

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÖGÜTÜLMÜŞ BAZALT İLE ÜRETİLEN KENDİLİĞİNDEN
YERLEŞEN HARÇLARIN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ**

Esra TÜRK

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yapı Bilim Dalı

ARALIK 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

ÖĞÜTÜLMÜŞ BAZALT İLE ÜRETİLEN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

Tez Yazarı
Esra TÜRK

Danışman
Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ

ARALIK 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Öğütülmüş Bazalt ile Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Durabilite Özellikleri

Yazarı: Esra TÜRK

İlk Teslim Tarihi: 06.11.2022

Savunma Tarihi: 12.12.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ Fırat Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Ragıp İNCE Fırat Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Nihan GÜLMEZ Munzur Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Öğütölmüş Bazalt ile Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Durabilite Özellikleri” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteğı olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

12.12.2022

Esra TÜRK



ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesi ve tezin hazırlanması sırasında bilgi ve birikimlerini devamlı aktaran, desteğini hiç esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ'a, FTIR analizleri için Bingöl Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Arş. Gör. Murat Dener'e, tecrübesi ve yardımlarıyla çalışmaya katkısı bulunan Burcu YILMAZ YILDIZ'a, süper akışkanlaştırıcı temininde bilimsel çalışmalarını destekleyen ve herhangi bir bedel talep etmeyen Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye, çimento temini için SEZA Çimento A.Ş.'ye, bazalt temini için Birlik Beton A.Ş.'ye, magnezyum sülfat çözeltisinin hazırlanması konusunda yardımcı olan Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Filiz KAR'a ve Arş. Gör. Fatih KAYA'ya, deneysel çalışmalarım sırasında yardımcı olan Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğr. Gör. A. Tevfik Bildik'e ve emeği geçen diğer hocalarım ile bölüm çalışanlarımıza, her zaman yanımda olan desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Esra TÜRK
ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON/HARÇ	4
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları.....	4
2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları.....	4
2.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Özellikleri	5
2.4. KYB’de Kullanılan Malzemeler.....	5
2.4.1. Çimento	6
2.4.2. Agregası.....	6
2.4.3. Mineral Katkılar	7
2.4.4. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkılar	10
2.4.5. Karışım Suyu.....	12
2.5. Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Kullanılan Deney Yöntemleri	12
2.5.1. KYB’ de Çökme-Yayıma ve T ₅₀₀ Deneyi	12
2.5.2. V Hunisi Deneyi.....	14
2.6. Çimento Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri.....	14
3. BETONDA SÜLFAT ETKİSİ.....	17
3.1. İç Kaynaklı Sülfat Etkisi.....	17
3.2. Dış Kaynaklı Sülfat Etkisi	18
3.2.1. Magnezyum Sülfat (MgSO ₄) Etkisi.....	19
3.2.2. Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (DEF).....	20
3.2.3. Sülfat Etkisini Azaltıcı Önlemler	21
4. MATERYAL VE METOT	22
4.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	22
4.1.1. Portland Çimentosu	22
4.1.2. Öğütülmüş Bazalt.....	23
4.1.3. Silis Dumanı.....	24
4.1.4. Agregası.....	24
4.1.5. Su	25
4.1.6. Kimyasal Katkı.....	25
4.1.7. Magnezyum Sülfat (MgSO ₄) Çözeltilisi.....	25
4.2. Numune Boyutları	25
4.3. Karışım Hesabı	26
4.4. KYH’nin Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kürü.....	27
4.5. Taze Harç Deneyleri.....	29
4.5.1. Mini Çökme Yayıma Deneyi	29

4.5.2. Viskozimetre Deneyi.....	30
4.6. Sertleşmiş Harç Deneyleri	31
4.6.1. Üç Noktalı Eğilme ve Basınç Deneyleri	31
4.6.2. Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri	34
4.6.3. Kapiler Su Emme Deneyi.....	34
4.6.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi	35
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
5.1. Taze Harç Deney Sonuçları.....	37
5.1.1. Mini Çökme-Yayıma Deney Sonuçları	37
5.1.2. Viskozite Deneyi Sonuçları.....	38
5.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları	40
5.2.1. Sülfat Etkisiz Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	40
5.2.2. Sülfat Etkisinden Sonra Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	43
5.2.3. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite	49
5.2.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi Sonuçları	52
6. SONUÇLAR.....	56
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Öğütülmüş Bazalt ile Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Durabilite Özellikleri

Esra TÜRK

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2022, Sayfa: xii + 62

Bu tez çalışmasının amacı bazalt tozu ve silis dumanı ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların (KYH'nin) dayanıklılığı ve mekanik performansının araştırılmasıdır. Bu doğrultuda kontrol karışımı ile birlikte %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35 ve %40 bazalt tozu ikamesi içeren ikili karışımlar ile %10 silis dumanı ve %5, %10, %15, %20 oranlarında bazalt tozu ikamesi içeren üçlü karışımlar olmak üzere toplamda 13 farklı karışımdan 5 seri harç numunesi üretilmiştir. Üretilen taze ve sertleşmiş harçların üzerinde işlenebilirlik ve dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. 180 gün kür süresi sonunda sülfat çözeltilisinde bekletilen numunelerin dayanım değerleri suda bekletilenlerle karşılaştırılmıştır.

Bazalt tozu ve silis dumanı ikamesinin harç numunelerinin mekanik özellikleri, kılcal su emme oranları, toplam su emmeleri, poroziteleri ve sülfat dirençleri belirlemek için deneyler yapılmıştır. Çalışma sonucunda bazalt tozu ve silis dumanının birlikte kullanılmasının dayanıma katkı sağladığı görülmüştür. %10'a kadar bazalt tozu kullanımının KYH'nin mekanik özelliklerini arttırdığı belirlenmiştir. Bazalt tozu kullanımının sülfat atağına karşı olumlu etki gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bazalt tozu, Silis dumanı, Kendiliğinden yerleşen harç, Sülfat direnci

ABSTRACT

Durability Properties of Self-Compacting Mortars Produced With Ground Basalt

Esra TÜRK

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

December 2022, Pages: xii + 62

The aim of this thesis is to investigate the durability and mechanical performance of self-compacting mortars (KYH) produced with basalt powder and silica fume. Accordingly, binary mixtures containing 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% and 40% basalt powder substitute together with the control mixture, 10% silica fume and 5%, 10%, 15%, 5 series of mortar samples were produced from 13 different mixtures in total, including triple mixtures containing 20% basalt powder substitution. Workability and strength tests were carried out on the fresh and hardened mortars produced. At the end of the 180-day curing period, the strength values of the samples kept in sulfate solution were compared with those kept in water.

Experiments were carried out to determine the mechanical properties, capillary water absorption rates, total water absorption, porosity and sulfate resistance of the mortar samples of basalt powder and silica fume substitution. As a result of the study, it was seen that the use of basalt powder and silica fume together contributed to the strength. It has been determined that the use of basalt powder up to 10% increases the mechanical properties of KYH. It has been observed that the use of basalt powder has a positive effect against sulfate attack.

Keywords: Basalt powder, Silica fume, Self-compacting mortar, Sulfate resistance

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	Normal beton ile KYB'nin karışım oranlarının karşılaştırılması 6
Şekil 2.2.	(a) çökme-yayıma tablası; (b) deney konisi..... 13
Şekil 2.3.	V Hunisi..... 14
Şekil 2.4.	Eğilme dayanımı tayini için yükleme düzeneği 15
Şekil 2.5.	Basınç dayanımı için yükleme düzeneği..... 16
Şekil 3.1.	Betonda sülfat etkisi..... 17
Şekil 4.1.	Öğütülmüş bazalt 23
Şekil 4.2.	Harç agregasının granülometri eğrisi 24
Şekil 4.3.	40x40x160 mm'lik prizmatik ve 50 mm'lik küp kalıplar 25
Şekil 4.4.	(a) Kalıplardaki numuneler, (b) Şebeke suyunda kür edilen numuneler, (c) Magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin ilk hali, (d) Magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin 180 gün sonundaki görünümü..... 28
Şekil 4.5.	Mini çökme yayılma konisi 29
Şekil 4.6.	Mini çökme yayılma çapının belirlenmesi..... 30
Şekil 4.7.	Brookfield DV-E model viskozimetre 31
Şekil 4.8.	(a) Üç noktalı eğilme deneyi, (b) Eğilme deneyine maruz kalmış numune, c) Eğilme dayanım değeri 32
Şekil 4.9.	(a) Basınç deneyi, (b) Basınç deneyine maruz kalmış numune, (c) Basınç dayanım değeri.... 33
Şekil 4.10.	Kapiler su emme deney düzeneği 35
Şekil 4.11.	24 saat sonunda su emmiş numunelerin görüntüsü..... 35
Şekil 4.12.	FTIR cihazı 36
Şekil 5.1.	Bağıl çökme-yayıma grafiği 38
Şekil 5.2.	Viskozite grafikleri a) İkili karışımlar, b) Üçlü karışımlar 39
Şekil 5.3.	Şehir şebeke sulu ortamda kür edilen numunelerin eğilmede çekme dayanım grafiği 41
Şekil 5.4.	Şehir şebeke sulu ortamda kür edilen numunelerin basınç dayanım grafiği 42
Şekil 5.5.	MgSO ₄ çözeltili ortamda kür edilen numunelerin eğilmede çekme dayanım grafiği 44
Şekil 5.6.	180 gün sonunda eğilme dayanımları 45
Şekil 5.7.	MgSO ₄ çözeltisinde bekletildikten sonraki eğilme dayanımındaki artış..... 45
Şekil 5.8.	MgSO ₄ çözeltili ortamda kür edilen numunelerin basınç dayanım grafiği 46
Şekil 5.9.	180 gün sonunda basınç dayanımı 47
Şekil 5.10.	MgSO ₄ çözeltisinde bekletildikten sonraki basınç dayanımındaki azalış 47
Şekil 5.11.	Eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki..... 48

Şekil 5.12.	Kapiler su emme katsayıları.....	49
Şekil 5.13.	50 mm'lik küp numunelerin toplam su emme oranları	51
Şekil 5.14.	50 mm'lik küp numunelerin porozite oranları	52
Şekil 5.15.	Suda bekletilen B5SD10 kodlu numunenin FTIR spektrumu.....	53
Şekil 5.16.	MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen B5SD10 kodlu numunenin FTIR spektrumu.....	53
Şekil 5.17.	Suda bekletilen B20SD10 kodlu numunenin FTIR spektrumu.....	54
Şekil 5.18.	MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen B20SD10 kodlu numunenin FTIR spektrumu.....	54



TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Mineral katkı tipleri ve sınıfları	7
Tablo 2.2. Silis dumanının kimyasal bileşenleri	8
Tablo 2.3. Silis dumanının taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkileri	9
Tablo 2.4. Bazaltın kimyasal bileşenleri	9
Tablo 2.5. Bazaltın mekanik ve fiziksel özellikleri.....	10
Tablo 4.1. CEM I 42,5 R tipi çimentonun kimyasal özellikleri	22
Tablo 4.2. CEM I 42,5 R tipi çimentonun fiziksel özellikleri	23
Tablo 4.3. Öğütülmüş bazaltın kimyasal ve fiziksel özellikleri	23
Tablo 4.4. Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri	24
Tablo 4.5. Akışkanlaştırıcı katkıya ait özellikler	25
Tablo 4.6. Harç karışım oranları	27
Tablo 5.1. Mini çökme-yayılma deney sonuçları.....	37
Tablo 5.2. Farklı açısız hız değerleri için harçların viskozite değerleri	38
Tablo 5.3. Şehir şebeke suyu küründeki KYH numunelerinin eğilme ve basınç dayanım değerleri	40
Tablo 5.4. MgSO ₄ çözültüsü küründeki KYH numunelerinin eğilme ve basınç dayanım değerleri	44
Tablo 5.5. KYH numunelerinin etüv kurusu, su içerisindeki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları	50
Tablo 5.6. 50x50x50 mm'lik küp numunelerin yoğunlukları	50
Tablo 5.7. 50x50x50 mm'lik küp numunelerin toplam su emme kapasitesi ve porozite	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

cP	: Viskozite değerleri
d	: Denev soncu elde edilen ortalama yayılma çapı (mm)
d ₀	: Kesik koninin alt çapı (mm)
Rpm	: Açısal hız
SA	: 1 m ³ betonda kimyasal katkı miktarı (kg)
t	: Geçen zaman (s)
W ₁	: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr)
W ₂	: Numunenin sudaki ağırlığı (gr)
W ₃	: Numunenin dovgun kuru yüzey ağırlığı (gr)
Γ _m	: Bağıl çökme yayılma değeri

Kısaltmalar

CaO	: Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
CaCO ₃	: Kalsiyum karbonat
C-A-H	: Kalsiyum Alüminat Hidrat
C-S-H (C ₃ S ₂ H ₃)	: Kalsiyum Silika Hidrat (xMgO.ySiO ₂ .yH ₂ O)
CO ₂	: Karbondioksit
C \bar{S} H ₂	: Alçıtışı (CaSO ₄ .2H ₂ O)
CH	: Kalsiyum hidroksit (Ca(OH) ₂)
C ₃ A	: Trikalsiyum Alüminat (3CaOAl ₂ O ₃)
C ₆ A \bar{S} ₃ H ₃₂	: Etrenjit (6CaO.Al ₂ O ₃ .3SO ₃ .32H ₂ O)
EFNARC	: European Federation of National Trade Associations
g	: Gram
kg	: Kilogram
KYB	: Kendiliğinden yerleşen beton
KYH	: Kendiliğinden yerleşen harç
lt	: Litre
M-S-H	: Magnezyum Silika Hidrat (xMgO.ySiO ₂ .yH ₂ O)
MgSO ₄	: Magnezyum Sülfat
MH	: Brusit (Mg(OH) ₂)
N	: Newton
NaSO ₄	: Sodyum Sülfat
ÖB	: Öğütölmüş bazalt
SD	: Silis dumanı
SiO ₂	: Silisyum dioksit
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu kül
YFC	: Yüksek fırın cürufu

1. GİRİŞ

Beton; çimento, agrega, su ve ihtiyaç olması durumunda mineral ve kimyasal katkı maddelerinden oluşan heterojen bir yapı malzemesidir [1]. Beton; ulaşımının kolay olması, ucuz olması ve üstün mekanik özellikleri gibi birçok sebep ile konut, yol, baraj, endüstriyel yapılar vb. birçok mühendislik yapısında kullanılan en önemli yapı malzemesi durumundadır. İşlenebilirlik, dayanım, dayanıklılık ve ekonomiklik betonda istenilen niteliklerdir [2].

Beton teknolojisi konusunda yapılan çalışmalarda farklı katkı malzemeleri ile farklı özelliklerde kullanım amacına uygun betonlar geliştirilmiştir. Bu doğrultuda yeni nitelikler kazandırılarak üretilen; kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB), su altında dökülebilen beton, ağır beton, hafif beton, püskürtme beton, lifli beton, kendi hasarını onarabilen beton, köpük beton, geçirgen beton çeşitleri bulunmaktadır.

Özel betonlardan biri olan KYB, ayrışma ve terleme gibi sorunlar yaratmayarak kohezyonunu koruyabilen, kendi ağırlığı ile sık donatılı dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç ve dış vibrasyona gerek kalmadan sıkışabilen, akıcı kıvamlı bir betondur [3]. KYB’de kimyasal katkılar, puzolanik mineral katkılar ve akışkanlaştırıcıların tamamı ya da bir bölümünün kullanılması gerekmektedir [2]. KYB’nin kalıpları doldurma becerisi ve yüksek ayrışma direnci temel özelliklerindedir. Kalıplara doldurulurken vibratör kullanımına gerek duyulmamasına, uygulamanın daha hızlı olmasına ve işçiliğin azalmasına olanak sağlamaktadır.

Türkiye Hazır Beton Birliği’nin 2020 yılı istatistiklerine göre Türkiye’de 95 milyon metreküp beton üretilmiştir. Bu miktar Avrupa Birliği ülkelerinin tamamında aynı yıl üretilen toplam beton miktarının % 37.6’sıdır. Betonun bu kadar çok kullanılması beraberinde çimentonun da önemini belirlemektedir. Ancak çimento üretiminin global karbondioksit (CO₂) emisyonuna katkısı yadsınamaz. Bu doğrultuda sera gazlarının emisyonlarını azaltmak, maliyeti düşürmek, doğal kaynakların verimli kullanılmasını sağlamak ve betonun diğer özelliklerini iyileştirmek için alternatif ekipmanlar kullanılmaktadır.

Betonun daha çevreci ve daha ekonomik olabilmesi ile birlikte daha iyi performans gösterebilmesi için çimento ikamesi olarak puzolanlar kullanılmaktadır. Puzolanlar elde edildikleri kaynaklara göre; doğal malzemeler, ısı işlem görmüş malzemeler ve endüstride yan ürün olarak elde edilen malzemeler olmak üzere üç gruba ayrılırlar [1]. Katkı maddesi olarak kullanılacak mineralin SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ değerinin %70’ten az olmaması şarttır [4]. Çimento ile ikameli olarak kullanılan silis dumanı puzolanik bir mineral katkı maddesidir. Beton ve harca ilave edilen silis dumanı, gözeneklerin geçirimsiz olmasını ve süresiz yapı oluşturmasını sağlamaktadır [5].

Bazalt, lavların donması sonucunda oluşan ve koyu gri-siyah renklere sahip volkanik bir kayadır. Su emmeye, dona, darbeye, paslanmaya karşı dayanıklı olan bu madde renk değiştirmez ve aşırı camsı bir özellik taşımaz. Bu sebeple kılcal çatlaklar oluşturmaz ve asitlere karşı

dayanıklıdır [6]. Bazalt agregası üretilirken ortaya çıkan bazalt tozunun çevreye ve insan sağlığına zararı yadsınamaz. Bu zararı minimize etmek için birçok çalışma yürütülmektedir.

Yapıların servis ömürleri boyunca fonksiyonlarını bozulmadan yerine getirebilmelerine durabilite veya dayanıklılık denir. Beton üzerinde zararlı etkisi bulunan sülfat, çimentodan kalsiyum hidroksit ve kalsiyum alüminat hidrat ile sülfat iyonları arasında betonda genişmeye neden olan ürünler oluşurmasıyla meydana gelen bir reaksiyondur. Bu ürünler jips ve etrenjit olup betonda çatlak oluşumu, genişleme ve yüzeyin pul pul dökülmesiyle sonuçlanan hasara, dolayısıyla dayanım kaybına neden olmaktadır. Ayrıca sülfatın etkisiyle hidrate portland çimentosundaki safhalardan olan kalsiyum silika hidratın ve kalsiyum hidroksitin bozulmasıyla adezyon kuvvetleri zayıflar, bu durum da dayanım kaybına sebep olmaktadır. Basınç dayanımındaki değişimin incelenmesi betonda sülfatın etkisini gözlemleyebilmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Betonun basınç dayanımında sülfatın etkisiyle erken yaşlar hariç artış gözlemlenmemiştir [7].

Akyüncü ve Cihan tarafından atık bazalt tozunun betonda çimento ikamesi olarak kullanılabilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, kontrol serisi ve belirli oranlarda çimentonun azaltılıp atık bazalt tozunun kullanıldığı seriler olmak üzere beş farklı seri harç numunesi üretilmiş, taze ve sertleşmiş harç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda atık bazalt tozunun %10 ikameli kullanımında basınç dayanımında, %15 ikameli kullanımında eğilme dayanımında artış gözlemlenmiştir. %10 ikameli seride basınç altında su işleme derinliği düşüş göstermiş olup olumlu yönde katkı sunmuştur [8].

Doğruyol, Diyarbakır bazaltının betonda agrega olarak kullanılabilirliğini incelemiş, mineral katkı olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanmıştır. Diyarbakır bazaltının mineral katkıları ile beraber kullanılmasının betonun dayanımını arttırdığını ve sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde kimyasal bozulmaya karşı dayanıklılığın arttığını yaptığı beton basınç deneyleri ile belirlemiştir [9].

Orhan ve arkadaşları bazalt kayacının betonda agrega olarak kullanımı sonucunda betonun dayanıklılığını, ısı iletkenliğini ve mikroorganizmalara karşı davranışını incelemiştir. Yaptıkları deneyler sonucunda betonun ısı iletkenlik katsayısı 0.2497 W/mK olarak hesaplanmıştır. Farklı agregalarla üretilen birçok betona göre bazalt agregasıyla üretilen betonun ısı iletkenlik katsayısının daha düşük olduğu saptanmıştır. Uygulanan deneyler sonucunda üretilen betonların normal dayanıma sahip oldukları gözlemlenmiştir. Ayrıca anaerobik ortamda canlılık gösteren Clostridium bakterilerine karşı bazalt agrega ile üretilen betonun bu bakterilerin hareketlerini kısıtlayıcı nitelikte olduğu belirlenmiştir [10].

Kahveci ve Kadayıfçı yaptıkları çalışmada, Diyarbakır yöresine ait bazalt taşının yapısal özelliklerini incelemiştir. Gözenekli ve gözeneksiz bazaltlar karşılaştırılmış ve kullanım alanları gösterilmiştir. Bazalt taşları üzerinde yapılan deneyler doğrultusunda gözeneksiz bazaltın basınç dayanımı, çekme dayanımı, darbe dayanımı, sürtünme ile aşınma dayanımının daha yüksek çıktığı

gözlemlenmiştir. Gözenekli bazaltın ise yoğunluğunun daha az olduğu, özgül ısı kapasitesinin daha düşük olduğu ve su emme oranının gözeneksiz bazalta kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir [11].

Balaneji, farklı mineral katkılı betonların sülfat direncini belirlemek için yaptığı çalışmada; betonda çimentoyu azaltıp yerine yüksek fırın cürufu, silis dumanı, zeolit ve uçucu külü belirli oranlarda kullanmıştır. Üretilen betonlar belirli zaman aralıklarında basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve birim ağırlık deneylerine ayrı ayrı tabi tutulmuştur. Ayrıca 28 gün kür havuzunda numuneler bekletildikten sonra sülfatlı çözeltiliye bırakılıp sülfat deneyleri gerçekleştirilmiştir. SD kullanılan numunelerin kontrol numunesine oranla basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu ve sülfatlı ortamda da SD kullanılarak üretilen grubun kontrol grubuna göre sülfat direncinin daha iyi olduğu, sülfat etkisinden sonra da kontrol grubuna göre basınç dayanım değerlerinin daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. UK ve YFC kullanılarak üretilen betonlarda, UK ve YFC miktarları %30'a kadar olduğunda basınç dayanımlarının kontrol grubuna kıyasla daha yüksek çıktığı ve sülfata maruz kaldıklarında her oranda kontrol grubuna göre sülfata daha dirençli olup dayanımlarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Zeolit katkılı betonlarda ise zeolit oranı %30' a kadar olan numunelerde kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında artış gözlemlenmiş, sülfatlı ortamda bekletildikten sonra zeolit oranı %30' a kadar olan numunelerde kontrol numunesine kıyasla yine basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir [12].

KYB'nin tasarımı genellikle harç veya hamur üzerinde yapılan ön çalışmalarla belirlenir. KYB'de harç karakteristiklerinin baskın olması, harçta deney yapmanın daha rahat olması ve harcın tasarımın temelini oluşturması harç deneylerinin üstün nitelikleridir.

Bu tez çalışmasında, kendiliğinden yerleşen harç (KYH) içerisinde çimento ile ikameli olarak öğütülmüş bazalt (ÖB) ve silis dumanı (SD) mineral katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bu mineral katkılar ile üretilen harç numunelerinin farklı kür (magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltili kür ve şehir şebeke suyu kür) altındaki dayanımları incelenmiştir. Karışım oranlarını belirleyebilmek için işlenebilirlik ve kıvam deneyleri yapılmış ve daha sonra harç karışımlarıyla hazırlanan $40 \times 40 \times 160$ mm prizmatik numuneler üzerinde eğilme çekme ve basınç deneyleri yapılmıştır. 50 mm küp numunelerde ise kapiler su emme deneyi, toplam su emme deneyi yapılmıştır.

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON/HARÇ

KYB, kendi ağırlığı ile yerleşebilen, yüksek ayrışma direncine sahip özel bir betondur. Eskiden beton sadece agrega, çimento ve sudan oluşmaktaydı. Gün geçtikçe kalifiye işçideki azalmayla dar kesitli ve sık donatılı alanlarda döküm kalitesinin azalmasına sebep olmuştur [13]. Döküm sırasında yaşanan bu sorun betonun dayanıklılığını etkilemiş ve özellikle Japonya’ da bu sorunun çözülmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1980’li yıllarda keşfedilen kimyasal akışkanlaştırıcıların da etkisiyle dar ve sık donatıya sahip alanlarda vibrasyon işlemine gerek kalmadan kalıba yerleşebilen beton üretmek üzere çalışmalar yapılmıştır [14]. KYB’nin tasarımı ve prototipi ilk olarak Japonya’da üretilmiştir.

KYB; sık donatılı, dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile yerleşebilen, iç veya dış vibrasyona gerek kalmadan sıkışabilen akıcı kıvamlı özel bir betondur. Bu olumlu özellikleri ile birlikte terleme ve segregasyon gibi olumsuz durumlara karşı stabilitesini korur [3].

Klasik beton üretiminden farklı olarak akışkanlaştırıcı maddeler, kimyasal ve mineral katkıları KYB’de kullanılmaktadır. Bu malzemelerin bazen hepsi birlikte bazen de birkaçı istenilen özelliklere göre kullanılmaktadır.

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları

KYB’de daha çok ince malzeme kullanıldığı için ara yüz bölgesini iyileştirmektedir [15]. Dar, derin, erişilmesi zor kesitler ve sık donatılı alanları doldurma yeteneği yüksektir. KYB’de vibrasyon işlemi yapılmadığı için çalışanları etkileyecek gürültü ve titreşim azalır. Çok az işçilik gerektirdiği için işçilikten kaynaklı hatalar minimuma iner. Betonun donatı ile olan aderansını artırıp boşluksuz bir yapı oluşturarak dayanıklılığa büyük bir katkı sağlar. KYB’nin su emme kapasitesi klasik betona göre daha düşüktür. Kendi ağırlığıyla akıp düzgün bir yüzey oluşturduğu için masterlama işlemi daha kolaydır. Özellikle deprem nedeni ile zarar görmüş yapıların güçlendirilmesinde, kalıplara tek bir noktadan döküm yapılması sırasında kendiliğinden yükselmesi ve yerleşmesiyle çok iyi sonuçlar vermektedir [16].

2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları

Klasik betona kıyasla daha çok Portland çimentosu kullanılması ve katkı maddelerinin kullanılması maliyeti artırmaktadır. Çimentonun daha fazla kullanılması hidrasyon ısısını da yükseltmektedir. Tasarımı ve üretimi aşamasında bilgi birikimi daha çok olan ve uygulama aşamasında tecrübeli kişilerce detaylı olarak yapılması gerekmektedir. Bundan ötürü KYB’nin yaygınlaşması zaman almaktadır [17].

2.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Özellikleri

KYB'nin performansını belirlemede taze betonun özellikleri önemli yer tutmaktadır. Bu doğrultuda taze betonun doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve geçiş yeteneği üç önemli özelliğidir.

Doldurma yeteneği; KYB'nin kendi ağırlığı ile herhangi bir ayrışmaya uğramadan döküldüğü kalıbın şeklini boşluksuz olarak alabilmesidir. İri agregaya, ince agregaya ve bağlayıcı katkı maddeleri arasındaki sürtünmenin azalması ile beton daha homojen dağılım sağlamaktadır. Çimento hamurunda akışkanlık ile akış hızı bir dengede olmalıdır. Bu nedenle katkı maddesi kullanımı ve su/bağlayıcı oranının uygun oranda olması önemli yer tutmaktadır [18].

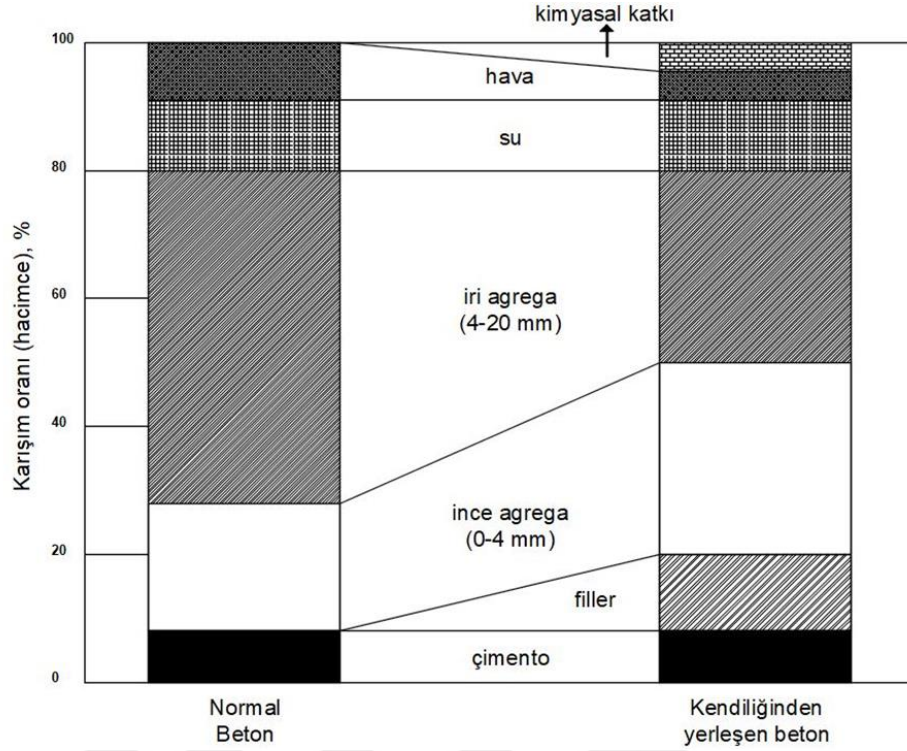
Ayrışmaya karşı direnç; taze betonun karıştırılması, taşınması ve dökülmesi sırasında homojenliğini koruyup gösterdiği kararlılığa denilmektedir. Geleneksel betonda, sık donatılı ve dar alanlarda segregasyon gözlemlenebilmektedir. KYB'de terleme, iri agregaların ayrışması, çimento hamuru ile agregaya ayrışması, hava boşluklarının düzensiz dağılması gibi durumların meydana gelmesi engellenmelidir. Terlemenin azaltılması için harçta kullanılan suyun toz malzeme ile olan oranının (su/toz malzeme) azaltılması gerekmektedir. Terlemeyi azaltmak için viskozite artırıcı katkı maddeleri de kullanılabilir [18].

Geçiş yeteneği; KYB'nin homojenliğini bozmadan sık donatılı dar ve derin kesitli alanlarda istenilen bölgelere ulaşması gerekmektedir. Geçiş yeteneğini sağlamak için en büyük agreganın dane çapını düşürmek ve iri agregaya içeriğini azaltmak, düşük su/toz madde oranını sağlamak ve viskoziteyi arttırmak gerekmektedir [19].

KYB'nin tasarımı sırasında iri agregaya miktarının az tutulması, hiperakışkanlaştırıcı kullanılması, su/ince malzeme oranının azaltılması ve gerekli durumlarda viskozite düzenleyici katkı maddelerinin kullanılması ile istenilen özellikler sağlanabilmektedir.

2.4. KYB'de Kullanılan Malzemeler

KYB, geleneksel betona kıyasla daha az iri agregaya bulundurmaktadır. İri agreganın yerini ince agregaya almakta ve 0.125 mm'lik elek altında kalan malzemeleri de içermektedir. Bu ince malzemeler daha çok uçucu kül, silis dumanı, mermer tozu ve tuğla tozu gibi atık ürünlerdir [20,21]. Şekil 2.1'de normal beton ve KYB'nin karışım oranları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.1. Normal beton ile KYB'nin karışım oranlarının karşılaştırılması [3].

2.4.1. Çimento

Klasik betonda kullanılan çimentolar KYB'de bağlayıcı olarak kullanılabilir. CEM I 42.5 tipi çimento kendiliğinden yerleşen beton için literatürde öngörülmektedir [3]. Kullanılacak çimentonun miktarı $350-450 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. Bu aralığın üzerinde kullanılacak çimento dozajları beton veya harçlarda rötreyi arttırabilir. 350 kg/m^3 altında çimento kullanımında ise çimento ikamesi olarak silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi mineral katkıları karışıma eklenmelidir [19]. Çimento tipi seçiminde dayanım ve dayanıklılık kriterleri ön planda tutulmalıdır. Çimentonun C_3A değerinin %10'un altında olması tavsiye edilmektedir [22]. C_3A oranının %10'un üzerinde olması, etrenjit oluşumunu hızlandırır ve hidrasyon ısısının artışından kaynaklanan su buharlaşması sebebi ile işlenebilirlik azalır. Bu nedenle taşıma ve yerleştirme esnasında betonun/harcın kendiliğinden yerleşme özelliğini yitirmesine neden olur. C_3A 'nın düşük olması ile betonda kullanılacak akışkanlaştırıcıdan da alınan verimi arttırmaktadır [22]. Diğer açıdan C_3A oranı yüksek çimento kullanımı erken yaştaki dayanımı az da olsa arttırmaktadır.

2.4.2. Agrega

KYB'de kullanılacak agrega geleneksel betonda kullanılan agrega ile uyumludur. Ancak KYB'de iri agrega miktarı ile en büyük agrega boyutu azaltılmalı ve agrega özelliklerinin TS EN 12620'nin belirlediği standartlara uygun olması gerekmektedir [23].

KYB’de iri agrega miktarı geleneksel betona kıyasla azaltılıp ince malzeme oranı arttırılmıştır. Tane boyutu 0.125 mm’nin altında bulunan partiküllerin çimento hamuruna ilave edilmesi ile tasarımda ince malzeme oranına dahil edilmektedir [19].

Agrega granülometrisi ve iri agregaların şekilleri kendiliğinden yerleşen betonun akışkanlığını ve geçiş kabiliyetini doğrudan etkilemektedir. Sonuç olarak betondaki boşluk oranını da etkilemektedir. Agregaların şekilleri ne kadar küresel formda olursa birbirlerine yapışma ihtimali azalır ve içsel sürtünmenin azalmasından kaynaklı akışkanlığın artışına sebep olmaktadır [19]. KYB’nin üretiminin kaliteli olması için agregaların; geometrisi, gradasyonu, su emme miktarı, ince agrega/iri agrega oranının optimizasyonu, ince agreganın özellikleri değerlendirilmelidir [19].

2.4.3. Mineral Katkılar

Taze betonun işlenebilirliği ile sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığını arttırmak amacıyla mineral katkıları kullanılmaktadır. Aynı zamanda betonun maliyetini ve üretimi süresince çevreye verdiği zararı azaltmaktadır [24]. KYB’de çimento ikamesi olarak kullanılan mineral katkıları; hidrasyon ısı, karışımın su ihtiyacı, boşlukları doldurma yeteneği ve akışkanlık gibi özelliklerini değiştirebilmektedir [25].

KYB’de kohezyonu arttırmak ve segregasyonu engellemek için birçok malzeme kullanılmakta olup bu malzemeler arasında mineral katkıları çimento ikamesi olarak kullanıldığı için çimento kullanımını azaltır, termik büzülme ve hidrasyon ısını düşürür, çimento hamuru ile agregalar arasındaki aderansı artırır. Tablo 2.1’de mineral katkıların su ile olan reaksiyon özelliklerine göre sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 2.1. Mineral katkı tipleri ve sınıfları [19].

Tip 1	Puzolanik olmayan ya da yarı puzolanik	Mineral filler (kireçtaşı, dolomit vs.)
		Pigmentler
Tip 2	Puzolanik	Silis dumanı
		Uçucu kül
	Hidrolik	Yüksek fırın cürufu

Silis Dumanı

Silis dumanı; yüksek saflığa sahip kuvarsın elektrik ark fırınında kömür ve odun parçaları kullanılarak yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta indirgenmesi ile silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sonucunda oluşan çok ince taneli tozdur. Bu alaşımların üretimi sırasında oluşan gaz formundaki SiO₂, fırının düşük sıcaklığa sahip üst kısımlarında hava ile temas ederek

hızlı bir şekilde yoğunlaşır ve amorf SiO₂'ye dönüşerek silis dumanı bileşimini oluşturur. Silis dumanı amorf yapıya sahip olduğu ve %85-98 arasında SiO₂ içerdiği için puzolanik bir malzemedir [26].

Silis dumanı aynı zamanda silis tozu, silika füme ve mikrosilika olarak da adlandırılmaktadır. SD, çok ince taneli olup tane boyutları 0.1-0.2 µ arasında değişir. Genellikle camsı yapıya sahip, küresel şekilli ve düzgün yüzeyle taneciklerden oluşur. SD'nin inceliği çimentonun %1'i kadardır [27]. Bu nedenle SD'nin su ihtiyacı diğer birçok puzolana göre daha fazladır. Çimento ikamesi olarak kullanılacak SD'nin özgül yüzey alanı 20000 m²/kg civarındadır [2].

Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3.10 – 3.15 g/cm³ değerleri arasında değişirken, SD'nin özgül ağırlığı yaklaşık olarak 2.2 – 2.3 g/cm³ değerleri arasındadır. Betonda çimento ile ikameli olarak kullanılan SD'deki SiO₂ miktarı %85'in üzerindedir. Bazı ülkelerde kullanılan SD'nin kimyasal bileşimi Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Silis dumanının kimyasal bileşenleri [1].

Bileşen	Türkiye	ABD	Norveç
SiO₂	93.0 – 95.0	90.0 – 93.0	90.0 – 96.0
Al₂O₃	0.4 – 1.4	0.5 – 1.6	0.5 – 3.0
Fe₂O₃	0.4 – 1.0	0.4 – 0.7	0.2 – 0.8
MgO	1.0 – 1.5	0.3 – 0.5	0.5 – 1.5
CaO	0.6 – 1.0	0.5 – 0.8	0.1 – 0.5
Na₂O	0.1 – 0.4	0.1 – 0.3	0.2 – 0.7
K₂O	0.5 – 1.0	1.0 – 1.2	0.4 – 1.0
S	0.1 – 0.3	0.1 – 0.2	0.1 – 0.4
C	0.8 – 1.0	1.3 – 2.6	0.5 – 1.4
Kızdırma Kaybı	0.5 – 1.0	1.4 – 2.8	0.7 – 2.5

SD'nin içerisinde bulunan SiO₂, Fe₂O₃ ve Al₂O₃ bileşenlerinin toplam yüzdesinin fazla olması puzolanik aktivitesinin artmasına, karbon miktarının fazla olması ise SD'nin renginin daha koyu olmasına sebep olmaktadır.

Silis dumanının betona karıştırılması ile taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini olumlu ve olumsuz açılardan değiştirmektedir. Tablo 2.3'te SD'nin beton özellikleri üzerindeki etkileri verilmiştir.

Tablo 2.3. Silis dumanının taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkileri [28].

Taze beton özellikleri üzerine etkisi	Sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkisi
<ul style="list-style-type: none">- Su ihtiyacını artırmaktadır.- İşlenebilirliği azaltmaktadır.-Terlemeyi azaltmakta ve segregasyon eğilimini düşürmektedir.- Yüzey üzerinde plastik rötre çatlakları oluşma tehlikesini arttırmaktadır.- Hidratasyon ısısını azaltmaktadır.	<ul style="list-style-type: none">- Basınç dayanımını artırmaktadır.- Normal betonlara kıyasla geçirimsizliği daha azdır.- Ayrışma direncini artırır.- Kimyasallar ve sülfatlara karşı direnci artırır.- Alkali-silika reaksiyonunu minimize eder.- Klasik betonlara göre daha koyu renkli beton elde edilmektedir.

Bazalt

Bazalt, doğada yaygın görülen lav kökenli volkanik bir kayadır. Yeryüzünün yüzlerce kilometre altında bulunan magmanın eriyik şekilde yeryüzüne ulaşip soğuması sonucu bazalt oluşmaktadır [29]. Yerkabuğunun 2.5 milyon km²'den fazlası bazalt ile kaplıdır. Volkanik bir kayaç olan bazalt; su emme ve sürtünmelere karşı dayanıklı, yoğun, sert, gri veya siyah renkte ve termoplastik bir malzemedir. Bazaltın yoğunluğu 2.7-2.8 g/cm³ arasında, Moh's sertliği ise 5-9 arasında değişmektedir [30].

Bazaltın kimyasal bileşiminde Si₂O₂, MgO, Al₂O₃ ve CaO bulunmaktadır. Bunların dışında P₂O₅, MnO, Na₂O, TiO₂ ve K₂O gibi oksitleri de bünyesinde az miktarda bulundurmaktadır. Bazaltın bulunduğu bölgeye ve türüne göre kimyasal bileşimi farklılık gösterebilmektedir [31]. Bazaltın kimyasal bileşenleri Tablo 2.4'te belirtilmiştir.

Tablo 2.4. Bazaltın kimyasal bileşenleri [32].

Bileşen	Ağırlık %'si
SiO ₂	45.0 – 50.0
Fe ₂ O ₃	2.0 – 5.0
Al ₂ O ₃	13.0 – 18.0
CaO	7.0 – 18.0
FeO	5.0 – 9.0
Na ₂ O	3.0 – 5.0
MgO	4.0 – 9.0
P ₂ O ₅	0.1 – 1.0
K ₂ O	0.5 – 2.5
TiO ₂	0.0 – 3.0
H ₂ O	0.0 – 0.5
MnO	0.0 – 0.2

Bazalt; aşınmaya, asitlere, yüksek ve düşük sıcaklıklara karşı üstün direnç gösteren aynı zamanda yüksek çekme mukavemeti olan bir malzemedir [33]. Renk değiştirmez ve çok yüksek camsı özellik taşımaz. Bu nedenle lekelenme oluşmaz ve kılcal çatlaklar görülmez. Bazaltın boyutlarına göre kullanım alanları değişmektedir. Kırmataş boyutunda yol yarmalarında, betonda agrega ve mıcır boyutunda ise barajlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır [34]. Tablo 2.5'te bazaltın mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.5. Bazaltın mekanik ve fiziksel özellikleri [35].

Mekanik ve fiziksel özellikler	Değer
Kaba Agrega Zahiri Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	2.854
Kaba Agrega Hacim Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	2.746
Kaba Agrega Su Absorpsiyonu (%)	1.39
İnce Agrega Zahiri Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	2.876
İnce Agrega Hacim Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	2.752
İnce Agrega Su Absorpsiyonu (%)	1.56
Filler Agrega Zahiri Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	2.822
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	14

Gözenekli bazalt, lavların volkanlardan çıkarken hava ile temas eden bölümlerinin içerisindeki gazların uçup, boşluklar oluşturması sonucu oluşur. Taşın iç kısmına doğru bakıldığında boşluklar küçülür ve sayıca azalır. Gözenekli bazaltlar suyu daha fazla emer ve absorbe özelliği fazladır. Gözeneksiz bazalt ise daha geç soğumadan kaynaklı düz bir yapıya sahiptir. Gözeneksiz bazaltlar daha yoğun oldukları için daha sert ve sağlam bir yapıya sahiptirler. İşlenebilirliği daha zor olmasına karşın geçmişte de taşıyıcı birçok sistemde tercih edildiği gözlemlenmiştir [36].

Okyanus sırtından çıkan bazalt içerikli lavlar, deniz suyunun etkisiyle yastık lavları biçiminde katılaşır. Yanardağ patlamaları sonucu oluşan bazaltlar üst üste yığılarak tabakalı bir yapı oluştururlar. Çatlak çıkışlı bazaltik lavlar ise genellikle geniş alanlara yayılır [37].

2.4.4. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkılar

Kimyasal katkılar harcın veya betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini iyileştirebilmek için kullanılırlar. Suda çözünebilen bu katkılar kullanım amaçlarına göre gruplandırılır: akışkanlaştırıcı katkıların; priz geciktirici katkılar, priz hızlandırıcı katkılar ve hava sürükleyici katkılar gibi çeşitleri mevcuttur. Kimyasal katkılar; betonun eğilme ve basınç dayanımını artırmak, geçirimsizlik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek, segregasyona

uğramadan hamurun kıvamını artırmak, rötreyi azaltmak ve priz süresinin ayarlanması gibi birçok olumlu özelliğe sahiptir [38].

Beton üretimi sırasında kullanılan katı parçacıklar arasında sürtünmeden dolayı taze betonda işlenebilirlik azalır. Taze betonda doldurma yeteneğinin ve akış hızının azalmasına sebep olan sürtünmeyi azaltmanın iki yolu bulunmaktadır. Betonda kullanılan su miktarının artırılması sürtünmeyi azaltmaktadır ancak suyun artmasıyla betonun kararlılığı bozulmakta ve segregasyon oluşma riski artmaktadır. Bu nedenle taze betondaki sürtünmeyi azaltmak, akıcılığı artırmak ve su kullanımını azaltmak için akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları tercih edilmektedir [39].

Akışkanlaştırıcılar su azaltma yeteneklerine göre üç grupta sınıflandırılır [40].

- Su azaltma yeteneği %10-15 arası olanlar normal akışkanlaştırıcı,
- Su azaltma yeteneği %15-30 arası olanlar süper akışkanlaştırıcı,
- Su azaltma yeteneği %30'dan fazla olanlar hiper akışkanlaştırıcı

Akışkanlaştırıcılar genel olarak üç amaç doğrultusunda kullanılır: Su/çimento oranını minimize edip yüksek dayanımlı beton elde etmek, akışkanlık sağlayıp işlenebilirliği artırmak ve hidrasyon ısısının düşürülmesi gereken yapılarda çimento miktarının azaltılmasına karşın aynı işlenebilirliği sağlamak [41].

KYB'de süper akışkanlaştırıcı katkıları ile yüksek akıcılık sağlanmaktadır. Süper akışkanlaştırıcılardan biri olan polikarboksilat bazlı katkıları KYB'nin üretiminde kullanılmaktadır. Aynı zamanda melamin sülfonat formaldehit polikondanseleri, polinaftalin sülfonatlar ve modifiye edilmiş lignosülfonat bazlı katkıları da kullanılmaktadır. Ancak polikarboksilat bazlı katkıları kıyasla diğer akışkanlaştırıcı katkıları taze betonun su ihtiyacını biraz daha arttırdığı için istenilen akıcılıkta beton üretilmemesine sebep olmaktadır. Bu nedenle KYB'nin üretiminde daha çok polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcıları kullanılmaktadır [42].

Akışkanlaştırıcı katkıları hava sürükleyip çimentonun topaklanmasını önlerler. Akışkanlaştırıcıları, su içerisinde eriyen boşluklu kimyasal dizilişleri sayesinde çimentonun tümüyle hidrate olmasını sağlarlar ve suyun yüzey gerilimini düşürürler. Akıcılık sağlanmış olur ve betonda oluşabilecek segregasyon minimum seviyeye iner [43].

Akışkanlaştırıcı katkıları su azaltma amacıyla kullanılabilirler gibi aynı zamanda çimento azaltma amacı ile de kullanılabilirler. Su azaltıcı olarak kullanıldığında, su/çimento oranı azalır, betonun basınç dayanımında artış meydana gelir, geçirimsizlik ve dış ortam şartlarına karşı dayanıklılık artar. Akışkanlaştırıcıları uygun olmayan dozajlarda kullanılmasının sonucu olarak; segregasyon, erken yaş dayanımında düşüş, priz süresinin çok erken veya geç olması gibi etkilere yol açabilmektedir [44].

2.4.5. Karışım Suyu

TS EN 1008'e göre betonda kullanılacak karışım suyu içme suyu olup bazı sınırlandırmalar mevcuttur. Karışım suyundan istenilen özellikler [45]:

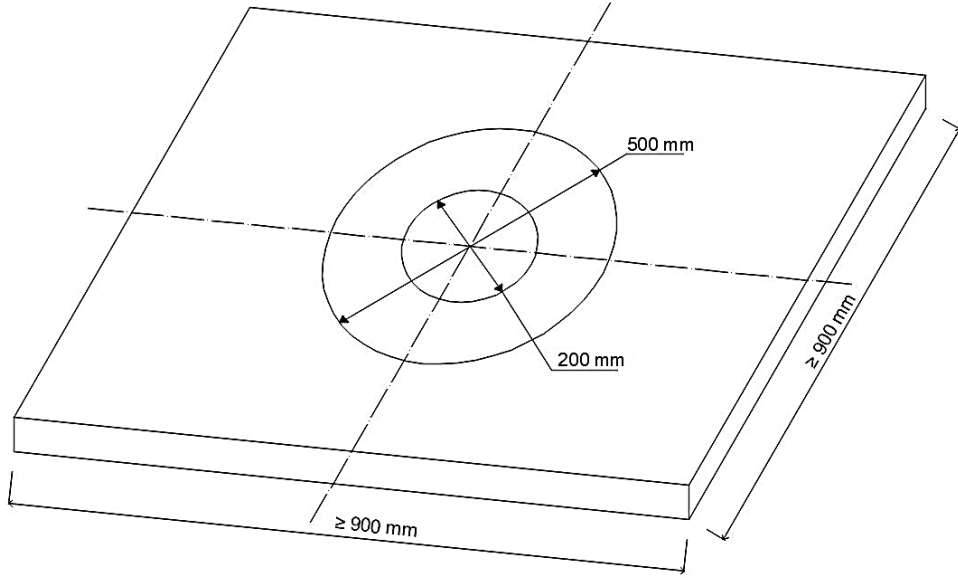
- pH ≥ 7 olmalıdır.
- Şeker, çinko, fosfat ve kurşun miktarı 100 mg/lt, nitrat miktarı ise 500 mg/lt ile sınırlandırılmıştır.
- Suyun içeriğindeki sülfatlar en fazla 200 mg/lt olmalıdır. Alkali-silika reaksiyonun oluşmasına karşı önlem alınmadıkça alkali miktarı 1500 mg/lt'den az olmalıdır.
- Klorür içeriği donatısız betonlarda 4500 mg/lt ile donatılı betonlarda ise 1000 mg/lt ile sınırlandırılmıştır.
- Suya NaOH eklenmesiyle ortaya çıkan renk neticesinde organik madde miktarı belirlenir. İstenilen rengin sarıya dönük kahverengi veya daha açık olması gerekmektedir.
- Askıdaki madde miktarının 4 ml'den az olması gerekmektedir.

2.5. Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Kullanılan Deney Yöntemleri

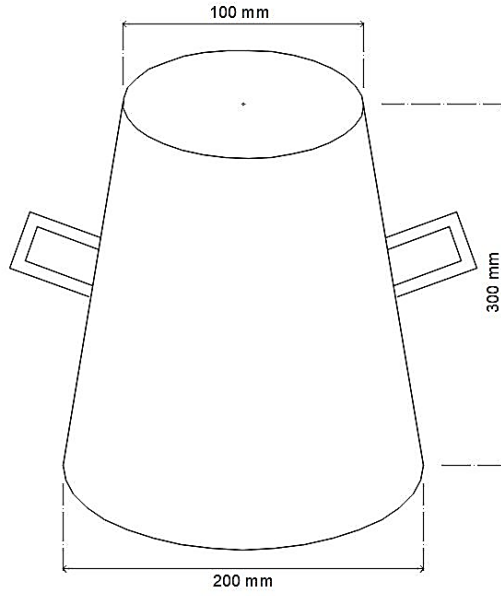
KYB'nin taze ve sertleşmiş durumdaki özelliklerini belirlemek için birçok deney yapılmaktadır. Bu deneylerden en çok kullanılanları hakkında bilgiler maddeler halinde verilmiştir.

2.5.1. KYB' de Çökme-Yayılma Deneyi

Taze haldeki KYB'nin akıcılığını ve akış hızını belirleyebilmek için çökme-yayılma deneyi yapılmaktadır. Bu deneylerin yapılabilmesi için maksimum agrega çapının 40 mm'nin altında olması gerekmektedir [19]. Şekil 2.2'de çökme-yayılma deneyinde kullanılan aparatlar ve boyutları verilmiştir. Kendiliğinden yerleşen harçlarda (KYH) ise mini çökme-yayılma konisi kullanılır.



(a)



(b)

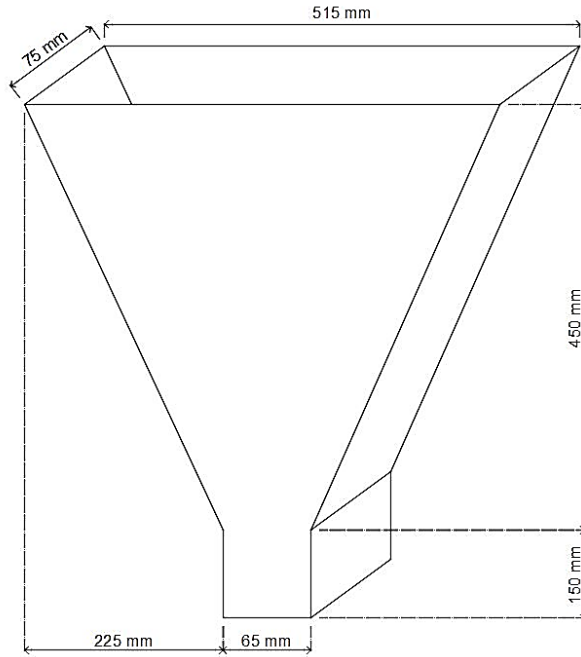
Şekil 2.2. (a) çökme-yayıma tablası; (b) deney konisi [46].

Tablanın yüzeyi düz ve pürüzsüz, boyutları ise en az 900x900 mm olmalıdır. Yüzeyinde serbest su kalmayacak şekilde nemlendirilen tablanın orta noktasına deney konisi yerleştirilir. Slump konisi sarsmadan beton ile doldurulur ve herhangi bir şişleme işlemi yapılmaz. Koni dikey doğrultuda hızlı ve dikkatli bir şekilde kaldırılır. Yayılan betonun iki farklı noktalarından çaplar ölçülür, ortalaması alınarak yayılma çapı hesaplanır ve deney tamamlanır [46].

2.5.2. V Hunisi Deneyi

V hunisi deneyi, KYB'nin viskozitesini ve doldurma yeteneğini belirlemek için yapılmaktadır. Deney kapsamında sızdırmaz, pürüzsüz, üstü açık ve altı aniden açılabilen kapaklı bir huni kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te kullanılan huninin boyutları verilmiştir. Deney yapılmadan önce beton ile huninin temas edecek yüzeyleri ve altta bulunan kapağı serbest su kalmayacak şekilde nemlendirilir. KYB tek seferde ve herhangi bir sıkıştırma işlemi yapmadan huniye yerleştirilir. Huni tam dolduktan sonra altta bulunan kapak ani bir şekilde açılır. Kapağın açıldığı zaman ile huninin içindeki bütün betonun boşaldığı zaman arasına V hunisi akış süresi denilmektedir [47].

Deney sırasında betonun düzgün bir şekilde akması gerekmektedir. Eğer beton düzgün bir şekilde akmıyorsa eşik kayma gerilmesi beton ağırlığının oluşturduğu gerilmeden yüksek veya beton karışımının dengeli olmayışından kaynaklı agregaların huninin alt kısmında birikip kenetlenmesi sonucu akışı engellemesi olarak açıklanmaktadır [48].

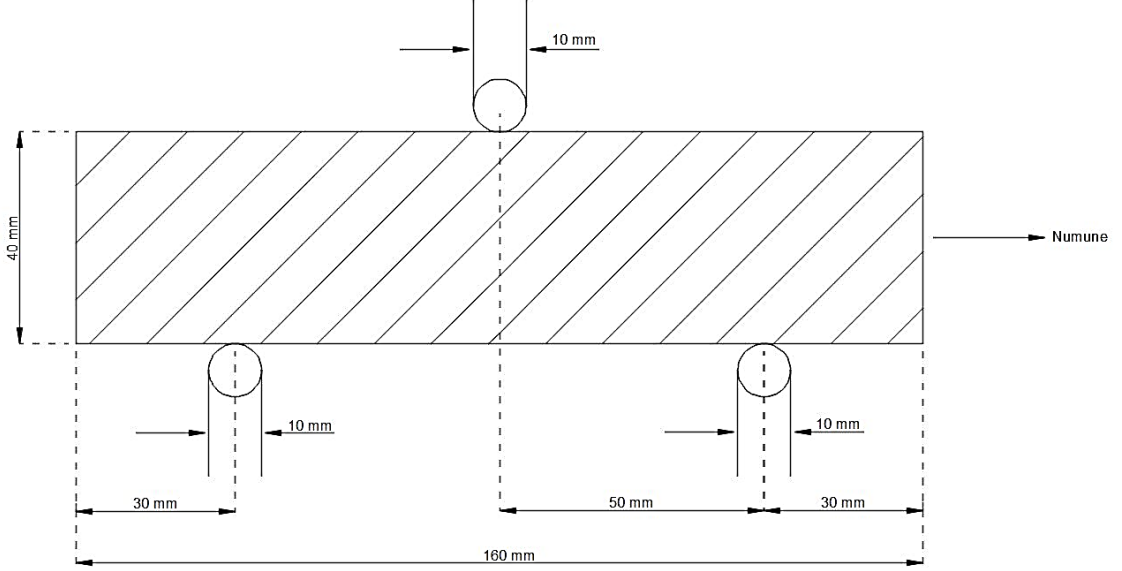


Şekil 2.3. V Hunisi [47].

2.6. Çimento Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri

Ülkemizde harç ve çimento deneyleri TS EN 196-1 standartlarına göre yapılmaktadır. Çimentonun basınç ve eğilme dayanımları mekanik deneyler uygulanarak belirlenmektedir. Bu doğrultuda boyutları 40×40×160 mm olan aynı karışım oranına sahip üç adet prizmatik deney numuneleri hazırlanır. Numuneler önce eğilme deneyine tabi tutulur. Şekil 2.4'te deney düzeneği verilmiştir. Eğilme dayanım cihazı, birbirinden uzaklığı $(100,0 \pm 0,5)$ mm olan, $(10,0 \pm 0,5)$ mm

çapındaki iki adet çelik mesnet silindiri ile her ikisi arasında merkezi olarak yerleştirilen üçüncü çelik yükleme silindirinin oluşturduğu eğilme düzeneğinden ibarettir [49].



Şekil 2.4. Eğilme dayanımı tayini için yükleme düzeneği [49].

Eğilme dayanımı (R_f) aşağıdaki eşitlik doğrultusunda hesaplanır.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times I}{b^3} \quad (2.1)$$

Burada;

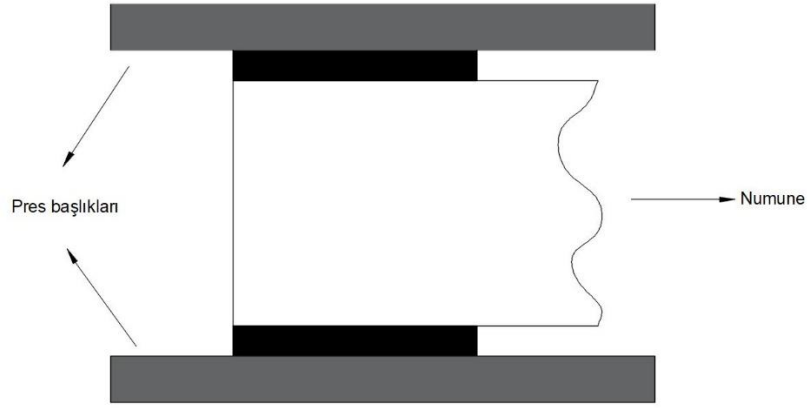
R_f : Eğilme dayanımı (N/mm^2)

F_f : Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (Newton)

I : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)

Üç deney numunesi için de eğilme dayanımı deneyi yapılır. Eğilme dayanımının hesaplanması için deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınır. Eğilme deneyi sonucunda her bir numune iki parçaya ayrılır. Basınç dayanımı deneyi için oluşan yarım prizmalar düzeneğe yerleştirilir. Şekil 2.5'te basınç dayanımı yükleme düzeneği verilmiştir. Yarım prizmaların 40×40 mm'lik kısımlar, boyutları 40×40 mm olan cihaz plakasından taşmayacak şekilde merkezlenir ve kırma presinde kırılır.



Şekil 2.5. Basınç dayanımı için yükleme düzeneği [50].

Basınç dayanımı (R_c) aşağıdaki eşitlik doğrultusunda hesaplanır.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (2.2)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı (N/mm^2)

F_c : Kırılmadaki en büyük yük (N)

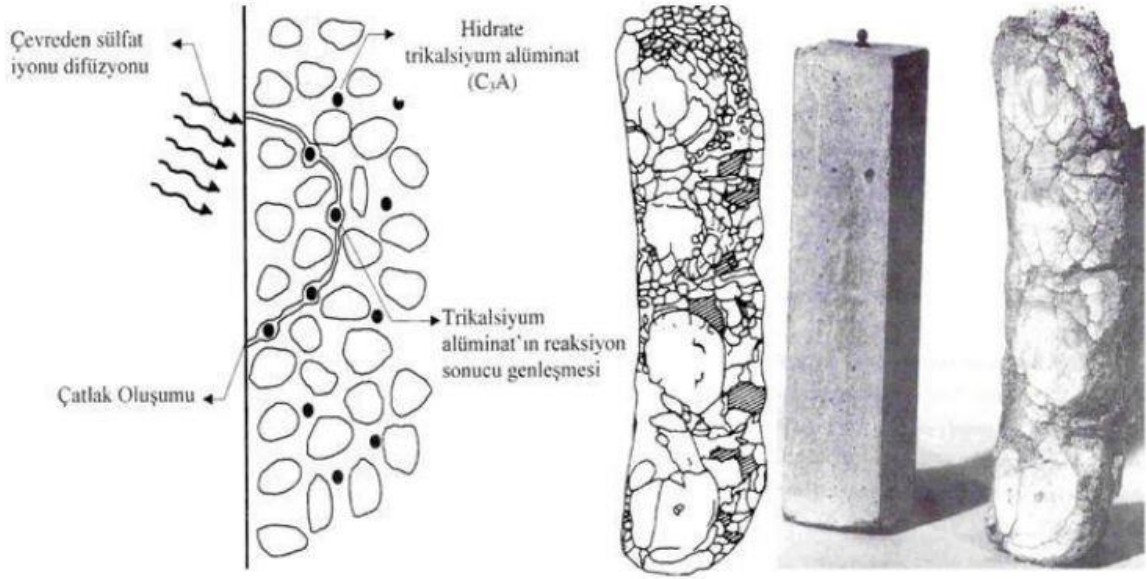
A : Kesit alanı ($40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$), (1600 mm^2)

Eğilme dayanımı deneyi sonucunda, basınç dayanım deneyi için altı tane numune oluşup her biri için basınç dayanım deneyi yapılır. Bulunan sonuçların aritmetik ortalaması hesaplanarak basınç dayanımı belirlenir.

3. BETONDA SÜLFAT ETKİSİ

Herhangi bir yapı veya yapı malzemesinin öngörülen servis ömrü boyunca bozulmadan işlevlerini yerine getirebilmesine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık denilmektedir. Günümüzde yapı alanında en çok kullanılan malzemelerinden biri olan beton, hizmet ömrü boyunca fiziksel ve kimyasal birçok yıpratıcı etki ile karşılaşmaktadır. Betonun içerisine sızan su, klorür, sülfat, karbondioksit gibi birçok madde betonda kimyasal olayların gerçekleşmesine neden olurken, ısınma-soğuma, donma-çözünme gibi olaylar betonda fiziksel nitelikteki bozulmalara sebep olmaktadır [50].

Sülfat, betonda fiziksel ve kimyasal reaksiyonlara girerek betonun servis ömrünün kısalmasına neden olan bir maddedir [27]. Sülfat tuzlarının betonda birikerek kristalleşmesi neticesinde fiziksel bozulmalar oluşurken, sülfat iyonlarının çimento hidrasyon ürünleri ile reaksiyonu sonucu kimyasal bozulmalar oluşmaktadır. Şekil 3.1’de sülfatın beton üzerine olan etkisi verilmiştir.



Şekil 3.1. Betonda sülfat etkisi [51].

Betonda bozulmalara sebep olan sülfat, iç kaynaklı ve dış kaynaklı olarak iki sınıfa ayrılmaktadır.

3.1. İç Kaynaklı Sülfat Etkisi

Betonu oluşturan çimento, su, agrega ve katkılarda bulunan sülfat iyonlarının uygun ortam koşullarında sertleşmiş betonda yeni ürünler oluşturması olayına iç kaynaklı sülfat etkisi denilmektedir ve iç kaynaklı sülfat etkisinde betona dış ortamda sülfat etki etmemektedir. Betonun

içerisinde bulunan sülfat iyonlarının sertleşmiş betonda etrenjit kristalleri oluşturması sonucu betonda hacim artışı meydana gelmektedir. Hacim artışından kaynaklı iç basınç oluşmakta ve bu basınç betonun çatlamasına yol açabilmektedir. Bu durum betonun dayanıklılığını azaltmakta ve servis ömrünü kısaltmaktadır [52].

3.2. Dış Kaynaklı Sülfat Etkisi

Dış kaynaklı sülfatın betonu etkilemesinde neden olan kaynaklar atık sular, yeraltı suları, yağmur suları, deniz suları ve topraklar olmaktadır. Dış kaynaklardan betona gelen sülfat iyonlarının sertleşmiş betonda çimento hidrasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyona girmesine dış kaynaklı sülfat etkisi denilmektedir. Bu reaksiyon sonucunda betonda birçok yeni ürün meydana gelmekte olup oluşan bu ürünler betonun hacim artışına, kohezyon kaybına ve kütle kaybı gibi oluşumlara sebep olurken aynı zamanda betonun çatlamasına da neden olabilmektedir [53]. Bu durum betonun dayanıklılığını azaltıp servis ömrünü kısaltmaktadır.

Sülfat iyonu doğada magnezyum sülfat, potasyum sülfat, kalsiyum sülfat ve sodyum sülfat şeklinde alkalilerle ve kalsiyum katyonları ile birleşmiş halde bulunur. Ayrıca amonyum sülfat ((NH₄)₂SO₄) ve sülfürik asit (H₂SO₄), sülfat iyonu bulunduran diğer kaynaklardır. Birbirinden farklı türde bulunan sülfat kaynaklarında meydana gelen reaksiyonlar farklılık göstermektedir. Sülfat iyonlarının bağlı olduğu iyon doğrultusunda çimento hidrasyon ürünleriyle girdiği reaksiyon neticesinde ortaya çıkan ürünler de farklılık göstermektedir [54].

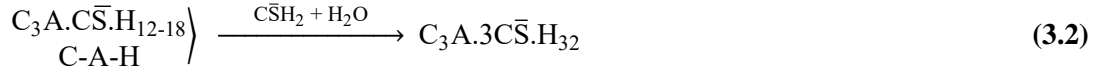
Çimento hidrasyon ürünleriyle dış ortamdaki mevcut sülfat iyonları kimyasal reaksiyona girerek ortamın şartları doğrultusunda alçıtaşı, etrenjit ve tomasit oluşturmaktadır. Bu ürünler ise sabit kalmayarak sürekli değişim gösterirler. Dış ortamdan kaynaklı oluşan bu üç ürünün ortak özelliği betonda hacim artışı olup betonun dayanıklılığını azaltmaktadır [55]. Dış çevre kaynaklı bu üç ürün aşağıdaki şekilde verilebilir.

1. Sülfat etkisi sonucu CH ve C-S-H' da alçı taşı oluşumu, denklem (3.1)'de verilmiştir.



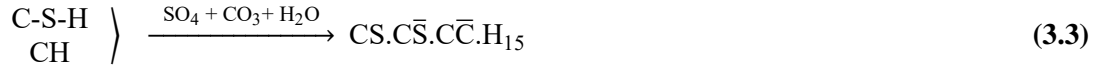
Alçıtaşı, ilk zamanlar betonun yüzeye yakın bölümlerinde özellikle çatlak ve boşluklarda oluşur [56]. Alçıtaşı betonda hacim artışına neden olduğu için betonda çatlamalara ve parçalanmalara rastlanır. Betonun dayanıklılığını ve kohezyonunu olumsuz yönde etkiler. C-S-H jeli çimento hamurunun bağlayıcılık özelliğinden sorumludur. Bu jelden kalsiyumun ayrılması kohezyon kaybına sebep olmaktadır [55].

2. Sülfat etkisi sonucu kalsiyum alümin hidratla (C-A-H) ve monosülfat hidratla (C₃A.CS.H₁₂₋₁₈) etrenjit oluşumu denklem (3.2)'de verilmiştir.



Bu reaksiyon sonucu etrenjit oluşur ve etrenjit hacim artışına neden olduğu için betonda çatlamlar meydana gelir [55].

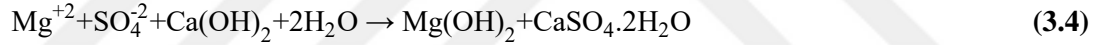
3. Karbonat iyonunun bulunduğu ortamda C-S-H ve CH'ye sülfat etkisiyle tomasit oluşumu denklem (3.3)'te verilmiştir.



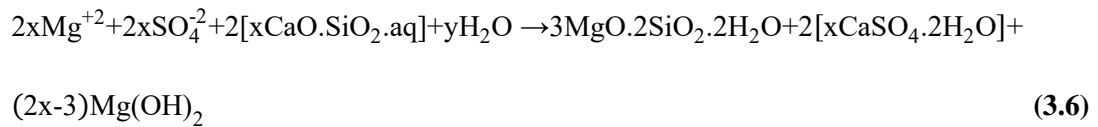
Tomasit oluşumu betonda hacim artışına sebep olurken aynı zamanda çok ciddi dayanım ve kohezyon kaybına yol açmaktadır [57]. Tomasit nedeniyle C-S-H jellerinde önemli bozulmalar oluşup, betonun yumuşaması ve dayanım kaybı artar. Tomasit oluşumu nemli ortamda ve düşük sıcaklıkta daha fazla olur. Sıcaklık arttıkça tomasit oluşumunda azalma gözlemlenmektedir [58].

3.2.1. Magnezyum Sülfat (MgSO₄) Etkisi

Betona nüfuz eden magnezyum sülfat en başta kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer ve alçıtaşı ile brusit oluşturur.



Denklem (3.4) magnezyum sülfat saldırısına maruz betonda yüzeyde veya yüzeye yakın kısımda alçıtaşı (CaSO₄·2H₂O) ve brusit (Mg(OH)₂) oluşumunun denklemidir. Suda çözünürlüğü az olan Brusit, betondaki boşlukları doldurarak geçirimsizliğin azalmasına sebep olur. Kalsiyum sülfat ise suda çözünebilir bir üründür. Sülfat etkisi ile betonda bulunan kalsiyum hidroksitin bitmesi durumunda reaksiyonun ihtiyaç duyduğu Ca⁺² iyonu C-S-H jellerinden karşılanmaya başlanır. C-S-H jelinde dekalsifikasyonun başlaması sonucunda C-S-H jellerinin zayıf kristal yapıya sahip magnezyum silika hidrata (M₃S₂H₂) veya amorf hidrit silikaya (SiO₂.aq) ya da her iki ürüne birden dönüştürür. Bu ürünlerin yanında reaksiyonda ilave alçıtaşı, brusit ve magnezyum silika hidrat oluşturur [59].



(3.5) ve (3.6) nolu reaksiyonlar neticesinde C-S-H jelinin C/S oranında azalma meydana gelir. C/S oranı; reaksiyonun ilk safhalarında betonun iç bölümlerinde yüksekken dış bölümlerinde

düşüktür. Magnezyum sülfat etkisinin sürekli devam etmesi durumunda C-S-H jelindeki Ca^{+2} iyonlarının Mg^{+2} iyonlarıyla tamamının yer değiştirmesi sonucu yapıdaki C/S oranının sıfıra düşmesine sebep olmaktadır [59].

Magnezyum sülfat etkisine sürekli olarak maruz kalan betonda bağlayıcılık kazandıran C-S-H'nin bozulması diğer sülfat etkilerine kıyasla daha hızlı olmakta ve betonun durabilite kaybını daha da arttırmaktadır. Magnezyum hidroksitin normal sıcaklıktaki çözünürlüğü sadece 0.01 g/l olması doymuş çözeltinin pH değerinin 10.5 değerinde olması sağlar. C-S-H'nin stabilitesini sürdürmesi için bu seviyedeki pH değeri çok düşük olmaktadır. Ortamın pH değerini dengelemek için serbest durumdaki kalsiyum hidroksitin tamamının tükenmesinden sonra C-S-H, kalsiyum hidroksit üretmeye başlar. C-S-H'nin kalsiyum hidroksit üretmeye devam edebilmesi için ortamda magnezyum sülfatın olması gerekmektedir. Böylelikle betonun C-S-H yapısı alçıtaşına, magnezyum silika hidrata ve brusite dönüşür. Magnezyum sülfatın betona etkisi ile hidroksit iyonları yüzeye doğru hareket ederken, çözünmeyen brusit ve sülfat iyonları ise betonun iç kısımlarına doğru hareket etmesi sonucunda az miktarda etrenjit ile alçıtaşı oluşturur. Betonda iki tabaka oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bunlar; dış yüzeyde brusit tabakası ve onun hemen altında alçıtaşı tabakasıdır [59].

Betonda $MgSO_4$ 'ün etkisini; yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkıların kullanılması artırmaktadır. Mineral katkıların kullanımı betondaki CH'i tükettiği için betona nüfuz eden magnezyum sülfat doğrudan C-S-H jeli ile reaksiyona girmekte ve betonun direncini azaltmaktadır. Bu nedenle $MgSO_4$ etkisinde normal çimento ile üretilen beton, katkılı çimento ile üretilen betona göre daha iyi performans göstermektedir [53].

3.2.2. Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (DEF)

Uzun süre nemli ortama maruz kalan prefabrik elemanlarda sülfat etkisinde olduğu gibi yıllar sonra çatlaklara ve hasarlara rastlanmıştır. Bu hasarların nedenini bulmak için yapılan çalışmalarda sebebin gecikmiş etrenjit olduğu saptanmıştır. Sülfat etkisi sonucu genleşen tuzun sertleşmiş betonu çatlatıp parçalaması olayına gecikmiş etrenjit oluşumu denilmektedir. Ancak burada ortaya çıkan etrenjit normal hidrasyon sonucu meydana gelen etrenjit ile karıştırılmamalıdır. Beton taze durumdayken kristalleşen tuzun genleşmesine izin verecek ortamı mevcuttur.

Gecikmiş etrenjit oluşumunun nedenlerinden biri, prefabrik sektöründe elemanların hızlı priz alması ve daha çabuk dayanım kazanması amacıyla uygulanan yüksek sıcaklıktır. 60-70 °C' kür sıcaklığı bile DEF oluşmasına yol açabilmektedir.

Gecikmiş etrenjit oluşumunun bir diğer nedeni ise çimento bünyesinde fazla miktarda SO_3 bulunmasıdır. Çimento içerisinde bulunan sülfatın bir kısmının suda çok az ve yavaş çözünmesinden kaynaklanan etrenjit oluşumu beton sertleştikten sonra da gerçekleşmekte ve betona zarar vermektedir [51].

Gecikmiş etrenjit oluşumunu engellemek amacıyla aşağıdaki önlemlerin alınması yarar sağlamaktadır.

- Çimento bünyesinde bulunan SO_3 oranı %1.5 olduğunda bile DEF'e yol açabilmektedir. Bu nedenle kullanılacak çimentodaki SO_3 oranının en alt seviyede olması istenmektedir.
- Kür sıcaklığının çok yüksek olmaması gerekmektedir. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' deki kür sıcaklığında bile bazı tür çimentolarda etrenjit oluşum reaksiyonu gerçekleşebilmektedir.
- Düşük hidrasyon ısısı çıkaran özelliğe sahip çimentoların kullanılması yarar sağlamaktadır.
- Uçucu kül gibi puzolan içeren çimentolar sülfat miktarını azaltmakta ancak bazı puzolanik maddeler de içerisinde sülfat bulundurabilmektedir.
- Yapı elemanlarının su ile olan bağlantısı kesilmelidir.
- Hava sürükleyici katkı kullanımı sayesinde, oluşan kristallerin genleşmelerinin oluşturduğu iç gerilmeleri azaltarak yararlı olması beklenmektedir [51].

3.2.3. Sülfat Etkisini Azaltıcı Önlemler

Betonun sülfata karşı dayanımını arttırmak ve sülfat saldırılarını azaltmak için alınacak tedbirler şunlardır:

1. Mümkün olduğu kadar geçirimsiz beton üretilmelidir. Geçirimsizliği az olan betona girecek sülfat miktarı azalacaktır.
2. Çimento C_3A ve $Ca(OH)_2$ içeriğinin sınıflandırılması gerekmektedir.
3. Beton üretiminde uygun puzolanik özellikteki mineral katkı maddesi kullanılmalıdır.
4. Gerekli durumlarda beton dıştan sülfata karşı izole edilecek şekilde kaplamalarla sarılmalıdır.

4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, KYH’de çimento ikamesi olarak mineral katkılardan bazalt tozu ve silis dumanının taze ve sertleşmiş haldeki harç üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında kontrol numunesi ile portland çimentosuna ağırlıkça ikameli olarak %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, ve %40 oranlarında öğütülmüş bazalt eklenip ikili karışımlar hazırlanmıştır. Üçlü karışımlarda ise mineral katkı oranı %30’u geçmeyecek şekilde %10 silis dumanının sabit kalması şartıyla çimento ile ikameli olarak %5, %10, %15, %20 oranlarında öğütülmüş bazalt kullanılmış ve toplamda 13 farklı numune üretilmiştir. Kendiliğinden yerleşen harçların taze özelliklerini belirleyebilmek amacıyla mini çökme yayılma ve viskozite deneyleri yapılmıştır. 40x40x160 mm boyutundaki sertleşmiş numuneler 3, 28, 180 gün boyunca şebeke sulu ortamda kür edilirken bir seri ise önce 28 gün boyunca şebeke suyunda bekletip toplamda 180 gün magnezyum sülfatlı çözeltide bekletildikten sonra üç noktalı eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Ayrıca 50 mm küp numunelerde kapiler su emme deneyi yapılmıştır. Tüm numunelerin yüzdece poroziteleri ile toplam su emme kapasiteleri ve yoğunlukları deney sonuçlarına göre belirlenmiştir.

4.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

4.1.1. Portland Çimentosu

Bu çalışma kapsamında CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmış olup SYCS İnşaat Çimento A.Ş.’nin Elazığ’ın Baskil ilçesindeki Seza Çimento tarafından temin edilmiştir. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 4.1’de, fiziksel özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1. CEM I 42,5 R tipi çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşenler, %	CEM I 42,5 R
SiO ₂	18.36
Al ₂ O ₃	4.72
Fe ₂ O ₃	3.63
CaO	63.06
MgO	1.58
SO ₃	3.29
K ₂ O	0.82
Na ₂ O	0.18
Kızdırma kaybı	4.13
Çözünmeyen kalıntı	0.39

Tablo 4.2. CEM I 42,5 R tipi çimentonun fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.09
Özgül yüzey (cm ² /g)	4.8
İncelik (45 µ)	3780
Priz başlama süresi (dk)	145
Priz sona erme süresi (dk)	245
Hacim sabitliği (mm)	1

4.1.2. Öğütülmüş Bazalt

Çalışma kapsamında Elazığ ili Karayazı mevkiinde bulunan Birlik Beton'a ait bazalt fabrikasından bazalt taşı temin edilmiştir. Çakıl boyutundaki bu taşlar yeterli incelikte öğütülmüştür. Öğütülen bazalt tozunun %87'si 0.125 mm elekten geçmiştir (Şekil 4.1.). Bazalt tozuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Öğütülmüş bazaltın kimyasal ve fiziksel özellikleri

Öğütülmüş Bazalt			
SiO ₂ (%)	48.13	SrO (%)	0.14
Al ₂ O ₃ (%)	15.93	ZnO (%)	0.01
Fe ₂ O ₃ (%)	9.23	Cr ₂ O ₃ (%)	0.01
CaO (%)	7.37	LSF (%)	4.55
MgO (%)	7.20	Silika oranı (%)	1.91
SO ₃ (%)	0.06	Alüminyum oranı(%)	1.73
K ₂ O (%)	1.87	C ₂ S (%)	48.192
Na ₂ O (%)	4.05	C ₃ S (%)	45.618
TiO ₂ (%)	2.00	C ₃ A (%)	26.61
P ₂ O ₅ (%)	0.69	C ₄ AF (%)	28.08
Mn ₃ O ₄ (%)	0.23	Toplam alkali (%)	5.28
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.626	ASR (%)	0.01



Şekil 4.1. Öğütülmüş bazalt

4.1.3. Silis Dumanı

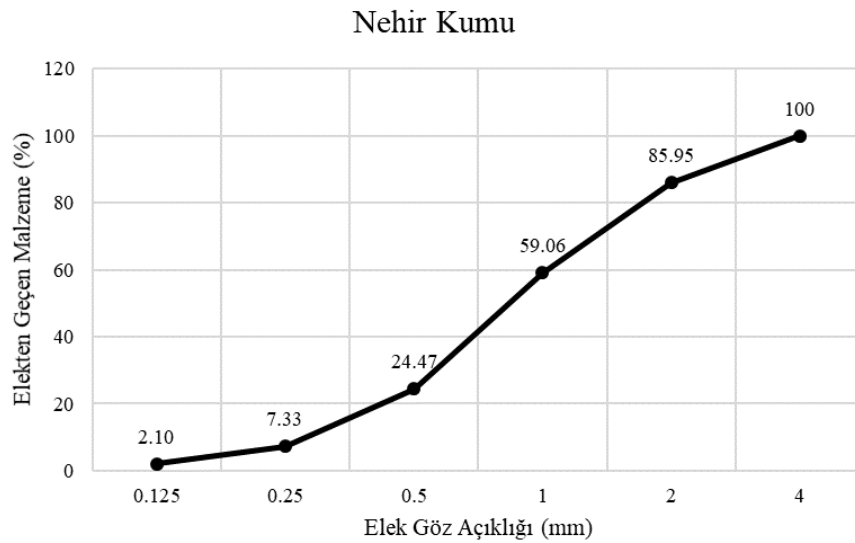
Bu çalışma kapsamında ASTM C1240 standartlarına uygun silis dumanı kullanılmış olup Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Silis dumanı deney kapsamında çimento yerine ağırlıkça %10 oranında eklenmiştir. Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik	Silis Dumanı
SiO ₂ (%)	91
Al ₂ O ₃ (%)	0.58
Fe ₂ O ₃ (%)	0.24
MgO (%)	0.33
CaO (%)	0.71
SO ₃ (%)	-
Kızdırma kaybı (%)	1.84
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.20
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	96.5%<45µm

4.1.4. Agrega

Çalışma kapsamında kullanılan agrega Elazığ ili Murat Nehri'nden temin edilmiştir. KYH deneylerinde agregaların maksimum tane çapı 4 mm olarak belirlenmiştir. Agreganın elek analizi sonucundaki granülometri eğrisi ise Şekil 4.2'de verilmiştir. Agreganın doygun kuru yüzey özgül ağırlığı (DKY) 2.63 g/cm³, su emme oranı ise % 1.95'tir.



Şekil 4.2. Harç agregasının granülometri eğrisi

4.1.5. Su

Bu çalışma kapsamında Elazığ ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

4.1.6. Kimyasal Katkı

Bu çalışma kapsamında Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. firmasından temin edilen, modifiye polikarboksilat esaslı polimer yapıya sahip ve yoğunluğu 1.06 g/cm^3 olan üçüncü nesil ViscoCrete Hi-Tech 36 yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. Kullanılan SA miktarı 7 kg/m^3 olarak belirlenmiştir ve bu oran tüm harçlar için sabit tutulmuştur. Kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5. Akışkanlaştırıcı katkıya ait özellikler

Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1.06 g/cm^3
pH Değeri	3 - 7
Viskozite	26 cp, 20 °C
Donma Noktası	-4 °C
Suda Çözünabilir Klorür Yüzdesi	En fazla % 0.1 (TS EN 934-2)
Alkali Miktarı (% Na ₂ O Eşdeğeri Olarak)	En fazla % 3 (TS EN 934-2)

4.1.7. Magnezyum Sülfat (MgSO₄) Çözeltisi

Çalışma kapsamında magnezyum sülfat çözeltisi hazırlamak için MgSO₄.7H₂O kullanılmıştır. Deneyde, ağırlıkça %10’luk magnezyum sülfat çözeltisi hazırlanmıştır.

4.2. Numune Boyutları

Hazırlanan harçlar üç noktalı eğilme ve basınç deneylerinin yapılabilmesi için 40x40x160 mm’lik çelik kalıplara dökülmüştür. Kapiler su emme deneyinin yapılabilmesi için ise 50 mm’lik çelik küp kalıplar kullanılmıştır. Kullanılan prizmatik ve küp kalıplar Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. 40x40x160 mm’lik prizmatik ve 50 mm’lik küp kalıplar

4.3. Karışım Hesabı

Bu çalışma kapsamında bağlayıcı katkı olarak CEM I 42.5 R tipi çimento, bazalt ve silis dumanı kullanılmıştır. Kontrol numunesi dahil 13 seri KYH karışımı hazırlanmıştır. Toplam bağlayıcı miktarı KYH harçlardaki toz oranının sağlanması amacıyla 650 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Hazırlanan ikili karışımlarda çimento ile ikameli olarak ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40 oranlarında öğütülmüş bazalt kullanılmıştır. Üçlü karışımlar ise mineral katkıların oranı %30'u geçmeyecek şekilde ağırlıkça %10'luk silis dumanıyla birlikte çimento ile ikameli olarak %5, %10, %15, %20 oranlarında öğütülmüş bazalt eklenerek hazırlanmıştır.

KYH'nin işlenebilirliği EFNARC'ın belirlediği tasarım kriterlerine göre hazırlanmıştır. Karışım hesabı yapılırken mutlak hacim yöntemi kullanılarak 1 m^3 harçtaki toplam agrega miktarının hesabı denklem (4.1)'de gösterilmiştir.

$$\frac{A}{\gamma_{ag}} = 1000 - \left[\frac{C}{\gamma_c} + \frac{B}{\gamma_b} + \frac{S}{\gamma_s} + \frac{SA}{\gamma_{sa}} + W + H \right] \quad (4.1)$$

Burada;

- A : 1 m^3 betonda dere agregası miktarı (kg)
- Ç : 1 m^3 betonda çimento miktarı (kg)
- B : 1 m^3 betonda öğütülmüş bazalt miktarı (kg)
- S : 1 m^3 betonda silis dumanı miktarı (kg)
- SA : 1 m^3 betonda süper akışkanlaştırıcı miktarı (kg)
- W : 1 m^3 betondaki su miktarı (kg)
- H : 1 m^3 betondaki havanın hacmi (dm^3)
- γ_{ag} : Dere agregasının özgül ağırlığı (kg/dm^3)
- γ_c : Çimentonun özgül ağırlığı (kg/dm^3)
- γ_b : Öğütülmüş bazaltın özgül ağırlığı (kg/dm^3)
- γ_s : Silis dumanının özgül ağırlığı (kg/dm^3)
- γ_{sa} : Süper akışkanlaştırıcının özgül ağırlığı (kg/dm^3)

Denklem (4.1)'e göre hesaplanan harçların oranları Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Harç karışım oranları

Karışım Kodu	MUHTEVA (kg/m ³)						
	CEM I 42.5R	Bazalt Tozu	SD	Agrega	Hi-Tech 36	Su/Toz (Hacimce) (%)	Su/Toz (Ağırlıkça) (%)
KONTROL	650	0	0	1326.55	7	1.12	0.38
B5	617.5	32.5	0	1308.39	7	1.14	0.38
B10	585	65	0	1303.37	7	1.14	0.38
B15	552.5	97.5	0	1298.36	7	1.14	0.38
B20	520	130	0	1306.49	7	1.11	0.38
B25	487.5	162.5	0	1301.47	7	1.11	0.38
B30	455	195	0	1283.31	7	1.14	0.38
B35	422.5	227.5	0	1278.29	7	1.13	0.39
B40	390	260	0	1273.28	7	1.13	0.39
B5+SD10	552.5	32.5	65	1311.95	7	1.06	0.37
B10+SD10	520	65	65	1306.93	7	1.06	0.37
B15+SD10	487.5	97.5	65	1288.77	7	1.08	0.38
B20+SD10	455	130	65	1283.75	7	1.08	0.38

4.4. KYH'nin Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kürü

Karışım oranları belirlendikten sonra KYH'ler herhangi bir sıkıştırma işlemi olmadan, daha öncesinde yağlanmış olan kalıplara kendi ağırlığıyla yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler priz alıncaya kadar kalıpların üzeri cam ile korunmuştur. Bir gün boyunca kalıpta bekletilen tüm numuneler 20±2 °C sıcaklığa sahip şehir şebeke sulu kür havuzlarında 3, 28 ve 180 gün sonuna kadar bekletilmiştir. Ayrıca %10'luk magnezyum sülfatlı çözeltide 180 gün sonuna kadar kür edilmiştir (Şekil 4.4). Sertleşmiş harç deneylerini uygulayabilmek için 13 seriden 3'er numune alınıp deneyler için toplamda 156 tane 40x40x160 mm'lik prizmatik, 39 tane 50x50x50 mm boyutunda küp numuneler hazırlanmıştır.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.4. (a) Kalıplardaki numuneler, (b) Şebeke suyunda kür edilen numuneler, (c) Magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin ilk hali, (d) Magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin 180 gün sonundaki görünümü

4.5. Taze Harç Deneyleri

KYH'nin işlenebilirlik özelliklerini belirlemek için EFNARC'ın belirlediği sınırlar doğrultusunda her bir numune için mini çökme-yayılma deneyi ve viskozimetre ölçümleri yapılmıştır.

4.5.1. Mini Çökme Yayılma Deneyi

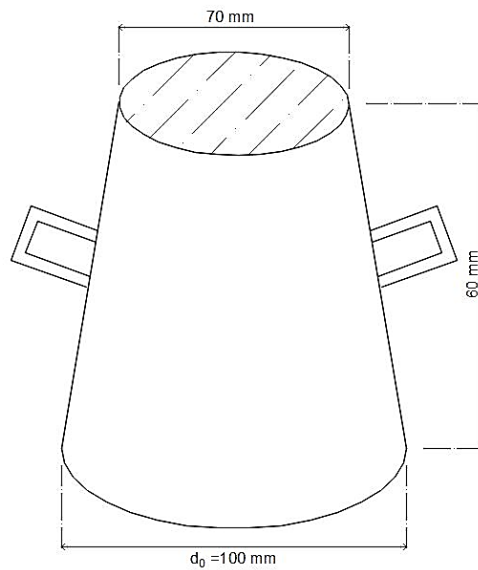
Harçların doldurma ve akıcılık yeteneklerini belirlemek için uygulanan mini çökme-yayılma deneyi EFNARC (2002) tarafından belirlenen standartlara uygun bir şekilde yapılmaktadır. Deney kapsamında hazırlanan harçlar tepesi kesik koni (Şekil 4.5) içerisine herhangi bir sarsma ve şişleme işlemi olmaksızın doldurulmaktadır. Daha sonra koni sarsmadan yukarıya doğru hızlı bir şekilde kaldırılır ve harcın kendi ağırlığıyla yayılması beklenir. Yayılan harcın birbirine dik iki yönde çapları ölçülüp aritmetik ortalaması alınarak yayılma çapı hesaplanır (Şekil 4.6). Standartlara göre bu çapın 240-260 mm aralığında olması gerekmektedir [22]. Aritmetik ortalama sonucu hesaplanan çap dikkate alınarak, bağıl çökme-yayılma değeri denklem (4.2)'de verilen formüle göre hesaplanmaktadır.

$$\Gamma_m = \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 - 1 \quad (4.2)$$

Buradan;

d : Deney sonucu elde edilen ortalama çap

d₀ : Kesik koninin alt çapı (100 mm)



Şekil 4.5. Mini çökme yayılma konisi



Şekil 4.6. Mini çökme yayılma çapının belirlenmesi

4.5.2. Viskozimetre Deneyi

Viskozimetre deneyi için kullanılan cihaz Brookfield DV-E'dir (Şekil 4.7). Numuneye göre cihaz içerisinde dönen milin çapı belirlenir (0.4 mm). Karıştırılıp hazırlanmış olan harç bir behere dökülür ve cihaz çalıştırılır. Mil dönmeye başladığında harcın mil ucuna karşı oluşturduğu burulma momenti (tork) değeri ölçülür. Milin ucu hızlandıkça değişen değerlere göre viskozite değişimleri belirlenir.

Harç karışımlarının 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarda viskozite değerleri ölçülmüştür. Her bir dönme hızına karşılık gelen değerler not edilmiş ve 100 devir/dk dönme hızından sonra geriye doğru tekrar ölçümler yapıp bu değerler ile ilk değerlerin aritmetik ortalaması alınarak her bir dönme hızına karşılık gelen değerler hesaplanmıştır. Böylece bütün harç karışımları için belirlenen açısal hızlara bağlı viskozite değerleri (cP) hesaplanıp viskozite-açısal hız grafiği çizilmiştir.



Şekil 4.7. Brookfield DV-E model viskozimetre

4.6. Sertleşmiş Harç Deneyleri

4.6.1. Üç Noktalı Eğilme ve Basınç Deneyleri

13 farklı karışımın her birinden 3'er numune alınarak toplamda 156 tane 40x40x160 mm prizmatik KYH numuneleri 3, 28, 180 gün şehir şebeke suyunda ve bir seri de 28 gün şehir şebeke suyunda bekletildikten sonra toplamda 180 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmişlerdir. Her bir kür süresi sonunda numuneler UTEST UTCM 6420 cihazında, TS EN 196-1'e göre üç noktalı eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur [49].

Numunelere önce 0.05 kN/s yükleme hızında üç noktada eğilme deneyi yapılmış (Şekil 4.8). Üç noktada eğilme deneyi sonucunda numuneler iki parçaya ayrılmış ve toplamda 312 numune basınç deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.9). Basınç deneyinde ise yükleme hızı 2.4 kN/s olarak belirlenmiştir. Hem üç noktada eğilme deneyinde hem de basınç deneyinde numunelerin dayanım değerlerinin aritmetik ortalaması hesaplanmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.8. (a) Üç noktalı eğilme deneyi, (b) Eğilme deneyine maruz kalmış numune, (c) Eğilme dayanım değeri



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.9. (a) Basınç deneyi, (b) Basınç deneyine maruz kalmış numune, (c) Basınç dayanım değeri

4.6.2. Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri

Her seriden 3'er numune olmak üzere toplam 39 tane 50x50x50 mm'lik küp numuneler hazırlanmıştır. 28 gün şehir şebeke suyunda bekletilen numunelerin doygun kuru yüzey yoğunluğu, etüv kurusu yoğunluğu, görünür yoğunluğu, porozitesi ve toplam su emme değerleri hesaplanmıştır. Kürden çıkarılan numunelerin suya doygun ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra 24 saat boyunca 105 °C±5 etüvde bekletilip etüv kurusu ağırlığı belirlenmiştir. Numunelerin Arşimet terazisinde su içerisindeki ağırlıkları ölçülmüştür. Buna bağlı olarak 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 denklemlerinde tüm serilere ait doygun kuru yüzey yoğunluğu, etüv kurusu yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam su emme ve porozite değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{Etüv Kurusu Yoğunluk} = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4.3)$$

$$\text{Doygun Kuru Yüzey Yoğunluk } \delta_{dyk} = \frac{W_3}{W_3 - W_2} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4.4)$$

$$\text{Görünür Yoğunluk } \delta_g = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4.5)$$

$$\text{Toplam Su Emme (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (4.6)$$

$$\text{Porozite (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (4.7)$$

W_1 = Etüv kurusu ağırlık (g)

W_2 = Sudaki ağırlık (g)

W_3 = Doygun kuru yüzey ağırlık (g)

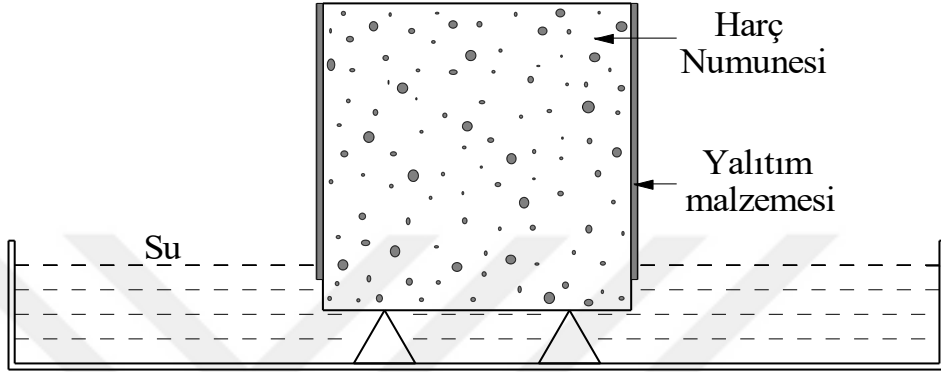
4.6.3. Kapiler Su Emme Deneyi

50 mm'lik küp numuneler, 28 gün sonunda kür havuzundan çıkarılarak 105°C±5'de hava sirkülasyonlu etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numuneler soğumasının ardından etüv kurusu ağırlığı belirlenmiştir. Daha sonra numunelerin yan yüzeyleri izole edilip tabanlarından itibaren 5 mm suya batacak biçimde Şekil 4.10'daki gibi düzeneğe yerleştirilmiştir. Küp numuneler 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dakikalık sürelerde sudan çıkarılıp yüzeyinde bulunan serbest sular bir bez yardımıyla silindikten sonra 0.01 g hassasiyetli tartılarda ağırlıkları ölçülüp kütle artışları belirlenmiştir (Şekil 4.11). TS 4045 [60] standardına uygun olarak kapiler su emme deneyi gerçekleştirilmiş olup kapilarite katsayısını hesaplamak için denklem (4.8)'deki formül kullanılmıştır.

$$K = \frac{Q^2}{A^2 \times t} \quad (4.8)$$

Burada;

- K = Kapilarite katsayısı (cm^2/s),
Q = Emilen su miktarı (cm^3),
A = Numune alanı (cm^2),
t = Geçen süre (s)



Şekil 4.10. Kapiler su emme deney düzeneği



Şekil 4.11. 24 saat sonunda su emmiş numunelerin görüntüsü

4.6.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi

Üretilen numunelerin bileşik yapılarını ortaya çıkarmak için Şekil 4.12’de verilen Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR cihazı kullanılmıştır. Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezinde FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. Analizi yapmadan önce numuneler iyice öğütülüp toz haline getirilmiştir. Daha sonra Potasyum Bromür ile karıştırılıp basınç altında 10 mm çapında 0.5 mm kalınlığında pellet haline getirilmiştir. $450\text{-}4500\text{ cm}^{-1}$

aralığındaki veriler optik sistem sayesinde elde edilmiştir. Numunelerin molekül veya bileşik yapısında bulunan bağları tanımlayıcı analizler, IR Spektrometre ile yapılmıştır. IR Spektrumu maddeyi oluşturan atomlar arasındaki bağların titreşimiyle ortaya çıkan frekanslarına karşılık gelen absorpsiyon pikleriyle örneğin kimliğini göstermektedir. Kolerasyon tablolarıyla hangi kimyasal bağların hangi dalga sayısı değerlerine ulaşacağı düzenlenmiştir. IR spektrumunda meydana gelen pikler molekülde bulunan çeşitli fonksiyonel gruplara ait olup spektrumun her bir pik bölgesinin değerlendirilmesi sonucunda o molekülde hangi fonksiyonel grubun olup olmadığı belirlenmektedir [61].



Şekil 4.12. FTIR cihazı

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Taze Harç Deney Sonuçları

5.1.1. Mini Çökme-Yayılma Deney Sonuçları

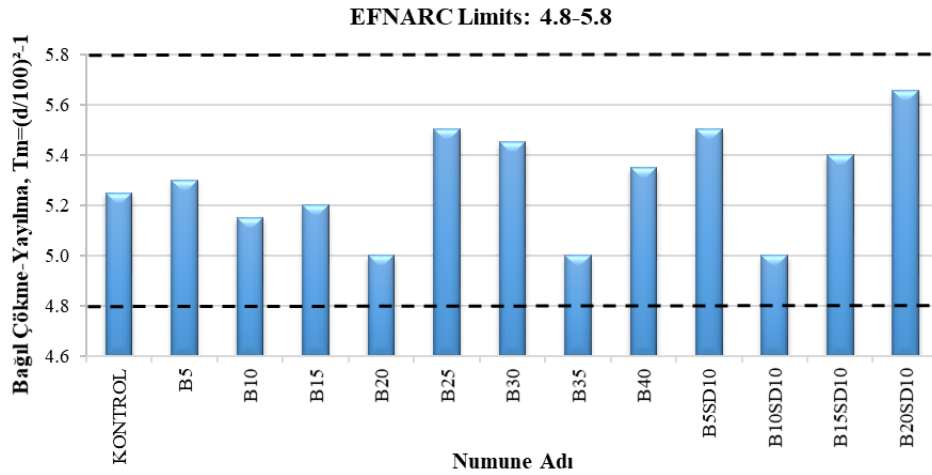
Kendiliğinden yerleşen harcın işlenebilirliğini ve kıvamını belirlemek için EFNARC (2002)'ın belirlediği standartlarda mini çökme-yayılma deneyi yapılmıştır.

Taze harç karışımlarının çökme-yayılma değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Tüm harç karışımlarında istenilen yayılma çapı 240-260 mm aralığındadır [22].

Tablo 5.1. Mini çökme-yayılma deney sonuçları

Karışım Kodu	Çökme-Yayılma (mm)	Bağlı Çökme-Yayılma
KONTROL	250	5.3
B5	251	5.3
B10	248	5.2
B15	249	5.2
B20	245	5.0
B25	255	5.5
B30	254	5.5
B35	245	5.0
B40	252	5.4
B5SD10	255	5.5
B10SD10	245	5.0
B15SD10	253	5.4
B20SD10	258	5.7

Tablo 5.1'deki çökme-yayılma değerleri kullanılarak denklem (4.2)'ye göre hesaplanan bağlı çökme-yayılma grafiği Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Bağlı çökme-yayılma grafiği

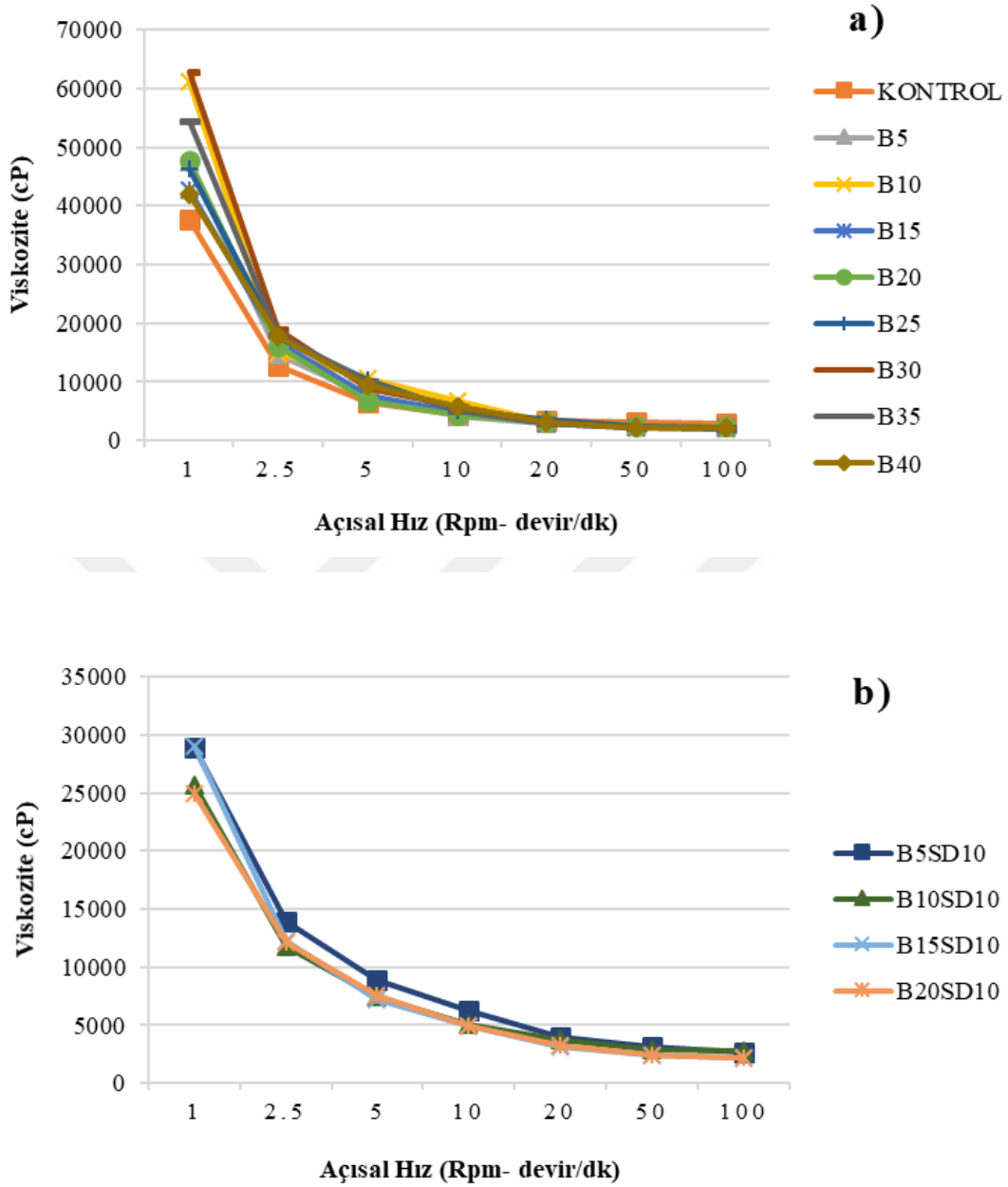
Bağlı çökme-yayılma grafiği incelendiğinde tüm değerlerin EFNARC (2002)'ın önerdiği aralıkta olduğu görülmektedir.

5.1.2. Viskozite Deneyi Sonuçları

KYB'nin istenilen akıcılığa ve ayrışmaya karşı dirence sahip olabilmesi için uygun viskozite değerine de sahip olması gerekmektedir. KYH karışımlarında işlenebilirlik ve kıvam özelliklerini belirlemek için karıştırma işleminden hemen sonra harçlar bir behere alınıp viskozite değerleri 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarda ölçülmüştür. Böylece farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri her bir karışım için belirlenmiş olup Tablo 5.2'de verilmiştir. Elde edilen viskozite değerleri doğrultusunda viskozite-açısal hız grafikleri Şekil 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Farklı açısal hız değerleri için harçların viskozite değerleri

KARIŞIM ADI	HIZ (RPM)						
	1	2.5	5	10	20	50	100
KONTROL	37600	12720	6500	4300	3310	3081	2837
B5	47400	14600	7680	4190	2990	2352	2207
B10	61200	15000	10600	6630	3235	2102	1840
B15	42700	16720	7660	4840	2995	2280	2180
B20	47700	16160	6640	4300	3055	2328	2302
B25	46300	17560	10440	5080	3505	2356	2237
B30	62950	18880	8960	5670	3130	2280	2079
B35	54400	17920	10060	5000	2970	2130	1987
B40	42000	17880	9380	5720	3105	2278	2095
B5SD10	28900	13960	8920	6220	3995	3100	2699
B10SD10	25700	11800	7420	5080	3705	2880	2787
B15SD10	29000	12200	7220	4870	3165	2356	2174
B20SD10	25000	12120	7620	4960	3220	2442	2185



Şekil 5.2. Viskozite grafikleri a) İkili karışımlar, b) Üçlü karışımlar

Tüm harçlarda dönele ucun açısal hızının artmasıyla ters orantılı olarak viskoziteleri azalmış ve viskozite eğrileri X eksenine doğru asimptotik bir yaklaşım göstermiştir.

Tablo 5.2 incelendiğinde ikili karışımların viskozitesi kontrol karışımına kıyasla en düşük dönme hızında daha yüksekken en yüksek dönme hızında ve 50 Rpm dönüş hızında kontrol karışımının viskozitesi daha yüksektir. 50 Rpm dönüş hızında kontrol karışımına kıyasla ikili karışımların viskoziteleri yüzdesel olarak sırayla %23.66, %31.78, %26, %24.44, %23.53, %26, %30.87, %26.06 oranında azalmıştır. Bazalt tozu ve silis dumanı içeren üçlü karışımların

viskoziteleri incelendiğinde ise hem en düşük hem de yüksek dönüş hızında bu karışımların viskozitelerinin kontrol karışımının viskozitesinden daha düşük oldukları gözlemlenmiştir.

5.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları

5.2.1. Sülfat Etkisiz Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

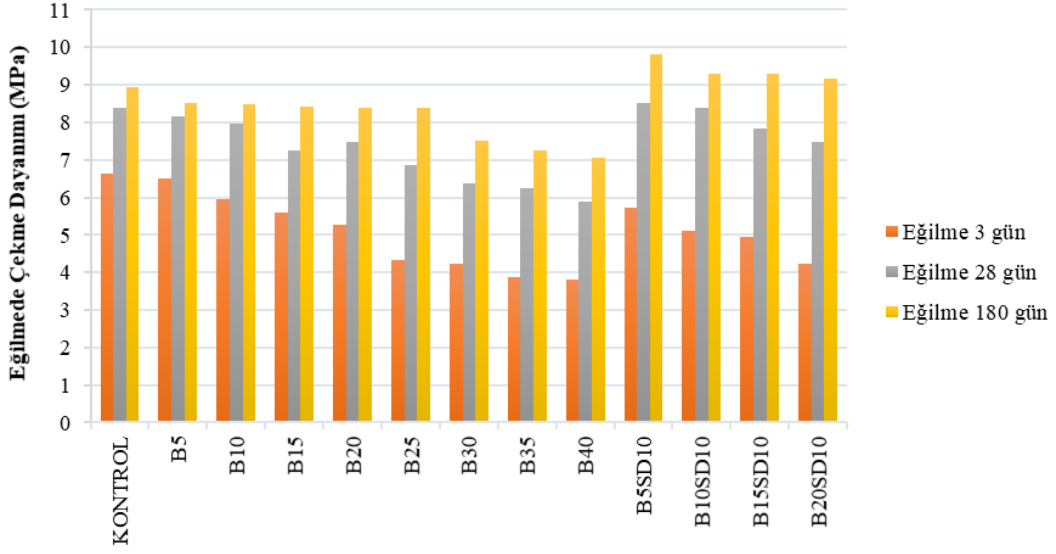
40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik KYH numuneleri 3, 28 ve 180 gün sonuna kadar şehir şebeke suyunda bekletilmesinin ardından üç noktalı eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Tablo 5.3'te deneylerden elde edilen değerler verilmiştir.

Tablo 5.3. Şehir şebeke suyu küründeki KYH numunelerinin eğilme ve basınç dayanım değerleri

ŞEHİR ŞEBEKE SUYU KÜR DEĞERLERİ						
Numune Adı	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)			Basınç Dayanımı (MPa)		
	3 gün	28 gün	180 gün	3 gün	28 gün	180 gün
KONTROL	6.632	8.375	8.926	35.076	52.143	68.131
B5	6.516	8.170	8.525	34.341	46.338	64.424
B10	5.953	7.963	8.473	30.038	43.966	62.760
B15	5.604	7.265	8.417	27.700	41.235	58.684
B20	5.259	7.465	8.383	25.738	40.123	55.031
B25	4.316	6.851	8.386	23.314	36.470	52.752
B30	4.222	6.377	7.498	18.753	33.184	46.359
B35	3.889	6.240	7.264	17.367	28.864	41.029
B40	3.824	5.885	7.053	17.097	27.035	38.076
B5SD10	5.712	8.521	9.804	34.545	55.156	71.802
B10SD10	5.106	8.389	9.283	30.969	52.285	67.272
B15SD10	4.952	7.834	9.282	28.164	42.563	65.891
B20SD10	4.234	7.483	9.155	25.979	42.224	62.183

Tablo 5.3'teki değerler doğrultusunda numunelerin eğilmede çekme değerlerinin kür süreleri ile karışım oranlarına göre değişimini gösteren grafik Şekil 5.3'te verilmiştir.

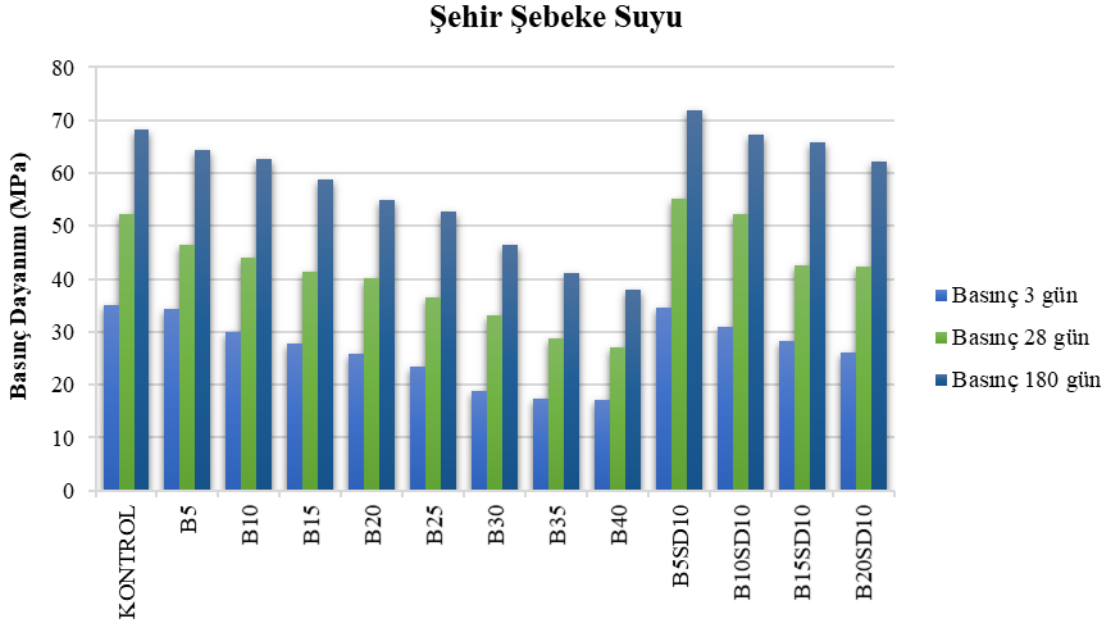
Şehir Şebeke Suyu



Şekil 5.3. Şehir şebeke sulu ortamda kür edilen numunelerin eğilmede çekme dayanım grafiği

Üç günlük kür süresi sonunda eğilme deneyi uygulanan numunelerde en yüksek dayanım kontrol numunesinde gözlemlenmiştir. Üç günün sonunda bazalt tozuna ek olarak %10 silis dumanı içeren B5SD10, B10SD10, B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerinin SD içermeyen emsallerinden sırasıyla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yalnızca bazalt tozu ikamesi içeren tüm numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları kontrol numunesinden daha düşüktür. %5 ve %10 bazalt tozu içeren B5 ve B10 kodlu numunelerin eğilme dayanımları kontrol numunesinden sadece %2.44 ve %4.92 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bazalt tozunun oranı arttıkça eğilme dayanımını düşmeye devam etmiştir. 28 günün sonunda bazalt tozuna ek olarak %10 SD içeren B5SD10 ve B10SD10 kodlu numunelerin eğilme dayanımları kontrol numunesine göre daha yüksek olup sırasıyla %1.71 ve %0.17 oranlarında arttırmaktadır. 3 günlük ve 28 günlük dayanımlarda olduğu gibi 180 günlük dayanımda da kontrol numunesinin eğilme dayanımı sadece katkı maddesi olarak bazalt tozu içeren numunelerden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 180 günlük kürlenme sonrası B5 ve B10 kodlu harç numunelerinin eğilme dayanımı kontrole yakın çıkmıştır. Silis dumanı içeren harç numuneleri hariç tutulduğunda 3. 28 ve 180 gün sonunda en yüksek eğilme dayanımı kontrol numunesinden, en düşük eğilme dayanımı ise B40 kodlu numuneden elde edilmiştir. 3 günün sonunda B40 kodlu numunenin eğilme dayanımı kontrolden %42.34, 28 günün sonunda %29.73, 180 günün sonunda ise %21 daha düşük olduğu belirlenmiştir. B5SD10, B10SD10, B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerin 180 günün sonunda eğilme dayanımları kontrol numunesinden daha yüksek olduğu belirlenmiş olup kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %8.95, %3.85, %3.83 ve %2.50 oranlarında artış gözlemlenmiştir.

Tablo 5.3'teki değerler doğrultusunda numunelerin basınç dayanım değerlerinin karışım oranları ile kür sürelerine göre değişimini gösteren grafik Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Şehir şebeke sulu ortamda kür edilen numunelerin basınç dayanım grafiği

Portland çimentosu sadece bazalt tozu ile ikame edildiğinde basınç dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. 3 günün sonunda kontrol numunesine kıyasla B5, B10 ve B15 kodlu numunelerin basınç dayanımları %2.1, %14.36 ve %21.03 daha düşük iken en yüksek bazalt tozu içeren B30, B35 ve B40 kodlu numunelerin basınç dayanımı kontrolden oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi ikili karışımların bazalt tozu ikamesi ne kadar yüksek olursa 3 günlük basınç dayanımı o kadar düşmektedir. İkili karışımlar arasında B5 kodlu numunenin basınç dayanımının en yüksek olduğu belirlenmiştir. Bazalt tozu ve silis dumanı içeren üçlü karışımlar içerisinde B5SD10 kodlu harç numunesinin 3 günlük basınç dayanımı referansa en yakın olmaktadır. Üç günün sonunda bazalt tozuna ek olarak %10 silis dumanı içeren B5SD10, B10SD10, B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen muadillerinden sırasıyla %0.59, %3.01, %1.65 ve %0.93 daha yüksektir.

28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, sadece bazalt tozu ikamesi içeren tüm numunelerin dayanımlarının kontrol numunesinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bazalt tozu ikame oranı arttıkça basınç dayanımındaki azalmanın devam ettiği gözlemlenmiştir. Kontrol karışımının mukavemeti ile ikili karışımların mukavemetleri arasındaki fark genellikle artan puzolanik reaksiyon nedeniyle kür süresi arttıkça azalmıştır [62–64]. Üç günün sonunda kontrol örneğinin basınç dayanımı sırasıyla B30, B35 ve B40 kodlu örneklerin basınç dayanımlarından

%87.04, %101.97 ve %105.16 daha yüksek iken 28 günün sonunda sırasıyla %57.13, %80.65 ve %92.87 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Uysal ve arkadaşları, Portland çimentosunu %10, %20 ve %30 azaltarak yerine bazalt tozu ikame ettikleri çalışmada 28 günlük basınç dayanımlarının kontrol örneğine kıyasla sırasıyla %5, %13.2 ve %18 azalma gösterdiğini belirlemişlerdir [65]. Başka bir çalışma bazalt tozu içeren örneklerin 28 günlük basınç dayanımlarının kontrolden daha düşük olduğunu göstermiştir [66].

3 günlük basınç dayanımı en yüksek kontrol numunesinden elde edilirken 28 günün sonunda B5SD10 ve B10SD10 kodlu numunelerin basınç dayanımları kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %5.78 ve %0.27 artmıştır. Silis dumanının bazalt tozu ile birlikte kullanımı ikincil hidratların üretimini arttırmış ve 28 günlük basınç dayanımını iyileştirmiştir. Burada, bazalt tozunun rolü bir katkı maddesi olarak yalnızca bazalt tozu içeren serilerin basınç dayanımını azaltan inert bir dolgu görevi gördüğü daha iyi anlaşılmaktadır [65]. B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerin basınç dayanımları silis dumansız emsallerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

3 günlük ve 28 günlük dayanımlarda olduğu gibi 180 gün sonunda da katkı maddesi olarak sadece bazalt tozu içeren tüm harç numunelerinin basınç dayanımları kontrol numunesinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bazalt tozunun çimento ikamesi olarak kullanıldığı bir çalışmada hem 28 günlük hem de 90 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiş ve bazalt tozu içeren numunelerin kontrol numunesine kıyasla dayanımlarının daha düşük olduğu belirtilmiştir [67]. %5 ve %10 bazalt tozu içeren B5 ve B10 kodlu karışımların basınç dayanımları kontrol numunesinden sırasıyla sadece %5.44 ve %7.88 daha düşük iken B35 ve B40 kodlu karışımların basınç dayanımları kontrol numunesinden sırasıyla %39.78 ve %44.11 daha düşüktür. B5SD10 kodlu örneğin 180 günlük basınç dayanımı ise kontrol numunesinden %5.39 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. B10SD10, B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerde ise kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %1.26, %3.29 ve %8.73 azalma olduğu gözlemlenmiştir. Harcın yaşı 28 günden 180 güne çıkarıldığında kontrol numunesinin basınç dayanımı %30.66 artarken B5, B10, B15, B20, B25, B30, B35 ve B40 kodlu ikili karışımlarda sırasıyla %39.03, %42.75, %42.32, %37.16, %44.64, %39.70, %42.14 ve %40.84 artış gözlemlenmiştir. B5SD10, B10SD10, B15SD110 ve B20SD10 kodlu üçlü karışımlarda ise sırasıyla %30.18, %28.66, %54.81, %47.27 artış belirlenmiştir.

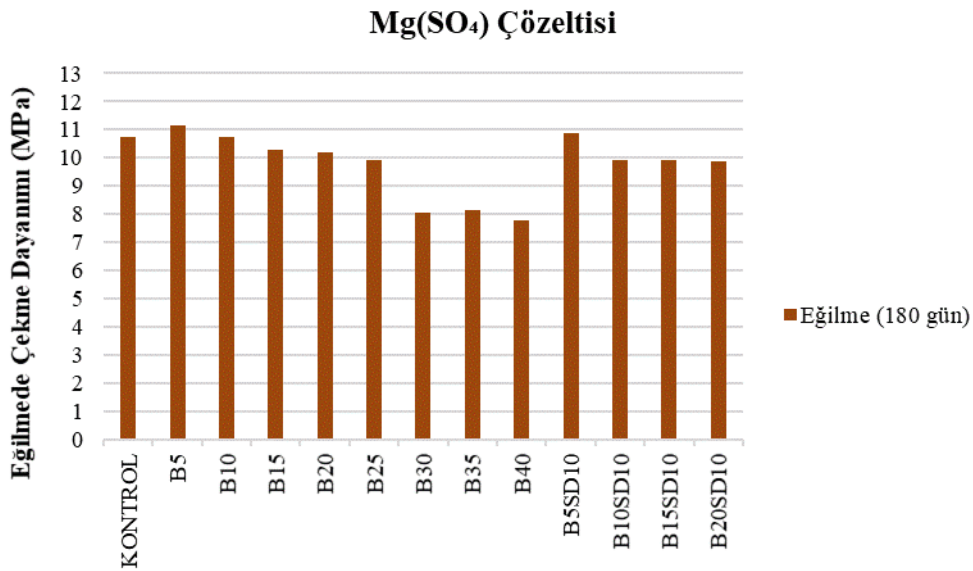
5.2.2. Sülfat Etkisinden Sonra Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

40x40x160 mm boyutundaki prizmatik kendiliğinden yerleşen harç numuneleri üzerindeki sülfat atağının etkisini incelemek için numuneler önce 28 gün şehir şebeke suyunda kür edilmiş daha sonra 180. günün sonuna kadar ağırlıkça %10 MgSO₄ çözeltisinde bekletilmesinin ardından üç noktalı eğilmede çekme ve basınç deneylerine tabi tutulmuş olup deney sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. MgSO₄ çözeltisi küründeki KYH numunelerinin eğilme ve basınç dayanım değerleri

Mg(SO₄) KÜR DEĞERLERİ (180 gün)		
Numune Adı	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
KONTROL	10.726	57.443
B5	11.135	56.731
B10	10.755	54.983
B15	10.278	51.766
B20	10.198	49.382
B25	9.908	45.834
B30	8.059	40.065
B35	8.146	35.829
B40	7.759	30.836
B5SD10	10.865	64.743
B10SD10	9.921	62.377
B15SD10	9.937	58.040
B20SD10	9.875	53.777

Tablo 5.4'teki değerler doğrultusunda numunelerin karışım oranlarına göre eğilmede çekme değerlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 5.5'te verilmiştir.

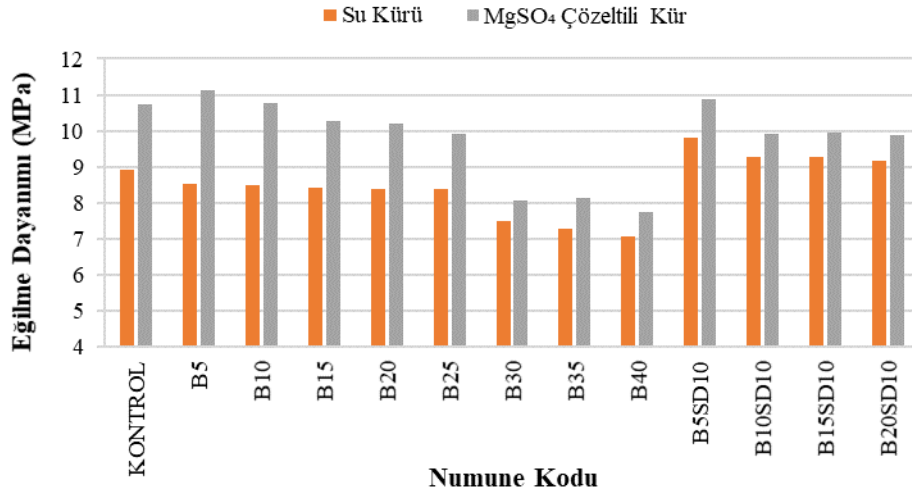


Şekil 5.5. MgSO₄ çözeltili ortamda kür edilen numunelerin eğilmede çekme dayanım grafiği

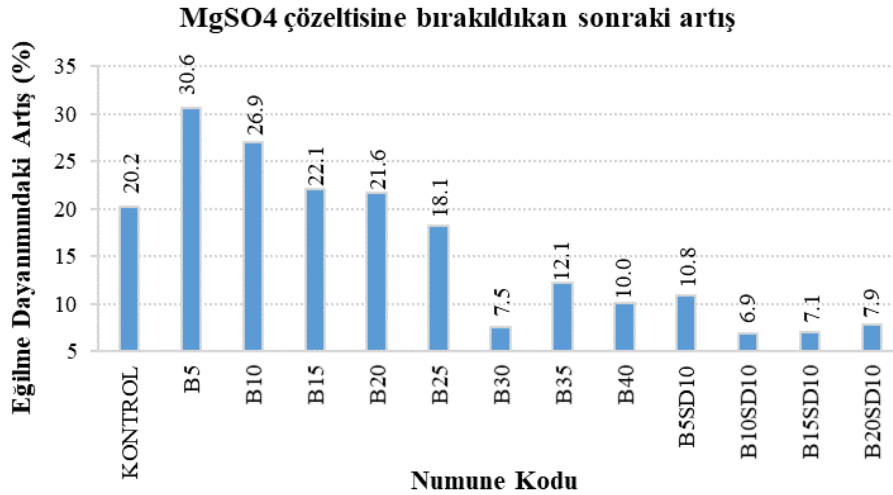
Şekil 5.5 incelendiğinde MgSO₄ çözeltili ortamda kür edilen B5 ve B10 kodlu numunelerin üç noktalı eğilmede çekme dayanımları kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %3.82 ve %0.27 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Diğer bazalt tozu içeren ikili karışımlarda ise eğilme dayanımlarının

kontrol numunesinden daha düşük değerlere sahip oldukları gözlemlenmiştir. B5SD10 kodlu üçlü karışımın eğilme dayanımı kontrol numunesine kıyasla %1.30 daha yüksek olup B10SD10, B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerin ise $MgSO_4$ çözeltisi ortamda kür edilmesi sonucu eğilme dayanımları kontrol numunesine kıyasla bir miktar daha düşük oldukları gözlemlenmiştir.

180 gün sonuna kadar hem suda hem de $MgSO_4$ çözeltisi ortamda bekletilen numunelerin eğilme dayanımları Şekil 5.6'da, ağırlıkça %10 $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonraki eğilme dayanımındaki artışlar Şekil 5.7'de verilmiştir.



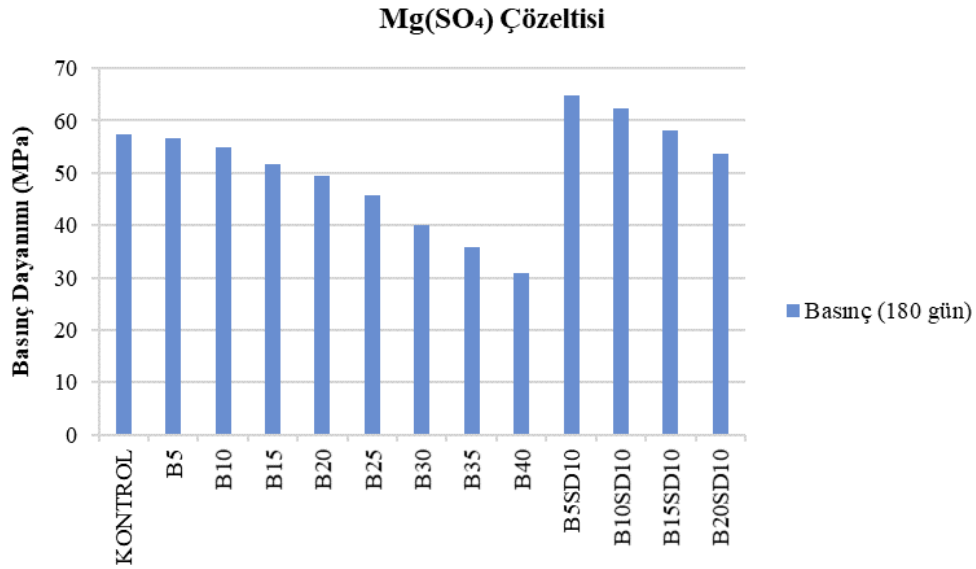
Şekil 5.6. 180 gün sonunda eğilme dayanımları



Şekil 5.7. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonraki eğilme dayanımındaki artış

MgSO₄ çözeltisine maruz kalan tüm numunelerin eğilme dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Kontrol numunesinin eğilme dayanımı sülfata maruz kaldıktan sonra %20.2'lik bir artış göstermiştir. B5, B10, B15 ve B20 kodlu numunelerin eğilme dayanımlarındaki artış kontrol numunesinin eğilme dayanımındaki artış oranından daha yüksektir. B25, B30, B35 ve B40 kodlu numunelerin dayanımındaki artışlar kontrol numunesinden daha düşüktür. KYH'de bazalt tozu ikamesinin sülfat direncini arttırdığı gözlemlenmiştir. %30, 35 ve 40 oranlarında bazalt tozu içeren numunelerin eğilme dayanımları MgSO₄ çözeltisine daldırıldıktan sonra artmasına rağmen bu artış hızı kontrol numunesindeki artış oranından daha düşüktür. MgSO₄ çözeltisinde bekletilen B5SD10, B10SD10, B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerin eğilme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Ancak bu artışın SD içermeyen emsallerinin ve kontrol numunesinin dayanım artış oranından daha düşük olduğu belirlenmiştir.

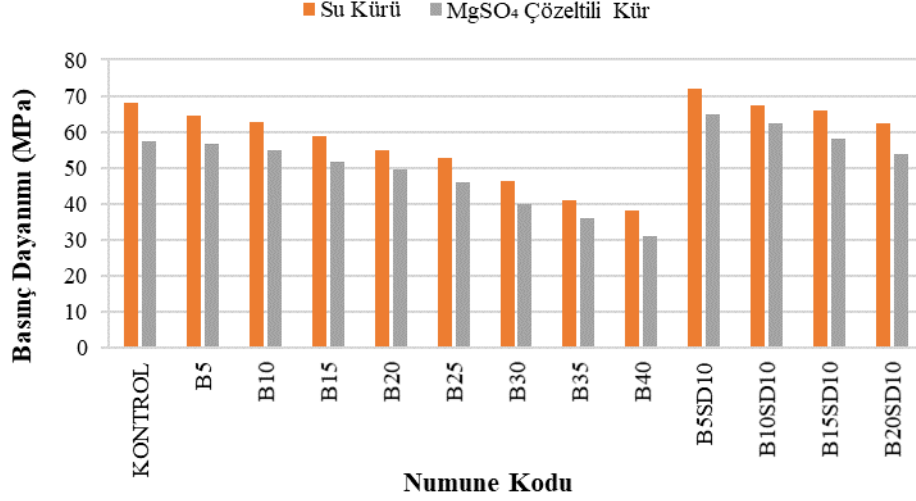
Tablo 5.4'teki değerler doğrultusunda numunelerin karışım oranlarına göre basınç dayanım değerlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 5.8'de verilmiştir.



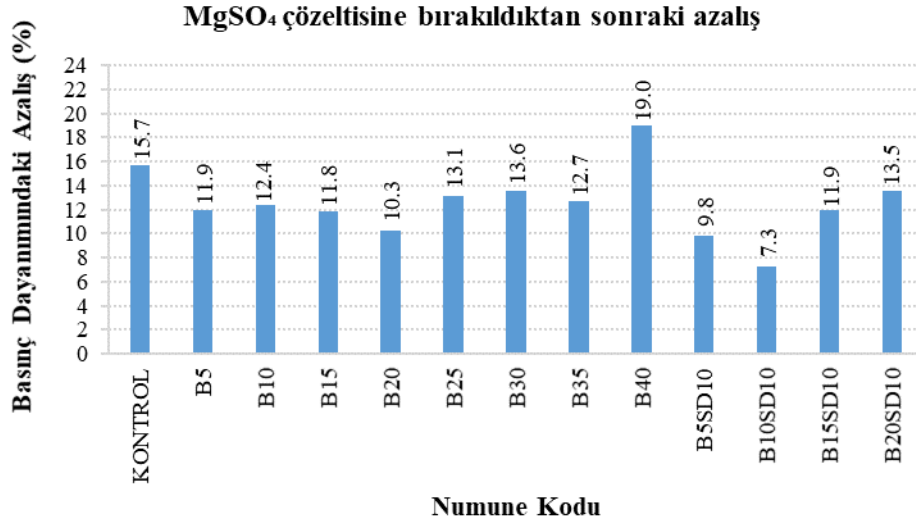
Şekil 5.8. MgSO₄ çözeltili ortamda kür edilen numunelerin basınç dayanım grafiği

Şekil 5.8 incelendiğinde MgSO₄ çözeltili ortamda kür edilen ikili karışımların basınç dayanımlarının kontrol numunesine kıyasla daha düşük oldukları gözlemlenmiştir. B5 ve B10 kodlu numunelerin basınç dayanımları kontrol numunesine kıyasla sırayla sadece %1.24 ve %4.28 daha düşüktür. Ancak numunelerdeki bazalt oranı arttıkça basınç dayanımları azalmaktadır. MgSO₄ çözeltili ortamda kür edilmiş B5SD10, B10SD10 ve B15SD10 kodlu numunelerin basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %12.17, %8.59 ve %1.04 oranlarında daha yüksek iken B20SD10 kodlu numunenin basınç dayanımı kontrole kıyasla %6.38 daha düşüktür.

180 gün sonuna kadar hem suda hem de $MgSO_4$ çözeltisi ortamında bekletilen numunelerin basınç dayanımları Şekil 5.9'da, ağırlıkça %10 $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonraki basınç dayanımındaki düşüş Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.9. 180 gün sonunda basınç dayanımı



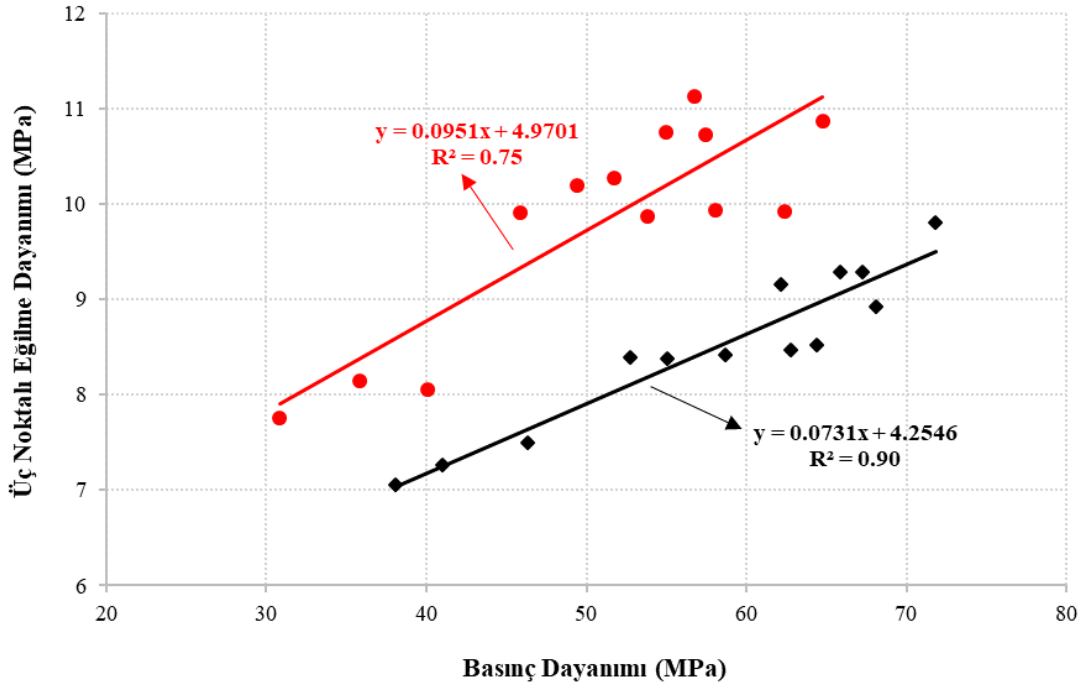
Şekil 5.10. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonraki basınç dayanımındaki azalış

$MgSO_4$ çözeltisine maruz kalan tüm numunelerin basınç dayanımları azalmıştır. %10'luk $MgSO_4$ çözeltisine daldırıldıktan sonra kontrol numunesinin basınç değeri %15.7 azalmıştır. Katkı maddesi olarak sadece bazalt tozu içeren numunelerin basınç dayanımları $MgSO_4$ çözeltisine daldırıldıktan sonra %10.3 ile %19 oranlarında azalmıştır. Katkı maddesi olarak yalnızca bazalt

tozu içeren harç numunelerinde sadece B40 kodlu numunenin dayanımındaki azalma kontrol numunesindeki dayanım düşüşünden daha fazla olmuştur. $MgSO_4$ 'e maruz kaldıktan sonra B40 kodlu numune dışındaki numunelerin dayanımındaki azalma kontrol numunesinden daha düşüktür. Binici ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; 180 gün $MgSO_4$ solüsyonunda bekletilen %5, %10, %15 ve %20 bazalt tozu içeren numunelerin basınç dayanımlarındaki ortalama kaybın %6.2 olduğunu ve kontrol numunesinin basınç kaybının da %22.1 olduğunu belirlemişlerdir [68]. $MgSO_4$ çözeltisine daldırıldıktan sonra bazalt tozu ve silis dumanı içeren tüm harç numunelerinin basınç dayanımındaki düşüş kontrol numunesindeki düşüşten daha azdır.

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi en yüksek bazalt tozu ikamesi içeren B40 kodlu numune dışında bazalt tozu içeren tüm numunelerin sülfat direnci kontrol numunesine kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Tüm harç karışımlarında en iyi sülfat direnci B10SD10 kodlu numuneden elde edilmiştir.

Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı birlikte incelendiğinde bazalt tozu ikamesinin sülfat direncini arttırdığı ancak belli bir orandan sonra olumsuz etkilediği anlaşılmıştır. $MgSO_4$ 'e maruz kalmadan önceki ile sonraki eğilme ve basınç dayanımları arasındaki korelasyon Şekil 5.11'de verilmiştir.



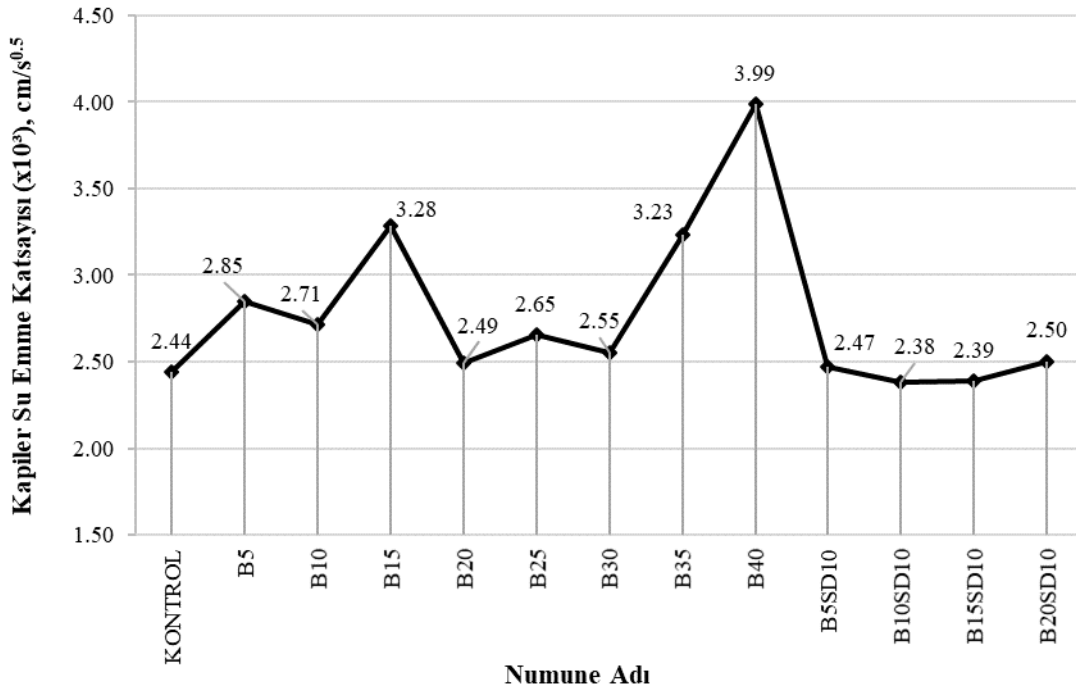
Şekil 5.11. Eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki

Şekil 5.11'de siyah renk, sülfata maruz kalmadan önceki korelasyonu gösterirken kırmızı renk sülfata maruz kaldıktan sonraki korelasyonu göstermektedir. Numuneler sülfat çözeltisine

daldırılmadan önce basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki korelasyon katsayısı (R^2) 0.90 iken sülfata maruz kaldıktan sonraki korelasyon katsayısı 0.75 olarak hesaplanmıştır.

5.2.3. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite

50 mm'lik küp numuneler 28 gün sonuna kadar su küründe bekletildikten sonra etüvde kurutulup yan yüzeyleri su geçirmez yalıtım malzemesiyle kaplanmıştır. Su emme deneyi için hazırlanan düzeneğe numuneler yerleştirilmiştir. İkili ve üçlü kombinasyonlarda bazalt tozu ve silis dumanı içeren numunelerin su emme miktarlarını belirleyebilmek için belirli aralıklarla tartımlar yapılmıştır. Kapiler su emme katsayıları, elde edilen tartım sonuçlarının denklem (4.8) kullanılarak hesaplanması sonucu belirlenmiş olup grafiği Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12. Kapiler su emme katsayıları

Şekil 5.12 incelendiğinde kontrol numunesinin basınç dayanımı bazalt tozu ikamesi içeren ikili karışımlardan daha yüksek iken kılcal su emmesi daha düşüktür. Harç/betonun mukavemeti ile gözeneklilik arasında yakın bir ilişki vardır. Gözenekli yapıya sahip harç/betonların basınç dayanımları daha düşüktür [69–71]. Bazalt tozuna ek olarak silis dumanı kullanılması daha kompakt bir yapı oluşturması nedeniyle üçlü karışımların su emme kapasitesi azalmıştır [70,71]. Üçlü karışımların kapiler su emme katsayıları sadece bazalt tozu içeren emsallerine göre daha düşüktür.

KYH numunelerinin etüv kuru ağırlıkları, su içerisindeki ağırlıkları ve doymun kuru yüzey ağırlıkları Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5. KYH numunelerinin etüv kuru, su içerisindeki ve doymun kuru yüzey ağırlıkları

Numune Adı	Etüv Kuru Ağırlık (W ₁)	Su İçindeki Ağırlık (W ₂)	DKY Ağırlık (W ₃)
KONTROL	269.42	161.69	279.07
B5	263.03	158.03	274.40
B10	271.57	163.14	284.59
B15	261.55	157.46	274.69
B20	265.63	159.31	279.96
B25	261.81	156.13	272.68
B30	259.38	154.94	274.27
B35	257.65	154.09	272.03
B40	252.25	151.73	265.75
B5SD10	267.11	157.95	277.15
B10SD10	267.80	157.59	277.55
B15SD10	263.78	155.79	271.88
B20SD10	262.96	154.28	274.79

Tablo 5.5'teki değerler doğrultusunda denklem (4.4), (4.5), (4.6) ve (4.7) kullanılarak numunelerin yoğunlukları, toplam su emme kapasitesi (%) ve porozite (%) değerleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 5.6 ile Tablo 5.7'de verilmiştir.

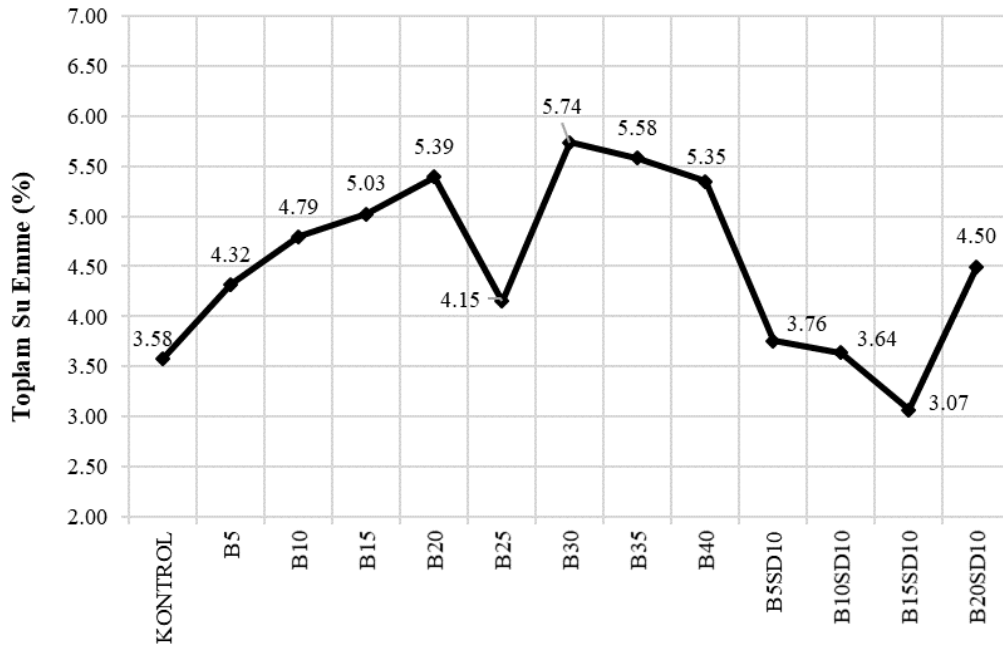
Tablo 5.6. 50x50x50 mm'lik küp numunelerin yoğunlukları

Numune Adı	DKY Yoğunluk (g/cm ³)	Görünür Yoğunluk (g/cm ³)
KONTROL	2.378	2.501
B5	2.358	2.505
B10	2.343	2.505
B15	2.343	2.513
B20	2.320	2.498
B25	2.340	2.477
B30	2.298	2.483
B35	2.306	2.488
B40	2.331	2.509
B5SD10	2.325	2.447
B10SD10	2.314	2.430
B15SD10	2.342	2.443
B20SD10	2.280	2.420

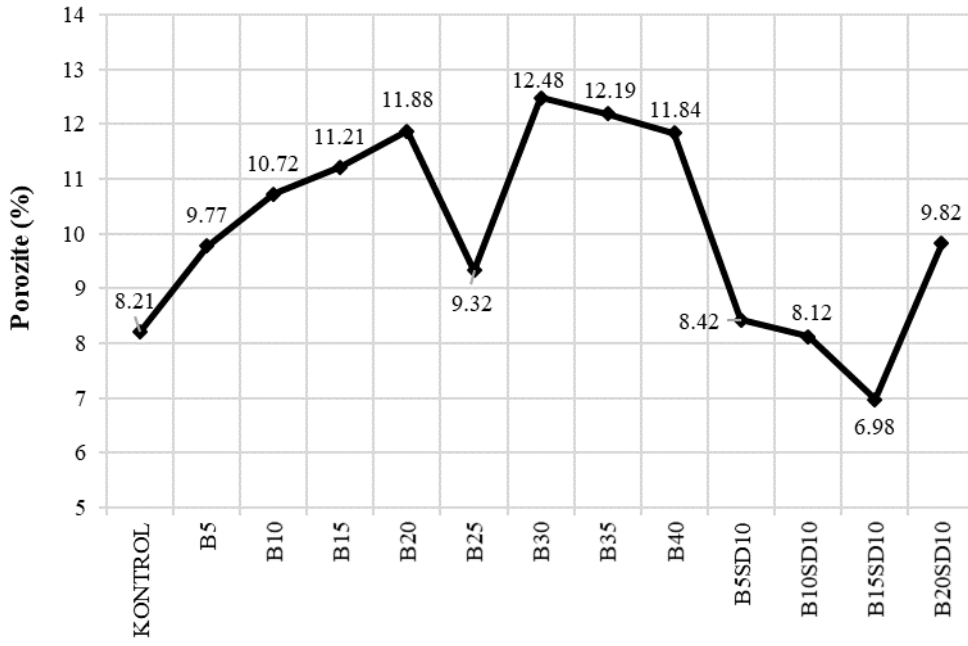
Tablo 5.7. 50x50x50 mm'lik küp numunelerin toplam su emme kapasitesi ve porozite

Numune Adı	Toplam Su Emme Kapasitesi (%)	Porozite (%)
KONTROL	3.58	8.21
B5	4.32	9.77
B10	4.79	10.72
B15	5.03	11.21
B20	5.39	11.88
B25	4.15	9.32
B30	5.74	12.48
B35	5.58	12.19
B40	5.35	11.84
B5SD10	3.76	8.42
B10SD10	3.64	8.12
B15SD10	3.07	6.98
B20SD10	4.50	9.82

Tablo 5.7'de KYH numunelerinin toplam su emme ve porozite değerlerine ait grafikler sırasıyla Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.13. 50 mm'lik küp numunelerin toplam su emme oranları

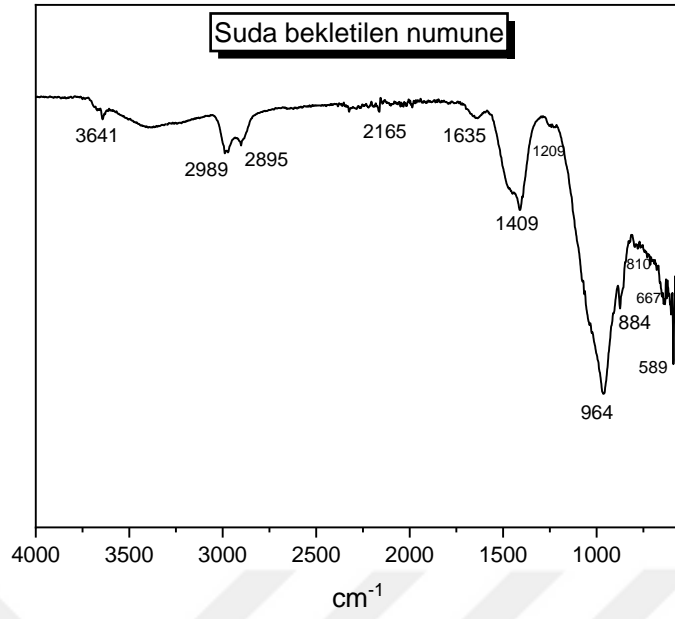


Şekil 5.14. 50 mm'lik küp numunelerin porozite oranları

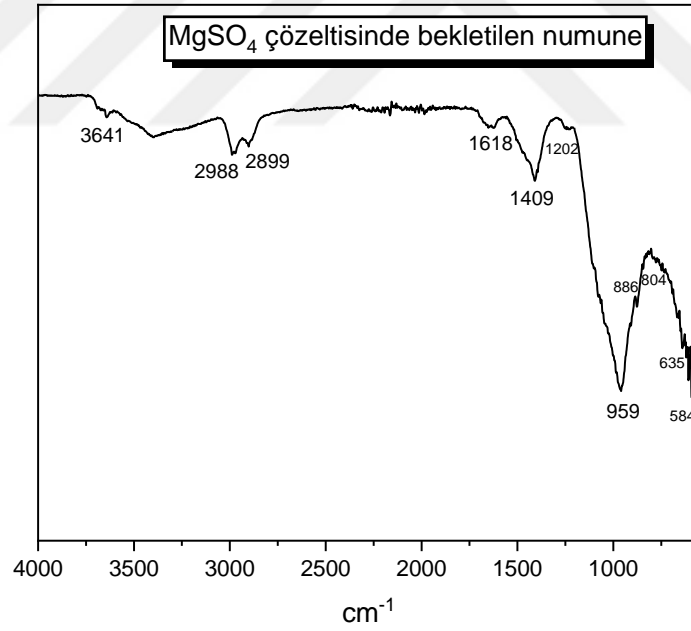
Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 incelendiğinde bazalt tozu içeren ikili karışımların su emme oranları ve poroziteleri kontrol karışımından daha yüksektir. Üçlü karışımlarda ise kontrole en yakın olan B10SD10 kodlu numunedir.

5.2.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi Sonuçları

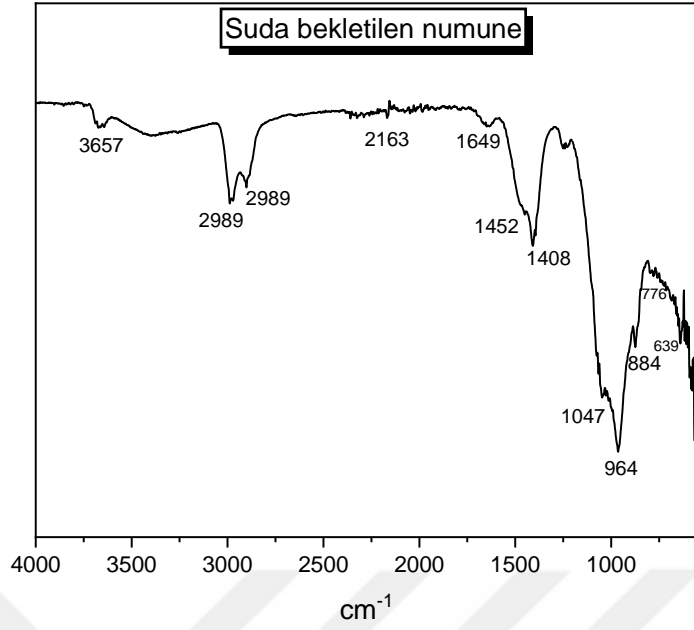
Suya daldırılmış B5SD10 kodlu numunenin FTIR spektrumu Şekil 5.15'de, aynı numunenin %10 MgSO₄ çözeltisine maruz kalan FTIR spektrumu ise Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Tüm numunelerin FTIR spektrumları 180 günün sonunda elde edilmiştir. Şekil 5.17, suya batırılmış B20SD10 numunesinin spektrumunu gösterirken, Şekil 5.18 ise MgSO₄'e maruz bırakılmış B20SD10 numunesinin spektrumunu sunmaktadır.



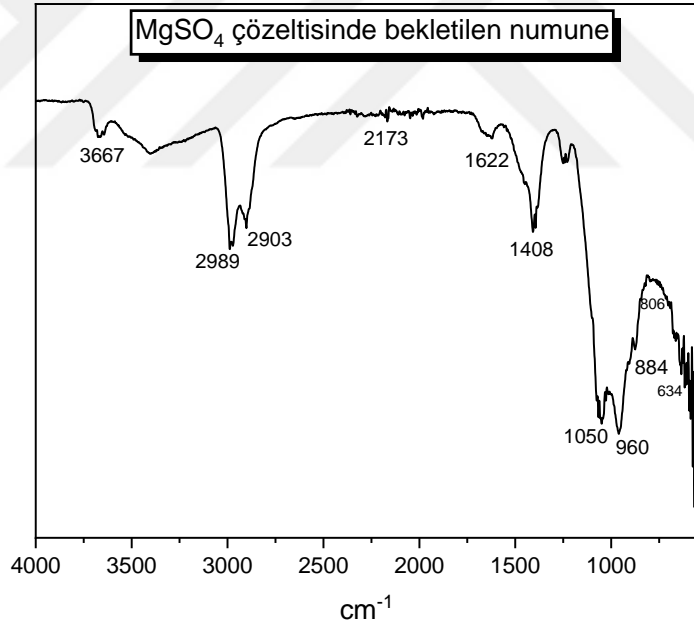
Şekil 5.15. Suda bekletilen B5SD10 kodlu numunenin FTIR spektrumu



Şekil 5.16. MgSO₄ çözeltisinde bekletilen B5SD10 kodlu numunenin FTIR spektrumu



Şekil 5.17. Suda bekletilen B20SD10 kodlu numunenin FTIR spektrumu



Şekil 5.18. MgSO₄ çözeltisinde bekletilen B20SD10 kodlu numunenin FTIR spektrumu

Spektrumlarda 3600-3700 cm⁻¹ arasındaki bant, portlanditin OH germe bandıyla ilgilidir [72–74]. 960-1050 cm⁻¹ arasındaki bantlar Si-O asimetrik gerilme ile karakterize edilir ve C-S-H'yi (kalsiyum-silikat-hidrat) gösterir [72–74]. 885 civarındaki bant karbonatla ilişkilidir [73–75]. 1410 cm⁻¹ civarındaki tepe noktası karbonatın C-O eğilme titreşiminden kaynaklanır [75]. 2800-2990 cm⁻¹ aralığında da zayıf bir bant (C-O) görüldüğü belirtilmiştir [73]. 1640 cm⁻¹'deki bant H₂O'nun

bükülmesiyle ilişkilidir [74]. 600 cm^{-1} civarındaki bant Si-O-Si'nin eğilme titreşim modlarına karşılık gelir [76,77].

MgSO₄'e maruz bırakılan örneklerin FTIR spektrumları, maruz kalmayan benzerleri ile karşılaştırıldığında; Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de görüldüğü gibi sülfata maruz bırakılan örneklerin FTIR spektrumları ile maruz kalmayan örneklerin FTIR spektrumları arasında önemli bir fark yoktur.



6. SONUÇLAR

Bu çalışmada KYH’de bağlayıcı olan çimento ile ikameli olarak Elazığ yöresine ait bazalt taşı öğütülüp bazalt tozu haline getirildikten sonra %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40 oranlarında ikili kombinasyonlar ve Antalya yöresine ait silis dumanı %10 oranında sabit tutulup bazalt miktarı %5, %10, %15, %20 oranlarında kullanılıp üçlü kombinasyonlarda mineral katkı olarak kullanılmışlardır. Bazalt tozu ve silis dumanı içeren kendiliğinden yerleşen harç numunelerinin işlenebilirlik ve kıvamını belirlemek için mini çökme yayılma deneyi ve viskozimetre deneyi yapılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için ise eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca tüm serilere ait numunelerin kapiler su emme deney sonuçları doğrultusunda kapiler su emme katsayısı, toplam su emme değerleri ve poroziteleri hesaplanmıştır. Yapılan tüm deneyler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Tüm karışımların mini çökme yayılma deneyi değerleri EFNARC (2002)’ın uygun gördüğü değerler arasındadır.
- Tüm karışımların su emme oranları %2’nin altında olup en yüksek su emme oranı %1.14 ile bazı bazalt tozu içeren ikili karışımlardan elde edilirken en düşük su emme oranı %1.06 ile B5SD10 ve B10SD10 kodlu üçlü karışımlardan elde edilmiştir. Bazalt tozu ve silis dumanı içeren üçlü karışımların su emme oranlarının kontrol karışımından daha düşük olması harç içindeki gözenek ve boşlukları doldurmasından kaynaklanmaktadır.
- İkili karışımların viskoziteleri en düşük dönüş hızında kontrol karışımından daha yüksekken, kontrol karışımının viskozitesi en yüksek dönüş hızında daha yüksektir. Bazalt tozu ve silis dumanı içeren üçlü karışımların viskoziteleri ise hem en düşük hem de en yüksek dönüş hızında kontrol karışımının viskozitesinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. İkili karışımlarda olduğu gibi üçlü karışımların viskozitesi artan dönüş hızıyla azalmıştır.
- İkili ve üçlü karışımların 3 günlük su kürü süresi sonunda basınç dayanımları kontrol harcına kıyasla düşük çıkmıştır. Bazalt tozu ikame oranı arttıkça 3 günlük basınç dayanımı daha fazla azalma göstermiştir. İkili karışımlar arasında en yüksek basınç dayanımını %5 bazalt içeren harç numunesi göstermiştir. 3 günün sonunda bazalt tozuna ek olarak %10 silis dumanı içeren üçlü karışımların basınç dayanımı silis dumanı içermeyen muadillerine göre daha yüksek çıkmıştır.
- 28 günlük su kürü süresi sonunda sadece bazalt tozu içeren ikili karışımların basınç dayanımları kontrol karışımından daha düşük çıkmıştır. %5 ve %10 bazalt tozuna ilave %10 SD içeren üçlü karışımların 28 günlük basınç dayanımları kontrol karışımına kıyasla sırası ile %5.8 ve %0.3 daha yüksektir. B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerin 28

günlük basınç dayanımları kontrole kıyasla daha düşük olmasına rağmen SD içermeyen emsallerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

- 180 günlük su kürü süresi sonunda da bazalt tozu içeren ikili karışımların basınç dayanımı kontrol karışımından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bazalt miktarı arttıkça dayanım daha da düşmektedir. %5 bazalt ve %10 silis dumanı içeren B5SD10 kodlu karışımın 180 günlük basınç dayanımı kontrol karışımından %5.39 daha yüksektir. B10SD10, B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerin basınç dayanımları ise kontrolden sırasıyla %1.26, %3.29 ve %8.73 daha düşüktür.
- Harcın yaşı 28 günden 180 güne çıkarıldığında kontrol numunesinin basınç dayanımı %30.66 artarken bazalt tozu içeren ikili karışımların basınç dayanımları %37.16 ile %44.64 arasında bir artış göstermiştir. Üçlü karışımlarda ise bu oran %28.66 ile %54.81 arasında bir değişim göstermektedir.
- Kontrol numunesine kıyasla bazalt tozu içeren ikili karışımların basınç deneyi yapılırken daha sünek bir kırılma gösterdikleri belirlenmiştir.
- 3 günlük normal kürde bekletilen KYH numunelerinin üç noktalı eğilme dayanımları hem ikili karışımlarda hem de üçlü karışımlarda kontrole kıyasla daha düşük çıkmıştır.
- 28 günlük su küründe bekletilen numunelerin eğilme dayanımları incelendiğinde ikili karışımların dayanım değerleri kontrolden daha düşük çıkmıştır. İkili karışımlar içinde eğilme dayanımı kontrole en yakın olan B5 kodlu numune olup kontrolden %2.44 daha düşüktür. Üçlü karışımlarda ise B5SD10 ve B10SD10 kodlu numunelerin eğilme dayanımları kontrole kıyasla %1.74 ve %0.17 daha yüksek olduğu, B15SD10 ve B20SD10 kodlu numunelerin eğilme dayanımlarının ise kontrolden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.
- 180 günlük su küründe bekletilen numunelerin eğilme dayanımları incelendiğinde bazalt tozu içeren ikili karışımların dayanımı kontrolden daha düşük çıkmıştır. %5, %10, %15 ve %20 bazalt tozu ile %10 silis dumanı içeren üçlü karışımlarda ise eğilme dayanımları kontrolden daha yüksek çıkmış olup sırasıyla %9.83, %4.00, %3.98 ve %2.56 oranlarındadır.
- Portland çimentosu %10'a kadar bazalt tozu ile değiştirildiğinde uzun süreli basınç ve eğilme dayanımlarının kontrol harcına yakın olabileceği gözlemlenmiştir.
- $MgSO_4$ çözeltilisine maruz kalan tüm numunelerin basınç dayanımlarında bir düşüş gözlemlenmiştir. %40 bazalt tozu içeren B40 kodlu karışım hariç tüm ikili ve üçlü karışımların sülfata maruz kaldıktan sonra basınç dayanımlarındaki azalma, kontrol numunesinin basınç dayanımındaki azalmadan daha düşük olmuştur. Tüm harc karışımları arasında en iyi sülfat direnci %10 bazalt tozu ve %10 silis dumanı içeren B10SD10 kodlu numuneden elde edilmiştir.

- $MgSO_4$ çözeltilisine daldırılan numunelerde basınç dayanımlarının aksine eğilme dayanımlarında artış gözlemlendi. B5, B10, B15 ve B20 kodlu numunelerin eğilme dayanımlarındaki artış kontrol numunesine kıyasla daha yüksek iken B25, B30, B35 ve B40 kodlu numunelerin eğilme dayanımlarındaki artış kontrol numunesinden daha düşük olmuştur. Bazalt tozu ve silis dumanı içeren üçlü karışımlarda ise sülfata maruz kaldıktan sonraki eğilme dayanımlarındaki artışlar kontrol harcının dayanımındaki artıştan daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Bazalt tozu kullanımının sülfat atağına karşı olumlu etki yarattığı gözlemlenmiştir.
- Kendiliğinden yerleşen harç numuneleri için yapılan kapiler su emme deneyi sonuçlarına göre kontrol numunesinin kapiler su emme katsayısı, bazalt tozu içeren ikili karışımlara kıyasla daha düşüktür. Bu durum aynı zamanda kontrol karışımının basınç dayanımının ikili karışımların basınç dayanımından daha yüksek olmasının nedenlerindedir. Bazalt tozu ve silis dumanı içeren üçlü karışımlar ise daha kompakt bir yapı oluştuğu için su emme kapasiteleri azalmıştır. En yüksek kapiler su emme katsayısı B40 kodlu numuneden, en düşük kapiler su emme katsayısı ise B10SD10 kodlu numuneden elde edilmiştir.
- Bazalt tozu içeren ikili karışımların poroziteleri ve toplam su emme değerleri kontrol karışımına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Toplam su emme katsayısı ve porozitesi kontrol numunesine en yakın olan ise %10 bazalt tozu ve %10 silis dumanı içeren B10SD10 kodlu karışımdır.
- FTIR analizleri numunelerin 6 ay süreyle $MgSO_4$ çözeltilisine maruz bırakıldıktan sonra spektrumda belirgin bir değişikliğin meydana gelmediğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] T.Y. Erdogan, Concrete, Middle East Tech. Univ. Press. Ankara, Turkey. (2003).
- [2] B. Baradan, S. Türkel, Yazıcı H, Ün H, Yiğiter H, Felekoğlu B, Tosun K, Aydın S, Yardımcı YM, Topal A, Öztürk AU, Beton. İzmir, Türkiye, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları. (2012).
- [3] B. Felekoğlu, Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, Temmuz. 251 (2003) 14.
- [4] Ş. Geçer, Kendiliğinden yerleşen harç ve betonlarda çimento ikame malzemesi olarak zeolitin kullanılabilirliği, (2020).
- [5] A. Mardani-Aghabaglou, G.İ. Sezer, K. Ramyar, Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point, Constr. Build. Mater. 70 (2014) 17–25.
- [6] Y. Erkan, Magmatik Petrografi; Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendislik Bölümü Raporu 44, Ankara, Turkey. (1995).
- [7] A. Neville, The confused world of sulfate attack on concrete, Cem. Concr. Res. 34 (2004) 1275–1296.
- [8] V. Akyüncü, M.T. Cihan, Bazalt tozu katkılı harçların mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg. 21 (2019) 697–707.
- [9] M. Doğruyol, Diyarbakır Bazaltının Mineral Katkılar İle Kullanılmasının Betonun Dayanım ve Dayanıklılığına Etkisi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Doktora Tezi. (2017) 134.
- [10] A. Orhan, A.K. Namık, A. Erensoy, Ç.E.K. Nurettin, Betonda Bazalt Agreganın Kullanımı ve Özellikleri, Avrupa Bilim ve Teknol. Derg. (2020) 524–532.
- [11] A.E. Kahveci, A. Kadayıfçı, Diyarbakır yöresi bazalt taşının yapısal özelliklerinin incelenmesi, Uluslararası Teknol. Bilim. Derg. 5 (2013) 56–69.
- [12] H.H. Balaneji, Farklı Mineral Katkılı Betonların Sülfat Direncinin Belirlenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum. (2017) 132.
- [13] O. Gencel, W. Brostow, T. Datashvili, M. Thedford, Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash, Compos. Interfaces. 18 (2011) 169–184.
- [14] A. Beycioğlu, Kendiliğinden yerleşen betonlarda beton ile donatı aderansı ilişkisinin araştırılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, Yapı Teknol. Anabilimdalı, Doktora Tezi. (2013).
- [15] N. Haddadou, R. Chaid, Y. Ghernouti, Experimental study on steel fibre reinforced self-compacting concrete incorporating high volume of marble powder, Eur. J. Environ. Civ. Eng. 19 (2015) 48–64.
- [16] İ.B. Topçu, T. Bilir, H. Baylavlı, Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimar. Fakültesi Derg. 21 (2008) 1–22.
- [17] B. Felekoğlu, K. Tosun Felekoğlu, Kendiliğinden Yerleşen Beton Üretiminde Polikarboksilat Esaslı Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Kullanımı, Hazır Bet. 124 (2014) 60–69.
- [18] C. Kılınç, K.Y. Betonlar, Hazır Beton Dergisi, (2012).
- [19] EFNARC, The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use, International Bureau for Precast Concrete (BIBM), 2005.
- [20] M. Şahmaran, H.A. Christianto, İ.Ö. Yaman, The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars, Cem. Concr. Compos. 28 (2006) 432–440.
- [21] İ.B. Topçu, O. Ünal, T. Uygunoğlu, Kendiliğinden Yerleşen Betonda Mineral Katkıların Taze Beton Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu. (2007) 181–193.
- [22] EFNARC, Guidelines for self-compacting concrete, London, UK Assoc. House. 32 (2002) 34.
- [23] TS 706 EN 12620-A1. Aggregates for Concrete., Inst. Turkish Stand. Ankara, Turkey. (2009).

- [24] C. Druta, Tensile strength and bonding characteristics of self-compacting concrete, (2003).
- [25] A. Faheem, S.A. Rizwan, T.A. Bier, Properties of self-compacting mortars using blends of limestone powder, fly ash, and zeolite powder, *Constr. Build. Mater.* 286 (2021) 122788.
- [26] S.T. Erdoğan, T.Y. Erdoğan, Puzolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu. (2007) 263–275.
- [27] A. Yeğınobalı, Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, Ankara. (2007).
- [28] M. Tokyay, Cement and concrete mineral admixtures, CRC Press, 2016.
- [29] S. Elshafie, G.S. Whittleston, A review of the effect of basalt fibre lengths and proportions on the mechanical properties of concrete., *Int. J. Res. Eng. Technol.* 4 (2015) 458–465.
- [30] M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta, Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 593–597.
- [31] V. Ramakrishnan, N.S. Tolmare, V.B. Brik, Performance evaluation of 3-D basalt fiber reinforced concrete & basalt rod reinforced concrete, (1998).
- [32] B. Güven, Bazaltlardan işlenebilir cam-seramik malzeme üretim imkanlarının araştırılması, (2017).
- [33] M. Di Ludovico, A. Prota, G. Manfredi, Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement, *J. Compos. Constr.* 14 (2010) 541–552.
- [34] A. Akıllı, Bazalt Agregasının mekanik özelliklerinin yol üstü yapısında kullanımını açısından incelenmesi, (2012).
- [35] M. Aslan, A. BAKIŞ, Usability of pumice, ignimbrite and perlite in stone mastic asphalt, *Avrupa Bilim ve Teknol. Derg.* (2020) 743–754.
- [36] A. Tekin, Diyarbakır: Anadolu tarihinin taşlara yazıldığı kent, DÜ Basımevi, 1997.
- [37] A. Yılmaz, Ferrokrom ve silikoferrokrom cürüfları ile silis dumanının yol üstü yapısında kullanımının incelenmesi, (2008).
- [38] ACI 212.3R-10., Report on Chemical Admixture for Concrete, (2010) 65.
- [39] M. Sonebi, P.J.M. Bartos, Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete, *Mater. Struct.* 35 (2002) 462–469.
- [40] V.S. Ramachandran, M. Malhotra, Concrete Admixtures Handbook-Part 7: Superplasticizers, (1984).
- [41] A.M. Neville, J.J. Brooks, Concrete Technology Longman Scientific and Technical, (1987) 155.
- [42] A. Sağlık, E. Tunç, M.F. Kocabeyler, Kimyasal ve Mineral Katkıların Kütle Betonunu Tasarımında Yeri ve Önemi, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara. (2007).
- [43] M.S. Akman, Kimyasal katkıların betona uygulanması, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası. 4 (1996) 30–31.
- [44] M. Uysal, K. Yılmaz, Aşırı dozda akışkanlaştırıcı katkı kullanımının beton özelliklerine etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg. 25 (2012) 19–34.
- [45] R. İnce, Yapı Malzemesi Ders Notları, Fırat Üniversitesi. (2005) 46.
- [46] TS EN 12350-8. Beton-taze beton deneyleri-kendiliğinden yerleşen beton-çökme yayılma deneyi., (2011).
- [47] TS EN 12350-9. Beton-taze beton deneyleri-kendiliğinden yerleşen beton-V hunisi deneyi., (2011).
- [48] A. Kandemir, Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 177s. İzmir. (2005).
- [49] TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları, Türk Stand. Enstitüsü, Ankara. (2002).
- [50] E. Gürses, Deniz suyunun farklı tip ve dozajdaki mineral katkıları kendiliğinden yerleşen harçların mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, Elazığ. (2013).

- [51] B. Baradan, H. Yazici, H. Ün, Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir. (2002) 79–88.
- [52] İ. Ustabaş, Sülfat etkisine maruz mineral katkılı beton ve harçların performansının incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Tek. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü, Trabzon. (2008) 135.
- [53] M. Santhanam, M.D. Cohen, J. Olek, Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 325–332.
- [54] M. Nehdi, M. Hayek, Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 731–742.
- [55] M. Collepari, A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 401–407.
- [56] S. Diamond, R.J. Lee, Microstructural alterations associated with sulfate attack in permeable concretes, *Am. Ceram. Soc. Inc, Mater. Sci. Concr. Sulfate Attack Mech.* (1999) 123–173.
- [57] M.D.A. Thomas, C.A. Rogers, R.F. Bleszynski, Occurrences of thaumasite in laboratory and field concrete, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 1045–1050.
- [58] E.F. Irassar, M. Gonzalez, V. Rahhal, Sulphate resistance of type V cements with limestone filler and natural pozzolana, *Cem. Concr. Compos.* 22 (2000) 361–368.
- [59] J. Marchand, I. Odler, J.P. Skalny, Sulfate attack on concrete, CRC Press, 2001.
- [60] TS 4045. Yapı malzemelerinde kapiler su emme tayini, TSE, Ankara. (1984).
- [61] M. Dener, Alkali-aktif yüksek fırın çürufu bağlayıcılı hafif agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların mühendislik özellikleri, Fırat Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ. (2022).
- [62] F. Arslan, A. Benli, M. Karataş, Effect of high temperature on the performance of self-compacting mortars produced with calcined kaolin and metakaolin, *Constr. Build. Mater.* 256 (2020) 119497.
- [63] A. Benli, Mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing binary and ternary mixes of fly ash and silica fume, *Struct. Concr.* 20 (2019) 1096–1108.
- [64] M. Karataş, B. Balun, A. Benli, High temperature resistance of self-compacting lightweight mortar incorporating expanded perlite and pumice, *Comput. Concr. An Int. J.* 19 (2017) 121–126.
- [65] M. Uysal, K. Yılmaz, M. Ipek, The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 263–270.
- [66] S. Unčík, V. Kmecová, The effect of basalt powder on the properties of cement composites, *Procedia Eng.* 65 (2013) 51–56.
- [67] M. Uysal, K. Yılmaz, Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 771–776.
- [68] H. Binici, Y. Yardim, O. Aksogan, R. Resatoglu, A. Dincer, A. Karpuz, Durability properties of concretes made with sand and cement size basalt, *Sustain. Mater. Technol.* 23 (2020) e00145.
- [69] A. Benli, M. Karataş, Y. Bakır, An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume, *Constr. Build. Mater.* 144 (2017) 552–562.
- [70] P. Chindapasirt, S. Rukzon, Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1601–1606.
- [71] C.H. Malami, V. Kaloidas, G. Batis, N. Kouloumbi, Carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures, *Cem. Concr. Res.* 24 (1994) 1444–1454.
- [72] M.A. Alhaji, P.K. Sharma, Effect of sulphate attack on strength of recycled aggregate concrete containing silica fume and hybrid fibres, (n.d.).
- [73] V. Tanwar, K. Bisht, K.I.S.A. Kabeer, P. V Ramana, Experimental investigation of mechanical properties and resistance to acid and sulphate attack of GGBS based concrete mixes with beverage glass waste as fine aggregate, *J. Build. Eng.* 41 (2021) 102372.

- [74] M.E.-S.I. Saraya, Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study, *Constr. Build. Mater.* 72 (2014) 104–112.
- [75] Y. Wang, X. He, Y. Su, J. Huang, B. Ma, Effect of silica fume on the thaumasite form of sulfate attack on cement-based materials, *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 32 (2017) 1108–1114.
- [76] P. Rovnaník, P. Bayer, P. Rovnaníková, Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1479–1487.
- [77] M. Dener, M. Karatas, M. Mohabbi, High temperature resistance of self compacting alkali activated slag/portland cement composite using lightweight aggregate, *Constr. Build. Mater.* 290 (2021) 123250.



