



**YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN SÜLFAT
DİRENCİNE SİLİS DUMANI ORANININ VE SÜLFAT
KONSANTRASYONUNUN ETKİSİ**

Emrah AKSAKAL

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2023

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN SÜLFAT DİRENCİNE SİLİS DUMANI
ORANININ VE SÜLFAT KONSANTRASYONUNUN ETKİSİ**

(The Effect of Silica Fume and Sulphate Concentration on the Early Age Sulfate Resistance
of High Resistant Concrete)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrah AKSAKAL

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

Erzurum
Ağustos, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Emrah AKSAKAL tarafından hazırlanan “**Yüksek Dayanımlı Betonların Sülfat Direncine Silis Dumanı Oranının ve Sülfat Konsantrasyonunun Etkisi**” başlıklı çalışması 31 / 07 / 2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU
Erzurum Teknik Üniversitesi

..... Aslı ıslak imzalıdır

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL
Atatürk Üniversitesi

..... Aslı ıslak imzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Zinnur ÇELİK
Atatürk Üniversitesi

..... Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Aslı ıslak imzalıdır

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL danışmanlığında sunulan “Yüksek Dayanımlı Betonların Sülfat Direncine Silis Dumanı Oranının ve Sülfat Konsantrasyonunun Etkisi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	5	30
Kuramsal Temeller	17	30
Materyal ve Metot	9	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	4	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	12	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5’den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Emrah AKSAKAL	Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL
31.7.2023	31.7.2023
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardımlarıyla beni yönlendiren danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Devamlı bilgi alışverişinde bulunduğum Dr. Öğr. Gör. Zinnur ÇELİK'e, varlıklarıyla bana güven duygusu veren başta eşim olmak üzere tüm aileme, çalışmalarım boyunca kullandığım laboratuvarlarda bana yardım eden tüm personele, minnet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmam süresince bana çeşitli konularda yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen Aşkale Hazır Beton ve Çimento A.Ş. ve Korkmazlar Hazır Beton A.Ş. ye teşekkür ederim.

Emrah AKSAKAL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN SÜLFAT DİRENCİNE SİLİS DUMANI ORANININ VE SÜLFAT KONSANTRASYONUNUN ETKİSİ

Emrah AKSAKAL

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

Amaç: Farklı sülfat iyonu konsantrasyonuna sahip çözeltilere maruz bırakılan farklı oranlarda silis dumanı ikame edilen yüksek dayanımlı betonların (YDB) sülfat direncine karşı performanslarının araştırılmasıdır.

Yöntem: %5, %10 ve %15 silis dumanı ikame edilerek 3 seri beton numunesi üretilmiştir. Beton karışımında C₃A miktarı 7,05 olan CEM I 42,5R portland çimentosu kullanılmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla silis dumanı ikamesiz örneklerde üretilmiştir. Toplamda 204 silindir ve 36 prizma beton numunesi dökülmüştür. Hazırlanan numuneler ağırlıkça %3, %5 ve %10 sodyum sülfat içeren çözelti içerisinde 120 gün süre ile bekletilmiş ve aylık periyodlar halinde birim ağırlık, boyca uzama ve basınç mukavemeti deneylerine tabi tutulmuştur. Sülfat etkisine maruz kalmamış kontrol numuneleri ile karşılaştırılmak suretiyle sülfatın YDBlerin görünümünde meydana gelen değişiklikler ve birim ağırlık, boyca uzama ve basınç mukavemeti değerlerindeki değişimler incelenmiştir.

Bulgular : En yüksek basınç dayanımına su küründe bekletilen %15 silis dumanı ikameli numunelerde, sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde ise %3 sülfat çözeltisinde bekletilen silis dumanı ikamesiz numunelerde elde edilmiştir. En az boyca uzama değerine % 15 silis dumanı ikameli %5 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde ulaşılmıştır.

Sonuç: Çalışma sonunda silis dumanı ikamesinin yüksek dayanımlı betonun sülfat direncine karşı performansını artırdığı, sülfat konsantrasyonunun artmasının sülfat etkisinin şiddetini artırmasına neden olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Dayanımlı Beton, Silis Dumanı, Sülfat Etkisi, Durabilite, Etrenjit

Ağustos 2023, 72 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

THE EFFECT OF SILICA FUME AND SULPHATE CONCENTRATION ON THE EARLY AGE SULFATE RESISTANCE OF HIGH RESISTANT CONCRETE

Emrah AKSAKAL

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

Purpose: The performance of high strength concrete with silica fume substitution against early age sulphate resistance was investigated.

Method: 3 series of concrete samples were produced by substituting 5%, 10% and 15% silica fume. CEM I 42,5R portland cement with C3A content of 7,05 was used in the concrete mixture. In addition, silica fume was produced in unsubstituted samples for comparison. A total of 204 cylinders and 36 prism concrete samples were poured. The prepared samples were incubated in a solution containing 3%, 5% and 10% sodium sulphate for 120 days and subjected to unit weight, elongation and compressive strength tests in monthly periods. Changes in the appearance of high strength concretes of sulphate and changes in unit weight, length elongation and pressure resistance values were examined by comparison with control samples which were not exposed to sulphate.

Findings: The highest compressive strength was obtained in 15% silica fume substituted in water curing, and in the samples kept in sulphate solution. The minimum elongation value was reached in the samples which were kept in 5% sulphate solution with 15% silica fume solution.

Results: At the end of the study, it was observed that silica fume substitution increased the performance of high strength concrete against sulphate resistance and increased sulphate concentration increased the strength of sulphate effect.

Keywords: High strength concrete, silica fume, sulfat attach, durability, ettringite

August 2023, 72 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Yüksek Dayanımlı Beton	4
Yüksek Dayanımlı Betonda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	6
Agrega	6
Çimentolar.....	8
Su	8
Silis dumanı.....	9
Süper akışkanlaştırıcı katkı (SAK).....	10
Yüksek Dayanımlı Betonun Özellikleri	10
Poisson oranı	10
Elastisite modülü.....	11
Rötre (Büzülme).....	12
Süneklik	12
Dayanıklılık.....	12
Yüksek Dayanımlı Betonun Ülkemizdeki Uygulamaları	13
Yüksek Dayanımlı Betonun Dünyada Uygulamaları.....	14
Betonun Dayanıklılığı ve Bozulma Mekanizmaları.....	15
Sülfat Saldırıları	16
Sülfat saldırıları sonucu betonda oluşan zararlı reaksiyonlar	16
Sülfat etkisine karşı alınacak önlemler	18
Sülfata dayanıklılık deneyleri	19
Betonda Sülfat Etkisi ile İlgili Çalışmalar	19

Yüksek Dayanımlı Betonla İlgili Çalışmalar	23
MATERYAL VE METOT	27
Materyal	27
Deneylerde kullanılan malzemeler	27
Deneylerde kullanılan aletler	30
Yöntem	33
Agrega deneyleri	33
Beton karışım seçeneklerinin belirlenerek ve hazırlanması	34
Betonların üretilmesi, yerine konulması ve bakımı	34
Numunelerin kodlanması	35
Taze beton deneyleri	35
Sertleşmiş beton deneyleri	36
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	38
Agrega Deney Sonuçları	38
Elektanalizi	38
Su emme oranı	39
Özgöl ağırlık	39
Taze Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	39
Slump deneyi	39
Birim hacim kütlesi	40
Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	40
Kuru birim hacim kütlesi ve basınç dayanımı ile ilgili bulgular ve tartışma	40
Basınç dayanımı ile ilgili bulgular ve tartışma	44
Boy değişimi ile ilgili bulgular ve tartışma	48
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	60

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. TS 206+A2 Göre Normal ve Ağır Betonda C45/55 üzeri Basınç Dayanımı	
Sınıfları.....	4
Tablo 2. Elastisite Modülü Denklemleri.....	12
Tablo 3. Gerede-Ankara Otoyolu Projesi’ nde Kullanılan Betona ait Özellikler	13
Tablo 4. Dünyada YDBnin Kullanıldığı Bazı Projeler (Engin 2015).....	14
Tablo 5. Çimentonun Kimyasal Özellikleri	27
Tablo 6. Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	28
Tablo 7. Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri.....	29
Tablo 8. Beton Karışım Oranı (kg/m ³)	34
Tablo 9. Elek Analizi Verileri.....	38
Tablo 10. Agregaların Su Emme Oranları	39
Tablo 11. Agregaların Özgül Ağırlıkları	39
Tablo 12. Slump Değerleri.....	39
Tablo 13. Taze Betona ait Birim Hacim Kütlesi.....	40
Tablo 14. Kür Havuzunda Bekletilen Numunelere ait Kuru Birim Hacim Kütlesi.....	40
Tablo 15. %3 Na ₂ SO ₄ İçeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Kuru Birim Hacim Kütlesi	40
Tablo 16. %5 Na ₂ SO ₄ içeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Kuru Birim Hacim Kütlesi	41
Tablo 17. %10 Na ₂ SO ₄ İçeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Kuru Birim Hacim Kütlesi	41
Tablo 18. Su Küründe Bekletilen Numunelere ait Beton Sonuçları.....	44
Tablo 19. %3 Na ₂ SO ₄ İçeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Beton Sonuçları	45
Tablo 20. %5 Na ₂ SO ₄ İçeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Beton Sonuçları	46
Tablo 21. %10 Na ₂ SO ₄ İçeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Beton Sonuçları	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Sodyum sülfat	29
Şekil 2. Elekler	30
Şekil 3. Betoniyer	30
Şekil 4. Silindir beton kalıpları	31
Şekil 5. Dikdörtgen beton kalıplar	31
Şekil 6. Kür havuzu	32
Şekil 7. Hidrolik pres	32
Şekil 8. Dijital kumpas	33
Şekil 9. Su küründe bekletilen numunelerin kuru birim hacim kütlesi	41
Şekil 10. %3 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin kuru birim hacim kütlesi	42
Şekil 11. %5 Sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin kuru birim hacim kütlesi	42
Şekil 12. %10 Sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin kuru birim hacim kütlesi	43
Şekil 13. Su küründe bekletilen numunelerin basınç dayanımları	44
Şekil 14. %3 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları	45
Şekil 15. %5 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları	46
Şekil 16. %10 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları	47
Şekil 17. %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen SD içerikleri farklı betonlara ait boy değişim yüzdeleri	49
Şekil 18. %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen SD içerikleri farklı betonlara ait boy değişim yüzdeleri.....	49
Şekil 19. %10 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen SD içerikleri farklı betonlara ait boy değişim yüzdeleri.....	50
Şekil 20. Silindir numunelerin sülfat çözeltisinde bekletildikten sonraki fiziksel görünümü	53
Şekil 21. Silindir numunenin basınç testleri sonucu görünümü	54

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

C ₃ A	Tri kalsiyum alüminat
CH	Kalsiyum hidrat
CSH	Kalsiyum silika hidrate
F _{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
MPa	Megapaskal
Na ₂ SO ₄	Sodyum sülfat

Kısaltmalar

DKY	Doygun Kuru Yüzey
GDSK	Geri Dönüştürülmüş Seramik Karolar
SAK	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı
SD	Silis Dumanı
UYDB	Ultra Yüksek Dayanımlı Beton
YDB	Yüksek Dayanımlı Beton

GİRİŞ

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde mineral ve kimyasal katkıların belirlenen oranlarda homojen bir şekilde karıştırılması ile elde edilerek, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun su ile hidratasyonu sonucu katılaşıp, istenilen kalıbın şeklini almaktadır (Ünsal ve Şen 2008).

İlkel şekliyle betonun, yapılan araştırmalar sonrası Mısır Piramitlerinde, Çin Seddinde ve Romalılar dönemindeki pek çok mühendislik yapısında 5000 yıl kadar önce kullanıldığı bilinmektedir. Beton, 1824 yılında portland çimentosunun üretilmesi ve 1848’de ilk çimento fabrikasının kurulması ile kullanılmaya başlamıştır. 1900’ lü yılların başında Almanya’ da hazır beton kullanılmaya başlamasıyla birlikte teknolojik gelişmeler ışığında kullanımı artarak devam etmiştir (Ünsal ve Şen 2008).

Ülkemizde ve dünyanın bir çok yerinde 1960’ lı yıllardan sonra kimyasal ve mineral katkıların ve liflerin betonda kullanılmaya başlanması ile birlikte karışımlardaki su/çimento oranının düşürülmesi sonucu yüksek dayanımlı betonlar (YDB) üretilerek bir çok yapıda kullanılmaktadır. (Ünsal ve Şen 2008).

YDB üretimine, 1930’larda başlanmasına rağmen üretim maliyetlerinin çok fazla olması nedeniyle üretime geçilmemiştir. 1960-1970 yılları arasında süper akışkanlaştırıcılar ve mineral katkı maddelerinin beton karışımlarında yer alması betonun performansının artmasına neden olmuştur. Bu gelişmelerden sonra pek çok ülkede YDB üretilmeye başlanmıştır. Amerika ve Avrupa ülkelerinin yanında Birleşik Arap Emirlikleri, Orta Asya ülkeleri ve dünyanın bir çok yerindeki uygulamalarda YDB’ nin kullanımı gün geçtikçe artmıştır. (Eser 2015).

Yapılarda kullanılan en önemli yapı malzemelerinden biri olan betonun başlıca özelliklerini sıralamak gerekirse;

- Betonun yapımında kullanılan malzemelerin (agrega, su, çimento) doğada kolay ve bol miktarda bulunabilmesi,
- Diğer yapı malzemelerine (çelik vb.) göre daha ekonomik olması,
- Yüksek basınç dayanımına ve dayanıklılığa sahip olması,
- Betonun hazırlanması kolay olduğundan fazla işçilik gerektirmemesi,
- Yangına karşı dayanımı,
- Bakımının kolay olması,

- Sertleştikten sonra dayanımının giderek artması,
- Doğada bulunan malzemelerle üretildiğinden çevreye olan etkisinin minimum seviyede oluşudur (Güner ve Süme 2001).

İşlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık betondan beklenen üç önemli özelliktir. Taze haldeyken beton, işlenebilir olmalı, kullanım koşulları ve yapımında kullanılacak ekipmanlarda dikkate alınarak döküldüğü kalıbı kolayca dolduracak ve sıkıştırılabilecek kıvamda olmalı, nakliyesinde, dökülürken yerleştirme ve içinde boşluk kalmayacak şekilde sıkıştırılmalı, ayrışma ve su kuma problemi yaşanmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Sertleşmiş betonun özelliklerini sıralamak gerekirse, proje dayanımını sağlaması ve iç ve dış etkilere karşı dayanıklılık göstermesidir. (Baradan ve Yazıcı 2003).

Betonda kullanılan malzemelerin (agrega, çimento, su, kimyasal ve mineral katkıları vb.) seçimi ve standartlara uygunluğu, betondaki su/çimento oranı, beton karışım hesabı, betonun üretilmesi ve üretilmesinde kullanılan teknolojiler, betonun taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve kürü gibi parametreler, betonun fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanımlı ve kalıcı olmasında önemlidir (Güner ve Süme 2001).

Betonda dayanıklılık, kalıcılık veya durabilite kavramını tanımlamak gerekirse;

Betonun dayanıklılığı, betonun istenen mühendislik özelliklerini korurken hava koşullarına, kimyasal etkilere ve aşınmaya karşı direnç gösterme yeteneği olarak tanımlanabilir (Anonymous 2023).

Çeşitli iç ve dış etkenler zamanla betonun bozulmasına yol açar. Bu etkenler fiziksel , mekanik, kimyasal ve biyolojik nedenlerden kaynaklı olabilmektedir.

Fiziksel ve mekanik etkenler;

- Donma-çözünme
- Aşınma
- Yangın
- Tekrar eden yükler vb.

Kimyasal Etkenler;

- Alkali-silika reaksiyonu
- Sülfat saldırıları
- Karbonatlaşma
- Korozyon

Biyolojik etkenler;

- Çiçeklenme,
- Bitkiler, yosunlar vb. nedenlerden kaynaklı bozulmalar

Zeminde ya da yeraltı sularında çözünmüş halde bulunan sülfat iyonlarının çimentonun hidrate bileşenleri ile reaksiyona girmesi sonucunda sülfat saldırıları meydana gelmektedir. Hidrate çimento bileşenlerinden kalsiyum hidroksit Ca(OH)_2 ve trikalsiyum alüminat (C_3A) ile sülfat iyonlarının reaksiyonu sonucunda oluşan ürünler kalsiyum sülfat alüminat ve alçıtaşıdır. Bu ürünler gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda betonun bünyesinde hacim artışı meydana getirirler (Baradan ve ark. 2010).

Sülfat etkisiyle sertleşmiş betonda hacimsel genişlemeler, çatlaklar, yumuşama, dayanım kayıpları oluşmaktadır. Betonun çatlaması ve dağılması dayanımının azalması, bütünlüğünün bozulmasına ve dış etkilere karşı dayanıklılığının azalmasına yol açar. Çimentonun bileşenlerinin yanında betonun boşluklu yapısı ve geçirimsizliği de sülfat saldırılarına neden olmaktadır. Betonun geçirimsizliğinin azaltılması ile toprakta ve yeraltı sularında bulunan sülfat iyonlarının su ile betonun içerisine taşınması azaltılmaktadır. Ayrıca mineral katkıların kullanılması ve çimentodaki C_3A miktarının sınırlandırılması, beton içerisindeki boşlukların azaltılması sülfat etkisine karşı alınacak önlemlerden bir kaçıdır. (Baradan ve ark. 2010).

Bu tez çalışmasında kullanımı gün geçtikçe artan YDBlerin sülfat etkisi altındaki fiziksel ve mekanik özelliklerinde (yoğunluk, boy değişimi ve basınç dayanımında) meydana gelen değişiklikler incelenmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde yapılan literatür çalışmalarında YDB, YDBnin malzemeleri, YDBnin özellikleri, durabilite kavramı, betonun bozulmasının nedenleri, bozulmasını önlemek için alınacak tedbirler, YDB ve betonda sülfat etkisi üzerine yapılan çalışmalar araştırılmıştır. Benzer konularla ilgili yapılan tez çalışmaları, makaleler, dergiler, standartlar, kitaplar taranmış ve özet halinde tarih sıralaması yapılarak sunulmuştur. Literatür araştırması, tez çalışmasının nasıl yapılacağı, izlenecek yollar, uygulanacak yöntemlerin araştırılması, sonuçların değerlendirilmesi için yapılmıştır.

Yüksek Dayanımlı Beton

YDBnin yüksek basınç dayanımı ve dayanıklılığı gibi üstün özelliklere sahip olması nedeniyle son yıllarda kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. YDB ortalama basınç dayanımı 50 MPa ve üzerinde olan özel bir beton türü olarak tanımlanabilir (Demir ve ark. 2022).

Tablo 1. TS 206+A2 Göre Normal ve Ağır Betonda C45/55 üzeri Basınç Dayanımı Sınıfları

Basınç Dayanım Sınıfı	En Düşük Karakteristik Silindirik Dayanımı $f_{ck,sil}$ (N/mm ²)	En Düşük Karakteristik Küp Dayanımı $f_{ck,küp}$ (N/mm ²)
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

YDB, yüksek kalitede agrega ve çimento ile SD gibi puzolanik maddeler kullanılarak üretilen, su/çimento oranı 0,20 seviyelerine hatta daha da düşürülerek yüksek işlenebilirlik ve döküm kolaylığı elde edilebilen özel bir beton türüdür. (Kocataşkın 1991).

YDB, iyi kaliteli çimento ve agrega ile süper akışkanlaştırıcı katkı (SAK) ve SD gerektiren, su/çimento oranı 0,20' lere kadar düşürülerek basınç dayanımı 100 N/mm² seviyelerine yükseldiği halde işlenebilirliğini ve pompalanabilirliğini koruyan özel bir beton türüdür (Sümer ve Söyler 2002).

YDB basınç dayanımı sınırları uluslararası standartlarda değişiklikler göstermektedir. ACI standardında 55 Mpa ve üzeri dayanıma sahip betonlar YDB olarak tanımlanmaktadır (Demir ve ark.2022).

Betonu oluşturan malzemeler arasında oluşabilecek boşlukları minimuma indirerek düşük su/çimento oranı sayesinde düşük porozite ve yüksek durabilite elde etme amacıyla tasarlanan YDB, süper akışkanlaştırıcı ve ultra incelikteki mineral katkıların kullanılmasıyla 1980’li yıllardan sonra 100 MPa gibi çok yüksek dayanımlara ulaşmıştır. Günümüzde basınç dayanımı 100 ila 130 MPa olan betonlar rutin bir şekilde üretilmektedir. Bu hızlı değişiklik 1980’lerde yapılan birçok araştırma sayesinde olmuştur. Beton dayanımlarındaki artış SAKların hızlı geliştirilmesi, mineral katkı uygulamaları ve özellikle puzolanların betonda kullanılmasıyla olmuştur (Yeğınobalı 2009).

YDBler de SD gibi yapay puzolanların kullanımıyla çimento ile agrega taneleri arasındaki boşlukların minimum seviyeye indirilmesiyle betonun dayanımı ve durabilite özelliklerinde artışlar meydana gelmektedir. Böylece daha yüksek dayanıma sahip, fiziksel, mekanik, kimyasal vb. etmenlerden daha az etkilenen YDBler üretmek mümkün olmaktadır.

YDB üretiminde;

- İyi nitelikli, temiz, sert, sağlam ve kırmataş agregalar seçilmeli,
- Mukavemeti yüksek çimentolar kullanılmalı,
- SAKlar kullanılmalı,
- Dozajı yüksek bir karışım hazırlanmalı,
- Su/çimento oranı düşük seçilmeli,
- İşlenebilir bir beton olmalı,
- Beton içerisindeki boşluklar minimize edilmeli
- Mineral katkıları (SD gibi) kullanılmalıdır (Sümer ve Söyler 2002).

YDB günümüzde çok yüksek katlı yapılarda, deniz yapılarının temellerinde, köprülerde, barajlarda, tribün çatılarında, otoparklarda vb. birçok yapıda kullanılmaktadır.

YDB’lerin yapılarda kullanılmaya başlamasıyla betonların daha erken yaşlarda hizmete sokulması, kolon boyutlarının azaltılarak yüksek katlı binaların inşaa edilmesi, yapıların toplam ağırlığının azalması, yapıların içerisinde daha geniş kullanım alanlarının oluşturulması, uzun ayak açıklığına sahip köprülerin üst yapılarının oluşturması ve köprü üst yapısının dayanıklılığının arttırılması, dayanıklılık ve eğilme dayanımı vb. gibi özel uygulamaların ihtiyaçlarının karşılanması gibi faydalar sağlanmaktadır (Anonymous 2001).

Yüksek Dayanımlı Betonda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

YDB üretiminde kullanılacak malzemeler seçilirken, en uygun malzemenin seçilmesi ve seçilen malzemelerin standartlara uygun olarak kullanılması, işlenebilirlik, boşluksuz yapı, dış ve iç etmenlere karşı dayanım hususları göz önünde bulundurulmalıdır.

Malzemelerin özellikleri belirlenmeden, değişik malzemelerin özellikleri ile karşılaştırılmadan amaca uygun malzemenin seçilmesi zorlaşacaktır. Malzemelerin teknolojik (aşınma, çarpma dayanımı, sertlik, yorulma, sünme vb.) fiziksel (Birim Ağırlık, Özgül Ağırlık, Porozite, Su Emme, Komposite, rötire, kapilarite vb.) kimyasal, mekanik, geometrik, termik, akustik ve elektriksel özelliklerinin (iletkenlik, yalıtkanlık vb.) bilinmesinde yarar vardır. Ucuz malzeme seçimi, temin edilebilmesindeki kolaylıklar, standartlara uygun oluşu, özelliklerinin değiştirilebilmesi, ihtiyaç kadar alınması malzeme seçiminde önemlidir (Güner ve Süme 2001).

Bu bölümde YDB elde edebilmek için kullanılan agrega, su, çimento, kimyasal ve mineral katkıların özellikleri hakkında bilgiler verilecektir.

Agrega

Betonlarda yüksek dayanım elde edebilmek için kullanılacak agregaların seçimi oldukça önemlidir. Agregalar beton hacminin yaklaşık %60-75' ini oluşturmaktadır. Kullanılacak agregalar düzgün şekilli, granülometrisi birbirlerinin boşluklarını dolduracak şekilde, sert, dayanımı yüksek, boşluksuz, organik madde içermeyen, çimento ile zararlı kimyasal reaksiyonlara girmeyen özellikte seçilmelidir.

YDB üretimi, amaca uygun kaliteli agregaların seçilmesini gerektirir. YDB için kullanılan hem ince hem de iri agregalar standartlardaki şartları sağlamalıdır. Yuvarlak şekilli ve daha yumuşak bir yapıya sahip ince agregalar betonda daha az karışım suyuna ihtiyaç duyduğundan dolayı YDB üretiminde tercih edilirler. İnce agregaların fiziksel özelliklerinden daha çok, su gereksinimi daha az olan agregaların seçilmesi tercih edilir. YDB' ler mineral katkıları içerdiğinden dolayı normal betonlara kıyasla ince agregaların gradasyonu daha az önemlidir. Bununla birlikte ince agregalar çimento hamuru ile agrega ara yüzü arasındaki aderansın artırılması için önemlidir. Betondaki su ihtiyacını azaltmak için karışımında kullanılacak agregaların kil, silt ve yabancı madde içermemesi ve 50 ve 100 nolu eleklerden geçen malzemelerin standartları sağlama koşulu ile kullanımı sınırlandırılmalıdır.

Kaba agreganın mineralojik özellikleri, gradasyonu, şekli, dokusu, elastisite modülü ve temizliği betonun özelliklerini etkilemektedir. Kaba agrega seçimi normal betona göre YDB' de daha belirgin bir etkiye sahiptir. Normal betonda basınç dayanımı çimento hamuru ile agrega arasındaki aderansın kapasitesi ile sınırlıdır. YDB' de mineral katkıların kullanımı ve düşük

su/ çimento oranı kaba agregası ve çimento hamuru arasındaki aderansı artırdığı ancak iri agreganın dayanımının nihai basınç dayanımını belirlediği görülmüştür.

Yüksek mukavemetli betonda kaba agregası miktarı, gerekli işlenebilirliği sağlayacak şekilde maksimum oranda kullanılmalıdır. Yüksek mukavemetli betonda yüksek çimentolu malzeme yüzdesi nedeniyle, normal mukavemetli karışımlar için standartlarda önerilen değerlerin ötesinde kaba agregası içeriğinde bir artış gereklidir. Ayrıca işlenebilirlik ve kompakteyi artırma özellikleri sağlayan ince agreganın rolü, geleneksel beton karışımlarında olduğu kadar önemli değildir. Kaba bir kum olduğu düşünülen, yaklaşık 3.0' lık bir incelik katsayısına sahip olan kumun, iyi işlenebilirlik ve yüksek basınç dayanımı elde etmek için yeterli olduğu görülmüştür (Kosmatha and Wilson 2016).

Kaba agregaları beton içerisindeki en büyük hacmi işgal ederler. YDBde kaba agregası hacmi genel olarak % 50 ile % 70 arasındadır. En uygun miktarı kaba agreganın maksimum tane çapı ve ince agreganın incelik modülü belirler. Kaba agreganın tane çapı arttıkça beton içerisindeki miktarı da artar. İnce agreganın incelik modülü arttıkça beton içindeki kaba agregası miktarı da azalır. Yüksek dayanım elde edebilmek için su/ çimento oranı düşük, daha çok çimento hamuru içeren ve kaba agregası tane boyutunun minimum 10-13mm maksimum 19-25 mm arasında seçilen karışımlar önerilmektedir. YDBler için tane boyutu 13mm nin altında ve kırma taşı agregaların seçilmesi önerilmektedir. Daha küçük boyutlardaki kaba agregaları daha büyük yüzey alanına sahip olduğu için çimento hamuru arasındaki aderansı artırır. Bununla birlikte nihai basınç dayanımı da artar. Daha küçük boyutta agregası kullanımı ile agregası ve çimento hamurunun elastisite modülü arasındaki farklılıklardan dolayı parçacıklar etrafında daha az gerilme oluşur daha yüksek basınç dayanımı sağlanmaktadır. Kaba agreganın yüzeyinin pürüzlü olması, çimento hamuru ile arasındaki bağı artırdığı için kullanılması daha uygundur (ACI 363 R10, 2010).

Kullanılan agregaların maksimum tane çapı SAK kullanılmıyorsa 10-16 mm, SAK kullanılacaksa 25mm olmalıdır. İyi bir aderans elde etmek için kırma taşı agregası kullanılması ve şekli bozuk tanelerin oranının %5'i geçmemesi gerekir. Düşük su/çimento oranlı karışımlarda bir miktar su emen agregası seçilmesi, kaba agregası mekanik özelliklerinin yeterli düzeyde olması, ince agregası olarak düşük su/çimento oranları için kaba kum, yüksek dozda SAK kullanılacaksa ince bir kum kullanılmalıdır. Kalker kırma taşı agregası kullanılması durumunda doğal agregalara kıyasla %30-35 daha yüksek beton basınç dayanımları elde etmek mümkündür. Kalker kırma taşın çimento hamuru ile çok iyi aderans sağladığı, agregası kırılma oranlarının ölçülmesi ile de ispatlanmıştır (Sümer ve Söyler 2002).

Yaklaşık olarak 40 MPa'lık bir beton basınç mukavemetine kadar, agreganın mukavemeti birinci derece öneme sahip değildir. Yükleme esnasında çatlak oluşumu önce agrega-matris temas yüzeyinde başlar, sonra matris çatlak ve kırılma matrisde olur. YDBde ise kırılma çatlakların agrega içinde geçmesiyle olur. Yani normal betondaki gibi, çatlak temas yüzeyinde başlayıp agrega etrafında tur atarak yayılmaz ve doğrudan agreganın içinden geçer. Dolayısıyla dayanımı yüksek agrega kullanılmasıyla daha yüksek dayanıma sahip betonlar elde edilebilir (Yılmaz ve Alemdar 2003).

Çimentolar

Portland çimentosu beton üretiminde kullanılan en yaygın çimento tipidir. YDB' de portland çimentosu seçimi son derece önemlidir. YDB' de kullanılacak portland çimentosu performans ihtiyaçlarına göre seçilmelidir. Örneğin öngerilmeli betonda olduğu gibi yüksek erken dayanım istenilmediği durumlarda yüksek erken dayanımlı portland çimentosunun kullanılmasına gerek yoktur. Çimento özellikleri genel olarak elastisite modülüne göre basınç dayanımı üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir (ACI 363 R10 2010).

Çimentoyu seçerken kalite programını tam uygulayan, standartlara uygun üretim yapan üretici firmalar araştırılmalı, çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından geçmişinin düzgünlüğüne bakılmalı ve kullanılan zaman içerisinde kimyasal ve fiziksel özelliklerdeki değişiklikler sıkı bir şekilde takip edilmelidir.

Su

YDB üretiminde kullanılan suyun özellikleri normal betondaki gibidir. İçme suları herhangi bir teste tabi tutulmaksızın betonda kullanılabilir(ACI 363 R10 2010).

Normal ve YDBde kullanılan su, kuru halde olan agrega ve çimento ile birlikte karıştırılarak karışımın plastik kıvamda olmasını sağlamaktadır. Agrega ve çimentonu karışımının içindeki su, karışım suyu olarak adlandırılmaktadır. Karışım suyu agrega ve çimento yüzeyinin ıslak kalmasını sağlayarak işlenebilirliği artırmakta ve beton karışımı içindeki bileşenlerin ayrışmasını engelleyerek kolay bir şekilde yerleştirilebilmesini ve sıkıştırılabilmesini sağlamaktadır (Eser 2015).

Daha önce beton üretiminde kullanılmamış olan suların pH değeri, içinde bulunan sülfat, diğer tuzlar ve yabancı maddelerin varlığı açısından analizden geçirilmesi uygun olacaktır. Litresinde çözünmüş halde en çok 15 gr ve yüzer halde 2 gr madeni tuz ve litresinde yine en çok 2 gr SO₃ bulunmalıdır. Deniz suyunun beton kullanılması dayanımını azaltıcı etkisinden dolayı karışımlarda kullanılmaması tavsiye edilmektedir (Çebi 2009).

Silis dumanı

SD ilk olarak 1947 yılında Norveç’ te çevresel kontroller sırasında fırınlardan çıkan egzoz gazlarının filtrelenmesine başlanması ile keşfedilmiştir. Bu malzemenin ana bileşeni silisyum dioksitdir (Panjehpour *et al.* 2011).

SD atık bir malzeme olmasına rağmen yüksek pozolanik özelliğe sahip olması nedeniyle diğer pozolanik malzemeler arasında zamanla en kıymetli konuma gelmiş ve beton üretiminde yan ürün olarak kullanılmaya başlanmıştır (Yılmaz ve Alemdar 2003).

SD ferro alaşımları endüstrisinin bir yan ürünüdür. Son derece ince amorf silika parçacıklarından oluşur. Betonda 80 MPa' dan daha fazla basınç dayanımına ulaşmak için her zaman kullanılmalıdır. Çimentonun SD ile değiştirilmesi betonun mukavemetini ve dayanıklılığını artırır. Bu ilginç özelliğin nedeni, mikro-dolgu etkisine ve çimento bazlı ürünlerde SD’ nin pozolanik reaksiyonuna bağlanabilir. SD partikülleri, çimento tanelerinden 100 kat daha küçüktür. SD parçacığının sigara dumanından daha küçük olduğu söylenir. Mikro dolgu etkisi, SD dumanı partiküllerinin çimento tanecikleri arasındaki boşluğa kolayca sokulduğu, böylece su için mevcut boşluğun azaldığı ve hidrasyon ürünlerinin yoğun yapıda üretildiği anlamına gelir. Pozolanik reaksiyon, SD partiküllerinin iyi kristalize edilmiş CSH jeli üretmek ve dayanıklılığı arttırmak için kimyasal olarak kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girdiği anlamına gelir (Kawai 2005).

SDnin incelik değeri çok küçük olduğundan elek analizi ile tane boyutu belirlenememektedir. SDnin tane boyutu azot absorpsiyonu analiziyle (BET) tespit edilir. BET kullanımıyla ortaya çıkan özgül yüzey 13000-30000 m² olmaktadır. Malzemenin yoğunluğu 2,2 gr/cm³, birim hacim kütlesi ise 200-250 gr/cm³ değerleri arasındadır (ACI 234R-96 2000).

Betonda çimentonun hidrasyon ürünleri ile sülfat iyonları arasında etkileşim, alçı ve etrenjit gibi zararlı reaksiyon ürünlerini meydana getirmektedir. Oluşan bu reaksiyon ürünleri beton hacminde genleşmelere çimentonun hidrasyon ürünlerinin parçalanmasına ve bağlayıcılık özelliğini kaybetmesine yol açmaktadır.

Bu reaksiyonların çoğunda C₃A içeriğinin rolü büyüktür. SD’ nin bu betonlarda genelde çimentonun yaklaşık %15’ ine kadar katılabildiğinden C₃A miktarını diğer pozolanlara oranla fazla azaltmazlar. Ancak geçirgenliği azaltması ve kalsiyum hidroksiti bağlamadaki yüksek aktivitesi nedeniyle betonda zararlı kimyasal etkilere karşı en az diğer pozolanlar kadar etki sağlamaktadırlar (ACI 363R-92 1997).

Süper akışkanlaştırıcı katkı (SAK)

Beton teknolojisinde SAK kullanımı 1960' lı yıllarda başlamış ve günümüzde betonların vazgeçilmez bileşenleri arasında yerini almıştır. SAKların kullanılması ile günümüzde su/çimento oranı çok düşük, yüksek dayanımlı ve çevresel etkilere karşı daha dayanıklı betonların üretilmesi sağlanmıştır (Erdoğan ve ark. 2017).

Akışkanlaştırıcıların en önemli özelliği su/çimento oranını azaltarak, betonun basınç dayanımı üzerinde olumlu etki göstermeleridir. SAKların beton karışımında çimento miktarı ve çökme değerlerini değiştirilmeden su/çimento oranını düşürmesi ile betonun dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. SAK kullanımının betonun basınç dayanımı ve elastisite modülünün üzerinde pozitif bir etkisi olduğu ve bunlar arasında en çok basınç dayanımı üzerinde etkin olduğu söylenebilir (Yılmaz ve Alemdar 2003).

Süper ve hiper akışkanlaştırıcıların en önemli faydalarından biri de çimento ve mineral katkıların su içinde topaklanmasını engelleyip taneleri dağıtarak, çok miktarda su ile elde edilebilen dispersiyonu çok daha az miktarda su ile betona bir yan etki vermeden sağlamalarıdır. Bu katkı maddelerinin çimento ve mineral katkı maddelerinin ağırlıklarının toplamının %0,3-0,6 oranında katılması durumunda karışım suyunun %30 oranında azalttığı görülmüştür. Ayrıca betonda ısıl çatlaklıklar oluşmadan rötre ve büzülme gibi problemlerin azaltılmasında etkilidir (Sümer ve Söyler 2002).

Yüksek Dayanımlı Betonun Özellikleri

YDBnin dayanımı genel olarak çimento hamurunun boşluklu yapısına, agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerine ve agrega-çimento hamuru geçiş bölgesi özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerden en zayıfı olan agrega-çimento hamuru geçiş bölgesi, agregaların maksimum tane çapı küçültülerek ve s/ç oranının düşürülmesiyle bir noktaya kadar iyileştirilebilmektedir. Bu sınırları aşmak için betonun yapısında var olan kolay kırılma özelliği gösteren Ca(OH)_2 kristallerinin oluşmasını engellemek gerekmektedir. Ca(OH)_2 kristallerinin oluşumunun engellenmesi betona puzolanların katılması ile mümkündür. Bu iki yaklaşım YDB bileşiminin esaslarını oluşturmaktadır (Sümer ve Söyler 2002).

Poisson oranı

YDB' lerin poisson oranlarını belirlemeye yönelik deneysel çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bazı araştırmacılar bu oranın normal betonda olduğu gibi 0,20 alınabileceğini savunurken diğerleri daha yüksek değerleri önermişlerdir (Uğur 2007).

YDBlerin poisson oranları ile ilgili Perenchio and Khieger (1978) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada basınç dayanımları 55 MPa ile 80 MPa arasında değişen YDBlerin poisson oranlarının 0,2 ile 0,28 değerleri arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Kaplan (1959) tarafından yapılan çalışmada basınç dayanımları 17 Mpa ile 79 Mpa arasında değişen betonların poisson oranı değerlerinin iri agrega türünden, dayanım sınıfından ve numune sınıfından bağımsız olarak 0,23 ile 0,32 arasında değiştiği belirlenmiştir (ACI 363R-92 1997)

Yapılan bu çalışmalarla YDBlerin poisson oranı değerinin yaklaşık olarak normal dayanımlı betonlar için belirlenen sınır değerler içerisinde kaldığı dolayısıyla beton basınç dayanımının poisson oranı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı düşünülebilir (Dallı 2017)

Elastisite modülü

Elastisite modülü betonun en önemli mekanik özelliklerinden biridir. Elastisite modülü, bir malzemenin oransal sınırının altında gerilme veya basma gerilmeleri için normal gerilime karşılık gelen gerilme oranı olarak tanımlanır. Betonarme yapıların yapısal performansını etkileyen önemli bir faktördür ve yüksek binaların deformasyonunu tahmin etmede bir tasarım parametresi olarak özellikle önemlidir.

Betonun esneklik modülü büyük ölçüde kaba agreganın özelliklerine tabidir. Kaba agregaların büyüklüğünü arttırmak veya daha yüksek esneklik katsayısına sahip sert kaba agregalar kullanmak, betonun esneklik modülünü artırır (Caldarone 2008).

Basınç dayanımında meydana gelen artışın elastisite modülünde de artış meydana getirdiği gözlemi haricinde, basınç mukavemetiyle elastisite modülü arasındaki matematiksel ilişki henüz kabul edilmemiştir (Uğur 2007).

YDBlerin elastisite modüllerinin yönetmeliklerde verilen formüller ile sağlıklı bir şekilde hesaplanamayacağı bir çok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar sonucunda kanıtlanmıştır. ACI 318-89 denklemi YDBler için geliştirilmediğinden dolayı elastisite modülünü gerçek değerinden çok daha büyük çıkarmaktadır. (Çebi 2009).

Yapılan çalışmalar sonucunda yapı kodları ve araştırmacılar tarafından elastisite modülünün tayini için önerilen denklemler Tablo 2' de görülmektedir (Üzümeri ve Özden 1991).

Tablo 2. Elastisite Modülü Denklemleri

ACI 318-89	$E_c = 0.043 \rho^{1.5} \sqrt{f_c}$
ACI Committee 363	$E_c = 3320\sqrt{f_c} + 6900$
Ahmad <i>et al.</i>	$E_c = (1/29510)\rho^{2.5}(\sqrt{f_c})^{65}$
FIP/CEB	$E_c = 104 (f_{ck}+8)^{1/3}$
Shah <i>et al.</i>	$E_c = (1/28)\rho^{1.5}\sqrt{f_c}$
Norwegian Code	$E_c = 9500(f_{cc})^{0.3}(\rho/2400)$

Rötre (Büzülme)

Betonda bir yük uygulanmadan bile ortamın sıcaklık ve rutubetine bağlı olarak deformasyonlar görülebilmektedir. Betonun taze haldeyken bünyesindeki suyun ortamdaki rutubetin etkisiyle buharlaşma yoluyla kaybolması betonda büzülmeye yol açar (Serinoğlu 2011).

YDBlerin büzülme özelliği hakkında yapılan pek çok çalışma bulunmaktadır. Aitcin 64 Mpa, 90 Mpa ve 100 MPa basınç dayanıma sahip 3 farklı YDB grubu üzerinde yapmış olduğu çalışmada başlangıçtaki büzülme oranının YDBler için daha fazla olduğunu gözlemlemiştir. 91 günün sonunda, 3 farklı beton grubunun büzölmelerinde büyük bir farkın olmadığını tespit etmiştir.

Süneklik

YDBler normal dayanımlı betonlara oranla daha fazla gevrek bir davranış göstermektedirler. Gevrek davranış betonda istenilen bir davranış biçimi değildir. Özellikle deprem etkisi altındaki yapı elemanlarının gevrek bir davranış sergilemesi tersinir ve tekrarlayan yükler altında çok önemli olan süneklik ve enerji tüketimini olumsuz yönde etkilemektedir (Ersoy ve Tankut 1991).

Dayanıklılık

SD ve SAKların ilavesiyle üretilen YDBlerde çok yoğun bir mikro yapı elde edilmektedir. Bu sayede çok yüksek basınç dayanımına sahip iç ve dış etkenlere karşı dayanımlı betonlar elde etmek mümkün olmuştur. Yoğun mikro yapı sayesinde daha geçirimsiz bir beton üretilmekte ve zararlı kimyasalların betonun içerisine sızmasına fiziksel olarak engel olmaktadır. Puzolanik etkinlik sayesinde puzolanların $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girmesi sonucu zararlı kimyasal reaksiyonların önlenmesi sağlanmıştır.

Yüksek Dayanımlı Betonun Ülkemizdeki Uygulamaları

Gelişmekte olan ülkeler arasında olan ülkemizde YDBlere olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Hızla artan yapılaşma ile beraber arsa maliyetlerindeki artış nedeniyle yeni yapılacak binalarda kullanılabilir alanı yüksek seviyede tutmak önem arz etmektedir. YDBlerin kullanımının artmasıyla taşıyıcı elamanların boyutlarının küçülmesi ve sayılarının azalması hem ekonomi sağlanmakta hem de yapılar içindeki kullanım alanlarının artmasını sağlamıştır. Ülkemizde YDBnin tasarımı ile ilgili olarak belirli standartların olmaması YDBlerin kullanımının sınırlı seviyede kalmasına neden olmuştur. Ülkemizde YDB ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Ancak bu çalışmalar tasarımı ile ilgili olarak standartların geliştirilmesi ve inşaat sektöründe yapım ve tasarım çalışmalarında kullanılması için henüz yeterli seviyelere ulaşmamıştır (Yılmaz ve Mertol 2011).

Ülkemizde artan nüfus, şehirlerin büyümesi ve sanayileşme hızının artması ile kimyasal çevre koşullarına daha dayanımlı ve daha uzun ömürlü binaların üretilmesi YDBlerin kullanılması ile mümkün olmaktadır (Yılmaz ve Mertol 2011).

Amerika'daki Trump Tower, Çin' deki Central Plaza, Tayvanda' ki Taipei 101 gibi dünyanın en yüksek ve en dayanımlı yapılarında kullanılan, C80 sınıfı YDB ülkemizde ilk kez Spine Tower projesinde kullanılmıştır.

Ülkemizde YDBlerin üretimi 1980' li yıllarda başladığı bilinmektedir. Bu dönemde Devlet Su İşleri, İstanbul Su Kanalizasyon İdaresi, Karayolları gibi kurumlara ait betonarme projelerde C40 ve C45 beton sınıfı tercih edilmiştir. Bu betonları STFA İnş. A.Ş. tarafından üretilmiştir. Firmanın yaptığı Tohma müşterek demiryolu-karayolu köprüsü, İski kuzey ve güney Haliç kollektörü ve Galata Köprüsü yapımında kullanılan betonların basınç dayanımının 35 ile 50 MPa arasında değiştiği bilinmektedir. Yeni Galata Köprüsü yapımında projesinde C35 sınıfı beton yer almasına karşın zamandan tasarruf sağlamak amacıyla uygulamada C45 beton sınıfı kullanılmıştır (Eser 2015).

Karayolları Genel Müdürlüğü' nün denetiminde gerçekleştirilen Gerede-Ankara Otoyolu projesinde C45 sınıfı beton kullanılmıştır. 1989-1991 yılları arasında Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2283 adet numune alınmıştır. Alınan numuneler ait özellikler aşağıdaki tabloda yer almaktadır (Eser 2015).

Tablo 3. Gerede-Ankara Otoyolu Projesi' nde Kullanılan Betona ait Özellikler

Numune Sayısı	Su/Çimento	Ortalama Dayanım	Çökme
2283	0,45	66,6 MPa	<180mm

YDBlerin ülkemizde kullanıldığı bir başka yapı da barajlardır. Atatürk Barajında yüksek su hızına maruz kalan yapılarda aşınmayı önlemek amacıyla nispeten YDB kullanılmıştır (Eser 2015).

Yüksek Dayanımlı Betonun Dünyada Uygulamaları

Dünyada kullanımı gittikçe artmakta olan YDB'lerden yapılan yapılarla ilgili örnek projeler Tablo 4'de gösterilmektedir.

Tablo 4. Dünyada YDBnin Kullanıldığı Bazı Projeler (Engin 2015)

Bina Adı	Şehir	Toplam Kat Adedi	Yapıldığı Yıl	Beton Basınç Dayanımı (MPa)
Helmsley Palace Hotel	New York	53	1978	55
City Center Project	Minneapolis	52	1981	55
Bank of China Tower	Hong Kong	70	1989	60
Jin Mao	Shanghai	88	1997	60
SEG Plaza	Shenzhen	75	1998	60
Baiyoke Tower	Bangkok	90	1996	80
e-Tower	Sao Paulo	42	2002	80
311 S. Wacker Drive	Chicago	70	1988	83
Trump World Tower	New York	90	2000	83
505 5th Avenue	New York	30	2004	83
Bay Adelaide Center	Toronto	57	1991	85
111 George Street	Brisbane	27	1993	100
Herriot's	Frankfurt	18	2002	125
Brillia Tower	Tokyo	45	2004	130

Avustralya'nın Melbourne şehrinde bulunan Eureka Kulesi, 91 katlı olarak ve tamamen yüksek mukavemetli betonla inşa edilmiştir. Merkezi göbek, çevre kolonları, perde duvarları, 30 cm kalınlığında sürekli çıkıntı ile tasarlanmıştır. Yapı malzemesi olarak yüksek mukavemetli betonun seçilmesi yapı elemanlarının kesitlerini azaltmış ve kat planlarında kiralabilir alanı artırmıştır (Kovacevic and Dzidic 2018).

Dünyanın en uzun otel ve en yüksek yüksek mukavemetli beton binası olarak rekor kırma arzusuyla tasarlanan 90 katlı Bangkok, Tayland' daki Baiyoke-2 Kulesi, yüksek mukavemetli betonla inşa edildi ve Tayland' da o güne kadar görülen beton teknolojisinde dönüm noktası oldu. Beton kolonlar, beton merkezi çekirdekler ve döşemeler, 65 kat boyunca 60 MPa basınç dayanımlı yüksek mukavemetli betondan yapılmıştır. Son 25 kat, 50 MPa'lık basınç dayanımı ile betondan inşa edilmiştir (Kovacevic and Dzidic 2018).

Almanya, 1992'de Frankfurt' ta inşaa edilen Trianon 186 metre yüksekliğe sahiptir. Bu yüksek katlı bina, 47 katlı ve 4 kat zemin katın altındadır. Yüksek mukavemetli beton sadece 54 cm genişliğindeki perde duvarlarda ve dört ana kolon için B85 sınıfında kullanılmıştır. Yapının geri kalanı BS 45 betonu ile yapılmıştır. Yüksek mukavemetli betonun kullanımı, yapı elemanların azaltılmış boyutları ve takviyeli çeliğin daha fazla kullanımını azaltmasından dolayı çok ekonomik olduğunu kanıtlanmıştır. Trianon binası için beton karışımı uçucu kül, süper plastikleştirici ve priz geciktiriciler içeriyordu. Basınç dayanımı testleri için alınan beton küp numunelerinden, 56 gün sonra B85'in ortalama basınç dayanımının 112 MPa olduğunu göstermiştir. (Kovacevic and Dzidic 2018).

Betonun Dayanıklılığı ve Bozulma Mekanizmaları

Değişik bir çok yapı türünde kullanılmakta olan beton hizmet süresi boyunca bünyesinde bozulmalara, yıpranmalara ve hasarlara yol açabilecek fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kalabilir (Ustabaş 2008).

Fiziksel ve kimyasal etkilerin betonda meydana getirdikleri hasarların temelinde su ve beton bünyesinde bulunan boşluklar ile çatlaklar arasındaki taşınım etkilidir. Gazların, suyun ve zararlı maddelerin betonun içerisine taşınması ve taşınan maddelerin beton ile olan etkileşimi bozulma sürecinin gelişimi açısından oldukça önemlidir. (Ustabaş 2008).

Taşınmanın hızı, boyutu, etkisi betonda yer alan boşlukların ve çatlakların çapına ve dağılımına bağlıdır. Bu nedenle betonun içinde yer alan boşluk yapısının ve betonun bünyesinin iyi analiz edilerek tanınması gerekmektedir. Beton içinde yer alan boşluklar agregalar arasında yer alan boşluklar ve çimento hamurunda bulunan boşluklar olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Beton üretiminde kullanılan agregaların arasında yer alan boşlukların uygun bir granülometri kullanılarak en aza indirilmesi mümkündür. Agregataneleri çimento hamuru ile kaplanmış olduklarından beton bünyesinde yer alan boşlukların çoğu çimento hamurunda yer almaktadır. (Ustabaş 2008).

Çimento hamurunda ve betonda yer alan boşluklar genelde beton üretiminde yapılan hatalar, betonun yeterinde sıkıştırılamaması, kür şartlarının yetersizliği gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır (Baradan ve ark. 2010).

Betonda fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkenlerden dolayı bozulmalar meydana gelmektedir.

Betonda meydana gelen zararlı kimyasal reaksiyonlar betonun fiziksel görünümünün ve renginin değişmesi, yumuşaması, parçalanması, dağılması ve bütünlüğünü kaybederek dayanımını kaybetmesi şeklinde etkilerini göstermektedir.

Betonun kimyasal nedenlerle bozulmasında dış ortamlardan gelen zararlı maddelerin beton bünyesinde yer alan çatlaklardan sızması, suyun varlığı ve boşluklu yapı nedeniyle betonun içine taşınması sonucu çimentonun hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girmesi veya beton üretiminde beton içerisinde bulunan agrega, su ve çimentoda bulunan maddelerin uygun koşullarda reaksiyona girmesi sonucu meydana gelmektedir (Ustabaş 2008).

Kimyasal reaksiyonların oluşumunda çoğunlukla zararlı maddelerin dış ortamdan betonun içine taşınması etkilidir. Betonun çatlaklı bir yapıda olması, boşluk içermesi ve suyun varlığı zararlı kimyasal reaksiyonların başlaması ve devamı için gereklidir. Madde transferinin kesilmesi durumunda zararlı reaksiyonlar gerçekleşmez. (Baradan ve ark. 2010).

Betonun kimyasal nedenlerle bozulmasının başlıca nedenleri sertleşmiş çimento bileşenlerinin hidrolizi ve yıkanması, İyon değiştirme reaksiyonları (asit saldırıları, magnezyum iyonu içeren çözeltilerin kimyasal saldırıları), genleşen ürünlerin oluşturduğu reaksiyonlar (sülfat saldırıları, gecikmiş etrenjit oluşumu, tomasit oluşumu, alkali reaksiyonları), kalsiyum ve magnezyum oksitin gecikmiş hidrasyonu şeklinde sıralanabilir. (Baradan ve ark. 2010).

Sülfat Saldırıları

Betonun kimyasal nedenlerden dolayı bozulmasının nedenlerinden biri de sülfat saldırılarıdır. Sülfat saldırıları kimyasal reaksiyonlar sonucunda genleşen ürünlerin oluşumuna yol açmakta ve betonun servis ömrünü azaltmaktadır (Ustabaş 2008).

Sülfat saldırıları iç kaynaklı ve dış kaynaklı olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir.

İç kaynaklı sülfat saldırılarında beton üretiminde kullanılan agrega, çimento, su ve katkılardan gelen sülfat iyonlarının sertleşmiş betonda uygun ortam koşullarında yeni ürünler meydana getirmesi sonucu oluşmaktadır (Ustabaş 2008).

Dış kaynaklı sülfat saldırıları sertleşmiş betona dış kaynaklardan gelen sülfat iyonlarının çimentonun hidrasyon ürünleri ile girmiş oldukları reaksiyonlar sonucu meydana gelmektedir. Dış kaynaklı sülfat saldırıları kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelen kimyasal bozulmalara betonun görünümünün değişmesi, çatlamlar, dağılmalar, betonun bütünlüğünün bozulması gibi fiziksel bozulmalar da eşlik eder (Ustabaş 2008).

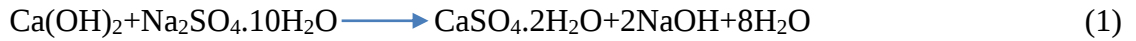
Sülfat saldırıları sonucu betonda oluşan zararlı reaksiyonlar

Sülfatların betonların hidrate çimento bileşenleri (CH ve CSH) ve $(Ca(OH)_2 + C_3AH)$ ve C_3A ile reaksiyona girmemiş C_3A ile etkileşimleri sonucunda oluşan ürünler alçıtaşı ve kalsiyum sülfat aliminattır. Bu ürünler yerlerini aldıkları bileşenlerden daha fazla hacim işgal

etmelerinden dolayı oluşan genleşme sonucu betonda hasarlar meydana getirmektedirler (Baradan ve ark. 2010).

Sülfat etkisi sonucu betonun yüzeyinde beyaz lekeler oluşmaya başlar ve ilerleyen dönemlerde betonun yüzeyinde çatlamlar ve dökülmeler gibi hasarlar oluşmaktadır. İleri düzeyde sülfat hasarlarında betonun kırıldığı, yumuşadığı, bütünlüğünü kaybederek dağılmaya başladığı ve dayanımını kaybettiği görülür (Baradan ve ark. 2010).

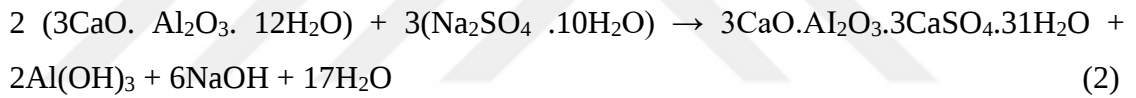
Sodyum sülfatın $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile yapmış olduğu reaksiyon sonucu (Denklem 1) oluşan ürün alçıtaşıdır.



Oluşan reaksiyon sonucu %124 hacim artışı meydana gelmektedir. Suyun sürekli yıkaması sonucu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tamamen bünyeden uzaklaşması sonucu NaOH oluşumuyla reaksiyon dengeye ulaşınca yalnızca SO_3 ' ün bir kısmı alçıtaşına dönüşür.

Sodyum sülfatın C_3A ile yaptığı reaksiyon sonucu etrenjit oluşumu meydana gelmektedir. Reaksiyonlar sonucunda %227 gibi büyük bir hacim artışı meydana gelmektedir.

C_3A ' nın sodyum sülfatla yaptığı reaksiyon ise Denklem 2' deki gibidir:



Kalsiyum sülfat ise yalnızca C_3A ile reaksiyona girer ve Kalsiyum sülfat alüminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) oluşturur.

Sülfat saldırıları sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonların gelişimini etkileyen parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Etkilenme koşulları (Sülfat içeriği, ortam koşulları)
- Betonun geçirimliliği
- Çimentonun kimyasal yapısı
- Suyun varlığı

Sülfat saldırıları sonucu meydana gelen zararlı reaksiyonların devam edebilmesi sülfat varlığına ve ortam koşullarının uygunluğuna bağlıdır. Sülfat iyonlarının beton içerisine taşınması yavaşlaması veya durması durumunda reaksiyonlarda yavaşlar ve durur.

Betonun sülfat etkisine karşı dayanımı betonun geçirimliliğine bağlıdır. Betonun geçirimli bir yapıya sahip olmasında, yapımında kullanılan malzemeler, karışım oranları, yapısında bulunan çatlaklar, boşluklar, üretiminde yapılan yanlışlıklar, uygun kür ortamının sağlanmaması gibi etkenler etkilidir (Baradan ve ark. 2010).

Çimentonun kimyasal yapısında bulunan C_3A miktarı betonun sülfata karşı dayanıklılığında önemli bir parametredir. Bir çok yabancı standartta çimento içinde bulunan C_3A miktarına sınırlandırma getirmektedir. ASTM standartlarında çimentodaki C_3A mikarı %8 ve altında ise sülfata orta derecede dayanımlı % 5 ve altında ise sülfata yüksek derecede dayanımlı olarak tanımlanmaktadır (Baradan ve ark. 2010).

Ayrıca beton karışımında kullanılan puzolanların $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek bağlanması betonun sülfata karşı dayanımını artıran bir unsurdur.

Reaksiyonun devam edebilmesi suyun varlığına bağlıdır. Reaksiyonun oluşması ve sülfat iyonlarının dış ortamdan betonun içine taşınması için su gereklidir. Beton karışım suyu olarak kullanılacak suyun iyi analiz edilmesi ve içerisinde zararlı maddeler bulunan suların kullanılmaması gerekmektedir. Sülfat içeren zeminlerle temasta bulunan suların kullanılmadan önce içeriğinde sülfat varlığı araştırılmalıdır (Baradan ve ark. 2010).

Sülfat etkisine karşı alınacak önlemler

Betonun sülfat saldırılarına karşı dayanımını artırmak için alınacak önlemler betonun geçirimsizliğinin sağlanması, çimentodaki C_3A ve $Ca(OH)_2$ miktarının sınırlandırılması, puzolanik katkı malzemelerinin kullanılması ve gerektiğinde betonun dıştan sülfata karşı izole edilmesi olarak sıralanabilir.

Betonun geçirimli olmasında üretim kaynaklı hatalar, betonun sıkıştırılamaması, kürünün tam yapılmaması vb. etmenler başta gelmektedir. Bu durum betonun sülfata karşı dayanımını da etkilemektedir. Sürekli sülfat saldırılarına maruz kalan betonun yapısında meydana gelen çatlamlar, dökülmeler gibi fiziksel değişimlerden dolayı reaksiyonların gelişimi hızlanmakta ve dış etkilere daha açık duruma gelmektedir (Baradan ve ark. 2010).

Çimentonun C_3A içeriğide sülfata karşı dayanıklılığı etkileyen parametrelerden biridir. Bir çok standartta çimentonun C_3A içeriği sınırlandırılarak iç kaynaklı sülfat saldırılarının engellenmesi amaçlanmaktadır.

Şiddetli sülfat etkisine maruz betonlarda çimento içeriğindeki C_3A miktarının azaltılması tek başına yetersiz bir önlem olarak kalmaktadır. Bu gibi durumlarda beton karışımlarında sülfata dayanımlı çimentoların ve puzolanların katılması büyük fayda sağlayacaktır. Puzolanların çimento hidratasyon ürünlerinden $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek bağlanması sonucu, zararlı sülfat reaksiyonlarının gelişimi engellenir (Baradan ve ark. 2010).

Çok şiddetli sülfat etkisi durumunda bütün bu önlemlerin yanında yapıyı dıştan sülfata dayanıklı malzemelerle kaplayıp betonun sülfat iyonları içeren zeminlerle ve sularla temasının engellenmesi sağlanabilir (Baradan ve ark. 2010).

Sülfata dayanıklılık deneyleri

Sülfata dayanıklılık deneylerinde deney numuneleri sodyum sülfat, magnezyum sülfat ya da her ikisinin karışımından oluşan çözeltilerde bekletilir. Deney sonuçları, beton numunelerin basınç dayanımlarındaki ve ağırlıklarındaki değişimlerin ölçülmesi ile sülfat etkisi altındaki hasarın şiddeti hakkında bilgi vermektedir.

ASTM C1012/ C1012M-18b sülfat çözeltisi içerisindeki harç çubuğu örneklerinin uzunluk değişimlerinin belirlenmesi için kullanılan standart bir test yöntemidir. Harç örneklerinin dayanımının 20 MPa ulaşmasından sonra sülfat çözeltilerine konulması ve boy değişimlerinin ölçülmesi esasına dayanır.

ASTM C452-21 standardına göre alçı katılarak hazırlanmış harç çubuğu örneklerinin 14 gün sonra meydana getirdiği genleşmelerin tespiti esasına dayanır. Karışımda kullanılacak alçı miktarı çimentonun ve alçının SO_3 içeriği dikkate alınarak %7 SO_3 içerecek şekilde ayarlanır.

ASTM C1038/C1038M-19 standardına göre suda saklanan harç çubuğu örneklerinin genleşme miktarı tespit edilir. 14 gün boyunca yapılan ölçümler sonucunda kritik genleşme değerlerinin %0,02' nin altında olması istenmektedir (Baradan ve ark. 2010).

Betonda Sülfat Etkisi ile İlgili Çalışmalar

Shannag and Shaia (2003) Yüksek Performanslı Betonun Sülfat Dayanımı konulu çalışmalarında çeşitli oranlarda puzolan ve SD içeren (%15) ve karşılaştırma yapmak amacıyla puzolan ve SD içermeyen yüksek performanslı beton numunelerini Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ sülfat çözeltisinde, Ölüdeniz ve Kızıldeniz'den alınan deniz suyunda 1 yıl bekletilmiştir. Numuneler üzerinde görsel incelemeler yapılmış basınç dayanımındaki değişimler izlenmiştir. Çalışma sonucunda puzolan ve SD içeren numuneler, katkı içermeyen numunelere göre sülfat saldırılarına karşı maksimum koruma göstermiştir. SD ve puzolanların betonların mukavemet ve dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Portland çimentosu kullanılarak yapılan numunelerin sülfat çözeltilerinde ve deniz suyunda basınç dayanımlarındaki kayıplar ve fiziksel bzulmalar nedeniyle sülfat saldırılarına karşı düşük performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Tosun ve ark. (2008) çalışmalarında, değişik oranlarda kalker tozu katkılı çimentolarla ile üretilen harç örneklerinin 5°C ve 20°C sülfat çözeltisinde bekletilerek sülfat etkisi altında

basınç dayanımı, boy değişimi ve iç yapılarındaki değişimler araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda, hasarların etrenjit kristallerinden kaynaklandığı görülmüştür. 5°C sülfat çözeltisinde kalker tozu oranı en yüksek numuneler kayda değer oranda zarar görmüştür. Kalker oranının artması, tüm örneklerde sülfat etkisinin şiddetini artırmıştır. Çalışma sonunda soğuk ve sülfatlı ortamlarda inşaa edilecek yapılarda çimentoya katılacak kalker tozu oranının %10 ile sınırlandırılması gerektiği tespit edilmiştir.

Yıldız ve Ürün (2010) çalışmalarında jips içerikli ve yeraltı suyunda bolca sülfat bulunan kil zeminler üzerine inşaa edilen çok katlı yapılarda taban basıncına bağlı olarak kil zeminin zayıf taşıma gücünden dolayı yapı yüklerinin kazıklı temeller vasıtasıyla zemine aktarıldığı ve yeraltı su seviyesinin yüksek olması nedeniyle kazıklı temellerin betonu yüksek sülfat içeren su ile temas halinde olmakta olan bu su içerisinde dökülerek prizini sülfat içeren bu su içerisinde aldığı belirtilmektedir. Çalışmada bu şekilde bir ortamda portland çimentosu ve yüksek fırın cürufu çimentodan oluşturulan numunelerde önemli basınç dayanımı kayıpları tespit edilmiştir.

Esmailzadeh (2013) yüksek lisans tezinde, mineral katkı malzemesi ilave edilerek üretilen pomzalı hafif betonların %5 ve %10 sülfat oranlarındaki çözeltide bekletilerek fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Değişik oranlarda SD ve UÇ ilaveli beton numuneleri üretilmiş ve sülfat çözeltisinde 120 gün süre ile bekletilen numunelerin basınç dayanımı, ultra ses geçiş süresi, birim ağırlık ve kılcal su emme özellikleri araştırılmıştır. Deneyler sonucunda standart küre maruz betonlarda en yüksek basınç dayanımına %15 SD ilaveli betonların, sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde başlangıçta tüm numunelerin basınç dayanımlarının yakın olduğu 120 gün süre sonunda %15 SD içeren numunelerin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Mineral katkıların hafif betonların sülfat ortamındaki performansını artırdığı kaydedilmiştir.

Arslan (2014) çalışmasında sülfat etkisine maruz kalmış harçlarda meydana gelen hasarlar ve iç yapısındaki değişimler incelenmiştir. Mikro silika, nano silika, UÇ, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların sülfat etkisine maruz kalan harçların durabilite özelliklerini ne yönde etkilediği araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca doğal sülfat içeriği yüksek ve ihmal edilebilir seviyede olan kumlarla üretilen harçların iç sülfat etkisi nedeniyle oluşabilecek durabilite problemleri incelenmiştir. Numunelerin 36 ay boyunca periyodik olarak boy ölçümleri yapılmış ve mineral katkı kullanımının dış sülfat etkisini ne derecede kısıtladığı belirlenmiştir. Deney sonucunda mineral katkı kullanımının kullanım oranına bağlı olarak sülfat etkisi altında mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirici etkisinin olduğu görülmüştür. Ayrıca iç sülfat etkisini

belirlemek amacıyla yapılan XRD (X-Ray Diffraction) deneyleriyle gözlemlenen hasarın nedeninin alçı taşı kristallerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Merida ve Kharchi (2015) çalışmalarında volkanik kökenli doğal puzolan ve portland çimentosu içeren betonların sülfat etkisi altındaki fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada doğal puzolan içeren ve içermeyen karışımlardan hazırlanan numuneler sülfat çözeltisinde ve su küründe bekletilmiş, basınç dayanımı ve boyca uzama deneylerine tabi tutulmuşlardır. Yapılan çalışma sonucunda puzolan kullanımının betonun basınç dayanımını artırdığı ve sülfat direncine olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Mineral katkı maddesi kullanımının, betonun doğal puzolan içermeyen örneklerle göre fiziksel özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Saleh (2017) çalışmasında, iç ve dış sülfat saldırılarının normal ve yüksek performanslı betondaki etkilerini incelenmiştir. Çalışmada sülfata dayanıklı çimento, normal portland çimentosu ve SD kullanılmıştır. İç sülfat etkisini belirlemek amacıyla (standart $SO_3 = \% 0.2$ ve standart olmayan $SO_3 = \% 1.13$) iki tip ince agrega kullanılmıştır. Dış sülfat etkisini belirlemek amacıyla da yüksek oranda sülfat içeren yeraltı suyu kullanılmıştır. Çimento tipi, su/çimento oranı, SD içeriği, ince agrega tipi farklı 12 adet beton karışımı hazırlanmış ve 360 adet küp şeklinde beton numunesi dökülmüştür. Numunelerin yarısı sülfat içeren yeraltı suyunda, diğer yarısı da musluk suyunda 360 gün süreyle bekletilmiştir. Numunelerin iç ve dış sülfat etkisinde meydana gelen hasarın görsel olarak incelenmesi ve basınç dayanımı kayıplarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda musluk suyunda bekletilen numunelerin basınç dayanımlarının 360 gün boyunca arttığı, sülfat konsantrasyonu yüksek yeraltı suyunda bekletilen örneklerde sülfat hasarının ihmal edilebilir seviyede olduğu, numunelerin yüzeylerinde beyaz lekelerin olduğu gözlemlenmiştir. Dış sülfat saldırılarına karşı sülfata dayanıklı çimento, standart dışı ince agrega ve su/çimento oranı en düşük karışımda maksimum basınç dayanımı kaybı ve normal Portland çimentosu kullanılan, w / c oranı en yüksek ve silika dumanı ikameli karışımlarda minimum basınç dayanımı kaybı elde edilmiştir.

Bingöl ve Balaneji (2019) çalışmalarında çimento yerine %10,%20 ve %30 oranlarında yüksek fırın cürufu ve zeolit ikame edilerek mineral katkıların betonların sülfat saldırılarına karşı direncinde etkileri incelenmiştir. Tüm örneklerde slump, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Ayrıca tüm numuneler 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra %10 derişimde sülfat çözeltisinde 90 ve 180 gün boyunca bekletilmiş ve sülfat testleri de yapılmıştır. Tüm gruplarda CEM I çimento türü , toplam bağlayıcı miktarı (400 kg/m³), sülfat miktarı (100 g/l), agrega türü ve gradasyonu sabit tutulmuştur. Çalışma sonucunda numunelerin kuru birim ağırları, mineral katkı yüzdesi ve çözeltiye maruz kalma

süresi arttıkça azalmaktadır. En yüksek kuru birim hacim ağırlığa kontrol numunelerinde en düşük kuru birim hacim ağırlığa ise %30 zeolit içeren örneklerde ulaşılmıştır. Yüksek fırın cürufu katkılı örnekler her grupta kontrol numunelerine göre daha yüksek dayanım göstermiştir. Sülfat etkisinde %10 YFC içeren örnekler kontrol gruplarına göre 180. Günün sonunda %61,34 oranında daha yüksek dayanım göstermiştir. %30 oranına kadar YFC kullanımının basınç dayanımında olumlu etkiler oluşturduğu tespit edilmiştir. Zeolit katkılı örnekler kontrol numunelerine göre %10 ve %20 zeolit içeren örneklerde basınç dayanımında artışlar görülmesine karşın %30 zeolit içeren örneklerde basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Zeolit'in hem sülfata karşı dirençte hem de dayanımı açısından ideal kullanım oranının %10 olduğu görülmüştür.

Lv et.al.(2022) çalışmalarında atmosferik sıcaklıkta çimento harcının dış sülfat saldırısına karşı uzun süreli direncinde uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve SD dahil olmak üzere mineral katkı malzemelerinin etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan örneklerde normal portland çimentosu (42.5) ve sülfata dayanıklı portlant çimentosu (42.5) kullanılmıştır. Çimento harçları 20 °C sıcaklıkta su küründe ve %5 sodyum sülfat çözeltisine 36 ay süreyle bekletilmiştir. Sülfat iyonları ile kimyasal reaksiyona giren çimentonun hidratasyon ürünlerinin miktarı ve gözenek özellikleri sülfat direncini etkileyen iki kritik faktör olduğunu göstermiştir. Gözenek özellikleri, uzun vadeli sülfat direncini etkilemede çimentonun hidratasyon ürünlerinin miktarından daha bütünleyici rol oynadı. Uçucu kül içeren örnekler 36 ay boyunca sülfat etkisine maruz kaldıktan sonra mükemmel derecede sülfat direncini korumuştur. SD, uçucu külden daha yüksek sülfat direnci sergilemiştir. Çünkü portlanditin pozolanik reaksiyonla uzaklaştırılmasından ziyade, çimento harcındaki boşlukları azaltarak sülfat saldırılarına karşı daha dayanımlı hale getirmiştir. Aksine, granüle yüksek fırın cürufunun eklenmesi ile toplam boşluk oranı ve yüzdesinde büyük değişiklikler meydana geldiğinden en kötü sülfat direncini sergilemiştir.

Gouda et.al. (2022) “Sülfat Saldırısının Geopolimer Betonun Basınç Dayanımına Etkisi” konulu çalışmalarında düşük kalsiyum uçucu kül bazlı beton ile Geopolimer betonun basınç dayanımı üzerindeki sülfat saldırısının etkisini, benzer maruziyete sahip sıradan Portland çimentolu betona kıyasla değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu sonuca ulaşmak için, Geopolimer Beton (GPC) ve sıradan Portland Çimentolu Beton (OPC) karışımlarının basınç dayanımlarını karşılaştırmak için 100x100x100 boyutunda kübik numuneler dökülmüştür. Numuneler kürlendikten sonra 90 gün boyunca litre başına 100 gr konsantrasyonda magnezyum sülfat çözeltisine daldırıldı. GPC üç gün boyunca 60°C'de bir buharlayıcıda kürlendi ve OPC betonu 28 gün boyunca suda kürlendi. GPC için basınç dayanımlarının test sonuçları 28. gün

38,2 MPa, 56. Gün 45 MPa ve 90. günde 53 MPa ve OPC için 28. gün 42,5 MPa, 56. Gün 48 MPa ve 90. günde 49 MPa dır. Bu değerler, sülfat saldırısına direnmede GPC performansı için önemli başarıyı doğrulamaktadır.

Ambrose et. al (2023) İnce Agregada Olarak Geri Dönüştürülmüş Seramik Karoları İçeren Katkılı Betonun Basınç Dayanımı ve Sodyum Sülfat Saldırısına Karşı Direnci konulu çalışmalarında ince agrega olarak geri dönüştürülmüş seramik karolar (GDSK) içeren betonun basınç dayanımı ve sodyum sülfat saldırısına direnci incelenmiştir. GDSKlar dört seviyede (%0, %33, %66, %100) nehir kumuna ilave olarak kullanılmıştır. Sülfat dayanım testleri için numuneler 28 gün su küründe bekletildikten sonra 180 gün %5'lik Na₂SO₄ çözeltisine bekletilmiş ve fiziksel görünümündeki değişiklikler, kütle değişikliği ve basınç dayanımı kaybı açısından izlenmiştir. Deneysel sonuçlardan, GDSKlar ile nehir kumuna kıyasla daha hafif beton üretebildiği bulunmuştur. Sonuçlar, GDSKların beton karışımındaki oranının artmasıyla sıkıştırma mukavemetinde artış olduğunu gözlemlenmiştir. Sülfat saldırısına karşı direnç konusunda, sodyum sülfat, GDSKları içeren betonda fazla üretilen C-S-H bağını etkilememektedir. Ancak bunun yerine hem GDSKlar hem de kontrol numuneleri için eşit miktarlarda üretilen kalsiyum hidroksit ve kalsiyum alüminatı etkilediği görülmüştür.. Bu nedenle, GDSK, betonun sülfat etkisinden kaynaklanan dayanım kaybına karşı direncinde çok fazla doğrudan rol oynamamaktadır. Bununla birlikte, GDSK örneklerinin saldırıdan sonraki basınç dayanımının, saldırıdan önceki ilk yüksek dayanımları nedeniyle kontrol örneklerinininkinden çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu, GDSK'nın ince agregalar olarak dahil edildiğinde betonun özelliklerini iyileştirebileceğini göstermektedir.

Yüksek Dayanımlı Betonla İlgili Çalışmalar

Ünal ve ark.(2005) tarafından hazırlana makelede agrega granülometrisinin ve kimyasal katkıların yüksek performanslı betonların özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada dört farklı agrega tane boyutundan oluşan beş farklı granülometri seçilerek 10 farklı seri beton numunesi üretilmiştir. Çalışma sonunda yapılan beton deneyleri sonucunda agrega granülometrisinin özellikle basınç dayanımının üzerinde etkisinin olduğu görülmüştür. Ayrıca beton karışımlarına katılan kimyasal katkıların betonun işlenebilirliğinin artırılmasında faydalı olduğu tespit edilmiştir.

Çelebi (2006) yüksek lisans tez çalışmasında silindir numuneler üzerinde farklı malzemelerle yapılan başlıkların YDB' nin basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Çimento hamuru, alçı hamuru, kükürt parafin hamuru, tamir harcı hamuru, kum ve neolit kauçuk başlık gibi beton numuneler için farklı türlerde başlıklar yapılmış ve başlıksız beton numunelerle

basınç dayanımına etkisi karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda kükürt-parafin hamurundan başlık yapılan numunelerin basınç dayanımının en yüksek olduğu görülmüştür.

Alam ve *et al.* (2012) çalışmalarında yüksek performanslı betonda sülfat etkisinin azaltılması ile ilgili devam eden tekniklerin ve stratejilerin eleştirel bir incelemesini sunmaktadır. Yapılan çalışmada sülfat saldırılarının oluşum mekanizmaları, iç ve dış sülfat etkisi sonucunda betonda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ve sonucunda betonda oluşan bozulmalarla ilgili genel değerlendirme yapılarak, yüksek performanslı betonda sülfat hasarlarının belirlenmesinde mevcut ölçüm tekniklerinin yetersiz kaldığı bildirilmektedir. Sabit Ph testinden bahsedilmekte ve sülfat konsantrasyonunun Ph'ını istenen seviyeye kadar koruyan bu testin ileriki zamanlarda kullanılmak üzere ASTM standartları ile birleştirilebileceği belirtilmektedir.

Constantinescu ve *et al.* (2015) yapmış oldukları çalışmada YDB'lerin farklı kür koşulları altında mekanik özelliklerindeki (basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı) değişimler incelenmiştir. Yapılan araştırmada incelenen yüksek mukavemetli beton, Romanya'da tedarik edilmek üzere özel bir yatırım gerektirmeyen ticari olarak temin edilebilen malzemeler kullanılarak üretilmiş ve tasarım için gerekli sertleşmiş betonun ana özelliklerini belirlemek için testler yapılmıştır. Normal çevre şartlarında ve su küründe bekletilen numunelerin belirli periyotlarda basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı değerlerini belirlemek testlere tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda su küründe bekletilen numunelerin basınç dayanımının daha yüksek olduğu, elastisite modülü değerlerinin, YDB' de kür koşullarından etkilenmediğini ve poisson oranı değerlerinin tüm beton sınıfları için tasarım standartlarında verilenlerle aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca Romanya'dan yerel malzemeler kullanılarak elde edilen YDB'nin özellikleri üzerine sunulan bu çalışma, YDB için kullanılan malzemelerin fiyatının ekonomik olarak geçerli olabileceğini göstermektedir. Bu durum YDB'nin, betonarme yapıların ihtiyaç duyduğu beton miktarını azaltmaya, başlangıç maliyetlerini ve bakım maliyetlerini düşürmeye yardımcı olmada önemli bir rol oynayabileceği anlamına gelmektedir.

Dallı (2017) yüksek lisans tez çalışmasında UÇ ve yüksek fırın cürufu katkılı YDB'lerin farklı kalıp türü ve kalıp yağı kullanılarak üretilen numunelerde basınç dayanımında meydana gelecek değişimler incelenmiştir. C35 ve C50 beton sınıfında numuneler üretilerek farklı kalıplara konulup kalıp yağı olarak da farklı malzemeler kullanılmıştır. Kalıp yağı olarak Playwood yağı kullanılan numunelerin en yüksek dayanımı verdiği C50 beton sınıfında en yüksek dayanıma çelik kalıplar ile üretilen numunelerde rastlanıldığı görülmüştür.

Birol ve Yavaş (2017) araştırma makalesinde ultra yüksek dayanımlı betonun (UYDB) betonarme kirişlerin eğilme davranışına olan etkileri incelenmiştir. 135 MPa basınç dayanımına sahip UYDB kullanılarak düşük ve yüksek donatı oranına sahip dört adet kiriş numunesi üretilmiş ve dört noktalı eğilme dayanımı testine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda UYDB ların normal betonlara oranla yüksek donatı içeren numunelerde eğilme sünekliği, rijitliği ve moment kapasiteleri bakımından büyük avantajlar sağladığı görülmüştür.

Atabey vd (2020) çalışmalarında metagabro ve kalker agregaları içeren ayrı ayrı karışımlar kullanılarak YDBler üretilmiştir. Agregat türünün betonların özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla iki farklı agrega grubu, iki farklı F sınıfı uçucu kül ve SD ile 12 karışım hazırlanmıştır. Üretilen numunelere birim ağırlık, su emme, yoğunluk, boşluk oranı, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Su/çimento oranı 0,40 ve çimento dozajı 400 kg olarak belirlenmiş olup; karışımlara %10 oranında uçucu kül ve SD ayrı ayrı ve ikili karışımlar şeklinde eklenmiştir. Kıvamı 15 ± 2 cm aralığında tutabilmek için beton karışımlarına %1 oranında hiper akışkanlaştırıcı katkı eklenmiştir. Metagabro agregaları ile üretilen örneklerde 28 günlük en yüksek basınç dayanımı (yaklaşık 77 MPa) Sugözü uçucu külü ve SDnin beraber kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir. Kalker tipi agregalar ile en yüksek 28 günlük basınç dayanımı 81,4 MPa elde edilmiştir. İki agrega grubu ile de YDB elde edilebilirken, kalker tipi agregalar ile üretilen betonlarda %15'e varan oranlarda daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

Demir vd (2022) çalışmalarında Farklı su/bağlayıcı ve Kimyasal Katkı Oranlarına Sahip YDBlerin işlenebilirlik ve dayanımına ait özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada 400 ve 600 kg/m³ çimento dozajı seçilmiş ve su/bağlayıcı (S/B) oranları 0.20 ve 0.30 olarak belirlenmiştir. Mineral katkı olarak beton karışımlarında SD kullanılmıştır. Çimento yerine %5 ve %20 oranlarında SD ikame edilmiştir. Çimentonun ağırlıkça %2 ve %3'ü oranında kimyasal katkı kullanılmıştır. 16 seri beton karışımı bu şekilde hazırlanmıştır. Belirlenen karışım oranları ile hazırlanan, yüksek dayanım elde edilmiş serilerin taze ve sertleşmiş beton (mekanik) özellikleri araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda serilerin çökme ve Ve-be değerleri ile f_{c-7} , f_{c-28} ve f_{c-90} günlük sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda kimyasal katkı kullanımının YDBlerin işlenebilirliği üzerinde ne kadar önemli olduğu görülmüştür. Düşük S/B oranında, yeterli miktarda kimyasal katkı ve SD kullanımı ile yüksek dayanıma sahip betonların üretilebileceği görülmüştür.

Pertiwi *et al.* (2023) araştırma makalelerinde farklı bölgelerden temin edilen ince ve iri agregalar kullanılarak agrega tiplerinin ve gradasyonunun YDBnin özelliklerinde meydana getirdiği değişimleri incelemişlerdir. Lumajang, Pasuruan ve Bangkalan bölgelerinden temin

edilen ince ve iri agregalar farklı oranlarda kullanılarak, değişik S/Ç oranlarında ve çimento miktarlarında C1, C2 ve C3 olarak 3 farklı beton tipinde YDB örnekleri hazırlanmıştır. C1, C2 ve C3 beton tipleri içinde her tip için beton karışım oranları farklı 10 karışım tipinde (MT1,MT2,...MT10) örnekler hazırlanmıştır. C1 için S/Ç oranı 0.4, C2 için S/Ç oranı 0.35 ve C3 için 0.30 olarak belirlenmiş ve çimento miktarları da sırasıyla 410.76, 512.22 ve 572.67 kg/m³ olarak kullanılmıştır. Tüm örneklerle yapılan slump, su emme ve basınç dayanımı deneyleri sonucunda her beton çeşidinde farklı agrega gradasyonunun YDB basınç dayanımını %30-%35 oranında iyileştirebileceği tespit edilmiştir. En yüksek su emme oranına sahip C1 tipi MT3 karışımına ait örneklerde en düşük basınç dayanımına, en düşük su emme oranına sahip C3 tipi MT1 karışımında en yüksek basınç dayanımına ulaşılmıştır. Makalenin sonuç kısmında YDB larda işlenebilirliği artırılması için akışkanlaştırıcı katkıların kullanılması gerektiği ve yüksek dayanım elde edebilmek için en uygun S/Ç oranının belirlenebilmesi amacıyla agregaların doygun kuru yüzey (DKY) haline getirilerek kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu başlık altında YDBlerin sülfat direncine silis dumanı oranının ve sülfat konsantrasyonunun etkisini belirlemek amacıyla yapılan çalışmada kullanılacak malzeme ve gereçlerin özellikleri ile üretilen betonların ve betonların üretiminde kullanılan agregaların gerekli fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için ilgili TSE ve uluslararası standartlarda belirtilen hususlar doğrultusunda tüm deneyler yapılmıştır.

Materyal

Agrega, çimento, SD, karışım suyu ve SAK' ların ve beton üretiminde kullanılan tüm malzeme ve ekipmanların özellikleri bu bölümde anlatılmaktadır.

Deneylerde kullanılan malzemeler

Çimento

YDB örneklerinde Aşkale Çimento Fabrikası'ndan alınan erken dayanımlı portland çimentosundan (PÇ 42,5 R) kullanılmıştır. Söz konusu fabrikadan temin edilen çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerine ait analiz sonuçları Tablo 5 ve Tablo 6 da gösterilmektedir.

Tablo 5. Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Bileşen	Oran (%)
SiO ₂	18.68
Al ₂ O ₃	4.23
Fe ₂ O ₃	2.46
CaO	64.66
MgO	2.97
SO ₃	3.20
Kızdırma Kaybı	2.13
Na ₂ O	0.35
K ₂ O	0.70
Cl	0.020
Toplam	99.40
Serbest CaO	1.44
C ₃ A	7.05

Tablo 6. Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Özgöl Ağırlık (g/cm ³)		3.12
Su İhtiyacı (%)		30.7
Özgöl Yüzey (cm ² /gr)		3710
Priz Başlangıcı (dakika)		145
Priz Sonu (dakika)		195
Hacim Genleşmesi (mm)		1
Basınç dayanımı (MPa)	2 gün	27.1
	28 gün	53.7

Agrega

YDB üretiminde kullanılmak üzere 0-3, 3-7, 7-15 mm boyutunda tane dağılımına sahip bazalt kırmataş agregalar elenerek kullanılmıştır.

Karışım suyu

Betondaki su miktarı, işlenebilirlik, basınç dayanımı, geçirgenlik ve su geçirmezlik, dayanıklılık ve ayrışma, büzülme ve çatlama potansiyeli dahil olmak üzere betondaki birçok taze ve sertleşmiş özelliği kontrol eder. Bu nedenlerden dolayı betondaki su miktarının sınırlandırılması ve kontrol edilmesi hem inşa edilebilirlik hem de hizmet ömrü açısından önemlidir (Anonymous 2014).

Beton karışım suyu, temiz olmalı, içinde sülfat, asit, klorür, organik madde, yağ, endüstriyel atık, kil ve silt gibi zararlı maddeler bulunmamalıdır.

Beton karışım suyu olarak ve sülfat çözeltisinin hazırlanmasında şehir şebeke suyu (Erzurum) kullanılmıştır.

Süper akışkanlaştırıcı

Bu tez çalışmasında SAK olarak Glenium C303 kullanılmıştır. GLENİUM C 303 yüksek oranda su azaltan, işlenebilirliği artıran, polikarboksilik eter esaslı bir malzemedir. Betonlarda dayanım ve dayanıklılığı artırıcı etkisi bulunmaktadır.

Silis dumanı

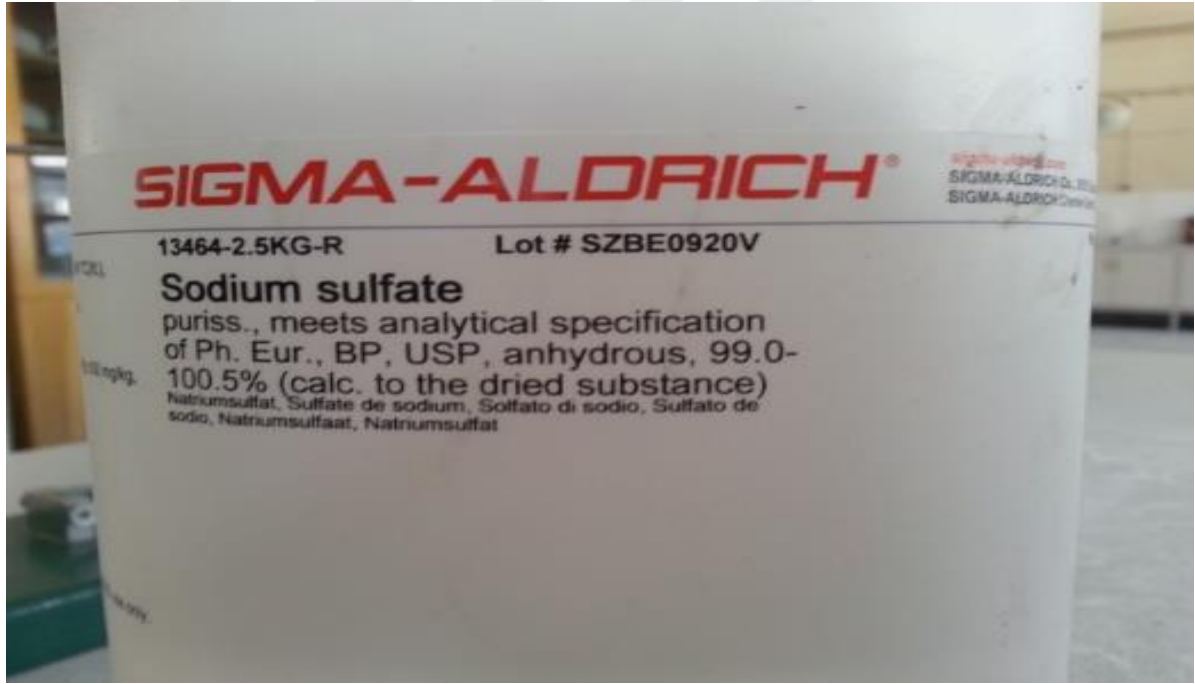
Antalya’ da bulunan Eti Elektrometalurji A.Ş.’den temin edilen SD’ nin kimyasal özellikleri Tablo 7’de verilmiştir. Ağırlıkça çimentonun % 5, %10 ve %15’ i kadar SD ikame edilerek numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 7. Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri

Madde	Miktarı (%)
SiO ₂	80 – 92
Fe ₂ O ₃	0.2 - 0.4
MgO	3.69 - 7.68
Al ₂ O ₃	0.42 - 0.83
C	0.21 - 1.22
S	0.07 - 0.92
CaO	2.06 - 2.53
Kızdırma Kaybı	2.96

Sodyum sülfat çözeltisi

Na₂SO₄ çözeltisi, 100 lt çözelti için sırasıyla ağırlıkça 3kg,5 kg ve 10kg Na₂SO₄ içeren %3,%5 ve %10 oranında 3 farklı çözelti şeklinde hazırlanmıştır. Bir aylık periyotlar halinde çözelti değiştirilmiştir.

**Şekil 1.** Sodyum sülfat

Diğer malzemeler

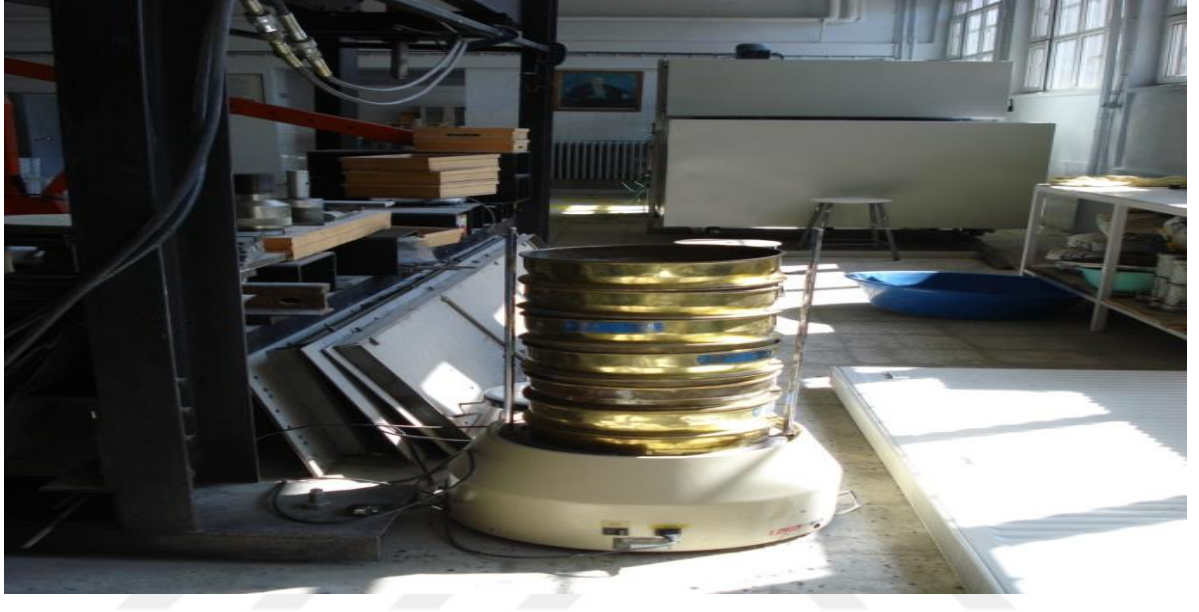
Sertleşmiş beton deneylerinde kullanılmak üzere silindir beton numunelerinde düzgün bir yüzey elde etmek amacıyla başlıklama yapmak için kükürt ve grafit karışımı başlık malzemesi kullanılmıştır. Su küründe kullanılmak üzere kireç ve silindir ve dikdörtgen prizması şeklindeki kalıpların numunelerin rahatça çıkarılması için kalıp yağı kullanılmıştır.

Betonda sülfat etkisi sonucu meydana gelecek değişimleri belirlemek amacıyla prizma numunelere pirinç vidalar yerleştirilmiştir.

Deneylerde kullanılan aletler

Elekler

şekil 2’de görülen TS ISO 3310-1 (2019) te belirtilen boyut ve özelliklerde elekler kullanılmıştır.



şekil 2. Elekler

Betoniyer

Deneylerde şekil 3’de görülen ELE firması tarafından üretilen düşey eksenli laboratuvar tipi betoniyer kullanılmıştır.



şekil 3. Betoniyer

Kalıplar

Deneylerde, Şekil 4’de görülen 100x200 mm boyutlarında plastik silindir beton kalıplar ve 70x70x280 mm boyutlarında çelik malzemeden yapılmış prizma kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 4. Silindir beton kalıpları



Şekil 5. Dikdörtgen beton kalıplar

Kür havuzu

Beton numunelerin bir kısmı kirece doygun bir su içinde $23\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta sabit tutulabilen Şekil 6’da görülen tam dijital kür havuzu içine konulmuştur.



Şekil 6. Kür havuzu

Hidrolik pres

Numunelerin basınç dayanımlarının tespitinde Şekil 7.' de görülen ELE AUTOTEST 3000 marka hidrolik pres kullanılmıştır.



Şekil 7. Hidrolik pres

Dijital kumpas

ASTM C1038/C1038M-19 standartlarında yer alan tariflere uygun olarak 0,01 mm hassasiyete sahip Şekil 8'de görülen dijital kumpas kullanılarak bir aylık periyodlar halinde boy değişimi ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 8. Dijital kumpas

Yöntem

Bu bölümde YDB üretiminde kullanılan agregaların tüm özelliklerinin belirlenmesi için izlenen yöntemler, numunelerin üretilmesi, saklanması ve korunması, taze ve sertleşmiş betonun özellikleri hakkında mevcut standartlar çerçevesinde yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilecektir.

Agrega deneyleri

Agregalar kum, kırmataş, çakıl, cüruf vb. gibi çeşitli büyüklükteki taneli malzemelerdir.

Agregalar betonun hacminin yaklaşık olarak %75' ini oluştururlar. Nitelik ve nicelikleri, betonun kalitesini ve ekonomisini önemli ölçüde etkiler. Agregalar betonun en önemli bileşenlerinden biri olduğundan özelliklerinin kullanılmadan önce deneylerle belirlenmesi gerekir (Ünsal ve Şen 2008).

Agrega deneylerinde kullanılan agregalar daha iyi tane dağılımı elde etmek, betonun içindeki boşlukları en aza indirmek amacıyla elenerek 0-3 mm, 3-7mm, 7-15 mm olmak üzere 3 farklı tane sınıfına ayrılmıştır. Betonda ideal granülometriye ulaşılarak tam doluluk oranının sağlanması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan agregalar Korkmazlar Yapı İnşaat Sanayi A.Ş. Aziziye Hazır beton tesislerinden temin edilmiştir. Yapılan agrega deneyleri sonrasında

Beton üretiminde kullanılacak agregaların TS EN 933-1 standardına göre elek analizi, TS EN 1097-6/A1 standardına göre tane yoğunluğu ve su emme oranları belirlemek amacıyla agrega deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına ait bulgular araştırma bulguları ve tartışma bölümünde değerlendirilmiştir.

Beton karışım seçeneklerinin belirlenerek ve hazırlanması

Karışım hesabı, betonun mukavemet, yoğunluk, dayanıklılık, işlenebilirlik gibi bazı parametreleri iyileştirmek için üretim maliyetleri de göz önünde bulundurularak çoğunlukla katkı maddeleri ve karışımlarla zenginleştirilmiş, çimento, su ve kaba ve ince agregalar miktarlarının belirlenmesi için yapılan hesaplama işlemidir (Anonymous 2023).

İlk olarak örnek karışımlar hazırlanarak YDB için standartlarda belirlenen dayanıma ulaşmak hedeflenmiştir. En ekonomik ve yüksek dayanıma sahip karışım seçeneği belirlenerek örneklerin üretimine geçilmiştir.

Beton karışımında kullanılacak agregalar ile ilgili deneyler yapılarak su emme oranları, birim ağırlıkları tüm agregalar için bulunmuştur. Bulunan verilere göre karışıma girecek agregalar miktarları hesaplanmıştır. 0-3 tane sınıfı agregadan %15, 0-7 tane sınıfından %35 ve 7-15 tane sınıfından %50 oranında kullanılarak karışıma eklenmiştir.

Belirlenen karışım hesabına göre kullanılacak malzemelerden ağırlıkları oranına göre eklenerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Beton üretimi düşey eksenli laboratuvar tipi betonyer kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan beton numunelere çökme deneyi yapılarak işlenebilirliğin yeterli olduğu görülmüştür. C50/60 beton sınıfında üretilen SD içeriklerine göre numunelerde kullanılan karışım oranlarına ait bilgiler Tablo 8’de gösterilmektedir.

Tablo 8. Beton Karışım Oranı (kg/m³)

SD İçeriği (%)	Çimento (kg)	Su (kg)	SD (kg)	S/Ç	SAK (kg)	0-3 mm (kg)	0-7mm (kg)	7-15mm (kg)
%0	450	158	0	0,35	9	267	623	890
%5	427,5	158	22,5	0,35	9	265	620	885
%10	405	158	45	0,35	9	264	617	881
%15	382,5	158	67,5	0,35	9	263	614	877

Betonların üretilmesi, yerine konulması ve bakımı

Beton karışım oranlarına göre belirlenen malzeme miktarlarına göre karışım hazırlanmıştır. Malzemelerde oluşabilecek zayıflıklar da göz önünde bulundurularak, yaklaşık olarak %10 fazla miktarda karışım hazırlanmıştır. Kullanılacak agregalar etüvde kurutulup DKY haline getirildikten sonra karışımlarda kullanılmıştır. Özellikleri bölüm 3.1.2.2. de açıklanan betonyer kullanılarak numuneler üretilmiştir.

İlk önce agregalar ve çimentolar kuru halde betonyer içine konularak karıştırılmış, sonra kullanılacak suyun yarısından fazlası ilave edilerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Suyun kalan kısmının içine SAK ilave edilerek karışıma eklenmiştir. Hazırlanan karışımlar daha

önceden temizlenip yağlanan kalıpların içene yerleştirilmiştir. Yerleştirme işleminin sağlıklı olabilmesi için kalıplar tokmaklanarak betonun kalıp içinde boşluksuz olarak yerleşmesi sağlanmıştır. Kalıpların üzeri mala ile düzlenip, laboratuvar ortamında 24 saat bekletilmiştir. Toplamda 204 silindir ve 36 prizma şeklinde numune tek seferde dökülmüştür. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler kirece doygun $23\pm1^{\circ}\text{C}$ su kürüne konulmuştur. 28 gün sonra sülfat etkisini belirlemek amacıyla numuneler önceden hazırlanmış olan değişik konsantrasyonlardaki sülfat çözeltisine ve karşılaştırma yapmak amacıyla kirece doygun $23\pm1^{\circ}\text{C}$ su kürüne konulmuştur. Aylık periyodlar halinde su küründen ve sülfat çözeltisinden çıkarılan numunelere, bir gün sonra sertleşmiş beton deneyleri uygulanmıştır.

Numunelerin kodlanması

Numuneler kodlanırken ilk önce sülfat konsantrasyonu, SD oranı, numunenin sıra numarası olacak şekilde kodlama yapılmıştır. SD içeriği %0SD= A, %5SD= B, %10SD= C ve %15 SD= D harfleriyle belirtilmiştir. Örneğin % 5 sülfat konsantrasyonunda bekletilen %10 SD oranına sahip 7 nolu numunenin kodlaması 5C7 şeklindedir.

Taze beton deneyleri

Çökme (slump) deneyi (TS EN 12350-2)

Çökme (Slump) deneyi taze betonun kıvamını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Çökme deneyi 10mm ile 200mm arasında çökme değerine sahip betonların kıvamlarının belirlenmesini sağlar. Bu sınırların dışındaki durumlarda çökme (slump) deneyi ile yapılan ölçümler kıvam tayininde kullanılamaz. Çökme deneyi yapılırken kıvam hunisinin çekilmesinden sonra taze betondaki çökmenin 1 dakika boyunca devam etmesi beton numunenin kıvam tayininin belirlenmesi için uygun olmadığı anlamına gelmektedir. En büyük agrega çapı 40mm den daha büyük çapta agrega içeren betonlar için kullanılmamaktadır. Taban plakası ve kalıbın iç yüzeyi nemlendirilir ve kalıp taban plakası üzerine kelepçelenerek veya iyi ayak basma parçasına basılarak taban plakası üzerine sabitlenir. Çökme hunisinin içine taze beton 3 eşit tabaka halinde ve sıkıştırılmış kalınlığı çökme hunisinin yaklaşık 1/3' ü olacak şekilde doldurulur. Doldurma sırasında her tabaka doldurulduktan sonra sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılır. İkinci ve üçüncü tabakalar sıkıştırılırken bir alt tabakaya sıkıştırma çubuğu işleyecek şekilde uygulanmalıdır. Şişleme esnasında sıkıştırma çubuğunun her darbesi yüzeye eşit dağılacak şekilde olmalıdır. Çökme hunisinin en üst tabakasında taze beton taşacak şekilde doldurulur. Sıkıştırma işlemi bitince çökme hunisinin üst kısmı tesviye edilir ve düzgün bir yüzey oluşturulur. Kalıp el tutamaklarından tutularak yukarıya doğru kaldırılır. Kalıp yukarıya doğru çekilirken yanal ve burulma hareketi yapılmamalıdır. Kalıp üst

seviyesi ile çöken betonun üst seviyesi arası çökme mesafesi metreyle ölçülür. Çöken beton kütlelerinin bütünlüğü bozulmadan kaymadan durması gerekmektedir.

Taze betonun birim hacim kütlesi (TS EN 12350-6)

Bu deney sıkıştırılmış taze betonun yoğunluğunun belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Yapılan deney hacmi bilinen bir kaba taze betonun doldurulup sıkıştırıldıktan sonra ağırlığının belirlenmesi ve kütlenin hacme bölünmesi esasına dayanır. Deneye başlanılmadan önce kabın ağırlığı tartılır. Hacmi bilinen bir kaba taze beton üç eşit tabaka halinde doldurulur ve her tabaka 12 mm lik sıkıştırma çubuğu ile 25 kez şişlenir. Betonun yüzeyi düzeltildikten sonra tartılır. Betonun birim ağırlığı taze betonun net ağırlığının hacime bölünmesi suretiyle bulunur.

Sertleşmiş beton deneyleri

Basınç dayanımı tayini (TS EN 12390-3)

Sertleşmiş betonda basınç dayanımı belirlenirken TS EN 12390-3 standardında belirtilen hususlar dikkate alınarak deney çalışması yapılmıştır. Basınç dayanımı hesaplamasında kullanılmak üzere numunelerin kesit alanları bulunarak yükün etki edeceği alan hesaplanmıştır. Deneyde silindir numuneler kullanıldığı için kükürt başlıklar yapılmıştır. Başlıklama yapılmadan önce numunelerin başlık yapılacak yüzeylerinin kuru ve temiz olması sağlanıp ve gevşek parçacıklar temizlenmiştir. Pres tablasına numunelerin yapışmasını sağlamak üzere ve üniform bir yüzey oluşturmak için kükürt ve grafit karışımı başlıklar yapılarak en az 2 saat sertleşmeye bırakılmıştır. Basınç dayanımı belirlenirken bölüm 3.2.6.1 de özellikleri verilen hidrolik pres kullanılmıştır. Yükleme hızı sabit tutularak 245 kgf/cm²/sn hız ile numunelere yükleme yapılmıştır. 204 adet silindir numune üzerinde yapılan basınç dayanımı deney sonuçlarına ait veriler Araştırma bulguları bölümünde açıklanmaktadır.

Birim hacim kütlesinin tayini (TS EN 12390-7)

Sertleşmiş betonda birim hacim kütlesinin tayini deneyleri TS EN12390-7 standardına uygun olarak yapılmıştır. Sertleşmiş beton numunesinin kütlesi ve hacmi belirlenerek birim ağırlığı bulunur. Numune hacmi üç yöntemle tayin edilir. Su ile yer değiştirme metodu, numunenin gerçek ölçülerinin kullanılarak hesaplama ve küp şekilli numunelerde belirtilmiş boyutların kontrol edilerek kullanılmasıdır. Bu üç metottan en hassas olanı su ile yer değiştirme metodudur. Gerçek ölçülerin kullanılarak hesaplama metodunda hassasiyet daha düşük, belirtilmiş boyutların kontrol edilerek kullanılması metodunda en azdır. Kütle tayin edilirken numunelerin tabii durumda, suya doygun durumda ve etüv kurusu durumunda olabileceği kabul edilmiştir. Suyu doygun durumdaki numuneler 24 saat boyunca su içerisine batırılır. Sudan

ıkarıldıktan sonra etrafı silinerek serbest su uzaklaştırılır. Suyu doymun numune kütlesi belirlenir. Etüv kurusu numuneler (105+2) C de etüvde kütle değişimi % 0,2' den daha az hale gelinceye kadar 24 saat tutulur ve oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur. Kütlesi tartılır ve kaydedilir. Yoğunluk deney numunesinin kütle ve hacmi kullanılarak $D=m/V$ formülünden hesaplanır.

Sülfata dayanıklılık deneyleri

Deneyin esası örneklerin sodyum sülfat çözeltisi içerisinde saklanması esasına dayanır. Dayanım ve ağırlık kayıplarının belirlenmesi ile sülfat etkisi altındaki hasarın şiddeti hakkında bilgi verilmektedir. Gözlemsel olarak ta hasar takip edilebilir.

70x70x280mm boyutlarında üretilmiş olan prizma şeklindeki numuneler %3, %5 ve %10 Na₂SO₄ içeren çözeltelerde bekletilerek ASTM C1018-97 standardının tariflerine uyularak 0,01 mm lm hassasiyetine sahip dijital kumpas ile boy değişimleri 1 aylık periyotlar halinde ölçülmüştür. lmlere 4 ay boyunca devam edilmiştir. lm öncesinde kr havuzunda ve sülfat çözeltisi içerisinde bulunan numuneler çıkılarak yüzeyleri kuru hale getirilmiştir. Numunelerin ilk boyu ölçüldükten sonra ASTM C1012/ C1012M-18b ye göre numunelerin boy değişimleri hesaplanmıştır.

$$\Delta L = \frac{(L_x - L_y)}{L_g} \times 100$$

L_g

ΔL = x yaşında uzunluktaki değişim %

L_x = x yaşındaki numunenin kumpas okuması

L_y = ilk kumpas okuma değeri

L_g = Numunenin uzunluğu

Uzunluklarındaki değişimler belirlenerek tekrar çözelti içerisine bırakılmıştır. Ağırlıkça %3, %5 ve %10 derişime sahip sülfat zelteleri ASTM C1012/ C1012M-18b ye göre her litrede 900 ml su ve 30 gr, 50 gr ve 100gr Na₂SO₄ olacak şekilde sodyum sülfat suda çözdürülerek çözelti 1000ml ye tamamlanacak şekilde hazırlanır. Çözeltinin pH değeri 6-8 arasında olmalıdır. Periyodik boy değişimi lmlerinden sonra çözelti her ay yenilenmiştir.

Ayrıca 10x20 cm boyutlarında silindirik numunelerde üretilmiştir. 28 günlük sreler boyunca örneklerin basınç dayanımındaki ve görünümündeki değişiklikler takip edilmiştir. Çalışma süresince elde edilen değerler bir önceki ölçümdeki değişimlere göre yüzde olarak ifade edilerek benzer çalışmalara ait literatür taramaları yapılarak karşılaştırmalı olarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Araştırma bulguları kısmında tez çalışması kapsamında kullanılan agregalara ait elek analizi, birim ağırlık, su emme oranları deney sonuçları ve beton numunelere ait basınç dayanımı, birim ağırlık ve boyca uzama deneyi sonuçlarına ait veriler tablo ve grafik halinde sunularak açıklanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür taraması yapılarak ve benzer çalışmalarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Söz konusu deney çalışmaları Atatürk Üniversitesi Yapı Malzemesi ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır. Üretilen beton numuneler su küründe ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilerek 28 günlük periyodlar halinde basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Sülfat çözeltisi 28 günde bir değiştirilmiştir. Ayrıca sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin aynı periyodlarda boyca uzamaları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara ait veriler aşağıda açıklanmaktadır.

Agrega Deney Sonuçları

Elek analizi

Agrega deneyleri ilgili standartlarda yer alan hususlar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Beton karışımında kullanılacak agregalar DKY haline getirildikten sonra elek analizi yapılmıştır. Karışım hesabı yaklaşık %50 ince agreg ve % 50 iri agreg kullanılarak yapılmıştır. 0-3 mm, 0-7 mm ve 7-15mm aralığındaki agreg numuneleri eleklerden elenerek oluşturulan elek analizine ait veriler tablo halinde aşağıda sunulmaktadır. Karışım hesabında kullanılacak agregalara ait elek analizi verileri en büyük agreg tane çapı 15mm olduğu için A16 ve B16 referans eğrileri arasında kalacak şekilde seçilmiştir. Elek analizine ait veriler Tablo 9’da verilmektedir.

Tablo 9. Elek Analizi Verileri

Elek Açıklığı	Elek Üstü Kalan (gr)	Kümülatif Toplam (gr)	Kalan (%)	Geçen (%)	A16	B16
16	50	50	2	98	100	100
8	550	600	30	70	60	76
4	380	980	49	51	36	36
2	400	1380	69	31	21	42
1	183	1563	78	22	12	32
0,5	129	1692	85	15	7	20
0,25	211	1903	95	5	3	8
Tava	97	2000	100	0	0	0

Su emme oranı

Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agregalar için su emme yüzdeleri TS EN1097-6 da belirtilen eşitlik yardımıyla hesaplanarak Tablo 10' de verilmektedir.

Tablo 10. Agregaların Su Emme Oranları

Agrega Sınıfı	Su Emme Oranı (%)
0-3 mm	1,8
0-7 mm	1,7
7-15 mm	1,5

Özgül ağırlık

Agrega ve suyun hacimce yer değiştirme esaslarına göre agregaların özgül ağırlıkları bulunmuştur. Özgül ağırlıklara ait deney sonuçları Tablo 11' de yer almaktadır.

Tablo 11. Agregaların Özgül Ağırlıkları

Agrega Sınıfı	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
0-3 mm	2,47
0-7 mm	2,69
7-15 mm	2,63

Taze Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Slump deneyi

SD ilavesiz ve değişik SD içeriklerinde hazırlanan beton numuneleri üzerinde yapılan slump (Çökme) testi sonucunda elde edilen değerler Tablo 12'de sunulmaktadır.

Tablo 12. Slump Değerleri

Karışım Tipi	Slump Değeri (cm)
SD İlavesiz YDB	17
%5 SD İlaveli YDB	16
%10 SD İlaveli YDB	16
%15 SD İlaveli YDB	15

TS EN 206+A2 standardında belirtilen slump sınıflarından %15 SD içeren örnekler S3 (100mm-150mm) SD içermeyen, %5 SD ve %10 SD içeren örnekler S4 (160mm-210 mm) slump sınıfına girmektedir.

SAK kullanılmasından kaynaklı olarak karışımlara ait çökme değerleri birbirine benzerdir. En yüksek çökme değeri SD içermeyen numunelerde, en düşük çökme değeri de

%15 SD içeren karışımdan elde edilmiştir. SD kullanılan karışımların çökme değerindeki düşüklük, SDnin çok ince parçacık boyutuna sahip olmasından dolayı süper akışkanlaştırıcının bir kısmının yüzeyinde adsorbe etmesine bağlanabilir (Mazloom ve ark., 2004; Park ve ark., 2005).

Birim hacim kütlesi

%5, %10 ve %15 SD içeren ve SD ilavesiz örnekler için yapılan birim ağırlık deneyi sonucunda elde edilen veriler Tablo 13’da sunulmaktadır.

Tablo 13. Taze Betona ait Birim Hacim Kütlesi

Karışım Tipi	Birim Hacim Kütlesi (gr/cm ³)
SD İlavesiz YDB	2.44
%5 SD İlaveli YDB	2.42
%10 SD İlaveli YDB	2.39
%15 SD İlaveli YDB	2.37

Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Kuru birim hacim kütlesi ve basınç dayanımı ile ilgili bulgular ve tartışma

İlk olarak SD içermeyen ve değişik yüzdelerde SD içeren YDB numunelerine ait sülfat etkisi ile ilgili çalışmalara başlanılmadan önce 28 günlük süre sonunda kuru birim hacim kütlesi ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Daha sonra 1 aylık periyodlar halinde basınç dayanımı kuru birim ağırlık deneyleri tekrarlanmıştır. Yapılan kuru birim hacim kütlesi deneyleri sonucu elde edilen veriler Tablo 14, 15,16 ve 17’de verilmektedir.

Tablo 14. Kür Havuzunda Bekletilen Numunelere ait Kuru Birim Hacim Kütlesi

SD İçeriği (%)	Başlangıç (gr/cm ³)	30 gün (gr/cm ³)	60 gün (gr/cm ³)	90gün (gr/cm ³)	120gün (gr/cm ³)
0	2.34	2.34	2.34	2.34	2.35
5	2.32	2.32	2.33	2.34	2.34
10	2.29	2.30	2.30	2.30	2.31
15	2.27	2.28	2.28	2.28	2.30

Tablo 15. %3 Na₂SO₄ İçeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Kuru Birim Hacim Kütlesi

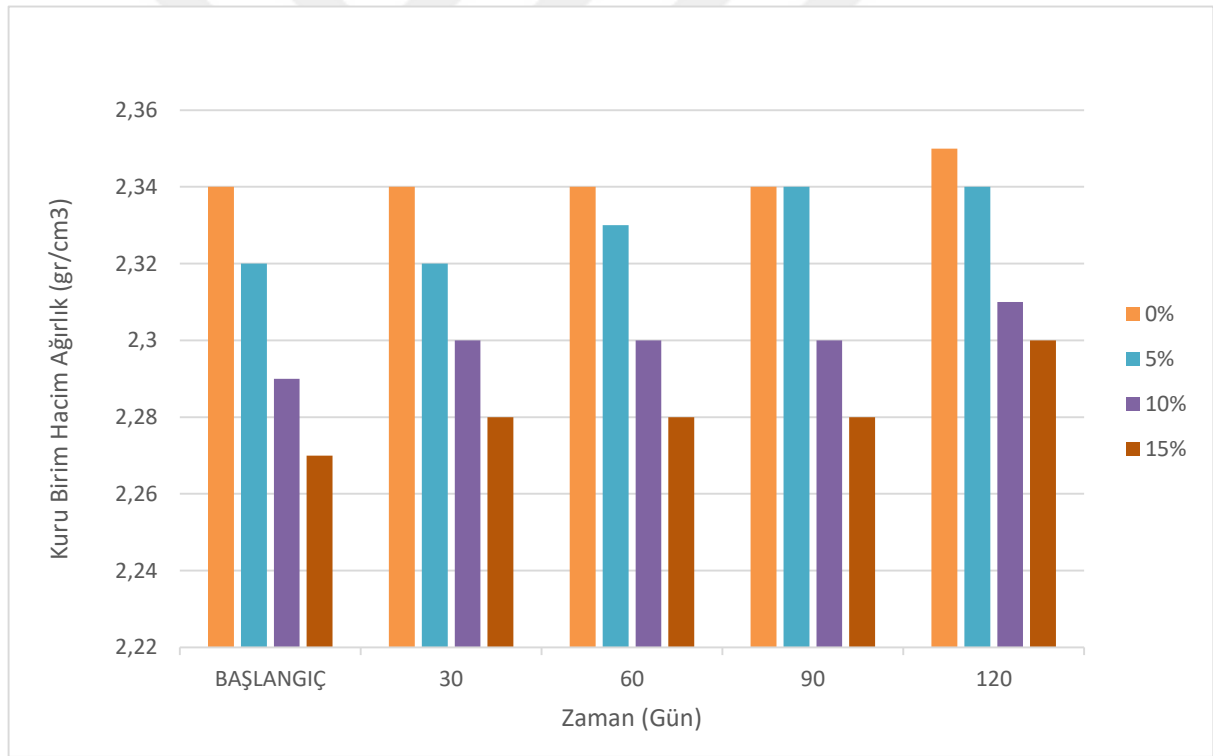
SD İçeriği (%)	Başlangıç (gr/cm ³)	30 gün (gr/cm ³)	60 gün (gr/cm ³)	90gün (gr/cm ³)	120gün (gr/cm ³)
0	2.34	2.35	2.34	2.33	2.31
5	2.32	2.33	2.30	2.31	2.31
10	2.29	2.30	2.30	2.30	2.28
15	2.27	2.28	2.27	2.26	2.25

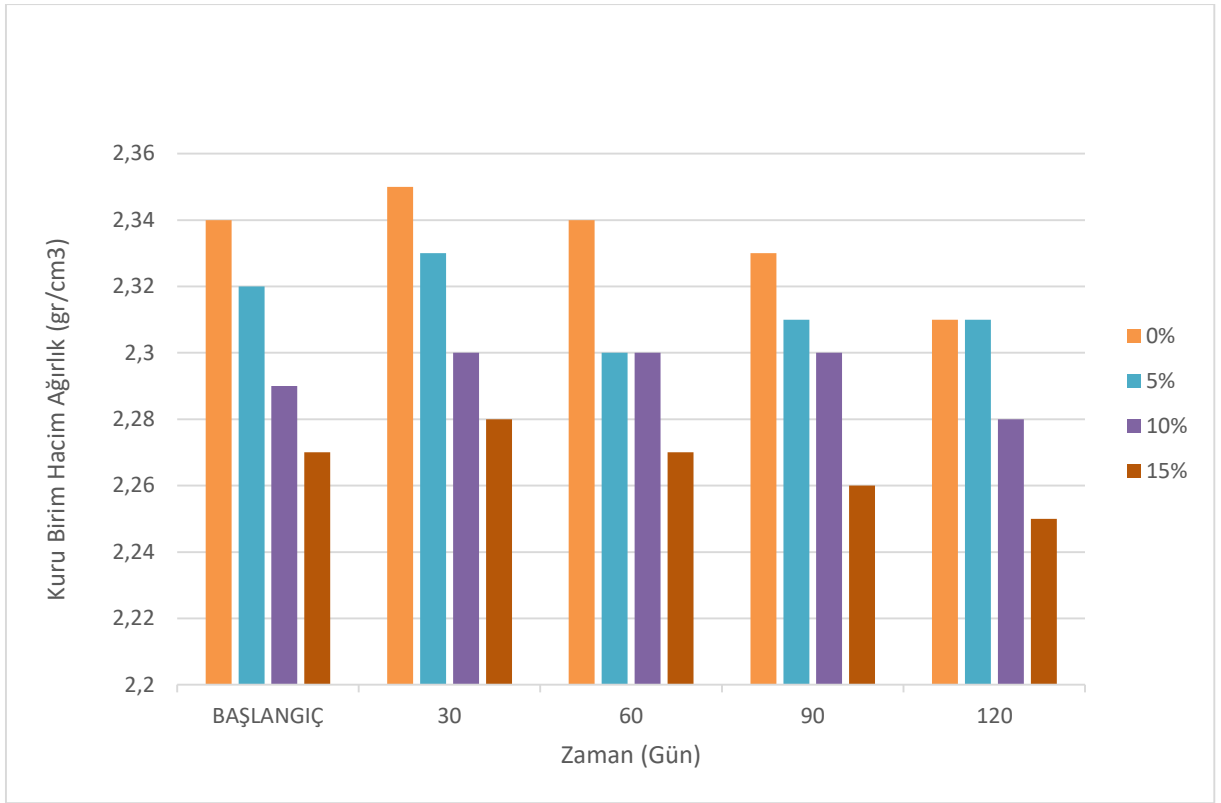
Tablo 16. %5 Na₂SO₄ içeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Kuru Birim Hacim Kütlesi

SD İçeriği (%)	Başlangıç (gr/cm ³)	30 gün (gr/cm ³)	60 gün (gr/cm ³)	90gün (gr/cm ³)	120gün (gr/cm ³)
0	2.34	2.35	2.33	2.32	2.30
5	2.32	2.33	2.31	2.31	2.30
10	2.29	2.30	2.28	2.28	2.27
15	2.27	2.28	2.27	2.27	2.24

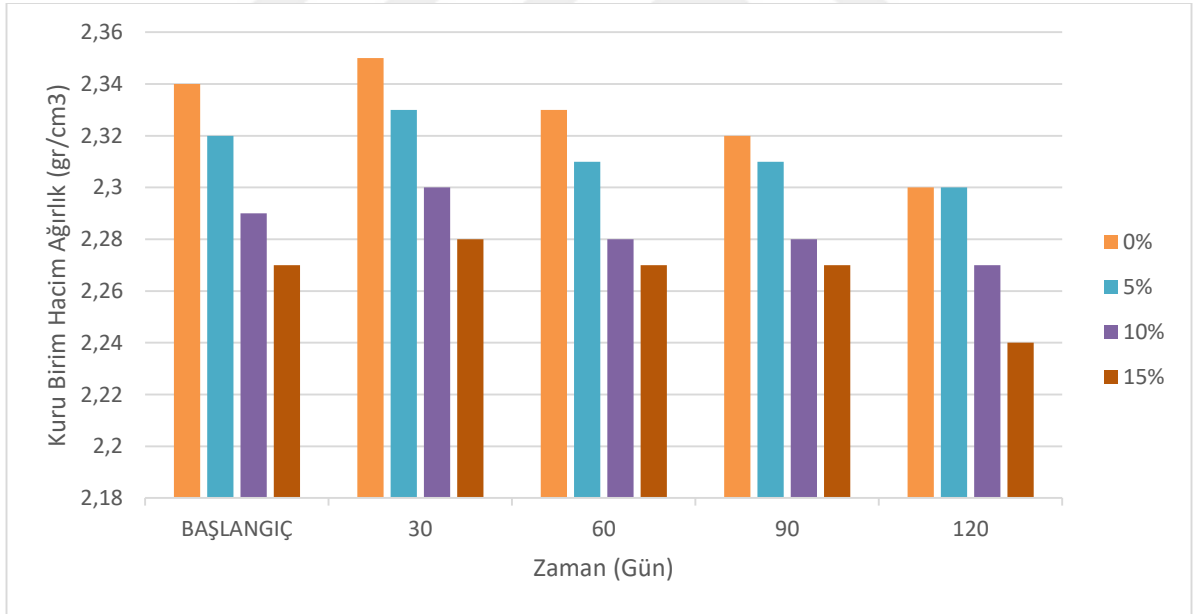
Tablo 17. %10 Na₂SO₄ içeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Kuru Birim Hacim Kütlesi

SD İçeriği (%)	Başlangıç (gr/cm ³)	30 gün (gr/cm ³)	60 gün (gr/cm ³)	90gün (gr/cm ³)	120gün (gr/cm ³)
0	2.34	2.35	2.33	2.32	2.28
5	2.32	2.33	2.31	2.30	2.30
10	2.29	2.30	2.28	2.27	2.26
15	2.27	2.28	2.27	2.26	2.23

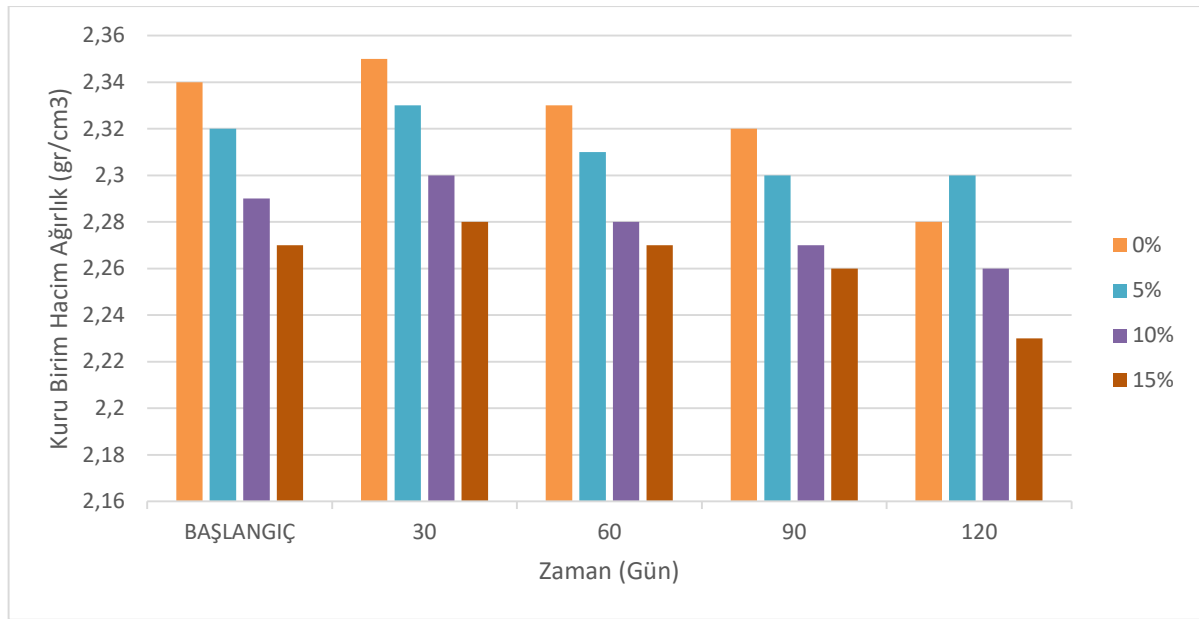
**Şekil 9.** Su küründe bekletilen numunelerin kuru birim hacim kütlesi



Şekil 10. %3 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin kuru birim hacim kütlesi



Şekil 11. %5 Sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin kuru birim hacim kütlesi



Şekil 12. %10 Sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin kuru birim hacim kütleleri

Beton numunelerde yapılan deneyler sonucu ölçülen kuru birim ağırlık değerleri 2.23-2.35 gr/cm³ değerleri arasındadır. Su küründe bekletilen numunelerin kür süresi arttıkça değerlerin artma eğiliminde olduğu görülmüştür. En yüksek değerin 2,35 gr/cm³ ile %0 SD ikameli numunelerde elde edilmiştir.

Su küründe bekletilen numunelerde yüzde olarak en büyük kuru birim ağırlık artışı yüzdesi %15 SD ikameli numunelerde elde edilmiştir. Bu değeri sırasıyla %10, %5 ve %0 SD ikameli numuneler takip etmektedir.

SD oranının ve sülfat konsantrasyonunun artmasıyla 60 gün sürenin sonunda kuru birim ağırlıkların azaldığı görülmüştür.

Numunelerin kuru birim hacim kütleleri en yüksek değerine su küründe bekletilen %0 SD içerikli numunelerde elde edilmiştir. Kuru birim hacim kütlelerinde en düşük değere %10 sülfat çözeltisinde bekletilen %0 SD içerikli numunelerde elde edilmiştir. Su küründeki numunelerde 120 günlük süre boyunca artışın devam ettiği %3 sülfat çözeltisindeki numunelerde 90 gün süre sonunda artış hızının azaldığı, %5 sülfat çözeltisindeki numunelerde 60 gün ve %10 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde 30 günlük sürenin sonunda tüm numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarının azalmaya başladığı görülmüştür. En büyük azalma yüzdesine %10 sülfat çözeltisinde bekletilen %0SD içeren numunelerde ulaşılmıştır. Azalmanın nedeninin sülfat direncine maruz kalan numunelerde sülfat çözeltisinin konsantrasyonunun artmasıyla sülfat hasarlarının şiddetinin arttığı ve numunelerin kenar kısımlarında aşınmaların, kopmaların meydana gelmesiyle kuru birim ağırlıklarda azalmaların meydana geldiği düşünülmektedir.

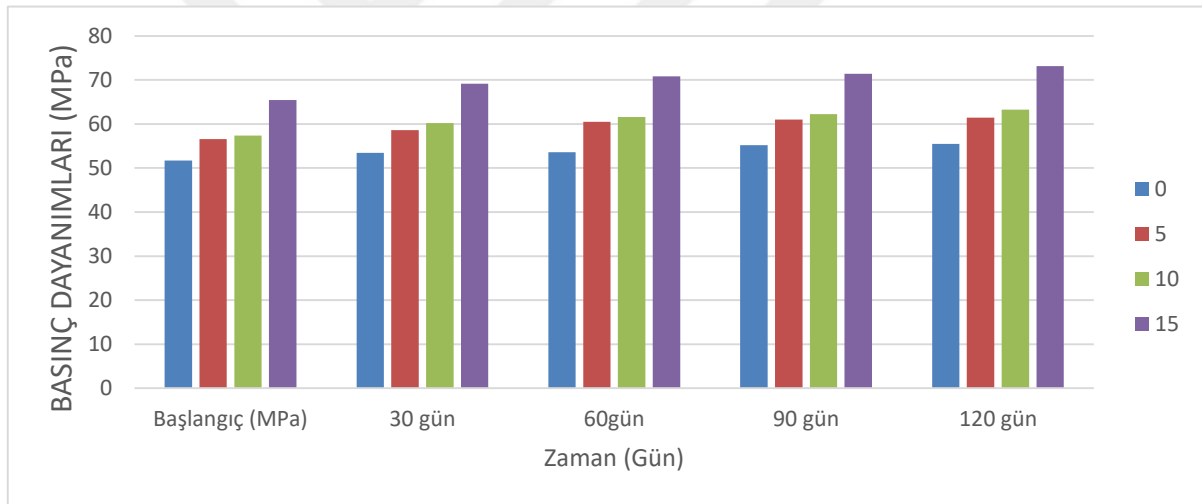
Bingöl ve Balaneji (2019) mineral katkı kullanılması katkı miktarına bağlı olarak betonların birim ağırlıkları azaltıldığını belirtmektedir.

Basınç dayanımı ile ilgili bulgular ve tartışma

Sülfat direncine maruz kalan numunelerin fiziksel ve mekanik değerlerinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi amacıyla yapılan basınç dayanım deneylerine ait veriler aşağıdaki tabloda görülmektedir.

Tablo 18. Su Küründe Bekletilen Numunelere ait Beton Sonuçları

SD İçeriği (%)	Başlangıç (MPa)	30 gün (MPa)	60gün (MPa)	90 gün (MPa)	120 gün (MPa)
0	51,70	53,41	53,58	55,16	55,47
5	56,57	58,60	60,50	61,02	61,42
10	57,37	60,20	61,57	62,25	63,23
15	65,40	69,15	70,82	71,41	73,11



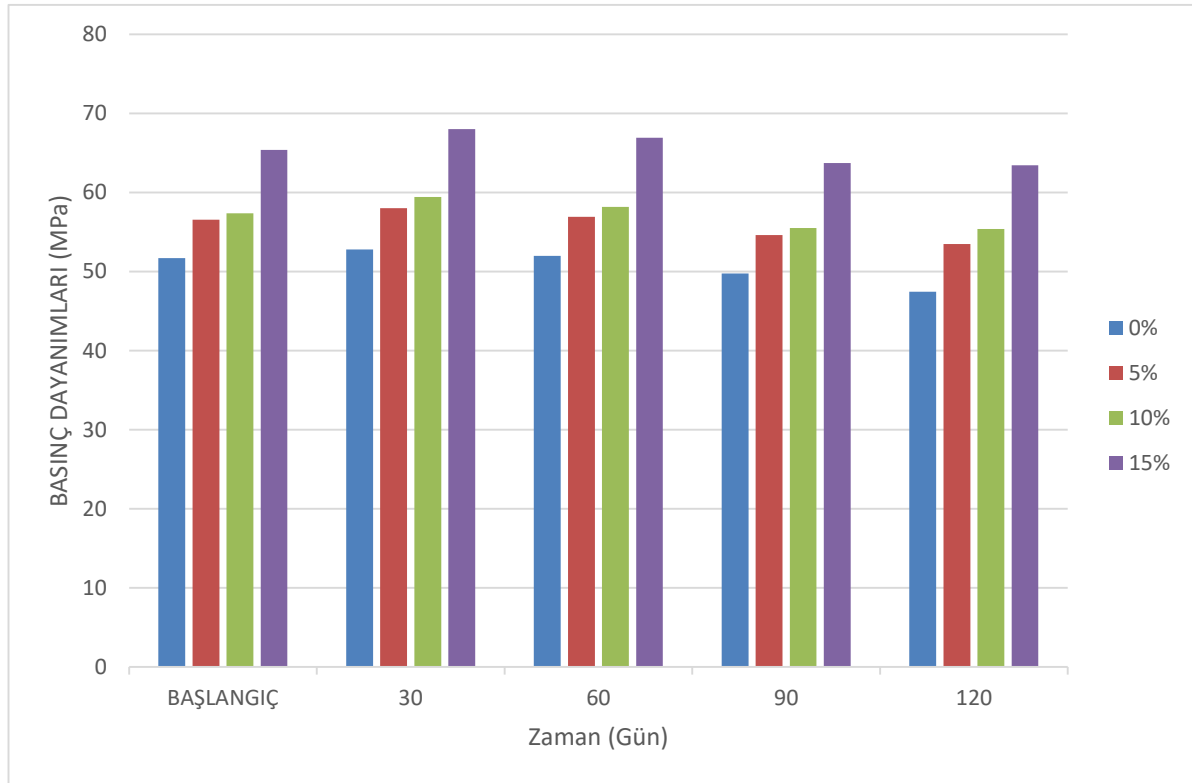
Şekil 13. Su küründe bekletilen numunelerin basınç dayanımları

Su küründe bekletilen numunelerde 120. Gün sonunda en yüksek basınç dayanımına %15 SD içeren örneklerde ulaşılmıştır. En düşük basınç dayanımına 51,7 MPa ile %0 SD içeren numunelerde rastlanılmıştır. 120 günlük periyotta basınç dayanımı tüm örneklerde artmıştır. 90. Günü sonunda artış hızı azalmaya başlamıştır. En yüksek basınç dayanımı artışı yüzdesi %11,8 ile %15 SD içeren örneklere aittir. En düşük basınç dayanımı artışı yüzdesine %7,29 ile %0 SD içeren örneklerde rastlanılmıştır. SD artışına paralel olarak basınç dayanımlarında da artışlar meydana gelmiştir. Bu durum yüksek pozolanik aktiviteye sahip SDnin çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan CaOH_2 ile reaksiyona girerek ilave C-S-H jelleri oluşturması ile açıklanabilir.(Sezer,2012). Ayrıca SDnin çimento partiküllerine oranla çok daha ince

olmasından dolayı betonun içerisinde yer alan mikro boşlukları doldurması sonucu beton basınç dayanımını artırmaktadır. (Yazıcı ve ark., 2009)

Tablo 19. %3 Na₂SO₄ İçeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Beton Sonuçları

SD İçeriği (%)	Başlangıç (MPa)	30 gün (MPa)	60gün (MPa)	90 gün (MPa)	120 gün (MPa)
0	51,70	52,80	51,97	49,74	47,44
5	56,57	58,01	56,94	54,63	53,48
10	57,37	59,44	58,19	55,51	55,38
15	65,4	68,02	66,93	63,74	63,43



Şekil 14. %3 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları

Tüm zaman aralıklarında %3 konsantrasyonlu sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerden en yüksek basınç dayanımına %15 SD içeren numunelerde ulaşılmıştır. En düşük basınç dayanımına %0 SD içeren numunelerde, sonra sırasıyla %5 SD ve %10 SD içeren numunelerde rastlanılmıştır. %3 derişimli sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde süre arttıkça basınç dayanımındaki kayıplarda zamana paralel artmaktadır.

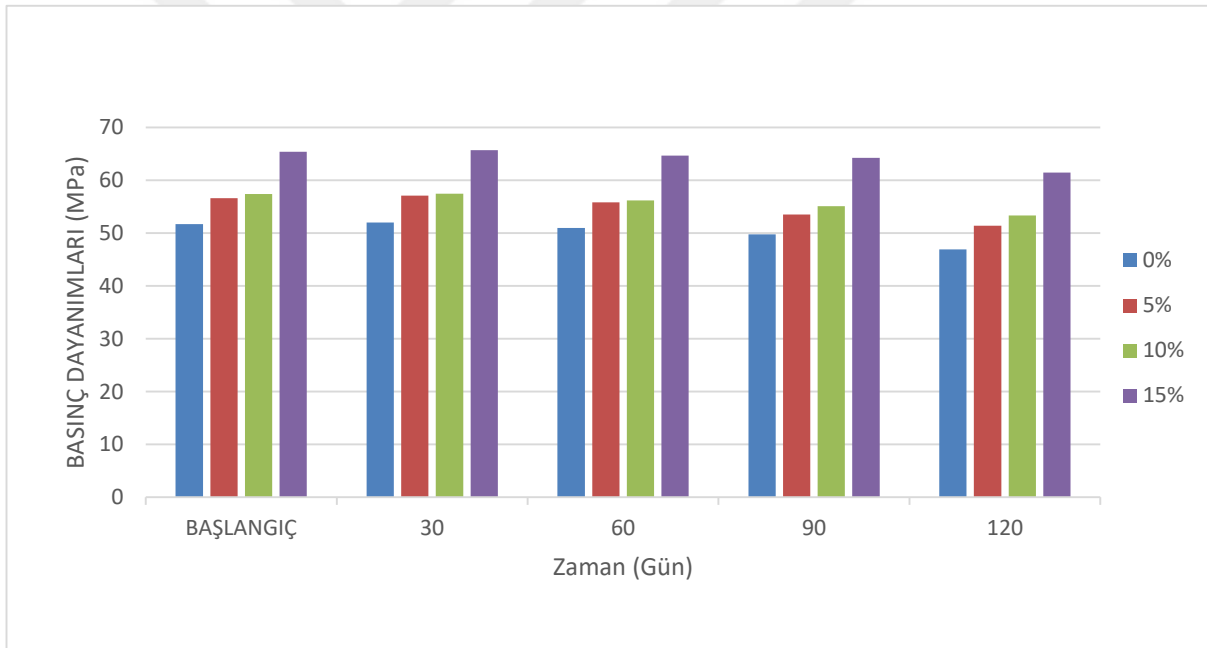
120. Günde başlangıç dayanımına kıyasla %0 SD içeren numunelerin % 8,24, %5 SD içeren numunelerin %5,46, %10 SD içeren numunelerde %3,46 ve %15 SD içeren numunelerde %3,01 basınç dayanımı kayıpları görülmüştür. Bütün karışımlarda 30. günün sonunda basınç dayanımlarında artışları meydana geldiği görülmüştür. En yüksek artış %4 ile %15 SD içeren numunelerde tespit edilmiştir.

Bakharev (2005) çalışmasında sülfat çözeltilerine maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarının ilk aylarda arttığını sonra sabit bir düşüşe geçtiğini bildirmiştir.

Bu durumun betonun içerisindeki gözeneklerdeki boşlukların sülfat saldırıları sonucu genişleyen ürünlerde doldurulmasına, harç matrisinin sülfat çözeltisine daldırılan numunelerin erken döneminde ve yüksek çekme gerilmesine maruz kalmadan önce yoğunlaştırılmasıyla açıklanabilir (Lee ve ark., 2005).

Tablo 20. %5 Na₂ SO₄ İçeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Beton Sonuçları

SD İçeriği (%)	Başlangıç (MPa)	30 gün (MPa)	60gün (MPa)	90 gün (MPa)	120 gün (MPa)
0	51,7	52	50,97	49,74	46,94
5	56,57	57,11	55,84	53,51	51,48
10	57,37	57,44	56,19	55,51	53,38
15	65,4	65,68	64,63	64,24	61,43



Şekil 15. %5 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları

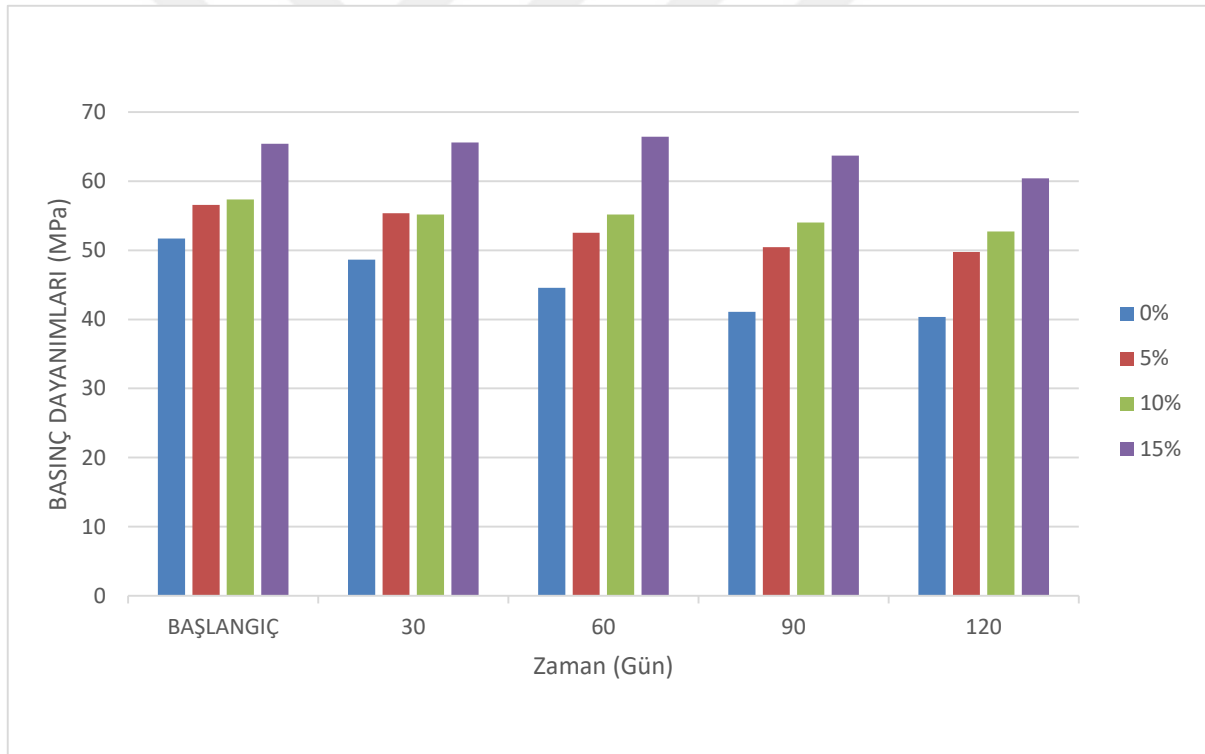
%5 konsantrasyonlu sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerden 30. günün sonunda basınç dayanımlarında %3 konsantrasyonlu sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin sonuçlarına benzer şekilde artış meydana gelmiştir. 30. Günden sonra basınç dayanımları azalarak 120 gün sonunda %0 SD içeren örneklerde en yüksek kayıplar meydana gelmiştir.

Karışımlardaki SD oranı arttıkça basınç dayanımlarındaki kayıplarda azalmıştır. 120. günün sonunda en yüksek dayanım kaybı %9.28 ile kontrol numunesinde tespit edilirken, en düşük dayanım kaybı %6.12 ile %15 SD numunesinde elde edilmiştir. Bu durum, SD'nin puzolanik reaksiyonundan dolayı mevcut CaOH₂'i azaltmasına ve böylece SD katkılı

karışımlarda sülfat etkisi ile dayanım kaybını arttıracak jips oluşumunun azalmasına bağlanabilir (Sezer, 2012). Ayrıca, SD'nin çok küçük partikül boyutundan dolayı betonun içindeki mikro boşlukları kapatarak geçirimsizliğini azaltmış ve çözeltinin beton içine nüfuz etmesini engellemiştir. Wang ve ark., (2017), SD'nin %5 derişimli Na₂SO₄ saldırısına karşı direnci arttırmada etkili olduğunu ve SD'nin uçucu külden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Tablo 21. %10 Na₂SO₄ İçeren Çözeltide Bekletilen Numunelere ait Beton Sonuçları

SD İçeriği (%)	Başlangıç (MPa)	30 gün (MPa)	60gün (MPa)	90 gün (MPa)	120 gün (MPa)
0	51,7	48,63	44,57	41,10	40,37
5	56,57	55,37	52,52	50,46	49,75
10	57,37	55,19	55,16	54,00	52,70
15	65,4	65,6	66,44	63,72	60,40



Şekil 16. %10 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları

Sülfat derişim oranının %10' a yükselmesiyle buna paralel olarak basınç dayanımlarında meydana gelen kayıplarda artmıştır. Basınç dayanımındaki azalış yüzdesi 120. Günün sonunda % 0 SD içeren numunelerde %21,92 ile en büyük değere ulaşmıştır. En yüksek sülfat konsantrasyona maruz kalınması ve numunenin SD içermemesi en büyük etkenlerden birini oluşturmaktadır. %10 derişimli sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarındaki kayıplar %7,64 ile %21,92 aralığında değişmektedir. Bu durum sülfat

saldırıları sonucu oluşan etrenjit ve alçıtaşının yıkıcı etkisinin betonun dayanımına olan etkilerinden daha fazla olduğunu göstermektedir.

Numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim incelendiğinde su küründeki numunelerin basınç dayanımlarının 120 gün boyunca artış hızı azalsa da sürekli arttığı görülmüştür. SD içeriğinin ve sülfat çözeltisinin konsantrasyonunun artmasıyla basınç dayanımlarındaki kayıplarda artmıştır. Sülfat çözeltisi içerisinde bulunan numunelerin başlangıçta basınç dayanımlarının artma eğiliminde olduğu 30 günlük sürenin sonunda azalma eğilimine girdikleri tespit edilmiştir. En büyük dayanım kayıpları %10 sülfat çözeltisinde ve SD içermeyen numunelerde görülmüştür. Beton numunelerinin zamanla sülfat saldırıları etkisinde kalması sülfat etkinlik derecesinin artması ve puzolan kullanım oranının azalması etkinin şiddetinin artmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Derişim oranı ve sülfata maruz kalma süresi arttıkça tüm numunelerde dayanım kayıpları yaşanmıştır. Bu durum genleşme sonucu çatlamların meydana gelmesi ve dayanım kayıplarına yol açan etrenjit ve alçı taşı oluşması ile birlikte beton numunelerde meydana gelen aşınma ve kapak atma gibi bozulmalara bağlanabilir.

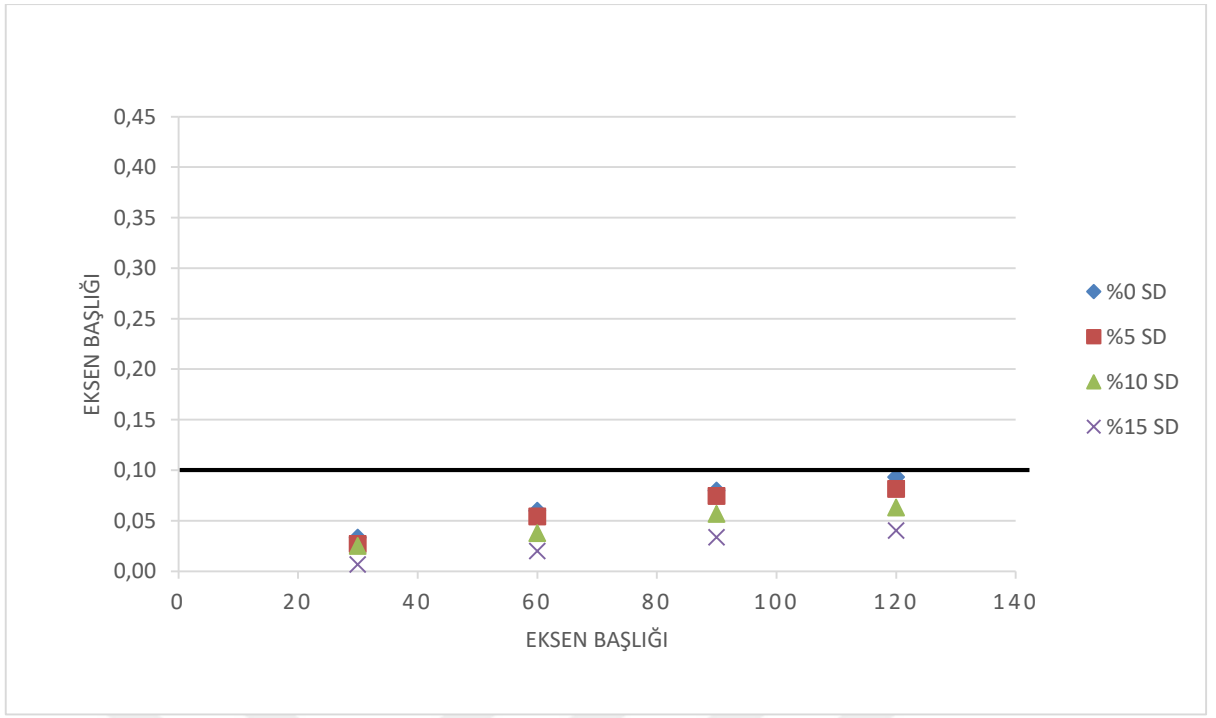
Boy değişimi ile ilgili bulgular ve tartışma

ASTM C1038/C1038M-19 standardı (Standard Test Method for Expansion of Hydraulic Cement Mortar Bars Stored in Water) sülfat etkisine maruz bırakılmış numunelerde meydana gelen deformasyonların kritik değere ulaşip ulaşmadığının kontrolü amacıyla geliştirilmiştir (Arslan 2014).

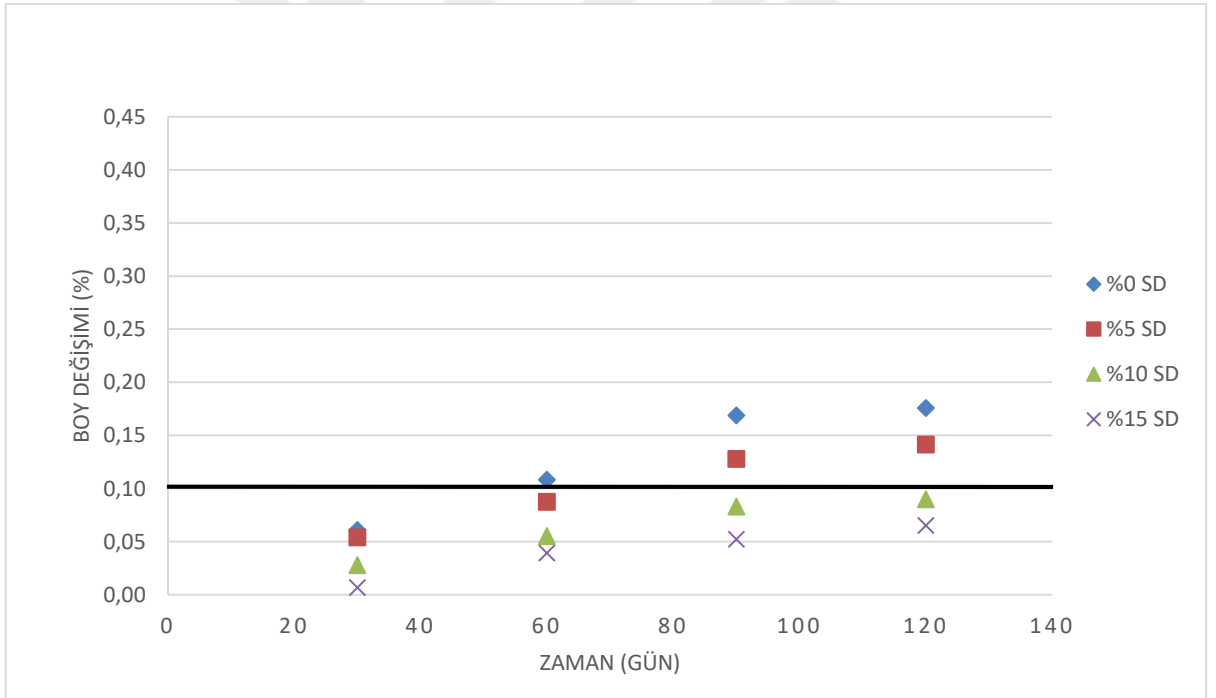
Değişik yüzdelerde SD içeren numunelere ait boy değişimi ölçümleri ASTM C1012 standardında belirtilen hesaplama yöntemine göre belirlenerek yüzde olarak ifade edilmiştir. Daha evvel yapılmış çalışmalarda ve standartlarda gösterildiği üzere bu çalışmada da kritik boy uzama sınır değeri % 0,1 kabul edilmiştir (Arslan 2014).

Kritik boy uzama sınır değeri Şekil 17-18-19 da kalın siyah çizgiyle gösterilmiştir.

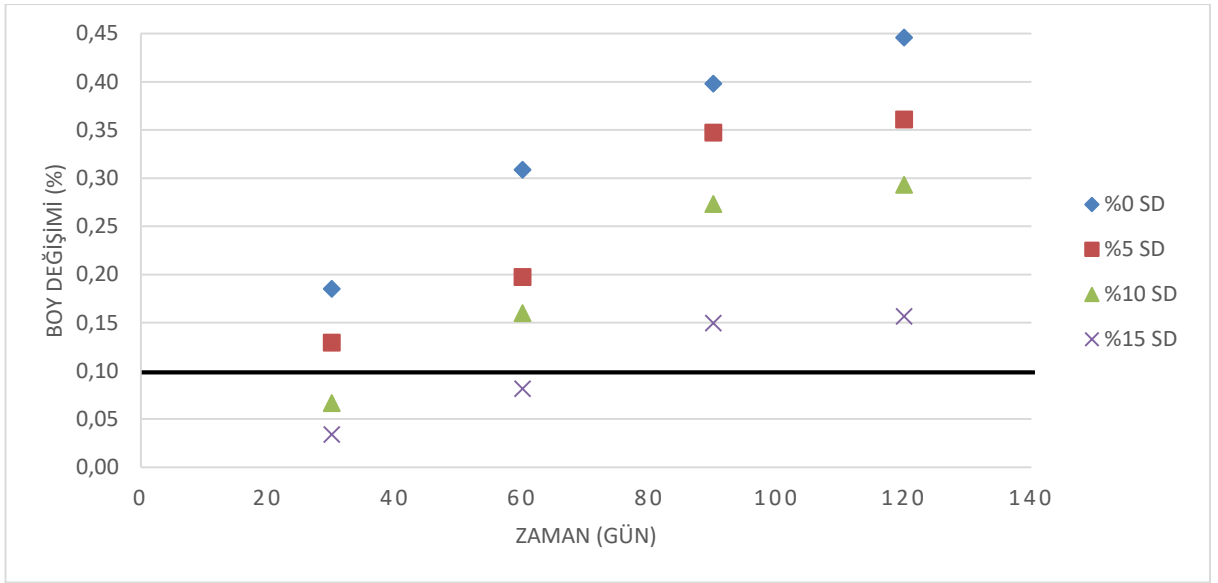
Sülfat etkisine maruz kalan numunelerden %10 sülfat içeren çözeltide bekletilen SD içermeyen numunelerde en yüksek boy değişimi % si elde edilmiştir. En düşük boy değişimi yüzdesine %3 sülfat çözeltisinde bekletilen %15 SD içeren numunelerde ulaşılmıştır. Numunelere ait elde edilen veriler aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir.



Şekil 17. %3 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen SD içerikleri farklı betonlara ait boy değişim yüzdeleri



Şekil 18. %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen SD içerikleri farklı betonlara ait boy değişim yüzdeleri



Şekil 19. %10 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen SD içerikleri farklı betonlara ait boy değişim yüzdeleri

Yapılan deneyde farklı SD içeriğine sahip numunelerden üçer adet üretilmiştir. Deney sonucunda yapılan ölçümlerde aynı SD içeriğine sahip ve aynı çözeltide bekletilen örneklerin boyca uzama değerlerinde farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Bu durumun aynı içerikli numunelerin farklı oranlarda sülfat çözeltisinden emmesi, sıkıştırma oranlarının farklı oluşu ve gözenek ve kılcal yapı farklılıklarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ölçüm sonuçları değerlendirilirken aynı içerikli numunelerden alınan sonuçların ortalaması alınarak değerlendirmeye tabi tutulmuştur (Tekin 2010).

%3 Na₂SO₄ içeren çözeltide bekletilen numunelerde sülfata karşı direnci gösteren kritik değer in altında oldukları görülmüştür. SD içermeyen örneklerde en yüksek boy değişimi yüzdesine ulaşılmıştır. SD yüzdesinin artmasına paralel olarak boy değişim oranları azalış göstermektedir. SD içeriğinin artması ile betonda boşluk oranının azalması ve kompasitenin artması ile daha boşluksuz bir beton üretileceğinden etkinin bu nedenden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca SD nin çimentonun hidrate bileşenleri ile girmiş olduğu reaksiyonlar sonucu Ca(OH)₂ bağlaması ile sülfata daha dayanıklı betonlar üretilmektedir.

%5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen örneklerde sülfat etkinlik derecesinin kuvvetli olması nedeniyle 120 günün sonunda boyca uzama yüzdelerinin %0 SD ve %5 SD içeren örneklerde kritik değerin üstüne çıktığı görülmüştür.

%10 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin çok kuvvetli sülfat etkinlik derecesine maruz kalması nedeniyle bütün numunelerin 120 gün sonunda kritik uzama değerinin üzerine çıktıkları görülmüştür. Artış hızının 90 güne kadar çok hızlı bir şekilde arttığı 120 günde artışın

devam ettiği ancak artış hızının azaldığı tespit edilmiştir. Beton numunelerdeki boşlukların sülfat iyonlarının doldurması nedeniyle artış hızının azaltıldığı düşünülmektedir.

Tüm konsantrasyon oranlarında bekletme süresinin artmasıyla genleşme oranları arasındaki fark da artmıştır. En düşük genleşme oranına %15 SD içeren örneklerde ulaşılmıştır.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında YDBlerin, sülfat direncine maruz bırakılarak farklı SD oranı ve sülfat konsantrasyonunu etkisi altındaki fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Beton karışımında değişik yüzdelerde SD ikame edilerek puzolanların sülfata karşı dayanıklılıkta etkinlikleri ve beton dayanımına olan katkıları belirlenmiştir. Sülfat etkinlik derecesinin artmasına bağlı olarak reaksiyonların gelişim hızının artması ile kısa zamanda çok kuvvetli sülfat etkisine maruz bırakarak meydana gelecek hasarların şiddeti tespit edilmiştir. Değişik yüzdelerde SD ilave edilerek ve en etkin test metodu olan karşılaştırma metoduyla SD içermeyen numunelerde üretip doğru ve uygulanabilir yöntemlerle sülfata karşı dayanıklılık açısından diğer yapılacak çalışmalara yol gösterilmesi amaçlanmıştır.

- 1-) YDBlerin gün geçtikçe kullanımı artmaktadır. Günümüzde pek çok alanda hem ekonomik hem de yüksek dayanıma ve dayanıklılığa sahip olmasından dolayı tercih edilmektedirler. YDBler ile ilgili hususların standartlarımızda yeterince yer alması kullanım ve uygulama aşamasında laboratuvar ortamında çıkıp ülkemizde kullanımı henüz istenilen seviyelere ulaşmamıştır. Söz konusu tez çalışmasında uluslararası standartlardan ve benzer çalışmalar ile ilgili olarak yapılan literatür taramalarından yararlanılarak gerekli çalışmalar yapılarak tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlar diğer çalışmalarla karşılaştırılarak doğru sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir.
- 2-) Bu tez çalışmasında en az C50/60 beton sınıfı silindir numunelerde 50 MPa basınç dayanımı ve üzerinde beton numunesi üretimi hedeflenmiştir. Karışım hesabı yapılırken hem ekonomi hem de yüksek dayanımın elde edilmesi amaçlanmıştır. Yüksek dayanım elde edilebilmesi için yüksek dayanımlı çimentolar, agregalar ve mineral katkı maddesi olarak da SD kullanılmıştır. İşlenebilirliğin sağlanması amacıyla SAKda kullanılmıştır.
- 3-) Karışımında kullanılacak optimum su oranının belirlenmesi amacıyla agregalar doygun yüzey kuru ağırlık haline getirilerek kullanılmıştır. Karışımında kullanılacak su oranı agregaların su emme oranları ve nemlilik durumları göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.
- 4-) Sülfat hasarlarını belirlemek amacıyla yaş ve kuru beton numunelerinin birim ağırlıkları bulunmuştur. Su kürüne tabi tutulan %15 SD içeren numunelerde en yüksek kuru birim hacim kütlesi değerlerine ulaşılmıştır. 120 gün süresinde yapılan ölçümlerde artış hızının azalsa da sürekli artma eğiliminde olduğu görülmüştür. %10 sülfat çözeltisinde bekletilen %0 SD içeren numunelerde en düşük kuru birim hacim

kütlesi oranlarına ulaşılmıştır. 90 günlük sürenin sonunda yapılan ölçümlerde %3, %5 ve %10 sülfat çözeltisinde bekletilen tüm numunelerde kuru birim hacim kütlesi azaldığı görülmüştür. Kuru birim hacim kütlesindeki azalmaların kuvvetli ve çok kuvvetli sülfat etkinlik derecesine maruz örneklerde sülfat saldırılarına maruz kalmaları sonucu meydana gelen özellikle kenar kısımlardaki aşınmaların, kopmaların meydana gelmesine bağlı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 20. Silindir numunelerin sülfat çözeltisinde bekletildikten sonraki fiziksel görünümü

5-) Numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim incelendiğinde su küründeki numunelerin basınç dayanımlarının 120 gün boyunca artış hızı azalsa da sürekli arttığı görülmüştür. SD içeriğinin ve sülfat çözeltisinin konsantrasyonunun artmasıyla basınç dayanımlarındaki kayıplarda artmıştır. Sülfat çözeltisi içerisinde bulunan numunelerin başlangıçta basınç dayanımlarının artma eğiliminde olduğu 30 günlük sürenin sonunda azalma eğilimine girdikleri tespit edilmiştir. En büyük dayanım kayıpları %10 sülfat çözeltisinde ve SD içermeyen numunelerde görülmüştür. Beton numunelerinin zamanla sülfat saldırıları etkisinde kalması sülfat etkinlik derecesinin artması ve puzolan kullanım oranının azalması etkinin şiddetinin artmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Beton numunelerin çok kuvvetli sülfat etkisine maruz bırakılması kısa periyotta sülfat hasarları hakkında bilgi edinilmesini kolaylaştırmıştır.



Şekil 21. Silindir numunenin basınç testleri sonucu görünümü

6-) Sodyum sülfat çözeltisi içindeki sülfat iyonlarının çimentonun hidrate bileşenleri ile kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan etrengit ve alçı taşı, erken yaşlarda betonun basınç dayanımının artmasında etkili olduğu, sülfat çözeltisinin konsantrasyonunun artması ve SD içeriğinin azalması ile betonun şiddetli sülfat etkisine maruz kaldığı görülmüştür. SDnin pozolanik etkisinden dolayı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile girmiş oldukları reaksiyonlar sonucu betonun dayanımını ve dayanıklılığını artırdığı, sülfat saldırılarına karşı sağlamış olduğu olumlu etkiler ve çok küçük taneler içermesinden dolayı betonun içindeki mikro boşlukları doldurması sülfat saldırılarına karşı koymada etkili olmaktadır.

7-) Numunelerin boyca uzama değerleri incelendiğinde %5 sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde %0 SD ve %5 SD içeren örneklerin 120 günlük deney süresi sonunda kritik değer olarak kabul edilen %0,1 sınırını aştığı görülmüştür. %10 Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin çok kuvvetli sülfat etkinlik derecesine maruz kalması nedeniyle bütün numunelerin 120 gün sonunda kritik uzama değerinin üzerine çıktıkları görülmüştür. Artış hızının 90 güne kadar çok hızlı bir şekilde olduğu 120 günde artışın devam ettiği ancak artış hızının azaldığı tespit edilmiştir. Beton numunelerdeki boşlukların sülfat iyonlarının doldurması nedeniyle artış hızının azalttığı düşünülmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında SD kullanımının sülfat saldırılarına karşı büyük faydalar sağladığı görülmüştür. Numunelerin doluluk oranının yükselmesi ve boşluk oranının azalması ile dış sülfat etkisine karşı daha dayanımlı hale geleceği görülmektedir. Sülfat etkisinin 90 günlük sürenin sonunda ortaya çıkmaya başladığı

numunelerin dış yüzeylerinde beyaz lekelerle kendini gösterdiği, ilerleyen dönemlerde kılcal çatlakların oluşmaya başladığı ve özellikle köşe noktalarında aşınmaların ve ayrışmaların olduğu gözlemlenmiştir.

Kiriş numunelerin genleşme miktarı ölçülürken, numunelerin çözelti içinde askıda kalması diğer numunelerle fiziksel temasını önleyeceği gibi, numunenin kendi ağırlığından dolayı oluşabilecek uzamaların da önüne geçilebilecektir. Çalışmanın daha uzun periyotlarda yapılması durumunda beton numunelerde görülecek fiziksel etkinin şiddeti ortaya çıkacaktır. Ayrıca elektron mikroskobu yardımıyla alınacak SEM görüntülerinin gerçekleşecek kimyasal reaksiyonların sonucu oluşacak ürünlerin ve meydana gelecek hacim artışlarının tespit edilmesinde büyük fayda sağlayacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Alam, B., Ashraf, M., Shahzada, K., Afzal, S., 2012. Sulphate Attack in High Performance Concrete - A Review. International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, 01(01), 15-18.
- Anonymous (2014). Water in concrete. <https://www.forconstructionpros.com/>
- Anonymous (2016). High Strength Concrete. <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/33pr.pdf>.
- Anonymous (2023). What is the Purpose of Concrete Mix Design? <https://learningtechnologyofficial.com/>
- Anonymous (2023). Durability. <https://www.cement.org/learn/concrete-technology/durability>
- ACI 234R-96,(2000). Guide for the Use of Silica Fume in Concrete. American Concrete Institute, Michigan
- ACI 363R-10,(1997). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. American Concrete Institute, Michigan
- Ambrose, E.E., Ogrigbo, O.R. and Ekop, I.E.(2023). Compressive Strength and Resistance to Sodium Sulphate Attack of Concrete Incorporated with Fine Aggregate Recycled Ceramic Tiles. J. Appl. Sci. Environ. Manage. Vol. 27 (3) 465-472
- Arslan, K., 2014. Sülfat Etkisine Maruz Kalmış Mineral ve Nano Katkılı Harçların Durabilitesi. Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ASTM C1012/ C1012M-18b, (2019). Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.
- ASTM C1038/C1038M-19, (2020). Standard Test Method for Expansion of Hydraulic Cement Mortar Bars Stored in Water.
- ASTM C452-21, (2021). Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulphate. Exposed to Sulfate
- Atabey, İ.İ., Çelikten, S., Yurt, Ü. (2020). Farklı Mineral Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonlarda Metagabro Agregalarının Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Academic Platform Journal of Engineering and Science 8-3, 514-522
- Bakharev, T.(2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. Cement and concrete research, 35(6), 1233-1246
- Baradan, B., Yazıcı, H.,2003. Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler. Türkiye Mühendislik Haberleri, 426s (2003/4), 62-69.
- Baradan, B.,Yazıcı, H., Ün,H., 2010. Betonun Kimyasal Nedenlerle Bozulması. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 89-107.
- Baradan, B.,Yazıcı, H., Ün,H., 2010. Giriş. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 1-2.
- Birol,T.,Yavaş, A., (2017). Betonarme Kirişlerde Ultra Yüksek Dayanımlı Beton Kullanımının Etilme Performansına Etkisi. BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, XX(X), 1-15.

- Caldarone, A.M., 2009. High-Strength Concrete. Taylor and Francis Group, 252, USA.
- Constantinescu, H., Ghermanb, O., Negrutia, C., Ioana, S., 2015. Mechanical Properties of Hardened High Strength Concrete. 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, Romania.
- Çebi, Y. M., 2009. Geleneksel ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Dayanım Gelişiminin Farklı Kür Koşulları Altında İncelenmesi. Y.Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Çelebi, O., 2006. Orta ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Başlık Malzemesinin Basınç Dayanımına Etkisi. Y.Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Dallı, K., 2017. Farklı Kalıp Yağlarının Yapay Puzolan Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonlardaki Etkileri. Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Demir, T., Demirel, B., ve Demirbilek, A. 2022. Farklı Su/Bağlayıcı ve Kimyasal Katkı Oranlarına Sahip Yüksek Dayanımlı Betonların İşlenebilirlik ve Dayanım Özellikleri. Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, 34(1), 161-170.
- Engin, Y., 2015. Yüksek Dayanımlı Beton. <http://www.betonvecimento.com> (2015).
- Ersoy, U., Tankut, T., 1991. Yüksek Dayanımlı Betonun Yapısal Davranışı İle İlgili Bir İrdeleme. 2.Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- Eser, N., 2015. Yüksek Dayanımlı Betonun Kalitesinin İncelenmesi. Y.Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Esmailzadeh, A., 2013. Mineral Katkılı Hafif Betonlarda Sülfat Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Güner, M., Süme, V., 2001. Malzemelerin Genel Özellikleri . Yapı Malzemesi ve Beton. Aktif Yayınevi (3.Baskı), İstanbul, 1-33.
- Gouda M. Ghaniem, Sameh Yehia, Mohamed Helmy , Nehal Mohamed., , July-2022, Effect of Sulphate Attack on Compressive Strength of Geopolymer Concrete. International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 13, Issue 7
- Kawai, T., 2005. State-Of-The-Art Report on High-Strength Concrete in Japan – Recent Developments and Applications. JSCE-VIFCEA Joint Seminar on Concrete Engineering, Japanese.
- Kocataşkın, F., 1991. Yüksek Dayanımlı Betonun Bileşimi. 2.Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- Kosmatka, S., Wilson, M., 2016. High-Performance Concrete. Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association, USA, 299-314.
- Kovacevic, I., Dzidic, S., 2018. High-Strength Concrete (HSC) Material For High-Rise Buildings. 12th Scientific Research Symposium with International Participation "Metallic and Nonmetallic Materials, Bosnia.
- Lee, S.T., Moon, H.Y., & Swamy, R.N. (2005). Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss. Cement and Concrete Composites, 27(1), 65-76
- Lv, X., Yangc, L., Li, J., Wang, F., 2022. Roles of fly ash, granulated blast-furnace slag, and silica fume in long-term resistance to external sulfate attacks at atmospheric temperature. Cement and Concrete Composites, 133, 104696
- Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. Cement and concrete composites, 26(4), 347-357.

- Merida, A., Kharchi, F.,2015. Pozzolan concrete durability on sulphate attack. 1st International Conference on Structural Integrity, Portugal.
- Panjehpour,M., Ali ,A., Demirboga, R.,2011. A review for characterization of silica fume and its effects on concrete properties. International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology, 2(2180-3242), 1-7.
- Park, C. K., Noh, M. H., & Park, T. H. (2005). Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and concrete research*, 35(5), 842-849.
- Pertiwi D., Maria T., Agusdini C., Komara I., Wahyu A.,2023. Performance of High- Strength Concrete Properties for Two Locally Available Aggregates: Partial Gradation Approaches. Trends in sciences, 20(3), 6370
- Saleh, I. S.,2017.Effect of External and Internal Sulphate on Compressive Strength of Concrete. International Journal of Applied Engineering Research, Volume 12 (Number 20), 10324-10333.
- Sezer, G.İ.(2012). Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silicafume mortars. Construction and Building Materials, 26(1),613-618.
- Shannag, M.J., Shaia, H. (2003). Sulfate Resistance of High-Performance Concrete. Cement & Concrete Composites 25 (2003) 363–369.
- Sümer, M., Söyler, B.,2002.Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Çimento ve Süperakınlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği. SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6.Cilt (3.Sayı), 15-20.
- Tekin, İ., 2010. Sülfat Etkisine Maruz Farklı Çimento Harçlarındaki Makro Boşluk Yapısı Gelişiminin Bilgisayarlı Tomografi Yöntemi İle İncelenmesi. Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tosun ve ark. (2008) “Portland Kalkerli Çimento Üretiminde Mekanik Performans ve Sülfat Kaynaklı Durabilite Problemleri Açısından Optimum Kalker Oranının Belirlenmesi”
- TS EN 206+A2, Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk- Bölüm 3: Yüksek Dayanımlı Beton, Nisan 2021.
- TS 706 EN 12620+A1, 2009. Beton Agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA.
- TS EN933–1, Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini, Eleme Yöntemi, Nisan 2012.
- TS EN 1097-6, 2022, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2, 2019, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-6, 2019, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2019, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390–7,2019, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun birim hacim kütlesinin tayini, Eylül 2019.
- TS EN 933-1, 2012, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 933-2, 2020, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler kısım 2: Tane boyutu dağılım tayini-Deney elekleri, elek göz açıklıklarını anma büyüklükleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Uğur, A., 2007. Lif Donatıların Yüksek Dayanımlı Betonlarda Yarma Dayanımı-Basınç Dayanımı İlişkisine Etkisi. Y.Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ustabaş, İ., 2008. Sülfat Etkisine Maruz Mineral Katkılı Beton ve Harçların Performansının İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T., Coşkun, U.,2005. Agregada Granülometrisinin Yüksek Performanslı Beton Özelliklerine Etkisi. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2005(2), 13-20.
- Ünsal, A. Ve Şen, H.,2008. Giriş. Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 1-4.
- Üzümeri, Ş., Özden,Ş., 1991. Yüksek Dayanımlı Betonun İnşaatda Kullanımı Konusunda Standartlar ve Yönetmeliklerdeki Gelişmeler. 2.Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- Wang, D., Zhou, X., Meng, Y., & Chen, Z. (2017). Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. Construction and Building Materials, 147, 398-406.
- Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Aydın, S., Karabulut, A.Ş. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. Construction and building materials, 23(3), 1223-1231.
- Yeğinoğlu, A. 2009. Giriş. Silis Dumanı ve Çimento İle Betonda Kullanımı. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 7-9.
- Yeğinoğlu, A., Ertün, T. 2009. Genel Çimentolar. Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 7-12.
- Yıldız, M., Ürün,E., 2010. Konya II. Organize Sanayi Bölgesinde Sülfatlı su içeren zeminlerde oluşturulan betonarme kazıklarda beton taşıma gücüne sülfatın etkisi. SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7.Cilt (3.Sayı), 1-11.
- Yılmaz,K., Alemdar, M., 2003.Yüksek Dayanımlı Betonlarda Numune Boyutundaki Değişimin Basınç Dayanımına Etkisi. SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25.Cilt (2.Sayı), Syf 243.
- Yılmaz, F., Mertol, H. C., 2011. Türkiye’de Yüksek Dayanımlı Beton’un Kullanımı – Standartlar, Tasarım ve Yapım. 2. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Eskişehir.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Emrah AKSAKAL
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
TMMOB Ankara İnşaat Mühendisleri Odası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	