



**FARKLI MİNERAL KATKILI BETONLARIN
SÜLFAT DİRENCİNİN BELİRLENMESİ**

Heydar Haghhipour BALANEJİ

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

2017

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**FARKLI MİNERAL KATKILI BETONLARIN
SÜLFAT DİRENCİNİN BELİRLENMESİ**

Heydar Haghhipour BALANEJİ

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yapı Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

FARKLI MİNERAL KATKILI BETONLARIN
SÜLFAT DİRENCİNİN BELİRLENMESİ

Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL danışmanlığında, Heydar Haghghipour BALANEJİ tarafından hazırlanan bu çalışma 12/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Fahriye KILIÇKALE

İmza:

Üye: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

İmza:

Üye: Doç. Dr. Remzi ŞAHİN

İmza:

Üye: Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

İmza:

Üye: Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 18.05.2017 tarih ve 20./..20 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

FARKLI MİNERAL KATKILI BETONLARIN SÜLFAT DİRENCİNİN BELİRLENMESİ

Heydar Haghghipour BALANEJİ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

Betonarme yapılardaki kalıcılık sorunlarından birisi de sülfat saldırısıdır. Sülfat beton içerisinde bazı reaksiyonlarla çatlak, genleşme, dağılma gibi bozulmalara yol açar ve sonuçta betonun dayanımında düşüşler gözlenir.

Bu tezde; farklı mineral katkıların betonların sülfat direncine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla çimento yerine, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit kullanılarak betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit çimento yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında, silis dumanı ise %5, %10 ve %15 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 %5 silis dumanı, %10 uçucu kül, %10 yüksek fırın cürufu ve %10 zeolit içeren numunelerin gösterdiği tespit edilmiştir.

2017, 116 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sülfat dayanımı, silis dumanı, uçucu kül, zeolit, yüksek fırın cürufu, SEM, XRD.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DETERMINATION OF SULPHATE RESISTANCE OF DIFFERENT MINERAL ADDITIVE CONCRETES

Heydar Haghghipour BALANEJİ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Structural Mechanics Division

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

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 the strength of the concrete.

In this thesis; the effect of different types of mineral additives on the sulphate resistance of concrete is investigated. For this aim concrete specimens were produced by using silica fume, fly ash, blast furnace slag and zeolite in stead of cement. In concrete specimens fly ash, blast furnace slag and zeolite were replaced with cement in weight 10%, 20% and 30%, while silica fume was used with 5%, 10% and 15% substitution ratio. Unit weights, compressive strength and bending strength measurements were made on the samples at 28, 90 and 180 days. In addition after 28 days water curing, specimens were exposed to sulfate 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 (CEM I), total amount of binder (400 kg/m^3), amount of sulphate (100 g/l), 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 the 5% silica fume, 10% fly ash, 10% blast furnace slag and 10% zeolite groups.

2017, 116 pages

Keywords: Sulfate resistance, silica fume, fly ash, blast furnace slag, zeolite, SEM, XRD.

TEŞEKKÜR

Çalışmanın her aşamasında yardım, teşvik ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL'e teşekkürü borç bilirim.

Çalışmaya fikirleri, bilgileri ve tecrübesi ile önemli katkılar sağlayan Sayın Doç. Dr. Remzi ŞAHİN'e teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ailemin bütün bireyelerine minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Heydar Haghhipour BALANEJİ

Mayıs, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Silis Dumanı ile Yapılmış Çalışmalar	6
2.2. Uçucu Kül ile Yapılmış Çalışmalar.....	9
2.3. Yüksek Fırın Cürufu ile Yapılmış Çalışmalar.....	11
2.4. Zeolit Konusunda ile Çalışmalar	13
2.5. Mineral Katkılı Betonlarda Sülfat Etkisi ile Yapılmış Çalışmalar.....	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	18
3.1. Kullanılan Malzemeler	18
3.1.1. Agregası	18
3.1.2. Çimento	18
3.1.3. Karma suyu.....	19
3.1.4. Silis dumanı.....	20
3.1.5. Uçucu kül	20
3.1.6. Yüksek fırın cürufu	21
3.1.7. Zeolit	22
3.1.8. Su azaltıcı katkı maddesi (Akışkanlaştırıcı).....	23
3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler.....	23
3.2.1. Elekler	23
3.2.2. Betonyer	24
3.2.3. Çökme konisi.....	24
3.2.4. Kalıplar	25
3.2.5. Pres	25

3.2.6. SEM cihazı	26
3.2.7. X-ışını kırınım cihazı (XRD)	28
3.3. Yöntem	31
3.3.1. Agrega deneyleri	31
3.3.1.a. Tane büyüklüğü dağılımı (Granülometri).....	31
3.3.1.b. İri agregaların tane şekli tayini	31
3.3.1.c. Çok ince malzemenin muhtevası	32
3.3.1.d. Çok ince malzemenin kalitesi.....	32
3.3.1.e. Tane yoğunluğu ve su emme	32
3.3.1.f. Yığın yoğunluğu	32
3.3.2. Deneysel çalışmanın kapsamı	33
3.3.3. Numunelerin kodlanmasında kullanılan yöntem.....	33
3.3.4. Karışım bileşenlerinin belirlenmesi.....	33
3.3.5. Beton üretimi ve bakımı	35
3.3.6. Taze beton deneyleri	39
3.3.7. Sertleşmiş beton deneyleri.....	39
3.3.8. Puzolanik aktivite deneyi	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	41
4.1. Taze Betonda Deney Sonucu	42
4.2. Sertleşmiş Betonun Deney Sonuçları	43
4.2.1. Puzolanik aktivite deneyi	43
4.2.2. Sertleşmiş beton birim ağırlıkları	44
4.2.3. Basınç dayanımı	46
4.2.3.a. Silis dumanı kullanımının etkisi	46
4.2.3.b. Uçucu kül kullanımının etkisi	50
4.2.3.c. Yüksek fırın cürufu kullanımının etkisi.....	53
4.2.3.d. Zeolit Kullanımının Etkisi.....	57
4.2.4. Eğilme dayanımı.....	64
4.2.4.a. Silis dumanı kullanımının etkisi	64
4.2.4.b. Uçucu kül kullanımının etkisi	69
4.2.4.c. Yüksek fırın cürufu kullanımının etkisi.....	72
4.2.4.d. Zeolit kullanımının etkisi	76

4.2.5. İçyapı incelemeleri	82
4.2.5.a. Kontrol ve SD katkılı betonlar.....	82
4.2.5.b. UK katkılı betonlar	92
4.2.5.c. YFC Katkılı Betonlar.....	97
4.2.5.d. Zeolit katkılı betonlar	101
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	106
KAYNAKLAR	110
ÖZGEÇMİŞ	117



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
ASTM	: American Society for Testing and Materials
Å	: Angström
C ₃ A	: Tri kalsiyum aluminat
C ₄ AF	: Tetra kalsiyum alumina ferrit
C ₃ S	: Tri kalsiyum silikat
C ₂ S	: Di kalsiyum silikat
C-S-H	: Kalsiyum silika hidrat
CH	: Kalsiyum hidroksit Ca(OH) ₂
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy (Elektron Kırınımı)
Fe ₂ O ₃	: Demir oksit
K	: Kontrol numunesi
S	: Sülfat etkisi
SD	: Silis dumanı
SK	: Sülfat etkisinde kontrol numunesi
S %... SD	: Sülfat etkisinde %... Silis dumanı katkılı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskop
S %... UK	: Sülfat etkisinde %... Uçucu kül katkılı
S %... YFC	: Sülfat etkisinde %... Yüksek fırın cürufu katkılı
S %... Z	: Sülfat etkisinde %... Zeolit katkılı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu kül
XRD	: X-Işını Kırınımı
YFC	: Yüksek fırın cürufu
Z	: Zeolit
nm	: Nanometre
µm	: Mikrometre

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. ABD’de prefabrike bir giriş elemanda DEF oluşumu	3
Şekil 1.2. Macaristan Ferenc Puskas stadı yapı elemanlarında tomasit oluşumu.....	3
Şekil 3.1. Uçucu Külün SEM altında görüntüsü.....	21
Şekil 3.2. Agrega deneylerinde kullanılan elek takımı	23
Şekil 3.3. Beton üretiminde kullanılan laboratuvar tipi betonyer	24
Şekil 3.4. Beton çökme konisi ve şişleme çubuğu.....	24
Şekil 3.5. Beton numune kalıpları.....	25
Şekil 3.6. Beton numunelerin basınç ve eğilme dayanımları belirlenmesinde kullanılan pres	25
Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan XRD cihazı [104].....	29
Şekil 3.8. X-ışınımı kırınımı yöntemi şematik gösterimi (Anonim 2008).....	30
Şekil 3.9. Betonların üretimi.....	36
Şekil 3.10. Beton üretimi ve taze betonda çökme deneyi	36
Şekil 3.11. Kontrol grubu numuneleri	36
Şekil 3.12. Silis dumanı katkılı numuneler	37
Şekil 3.13. Uçucu kül katkılı numuneler	37
Şekil 3.14. Yüksek fırın cürufu katkılı numuneler	37
Şekil 3.15. Zeolit katkılı numuneler	38
Şekil 3.16. Su küründeki numuneler.....	38
Şekil 4.1. Taze betonların çökme değerleri	42
Şekil 4.2. Puzolanik aktivite deney numuneleri.....	44
Şekil 4.3. SD katkılı numunelerin basınç dayanımları	47
Şekil 4.4. Sülfatlı ortamda SD katkılı numunelerin basınç dayanımları.....	47
Şekil 4.5. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda SD katkılı numunelerin basınç dayanımları	48
Şekil 4.6. UK katkılı numunelerin basınç dayanımları.....	51
Şekil 4.7. Sülfatlı ortamda UK katkılı numunelerin basınç dayanımları.....	51
Şekil 4.8. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda UK katkılı numunelerin basınç dayanımları.....	51
Şekil 4.9. YFC katkılı numunelerin basınç dayanımları.....	54
Şekil 4.10. Sülfatlı ortamda YFC katkılı numunelerin basınç dayanımları.....	54

Şekil 4.11. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda YFC katkıli numunelerin basınç dayanımları.....	55
Şekil 4.12. Zeolit katkıli numunelerin basınç dayanımları	58
Şekil 4.13. Sülfatlı ortamda zeolit katkıli numunelerin basınç dayanımları.....	59
Şekil 4.14. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda zeolit katkıli numunelerin basınç dayanımları.....	59
Şekil 4.15. Mineral katkıli betonların basınç dayanımları.....	62
Şekil 4.16. Sülfat etkisine maruz bırakılan mineral katkıli betonların basınç dayanımları.....	63
Şekil 4.17. SD katkıli numunelerin eğilme dayanımları.....	65
Şekil 4.18. Sülfat ortamında SD katkıli betonların eğilme dayanımları	65
Şekil 4.19. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda SD katkıli numunelerin eğilme dayanımları...	66
Şekil 4.20. UK katkıli numunelerin eğilme dayanımları	69
Şekil 4.21. Sülfat ortamında UK katkıli betonların eğilme dayanımları	70
Şekil 4.22. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda UK katkıli numunelerin eğilme dayanımları.....	70
Şekil 4.23. YFC katkıli numunelerin eğilme dayanımları	73
Şekil 4.24. Sülfat ortamında YFC katkıli betonların eğilme dayanımları	73
Şekil 4.25. Sülfat sız ve sülfatlı ortamda YFC katkıli numunelerin eğilme dayanımları.....	74
Şekil 4.26. Zeolit katkıli numunelerin eğilme dayanımları	77
Şekil 4.27. Sülfat ortamında zeolit katkıli betonların eğilme dayanımları	77
Şekil 4.28. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda zeolit katkıli numunelerin eğilme dayanımları.....	77
Şekil 4.29. Mineral katkıli betonların eğilme dayanımları	80
Şekil 4.30. Sülfat etkisine maruz bırakılan mineral katkıli betonların eğilme dayanımları.....	81
Şekil 4.31. Beton numunelerin XRD ölçümleri.....	83
Şekil 4.32. Kontrol ve sülfatlı kontrol numunesinin XRD ölçümleri.....	83
Şekil 4.33. %10 SD ve S %10 SD'nın XRD ölçümleri	84
Şekil 4.34. Kontrol numunesinin arayüzeyi boşlukları gösteren SEM görüntüleri	86
Şekil 4.35. Sülfat etkisinde Kontrol numunesinde çatlak görüntüsü.....	88

Şekil 4.36. %10 SD numunesinin arayüzeyi SEM görüntüsü	90
Şekil 4.37. Sülfat etkisinde %10 SD numunesinde çatlak oluşumu görüntüsü	91
Şekil 4.38. %10 UK ve S %10 UK numunelerin XRD ölçümleri	92
Şekil 4.39. %10 UK katkıli numunelerin SEM görüntüsü	94
Şekil 4.40. Sülfat etkisinde %10 UK katkıli numunelerin SEM görüntüsü.....	96
Şekil 4.41. %10 YFC ve S %10 YFC numunelerin XRD ölçümleri	98
Şekil 4.42. %10 YFC katkıli betonda SEM görüntüsü	99
Şekil 4.43. Sülfat etkisinde %10 YFC katkıli betonda SEM görüntüsü	100
Şekil 4.44. %10 zeolit ve sülfatlı %10 zeolit numunelerin XRD ölçümleri	101
Şekil 4.45. %10 zeolit katkıli numunelerin SEM görüntüsü	103
Şekil 4.46. Sülfat etkisinde %10 zeolit katkıli numunenin SEM.....	105

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal özellikleri ve anabileşenlerinin miktarları	19
Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	19
Çizelge 3.4. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	21
Çizelge 3.5. Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	22
Çizelge 3.6. Zeolit (klinoptilolit) kimyasal ve fiziksel özellikleri kompozisyonu	22
Çizelge 3.7. Hiper akışkanlaştırıcı'nın özellikleri	23
Çizelge 3.8. 1m ³ Betonda malzeme miktarları.....	34
Çizelge 3.9. Silis dumanı gurupları için malzeme miktarları	35
Çizelge 3.10. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit gurupları için malzeme miktarları	35
Çizelge 4.1. Agregaların granülometrisi	41
Çizelge 4.2. Agregaların fiziksel özellikleri	41
Çizelge 4.3. Betonların çökme değerleri	42
Çizelge 4.4. Puzolanik Aktivite Deneyi.....	43
Çizelge 4.5. 180 Günlük numunelerin birim ağırlıkları.....	45
Çizelge 4.6. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış SD katkılı betonların basınç dayanımları	47
Çizelge 4.7. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış UK katkılı betonların basınç dayanımları.....	50
Çizelge 4.8. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış YFC katkılı betonların basınç dayanımları.....	54
Çizelge 4.9. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış zeolit katkılı betonların basınç dayanımları.....	58
Çizelge 4.10. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış SD katkılı betonların eğilme dayanımları.....	65
Çizelge 4.11. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış UK katkılı betonların eğilme dayanımları.....	69
Çizelge 4.12. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış YFC katkılı betonların eğilme dayanımları.....	73

Çizelge 4.13. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış zeolit katkı betonların eğilme dayanımları.....	76
--	----



1. GİRİŞ

Betonarme yapıların kalıcılığını etkileyen kimyasal ve fiziksel işlemlerin hemen hepsinde ana faktör su ile birlikte beton bünyesindeki boşluklar ve çatlaklar içindeki taşınımıdır. Gazların, suyun ve çeşitli tuzların beton içine taşınımı ve bunların beton ile etkileşimi, bozulma sürecinin gelişimi açısından çok önemlidir. Taşınımın boyutu, hızı ve etkisi büyük ölçüde beton bünyesindeki boşluk ve çatlakların çapı ve dağılımına ayrıca beton yüzeyindeki “mikro iklim” bağlıdır. Agregada beton içinde çimento hamuru ile kaplanmış olduğundan ve normalde az boşluk içermesi nedeniyle, betonun geçirimsizliği büyük ölçüde çimento hamurunun ve agregada-hamur ara yüzeyinin geçirimsizliğine bağlıdır. Çimento hamuru ve betondaki çatlak ve boşluklar; çoğunlukla beton teknolojisi kurallarına uyulmaması sonucu, yetersiz sıkıştırma, yetersiz kür, kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun terleme, buharlaşma olayları veya hava sürükleyici katkı maddeleri eklenmesi gibi nedenlerle oluşur. Çimento hamuru ve betondaki mikro, kapiler ve makro boşluklar arasında kalıcılığı en fazla etkileyenler kılcal (kapiler) ve makro boyutta olanlardır (Baradan vd 2010).

Sülfat, çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girecek Etrenjit oluşturması ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda genleşme yaratarak çatlaklara ve dağılmaya yol açar, agregada-çimento hamuru aderansının etkilenmesiyle betonun dayanımı azalır. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütlede yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür. Etkilenme koşulları (SO_4^{2-} içeriği, ortam koşulları), betonun geçirimsizliği (zararlı madde taşınımı), betonun yapısı (çimentonun kimyasal yapısı) ve suyun varlığı sülfat etkisini en fazla etkileyen özelliklerdir (Anonymous 1992).

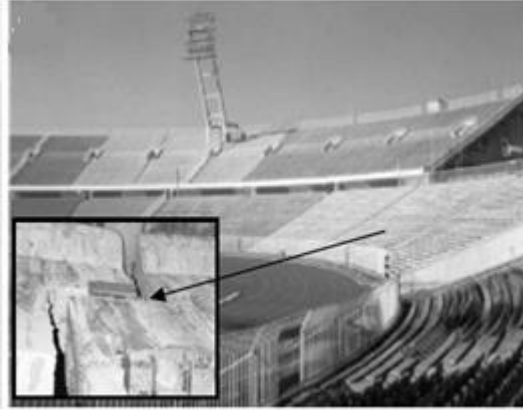
Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Bazı tür çalılık dışında, bitki ve ağaç yetişmeyen, yüzeyinde beyaz lekeler, tuz birikintileri görülen çorak topraklarda rastlanır. Bu tip zeminlerde yapılacak inşaatlarda, zemin etüdünün

yanı sıra, yeraltı suyu ve topraktan örnek alınarak betona zarar verebilecek maddelerin varlığı araştırılmalıdır. Özellikle deniz yapılarında, deniz suyundaki sülfatlar, ıslanma-kuruma bölgesinde buharlaşma nedeniyle betonun sülfat yoğunluğunun artmasına yol açabilirler. Bir diğer kaynak ise çimentodur. Çimentonun C_3A bileşeninin ani prizini önlemek için üretim aşmasında çimentoya ~%5 alçıtaşı (kalsiyum sülfat) ilave edilir (Baradan vd 2010).

Betonda sülfat saldırısının bir diğer türü ise gecikmiş Etrenjit oluşumu (GEO) adı verilen sorundur. Özellikle prefabrik yapı elemanı üretiminde, dayanımın hızlı gelişmesini sağlamak için betona buhar kürü uygulanır. Yüksek sıcaklıklarda ($70-80^{\circ}C$) alçıtaşının çözünürlüğünün düşmesiyle C_3A 'ın erken yaşlarda reaksiyona girememesi ve bu reaksiyonun beton sertleştikten sonra zamanla nem varlığında gerçekleşmesi sonucu bu problem ortaya çıkar. Ancak burada oluşan Etrenjit ile normal hidrasyon sonucu oluşan Etrenjit karıştırılmamalıdır. Beton taze iken, kristalleşen tuzun genişmesine izin verecek ortam bulunur. $60-70^{\circ}C$ kür sıcaklıklarının bile DEF'e yol açabildiği bilinmektedir. Bu sıcaklıklarda Etrenjitin ($C_3A.3CaSO_4.31H_2O$) normalde hidrasyonun ilk dakikalarında görülen oluşumu engellenir. Etrenjit oluşumunun stabilizesinin bozulması, çimentodaki alkali oksit içeriğine de bağlıdır. Bu nedenle, yüksek alkalili çimentolarda bu sıcaklık dereceleri daha düşüktür. Ardından yıllar sonra nem etkisinde kalan elemanlarda Etrenjit yeniden oluşur, ancak bu sefer ortam katı olduğundan betonda hasar görülür. Ayrıca, buhar kürü uygulanmasa da kütle betonu, köprü ayakları, gökdelen temelleri gibi sadece iç ısı artan elemanlarda veya beton bacaların dış çeperleri, beton yol kaplamaları gibi dıştan ısınan yapı elemanlarında da DEF kaynaklı hasarlar görülebilmektedir. Örneğin, Çin'in Şangay kentinde yer alan Jin Mao Kulesinin temel betonlarında 3 saat sonra ölçülen sıcaklığın $90^{\circ}C$ 'ye kadar ulaşmış olduğu bildirilmiştir. Kesit içerisinde yüksek sıcaklık farklılıkları sebebiyle oluşan hasarlar Şekil 1.1 ve 1.2'de gösterilmiştir (Baradan vd 2010).



Şekil 1.1. ABD’de prefabrike bir kiriş elemanda DEF oluşumu (Baradan vd 2010).

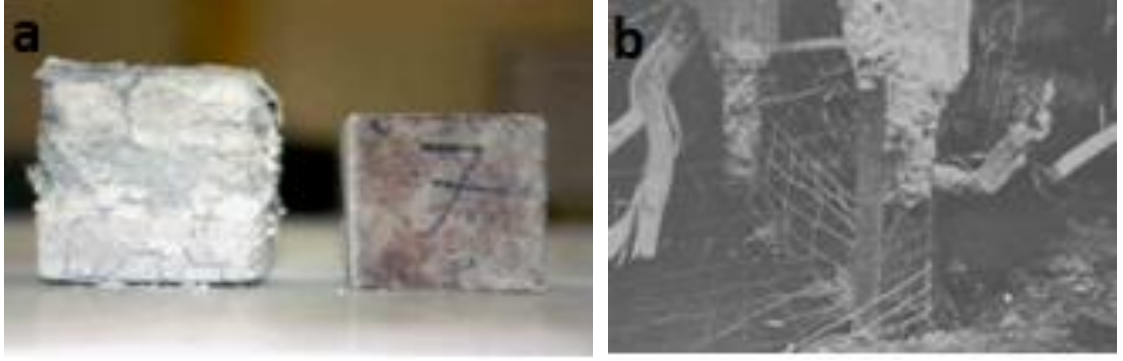


Şekil 1.2. Macaristan Ferenc Puskas stadı yapı elemanlarında tomasit oluşumu

Sülfat saldırısı sonucu oluşan reaksiyon ürünleri başlıca; Etreanjit ve tomasit olarak sıralanabilir. Tomasit bir hidratlı kompleks bileşendir ve kalsiyum silikat hidrattan oluşur. Sülfat ve karbonat iyonları reaksiyonu için aşırı nem gereklidir (Bensted 1999; Jallad *et al.* 2003; Lee *et al.* 2008; Macphee and Barnett 2004; Irassar 2009; Skaropoulou *et al.* 2012; Tosun ve Felekoglu 2012; Tosun vd 2009; Tsvilis *et al.* 2007) Sülfat saldırısı çimentodaki hidrasyon ürünü C-S-H jel’in bağlayıcı kabiliyetini yavaş yavaş tahrip eder (Schmidt *et al.* 2009; Skaropoulou *et al.* 2009). Tomasit, Etreanjit kristaline çok benzeyen bir kafes yapısına sahip olmasına rağmen bünyesinde Al_2O_3 bulunmamakta, bu bileşen yerine SiO_2 içermektedir. Genleştirici etkisi daha düşük olup, Etreanjitin yaklaşık %45’i kadardır. Tomasit normal ortam koşullarında çok sık görülmeyen bir sülfat etkisi ürünüdür. Özellikle kalker katkılı çimentolarla üretilen ve soğuk iklim koşullarına maruz kalan betonarme yapılarda tomasit oluşumuyla hasarlar

ortaya çıkmıştır. Kuzey Avrupa ve İngiltere’de sülfat içeren zeminlerde inşa edilmiş pek çok köprü ayağında, Çin’de soğuk iklimin hüküm sürdüğü pek çok baraj yapısında tomasit kaynaklı hasarlar rapor edilmiştir. Şekil 1.2’de Macaristan Ferenc Puskas Stadı yapı elemanlarında Tomasit oluşumunun neden olduğu hasarlar görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar ve saha bulguları çimentoda kalker kullanım oranının %10 ile sınırlandırılmasına dikkat çekmektedir. Diğer birçok kalıcılık probleminde olduğu gibi, sülfat etkisinde de önlem olarak, üretilen betonun mümkün olduğunca yoğun ve geçirimsiz olması, çimento dozajının çok düşük olmaması ve düşük su/çimento oranına sahip olması gerekir. Sülfat etkisinin şiddeti arttıkça geçirimsizliği artırmanın yanı sıra, C₃A oranı düşük çimento kullanmak ve/veya puzolanik katkılı beton üretmek gibi ek önlemler alınması zorunludur. ASTM standartları C₃A içeriği \leq %8 olan çimentoları sülfata orta seviyede dayanıklı, \leq %5 olan çimentoları ise sülfata yüksek seviyede dayanıklı olarak tanımlamaktadır. Normal Portland Çimentolarında C₃A oranı %8-11 arasında değiştiğinden, bu tip çimentoları sülfat etkisinde kalan yapılarda önlem almadan kullanmak doğru değildir (Baradan vd 2010).

Puzolanik mineral katkılarının betonda kullanımı sülfat direncini arttırmaya katkıda bulunmaktadır (Irassar *et al.* 1996; Skaropoulou *et al.* 2009). Ayrıca bu minerallerin kullanımı çevresel bakımından olumlu etki sağlamaktadır (Senthamarai *et al.* 2011; Huang *et al.* 2009; Pereira-de-Oliveira *et al.* 2012; Hiroshi *et al.* 2012; Hiroshi *et al.* 2012; Medina *et al.* 2012; Hiroshi *et al.* 2013). Puzolanlar, düzgün kür edilmiş betonda geçirimsizliği artırır. Betonun içindeki Ca(OH)₂’i bağlayarak sülfatlarla reaksiyona girecek öğelerden birini azaltırlar. Ancak hangi tür puzolanın kullanılacağına dikkat edilmelidir. Örneğin, C sınıfı uçucu külün bazı durumlarda sülfat dayanıklılığını artırmak yerine azaltabildiği dikkate alınmalıdır. Çok şiddetli etki durumunda, Ca(OH)₂ ve C-S-H’in da sülfat hassasiyetini dikkate alarak, başlıca iki önlemin beraber değerlendirilmesi tavsiye edilir. Bunlar; C₃A miktarını azaltmak ve uygun bir puzolan kullanmak şeklinde düşünülebilir. Tedbir alınmadığı takdirde, sülfat etkisiyle genişleyen tuz sertleşmiş betonda çatlama ve sonuçta parçalanmalara sebep olabilmektedir (Şekil 1.3 a-b) (Baradan 2010).



Şekil 1.3. Sülfat etkisinde beton hasarları

Bu çalışmada betonda sülfat etkisini incelemek amacıyla, dört farklı tür mineral katkı (silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit) farklı dozajlarda kullanılarak betonlar üretilmiştir. Betonlar 28 gün suda kür edildikten sonra ASTM C 1012'ye uygun şekilde 100 g/l sülfatlı suda (Na_2SO_4) 90 gün ve 180 gün bekletilerek sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufunu ve zeolit kullanım miktarları ağırlıkça çimentonun %10, %20 ve %30'u iken, silis dumanı %5, %10 ve %15 oranında çimento ile ikame edilmiştir. Tüm gruplarda CEM I türü çimento kullanılmıştır. Numuneler üzerinde 28, 90 ve 180 gün sonra birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve sülfat direnci ölçümleri yapılmıştır. Ara yüzey bölgeleri SEM görüntüleri ve XRD ışını ölçümleri göz önüne alınarak incelenmiş ve kullanılan katkıların sülfat etkisindeki performansı araştırılmıştır. Çalışmada çimento türü, toplam bağlayıcı miktarı, sülfat miktarı, agrega türü ve gradasyonu sabit tutulmuştur. Sonuçlar suda kür edilmiş kontrol karışımları ile sülfatla ortamdaki numunelerle kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit kullanımı betonda sülfat dayanıklılığını olumlu yönde etkilemiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde farklı mineral katkılı betonla ve sülfat direnci belirlenmesi konularında daha önceden yapılmış olan çalışmalar beş ayrı bölümde özetlenerek her birisi kendi içerisinde tarih sırasına göre sunulmuştur.

2.1. Silis Dumanı ile Yapılmış Çalışmalar

Hızla artan insan nüfusu ve sanayileşmeye paralel olarak doğal kaynakların giderek azalması konusu dikkate alındığında, açığa çıkan atıkların azaltılması, mevcut atıkların potansiyel bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesi ve kullanılmış hammaddelerin tekrar kullanılması gibi atık yönetimi konuları son zamanlarda önem kazanmaya başlayan güncel bir konudur. Doğal kaynakların daha az kullanılması, çevre kirliliğinin ve enerji maliyetlerinin azaltılması amacıyla endüstriyel atık kullanımı her geçen gün daha fazla dikkat çeken bir konu haline gelmektedir (Akbulut ve Gürer 2006; Çelik 2004).

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1 µm'dan küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO₂) partiküllerinden oluşan (Papwort 1997) yüksek puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür (Koca 1996).

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulmasıyla yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85-%98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzeme “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” olarak adlandırılmaktadır. Bu malzeme, “mikro silis” veya “silis tozu” veya “silika füme” gibi isimlerle de anılmaktadır. Silis dumanı, amorf yapıda ve çok ince taneli malzeme (Ünal vd 2011) olmasından dolayı ve yüksek miktarda SiO₂ içermesi sebebiyle, mükemmel bir puzolanik malzemedir (Erdoğan 2003). Silis dumanının rengi açık griden koyu griye

değişen renkte olabilir. Koyuluk, içeriğindeki karbonun artmasıyla artmaktadır. Silis dumanı su ile karıştırıldığında rengi koyulaşmakta, hatta siyaha dönüşmektedir (Malhotra 1997).

Peterson (1976), puzolanik reaksiyonun meydana gelmesi için ortamda yeterli su olması koşuluyla, çimento yerine %16 civarında silis dumanı miktarına gerek olduğunu belirtmiştir.

Jahren (1983), yaptığı çalışmada, yeterli su/bağlayıcı oranı olması durumunda silis dumanının diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşumunu sağladığını ve ince SD tanelerinin agrega-hamur ara yüzey bölgesini yoğunlaştırdığını belirtmiştir.

Yogendran *et al.* (1993), tüm kalsiyum hidroksiti tüketmek için ihtiyaç duyulan SD miktarının, su/çimento oranına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, su/çimento oranı 0.48 olan bir karışımda, tüm kalsiyum hidroksiti tüketmek için %15 civarında silis dumanına ihtiyaç duyulurken, su/çimento oranı 0.28 olan karışım için sadece %10 oranında silis dumanının yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.

Larsen *et al.* (1993), silis dumanı betonda çimento yerine kullanımının beton özelliklerini iyileştirmesinin ancak yeterli su/bağlayıcı ve uygun değer miktarda su kullanılmasıyla mümkün olacağını açıklamıştır.

Perraton *et al.* (1994), beton dayanımındaki azalmanın, SD ikamesi betonda meydana gelen mikro çatlama miktarı ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bu sonuçların birkaçı ise, basınç dayanımı deneyleri yapılırken betondaki nem durumlarının farklılıklarıyla açıklanmaktadır.

De Belie *et al.* (1997), betonunda asit direncini ölçmek için yaptığı çalışmada; betonda geçirimsizlik, alkaliler ve çimentonun kimyasal bileşimi olmak üzere üç ana faktörün önemli rol oynadığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada ve benzer olarak diğer pek çok çalışmalarda uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların

betonda geçirimsizliği sağlamak için olumlu etkisi olduğu ifade edilmiştir (Bertron *et al.* 2005; Bayoux *et al.* 1990; De Belie *et al.* 1997; Bertron *et al.* 2004; De Belie *et al.* 1998).

Topçu ve Kaval (2001), yaptıkları çalışmada; betonda silis dumanı kullanımının ekonomik analizini yapmışlardır. En uygun değerlerin; 350 ve 400 dozajlı betonlar için %10 oranında, 300 dozajlı betonlar için ise %15 oranında silis dumanı ilavesiyle elde edildiğini belirtmişlerdir.

Türk vd (2006), yaptıkları çalışmada, beton karışımı için gerekli toz madde miktarını tamamen imento ile karşılamanın ekonomik açıdan uygun olmadığını, beton özelliklerini olumsuz etkilediğini ve hidrasyona bağlı reaksiyonların gelişmesini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Buna göre beton karışım tasarımıında, toz madde miktarını artırmak amacıyla imento yerine belli bir oranda farklı mineral katkıların kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

Beycioğlu vd (2010), silis dumanının beton teknolojisinde kullanımı başlıklı deneysel bir çalışma yapmışlardır. Silis dumanının taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkilerinin incelendiği çalışmada betonda silis dumanı miktarının uygun kullanımı ile ilgili öneriler sunulmuştur. Silis dumanı tanelerinin çok ince olması sebebiyle betonun su ihtiyacını artırdığını belirtmişlerdir. SD oranı imento ağırlığının %5'inden daha fazla olduğunda, beton daha yapışkan olmakta, yüzey düzeltme işlemlerinde kullanılan malzemelere yapışarak güçlük çıkarmaktadır. SD içeren betonların daha kohezif hale gelmesi sebebiyle işlene bilirliğin azaldığı ve priz sürelerinin uzadığı rapor edilmiştir. Mekanik dayanım açısından yapılan değerlendirmede ise silis dumanının puzolanik etkisinin betonda agrega-imento hamuru temas yüzeyini güçlendirmede etkili olduğunu ve basınç dayanımını belirli bir ikame miktarına kadar artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca betonda mikro boşlukları doldurması nedeniyle dayanıklılığa olumsuz etki eden birçok dış faktöre karşı da SD kullanımının dayanımda olumlu sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Atiş vd (2010), yaptıkları çalışmada; silis dumanı kullanımının beton basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Silis dumanı kullanımının taze betonda işlenebilirliği azalttığını ancak su kusmayı önlediğini belirtmişlerdir. Sertleşmiş betonda ise 28 günde belirgin olmamakla birlikte ilerleyen yaşlarda basınç dayanımında belirgin artışlar olduğunu ifade etmişlerdir. Su/imento oranının ya da ilave edilecek silis dumanı miktarının uygun değerden daha fazla olması durumunda ise silis dumanının etkisinin azaldığını ve buna bağlı olarak dayanım artışlarının görölmediğini vurgulamışlardır.

Karpuz vd (2015), yaptıkları çalışmada; ağırlıkça %4 ile %16 arasında değişen oranlarında imento ile silis dumanını ikame ederek, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, geçirimlilik, birim hacim ağırlığı ve irtibatlı boşluk oranı ölçümleri yapmışlardır. Elde edilen sonuçlardan çimentoyla yer değiştirilerek silis dumanı kullanılmasının basınç dayanımını arttırdığı ve yarmada çekme dayanımını fazla etkilemediği; ince kum kullanılmasının basınç dayanımını ve yarmada çekme dayanımını azalttığı; her iki katkının irtibatlı boşluk oranını ve geçirimlilik kapasitesini azalttığı görölmüştür.

2.2. Uçucu Kül ile Yapılmış alışmalar

Elektrik üretimi yapan termik santralde, gerekli enerjiyi sağlayabilmek için yakıt olarak genellikle pulvarize kömür kullanılmaktadır. Pulvarize kömürün yanmasıyla ortaya çıkan küllerin bir kısmı ocak tabanında birikirken yaklaşık %75-80'i gazlarla birlikte bacadan dışarıya çıkmaktadır. Bu küller "uçucu kül" ya da "pulvarize yakıt külü" olarak isimlendirilir (Erdoğan 2004). Tane boyutları 0,5–150 µm olan, kısmen veya tamamen küresel şekilli küllerin bacadan çıkararak çevreye yayılmasını önlemek gerekmektedir. TS EN 197–1, "imento-Genel imentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk" standardında belirtilen tipteki uçucu küller, elektrostatik veya mekanik olarak çöktürme yoluyla elde edilmektedirler. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

Bitümlü kömürden üretilen F sınıfı uçucu küllerde toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla, reaktif kireç (CaO) yüzdesi ise %10'un altındadır. Bu sebeple düşük kireçli olarak da adlandırılan F sınıfı uçucu küller sadece puzolanik özellik gösterirler.

C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilir. Toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan C sınıfı uçucu küllerde CaO miktarı da %10'dan yüksektir. Bu sebeple C sınıfı uçucu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da bilinir. Bu küller, puzolanik özelliğine ilave olarak yüksek miktarda kireç içermelerinden dolayı kendiliğinden de bir miktar bağlayıcılık özelliği gösterirler (Gündeşli 2008).

Hauser *et al.* (1999), geleneksel gaz beton karışımında bulunan kireci uçucu kül ile yer değiştirmişlerdir. Ürettikleri numunelerde en yüksek basınç dayanımını 0,7-0,8 Ca/Si oranına sahip serilerde elde etmişlerdir.

Vu *et al.* (2001), tarafından yapılan çalışmada, doğal puzolanların çimento hamurundaki mikro boşluklara kolayca girdiği ve çimento hamurunun iskelet yapısını değiştirerek dayanıklılığını artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca doğal puzolanların, ince taneli olmaları sebebiyle çimento harcı ve beton üzerinde kayganlaştırıcı bir etki de ortaya koyduğu ifade edilmiştir. Bu etkinin taze betonun işlenebilirliğini iyileştirmesine rağmen doğal puzolanların, çimentonun toplam özgül yüzeyini artırdıkları için su ihtiyacını da artırabilmekte olduğunu belirtmişlerdir.

Wongkeo and Chaipanich (2010), atık uçucu külü ve silis dumanından yapılmış otoklav ve hava kürüne tabi tutulmuş düşük yoğunluklu gaz betonların basınç dayanımı, mikro yapısı ve termal iletkenliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak en yüksek basınç dayanımını uçucu külü külünün %20 ve silis dumanın %5 oranında kullanıldığı karışımlarda elde etmişlerdir.

Tohumcu ve Bingöl (2013), yaptıkları; silis dumanlı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri ve basınç dayanımları konulu bir çalışmada,

mineral katkı olarak çimento yerine ağırlıkça %5-%15 arası oranlarında silis dumanı ve %25-55 arası oranlarında uçucu kül kullanılarak KYB üretmişlerdir. Taze beton özellikleri ile sertleşmiş betonların erken yaşlardaki basınç dayanımları belirlenmiştir. Silis dumanı ilavesinin basınç dayanımlarında artışa yol açarken uçucu kül katkılı betonların dayanımlarında azalmalar olduğunu bildirmişlerdir. Basınç dayanımlarından yüksek değer 88 MPa olarak %15 silis dumanı katkılı betonlardan sağlanmıştır. Yazarlar; ince taneli malzeme olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanımının betonun viskozitesini artırdığını, erken yaşlarda silis dumanı ve uçucu kül katkılı betonların dayanımlarının kontrol grubundan daha düşük değerlerde olduğunu belirtmişler, buna gerekçe olarak da puzolanik reaksiyonunun tamamlanmamış olabileceğini göstermişlerdir.

Yaprak vd (2004) de uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun süper akışkanlaştırıcı katkılı beton özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Mineral katkılar %30'a kadar oranlarda portland çimentosu ile yer değiştirilmiştir. Numuneler, 7, 28 ve 90 gün kür edildikten sonra basınç ve yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. UK ve YFC ikameli betonlar hem birbirleri ile hem de portland çimentosu ile üretilmiş olan kontrol betonu ile karşılaştırılmıştır. En yüksek basınç dayanımı, %10 UK ve %20 YFC betonlarda elde edilmiştir.

2.3. Yüksek Fırın Cürufu ile Yapılmış Çalışmalar

YFC; silis, kalsiyum alümina silis ve bazik esaslı bileşikler içeren ve demir üretimi sırasında fırınlardan ergimiş halde elde edilen bir atık üründür (Erdoğan ve Kurbetçi 2003). Kimyasal bileşimi esas olarak $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşmaktadır. Ancak cürufun kimyasal bileşimi kadar kristal yapısı da önemlidir (Yalçın ve Gürü 2006). Kalsiyum içeriklerine ilave olarak, cürufun tane boyutu ve karakteristikleri ile camsı madde bileşimi ve oranı, aktivitelerinde önemli faktörlerdir (Mindness and Young 1981). Fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gereken YFC'nun içindeki CaO, MgO ve SiO_2 miktarları toplamın da yine en az 2/3 oranında olması istenmektedir (Richardson 2007).

YFC'nun çimento ve beton sektöründe farklı kullanım imkânları bulunmakla beraber genellikle çimento ile ikame edilerek kullanılmaktadır. Önceki çalışmalarda YFC katkı betonların erken yaş dayanımlarının düşük, ileri yaş dayanımlarının yüksek olduğu, betonda işlenebilmeyi artırdığı, priz süresini uzattığı, terlemeyi, hidrasyon ısısını ve su geçirimsizliğini azalttığı bildirilmektedir. Ayrıca YFC kullanımı betonda klor geçirimsizliğinin azaltır, yüksek alkali silika direnci sağlar. YFC katkı betonların hidrasyon ısılarının düşük olduğu ve donatı korozyonuna karşı direnci artırdığı da literatürde bildirilmiştir (Yazıcıoğlu vd 2003; Yazıcıoğlu vd 2005; Ekinci 1993; Emiroğlu vd 2011).

Neville (1990), öğütülmüş yüksek fırın cürufu betonda kullanıldığında, çimento hamurunda daha küçük ve süresiz boşluk oluştuğunu, agrega- çimento ara yüzündeki boşlukların azaldığını, betonun kalıcılığının arttığını gözlemiştir.

Neville and Brooks (2001), tarafından cürufun uygun miktarlarda çimento ikamesi olarak kullanıldığında kütle betonlarında hidrasyonun sıcaklığın kontrol edilmesi için etkili bir araç olduğu gözlenmiştir. Cürufu çimentonun ilavesinin ilk yaşlarda çimentonun neden olduğu erken ısı akışının azalttığını böylelikle beton bünyesinde yüksek sıcaklıkların sebep olduğu çatlak oluşumu ve hacimsel kararlılığın bozulmaması için olumlu etkilerinin olduğunu ifade etmişlerdir.

Shi (2004)'e göre kullanılan ham maddenin içeriğine, hatta işlem ısısına bağlı olarak çelikhane cürufunun kimyasal bileşimindeki önemli değişimlerle beraber, mineralojik bileşiminin de farklı olması düşünülmektedir.

Taylor (1997), Higgins (2003), Brown *et al.* (2004) ve Rozière *et al.* (2009), YFC katkı betonların sülfat etkisini Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre sodyum sülfata maruz bırakılan numunelerde basınç dayanımlarında kayıplar oluştuğunu ve hacimsel genleşmeler meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

2.4. Zeolit Konusunda ile Çalışmalar

Zeolitler, kristal yapılı olup yapay ya da doğal sulu alüminyum silikat bileşikleri olarak tanımlanırlar. Yapay zeolitler; katalizör, adsorblayıcı ve iyon değiştirici olarak kimya endüstrisinde kullanılırken, doğal zeolitler ise hafif yapı taşı ve puzolanik çimento katkı maddesi olarak inşaat endüstrisinde, katkı maddesi olarak kâğıt sanayinde, toprak düzenleyici ve gübre katkı maddesi olarak da tarım sektöründe kullanılmaktadır (Yücel 1987).

Zeolitli tüfler tarih öncesi çağlardan beri genellikle yapı taşı olarak inşaat alanında kullanılmakta olup son yıllarda ise hafif agrega ve çimento katkı malzemesi olarak ön plana çıkmaktadır. Zeolitler kafes yapılarında alüminyum, silis ve oksijen, gözeneklerinde ise katyon ve su bulunan mikro gözenekli kristal katkılardır. Silis ve alüminyum tanecikleri ortak oksijen tanecik sayesinde birbirlerine tetrahedral olarak bağlanırlar (Turanlı vd 2007). Zeolitli tüflerin zeolitli olmayan doğal puzolanlara göre daha aktif olmaları genel olarak zeolitlerin mikro-gözenekli yapısıyla ilişkilendirilmektedir (Sersale 1995). Mikro gözeneklilikten dolayı zeolitler muhtemelen difüzyon-kontrollü topo kimyasal reaksiyon yoluyla ortamdaki kireçle etkin bir şekilde reaksiyona girerek bağlayıcı jeller oluşturmaktadır (Drezaj *et al.* 1978).

Feng *et al.* (1990) zeolitik mineral katkılı yüksek dayanımlı ve akıcı betonlarda, çimento yerine %10 oranında zeolit kullanılan betonlarda dayanımı 80 MPa ve çökmesi 18 cm olan betonlar üretmişlerdir. Bu değer, normal portland çimentolu betonlara göre basınç dayanımında %10-15 arasında artış göstermiştir. Araştırmacılar aynı zamanda zeolit kullanılan betonlarda terleme ve ayrışmanın da olmadığını belirtmişlerdir.

Franus and Dudek (1999) en yaygın kullanılan doğal puzolan malzemeler arasında uçucu kül ve silis dumanı olmasına rağmen zeolitin; düşük maliyeti ve erişilebilirliği (Feng and Peng 2005; Colella *et al.* 2007) ve kristal yapılı olmasından dolayı, betonun dayanımında olumlu etki sağladığını ve bu sebeple tercih edilebileceğini belirtmişler (Najimi *et al.* 2012).

Colella *et al.* (2001) puzolanik maddelerin bağladıkları kireç (Ca(OH)_2) miktarının ölçülmesi esasına dayanan deneysel çalışmalar sonucunda, zeolitlerin orijinal puzolanik malzemenin kireç bağlama kapasitesini düşürmediğini, tam tersine alüminosilikat yapının re aktivitesini artırdığı bildirilmiştir.

Turanlı vd (2007), Türkiye'deki doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımının yaygınlaştırılması amacıyla, zeolitlerin puzolanik katkı maddesi olarak ve hafif agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla; öncelikle Türkiye'deki başlıca iki doğal zeolit rezervinden (Manisa/Gördes, Balıkesir/Bigadiç) temin edilen doğal zeolitlerin özellikleri ve daha sonra puzolanik aktiviteleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda kullanılan doğal zeolitlerin önemli düzeyde puzolanik aktivite gösterdikleri, doğal zeolit katkılı portland çimentolarının normal portland çimentosuna kıyasla daha hızlı ilk ve son priz süreleri sağladığı ve zeolit ikamesinin çimento hamurlarının gözenek boyut dağılımını küçülterek basınç dayanımı ve geçirimsizliğini artırdığı belirtilmiştir.

Perraki *et al.* (2010), tarafından doğal puzolanlardan, zeolitik tüflerin eski çağlardan beri kireç ile karıştırılarak inşaatlarda yaygın kullanıldığı bildirilmiştir.

Uzal ve Turanlı (2012), klinoptilolit zeolitinin kireç re aktivitesinden dolayı, silis dumanı ve uçucu külden daha aktif bir doğal puzolan olduğunu belirtmişlerdir. Bu aktivite sayesinde çimentonun hidrasyonunda doğal zeolitte bulunan reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 reaksiyona girerek kalsiyum silikatları oluşturur (Sanytsky *et al.* 2010).

Bideci vd (2013), yaptıkları çalışmada; zeolit katkılı çimentoların özelliklerini incelemek amacıyla, portland çimentosuna %0, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında zeolit katkısı ilave ederek çimento harç özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada zeolit katkılı çimento harç numunelerinin, fiziksel ve kimyasal analizleri, 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ile SEM görüntüleri incelenmiştir. Çalışmada, katkılı çimento özellikleri bakımından en uygun değerlerin %10 zeolit katkılı çimento harçlarından elde edildiği belirtilmiştir.

Canpolat vd (2000), zeolit katkıli çimentoların özelliklerinin incelenmesi konulu deneysel çalışmada, doğal zeolit ve silis dumanı katkıli çimentolar üreterek, bunların fiziksel ve kimyasal etkilerini araştırmışlardır. Bu katkıli farklı oranlarda portland çimentosu ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Katkıların fiziksel özellikleri; priz süresi, hacim genişmesi, öğütme süresi, eğilmede çekme ve basınç dayanımı kontrol numunesi ile karşılaştırılmıştır. Çimentoyla yer değiştirilerek kullanılan katkıların çimentonun mekanik özelliklerinde iyileşmeye yol açtığını ve bunun sonucu olarak da SD ve doğal zeolit çimento katkı malzemesi olarak kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Doğal zeolit tek başına klinkere %20 den fazla ilave edilmesi durumunda ise harcın eğilme ve basınç dayanımında azalmaya sebep olduğu rapor edilmiştir.

Aruntaş ve Beycioğlu (2014), çimentoların eğilme dayanımı değerlerini dikkate alarak, zeolit sadece %5 ikame oranında ve 90 günlük numunelerde eğilme dayanımını artırdığını, daha fazla miktardaki ikame oranlarında ise eğilme dayanımı değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Basınç dayanımı ise 28 günlük kür süresi sonunda %10 ikame oranına kadar TS EN 197- 1'de öngörülen minimum dayanım değerini sağlamıştır. Yazarlar %10 ikame oranına kadar zeolit içeren çimento üretimimin mümkün olabileceğini ifade etmişlerdir.

2.5. Mineral Katkıli Betonlarda Sülfat Etkisi ile Yapılmış Çalışmalar

Sülfat reaksiyonunun gelişimini; sülfatlı ortamının şiddeti, betonun geçirimsizliği, çimentonun kimyasal yapısı ve suyun varlığı etkilemektedir. Sülfat dayanıklılığını artırmak için sülfata dayanıklı çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkıli kullanılabilir. Puzolanlar, Ca(OH)_2 'i bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önler ve sadece Portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki Ca(OH)_2 ve C_3A oranının azaltılmasını sağlarlar (Akman 1992; Mehta and Monteiro 1997; Yeğinoğlu 1999).

Katı, kuru tuzlar betona zarar vermezler ancak su ile birlikte bulunmaları sonucu, sertleşmiş çimento harcıyla reaksiyona girerler. Bazı killer alkali magnezyum ve

kalsiyum sülfat gibi kimyasal maddeler içerir, bunlar yer altı suyuyla birleşince zararlı etki ortaya çıkar. Zemin yüzeyinde oluşan tuz birikintileri çoğunlukla sodyum sülfattır. Ancak magnezyum sülfata da birçok bölgede rastlanır. Na_2SO_4 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C_3A ile, CaSO_4 ise yalnızca C_3A ile reaksiyona girer. Deniz suyunda da bulunabilen MgSO_4 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C_3A 'nın yanı sıra kalsiyum silikat hidrate (CSH) yapıyla da reaksiyona girebilmektedir (Neville 1997; Baradan vd 2002).

Monteiro *et al.* (2003), tarafından yapılan çalışmada, betonun sülfat saldırısından zarar görmemesi için kritik bir bölgenin bulunduğu, çimentonun C_3A miktarının %8'den az, su/çimento oranının 0,45'in altında olması halinde 40 yıllık etki sürede hasar oluşmadığı, çimento yerine %25 ve %45 uçucu kül kullanımının genleşmeleri azalttığı belirtilmektedir.

Li and Zhao (2003), yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı betonların sülfat dayanıklılığını incelemişlerdir. En iyi performansı yüksek fırın cürufu kullanılan betonların gösterdiği ifade edilmiştir.

Chindaprasirt *et al.* (2004), tarafından yapılan çalışmada, F sınıfı uçucu kül kullanımının sülfat dayanıklılığını artırdığı, uçucu kül inceliği arttıkça bu etkinin daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Kaba uçucu kül (Blaine değeri $1800 \text{ cm}^2/\text{g}$) kullanımı halinde ise genleşmelerin azalmadığı aksine arttığı ifade edilmektedir.

Yazıcı (2006); YFC katkılı harçların sülfat dayanıklılığını araştırmıştır. Çalışmada, PÇ CEM I 42.5 çimentosu ve farklı oranlarda YFC kullanılarak üretilen harçlar Na_2SO_4 çözeltisinde farklı koşullarda bekletilerek genleşmeler ve basınç dayanımlarındaki değişimleri incelenmiştir. Bir grup 150 g/l Na_2SO_4 çözeltisinde 6 ay süre ile bekletilmiş, diğer grup ise aynı çözeltide ıslanma-kuruma etkisine tabi tutulmuştur. Sülfata maruz kalmış numunelerin basınç dayanımları kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, özellikle ıslanma-kuruma etkisinde tüm karışımlarda basınç dayanımlarında azalmalar görüldüğü ancak sürekli sülfat etkisinde ise YFC içeren

karışımlarda bir miktar dayanım artışı olduğu bildirilmiştir. YFC kullanımı ile genleşmelerin azaldığı belirtilmiştir.

Doğruyol ve Karaşin (2011), yaptıkları çalışmada sülfatın beton ve betonarme elemanlara olumsuz etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada sülfat yoğunluğu yüksek toprakların sülfat oranı TS 12457-4 Standardı ile karşılaştırılmıştır. Yüksek oranda sülfatın betonun dayanım ve dayanıklılığına etkisini görebilmek için numuneler ASTM C 1012'ye uygun şekilde hazırlanmış 150 g/l Na₂SO₄ çözeltisinde 5 ay süreyle bekletilmiştir. Aynı zamanda sülfatın etkisini araştırmak için bu numuneler 28 günlük su kürü ile dayanım kazanmış numunelerle karşılaştırılmış ve sülfat etkisine maruz beton numunelerin belli aralıklarla yüzey sertlikleri ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Aynı zamanda numunelerde meydana gelen ağırlık değişimleri ve yüzeysel bozulmalar periyodik olarak gözlemlenmiştir. Sülfatın beton ve betonarme elemanlarda dayanım ve dayanıklılığı düşürdüğü tespit edilmiştir. Sülfata maruz beton ve betonarme elemanlarda dayanıklılığı artırmak için çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların kullanılmasının olumlu sonuçlar verdiği ancak puzolanların kullanımının erken dayanımları düşürdüğü tespit edilmiştir. Ancak bu etkinin ilerleyen yaşlarda büyük oranda kaybolduğu ve sülfat etkisine maruz katkısız numuneden daha yüksek dayanıma ulaştığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak sülfat etkisine maruz kalabilecek yapılarda, betonun dayanım ve dayanıklılığını arttırmak için portland çimentosunu karışımından bir miktar azaltarak yerine mineral katkı maddelerinin kullanılmasının olumlu sonuçlar vereceği bildirilmiştir. Aynı zamanda çimentonun ekonomik tasarrufunun yanı sıra atık maddelerin geri dönüşümünün sağlanmasının çevresel denge açısından da büyük bir önemi olduğu vurgulanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal kısmında çalışmanın amacı doğrultusunda agrega, uçucu kül, zeolit, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, çimento, karma suyu ve kullanılan diğer malzemelerin çalışmalarda kullanılan aletler hakkında bilgi verilmektedir. Yöntem kısmında ise beton üretimi belirlemek için kullanılan yöntemler, bu agregalarla üretilen betonlarda karışım oranlarının belirlenmesi, taze betonun ve sertleşmiş betonun özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Deney esnasında TSE (Türk Standartları Enstitüsü) standartları dikkate alınmıştır.

Kullanılan çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri İran Urumiye Çimento Fabrikası'nda yapılmıştır. Beton üretimi, taze beton deneyleri ve sertleşmiş betonda basınç ve eğilme mukavemetlerinin tayini İran'ın Urumiye şehrinde bulunan Zemin Jerfab Laboratuvarı'nda, SEM görüntüleri ve XRD ölçümleri Atatürk Üniversitesi DAYTAM laboratuvarında yapılmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Agrega

Beton üretiminde Urumiye ili sınırında Nazlı Dağı'ndan temin edilen doğal kum ve kırma taşlar kullanılmıştır. Kullanılan agreganın en büyük tane çapı 25mm'dir. Beton üretimlerinde %40 iri, %60 ince malzeme kullanılmıştır. Temin edilen malzeme üzerinde yapılan agrega deneyleri sonuçları Araştırma Bulguları bölümünde verilmiştir.

3.1.2. Çimento

Bu çalışmada TS EN 197-1 standartlarına uygun, İran Urumiye Çimento Fabrikası'nda üretilen CEM I 42.5 R türü çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal analizi Çizelge 3.1'de fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal özellikleri ve ana bileşenlerinin miktarları

Kimyasal Özellikleri	(%)	Çimentonun Ana Bileşenleri	(%)
SiO ₂	21,50	C ₃ S	48,26
Al ₂ O ₃	5,05	C ₂ S	21,36
Fe ₂ O ₃	2,77	C ₃ A	8,78
CaO	63,05	C ₄ AF	8,43
MgO	1,74	NOT: Çimentonun ana bileşenlerinin miktarları Bogue formülleri kullanılarak hesaplanmıştır.	
SO ₃	2,50		
K ₂ O	0,85		
Kızdırma Kaybı	2,34		
Serbest kireç	1,20		

Çizelge 3.2. 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

3.1.3. Karma suyu

Beton üretiminde kullanılacak suyun temiz olması ve betona olumsuz bir etki yapmaması gerekmektedir. İçilebilir sular beton üretiminde karışım suyu olarak kullanılabilirler (Bingöl 2007). Çalışmada karma suyu olarak sıcaklığı yaklaşık 19°C olan Urumiye şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Silis dumanı

Bu çalışmada, silis dumanı ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında çimento yerine kullanılmıştır. Kullanılan silis dumanı İran'ın Tahran ilinden temin edilmiştir ve kimyasal ve fiziksel analizi Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri

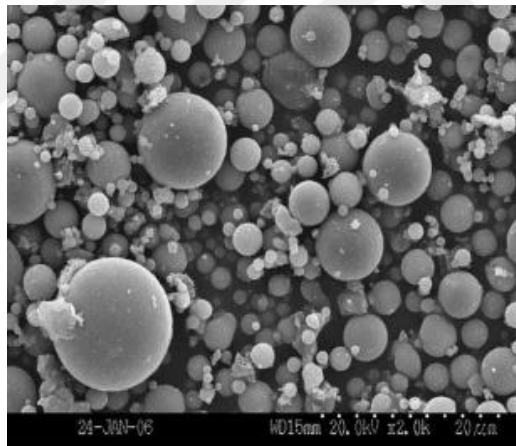
Kimyasal Özellik	(%)
SiO ₂	93,00
CaO	0,77
MgO	0,70
Fe ₂ O ₃ (Hematit)	1,00
Al ₂ O ₃	1,30
SO ₃	0,50
Cl	0,10
Na ₂ O	0,30
K ₂ O	0,30
C	2,00
Kızdırma Kaybı	2,00
Nem	3,00
45 µm üzeri malzeme	10
Özgül ağırlık	2,22
Renk	Gri

3.1.5. Uçucu kül

Bu çalışmada Kütahya Çimento Kü-Blok ve Pülverize uçucu kül Tesisinden temin edilen ve aşağıda özellikleri (Çizelge 3.4) verilen uçucu kül kullanılmıştır. Çizelgeden görüleceği üzere deneylerde kullanılan uçucu kül ASTM C 618 göre F sınıfı ve “düşük kireçli” uçucu kül sınıfına girmektedir. Bu çalışmada uçucu külün ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında çimento yerine kullanılmıştır. Uçucu külün resmi üretici firmadan alınan SEM görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir (Anonim 2016a).

Çizelge 3.4. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikleri	(%)	Fiziksel Özellikleri	
SiO ₂	54,59	Özgül Ağırlık	1,98
Al ₂ O ₃	20,29	Özgül Yüzey (cm ² /g)	4020
Fe ₂ O ₃	11,93		
CaO	3,47		
MgO	4,09		
SO ₃	0,99		
K ₂ O	2,53		
Kızdırma Kaybı	2,01		

**Şekil 3.1.** Uçucu Külün SEM altında görüntüsü (Anonim 2016a)

3.1.6. Yüksek fırın cürufu

Bu çalışmada kullanılan Yüksek fırın cürufu İran'ın, İsfahan şehrinde olan İsfahan Çelikhanesin 'den temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufu İran, Urumiye Çimento Fabrikasının 'da öğütülerek çimento inceliğine getirilmiştir.

Yüksek fırın cürufu ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranında çimento ile ikame edilerek kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikleri	%	Fiziksel Özellikleri	
CaO	37,00	Özgül Ağırlık	2,51
SiO ₂	34,00	Tane Boyutu (mm)	≤ 5,00
Al ₂ O ₃	11,00		
MgO	8,00		
MnO	2,10		
Fe ₂ O ₃	1,10		
TiO ₂	2,85		
V ₂ O ₅	0,35		
NaO ₂	0,50		
K ₂ O	0,30		
S	0,90		
CaO/SiO ₂	0,80		
Kızdırma Kaybı	1,00		

3.1.7. Zeolit

Bu çalışmada zeolit ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında çimento yerine kullanılmıştır. Kullanılan zeolit İran'ın Semnan ilinde üretilen Zeolit Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir ve özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Zeolit (klinoptilolit) kimyasal ve fiziksel özellikleri kompozisyonu

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

3.1.8. Su azaltıcı katkı maddesi (Akışkanlaştırıcı)

Bu çalışmada İran Tahran Abadgeran firmasından temin edilen hiper akışkanlaştırıcı (polikarboksilik eter esaslı) katkı maddesi kullanılmıştır. ASTM C1017/C 1017 M, ASTM C494/C494 M Type F, EN 480-10 ve EN 480-12 standartlarına uygun olarak üretilen ürünün özellikleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Hiper akışkanlaştırıcı’nın özellikleri

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

3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler

3.2.1. Elekler

Deneylerde ASTM D 422 (1963)’e uygun kare göz açıklıklı tel elekler kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Agrega deneylerinde kullanılan elek takımı

3.2.2. Betonyer

Çalışmada, Şekil 3.3'te görülen 100 dm³ kapasiteli, 30 devir/dakika karıştırma hızına sahip, yatay eksenli betonyer kullanılarak beton üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.3. Beton üretiminde kullanılan laboratuvar tipi betonyer

3.2.3. Çökme konisi

Çökme konisi, taban çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan metalden yapılmış kesik koni şeklindedir. Alt kısmında oynamasını önlemek için iki adet basma kulaklığı mevcuttur (Şekil 3.4). Numunelerin kalıplara konulup, sıkıştırılması işlemi sırasında 600 mm uzunluğunda 16 mm çapında standart çelik şişleme çubuğu kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Beton çökme konisi ve şişleme çubuğu

3.2.4. Kalıplar

Deneyleerde, basınç dayanımı için 150x150x150 mm boyutlarında küp numune kalıpları ve eğilme dayanımı için 280x70x70 mm boyutlarında prizmatik beton kalıpları kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Beton numune kalıpları

3.2.5. Pres

Sertleşmiş beton deneylelerinden, numunelerin basınç ve eğilme dayanımları belirlenmesinde İran'da Urumiye Zemin Jerf Ab laboratuvarında, hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Beton numunelerin basınç ve eğilme dayanımları belirlenmesinde kullanılan pres

3.2.6. SEM cihazı

İnsan gözünün çok ince ayrıntıları görebilme olanağı sınırlı olması sebebiyle görüntü iletimini sağlayan ışık yollarının merceklerle değiştirilerek, daha küçük ayrıntıların görülebilmesine olanak sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Ancak bu cihazlar, gerek büyütme miktarlarının sınırlı oluşu gerekse elde edilen görüntü üzerinde işlem yapma imkânının olmayışı nedeniyle araştırmacıları bu temel üzerinde yeni sistemler geliştirmeye yönlendirmiş ve elektronik ve optik sistemlerin birlikte kullanılmasıyla üzerinde işlem ve analizler yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazlar geliştirilmiştir. Bu amaca hizmet eden cihazlardan birisi de taramalı elektron mikroskopudur (Scanning Electron Microscope-SEM). SEM, sanayinin değişik kollarında araştırma-geliştirme çalışmalarında, tıp ve kriminal uygulamalarda, hata analizlerinde ve biyolojik bilimlerde olmak üzere pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Anonim 2016b).

İlk ticari taramalı elektron mikroskobu 1965'de kullanılmaya başlanmış, bundan sonra pek çok teknik gelişme neticesinde geliştirilmiştir. SEM 'de görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune tanecikleri arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir (Anonim 2016b).

1. Çalışma Prensipleri

SEM üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemidir. Optik kolon kısmında; elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron

demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınları toplayan detektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler yer almaktadır (Anonim 2016b).

2. Numune ile Etkileşim

Yüksek enerjili demet elektronları numune atomlarının dış yörünge elektronları ile elastik olmayan girişimi sonucunda düşük enerjili Auger elektronları oluşur. Bu elektronlar numune yüzeyi hakkında bilgi taşır ve Auger Spektroskopisinin çalışma prensibini oluşturur. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde toplanırlar. Bu elektronlar ikincil elektron (seconder electrons) olarak tanımlanır. İkincil elektronlar numune odasında bulunan sintilatörde toplanarak ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevrilir. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır. Ayrıca numune atomları ile elektron demeti arasında elastik olmayan girişimler sonucu numunede karakteristik X-ışınları ve sürekli ışınlar da meydana gelmektedir. Karakteristik ışınlar, dalga boyu veya enerji dağılımlı X-ışını analitik sistemlerde değerlendirildiğinde, numunenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi vermektedir. Bu yöntem Elektron Mikroskopu Analizi olarak bilinir (Anonim 2016b).

Numune üzerine odaklanan elektron demeti, numune atomları ile ayrıca elastik girişimlerde de bulunabilir. Bu girişimlerde demet elektronları, numune atomlarının çekirdeğinin çekim kuvveti ile saptırılarak numune yüzeyinden geri saçılmaktadır. Bu elektronlar geri saçılmış (back scattered) elektronlar olarak tanımlanır ve objektif merceğin altında yer alan özel üç adet silikon detektörde (A, B, C) toplanarak görüntü

oluşumunda kullanılır. Böyle bir görüntü geri saçılmış (back scattered) elektron görüntüsü olarak tanımlanır. Geri saçılmış elektron miktarı, numunenin atom numarasıyla orantılıdır. Bu nedenle geri saçılmış elektron görüntüsü özellikle çok fazlı sistemlerde atom numarası farkına dayanan kontrast içerir. Geri saçılmış elektron görüntüleri en fazla x2000 büyütme kadar olan incelemelerde kullanılmaktadır (Anonim 2016b).

Bu çalışmanın SEM görüntülemeleri ve XRD ölçümleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezin' de (DAYTAM) yapılmıştır. Bu araştırmada Zeiss marka Sigma 300 modeli sistem kullanılmıştır.

3.2.7. X-ışını kırınım cihazı (XRD)

Doğada bulunan maddelerin çoğu bileşik halinde olup %95'e yakını kristal yapıdadır. Bu sebeple, maddelerin bileşik haldeki durumunun, bazen de onu oluşturan elementlerin bilinmesi gerekir. X-Işınları ile madde analizi, bir maddenin karakteristiği olan kırınım desenine dayanır. Kırınım, üzerine düşen elektromanyetik radyasyonun dalga boyuyla uyumlu farklı geometrik varyasyonlar içeren periyodik yapılara çarpması sonucu gözlenen bir etkidir. Aynı şekilde X-Işını Kırınım metodu (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, aynı mertebedeki dalga boyuna sahip X-ışını dalgalarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristal faz, X ışınları ile etkileştiğinde kendi yapısına özgü bir X-ışını kırınım deseni oluşur ve bu kırınım desenleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X- Işını Kırınımı için 3-8 keV arası foton enerjisine sahip X- ışınlarıyla uyumlu olan moleküler ve kristaldeki atomlar arası mesafe 0,15-0,4 nm civarında olmalıdır. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. Periyodik cetvelde atom numaraları düşük elementler hariç birçok elementin analizleri yapılabilir. X-Işını Kırınım cihazıyla, organik ve inorganik malzemelerin, minerallerin, kristal ve amorf malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir. Diğer kimyasal yöntemlere göre üstünlüklerinden en önemlisi; bir cismi kendisini oluşturan elementler cinsinden değil,

örnek içinde gerçekte bulunduğu şekilde açıklamasıdır. Kullanımı kolay ve hızlı bir yöntemdir. Çok düşük oranındaki miktarları doğru analiz yapılabilir ve yüksek hassasiyetle çalışabilir. İncelenecek örneklerde boyut, ağırlık, şekil çeşitliliğine izin verir. Doğal ve yapay minerallerin ve kayaçların tanımlanmasında, toprak ve maden analizlerinde, seramik ve çimento sanayiinde, organik ve inorganik malzemelerin analizinde, metal, alaşım, katı çözelti korozyon maddeler, çelik, süper iletken, yarıiletken ve kaplama malzemeleri analizlerinde, ince film kompozisyonu tayininde, polimerlerin analizinde, kristal veya amorf kompleks bileşiklerin incelenmesi, böbrek ve safra taşlarının analizinde, ilaç endüstrisinde belli bir malzeme içindeki polimorfların ve safsızlıkların tespitinde, arkeolojide, tarihi yapıları oluşturan malzemelerin tayininde olmak üzere pek çok alanda kullanılabilir (Anonim 2016b).

Bu çalışmada PANalytical Marka Empyrean modeli cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.7).

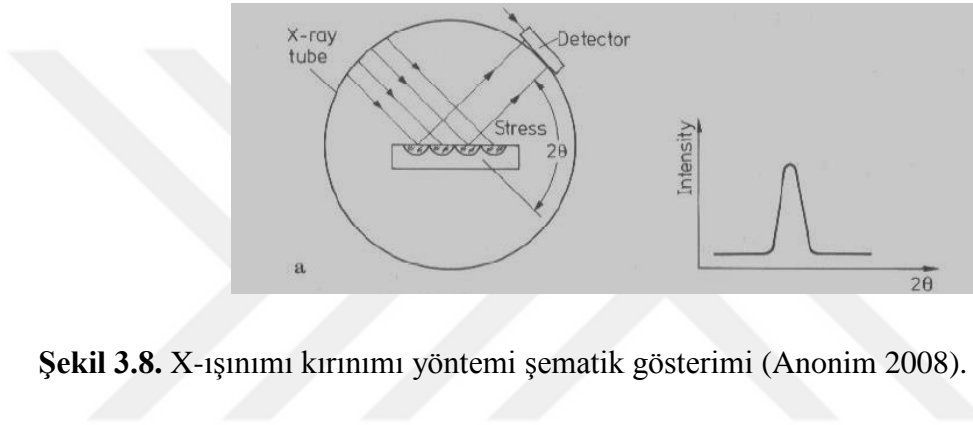


Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan XRD cihazı (Anonim 2016b)

1. X-ışını kırınımı yöntemi

X-ışını kırınımı metodu kalıntı gerilimlerin bulunmasında oldukça doğru sonuçlar veren bir yöntemdir. Kristal yapı içerisinde bulunan atomik düzlemler arasındaki mesafe, uygulanan gerilimler veya malzeme içerisinde kalan kalıntı gerilimler sayesinde uzayıp kısalır. Bu mesafenin artması o bölgede oluşan bir çekme gerilimi ifade ederken mesafenin azalması ise basma gerilimlerin varlığını gösterir. X-ışını kırınımı

yönteminde malzemeye gönderilen X-ışınları malzeme içerisindeki kristal düzlemlerden yansır. Bu sırada malzemeye gelen ışınların yönü değiştirilerek en çok yansımanın olduğu açı bulunur. Bulunan açı ve Bragg yasası kullanılarak iki atomik düzlem arasındaki mesafe hesaplanır. Malzeme içerisinde kalıntı gerilimler mevcutsa bu mesafe parçanın gerilim olmayan haline göre farklılık gösterir. Bu farklılık kullanılarak parçanın içerisinde kalan kalıntı gerilimler hesaplanabilir (Anonim 2008). X-ışınımı kırınımı yöntemi şematik olarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. X-ışınımı kırınımı yöntemi şematik gösterimi (Anonim 2008).

Özellikle ince kaplamalarda 2-3 µm derinliğe kadar ölçümler yapılabilmektedir. Tahribatsız bir yöntem olması dolayısıyla birçok uygulamada kullanılmakla beraber saha uygulamaları için çok uygun değildir. Günümüzde ise taşınabilir, hızlı ve daha ekonomik olan tahribatsız muayene yöntemlerine olan talep artmaya başlamıştır. Bu nedenle Manyetik Barkhausen Gürültüsü yöntemi bu alandaki araştırmaların başında gelmektedir (Anonim 2008).

Bu çalışmada düzlemler arası uzaklığı Blainen filmlerin X-ışınlarının kırınım deseninden yararlanıp Scherrer formülü kullanılarak tanecik büyüklükleri hesaplanmıştır.

$$D=(0,9\lambda) / (B(\text{radyan})\cos(\Theta_B))$$

Denklemdaki λ , kırınımında kullanılan x-ışınının dalga boyu, D toz taneciğinin çapı, B değeri, kırınım deseninde gözlenen maksimum piklerin yarı maksimumdaki

genişliklerinin (FWHM de denir) radyan cinsinden değeridir. Θ_B dikkate alınan pikin Bragg yansıma açısıdır. Bu denklemden yararlanarak tanecik büyüklükleri tahmin edilebilir (Kara 2008).

3.3. Yöntem

3.3.1. Agregat deneyleri

Deneylerde kullanılacak olan agregat; daha iyi tane dağılımı elde edebilmek için elenerek, 0-5 mm, 5-10 mm ve 10-25 mm olmak üzere üç farklı tane sınıfına ayrılmıştır. Böylelikle üretilen betonlarda ideal granülometrinin ve maksimum doluluğun sağlanması amaçlanmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere laboratuvara getirilen normal agregat için agregat deneyleri yapmak üzere numune alınmasında TS 706 EN 12620 belirtilen esaslar dikkate alınmıştır.

3.3.1.a. Tane büyüklüğü dağılımı (Granülometri)

Beton agregatları ile ilgili özelliklerin tarif edildiği TS 706 EN 12620'ye göre agregatların tane büyüklüğü dağılımı TS 3530 EN 933-1'e uygun olarak belirlenmelidir. Üç farklı tane sınıfına ayrılmış olan agregatlar üzerinde adı geçen standarda uygun olarak elek analizi deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

3.3.1.b. İri agregatların tane şekli tayini

TS 706 EN 12620'ye göre iri agregatların şekli, EN 933-3'te belirtilen yassılık indeksi cinsinden tayin edilmelidir. Yassılık indeksi, iri agregatların tane şeklinin tayininde referans deney olarak kullanılmalıdır.

3.3.1.c. Çok ince malzemenin muhtevası

Çok ince malzeme miktarı TS 706 EN 12620 ve TS 3530 EN 933-1'e uygun olarak yapılmıştır. Her bir agrega tane sınıfı için deney numunelerinin başlangıç ağırlıkları, malzemelerin yıkandıktan sonra ki ağırlıkları, bunlara bağlı olarak hesaplanan ince malzeme yüzdeleri ve malzeme kategorileri Araştırma Bulguları Bölümü'nde belirtilmiştir.

3.3.1.d. Çok ince malzemenin kalitesi

TS 706 EN 12620 EK D'ye göre ince agreganın toplam çok ince malzeme muhtevasının %3'ten az olması gerekmektedir.

3.3.1.e. Tane yoğunluğu ve su emme

Her bir agrega tane sınıfı için TS EN 1097-6'ya uygun olarak tane yoğunluğu ve su emme deneyleri yapılmış olup deney sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü'nde sunulmuştur.

3.3.1.f. Yığın yoğunluğu

Her bir agrega tane sınıfı için yığın yoğunlukları TS EN 1097-3'e uygun olarak yapılmış ve sonuçlar Araştırma Bulguları Bölümü'nde belirtilmiştir. Hacmi belirli bir kaba numuneler sıkıştırılmadan serbestçe doldurularak ağırlıkları tartılmıştır. Numunelerin net ağırlıklarının kabın hacmine bölünmesi ile yığın yoğunlukları tespit edilmiştir.

3.3.2. Deneysel çalışmanın kapsamı

Bu çalışmada dört tür mineral (silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit) farklı dozajlarda kullanılmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolitin dozajları %10, 20 ve 30 iken silis dumanı %5, 10 ve 15 oranlarında çimento yerine kullanılmıştır. Toplam ikili 13 grup numune (390 tane) üretilmiştir. 13 gruptaki 234 numune 28, 90 ve 180 gün sürelerle suda kür edilmiş ve kontrol numuneleri olarak kullanılmıştır diğer 13 gruptaki 156 numune 28 günlük su kürünün ardından 90 ve 180 gün sürelerle 100 g/l sülfatlı suda bekletilmiştir. Numunelerden 28, 90 ve 180 günlük yaşlarda birim ağırlık, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ölçümleri yapılmıştır.

3.3.3. Numunelerin kodlanmasında kullanılan yöntem

Numune kodlamalarında öncelikle sülfat etkisine maruz kalıp kalmadığı sonra mineral katkının dozajı ve ismi, en sonda da betonun yaşı belirtilmiştir. Aşağıda kodlama ile ilgili bir örnek sunulmuştur.

S %10 UK 90: %10 Uçucu kül katkılı sülfat etkisine maruz kalmış 90 günlük numune.
%5 SD 28: %5 Silis dumanı katkılı sülfat etkisine maruz kalmamış 28 günlük numune.

3.3.4. Karışım bileşenlerinin belirlenmesi

Bu çalışmada toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Su/çimento oranı ise 0,40 olarak seçilmiş, su azaltıcı katkı ise %0,8 oranında kullanılmıştır. Agregaların kuru yüzey doygun durumda olduğu kabul edilerek örnek bir karışım hesabı aşağıda sunulmuştur. Gerçek karışımlarda agregaların nem içeriğine göre su miktarları düzenlenmiştir.

Çimento dozajı 400 kg/m^3

Çimento hacmi= $400/3,13=127,80 \text{ dm}^3$

Su hacmi=160/1=160 dm³

Akışkanlaştırıcı katkı = 400 x 0.008 = 3,20 kg/m³

Akışkanlaştırıcı hacmi =3,20/1,10 =2,91 dm³

Hava hacmi=1000*0,01=10 dm³

Agrega dışı hacimler toplamı =127,80+160+2,91+10= 300,71 dm³

Agrega hacmi=1000-300,71=699,29 dm³

Agrega miktarlarının belirlenmesi

Ortalama agrega yoğunluğu:

$$\bar{\rho}_a = \frac{1}{\frac{X_1}{\rho_{a1}} + \frac{X_2}{\rho_{a2}} + \dots + \frac{X_n}{\rho_{an}}} \quad \bar{\rho}_a = \frac{1}{\frac{0.18}{2.73} + \frac{0.22}{2.71} + \frac{0.60}{2.57}} = 2.628$$

Toplam agrega kütlesi ise: $M_a = V_a \times \rho_a = 699,29 \times 2,628 = 1837,73$ kg olmaktadır.

Her bir agrega karışım yüzdelerine göre dağıtılır ise:

1 nolu kırma taş $1837,73 \times 0,18 = 330,79$ kg

2 nolu kırma taş $1837,73 \times 0,22 = 404,30$ kg

Kum $1837,73 \times 0,60 = 1102,64$ kg

1m³ beton için hesaplanan teorik malzeme miktarları Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. 1m³ Betonda malzeme miktarları

Malzeme	Miktar (kg)
Çimento	400
Su	160
Akışkanlaştırıcı	3,20
1 nolu kırma taş	331
2 nolu kırma taş	404
Kum	1103
Toplam	≈ 2400 kg/m ³

Mineral katkı kullanılması durumunda, kullanılan katkı oranınca çimento ile ikame edilmiştir. Buna göre tüm katkı türleri için karışım hesapları yapılarak Çizelge 3.9-3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9. Silis dumanı gurupları için malzeme miktarları

Malzeme Gurup	Çimento (kg)	SD (kg)	Toplam Bağlayıcı (kg)	İnce Agr (kg)	İri Agr 1 (kg)	İri Agr 2 (kg)	Su (kg)	Akış. Katkı (kg)
Kontrol	400	----	400	1103	331	404	160	3,20
%5 SD	380	20	400	1103	331	404	160	3,20
%10 SD	360	40	400	1103	331	404	160	3,20
%15 SD	340	60	400	1103	331	404	160	3,20

Çizelge 3.10. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit gurupları için malzeme miktarları

Malzeme Gurup	Çimento (kg)	UK YFC Z (kg)	Toplam Bağlayıcı (kg)	İnce Agr (kg)	İri Agr 1 (kg)	İri Agr 2 (kg)	Su (kg)	Akış. Katkı (kg)
Kontrol	400	----	400	1103	331	404	160	3,20
%10 (UK, YFC, Z)	360	40	400	1103	331	404	160	3,20
%20 (UK, YFC, Z)	320	80	400	1103	331	404	160	3,20
%30 (UK, YFC, Z)	280	120	400	1103	331	404	160	3,20

3.3.5. Beton üretimi ve bakımı

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 katkıları ve geriye kalan karma suyu konulup yaklaşık 5 dakika daha karıştırılarak betonlar üretilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Betonların üretimi

Üretilen betonlarda çökme deneyi (Şekil 3.10) yapıldıktan sonra, basınç dayanımı deneyi için 15x15x15 cm küp ve eğilme dayanımı deneyi için 7x7x28 boyutlu prizma kalıplara yerleştirilmiştir. Numunenin kalıplardan kolaylıkla çıkarılabilmesi için, kalıpların içi ince motor yağı ile yağlanmıştır. Her 1/3 yükseklikte 25 defa şişlemeden sonra kalıpların yüzeyleri çelik mala ile düzeltilmiştir. Beton numunelerinin nem kaybını önlemek amacı ile naylon örtü ile üzerleri kapatılmış ve 24 saat kalıplarda bekletilmiştir. Üretilen beton gruplarından örnek numuneler Şekil 3.11-3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Beton üretimi ve taze betonda çökme deneyi



Şekil 3.11. Kontrol grubu numuneleri



Şekil 3.15. Zeolit katkılı numuneler

Laboratuvar koşullarında 24 saat bekletilen numuneler kalıpları söküldükten sonra kür havuzuna konulmuştur (Şekil 3.16). Kür havuzları, numuneler yerleştirilmeden önce su ile doldurulmuş, kirece doymun hale getirilmiş ve sıcaklığının $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ olması sağlanmıştır. Her grubun numuneleri 27 gün kürden çıkarılarak bir gün laboratuvar şartlarında bekletilmiştir. Sonra kontrol numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir.

İlerleyen 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 suda 90 gün ve 180 gün yaşlarda sülfat etkisi belirlenmiştir.



Şekil 3.16. Su küründeki numuneler

3.3.6. Taze beton deneyleri

Taze betonlar üzerinde çökme deneyi ve taze betonun birim ağırlığı deneyleri yapılmıştır.

3.3.7. Sertleşmiş beton deneyleri

Numuneler üzerinde sertleşmiş birim ağırlıklar ölçülmüş, basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Beton zamana bağlı olarak şekil değiştirme gösteren bir malzeme olduğundan, yükleme hızı, betonun basınç dayanımı üzerinde etkili bir parametredir. Bu nedenle tüm numuneler sabit bir yükleme hızı altında deneye tabi tutulmuşlardır. Basınç dayanımı tayininde kullanılmak üzere numune boyutları 1 mm hassasiyetle ölçülerek yükün etki edeceği alan hesaplanmıştır. Numunelerin basınç dayanımlarının hesaplanmasında TS EN 12390-3'deki yöntemler göz önünde bulundurulmuştur. Numunelerin eğilme dayanımlarının hesaplanmasında TS 3285 Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini Deneyi (Orta Noktasından Yüklenmiş Basit Kiriş Metodu ile) yöntemler göz önünde bulundurulmuştur. Böylelikle farklı beton grupları için basınç ve eğilme dayanımına mineral katkıların etkileri ve betonların sülfat direnci incelenmiştir.

3.3.8. Puzolanik aktivite deneyi

Puzolanik minerallerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne kadar reaksiyona yapacağı ve ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği “puzolanik aktivite” olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis + alümin + demir oksit” içermesi gerekmektedir. Puzolanik aktivite “dayanım aktivite indeksi” olarak adlandırılan bir değer hesaplanmasıyla ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Erdoğan 2003)

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = (A/B) \times 100$$

A= Puzolanlı harç numunelerin ortalama basınç dayanımı, B= Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır. Puzolanlı harç numuneler ile kontrol harç numunelerini oluşturan malzemelerin miktarları ve deneylerin yapılma şekilleri ASTM C 311 (1994) ve TS EN 450-1 (2005) standartlarında belirtilmektedir. Dayanım aktivite indeksinin belirli bir değerden daha az olmaması gerekmektedir. ASTM C 618 (1994)'e göre bu değer en az 75 olmalıdır. TS 25 (1975)'te bu değer en az 70 olması gerektiği belirtilmektedir.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, çalışmada kullanılan agregaya üzerinde yapılan yeterlilik deneylerinin sonuçları ile üretilen beton numunelerine ait taze ve sertleşmiş beton deneylerinin sonuçları sunulmuş ve elde edilen sonuçlar grafikler ve literatür bilgileri yardımıyla yorumlanmıştır.

Agrega deneyleri Yöntem Bölümü'nde anlatıldığı şekilde Türk Standartları'na uygun olarak yapılmıştır. 3 farklı grubun elek analizi, agregaya üzerinde özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılarak sonuçlar Çizelge 4.1 ve 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Agregaların granülometrisi

Elek no	Elekten geçen malzeme (%)		
	Kum	1 nolu Kırma taş	2 nolu kırma taş
3"	100	100	100
2 1/2"	100	100	100
2"	100	100	100
1 1/2"	100	100	100
1"	100	99,50	100
3/4"	100	96,24	100
1/2"	100	59,19	100
3/8"	100	21,85	90,77
No. 4	96,90	1,00	1,09
No. 10	58,07	0,21	0,92
No. 30	21,60	0,21	0,89
No. 40	21,60	0,21	0,89
No. 50	19,58	0,21	0,89
No. 100	9,93	0,21	0,89
No. 200	5,46	0,21	0,89

Çizelge 4.2. Agregaların fiziksel özellikleri

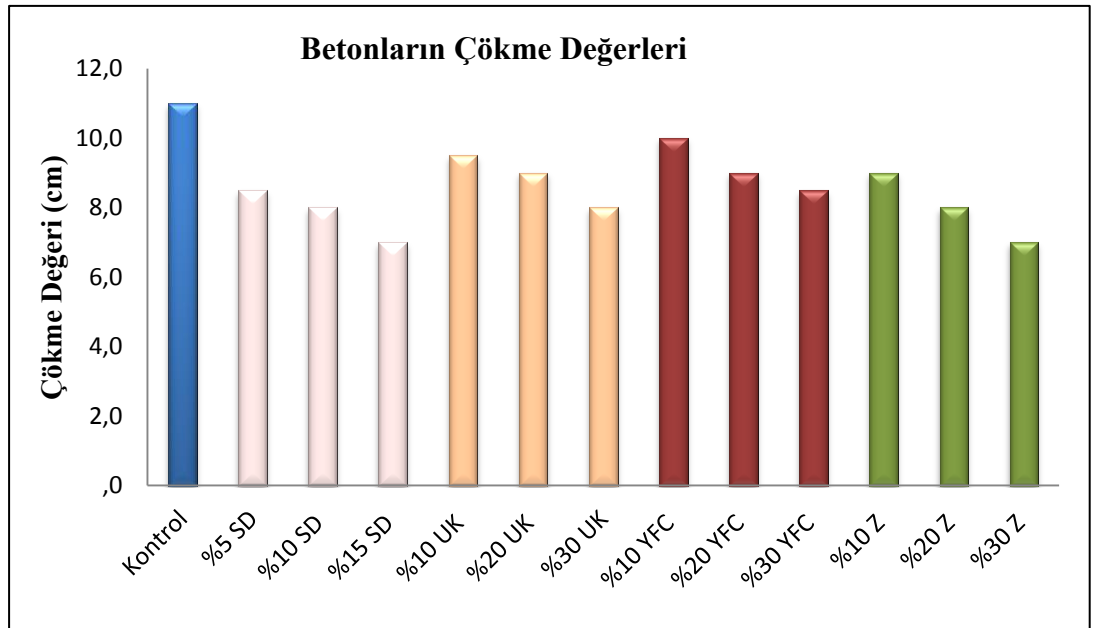
Özellik	Kum	1 nolu kırma taş	2 nolu kırma taş
Özgül Ağırlık (kuru)	2,57	2,73	2,71
Su emme (%)	1,13	0,73	0,78
Agrega en büyük tane çapı 25 mm'dir			

4.1. Taze Betonda Deney Sonucu

Taze betonların çökme değerleri Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Betonların çökme değerleri

Grup	Çökme Değeri (cm)
Kontrol	11,00
%5 SD	8,50
%10 SD	8,00
%15 SD	7,00
%10 UK	9,50
%20 UK	9,00
%30 UK	8,00
%10 YFC	10,00
%20 YFC	9,00
%30 YFC	8,50
%10 Z	9,00
%20 Z	8,00
%30 Z	7,00



Şekil 4.1. Taze betonların çökme değerleri

Çökme deneyi sonuçları incelendiğinde; en yüksek çökme değerleri kontrol numunelerinde görülmüştür. Mineral katkıların çok ince taneli olmalarından dolayı betonda su ihtiyacını artırdıkları ve aynı su/çimento oranı değerlerinde işlenebilirliklerin azaldığı düşünüldüğünde, katkı miktarının artmasıyla çökme değerlerindeki azalma normal bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Mineraller içinde en yüksek çökme değerlerini %10 YFC 10 cm ile göstermiştir. Yüksek fırın cürufu yüksek miktarında kalsiyum oksit içerir ve bu sebeple, öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kendiliğinde de bir miktar bağlayıcı özelliği vardır ve hidrasyon olayında daha az suya ihtiyaç duyar. Öğütülmüş cürufu taze betonun işlenebilirliğini artırırken terlemeyi azaltmaktadır (Uysal 2010). %10 UK'de çökme değeri 9,5 cm bulunmuştur. Uçucu kül taneleri genellikle küresel yapısı nedeni ile betonun işlenebilirlik özelliğini iyileştirir. %15 SD ve %30 zeolit en az çökme değerlerini (7 cm) göstermişlerdir. SD'nı ve zeolit diğer puzolanlar gibi ilave C-S-H jelleri oluşmasını sağlar ve betonda işlenebilirliği azaltır, bu nedenle su/bağlayıcı miktarına dikkat etmek ve kullanım oranını uygun değer miktarda tutmak gerekmektedir. Mineral katkılı tüm gruplarda işlenebilirlikler azaltmaktadır. Bununla birlikte üretilen tüm grupların yeterli işlenebilirliği sağladığı görülmüştür.

4.2. Sertleşmiş Betonun Deney Sonuçları

4.2.1. Puzolanik aktivite deneyi

Bu çalışmada kullanılan mineraller üzerinde puzolanik aktivite deneyi yapılmıştır ve sonuçlar Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.2'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Puzolanik Aktivite Deneyi

Beton Numunesi	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Puzolanik Aktivite (%)
Kontrol	4,54	41,23	100,00
SD Katkılı	5,47	36,48	88,47
UK Katkılı	4,35	31,11	75,45
YFC Katkılı	3,88	32,36	78,48
Zeolit Katkılı	3,57	34,03	82,54



Şekil 4.2. Pozolanik aktivite deney numuneleri

- En yüksek pozolanik aktiviteye sahip olan mineral; %88,47 pozolanik aktivite indeksi değeri ile silis dumanı olarak belirlenmiştir.
- En düşük pozolanik aktiviteye sahip olan mineral uçucu kül olup, pozolanik aktivite indeksi değeri %75,45 olarak hesaplanmıştır.
- Kullanılan katkıların pozolanik aktiviteleri SD>zeolit>YFC>UK olacak şekilde belirlenmiştir.
- Eğilme dayanımlarında en yüksek dayanım SD'lı numunelere aittir.

4.2.2. Sertleşmiş beton birim ağırlıkları

TS EN 12390-7'ye uygun olarak belirlenen sertleşmiş betonun birim ağırlığı, numunenin durumuna göre hesaplanır. Eğer numune doğal durumda ise bu hali ile tartılır. Numunenin hacmi boyutları ölçülerek belirlenir. Numune ağırlığı hacme bölünerek birim ağırlık tespit edilir. Eğer numune doygun durumda ise birim ağırlık için numune öncelikle $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki su içerisinde, 24 saat aralıkla yapılan tartımda kütle değişimi %0,2'den daha az hale gelinceye kadar batırılır. Numune yüzeyindeki serbest su silinerek suya doygun numunenin kütlesi kaydedilir. Numunenin hacmi

boyutları ölçülerek belirlenir. Numune ağırlığı hacme bölünerek birim ağırlık tespit edilir. Etüv kurusu durumdaki numunenin birim ağırlığı hesaplanacak ise numune $105\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 24 saat aralıkla yapılan tartımda kütle değişimi %0,2'den daha az hale gelinceye kadar tutulur, soğutulduktan sonra tartılır. Etüv kurusu numunenin okunan kütlesi kilogram olarak kaydedilir. Numunenin hacmi boyutları ölçülerek belirlenir. Numune ağırlığı hacme bölünerek birim ağırlık tespit edilir (De Belie *et al.* 1997).

Bu çalışmada her beton sınıfı için sertleşmiş birim ağırlıklar ilgili standartlara uygun olarak ölçülmüştür. Sertleşmiş beton birim ağırlıkları için hem suda kür edilmiş hem de sülfat etkisine maruz bırakılmış numunelerde ölçüm yapılmıştır. Betonların 180 günlük birim ağırlık değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. 180 Günlük numunelerin birim ağırlıkları

Beton Kodu	Birim Ağırlıkları (g/cm ³)	Beton Kodu	Birim Ağırlıkları (g/cm ³)
Kontrol	2,320	%10 YFC	2,274
SK	2,310	S %10 YFC	2,261
%5 SD	2,283	%20 YFC	2,223
S %5 SD	2,271	S %20 YFC	2,210
%10 SD	2,251	%30 YFC	2,175
S %10 SD	2,240	S %30 YFC	2,160
%15 SD	2,217	%10 Z	2,229
S %15 SD	2,210	S %10 Z	2,211
%10 UK	2,232	%20 Z	2,137
S %10 Uk	2,220	S %20 Z	2,121
%20 UK	2,143	%30 Z	2,045
S %20 UK	2,131	S %30 Z	2,030
%30 UK	2,062		
S %30 UK	2,050		

- Tüm grupların normal ağırlıklı beton sınıfında oldukları görülmektedir.
- En yüksek birim ağırlık $2,320 \text{ g/cm}^3$ değeri ile kontrol numunesinde (mineral katkısız betonda) ölçülmüştür.

- En düşük birim ağırlık $2,030 \text{ g/cm}^3$ (kontrol grubuna göre %12,50 azalma) değeri ile sülfata maruz bırakılan %30 zeolit içeren betonlardan elde edilmiştir.
- Birim ağırlıktaki azalma sülfata maruz bırakılan kontrol grubunda %0,43 olarak hesaplanmıştır.
- Birim ağırlıktaki azalma sülfata maruz bırakılan %5 SD grubunda %0,53, %10 SD grubunda %0,49 ve %15 SD grubunda %0,32 olarak hesaplanmıştır.
- Birim ağırlıktaki azalma sülfata maruz bırakılan %10 UK grubunda %0,54, %20 UK grubunda %0,56 ve %30 UK grubunda %0,58 olarak hesaplanmıştır.
- Birim ağırlıktaki azalma sülfata maruz bırakılan %10 YFC grubunda %0,57, %20 YFC grubunda %0,59 ve %30 YFC grubunda %0,69 olarak hesaplanmıştır.
- Birim ağırlıktaki azalma sülfata maruz bırakılan %10 zeolit grubunda %0,81, %20 zeolit grubunda %0,75 ve %30 zeolit grubunda %0,73 olarak hesaplanmıştır.
- Sülfat etkisinde en fazla birim ağırlık kaybı zeolit grubunda tespit edilirken, en az birim ağırlık kaybı %15 SD grubunda belirlenmiştir.

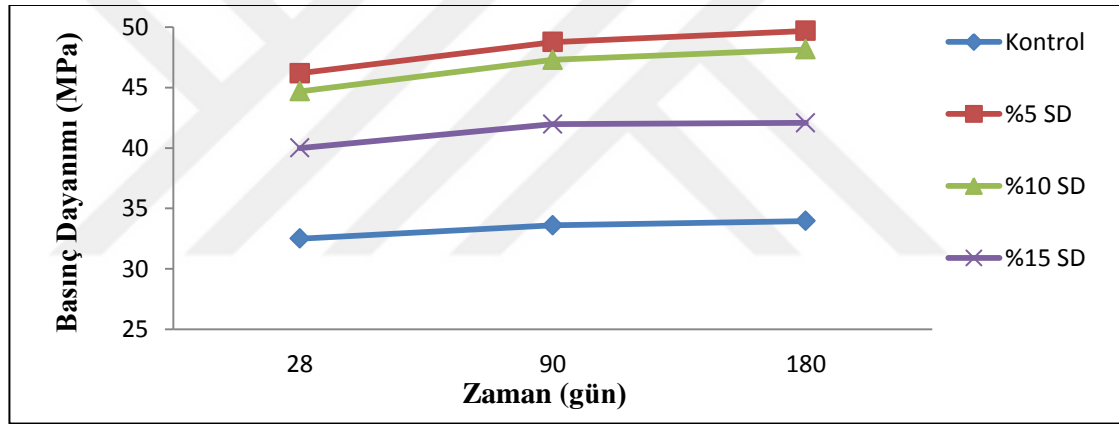
4.2.3. Basınç dayanımı

4.2.3.a. Silis dumanı kullanımının etkisi

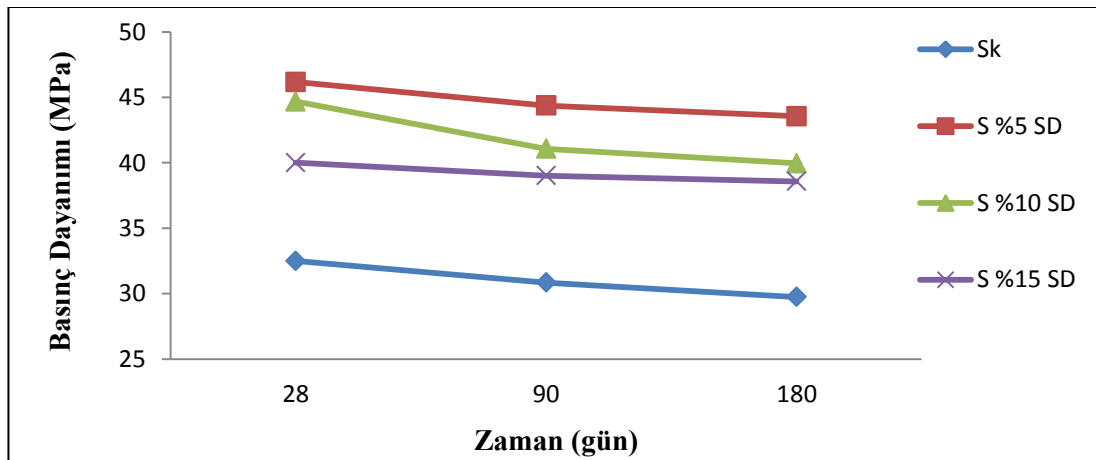
Silis dumanı kullanılan betonların suda ve sülfatlı ortamda kür edildikten sonra basınç dayanım sonuçları ve kontrol gruplarına göre değişimler Çizelge 4.6'da verilerek Şekil 4.3-4.5'de grafik üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış SD katkıli betonların basınç dayanımları

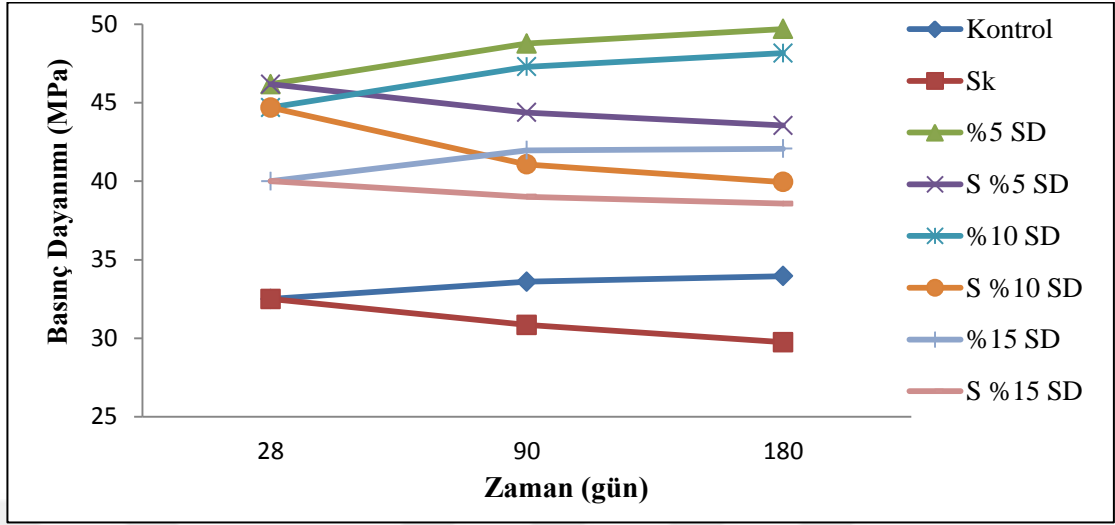
Beton Kodu	Basınç Dayanımları 28 Gün (MPa)	Basınç Dayanımları 90 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)	Basınç Dayanımları 180 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)
Kontrol	32,50	33,60	3,38	33,96	4,49
Sk		30,85	-5,08	29,75	-8,46
%5SD	46,17	48,76	5,61	49,69	7,62
S%5SD		44,37	-3,91	43,55	-5,68
%10SD	44,68	47,29	5,83	48,15	7,77
S%10SD		41,07	-8,08	39,95	-10,59
%15SD	40,00	41,97	4,93	42,07	5,18
S%15SD		39,01	-2,48	38,57	-3,57



Şekil 4.3. SD katkıli numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4.4. Sülfatlı ortamda SD katkıli numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4.5. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda SD katkılı numunelerin basınç dayanımları

Numunelerin basınç dayanım değerleri 28 günlük dayanımlarla kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Sülfat etkisine maruz bırakılmayan kontrol numunesinde dayanım artışı oranı 90 günde %3,38 ve 180 günde %4,49 olarak belirlenmiştir.
- Mineral katkı içermeyen kontrol numunelerinde, sülfat etkisinde 90 günlük yaşta %5,08 ve 180 günlük yaşta %8,46 oranında dayanım düşüşleri hesaplanmıştır.
- SD katkılı grupların her yaşta kontrol grubuna göre daha yüksek dayanım gösterdiği belirlenmiştir.
- SD katkılı gruplarda en yüksek sonucunun %5 SD içeren gruptan elde edildiği görülmektedir. Bu grupta 90 günde kontrol grubuna göre %5,61 ve 180 günde %7,62 oranlarında daha yüksek değerler elde etmiştir.
- SD katkılı gruplarda en az miktardaki artış %15 SD içeren gruptan elde edilmiştir. Bu grupta artış miktarları 90 gün için %4,93 ve 180 gün için %5,18 olarak belirlenmiştir.
- Sülfat etkisi %5 SD katkılı grupta 90 günlük numunelerde %3,91 ve 180 günlük numunelerde %5,68 oranlarında dayanım azalmasına yol açmıştır.
- Sülfat etkisi %15 SD katkılı grupta 90 günlük numunelerde %2,48 ve 180 günlük numunelerde %3,57 oranlarında dayanım azalmasına yol açmıştır.

- Puzolan katkılı betonlarda dayanım artışı ilerleyen yaşlarda daha belirgin olmaktadır. Bununla beraber ilerleyen yaşlarda en yüksek dayanım artışı %7,77 değeri ile %10 SD içeren grupta 180 günde belirlenmiştir.

SD katkılı beton numunelerinin basınç dayanımlarını kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- %5 SD katkılı beton numuneleri 28 günde %42,06, 90 günde %42,12 ve 180 günde %46,32 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- %10 SD katkılı beton numuneleri 28 günde %37,49, 90 günde %40,74 ve 180 günde %41,80 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- %15 SD katkılı beton numuneleri 28 günde %23,08, 90 günde %24,91 ve 180 günde %23,88 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.
- %15'e kadar SD katkının kullanımı basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

SD katkılı beton numunelerinin sülfatlı ortamda basınç dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- S %5 SD katkılı beton numuneleri 90 günde %43,81 ve 180 günde %46,39 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- S %10 SD katkılı beton numuneleri 90 günde %33,14 ve 180 günde %34,30 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- S %15 SD katkılı beton numuneleri 90 günde %26,45 ve 180 günde %29,65 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.
- %15'e kadar SD katkının kullanımı sülfatlı ortamda basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

Sülfat etkisine maruz bırakılmış SD katkılı beton numuneleri aynı yaşta sülfat etkisine maruz bırakılmamış SD katkılı numunelere göre basınç dayanımları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

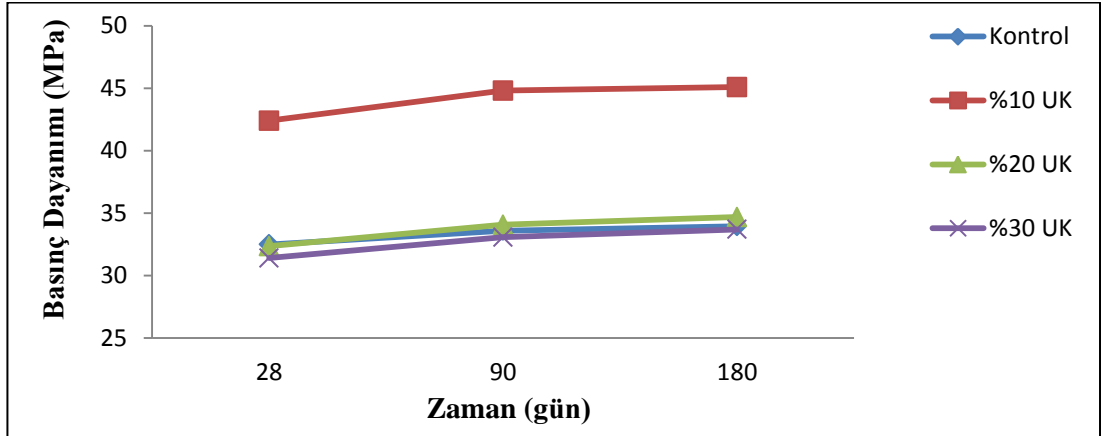
- Sülfat etkisine maruz bırakılmış kontrol numunelerinde, 90 günde %8,18 ve 180 günde %12,40 oranlarında dayanım kayıpları belirlenmiştir.
- %5 SD katkılı numuneler, 90 günde %9,01 ve 180 günde %12,36 oranlarında dayanım kaybı göstermişler.
- %10 SD katkılı numunelerde, 90 günde %13,15 ve 180 günde %17,03 oranlarında dayanım kaybı hesaplanmıştır. Bu grup aynı yaşta en yüksek dayanım kaybı göstermiştir.
- %15 SD katkılı numunelerde, 90 günde %7,05 ve 180 günde %8,32 oranlarında dayanım kaybı belirlenmiştir.

4.2.3.b. Uçucu kül kullanımının etkisi

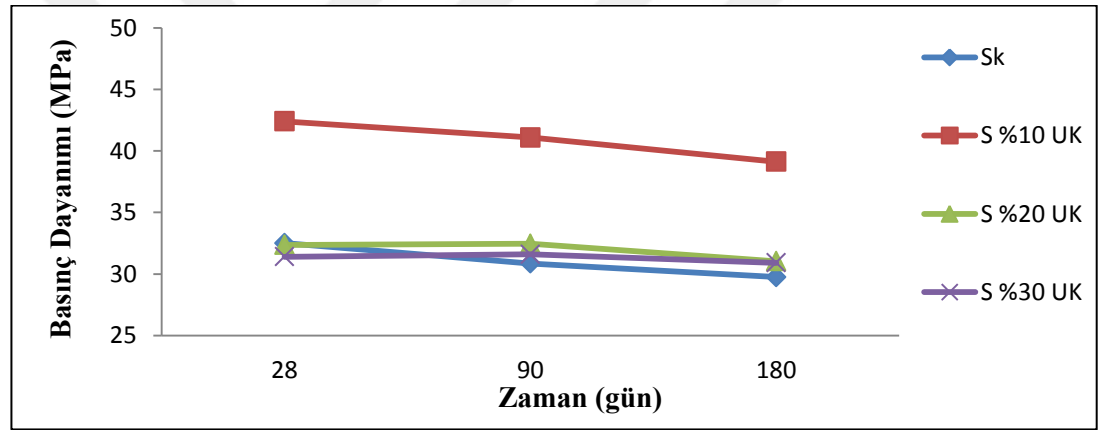
Uçucu kül kullanılan betonların suda ve sülfatlı ortamda kür edildikten sonra basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.7’de verilerek Şekil 4.6-4.8’de grafik olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış UK katkılı betonların basınç dayanımları

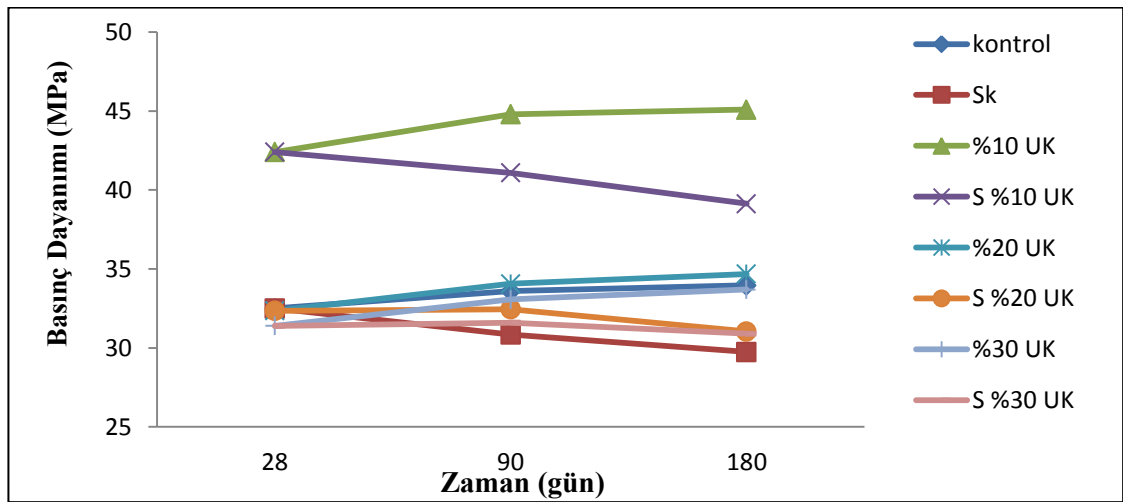
Beton Kodu	Basınç Dayanımları 28 Gün (MPa)	Basınç Dayanımları 90 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)	Basınç Dayanımları 180 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)
Kontrol	32,50	33,60	3,38	33,96	4,49
SK		30,85	-5,08	29,75	-8,46
%10 UK	42,40	44,80	5,66	45,09	6,34
S %10 UK		41,09	-3,09	39,13	-7,71
%20 UK	32,36	34,07	5,30	34,68	7,18
S %20 UK		32,45	0,29	31,04	-4,07
%30 UK	31,40	33,07	5,32	33,70	7,33
S %30 UK		31,60	0,64	30,90	-1,59



Şekil 4.6. UK katkılı numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4.7. Sülfatlı ortamda UK katkılı numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4.8. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda UK katkılı numunelerin basınç dayanımları

Numunelerin basınç dayanım değerleri 28 günlük dayanımlara göre kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- %10 UK katkılı numunelerde, artış miktarları 90 gün için %5,66 ve 180 gün için %6,34 olarak belirlenmiştir ve en yüksek dayanım artışına bu grupta ulaşılmıştır.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %10 UK katkılı numunelerde, 90 günde %3,09 ve 180 günde %7,71 oranlarında dayanım kayıpları belirlenmiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan 180 günlük numunelerde en az dayanım kaybını %30 UK katkılı grubu (%1,59 oranında) göstermiştir.
- %20 UK katkılı numunelerde, 90 günde %5,30 ve 180 günde %7,18 dayanım artışına ulaşılmıştır.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %20 UK katkılı numunelerde, 90 günde %0,29 oranında dayanım artışı ve 180 günde %4,07 oranında dayanım kaybı görülmüştür.
- %30 UK katkılı numunelerde, 90 günde %5,32 ve 180 günde %7,33 dayanım artışı belirlenmiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %30 UK katkılı numunelerde, 90 günde %0,64 oranında dayanım artışı ve 180 günde %1,59 dayanım kaybı belirlenmiştir.
- Bu veriler, uçucu külün hem sülfat direnci için hem de ekonomik ve çevresel gerekçelerle betonda kullanılabilceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

UK katkılı beton numunelerinin basınç dayanımlarını kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- %10 UK katkılı beton numuneleri 28 günde %30,47, 90 günde %33,33 ve 180 günde %32,77 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- %20 UK katkılı beton numuneleri 28 günde %0,44 oranında düşüş, 90 günde %1,40 ve 180 günde %2,12 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- %30 UK katkılı beton numuneleri 28 günde %3,39, 90 günde %1,58 ve 180 günde %2,12 oranında dayanımda düşüş belirlenmiştir.
- %20'ye kadar UK katkının kullanımı basınç dayanımında artış görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

UK katkılı beton numunelerinin sülfatlı ortamda basınç dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- S %10 UK katkılı beton numuneleri 90 günde %33,19 ve 180 günde %31,53 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- S %20 UK katkılı beton numuneleri 90 günde %5,19 ve 180 günde %4,34 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- S %30 UK katkılı beton numuneleri 90 günde %2,43 ve 180 günde %3,87 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.
- %30'a kadar UK katkının kullanımı sülfatlı ortamda basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

Sülfat etkisine maruz bırakılmış UK katkılı beton numunelerinin aynı yaşta sülfat etkisine maruz bırakılmamış UK katkılı numunelere göre basınç dayanımları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

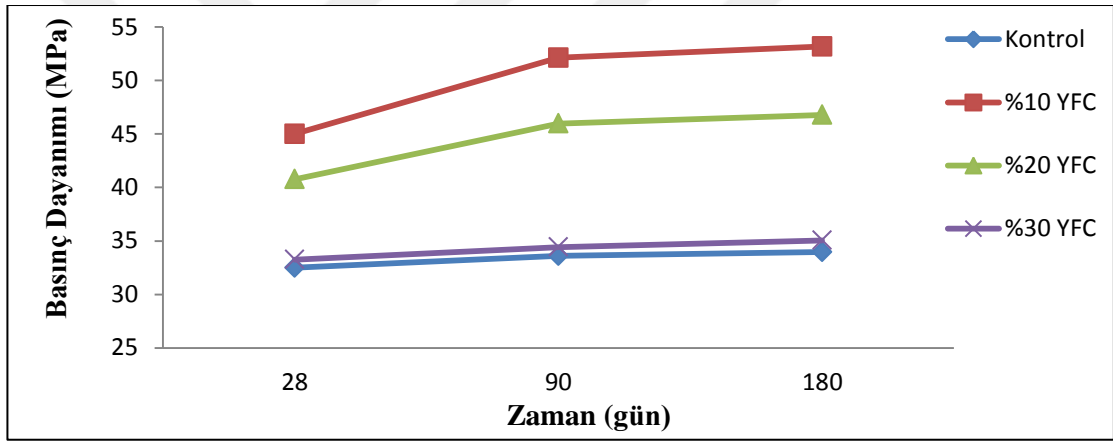
- %10 UK katkılı numuneler, 90 günde %8,28 ve 180 günde %13,22 oranlarında dayanım kaybı göstermiştir. Aynı yaşta en fazla miktarda dayanım kaybı bu grupta belirlenmiştir.
- %20 UK katkılı numunelerde, 90 günde %4,75 ve 180 günde %10,50 oranlarında dayanım kaybı hesaplanmıştır.
- %30 UK katkılı numunelerde, 90 günde %4,45 ve 180 günde %8,30 oranlarında dayanım kaybı belirlenmiştir.

4.2.3.c. Yüksek fırın cürufu kullanımının etkisi

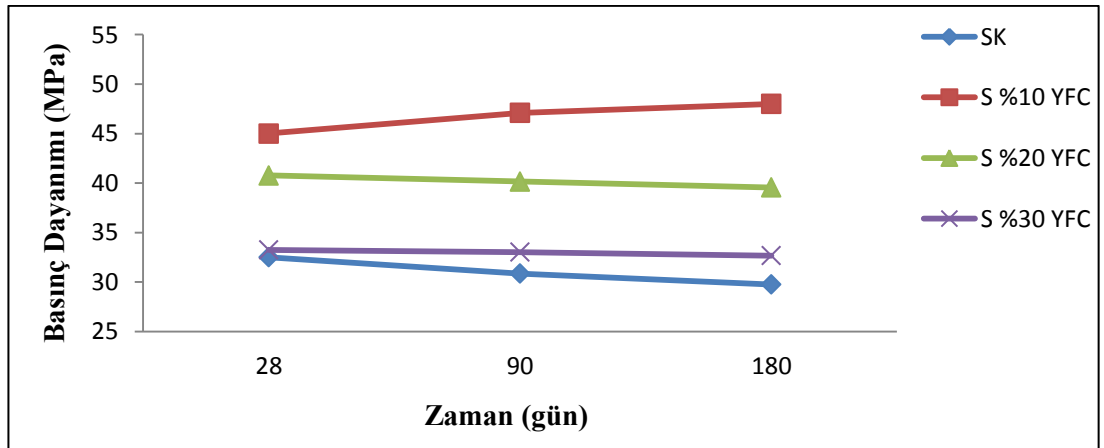
Yüksek Fırın Cürufu kullanılan betonlarda basınç dayanımı sonuçları ve bu sonuçlardan elde edilen grafikler sırasıyla Çizelge 4.8'de ve Şekil 4.9-4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış YFC katkıli betonların basınç dayanımları

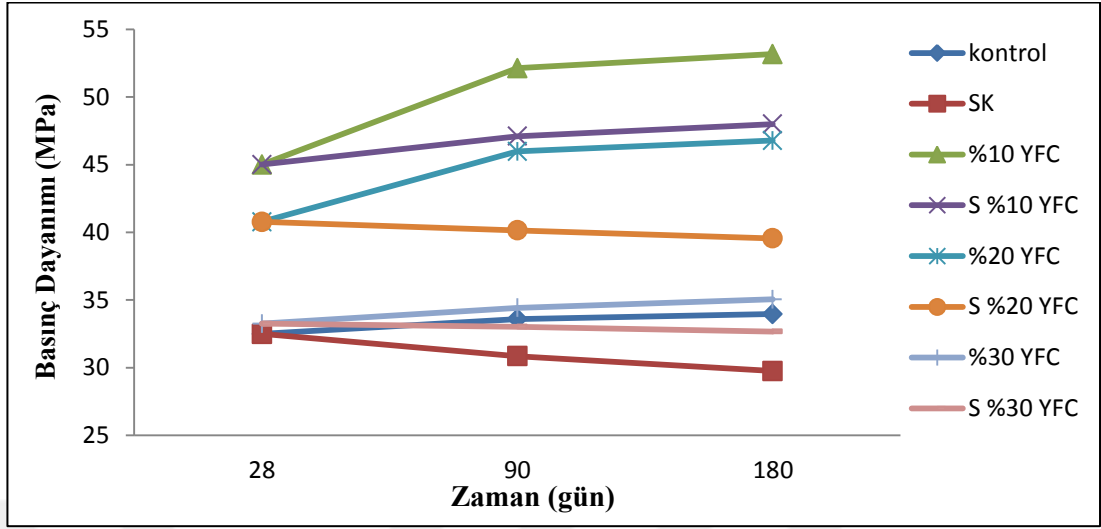
Beton Kodu	Basınç Dayanımları 28 Gün (MPa)	Basınç Dayanımları 90 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)	Basınç Dayanımları 180 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)
Kontrol	32,50	33,60	3,38	33,96	4,49
SK		30,85	-5,08	29,75	-8,46
%10 YFC	45,01	52,13	15,82	53,17	18,13
S %10 YFC		47,10	4,64	48,00	6,64
%20 YFC	40,77	45,98	12,78	46,78	14,74
S %20 YFC		40,15	-1,52	39,56	-2,97
%30 YFC	33,26	34,42	3,50	35,05	5,39
S %30 YFC		33,03	-0,68	32,67	-1,76



Şekil 4.9. YFC katkıli numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4.10. Sülfatlı ortamda YFC katkıli numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4.11. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda YFC katkıli numunelerin basınç dayanımları

Numunelerin basınç dayanım değerleri 28 günlük dayanımlarla karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- %10 YFC katkıli numuneler, 90 günde %15,82 ve 180 günde %18,13 dayanım artışı göstererek en fazla dayanım artışına ulaşmıştır.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %10 YFC katkıli 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 katkıli grup %1,76 oranında göstermiştir.
- %20 YFC katkıli numuneler, 90 günde %12,78 ve 180 günde %14,74 dayanım artışı göstermiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %20 YFC katkıli numunelerde, 90 günde %7,45 ve 180 günde %10,79 dayanım kaybı hesaplanmıştır.
- %30 YFC katkıli numunelerde, 90 günde %3,5 ve 180 günde %5,39 dayanım artışı belirlenmiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %30 YFC katkıli numunelerin dayanımlarında, 90 günde %0,68 ve 180 günde %1,76 oranında düşüş belirlenmiştir.
- Numunelerin basınç dayanım sonuçlarına göre en yüksek basınç dayanımının sırasıyla %10 YFC ve %20 YFC katkıli numunelerde tespit edildiği görülmektedir.

- %30 YFC katkılı numune kontrol numunesiyle yaklaşık aynı dayanımı vermiştir.
- Bu çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu çelikhane cürufudur ve beton sektöründe kullanılması ekonomik açıdan ve çevrenin korunması bakımından da önemlidir.
- Çelikhane cüruflarının kimyasal bileşiminde başlıca CaO, MgO, SiO₂ ve Fe₂O₃ bulunmaktadır. SiO₂ miktarı %34-40'dır. Cüruf içerisindeki silisyum miktarının artışı yanmış kireç kullanımını da artırır. Sönmüş kireç, akışkandır ve betonda işlenebilmeği sağlar, MnO miktarının artışında cürufun akışkanlığını ve cüruf hacmini artırır ve boşlukları kapatır.
- Öğütülmüş yüksek fırın cürufu betonda kullanıldığında, çimento tanelerinden daha ince boyutta olması sebebiyle agrega-çimento arayüzündeki boşlukların azaldığı, betonun kalıcılığının ve dayanımının arttığı tespit edilmiştir.
- YFC, sertleşmiş betonda geçirimsizlik ve su emme özelliğini azaltır. Geçirimsizlik azaldığı zaman, betona su girişi, suyun çözülebilen zararlı iyonları beton içerisine taşıması ve kimyasal tepkimelerde suyun yer alması engellenir.

YFC katkılı beton numunelerinin basınç dayanımlarını kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- %10 YFC katkılı beton numuneleri 28 günde %38,49, 90 günde %55,15 ve 180 günde %56,57 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- %20 YFC katkılı beton numuneleri 28 günde %25,45 oranında, 90 günde %36,85 ve 180 günde %37,75 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- %30 YFC katkılı beton numuneleri 28 günde %2,33, 90 günde %2,44 ve 180 günde %3,21 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.
- %30'a kadar YFC katkının kullanımı basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

YFC katkılı beton numunelerinin sülfatlı ortamda basınç dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- S %10 YFC katkılı beton numuneleri 90 günde %52,67 ve 180 günde %61,34 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- S %20 YFC katkılı beton numuneleri 90 günde %30,15 ve 180 günde %32,97 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- S %30 YFC katkılı beton numuneleri 90 günde %7,07 ve 180 günde %9,82 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.
- %30'a kadar YFC katkının kullanımı sülfatlı ortamda basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

Sülfat etkisine maruz bırakılmış YFC katkılı beton numunelerin aynı yaşta Sülfat etkisine maruz bırakılmamış YFC katkılı numunelere göre basınç dayanımları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

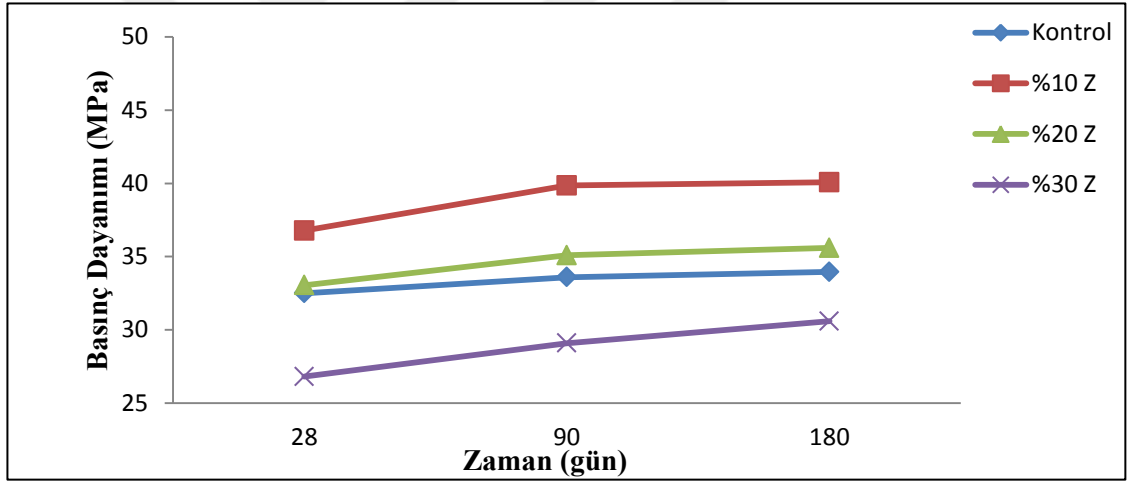
- %10 YFC katkılı numuneler, 90 günde %9,65 ve 180 günde %9,72 oranlarında dayanım kaybı göstermişler.
- %20 YFC katkılı numunelerde, 90 günde %12,68 ve 180 günde %15,43 oranlarında dayanım kaybı hesaplanmıştır. Bu grup aynı yaşta en yüksek dayanım kaybı göstermiştir.
- %30 YFC katkılı numunelerde, 90 günde %4,04 ve 180 günde %6,79 oranlarında dayanım kaybı belirlenmiştir.

4.2.3.d. Zeolit Kullanımının Etkisi

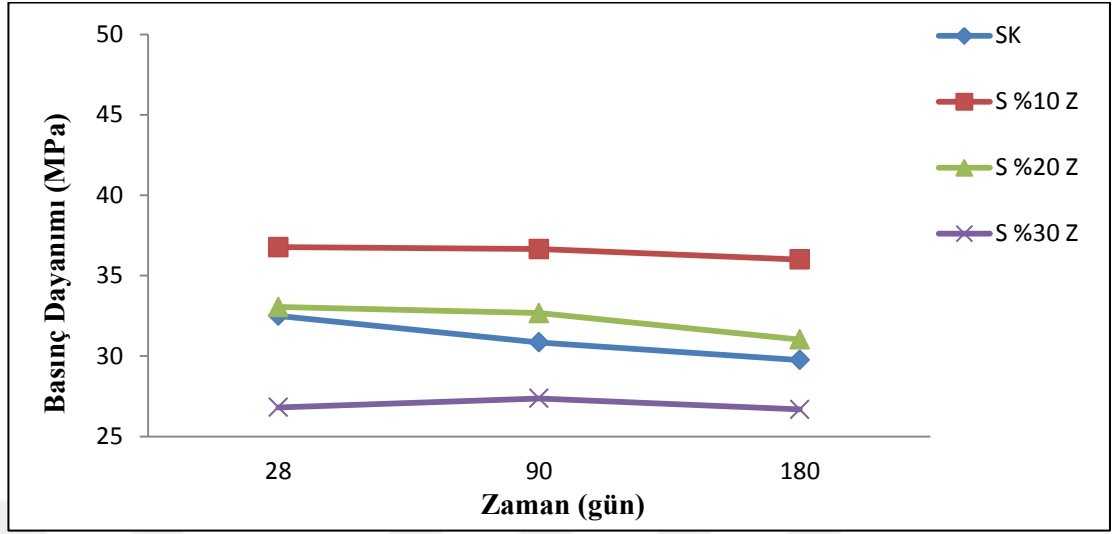
Zeolit katkılı betonlarda basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.9'da sunulmuş ve sonuçlar grafik olarak Şekil 4.12-4.14'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış zeolit katkıli betonların basınç dayanımları

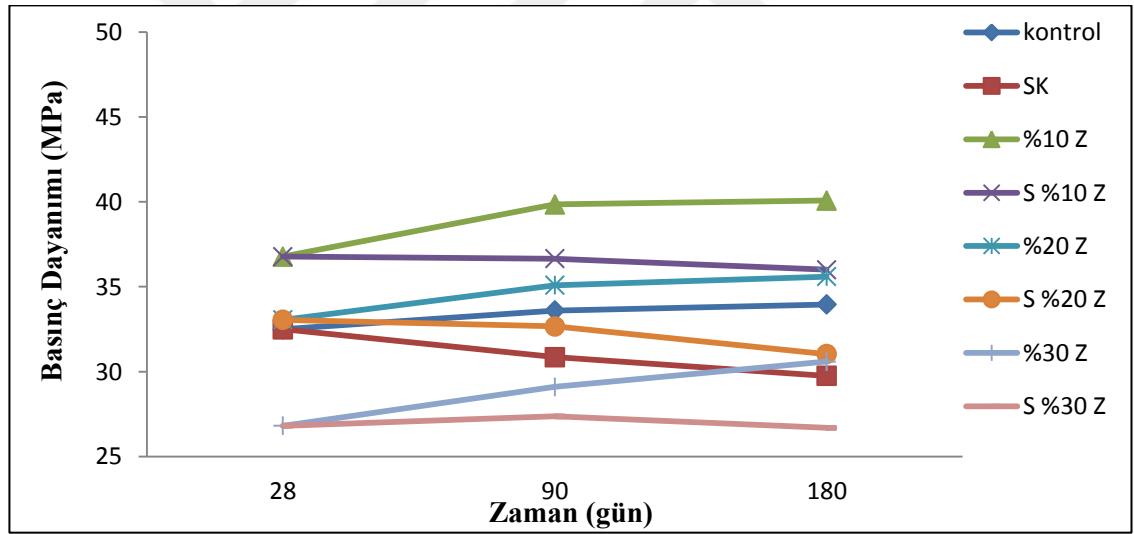
Beton Kodu	Basınç Dayanımları 28 Gün (MPa)	Basınç Dayanımları 90 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)	Basınç Dayanımları 180 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)
Kontrol	32,50	33,60	3,38	33,96	4,49
SK		30,85	-5,08	29,75	-8,46
%10 Z	36,77	39,85	8,37	40,08	8,99
S %10 Z		36,65	-0,34	36,00	-2,11
%20 Z	33,05	35,09	6,17	35,60	7,72
S %20 Z		32,67	-1,15	31,03	-6,11
%30 Z	26,81	29,10	8,55	30,59	14,13
S %30 Z		27,37	2,10	26,68	-0,46



Şekil 4.12. Zeolit katkıli numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4.13. Sülfatlı ortamda zeolit katkıli numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4.14. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda zeolit katkıli numunelerin basınç dayanımları

Numunelerin basınç dayanım değerleri 28 günlük dayanımlarla kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- %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 katkılı numuneler (%1,06 artış) göstermiştir.
- %20 zeolit katkılı numunelerde, 90 günde %6,17 ve 180 günde %7,72 dayanım artışı belirlenmiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %20 zeolit katkılı numuneler, 90 günde %1,15 ve 180 günde %6,11 oranında dayanım kaybı göstermiştir.
- %30 zeolit katkılı numunelerde, 90 günde %8,55 ve 180 günde %14,13 oranında dayanım artışı hesaplanmıştır.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %30 zeolit katkılı numuneler için, 90 günde %2,10 dayanım artışı ve 180 günde %0,46 oranında dayanım kaybı söz konusudur.
- Numunelerin basınç dayanım sonuçlarına göre sadece %10 oranında zeolit kullanılması durumunda kontrol numunesine göre 28 günlük basınç dayanımında artış görülmüştür.
- 28 günlük numunelerde %20 Zeolit katkılı betonlar kontrol numunesi ile yaklaşık aynı değere sahipken, zeolit oranının %30'a çıkması durumunda basınç dayanımı azalmıştır.
- İlerleyen yaşlarda ise %10 ve %20 zeolit katkılı numuneler kontrol grubuna göre daha olumlu sonuçlar gösterirken %30 zeolit katkılı numunelerin dayanımları düşmüştür.
- Basınç ve eğilme dayanımında en önemli etken agrega-çimento arayüzeyi olduğu bilinmektedir.
- %10 zeolit katkılı betonda agrega-çimento arayüzündeki boşlukların azaldığı, betonun basınç ve eğilme dayanımının arttığı belirlenmiştir.
- Bu çalışmada kullanılan zeoliti yüksek miktarda reaktif SiO₂ (%70,5) içermektedir. Bu nedenle betonun ilk yaşlardaki ve sonraki dayanımı artar, ancak %10'dan fazla zeolit kullanıldığında olumsuz etki yaparak, rötreye sebep olur ve çatlaklar meydana gelir.

Zeolit katkılı beton numunelerinin basınç dayanımlarını kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- %10 zeolit katkılı beton numuneleri 28 günde %13,15, 90 günde %18,61 ve 180 günde %18,02 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- %20 zeolit katkılı beton numuneleri 28 günde %1,69, 90 günde %4,43 ve 180 günde %4,83 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- %30 zeolit katkılı beton numuneleri 28 günde %17,52, 90 günde %13,40 ve 180 günde %9,91 oranında dayanımda düşüş belirlenmiştir.
- %20'ye kadar zeolit katkının kullanımı basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

Zeolit katkılı beton numunelerinin sülfatlı ortamda basınç dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde:

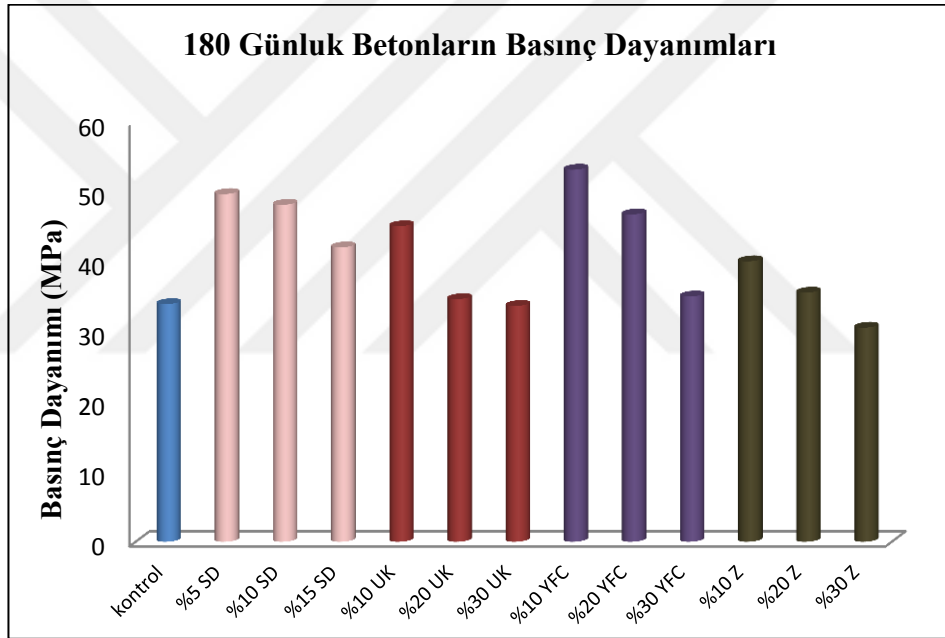
- S %10 zeolit katkılı beton numuneleri 90 günde %18,80 ve 180 günde %21,01 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- S %20 zeolit katkılı beton numuneleri 90 günde %5,90 ve 180 günde %4,30 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- S %30 YFC katkılı beton numuneleri 90 günde %11,29 ve 180 günde %10,31 oranında dayanımda düşüş belirlenmiştir.
- %20'ye kadar zeolit katkının kullanımı sülfatlı ortamda basınç dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

Sülfat etkisine maruz bırakılmış zeolit katkılı beton numunelerin aynı yaşta Sülfat etkisine maruz bırakılmamış zeolit katkılı numunelere göre basınç dayanımları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- %10 zeolit katkılı numuneler, 90 günde %8,04 ve 180 günde %10,18 oranlarında dayanım kaybı göstermişler.

- %20 zeolit katkıli numunelerde, 90 günde %6,90 ve 180 günde %12,84 oranlarında dayanım kaybı hesaplanmıştır. Bu grup aynı yaşta en yüksek dayanım kaybı göstermiştir.
- %30 zeolit katkıli numunelerde, 90 günde %5,94 ve 180 günde %12,78 oranlarında dayanım kaybı belirlenmiştir.

Sonuç olarak numunelerin hepsinin bir arada basınç dayanımlarının sülfatsız ve sülfatlı ortamda Şekil 4.15-4.16'da gösterilerek incelenmiştir:

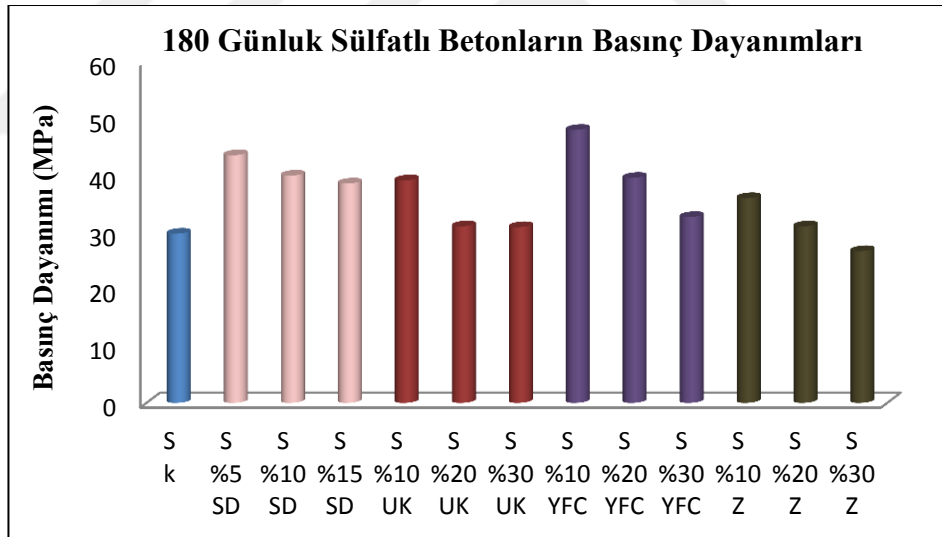


Şekil 4.15. Mineral katkıli betonların basınç dayanımları

Numunelerin basınç dayanım değerleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Numunelerin basınç dayanımları sonucuna göre, büyükten küçüğe doğru sırasıyla: %10 YFC > %5 SD > %10 UK > %10 Zeolit > Kontrol olacak şekilde belirlenmiştir
- SD katkıli gruplar incelendiğinde; 180 günde kontrol grubuna göre %5 SD için %46,32, %10 SD için %41,80 ve %15 SD için %23,88 oranlarında daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir.

- UK katkılı gruplar incelendiğinde; 180 günde kontrol grubuna göre %10 UK ve %20 UK için sırasıyla %32,77 ve %2,21 oranında daha yüksek değerler görülürken %30 UK grubunda kontrol grubundan %0,77 oranında daha düşük dayanım tespit edilmiştir.
- YFC katkılı gurupların hepsinde 180 günde kontrol grubuna göre daha yüksek dayanım değerleri belirlenmiştir. Dayanımdaki fazlalık oranları, %10 YFC, %20 YFC ve %30 YFC grupları için sırasıyla %56,57, %37,75 ve %3,21 olarak hesaplanmıştır.
- Zeolit katkılı guruplar değerlendirildiğinde, 180 günde kontrol grubuna göre %10 ve %20 zeolit katkılı guruplarda %18,02 ve %4,83 oranlarında daha yüksek dayanımlar olmasına karşın %30 zeolit katkılı gurupta %9,91 oranında daha düşük dayanım değeri belirlenmiştir.



Şekil 4.16. Sülfat etkisine maruz bırakılan mineral katkılı betonların basınç dayanımları

Numunelerin sülfatlı ortamda basınç dayanım değerleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin, basınç dayanımları sonucuna göre, dayanımlar büyükten küçüğe doğru %10 YFC > %5 SD > %10 UK > %10 Zeolit > Kontrol olacak şekilde sıralanmıştır.

- Sulfat etkisine maruz bırakılan numunelerde 180 günde SD katkıli betonlar kontrol grubuna göre daha iyi performans göstermiştir. %5 SD , %10 SD ve %15 SD katkıli numunelerin basınç dayanımları kontrol grubuna göre sırasıyla %46,37, %34,30 ve %29,65 oranında daha yüksek değerler göstermiştir.
- UK ilave edilmesi durumunda da benzer olarak her grupta kontrol numunelerine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. 180 günde %10 UK, %20 UK ve %30 UK katkıli betonlar kontrol grubuna kıyasla sulfat etkisinden sonra %31,53, %4,33 ve %3,87 oranlarında daha yüksek dayanım sonuçları vermiştir.
- YFC kullanılması da betonların sulfat direncini artırmıştır. Sulfat etkisine maruz bırakılan kontrol grubuna göre 180 günde %10 YFC, %20 YFC ve %30 YFC katkıli numunelerin dayanımları sırasıyla %61,34, %32,97 ve %9,82 oranlarında daha yüksek tespit edilmiştir.
- Zeolit katkıli guruplar incelendiğinde; 180 günde sulfat etkisine maruz bırakılan kontrol grubuna göre %10 ve %20 zeolit katkıli betonlar için %21,01 ve %4,30 oranlarında daha yüksek dayanımlar elde edilmesine karşın %30 zeolit ilavesi durumunda kontrol numunelerine göre %10,31 oranında daha düşük dayanım değeri görülmüştür.

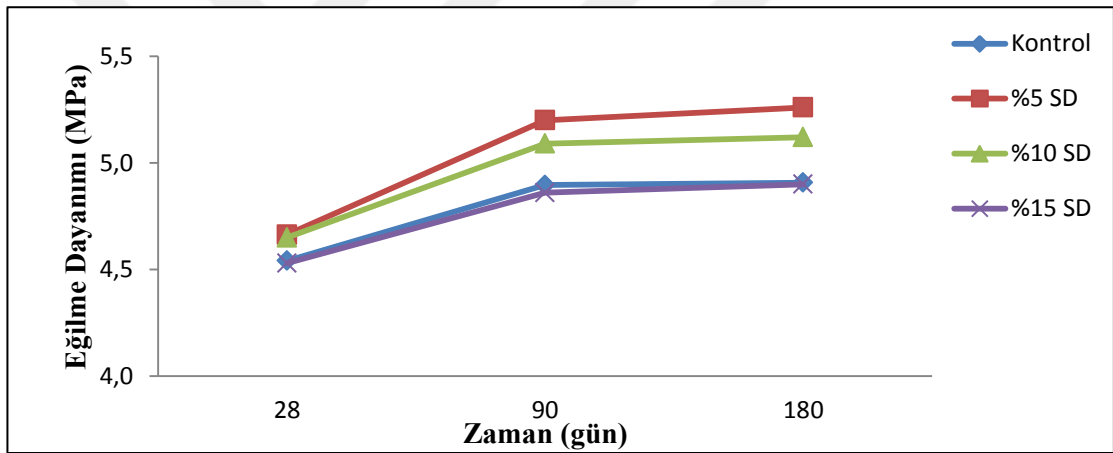
4.2.4. Eğilme dayanımı

4.2.4.a. Silis dumanı kullanımının etkisi

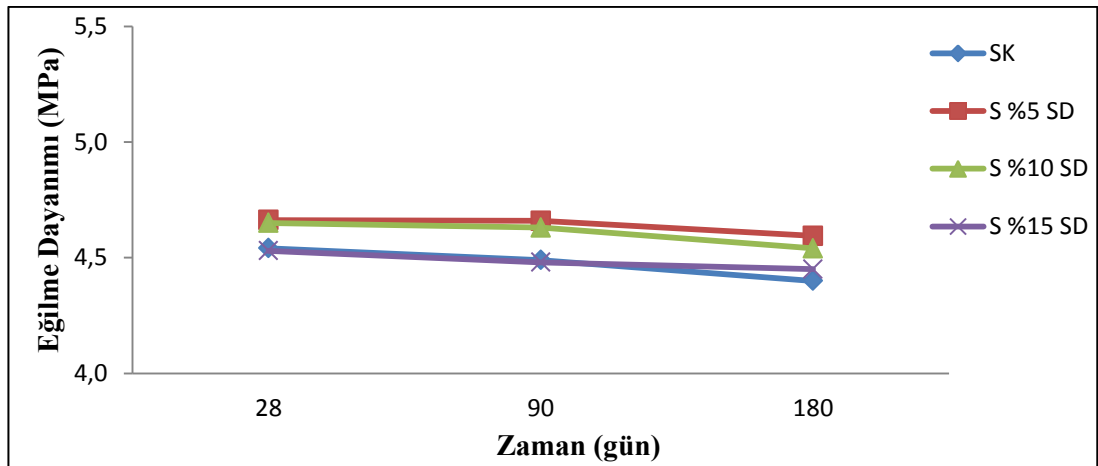
Silis dumanı kullanılan betonlarda eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.10'da sunulmuş ve Şekil 4.17-4.19'da grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış SD katkıli betonların eğilme dayanımları

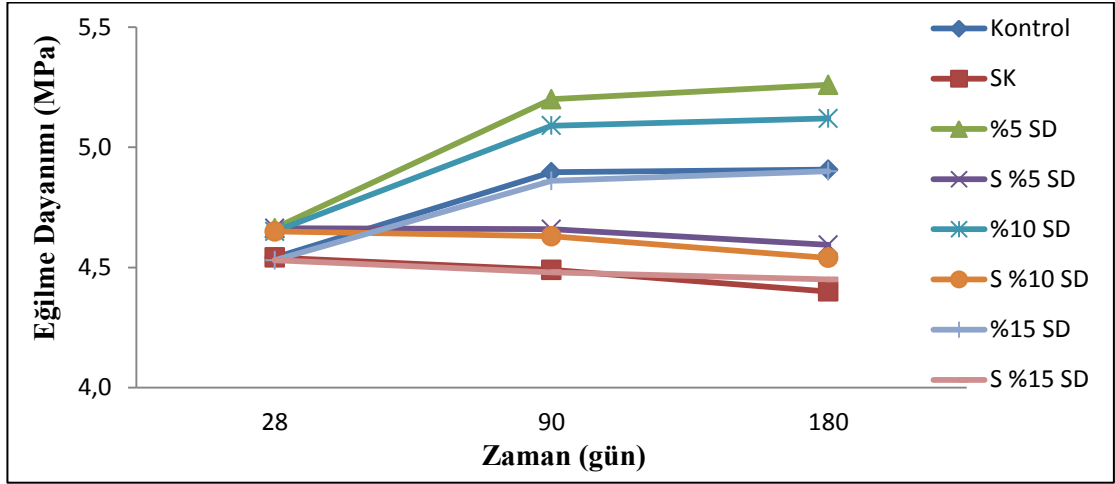
Beton Kodu	Eğilme Dayanımları 28 Gün (MPa)	Eğilme Dayanımları 90 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)	Eğilme Dayanımları 180 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)
Kontrol	4,54	4,90	7,82	4,91	8,06
SK		4,49	-1,12	4,40	-3,11
%5 SD	4,66	5,20	11,52	5,26	12,80
S %5 SD		4,66	-0,09	4,59	-1,48
%10 SD	4,65	5,09	9,46	5,12	10,11
S %10 SD		4,63	-0,43	4,54	-2,37
%15 SD	4,53	4,86	7,28	4,90	8,17
S %15 SD		4,48	-1,10	4,45	-1,77



Şekil 4.17. SD katkıli numunelerin eğilme dayanımları



Şekil 4.18. Sülfat ortamında SD katkıli betonların eğilme dayanımları



Şekil 4.19. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda SD katkılı numunelerin eğilme dayanımları

Numunelerin eğilme dayanım değerleri 28 günlük dayanımlara göre kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Kontrol grubu, 90 günde %7,82 ve 180 günde %8,06 dayanım artışı göstermiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan Kontrol grubu numunelerinde, 90 günde %1,12 ve 180 günde %3,11 oranında dayanım kaybı belirlenmiştir.
- %5 SD katkılı numuneler, 90 günde %11,52 ve 180 günde %12,80 dayanım artışı göstererek en yüksek dayanım artışına ulaşmıştır.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %5 SD katkılı numunelerde, 90 günde %0,09 ve 180 günde %1,48 oranında dayanım kaybı söz konusudur.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan 180 günlük numunelerde, %5 SD katkılı numuneler en iyi performansı göstermiştir.
- %10 SD katkılı numuneler, 90 günde %9,46 ve 180 günde %10,11 oranında dayanım artışı göstermiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %10 SD katkılı numunelerde, 90 günde %0,43 ve 180 günde %2,37 oranında dayanım kaybı söz konusudur.
- %15 SD katkılı numuneler, 90 günde %7,28 ve 180 günde %8,17 oranında dayanım artışı göstermiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %15 SD katkılı numunelerde, 90 günde %1,10 ve 180 günde %1,77 oranında dayanım kaybı belirlenmiştir.

SD katkılı beton numunelerinin eğilme dayanımlarını kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- %5 SD katkılı beton numuneleri 28 günde %2,69, 90 günde %6,21 ve 180 günde %7,19 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- %10 SD katkılı beton numuneleri 28 günde %2,40, 90 günde %3,96 ve 180 günde %4,34 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- %15 SD katkılı beton numuneleri 28 günde %0,24 günde %0,74 ve 180 günde %0,14 oranında dayanımda düşüş belirlenmiştir.
- %10'a kadar SD katkının kullanımı eğilme dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

SD katkılı beton numunelerinin sülfatlı ortamda eğilme dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- S %5 SD katkılı beton numuneleri 90 günde %3,76 ve 180 günde %4,41 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- S %10 SD katkılı beton numuneleri 90 günde %3,12 ve 180 günde %3,18 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- S %15 SD katkılı beton numuneleri 90 günde %0,22 oranında düşüş ve 180 günde %1,14 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.
- %10'a kadar SD katkının kullanımı sülfatlı ortamda eğilme dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

Sülfat etkisine maruz bırakılmış SD katkılı beton numuneleri aynı yaşta Sülfat etkisine maruz bırakılmamış SD katkılı numunelere göre eğilme dayanımları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Sülfat etkisine maruz bırakılmış kontrol numunelerinde, 90 günde %8,29 ve 180 günde %10,33 oranlarında dayanım kayıpları belirlenmiştir.

- %5 SD katkılı numuneler, 90 günde %10,40 ve 180 günde %12,66 oranları ile aynı yaşta en yüksek dayanım kaybı göstermiştir.
- %10 SD katkılı numunelerde, 90 günde %9,04 ve 180 günde %11,33 oranlarında dayanım kaybı hesaplanmıştır.
- %15 SD katkılı numunelerde, 90 günde %7,82 ve 180 günde %9,18 oranlarında dayanım kaybı belirlenmiştir.

Numunelerin eğilme dayanım sonuçlarına göre her yaşta en yüksek eğilme dayanımı %5 SD katkılı betonlarda görülmüş ve özellikle ilerleyen yaşlarda dayanım artışları daha belirgin hale gelmiştir. SD dumanı oranının artmasıyla beraber dayanım artışlarında azalmalar oluşmuştur. %15 SD kullanılan numuneler hemen hemen kontrol grubuyla aynı sonuçları vermiştir. Bu durum SD miktarının %15'i aşması durumunda olumlu etkinin ortadan kalkacağı anlamına gelmektedir. Betonun eğilme dayanımındaki azalma, betonda meydana gelen mikro çatlaklarla ilişkilidir. Bu mikro çatlaklar betondaki farklı nem durumuyla açıklanmaktadır. SD ikameli betonlarda basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında, eğilme dayanımındaki azaltma otojen rötre ile alakalıdır. %15 SD'nın daha fazla su emmesi eğilme dayanımında etkisini dayanımı azaltarak göstermiştir.

Silis dumanı katkılı numuneler sülfata karşı kontrol numunesine göre yüksek dayanım göstermişler, Silis dumanı Ca(OH)_2 'i bağlayarak sülfatların reaksiyonunu önlemiştir ve Portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki Ca(OH)_2 ve C_3A oranını azalmıştır. %15 SD kullanımı basınç dayanımında olumlu etki göstermiş ama eğilme dayanımında 28 ve 90 günde bu etki belirlenememiştir. Bunun nedeni sülfat iyonlarının mikro çatlaklardan içeriye sızmasıyla C_3A 'nı aktif hale getirmesinden dolayı genleşmeler oluşmasıyla eğilme deneylerinde bu etki açığa çıkmıştır.

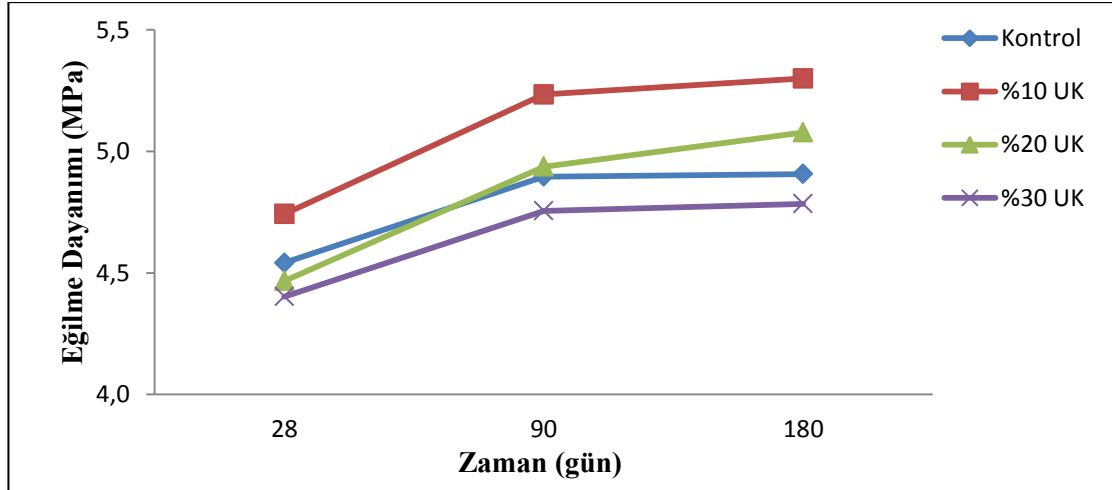
Silis dumanının çimento ağırlığınca %15'e kadar kullanılması durumunda basınç dayanımlarında ve %10'a kadar da eğilme dayanımlarında olumlu etki yaptığı söylenebilir.

4.2.4.b. Uçucu kül kullanımının etkisi

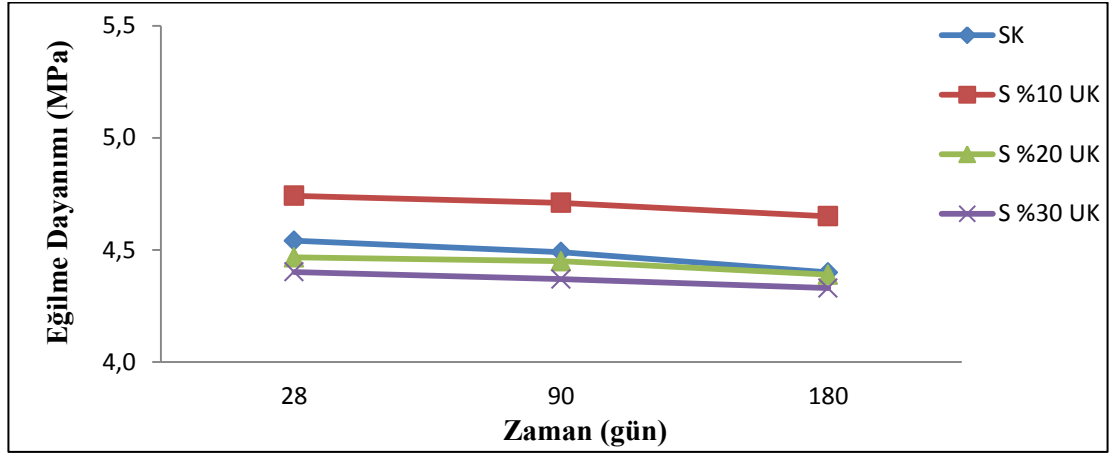
Uçucu kül kullanılan betonlarda eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.11’de sunulmuş ve grafik olarak Şekil4.20-4.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış UK katkıli betonların eğilme dayanımları

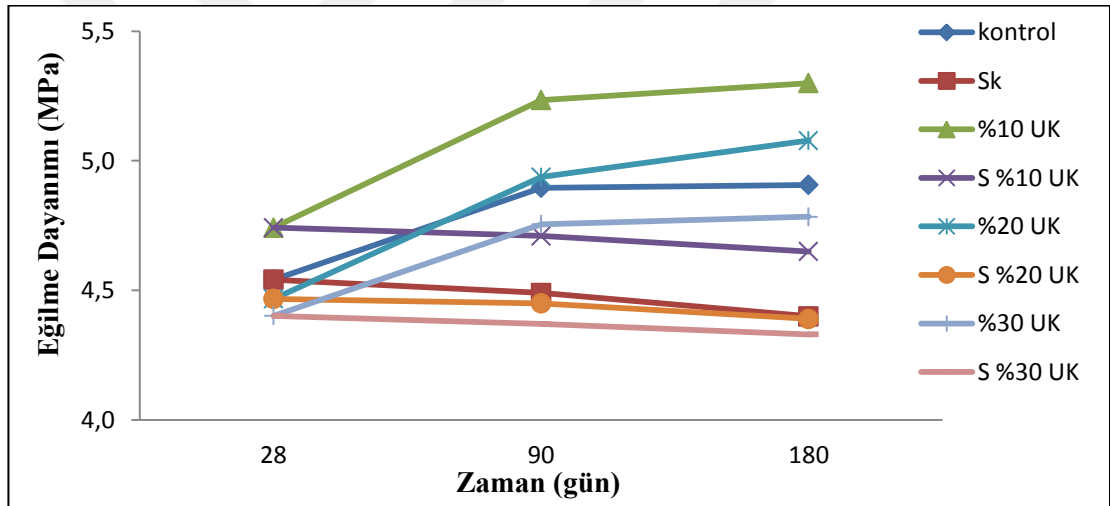
Beton Kodu	Eğilme Dayanımları 28 Gün (MPa)	Eğilme Dayanımları 90 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)	Eğilme Dayanımları 180 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)
Kontrol	4,54	4,90	7,82	4,91	8,06
SK		4,49	-1,12	4,40	-3,11
%10 UK	4,74	5,23	10,38	5,30	11,77
S %10 UK		4,71	-0,67	4,65	-1,94
%20 UK	4,47	4,94	10,52	5,08	13,68
S %20 UK		4,45	-0,38	4,39	-1,72
%30 UK	4,40	4,76	8,02	4,78	8,68
S %30 UK		4,37	-0,73	4,33	-1,64



Şekil 4.20. UK katkıli numunelerin eğilme dayanımları



Şekil 4.21. Sülfat ortamında UK katkılı betonların eğilme dayanımları



Şekil 4.22. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda UK katkılı numunelerin eğilme dayanımları

Numunelerin eğilme dayanım değerleri 28 günlük dayanımlarla karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- %10 UK katkılı numuneler, 90 günde %10,38 ve 180 günde %11,77 oranında dayanım artışı göstermiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %10 UK katkılı numunelerde, 90 günde %0,67 ve 180 günde %1,94 oranında dayanım kaybı söz konusudur.
- Sülfat etkisine 180 gün maruz bırakılan numunelerde en iyi performansı %10 UK katkılı numuneler göstermiştir.

- %20 UK katkılı numunelerde 90 günde %10,52 ve 180 günde %13,68 oranında dayanım artışı görülmüştür.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %20 UK katkılı numunelerde, 90 günde %0,38 ve 180 günde %1,72 oranında dayanım kaybı söz konusudur.
- %30 UK katkılı numuneler 90 günde %8,02 ve 180 günde %8,68 oranında dayanım artışı göstermiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %30 UK katkılı numunelerde, 90 günde %0,73 ve 180 günde %1,64 oranında dayanım kaybı söz konusudur.
- Numunelerin eğilme dayanım sonuçlarına bakıldığında en yüksek eğilme dayanımının, basınç dayanımında olduğu gibi, %10 UK katkılı numunelerden elde edildiği belirlenmiştir.
- %20 UK ve %30 UK, kontrol numunesiyle yaklaşık aynı dayanımı vermiştir.
- Eğilme dayanımlarındaki değişiklikler çok belirgin olmamakla beraber %10 UK kullanımının eğilme dayanımı açısından en olumlu değer olduğu söylenebilir.

UK katkılı beton numunelerinin eğilme dayanımlarını kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- %10 UK katkılı beton numuneleri 28 günde %4,43, 90 günde %6,90 ve 180 günde %8,01 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- %20 UK katkılı beton numuneleri 28 günde %1,63 oranında düşüş, 90 günde %0,84 ve 180 günde %3,48 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- %30 UK katkılı beton numuneleri 28 günde %3,06 günde %2,88 ve 180 günde %2,51 oranında dayanımda düşüş belirlenmiştir.
- %20'ye kadar UK katkının kullanımı eğilme dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

UK katkılı beton numunelerinin sülfatlı ortamda eğilme dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- S %10 UK katkılı beton numuneleri 90 günde %4,90 ve 180 günde %5,68 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- S %20 UK katkılı beton numuneleri 90 günde %0,89 ve 180 günde %0,23 oranında düşüş görülmüştür.
- S %30 UK katkılı beton numuneleri 90 günde %2,67 oranında dayanımda düşüş ve 180 günde %1,59 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.
- %10'a kadar UK katkının kullanımı sülfatlı ortamda eğilme dayanımında fazla dayanım görülmüştür. ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

Sülfat etkisine maruz bırakılmış UK katkılı beton numunelerin aynı yaşta Sülfat etkisine maruz bırakılmamış UK katkılı numunelere göre eğilme dayanımları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

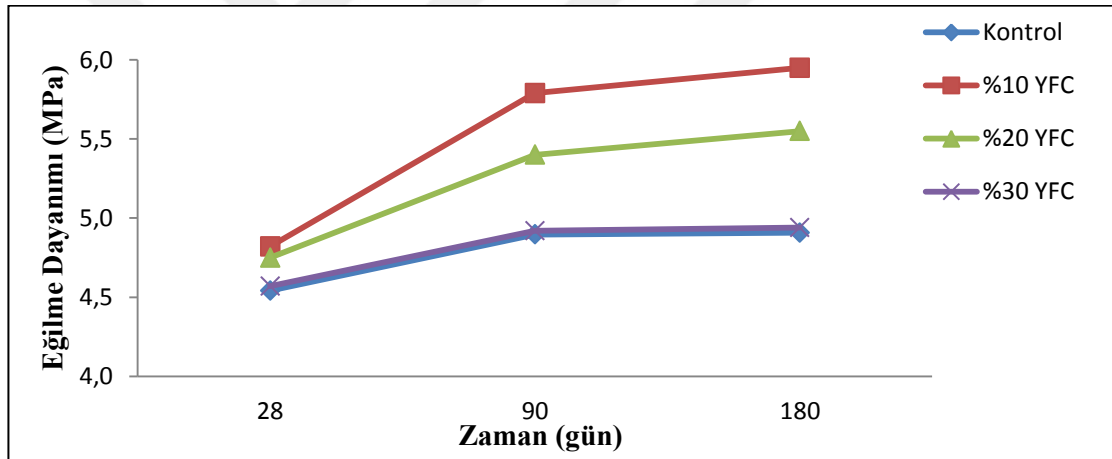
- %10 UK katkılı numuneler, 90 günde %10,01 ve 180 günde %12,26 oranlarında dayanım kaybı göstermişlerdir.
- %20 UK katkılı numunelerde, 90 günde %9,86 ve 180 günde %13,55 oranlarında dayanım kaybı hesaplanmıştır. Bu grup aynı yaşta en yüksek dayanım kaybı göstermiştir.
- %30 UK katkılı numunelerde, 90 günde %8,10 ve 180 günde %9,49 oranlarında dayanım kaybı belirlenmiştir.

4.2.4.c. Yüksek fırın cürufu kullanımının etkisi

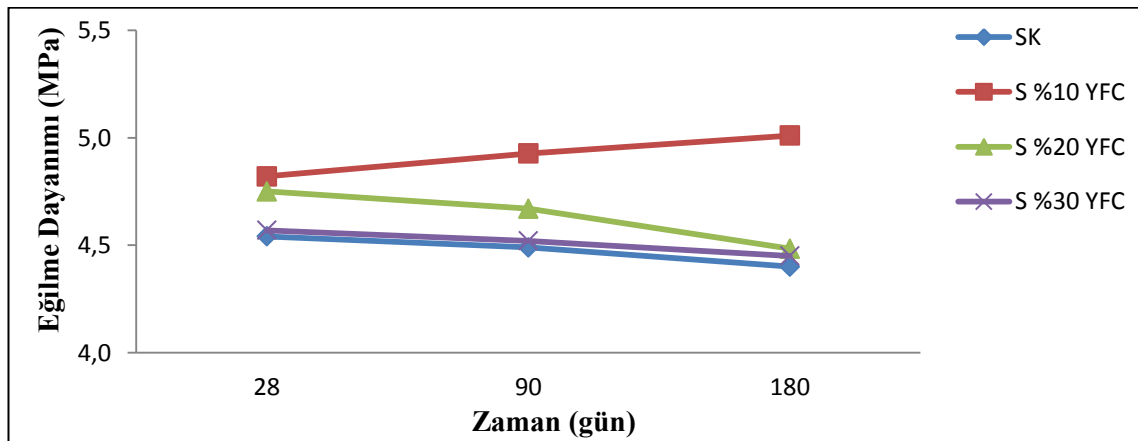
Yüksek Fırın Cürufu kullanılan betonlarda eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.12'de verilerek grafik olarak Şekil 4.23-4.25'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış YFC katkıli betonların eğilme dayanımları

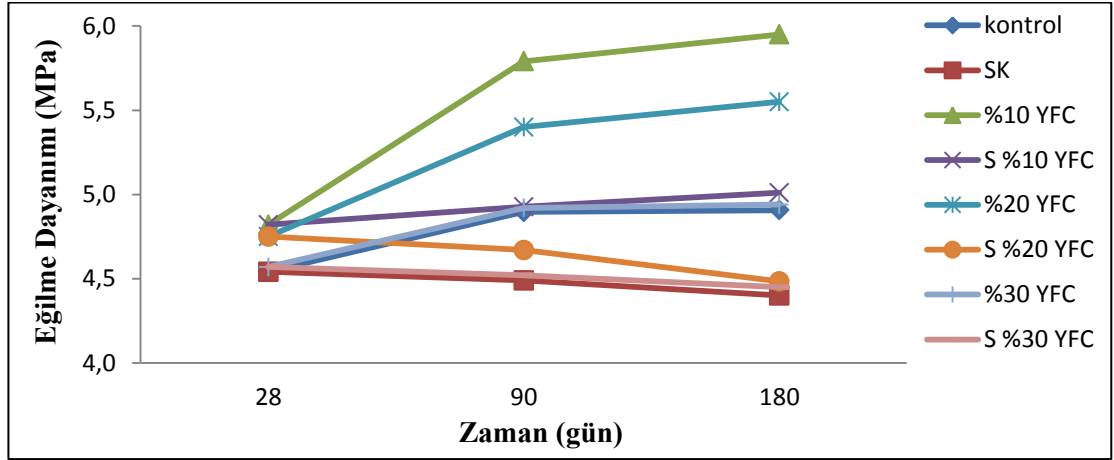
Beton Kodu	Eğilme Dayanımları 28 Gün (MPa)	Eğilme Dayanımları 90 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)	Eğilme Dayanımları 180 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)
Kontrol	4,54	4,90	7,82	4,91	8,06
SK		4,49	-1,12	4,40	-3,11
%10 YFC	4,82	5,79	20,12	5,95	23,44
S %10 YFC		4,93	2,22	5,01	3,94
%20 YFC	4,75	5,40	13,68	5,55	16,84
S %20 YFC		4,67	-1,68	4,48	-5,60
%30 YFC	4,57	4,92	7,68	4,94	8,12
S %30 YFC		4,52	-1,07	4,45	-2,60



Şekil 4.23. YFC katkıli numunelerin eğilme dayanımları



Şekil 4.24. Sülfat ortamında YFC katkıli betonların eğilme dayanımları



Şekil 4.25. Sülfat sız ve sülfatlı ortamda YFC katkıli numunelerin eğilme dayanımları

Numunelerin eğilme dayanım değerleri 28 günlük dayanımlara göre değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- %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.
- %20 YFC katkıli numuneler 90 günde %13,68 ve 180 günde %16,84 oranında dayanım artışı göstermiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %20 YFC katkıli numunelerde, 90 günde %1,68 ve 180 günde %5,60 oranında dayanım kaybı söz konusudur.
- %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.
- Numunelerin eğilme dayanım sonuçları incelendiğinde YFC kullanımının 28 günde belirgin bir etki oluşturmadığı ancak ilerleyen yaşlarda eğilme dayanımlarında artışa sebep olduğu görülmektedir.

- En yüksek eğilme dayanımı sırasıyla %10 YFC ve %20 YFC katkıli numunelerde görülmüştür. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer olarak, %30 YFC katkıli numunelerde kontrol numunesine çok yakın dayanım değerleri tespit edilmiştir.
- Yüksek fırın cürufu katkıli betonda agrega-çimento arayüzeyindeki boşlukların azaldığı, betonun eğilme dayanımının arttığı görülmüştür.
- Kullanılan yüksek fırın cürufunda SO_3 miktarı sıfırdır ve YFC kullanımı geçirimsiz bir beton üretmeye imkân sağladığı için sülfat iyonları betonun iç yapısını çok az tahrip etmiştir ve genleşme az olduğu için de sülfat etkisinde dayanım kaybı az olmuştur.

YFC katkıli beton 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.
- %20 YFC katkıli beton numuneleri 28 günde %4,60, 90 günde %10,29 ve 180 günde %13,10 oranında fazla dayanım görülmüştür.
- %30 YFC katkıli beton numuneleri 28 günde %0,62 günde %0,49 ve 180 günde %0,67 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.
- %30'a kadar YFC katkının kullanımı eğilme dayanımında artış görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

YFC katkıli beton 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.

- %30'a kadar YFC katkının kullanımı sülfatlı ortamda eğilme dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

Sülfat etkisine maruz bırakılmış YFC katkıli beton numuneleri aynı yaşta Sülfat etkisine maruz bırakılmamış YFC katkıli numunelere göre eğilme dayanımları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

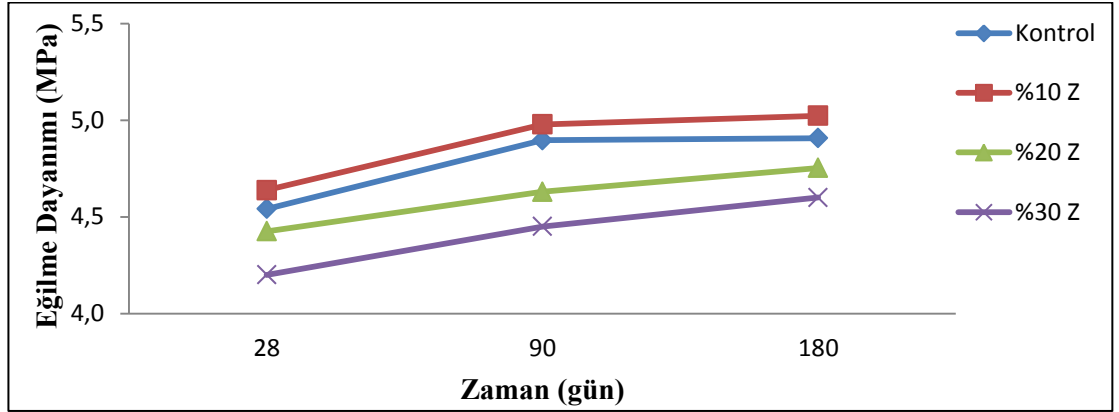
- %10 YFC katkıli numuneler, 90 günde %14,91 ve 180 günde %15,80 oranlarında dayanım kaybı göstermişler.
- %20 YFC katkıli numunelerde, 90 günde %13,52 ve 180 günde %19,21 oranlarında dayanım kaybı hesaplanmıştır. Bu grup aynı yaşta en yüksek dayanım kaybı görülmüştür.
- %30 YFC katkıli numunelerde, 90 günde %8,13 ve 180 günde %9,92 oranlarında dayanım kaybı belirlenmiştir.

4.2.4.d. Zeolit kullanımının etkisi

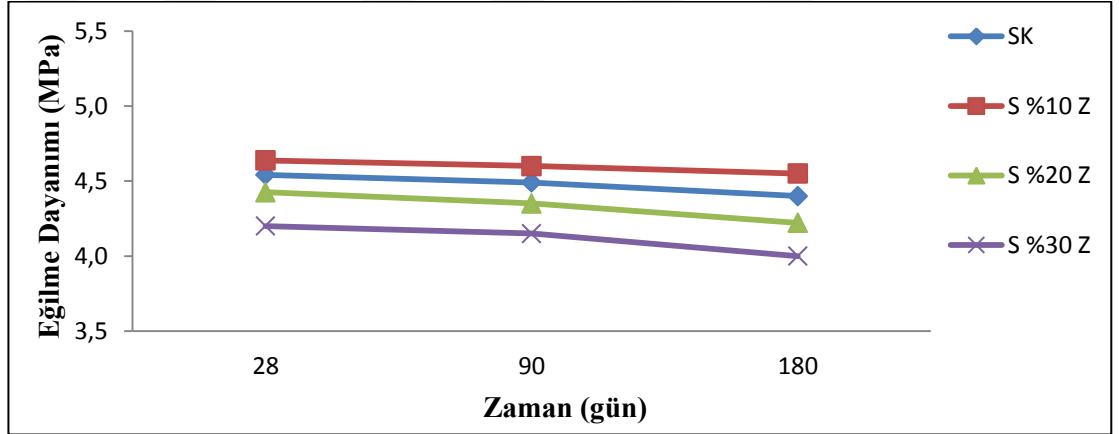
Zeolit kullanılan betonlarda eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.13'te verilmiş ve grafik olarak Şekil 4.26-4.28'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. Sülfat etkisine maruz bırakılmış ve bırakılmamış zeolit katkıli betonların eğilme dayanımları

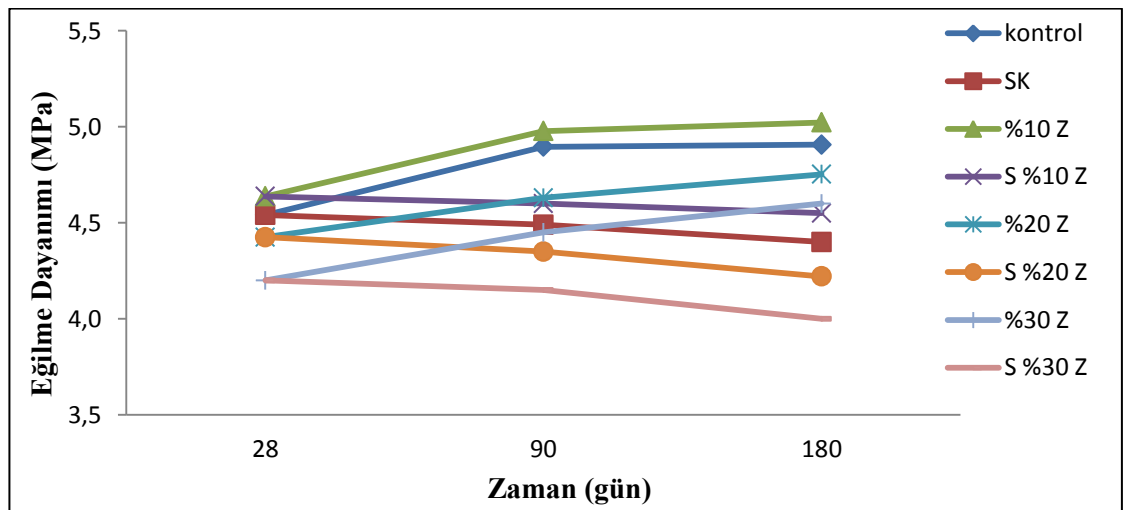
Beton Kodu	Eğilme Dayanımları 28 Gün (MPa)	Eğilme Dayanımları 90 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)	Eğilme Dayanımları 180 Gün (MPa)	Dayanım Değişimi (%)
Kontrol	4,54	4,90	7,82	4,91	8,06
SK		4,49	-1,12	4,40	-3,11
%10 Z	4,64	4,98	7,33	5,02	8,30
S %10 Z		4,60	-0,82	4,55	-1,90
%20 Z	4,43	4,63	4,63	4,75	7,41
S %20 Z		4,35	-1,69	4,22	-4,61
%30 Z	4,20	4,45	5,95	4,60	9,52
S %30 Z		4,15	-1,19	4,00	-4,76



Şekil 4.26. Zeolit katkılı numunelerin eğilme dayanımları



Şekil 4.27. Sülfat ortamında zeolit katkılı betonların eğilme dayanımları



Şekil 4.28. Sülfatsız ve sülfatlı ortamda zeolit katkılı numunelerin eğilme dayanımları

Numunelerin eğilme dayanım değerleri 28 günlük dayanımlarla karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- %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.
- %20 zeolit katkıli numuneler 90 günde %4,63 ve 180 günde %7,41 oranında dayanım artışı göstermiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılan %20 zeolit katkıli numunelerde, 90 günde %1,69 ve 180 günde %4,61 oranında dayanım kaybı söz konusudur.
- %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.
- %20 ve %30 zeolit katkıli numunelerden kontrol numunesine göre daha düşük dayanımlar tespit edilmiştir.

Zeolit katkıli beton 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 katkının kullanımı eğilme dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

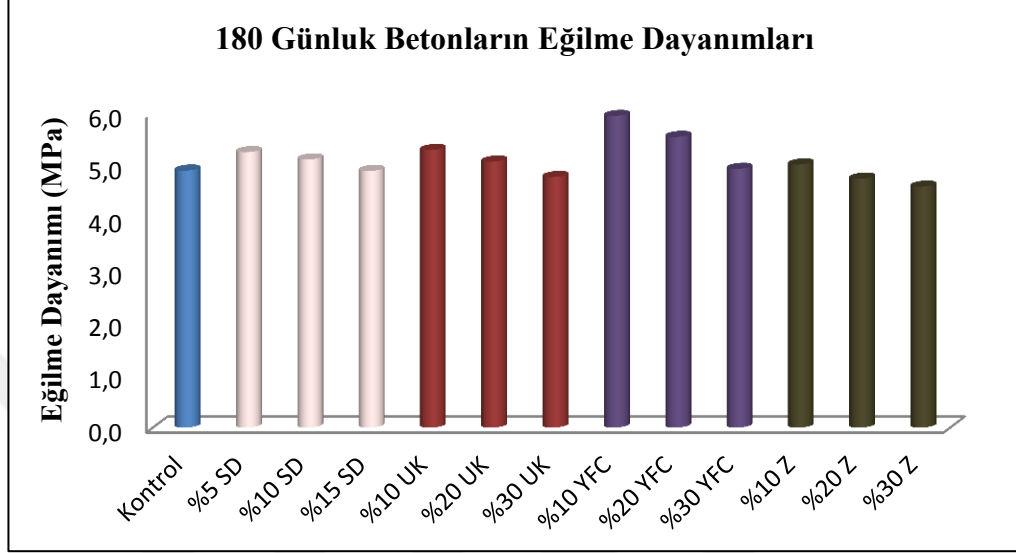
Zeolit katkılı beton numunelerinin sülfatlı ortamda eğilme dayanımlarını sülfatlı kontrol grubuna göre incelendiğinde:

- S %10 zeolit katkılı beton numuneleri 90 günde %2,45 ve 180 günde %3,41 oranında fazla dayanım hesaplanmıştır.
- S %20 zeolit katkılı beton numuneleri 90 günde %3,12 ve 180 günde %4,07 oranında dayanımda düşüş görülmüştür.
- S %30 zeolit katkılı beton numuneleri 90 günde %7,57 ve 180 günde %9,09 oranında fazla dayanım belirlenmiştir.
- %10'a kadar YFC katkının kullanımı sülfatlı ortamda eğilme dayanımında fazla dayanım görülmüştür ve bu oranda kullanımı betonda tavsiye olunur.

Sülfat etkisine maruz bırakılmış zeolit katkılı beton numuneleri aynı yaşta Sülfat etkisine maruz bırakılmamış zeolit katkılı numunelere göre eğilme dayanımları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- %10 zeolit katkılı numuneler, 90 günde %7,59 ve 180 günde %9,42 oranlarında dayanım kaybı göstermişlerdir.
- %20 zeolit katkılı numunelerde, 90 günde %6,05 ve 180 günde %11,19 oranlarında dayanım kaybı hesaplanmıştır.
- %30 zeolit katkılı numunelerde, 90 günde %6,74 ve 180 günde %13,04 oranlarında dayanım kaybı belirlenmiştir. Bu grup aynı yaşta en yüksek dayanım kaybı göstermiştir.

Sonuç olarak numunelerin hepsinin bir arada değerlendirilmesi için, sülfatsız ve sülfatlı ortamda eğilme dayanımları Şekil 4.29-4.30’da gösterilerek incelenmiştir:

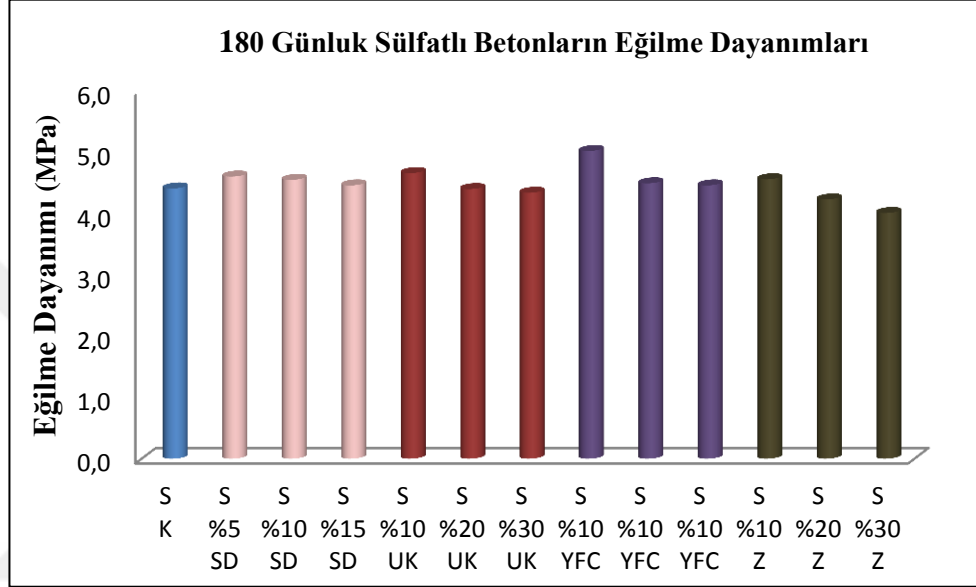


Şekil 4.29. Mineral katkıli betonların eğilme dayanımları

Numunelerin eğilme dayanım değerleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Beton numuneleri eğilme dayanım deneyinde, dayanımlar büyükten küçüğe doğru sıralandığında; %10 YFC > %10 UK > %5 SD > %10 Zeolit > Kontrol olduğu görülmüştür.
- SD katkıli gruplar değerlendirildiğinde; %5 SD ve %10 SD katkıli gruplar 180 günde kontrol grubuna göre %7,19 ve %4,34 oranlarında daha yüksek dayanımlar göstermesine karşın %15 SD katkıli grupta %0,14 oranında daha düşük dayanım belirlenmiştir.
- UK katkıli gruplarda da %10 UK ve %20 UK katkıli numuneler 180 günde kontrol grubuna göre %8,01 ve %3,48 oranlarında daha yüksek dayanımlara sahipken %30 UK katkıli grubun eğilme dayanımı %2,51 oranında daha düşük çıkmıştır.
- YFC katkıli grupların hepsinde 180 günde kontrol grubuna göre daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu miktarlar; %10 YFC, %20 YFC ve %30 YFC katkıli gruplar için sırasıyla %21,26, %13,10 ve %0,67 olarak hesaplanmıştır.

- Zeolit ilave edilmesi durumunda 180 günde kontrol grubuna göre sadece %10 zeolit katkılı grupta %2,36 oranında daha yüksek dayanım elde edilmiştir. %20 ve %30 zeolit katkılı grupların eğilme dayanımları ise %3,14 ve %6,26 oranlarında daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.30. Sülfat etkisine maruz bırakılan mineral katkılı betonların eğilme dayanımları

Sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanım değerleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Betonların eğilme dayanımları, büyükten küçüğe doğru %10 YFC > %10 UK > %5 SD > %10 Zeolit > Kontrol olacak şekilde belirlenmiştir.
- SD katkılı grupların eğilme dayanımları 180 günde kontrol grubuna göre daha yüksek değerler sergilemiştir. %5 SD, %10 SD ve %15 SD katkılı gruplarda kontrole göre sırasıyla %46,37, %34,30 ve %29,65 oranlarında daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir.
- UK katkılı grupların tümünde 180 günde kontrol grubuna göre daha yüksek dayanımlar görülmüştür. %10 UK ilavesi için %31,53, %20 UK ilavesinde %4,33 ve

%30 UK kullanılması durumunda %3,87 oranında daha yüksek dayanımlar belirlenmiştir.

- YFC katkıli guruplarda da eğilme dayanımları 180 günde kontrol grubuna göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Dayanımdaki fazlalık miktarları %10, %20 ve %30 YFC ikamesi için sırasıyla %61,34, %32,97 ve %9,82 olarak hesaplanmıştır.
- Zeolit katkıli guruplar değerlendirildiğinde %10 ve %20 zeolit katkıli gurupların eğilme dayanımları 180 günde kontrol grubuna göre %21,01 ve %4,30 oranında daha yüksek değerler vermesine karşın %30 zeolit katkıli grubun eğilme dayanımı kontrol grubundan %10,31 oranında daha küçük değerde kalmıştır.

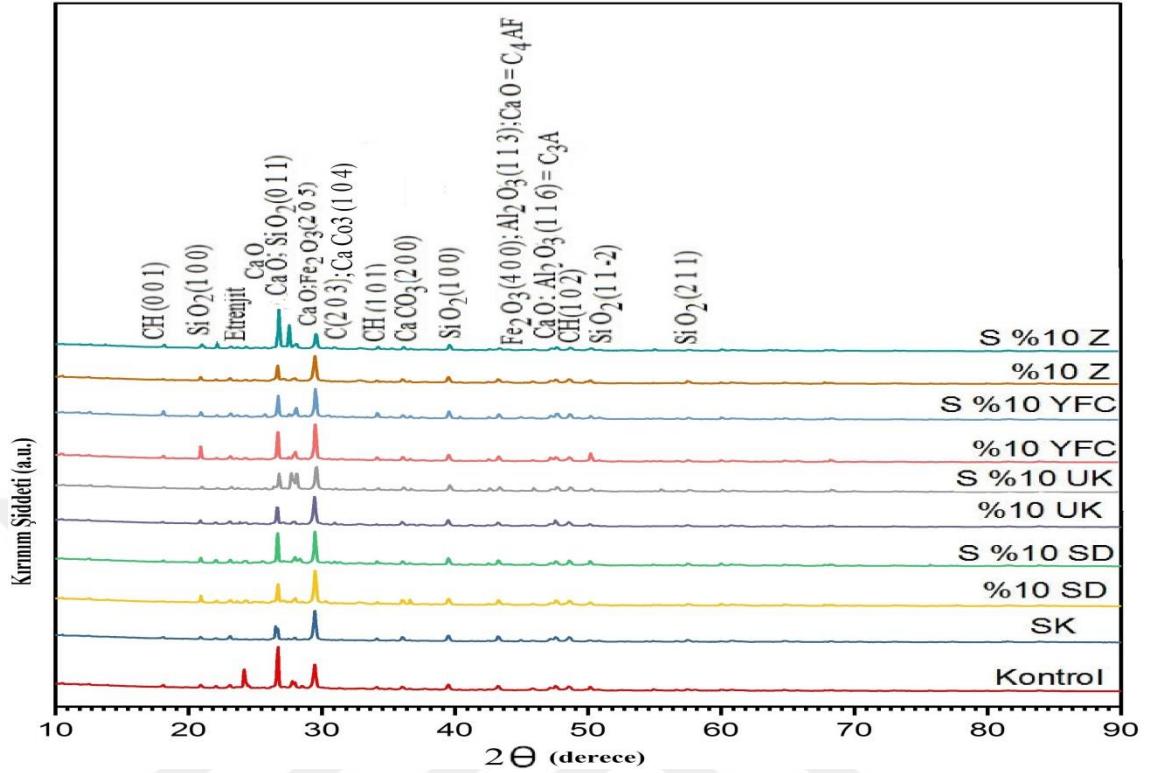
4.2.5. İıyapı incelemeleri

SEM görüntüleri 180 günlük numunelerden elde edilmiştir. Kontrol grubu ve mineral katkıli betonlarda (katkı ikame oranı %10 olan beton numuneleri) yapılan incelemelerde içyapı fotoğrafları çekilmiş ve EDS, XRD ölçümleri yapılmıştır. Bu görüntüler ve ölçümler aşağıda sunularak yorumlanmıştır.

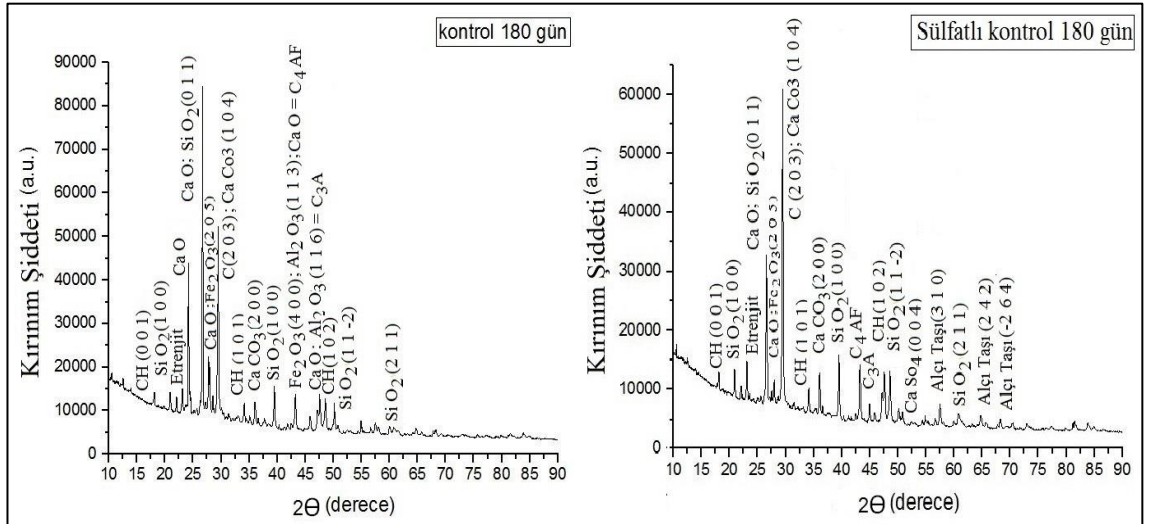
4.2.5.a. Kontrol ve SD katkıli betonlar

a. XRD Ölçümleri

180 günlük beton numunelerinin üzerinde XRD ölçümleri yapılmıştır hepsi bir tablo olarak Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Kontrol ve %10 SD mineral katkıli beton numuneleri üzerinde XRD ölçümleri ve sonuçları Şekil 4.32-4.33'te sunularak değerlendirilmiştir.



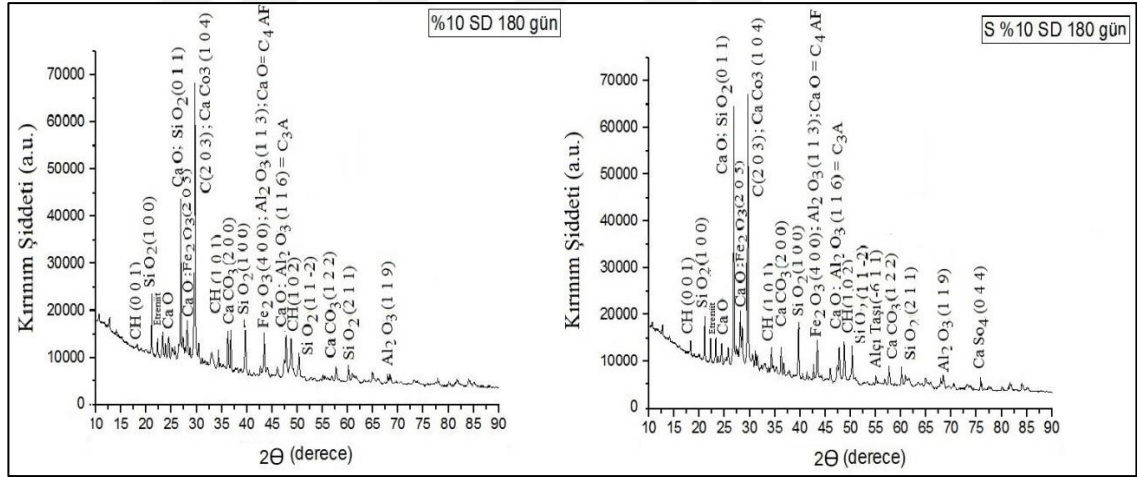
Şekil 4.31. Beton numunelerin XRD ölçümleri



Şekil 4.32. Kontrol ve sülfatlı kontrol numunesinin XRD ölçümleri

- XRD ölçümünde numunelerde CH, C₄AF, C₃A ve diğer beton bileşenleri belirlenmiştir.
- Hidratasyon ürünlerinden Etrenjüt numunelerde görülmüştür.

- XRD ölçümünde sülfat CH ve C₃A üzerinde etkisini CaSO₄ ve alçıtaşı oluşturarak göstermiştir.
- Betonda alçıtaşının oluşmasıyla, genleşmeler ve çatlaklar meydana gelir. Oluşan genleşme 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 genleşme olarak görülmüştür ve bu genleşme sonucu meydana gelen çatlaklar sonucunda dayanımlar azalmıştır.
- Sülfat etkisinde kontrol numunesindeki genleşme oranı %49,22 olarak tespit edilmiştir.
- XRD ve SEM görüntülerinde betonun homojen olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.33. %10 SD ve S %10 SD'nın XRD ölçümleri

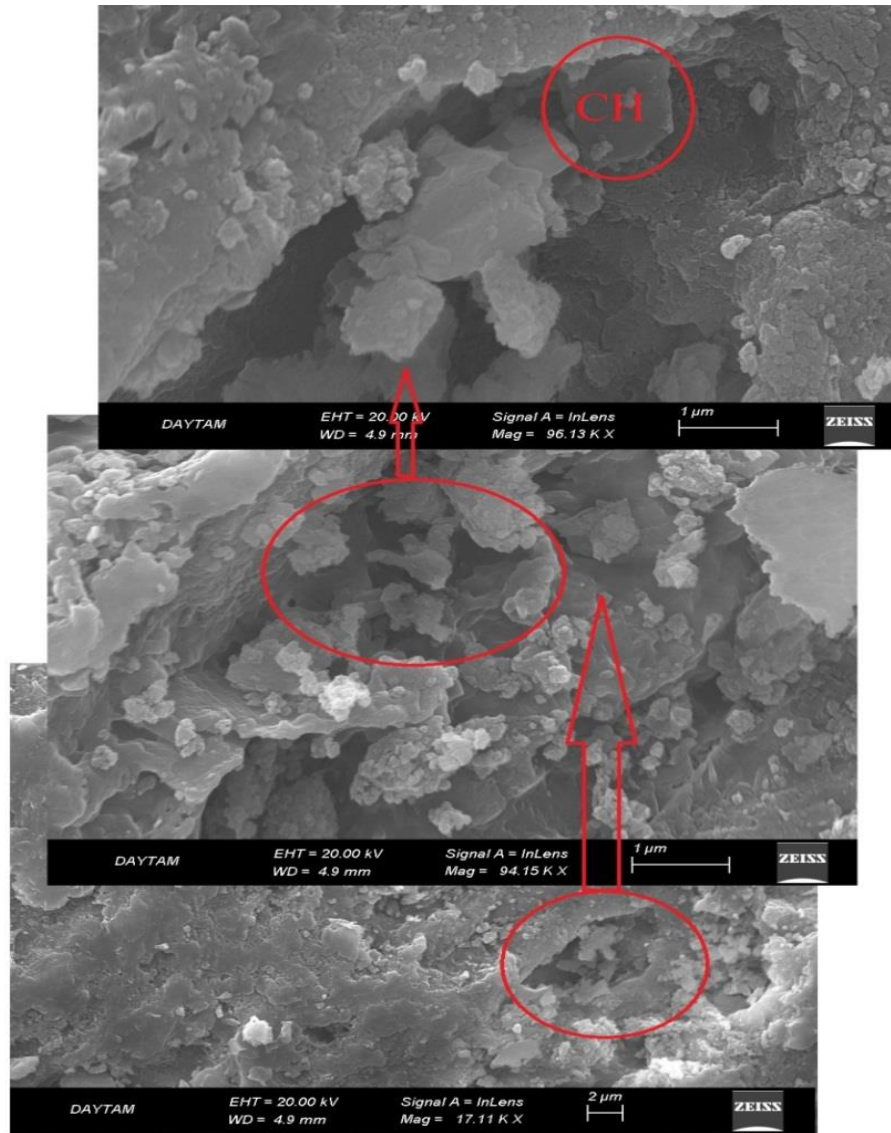
- XRD ölçümünde %10 SD katkılı betonda, kontrol grubuna göre, C₃A ve C₄AF daha şiddetli bir pike sahiptir.
- XRD ölçümünde sülfat CH ve C₃A üzerinde etkisini CaSO₄ ve alçıtaşı oluşturarak göstermiştir.
- XRD ölçümünde %10 SD katkılı betonda, kontrol grubuna göre, alçıtaşı daha düşük bir pike sahiptir.
- XRD ölçümünde sülfat etkisine maruz kalmayan %10 SD katkılı beton numunesinin ortalama tanecik boyutu 27,92 nm ve sülfat etkisinde %10 SD katkılı beton

numunesinin ortalama tanecik boyutu 36,00 nm olarak ölçülmüştür. Sülfat etkisi SD katkılı betonlarda, taneciklerde 8,08 nm genişleme olarak belirlenmiştir. Burada genişleme oranı %28,92 olarak hesaplanmıştır.

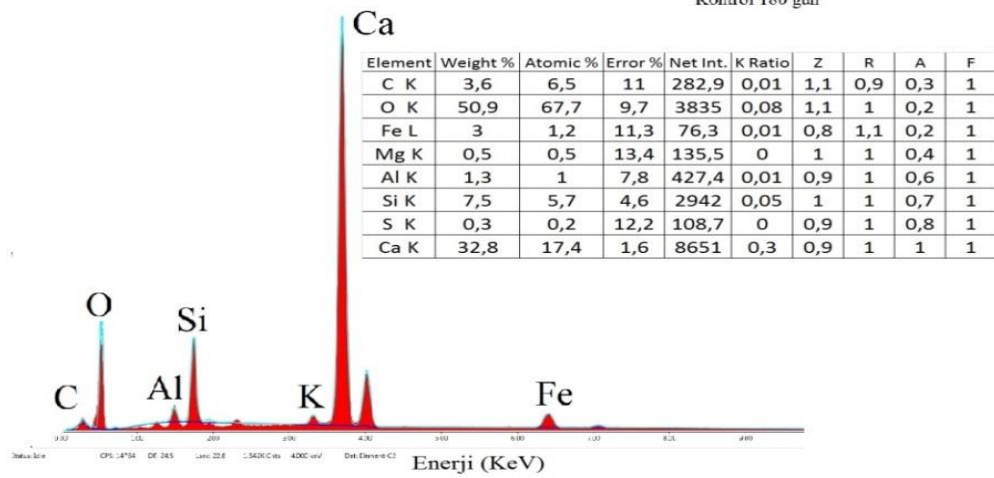
- XRD ölçümlerine göre SD katkılı numunelerin genişleme oranının kontrol numunesinden %20,30 daha az olduğu belirlenmiştir. Böylelikle sülfat etkisinin kontrol grubuna göre daha az etkili olduğu değerlendirilebilir.

b. SEM Görüntüleri

Kontrol grubu ve %10 SD katkılı beton numuneleri üzerinde SEM görüntüleri alınmış ve içyapı fotoğrafları Şekil 4.34- 4.37'de sunularak değerlendirilmiştir.

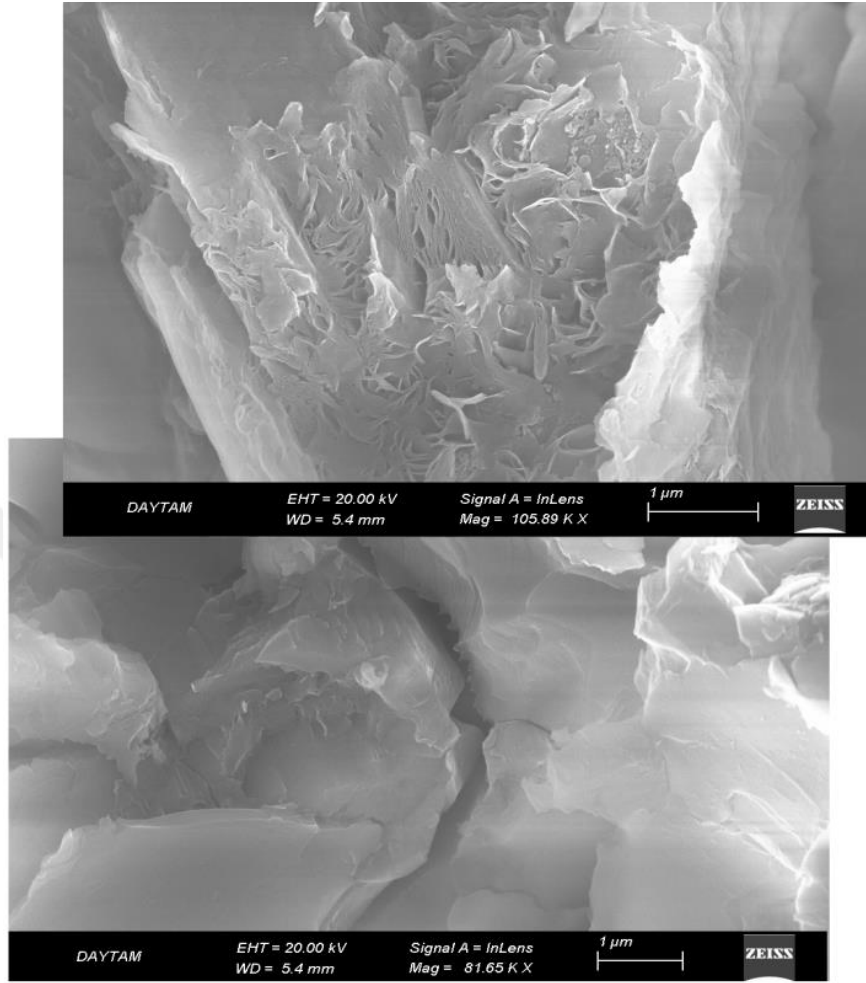


Kontrol 180 gün

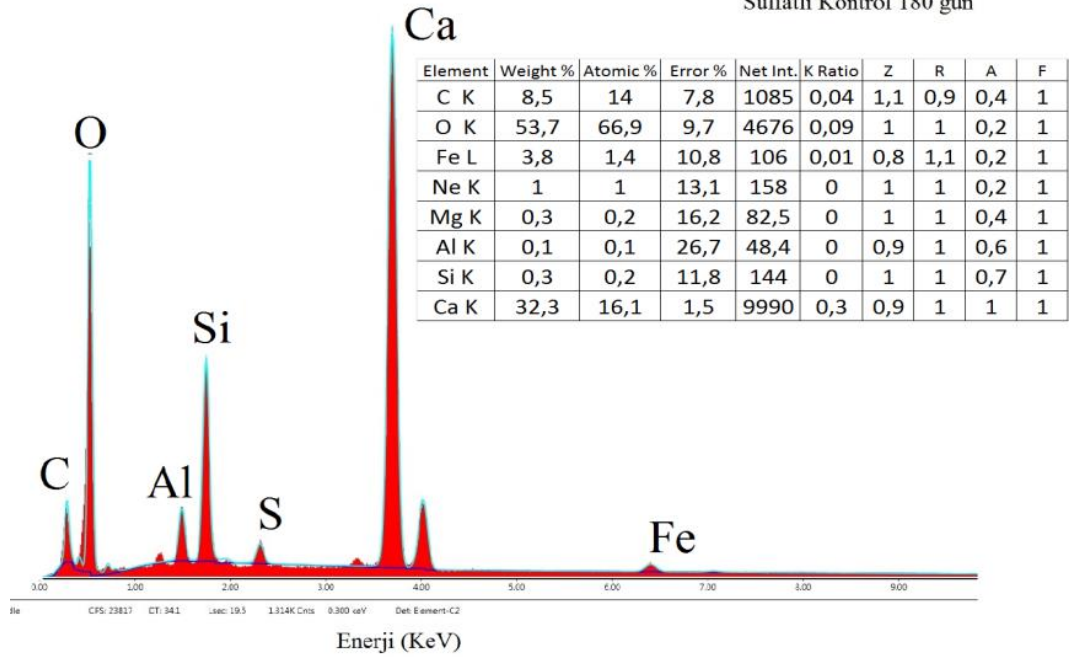


Şekil 4.34. Kontrol numunesinin arayüzeyi boşlukları gösteren SEM görüntüleri

- SEM görüntüleri incelendiğinde kontrol numunesinde fazla miktarda boşluk olduğu görülmektedir.
- CH oluşumu hidrasyon sonucunda görülmektedir.
- Betondaki boşluklar basınç ve eğilme direncini 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.
- Kontrol numunesindeki SEM görüntülerinde betonun homojen olmadığı belirlenmiştir.
- Bu çalışmada mineral katkılardan filler etkisi özelliği ile betonda doluluk oranını artırdığı belirlenmiştir.



Sülfatlı Kontrol 180 gün

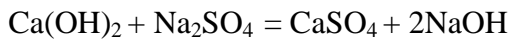
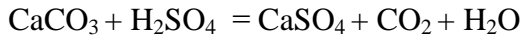


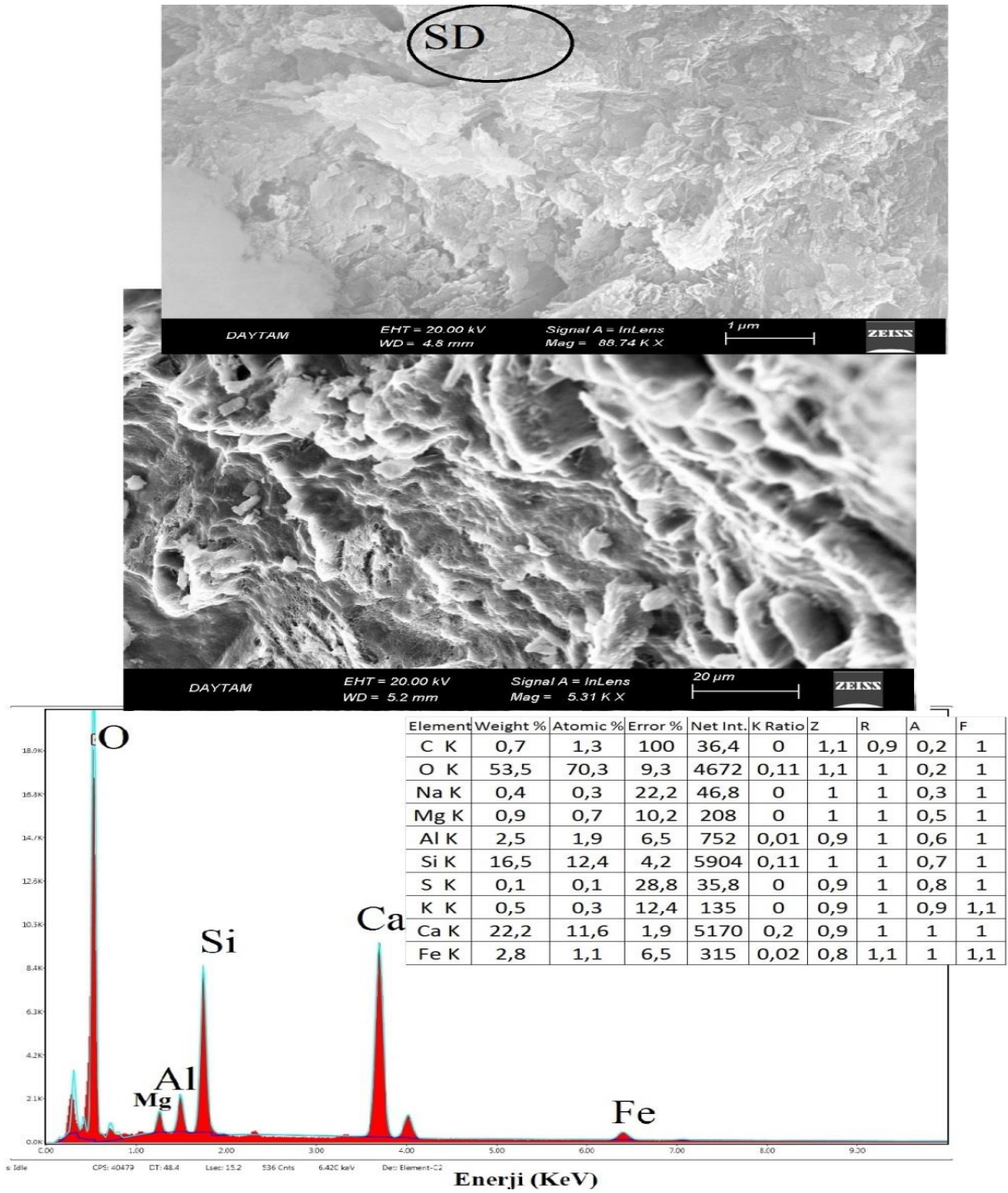
Şekil 4.35. Sülfat etkisinde kontrol numunesinde çatlak görüntüsü

- Sulfat saldırısının sonuçlarından birisi alçıtaşı oluşumu ve buna bağlı olarak görülen genişlemedir ve genişleme seramik maddelerde çatlak olarak görülmektedir.
- SEM görüntülerinden sulfata maruz bırakılmış kontrol numunesinde yapı tahribatı görülmektedir.
- SEM fotoğraflarında plak halinde yapı oluşumu ve çatlaklar gösterilmiştir.

Çatlakların oluşunu basınç ve eğilme dayanımında azalmalara ve betonda tahribata sebep olur.

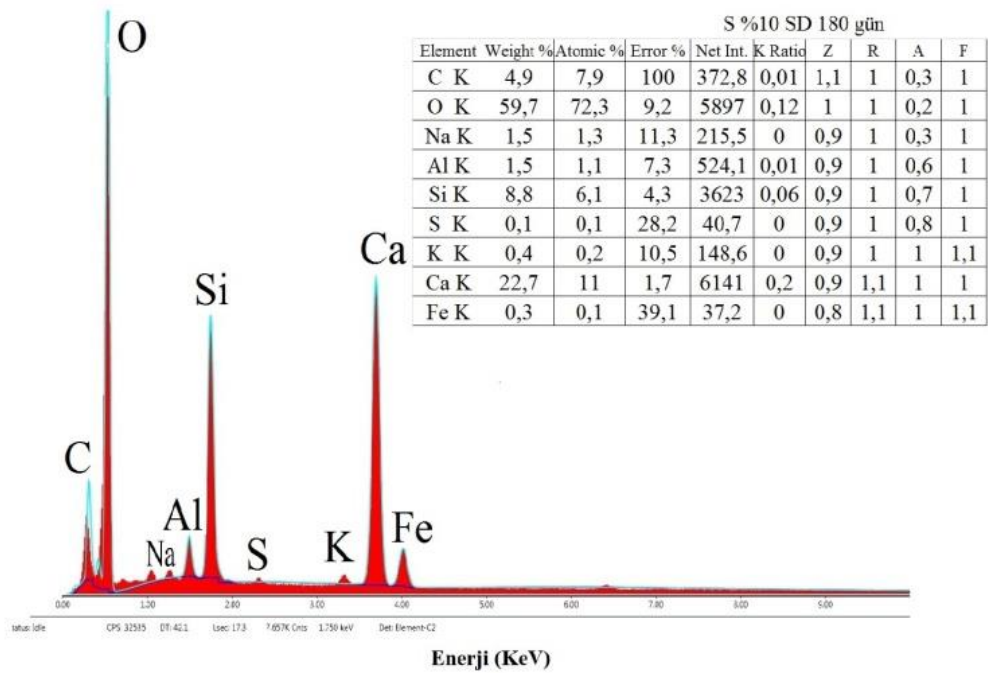
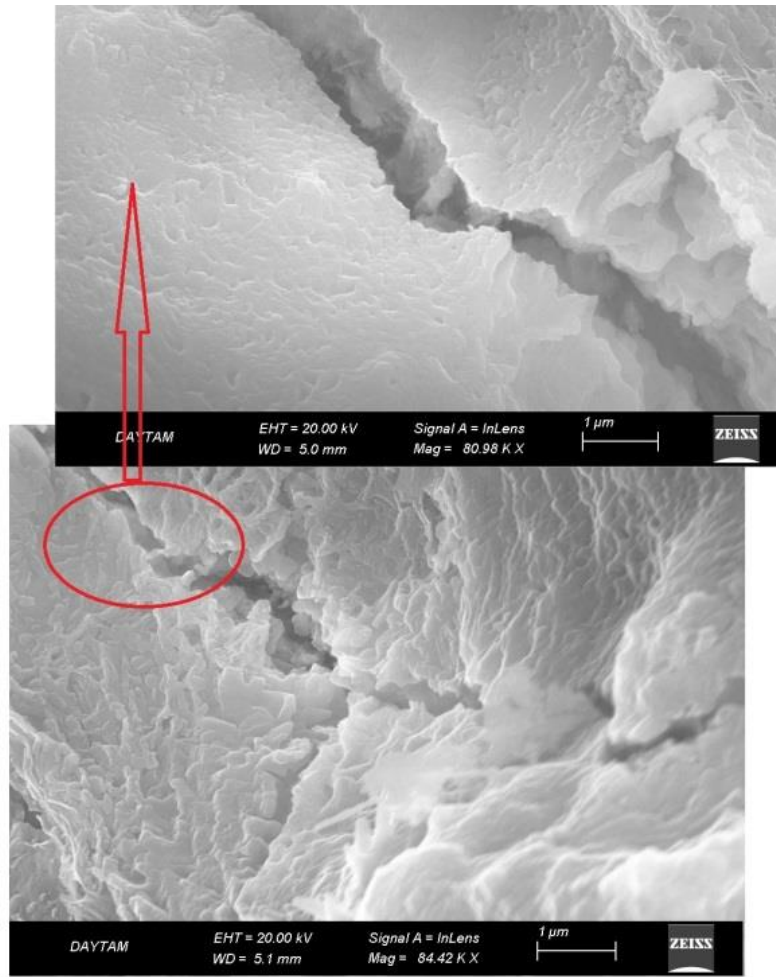
Portland çimentolarında sulfat dayanımı için C_3A miktarının %5'in altında olması gerekmektedir. C_3A 'nın reaktifliği düşük veya yüksek sulfatlı ortamlarda 1-4 saat hidatasyondan sonra Etrenjit ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$) oluşturur. Hasar; bağlayıcı maddenin suda eriyen reaksiyon ürünleri ile sürüklenip uzaklaşması veya reaksiyon ürünlerinin kristalleşmesi sonucu çatlama şeklinde olur. Sulfat iyonu tarafından meydana getirilen bazı zararlı reaksiyonlar şunlardır:





Şekil 4.36. %10 SD numunesinin arayüzeyi SEM görüntüsü

- SEM fotoğrafında SD'nin amorf yapısı görüntülenmiştir.
- EDS analizinde SD'nin yüksek miktarda SiO_2 içerdiği görülmüştür.
- SEM fotoğrafında SD'nin çok ince taneli olduğu görülmüştür.
- SD ilavesiyle betonda daha dolu ve sağlam bir arayüzey olduğu SEM görüntülerinden belirlenmiştir. Bu da basınç ve eğilme dayanımlarındaki artışın sebeplerinden birisi olarak değerlendirilmektedir.



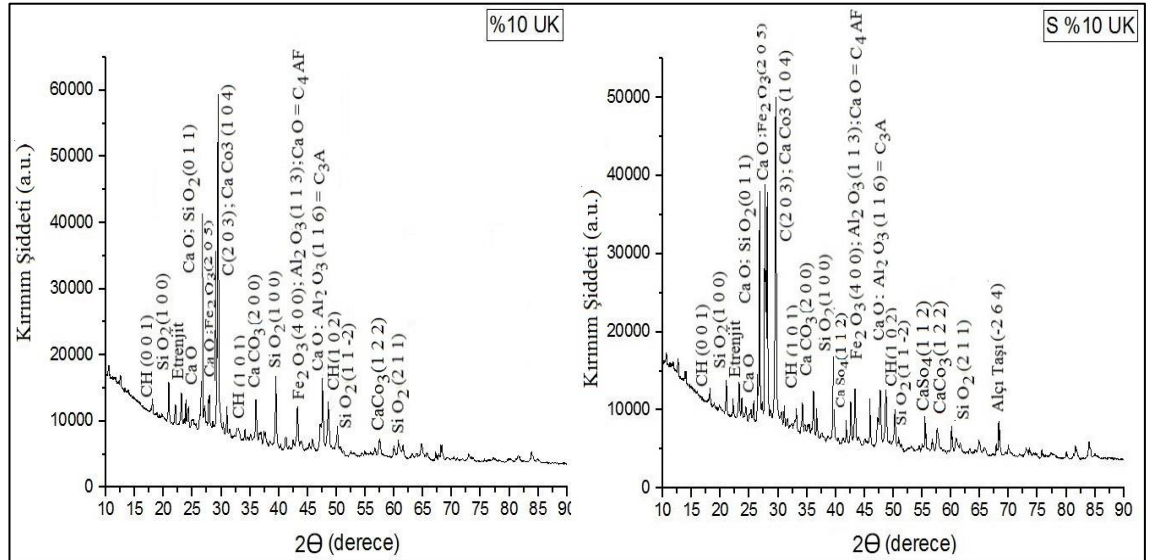
Şekil 4.37. Sülfat etkisinde %10 SD numunesinde çatlak oluşumu görüntüsü

- EDS analizinde Na_2O miktarını yüksek olduğu (ASTM standartlarına göre %0,6'dan fazla olmaması tavsiye olunur) belirlenmiştir.
- Alkaliler çok su emme özelliğine sahip oldukları için alkali – silika jeli oluşmakta ve bu nedenle betonda büyük genişleme meydana gelmektedir.
- SEM görüntüsünde Sülfatın SD katkılı numuneler üzerinde kontrol grubuna göre daha az tahribat yaptığı görülmektedir.
- SEM fotoğrafında genişleme ürünü, betonda çatlak olarak görüntülenmiştir.
- Arayüzeyde çatlak, basınç ve eğilme dayanımlarında düşüşe sebep olmuştur.

4.2.5.b. UK katkılı betonlar

a. XRD Ölçümleri

180 günlük %10 UK katkılı beton numuneleri üzerinde yapılan XRD ölçümleri Şekil 4.38'de verilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.



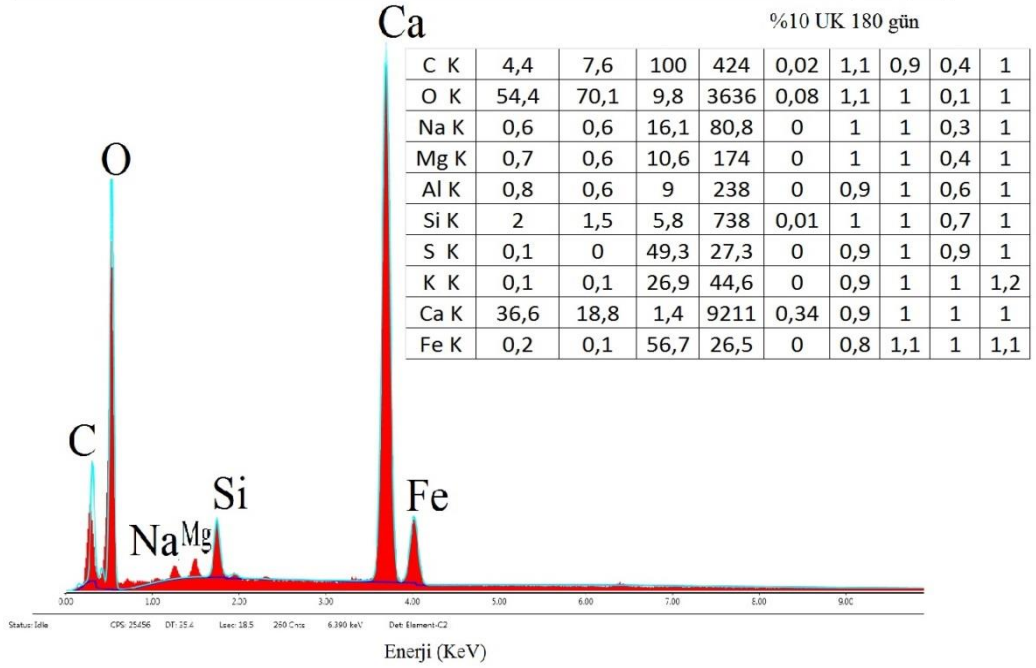
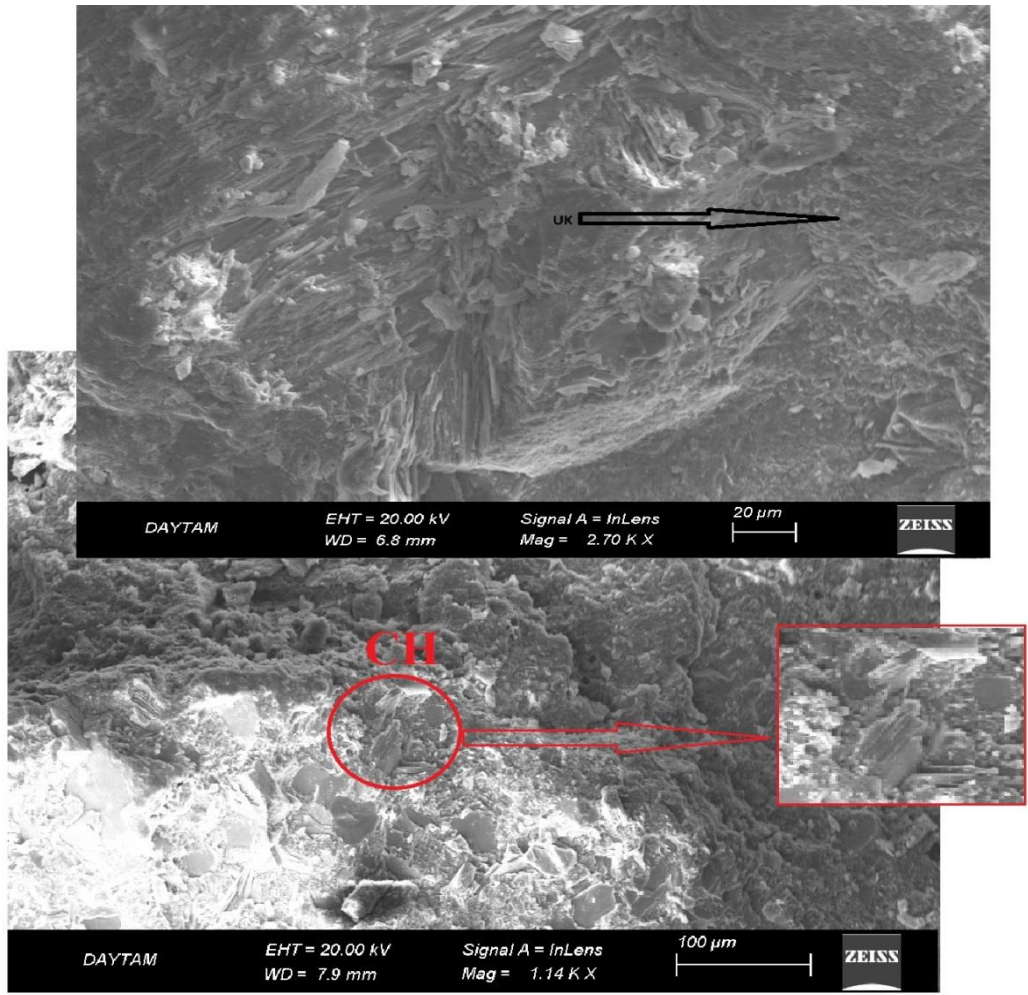
Şekil 4.38. %10 UK ve S %10 UK numunelerin XRD ölçümleri

- XRD ölçümünde %10 UK katkılı betonda C_4AF ve C_3A , kontrol grubuna göre daha şiddetli ve belirgin olarak ölçülmüştür.

- XRD ölçümünde sülfat %10 UK betonlarda CH ve C₃A üzerinde etkisini CaSO₄ ve alçıtaşı oluşturarak göstermiştir.
- Sülfat etkisine maruz kalmayan %10 UK katkılı numunenin ortalama tanecik boyutu 24,31 nm ve sülfata maruz kalan %10 UK katkılı numunenin ortalama tanecik boyutu 30,40 nm olarak ölçülmüştür.
- Sülfat etkisiyle %10 UK katkılı numunelerde, taneciklerde 6,09 nm miktarında genişleme görülmüştür. Genleşme oranı %25,04 olarak hesaplanmıştır.
- XRD ölçümlerine göre %10 UK katkılı numunelerde, genişleme oranında kontrol grubuna göre %24,18 azalma olduğu belirlenmiştir.

b. SEM Görüntüleri

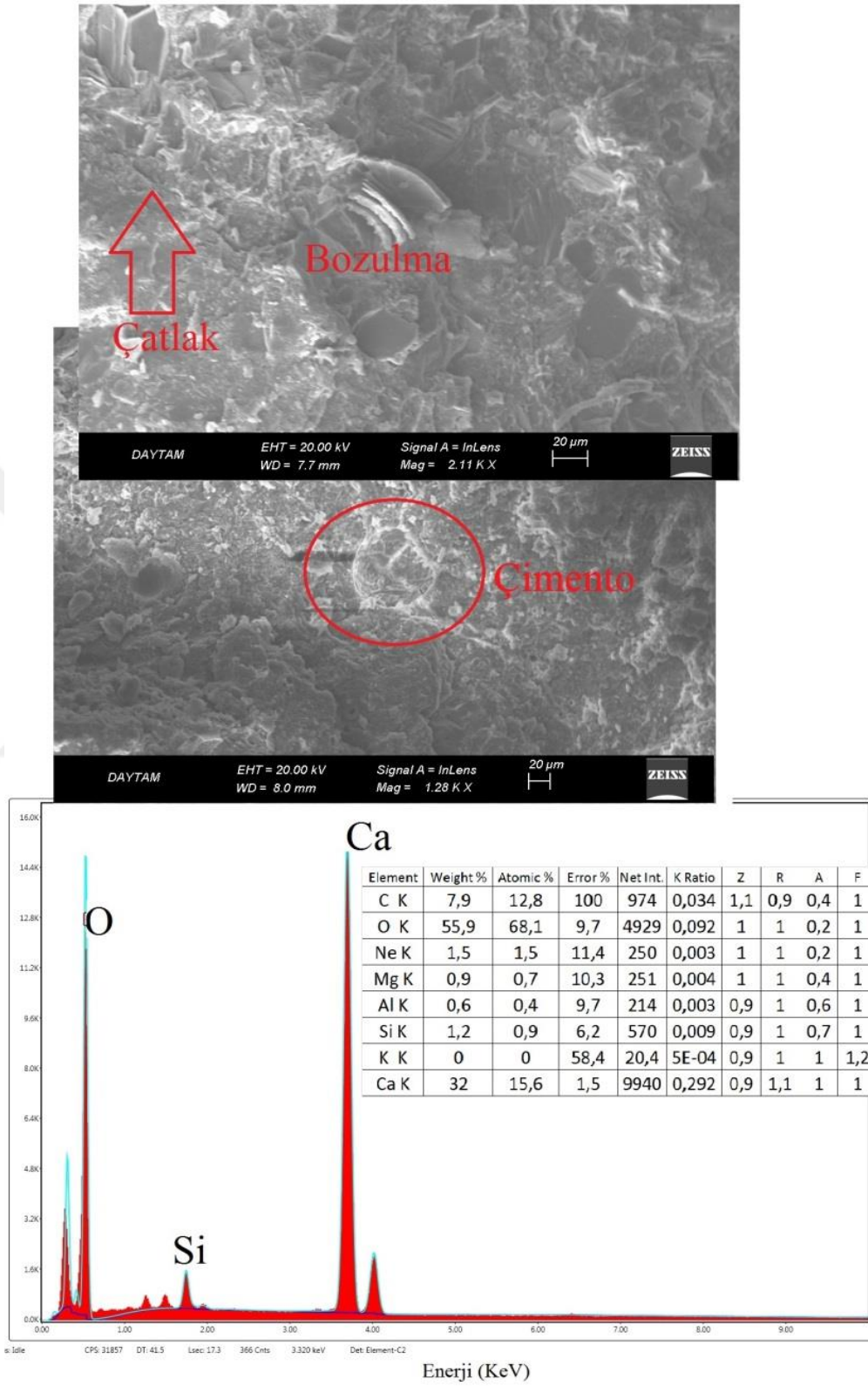
%10 UK katkılı beton numuneleri üzerinde SEM görüntüleri alınmış ve içyapı fotoğrafları Şekil 4.39- 4.40'da verilmiştir.



Şekil 4.39. %10 UK katkıli numunelerin SEM görüntüsü

- SEM fotoğrafında UK' ün amorf yapısı görüntülenmiştir.
- SEM görüntüsünde altıgen şekline CH oluştuğu görülmüştür.
- SEM fotoğrafında UK' ün boşlukları doldurduğu görüntülenmiştir.
- UK ilavesi betonda daha yoğun ve sağlam bir arayüzey oluşturması nedeniyle basınç ve eğilme dayanımlarında artışa sebep olmuştur.
- UK çok ince taneli (1-150 μm) olduğu için boşlukları doldurup ve betonda geçimsizliği artırır.





Şekil 4.40. Sülfat etkisinde %10 UK katkılı numunelerin SEM görüntüsü

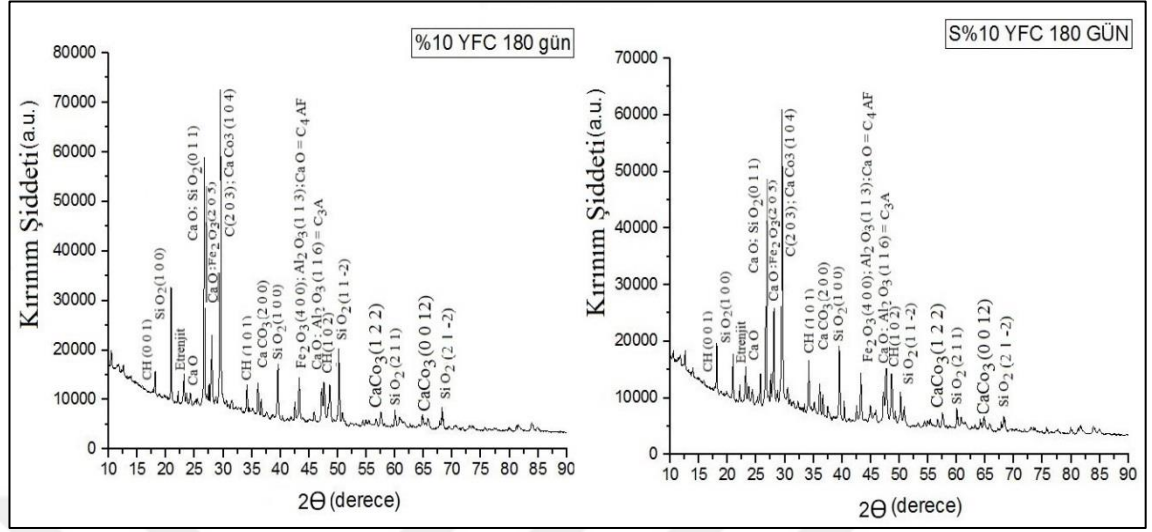
- Betonda su ihtiyacı, UK' ün inceliğine bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan UK' ün inceliğinin yaklaşık 0,5 μm olduğu SEM görüntüsünden belirlenmiştir. Çimento taneciklerinin daha iri boyutta olması sebebiyle bazı tanelerin tam olarak hidrate olmadığı görülmüştür.
- XRD ölçümünde görüldüğü gibi, sülfat iyonları betonda genişmeye sebep olur ve bunun sonucunda ve çatlak oluşur. Bu nedenle de basınç ve eğilme dayanımlarında azalma görülmüştür.
- SEM fotoğraflarında sülfat etkisiyle arayüzeyde bozulmalar ve içyapıda çatlaklar oluştuğu görülmektedir ve bunun sonucunda geçirimsizliğin arttığı söylenebilir.

Chindaprasirt *et al.* (2004) yaptıkları çalışmada F sınıfı uçucu kül kullanımının sülfat dayanıklılığını arttırdığını, uçucu kül inceliği arttıkça bu etkinin daha belirgin hale geldiğini göstermişlerdir. İri taneli uçucu kül (Blaine değeri 1800 cm^2/g) kullanımı halinde ise genişmelerin azalmadığı aksine arttığı ifade edilmiştir. Bu çalışmada da UK kullanılan numunelerde kontrol grubuna göre daha az miktarda genişme olduğu belirlenmiştir.

4.2.5.c. YFC Katkılı Betonlar

a. XRD Ölçümleri

180 günlük %10 YFC katkıli beton numuneleri üzerinde yapılan XRD ölçümleri Şekil 4.41'de gösterilmiş ve değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

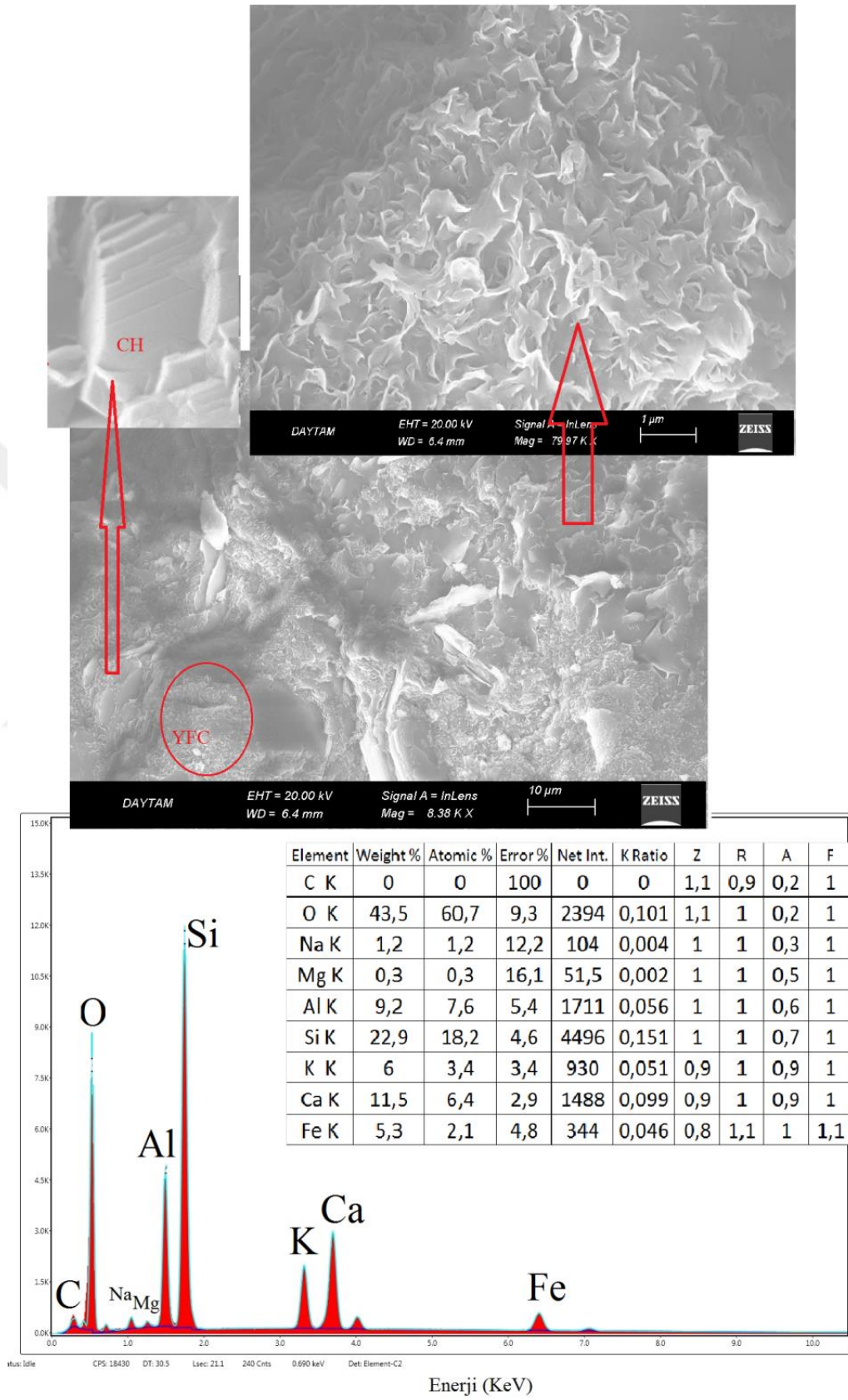


Şekil 4.41. %10 YFC ve S %10 YFC numunelerin XRD ölçümleri

- YFC öğütülerek kullanıldığında puzolanik reaksiyon gösterir.
- XRD ölçümünde YFC katkılı numunelerde sülfat etkisinin çok az olduğu belirlenmiştir.
- Genleşme miktarı sıfıra yakın olarak tespit edilmiştir. XRD ölçümlerine göre %10 YFC katkılı numunelerde, genleşme oranında kontrol numunesine göre %49,22 azalma görülmüştür.
- YFC katkılı betonlarda sülfat direncinin fazla oluşu; YFC ilavesiyle C₃A miktarında ve buna bağlı olarak durabilite açısından sorun oluşturan CH miktarında azalma sağlanmasyla açıklanabilir.
- Aynı zamanda YFC ilavesiyle daha yoğun bir mikro yapı ve homojen beton elde edildiğinden sülfat direnci artırılmış olabilir.

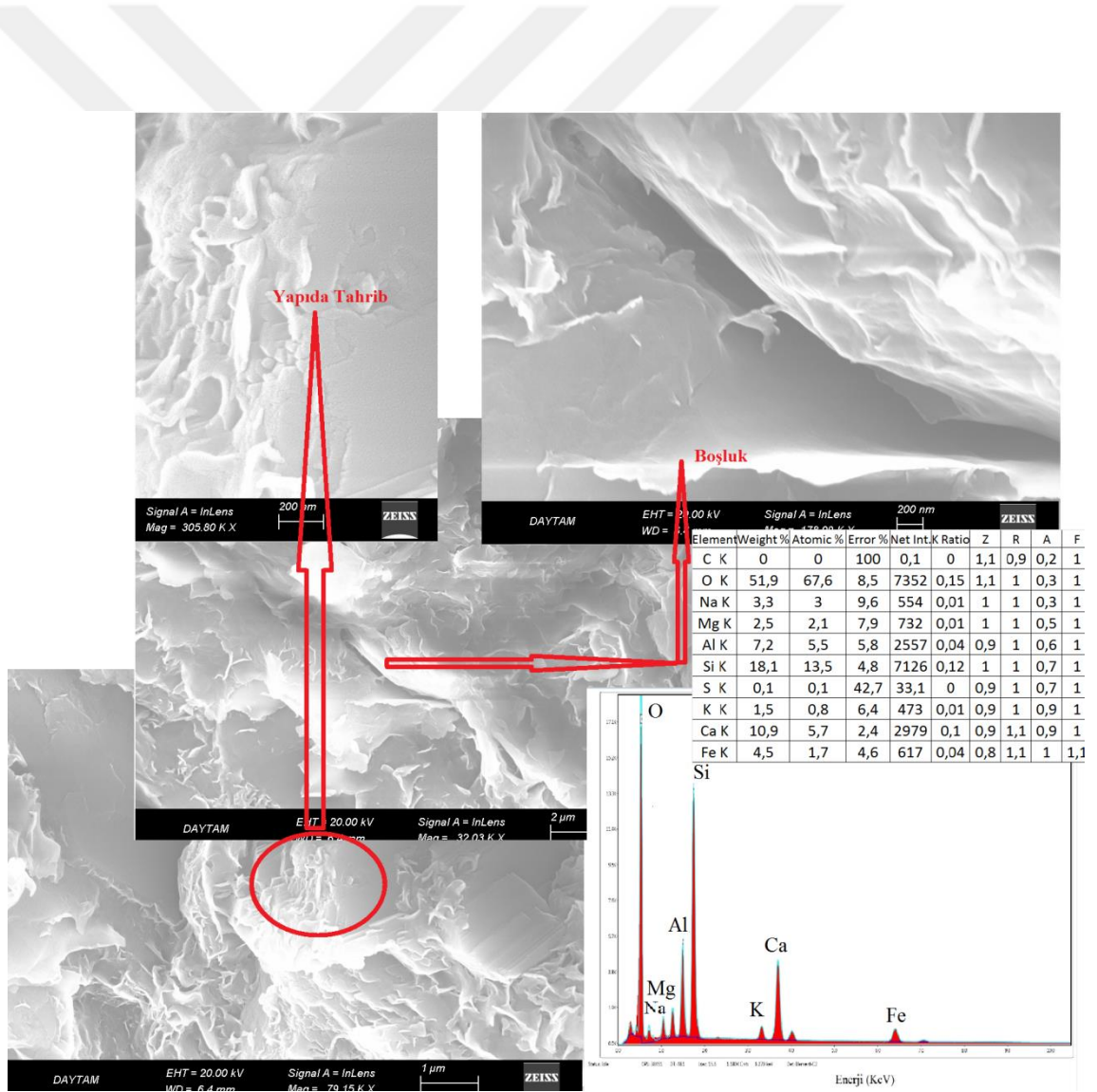
b. SEM Görüntüleri

%10 YFC mineral katkılı beton numuneleri üzerinde çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.42- 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.42. %10 YFC katkılı betonda SEM görüntüsü

- SEM fotoğrafında UK'ün amorf yapısı görüntülenmiştir.
- EDS analizinde YFC katkılı numunelerde yüksek miktarda Si, O ve Al tespit edilmiştir.
- SEM görüntüsünde altıgen şeklinde CH oluşumu görüntülenmiştir.
- SEM fotoğrafında YFC'nun boşlukları azalttığı görüntülenmiştir. 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 4.43. Sülfat etkisinde %10 YFC katkılı betonda SEM görüntüsü

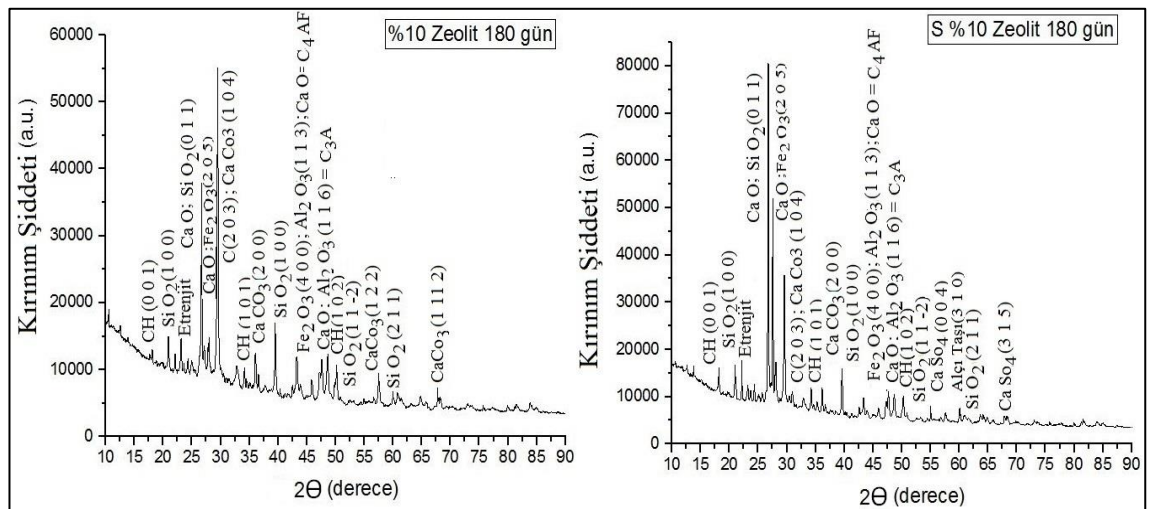
- YFC katkıli betonunun arayüzeyi kontrol numunesine göre çok daha yoğun olarak gelişmiştir.
- SEM görüntülerinde YFC'nun boşlukları doldurduğu görülmektedir. Bu nedenle numunelerde hem basınç ve hemde eğilme dayanımda kontrol grubuna göre artış tespit edilmiştir.
- Arayüzeyin daha yoğun olmasından dolayı SEM fotoğraflarında görüldüğü gibi sülfat etkisinin hidrasyon ürünleri üzerinde daha az hasara sebep olduğu söylene bilir.

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.

4.2.5.d. Zeolit katkıli betonlar

a. XRD Ölçümleri

180 günlük %10 zeolit katkıli beton numuneleri üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçları Şekil 4.44'te verilmiştir.

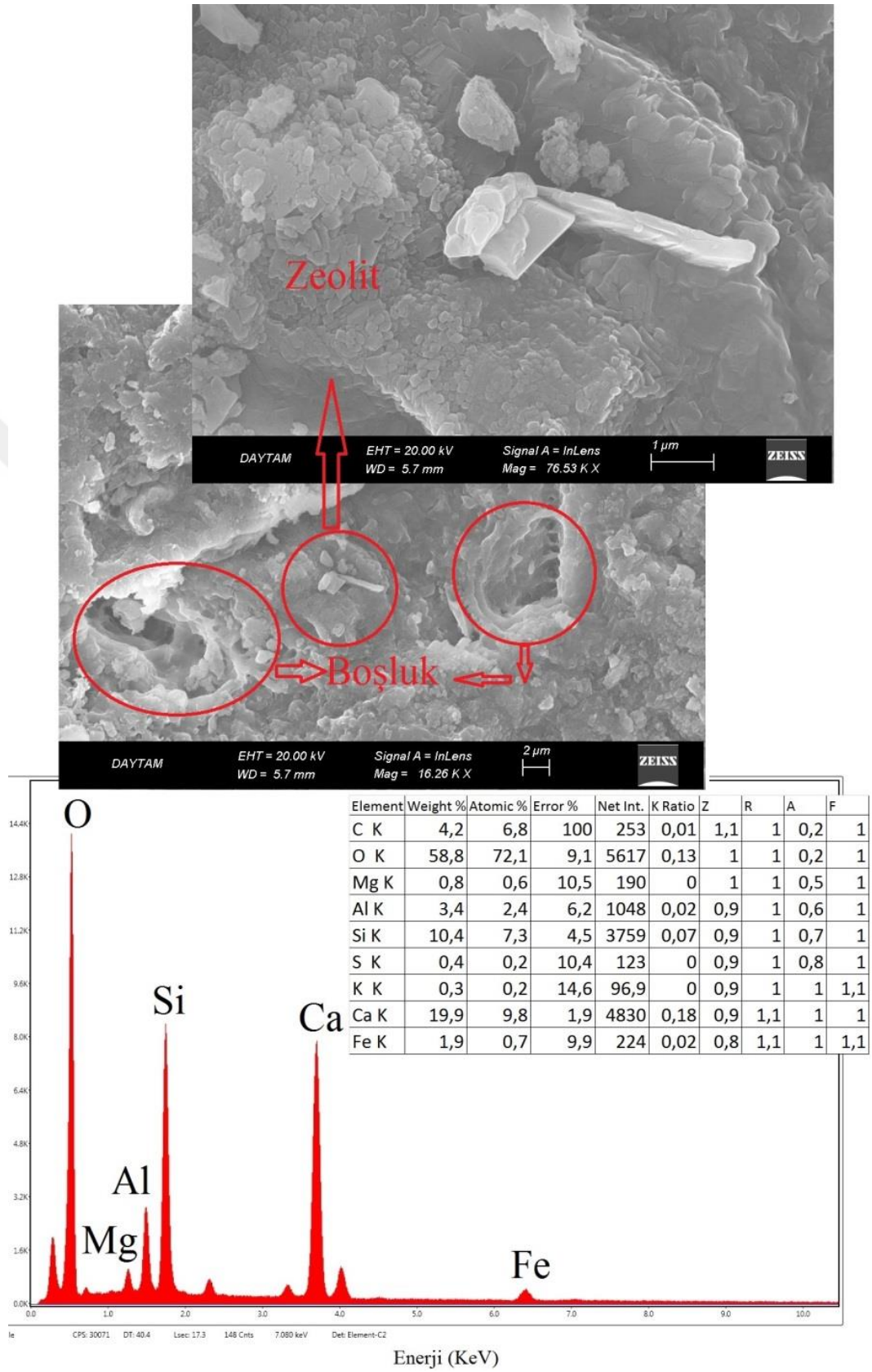


Şekil 4.44. %10 zeolit ve sülfatlı %10 zeolit numunelerin XRD ölçümleri

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

b. SEM Görüntüleri

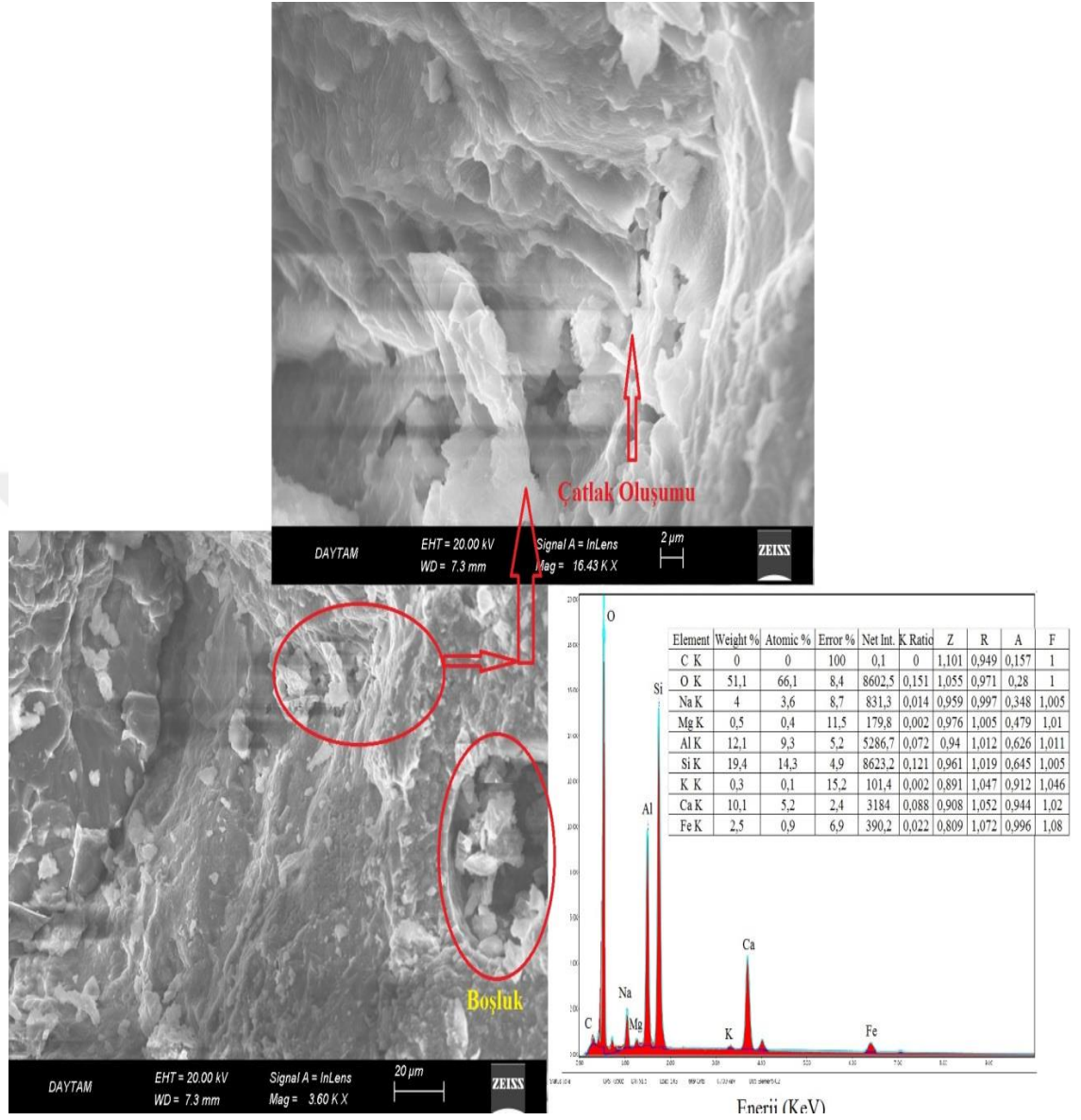
%10 zeolit katkıli beton numunelerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 4.45-4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.45. %10 zeolit katkılı numunelerin SEM görüntüsü

- Zeolit ince taneli olması sebebiyle betonda su ihtiyacını attırmıştır. Su miktarı her grupta sabit tutulduğu için zeolit katkılı grupların işlenebilirliği diğerlerine oranla azalmıştır. Kıvamın yetersiz olmasından dolayı yerleştirme boşlukları oluşmuş ve bunun sonucunda SEM görüntüsünde daha fazla boşluk görülmüştür.
- SEM görüntüsünden zeolit katkılı betonların homojen olmadığı söylenebilir.
- Zeolitin ilavesi betonda arayüzeyi daha sağlam hale getirdiği için basınç ve eğilme dayanımlarında artış göstermiştir.
- Öğütülmüş zeolit çok ince taneli olduğu için boşlukları doldurup ve betonda geçimsizliği artmaktadır.

Feng *et al.* (1990) zeolitik mineral katkılı betonlar üzerinde yaptığı çalışmada %10 oranında çimento yerine zeolit ikamesinin normal portland çimentolara göre basınç dayanımında %10-15 arasında artışa sebep olduğunu belirtmektedir.



Şekil 4.46. Sülfat etkisinde %10 zeolit katkılı numunenin SEM

- 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 C_3A 'la reaksiyona girerek, genişleme ve çatlak oluşumuna sebep olur. Böylece betonda basınç ve eğilme dayanımlarında kayıplar görülmüştür.
- SEM fotoğraflarında sülfat etkisiyle arayüzeyde bozulmalar ve içyapıda çatlaklar oluştuğu görülmektedir ve bunun sonucunda geçirimsizliğin arttığı söylenebilir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

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 büyükten küçüğe doğru; SD için 0,88, zeolit için 0,83, YFC için 0,78 ve UK için 0,75 olarak hesaplanmıştır.
2. Çalışmada üretilen tüm beton gruplarının normal ağırlıklı beton sınıfında olduğu belirlenmiştir. En yüksek birim ağırlık $2,32 \text{ g/cm}^3$ değeri ile kontrol numunesinde ölçülmüştür. Mineral katkı kullanılması sonucu katkı miktarına bağlı olarak betonların birim ağırlıkları azalmıştır.
3. SD kullanımı beton numunelerinin basınç dayanımlarında her yaşta kontrol grubuna göre artışa yol açmıştır. En fazla artış miktarı %5 SD içeren grupta tespit edilmiştir. Bu grubun basınç dayanımları kontrol grubuna göre 28 günde %42,06, 90 günde %42,12 ve 180 günde %46,32 oranında artmıştır. Puzolanik etkinin ilerleyen yaşlarda daha belirgin bir etki oluşturduğu düşünüldüğünde bu durum beklenen bir sonuç olarak görülmektedir.
4. SD ilavesinin sülfatlı ortamda basınç dayanımlarına etkisi incelendiğinde SD kullanılan grupların hepsinde sülfat direncinin kontrol grubuna göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. En iyi sülfat direncini %5 SD katkılı betonlar sergilemiştir. Sülfat etkisinden sonra 90 günde kontrol numunelerinin basınç dayanımı 30,85 MPa iken %5 SD katkılı betonlarda bu değer 44,37 MPa olarak belirlenmiştir. 180 gün için ise bu değerler sırasıyla 29,75 MPa ve 43,55 MPa'dır.
5. %10 oranında UK kullanımı beton numunelerinin basınç dayanımlarında her yaşta kontrol grubuna göre artışa yol açmıştır. Bu grubun basınç dayanımları kontrol grubuna göre 28 günde %30,47, 90 günde %33,33 ve 180 günde %32,77 oranında artmıştır. Ancak %20 UK kullanımı 28 günde az miktarda düşüşe sebep olmuş ilerleyen yaşlarda dayanım artışları gözlemlenmiştir. Bu durum puzolanik etkinin ilerleyen yaşlarda daha belirgin hale gelmesiyle açıklanabilir. UK miktarı %30'a

çıkıldığında her yaşta kontrol grubuna nazaran daha düşük dayanımlar elde edilmiştir. Bu sonuçtan hareketle UK ikame oranının %20'den sonra basınç dayanımına olumsuz etki yaptığı söylenebilir.

6. UK katkılı beton numunelerinin sülfat dirençleri incelendiğinde her yaşta ve her ikame oranında sülfata maruz kalan kontrol grubuna göre daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. En iyi sülfat direnci %10 UK katkılı beton numunelerinde tespit edilmiştir. Bu numuneler kontrol grubuna kıyasla 90 günde %33,19 ve 180 günde %31,53 oranında daha yüksek dayanımlar sağlamışlardır.
7. 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. Bu grup için kontrol numunelerine göre dayanım artışı oranları 28, 90 ve 180 gün için sırasıyla %38,49, %55,15 ve %56,57 olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları basınç dayanımı açısından YFC'nun %30'a kadar kullanıldığında olumlu etki yapacağını göstermektedir.
8. YFC katkılı beton numuneleri sülfat etkisinde her grupta kontrol numunelerine göre daha iyi sonuçlar göstermiştir. Sülfat etkisinde en yüksek direnci %10 YFC katkılı 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.
9. Zeolit katkılı 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 zeolit'in ideal kullanım oranının %10 olduğu söylenebilir.
10. Zeolit katkılı 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 zeolitin ideal kullanım miktarının %10 olduğu söylenebilir.

11. Mineral katkıların betonun eğilme dayanımları üzerinde etkileri incelendiğinde en yüksek dayanımların YFC katkılı 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. SD katkılı betonlarda ise %5 ve %10 oranlarında kontrol grubuna göre daha yüksek eğilme dayanımları elde edilirken %15 SD içeren numunelerin eğilme dayanımları kontrole göre çok az miktarlarda azalmıştır. UK katkılı betonlar da benzer olarak %10 ve %20 kullanım oranlarında eğilme dayanımlarında daha yüksek değerler vermesine karşın %30 UK katkılı betonların eğilme dayanımları daha düşük olmuştur.
12. Betonların sülfat etkisinden sonra eğilme dayanımlarını incelendiğinde en iyi sülfat direncinin YFC ve SD katkılı numunelerden elde edildiği görülmüştür. YFC her oranda eğilme dayanımlarına artışa yol açmış ve en yüksek dayanım artışı kontrole göre %13,86 daha fazla dayanım değeri ile %10 YFC içeren 180 günlük numunelerde belirlenmiştir. Bu değer %5 SD katkılı grupta %4,41 olarak tespit edilmiştir. UK ve zeolit ise düşük ikame oranlarında olumlu sonuç vermesine karşın daha yüksek oranda kullanılması durumunda eğilme dayanımlarının sülfat etkisinden sonra kontrol grubuna göre azaldığı görülmüştür.
13. Çalışmada kullanılan tüm mineral katkıları; uygun değerlerde kullanıldıklarında, gerek filler etkisiyle betonda boşlukları doldukları için gerek de puzolanik özelliklerinden dolayı betonda basınç ve eğilme dayanımlarında artışa sebep olmuşlardır.
14. Mineral katkıları durabilite açısından sorun oluşturan CH miktarını azalttıklarından dolayı betonda sülfat direncini artırmışlar ve uygun oranlarda kullanıldıklarında, sülfat etkisinden sonra betonun hem basınç hem de eğilme dayanımlarında kontrol grubuna göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir.
15. Bu çalışmada beton dayanımları ve sülfat dirençleri göz önüne alındığında; SD, UK, YFC ve zeolit için uygun değer kullanım oranları %5-%10, %10, %10 ve %10 olarak belirlenmiştir. Basınç ve eğilme dayanımlarından yüksek değerler 180 günde %5 SD ve %10 YFC katkılı betonlarda belirlenmiştir.

16. XRD ölçümlerinden hesaplanan genişleme miktarlarına göre en iyi sonucu YFC katkıli betonların verdiği belirlenmiştir.

Bu sonuçlar ışığında; mineral katkıların uygun oranlarda çimento ile ikame edilmesi sonucu betonda hem basınç ve eğilme dayanımı hem de sülfata karşı direnç açısından olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Ayrıca çoğunlukla atık malzeme olan mineral katkıların beton üretiminde kullanımı dayanım ve kalıcılık özelliklerindeki iyileşmenin yansira ekonomik ve çevresel etkiler açısından da önemlidir. Bu sebeple bu tür katkıların beton teknolojisinde kullanımı fayda sağlayacaktır. Bu konu hakkında bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda X-Işını Difraktometresi kullanılarak CSH jelinin oluşumunu inceleyecek analizlerin yapılması araştırmacılara tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, H., Gürer, C., 2006. Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agregata Olarak Değerlendirilmesi, imo Teknik Dergi, 3943-3960, Yazı 261.
- Akman M.S.,1992. Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- Anonim, 1975. TS 25, Tras. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 5s.
- Anonim, 1979. TS3285 Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini Deneyi (Orta Noktasından Yüklenmiş Basit Kiriş Metodu ile).
- Anonim, 1999a. TS 3530 EN 933-1, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu.
- Anonim, 1999b. TS EN 1097-3, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler Bölüm 3: Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini, Nisan.
- Anonim, 1999c. TS EN 933-3, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 3: Tane şekli tayini- Yassılık endeksi.
- Anonim, 2002a. TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve su emme oranı Tayini, Nisan.
- Anonim, 2002b. TS EN 12390-7, Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini, Nisan.
- Anonim, 2002c. TS EN 197-1/Mart. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri.
- Anonim, 2003. TS 706 EN 12620, Beton agregaları ve deneyleri.
- Anonim, 2005. TS EN 450-1, Uçucu Kül – Betonda Kullanım İçin- Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 35s.
- Anonim, 2008. <http://www.wtndt.metu.edu.tr>.
- Anonim, 2016a. <http://www.kutahyacimento.com/en/pulverized-fly-ash>.
- Anonim, 2016b. <http://daytam.atauni.edu.tr/>.
- Anonim, 2016c. https://www.selcuk.edu.tr/ileri_arge/birim/web/sayfa/ayrinti/5874/tr.
- Anonymous, 1989. ASTM C 1012, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia.
- Anonymous, 1991. ASTM C 618, Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”, ASTM, Philadelphia.
- Anonymous, 1992. CEB (Comite Euro-International du Beton). Durable Concrete Structures, Lausanne: Thomas Telford Ltd.
- Anonymous, 1994a. ASTM C 311, Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland – Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standard.
- Anonymous, 1994b. ASTM C 618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards.
- Anonymous, 2001. ASTM C494/C494 M Type F, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.

- Anonymous, 2007. ASTM D 422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- Anonymous, 2013. ASTM C1017 / C1017M-13e1, Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Atış, C.D., Özcan, F., Karahan, O., Bilim, C., Sevim, U.K., Demir, A., 2010. Silis Dumanının Beton Teknolojisinde Kullanımı, Ulusal Meslek Yüksekokulları Öğrenci Sempozyumu, 21-22 Ekim -Duzce.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), D.E.Ü.Müh. Fak. Yayın No. 298, İzmir.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.
- Bayoux, J.P., Letourneux, J.P., Marcdargent, S.,Verschaeve, M., 1990. Acidic Corrosion of High Alumina Cement, Seminar High Alumina Cement, London.
- Bensted, J., 1999. Thaumassite – background and nature in deterioration of cements, mortars and concretes. *Cem Concr Compos*;21(2):117–21.
- Bertron, A., Escadeillas, G., Duchesne, J., 2004. Cement pastes alteration by liquid manure organic acids: chemical and mineralogical characterization, *Cem. Concr. Res.* 34, 1823–1835.
- Bertron, J., Duchesne, G.E., 2005. Attack of cement pastes exposed to organic acids in manure, *Cem. Concr. Compos.* 27,898–909.
- Beycioğlu, A., Başıyigit, C., Kılınçarslan, Ş., 2010. Silis Dumanının Beton Teknolojisinde Kullanımı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14-2, 200-205.
- Bingöl, A.F., 2007. Beton-Donatı Aderansına Yüksek Sıcaklıkların Etkisi, Doktora Tezi, Atatürk University, Erzurum, Turkey.
- Brown, P.W., Hooton, R.D., Clark, B.A., 2004. Microstructural changes in concretes with sulfate exposure, *Cem. Concr. Compos.* 26, 993–999.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Sümer, M., Uysal, M., 2000. Zeolit Katkılı Çimentoların Özelliklerinin İncelenmesi.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., Sirivivatnanon, V., 2004. Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, s.1087-1092.
- Colella, C., Cejka, J., van Bekkum, H., Corma, A. F., 2007. Schueth (Eds.), *Introduction to Zeolite Science and Practice*, Elsevier, Amsterdam, 999–1035.
- Colella, C., Gennaro, M. de', Aiello, R., 2001. Use of Zeolitic Tuff in Building Industry, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry; Natural Zeolites*, ed: D.L. Bish, D.W. Ming, Mineralogical Society of America, Vol. 45, Chapter 16, pp:551-587.
- Çelik, O., 2004. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Atık Çamur Katkılarının Çimento Dayanımlarına Etkileri, Hazır Beton Kongresi Bildiriler Kitabı.
- De Belie, N., Debruyckere, M., Van Nieuwenburg, D., De Blaere, B., 1997. Attack of concrete floors in pig houses by feed acids: influence of fly ash addition and cement-bound surface layers, *J. Agric. Eng. Res.* 68, 101–108.
- De Belie, N., Verschoore, R., Van Nieuwenburg, D., 1998. Resistance of concrete with limestone and or polymer additions to feed acids, *Trans. ASAE* 41, 227–233.

- De Belie, N.V., De Coster, D., Van, N., 1997. Use of fly ash or silica fume to increase the resistance of concrete to acid attacks, *Mag. Concr. Res.* 49, 337–344.
- Doğruyol, M., ve Karaşin, H., 2011. Sülfatın Beton ve Betonarme Elemanlara Olumsuz Etkisi.
- Drzaj, B., Hocevar, S., Slokan, M., 1978. Kinetics and Mechanism of Reaction in the Zeolitic Tuff-CaO-H₂O Systems at Increased Temperature, *Cement and Concrete Research.*, Vol.8, No.6, pp:711-720.
- Ekinci, C. E., 1993. Elâzığ Ferrokrom Fabrikası çürüfunun Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara İMO, 243-253.
- Emiroğlu, M., Koçak, Y., Subaşı, S., 2011. Yüksek Fırın Çürüfunun Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Elazığ*.
- Erdoğan T.Y., 2004. Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton. ODTU Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.S., Ankara, 741s.
- Erdoğan, Ş., Kurbetçi, Ş., 2003. Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426 (4): 115-120.
- Feng, N., and Peng, G., 2005. Applications of natural zeolite to construction and building materials in China, *Construction and Building Materials* 19, 579–584.
- Feng, N.Q., Li, Z., Zang, X. W., 1990. High – strength and Flowing Concrete with a Zeolite Mineral Admixture, *Cement and Aggregates*, ASTM. Vol. 12, pp. 61-69.
- Franus, W., and Dudek, K., 1999. Clay minerals and clinoptilolite from the Variegated Shales Formation in the Skole Unit, Polish Flysch Carpathians, *Geologica Carpathica* 50, 23–24.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı Ve Yüksek Fırın Çürüfunun Beton Ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Hauser A., Eggenberger U., Mumenthaler T., 1999. Fly Ash From Cellulose Industry as Secondary Raw Material in Autoclaved Aerated Concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, 297-302.
- Higashiyama, H., Sappakittipakorn, M., Sano, M., Yagishita, F., 2012. Chloride ion penetration into mortar containing ceramic waste aggregate. *Constr Build Mater*; 31:48–54.
- 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.
- Higashiyama, H., Yamauchi, K., Sappakittipakorn, M., Sano, M., Takahashi, O., 2013. A visual investigation on chloride ingress into ceramic waste aggregate mortars having different water to cement ratios. *Constr Build Mater*; 40:1021–8.
- 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*; 23:3451–6.

- Irassar, E., Di Maio, A., Batic, O., 1996. Sulfate attack on concrete with mineral admixtures. *Cem Concr Res*;26(1):113–23.
- Irassar, EF., 2009. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – areview. *Cem Concr Res*;39(3):241–54.
- Jahren, P., 1983, Use of Silica Fume in Concrete, ACI SP-79, Vol. 1, 625-645.
- Jallad, KN., Santhanam, M., Cohen, MD., 2003. Stability and reactivity of thaumasite at different pH levels. *Cem Concr Res*;33(3):433–7.
- Kara, K., 2008. Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi İle P-Tipi Zno (Çinko Oksit) Üretimi ve Yapısal Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Karpuz, O., Mutlu, A.M., Tanrıverdi, T., 2015. Silis Dumanı ve İnce Kumun Poroz Kaplama Betonu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, konferans, April.
- Koca, C., 1996. Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Cüruf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı.4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB inşaat Mühendisleri Odası, istanbul, s.381-394.
- Larsen, E.S., Lauridsen, J.L., Eriksen, K., Hansen, O.R., and Mølgaard, T., 1993. Durability of Concrete in the Ryå Bridge, Changes of Properties in Concrete with Silica Fume Between Years 1981 and 1993. Report 6; The Danish Road Department: Roskilde, Denmark, 16–22.
- Lee, ST., Hooton, RD., Jung, H-S., Park, D-H., Choi, CS., 2008. Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature. *Cem Concr Res*;38(1):68–76.
- 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.
- Macphee, DE., Barnett, SJ., 2004. Solution properties of solids in the ettringite–thaumasite solid solution series. *Cem Concr Res*;34(9):1591–8.
- Malhotra, V.M. 1997. Mineral Admixtures. *Concrete Construction Engineering Handbook*, Naway Edward G. CRC Press, New York, pp.27-36.
- 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.
- Mehta, P.K., Monteiro P.J.M., 1997. *Concrete Microstructure, Properties and Materials*, Indian Edition, India.
- Mindness, S., Young, J. F., 1981. *Concrete*, New Jersey: Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs,
- Monteiro, P.J.M., and Kurtis, K.E., 2003. Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate Attack, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, p.987-993.
- 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.
- Neville, A.M., 1997. *Properties of Concrete*, Final Edition, Longman Ltd, England.
- Neville, A.M., 1990. *Properties of Concrete Third Edition*, Longman Scientific and Tecnical, New York.
- Neville, A.M., and Brooks, J.J., 2001. *Concrete Technology*, Revised Edition, Pearson Education Limited.

- Osman, Ü., İsmail, D., Kadir, G., Adnan, A.M., Serhat, B., 2011. Uçucu Kül ve Silis Dumanının Gazbeton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Afyonkarahisar. i.demir, k.güçlüer, a.aker, s.başpınar, , hazır beton kogeresi, bidiriler kitabı,439-448.
- Özlem, B.S., Bideci, A., Oymae, S., 2013. Zeolit Katkılı Çimentoların Özelliklerinin İncelenmesi.
- Papwort, H.F., 1997. Production of Silica Fume, M.I.E (Australia) Civil Engineering.
- 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.
- Perraki, T., Kontori, E., Tsivilis, S., Kakali G., 2010. The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements, *Cement & Concrete Composites* 32, 128–133.
- Perraton, D., de Larrard, F., and Ai'tcin, P. C., 1994. Additional Data on the Strength Retrogression of Air-cured Silica Fume Concretes. 2nd CANMET/ACI conference on durability of concrete: Nice, France, 2-15.
- Peterson, O., 1976. Interaction Between Silica Fume and Standard Portland Cement in Mortar and Concrete. *Cementa Ltd.: Malmö, Sweden*, 1– 8.
- Richardson, D. N., 2007. Strength and Durability Characteristics of a 70% Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) Concrete Mix., Missouri Department of Transportation Organizational Results, Project No. R199-035, MoDOT, University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, 134. Available: <http://library.modot.mo.gov/RDT/reports/Ri99035/or06008.pdf>.
- 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.
- Sanytsky, M., Sobol, Kh., Markiv, T., 2010. [Modified Composite Cements], Lviv Polytechnic National University Publishing House, Lviv, (in Ukrainian).
- Schmidt, T., Lothenbach, B., Romer, M., Neuenschwander, J., Scrivener, K., 2009. Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements. *Cem Concr Res*;39(12):1111–21.
- Senthamarai, R., Devadas Manoharan, P., Gobinath, D., 2011. Concrete made from ceramic industry waste: durability properties. *Constr Build Mater*; 25:2413–9.
- Sersale, R., 1995. Zeolite Tuff As A Pozzolanic Addition In The Manufacture Of Blended Cements, *Natural Zeolites '93*, (ed: D. W. Ming and F. A. Mumpton), pp:603-612
- SHI, C., 2004. Steel Slag – Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.16, No.3, pp.230-236.
- Skaropoulou, A., Kakali, G., Tsivilis, S., 2012. Thaumosite form of sulfate attack in limestone cement concrete: the effect of cement composition, sand type and exposure temperature. *Constr Build Mater*; 36:527–33.
- Skaropoulou, A., Tsivilis, S., Kakali, G., Sharp, J.H., Swamy, R.N., 2009. Thaumosite form of sulfate attack in limestone cement mortars: A study on long term efficiency of mineral admixtures. *Constr Build Mater*;23(6):2338–45.

- 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):628–36.
- Taylor, H., 1997. *Cement Chemistry*. edition Thomas Telford Publishing, London.
- Tohumcu, İ., Ferhat A.B., 2013. Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri ve Basınç Dayanımları, Deü Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Cilt: 15 sayı: 2 sh. 31-44 Ocak.
- Topçu, İ.B., ve Kaval, M., 2001. Betonda Silis Dumanı Kullanımının Ekonomik Analizi Yaparak, Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim. Fak. Dergisi C.XIV, S.1.
- Tosun, K., Felekoglu, B., Baradan, B., Altun, A., 2009. Effects of limestone replacement ratio on the sulfate resistance of Portland limestone cement mortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations. *Constr Build Mater*;23(7):2534–44.
- Tosun-Felekoglu, K., 2012. The effect of C3A content on sulfate durability of Portland limestone cement mortars. *Constr Build Mater*; 36:437–47.
- Tsivilis, S., Sotiriadis, K., Skaropoulou, A., 2007. Thaumasite form of sulfate attack (TSA) in limestone cement pastes. *JEur Ceram Soc*;27(2-3):1711–4.
- Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu, C., Çulfaz, A., Uzal, B., 2007. Doğal Zeolitlerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, Ankara, Ekim.
- Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu, C., Çulfaz, A., Uzal, B., 2007. Doğal Zeolitlerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, Proje No: 104M393.
- Türk, K., Karataş, M., ve Ulucan, Z. Ç., 2006. Farklı oranlarda F sınıfı uçucu kül içeren kendiliğinden sıkışan betonun dayanım özellikleri. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Elâzığ, 513–520.
- Uysal, M., 2010. Mineral Katkılar Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özelliklerinin ve Dayanıklılığının incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Uzal, B., ve Turanlı, L., 2012. Blended cements containing high volume of natural zeolites: properties, hydration and paste microstructure, *Cement and Concrete Composites* 34,101–109.
- Vu, D., Stroeven, P., Bui, V., 2001. Strenght and durability aspects of calcsined caolin – blended portland cement mortar and concrete, *Cem. & Conc. Comp.*, 23, P 471-478.
- Wongkeo, W., Chaipanich A., 2010. Compressive Strenght, Microstructure and Thermal Analysis of Autoclaved and A ir Cured Structural Lightweight Concrete Made With Coal Bottom Ash and Silica Fume, *Materials Science and Engeneering*, A 527, 3676-3684.
- Yalçın, H., Gürü, M., 2006. Çimento ve Beton, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Yaprak, H., Şimşek, O., Aruntaş, H.Y., 2004. Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Süper Özelliklerine Etkisi Akışkanlaştırıcı Katkılı BetonÖzelliklerine Etkisi, Ankara. Beton konferansı.707-715.İstanbul, Türkiye.
- 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.
- Yazıcıoğlu, S., Arıcı, E., Gönen, T., 2003. Elâzığ Ferrookrom Cürufunun Betonda Karbonatlaşmaya Etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul İMO, 261-268.

- Yazıcıoğlu, S., Gonen, T., Çobanoğlu, Ö.C., 2005. Elâzığ Ferrookrom Cürufunun Beton Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der., 17(4): 681-685.
- Yeğinobalı, A., 1999. Betonun Dayanıklılığı II, Kimyasal Etkenler, TCMB Çimento Araştırma Enstitüsü Seminer Notları, Ankara.
- Yılmaz, A.H., ve Beycioğlu, A., 2014. Puzolanik Zeolit (Klinoptilolit) KatkılıÇimentoların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, El- Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 1, No: 2, (57-67).
- Yogendran, V., Langan, B.W., and Ward, M.A., 1991. Hydration of Cement and Silica Fume Paste, Cement and Concrete Research, 21(5), 691–708.
- Yücel, H., 1987. Zeolitler ve Uygulama Alanları, III. Ulusal Kil Sempozyumu, pp:391-402.



ÖZGEÇMİŞ

H. Haghghipour Balanji, 1972 yılında İran'da, Urumiye ilinde doğdu. 1991 yılında Urumiye, Tohid Fen ve Teknik'te Lisesi'ni bitirdi. Aynı yıl girdiği Tahran, Recai Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden, 1993 yılında ön lisans olarak mezun oldu. 1997 yılında Hoy Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden lisans mezunu oldu. 2007 yılında Mahabat Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisansını tamamladı. 2013 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde doktora başladı. Evli ve üç çocuk babasıdır.