



ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI KATKILI YÜKSEK
DAYANIMLI BETONLARIN KALICILIK ÖZELLİKLERİ**

**Onur PAŞA
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Cenk KARAKURT**

BİLECİK, 2018

Ref.No:10206481



ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI KATKILI YÜKSEK
DAYANIMLI BETONLARIN KALICILIK ÖZELLİKLERİ**

**Onur PAŞA
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Cenk KARAKURT**

BİLECİK, 2018



ANADOLU UNIVERSITY



**BİLECİK SEYH EDEBALI
UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Department of Civil Engineering**

**DURABILITY PROPERTIES OF HIGH STRENGTH
CONCRETES PRODUCED WITH FLY ASH AND
SILICA FUME**

**Onur PAŞA
Master's Thesis**

**Thesis Advisor
Assoc. Prof. Dr. Cenk KARAKURT**

BİLECİK, 2018



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS

JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 28/06/2018 tarih ve 35..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 13/07/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Onur PAŞA'nın "Uçucu Kül ve Silis Dumanı Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonların Kalıcılık Özellikleri" başlıklı tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Cenk KARAKURT

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Kıvanç TAŞKIN

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun/..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tezimde kendisiyle çalışma fırsatı bulduğum, bilgi ve tecrübesinden faydalandığım, zamanını ve desteğini esirgemeyen çok değerli hocam, tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Cenk KARAKURT 'a ve 2017-01.BŐEÖ.03-06'nolu proje ile çalışmalarına destek sunan Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne minnet ve Őükranlarımı sunarım.

Ayrıca çalışmam süresince yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm başta, Dr. Öğr. Üyesi Özlem ÇALIŐKAN, Öğr. Gör. Turğut KAYA, Arő. Gör. Murat ARAS ve İnşaat Mühendisliğı Bölümü Laboratuvar çalışanlarına, Bilecik Sançım Çimento bölge sorumlusu Vedat Çakır'a, inşaat mühendisleri Ömer Tekgöz, Nimet Toktay, Ömer Tatar'a ve çalışmam sırasında emeğı geçen herkese teşekkür ederim. Son olarak, beni yetiőtiren ve bu günlere getiren, her zaman destek ve yardımlarını esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Onur PAŞA
2018

ÖZET

Beton, insanlık tarihinin gelişiminde ve eski medeniyetlerin günümüze kadar gelebilen eserlerinde önemli bir yere sahiptir. Günümüzde çok geniş bir kullanım alanı olan beton, sudan sonra dünyada en fazla tüketilen malzeme haline gelmiştir. Her ne kadar yüksek dayanımlı beton yeni bir malzeme olarak düşünülse de çok uzun yıllardır gelişimini sürdürmektedir. Çok yönlü titiz kalite kontrolü gerektiren Yüksek Dayanımlı Betonlar pahalıdır. Tümüyle klasik normal betonların yerini alamazlar ancak yüksek dayanımlı betonların sorunları çözüldükçe kullanım alanları genişleyecektir. Özellikle sürdürülebilir kalıcılığın daha önemli olduğu yapılarda yüksek dayanımlı betonlar aranılacak ve kullanılacaktır.

Bu çalışmada, yüksek dayanımlı betonların ileri yaş performansının iyileştirilmesi için kullanılacak uçucu kül ve silis dumanı katkılarının aşınma, donma-çözülme ve çelik betonarme donatı korozyonu gibi kalıcılık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Böylece yüksek dayanımlı betonlarda ileri yaş performansı geliştirilmiş beton tasarımının optimizasyonu yapılabilecektir.

Tez çalışması sonucunda;yüksek dayanımlı betonlara eklenen mineral katkıların erken yaşlardaki dayanımını olumsuz ileri yaşlardaki dayanımını ise olumlu etkilediği görülmüştür. Çalışmada betona %5-10-15 oranında eklenen mineral katkılı bütün karışımlar, referans betonuna göre daha iyi aşınma ve donma-çözülme direnci göstermiştir. Ayrıca beton karışımına optimum oranlarda (%5-10 arasında) silis dumanı eklenmesinin korozyon direncini arttırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

Yüksek dayanımlı beton, Uçucu kül, Silis dumanı, Mekanik özellikler, Kalıcılık

ABSTRACT

Concrete has an important place in the development of human history and in the works of the ancient civilizations as far as the day-to-day work is concerned. Concrete, which has a wide use area today, has become the most consumed material in the world after water. Although high strength concrete is considered as a new material, it has been developing for many years. High Strength Concretes are expensive because they require very versatile quality control. They can not take the place of classical normal concretes completely, but their use areas will expand as the problems of high strength concretes are solved. High strength concrete will be sought and used especially when sustainable durability is more important.

In this study, the effect of the fly ash and silica fume additives on the durability properties such as corrosion, freeze and thaawing effect and steel reinforcement corrosion will be experimentally investined to improve the older performance of high strength concrete. Thus, the concrete design can be optimized by improving the older age performance of the high strength concrete mixture.

As a result of this thesis; it was seen that the mineral admixtures added to the high strength concretes had a negative effect on the early ages and positive ages on the aged ages. In the study, all mineral admixtures added at 5-10-15% of concrete showed better wear and freeze-thaw resistance than reference concrete. In addition, the addition of silica fume to the concrete mixture at optimum ratios (between 5-10%) increased the corrosion resistance.

Keywords

High strength concrete, Fly ash, Silica fume, Mechanical properties, Durability

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI

TEŞEKKÜR

ÖZET.....i

ABSTRACTii

İÇİNDEKİLERiii

SİMGELER VE KISALTMALARvii

ÇİZELGELER DİZİNİviii

ŞEKİLLER DİZİNİix

1. GİRİŞ 1

1.1. Çalışmanın Amacı 1

1.2. Çalışmanın Kapsamı 1

2. YÜKSEK DAYANIMLI BETONLAR 3

2.1. Tarihsel Gelişimi 4

2.2. Yüksek Dayanımlı Beton ile İnşa Edilen Yapılar..... 5

2.3. Yüksek Dayanımlı Beton Karışımında Kullanılan Malzemeler..... 5

2.3.1. Çimento 6

2.3.2. Agregas 7

2.3.3. Karışım suyu 8

2.3.4. Mineral katkı maddeleri 9

2.3.4.1. Uçucu kül..... 9

2.3.4.2. Silis dumanı 11

2.3.4.3. Yüksek fırın cürufu..... 12

2.3.4.4. Pirinç kabuğu külü..... 13

2.3.4.5. Doğal puzolanlar..... 14

2.3.5. Kimyasal katkı maddeleri..... 14

2.3.5.1. Akışkanlaştırıcı katkıları..... 16

2.3.5.2. Priz düzenleyici katkıları 17

2.3.5.3. Su geçirimsizlik katkıları..... 17

2.3.5.4. Aderans artırıcı katkıları 18

2.3.5.5. Hava sürükleyici katkıları 18

2.3.5.6. Korozyon önleyici (inhibitör) katkıları	19
2.3.5.7. Diğer kimyasal katkıları	19
2.4. Betonun Avantajları	19
2.5. Yüksek Dayanımlı Betonun Tasarımı	20
2.5.1. Toralles Carbonari yöntemi	20
2.5.2. Mehta - Aitcin yöntemi	20
2.5.3. Aitcin yöntemi	21
2.6. Yüksek Dayanımlı Betonlarda Kalite Kontrol	21
2.6.1. Üretimde kalite kontrol	22
2.6.2. Yerinde kalite kontrol	22
2.6.3. Karot sonuçlarının değerlendirilmesi	23
2.7. Literatür Özeti	23
3. YDB'LARIN KALICILIK ÖZELLİKLERİ	28
3.1. Betonun Fiziksel Etkenlerle Bozulması	29
3.1.1. Aşınma etkisi	29
3.1.2. Donma - çözülme etkisi	31
3.1.3. Yüksek sıcaklığın betona etkisi	32
3.2. Betonun Kimyasal Etkenlerle Bozulması	33
3.2.1. Çelik donatının korozyonu	33
3.2.2. Asit Etkisi	35
3.2.3. Sülfatın betona etkisi	36
3.2.4. Alkali - silika reaksiyonu (ASR)	37
4. MALZEME VE YÖNTEM	38
4.1. Malzeme	38
4.1.1. Çimento	38
4.1.2. Agregası	38
4.1.3. Uçucu kül	38
4.1.4. Silis dumanı	39
4.1.5. Karışım suyu	39
4.1.6. Hiper akışkanlaştırıcı	39
4.1.7. Diğer malzemeler	40
4.2. Yöntem	40

4.3. Beton Karışımları.....	41
4.4. Bağlayıcı Malzemelerin Karakterizasyonu.....	41
4.4.1. XRD analizi.....	41
4.4.2. XRF analizi	42
4.5. Taze Beton Deneyleri	42
4.5.1. Birim ağırlık deneyi	42
4.5.2. Çökme (Slump) deneyi.....	42
4.5.3. Yayılma tablası deneyi	44
4.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri	46
4.6.1. Birim ağırlık tayini	46
4.6.2. Basınç dayanımının tayini	46
4.6.3. Aşınma direncinin Böhme deneyi ile ölçülmesi	47
4.6.4. Hızlandırılmış korozyon deneyi	48
4.6.5. Donma - çözülme deneyi.....	50
4.7. Mikroyapı İncelemesi	51
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	52
5.1. Malzeme Deneyleri.....	52
5.1.1. Agreganın granülometrisi (elek analizi).....	52
5.1.2. Agreganın aşınma direnci - Los Angeles deneyi	53
5.1.3. Agreganın birim ağırlık, yoğunluk ve su emme deneyleri.....	54
5.1.4. Puzolanik aktivite deneyi	54
5.1.5. XRD analizi.....	56
5.1.6. XRF analizi	57
5.2. Numune Kodlarının Belirlenmesi.....	58
5.3. Beton Tasarımı.....	58
5.4. Beton Üretim Süreci	59
5.5. Taze Beton Deney Sonuçları	61
5.6. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	62
5.6.1. Sertleşmiş birim hacim ağırlık	62
5.6.2. Basınç dayanımı	62
5.6.3. Böhme aşınma direnci ve su emme deneyi	64
5.6.4. Donma çözülme deneyi.....	65

5.6.5. Ultrases deneyi	66
5.6.6. Hızlandırılmış korozyon deneyi	67
5.7. Mikroyapı İncelemeleri	71
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR	81
Ek 1: Çekme deneyi uygulanan serilerin yük-deplasman grafikleri	90
ÖZGEÇMİŞ	



SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
MPa	: Megapaskal
pH	: Asitlik veya Bazlık Derecesi
RPB	: Reaktif Pudra Beton
S/Ç	: Su/Çimento
SD	: Silis Dumanı
UK	: Uçucu Kül
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1: Bazı ülkelerin ilgili yönetmeliklerindeki YDB'ların dayanım sınırları	3
Çizelge 2.2: Ülkemizdeki bazı büyük projelerdeki beton özellikleri ve miktarları.....	5
Çizelge 2.3: Betonda kullanılabilen yada kullanılamayan kayaç türleri	8
Çizelge 2.4: Uçucu kül tipleri (ASTM C618'e göre).....	11
Çizelge 2.5: Farklı beton sınıfları için asgari karakteristik dayanım değerleri.....	23
Çizelge 3.1: Betonun yıpratıcı fiziksel etkiler	29
Çizelge 3.2: Değişik asitlerin beton üzerindeki etkisi	35
Çizelge 4.1: CEM I 42.5R Portland kompozite çimentosu fiziksel ve mekanik özellikleri.....	38
Çizelge 4.2: UK ile SD' nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	39
Çizelge 4.3: Kullanılan katkıların teknik özellikleri.....	40
Çizelge 5.1: Agregaların elek analizi sonuçları.....	52
Çizelge 5.2: Los Angeles deney sonuçları.....	53
Çizelge 5.3: Prizma numunelerin deney sonuçları	55
Çizelge 5.4: Pozolanik aktivite deney sonuçları.....	55
Çizelge 5.5: YDB üretiminde kullanılan bağlayıcıların kimyasal özellikleri.....	57
Çizelge 5.6: Numune kodları.....	58
Çizelge 5.7: Beton karışım oranları (1 m ³ için).....	59
Çizelge 5.8: Taze beton deney sonuçları	61
Çizelge 5.9: Sertleşmiş betonda birim hacim ağırlık deneyi sonuçları	62
Çizelge 5.10: Ultrases deneyi sonuçları.....	67
Çizelge 5.11: Çekme Deneyi Sonuçları.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1 (a): Washington-ABD'de bulunan 39 katlı Premiere On Pine binası. Yüksekliği 130 m. (b): Toronto-Kanada'da bulunan 150 katlı CN Tower binası. Yüksekliği:600 m.....	5
Şekil 2.2: Puzolan katkılı yüksek dayanımlı beton.....	9
Şekil 2.3: Uçucu kül	11
Şekil 2.4: Silis dumanı.....	12
Şekil 2.5: Yüksek fırın cürufu	13
Şekil 2.6: Pirinç kabuğu külü	14
Şekil 2.7 (a): Yetersiz miktarda akışkanlaştırıcı eklenen çimento hamuru (b): Yeterli miktarda akışkanlaştırıcı eklenen çimento hamuru.....	16
Şekil 3.1: Betondaki aşınma etkisi	30
Şekil 3.2: Betondaki donma-çözülme hasarı	32
Şekil 3.3: Betonun basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi	32
Şekil 3.4: Betondaki paslanma etkisi.....	35
Şekil 3.5: Asit saldırısına uğramış beton	36
Şekil 3.6: Sülfat saldırısına uğramış normal dayanımlı beton.....	36
Şekil 3.7: Sülfat saldırısına uğramış yüksek dayanımlı ve katkılı beton.....	37
Şekil 3.8: ASR saldırısına uğramış beton.....	37
Şekil 4.1: Çökme değerinin ölçülmesi.....	43
Şekil 4.2 (a): Nizami çökme (b): Kayma meydana gelmiş çökme	43
Şekil 4.3 (a): Çökme deneyi-1 (b): Çökme deneyi-2	44
Şekil 4.4: Tipik yayılma tablası	44
Şekil 4.5: Tipik beton kalıbı ve sıkıştırma çubuğu	44
Şekil 4.6: Yayılma boyutlarının ölçülmesi	45
Şekil 4.7 (a): Yayılma deneyi uygulaması-1 (b): Yayılma deneyi uygulaması-2.....	45
Şekil 4.8: Numune Ağırlığının ölçülmesi.....	46
Şekil 4.9: Küp numunenin tatmin edici kırılma şekilleri.....	46
Şekil 4.10: Silindir numunenin tatmin edici kırılma şekilleri	47
Şekil 4.11: Böhme aşınma deney düzeneği	48

Şekil 4.12: Böhme aşınma deneyi uygulaması	48
Şekil 4.13: Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği	49
Şekil 4.14: Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği	49
Şekil 4.15 (a): Deney öncesi numune yüzeyi (b): Deney sonrası numune yüzeyi	50
Şekil 4.16 (a): İklimlendirme dolabındaki numuneler (b): Basınç presinde kırılan numuneler	50
Şekil 5.1: Seçilen karışımın granülometri eğrisi	52
Şekil 5.2 (a): Tamburun içindeki agrega ve çelik bilyeler (b): Tambur kendi ekseninde dönüştü	53
Şekil 5.3 (a): Agreganın sıkışık ve gevşek birim ağırlık tespiti (b): Agregada yoğunluk tespiti	54
Şekil 5.4 (a): Üç nokta eğilme deneyi (b): Eğilme deneyinde ortadan kırılmış numune (c): Kırılan parça üzerinde basınç deneyi uygulaması	55
Şekil 5.5: CEM I 42,5 R için XRD spektrumu	56
Şekil 5.6: Uçucu kül için XRD spektrumu	56
Şekil 5.7: Silis dumanı için XRD spektrumu	57
Şekil 5.8 (a): %30 Karışım suyu ve hiper akışkanlaştırıcının karıştırıcıya eklenmesi (b): Taze betonun görünümü	59
Şekil 5.9 (a): Abrahms hunisi (b): Çökme değerinin ölçümü	60
Şekil 5.10 (a): Yayılma hunisi (b): Yayılma sonrası	60
Şekil 5.11 (a): Ø15x30cm lolipop numune (b): Puzolanik aktivite deney numuneleri	60
Şekil 5.12: Kür havuzunda şartlandırılan numuneler	61
Şekil 5.13: Basınç deneyi sonuçlarının karşılaştırılması	63
Şekil 5.14: 28 günlük Böhme aşınma ve su emme deneyi sonuçları	64
Şekil 5.15: 90 günlük Böhme aşınma ve su emme deneyi sonuçları	64
Şekil 5.16: 28 günlük donma çözülme deney sonuçları	65
Şekil 5.17: 90 günlük donma çözülme deney sonuçları	66
Şekil 5.18 (a): Hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanan lolipop numuneler (b): Hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanmayan lolipop numuneler	68
Şekil 5.19 (a): Çekme deneyi uygulaması (b): Çekip çıkartılan donatılar	68
Şekil 5.20: 28 günlük serilerin korozyon akımlarının zamanla değişimi	69
Şekil 5.21: 90 günlük serilerin korozyon akımlarının zamanla değişimi	69

Şekil 5.22: Referans örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme)	72
Şekil 5.23: Referans örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme)	72
Şekil 5.24: SD5 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme)	73
Şekil 5.25: SD5 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme)	73
Şekil 5.26: SD10 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme)	74
Şekil 5.27: SD10 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme)	74
Şekil 5.28: SD15 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme)	75
Şekil 5.29: SD15 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme)	75
Şekil 5.30: UK5 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).....	76
Şekil 5.31: UK5 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).....	76
Şekil 5.32: UK10 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).....	77
Şekil 5.33: UK10 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).....	77
Şekil 5.34: UK15 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).....	78
Şekil 5.35: UK15 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).....	78

1. GİRİŞ

Günümüzde çok geniş bir kullanım alanı olan beton, sudan sonra dünyada en fazla tüketilen bir malzeme haline gelmiştir. Son yıllarda kullanımı giderek yaygınlaşan yüksek dayanımlı betonlar her geçen gün kullanım alanlarını daha fazla arttırmaktadır.

İnsanoğlunun artan hayal gücüne ve sınır tanımaz beklentilerine karşı normal dayanımlı betonlar yetersiz kalmaya başlamıştır. Ancak halen gelişimi devam eden yüksek dayanımlı betonların kalıcılığının (durabilitesinin) daha ileriye götürülerek, daha ekonomik üretilmesi tüm toplumlarca kullanımını yaygınlaştıracaktır.

Yüksek dayanımlı betonların kalıcılık özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada, endüstriyel atık olan uçucu kül ve silis dumanının beton içerisinde kullanılmasıyla çevre kirliliği azaltılarak; topluma yarar sağlanması planlanmaktadır. Ayrıca kalıcılık özellikleri normal betonlara göre iyi olduğu bilinen yüksek dayanımlı betonların bu özelliğinin iyileştirilmesi planlanmaktadır.

1.1. Çalışmanın Amacı

Kullanımı giderek yaygınlaşan yüksek dayanımlı betonların üzerinde birçok araştırma gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, bu betonun özellikleri geleneksel betonlar kadar fazla araştırılmamıştır.

Bu çalışmada; silis dumanı ve uçucu kül katkılı yüksek dayanımlı betonun karışım oranları belirlenerek, bu oranlara göre beton numuneleri hazırlanacaktır. Bu numuneler üzerinde standartlara uygun olarak; önemli kalıcılık özelliklerinden olan donatı korozyonu, aşınma direnci ve donma-çözülme deneyleri yapılacaktır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek yüksek dayanımlı betonların kalıcılık özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha ekonomik olarak elde edilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca endüstriyel atık olan uçucu kül ve silis dumanının beton içerisinde değerlendirilmesiyle; çimento tüketiminin azaltılması ve atık kullanımıyla daha çevreci bir beton üretimi mümkün olacaktır.

1.2. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada; silis dumanı ve uçucu kül katkılı yüksek dayanımlı betonların kalıcılık özellikleri incelenecektir. Seçilen karışım oranlarına göre uçucu kül ve silis dumanı katkılı yüksek dayanımlı betonların kalıcılık özellikleri hakkında bilgiler elde edilecektir. Bu tez çalışmasında; mineral katkılı yüksek dayanımlı beton tasarlanırken TS 500, TS EN 206 ve TS 13515 'deki değerler dikkate alınacaktır. Ayrıca, deneysel

alışmalar sırasında, hem deney numuneleri hazırlanması sırasında hem de uygulama hakkında deneysel tecrübe paylaşımı şeklinde destek alınacaktır.

Bu çalışmada öncelikle beton bileşenlerinin özellikleri ile yüksek dayanımlı betonun karışım oranları belirlenecektir. Bu orana göre hazırlanan beton numuneleri üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılacak ve sonuçlar arasındaki sistematik ilişki kurulacaktır. Ayrıca laboratuvarıda mineral katkılı yüksek dayanımlı betonun önemli kalıcılık özelliklerinden olan; aşınma direnci, donma-çözölme direnci ve elik donatı korozyonu incelenerek, uçucu kül ve silis dumanı kullanımının YDB'nin kalıcılığı üzerindeki etkisi belirlenecektir.

Çalışmanın sonucunda, endüstriyel atık olan uçucu kül ve silis dumanının beton içerisinde kullanılmasıyla; hem evre kirliliğinin azaltılması hem de ihtiyaçlarımızı karşılayan kalıcılık özellikleri denenmiş yüksek dayanımlı betonun elde edilmesi hedeflenmektedir.

2. YÜKSEK DAYANIMLI BETONLAR

Genel bir bakış açısından değerlendirildiğinde en iyi beton diye bir şey yoktur; amaca uygun beton seçimi vardır. Son yıllarda adını sıkça duyduğumuz Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) terimi standartlara ve ülkelere göre değiştiğinden oldukça görecelidir. Kısaca beton tasarımında yapılan birtakım değişikliklerle birlikte normal betonlardan daha üstün özelliklerde elde edilen betonlar olarak tanımlanabilir.

Her ne kadar yüksek dayanımlı beton yeni bir malzeme olarak düşünülse de çok uzun yıllardır gelişimini sürdürmektedir. Bu süreç içerisinde de yüksek dayanımlı beton tanımlaması sürekli olarak değişmiştir. 1950'li yıllarda 34 MPa basınç dayanımına sahip betonlar yüksek dayanımlı beton olarak tanımlanmakta iken günümüzde 50-115 MPa arasındaki betonlar bu tanımın içerisine girmektedir. 115 MPa'dan büyük dayanıma sahip betonlar ise ultra yüksek dayanımlı betonlar olarak isimlendirilmektedir (Çebi, 2009).

YDB 'ların, dayanım sınırları ülkeler ve toplumlar arasında farklılık gösterse de aşağıdaki Çizelge 2.1'de ilgili yönetmeliklerdeki beton basınç dayanım sınırları verilmektedir.

Çizelge 2.1. Bazı ülkelerin ilgili yönetmeliklerindeki YDB 'ların dayanım sınırları.

Ülke /Yönetmelik	En alt dayanım sınırı (MPa)	En üst dayanım sınırı (MPa)	Numune tipi ve boyutları
[TÜRKİYE] TS 500	50	100	Sinindir Numune (h=15cm, Ø=30cm)
[AVRUPA BETON KOMİTESİ] CEB-FIB (MC90)	60	80	Sinindir Numune (h=15cm, Ø=30cm)
[ABD] ACI 318-89	62	69	Sinindir Numune (h=15cm, Ø=30cm)
[KANADA] CAN-A23.3 M84	62	69	Sinindir Numune (h=15cm, Ø=30cm)
[İNGİLTERE] BS 8110	60	110	Küp (a=15cm)
[ALMANYA] DIN 1045	55	115	Küp (a=15cm)
[NORVEÇ] NS 3473	65	105	Küp (a=15cm)

YDB tasarlanırken dayanımı düşüren malzemelerin arasındaki boşluk en aza indirilmeye çalışılır. Ayrıca üretilen betonun performansını arttırabilmek için karışım: yüksek dayanım sınıfında çimento ve agrega ile düşük S/Ç oranında su ve hiper akışkanlaştırıcının yanında çoğu zaman silis dumanı ve uçucu külde eklenir.

Çok yönlü titiz kalite kontrolü gerektiren YDB'ların yapılardaki başlangıç maliyetleri yüksektir. Ancak yüksek performanslı beton kullanımı ile yapının ileriki yıllarda daha az bakım gerektireceği ve daha uzun ömürlü olacağı da unutulmamalıdır. Bu sayede uzun vadede getireceği ekonomik faydaları başlangıçtaki yatırım maliyetlerini dengeleyecektir. Hem ülkedeki yapıların uzun vadeli performansı bütün ulusların ekonomisine hayati bir önem katmaktadır.

YDB tümüyle klasik betonların yerini alamazlar ancak gelişimi devam ettikçe kullanım alanları genişleyecektir. Günümüzde birçok yapıda karşımıza çıkan; basınç dayanımının yanı sıra kalıcılık özellikleri yüksek olan bu tip betonlar, özellikle uzun servis ömrü gerektiren yapılarda tercih edilir (Özalp, 2006). YDB'ların uygulama alanları şöyle sıralanabilir;

- i) Askeri yapılarda,
- ii) Depreme karşı stratejik yapılarda (Nükleer endüstride, köprülerde, tünellerde, barajlarda, limanlarda vb. yapılarda),
- iii) Yer altı çalışmalarında,
- iv) Betonarme yapıların güçlendirilmesinde ya da çok yüksek katlı yapılarda,
- v) Prefabrikasyonlarda,
- vi) Bow-String köprü kemerlerinde,
- vii) Açık deniz platformlarında (Çebi, 2009).

2.1. Tarihsel Gelişimi

Beton, insanlık tarihinin gelişiminde ve eski medeniyetlerin günümüze kadar gelebilen eserlerinde önemli bir yere sahiptir. İlk kez doğal çimentonun bir bağlayıcı olarak kullanılmasının Romalı uygarlığına dayandığı sanılmaktadır. 1850-1860'lı yıllara gelindiğinde betonun kullanımı yaygınlaşmıştır.

1900'lü yıllardan itibaren ilgili yönetmelikler, betonun ideal karışım ve ideal granülometri eğrileri oluşturulmuş ayrıca Türkiye'de de beton kullanımı başlamıştır. 2000'li yıllara kadar endüstriyel beton gelişimi başta Amerika ve Avrupa olmak üzere

gelişerek devam etmiştir. Günümüzde de halen bu gelişim tamamlanmamış olup; insanoğlunun sınırları zorlayan hayal gücüyle birlikte şekillenmektedir.

2.2. Yüksek Dayanımlı Beton ile İnşa Edilen Yapılar

Son yıllarda ülkemizde yapılan önemli bazı projelerdeki beton dayanım sınıfları ve hacimleri aşağıdaki Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Ülkemizdeki bazı büyük projelerdeki beton özellikleri ve miktarları.

Proje	Başlama Tarihi	Bitiş Tarihi	Beton Dayanım Sınıfı (MPa)	Beton Hacmi (m ³)
Marmaray	2004	2013	C40/50	1.000.000
Avrasya Tüneli	2011	2016	C40/50	450.000
Yavuz Sultan Selim Köprüsü	2013	2015	C50/60	230.000
Haliç Metro Köprüsü	2009	2014	C40/50	36.000
İzmit Körfez Geçiş Köprüsü	2012	2016	C45/55	200.000
Çamlıca Camii	2013	2016	C50/60	150.000

Ülkemizde YDB'lar ile inşa edilen bu ve benzeri örnekleri çoğaltmak mümkündür. Dünya üzerindeki YDB'lar ile inşa edilen yapıları inceleyecek olursak; bazıları Şekil 2.1'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.1 (a): Washington-ABD'de bulunan 39 katlı Premiere On Pine binası. Yüksekliği : 130 m. (b): Toronto-Kanada'da bulunan 150 katlı CN Tower binası. Yüksekliği : 600m (Coşkun, 2006).

2.3. Yüksek Dayanımlı Beton Karışımında Kullanılan Malzemeler

Son yıllarda kullanımı giderek yaygınlaşan yüksek performanslı betonların üretiminde üç altın kural bulunmaktadır:

1-) Öncelikle beton karışımındaki tüm malzemeleri dikkatlice seçmek ve düzenli olarak kalite kontrollerini yapmak,

2-) İkinci olarak ise silis dumanı, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü gibi puzolan katkıları yardımıyla betondaki boşluklu yapıyı doldurarak, işlenebilirliği arttırmak,

3-) Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı yardımıyla karışımındaki S/Ç oranını en aza indirmek

Bu yaklaşımlar eskiden beri bilinmekle birlikte günümüzde kullanımı yaygınlaşan hiper akışkanlaştırıcı katkıları ile çok kolaylaşmıştır (Çebi, 2009).

2.3.1. Çimento

Kullanımı en yaygın ve en bilinen Portland çimentosu; alümin, kireç, demir oksit ve silis bileşimli hammaddelerin harmanlanarak, yüksek sıcaklıklarda fırında pişirilmeleri (öğütölmeleri) sonucunda oluşan hidrolik bir bağlayıcıdır. 1 ton Portland çimentosu üretebilmek için yaklaşık 1600 kg hammadde kullanılır. Bu malzemenin de yaklaşık %80 i kalker kökenlidir (Baradan, vd., 2012).

Çimento olarak tam bir kalite programı uygulayan bir üretici firmanın çimentosunu tercih etmek, kimyasal ve fiziksel özellikleri açısından geçmişinin düzgünlüğüne önem vermek ve kullanım aşamasında da çimentonun kontrollerini düzenli ve uygun bir şekilde yapmak gerekmektedir. Geleneksel beton için çimento dozajını 300-350 kg/m³ arasında tutmak, yüksek dayanımlı beton için ise 400-500 kg/m³ arasında tutmak gerekmektedir (Dahil, 2001).

Çimento, birçok beton karışım tasarımında (puzolan katkılı betonlar vb. hariç) hacimce en az yeri kaplamasına rağmen karışımındaki en önemli bileşendir.

TS 197-1 standartlarınca Türkiye’de üretilen çimentolara CEM çimentosu adı verilmektedir. Ülkemizde halen 5 farklı tipte üretimi yapılmaktadır. TS 197-1’e göre üretilen CEM çimentosunun çeşitleri ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği verilerine göre yaklaşık kullanım oranları aşağıdaki gibidir (Baradan, vd., 2012).

- CEM I Portland çimentosu - (%43),
- CEM II Portland - kompoze çimento - (%39),
- CEM III Yüksek fırın cürufu çimento - (%2),
- CEM IV Puzolanlı çimento - (%12),
- CEM V Kompoze çimento - (%4).

Ülkemizde hazır beton ve inşaat sektöründe en yaygın olarak kullanılan çimento türü yukarıdaki oranlardan da anlaşılacağı gibi CEM I Portland çimentosudur. Bina, yol, köprü, prefabrik elemanlar ve yüksek dayanımlı betonların üretimine uygundurlar. Özellikle yüksek hidrasyon ısısı nedeniyle tercih edilirler (Karakurt, 2008).

CEM II Portland kompoze çimentosu, yüksek dayanımın gerekli olmadığı genel beton uygulamalarında kullanılır ve çevreci çimento olarak da bilinir. CEM III Yüksek fırın cürufu çimento ise, hidrasyon ısıları ve yüksek dayanıklılıkları nedeniyle özellikle kimyasal etkilere karşı dayanıklı beton üretimi için uygundur. CEM IV Puzolanlı çimento, ekonomiktir ve hidrasyon ısısı düşük olduğu için genellikle kütle betonlarında tercih edilir (Karakurt, 2008).

Ülkemizde en az tercih edilen çimentolardan olan CEM V tipi kompoze çimentolar ise diğer katkılı çimentolar gibi ekonomikliği, çevreci ve hidrasyon ısılarının düşük olması sebebiyle tercih edilirler (Yalçın, 2006).

Çimento su ile birleşince birçok karmaşık kimyasal reaksiyon meydana gelir. Çimentonun karma bileşenlerinin su ile ayrı ayrı reaksiyona girdikleri varsayılır ve hidrasyon sonunda her ana bileşen tarafından değişik hidrasyon ürünleri oluşur (Baradan, vd., 2012).

Kalsiyum silikatlar çimentonun esas iskeletini meydana getirir. Hidrasyon sonunda C_3S ve C_2S benzeri ürünler oluşur. Bu ürünler C-S-H jeli ve sönmüş kireç ($Ca(OH)_2$)' dir. Jel sözcüğü, kolloidal katı malzeme topluluğunu ifade etmektedir. $Ca(OH)_2$ ise portlandit olarak adlandırılır (Erdoğan, 2003).

Çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran C-S-H moleküler büyüklükte olup, çimento taneciklerinden yaklaşık 1000 kat daha küçüktür. C-S-H 'ın oluşması ile bu parçacıkların arasındaki Van der Waals kuvvetleri bağlayıcı özellik yaratmaktadır (Baradan, vd., 2012).

2.3.2. Agrega

Karışımındaki agreganın kalitesi yüksek mukavemetli betonun dayanımını doğrudan etkilediği için çimento kalitesi kadar önemlidir. Agregaları tane boyutlarına göre ince, orta ve iri olmak üzere genel olarak 3'e ayırabiliriz. Kullanılan agregaların kalitesi TS 706 EN 12620 deki (TS 706 EN 12620 + A1, 2010) standartlara uygun olmalıdır. Ancak YDB elde edebilmek için bunların yanında aşağıdaki özelliklerinde bulunması tavsiye edilir.

- Karışım hamuru ile yeterli yüzey alanı
- Beton içerisinde kolayca yerleşmeyi sağlayabilmesi
- Optimum S/Ç oranını düşürmesi

Taze betonun işlenebilme özelliği, agregata tane dağılımından doğrudan etkilenir. Agregalar kullanım yerine göre istenen özel koşulları yetine getirmeli; içerisinde kil, silt vb. kirlilikler olmamalı, betona zarar verebilecek maddeler içermemeli, yüksek mukavemet için kırmataş agregata kullanılmalı, yassı ve uzun danelerin oranı %'5'i geçmemeli, basınca, aşınmaya parçalanmaya ve ufalanmaya karşı dayanıklı olmalı ayrıca düşük S/Ç oranı istendiği için karışımlarda su emme oranı yüksek agregalar seçilmelidir (Nergiz, 2007). Betonda kullanılabilen ve kullanılamayan kayaç türleri Çizelge 2.3 'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Betonda kullanılabilen yada kullanılamayan kayaç türleri.

Açıklama	Mineral ve Kayaç Çeşitleri
Betonda Kullanılabilen	Kireçtaşı, bazalt, granit, diyabaz, siyanit, mermer, barit
Betonda Kullanılamayan	Andezit, alçıtaşı, kıltaşı, kumtaşı, kuvars dışındaki silika mineralleri, feldspatlar, sülfat mineralleri

Agreganın genellikle çimento ile kimyasal reaksiyona girmesi istenmez. Çimento hamuru ile agregata arasındaki bağ fiziksel ve mekanik özelliktedir. Bu bağa "aderans" yada kenetlenme denir (Baradan, vd., 2012).

Beton maliyetlerinde, malzemelerin etkin ve ucuz olanının seçilmesi; oranlarının iyi hesaplanması çok önemlidir. Bu sebeple istenen nitelikteki agregayı, istenen nicelikte, en yakın taşıma mesafesinde, ekonomik olarak temin etmek; beton için hayati önem taşır (Baradan, vd., 2012).

2.3.3. Karışım suyu

Beton karışımına eklenen karışım suyunun iki temel görevi vardır:

- Çimento ve agregayı plastik, işlenebilir kütleye dönüştürmek.
- Çimento ile kimyasal reaksiyona girerek karışım kütlelerinin sertleşmesini sağlamak (Nergiz, 2007).

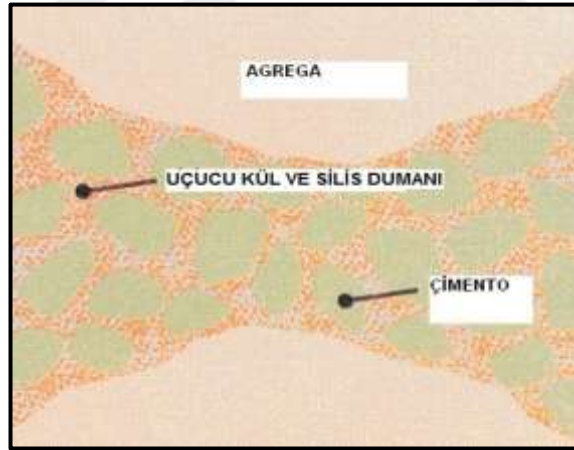
Betonun kıvamı su ile doğru orantılıdır. Ancak betonun dayanımı tasarımdaki S/Ç oranına bağlı olarak değişmektedir. Sonuç olarak şantiyede taze betonun kıvamını arttırmak için ilave su eklemek beton dayanımını düşürdüğü gibi söz konusu fazlalık

suyun neden olacağı boşluklardan zamanla zararlı unsurların (sülfat, klor vb.) girmesine neden olacağından beton kalıcılığında ciddi sorunlar yaşanabilir (Nergiz, 2007).

Geleneksel betonlarda olduğu gibi yüksek dayanımlı betonlarda da karışım suyu olarak temiz ve zararlı kimyasallar içermeyen suların kullanımı önemlidir. Örneğin deniz suyu bünyesinde barındırdığı tuz nedeniyle dayanımı ve betonu olumsuz etkilediği için özellikle yüksek dayanımlı betonlarda kullanılmamalıdır.

2.3.4. Mineral katkı maddeleri

Öğütülmüş yada ayrıştırılmış olarak toz halinde silolarda saklanan uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü gibi puzolanik özelliğe sahip katkı maddelerine mineral katkı adı verilir. Mineral katkıların pek çoğu tek başlarına kullanıldıklarında çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar ancak çimentoyla birlikte kullanıldıklarında karışımdaki boşluklu yapıyı hidrasyon ürünü olan Ca(OH)_2 ile tepkimeye girip doldurarak çimento ile benzer davranış gösterirler. Böylece hem atık malzemeler değerlendirilmiş olur hem de karışımdaki en pahalı malzeme olan çimento oranı azaltılarak beton maliyetleri düşürülebilir. Puzolanlar özellikle beton matrisindeki boşluklu yapıyı doldurduğu için yüksek dayanımlı betonlarda sıkça tercih edilirler (Anwar, 2010).



Şekil 2.2. Puzolan katkılı yüksek dayanımlı beton (Kayseri Beton Laboratuvarı, 2014).

Mineral katkıların betonun kalıcılık özelliklerine ve maliyetlerine olumlu etkide bulunduğu artık birçok araştırmacı tarafından kabul edilmektedir (Nergiz, 2007).

2.3.4.1. Uçucu kül

Uçucu kül (UK) termik enerji santrallerinin içerisindeki pulvarize kömürün yanmasıyla yan ürün olarak ortaya çıkan çok ince bir kalıntı malzemesidir. Bacadaki gazlar atmosfere bırakılmadan önce gazların içtersindeki ince tanelerin toz toplama

filtreleri tarafından toplanıp depolanmasıyla elde edilir. Kullanımı en yaygın olan puzolandır. Genellikle termik santrallerde yakılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin ise %35-40'ı küldür. Türkiye de termik santrallerden açığa çıkan atık miktarı hakkında sağlıklı bir bilgi bulunmamaktadır. Ancak 2003 yılı verilerine göre 18 milyon ton UK açığa çıktığı tahmin edilmektedir. Ancak bu oranın günümüzde çok daha yüksek olduğu bilinmektedir (Baradan, vd., 2012).

UK en çok kullanıldığı alanlardan biride inşaat sektörüdür. Bu alanda değerlendirilen UK'lerin çoğu çimento, beton, tuğla, dolgu ve tesviye işlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca uçucu küllerin toprak ıslahında, atık suların arıtılmasında, sondaj işlerinde, karlı yolların açılmasında, döküm ve metal sanayisinde de kullanıldığı bilinmektedir.

UK üzerinde ilk araştırmalara, 1930 yılında ABD'de başlanmış ve 1938 yılında ilk defa Chicago'da bir yol yapımında çimentoya karıştırılarak kullanılmıştır. İkinci dünya savaşından sonra, malzeme darlığından dolayı bu malzemenin kullanımı gerek ABD'de gerekse Avrupa'da son derece yaygınlaşmıştır (Postacioğlu, 1986).

Türkiye'de UK ilk olarak yapımı 1967-1971 yılları arasında süren Gökçekaya Barajı'nda ve yapımı 1966-1972 arasında gerçekleşen Porsuk barajının inşaatlarında kullanılmıştır. Çimento fabrikalarında ilk UK kullanımı ise, 1970'li yılların başında Afyon ve Balıkesir çimento fabrikalarında Soma ve Seyitömer termik santrallerinin uçucu küllerinin kullanımı ile olmuştur (Orhun ve Günday, 1970). Betona uçucu kül katılmasının iki temel sebebi vardır:

- 1-) Çimentodan tasarruf ederek betonun maliyetlerini düşürmek,
- 2-) Taze ve sertleşmiş betonun performansını iyileştirmek.

Uygulamada uçucu kül içeren betonarmelerin, zararlı olabilecek genleşme veya büzülme göstermemeleri istenir. Hacim sabitliği deneyleri TS EN 450-1 (TS EN 450-1, 2013) ve ASTM C311 (ASTM C 311-94a, 1994)'e göre yapılabilmektedir. Uçucu küllerin tane boyutu ve tane boyutu dağılımı, uygun bir ünlformluğa sahip olmalıdır.

Birçok ülkenin standartlarında hala UK 'ün sınıflandırılmasıyla ilgili bir kural yoktur. Ancak ASTM C618 standardı, UK 'leri kimyasal yapılarına ve elde edildikleri kömür çeşidine göre C ve F sınıfı olarak ayırmıştır. ASTM C618'e göre UK tipleri Çizelge 2.4 'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4.Uçucu kül tipleri (ASTM C618'e göre).

Tipi	Açıklaması
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$ bitümlü veya antrasit (parlak kömürden elde edilen uçucu küller). Yalnızca puzolanik özelliğe sahip.
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$ linyit kömüründen elde edilen uçucu kül. Kireç (CaO) içeriği %10'dan fazla olabilir (Yüksek Kireçli Uçucu Kül). Puzolanik ve bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahip.

Uçucu külün görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir.

**Şekil 2.3.** Uçucu kül.

2.3.4.2. Silis dumanı

Silis dumanı (SD), silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında 2000 C° sıcaklıkta bir yan ürün olarak elde edilen endüstriyel atık maddelerdir. Çoğunlukla "baca tozu" olarak da adlandırılırlar. Türkiye'de SD yalnızca Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde elde edilmektedir. Ülkemizdeki SD üretimi yılda yaklaşık 2 bin tondur. SD değerlendirilmesine yönelik ilk çalışmalar çevre koruması amacı ile 1950'li yıllarda Norveç'te başlamıştır. Bugün ise SD yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonların vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Diğer puzolanların aksine erken dayanımı da artırması silis dumanının en büyük avantajıdır (Yeğinobalı, 2003).

Ticari amaçlarla SD birkaç şekilde elde edilerek piyasaya satılmaktadır. Bunlardan bazıları:

1-) Yoğunlaştırılmış SD: Elde edildiği şekliyle 80x80x140 cm boyutlarındaki bez torbalara konularak piyasaya satılmaktadır. Taşıma maliyetleri oldukça yüksektir. Çoğunlukla katkılı çimento yapımında kullanılır (Baradan, vd., 2012).

2-) Yoğunlaştırılmış veya sıkılaştırılmış SD: Silika dumanı yüksek taşıma maliyetlerini azaltmak için yoğunlaştırılmış halde 25 kg 'lık torbalarla veya 900 kg 'lık big bag çuvallarla piyasaya satılır (Baradan, vd., 2012).

3-) Sulandırılmış SD: SD su ile karıştırılarak bir bulamaç haline getirilmektedir. Bulamaç durumundaki SD varillerle taşınması daha kolay ve ekonomik olmaktadır (Baradan, vd., 2012).

SD özgül ağırlığı alaşım türüne ve kaynağına göre değişmekle birlikte ortalama 2,20 civarındadır. Yapılan çalışmalar betonda kullanılan en uygun silis dumanı miktarının, Portland çimentosu ağırlığının %10'una yakın olduğunu göstermiştir (Malhotra ve Carrette, 1983).

Puzolanik aktivite bakımından genellikle SD çok yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir. Yüksek oranda silis içeriği ve çok ince oluşu puzolanik aktiviteyi artırır. Dayanım aktivite indeksi ASTM C311'e göre saptanabilmektedir (ASTM C 311-94a, 1994). Dayanım aktivite indeksi diğer puzolanlardan daha yüksektir. Silika dumanı çok ince olduğu için su gereksinimleri diğer puzolanlardan fazladır (Erdoğan, 1997).

SD amorf yapıya sahip olduğundan, çok ince taneli bir malzeme olduğundan ve yüksek miktarda SiO_2 içerdiğinden mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiği takdirde hidrolik bağlayıcılık özelliği göstermektedir. Hem erken yaşlarda hem de ileri yaşlarda nihai dayanımı arttırdığı için yüksek dayanımlı beton üretiminde sıkça tercih edilmektedir (Sarıbıyık, 2016). Görünümü Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Silis dumanı.

2.3.4.3. Yüksek fırın cürufu

Farklı metal kollarında ortaya çıkan, çoğunlukla değerlendirilemeyen atık malzemelere cüruf adı verilmektedir. Cüruf malzemeler kendi içersinde birçok farklılık göstermektedir. Bunun temel sebebi metal endüstrisindeki farklılık ve üretimdeki çeşitliliklerdir. Örneğin demir-çelik üretiminde ortaya çıkan Yüksek Fırın Cürufları (YFC) tek başına bağlayıcı özellik gösterebilirken; bakır ve nikel gibi metallerin cürufları yalnızca puzolanik özelliğe sahiptir (Tokyay, 2003).

Günümüzde modern çelik tesislerinde ortaya çıkan cüruflar, sıkça çimento ile birlikte kullanılmaktadır. Bunun en büyük nedeni bu cürufların camsı yapıları sayesinde yüksek puzolanik özellik göstermeleridir.

Ülkemizde her yıl ortalama 350 bin ton çelik cürufunun ortaya çıktığı ve bu yüksek fırın cüruflarının barajlar, tüneller gibi birçok alanda beton özelliklerini iyileştirmek için kullanıldığı bilinmektedir.

Çimento sınıflarında YFC adıyla bir çimento sınıfının olması (CEM III) YFC'nin önemini anlatan önemli bir parametredir. YFC'nin UK, SD ve doğal puzolanlardan en büyük farkı çimentoya en yakın bağlayıcı özellikli mineral katkı maddesi olmasıdır. İşlenebilirliği olumlu yönde etkiler. Hidratasyon ısını düşürdüğü ve reaksiyonunu yavaşlattığı için betonda kıvam kaybını azaltır. Portland çimentosuna oranla erken yaşlarda dayanımı düşürür, ileri yaşlarda ise yükseltir (Baradan, vd., 2012). Açık renkli bir görünüme sahip olan YFC 'nin görünümü Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Yüksek fırın cürufu.

2.3.4.4. Pirinç kabuğu külü

Çeltik bitkisi dünyada en fazla üretimi yapılan ikinci bitkidir. Yeryüzünde yaklaşık 145 milyon hektar alanda pirinç ekimi yapılmaktadır. Çeltik ve pirinç üretimi sonucunda zirai atık olarak kalan kabukların değerlendirilebilmesi için yapılan çalışmalarda 200 kg kabuktan, 40 kg kül elde edilmiştir (Baradan, vd., 2012).

Son yıllarda Türkiye'de TÜİK verilerine göre yaklaşık 920 bin ton çeltik üretimi yapılmaktadır. Buna ilaveten çeltik ithal edilmektedir ancak bu rakamlar, yıllara göre değişmektedir. Türkiye'de işlenen çeltiğin 1 milyon ton olduğunu varsayarsak bundan yaklaşık olarak yüzde 20 kabuk çıkar. Bu da 200 bin ton kabuk demektir ve 40 bin ton küle tekabül eder (Baradan, vd., 2012).

Yapı malzemesi olarak bu küllerden ısı yalıtım tuğlalarında, seramiklerde faydalanılmaktadır. Ayrıca mineral katkı olarak çimentoya da eklemek mümkündür. Pirinç üretiminin fazla olduğu ülkelerde (Pakistan, Tayland vb.) özellikle kırsal bölgelerde konut yapımında maliyetleri düşürmek için külden geniş ölçüde yararlanılır.

Pirinç kabuğu külünden blok tuğla, çini ve briket üretiminde yararlanmak amacıyla da çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca pirinç kabuğu külü bitümlü karışımlarda da filler şeklinde kullanılmıştır (Mehta, 1977). Pirinç kabuğu külünün görünümü Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Pirinç kabuğu külü.

2.3.4.5. Doğal puzolanlar

Doğal puzolanlar çoğunlukla volkanik kökenli malzemelerdir ve jeolojik olarak volkanik aktivitelerin meydana geldiği bölgelerde bulunurlar. Magma hareketleri sonucu oluşan; volkanik camlar, volkanik tüfler, volkanik küller ve traslar doğal puzolanlardır. Örneğin Anadolu toprakları doğal puzolanlar bakımından son derece zengindir. Ayrıca doğal olarak oluşmuş şeyller, killer ve diatomit kayalar ısıtma işlem gördüklerinde doğal puzolan olarak kabul edilirler (Karakurt 2008).

Volkanik kökenli malzemeler mineral katkı olarak kullanılacaksa en az portland çimentosunun tane boyutlarına ginceye kadar öğütülmelidir. Doğal puzolanlar, genellikle, portland – puzolan tipi çimento üretiminde ve puzolan katkılı beton üretiminde kullanılmaktadır (Sarıbiyık, 2016).

2.3.5. Kimyasal katkı maddeleri

Beton üretimi için çimento, agrega ve su kullanılması yeterlidir. Ancak günümüz şartlarında ekonomik ve kaliteli beton tasarımı için kimyasal katkı maddeleri vazgeçilmez dördüncü temel malzeme haline gelmiştir. Yüksek dayanımlı betonlarda, bilinçli ve optimum seviyelerde katkı kullanımı, rekabetçi modern beton teknolojinin gerekliliği haline gelmiştir (Baradan, vd., 2012).

Kimyasal katkıların betonda S/Ç oranına veya poroziteye olan etkileri dışında dayanıma doğrudan etkileri bulunmamaktadır. Ancak bu durumda bile düşük çimento dozajı ile işlenebilirlik için tasarlanmış betonun dayanımı S/Ç oranı azaldığı için artmaktadır.

Genel itibariyle kimyasal katkıların sağladığı avantajlar şu şekilde sıralanabilir.

- Terleme ve ayrışmayı azaltmak,
- Erken yaşlarda dayanım kazanma hızını yükseltmek,
- Su içeriğini arttırmadan, betonun işlenebilirliğini yükseltmek,
- Hidratasyon ısısı artışını düzenlemek,
- Donma-Çözülme gibi yıpratıcı dış etkenlere karşı betonun direncini arttırmak,
- Priz süresini düzenlemek,

Kimyasal katkıları denince akla çok geniş bir yelpaze gelmektedir. Kimyasal katkıların en çok kullanılanları: akışkanlaştırıcılar, priz geciktiriciler, priz hızlandırıcılar, hava sürükleyiciler, korozyon önleyiciler, renklendiriciler, aderans arttırıcılar, genleşme yaratıcı katkıları ve su geçirimsizlik katkılarıdır. Bazı betonlarda birden fazla kimyasal katkı birlikte kombine edilerek kullanılabilir. Ancak bunların birbirini olumsuz etkilemedikleri denenmelidir (Baradan, vd., 2012).

Betonlara eklenen maksimum kimyasal katkı dozajı TS EN 206 (TSE EN 206-1, 2002) tarafından 50g/kg olarak sınırlandırılmıştır. Ayrıca 2g/kg'dan daha küçük dozajlarda kimyasal katkıları suya karıştırılarak ilave edilmelidir (Nergiz, 2007).

Betonda kullanılan kimyasal katkıları performans (etkileri) TS EN 934-2 (TS EN 934-2, 2002) tarafından tek etkili katkıları ve çift etkili katkıları olarak aşağıdaki şekilde gruplandırılmıştır.

- Su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkıları
- Yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı katkıları
- Hava sürükleyici katkıları
- Su tutucu katkıları
- Su geçirimsizlik katkıları
- Priz hızlandırıcı katkıları
- Priz hızlandırıcı / su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkıları
- Priz geciktirici katkıları
- Priz geciktirici su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkıları

- Priz geciktirici / yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı katkıları

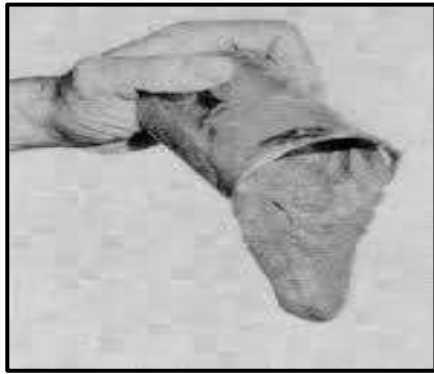
TS EN 934-2 ye (TS EN 934-2, 2002) benzer yine performansa göre bir gruplandırmada ASTM C 494'de (ASTM C 494, 1994) yapılmıştır.

Kimyasal katkıların performansı referans betona göre belirlenir. Deney karışımı (kimyasal katkı) kontrol karışımıyla (katkısız) kıyaslanır. Klor ve alkali içerikleri de ölçülerek belirlenir. Katkılar için deney prosedürleri TS EN 480'de (TS EN 480, 2001) belirlenmiştir (Nergiz, 2007).

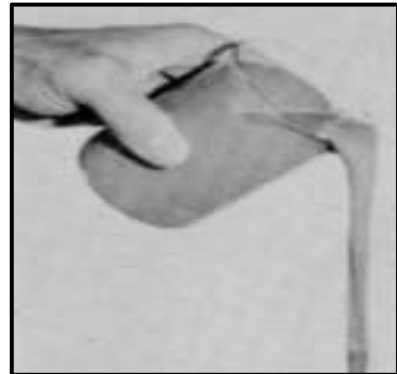
2.3.5.1. Akışkanlaştırıcı katkıları

Betonun akıcı ve kolay yerleşebilir olmasını sağlamak ve S/Ç oranını düşürerek yüksek mukavemetli beton üretmek istediğimizde kullanılır. Akışkanlaştırıcı katkıları karışım suyu ile birleşerek; suyun yüzey gerilimlerini ve çekim gücünü azaltırlar. Bu sayede beton hamurundaki tanelerin birbiri üzerinden kaymalarını kolaylaştır ve işlenebilirliği artır (Çimsa, 2017).

Beton tasarımı yapılırken katkı miktarlarına dikkat edilmelidir. Çimento hamuruna fazla miktarda katkı konulması halinde bir miktar katkı atıl olarak bekleyecektir. Karışıma eklenen fazlalık katkının olumlu bir etkisi olmayacağından optimum katkı dozajı kullanılmalıdır. İşte bu optimum noktaya doygunluk noktası denir. (Sağlam, A. R., vd., 2002; Mehta, 2002). Doygunluk noktasını aşan katkı betonda ayrılmaya neden olur. Bu nedenle katkı kullanırken üretici firmanın tavsiyelerine uymamız gerekir.



(a)



(b)

Şekil 2.7 (a): Yetersiz miktarda akışkanlaştırıcı eklenen çimento hamuru (b): Yeterli miktarda akışkanlaştırıcı eklenen çimento hamuru (Yazıcı, 2014).

Piyasada normal akışkanlaştırıcılar, süper akışkanlaştırıcılar ve yeni nesil hiper akışkanlaştırıcılar olmak üzere 3 farklı şekilde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Normal akışkanlaştırıcıların kimyasal formları; genellikle lignosülfonik asit ve bu asidin tuzları ile hidroksil karboksilik aside dayanmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı katkıları ise çoğunlukla melamin ve naftalin sülfonat bazlı, hiper akışkanlaştırıcı katkıları ise genellikle polikarboksilat bazlıdır.

2.3.5.2. Priz düzenleyici katkıları

Priz düzenleyici katkıları TS EN 934-2 (TS EN 934-2, 2002) standartlarıyla priz hızlandırıcı ve priz geciktirici olarak ikiye ayrılmıştır. Betonun döküldüğü iklim şartlarına göre her iki katkıya da sıkça başvurulmaktadır.

Soğuk havalarda priz hızlandırıcı katkının avantajları:

- Betonun erken dayanım kazanmasını sağlayarak; yapıyı servise daha erken almak,
- Özellikle baraj, tünel gibi büyük kütleli betonların erken priz almasını sağlayarak, kalıplara uygulanan hidrolik basıncın süresini kısaltmak,
- Püskürtme betonlarda, çimento hamurunun akmadan hızlıca priz almasını sağlamak (Baradan, vd., 2012).

Diğer yandan sıcak havalarda da priz geciktiricilere başvurulur. Bunlarında avantajları:

- İşlenebilirlik kaybını azaltmak,
- Kütle betonların peş peşe dökümü arasındaki soğuk derz oluşumlarını engellemek,
- Beton karıştırma ve yerleştirme işlemleri arasındaki sürenin uzun olduğu durumlarda başvurulur (Baradan, vd., 2012).

2.3.5.3. Su geçirimsizlik katkıları

Betonun su geçirimsizliğini azaltmak amacıyla beton bünyesine katılan kimyasal maddelerdir. Sabun türevleri, bütül stearatlar, mineral yağ, asfalt emülsiyonları ve katbek asfaltları gibi, bazı petrol ürünleri su geçirimsizlik katkıları olarak kullanılmaktadır. Su geçirimsizlik katkıları beton bünyesine su girişini iki şekilde engeller (Mehta, 1997):

1-) Boşluklarda kaplayıcı görevi yaparak, suda çözülmeyen bileşim oluşturur ve su geçişlerini engeller.

2-) Boşlukların içini doldurarak (kümelenerek), tıkayıcı madde gibi davranır.

Su geçirimsizlik sağlayıcılar, su yapılarında (baraj, tünel, arıtma, havuz, su deposu, sarnıç, kanal), bina temeli, çatı betonları, istinat duvarı vb. yerlerde, yani su ile temasta buluna tüm yapı betonlarında kullanılır. Rengi, kahverengi ve sıvı haldedir.

TS EN 934-2 (TS EN 934-2, 2002) standartları su geçirimsizlik katkıları ile üretilen betonarme yapıların su emme ve basınç dayanımı sınırlarını belirlemiştir. Su geçirimsizlik katkısının betondaki basınç dayanım kaybı 28 günlük referans numunesine göre en fazla %15 olmalıdır. Aksi halde beton tasarımı yeniden yapılmalıdır.

2.3.5.4. Aderans arttırıcı katkılar

Aderans arttırıcı kimyasallar taze beton ile sertleşmiş beton arasındaki yapışmayı (aderansı) arttırmak için çimento hamuruna ilave edilir. Genellikle tamir işlerinde ve eskiden dökülmüş beton ile yeni dökülecek beton arasındaki soğuk derzleri engellemek için kullanılır. Bazı araştırmacılar aderans arttırmak amacıyla yüzeye uygulanan kimyasalların veya çimento şerbetinin iki yeni yüzey daha ortaya çıkaracağı için aderansı olumsuz etkileyebileceğini savunmaktadır. Çoğu zaman kullanılan çimento şerbetinin S/Ç oranı yüksek olmakta ve zayıf kesit yaratma olasılığı bulunmaktadır. Bu araştırmacılara göre etkili bir yüzey hazırlığı yapılması yeterli kenetlenmenin sağlanması için yeterlidir (Sifwerbrand ve Paulsson, 1998).

2.3.5.5. Hava sürükleyici katkılar

Hava sürükleyici katkılar beton içerisinde değişik küçük çaplarda (0,05-0,25mm arasında) hava kabarcıkları bırakmak için kullanılır. Bu sayede betonun işlenebilirliği de arttırılmış olur. Milyonlarca hava kabarcığı homojen bir şekilde dağılarak betonun donma-çözülme olaylarından korunmasını sağlar (Baradan, vd., 2012).

Kullanım amacı: özellikle sertleşmiş betonun içerisinde hapsolan karışım suyu, kış aylarında donma ve çözülme olayına maruz kaldığında hacimce genişlemeye uğrar. Bu genişleme çimento hamurunda içsel gerilmelere yol açarak betonu patlatacak seviyelere kadar çıkabilir. Bunun önüne geçebilmek için bilinçli olarak çimento hamurunda boşluklu yapı bırakırız ki suyun hacimce genişmesi esnasında beton zarar görmesin. Böylece betonun donma-çözülme direnci arttırılmış olur.

Hava sürükleyiciler, yoğunluklu olarak beton yollar, pist betonları, havaalanları ve su yapıları gibi yerlerin betonunda kullanılır.

Hava sürükleyici katkıların yüksek dozajlarda kullanılması durumunda betonun hidratasyon ısısında sıkıntılar oluşacağından kullanımı %2 ye kadar sınırlandırılmalıdır.

Aksi halde betonun basınç dayanımında kayba neden olur. TS EN 934-2 (TS EN 934-2, 2002)'ye göre, hava sürükleyici katkı eklenmiş betonun 28 günlük basınç dayanımı, referans betonun basınç dayanımının en az %75'i kadar olmalıdır (Baradan, vd., 2012).

2.3.5.6. Korozyon önleyici (inhibitör) katkıları

Potasyum kromat, potasyum benzoat, sodyum ve kalsiyum nitrit bilinen başlıca korozyon önleyici kimyasal maddeleridir. Ancak kalsiyum nitrit dışındaki yukarıda yazılı bütün kimyasallar betonun mekanik özelliklerini negatif yönde etkiler. Kalsiyum nitrit demir iyonları, klor iyonunun varlığında oluşacak korozyon tepkimelerine karşı etkilidir (Erdoğan, 1997).

Korozyon önleyici kimyasallar çimento ağırlığının yaklaşık %1-10'u arasında denenerek kullanılmalıdır. Bu katkıları çimento hamuruna doğrudan eklenebildiği gibi karışım suyu yardımıyla da ilave edilebilir (Erdoğan, 1997).

2.3.5.7. Diğer kimyasal katkıları

Bu katkıları yukarıda bahsedilen kimyasal katkıların dışında kalanlardır. Renklendiriciler, antifriz katkıları, anti bakteriyel katkıları, su tutucu veya viskozite arttırıcı katkıları, genleşme önleyici yada genleşme yaratıcı katkıları vb. bunlara örnek olarak sayılabilir.

2.4. Betonun Avantajları

Günümüzde çok geniş bir kullanım alanı olan beton, sudan sonra dünyada en fazla tüketilen malzeme haline gelmiştir (Nergiz, 2007). Bunda şüphesiz ki insanoğlunun hayatına sunduğu sayısız avantajlar çok büyük bir yer tutmaktadır. Betonun diğer yapı malzemelerinden ayıran üstün özelliklerin başlıcaları aşağıda sıralanmıştır.

- Taze betona kolayca istenilen şekil verilebilir.
- Betonarme elemanlar şantiye ortamında üretilebildiği gibi fabrikada prefabrik olarak üretilip yerinde montajı yapılabilir.
- Basınç dayanımları çok yüksektir.
- Hizmet ömrü boyunca diğer yapı malzemelerine göre daha az yıpranırlar.
- Yangına karşı dayanıklıdırlar.
- Taze beton hayal edebildiğimiz estetik görünümlere bürünebilir.
- Üretimi kolay ve ekonomiktir. Hata oranı düşüktür.
- Çelik donatı ile kenetlenerek; birbirini tamamlayıcı tek bir malzeme gibi davranabilirler (Erdoğan, 2002).

2.5. Yüksek Dayanımlı Betonun Tasarımı

Öncelikle YDB karışımındaki tüm malzemeleri dikkatlice seçmek ve düzenli olarak kalite kontrollerini yapmak gerekmektedir. YDB tasarlanırken dayanımı düşüren malzemelerin arasındaki boşluk en aza indirilmeye çalışılır. Ayrıca üretilen betonun performansını arttırabilmek için karışıma: yüksek dayanım sınıfında çimento ve agrega ile düşük S/Ç oranında su ve hiper akışkanlaştırıcının yanında çoğu zaman silis dumanı ve uçucu külde eklenir.

Bu yaklaşımlar eskiden beri bilinmekle birlikte günümüzde kullanımı yaygınlaşan hiper akışkanlaştırıcı katkıları ile çok kolaylaşmıştır ve normal betonlarla YDB'ların arasındaki tasarım farklarını oluşturmaktadır.

2.5.1. Toralles Carbonari yöntemi

Toralles Carbonari teorisinde, agregalar arasında en az boşluk oranını yakalayarak en iyi dayanım değerlerine ulaşılmaya çalışılır. Kısacası çimento hamurunda tüm malzemelerin optimum oranlarının olduğu savunulur (Çebi, 2009).

1-) Bu yöntemde öncelikle S/Ç oranı, kullanılacak katkının miktarı ve cinsi seçilmelidir.

2-) Ardından en küçük boşluklu yapıyı elde edecek biçimde; ince ve iri taneli agregaların karışımı hesaplanmalıdır.

3-) En son boşluk oranı %0-10 arasındaki çeşitli tasarımlar karıştırılarak, hedeflenen betonun elde edilebilmesi için hesaplamaların teste tabi tutulması gerekir.

2.5.2. Mehta - Aitcin yöntemi

Mehta - Aitcin teorisinde tasarlanan betonu üretebilmek için hacimce optimum %35'i çimento hamuru, geri kalan hacimce %65'lik kısmı ise optimum ince ve kaba daneli agregalardan oluşturulmalıdır. Ayrıca bu teori puzolanların (mineral katkıların) ekonomik tasarım için şart olduğunu ve maksimum agrega boyutunun akışkanlaştırıcı katkıları ile absorbe edilebileceğini savunmaktadır (Çebi, 2009).

1-) Maksimum agrega boyutu 12-19 mm arasında olmalıdır.

2-) Hacimsel oranı %35 olan çimento hamuru:

- Sadece portland çimentosu,
- Portland çimentosuyla birlikte uçucu kül ya da yüksek fırın cürufu,
- Portland çimentosuyla birlikte uçucu kül ve silis dumanı şeklinde oluşturulabilir.

- 3-) Geri kalan ince ve kaba agregası arasındaki hacimsel oran 2/3'tür.
- 4-) Çimento hamurunu oluşturan malzemelerin ağırlığının %1'i kadar akışkanlaştırıcı betona eklenmelidir.
- 5-) İdeal karışımı buluncaya kadar tasarımda ufak değişiklikler yapılarak hedeflenen beton elde edilebilir.

2.5.3. Aitcin yöntemi

Aitcin yöntemi, Mehta - Aitcin yönteminin değiştirilerek güncellenmesiyle ortaya çıkmıştır (Çebi, 2009).

ACI 2111 Standard Practice for Selecting Proportions"ın normal, ağır ve kütle betonları için yaklaşımı ile aynı yaklaşıma sahiptir. Yaklaşık hacim yöntemini esas alan ampirik sonuçların ve matematik hesapların kombinasyonudur (Alves, vd., 2004).

- 1-) Başlangıçta S/Ç oranı seçilmelidir.
- 2-) Yeterli işlenebilirliği sağlayacak en düşük su miktarı tahmin edilir.
- 3-) Akışkanlaştırıcı miktarı deneme yanılma yöntemiyle bulunur.
- 4-) Kaba agregası hacmi deneyerek bulunur.
- 5-) Agregası biçiminden hapsolan hava hacmi tahmin edilir.
- 6-) Yukarıdaki maddelere göre ampirik bir dizayn tablosu hazırlanarak interpolasyon yapılır.

2.6. Yüksek Dayanımlı Betonlarda Kalite Kontrol

Her ne kadar yüksek dayanımlı betonları hesaplamalarda homojen kabul etmek de, gerçekte oldukça heterojen ve kompozit bir yapıdadır. Ayrıca yüksek dayanımlı betonlar bile kusursuz olmayıp, işçilik, iklim şartları (ortam koşulları), malzeme seçimi, nakliye, karışım oranları vb. etkenlere bağlı olarak kalitesi değişebilir. Bu değişkenlik, binalar arasında, katlar arasında, yapı elemanları arasında olabileceği gibi, aynı yapı elemanının farklı bölgelerinde dahi olabilir. Önemli olan bu değişkenliği objektif bir şekilde tespit ederek; alınan önlemlerle en aza indirebilmektir (Baradan, vd., 2012).

Yüksek dayanımlı betonların kalitesini etkileyen pek çok değişken vardır. Bu değişkenlerin bir kısmı alınan önlemlerle kontrol edilebilirken, bir kısmı da rastgele değişken şeklindedir. Ayrıca laboratuvar ortamındaki numuneler ile şantiye ortamındaki numuneler arasında ciddi farklar görülebilmektedir. Bu farkları en aza indirip objektif sonuçlar elde edebilmek için temsili örnek alımı yerine rastgele örnek alımı tercih edilmelidir (Baradan, vd., 2012).

2.6.1. Üretimde kalite kontrol

Genellikle ihtiyaç duyulan beton dayanımın belirlenmesi ve ihtiyaçlara göre tasarlanan numunenin çeşitli standartları sağlayıp sağlamadığının kontrolü şeklinde geçer.

Üretimdeki betonun kalite kontrolü için farklı ülkelerin farklı standartları mevcut olup; ülkemizde bu konuda çok başlılık söz konusudur. Uygulamada olan TS500 ve TS EN 206 (TS500, 2000; TS EN 206, 2002) arasında farklılıklar bulunmaktadır.

Genel hatlarıyla standartlar arasındaki ortak felsefe:

- 1-) Hedeflenen özelliğin (Örneğin: basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı vb.) öngörülmesi,
- 2-) Yeteri kadar objektif örnek alınması,
- 3-) Üretim aşamasında kalite kontrolünün sürdürülebilir ve gerçekçi olması,
- 4-) Numuneler arasındaki standart sapmanın düşük olması, olarak açıklanabilir.

2.6.2. Yerinde kalite kontrol

Sertleşmiş betonun yerinde dayanımı standart koşullarda hazırlanan, kür edilen örneğin dayanımından farklı olacaktır (Arioğlu ve Arioğlu, 2005). Bu dayanım belirlenirken farklı yöntemler bir arada kullanılarak, istatistiksel analiz yöntemi ile güvenilirlikleri karşılaştırılmalıdır.

Yerinde dayanım için kontrol mekanizması, üretim aşamasındakinden farklı olmalıdır. Çünkü yüksek dayanımlı betonları, şantiye ortamında etkileyen değişken sayısı çok fazladır. Günümüzde analizciler tarafından betonun yerinde dayanımı ölçmede en güvenilir yöntem olarak görülen karot almaya sıkça başvurulmaktadır. Bunun yanında %20-50 arasında standart sapması bulunan beton çekici ve ultrases yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu standart sapma sebebiyle daha az güvenilir olan beton çekici ve ultrases yöntemlerinin tek başına kullanılmaması gerekir. Ancak karot hasar verici bir yöntem olduğundan alınacak karot sayısını azaltmak amacıyla birlikte kullanılabilirler (Arioğlu ve Arioğlu, 2005).

Sonuç olarak yerinde dayanımla standart koşullarda elde edilen laboratuvar dayanımı arasında %15'e kadar fark olabileceği ACI 318 ve TS EN 206'da (ACI 318-99, 1999; TS EN 206, 2002) belirtilmektedir. Aradaki ilişkinin daha objektif olarak

belirlenebilmesi için daha fazla örnek alarak; bu örnekleri şantiye ortamında beklettikten sonra laboratuvardaki sonuçlarla detaylıca karşılaştırmak gerekir.

2.6.3. Karot sonuçlarının değerlendirilmesi

Karot sonuçlarının değerlendirilmesinde farklı metotlar bulunduğu; çok sayıda örnek alarak istatistiksel açıdan karşılaştırmak en sağlıklıdır. Ülkemizde karot sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan TS 10465 (TS 10465, 1992) standardı, 2010 yılında yerini TS EN 13791 (TS EN 13791, 2010) standardına bırakmıştır.

Yüksek dayanımlı betonlardaki karakteristik basınç dayanımları TS EN 206-1 (TSE EN 206-1, 2002) 'e göre basınç dayanımı sınıflarına uygun asgari değerden az olmamalıdır. Bu değerler Çizelge 2.5 'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Farklı beton sınıfları için asgari karakteristik dayanım değerleri.

TS EN 206-1'e Göre Basınç Dayanım Sınıfları	Yapılardaki Asgari Karakteristik Dayanım (MPa)	
	$f_{ck, is, silindir}$	$f_{ck, is, küp}$
C50/60	43	51
C55/67	47	57
C60/75	51	64
C70/85	60	72
C80/95	68	81
C90/105	77	89
C100/115	85	98

2.7. Literatür Özeti

Topçu ve Kaval (2001) yılında betonda silis dumanı kullanımının ekonomik analizi çalışmasında: Silis dumanının dayanımı arttırdığı ancak oranlara dikkat edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Dayanım artışı açısından 350 ve 400 dozajlı betonlarda % 10, 300 dozajlı betonlarda ise % 15 Silis Dumanı kullanılması uygun bulunmuştur. Ayrıca Dozaj sabit tutularak her % 5 Silis Dumanı dilimi ilavesi maliyeti % 2 oranında arttırmaktadır. 300 dozajlı kontrol betonunda Silis Dumanın % 10 oranında kullanılması ile aynı dayanımda, bağlayıcı malzeme maliyetinden yaklaşık % 17'lik tasarruf sağlanmıştır. 350 dozajlı kontrol betonunda %15 Silis Dumanı kullanılması ile aynı dayanımda, bağlayıcı malzeme maliyetinden yaklaşık % 23'lük tasarruf sağlanmıştır.

Topçu ve Canbaz (2001) yılında uçucu kül kullanımının betondaki etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgularda UK kullanımının beton basınç dayanımını

düşürdüğünü ve miktarlarının artırılmasıyla betonun dayanım kazanma sürelerinin de uzadığını tespit etmişlerdir. Ancak yapılan maliyet analizlerinde çimento yerine % 20 UK kullanılması ile beton birim maliyetinde ortalama % 10'luk, % 40 UK kullanılması ile de % 18'lik bir ekonomik kazanç elde edildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca endüstriyel bir atık olan UK 'ün betonda kullanılması ile bu atığın depolanma maliyetlerinin de düşeceğini sonucuna varmışlardır.

Topçu ve Canbaz (2002) Silis Dumanı kullanımı mikro yapı fotoğrafları ile ve kimyasal analizlerle incelendiği kadarıyla betonun içyapısında mikro düzeyde doluluk sağladığı, bağlayıcılığı ile düzenli bir harç yapısının oluşmasına yardımcı olduğu görülmüştür. Ayrıca endüstriyel bir atık olan SD 'nın betonda kullanılması hem çevreye vereceği zararı önleyecektir hem de beton özelliklerini iyileştirdiği için daha kaliteli betonlar üretilmesini sağlayacaktır.

Atış, Özcan, Karahan, Bilim, Sevim ve Demir (2003) de yaptıkları çalışmada, çimento hamuruna farklı oranlarda silis dumanı ekleyerek beton dayanımı üzerindeki etkilerini gözlemlemişlerdir. Yapılan deneylerde silis dumanının taze betonun işlenebilirliğini düşürdüğü, ancak karışım oranına bağlı olarak beton dayanımını %20 ile %50 arasında arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca optimum oranlardaki silis dumanı ve hiper akışkanlaştırıcı katkılarla yapılan betonların rahatlıkla 90-100 MPa seviyesindeki basınç dayanımlarına çıkabileceğini öngörmüşlerdir.

Yazıcı ve Sezer (2007) Silis dumanı ve/veya uçucu kül içeren basınç dayanımı 65-85 MPa arasındaki yüksek dayanımlı betonların aşınma direnci ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemeye çalışmışlardır. Karışımların 28 günlük değerleri çıkartılarak basınç ve eğilme dayanımına bağlı olarak aşınma direncini tahmin eden matematiksel bir eşitlik önerilmiştir. Önerilen denklemin yeterli güvenilirliğe sahip olduğu ayrıca silis dumanının uçucu küle oranla aşınma direncini daha fazla iyileştirdiği belirlenmiştir.

Doğan ve Özkul (2009) Mineral katkılı betonlarda bileşimin basınç dayanımı ve geçirimsizliğe etkisini araştırmıştır. Bu amaçla her karışımda bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı, puzolan/bağlayıcı oranı gibi parametreler değişken olarak seçilmiştir. En düşük klorür geçirimsizliği için optimum uçucu kül/bağlayıcı oranının su kürü uygulamasıyla yükseldiğini savunarak "Merkezi Kompozit Tasarım" adında yöntem belirlenmiştir.

Demir (2009) yılında aynı oranlarda ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisini belirleyip kıyaslamaya çalışmıştır. Bu amaçla kırmataş agrega ve CEM 42,5 sınıfı çimento ile hazırlanan karışımlara %5-10-15-20-25 oranlarında SD ve UK eklenmiştir. Hazırlanan numunelere 7, 28, 90 günlük basınç ve yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda SD katkılı betonların referans betonlara ve UK katkılı betonlara göre çok daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiş olup; bunların arasında da %20 SD katkılı betonun her yaşta optimum oran olduğu tespit edilmiştir. Diğer yapılan tespitlerde SD ve UK katkılı taze betonların slump (çökme) değerlerinin referans betona göre düştüğü ve bu katkıların taze betonda birim ağırlığı azalttığı gözlemlenmiştir.

Nochaiya, Wongkeo ve Chaipanich (2010) yılında Portland çimentosundan ürettikleri betona silis dumanı ve uçucu kül ekleyerek dayanımda %145 lik bir artış yakalamışlardır. Ayrıca uçucu kül ve silis dumanı sayesinde portland çimentosundan tasarruf ederek; daha yoğun bir çimento matrisinin yakalamışlardır.

Bagheri, Zanganeh ve Moalemi (2012) yılında yaptıkları çalışmada $S/\bar{C}=0,38$ sabit olan betona çimento yerine çeşitli oranlarda (%15, %30, %50) sadece yüksek fırın cüruf ve (%2,5, %5, %7,5, %10) sadece silis dumanı eklemişlerdir. Ayrıca yine $S/\bar{C}=0,38$ sabit olan betona silis dumanı - yüksek fırın cürufu kombinasyonunu birlikte ekleyerek numuneleri 180 güne kadar gözlemlemiş ve kendi aralarında kıyaslamışlardır. Sonuçta en iyi çözümün silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun uygun kombinasyonlarda kullanımıyla tasarlanan betonun olduğunu savunarak; uzun vadede (28 gün ve daha ileriki dönem) dayanımı önemli ölçüde arttırdıklarını ve karışım suyu ihtiyacının düşürdüklerini belirtmişlerdir.

Sümer ve Sarıbyık (2013) de klasik betona silis dumanı ve polipropilen lif ekleyerek, betona etkilerini incelemişlerdir. Silis dumanının aşırı ince malzeme olmasından dolayı su ihtiyacını arttırdığını gözlemlemişler ve işlenebilirliği korumak için söz konusu betonların, süper akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

Gesoğlu, Güneyisi, Alzebaree ve Mermerdaş (2013) yılında silis dumanı ve çelik fiber katkılı uçucu kül agregalı betonların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında $S/\bar{C}$ oranı 0,35 ve 0,55 olan farklı seride numune betonları hazırlanmıştır. Araştırmacılar yapılan deneyler sonucunda numuneler arasında

kolerasyon kurarak, bu ilişkiyi matematiksel tabloya döktüler. Sonuç olarak karışama silis dumanının eklenmesi ve farklı tipte çelik fiber takviyelerin uygulanması S/Ç oranına bakılmaksızın betonların mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir.

Binici, Eken ve Dinçer (2013) yılındaki çalışmalarında mineral katkıların ikili ve üçlü kombinasyonlar halinde kullanılmasının; mineral katkıların tek başlarına kullanılması ile ortaya çıkan eksiklikleri giderdiğini tespit etmişlerdir. Yani mineral katkıları birbirlerini tamamlayarak ilk yaşlardaki dayanımlarının referans numunesini yakın ve daha homojen olmasını sağlarken boşluk ve etrenjit miktarını da azaltmıştır.

Sabet, Libre ve Shekarchi (2013) de uçucu kül, silis dumanı ve doğal zeolit kombinasyonlarını içeren farklı yüksek dayanımlı betonların özelliklerini irdelenmiştir. Araştırmacılar 28 günlük beton dayanımlarına en olumlu etkiyi silis dumanının yaptığını; 90 günlük numunelerde uçucu kül ve doğal zeolit olumlu etkilerinin olduğu gözlemlenmiştir.

Aghabaglou, Sezer ve Ramyar (2014) Uçucu kül, silis dumanı ve metakaolin katkılı harçların su emme yüzdeleri hazırladıkları referans numunesiyle karşılaştırarak oranlamışlardır. Sırasıyla mineral katkıların absorbe ettikleri su yüzdeleri %42, %67 ve %74 tür.

Okoye, Durgaprasad ve Singh (2015) yılındaki çalışmalarında farklı yüzdelerde silis dumanı içeren kül bazlı jeo-polimer betonları incelemişlerdir. Deney sonunda silis dumanının çimento hamurunun işlenebilirliğini azalttığı ancak betonun basınç, çekme ve eğilme değerlerini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Chousidis, Rakanta, Ioannou ve Batis (2015) Ptolemais Termik Güç santralinden temin edilen Yunan uçucu külünün betona katıldığında kılcal emilimi azalttığını, her yaşta fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirdiğini gözlemlenmiştir.

Bagha, Shayanfar, Javid ve Ziaadiny (2016) yılında mineral katkılı betonları hızlandırılmış korozyon ve basınç deneylerine tabi tutarak; aralarındaki ilişkiyi gözlemlemeye çalışmışlardır. Deneyde kullanılan mineral katkılı betonların, korozyonu ilerledikçe basınç dayanımlarının da düştüğünü ayrıca 90 günlük numunelerin 31-40 günlük numunelere oranla daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir.

Cheng, Shui, Sun, Yu, Zhang ve Ding (2017) yılında uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolinin katkılı mercan kumu betonlarının özellikleri üstüne çalışmışlardır. Betonda uçucu külün tek başına kullanımı durumunda hem erken hem de

ileri dönemlerdeki basınç dayanımlarının düştüğünü ancak uçucu külün, yüksek fırın cürufu ve metakaolin ile birlikte kullanımı durumunda betonun basınç dayanımlarını büyük ölçüde geliştiğini fark etmişleridir.

Akçaözoğlu ve Güldür (2017) Mikronize kalsit ve uçucu kül katkısının beton özelliklerine etkisini incelemiştir. Araştırmacılar tasarımlarda bağlayıcı miktarları ile su/bağlayıcı oranı sabit tutmuştur. Çalışma sonunda taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapıldığında: kalsit malzemesinin tek başına beton içerisinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılamayacağı ve uçucu kül ile birlikte kullanıldığında donma-çözülme direncini arttırdığı gözlemlenmiştir.



3. YDB'LARIN KALICILIK ÖZELLİKLERİ

Betonarme yapıların, hizmet ömrü boyunca kalıcılığını etkileyen fiziksel ve kimyasal etkenler bulunmaktadır. Bu etkenler çevresel faktörlerden kaynaklanabildiği gibi beton karışımındaki malzemelerin arasındaki reaksiyonlardan da gelişebilmektedir. Betonun hasar oluşum sürecinde, bünyesindeki su, boşluklar ve çatlaklar içindeki taşınım önemli yer tutar. Gazların, suyun ve zararlı maddelerin beton içersindeki taşınımı ve etkileşimi bu yollardan gerçekleşir. Sonuç olarak betonun bünyesini ve boşluk yapısını iyi tanımak gerekir. Çimento hamurundaki çatlak ve boşluklar: genellikle betonun uygun dizayn edilememesinden, yeterince sıkıştırılamamasından yada kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun terleme, buharlaşma vb. durumlarından dolayı ortaya çıkar (Baradan, vd., 2012).

Zararlı maddelerin taşınım hızı yavaş olduğundan, bazı reaksiyonların zararlı etkileri yıllar sonra oluşabilir. Tüm kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi betondaki reaksiyonlarda da sıcaklık, reaksiyon hızını arttıran önemli bir faktördür. Kimyasal reaksiyonlar çoğunlukla fiziksel ve biyolojik etkenlerle bir arada veya bunları izleyen süreçte gelişir ve betonun zaman içinde bozulmasına neden olurlar (Karakurt, 2008).

YDB'larda yıpranmaya neden olan fiziksel olayları: aşınma, donma-çözülme, ıslanma-kuruma, sıcaklık farkları, buz çözücü tuzlar, erozyon, yangın vb. olarak düşünebiliriz. Ayrıca betonarme yapılardaki kimyasal yıpranmalara ise betonda oluşan çatlaklardan sızan su, karbondioksit, oksijen, sülfat, asit ve klor gibi maddeler sebep olmaktadır. Hem fiziksel hem kimyasal etkenlerden dolayı betonun içerisinde yer alan demir donatılar paslanabilmekte, büyük gerilmeler oluşabilmekte ve yapı hizmet ömrünü tamamlayamadan kullanılamaz hale gelmektedir.

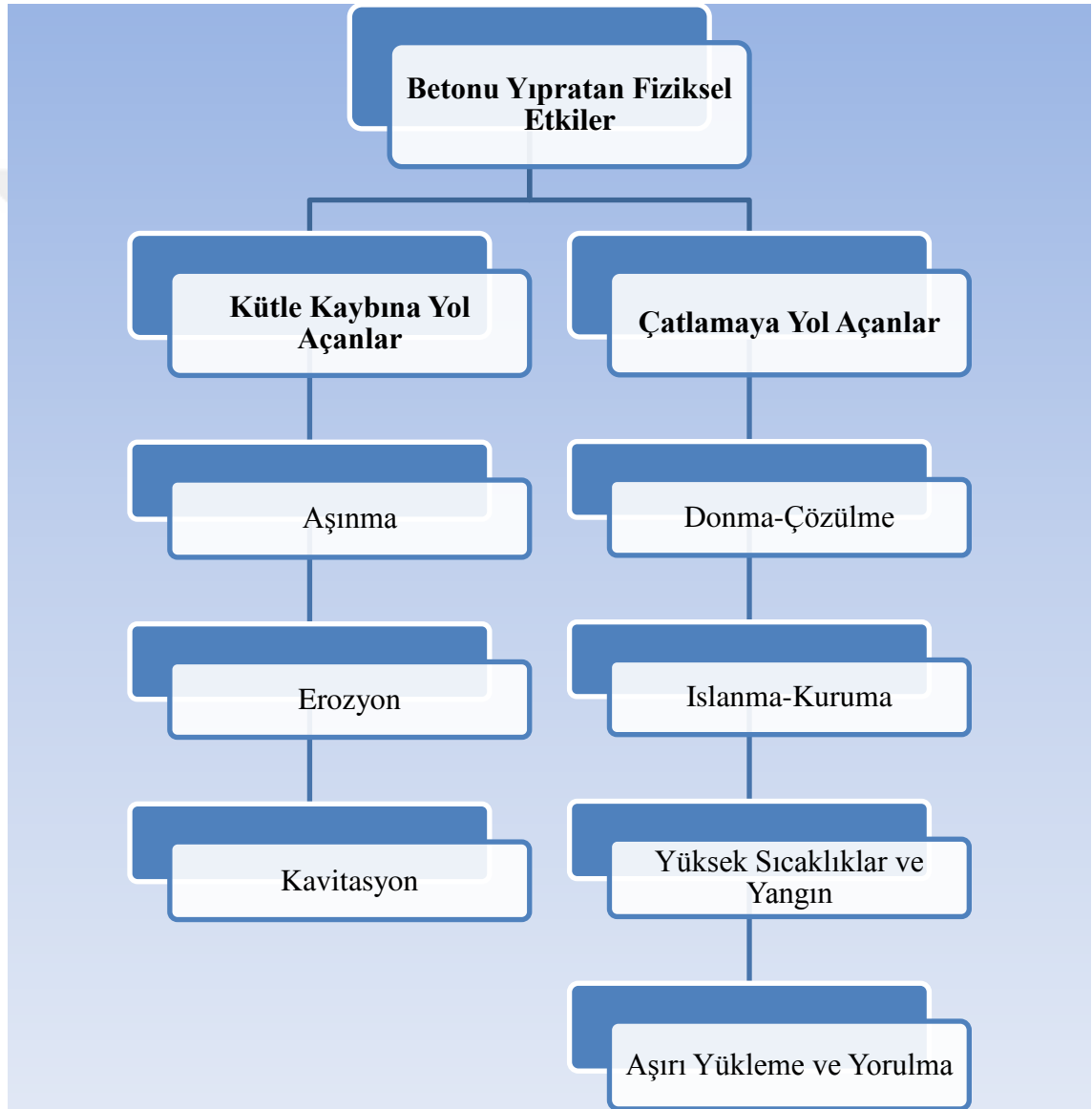
Betonarme yapıların, çeşitli bozulma süreçleri nedeniyle kısa sürelerde işlevselliklerini yitirmeleri sadece ekonomik ve teknik bir problem olarak düşünülmemelidir. Bu durum kıt kaynakların verimsiz olarak kullanımı anlamına da gelmektedir. Doğal kaynakların verimsiz kullanımı, çevresel-ekolojik problemlere yol açar. En az bakım ve onarım gerektiren yüksek dayanımlı uzun ömürlü yapılar. başlangıç maliyetleri nispeten az olan fakat sık sık bakım onarım gerektiren yapılara kıyasla daha ekonomiktirler (Baradan, 2013).

Beton tasarımı yapılırken, yapının planlanan hizmet ömrü boyunca ayakta kalabilmesi için kalıcılık özelliklerine; en az betonun dayanım sınıfı kadar dikkat edilmesi gerekmektedir (Ünsal, 2008).

3.1. Betonun Fiziksel Etkenlerle Bozulması

Betondaki bozulmalara neden olan fiziksel ve mekanik etkenler iki ana başlıkta incelenebilir.

Çizelge 3.1. Betonu yıpratın fiziksel etkiler (Baradan, vd., 2012).



3.1.1. Aşınma Etkisi

Aşınma bir süreç içerisinde yavaş ilerleyen fiziksel bir bozulmadır. Beton yüzeyine etkiyen aşındırıcı mekanik etkiler zamanla artın kütle kaybına sebep olurlar.

Genel anlamda basınç dayanımı yüksek betonların aşınmaya karşı dirençleri de yüksektir. Ancak beton basınç dayanımı tek değişken olmayıp, yüzeydeki aşınmaya karşı ilave tedbirler alınarak da aşınma önlenabilir.

Abrasif aşınma, beton yüzeylerinin (yol betonu, basamak, döşeme vb.) kuru sürtünme yükleri altında zamanla artan kütle kaybıdır. Aşındırıcı etki; araç tekerlerinden, yayaların yürümesinden yada ağır cisimlerin beton yüzeyinde sürüklenmesinden kaynaklanır (Baradan, vd., 2012).

Erozyon ise içinde askıda madde bulunan sıvıların özellikle yüksek hızlara ulaşarak beton yüzeyini çizmesi ve aşındırmasını ifade eder. Bu tür aşındırmalara daha çok beton borularda yada akarsu yakınlarındaki betonarme yapılarda rastlanır (Yeğinobalı, 1999).

Diğer bir aşınma türü olan kavitasyon, su yapılarında görülen oyulma olayıdır. Akan suyun statik basıncı özellikle dik açılı yüzeylerde bozulmalara yol açar (Baradan, vd., 2012).

Beton yüzeyinde çeşitli aşınma türleri olduğundan aşınma dayanıklılığı ölçmeye yönelik standart bir deney yoktur. Yüzeylerin aşınma dayanımlarını belirleyen; dönen tablalar, tekerlekler ve çelik bilyeler esasına dayanan 3 farklı deney yöntemi vardır (Baradan, vd., 2012).

Aşınmanın yer aldığı başlıca beton yapılar şunlardır:

- Akar sularda taşınan kum, çakıl gibi sert maddelerin çarparak yada sürtünerek aşındırdığı baraj, köprü ayağı vb. sanat yapılarındaki kütle betonlar,
- Üzerinden ağır trafiğin geçtiği beton yollar,

Beton yüzeyinin sürtünme ve çarpma etkisine karşı gösterdiği direnme dayanımına "aşınma dayanıklılığı" denilebilir (Nergiz, 2007).

Betonlarda aşınma etkisi Şekil 3.1'de görünen hasarlara sebep olmaktadır.



Şekil 3.1. Betondaki aşınma hasarı (Yazıcı, 2014).

3.1.2. Donma-çözülme etkisi

Soğuk iklimlerde betonun kalıcılığını tehdit eden faktörlerin başında donma-çözülme etkisi gelmektedir. Beton sıcaklığı $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altına indiğinde, betonun içerisinde hapsedilen kapiler boşluklardaki su donmaya başlar. Buza dönüşen karışım suyunun hacmi yaklaşık %9-10 oranında artmaktadır (Nergiz, 2007).

Kapiler boşluklardaki suyun bir miktarının buz haline dönüşmesiyle, ortaya çıkan hacim genişmesi, boşluklarda kalan henüz donmamış durumdaki suyun üstünde hidrolik basınç oluşturmaktadır. Henüz donmayan karışım suyu, kapiler boşluklardan dışarıya doğru itilmektedir. Mevcut boşluklardan dışarıya itilen karışım suyu, boşlukların çevresinde çatlaklara hatta daha büyük yarılmalara neden olabilmektedir (Nergiz, 2007).

Betondaki sıcaklığın yükselmesi ile, çimento hamurunun içindeki buzlar çözülmeğe, dolayısıyla betonun içinde oluşan gerilmeler kuvvetleri ortadan kalkmaktadır. Ancak söz konusu durumun periyodik olarak devam etmesi betonun ömrünü kısaltmaktadır (Nergiz, 2007).

Betonun donmaya karşı direnci çeşitli faktörlere bağlı olmakla birlikte iki ana etken bulunmaktadır.

- 1-) Betonun doygunluk derecesi
- 2-) Betonun boşluk yapısı

Doygunluk derecesi düşük betonların dona dayanıklılığı yüksektir. Teorik olarak ise kuru betonun don sebebiyle zarar görmeyebileceği düşünülebilir. Bu nedenle beton imalatların soğuk iklimlerde yalıtımını sağlayarak su emmesi engellenmelidir. Ayrıca kış mevsiminden önce beton dökümü yapılarak beton imalatların sağlıklı bir şekilde kuruması sağlanmalıdır. Bu basit önlemlere ilave olarak hava sürükleyici katkı maddesi kullanılarak betonun donma-çözülme etkisinden zarar görmesi engellenebilir. İlginç bir çelişki ise bal peteği görünümündeki çok boşluklu kalitesiz bir beton da donma-çözülme olayından aynı nedenle zarar görmez.

Donma-çözülme olayı, fiziksel yıpranmadır. Isınlma nedeniyle doymun hale gelen ve periyodik olarak donma-çözülme etkisine uğrayan bütün yüksek dayanımlı betonlar kısa sürede ömrünü tamamlamaktadır. Parklarda, kaldırımlarda, hava alanlarında ve hatta yollarda kullanılan betonlar, sık sık donma-çözülme etkisine uğrayarak hasara uğrarlar (Anwar, 2010).

Betonda donma-çözülme etkisi Şekil 3.2'de görünen hasarlara sebep olmaktadır.

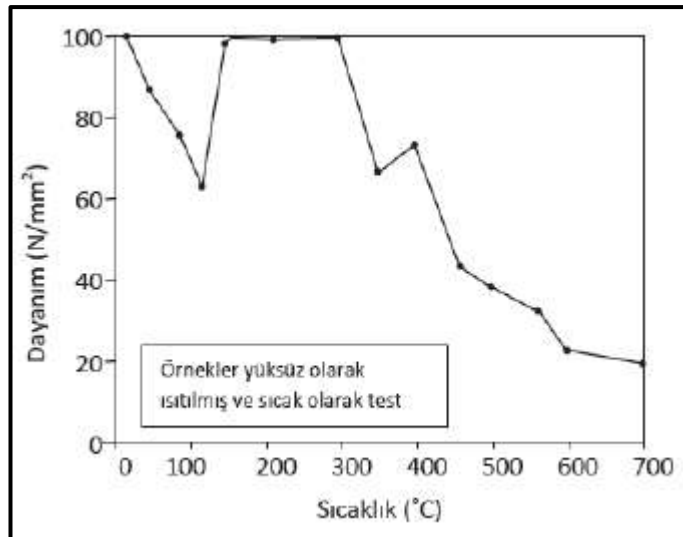


Şekil 3.2. Betondaki donma-çözülme hasarı (Yazıcı, 2014).

3.1.3. Yüksek sıcaklığın betona etkisi

Beton, piyasadaki diğer yapı malzemelerine oranla yüksek sıcaklıklara ve yangına karşı daha dayanıklı bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan beton zehirli gazlar çıkarmaz ve kolay kolay deformasyona uğramaz. İletkenlik katsayısı düşük olduğu için sarmış olduğu içersindeki donatı elemanlarını da koruma altında tutar.

Sadece beton olarak düşünüldüğünde sıcaklık etkisine maruz kalan betonların dış yüzeylerinde ayrışma ve kabuk halinde dökülmeler gözlemlenebilir. Özellikle paspayının kısa bırakıldığı yada donatının açıkta olduğu betonarme yapılarda hasarın boyutları daha büyük olmaktadır. Ayrıca yüksek mukavemetli betonların geçirimsizliği daha yüksek olduğu için sıcaklık dayanımları daha düşüktür. Geçirimsiz beton suyun buharlaşarak dışarı çıkmasını engellediği için, içteki hidrostatik gerilmeler YDB 'u patlatarak dağıtmaktadır.



Şekil 3.3. Betonun basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Baradan, 2013).

Yüksek sıcaklıkların betonun mekanik özelliklerine etkisi Şekil 3.3'te verilmiştir. 50-120 °C sıcaklık aralığında dayanımda düşüş, hamurdaki su tabakalarının şişmesi nedeniyle bağların zayıflamasına bağlanmaktadır. Sıcaklık 300 °C 'ye ulaştığında C-S-H ara yüzeylerindeki su, C-S-H ve sülfalüminattan gelen kimyasal bağ suyunun bir bölümünün kaybedilmesi mikro çatlaklara yol açmaktadır. 400-600 arasındaki yüksek sıcaklıklar sertleşmiş çimento hamurunun tamamen kurumasına, hidrasyon ürünlerinin ayrışmasına ve C-S-H jellerinin parçalanmasına yol açar (Mehta, 1997; Piasta, 1984; Lin, 1996). Yangın söndürme çalışmaları sırasında püskürtülen su CaO 'i tekrar Ca(OH)₂ 'e dönüştürür ve hacimde genleşme görülür. Kısa sürede büzülen ve genişleyen beton içinde oluşan parazit gerilmeler hasarın büyümesine neden olur (Akman, 2001).

TS4065 "Yapı Bileşenlerinin Yanmaya Dayanıklılık Sınıfları (Sınır Dakika Değerleri)" standardına göre, betonarme-çelik kompozit elemanların yangına karşı 2 saat dayanıklı olabilmesi için paspayı en az 4 cm olmalıdır. Yönetmelikteki bu şartın özellikle yangın riski yüksek yapılarda sağlanması gerekmektedir (Baradan, vd., 2012).

3.2. Betonun Kimyasal Etkenlerle Bozulması

Yüksek Dayanımlı Betonlarda meydana gelen zararlı kimyasal tepkimler kendini, gözeneklerin artması, çatlama, yumuşama, dökülme ve rijitliği kaybetme şeklinde gösterir. Zaman içerisinde deformasyon arttıkça betonun zarar görme sürecide hızlanır. Betonarme yapı çevresel faktörlere bağlı olarak birçok kimyasal saldırıya aynı anda maruz kalabilir. Bunların başlıcaları: sülfat, asit ve alkali saldırılarıdır. Ayrıca deniz suyu da sıkça karşılaşılan; betonda hem kimyasal hem de fiziksel etkileri olan bir yıpranma türüdür (Baradan, vd., 2012).

3.2.1. Çelik donatının korozyonu

Betonla birlikte sıkça kullanılan ve betonun eksik yönlerini kapatması istenilen (kenetlenerek tek bir malzeme gibi davranması istenilen) çelik donatı, zamanla, "paslanma" da denilen "korozyon" etkisine maruz kalmaktadır. (Korozyon kelimesi Latince kemirmek anlamına gelen con rodere kelimesinden gelmektedir.) Betonunun içinde bulunan çelik donatının korozyonu dikkat edilmesi gereken deformasyonlardan bir tanesidir. Korozyon maksimum hızına %75-80 bağıl hava nemi bulunan ortamlarda ulaşır. Kuru betonda elektrolit ortam bulunmadığından, suya doygun betonda ise oksijen difüzyonu ihmal edilebilecek kadar küçük değerlerde olduğundan korozyon gerçekleşmez. En çok zararı ise periyodik olarak ıslanıp-kuruyan yapılar görür.

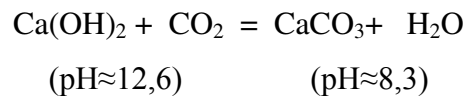
Korozyona maruz kalan çelik donatının kesitinde küçülme meydana geleceğinden; mevcut çekme yükü, daha küçük kesitli çelik donatının üstüne binmiş olacaktır. Yani, birim hacimdeki donatı kademeli olarak daha büyük gerilmeleri karşılamak zorunda kalacaktır. Böylece zamanla gerilme yüklerini taşıyamaz duruma gelen donatı, betonda çatlamalara ve kırılmalara neden olmaktadır (Nergiz, 2007).

Pasın hacmi, korozyonda uğrayan donatının hacminden yaklaşık 2,5 - 3 kat daha fazladır. Korozyonun ilerleyen safhalarında oluşan pas donatının yüzeyine yerleşerek priz almış betonu hacim artışına zorladığı için artan iç gerilmeler karşısında, dayanamayan beton kütlesi çatlayıp parçalanmaktadır (Nergiz, 2007).

Bütün metal yapılar çevresel etkiler sonucunda belirli miktarlarda korozyona uğrar. Paslanmaz çelik yada alüminyum koruma olmaksızın kullanıldıkları çevresel etkilere de bağlı olarak çok yavaş bir korozyon meydana gelir.

Beton yüksek dereceden alkali bir malzemedir. Alkalinitenin ana kaynağı gözenek suyu içinde çözülmüş kireçtir. Çimento alkali oksitlerinin su ile reaksiyonundan oluşan alkali hidroksitler de bir diğer alkali kaynağıdır. Böylece betonun PH değeri 13 mertebesine kadar çıkar. Fakat donatıların korozyondan korunması için çok önemli ve gerekli olan betonun alkali ortamı zamanla karbonatlaşma adı verilen kimyasal bir reaksiyon nedeniyle kaybolabilir. Özellikle, Ca(OH)_2 ortamda bulunan $\text{(CaCO}_3\text{)}$ 'a dönüşür (Baradan, vd., 2012).

Aslında en önemli reaksiyon formülü basitleştirilmiş olarak aşağıda görülmektedir.



Korozyon hızı büyük ölçüde beton içine ulaşan O_2 ve H_2O difüzyon hızına bağlıdır. Bu yüzden betonda boşluk yapısını etkileyen tüm değişkenler korozyon hızını da etkiler. Bunlar arasında betonun S/Ç oranı ilk sırada yer alır (Baradan, vd., 2012).

Düşük S/Ç oranıyla tasarlanan geçirimsiz ve yeterli kalınlıkta pas payı ile hazırlanan betonlar; karbonatlaşma reaksiyonu ve klorür difüzyonuna büyük ölçüde engel olur. Betonda çelik donatı korozyonu Şekil 3.4'te görünen hasarlara sebep olmaktadır.



Şekil 3.4. Betondaki paslanma etkisi (Boğa, 2010)

3.2.2. Asit etkisi

Portland çimentosu yüksek dereceden alkali olduğu için, beton güçlü asitlerin ya da asit oluşturan maddelerin saldırısına dayanıksızdır. Kimyasal saldırı, çimento hidrasyon ürünlerinin ayrışması ve oluşan yeni ürünlerden eriyebilir olanların betondan ayrılması, erimez olanların betonu parçalaması şeklinde görülür. Asitlerin betonda oluşturduğu deformasyon "asit hücumu" olarak tanımlanır (CEB, 1992). Asit hücumlarına en dayanıksız bileşen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'dir. C-S-H bileşenleri de asit saldırısına uğrayıp zarar görebilir (Baradan, vd., 2012).

Çizelge 3.2. Değişik asitlerin beton üzerindeki etkisi.

Saldırı Hızı	Asit Tipi	
	İnorganik	Organik
Hızlı	Hidroflorik, Hidroklorik, Nitrik, Sülfürik	Asetik, Formik, Laktik
Orta	Fosforik	Tannik
Yavaş	Karbonik	-
İhmal edilebilir	-	Oksalik, Tartarik

Asit saldırısına uğramış betonun görünümü Şekil 3.5'te verilmektedir.



Şekil 3.5. Asit saldırısına uğramış beton (Yazıcı, 2014).

3.2.3. Sülfatın betona etkisi

Sülfat iyonları çoğunlukla topraktan ya da zemin sularından betona sızmaktadır. Beton içersine sızan iyonlar çimentonun bazı bileşenleri ile tepkimeye girerek betonun zaman içerisinde deformasyona uğramasına sebep olur. Tepkime sonucu oluşan ürünler betonda genleşme yaratarak kılcal çatlaklara ve hatta parçalanmaya neden olur. Saldırıya uğrayan mukavemeti düşmüş betonun yumuşadığı ve kolayca ufalanabildiği görülür. Sülfatların betonda oluşturduğu deformasyon "sülfat hücumu" olarak tanımlanır. Yapıların temelindeki betonlarda, istinat duvarlarında, beton borularda vb. yerlerde sülfat etkisinin olumsuzlukları sıkça görülebilir (Nergiz, 2007).

Diğer fiziksel ve kimyasal saldırılarda olduğu gibi sülfat saldırılarında da deformasyonları (etkiyi) azaltmak içinde; üretilen betonun mümkün olduğunca yoğun ve geçirimsiz olması gerekmektedir. Ayrıca sülfat saldırısının şiddeti arttıkça geçirimsizliği arttırmanın yanı sıra, C_3A oranı düşük çimento kullanmak ve/veya puzolanik katkılı beton üretmek gibi ek tedbirler almak gerekebilir (Baradan, vd., 2012).

Sülfat saldırısına uğramış normal ve YDB'nun hasarları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3.6. Sülfat saldırısına uğramış normal dayanımlı beton (Yazıcı, 2014).



Şekil 3.7. Sülfat saldırısına uğramış yüksek dayanımlı ve katkılı beton (Yazıcı, 2014).

3.2.4. Alkali - silika reaksiyonu (ASR)

Alkali-silika reaksiyonu (ASR) çok karışık kimyasal bir tepkimedir. Bazı çimentoların çokça bulunan Na_2O (sodyum oksit) ve K_2O (potasyum oksit) gibi alkaliler, aktif silis içeren agregalarla tepkimeye girerek, betonda deformasyona sebep olan bir jel üretirler. ASR saldırısı iki aşamada anlatılacak olursa (Baradan, vd., 2012):



ASR olumundaki üçüncü aktör olan nem, deformasyonun ve genleşmenin şiddeti üzerinde önemli bir faktördür. ASR sadece nemli ortamlarda gerçekleşir. ASR üzerinde beton karışım oranlarının, hava etkisinin, agrega boyutunun, ortam sıcaklığının, mineral ve kimyasal katkıların da etkisi vardır.

Puzolanlar çimento harcının kirecini tutarak, ortamın pH derecesini indirger ve silisin çözünürlüğünü azaltarak ASR 'yi ve jel oluşumunu önlerler (Baradan, vd., 2012). Betonlarda ASR, Şekil 3.8'de görünen hasarlara sebep olmaktadır.



Şekil 3.8. ASR saldırısına uğramış beton (Yazıcı, 2014).

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Malzeme

Çalışmanın bu kısmında, deneylerde kullanılan malzemelerin (çimento, agrega, uçucu kül, silis dumanı, hiper akışkanlaştırıcı katkı vb.) özellikleri açıklanacaktır.

4.1.1. Çimento

Beton karışımlarında Sançim Bilecik çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42,5R çimentosu kullanılmıştır. TS EN 196-1'e ve TS EN 197-2'ye göre (TS EN 196-1, 2016; TS EN 197-2, 2014) çimentonun fiziki ve mekanik özellikleri yapılmış ve sonuçların belirtilen standart değerlere uygun olduğu görülmüştür. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. CEM I 42.5R Portland kompoze çimentosu fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	Değer
Dayanım Sınıfı	42.5
2 Gün (MPa)	29.8
7 Gün (MPa)	39.5
28 Gün (MPa)	52
Priz Başlama (s)	2.3
Priz Sonu (s)	4.8
Özgül Yüzey Alanı (cm ² /gr)	3172
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3.1

4.1.2. Agrega

Çalışmadaki beton tasarımında kullanılacak agregalar Sançim Bilecik Çimento Madencilik Beton San. Tic. A.Ş. 'den temin edilen 3 grup altında toplanmış 0-7 mm, 7-15 mm ve 15- 22 mm gruplarına sahip kırma taş agregalar kullanılmıştır. Silis dumanı ve uçucu kül katkılı betonun üretimi, karışımı ve yerleştirme zorluklarını azaltmak için karışımın en büyük agrega tane boyutu 22 mm olarak seçilmiştir.

4.1.3. Uçucu kül

Proje kapsamında hazırlanan karışımlarda Kütahya-Tavşanlıdaki Tunçbilek Termik Santralinden temin edilen uçucu kül kullanılmıştır.

4.1.4. Silis dumanı

Proje kapsamında hazırlanan karışımlarda Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinden temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. YDB üretiminde kullanılan UK ve SD' nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. UK ile SD'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Bileşen	Uçucu Kül	Silis Dumanı
Yapısı	Küresel	Küresel
Tane Çapı (µm)	1-150	0,1-0,2
Yoğunluğu (g/cm ³)	2,1-2,7	2,2
Özgül Yüzey (cm ² /g)	1.800-5.000	130.000-280.000
SiO ₂	23,1-50,5	93-95
C	-	0,8-1,0
Fe ₂ O ₃	3,7-22,5	0,4-1,0
Al ₂ O ₃	13,3-21,3	0,4-1,4
MgO	1,5-7,5	1,0-1,5
CaO	11,5-29,0	0,6-1,0
Na ₂ O	0,4-1,9	0,1-0,4
K ₂ O	-	0,5-1,0
S	-	0,1-0,3
Kızdırma Kaybı	0,3-1,9	0,5-1,0

4.1.5. Karışım suyu

Laboratuvardaki deneylerimizde Bilecik ilinin şehir şebekesinden temin edilen içme ve kullanma suyu kullanılmıştır.

4.1.6. Hiper akışkanlaştırıcı

Çalışmamızda Bilecik çimento fabrikasından temin edilen TS EN 934-2 standartlarına uygun Sika marka yeni nesil yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. (TS EN 934-2, 2002) Bu katkı, %20'den daha fazla su oranını azaltarak S/Ç oranını düşürdüğü ve ayrışma riski olmaksızın betonun işlenebilmesini arttırdığı için tercih edilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan akışkanlaştırıcı katkının teknik özellikleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Kullanılan katkıının teknik özellikleri.

Özellik	Sikament®-300
Renk	Kahverengi
Görünüm	Homojen sıvı
Yapısı	Özel tip melamin sülfonat polimeri
Yoğunluk (kg/l)-20 °C 'de	1,21 - 1,25
PH Değeri	7 - 11
Donma Noktası (°C)	-8
Alkali Miktarı	% 6
Klorür İyon İçeriği	% 0,1

4.1.7. Diğer malzemeler

Korozyon deneyi için hazırlanan lolipop numunelerde Ø16 mm lik nervürlü S420a betonarme donatı çeliği kullanılmış olup; hızlandırılmış korozyon deneyinin düzeneğinde derişimi ayarlamak için kaya tuzu eklenmiştir (% 4 oranında).

4.2. Yöntem

Referans betonu tasarımı sonrasında; çimento yerine %5, 10 ve 15 oranlarında uçucu kül ve silis dumanı ikamesi yapılarak diğer beton serileri üretilmiştir. Üretilen betonlarda taze beton deneylerinden, taze birim ağırlık, çökme ve yayılma tablası deneyleri yapılarak işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Hazırlanan yüksek dayanımlı beton karışımından 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler alınarak bu numuneler üzerinde 2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı ve fiziksel özellik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonrasında kalıcılık deneyleri için 7x7x7 cm, 10x10x10 cm ve 15x30 cm standart silindir deney numuneleri üretilerek bu numunelerin üzerinde Böhme aşınma, donma-çözülme ve hızlandırılmış korozyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneyi özel olarak tasarlanan deney düzeneğinin ø15x30 cm boyutlarında silindir numunelere ekilen 16 mm çaplı betonarme donatısı içeren lolipop numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonrasında kalıcılık etkilerine maruz kalmış numunelerin iç yapılarında meydana gelen değişiklikler mekanik, fiziksel ve kalıcılık deney sonuçlarıyla beraber değerlendirilerek çalışmanın genel analizi yapılmıştır.

Çalışma için yapılan deneyler Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında ve Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4.3. Beton Karışımları

Proje kapsamında tasarımı yapılan beton numunelerinin, 28 günlük karakteristik küp basınç dayanımının 70-80 MPa arasında olması hedeflenmiştir. Bu amaçla beton tasarımı yapılırken, TS EN 206 standartlarına (TS EN 206, 2002) dikkat edilmiştir. Tasarımı tamamlanan beton numunesinden 3 adet deneme amaçlı 15x15x15 boyutlarında küp numune hazırlanmış olup; 28 günlük basınç dayanımlarının hedeflenen dayanım sınıfına uygunluğu kontrol edilmiştir.

4.4. Bağlayıcı Malzemelerin Karakterizasyonu

Bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve mineralojik karakterizasyonuna XRD ve XRF analizleriyle bakılmıştır.

X-ışınları kırınımı kristalin ve bileşiklerin kalitatif olarak tanımlanmasında pratik ve uygun bir yöntemdir. X-ışınları toz kırınım yöntemi ise, katı bir numunedeki bileşikler hakkında kalitatif ve kantitatif bilgi sağlayabilen tek analitik yöntemdir (Bulun, 2010).

X-ışınları toz yöntemleri her bir kristal madde için X-ışını kırınım deseninin sadece o kristale özgü olması temeline dayanır. Böylece eğer numunenin kırınım deseni karşılaştırıldığı maddenin literatürdeki kırınım deseni ile tam uyuşursa (kırınım açıları aynı olursa), numunenin kimyasal bileşimi bulunabilir (Bulun, 2010).

4.4.1. XRD analizi

X-ışını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristal faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-ışını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar.

Çalışma kapsamında XRD analizi; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında (MARAL), Panalytical Empyrean marka XRD cihazı kullanılarak yapılmıştır.

4.4.2. XRF analizi

XRF sistemi, katı (mineral, metal, kayaç, toprak), sıvı (su, yağ, petrol ürünleri) ve preslenmiş toz gibi farklı formlardaki numunelerde ağır metal konsantrasyonlarını (Na-U element aralığında) yüzdelik (%) ve milyonda birlik (ppm) cinsinden yarı kantitatif olarak analiz edilmesine olanak sağlar.

Çalışma kapsamında XRF analizi; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında (MARAL), Panalytical Axios marka XRF cihazı kullanılarak yapılmıştır.

4.5. Taze Beton Deneyleri

Şimdiye kadar bütün özellikleri ölçebilecek tek bir deney metodu tasarlanmış değildir (Yüce, 2011). Bu nedenle taze beton deneylerinde çeşitlilik söz konusudur. Çalışmanın bu bölümünde proje kapsamında yapılan taze birim hacim ağırlık, çökme ve yayılma tablası deneylerinde izlenen yöntemler açıklanmıştır.

4.5.1. Birim ağırlık deneyi

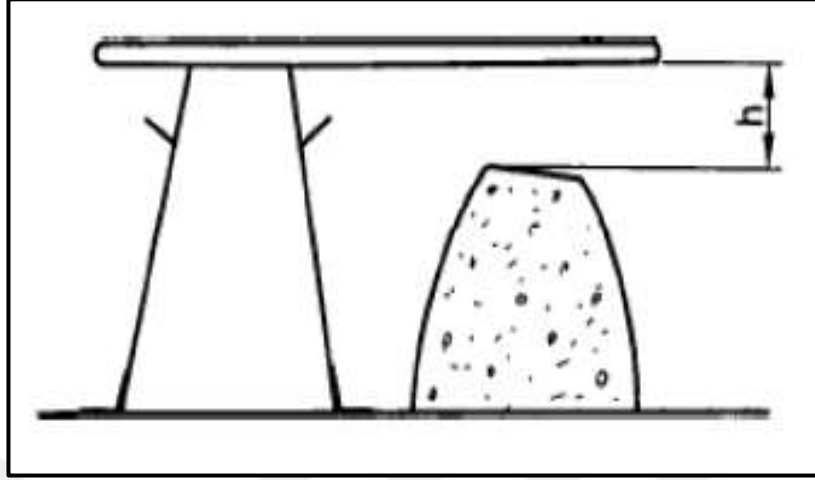
Taze birim ağırlık deneyinde, üretilen numuneler kalıptan önce hacmi bilinen bir kap içerisine vibrasyon yardımıyla yerleştirildi ve taze betonun ağırlığı ölçüldü. Ölçülen ağırlık, hacme oranlanarak birim hacim ağırlık elde edilmiştir.

4.5.2. Çökme (Slump) deneyi

Çökme deneyi, TS EN 12350-2 (TS EN 12350-2, 2010) standartlarına göre; üretilen taze betonun kıvamını görmek için yapılır. Bu yöntem 10 mm ile 200 mm arasındaki çökme değerine sahip betonların kıvamını tespit ederken uygulanabilir. Bu aralığın dışındaki betonlar için diğer kıvam deneyleri yapılmalıdır. Ayrıca çimento hamurunda 40 mm den daha büyük daneli agregalar varsa yine bu yöntem tercih edilmemelidir (Ünsal 2008).

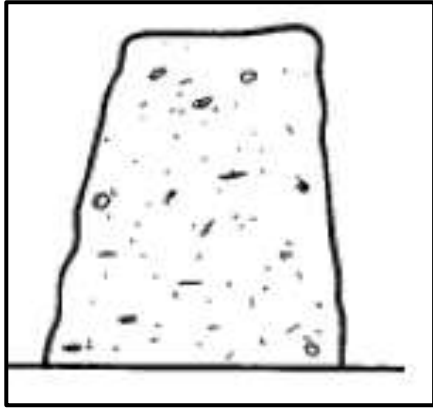
Öncelikle taban plakası ve huninin temas yüzeyleri temizlenerek kurulur. Sonrasında huni yatay konumdaki taban plakası üstüne yerleştirilir. Yerleşme işleminden sonra: TS EN 12350-1'e (TS EN 12350-1, 2002) uygun olarak alınan taze beton huniye eşit yüksekliklerdeki 3 tabaka halinde doldurulur. Doldurma esnasında her tabaka, sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılır. Sıkıştırma esnasında hunideki beton seviyesi düşerse beton ilave edilmeli ve en son huninin üstü düzeltilmelidir. Huninin üstünden taban plakasına taşan beton varsa temizlenir ve huni düşey yönde

yukarı doğru kaldırılır. Huninin kaldırılmasından hemen sonra, huninin üst yüzeyi ile çöken taze beton kütlelerinin en yüksek noktası arasındaki çökme mesafesi (h) ölçülür.

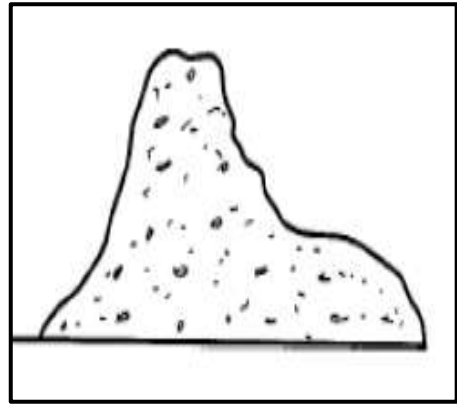


Şekil 4.1. Çökme değerinin ölçülmesi (TS EN 12350-2, 2010).

Deney ancak taze beton numunesinin nizami olarak çökmesiyle kabul edilir. Nizami çökme meydana gelen deneyde, çökme değeri (h), Şekil 4.1’de gösterildiği gibi ölçülerek, en yakın 10mm’ye yuvarlanır. Nizami çökme, Şekil 4.2.(a)’da gösterildiği gibi, betonun deney sonunda, bütün olarak ve simetrik şekilde kalmasını ifade eder. Numunenin Şekil 4.2.(b)’de gösterildiği gibi kayması halinde, yeni numune alınarak deney tekrarlanmalıdır. Ardışık 2 numunede kayma olursa betonun yeterli kohezyona sahip olmadığı anlaşılmalıdır.



(a)



(b)

Şekil 4.2 (a): Nizami çökme. (b): Kayma meydana gelmiş çökme (TS EN 12350-2, 2010).

Şekil 4.3’te de yüksek lisans tezi kapsamında yapılan slump (çökme) deneyi uygulaması gösterilmektedir.



(a)

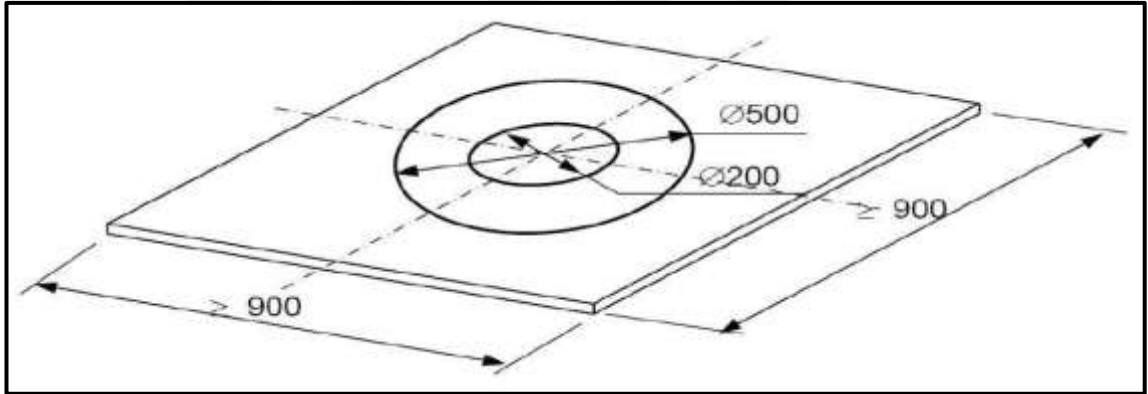


(b)

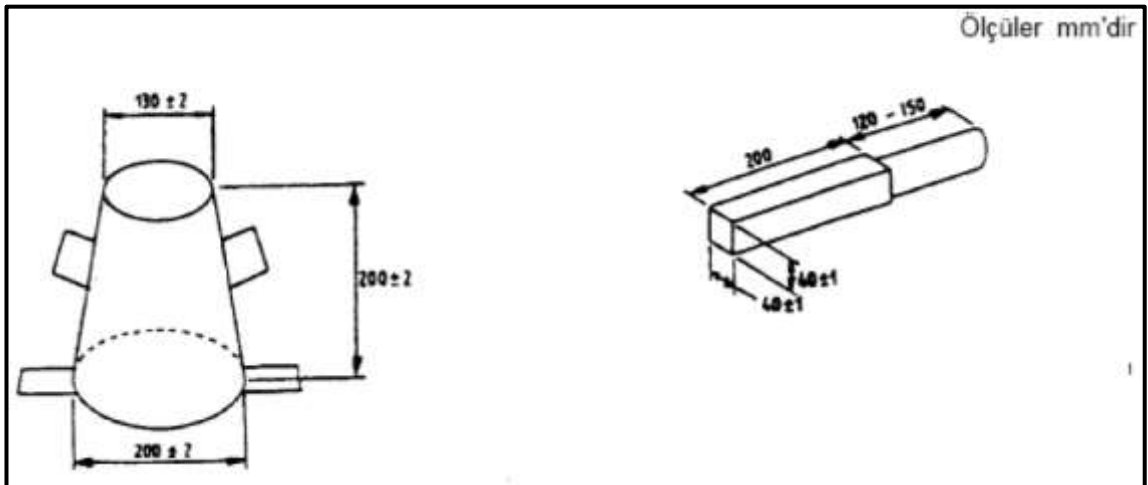
Şekil 4.3 (a): Çökme deneyi-1. (b): Çökme deneyi-2.

4.5.3. Yayılma tablası deneyi

Yayılma tablası deneyi, TS EN 12350-5 (TS EN 12350-5, 2010) standartlarına göre; üretilen taze betonun yayılmasını görmek için yapılır. Bu yöntem, çimento hamurunda 63 mm den daha büyük daneli agregalar bulunan betonlara uygulanmamalıdır.

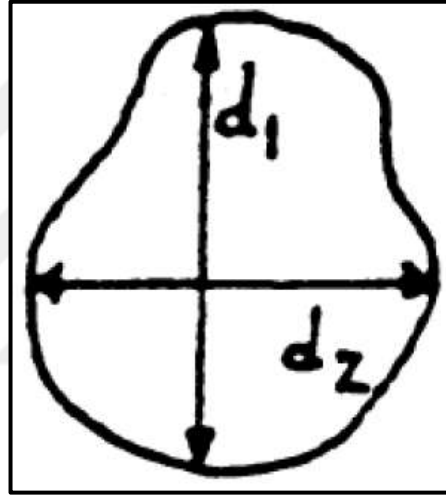


Şekil 4.4. Tipik yayılma tablası (TS EN 12350-5, 2010).



Şekil 4.5. Tipik beton kalıbı ve sıkıştırma çubuğu (TS EN 12350-5, 2010).

Öncelikle yayılma tablası ve beton kalıbının temas yüzeyleri temizlenerek kurulanır. Sonrasında yayılma tablası ve kalıp darbe tesiri olmayan düz bir zemine yerleştirilir. TS EN 12350-1'e (TS EN 12350-1, 2002) uygun olarak alınan beton numunesi kalıba iki eşit tabaka halinde konulur. Doldurma esnasında tabakaların üstü sıkıştırma çubuğu ile 10'ar kez şişlenir. Kalıp üstündeki taşan beton alınarak; kalıbın üstü düzlenmelidir. Düzlenen kalıp, tabla üzerinden düşey şekilde yukarı yönde çekilerek alınır. Kalıp alındıktan sonra yayılma tablasının üst plakası alttaki sabitleyicilere 15 periyodik tekrar yapacak şekilde düşürülür. Son olarak ise tablanın üst plakasına yayılan taze betonun en büyük boyutları ölçülür. Ayrıca tablanın üstünde ayrışma meydana gelip gelmediği kontrol edilmelidir.



Şekil 4.6. Yayılma boyutlarının ölçülmesi (TS EN 12350-5, 2010).

Ölçülen yayılma değerleri, $(d_1 + d_2) / 2$ olarak hesaplanır ve en yakın 10 mm'ye yuvarlanır. Böylece taze betonun yayılma değeri bulunmuş olur.



(a)



(b)

Şekil 4.7 (a): Yayılma deneyi uygulaması-1. (b): Yayılma deneyi uygulaması-2.

4.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri

4.6.1. Birim ağırlık tayini

Kür havuzundan çıkarılan numunelerin, kırılmadan önce toplam ağırlıkları alınarak; toplam hacme oranlanmış; böylece birim ağırlık değerleri bulunmuştur.



Şekil 4.8. Numune Ağırlığının ölçülmesi.

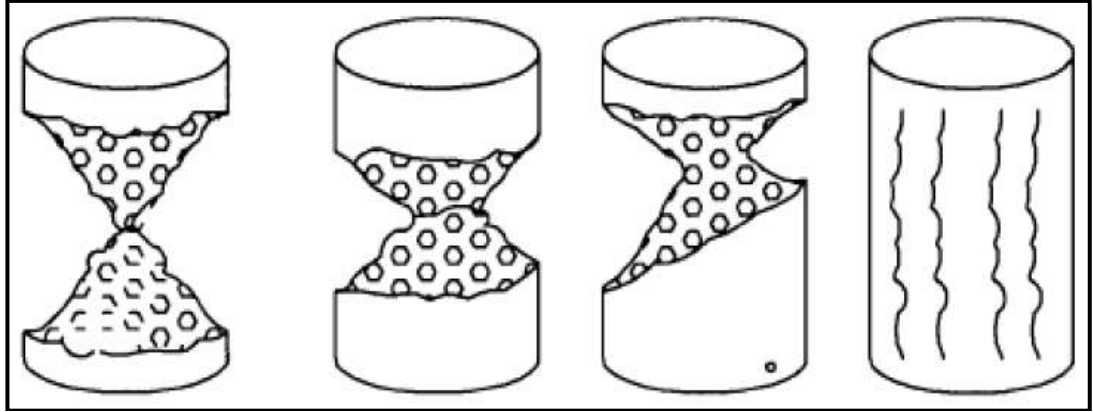
4.6.2. Basınç dayanımının tayini

Basınç dayanımı deneyi, sertleşmiş (priz almış) beton numunelerinde basınç dayanımı tayini için yapılır. TS EN 12350-1, TS EN 12390-1, TS EN 12390-2 veya TS EN 12504-1'e (TS EN 12350-1, 2002; TS EN 12390-1, 2012; TS EN 12390-2, 2010; TS EN 12504-1, 2002) uygun; küp silindir veya karot biçiminde alınan numuneler; TS EN 12390-4 'e (TS EN 12390-4, 2002) uygun basınç deney makinesinde (pres makinesinde) kırılıncaya kadar yüklenir. Numunenin kırılmadan önce taşıyabildiği en büyük yük belirlenerek, basınç dayanımı bulunur. Bulunan basınç dayanımı, en yakın 0,5 MPa (N/mm^2) 'ye yuvarlanmalıdır.

Basınç dayanımı tayininde, deneyin tatmin edici doğrulukta yapıldığının göstergesi olan; numunenin kırılma tipleri de son derece önemlidir. Tatmin edici doğrulukta yapılan küp ve silindir numunelere ait kırılma tipleri Şekil 4.9. ve Şekil 4.10. da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Küp numunenin tatmin edici kırılma şekilleri (TS EN 12390-3, 2003).



Şekil 4.10. Silindir numunenin tatmin edici kırılma şekilleri (TS EN 12390-3, 2003).

4.6.3. Aşınma direncinin Böhme deneyi ile ölçülmesi

Hazırlanan (70x70x70mm) küpler Böhme aşındırma diskinin üstündeki, standart aşındırıcı serpilmiş ize gelecek şekilde yerleştirilir. Disk, küp numuneyi 294 N 'luk aşındırma kuvveti uygulayarak her biri 22 dönüşten meydana gelen 16 tekrar yapacak şekilde döndürür. Standart aşındırıcı iz (kum), deneye başlamadan önce ve her 4 tekrardan sonra değiştirilmelidir. Başlangıç hacmi bilinen numunenin, deney bitiminde son hacmi tekrar ölçülür. Kuvvete maruz kalan numunenin hacmindeki azalma, aşınma kaybı olarak tayin edilir. Deney sonunda aşınma; " ΔV " aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır:

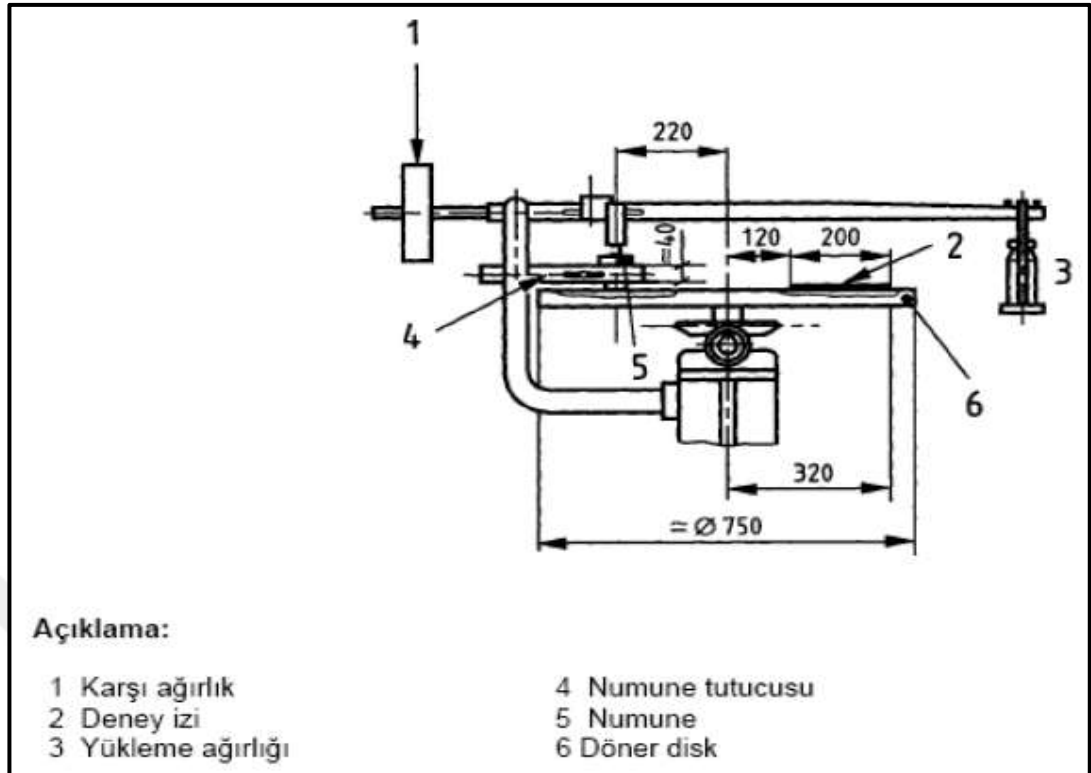
$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_r}$$

Formüldeki:

ΔV : 16 tekrardan sonra mm^3 cinsinden hacim kaybı. (1 tekrar = 22 dönüş)

Δm : 16 tekrardan sonra gram cinsinden kütle kaybı. (1 tekrar = 22 dönüş)

ρ_r : Numunenin mm^3 cinsinden yoğunluğu.



Şekil 4.11 Böhme aşınma deney düzeneği (TS EN 13892-3, 2015).

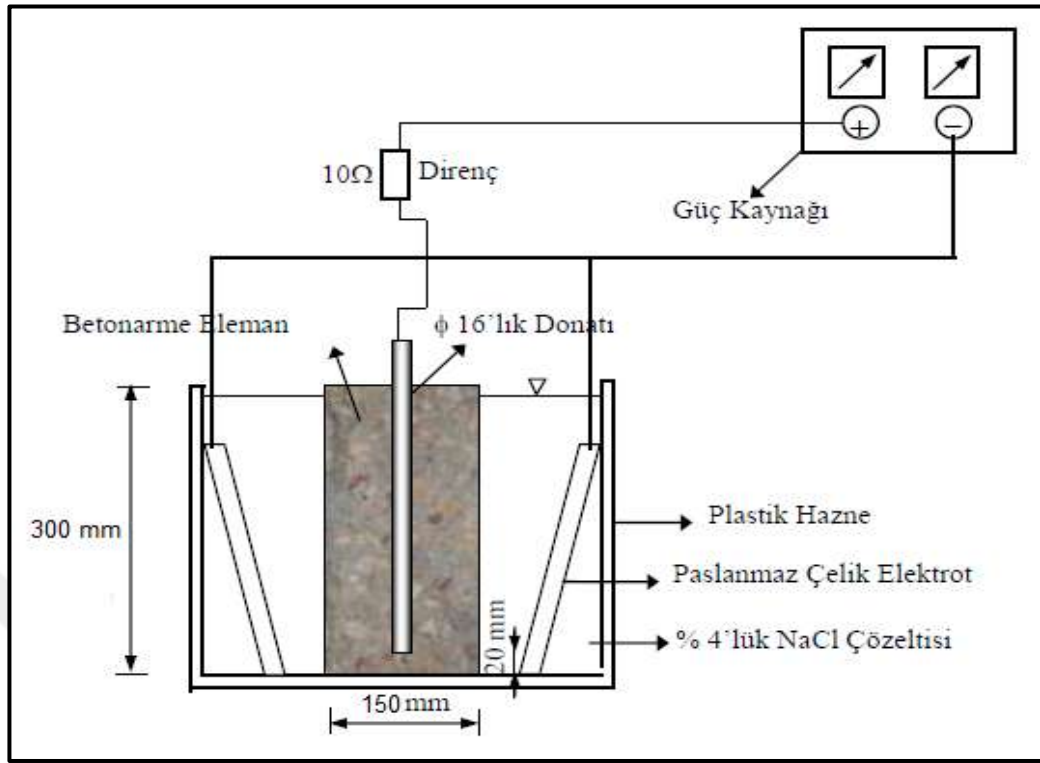


Şekil 4.12 Böhme aşınma deneyi uygulaması.

4.6.4.Hızlandırılmış korozyon deneyi

Hızlandırılmış korozyon deneyi, sertleşmiş ve içinde donatı bulunan beton numunelerin, korozyona karşı dayanıklılığını bulmak amacıyla yapılmıştır. Bu deney aynı zamanda betonun geçirimsizliği hakkında dolaylı yoldan da olsa fikir verir.

Bu deney yönteminde kullanılan deney düzeneği doğru akım kapasiteli bir güç kaynağı, verilerin toplanmasında kullanılan bir veri toplama cihazı, içerisinde %4 konsantrasyonlu NaCl çözeltisi ve iki adet paslanmaz çelik plaka bulunan bir plastik kova ve deney numunesinden oluşmaktadır (Boğa, 2010). Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği (Boğa, 2010).

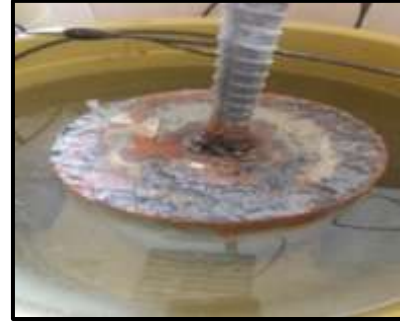
Deneylerde 150 mm çapında 300 mm boyundaki silindir numuneye Ø16 mm nervürlü inşaat demiri saplanmıştır. Lolipop numune olarak nitelendirdiğimiz betonlarımız, %4 derişimli NaCl çözeltisi bulunan plastik kovalara konulmuştur. DC akım güç kaynağıımızdan lolipop numunelere 30 Volt sabit gerilim uygulanarak pozitif kutup donatı çubuğuna, negatif kutup ise çözelti içersinde bulunan paslanmaz çelik plakalara bağlanmıştır. Deney düzeneği farklı serilerden lolipop numunelerin bulunduğu 7 farklı kovaya da eş zamanlı olarak kurularak; sonuçlar deney süresince not edilmiştir.



Şekil 4.14. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği.



(a)



(b)

Şekil 4.15 (a): Deney öncesi numune yüzeyi. (b): Deney sonrası numune yüzeyi.

Deneyimizde her bir tasarımdan (Referans beton, sırasıyla %5-10-15 sadece silis dumanı katkılı beton ve sırasıyla %5-10-15 sadece uçucu kül katkılı beton) 1 adet numune kullanılmış olup; deney süresince lolipop numunelerdeki hasar oluşumları gözlemlenmiştir.

4.6.5. Donma-çözülme deneyi

Donma-çözülme deneyi, Sürdürülebilir Doğaltaş Teknolojileri Geliştirme Laboratuvarında sertleşmiş beton numunelerin, sıcaklık farklarına nasıl tepki verdiğini ve ne kadar basınç kaybına neden olduğunu görmek amacıyla yapılmıştır. Çalışmamızda donma-çözülme deneyinde kullanılacak numuneler belirlenen süre boyunca (28 ve 90 gün) kür havuzunda bekletildikten sonra iklimlendirme dolabına alınmışlardır. İklimlendirme dolabında numuneler, kırım gününe kadar (50 çevrim - 360 saat boyunca) aşağıdaki periyodik sıra ile donma-çözülme deney çevrimine tabi tutulmuştur: -20 ve +20 °C de 2'şer saat kalacak şekilde çevrimler uygulanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.16(a): İklimlendirme dolabındaki numuneler. (b): Basınç presinde kırılan numuneler.

Kırım günü tamamen kurutulan numuneler; pres makinesinde kırılarak deney tamamlanmıştır. Deneyimiz 7 farklı seriden 1'er adet (100x100x100 mm boyutlarında) küp numune üzerinde uygulanmıştır.

4.7. Mikroyapı İncelemesi

Günümüzde ilerleyen bilgisayar teknolojisi doğrultusunda gelişen laboratuvar donanımları, bilgisayar kapasiteleri ve yazılımları araştırmacılara malzemelerin mikroyapısal karakterizasyonu açısından büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Mikroyapısal karakterizasyon; incelenen malzemenin detaylı içyapı analizlerini kapsar ve yapılabilecek mikroyapısal iyileştirmeler ve modifikasyonlar ile makro özelliklerin geliştirilmesine olanak verir (Öztürk, 2009).

Genel olarak mikroyapısal çalışmalar; örnek hazırlama, görüntü alma, görüntü analizi ve mikroyapı-makro özellik ilişkilerinin oluşturulması olarak özetlenebilir (Öztürk, 2009).

Üretilen katkılı çimentoların dayanım gelişimi ve dayanıklılık deneyleri için içyapıda oluşan değişimleri taramalı elektron mikroskobu SEM (Scanning Electron Microscope) yardımıyla analiz edilmiştir. Elektron mikroskoplarının çözme güçleri, odaklama derinlikleri ve büyütme oranları optik mikroskoplara göre çok daha fazladır. Bu nedenle deney numunelerinin kristal yüzeylerini daha iyi inceleyebilmek için SEM analizleri yapılmıştır. Özellikle ileri yaşlarda ortaya çıkan puzolanik reaksiyonların içyapıdaki değişime etkisini belirleyebilmek için, 90 gün süreyle kür edilmiş beton numuneleri üzerinde mikroyapı incelemelerinin yapılması uygun görülmüştür. (Karakurt, 2008).

SEM analiziyle görüntü alınabilmesi için, betonlardan yaklaşık 20-25 gr ağırlığında örnekler alınmış; alınan örnekler Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında (MARAL'da), ZEISS Supra 40VP marka cihaz kullanılarak SEM analizine tabi tutulmuştur.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

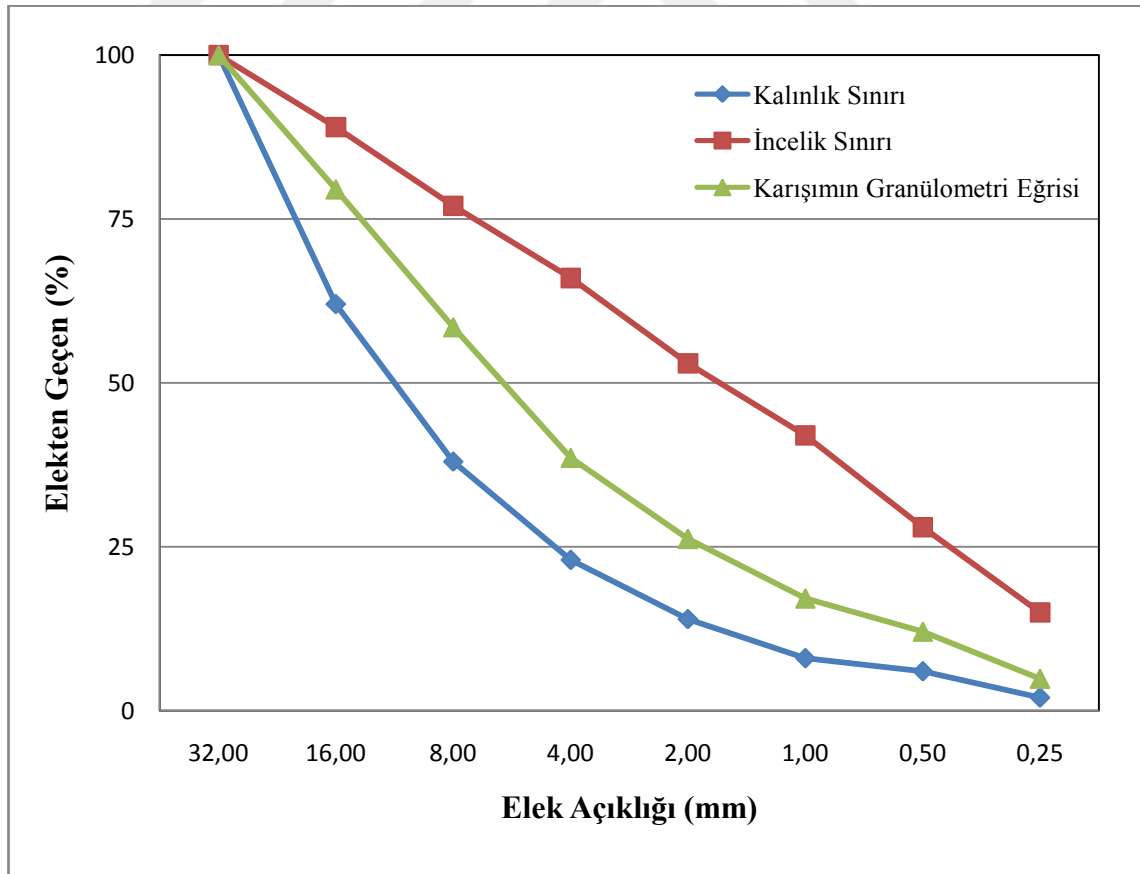
5.1. Malzeme Deneyleri

5.1.1. Agreganın granülometrisi (elek analizi)

Çalışmada kullanılacak agrega, yapılan elek analizi sonucunda TS 706 'da belirtilen sınır eğrilerinden incelik ve kalınlık sınırı (A ile B arasında) arasında uygun bölgede kalmıştır. En uygun granülometri eğrisini elde edebilmek için üretilen betonlara 0-7mm agregadan %35, 7-15mm agregadan %30 ve 15-22mm agregadan ise %35 oranında eklenmiştir.

Çizelge 5.1. Agregaların elek analizi sonuçları.

Numune Cinsi	31,5 (%) Geçen	16 (%) Geçen	8 (%) Geçen	4 (%) Geçen	2 (%) Geçen	1 (%) Geçen	0,50 (%) Geçen	0,25 (%) Geçen	Karışım Oranı (%)
0-7 mm	100,0	100,0	100,0	97,5	70,1	45,7	31,7	11,5	0,35
7-15 mm	100,0	100,0	78,0	14,7	5,4	3,6	3,1	2,7	0,30
15-22 mm	100,0	41,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,35



Şekil 5.1. Seçilen karışımın granülometri eğrisi.

5.1.2. Agreganın aşınma direnci - Los Angeles deneyi

Agreganın aşınma değerleri Los Angeles deneyi ile belirlendi. İri (15-22 mm) ve orta (7-15 mm) agregaların her birinden 2,5 kg numune alınarak tambura konuldu. Tamburdaki 5 kg agregaya ilave olarak 12 adet çelik bilye tambura eklendi. Los Angeles deney aletindeki tambur eksenini etrafında dakikada 30-33 devir yapacak şekilde ayarlandı. Tambur 100 ve 500 devir yaptığinde içindeki numuneler 12 nolu elekten geçirildi.



(a)



(b)

Şekil 5.2 (a): Tamburun içindeki agrega ve çelik bilyeler. (b): Tambur kendi eksenini etrafında dönüşü.

Çizelge 5.2. Los Angeles deney sonuçları

Devir Sayısı	Elek Altı ve Üstünde Kalan Numune	Miktar (gr)	Oran (%)	Sonuç
Tamburda 100 Tam Devir Yaptıktan Sonra	12 Nolu Elek Üstünde Kalan Agregası	4539	%91	<i>Elek Altında Kalan Malzeme %10 dan Küçük Olduğu İçin Agreganın Aşınma Deneyi Sağlanmaktadır. Söz konusu Agregası Betonda Kullanılabilir.</i>
	12 Nolu Elek Altında Kalan Agregası	461	%9	
Tamburda 500 Tam Devir Yaptıktan Sonra	12 Nolu Elek Üstünde Kalan Agregası	3598	%72	<i>Elek Altında Kalan Malzeme %50 dan Küçük Olduğu İçin Agreganın Aşınma Deneyi Sağlanmaktadır. Söz konusu Agregası Betonda Kullanılabilir.</i>
	12 Nolu Elek Altında Kalan Agregası	1402	%28	

5.1.3. Agreganın birim ağırlık, yoğunluk ve su emme deneyleri

Agrega numunesi 3 dm³ lük kap içerisine konarak gevşek ve sıkışık birim ağırlıkları bulunmuştur. Sıkışık birim ağırlık için her seferinde kabın 1/3 ü doldurularak 25 kez demir çubukla şişlenmiştir. İnce agreganın (0-7 mm) birim ağırlığı 1,896 t/m³, orta agreganın (7-15 mm) birim ağırlığı 1,618 t/m³ ve iri agreganın (15-22 mm) birim ağırlığı 1,507 t/m³ olarak bulunmuştur.

Su emme deneyi için iri agregadan 1,5 kg alınarak 24 saat su içerisinde bekletilmiştir. Suda bekleyen agregaların yüzeyi kurulanmış malzeme kuru yüzey-doygun hale getirilmiştir. Ağırlık not edildikten sonra malzeme 24 saat 105 °C derecedeki etüve atılmış ve kuru ağırlık bulunmuştur. Buna göre betonda kullanılacak agreganın su emmesi %0,4'tür. Ayrıca söz konusu malzeme etüve atılmadan önce yoğunluk tespiti de yapılmış olup; agreganın özgül ağırlığı 2,70 gr/cm³ olarak bulunmuştur.



(a)



(b)

Şekil 5.3 (a): Agreganın sıkışık ve gevşek birim ağırlık tespiti. (b): Agregada yoğunluk tespiti.

5.1.4. Puzolanik aktivite deneyi

Bu deney kireç-puzolan karışımlarının, basınç dayanımlarının ölçülmesi esasına dayanır. Proje kapsamında kullanılacak olan mineral katkıların (silis dumanı ve uçucu külün) uygunluğu TS 197-1'e göre (TS EN 197-1, 2012) 4x4x16cm boyutlarında hazırlanan prizma numuneler üzerinde test edilmiştir. Hazırlanan toplam 9 adet numuneden, 3 tanesi referans harç numunesi, 3 tanesi silis dumanlı harç numunesi, 3 tanesi uçucu küllü harç numunesidir.

TS 197-1'e (TS EN 197-1, 2012) göre hazırlanan karışım oranları belirtilen harç numunelerinin kırılgan eğilme testlerinde önce en yüksek gerilmede iken çatlama değerlerine bakılmıştır. Daha sonra ayrılan sağ ve sol parçaların ayrı ayrı basınç değerleri bulunmuştur. Deney sonucu elde edilen eğilme ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Prizma numunelerin deney sonuçları.

Harç Türü	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)
Referans Harcı - (3 Adet)	8,95	48,57	2,18
Silis Dumanlı Harç - (3 Adet)	9,68	58,25	2,18
Uçucu Küllü Harç - (3 Adet)	7,69	39,33	2,17

Betonda kullanılan puzolanik malzemelerin, tepkimeye girme ve bağlayıcılık durumları aşağıdaki formül yardımıyla kontrol edilir.

- Puzolanik Aktivite = $\frac{A}{B} \times 100$
- Puzolanik Aktivite $\geq$ %70 olmalıdır.

A : çimento + kül karışımı numunelerin ortalama basınç dayanımı

B : karşılaştırma(yalnızca çimento numunelerinin) ortalama basınç dayanımı

Çizelge 5.4. Puzolanik aktivite deney sonuçları.

Harç Türü	Puzolanik Aktivite Hesaplaması	Sonuç
Silis Dumanlı Harç	$\frac{58,25}{48,57} \times 100 = \%119,93$	%119,93 $\geq$ %70 olduğu için sağlanmıştır. Betonda kullanılabilir.
Uçucu Küllü Harç	$\frac{39,33}{48,57} \times 100 = \%80,98$	%80,98 $\geq$ %70 olduğu için sağlanmıştır. Betonda kullanılabilir.



(a)



(b)



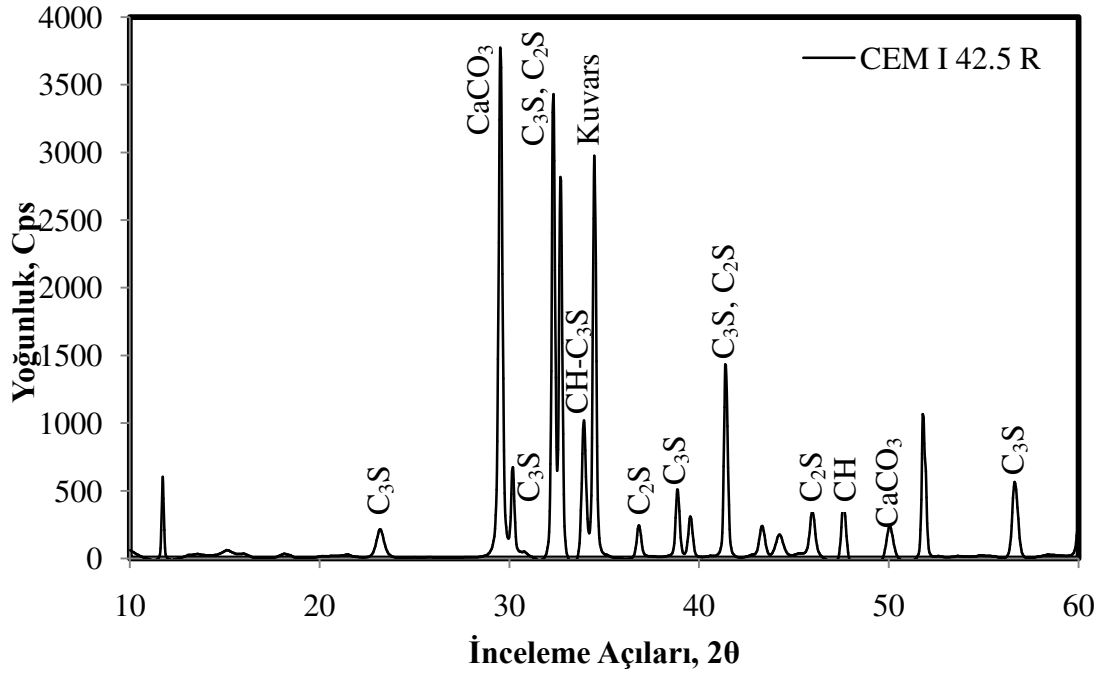
(c)

Şekil 5.4 (a): Üç nokta eğilme deneyi. (b): Eğilme deneyinde ortadan kırılmış numune. (c): Kırılan parça üzerinde basınç deneyi uygulaması.

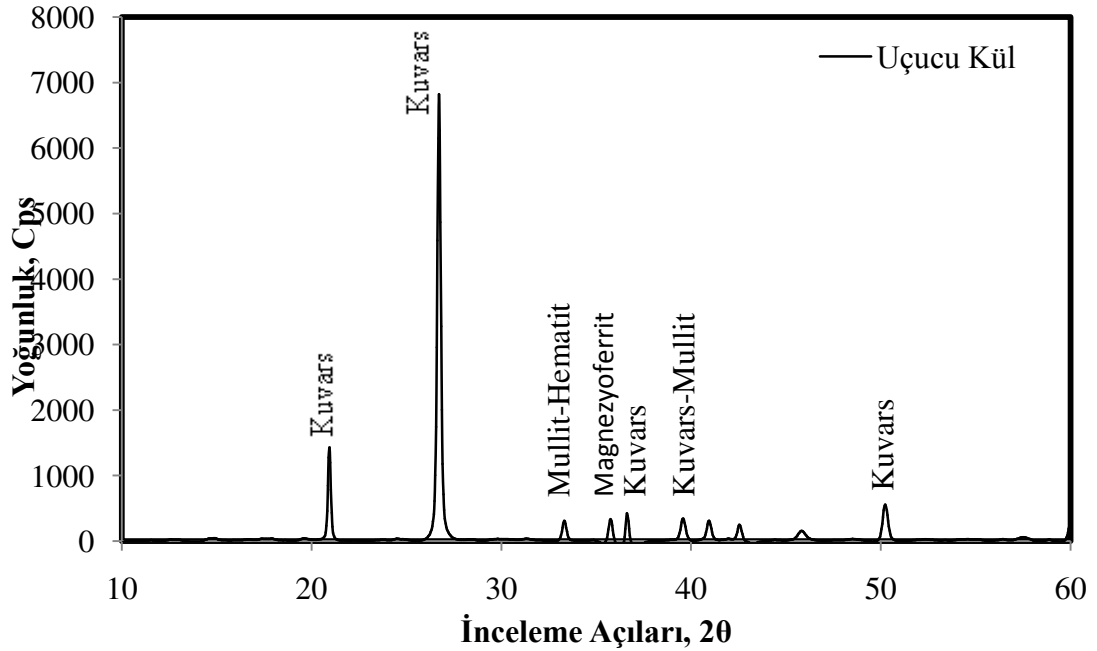
5.1.5. XRD analizi

Deneylerde kullanılan malzemelerin (CEM I 42,5 R çimentosu, uçucu kül ve silis dumanı) XRD analiz spektrumları aşağıda verilmiştir.

Şekil 5.5 incelendiğinde çimentonun ana bileşen fazlarından olan C_2S , C_3S ve Kalsiyum oksit bileşiklerinin varlığı görülebilmektedir.

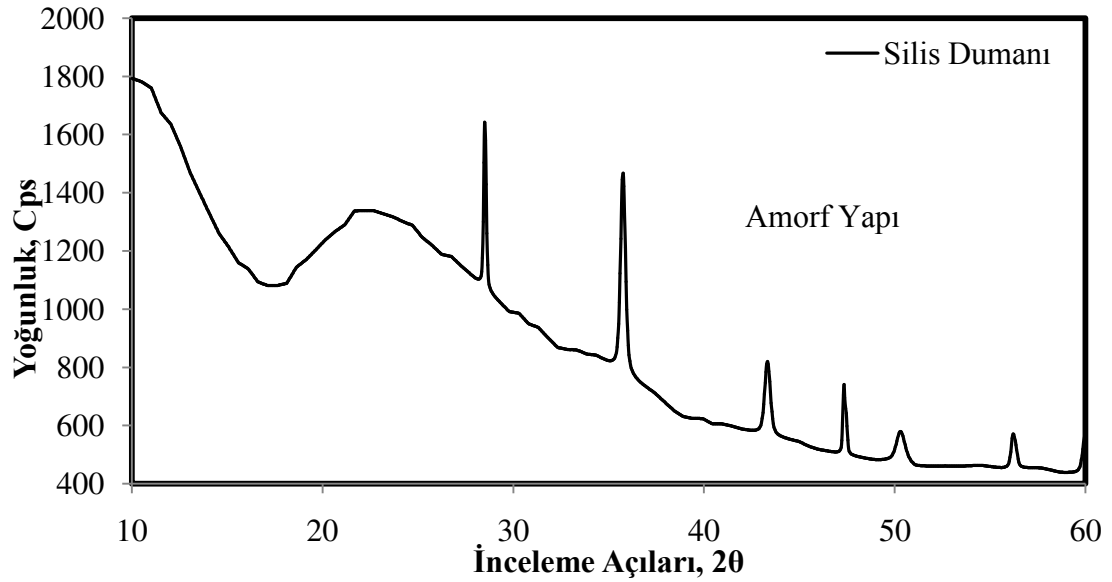


Şekil 5.5. CEM I 42,5 R için XRD spektrumu.



Şekil 5.6. Uçucu kül için XRD spektrumu.

Uçucu külün XRD spektrumu incelendiğinde ise (Şekil 5.6) mineralojik yapıda Kuvars, Mullit - Hematit, Magnezyoferrit yapılarının olduğu görülmektedir. Silis dumanı numunesinin mineralojik yapısı incelendiğinde (Şekil 5.7) XRD spektrumunun amorf yapıya işaret ettiği görülmektedir.



Şekil 5.7. Silis dumanı için XRD spektrumu.

5.1.6. XRF analizi

YDB üretiminde kullanılan mineral katkıların ve çimentonun XRF analizinden elde edilen kimyasal özellikleri Çizelge 5.5 'te görülmektedir. Uçucu külün, reaktif kireç miktarının %10'un altında olması nedeniyle TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silisli uçucu kül) kapsamına girmektedir. Reaktif silis miktarının %25'in üzerinde olması nedeniyle TS EN 197-1'de V sınıfı uçucu kül şartlarının tamamını sağlamaktadır (Türker, vd., 2007).

Çizelge 5.5. YDB üretiminde kullanılan bağlayıcıların kimyasal özellikleri.

Ana Oksitler	CEMI 42.5 R (%)	UçucuKül (%)	SilisDumanı (%)
SiO ₂	21.52	59.45	94.20
Al ₂ O ₃	5.32	16.55	0.25
Fe ₂ O ₃	3.20	12.35	0.55
CaO	64.22	1.50	0.25
MgO	1.44	4.83	0.23
SO ₃	3.51	0.41	0.20
K ₂ O	0.84	1.21	0.50
Na ₂ O	0.52	0.50	0.02
Cl ⁻	0.006	0.001	-
Kızdırma Kaybı	3.58	2.40	4.28

Yine $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin %70'in üzerinde ve CaO 'in %10'un altında olması nedeniyle ASTM C 618 standartlarına göre F sınıfı (düşük kireçli) uçucu küle uygun olmaktadır (Türker, vd., 2007).

Silis dumanının kimyasal analizi incelendiğinde %94,20 oranında SiO_2 içerdiği ve bunun oldukça yüksek silis oranına karşılık geldiği görülmektedir.

5.2. Numune Kodlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada 7 farklı karışım bulunmaktadır. Bu karışımların 1 tanesinde bağlayıcı madde olarak yalnızca çimento kullanılmış ve "referans" olarak isimlendirilmiştir. Bunun dışındaki diğer 6 karışımın kodlaması yapılırken beton karışımına eklenen mineral katkının cinsi ve oranı dikkate alınmıştır. Belirlenen numune kodları Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Numune kodları.

Numune Tipi (Kod)	İçerik
Referans	Kontrol Betonu
SD5	%5 Silis Dumanı Katkılı Beton
SD10	%10 Silis Dumanı Katkılı Beton
SD15	%15 Silis Dumanı Katkılı Beton
UK5	%5 Uçucu Kül Katkılı Beton
UK10	%10 Uçucu Kül Katkılı Beton
UK15	%15 Uçucu Kül Katkılı Beton

5.3. Beton Tasarımı

Bu çalışmada, biri referans olmak üzere; çeşitli oranlarda (%5-10-15) silis dumanı veya uçucu kül içeren; toplam 7 farklı seride beton üretilmiştir.

Referans betonunda çimento dozajı 480 kg/m^3 alınmış olup; işlenebilmeyi kolaylaştırmak amacıyla çimento miktarının ağırlıkça % 1,5'si oranında hiper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Ayrıca etkin su/çimento oranı 0.38 olarak belirlenmiştir. Agrega oranları ideal granülometri eğrisine göre belirlenmiş olup; betondaki karışım oranları Çizelge 5.7'de gösterilmiştir. Beton bileşenleri 50 dm^3 hacmindeki betonyerde karıştırıldıktan sonra hiper akışkanlaştırıcının ve su/çimento oranının taze beton üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla taze beton deneyleri yapılmıştır. Taze beton kalıplara yerleştirildikten sonra sarsma tablası ile üzerinde harici vibrasyona tabi tutulmuştur. 24 saat sonra kalıplardan alınan numuneler, sıcaklığı $20 \pm 2^\circ\text{C}$ olan kirece doymun su içerisinde; deney süresi gelene kadar kür edilmiştir.

Çizelge 5.7. Beton karışım oranları (1 m³ için).

Numune Tipi	Çimento (kg)	UK (kg)	SD(kg)	Su (kg)	Katkı (kg)	0-7 mm Agrega (kg)	7-15 mm Agrega (kg)	15-22 mm Agrega (kg)
Referans	480	-	-	182	7	624	535	624
SD5	456	24	-	182	7	624	535	624
SD10	432	48	-	182	7	624	535	624
SD15	408	72	-	182	7	624	535	624
UK5	456	-	24	182	7	624	535	624
UK10	432	-	48	182	7	624	535	624
UK15	408	-	72	182	7	624	535	624

5.4. Beton Üretim Süreci

Yapılan çalışmada aşağıdaki sıra izlenerek beton üretimi ve deneyleri tamamlanmıştır.

- Karışım hesabı yapılan agregaların etüvde tamamen kurutularak hazır hale getirilmesi,
- Betonyere çimento, agrega ve tasarım durumuna göre puzolanın (sadece UK, sadece SD yada hiçbiri) eklenerek karışımın harmanlanması,
- Hesaplanan karışım suyunun %70 'inin betonyere eklenerek, 2-3 dakika betonyerin karıştırılması,
- Çözünürlüğü yükseltmek için geri kalan karışım suyunun hiper akışkanlaştırıcı ile karıştırılarak betonyere eklenmesi ve bir süre daha betonyerin karıştırılması,



(a)



(b)

Şekil 5.8 (a): %30 Karışım suyu ve hiper akışkanlaştırıcının karıştırıcıya eklenmesi. b): Taze betonun görünümü.

- Çimento hamuru, priz almadan önce taze beton deneylerinin yapılması,



(a)



(b)

Şekil 5.9 (a): Abrahms hunisi. (b): Çökme değerinin ölçümü.



(a)



(b)

Şekil 5.10 (a): Yayılma hunisi. (b): Yayılma sonrası.

- Betonun kalıplara yerleştirilmesi ve vibrasyonun yapılması,



(a)



(b)

Şekil 5.11 (a): Ø15x30cm lolipop numune. (b): Puzolanik aktivite deney numuneleri.

- Priz alan betonun, kalıplardan çıkartılarak kür havuzuna konulması ve deney gününe kadar bekletilmesi,



Şekil 5.12. Kür havuzunda şartlandırılan numuneler.

- Deney gününe kadar bekleyen numunenin kür havuzundan çıkartılarak sertleşmiş beton deneylerinin yapılması.

5.5. Taze Beton Deney Sonuçları

Üretilen numunelere "Malzeme ve Yöntemler" bölümünde anlatıldığı şekliyle yapılan; taze birim hacim ağırlık, çökme (slump) ve yayılma tablası deneylerinin sonuçları aşağıdaki Çizelge 5.8 'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8. Taze beton deney sonuçları.

Numune Tipi	Taze Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	Çökme (cm)	Yayılma Tablası (mm)
Referans	2446	15	400
SD5	2438	13	405
SD10	2431	12	395
SD15	2423	12	385
UK5	2442	14	405
UK10	2439	12	400
UK15	2435	13	395

Numunelerin taze birim hacim ağırlıklarına bakıldığında; çimento yerine karışıma mineral katkıları eklendikçe ağırlık azalmıştır. Bunun nedeni silis dumanı ve uçucu külün yoğunluklarının çimentodan düşük olmasıdır. Karışımlarda çimento yerine ikame edilen mineral katkı oranı arttıkça, taze birim hacim ağırlıkta orantılı olarak düşmüştür.

Çökme değerlerine bakıldığında; karışıma uçucu kül veya silis dumanının eklenmesi çökme değerlerini azaltmıştır ancak yayılma tablası deneyinde değerler

yaklaşık olarak aynıdır. Ancak SD15 numunesinin yayılma tablası değerlerinde, referans harcına göre 15mm düşüş olmuştur.

Bütün taze beton deneyleri birlikte değerlendirildiğinde referans betonuna en yakın ve en iyi sonuçları UK5 numunesi göstermiştir.

5.6. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

5.6.1. Sertleşmiş birim hacim ağırlık

Çalışma kapsamında, 7 farklı serinin 90 günlük birim hacim ağırlıkları için 15x15x15cm boyutlarında küp numuneler hazırlanmıştır. Üretilen numunelere "Malzeme ve Yöntemler" bölümünde anlatıldığı şekliyle yapılan; sertleşmiş birim hacim ağırlık, deneyinin sonuçları aşağıdaki Çizelge 5.9 'da gösterilmiştir.

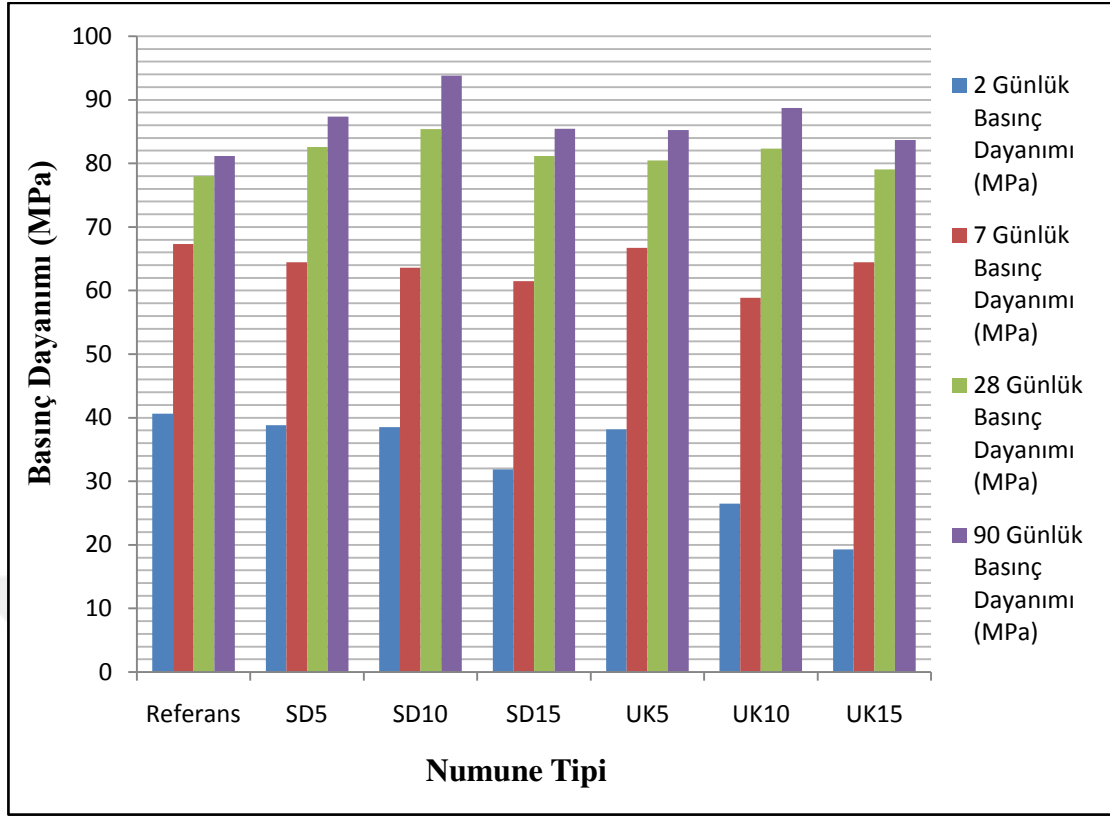
Çizelge 5.9. Sertleşmiş betonda birim hacim ağırlık deneyi sonuçları.

Numune Tipi	Sertleşmiş Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
Referans	2436
SD5	2430
SD10	2420
SD15	2412
UK5	2433
UK10	2430
UK15	2425

Karışımlarda çimento yerine ikame edilen mineral katkı oranı arttıkça, sertleşmiş birim hacim ağırlıkta orantılı olarak düşmüştür. Ayrıca referans, silis dumanı ve uçucu kül serileri incelendiğinde; en fazla birim hacim ağırlık düşüşü silis dumanında olmuştur. Bunun sebebi silis dumanı yoğunluğunun, çimentodan ve uçucu külden düşük olmasıdır.

5.6.2. Basınç dayanımı

Referans numunesindeki çimento miktarı hariç bütün değişkenler sabit tutularak; silis dumanı ve uçucu kül katkılı diğer numune serileri üretilmiş. Bu numunelerde ise karışımdaki çimento yerine ağırlıkça sırasıyla %5-10-15 oranlarında sadece uçucu kül veya sadece silis dumanı ikame edilmiştir. Kırılan betonlara ait dayanım sonuçları aşağıdaki Şekil 5.13 'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Basınç deneyi sonuçlarının karşılaştırılması.

Beton zamanla dayanım kazanan bir malzemedir. Şekil 5.13'ten de anlaşılacağı üzere bütün numunelerinin basınç dayanımları zaman içinde artmaktadır. Üretilen betonlar basınç dayanımlarının büyük bir kısmına 28. günün sonuna kadar ulaşırlar. İlk 7 günde çok hızlı olan dayanım kazanımı, ilerleyen günlerde yavaşlayarak devam eder. Bu nedenle, betonun ilk hafta içinde bulunduğu ortamın koşulları, 28 günlük dayanımını önemli ölçüde etkiler.

Elde edilen sonuçlar referansın erken yaşlardaki (2 ve 7 günlük) basınç dayanımının diğer karışımlardan daha yüksek olduğu ancak ilerleyen yaşlarda (28 ve 90 günlük) bütün karışımların gerisinde kaldığı göstermiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere puzolanik katkıları betonu erken yaşlarda olumsuz, ileri yaşlarda ise olumlu etkilemektedir. Bunun sebebi ileri yaşlarda mineral katkıların (SD ve UK) hidrasyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireçle reaksiyona girerek puzolanik aktivite ve filler etkisi göstermesidir.

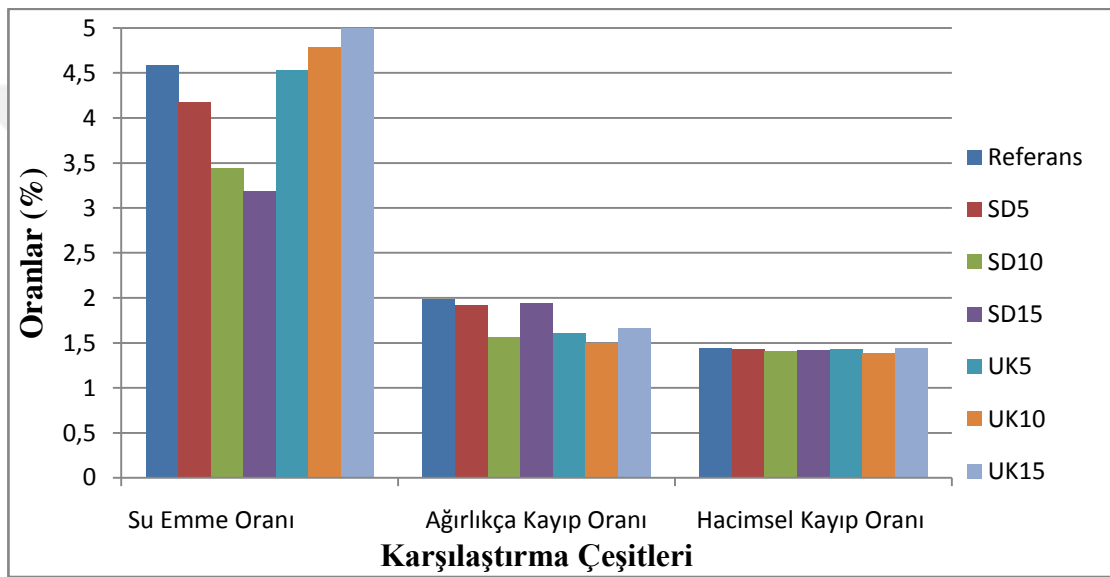
Şekil 5.13.'e bakıldığında tüm karışımlar arasında en iyi sonucu SD10 ve UK10'un verdiği görülmektedir. Buda betona silis dumanı ve uçucu külün %10 oranında katıldıklarında optimum sonuçları verdiğini göstermektedir. Ayrıca genel itibarıyla silis

dumanı, uçucu küle göre daha etkili olmuştur. Bu durum SD parçacıklarının, betonu doldurma kapasitesinin UK parçacıklarına göre daha yüksek olması ile açıklanabilir.

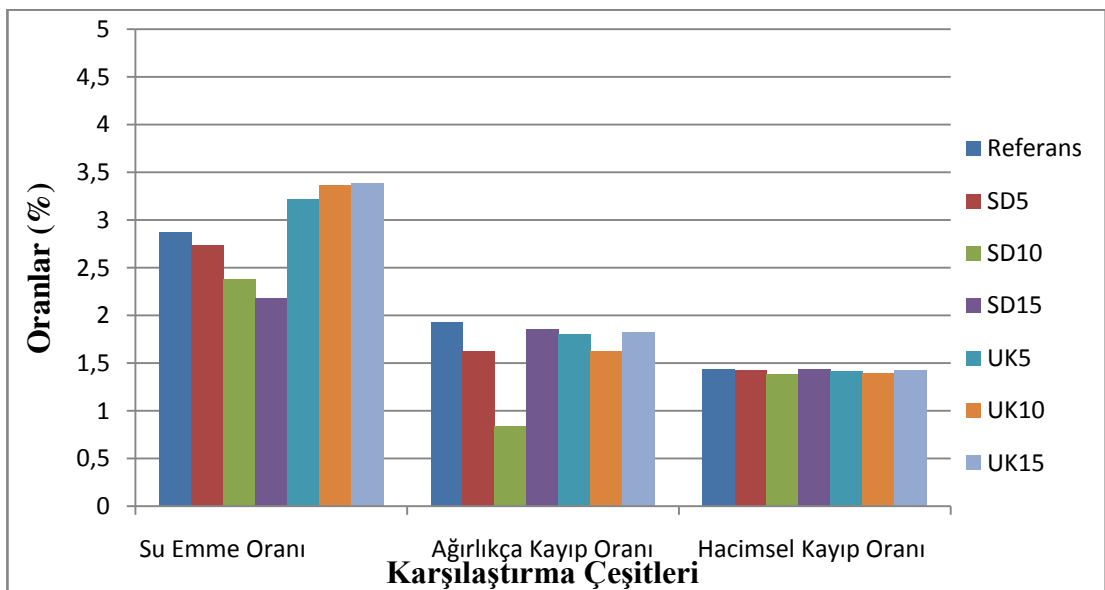
5.6.3. Böhme aşınma direnci ve su emme deneyi

Çalışmamızda 7 farklı seriden toplam 28 adet (7x7x7cm boyutlarında) küp numunenin 28 günlük ve 90 günlük aşınma değerlerine bakılmıştır. Her bir serinin aynı deneyi için 2'şer adet numune üretilmiştir.

Üretilen (7x7x7cm) küp numunelere ilk önce su emme deneyi sonrasında aşınma deneyi yapılmıştır. Yapılan deneylere ait sonuçlar Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. 28 günlük Böhme aşınma ve su emme deneyi sonuçları.



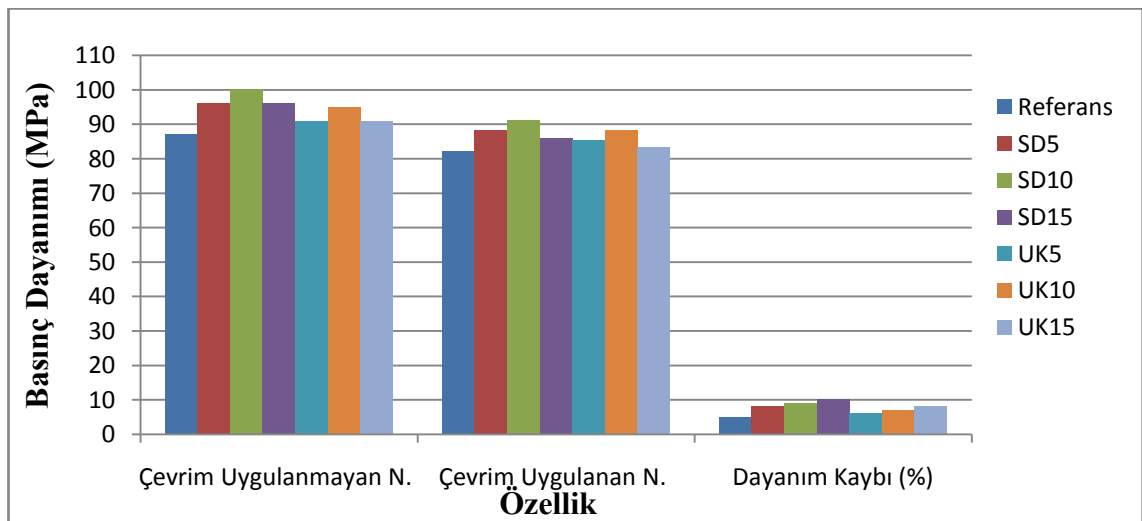
Şekil 5.15. 90 günlük Böhme aşınma ve su emme deneyi sonuçları.

Yapılan Böhme aşınma ve su emme deneyinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

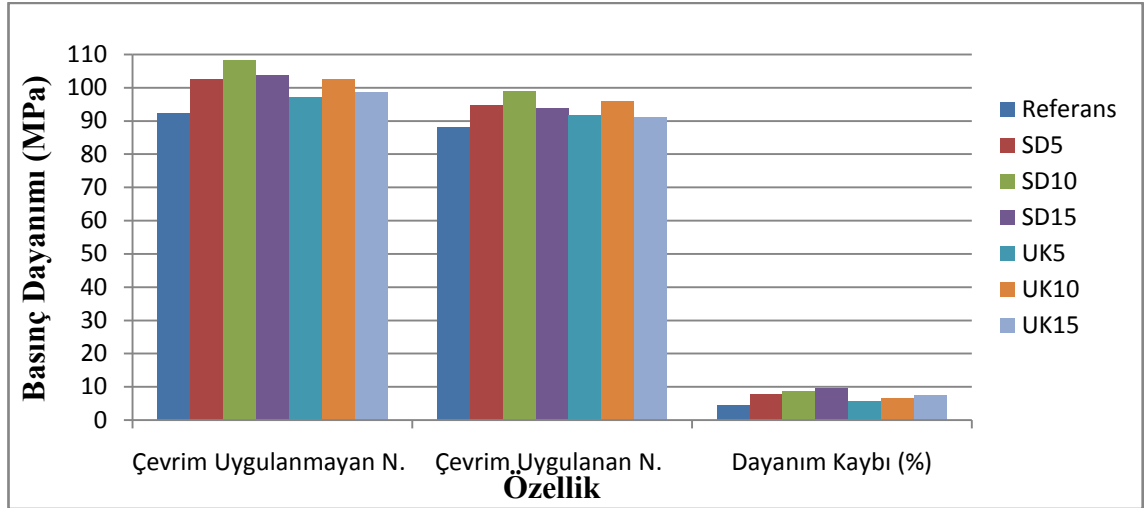
- 28 ve 90 günlük numunelerin su emme oranlarına bakıldığında silis dumanının su emme oranını her oranda düşürdüğü, uçucu külün ise her oranda arttırdığı gözlemlenmiştir.
- %10 ve %15 oranında kullanılan silis dumanı karışımları su emme açısından en olumlu sonuçları verip betonun su emme oranını düşürmüşlerdir.
- 28 ve 90 günlük mineral katkılı karışımların tümünde referansa göre ağırlıkça kayıp oranı düşmüş olup mineral katkıların betonun aşınma davranışına olumlu etki ettiği gözlemlenmiştir.
- 28 ve 90 günlük mineral katkılı karışımlardan %10 oranında kullanılan silis dumanı ve uçucu külün ağırlıkça kayıp oranının en düşük çıktığı görülüp betonun aşınma davranışına en olumlu etki yapan oran olarak görülmüştür.
- 28 günlüklerde %10 uçucu kül, 90 günlüklerde %10 silis dumanı ağırlıkça kayıp olarak en olumlu sonucu verip betonun aşınma davranışına en olumlu etkiyi yapmışlardır.
- Hacimsel kayıp oranı da ağırlıkça kayıp oranı ile doğru orantılı sonuçlar verip %10 oranında kullanılan silis dumanı ve uçucu külün betonun aşınma direncini arttırdığı tespit edilmiştir.

5.6.4. Donma çözülme deneyi

Çalışmamızda 7 farklı seriden toplam 28 adet (10x10x10 cm boyutlarında) küp numunenin 28 günlük ve 90 günlük değerlerine bakılmıştır. Yapılan deneylere ait sonuçlar Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.16. 28 günlük donma çözülme deney sonuçları.



Şekil 5.17. 90 günlük donma çözülme deney sonuçları.

Referans numune ve diğer numuneler karşılaştırıldığında:

- Belirlenen sürelerde (28. günde ve 90. günde) çevrim uygulanmadan kırılan SD ve UK katkılı numunelerin basınç dayanımları referans numunesinden yüksektir.
- Çevrim uygulandıktan sonra kırılan tüm serilerin basınç dayanımı Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de ki oranlarda düşmüştür ancak yine de bütün SD ve UK katkılı numunelerin mukavemeti, referans numunesinden daha yüksek çıkmıştır.
- Aynı serilerin 28 ve 90 günlük sonuçları incelendiğinde zamanla donma çözülme deneyi sonrası oluşan dayanım kaybının azaldığı gözlenmiştir.
- Deneyde en iyi sonuçlar çimento yerine ağırlıkça %10 oranında silis dumanı ikame edilen numunedan alınmıştır.

Sonuç olarak mineral katkıları (SD ve UK) çimento hamurundaki boşlukları doldurarak; betonun daha boşluksuz ve geçirimsiz olmasını sağlamıştır. Böylece çeşitli oranlarda SD ve UK eklenerek betonun donma çözülme direnci artırılmıştır.

5.6.5. Ultrases deneyi

Ultrasonik test cihazı yardımıyla 10'luk sertleşmiş küp numunelerin içinden hasarsız olarak geçen ses dalgalarının hızı ölçüldü. Test sonuçları incelendiğinde beton serilerinin ses üstü dalga geçiş hızlarından nasıl bir dayanım göstereceği hakkında genel bir yargıya varılabilir. Yapılan ultra-ses deneyine ait sonuçlar aşağıdaki Çizelge 5.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.10. Ultrases deneyi sonuçları.

Numune Tipi	Çevrim Uygulanmayan Numune p Dalga Hızı (km/s)	Çevrim Uygulanan Numune p Dalga Hızı (km/s)
Referans	5,28	5,15
SD5	5,63	5,44
SD10	5,62	5,41
SD15	5,57	5,33
UK5	5,46	5,38
UK10	5,45	5,36
UK15	5,44	5,33

Referans betonunun ve çeşitli oranlarda, farklı mineral katkılarla üretilen diğer numunelerin (SD ve UK) p dalga hızları değişiklik göstermiştir. 90 günlük kür süresi boyunca p dalga hızı testinde en iyi neticeyi silis dumanı eklenen numuneler vermiştir. Silis dumanı katkısının nitelik ve aktivasyonunun uçucu külden yüksek olması sebebiyle p dalga hızları daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca SD parçacık boyutu, çimento parçacık boyutundan çok daha küçük olduğu için agrega-çimento ara yüzeyinde pozolanik aktiviteden daha önemli dolgu etkisi gerçekleştirerek daha yoğun ve boşluksuz bir agrega-bağlayıcı ara yüzeyi oluşturmuştur.

Betonun içerisinden geçen p dalgasının hızı ile beton dayanımı arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Ancak, p dalgasının hızı ile betonun yoğunluğu arasında bir ilişki kurulabilir. Yoğunluğu az olan bir betonda, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda, p dalgasının betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça p dalga hızı düşmektedir.

5.6.6. Hızlandırılmış korozyon deneyi

Çalışmamızda 28 ve 90 günlük lolipop numunelerin ilk serileri hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanarak, ikinci serileri ise hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanmadan; donatı çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Çizelge 5.11'de; hasar oluşumları ise aşağıdaki resimlerde gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.18 (a): Hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanan lolipop numuneler. (b): Hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanmayan lolipop numuneler.



(a)

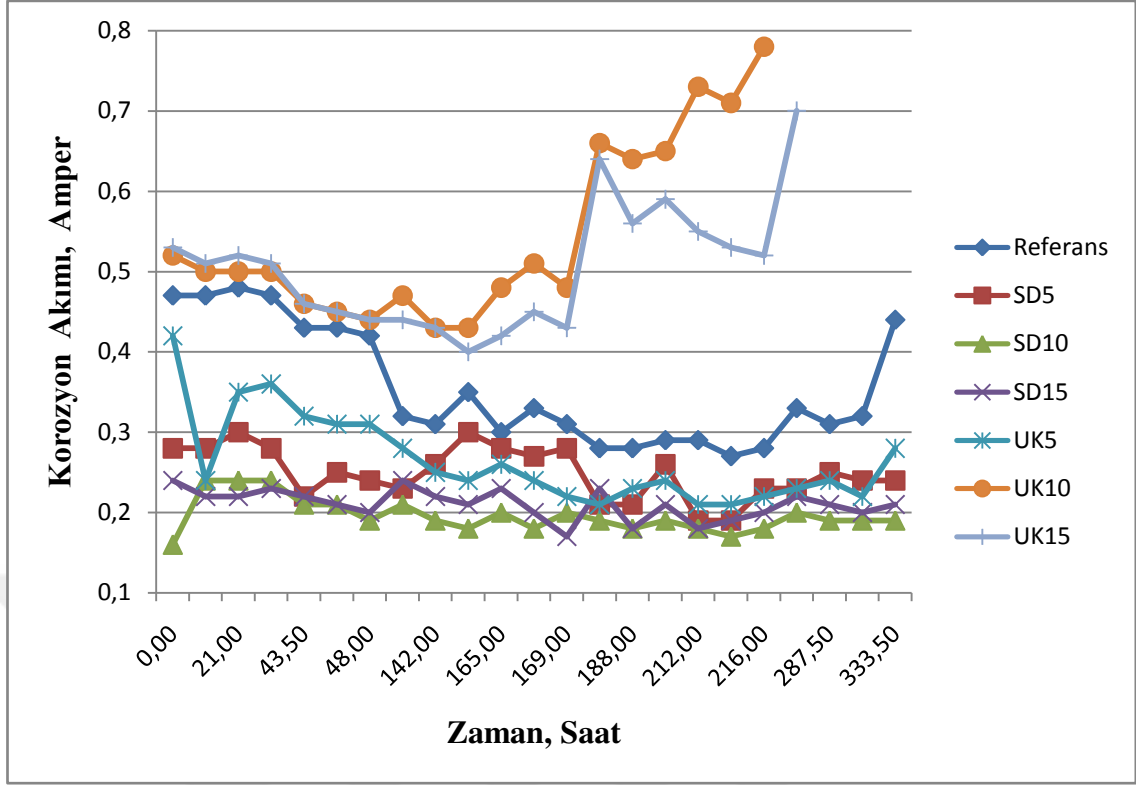


(b)

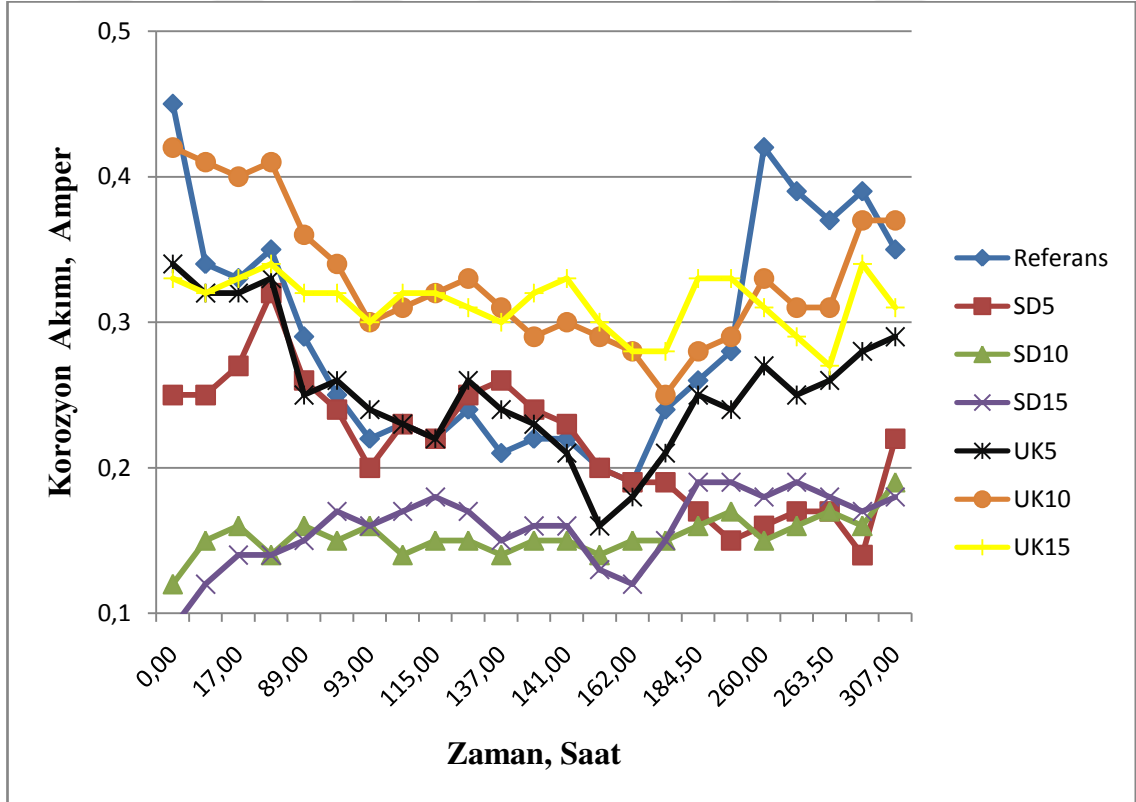
Şekil 5.19 (a): Çekme deneyi uygulaması. (b): Çekip çıkartılan donatılar.

Hızlandırılmış korozyona tabi tutulan 28 günlük ve 90 günlük lolipop numunelerin akım-zaman grafikleri Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 'de verilmiştir. Şekil 5.20 incelendiğinde 28 günlük serilerde UK10 ve UK15 numunelerinin korozyon akımlarının 170 saat sonrasında hızla artış göstererek yükseldikleri ve numunelerin korozyona uğradıkları görülmektedir. Referans numunesinin ise 300 saat sonrasında korozyon akımını hızla arttırdığı görülmektedir. En düşük korozyon akımı değerlerinin ise sırasıyla SD10, SD15 ve SD5 serilerinde olduğu görülmüştür.

90 günlük serilerin korozyonlarının zamanla değişiminin verildiği Şekil 5.21 incelendiğinde referans numunesinin 200 saat sonrasında artış gösterdiği ve korozyona uğradığı görülmüştür. Sonrasında ise UK10 ve UK15 serilerinin korozyon akımlarının silis dumanı katkılı serilere göre daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Korozyon akımlarındaki en stabil davranışın SD10 ve SD15 serilerinde olduğu görülmüştür. Korozyona maruz bırakılmış ve bırakılmamış numunelerinin aderans dayanımlarının belirlendiği çekip çıkarma deneyi sonuçları Çizelge 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.20. 28 günlük serilerin korozyon akımlarının zamanla değişimi.



Şekil 5.21. 90 günlük serilerin korozyon akımlarının zamanla değişimi.

Çizelge 5.11. Çekme deneyi sonuçları.

Numune Adı		Nihai Çekme Kuvveti(kN)	Başlangıç Rijitliği(kN/mm)	Deplasman Süneklik Oranı	Enerji Yutma Kapasitesi (kNmm) ($\times 10^3$)	Göçme Modları
28 Günlük Normal	Referans	99,26	23,62	1,04	1,5555	Beton Y.
	SD5	92,51	12,85	1,01	1,3261	Beton Y.
	SD10	97,40	10,15	1,05	1,3675	Beton Y.
	SD15	78,58	15,29	1,07	0,5908	Beton Y.
	UK5	80,19	10,20	1,03	0,5625	Beton Y.
	UK10	73,71	12,081	1,05	1,1425	Beton Y.
	UK15	61,30	23,66	1,07	0,0559	Beton Y.
28 Günlük Korozyonlu	Referans	73,51	21,49	1,17	0,2116	Beton Y.
	SD5	80,02	7,71	1,04	1,2643	Beton Y.
	SD10	91,26	15,14	1,06	0,8980	Beton Y.
	SD15	69,42	17,65	1,17	0,2379	Beton Y.
	UK5	71,58	6,71	1,04	0,4457	Beton Y.
	UK10	72,47	12,27	1,04	1,7423	Beton Y.
	UK15	59,29	15,56	1,459	0,0559	Beton Y.
90 Günlük Normal	Referans	107,46	10,23	1,39	0,3167	Beton Y.
	SD5	104,11	18,87	1,09	2,0037	Beton Y.
	SD10	110,80	39,46	1,12	0,6154	Beton Y.
	SD15	78,23	15,89	1,09	0,2252	Beton Y.
	UK5	101,40	16,89	1,16	2,0047	Beton Y.
	UK10	88,52	11,64	1,07	1,0219	Beton Y.
	UK15	82,71	18,45	1,04	1,7800	Beton Y.
90 Günlük Korozyonlu	Referans	94,93	6,45	1,06	1,5860	Beton Y.
	SD5	102,06	20,01	1,06	1,7632	Beton Y.
	SD10	104,16	13,03	1,39	0,6436	Beton Y.
	SD15	69,01	8,16	1,04	0,2331	Beton Y.
	UK5	89,58	10,79	1,13	0,3578	Beton Y.
	UK10	87,10	9,49	1,09	1,1557	Beton Y.
	UK15	79,27	12,07	1,05	1,2213	Beton Y.

Değerleri yukarıdaki tabloda verilen donatı çekme deneyinin yük-deplasman grafikleri EK 1’de sunulmuştur.

Grafiklerdeki pik noktası, numunelerde oluşan hasarlar ve elde edilen diğer deney sonuçları incelendiğinde:

28 günlük numunelerde en yüksek aderans dayanımının korozyona uğramamış referans numunesinde elde edildiği görülmekle birlikte, aynı betonların korozyona uğraması halinde referans numunesinin aderans dayanımının düştüğü, SD10 serisinde ise bu dayanımın en iyi değeri aldığı görülmüştür.

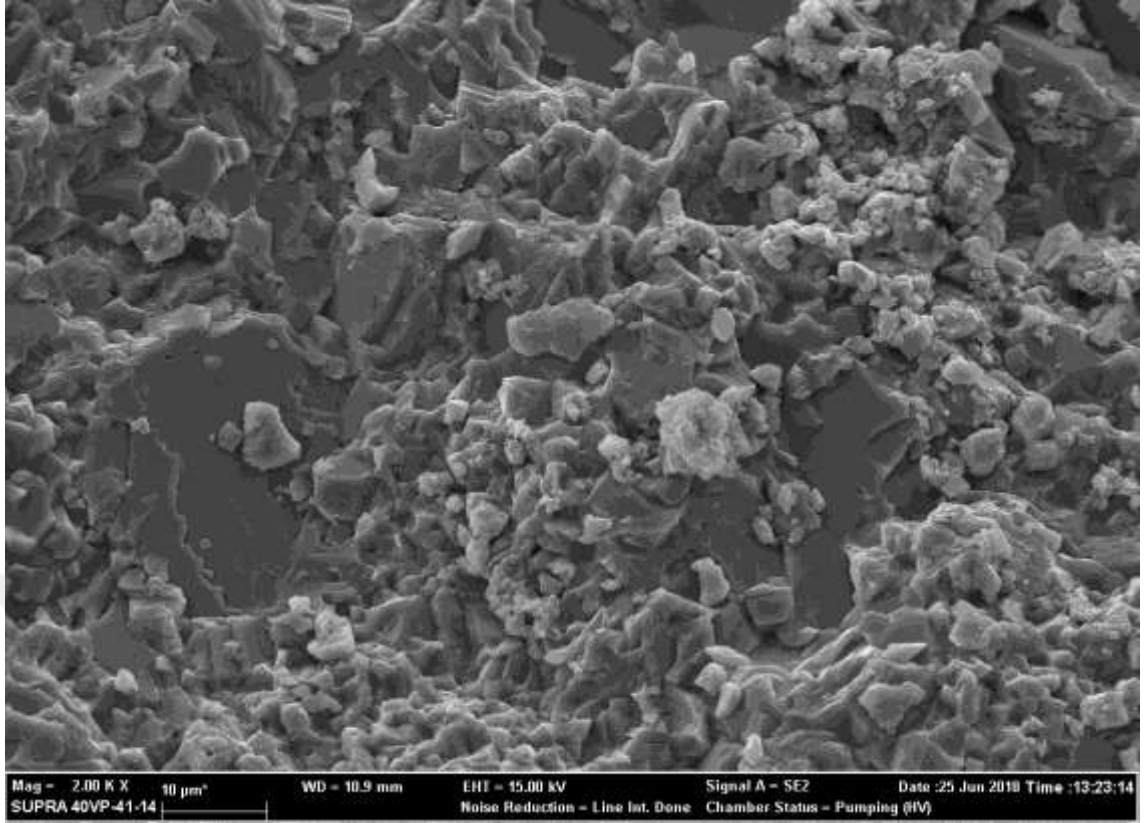
90 günlük numunelerde ise SD5 ve SD10 serisindeki YDB'lerin en iyi aderans dayanımlarına sahip olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak çimento yerine silis dumanının ikame edilmesi, betonun korozyona karşı direncini arttırmış olup; optimum SD oranının %5-10 arasında olduğu düşünülmektedir.

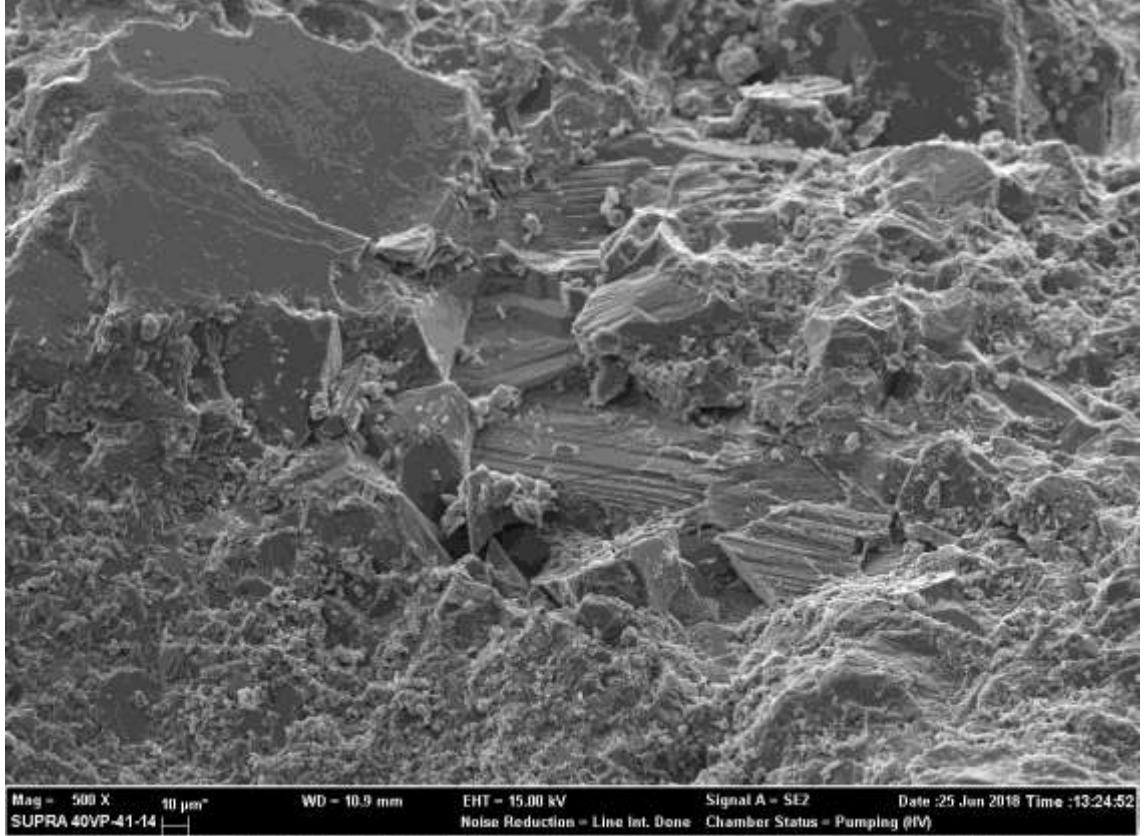
5.7. Mikroyapı İncelemeleri

Hazırlanan mineral katkılı YDB numunelerinden alınan kesitler üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile platin kaplanmış numunelerde iç yapı incelemeleri yapılmıştır. Numune kesitleri üstünden alınan içyapı görüntüleri Şekil 5.22 ile 5.35 arasında verilmiştir.

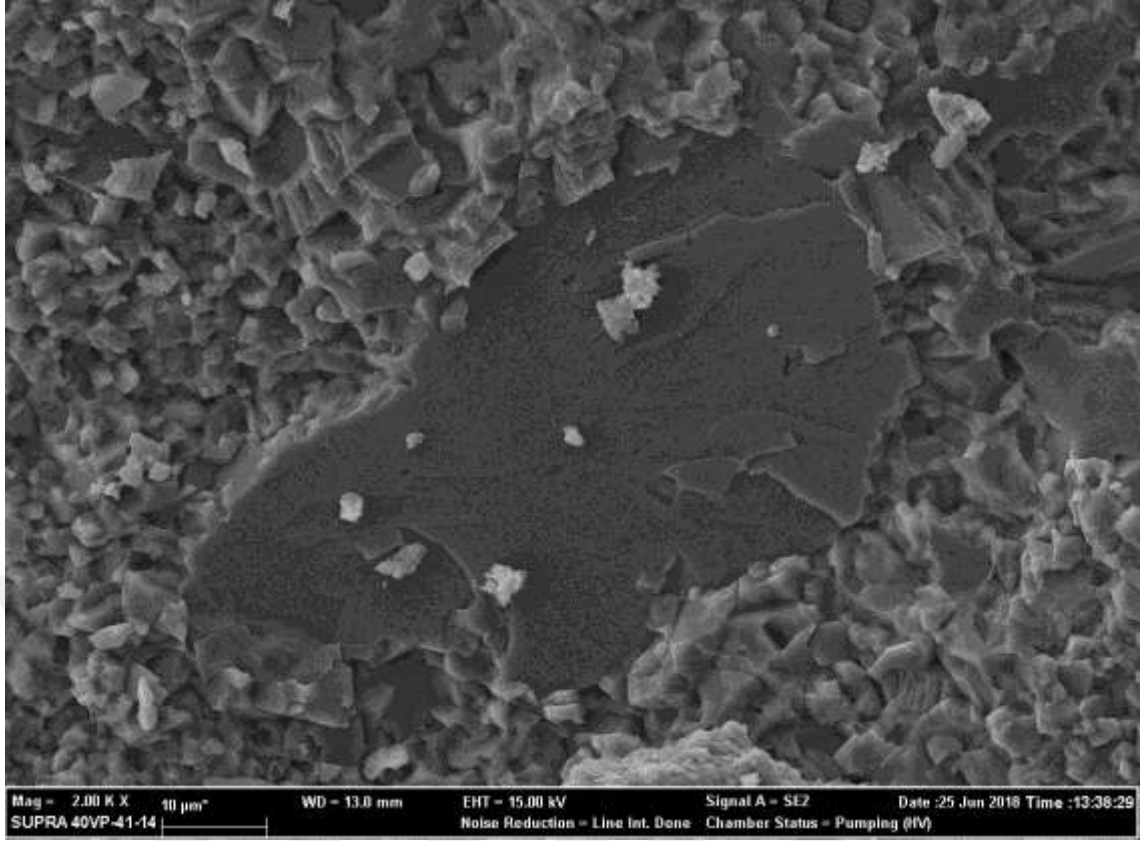
İçyapı görüntülerine göre özellikle SD5 ve SD10 numunelerinin daha gözeneksiz olduğu (Şekil 5.24 - 27) agrega ile hamur ara yüzeyindeki kenetlenmenin daha güçlü olduğu görülmektedir. Benzer davranışın UK5 ve UK10 serilerinde de gözlemlendiği (Şekil 5.30 - 33); ancak hava boşluklarının bu numunelerde biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Özellikle puzolanik aktivitenin belirgin etkisi, numune yaşlarının 90 gün olmasına bağlı olarak bu yapılar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. SD ve UK katkılı numunelerin, kalıcılık özelliklerinin belirli kullanım oranlarına kadar katkısız referans numunesine göre daha iyi olmalarının altında; bu sıkı ve boşluksuz iç yapının etkin rol oynadığı düşünülmektedir.



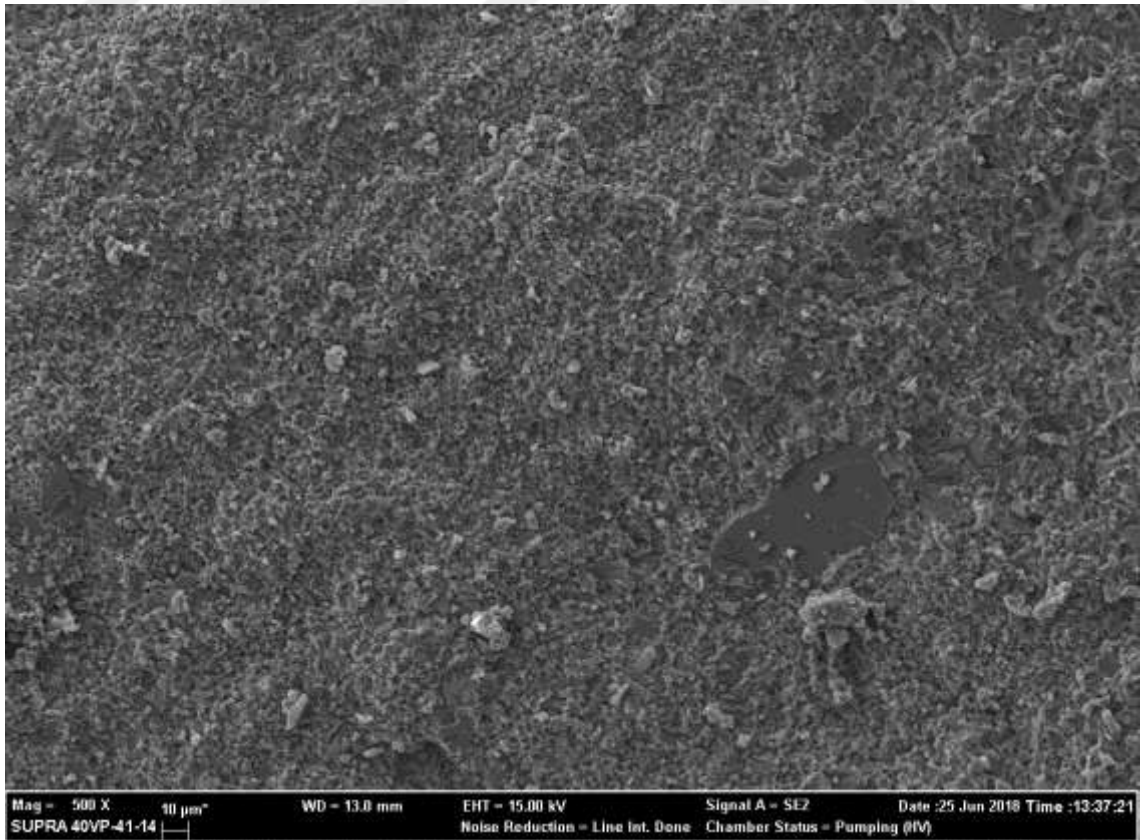
Şekil 5.22. Referans örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).



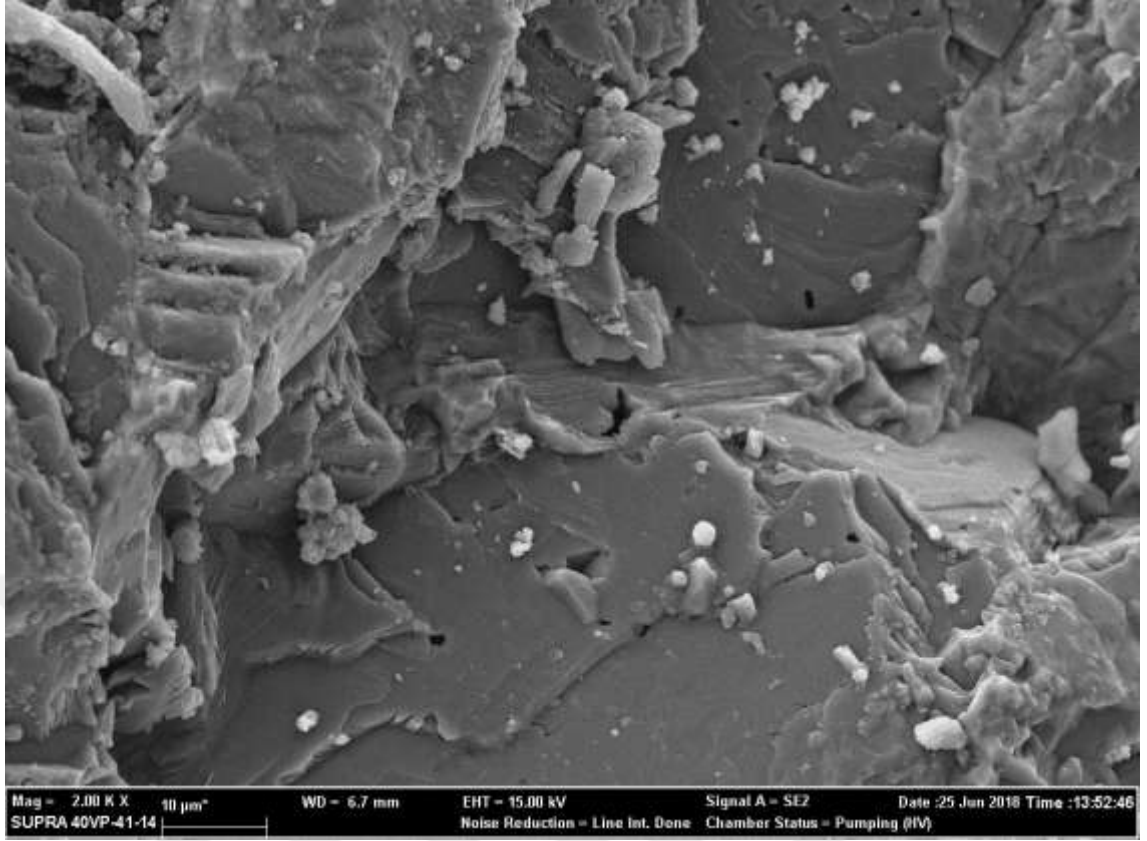
Şekil 5.23. Referans örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).



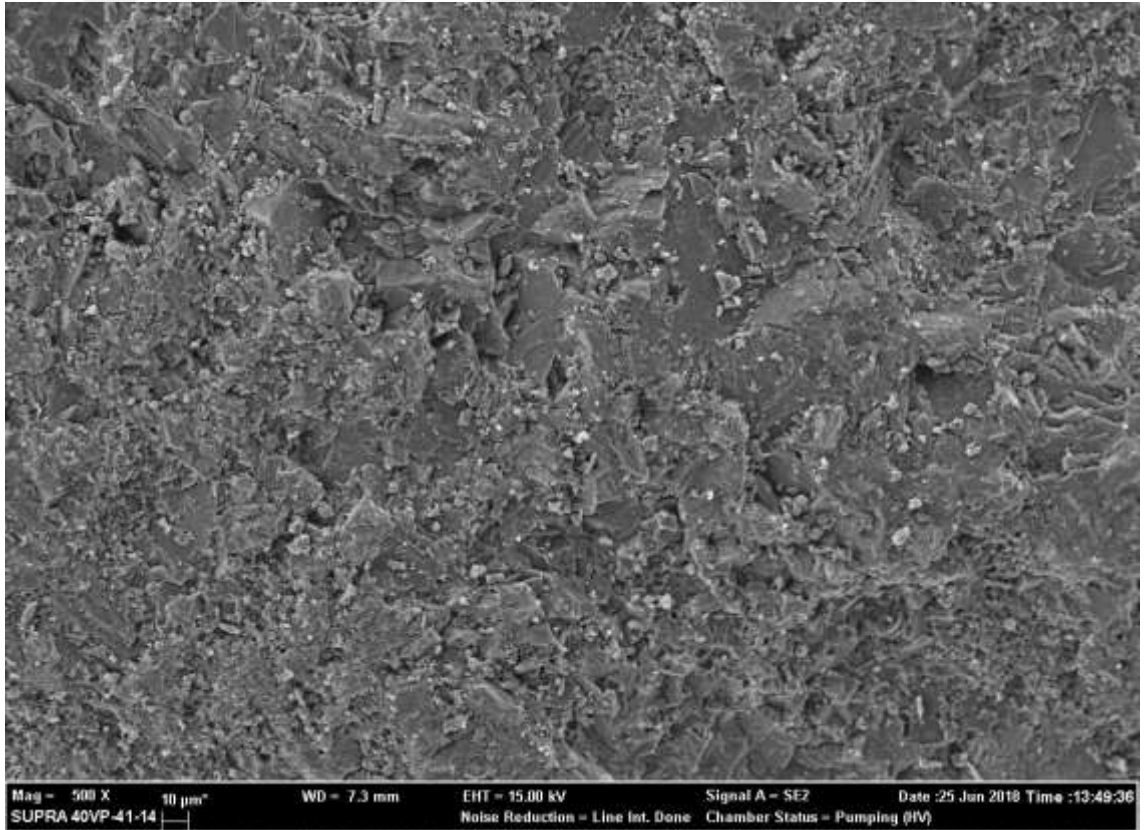
Şekil 5.24. SD5 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).



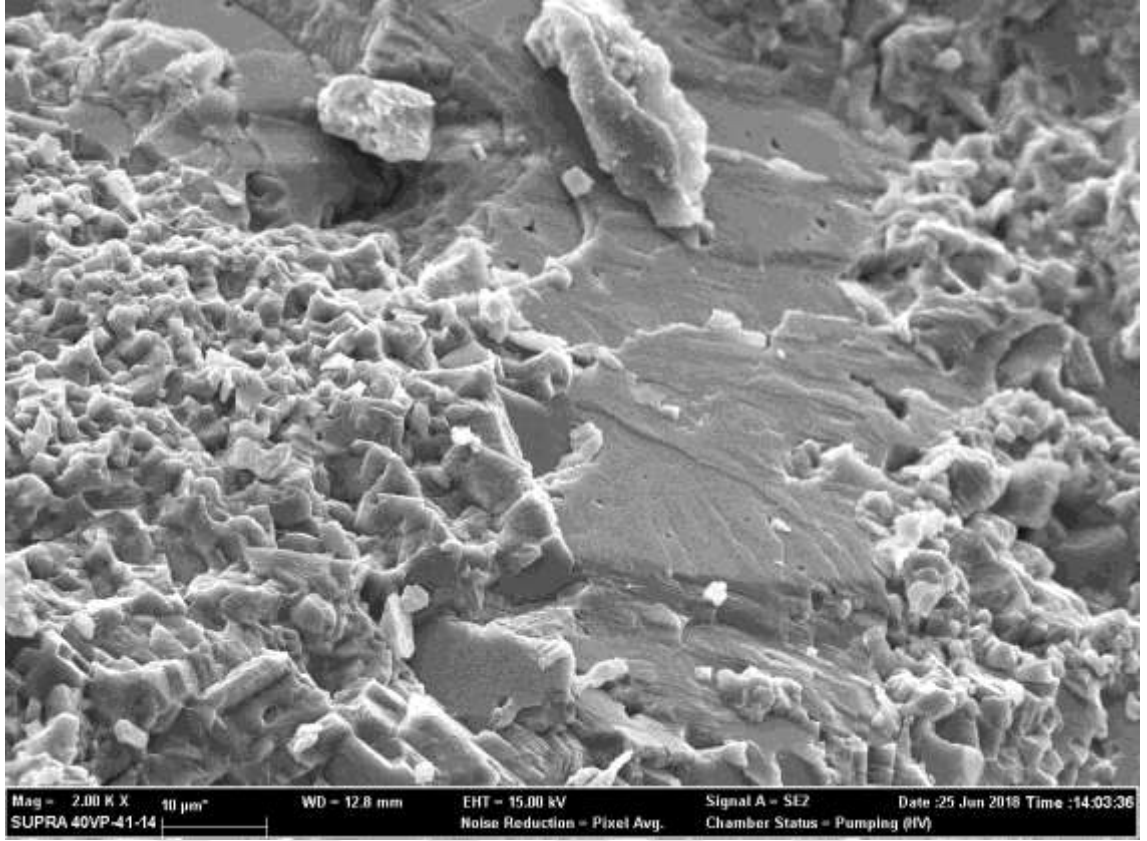
Şekil 5.25. SD5 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).



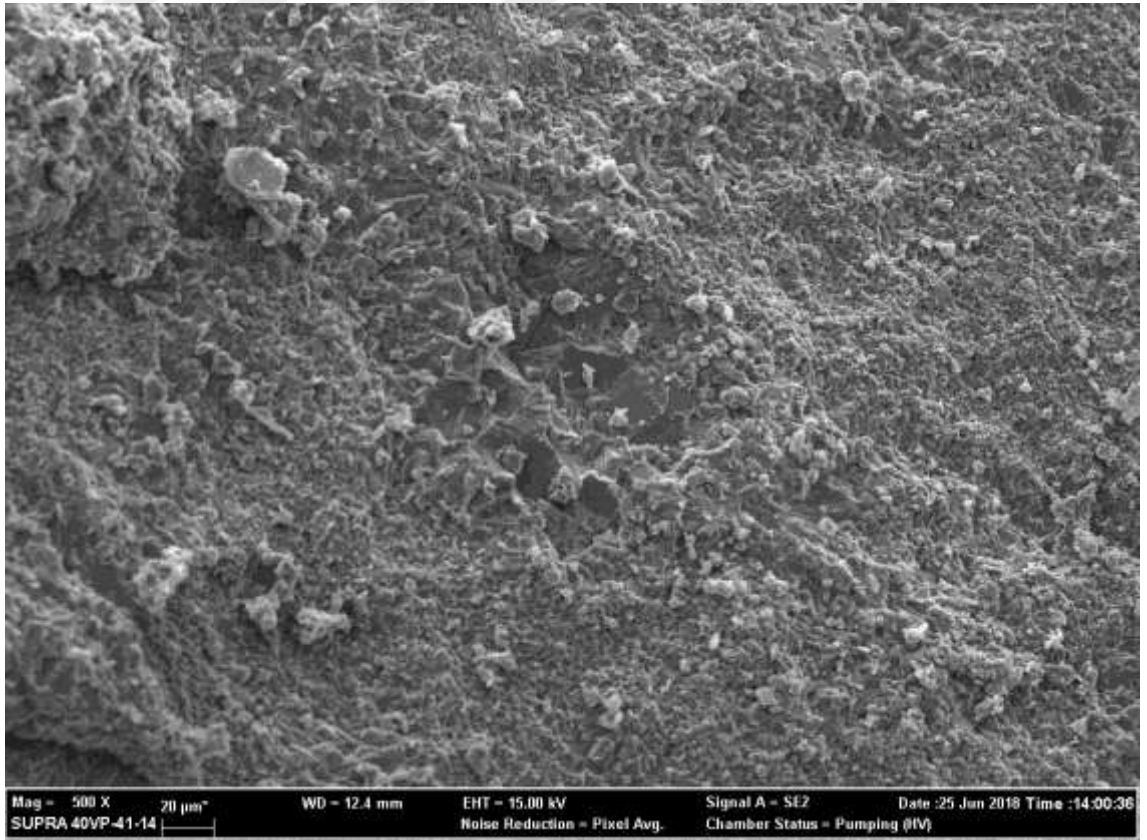
Şekil 5.26. SD10 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).



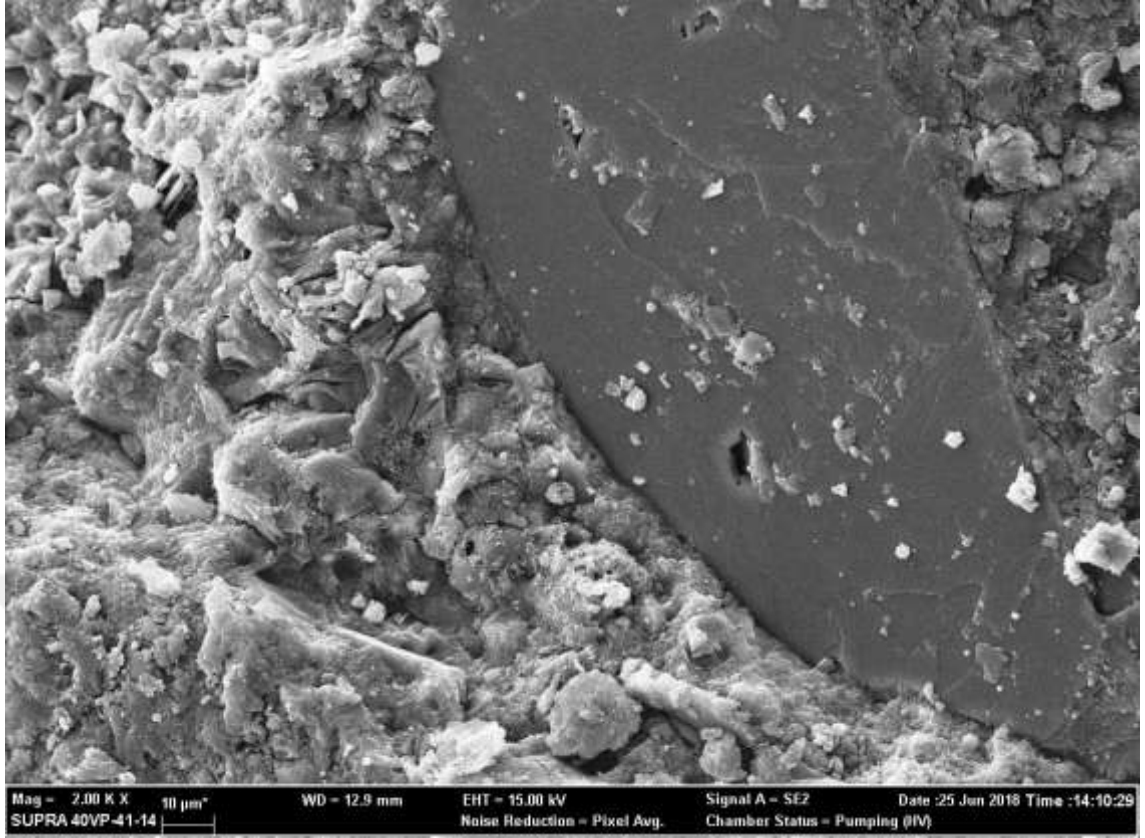
Şekil 5.27. SD10 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).



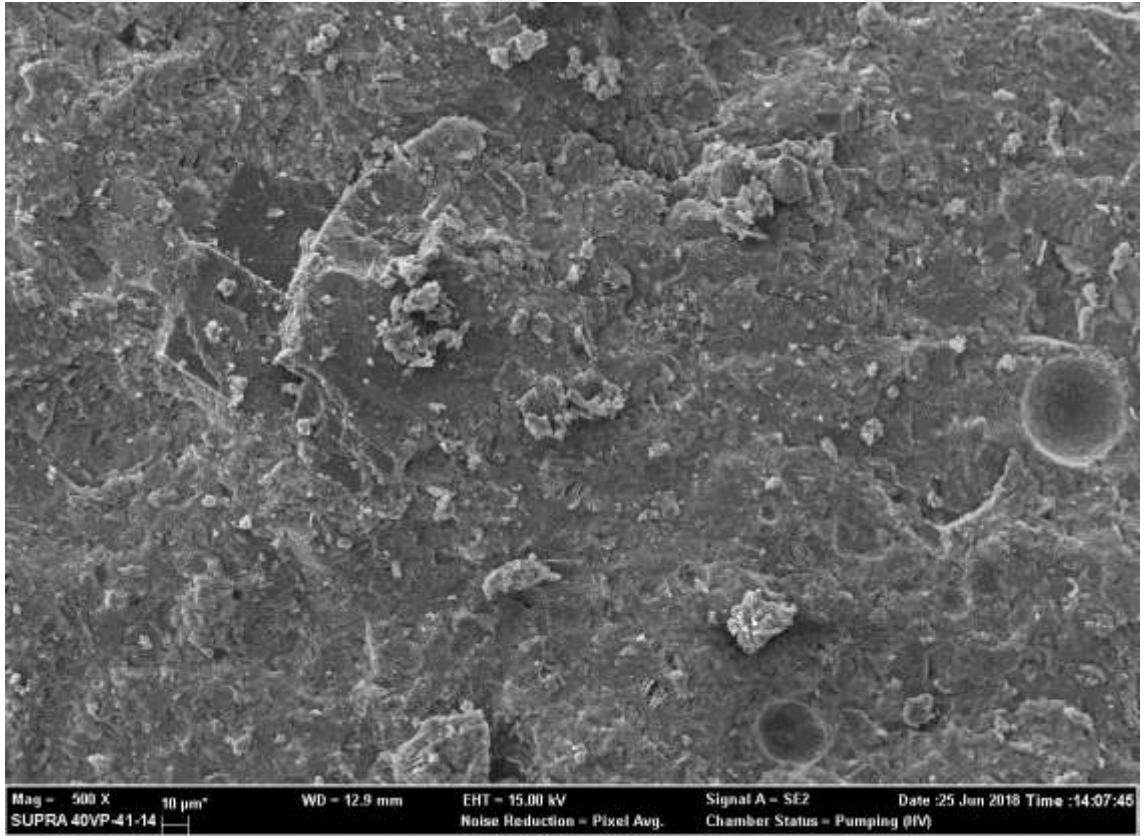
Şekil 5.28. SD15 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).



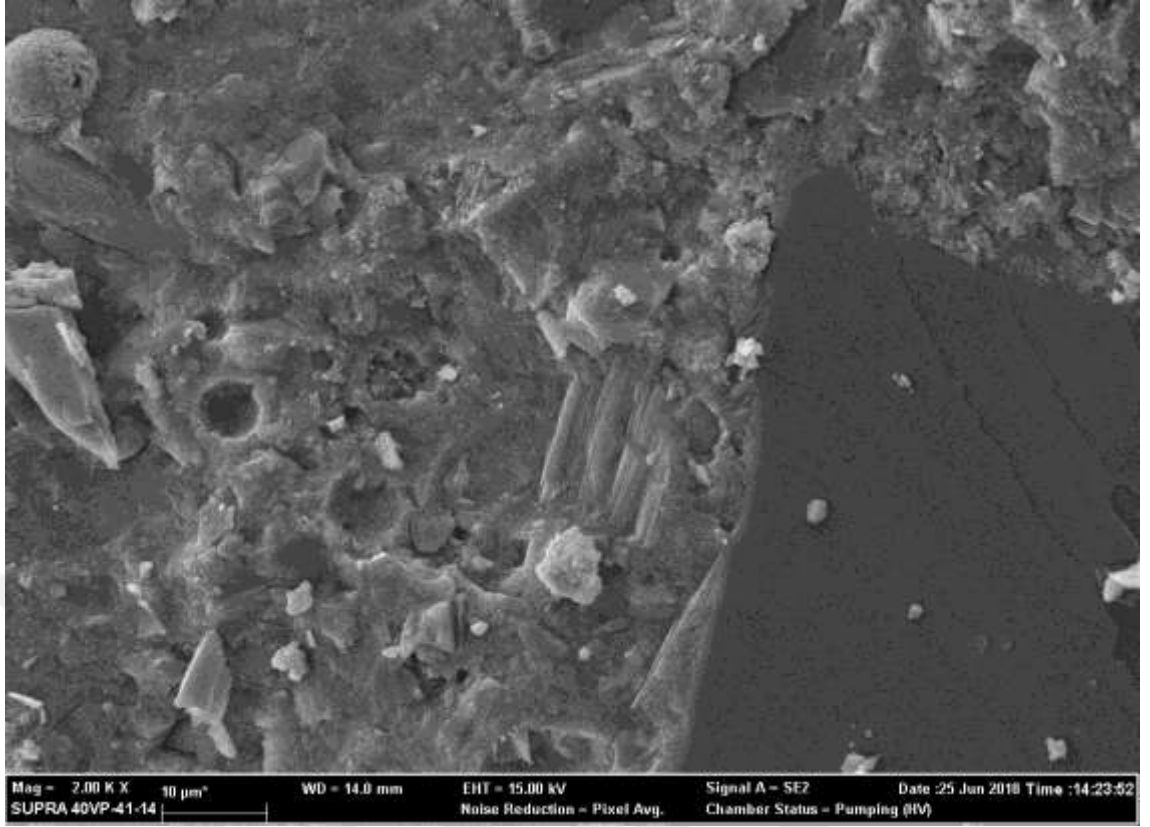
Şekil 5.29. SD15 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).



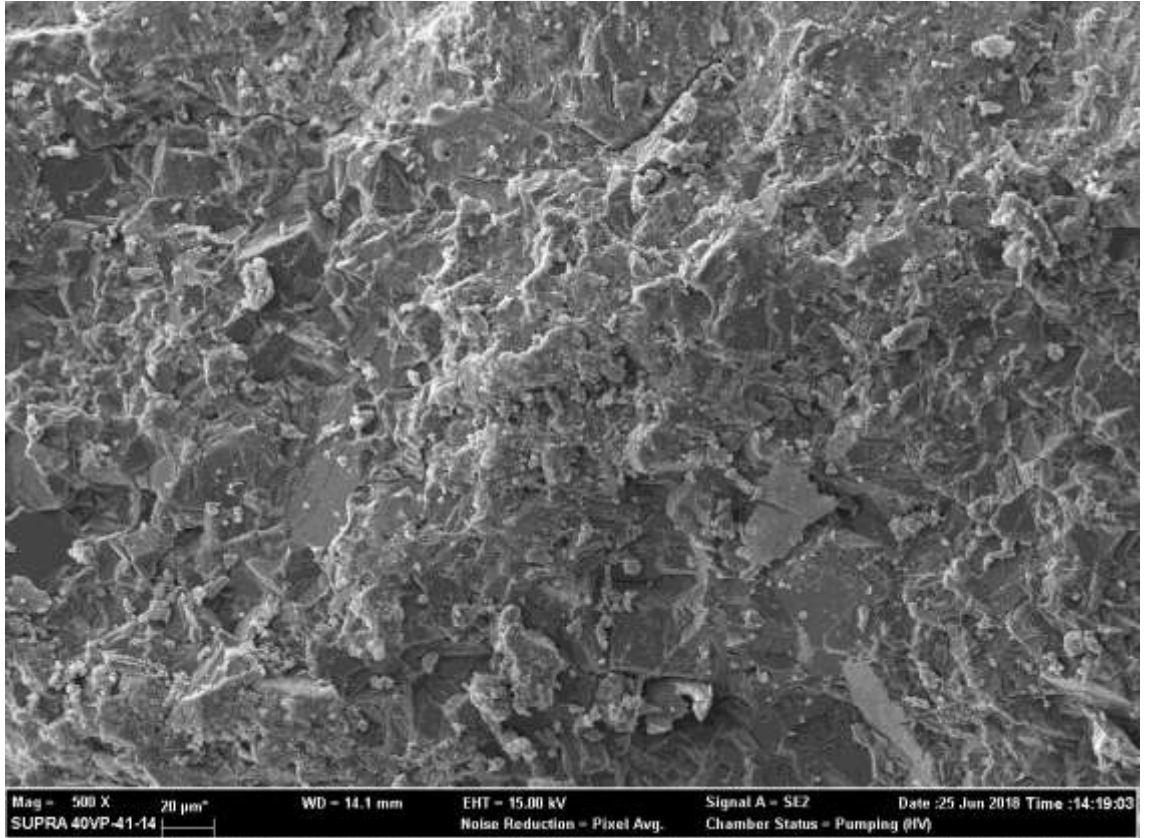
Şekil 5.30. UK5 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).



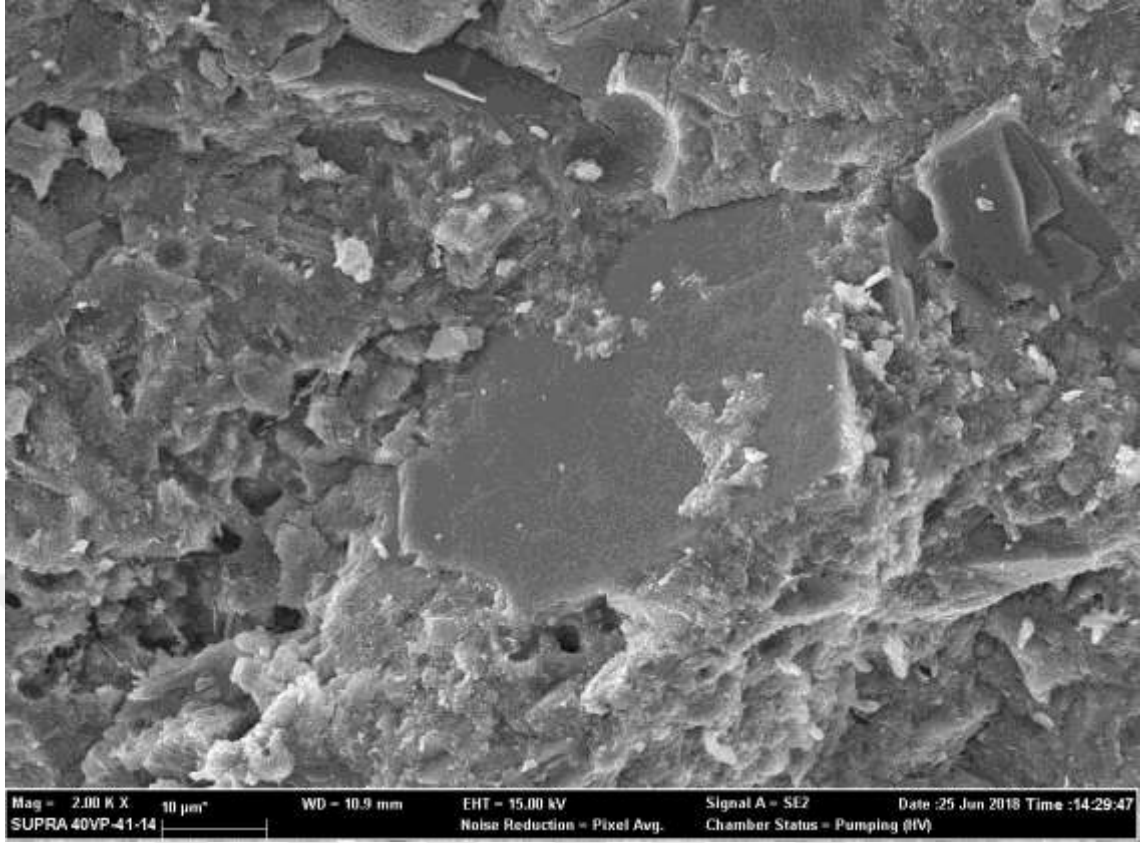
Şekil 5.31. UK5 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).



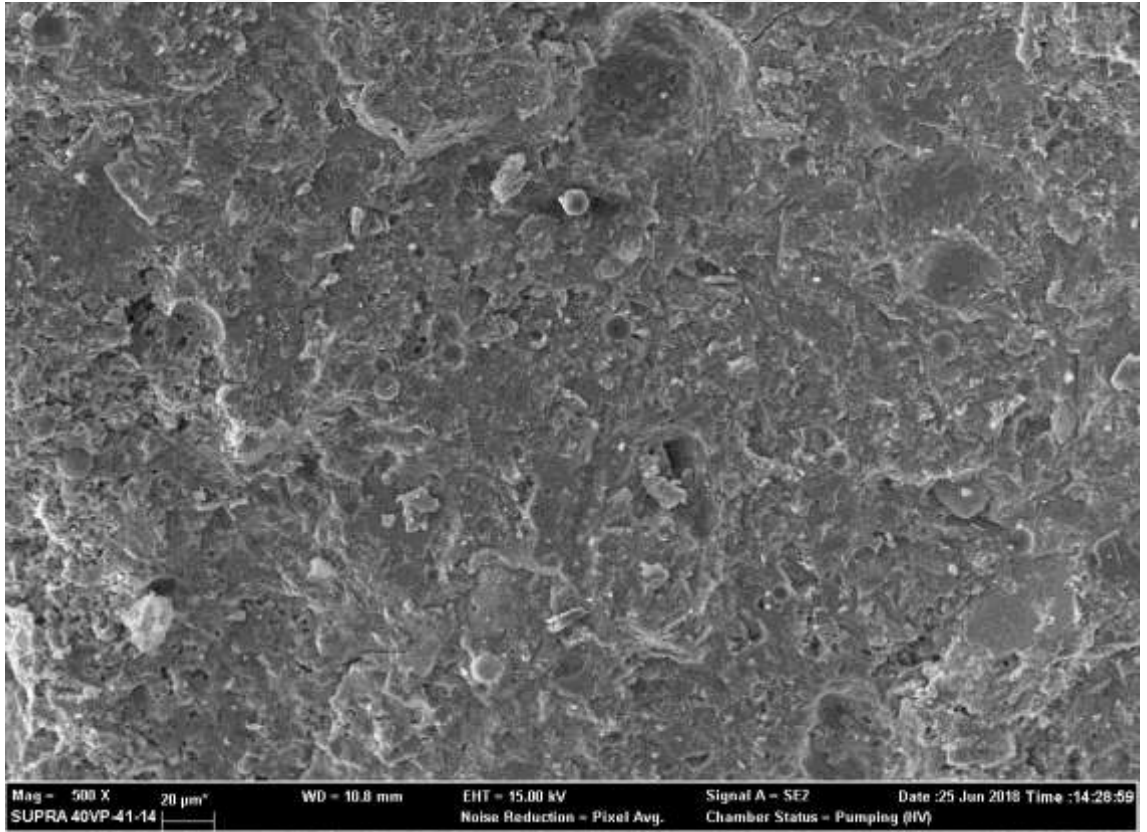
Şekil 5.32. UK10 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).



Şekil 5.33. UK10 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).



Şekil 5.34. UK15 örneğine ait SEM görüntüsü-1 (x2000 büyütme).



Şekil 5.35. UK15 örneğine ait SEM görüntüsü-2 (x500 büyütme).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada su/bağlayıcı miktarı ve diğer değişkenler sabit tutularak çimento yerine değişik oranlarda UK ve SD ikame edilerek 7 farklı grupta seriler üretilmiştir. Üretilen beton serileri: birim hacim ağırlık, slump, yayılma tablası, basınç, donma-çözülme, hızlandırılmış korozyon, aşınma ve su emme deneylerine tabi tutularak; birbiriyle mukayese edilmişlerdir. Bu deneyler sonucunda aşağıdaki sonuç ve öneriler elde edilmiştir:

- Mineral katkıları (SD ve UK) yardımıyla; istenilen özelliklerde, daha düşük birim hacim ağırlıklara sahip betonlar ekonomik olarak üretilir. Bunun nedeni silis dumanı ve uçucu külün yoğunluklarının çimentodan düşük olmasıdır. Karışımında çimento yerine ikame edilen mineral katkı oranı arttıkça, taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlıkta orantılı olarak düşmektedir.
- Çalışmadaki 7 farklı serinin işlenebilirlik ve kıvam deneyleri incelendiğinde: mineral katkıların (SD ve UK) yayılma tablası değerlerini değiştirmedikleri (ihmal edilebilir seviyelerde değiştiği) ancak slump (çökme) değerlerini ortalama %14 oranında düşürdüğü görülmüştür. Sonuç olarak mineral katkıları taze beton özelliklerini bir miktar olumsuz etkilemekle birlikte; iyi bir beton tasarımı ile bu durum absorbe edilebilir. Ayrıca bütün taze beton deneyleri incelendiğinde referans betonundan sonra en iyi sonuçları %5 uçucu kül katkılı seri göstermiştir.
- Beton zamanla dayanım kazanan bir malzemedir. İlk 7 günde çok hızlı olan dayanım kazanımı, ilerleyen günlerde yavaşlayarak devam etmektedir. Bu nedenle, betonun ilk hafta içinde bulunduğu ortam koşulları, hedeflenen basınç dayanımını ve diğer kalıcılık özelliklerini önemli ölçüde etkiler.
- Basınç deneyi sonuçları incelendiğinde; çimento hamuruna eklenen mineral katkıları betonun erken yaşlarda ki dayanımını olumsuz, ileri yaşlarda ki dayanımını ise olumlu etkilemektedir. Bunun sebebi ileri yaşlarda mineral katkıların (SD ve UK) hidrasyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireçle reaksiyona girerek pozolanik aktivite ve filler etkisi göstermesidir.

- Genel itibariyle silis dumanı, uçucu küle göre daha etkili olmuştur. Bu durum SD parçacıklarının, betonu doldurma kapasitesinin UK parçacıklarına göre daha yüksek olması ile açıklanabilir.
- Basınç deneyine tabi tutulan sırasıyla %5-10-15 silis dumanı katkılı seriler arasında en iyi sonucu %10 silis dumanı katkılı seri göstermiştir. SD10 olarak isimlendirilen seri, 90 günlük kür süresinin ardından referans betonuna göre %16 daha yüksek dayanıma ulaşmıştır.
- Ayrıca basınç deneyi uygulanan %5-10-15 uçucu kül katkılı seriler arasında en iyi sonucu %10 uçucu kül katkılı seri göstermiştir. UK10 olarak isimlendirilen seri, 90 günlük kür süresinin ardından referans betonuna göre %9 daha yüksek dayanıma ulaşmıştır.
- Böhme aşınma deneyinde 28 ve 90 günlük mineral katkılı karışımların tümünde referansa göre ağırlıkça kayıp oranı düşmüş olup; mineral katkıların betonun aşınma davranışına olumlu etki ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca %10 oranında kullanılan silis dumanı ve uçucu külün ağırlıkça kayıp oranının en düşük çıktığı görülmüş olup; beton karışımlarındaki optimum oranlarının %10 olduğu kanaatine varılmıştır.
- Çalışmada mineral katkılı bütün seriler, referans betonuna göre daha iyi bir donma-çözülme direnci göstermiştir. Bunun sebebi mineral katkıların (SD ve UK) çimento hamurundaki boşlukları doldurarak; betonun daha boşluksuz ve geçirimsiz olmasını sağlamasıdır. Ayrıca bütün seriler arasında en iyi donma-çözülme direncini %10 silis dumanı katkılı seri göstermiştir.
- Hızlandırılmış korozyon deneyi ve çekme deneyi sonuçları; çimento yerine silis dumanı ikamesinin, korozyona karşı direnci arttırdığını göstermektedir. Yapılan deneysel çalışmalar, en iyi tasarım için betona eklenecek en uygun SD oranının %5-10 arasında olduğunu göstermektedir.
- Çalışmadan elde edilen veriler ışığında uygun oranlarda kullanılması halinde SD ve UK kullanımının YDB kalıcılığını daha da iyileştirdiği, böylece kalıcılık açısından riskli bölgelerde inşa edilecek beton ve betonarme yapılarda ciddi kazanımlar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI 318-99, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", *American Concrete*, Washington (1999).
- Aghabaglou, A. M., Sezer, G. İ., Ramyar, K., "Comparison of Fly Ash, Silica Fume and Metakaolin From Mechanical Properties and Durability Performance of Mortar Mixtures View Point", *Construction and Building Materials*, 70: 17-25 (2014).
- Akçaözoğlu, K., Güldür, Ş. E., "Mikronize Kalsit ve Uçucu Kül Katkısının Beton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Journal of Science and Engineering*, 17 (025603): 658-668 (2017).
- Akman, M. S., "Betonarme Yapılarda Yangın Hasarı ve Yangın Sonunda Taşıyıcılığın Belirlenmesi", *Sika Teknik Bülten*, 4-3 İstanbul (2001).
- Alves, M.F., Cremonini, R.A., Dal Molin, D.C.C., "A Comparison of Mix Proportioning Methods for High-Strength Concrete", *Cement & Concrete Composites*, 26: 613-621 (2004).
- Anwar, I. I., "Katkıların Beton Performansına Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).
- Atış, C. D., Özcan, F., Karahan, O., Bilim, C., Sevim, U. K., Demir A., "Silis Dumanı Kullanımının Beton Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426 (4): 121-124 (2003).
- Arıoğlu, E., Arıoğlu, N., "Üst ve Alt Yapılarda Beton Karot Deneyleri ve Değerlendirmesi", *Evrinm Yayınevi*, İstanbul (2005).
- ASTM C 311-94a, "Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolan for Use As a Mineral Admixtures in Portland Cement Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, (1994).
- ASTM C 494, "Standard Specifcation for Ready Mixed Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, (1994).

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Bagha, M. G., Shayanfar, M. A., Javid, A. A., Ziaadiny, H., "Corrosion-Induced Reduction in Compressive Strength of Self-Compacting Concretes Containing Mineral Admixtures", *Construction and Building Materials*, 113: 221-228 (2016).
- Bagheri, A. R., Zanganeh, H., Molemi M. M., "Mechanical and Durability Properties of Ternary Concretes Containing Silica Fume and Low Reactivity Blast Furnace Slag", *Cement & Concrete Composites*, 34 (5): 663-670 (2012).
- Baradan, B., Aydın, S., "Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık)", *2013 Hazır Beton Kongresi*, 54-68 (2013).
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K. T., Aydan, S., Yardımcı, M. Y., Topal, A., Öztürk, A. U., "Beton", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, İzmir, 61-124 (2012).
- Binici, H., Eken, M., Dinçer, A., " Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri", *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (1): 11-20 (2013).
- Boğa, A. R., "Yüksek Fırın Cürufu ve Korozyon İnhibitörü Kullanımının Beton İçerisindeki Donatı Korozyonuna ve Beton Özelliklerine Etkisi", Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2010).
- Bulun, G., "3d-Geçiş Metali Ni Katkılı $Zn_{1-x}Ni_xO$ ve 4f-Lantanit Gd Katkılı $Zn_{1-x}Gd_xO$ Bileşiklerinin Yapısal ve Manyetik Özellikleri", Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2010).
- CEB (Comite Euro-International du Beton), "Durable Concrete Structures", *Thomas Telford Ltd.*, Lausanne (1992).
- Çebi, Y. M., "Geleneksel ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Dayanım Gelişiminin Farklı Kür Koşulları Altında İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, (2009).

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Cheng, S., Shui, Z., Sun, T., Yu, R., Zhang, G., Ding, S., "Effects of Fly Ash, Blast Furnace Slag and Metakaolin on Mechanical Properties and Durability of Coral Sand Concrete", *Applied Clay Science*, 141: 111-117 (2017).
- Chousidis, N., Rakanta, E., Ioannou, I., Batis, G., "Mechanical Properties and Durability Performance of Reinforced Concrete Containing Fly Ash", *Construction and Building Materials*, 101 (1): 810-817 (2015).
- Çimsa, "Çimentolu Sistemlerde Kullanılan Kimyasal Katkılar ve Özellikleri" (<https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/71DDECEE521E470BA4ADA95A091840/81A0869F14E34FA2AB7C840A5E764876.pdf>) (2014). (Erişim Tarihi: 04.05.2018)
- Coşkun, E., "Yüksek Binaların Gelişimi ve Tasarım İlkeleri" (<http://web.iku.edu.tr/~ecoskun/semineryap%C4%B12006.pdf>) (2006). (Erişim Tarihi: 23.07.2017)
- Dahil, H., "Yüksek Performanslı Beton-Donatı Aderansının Geleneksel Beton-Donatı Aderansı ile Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, (2001).
- Demir, İ., "Aynı Oranlarda İkame Edilen Silis Dumanı ve Uçucu Külün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi", *Int. J. Eng. Research & Development*, 1 (2): 1-8 (2009).
- Doğan, Ü. A., Özkul, M. H., "Mineral Katkılı Betonlarda Bileşimin Basınç Dayanımı Ve Geçirimliliğe Etkisi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, Cilt 8, Sayı 6: 121-132 Aralık (2009).
- Erdoğan, Y. T., "Admixtures for Concrete", Middle East Technical University Press, Ankara, (1997).

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Erdoğan, Y. T., "Beton", *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.*, Ankara, 1-757 (2002).
- Erdoğan, Y. T., "Beton", *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.*, Ankara, 1-741 (2003).
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Alzebaree, R., Mermerdaş, K., "Effect of Silica Fume and Steel Fiber on The Mechanical Properties of The Concretes Produced with Cold Bonded Fly Ash Aggregates", *Construction and Building Materials*, 40: 982-990 (2013).
- Karakurt, C., "Çimento Üretiminde Doğal Zeolit ve Volkanik Tüflerin Endüstriyel Atıklarla Birlikte Kullanılmasının Beton Performansı Üzerine Etkileri", Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2008).
- Kayseri Beton Laboratuvarı, "Mineral Katkılar"
(<http://kayseribetonlaboratuvari.com/index.php?e=teknik&id=14>) (2014).
(Erişim Tarihi: 01.03.2018)
- Lin, W. M., Lin, T. D., Powers-Couche, L. J., " Mikrostructures of Fire-Damaged Concrete", *American Concrete Institute Materials Journal*, 93: 199-205 (1996).
- Malhotra, V. M., Carrette, G. C., "Silica Fume Concrete - Properties", Applications and Limitations", *Concrete International*, ACI, 40-46 (1983).
- Mehta, P. K., "Durable Concrete Structures - Modern Materials and Construction Practice", *METU Dept. of Civil Engineering Course Notes*, Ankara (2002).
- Mehta, P. K., Monteiro P. J. M., "Concrete Microstructure, Properties and Materials - Chapter 8: Admixtures", *Indian Concrete Institute*, 256-271 (1997).

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Mehta, P. K., "Properties of Blended Cement Made From RHA", *American Concrete Institute Journal*, 74(9): 440-442 (1977).
- Nergiz, V., "Yüksek Dayanımlı Betonlarda Durabilite ve İşlenebilirlik", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2007).
- Nochaiya, T., Wongkeo, W., Chaipanich, A., "Utilization of Fly Ash with Silica Fume and Properties of Portland Cement–Fly Ash–Silica Fume Concrete", *Fuel*, 89 (3): 768-774 (2010).
- Okoye, F. N., Durgaprasad, J., Singh, N. B., "Effect of Silica Fume on The Mechanical Properties of Fly Ash Based-Geopolymer Concrete", *Ceramics International*, S0272-8842 (15): 19-86 (2015).
- Orhun, M., Günday, F., Özden, N., Atbas, M., "The Use of Fly Ash in Turkey For Cement and Cement Products", *Europe Committee on Electric Power, Symposium on The Use of Fly Ash*, B.2. (1970).
- Özalp, F., "Ultra Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Davranışı", Yüksek Lisans Tezi, *İ. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2006).
- Öztürk, A. U., "Çimento Harçlarının Mikroyapı-Basınç Dayanımı İlişkisinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2009).
- Piesta, J., "Heat Deformations of Cement Paste Phases and the Mikrostructure of Cement Paste", *Materials and Structures*, 17: 415-420 (1984).
- Postacıoğlu, B., "Bağlayıcı Maddeler", Cilt-1, *Matbaa Teknisyenleri Yayınevi*, İstanbul, (1986).
- Sabet, F. A., Libre, N. A., Shekarchi, M., "Mechanical and Durability Properties of Self Consolidating High Performance Concrete Incorporating Natural Zeolite, Silica Fume and Fly Ash", *Construction and Building Materials*, 44: 175-184 (2013).

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Sağlam, A. R., Akman, M. S., "Yüksek Performanslı Betonlarda İşlenebilme Açısından Çimento ve Süper Akışkanlaştırıcı Katkının Uyumu", ***Sika Teknik Bülten***, 3-9 Ankara (2002)
- Sarıbıyık, M., "Betonda Katkı Maddeleri"
(http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/67858/37141/yap%C4%B1_malzemesi_ve_lab._11._beton_katk%C4%B1_maddeleri.pdf) (2016). (Erişim Tarihi: 22.01.2018)
- Sifwerbrand J., Paulsson, J., "Better bonding of bridge deck overlays", ***Concrete International***, 20(4): 21-28 (1998).
- Sümer, B., Sarıbıyık, M., "Betonda Silis Dumanı ve Polipropilen Lif Kullanımının Beton Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi", ***Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*** 17 (2): 217-224 (2013).
- Tohumcu, İ., "Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Farklı Kür Koşullarının Basınç Dayanımına Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, ***Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Erzurum (2011).
- Tokay, M., Erdoğan, K., "Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar", ***Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları***, Ankara, 9-21 (2003).
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., "Silis Dumanlı Betonların Ara Yüzlerinin İncelenmesi", ***ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu***, 469-476 (2002).
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., "Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri", ***Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi***, 14: 2 (2001).
- Topçu, İ. B., Kaval, M., "Betonda Silis Dumanı Kullanımının Ekonomik Analizi", ***Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi***, 14: 1 (2001).
- TS EN 196-1, "Dayanım Tayini", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara (2016).

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- TS EN 197-1, "Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2012).
- TS EN 197-2, "Çimento Uygunluk Değerlendirmesi", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2014).
- TS EN 206, "Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2002).
- TSE EN 206-1, "Beton, Özellik, Performans, İmalat, Uygunluk", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).
- TS EN 450-1, "Betonda Kullanılan Uçucu Kül-Tarifler Özellikler ve Kalite Kontrolü", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2013).
- TS EN 480, "Kimyasal Katkılar – Beton, Harç ve Şerbet İçin - Deney Metotları", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2001).
- TS500, "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2000).
- TS EN 802, "Beton Karışım Esasları Hesap Dayanımı", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2009).
- TS EN 934-2, "Kimyasal Katkılar – Beton, Harç ve Şerbet İçin - Bölüm 2: Beton Katkıları", TSE, Ankara, (2002).
- TS EN 12350-1, " Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 1: Numune Alma", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2002).
- TS EN 12350-2, " Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2010).
- TS EN 12350-5, " Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 5: Yayılma Tablası Deneyi", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2010).

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

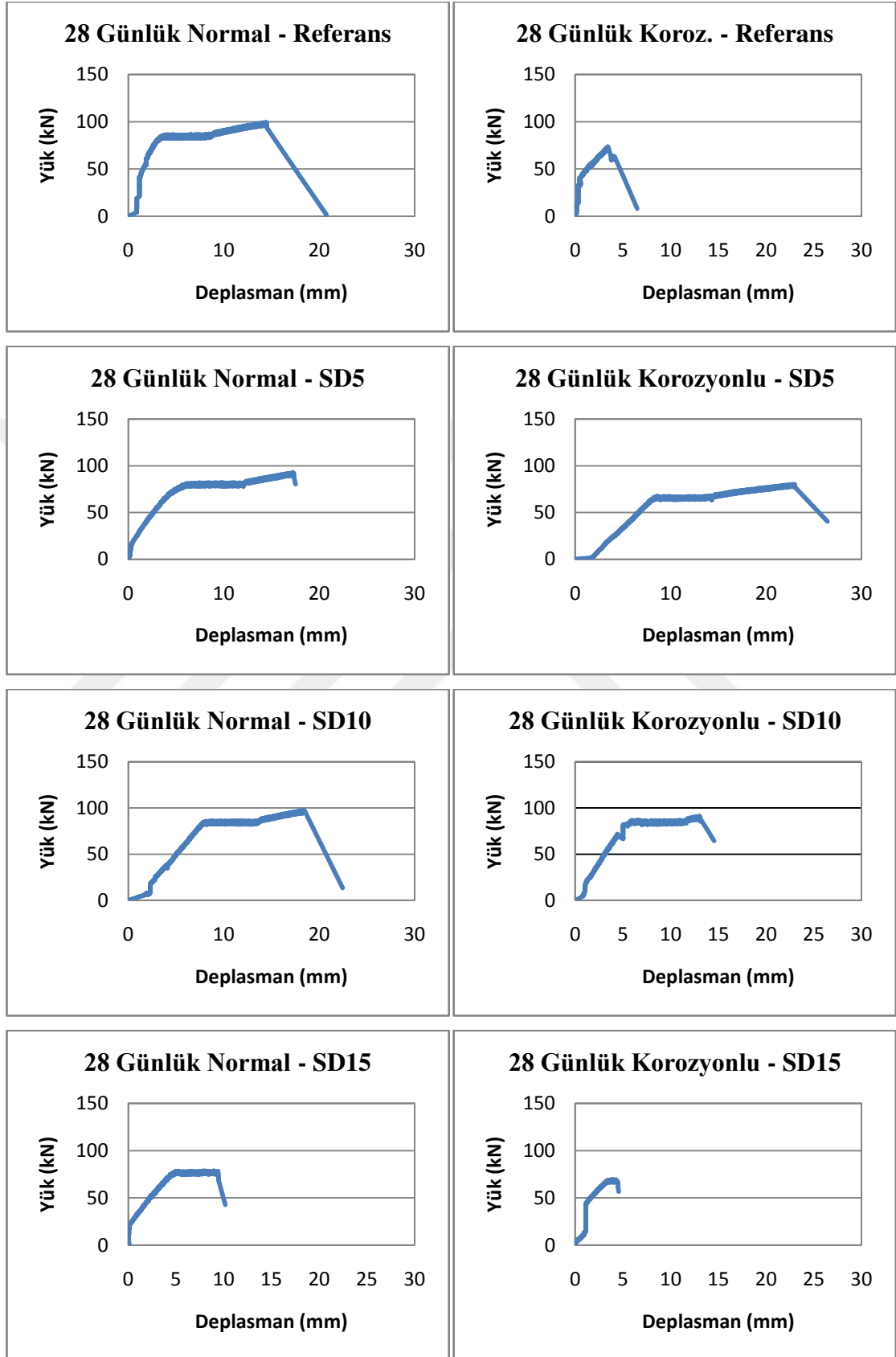
- TS EN 12390-1, "Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2012).
- TS EN 12390-2, "Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2010).
- TS EN 12390-3, "Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2003).
- TS EN 12504-1, "Beton - Yapıda Beton Deneyleri- Bölüm 1 : Karot Numuneler - Karot Alma, Muayene ve Basınç Dayanımının Tayini", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2002).
- TS EN 13791, "Basınç Dayanımının Yapılar ve Ön dökümlü Beton Bileşenlerde Yerinde Tayini", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2010).
- TS EN 13892-3, "Şap Malzemeleri - Deney Yöntemleri - Bölüm 3: Aşınma Direncinin Tayini - Böhme", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2015).
- TS 706 EN 12620 + A1, "Beton Agregaları", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2010).
- TS10465, "Beton Deney Metotları - Yapı ve Yapı Bileşenlerinde Sertleşmiş Betondan Numune Alınması ve Basınç Mukavemetinin Tayini (Tahribatlı Metod)", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (1992).
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinobalı, A., "Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri", *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları*, Ankara, 41-49 (2007).

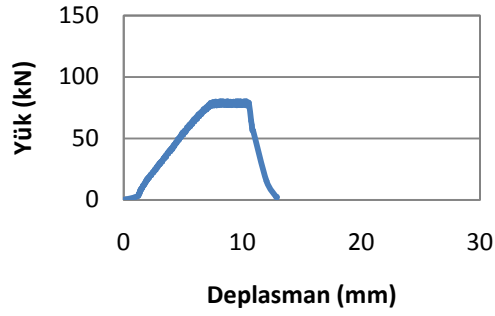
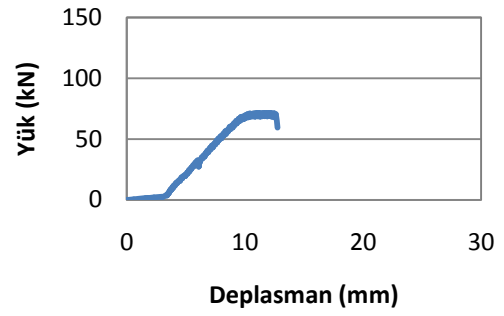
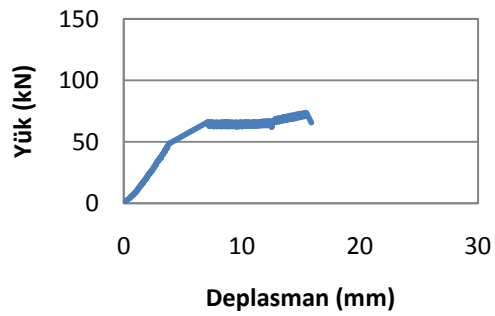
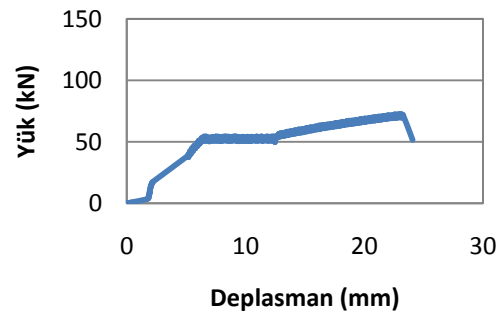
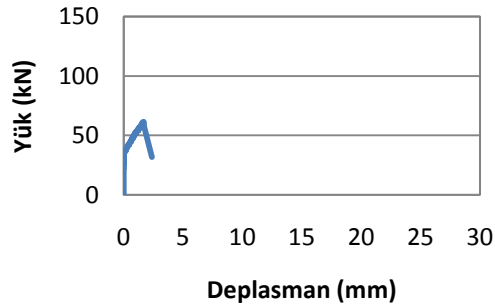
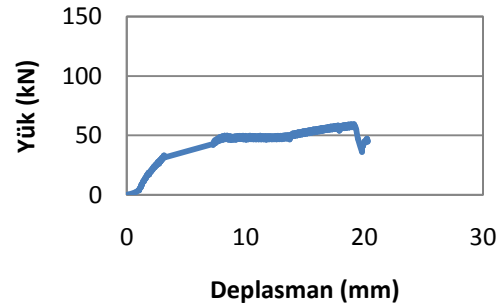
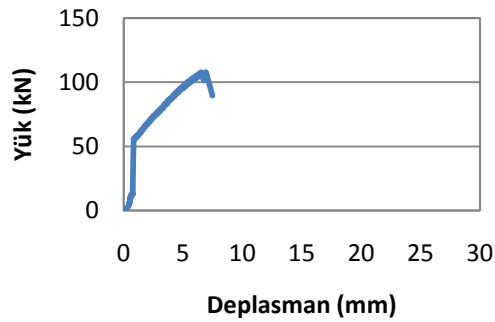
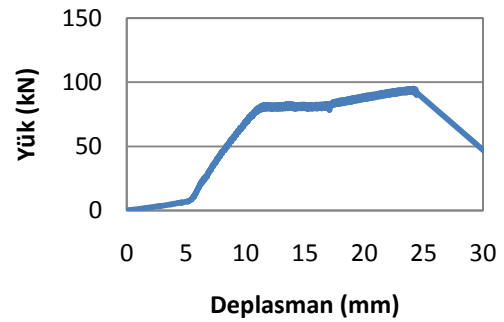
KAYNAKLAR (Devam ediyor)

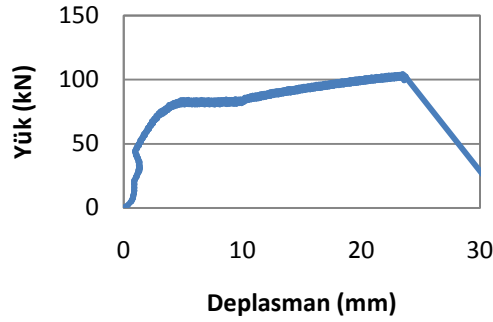
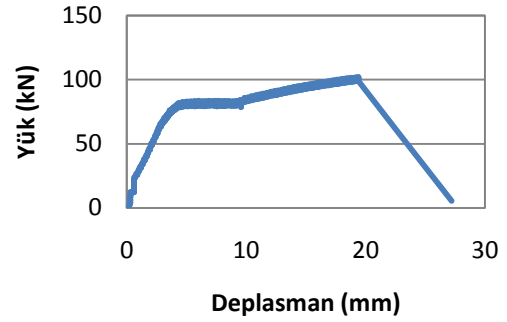
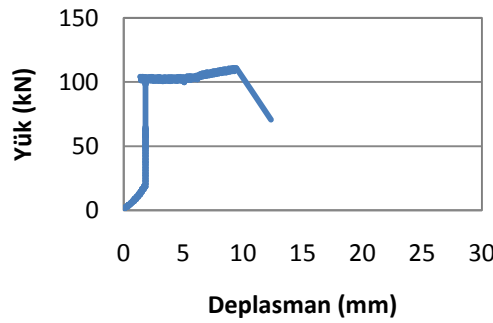
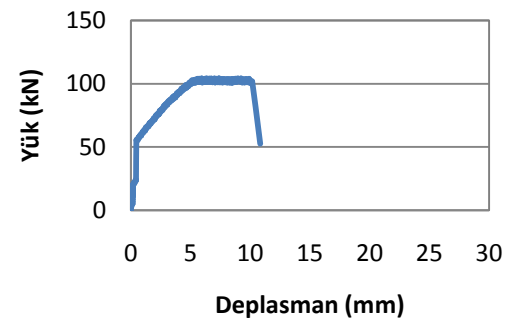
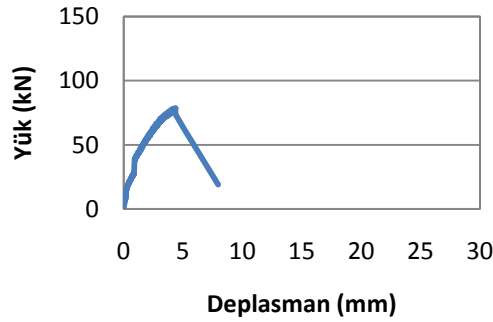
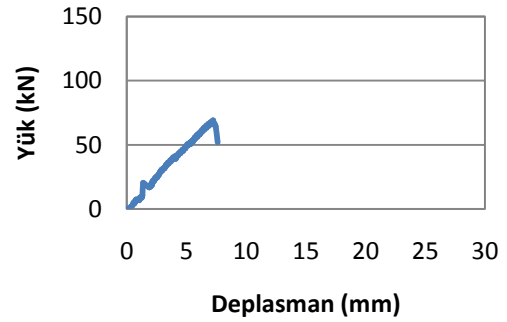
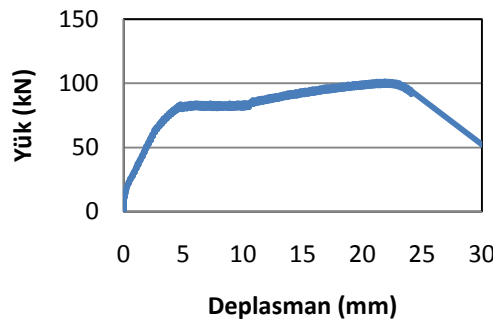
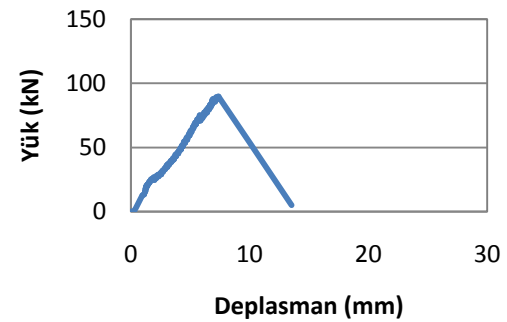
KAYNAKLAR (Devam ediyor)

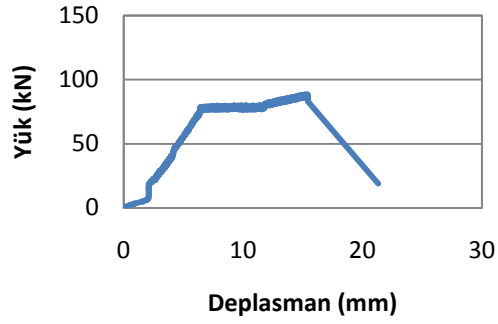
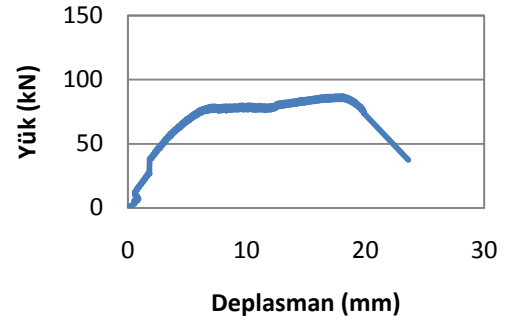
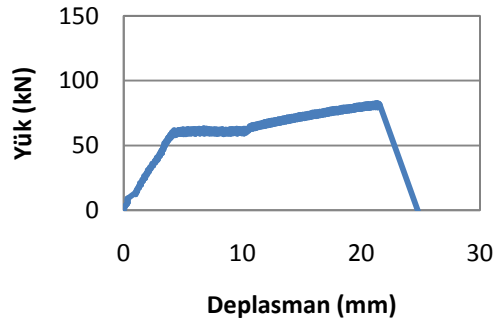
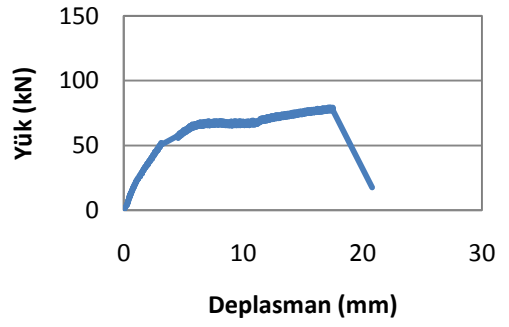
- Ünsal, A., Şen, H., "Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri", **T.C Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü** Ankara, (2008).
- Yalçın, H., Gürü, M., "Çimento ve Beton", **Palme Yayınları**, Ankara, 1-406 (2006).
- Yazıcı, H., "Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite) - 2"
(http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/YM2/YM-II%2314_BETONARME_YAPILARDA_KALICILIK-2.pdf) (2014). (Erişim Tarihi: 04.08.2018)
- Yazıcı, Ş., Sezer, G. İ., "Abrasion Resistance Estimation of High Strength Concrete", **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, III: 1 (2007).
- Yeğinobalı, A., "Betonun Dayanıklılığı I - Fiziksel Etkenler", **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları**, Ankara, 7-8 (1999).
- Yeğinobalı, A., "Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı", **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları**, Ankara, 7-8 (2009).
- Yüce, O., "Yüksek Dayanımlı Kendiliğinden Yerleşen Betonlar", Yüksek Lisans Tezi, **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Afyon (2011).

EK-1: Çekme deneyi uygulanan serilerin yük-deplasman grafikleri.



28 Günlük Normal - UK5**28 Günlük Korozyonlu - UK5****28 Günlük Normal - UK10****28 Günlük Korozyonlu - UK10****28 Günlük Normal - UK15****28 Günlük Korozyonlu - UK15****90 Günlük Normal - Referans****90 Günlük Koroz. - Referans**

90 Günlük Normal - SD5**90 Günlük Korozyonlu - SD5****90 Günlük Normal - SD10****90 Günlük Korozyonlu - SD10****90 Günlük Normal - SD15****90 Günlük Korozyonlu - SD15****90 Günlük Normal - UK5****90 Günlük Korozyonlu - UK5**

90 Günlük Normal - UK10**90 Günlük Korozyonlu - UK10****90 Günlük Normal - UK15****90 Günlük Korozyonlu - UK15**

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Onur PAŞA

Doğum Yeri ve Tarihi : Merkez / BİLECİK / 23.08.1992



Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği
Bölümü(2014)

Bilimsel Faaliyetleri : 2017-01.BŞEÜ.03-06 Nolu Bilimsel Araştırma Projesi

İş Deneyimi

İl Özel İdaresi (Bilecik)(İnşaat Mühendisi).....(2014 - halen)

İletişim

Adres :İl Özel İdaresi (Bilecik)

E-Posta Adresi : onur10241054@gmail.com

Sertifikalar

Probina Temel Eğitim Sertifikası ,2014,Denizli

Türk-Amerikan Derneği B1 Düzeyi İngilizce Sertifikası, 2013, Denizli

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Onur Belgesi, 2014, Denizli

Yabancı Dil Bilgisi

İngilizce