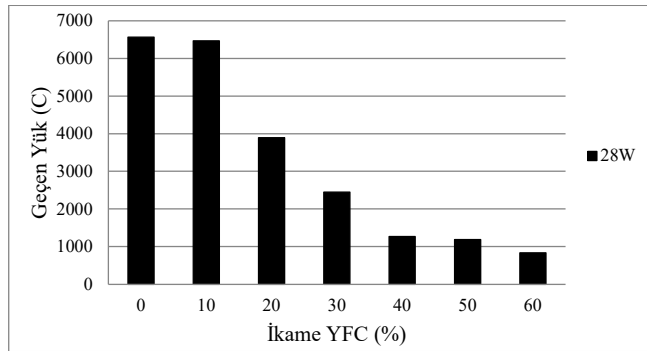
Şekil 5. Numunelere ilişkin ölçülen kılcal geçirimlilik katsayıları

Şekil 6, numuneler üzerinde ölçülen su emme değerlerini içermektedir. Şekilden görüleceği üzere YFC ikameli betonların su emme değerleri katkısızla göre azalmıştır. Bu azalma yüksek ikame oranlarında daha da belirginleşmiştir.



Şekil 6. Numuneler üzerinde ölçülen su emme sonuçları

Şekil 7, hızlı klor geçirimliliği ölçümlerini vermektedir. Şekil incelendiğinde YFC ikame oranı arttıkça hızlı klor geçirimliliği belirgin olarak azalmaktadır. Katkısız ve %10 YFC ikameli betonlar ilgili standart uyarınca yüksek geçirimli, %20-30 YFC ikameli betonlar orta geçirimli, %40-50 YFC ikameli betonlar düşük geçirimli ve %60 YFC ikameli betonlar da ihmal edilebilir derecede az geçirimli sınıfta yer aldıkları görülmektedir. Bağlayıcı miktarı 450 kg/m^3 olacak şekilde gerçekleştirilen bir çalışmada klor iyonu geçirimliliği YFC ikamesi artışına bağlı olarak hatırı sayılır bir azalma eğilimi görülmektedir [15]. %70 YFC ikameli betonların klor iyonu geçirimliliği standart betonlarınkine nazaran azalma %50 iken, çalışmamızda %60 YFC ikameli betonlarda azalma oranı %80 civarındadır.



Şekil 7. Hızlı klor geçirimliliği sonuçları

4. SONUÇ

- Gerçekleştirilen deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçları çıkarmak mümkündür:
- YFC ikamesi arttıkça basınç dayanımı belirgin bir biçimde azalmaktadır. YFC ikamesi oranından bağımsız olarak 7 gün su ve akabinde 21 gün havada (laboratuvar ortamında) kür gören betonların basınç dayanımları düşük ikame oranlarında standart betona kıyasla yüksek çıkmıştır.

- Eğilme dayanımı YFC ikame oranı artışına bağlı olarak 28 gün su içinde kür halinde önemli bir değişim göstermezken 7 gün su içinde 21 gün havada kür etkisinde azalma yönünde olacak şekilde önemli bir değişim göstermektedir.
- Tüm kür koşulları için geçerli olmak üzere %30-50 YFC ikameli betonlarda kılcallık katsayıları minimum seviyededir.
- İkame oranından bağımsız olarak su emme değerleri standart betona kıyasla belirgin olarak düşük çıkmaktadır.
- YFC ikame oranı arttıkça hızlı klorür geçirimliliği belirgin olarak azalmaktadır.
- Sonuç itibarıyla, yüksek YFC ikame oranlarında basınç dayanımında belirgin bir azalma olsa da durabilite açısından etkisinin olumlu olduğu söylenebilir. Özellikle yüksek YFC ikame oranlarında ölçülen su emme ve hızlı klorür geçirimliliğinde belirgin iyileşmeler söz konusudur. 7 gün su kürü akabinde 21 gün havada kür uygulaması basınç dayanımı açısından standart küre eş değer sonuçlar vermiştir.

Kaynaklar

1. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., "Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)", Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 2010.
2. Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Gjør, O.E., "Puzolanik Malzemelerin Betonun Mekanik Özellikleri ve Klor İyonu Yayınımına Etkisi", İTÜ Mühendislik Dergisi, Cilt. 6, pp. 85-94, 2007.
3. Erdoğan, T.Y., "Beton", ODTÜ yayıncılık, Ankara, 2013.
4. Dubey, A., Chandak, R., Yadav, R.K., "Effects of Blast Furnace Slag Powder on Compressive Strength of Concrete", International Journal of Scientific & Engineering Research, No. 3, 2012.
5. Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., "Beton", Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2012.
6. Erdoğan, Ş., Kurbetci, Ş., "Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri", Türkiye Mühendislik Haberleri, 2003.
7. Yalçın, H., Gürü, M., "Çimento ve Beton", Palme Yayıncılık, Ankara, 2006.
8. Emiroğlu, M., Koçak, Y., Subaşı, S., "Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi", 6th International Advanced Technologies Symposium, 2011.
9. Binici, H., Eken, M., Dinçer, A., "Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, No. 28, pp. 11-20, 2013.
10. Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Yüceer, Z., Erenoğlu, T., "Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Klor Geçirimsiliğine ve Basınç Dayanımına Etkisi", 5.Ulusal Beton Kongresi, 2003.
11. Bagheri, A.R, Zanganeh, H., Moalemi, M.M., "Mechanical and Durability Properties of Ternary Concretes Containing Silica Fume and Low Reactivity Blast Furnace Slag", Cement & Concrete Composites, No. 34, pp. 663-670, 2012.
12. Zhao, H., Sun, W., Wu, X., Gao, B., "The properties of Self-compacting Concrete with Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag Mineral Admixtures", Journal of Cleaner Production, No. 95, pp. 66-74, 2015.
13. Khatib, J.M., Hibbert, J.J., "Selected Engineering Properties of Concrete Incorporating Slag and Metakaolin", Construction and Building Materials, No. 19, pp. 460-472, 2005.
14. Panesar, D.K., Chidiac, S.E., "Capillary Suction Model for Characterizing Salt Scaling Resistance of Concrete Containing GGBFS", Cement & Concrete Composites, No. 31, pp. 570-576, 2009.
15. Ahmed, M.S., Kayali, O., Anderson, W., "Chloride Penetration in Binary and Ternary Blended Cement Concretes as Measured by Two Different Rapid Methods", Cement & Concrete Composites, No. 30, pp. 576-582, 2008.