



YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE ZEOLİT KATKILI BETONLARIN SÜLFAT DİRENCİNİN BELİRLENMESİ

A. Ferhat BİNGÖL*, H. Haghghipour BALANEJİ

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Sülfat dayanımı,
Yüksek fırın cürufu,
Zeolit,
SEM,
XRD.

Öz

Betonarme yapılarıdaki kalıcılık sorunlarından birisi de sülfat saldırısıdır. Sülfat beton içerisinde bazı reaksiyonlarla çatlak, genişleme, dağılma gibi bozulmalara yol açar ve sonuçta betonun dayanımında düşüşler gözlenir. Bu çalışmada; mineral katkıların betonların sülfat direncine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla çimento yerine, yüksek fırın cürufu ve zeolit kullanılarak betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlarda yüksek fırın cürufu ve zeolit çimento yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen betonlardan hazırlanan örnekler üzerinde 28, 90 ve 180 günlük kür sonrasında basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Ayrıca üretilen betonlardan hazırlanan örnekler 28 günlük kür sonrasında 100 g/l sülfatlı (Na_2SO_4) suda 90 ve 180 gün sülfat etkisine maruz bırakılarak ASTM C 1012'ye uygun şekilde sülfat testleri de yapılmıştır. Ayrıca kontrol grubu ve %10 mineral katkıli gruplarda SEM görüntüleri, EDS ve XRD ışını ölçümleri ile içyapı incelemesi yapılmıştır. Tüm gruplarda çimento türü (CEM I), toplam bağlayıcı miktarı (400 kg/m^3), sülfat miktarı (100 g/l), agrega türü ve gradasyonu sabit tutulmuştur. Sülfat etkisine maruz bırakılmamış kontrol numuneleri ve sülfat etkisindeki numuneler kıyaslanmış, hem basınç hem de eğilme dayanımında en iyi performansı %10 yüksek fırın cürufu ve zeolit içeren numunelerin gösterdiği tespit edilmiştir.

DETERMINING SULPHATE RESISTANCE OF CONCRETES WITH BLAST FURNACE SLAG AND ZEOLITE

Keywords

Sulphate resistance,
Blast furnace slag,
Zeolite,
SEM,
XRD.

Abstract

One of the problems in reinforced concrete structures is sulphate attack. Some reactions of sulphate with the cement, lead to deteriorations in concrete such as cracks, expansion, dispersion and as a result decreases are seen in strength of the concrete. In this paper; the effect of mineral additives on the sulphate resistance of concrete was investigated. For this aim concrete specimens were produced by using blast furnace slag and zeolite instead of cement. In concrete specimens Blast Furnace Slag (BFS) and zeolite were replaced with cement in weight 10%, 20%, 30% ratio. Unit weights, compressive strength and flexural strength measurements were made on the samples at 28, 90 and 180 days. In addition after 28 days water curing, specimens were exposed to sulphate effect for 90 and 180 days in 100 g/l sulphated (Na_2SO_4) water according to ASTM C 1012. In the control group and 10% mineral supplement groups, SEM images, EDS and XRD measurements were used for internal structure analysis. In all groups, cement type, total amount of binder, amount of sulphate, aggregate type and gradation were kept constant. As a result, both water-cured samples and the samples in the sulphated water were compared, best performance in both compressive and bending strength, is obtained from 10% BFS and 10% zeolite groups.

Alıntı/Cite

Bingöl, A.F., Balaneji, H.H., (2019). Yüksek Fırın Cürufu ve Zeolit Katkılı Betonların Sülfat Direncinin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(2), 254-264.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A.F. Bingöl, 0000-0002-8798-8343
H.H. Balaneji, 0000-0001-5444-2101

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	16.08.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	27.12.2018
Kabul Tarihi / Accepted Date	28.12.2018
Yayın Tarihi / Published Date	26.06.2019

* İlgili yazar / Corresponding author: afbingol@atauni.edu.tr, +90-442-2314770

1. Giriş

Puzolanik mineral katkılarının kullanımı sülfat direncini arttırmaya katkıda bulunmaktadır (Irassar vd., 1996; Skaropoulou vd., 2009). Ayrıca bu minerallerin kullanımı çevresel bakımından olumlu etki sağlamaktadır (Senthamarai vd., 2011; Huang vd., 2009; Pereira ve Luiz, 2012; Higashiyama vd., 2012, Medina vd., 2012). Tedbir alınmadığı takdirde, sülfat etkisiyle genleşen tuz sertleşmiş betonda çatlama ve sonuçta parçalanmalara sebep olabilmektedir (Baradan vd., 2010). YFC; silis, kalsiyum alümina silis ve bazik esaslı bileşikler içeren ve demir üretimi sırasında fırınlardan ergimmiş halde elde edilen bir atık üründür (Erdoğan ve Kurbetçi, 2013). Kimyasal bileşimi esas olarak $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'den ibarettir. Ancak cürufun kimyasal bileşimi kadar kristal yapısı da önemlidir. Kalsiyum içeriklerine ilave olarak, cürufun tane boyutu ve karakteristikleri ile camı madde bileşimi ve oranı, aktivitelelerinde önemli faktörlerdir (Mindness ve Young, 1981). Fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camı faz içermesi gereken YFC'nun içindeki CaO, MgO ve SiO_2 miktarları toplamın da yine en az 2/3 oranında olması istenmektedir. Bazı araştırmacılar YFC katkılı betonların sülfat etkisini Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde araştırmışlardır (Higgisn 2003; Brown vd., 2004; Roziere vd., 2009). Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre sodyum sülfata maruz bırakılan numunelerde basınç dayanımlarında kayıplar oluştuğunu ve hacimsel genleşmeler meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Yazıcı (2006), YFC katkılı harçların sülfat dayanıklılığını araştırmıştır. Zeolitler, kristal yapılu olup yapay ya da doğal sulu alüminyum silikat bileşikler olarak tanımlanırlar (Yücel, 1987). En yaygın kullanılan doğal puzolan malzemeler arasında olan zeolitin düşük maliyeti ve erişilebilirliği ve kristal yapılu olmasından dolayı, betonun dayanımında olumlu etki sağladığını ve bu sebeple tercih edilebileceği belirtilmiştir (Franus ve Dudek, 1999; Feng ve Peng, 2005; Najimi vd., 2012).

2. Materyal ve Yöntem

Beton üretiminde Urumiye ili sınırında Nazlı Dağı'ndan temin edilen doğal kum ve kırma taşlar kullanılmıştır. Kullanılan agreganın en büyük tane çapı 25mm'dir.

Bağlayıcı olarak, TS EN 197-1, 2002 standartlarına uygun olan, CEM I 42.5 R türü çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal analizi Tablo 1'de fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

YFC, İran'ın İsfahan ilinden temin edilmiş olup kimyasal ve fiziksel analizi Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimento bileşimi ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	(%)	Çimento Ana Bileşenleri	(%)
SiO_2	21,50	C_3S	48,26
Al_2O_3	5,05	C_2S	21,36
Fe_2O_3	2,77	C_3A	8,78
CaO	63,05	C_4AF	8,43
MgO	1,74	NOT: Çimentonun ana bileşenlerinin miktarları Bogue formülleri kullanılarak hesaplanmıştır.	
SO_3	2,50		
K_2O	0,85		
Kızdırma Kaybı	2,34		
Serbest kireç	1,20		

Tablo 2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel ve Mekanik özellikleri		
İncelik 45 μm elek üstü	(%)	5,80
Özgül ağırlık		3,13
Özgül Yüzey (Blaine değeri)	(g/cm^2)	3670
Priz başlangıcı	(saat-dakika)	2:25
Priz sonu	(saat-dakika)	3:00
Hacim genleşmesi	(%)	0,07
Basınç dayanımı 2 gün	(MPa)	28,4
Basınç dayanımı 28 gün	(MPa)	57,5

Tablo 3. YFC'nun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikleri	%	Fiziksel Özellikleri
CaO	37,00	Özgül Ağırlık 2,51
SiO_2	34,00	
Al_2O_3	11,00	Tane Boyutu (μm) ≤ 50
MgO	8,00	
MnO	2,10	
Fe_2O_3	1,10	
TiO_2	2,85	
S	0,90	
Kızdırma Kaybı	1,00	

Bu çalışmada kullanılan zeolit İran'ın Semnan ilinde üretilen Zeolit Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir ve özellikleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Zeolitin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikleri	%	Fiziksel Özellikleri
SiO ₂	70,50	Özgül Ağırlık 1,85
Al ₂ O ₃	10,30	
Fe ₂ O ₃	0,85	Su emme oranı (%) 22,00
MgO	0,74	
Na ₂ O	1,15	Porozite (%) 34,00
K ₂ O	1,35	
CaO	2,64	
P ₂ O ₅	0,02	
Cl	0,01	
Kızdırma Kaybı	11,79	

Bu çalışmada betonda işlenebilirliği sağlamak için hiper akışkanlaştırıcı (polikarboksilik eter esaslı) katkı maddesi kullanılmıştır. ASTM C1017/C 1017 M (2013); ASTM C494/C494 M Type (2001); EN 480-10 (2001) ve EN 480-12 (2008) standartlarına uygun olarak üretilen ürünün özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Su azaltıcı katkı maddesinin özellikleri

Özellik	
Renk	Koyu mavi
Yoğunluk (g/cm ³)	1,03-1,12
Klor içeriği (%)	<0,10
Alkali İçeriği (%)	<3

Bu çalışmada tüm gruplarda CEM I türü çimento kullanılmış ve toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Yüksek fırın cürufu ve zeolit kullanım miktarları ağırlıkça çimentonun yerine %10, %20 ve %30 ikame edilmiştir. Sülfat (Na₂SO₄) oranı 100 g/l, su/bağlayıcı oranı ise 0,40 olarak seçilmiş, su azaltıcı katkı ise %0,8 oranında kullanılmıştır. Buna göre tüm katkı türleri için karışım hesapları yapılarak Tablo 6'da gösterilmiştir.

Karışım oranları belirlenen malzemeler 1g hassasiyetli terazide tartıldıktan sonra betonyere sırasıyla iri agrega ve ince agrega konulmuştur. Karışım suyunun yaklaşık 1/3'ü eklenerek agregalar 1 dakika süreyle karıştırılmıştır. Sonra çimento, mineral katkılar ve geriye kalan karma suyu konulup yaklaşık 5 dakika daha karıştırılarak betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlarda çökme deneyi yapıldıktan sonra, basınç dayanımı deneyi için 15x15x15 cm küp ve eğilme dayanımı deneyi için 7x7x28 boyutlu prizma kalıplara yerleştirilmiştir. Laboratuvar koşullarında 24 saat bekletilen numuneler kalıpları söküldükten sonra kür havuzuna konulmuştur. Her grubun numuneleri 27. gün kürden çıkarılarak bir gün

laboratuvar şartlarında bekletildikten sonra numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir.

Tablo 6. Tüm gruplara ait karışım oranları

Malzeme Grup	Çimento (kg)	Mineral katkı (kg)	Toplam Agrega (kg)	Su (kg)	Akışkan. Katkı (kg)
Kontrol	400	----	1838	160	3.20
%10 YFC	360	40	1838	160	3.20
%20 YFC	320	80	1838	160	3.20
%30 YFC	280	120	1838	160	3.20
%10 Zeolit	360	40	1838	160	3.20
%20 Zeolit	320	80	1838	160	3.20
%30 Zeolit	280	120	1838	160	3.20

ilerleyen yaşlardaki dayanımları belirlemek için diğer gruplar 90 ve 180 gün kür edildikten sonra basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Sülfat etkisine maruz bırakılacak beton numuneleri ise 28 gün suda kür edildikten sonra 100 g/l sülfatlı (Na₂SO₄) suda 90 ve 180 gün sülfat etkisine maruz bırakılarak ASTM C 1012 (1989)'ye uygun şekilde sülfat testleri de yapılmıştır. Numuneler içerdikleri mineral katkı oranına göre kodlanmış (%10 YFC, %20 Zeolit), sülfat etkisine bırakılan numuneler ise başlarında S harfi ile gösterilmiştir (S %10 YFC, S %20 Zeolit)

3. Araştırma Bulguları

3.1. Puzolanik Aktivite Deneyi

Bu çalışmada kullanılan mineral katkılar için ASTM C311(1994)'e uygun olarak puzolanik aktivite deneyi yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Puzolanik Aktivite Deneyi

	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Puzolanik Aktivite (%)
Kontrol	4.54	41.23	100.00
YFC Katkılı	3.88	32.36	78.48
Zeolit Katkılı	3.57	34.03	82.54

YFC puzolanik aktivite indeksi %78,48 iken, zeolitin puzolanik aktivite indeksi %82,54 olarak hesaplanmıştır. Her iki mineral katkının da yeterli puzolanik aktivite özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir.

3.2. İşlenebilirlik

Taze betonlar üzerinde çökme deneyi ölçümleri yapılmış ve çökme değerleri Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Çökme değerleri

Grup	Çökme değeri (cm)
Kontrol	11,00
%10 YFC	10,00
%20 YFC	9,00
%30 YFC	8,50
%10 Zeolit	9,00
%20 Zeolit	8,00
%30 Zeolit	7,00

En yüksek çökme değerleri kontrol numunelerinde görülmüştür. Kullanılan iki mineral katkı arasında en yüksek çökme değerlerini %10 YFC 10 cm ile göstermiştir. Mineral katkılı tüm gruplarda çökme miktarları kontrol grubuna göre azalmıştır. Bu durumun mineral katkıların çimentoya göre daha ince öğütülmüş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bağlayıcı malzemenin inceliğinin artmasıyla betonda su ihtiyacının arttığı göz önüne alındığında, bu sonuçlar normal karşılanmaktadır. Bununla birlikte üretilen tüm gurupların TS EN 206-1'de verilen S2 ve S3 kıvam sınıflarında olduğu belirlenmiştir.

3.3. Birim Hacim Ağırlık

TS EN 12390-7 (2002)'ye uygun olarak sertleşmiş betonların birim hacim ağırlıkları belirlenmiş ve numunelerin birim hacim ağırlık değerleri Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. Birim hacim ağırlıklar

Grup	Birim ağırlık (g/cm ³)
Kontrol	2,320
S Kontrol	2,310
%10 YFC	2,274
S %10 YFC	2,261
%20 YFC	2,223
S %20 YFC	2,210
%30 YFC	2,175
S %30 YFC	2,160
%10 Zeolit	2,229
S %10 Zeolit	2,211
%20 Zeolit	2,137
S %20 Zeolit	2,121
%30 Zeolit	2,045
S %30 Zeolit	2,030

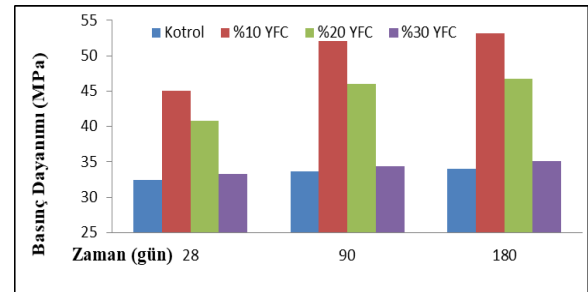
Tüm grupların normal ağırlıklı beton sınıfında oldukları görülmektedir. En yüksek birim hacim

ağırlık 2,320 g/cm³ değeri ile kontrol numunesinde (mineral katkısız betonda) ölçülmüştür. En düşük birim hacim ağırlık 2,030 g/cm³ (kontrol grubuna göre %12,50 azalma) değeri ile sülfata maruz bırakılan %30 zeolit içeren betonlardan elde edilmiştir. Birim hacim ağırlıktaki azalma sülfata maruz bırakılan kontrol grubunda %0,43 olarak hesaplanmıştır. Birim hacim ağırlıktaki azalma sülfata maruz bırakılan %10 YFC grubunda %0,57, %20 YFC grubunda %0,59 ve %30 YFC grubunda %0,69 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde sülfata maruz bırakılan %10 zeolit grubunda %0,81, %20 zeolit grubunda %0,75 ve %30 zeolit grubunda %0,73 oranında birim hacim ağırlıkların azaldığı hesaplanmıştır.

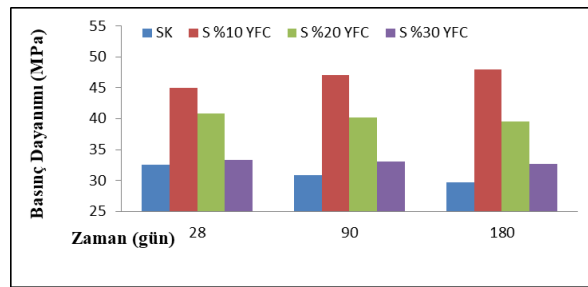
3.4. Basınç Dayanımı

3.4.1. YFC'nun Etkisi

Yüksek Fırın Cürufu kullanılan betonlarda basınç dayanımı sonuçlarından elde edilen grafikler, sülfatsız ortam için Şekil 1, sülfat ortamındaki numuneler için ise Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Sülfatsız ortamda YFC katkılı numunelerin basınç dayanımları



Şekil 2. Sülfatlı ortamda YFC katkılı numunelerin basınç dayanımları

Basınç dayanımlarına göre; %10 YFC katkılı numuneler, 90 günde %15,82 ve 180 günde %18,13 dayanım artışı göstererek en fazla dayanım artışına ulaşmıştır. Sülfat etkisine maruz bırakılan %10 YFC katkılı numunelerde, 90 günde %5,43 ve 180 günde %8,52 dayanım kaybı söz konusudur. Sülfat etkisine maruz bırakılan 180 günlük numunelerde, en az dayanım kaybını %30 YFC katkılı grup %1,76 oranında göstermiştir. Numunelerin basınç dayanım sonuçlarına göre en yüksek basınç dayanımının

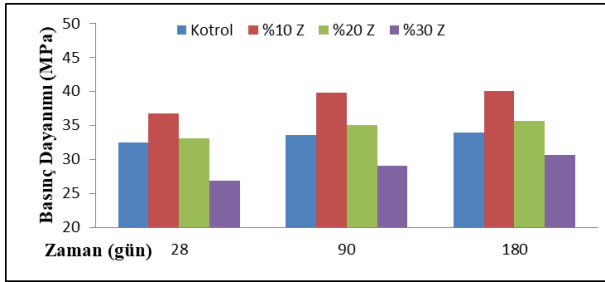
sırasıyla %10 YFC ve %20 YFC katkıli numunelerde tespit edildiği görülmektedir.

Kontrol grubuna göre incelendiğinde: %10 YFC katkıli beton numuneleri 28 günde %38,49, 90 günde %55,15 ve 180 günde %56,57 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır. %20 YFC katkıli beton numuneleri 28 günde %25,45 oranında, 90 günde %36,85 ve 180 günde %37,75 oranında fazla dayanım görülmüştür. %30 YFC katkıli beton numuneleri 28 günde %2,33, 90 günde %2,44 ve 180 günde %3,21 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.

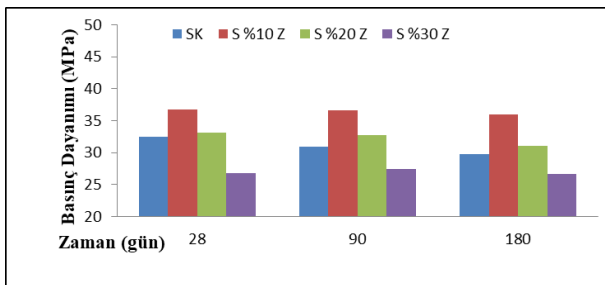
Sülfatlı ortamda basınç dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde: S %10 YFC katkıli beton numuneleri 90 günde %52,67 ve 180 günde %61,34 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır. S %20 YFC katkıli beton numuneleri 90 günde %30,15 ve 180 günde %32,97 oranında fazla dayanım görülmüştür. S %30 YFC katkıli beton numuneleri 90 günde %7,07 ve 180 günde %9,82 oranında fazla dayanım belirlenmiştir. %30'a kader YFC katkının kullanımı sülfatlı ortamda basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye edilebilir.

3.4.2. Zeolitin Etkisi

Zeolit katkıli betonlarda basınç dayanımı sonuçları grafik olarak sülfatsız ve sülfatlı ortamlar için sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Sülfatsız ortamda zeolit katkıli numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4. Sülfatlı ortamda zeolit katkıli numunelerin basınç dayanımları

28 günlük dayanımlarla kıyaslandığında: %10 zeolit katkıli numuneler, 90 günde %8,37 ve 180 günde %8,99 dayanım artışı göstererek en yüksek dayanım

artışına ulaşmıştır. Sülfat etkisine maruz bırakılan %10 zeolit katkıli numunelerde, 90 günde %0,34 ve 180 günde %2,11 oranında dayanım kaybı söz konusudur. Sülfat etkisine maruz bırakılan 180 günlük numuneler içerisinde en iyi performansı, %10 zeolit katkıli numuneler (%1,06 artış) göstermiştir.

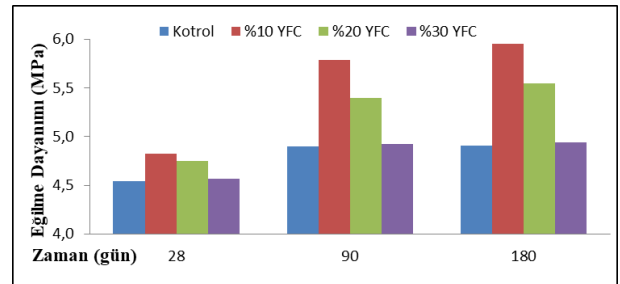
Zeolit katkıli beton numunelerinin basınç dayanımlarını kontrol grubuna göre incelendiğinde: %10 zeolit katkıli beton numuneleri 28 günde %13,15, 90 günde %18,61 ve 180 günde %18,02 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır. %20 zeolit katkıli beton numuneleri 28 günde %1,69, 90 günde %4,43 ve 180 günde %4,83 oranında fazla dayanım görülmüştür. %30 zeolit katkıli beton numuneleri 28 günde %17,52, 90 günde %13,40 ve 180 günde %9,91 oranında dayanımda düşüş belirlenmiştir. %20'ye kader zeolit katkının kullanımı basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür.

Zeolit katkıli beton numunelerinin sülfatlı ortamda basınç dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde: S %10 zeolit katkıli beton numuneleri 90 günde %18,80 ve 180 günde %21,01 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır. S %20 zeolit katkıli beton numuneleri 90 günde %5,90 ve 180 günde %4,30 oranında fazla dayanım görülmüştür. S %30 YFC katkıli beton numuneleri 90 günde %11,29 ve 180 günde %10,31 oranında dayanımda düşüş belirlenmiştir. %20'ye kader zeolit katkının kullanımı sülfatlı ortamda basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımının betonda olumlu etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

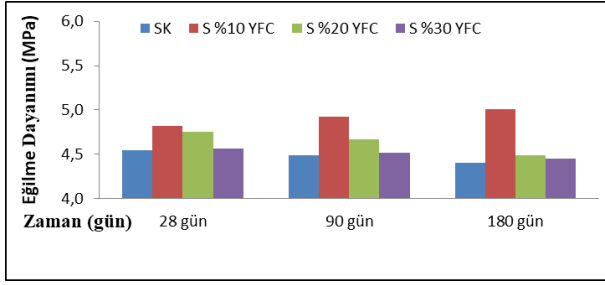
3.5. Eğilme Dayanımı

3.5.1. YFC'nun Etkisi

YFC kullanılan betonlarda eğilme dayanımı sonuçları grafik olarak sülfatsız ve sülfatlı ortamlar için sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir



Şekil 5. Sülfatsız ortamda YFC katkıli numunelerin eğilme dayanımları



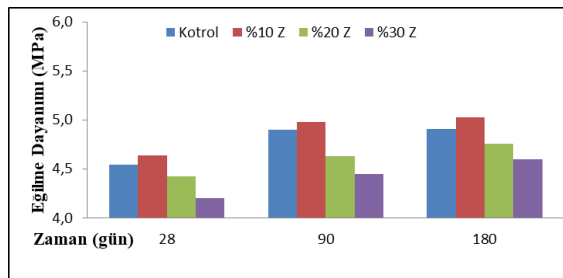
Şekil 6. Sülfatlı ortamda YFC katkıli numunelerin eğilme dayanımları

Eğilme dayanım değerleri 28 günlük dayanımlara göre: %10 YFC katkıli numunelerin eğilme dayanımlarında 90 günde %20,12 ve 180 günde %23,44 oranında artış görülmüştür. Sülfat etkisine maruz bırakılan %10 YFC katkıli numunelerde, 90 günde %2,22 ve 180 günde %3,94 oranında dayanım artışı söz konusudur. Sülfat etkisine 180 gün maruz bırakılan numunelerde en iyi performansı %10 YFC katkıli numuneler göstermiştir. %30 YFC katkıli numuneler 90 günde %7,68 ve 180 günde %8,12 oranında dayanım artışı göstermiştir. Sülfat etkisine maruz bırakılan %30 YFC katkıli numunelerde, 90 günde %1,07 ve 180 günde %2,60 oranında dayanım kaybı söz konusudur. Numunelerinin eğilme dayanımlarını kontrol grubuna göre incelendiğinde: %10 YFC katkıli beton numuneleri 28 günde %6,14, 90 günde %18,26 ve 180 günde %21,26 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır. %30'a kadar YFC katkıli kullanımı eğilme dayanımında artış görülmüştür.

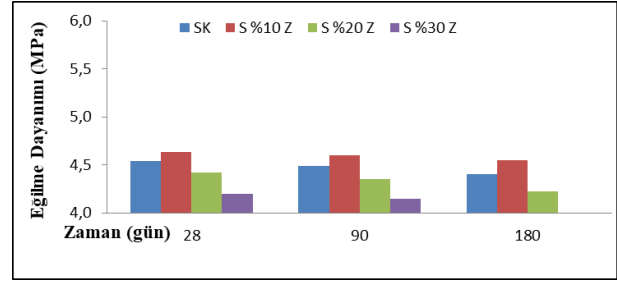
Numunelerinin sülfatlı ortamda eğilme dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde: S %10 YFC katkıli beton numuneleri 90 günde %9,73 ve 180 günde %13,86 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır. S %20 YFC katkıli beton numuneleri 90 günde %4,01 ve 180 günde %1,91 oranında dayanımda düşüş görülmüştür. S %30 YFC katkıli beton numuneleri 90 günde %0,67 ve 180 günde %1,14 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.

3.5.2. Zeolit Etkisi

Zeolit katkıli betonlarda eğilme dayanımı sonuçları grafik olarak sülfatsız ortam için Şekil 7, sülfat ortamındaki numuneler için ise Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Sülfatsız ortamda zeolit katkıli numunelerin eğilme dayanımları



Şekil 8. Sülfatlı ortamda zeolit katkıli numunelerin eğilme dayanımları

Numunelerin eğilme dayanım değerleri 28 günlük dayanımlarla göre: %10 zeolit katkıli numunelerin eğilme dayanımlarında 90 günde %7,33 ve 180 günde %8,30 oranında artış olmuştur. Sülfat etkisine maruz bırakılan %10 zeolit katkıli numunelerde, 90 günde %0,82 ve 180 günde %1,90 oranında dayanım kaybı söz konusudur. Sülfat etkisine 180 gün maruz bırakılan numunelerde en iyi performansı 180 günde %10 zeolit katkıli numuneler göstermiştir. %30 zeolit katkıli numuneler 90 günde %5,95 ve 180 günde %9,52 oranında dayanım artışı göstermiştir. Sülfat etkisine maruz bırakılan %30 zeolit katkıli numunelerde, 90 günde %1,19 ve 180 günde %4,76 oranında dayanım kaybı belirlenmiştir.

Numunelerinin eğilme dayanımlarını kontrol grubuna göre incelendiğinde: %10 zeolit katkıli beton numuneleri 28 günde %2,14, 90 günde %1,67 ve 180 günde %2,36 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır. %20 zeolit katkıli beton numuneleri 28 günde %2,55, 90 günde %5,43 ve 180 günde %2,36 oranında dayanımda düşüş görülmüştür. %30 zeolit katkıli beton numuneleri 28 günde %7,51 günde %9,11 ve 180 günde %6,26 oranında dayanımda düşüş belirlenmiştir. %10'a kadar zeolit katkıli kullanımı eğilme dayanımında fazla dayanım görülmüştür.

Sülfatlı ortamda eğilme dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde: S %10 zeolit katkıli beton numuneleri 90 günde %2,45 ve 180 günde %3,41 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır. S %20 zeolit katkıli beton numuneleri 90 günde %3,12 ve 180 günde %4,07 oranında dayanımda düşüş görülmüştür. S %30 zeolit katkıli beton numuneleri 90 günde %7,57 ve 180 günde %9,09 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.

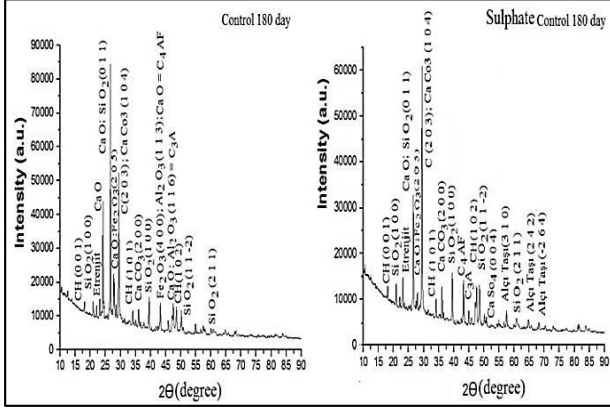
3.6. İç Yapı Analizleri

SEM görüntüleri 180 günlük numunelerden elde edilmiştir. Kontrol grubu ve %10 mineral katkıli betonlarda yapılan incelemelerde içyapı fotoğrafları çekilmiş ve EDS, XRD ölçümleri yapılmıştır. Bu görüntüler ve ölçümler aşağıda sunulmaktadır.

3.6.1. Kontrol grubu

a. XRD Ölçümleri

180 günlük beton numunelerinin üzerinde XRD ölçümleri yapılmıştır. Kontrol grubu için XRD ölçüm sonuçları Şekil 9'da sunulmaktadır değerlendirilmiştir.



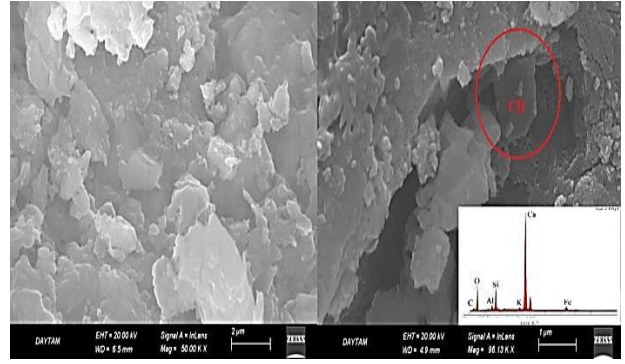
Şekil 9. Kontrol ve sülfatlı kontrol numunesinin XRD ölçümleri

XRD ölçümünde numunelerde CH, C₄AF, C₃A ve diğer beton bileşenleri belirlenmiştir. Hidratasyon ürünlerinden Etrenjit numunelerde görülmüştür. Sülfat CH ve C₃A üzerinde etkisini CaSO₄ ve alçıtaşı oluşturarak göstermiştir. Betonda alçıtaşının oluşmasıyla, genişmeler ve çatlaklar meydana gelir. Oluşan genişme miktarları hesaplanmış ve çatlaklardan SEM fotoğrafları alınmıştır. XRD ölçümünde Kontrol numunesinin ortalama atom boyutu 16,30 nm ve Sülfat etkisinde Kontrol numunesinin ortalama atom boyutu 24,32 nm olarak ölçülmüştür. Sülfat etkisi, atomlar üzerinde 8,02 nm genişleme olarak görülmüştür ve bu genişleme sonucu meydana gelen çatlaklar sonucunda dayanımlar azalmıştır. Sülfat etkisinde kontrol numunesindeki genişleme oranı %49,22 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca XRD ve SEM görüntülerinde betonun homojen olmadığı da değerlendirilmiştir.

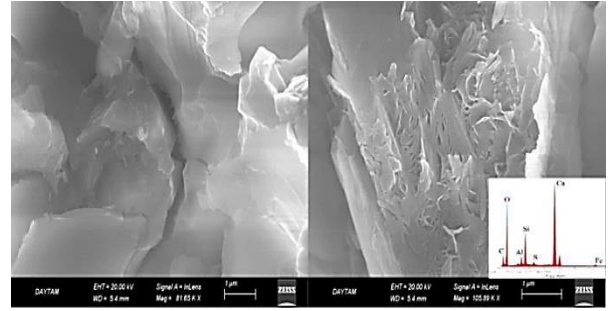
b. SEM Görüntüleri

Kontrol grubu numuneleri üzerinde SEM görüntüleri alınmış ve içyapı fotoğrafları Şekil 10- 11'de sunulmaktadır değerlendirilmiştir.

SEM görüntüleri incelendiğinde kontrol numunesinde fazla miktarda boşluk içerdiği görülmektedir. Hidratasyon sonucunda oluşan CH taneleri fotoğraflarda görülmektedir. Betondaki boşluklar basınç ve eğilme dayanımını azaltmakta ve geçirimli bir yapıya sebep olarak her tür saldırıya (suyla içerilen zararlı anyonlar, havadan gelen zararlı gazlar ve hatta iklim değişimi) karşı beton direncini zayıflatmaktadır. Bu çalışmada mineral katkılardan filler etkisi özelliği ile betonda doluluk oranını artırdığı belirlenmiştir.



Şekil 10. Kontrol numunesinin arayüzeyi boşlukları gösteren SEM görüntüleri



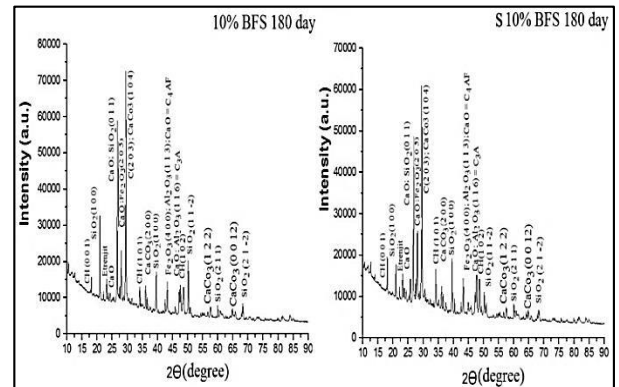
Şekil 11. Sülfat etkisinde kontrol numunesinde çatlak görüntüsü

Sülfat saldırısının sonuçlarından birisi alçıtaşı oluşumu ve buna bağlı olarak görülen genişmedir ve genişme seramik malzemelerde çatlak olarak görülmektedir. SEM görüntülerinden sülfata maruz bırakılmış kontrol numunesinde yapı tahribatı görülmektedir. SEM fotoğraflarında plak halinde yapı oluşumu ve çatlaklar gösterilmiştir. Çatlakların oluşunu basınç ve eğilme dayanımda azalmalara ve betonda tahribata sebep olur.

3.6.2. YFC Katkılı Örnekler

a. XRD Ölçümleri

180 günlük %10 YFC katkıli beton numuneleri üzerinde yapılan XRD ölçümleri Şekil 12'de gösterilmiş ve değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

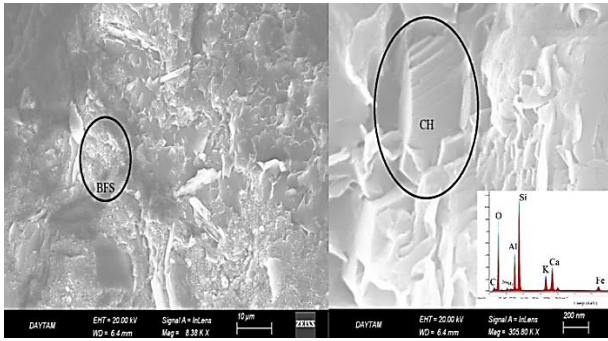


Şekil 12. %10 YFC ve S %10 YFC numunelerinin XRD ölçümleri

Genleşme miktarı sıfıra yakın olarak tespit edilmiştir. XRD ölçümlerine göre %10 YFC katkıli numunelerde, genleşme oranında kontrol numunesine göre %49,22 azalma görülmüştür. YFC katkıli betonlarda sülfat direncinin fazla oluşu; YFC ilavesiyle C₃A miktarında ve buna bağlı olarak durabilite açısından sorun oluşturan CH miktarında azalma sağlanmasıyla açıklanabilir. Aynı zamanda YFC ilavesiyle daha yoğun bir mikro yapı ve homojen beton elde edildiğinden sülfat direnci artırılmış olabilir.

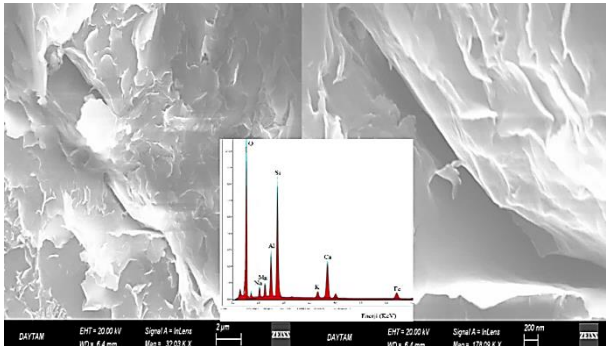
b. SEM Görüntüleri

%10 YFC mineral katkıli beton numuneleri üzerinde çekilen SEM fotoğrafları Şekil 13- 14'de verilmiştir.



Şekil 13. %10 YFC katkıli betonda SEM görüntüsü

EDS analizinde YFC katkıli numunelerde yüksek miktarda Si, O ve Al tespit edilmiştir. SEM görüntüsünde altıgen şeklinde CH oluşumu görülmüştür. SEM fotoğrafında YFC'nun boşlukları azalttığı görülmüştür. Öğütülmüş YFC çok ince taneli olduğundan boşlukları doldurarak daha geçimsiz betonlar üretmeye imkân sağlar. YFC ilavesi betonda en iyi arayüze sahip olması nedeniyle basınç ve eğilme dayanımlarında artış göstermiştir.



Şekil 14. Sülfat etkisinde %10 YFC katkıli betonda SEM görüntüsü

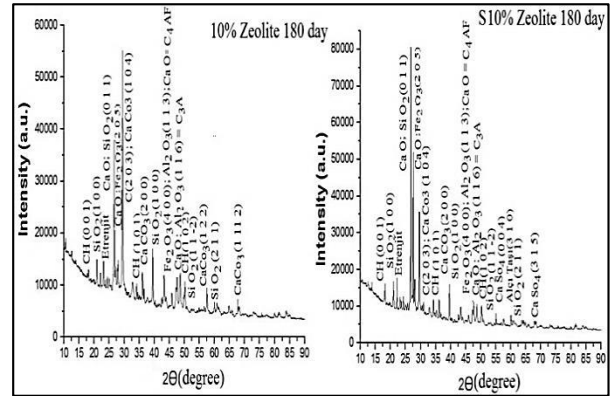
SEM görüntülerinde YFC'nun boşlukları doldurduğu görülmektedir. Bu nedenle numunelerde hem basınç ve hem de eğilme dayanımda kontrol grubuna göre artış tespit edilmiştir. Arayüzeyin daha yoğun olmasından dolayı SEM fotoğraflarında görüldüğü gibi

sülfat etkisinin hidratasyon ürünleri üzerinde daha az hasara sebep olduğu söylenebilir. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkıli betonların sülfat dayanıklılığı Li ve Zhao (2003), tarafından da incelenmiş ve söz konusu çalışmada, en iyi performansı yüksek fırın cürufu kullanılan betonların gösterdiği ifade edilmiştir.

3.6.3. Zeolit Katkıli Örnekler

a. XRD Ölçümleri

180 günlük %10 zeolit katkıli beton numuneleri üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçları Şekil 15'de verilmiştir. XRD ölçümünde %10 zeolit katkıli numunenin CaO, CaCO₃ ve SiO₂ pikleri kontrol grubuna göre daha yüksek miktarda ölçülmüştür. XRD ölçümünde sülfat CH ve C₃A üzerinde etkisini CaSO₄ ve alçıtaşı oluşturarak göstermiştir. XRD ölçümünde %10 zeolit katkıli numunenin ortalama tanecik boyutu 14,71 nm ve sülfat etkisinde kalan %10 zeolit katkıli numunenin ortalama tanecik boyutu da 31,44 nm olarak ölçülmüştür.

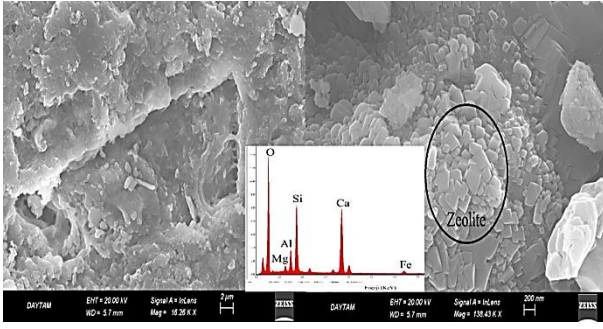


Şekil 15. %10 zeolit ve sülfatlı %10 zeolit numunelerin XRD ölçümleri

Sülfat etkisiyle zeolit katkıli numunenin taneciklerinde 16,73 nm genleşme olduğu belirlenmiştir. Sülfat etkisiyle oluşan genleşme oranı %113,67 olarak hesaplanmıştır. XRD ölçümlerine göre sülfat etkisinde %10 zeolit katkıli numunelerde kontrol numunesine göre genleşme oranının %64,45 daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

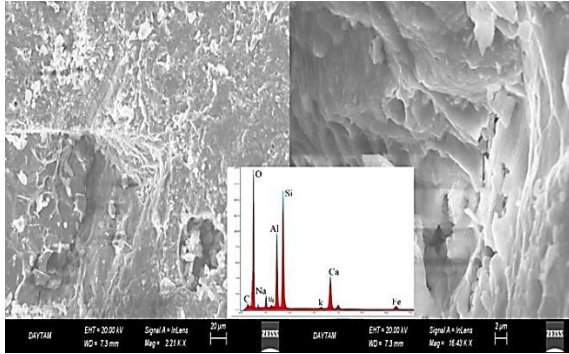
b. SEM Görüntüleri

%10 zeolit katkıli beton numunelerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 16-17'de verilmiştir.



Şekil 16. %10 zeolit katkıli numunelerin SEM görüntüsü

Zeolit ince taneli olması sebebiyle betonda su ihtiyacını artırmıştır. Su miktarı her grupta sabit tutulduğu için zeolit katkıli grupların işlenebilirliği diğerlerine oranla azalmıştır. Kıvamın yetersiz olmasından dolayı yerleştirme boşlukları oluşmuş ve bunun sonucunda SEM görüntüsünde daha fazla boşluk görülmüştür. SEM görüntüsünden zeolit katkıli betonların homojen olmadığı söylenebilir. Feng vd. (1990) zeolitik mineral katkıli betonlar üzerinde yaptığı çalışmada %10 oranında çimento yerine zeolit ikamesinin normal portland çimentolara göre basınç dayanımında %10-15 arasında artışa sebep olduğunu belirtmektedir.



Şekil 17. Sülfat etkisinde %10 zeolit katkıli numunenin SEM görüntüsü

Zeolit kafes yapısından dolayı suyu içinde hapseder. Betonda su ihtiyacını artırır ve işlenebilirliği azaltır. Bu nedenle betonda yerleştirme boşluğu oluşumuna ve betonun daha heterojen olmasına sebep olur. SEM fotoğrafında görüldüğü üzere, sülfat iyonları bu boşluklardan sızarak CH ve C₃A'la reaksiyona girerek, genleşme ve çatlak oluşumuna sebep olur. Böylece betonda basınç ve eğilme dayanımlarında kayıplar görülmüştür. SEM fotoğraflarında sülfat etkisiyle ara yüzeyde bozulmalar ve içyapıda çatlaklar oluştuğu görülmektedir ve bunun sonucunda geçirimsizliğin arttığı söylenebilir.

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmadan çıkarılan en önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Puzolanik aktivite deneyi sonuçlarına göre, bu çalışmada kullanılan minerallerin hepsinin puzolanik özelliğinin yeterli olduğu tespit edilmiştir. Puzolanik aktivite indeksleri; zeolit için 0,83 ve YFC için 0,78 olarak hesaplanmıştır.
2. Çalışmada üretilen tüm beton gruplarının normal ağırlıklı beton sınıfında olduğu belirlenmiştir. En yüksek birim ağırlık 2,32 g/cm³ değeri ile kontrol numunesinde ölçülmüştür. Mineral katkı kullanılması sonucu katkı miktarına bağlı olarak betonların birim ağırlıkları azalmıştır.
3. YFC ilave edilmesi beton numunelerinin basınç dayanımlarında kontrol grubuna göre her yaşta artışa sebep olmuştur. En fazla dayanım artışı her yaşta %10 YFC kullanılan numunelerde tespit edilmiştir. Deney sonuçları basınç dayanımı açısından YFC'nun %30'a kadar kullanıldığında olumlu etki yapacağını göstermektedir.
4. YFC katkıli beton numuneleri sülfat etkisinde her grupta kontrol numunelerine göre daha iyi sonuçlar göstermiştir. Sülfat etkisinde en yüksek direnci %10 YFC katkıli betonlar göstermiştir. Bu grubun basınç dayanımları kontrol grubuna göre 90 günde %52,67 ve 180 günde %61,34 oranında daha yüksek değerler sağlamıştır. Sülfat direnci açısından da %30'a kadar YFC kullanımının basınç dayanımında olumlu etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
5. Zeolit katkıli beton numunelerinin basınç dayanımları kontrol grubuyla karşılaştırıldığında %10 ve %20 oranlarında zeolit ikamesi durumunda artışlar olmasına karşın %30 zeolit kullanıldığında basınç dayanımlarının düştüğü belirlenmiştir. Basınç dayanımı açısından en iyi sonuçlar %10 zeolit içeren gruptan elde edilmiştir. Bu grubun dayanımları kontrol grubuna göre 28 günde %13,15; 90 günde %18,61 ve 180 günde %18,02 oranında daha yüksek değerler sağlamıştır. Böylece basınç dayanımı açısından zeolitın ideal kullanım oranının %10 olduğu söylenebilir.
6. Zeolit katkıli beton numunelerinin sülfatlı ortamda basınç dayanımları kontrol grubuna göre %10 ve %20 ikame oranlarında daha yüksek sonuçlar vermesine rağmen, %30 zeolit kullanılan betonların basınç dayanımları kontrol numunelerinden düşük olmuştur. Sülfat etkisinde de zeolitın ideal kullanım miktarının %10 olduğu söylenebilir.
7. Katkıların betonun eğilme dayanımları üzerinde etkileri incelendiğinde en yüksek dayanımların YFC katkıli numunelerden elde edildiği görülmüştür. YFC'nun her oranda ikamesi eğilme dayanımlarında artışlara yol açarken en yüksek

dayanım değeri 5,95 MPa ile %10 YFC içeren 180 günlük numunelerden elde edilmiştir.

8. Betonların sülfat etkisinden sonra eğilme dayanımlarını incelendiğinde en iyi sülfat direncinin YFC katkılı numunelerden elde edildiği görülmüştür. YFC her oranda eğilme dayanımlarına artışa yol açmış ve en yüksek dayanım artışı %10 YFC içeren 180 günlük numunelerde belirlenmiştir. Zeolit ise düşük ikame oranlarında olumlu sonuç vermesine karşın daha yüksek oranda kullanılması durumunda eğilme dayanımlarında sülfat etkisinden sonra kontrol grubuna göre azalmaya sebep olmuştur.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

ASTM C1017/C1017M-13e1, 2013. Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C 1012, 1989. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia

ASTM C 311, 1994. Standart Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use a Mineral Admixtural Portland – Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standard.

ASTM C494/C494 M Type F, 2001. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.

Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.

Brown, P.W., Hooton, R.D., Clark, B.A., 2004. Microstructural changes in concretes with sulfate exposure, Cem. Concr. Compos. 26, 993–999.

EN 480-10, 2001. Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods - Part 10: Determination of water soluble chloride content.

EN 480-12, 2008. Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods - Part 12: Determination of the alkali content of admixtures.

Erdoğan, Ş., Kurbetçi, Ş., 2003. Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, 426 (4): 115-120.

Feng, N.Q., Li, Z., Zang, X. W., 1990. High – strength and Flowing Concrete with a Zeolite Mineral Admixture, Cement and Aggregates, Vol. 12, pp. 61-68.

Feng, N., and Peng, G., 2005. Applications of natural zeolite to construction and building materials in China, Construction and Building Materials 19, 579–584.

Franus, W., and Dudek, K., 1999. Clay minerals and clinoptilolite from the Variegated Shales Formation in the Skole Unit, Polish Flysch Carpath., Geologica Carpathica 50, 23–24.

Higashiyama, H., Yagishita, F., Sano, M., Takahashi, O., 2012. Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate. Constr Build Mater; 26:96–101.

Higgins, D.D., 2003. Increased sulfate resistance of ggbs concrete in the presence of carbonate, Cem. Concr. Compos. 25, 913–919.

Huang, B., Dong, Q., Burdette, E. G., 2009. Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete. Constr Build Mater; 23:3451–3456.

Irassar, E., Di Maio, A., Batic, O., 1996. Sulfate attack on concrete with mineral admixtures. Cem Concr Res;26(1):113–123.

Li, G., and Zhao, X., 2003. Properties of Concrete Incorporating Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag, Cement and Concrete Composites, Vol. 25, s. 293-299.

Medina, C., Sánchez, R. M., Frías, M., 2012. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. Cement Concr Compos; 34:48–54.

Mindness, S., Young, J. F., 1981. Concrete, New Jersey: Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs.

Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M., 2012. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, Construction and Building Materials, 35, 1023–1033.

Pereira, O., Luiz, A., 2012. Castro-Gomes Joao P, Santos Pedro MS. The potential pozzolanic activity of glass

and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Constr Build Mater*; 31:197–203.

Rozière, E., Loukili, A., El Hachem, R., Grondin, F., 2009. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks, *Cem. Concr. Res.* 39, 1188–1198.

Senthamarai, R., Devadas Manoharan, P., Gobinath, D., 2011. Concrete made from ceramic industry waste: durability properties. *Constr Build Mater*; 25:2413–2419.

Skaropoulou, A., Tsivilis, S., Kakali, G., Sharp, JH., Swamy, RN., 2009. Long term behavior of Portland limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack. *Cem Concr Compos*;31(9):628–636.

TS EN 197-1, 2002. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri.

TS EN 12390-7, 2002. Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini.

Yazıcı, H., 2006. Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harçların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi, Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 8 sayı: 1 s. 51-58 Ocak.

Yücel, H., 1987. Zeolitler ve Uygulama Alanları, III. Ulusal Kil Sempozyumu, pp:391-402.