

MİNERAL KATKILI LİFLİ BETONLARDA YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİYLE OLUŞAN YÜZEY ÇATLAKLARI VE DAYANIM KAYIPLARI

Abdullah Huzeyfe Akca¹,
Nilüfer Özyurt Zihnioğlu²

Özet

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonlardaki CaO soğuma sonrasında ortamdaki nem etkisiyle Ca(OH)₂ oluşturur ve hacimce %44 oranında genişerek mekanik olarak zayıflamış beton yüzeyinde ciddi tahribata neden olabilir. Bu çalışmada, içerisinde farklı oranlarda çelik ve polipropilen lif bulunan mineral katkıli betonlar tek taraflı olarak 1000°C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve soğuma sonrasında yüksek sıcaklığa maruz kalmış beton yüzeylerindeki çatlak oluşumu takip edilmiştir. Çelik lifler yüksek ergime noktasına sahip olduğundan ısıtma sonrasında bütünlüklerini koruyabilmiştir. Bundan dolayı bu lifler betonların yüzeyinde oluşan çatlakların daha fazla büyümesine ve çoğalmasına engel olmuştur. Ayrıca çelik lifli ve hibrit lifli beton gruplarında ısıtma sonrasında devam eden dayanım kayıplarında azalmalar görülmüştür. Fakat çelik lifli mineral katkıli betonların parça atma eğilimi ciddi oranda artmıştır. Polipropilen lifler ise 160°C civarında eriyerek ve 450°C civarında tamamen yok olarak beton içerisinde hacimleri oranında boşluk oluşturmuştur. Bu kanallar betonların ısıtma sırasında parça atma riskini azaltmıştır fakat soğuma sonrasında betonda oluşan çatlaklarla birleşerek beton yüzeyinin daha hızlı bozulmasında rol oynadıkları düşünülmektedir.

Surface Cracks and Strength Reduction of Fiber Reinforced Concrete Incorporating Mineral Additives After High Temperature Exposure

CaO in high temperature exposed concrete reacts with water molecules in the air and forms Ca(OH)₂ resulting in 44% volume increase. This can be detrimental at the weakened surface of concrete. In this study, steel and polypropylene fiber reinforced concretes incorporating mineral admixtures were heated to 1000°C under one-sided heating conditions and then crack growth and occurrences were monitored on the heated surfaces of concrete after cooling. Steel fibers survived after heating since they have high melting points. Therefore, they were effective to restrict crack growth and development. However, spalling risk of plain concrete incorporating mineral admixtures increased with the inclusion of steel fibers. On the other hand, polypropylene fibers melted above 160°C and they disappeared by forming micro channels in concrete around 450°C. These channels reduced spalling risk of concrete by improving vapor diffusion rate but they combined with new cracks occurred after cooling resulting in higher deterioration of concrete.

1. GİRİŞ

Yüksek sıcaklığa ve ateşe maruz kalan betonun dayanıklılığı ile ilgili birçok araştırma yapılmaktadır. Sonuçların geneli, betonun yanmaz bir malzeme olmasından ötürü yangında stabil kalma süresinin uzun olduğunu ve yangın sırasında zararlı gazlar salmadığını göstermiştir [1]. Literatürde yüksek sıcaklığa maruz kalan betonda parça atma, çatlama, renk değişimi, kütle ve dayanım kaybı gibi çeşitli olgu ve hasarlar rapor edilmiştir. [2]. Bunun yanı sıra betonun dayanıklılığı ve elastisite modülünde düşüş de literatürdeki çalışmalarda önemle üzerinde durulan konulardan birisidir [3].

Betonun fiziksel yapısı ve morfolojisi yüksek sıcaklık uygulaması sırasında önemli ölçüde değişir ve bu durum betonun dayanım ve dayanıklılığında kötüleşmeye yol açar. Hidratasyon ürünlerinin dehidrasyonu 400°C'den sonra başlar ve CSH jellerinin tamamen bozulmasına kadar sürer [4]. Bu süreçte Ca(OH)₂ suyunu kaybederek CaO'e dö-

nüşür ve dolayısıyla yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonların iç yapısında CaO miktarı artmış olur. Beton soğuduktan sonra CaO ortamdaki nem ile tekrar hidrate olarak Ca(OH)₂ oluşturur ve hacimce %44 oranında genişleyerek betonun

¹abdullah.akca@boun.edu.tr 2) nilufer.ozyurt@boun.edu.tr / Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

² Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

dağılmasına sebep olabilir [5]. Bu olumsuz etkiden korunmak adına betonun içindeki $Ca(OH)_2$ miktarı üretim sırasında bazı mineral katkıları kullanılarak baştan azaltılabilir ya da betonda genişleme sırasında oluşacak gerilmeleri dengeleyebilmek için yüksek ergime noktalı lifler karışım sırasında eklenebilir [6].

Bu sebeple, bu çalışmada puzolanik etkiyle $Ca(OH)_2$ miktarını azaltmak için yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikameli betonlar üretilmiş, ısıtma sırasında parça atma etkisini azaltmak için polipropilen (PP) ve çelik lifler beton içerisinde kullanılmış ve soğuma sonrasındaki süreçte çatlak oluşumunu sınırlamak için yine liflerin etkisinden yararlanılmak istenmiştir. Üretilen numuneler yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra çatlak oluşumunu takip etmek amacıyla hava kürüne maruz bırakılmıştır. Bu sürecin her aşamasında basınç dayanımları incelenmiş, ısıtma sonrasındaki basınç dayanımındaki değişimler siyah piksel analizi sonuçları ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca beton soğuma sonrasında ve hava kürü sonrasında ısıtılan yüzeylerden alınan toz örneklerde TGA incelemeleri yapılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Numuneler

CEM I tipi Portland çimentosu (PÇ), yüksek fırın cürufu (FC) ve F tipi uçucu kül (UK) kullanılarak üç farklı beton tipi üretilmiştir. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül, toplam bağlayıcının sırasıyla kütlece %40'ı ve %30'u oranında çimento ile ikame edilmiştir. Beton üretimleri su/çimento oranı 0,45 olacak şekilde yapılmıştır. Betonlarda agrega olarak dere kumu ve silis esaslı çakıl kullanılmıştır. Beton karışım oranları Tablo 1'de verilmiştir. Her beton grubunun çökme değerleri TS EN 206'ya göre S4 sınıf aralığına denk gelmektedir. Her beton tipi için kontrol (O), çelik lifli (Ç), polipropilen lifli (P) ve hibrit lifli (H) olmak üzere 4 beton grubu oluşturulmuştur. Böylece toplamda Tablo 2'de kodlamaları verilen 12 farklı beton üretimi gerçekleştirilmiştir. PP lifler 12 mm boyunda 35 mikron çapındadır ve PP lifli gruplarda hacimce %0,2 oranında kullanılmıştır. Betonda PP lifler mukavemet arttırmak amacıyla kullanılmamıştır. Çelik lifler 35 mm boyunda ve 0,55 mm çapında kancalı şekildedir ve çelik lifli gruplarda hacimce %0,5 oranında kullanılmıştır. Hibrit lifli betonlarda ise hacimce %0,1 PP lif ve %0,25 çelik lif beraber kullanılmıştır.

Tablo 1. Betonların karışım oranları

Malzemeler	Portland Çimentolu	Yüksek Fırın Cürufu	Uçucu Küllü
	1 m ³ betondaki miktarı (kg)		
Çimento	450,0	270,0	315,0
Cüruf	-	180,0	-
Uçucu Kül	-	-	135,0
Su	202,5	186,3	166,5
No 2 Agrega	484,0	493,4	495,7
No 1 Agrega	484,0	493,4	495,7
Kırma Kum	564,0	574,2	576,8
Kum	225,0	228,9	223,0

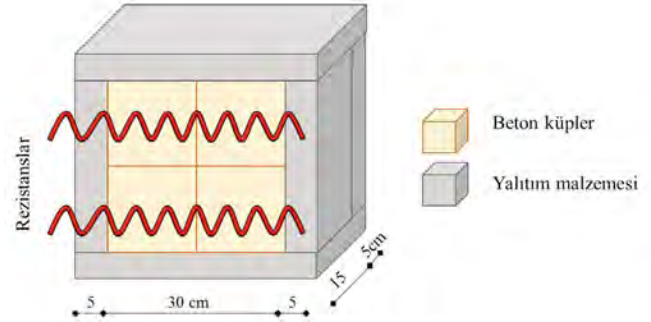
Tablo 2. Beton gruplarının kodlandırılması

Kontrol	Portland Çimentolu			Yüksek Fırın Cürufu				Uçucu Küllü			
	Çelik Lifli	P.P. Lifli	Hibrit Lifli	Kontrol	Çelik Lifli	P.P. Lifli	Hibrit Lifli	Kontrol	Çelik Lifli	P.P. Lifli	Hibrit Lifli
PÇO	PÇÇ	PÇP	PÇH	FCO	FCÇ	FCP	FCH	UKO	UKÇ	UKP	UKH

Her bir beton grubu için 11 adet 15 cm'lik küp numune üretilmiştir. Üretilen küp numuneler ertesi gün kalıpları söküldükten sonra 20°C'deki kirece doymun suda 28. günlerine kadar bekletilmiştir. Daha sonra sudan çıkarılarak 90. günlerine kadar laboratuvar ortamında bekletilerek ısıtma öncesinde şartlandırılmıştır. Üretilen 11 numunedan 3 tanesi 90. günde ısıtma öncesindeki özellikleri belirlemek için test edilmiştir. Kalan 8 tanesi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Bunlardan iki tanesi beton numuneler içerisindeki sıcaklığı ölçmek için kullanılırken, 3 tanesi soğuduktan sonra test edilmek için, diğer 3 tanesi de 28 gün boyunca laboratuvar ortamında hava kürüne tabi tutulduktan sonra test edilmek için kullanılmıştır.

2.2. Isıtma Prosedürü

Numuneleri ısıtmak için 1250°C kapasiteli elektrikli bir fırın kullanılmıştır. 4 numune Şekil 1'de gösterildiği gibi yalıtım yapılarak fırının içine yerleştirilmiş ve tek taraflı ısıtmaya benzer koşullar sağlanmaya çalışılmıştır. Numuneler 1000°C sıcaklığa kadar ortalama 7°C/dk ısıtma hızıyla ısıtılmıştır ve maksimum sıcaklıkta 1 saat boyunca ısıtmaya devam edilmiştir. Numuneler fırın kapatıldıktan sonra fırın içerisinde soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 1. Numunelerin yalıtımı ve fırına yerleştirilmesi

2.3. TGA incelemesi

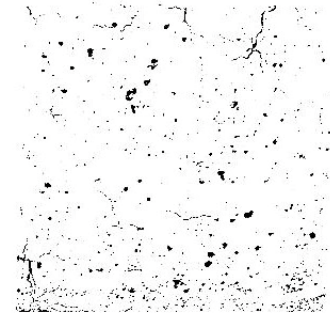
Isıtma sonrasında ve hava kuru sonrasında beton numunelerin ısıtılan yüzeylerinden ayrı ayrı toz alınmıştır. Alınan bu tozlardan ortalama 20 mg kadar örnekler alınarak termogravimetrik analiz (TGA) cihazına yerleştirilmiş ve 20°C/dk ısıtma hızı ile 1000°C'ye kadar ısıtılmıştır. Elde edilen TGA eğrilerinin türevleri alınarak diferansiyel termal analiz (DTA) diyagramları elde edilmiştir. DTA diyagramlarında görülen pikler malzemede faz değişimine işaret etmektedir. Ca(OH)_2 dehidrasyonu gösteren pikler ortalama 450°C civarında belirginleşmektedir.



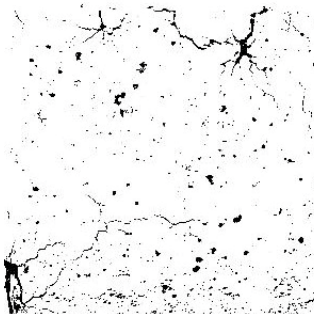
Soğuma Sonrası İlk Yüzey
Siyah Alan: 407 mm²
Normalize değer: 1,0



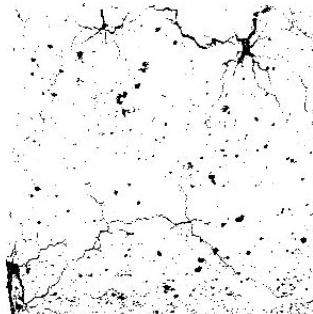
1 gün sonra
Siyah Alan: 416 mm²
Normalize değer: 1,021



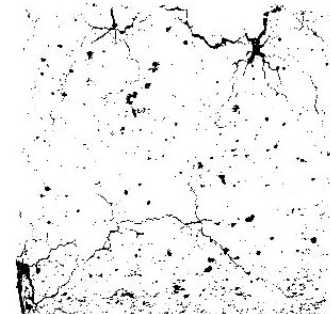
2 gün sonra
Siyah Alan: 430 mm²
Normalize değer: 1,052



3 gün sonra
Siyah Alan: 594 mm²
Normalize değer: 1,459



4 gün sonra
Siyah Alan: 682 mm²
Normalize değer: 1,672

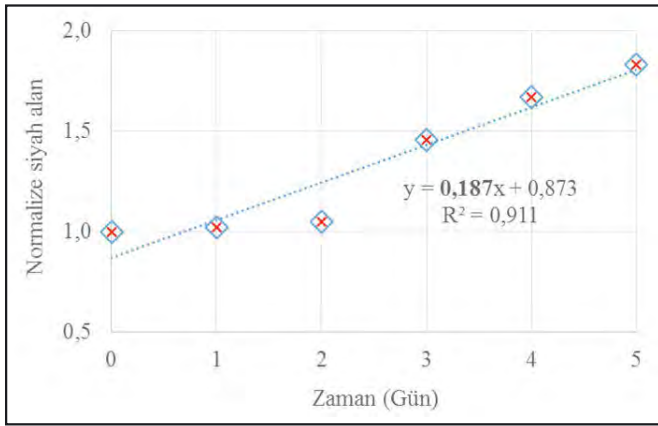


5 gün sonra
Siyah Alan: 747 mm²
Normalize değer: 1,834

Şekil 2. PÇP beton grubuna ait hava kuru sırasında çekilen fotoğraflarda çatlak gelişimi takibi

2.4. Fotoğraflar üzerinde Siyah Piksel Analizi (SPA)

Parça atma gözlemlenen gruplar hariç her beton grubundan ısıtma sonrasında hava kürüne tabi tutulan bir numunede inceleme yapılmıştır. Numunenin ısıtılan yüzeyi 24 saat arayla fotoğraflanarak yüzeydeki çatlakların büyümesi ve yeni çatlakların oluşumları takip edilmiştir. Fotoğraf çekimi için 18 MP DSLR kamera ve 100 mm makro lens kullanılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi çekilen bu fotoğraflar ImageJ programı kullanılarak çatlaklar, yüzeydeki kavlamalar ve boşluklar siyah olacak şekilde siyah beyaz görüntülere dönüştürülmüştür. Her görüntü için mevcut siyah piksellerin alanları hesaplanmıştır. Daha sonra aynı seride peş peşe çekilen fotoğraflardaki siyah alanlar ilk görüntüdeki siyah alana bölünerek normalize edilmiştir. Normalize edilen bu değerlerin zamanla değişim grafikleri üzerine eğilim çizgileri eklenmiştir. Elde edilen doğruların eğimleri karşılaştırılarak farklı malzemeler ve liflerle üretilmiş serilerin yaklaşık bozulma hızları karşılaştırılmıştır. Örnek olarak Şekil 3’te verilen PÇP grubuna ait numunenin SPA - zaman eğrisinin eğimi 0,187 olarak bulunmuştur. Parça atma olgusu gözlemlenen seriler hariç her seri için verilen örnekteki gibi hesaplanan bu oranların hava kürü uygulanan betonlarda dayanım kayıpları ile ilişkileri incelenmiştir.



Şekil 3. PÇP grubu betonda SPA sonucu

2.5. Basınç Dayanımı Ölçümleri

Beton numunelerin ısıtma öncesinde, soğuma sonrasında ve hava kürü sonrasında basınç dayanımı belirlenmiştir. Basınç testleri sırasında yükleme hızı 0,6 MPa/s seçilmiştir.

3. SONUÇLAR

3.1 Parça atma istatistiği

Isıtmalar sırasında bazı gruplarda parça atma gözlemlenmiştir. Her grup için parça atan numunelerin ve ısıtılan numu-

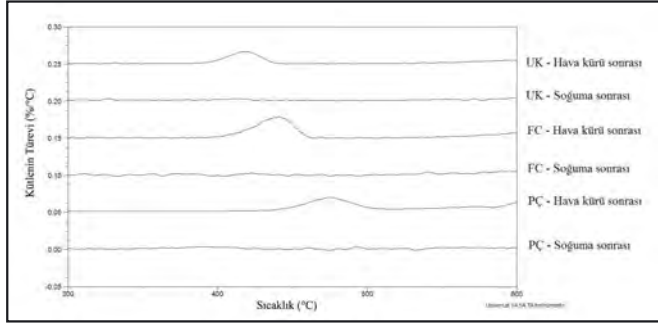
nelerin sayısı ile parça atma gözlemlenen numune sayısının toplam ısıtılan numune sayısına oranı Tablo 3’te verilmiştir. Literatürde de belirtildiği gibi PP lifler 160°C gibi sıcaklıklarda eriyerek beton içerisinde oluşan buhar basıncını azaltmaktadır [6], bu sebeple PP lif bulunan gruplarda parça atma davranışına rastlanmamıştır. Çelik liflerin kullanılması parça atma oranını azaltsa da PP lifler kadar etkili olamamıştır. Bunlarla birlikte mineral katkı kullanılan betonlarda parça atma eğiliminin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi çok ince parçacıklara sahip mineral katkıların beton iç yapısını yoğunlaştırması olabilir. Muhtemelen yoğunlaşan iç yapı oluşan su buharının tahliyesini zorlaştırmakta ve betonun içerisindeki buhar basıncının artmasına sebep olmaktadır [2].

Tablo 3. Isıtılan beton numunelerde görülen parça atma sıklığı

Grup	Isıtılan numune sayısı	Parça atan numune sayısı	Parça atma gözlemlenen numune oranı (%)
PÇO	6	2	33
PÇÇ	6	1	17
PÇP	6	0	0
PÇH	6	0	0
FCO	6	6	100
FCÇ	6	1	17
FCP	6	0	0
FCH	6	0	0
UKO	6	6	100
UKÇ	6	6	100
UKP	6	0	0
UKH	6	0	0

3.2. TGA sonuçları

Yapılan TGA incelemeleri sonucunda elde edilen DTA diyagramları Şekil 4’te verilmiştir. Sonuçlara göre ısıtılan yüzeylerde soğuma sonrasında Ca(OH)₂ bulunmamaktadır. Fakat hava kürü sonrasında her beton tipi için yüzeyde Ca(OH)₂ olduğu 450°C gözükten piklerden anlaşılmaktadır. Eldeki bu verilere göre, betonda mineral katkı kullanarak ısıtma sonrasında Ca(OH)₂ oluşumunu sınırlamak mümkün olmamıştır.



Şekil 4. TGA sonucunda elde edilen DTA diyagramlarının karşılaştırılması

3.3. Basınç Testlerinin Sonuçları

Isıtılan numunelerinin tamamında parça atma gözlemlenen serilerde basınç testleri yapılamamıştır. Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da yüksek sıcaklık uygulaması sonrasında ve hava kürü sonrasında farklı beton kategorilerine ait basınç daya-

nımı kayıpları verilmiştir. Beklenildiği üzere ısıtma sonrasında basınç dayanımına ait değerler her beton kategorisi için düşüş göstermiştir [2, 3]. Özellikle 600°C sıcaklıktan sonra CSH jellerinin yapısının bozulması bu kayıpların ciddi oranlara ulaşmasına sebep olmuştur [7]. Kalan dayanımlardaki düşüş yine her beton kategorisi için hava kürü sırasında devam etmiştir. Basınç dayanımları ısıtma sonrasında ortalama olarak %35 düşmüştür. Basınç dayanımları hava kürü sonrasında ise ilk dayanımın %50'si mertebesine inmiştir. Bu bağlamda ısıtma sonrasında beton dayanımındaki kötüleşmenin devam edebileceği açıkça görülmektedir. Çünkü ısıtma sonrasında beton içerisindeki CaO havadaki nem ile reaksiyon vererek Ca(OH)₂ oluşturur [5]. Fakat bu reaksiyon sırasında CaO hacimce %44 oranında genişleyerek ısıtma sonrasında zayıf düşmüş beton içerisinde yeni gerilmelere sebep olur. Bu gerilmelerin betonun zayıf noktalarında yeni çatlakların oluşmasına veya mevcut çatlakların büyümesine sebep olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4. Portland çimentolu kontrol gruplarında basınç dayanımları ve dayanım kayıpları

Grup	Isıtma öncesi	Soğuma sonrası		Hava kürü sonrası	
	MPa	MPa	Kayıp (%)	MPa	Kayıp (%)
PÇ0	64,5	43,9	31,9	23,1	64,1
PÇÇ	62,0	46,0	25,7	34,2	44,9
PÇP	58,2	36,9	36,7	19,3	66,8
PÇH	55,4	36,7	33,9	28,2	49,2
Ortalama	60,0	40,9	32,0	26,2	56,2

Tablo 5. Yüksek fırın cüruf ikameli beton gruplarında basınç dayanımı ve dayanım kayıpları

Grup	Isıtma öncesi	Soğuma sonrası		Hava kürü sonrası	
	MPa	MPa	Kayıp (%)	MPa	Kayıp (%)
FC0	63,0	-	-	-	-
FCÇ	60,8	39,4	35,2	31,5	48,2
FCP	63,6	43,8	31,1	28,7	54,9
FCH	60,2	44,6	25,9	32,6	45,8
Ortalama	61,9	42,6	30,7	30,9	49,6

Tablo 6. Uçucu kül ikameli beton gruplarında basınç dayanımı ve dayanım kayıpları

Grup	Isıtma öncesi	Soğuma sonrası		Hava kürü sonrası	
	MPa	MPa	Kayıp (%)	MPa	Kayıp (%)
UKO	69,5	-	-	-	-
UKÇ	69,4	-	-	-	-
UKP	71,1	45,5	36,0	32,8	53,8
UKH	70,6	44,2	37,4	42,3	40,1
Ortalama	70,1	44,9	36,7	37,6	46,9

Basınç dayanımlarının değişiminde liflerin etkisi incelendiğinde ise PP lif ilaveli betonların diğer beton tiplerine oranla ısıtma sonrasında ve hava kürü sonrasında daha fazla zarar gördüğü ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi 450°C sıcaklıklardan sonra yanarak tamamen yok olan PP liflerin beton içerisinde bıraktığı kılcal boşlukların hava kürü sırasında oluşan çatlaklarla birleşmesi sonucu oluşan çatlak ağı olabilir [8]. Çelik lif ilaveli betonlarda ise soğuma sonrasında genel olarak daha iyi sonuçlar görüle de bu etki çok sınırlı kalmaktadır. Fakat hava kürü sonrasında en az dayanım kayıpları çelik lif içeren gruplarda gözlemlenmiştir. Çelik lifler yüksek ergime noktasına sahip olduğu için ısıtma sonrasında da beton içerisindeki bütünlüklerini korumaktadır. Bu sebeple mevcut çelik liflerin hava kürü sırasında oluşan çatlakların gelişimini yavaşlattığı düşünülebilir.

3.4. Siyah Piksel Analizi (SPA) Sonuçları

Hava kürü sırasında numunelerin yüksek sıcaklığa maruz ka-

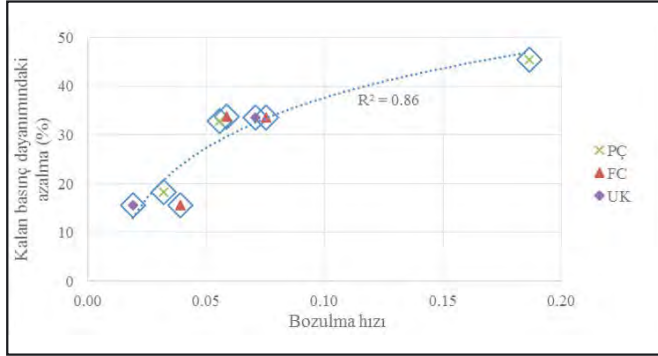
lan yüzeylerinde oluşan çatlaklar bozulma sürecinin izlenmesi amacı ile fotoğraflarla görüntülenerek kaydedilmiştir. Bu kayıtlar çatlak ve boşluklar siyah olacak şekilde siyah beyaz tona dönüştürülmüş ve numunelerdeki çatlak gelişimiyle birlikte artan siyah alan hesaplanmıştır. Fotoğrafı çekilen her numuneye hava kürü tamamlandıktan sonra basınç deneyi uygulanmış ve kalan basınç dayanımları hesaplanmıştır. Tablo 7'de gösterildiği üzere numunelerin hava kürü sonrası kalan basınç dayanımları, daha önce hesaplanan soğuma sonrası grup dayanımı ile oranlanmıştır. Buna göre hava kürü sırasında azalan dayanımlar hesaplanan bozulma hızı ile kıyaslandığında Şekil 5'te verilen grafik elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde dayanımlardaki azalmaların yüzeyde oluşan çatlak yoğunluğu ile %85'in üzerinde tanımlanabildiği görülmektedir. Bu oran gelişmiş fotoğrafı yöntemleri ve bu analize yönelik özel bir yazılım ile daha sonraki çalışmalarda belirgin bir şekilde artırılabilir.

Tablo 7. Basınç dayanımındaki azalma ve bozulma hızı karşılaştırması

Grup	Soğuma Sonrası ¹ (MPa)	Hava kürü sonrası ² (MPa)	Azalma (%)	Bozulma hızı
PÇO	Parça atma gözlemlendi, analiz yapılamadı.			
PÇÇ	46,0	37,6	18,3	0,032
PÇP	36,9	20,1	45,5	0,187
PÇH	36,7	24,6	32,8	0,056
FCO	Parça atma gözlemlendi, analiz yapılamadı.			
FCÇ	39,4	33,3	15,6	0,039
FCP	43,8	29,1	33,6	0,075
FCH	44,6	29,5	33,8	0,059
UKO	Parça atma gözlemlendi, analiz yapılamadı.			
UKÇ	Parça atma gözlemlendi, analiz yapılamadı.			
UKP	45,5	30,3	33,5	0,071
UKH	44,2	37,3	15,6	0,019

¹ Soğumanın hemen sonrasında kırılan 3 numunenin basınç dayanımı ortalamasını belirtmektedir.

² Fotoğrafı çekilen tek numunenin hava kürü sonrasındaki basınç dayanımını belirtmektedir.



Şekil 5. Kalan basınç dayanımındaki azalma ve bozulma hızı arasındaki ilişki

4. DEĞERLENDİRMELER

Çalışma kapsamında mineral katkı içeren lifli betonlarda yüksek sıcaklık uygulaması sonrası davranış değişiklikleri incelenmiş, bu değişikliklerin altında yatan sebepler makro ve mikro düzeyde araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar ile şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- Lifsiz her beton grubunda parça atma davranışına rastlanmıştır. Parça atma eğilimi çimentonun mineral katkılarla ikame edilmesiyle ciddi oranda artmaktadır. Lif takviyesi ise betonun parça atma riskini azaltmaktadır.
- Kalan basınç dayanımları ısıtma sonrasında belirgin bir şekilde azalmış ve bu azalma hava küreğine maruz bırakılan betonlarda daha ciddi boyutlara ulaşmıştır.
- PP liflerin betonda kullanılması avantaj olsa da (betonların parça atma eğilimi azaltması nedeniyle) ısıtma sonrasında mekanik özelliklerde zayıflamaya sebebiyet verdiği görülmektedir. Çelik lifler Portland çimentolu betonlarda ve yüksek fırın cürufu ikameli betonlarda parça atma riskini kısmen de olsa azaltmıştır. Bu etki daha yoğun matrisine sahip olan uçucu küllü betonlarda ise gözlemlenmemiştir. Fakat çelik lifler ısıtma sonrasında hâlâ beton içerisinde kalabildikleri için hava küreği sırasında oluşan çatlakları tutarak betonun bu süreçten daha az zarar görebilmesini sağlamıştır. Bu sebeple hibrit lif kullanımı ısıtma sırasında ve sonrasında betonun bütünlüğünü koruyabilmesi için etkili bir yöntem olabilir.
- Soğuma sonrası incelenen numunelerden hava küreğine tabi tutulanlarda gün geçtikçe yeni çatlaklar gözlemlenmiştir ve oluşan bu çatlakların dayanım kaybı ile ilişkili olduğu görüntü inceleme teknikleri ile de tespit edilmiştir.

Teşekkürler

Sağladığı finansal destek için Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projelerine (Proje Kodu 14A04D2), sundukları ürün desteği için AKÇANSA ve BASF-YKS Yapı Kimyasalları'na teşekkür ederiz. Ayrıca, çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen Ümit Melep, Bilge Uluocak ve Melike Babucci'ye de teşekkürlerimizi sunarız. Çalışmanın ilk yazarı TÜBİTAK'a doktora çalışmaları süresince sağladığı finansal destek için ayrıca teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Neville, A. M., "Properties of Concrete", Longman Scientific and Technical, New York, 2000.
2. Akca, A. H., Özyurt Zihnioğlu N., "High Performance Concrete under Elevated Temperatures", Construction and Building Materials, No.44, pp.317-328, 2013.
3. Chang, Y. F., Y. H. Chen, M. S. Sheu, G. C. Yao, "Residual Stress-Strain Relationship for Concrete after Exposure to High Temperatures", Cement and Concrete Composites, No.36, pp.1999-2005, 2006.
4. Bazant, Z. P., Kaplan, M. F., "Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models", Harlow, 1996.
5. Mendes, A., Sanjayan, J. G., Collins, F., "Long-term Progressive Deterioration Following Fire Exposure of OPC versus Slag Blended Cement Pastes", Materials and Structures, No.42, pp.95-101, 2009.
6. Khoury, G. A., "Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures", Structural Engineering Materials, No.22, pp.429-447, 2000.
7. Lin, W. M., T. D. Lin, L. J. Powers-Couche, "Microstructures of Fire-Damaged Concrete", ACI Materials Journal, No.93, pp.199-205, 1996.
8. Mofokeng, J. P., Luyt, A. S., Tábi, T., Kovács, J., "Comparison of Injection Moulded, Natural Fibre-reinforced Composites with PP and PLA as Matrices", Journal of Thermoplastic Composite Materials, No.25, pp.927-948, 2011.