

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DIATOMİTİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
HARÇLARDA PUZOLANİK MALZEME OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Büşra KARABULUT

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAYIS 2025

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**DIATOMİTİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARDA
PUZOLANİK MALZEME OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
Büşra KARABULUT

Danışman
Prof. Dr. Mehmet KARATAŞ

MAYIS 2025
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Diatomitin Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Yazarı: Büşra KARABULUT

İlk Teslim Tarihi: 17.04.2025

Savunma Tarihi: 30.05.2025

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: Prof. Dr. Mehmet KARATAŞ
Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

İmza
Onayladım

Başkan: Prof. Dr. Ragıp İNCE
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Onayladım

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Merve ŞAHİN YÖN
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 ‘‘Diatomitin Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması’’ 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 desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

30.05.2025

Büşra KARABULUT



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi ve deneyimlerini her zaman paylaşan, yönlendirmeleriyle çalışmamı şekillendiren kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Karataş'a gönülden teşekkür ederim. Ayrıca, katkılarından dolayı Munzur Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Dr. Öğretim Üyesi Sayın Merve Şahin Yön'e, süper akışkanlaştırıcı temininde destek sağlayan Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye, diatomit teminindeki katkılarından dolayı NB Global Madencilik ve Kimya San. Tic. A.Ş.'ye ve magnezyum sülfat çözeltisinin hazırlanmasında yardımcı olan Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Filiz Kar'a teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte, varlıklarıyla bana güç veren, her koşulda yanımda olarak çalışmalarımı destekleyen sevgili aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Büşra KARABULUT

ELAZIĞ, 2025



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.....	5
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri	5
2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları	6
2.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Kullanılan Malzemeler	7
2.3.1. Çimento	7
2.3.2. Agregası	8
2.3.3. Su.....	8
2.3.4. Mineral Katkılar	9
2.3.5. Kimyasal Katkılar.....	10
3. PUZOLANİK MALZEME OLARAK DİATOMİT	13
3.1. Tanımı ve Tarihiçesi	13
3.2. Kullanım Alanları	14
3.3. Dünya’da ve Türkiye’de Rezerv Durumu	15
3.4. Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	17
3.5. Puzolanik Aktivitesi.....	19
4. MATERYAL VE METOT.....	20
4.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	20
4.1.1. Çimento	21
4.1.2. Agregası	21
4.1.3. Mineral Katkılar	22
4.1.4. Kimyasal Katkılar.....	24
4.1.5. Magnezyum Sülfat (MgSO ₄) Çözeltisi	25
4.1.6. Su.....	25
4.1.7. KYH Karışım Hesabı.....	25
4.2. Taze Harç Deneyleri	28
4.2.1. Mini Çökme Yayılma Deneyi.....	28
4.2.2. Viskozimetre Deneyi	29
4.2.3. KYH Karışımlarının Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kür İşlemi	30
4.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri.....	32
4.3.1. Üç Noktalı Eğilme ve Basınç Deneyi	33
4.3.2. Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri	34
4.3.3. Kapiler Su Emme Deneyi	35
4.3.4. Donma-Çözülme Deneyi	36
4.3.5. Sülfat Çözeltisi Deneyi.....	38

4.3.6. Mikroyapı Analizi.....	39
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
5.1. Taze Harç Deney Sonuçları	40
5.1.1. Mini Çökme-Yayıma Deney Sonuçları	40
5.1.2. Viskozite Deney sonuçları	41
5.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları.....	43
5.2.1. Üç Noktalı Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	43
5.2.2. Sülfat Etkisi Sonrası Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	47
5.2.3. Sülfat Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim	51
5.2.4. Donma-Çözülme Etkisi Sonrası Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	53
5.2.5. Donma-Çözülme Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim.....	55
5.2.6. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite Deney Sonuçları	58
5.2.7. Faz Analizi.....	62
6. SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR.....	70
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Diatomitin Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Büşra KARABULUT

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2025, Sayfa: xi + 73

Bu tez çalışmasında, kendiliğinden yerleşen harç (KYH) üretiminde diatomit ve uçucu kül katkılarının dayanım ve durabilite özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. KYH'nin işlenebilirlik özellikleri mini çökme-yayıma ve viskozimetre deneyleriyle, mekanik ve dayanıklılık özellikleri ise eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı, sülfat direnci ve donma-çözülme testleriyle değerlendirilmiştir.

Toplamda 19 farklı karışım hazırlanmış ve her deney için üçer numune dökülmüştür. İkili karışımlarda Portland çimentosu %5, %10, %15 ve %20 oranlarında diatomit ile ikame edilmiştir. Üçlü karışımlarda ise toplam mineral katkı oranı %30'u aşmayacak şekilde düzenlenmiş; sabit diatomit miktarlarına (%5, %10, %15, %20) farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25) uçucu kül eklenmiştir.

Sertleşmiş hal özellikleri 40x40x160 mm prizmatik ve 50x50x50 mm küp numunelerle analiz edilmiştir. Ayrıca yoğunluk, porozite, toplam su emme ve kapiler su emme testleri uygulanmıştır.

Çalışma sonucunda, %5 diatomit içeren ikili karışımın ve %5 diatomit ile %5 uçucu kül içeren üçlü karışımın kontrol numunesine yakın dayanım ve dayanıklılık özellikleri sergilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Diatomit, Uçucu kül, Kendiliğinden yerleşen harç, Donma-çözülme, Sülfat direnci

ABSTRACT

Investigation of the Usability of Diatomite as a Pozzolanic Material in Self-Compacting Mortars

Büşra KARABULUT

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering
Civil Engineering Technologies
May 2025, Pages: xi + 73

In this thesis study, the effects of diatomite and fly ash (FA) additives on the strength and durability properties of self-compacting mortar (SCM) were investigated. The workability properties of SCM were evaluated using mini slump flow and viscometer tests, while mechanical and durability properties were analyzed through flexural strength, compressive strength, sulfate resistance, and freeze-thaw tests.

A total of 19 different mixtures were prepared, and three samples were cast for each test. In binary mixtures, Portland cement was replaced with diatomite at rates of 5%, 10%, 15%, and 20%. In ternary mixtures, the total mineral additive ratio was limited to not exceed 30%, and varying amounts of fly ash (5%, 10%, 15%, 20%, 25%) were added to fixed diatomite levels (5%, 10%, 15%, 20%).

The hardened state properties were analyzed using 40x40x160 mm prismatic and 50x50x50 mm cubic specimens. Additionally, density, porosity, total water absorption, and capillary water absorption tests were conducted.

As a result of the study, it was determined that the binary mixture containing 5% diatomite and the ternary mixture containing 5% diatomite and 5% fly ash exhibited strength and durability properties close to those of the control specimen.

Keywords: Diatomite, Fly Ash, Self-Compacting Mortar, Freeze-Thaw, Sulfate Resistance

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	KYB'nin bileşim özellikleri..... 5
Şekil 3.1.	Doğal diatomit rezervi görselleri; a. Nevada, Oregon/USA, b. Afyonkarahisar/Türkiye [11] 14
Şekil 3.2.	Türkiye'de bulunan diatomit yatakları..... 17
Şekil 3.3.	Diatomitin taramalı elektron mikroskobu görselleri [69] 18
Şekil 4.1.	Agrega 22
Şekil 4.2.	KYH'de kullanılan agreganın granülometri eğrisi..... 22
Şekil 4.3.	Diatomit 23
Şekil 4.4.	Uçucu Kül..... 24
Şekil 4.5.	Mini çökme yayılma deney aparatı ve düzeneği..... 28
Şekil 4.6.	Mini çökme-yayılma çapının ölçümü 29
Şekil 4.7.	Brookfield DV-E model viskozimetre cihazı..... 30
Şekil 4.8.	KYH'lerin kalıplara yerleştirilmesi 31
Şekil 4.9.	Şebeke suyunda kür edilen numuneler..... 32
Şekil 4.10.	(a) Magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin ilk hali. (b) Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin son hali 32
Şekil 4.11.	Üç noktalı eğilme testi 33
Şekil 4.12.	Basınç testi..... 34
Şekil 4.13.	Yan yüzeyleri izole edilmiş numunelerin su emmesi 36
Şekil 4.14.	24 saatlik sürenin ardından numunelerin su emmiş görüntüleri..... 36
Şekil 4.15.	+20 °C'de çözdürülen numuneler 37
Şekil 4.16.	Donma-çözülme döngülerine tabi tutulan numunelerin son durumu 37
Şekil 4.17.	Donma-çözülme döngüleri sonrası numunelerin yakından görünümü 38
Şekil 4.18.	Sülfat çözeltisinden çıkarılan numunelerin görünümü 39
Şekil 4.19.	a) Sülfat çözeltisine maruz kalmayan numune b) Sülfat çözeltisine maruz kalan numune..... 39
Şekil 5.1.	Bağlı çökme-yayılma grafiği 41
Şekil 5.2.	İkili karışımların viskozite grafiği 42
Şekil 5.3.	Üçlü Karışımların viskozite grafiği 43
Şekil 5.4.	Üç noktalı eğilmede çekme dayanımı grafiği 45
Şekil 5.5.	Basınç dayanımı grafiği 46
Şekil 5.6.	MgSO ₄ çözeltisinde kür edilen numunelerin eğilme çekme dayanım grafiği 49
Şekil 5.7.	MgSO ₄ çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanım grafiği 50

Şekil 5.8.	MgSO ₄ çözeltisinde kür edilen numunelerin ağırlık değişim grafiği	52
Şekil 5.9.	MgSO ₄ çözeltisinde kür edilen numunelerin ağırlık artışları (%)	52
Şekil 5.10.	Donma-çözülme döngüsü sonrası eğilmede çekme dayanım grafiği	54
Şekil 5.11.	Donma-çözülme döngüsü sonrası basınç dayanım grafiği.....	55
Şekil 5.12.	Tekrarlı donma-çözülme döngüleri sonrası numunelerin ağırlık değişim grafiği	57
Şekil 5.13.	Tekrarlı donma-çözülme döngüleri sonrası numunelerin ağırlık değişim yüzdeleri	57
Şekil 5.14.	Kapiler su emme katsayıları.....	58
Şekil 5.15.	Toplam su emme kapasitesi değişimleri	61
Şekil 5.16.	Porozite değişimleri	62
Şekil 5.17.	D20 numunesinin sülfat saldırısından önce a) SEM ve b) EDS görüntüleri	63
Şekil 5.18.	D20 numunesinin sülfat saldırısından sonra c) SEM ve d) EDS görüntüleri	63
Şekil 5.19.	D20UK10 numunesinin sülfat saldırısından önce e) SEM ve f) EDS görüntüleri	64
Şekil 5.20.	D20UK10 numunesinin sülfat saldırısından sonra e) SEM ve f) EDS görüntüleri	65

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Mineral katkıların su ile reaksiyonuna göre sınıflandırılması [38]	10
Tablo 3.1. Diatomitin ticari değeri bakımından kimyasal bileşim sınır değeri [11].....	18
Tablo 4.1. CEM I 42.5 R sınıfı Portland çimentosu kimyasal bileşenleri	21
Tablo 4.2. CEM I 42.5 R sınıfı Portland çimentosu fiziksel özellikleri	21
Tablo 4.3. Diatomitin fiziksel ve kimyasal özellikleri	23
Tablo 4.4. C sınıfı uçucu kül fiziksel ve kimyasal özellikleri	24
Tablo 4.5. Akışkanlaştırıcı katkının özellikleri	25
Tablo 4.6. KYH karışım oranları	27
Tablo 5.1. Mini çökme-yayıma deney sonuçları	40
Tablo 5.2. Farklı açılma hızlarında KYH karışımlarının viskozite değerleri.....	42
Tablo 5.3. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri	44
Tablo 5.4. MgSO ₄ çözeltilisinde kür edilen KYH'lerin eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri	48
Tablo 5.5. Sülfat çözeltilisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri	51
Tablo 5.6. Donma-Çözülme döngülerine tabi tutulan numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanım değerleri	53
Tablo 5.7. Tekrarlı donma-çözülme döngüleri sonrası numunelerin ağırlık değişimi	56
Tablo 5.8. KYH numunelerinin etüv kuru su içerişindeki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları.....	59
Tablo 5.9. 50x50x50 mm'lik küp numunelerin yoğunlukları	60
Tablo 5.10. 50x50x50 mm boyutlu küp numunelerin toplam su emme kapasitesi ve porozite değerleri ..	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: 1 m ³ betonda kullanılacak dere agregası miktarı (kg)
cP	: Viskozite değeri
Ç	: 1 m ³ betonda kullanılacak çimento miktarı (kg)
d	: Deney sonucunda ölçülen ortalama yayılma çapı (mm)
d ₀	: Kesik koninin taban çapı (mm)
H	: 1 m ³ betondaki havanın hacmi (dm ³)
K	: Kapiler su emme katsayısı (cm ² /s)
Q	: Emilen su miktarı (cm ³)
Rpm	: Açısız hız
SA	: 1 m ³ betonda kullanılacak süper akışkanlaştırıcı miktarı (kg)
t	: Geçen süre (s)
W	: 1 m ³ betonda kullanılacak su miktarı
W ₁	: Numunenin etüvde kurutulmuş ağırlığı (gr)
W ₂	: Numunenin su içerisindeki ağırlığı (gr)
W ₃	: Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (gr)
µm	: Mikrometre (1 mm = 1x10 ³ µm)
γ _{ag}	: Dere agregasının özgül ağırlığı (kg/dm ³)
γ _ç	: Çimentonun özgül ağırlığı (kg/dm ³)
γ _d	: Diatomitin özgül ağırlığı (kg/dm ³)
γ _{uk}	: Uçucu külün özgül ağırlığı (kg/dm ³)
γ _{sa}	: Süper akışkanlaştırıcının özgül ağırlığı (kg/dm ³)

Kısaltmalar

C ₃ A	: Kalsiyum Alüminat (3CaOAl ₂ O ₃)
CaCO ₃	: Kalsiyum Karbonat
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat Jel
DKY	: Doymuş Kuru Yüzey
EDS	: Enerji Dağıtıcı Spektroskopi
EFNARC	: European Federation of National Associations Representing for Concrete
HF	: Hidroflorik Asit
KYB	: Kendiliğinden yerleşen beton
KYH	: Kendiliğinden Yerleşen Harç
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
SEM	: Scanning Electron Microscope
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu Kül
VAK	: Viskozite Arttırıcı Katkı

1. GİRİŞ

Beton; çimento, agrega, su ve kimyasal katkı maddelerinin karıştırılmasıyla oluşturulan, başlangıçta plastik kıvamlı ancak zamanla sertleşerek dayanıklı hale gelen ve günümüzde inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan temel bir yapı malzemesidir [1].

Geleneksel betonun en büyük sorunlarından biri, sıkıştırılması için dış enerjiye ihtiyaç duymasıdır. Bu işlem, sahada vibratörler veya beton fabrikalarında titreşimli masalar gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Betonun tam dayanımına ulaşabilmesi için düzgün sıkıştırılması şarttır; aksi takdirde, beton tam dayanımına ulaşamaz. Yeterli titreşim uygulanmayan geleneksel beton, düzgün sıkıştırılmadığında, olması gerekenden çok daha düşük bir kaliteye sahip olur. Dayanım kaybı bazı durumlarda kabul edilebilir olsa da, dayanıklılıktaki azalma genellikle daha büyük bir sorun teşkil eder ve donatı korozyonu, don hasarı ve sülfat saldırısı gibi hızlandırılmış bozulma süreçlerine yol açabilir[1,2].

1980'li yılların başında Japonya'da yapılan araştırmalar, betonarme yapılarda durabilite sorunlarının önemli bir sebebinin taze betonun yeterince sıkıştırılmadan yerleştirilmesi olduğunu ortaya koymuştur. Taze betonun yeterli derecede sıkıştırılması için gereken nitelikli iş gücünün yetersizliği, betonun kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, işçiler ne kadar deneyimli olursa olsun, özellikle işlenebilirliği düşük betonlarda homojen bir sıkıştırma enerjisi sağlamak, pratikte büyük zorluklar barındırmaktadır. Bu sorunu çözmek için, sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duymadan kendi ağırlığı ile sıkışarak yerleşebilen özel bir beton türü geliştirilmiştir [3,4].

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), inşaat sektöründe devrim yaratan bir yeniliktir. Bu özel beton türü, kendi ağırlığı sayesinde sık donatılmış, dar ve derin kesitlere kolaylıkla yerleşebilir ve iç veya dış vibrasyon gerektirmeden kendiliğinden sıkışabilir. KYB, ayrışma ve terleme gibi sorunlar yaratmadan kohezyonunu korur ve çok akıcı bir kıvama sahiptir. Düşük akma gerilimi, sabit viskozite ve yüksek deformabilite özellikleri sayesinde, sıkışık bölgelerde bile mükemmel performans gösterir. Ayrıca, segregasyon ve petek oluşumuna karşı yüksek direnç sağlar. Beton teknolojisinde önemli bir yenilik olarak kabul edilen KYB, kendi ağırlığı altında kalıplara ve karmaşık donatıların altına akarak, titreşim gerektirmeden mükemmel işlenebilirlik, dayanıklılık ve üstün mekanik özellikler sunar. Bu özellikleriyle, inşaat endüstrisinde kalite ve verimliliği artırarak önemli bir gelişme sağlamıştır [5–7].

KYB'nin en büyük dezavantajlarından biri, kimyasal katkı maddeleri ve yüksek miktarda Portland çimentosu kullanımı nedeniyle ortaya çıkan yüksek maliyetlerdir. Bu maliyeti düşürmenin etkili bir yolu, kireçtaşı tozu, doğal puzolanlar ve uçucu kül (UK) gibi mineral katkı maddelerinin kullanılmasıdır. İnce taneli bu malzemeler, beton karışımına dahil edilerek Portland çimentosunun bir kısmının yerini alabilir. Özellikle bu mineral katkı maddeleri endüstriyel yan ürünler veya atıklar olduğunda, KYB'nin maliyetini önemli ölçüde azaltacaktır. Ayrıca, uçucu kül gibi bazı

mineral katkı maddeleri, betonun işlenebilirliğini, dayanıklılığını ve uzun vadeli performansını artırma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, KYB’de bu tür mineral katkı maddelerinin kullanılması, sadece maliyeti düşürmekle kalmaz, aynı zamanda betonun uzun vadeli performansını da iyileştirir, bu da onu daha sürdürülebilir ve ekonomik bir seçenek haline getirir [8,9].

Farklı puzolanik malzemeler arasında diatomit, ülkemizde iyi kalitede rezervleri bulunan bol ve ucuz bir malzemedir [10]. Diatomit, mikroskobik algler olan diyatomların (Bacillariophyta) fosilleşmiş silisli kabuklarından oluşan organik bir sedimanter kayadır. Diyatomlar yaşam döngülerini tamamladıklarında silisli kabukları çökerek diatomit rezervlerini meydana getirir. Diatomit üretim teknolojisi 1930’lardan itibaren gelişmiş ve izolasyon, filtre yardımcısı, katkı maddesi ve refrakter malzemesi gibi çeşitli amaçlar için diatomit üretimi yapılmıştır. Diatomitlerin çimentolu sistemlerde kullanılması ise 1950’lerden sonra başlamıştır [11].

Beton, kullanım ömrü boyunca çeşitli fiziksel, kimyasal, mekanik ve fiziko-kimyasal etkilerle hasar görebilir. Bu çevresel faktörler, betonun performansının zamanla azalmasına ve tasarlanan ömründen önce işlevini yitirmesine neden olabilir. Fiziksel etkilerden biri olan tekrarlı donma-çözülme döngüleri, betonun bulunduğu ortamın koşullarına, nem durumuna, sıcaklık değişimlerine ve suyun donma hızına bağlı olarak değişir. Sürekli tekrarlanan donma-çözülme döngüleri, betonun yüzeyinde kılcal çatlaklar ve ardından soyulmalar ve dökülmeler şeklinde hasara yol açar. Donma olayı, betonun bileşenlerinden olan çimento hamuru ve agrega tanelerinde zararlı etkiler gösterir. Donmaya karşı dayanıklı beton elde etmek için, çimento hamurunun kompakt, agreganın ise düşük poroziteli olması tercih edilir [12,13].

Kimyasal etkilerden biri olan sülfat saldırısı, betonun sülfat içeren su veya toprakla temas etmesi sonucu meydana gelir. Bu süreçte, sülfat iyonları betonun hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek zararlı bileşiklerin oluşmasına neden olur. Sülfat saldırısının betona etkileri arasında mukavemet kaybı, geçirimsizlik özelliğinin kaybı, çatlaklar ve korozyon ile estetik bozulmalar bulunur. Puzolanik özellik taşıyan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi katkı maddeleri, betonun sülfat saldırısına karşı direncini önemli ölçüde artırır. Bu katkılar, betonun geçirimsizliğini artırarak sülfat iyonlarının beton içine nüfuz etmesini zorlaştırır. Betonun geçirimsizliğini artırmak için su/çimento oranı düşük tutulmalı ve uygun kür yöntemleri uygulanmalıdır. Ayrıca, beton yüzeyine su yalıtımı sağlayan kaplamalar uygulanabilir. Bu önlemler, betonun sülfat saldırısına karşı dayanıklılığını artırarak uzun ömürlü ve sağlam yapılar elde edilmesine katkı sağlar [14–16].

Yılmaz ve Ediz, amorf ve gözenekli yapıya sahip ham ve kalsine diatomitin çimento üretiminde kullanımını incelemiştir. Bu araştırma, ham ve kalsine diatomitin çimento üretiminde kullanımının, çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir. Ham diatomitin %10’a kadar olan ilavelerde olumlu sonuçlar verdiğini, kalsine diatomit ilavesinin ise su emilimini azaltarak ve mekanik performansı artırarak daha yüksek

oranlarda kullanılabilceği gözlemlenmiştir. Diatomitin özgül ağırlılığının düşük olması, daha hafif yapısal beton bileşenlerinin üretimini mümkün kılmıştır. Ancak, ham diatomit kullanıldığında erken aşamada düşük mukavemetli standart çimento üretilebileceğini göz önünde bulundurmuştur. Bu nedenle, diatomitlerin gözenek yapısıyla ilgili su emme kapasitesini azaltmaya yönelik daha fazla araştırma yapılması önerilmiştir [17].

Li ve arkadaşları, diatomitin beton performansı üzerindeki etkisini makro ve mikro testlerle araştırmışlardır. Bu araştırma sonucunda, diatomitin betonun akışkanlığını azaltarak işlenebilirliğini olumsuz etkileyebileceği, ancak %5 oranında diatomit ilavesinin betonun en düşük su emme oranına ve en yüksek basınç dayanımına sahip olmasını sağladığı bulunmuştur. Ayrıca, diatomit ilavesi betonun klor geçişine direnç yeteneğini artırmış ve %5 diatomit içeriği ile en yüksek dayanıklılığa ulaşılmıştır. Diatomitin betonun gözenekliliğini azaltarak zararsız gözeneklerin oranını artırırken zararlı gözeneklerin oranını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Yaptıkları mikro yapı analizi, diatomitin betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini ile dayanıklılığını artırıcı etkiler sağladığını ortaya koymuştur [18].

Taoukil ve arkadaşları, diatomitin harçlarda kum yerine kullanılabilirliğini incelemiştir. Bu çalışmanın sonuçları, diatomit eklenmesinin harcın ısı yalıtım potansiyelini önemli ölçüde artırdığını ve ısı iletkenlik ile yayılmada net bir azalma sağladığını göstermektedir. Diatomit eklenmesinin basınç ve eğilme dayanımlarında azalmaya neden olmasına rağmen, bu azalmanın malzemenin hafif beton olarak kullanılabilirliğini etkilemediği gözlemlenmiştir. Ancak, diatomit oranının artması, harcın su emme kapasitesini artırarak higroskopik özelliğini yükseltmiştir. Genel olarak, çalışma, diatomitin çimento harcında kum yerine başarıyla kullanılabilceğini ve bu malzemenin yalıtım betonu olarak kullanılabilirliğini desteklemiştir [19].

Ahmadi ve arkadaşları, çimento yerine yüksek hacimde ham diatomit tozu kullanarak çevre dostu çimento harçları geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, %0, %15, %30 ve %40 oranlarında diatomit tozu içeren harçları incelemişlerdir. Akışkanlık testleri, diatomit tozu içeriği arttıka harçların akışkanlığının azaldığını göstermiştir. Basınç dayanımı testlerinde, erken yaşlarda (3 gün) diatomit tozu içeriği arttıka dayanımın azaldığı, ancak daha yüksek yaşlarda (91 gün) bu azalmanın telafi edildiği ve hatta %40 diatomit tozu içeren numunelerin kontrol numunelerine göre daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Çekme dayanımı testlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir; erken yaşlarda azalan çekme dayanımı, daha yüksek yaşlarda artmıştır. Su emme oranı, diatomit tozu içeren numunelerde kontrol numunesine göre daha düşük bulunmuştur. Darbe hızı testleri, diatomit tozu eklenmesiyle numunelerin darbe hızının arttığını ve gözenek yapısının iyileştiğini göstermiştir. Ayrıca yüksek hacimde ham diatomit tozu içeren harçların çevresel etkisinde önemli bir azalma olduğu ortaya konulmuştur. Bu bulgular, yüksek hacimde ham diatomit tozunun çevre dostu ve uygun maliyetli çimento bazlı malzemeler üretmek için etkili bir şekilde kullanılabilceğini göstermiştir [20].

Posi ve arkadaşları, çalışmalarında diatomitin doğal formdaki düşük reaktivitesi ve zayıf mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kalsinasyon sürecini araştırmıştır. Araştırmada, farklı boyutlardaki (ince, orta, kaba) diatomit agregalarının 400–1000 °C arasında kalsine edilmesiyle elde edilen hafif betonun özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, kalsine edilmiş diatomit ile üretilen betonun 28 günlük basınç dayanımının 7.8–12.9 MPa arasında değiştiği, yoğunluğunun 1000–1200 kg/m³ olduğu, porozite değerlerinin %58–61 arasında, su emme oranlarının ise %61–72 arasında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, betonun ısıl iletkenliğinin 0.15–0.19 W/mK arasında olduğu belirlenmiştir. Kalsinasyon sıcaklıklarının malzeme özellikleri üzerindeki etkileri de değerlendirilmiş, ince agregalar için optimum sıcaklığın 600 °C olduğu ve bu sıcaklıkta agregaların reaktif hale geldiği, kaba agregalar için ise 1000 °C sıcaklıkta stabil ve dayanıklı bir yapı elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Posi ve arkadaşları, kalsine edilmiş diatomit kullanımının basınç dayanımı, yoğunluk ve ısıl iletkenlik özelliklerini iyileştirerek hafif beton üretiminde cazip bir malzeme sunduğunu ortaya koymuştur [21].

KYB tasarımı, genellikle harç üzerinde gerçekleştirilen ön çalışmalar sonucunda belirlenir. KYB üzerinde harç deneyleri yapılmasının temel nedenleri, KYB'nin reolojik özelliklerini anlamak, tasarım sürecine yön vermek, işlenebilirlik ve performansını değerlendirmek, maliyet ve zaman tasarrufu sağlamak ve öngörülebilirliği artırmaktır. Harç deneyleri, KYB'nin işlenebilirlik özelliklerinin temelini oluşturur ve bu deneyler, KYB'nin nihai tasarımında kullanılacak malzemelerin ve oranların belirlenmesine yardımcı olur. Ayrıca, harç deneyleri daha küçük ölçekli ve ekonomik oldukları için araştırma ve geliştirme süreçlerini hızlandırır ve inşaat sürecinde karşılaşılabilecek potansiyel sorunların önceden belirlenmesine olanak tanır [22–24].

Bu çalışmada, doğal puzolanik bir mineral olan diatomitin kendiliğinden yerleşen harçlarda (KYH) kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül ve diatomit kullanılarak hazırlanan KYH karışımları, taze harç deney yöntemleriyle belirlenmiştir. Hazırlanan beş seri 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numunelerden dördü 3, 28 ve 90 gün süreyle şehir şebeke suyunda kür edilirken, kalan bir seri ise 180 gün süreyle magnezyum sülfat (MgSO₄) çözeltisinde kür edilmiştir. Kür işleminden çıkarılan sertleşmiş numunelere üç noktalı eğilme testi ve basınç testi uygulanarak mekanik dayanımları ölçülmüştür. Ayrıca, bir seri prizmatik numuneler 90 gün kür işlemine tabi tutulduktan sonra tekrarlı donma-çözülme döngülerine tabi tutulmuş ve ardından üç noktalı eğilme ile basınç testleri uygulanmıştır. Belirlenen karışım oranlarında hazırlanan 50x50x50 mm boyutlarındaki küp numuneler ise 28 gün kür edilerek kapiler su emme, toplam su emme, yoğunluk ve porozite değerleri ölçülmüştür. Deneyler tamamlandıktan sonra elde edilen veriler analiz edilmiş, karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

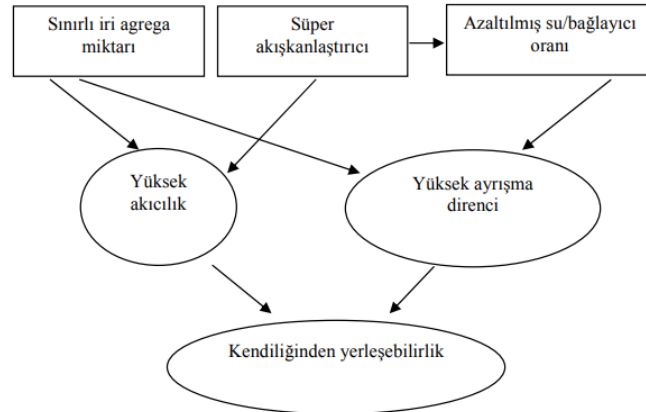
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

KYB, vibratör kullanılmasına ihtiyaç duymadan, kendi ağırlığıyla döküldüğü kalıba yerleşen ve sık donatılı ya da dar kesitli bölgelerde dahi hava boşluğu bırakmadan homojen bir şekilde sıkışma sağlayan, yüksek akışkanlık özelliği gösteren bir beton türüdür. Ayırışma ve terleme gibi kusurlar sergilemeden iyi bir sıkışma elde edilmesine olanak tanır. [4,25]. Bu sayede, işçilik maliyetlerini azaltır, kaliteyi artırır ve çevreye zarar vermez. İlk olarak 1988 yılında Japonya’da geliştirilen bu beton; köprüler, tüneller, barajlar gibi zorlu yapı projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri

KYB, yerleştirildiği anda herhangi bir dış kuvvete gerek kalmaksızın kendi ağırlığı altında akabilen, titreşim gerektirmeyen, boşluk içermeyen ve düzgün bir kütle oluşturan bir yapı malzemesidir [26].

KYB üretiminde, geleneksel betona uygun birçok malzeme kullanılabilir. Ancak, geleneksel beton karışımlarından farklı olarak KYB’de su/çimento oranı düşük tutulduğundan gerekli akışkanlığı elde etmek amacıyla kimyasal katkılar, viskozite artırıcı katkılar ve büyük miktarda inert veya puzolanik mineral katkılarının tümü veya bir kısmının kullanılması gerekmektedir. Taze KYB’nin özellikleri, karışım bileşenlerinin kalitesi ve tutarlılığındaki değişikliklere karşı çok daha hassastır. Bu nedenle, KYB’nin başarılı olması için tüm bileşen malzemelerinin doğru dozajlanması önemlidir. KYB’nin yüksek performans gösterebilmesi için gereken özellikler, Şekil 2.1’de şematik bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 2.1. KYB’nin bileşim özellikleri

KYB'nin kullanımı, yapının inşa edilme sürecine önemli değişiklikler getirmiştir. KYB'nin uygulama aşamasında, üniform yoğunlukta beton üretmek için döküm işlemi, geleneksel betona kıyasla daha az beceri ve iş gücü gerektirir. Titreşime ihtiyaç duyulmaması, gürültü seviyesini düşürür ve titreşim ekipmanlarının kullanımına bağlı sorunların ortaya çıkma riskini azaltır. Bu süreçte daha az işçi gerekse de, betonun yerleştirilmeden önce test edilmesi için daha fazla zaman ayrılması gerekmektedir [27].

Genel olarak, KYB'nin sertleşmiş özellikleri, eşdeğer geleneksel betona benzer veya ondan üstündür. KYB'nin kendiliğinden yerleşme özellikleri sahada doğrulandığında, daha az değişken ve daha yoğun bir beton elde edilir. KYB kullanımı, sıkıştırma işlemini ve dolayısıyla betonun dayanıklılığını daha güvenilir hale getirir, çünkü insan hatası (örneğin, yetersiz sıkıştırma) potansiyeli azalır. Yüksek ince malzeme içeriği ve iyi derecelendirilmiş agregaların gerekliliği, betonu iyileştirir ve agrega ile çimento matrisi arasında daha yoğun bir geçiş bölgesi oluşturur. Bu etkiler, betonun dayanım ve dayanıklılık açısından üstün olmasını sağlar [28].

Benzer su/çimento oranlarında, KYB'nin karakteristik dayanımı, geleneksel betonunki kadar güçlüdür ve aynı sınıf için benzer bir dayanım gelişimi gösterir. KYB'de kullanılan düşük su/çimento oranı sayesinde, basınç dayanımı genellikle C40'ın üzerinde olup, C100'e kadar çıkabilir. Çekme dayanımı da aynı sınıf geleneksel betonla karşılaştırılabilir [6,25,29].

2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları

KYB, işlenebilirlik, dayanıklılık ve uygulama kolaylığı gibi üstün özellikleri nedeniyle çok çeşitli inşaat projelerinde tercih edilmektedir. KYB, vibrasyon gerektirmeden kendi ağırlığı ile yerleşebilme yeteneğine sahip olması sayesinde, karmaşık kalıpların ve dar alanların doldurulmasında etkin bir çözüm sunar. KYB'nin kullanım alanları genel olarak köprü, tünel, baraj, yüksek katlı binalar, prefabrik beton elemanlarının üretimi, su altı beton dökümleri ve rehabilitasyon projelerini kapsamaktadır [2].

KYB, özellikle karmaşık geometrilere sahip yapıların kalıplarını doldurmak için idealdir. Geleneksel betonlar, dar ve karmaşık alanlarda vibrasyon uygulaması gerektirirken, KYB'nin yüksek akışkanlık özelliği sayesinde bu tür projelerde betonun düzgün ve homojen bir şekilde yerleşmesi sağlanır. Böylece vibrasyon gereksinimi ortadan kalkar, işçilik maliyetleri azalır ve uygulama süresi kısalmıştır [30]. Örneğin, yüksek katlı binaların betonarme kolonları ve kirişleri gibi dar kesitli elemanların yapımında KYB'nin kullanımı, kalıpların homojen bir şekilde doldurulmasını sağlayarak yapının dayanıklılığını artırır.

Prefabrik beton elemanlarının üretiminde KYB, yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve üretim hızının artırılması için tercih edilir. KYB, vibrasyon gerektirmediği için kalıplarda hava kabarcığı ve boşluk oluşumunu önleyerek, pürüzsüz yüzeyler elde edilmesini sağlar. Bu durum, özellikle

estetik ve yapısal bütünlüğün önemli olduğu projelerde avantaj sağlar [31]. Ayrıca, prefabrik beton elemanlarının üretim sürecinde KYB'nin kullanılması, üretim süresini kısaltır ve daha az enerji tüketimine neden olur.

KYB, su altı beton dökümlerinde büyük avantajlar sunar. Su altında beton dökümünde en büyük zorluklardan biri, betonun ayrışmadan ve homojenliğini kaybetmeden yerleşmesidir. KYB, düşük ayrışma ve yüksek viskozite özelliği sayesinde su altında düzgün bir şekilde yerleşir ve bu da yapıların dayanıklılığını artırır. Su altı yapılarda, baraj temelleri, köprü ayakları ve deniz yapıları gibi uygulamalarda KYB, yüksek mukavemet ve uzun ömür sağlayarak suyun beton içindeki zararlı kimyasalların yayılmasını engeller [30]

KYB, mevcut yapıların onarım ve güçlendirme çalışmalarında da sıkça kullanılır. Yapıların güçlendirilmesi veya rehabilitasyonu sırasında dar ve erişimi zor alanlarda KYB'nin kullanımı, betonun vibrasyon gerektirmeden yerleşmesine olanak tanır. Bu sayede, yapıların orijinal tasarımını bozmadan, dayanıklılık ve mukavemeti artırmak mümkün olur [30]. Özellikle tarihi yapıların restorasyonunda KYB, titreşimli uygulamalardan kaçınılması gerektiği için ideal bir çözümdür [32].

Tünel ve köprü gibi büyük mühendislik projelerinde KYB, yerleştirme sürecinin hızlanmasını ve betonun homojen bir şekilde yayılmasını sağlar. Tünel projelerinde dar ve erişimi zor alanlarda betonun sorunsuz şekilde yerleşmesi, köprü inşaatlarında ise geniş açıklıklarda kalıpların düzgün doldurulması, KYB'nin yüksek işlenebilirlik özelliği ile sağlanır. Bu projelerde KYB kullanımı, işçilik maliyetlerini düşürürken, zaman tasarrufu sağlar ve projenin genel verimliliğini artırır [33].

KYB'nin tüm bu alanlardaki kullanımı, betonun dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü artırırken, iş gücü ve maliyet tasarrufu sağlar. Ayrıca, vibrasyon gerektirmemesi nedeniyle kalıpların hasar görme riski azalır ve betonun homojen yerleşmesi sağlanır. Bu özellikler, KYB'yi inşaat sektöründe vazgeçilmez bir malzeme haline getirmektedir [34].

2.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Kullanılan Malzemeler

KYB, tasarımı ve özellikleri açısından geleneksel betondan belirgin farklılıklar gösterir. Bu nedenle, KYB'nin istenilen performansı sağlayabilmesi için tasarım sürecinde kullanılan malzemelerin titizlikle seçilmesi büyük öneme sahiptir [35]. Aşağıda, KYB tasarımında kullanılacak malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri özetlenmiştir.

2.3.1. Çimento

Geleneksel betonda sıklıkla kullanılan normal Portland çimentoları, kendiliğinden yerleşen beton üretiminde de kullanılabilir. Ancak bazı çimentolar, KYB üretiminde daha iyi sonuçlar

verebilmektedir [36]. KYB üretiminde yaygın olarak tercih edilen CEM I 42.5 R tipi çimento, genellikle 350-450 kg/m³ arasında kullanılmalıdır. Bu miktarın üzerinde çimento kullanımı rötre riskini artırabilirken, 350 kg/m³'ün altında çimento kullanımı durumunda mineral katkıları veya viskozite artırıcı katkı maddeleri eklenmelidir; aksi takdirde betonda ayrışma problemi yaşanabilir. Çimento seçiminde, dayanım ve dayanıklılık kriterleri öncelikli olarak değerlendirilmelidir. Bu doğrultuda, özellikle sülfat direnci ve uzun vadeli performansı artırmak amacıyla, çimentodaki C₃A (kalsiyum alüminat) oranının %10'un altında olması tercih edilmektedir. Düşük C₃A oranı, betonu sülfat saldırılarına karşı daha dirençli hale getirir ve genel dayanıklılığı olumlu yönde etkiler. Yüksek C₃A oranı ise, etrenjit oluşumunu hızlandırarak hidrasyon ısısının artmasına ve su buharlaşmasına neden olur, bu da işlenebilirliği olumsuz etkiler [37].

2.3.2. Agregalar

KYB üretiminde kullanılan agregaların özellikleri, malzemenin akışkanlık, yerleşme ve dayanım performansı üzerinde önemli ve belirleyici bir etkiye sahiptir. Geleneksel betonda kullanılan agregalar KYB için uygun olmakla birlikte, bu malzemelerin kullanımında bazı değişiklikler yapılması gerekmektedir. KYB karışımında iri agrega miktarı azaltılarak, en büyük agrega boyutu genellikle 4-8 mm arasında sınırlandırılmaktadır; bu uygulama, taze malzemenin dar alanlarda ve donatılar arasında daha kolay hareket edebilmesini sağlamaktadır [38,39]. Ayrıca, kum oranının artırılması ve tane boyutu 0.125 mm'nin altındaki ince malzemelerin karışıma dahil edilmesi, malzemenin viskozitesini ve homojenliğini destekleyerek segregasyonu önlemektedir [40]. Agregaların şeklinin küresel veya yuvarlak olması, içsel sürtünmeyi azaltarak akışkanlık özelliklerini iyileştirmektedir. KYB'de kullanılan agregaların granülometrisi sürekli bir dağılıma sahip olmalı ve ince agrega oranı yüksek tutulmalıdır; bu durum, malzemenin işlenebilirliği ve yerleşme kapasitesi üzerinde olumlu etkilere sahiptir. Uygun agrega seçimi, KYB'nin dayanım performansını ve akışkanlığını artırarak hem teknik hem de ekonomik avantajlar sunmaktadır [37].

2.3.3. Su

KYB üretiminde kullanılan su, betonun işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir bileşendir. KYB karışımlarında su/çimento oranı genellikle 0.3-0.4 aralığında tutulmakta olup, bu durum betonun yüksek dayanım ve dayanıklılık kazanmasına olanak sağlamaktadır [37]. Karışımda kullanılacak suyun kalitesi büyük önem taşımaktadır; bu bağlamda, betonda kullanılacak suyun içme suyu kalitesinde olması tercih edilmeli veya en azından zararlı kimyasal ve organik bileşenler içermemesi gerekmektedir. Uygun olmayan suyun kullanımı, betonun uzun dönem dayanıklılığında olumsuz etkilere neden olabilmektedir [31].

2.3.4. Mineral Katkılar

KYB üretiminde, betonun reolojik (akış) özelliklerini iyileştirmek ve dayanıklılığını artırmak amacıyla çeşitli mineral katkıları kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri, ince taneli yapıları sayesinde çimentonun hidratasyon sürecini etkileyerek betonun performansını iyileştirmekte ve ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır [41]. KYB'de kullanılan mineral katkıları, çimentonun yerine ikame edilerek veya çimentoya eklenerek karışıma dahil edilir ve genellikle puzolanik ya da hidrolik özellikler gösterirler. Puzolanlar, çimentonun hidratasyon sürecinde açığa çıkan Ca(OH)_2 (kalsiyum hidroksit) ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanan bileşikler oluşturur. Bu reaksiyon sonucunda oluşan ek bağlayıcı maddeler, betonun dayanıklılığını artırırken aynı zamanda geçirgenliğini azaltır. Böylece, puzolanlar betonu hem kimyasal saldırılara karşı korur hem de uzun ömürlü ve dayanıklı bir yapı malzemesi elde edilmesini sağlar. Ayrıca, mineral katkıları betonun kohezyonunu iyileştirir ve ayrışma ile terleme gibi istenmeyen olayların önlenmesine yardımcı olur [30,31].

KYB üretiminde mineral katkıların kullanımının başlıca amaçları, betonun dayanıklılığını artırmak, işlenebilirliğini iyileştirmek, mukavemetini artırmak ve hidratasyon ısısını düşürmektir. Bu katkıları, betonun uzun ömürlü olmasını sağlarken, aşındırıcı çevresel etkilere karşı da direnç kazandırır. Ayrıca, mineral katkıları betonun akıcılığını artırarak, zor kalıplara vibrasyon gerektirmeden kolayca yerleşmesine olanak tanır [37,42]. Çimento miktarının azaltılmasıyla hidratasyon ısısı düşerken, bu durum betonun iç yapısında oluşabilecek mikro çatlakların azaltılmasına katkıda bulunur ve betonun maliyetinin düşmesini sağlar [43].

KYB üretiminde kullanılan mineral katkıları, su ile reaksiyon kapasitelerine göre iki ana sınıfa ayrılmaktadır: Kimyasal olarak reaktif olmayan katkıları (İnert) (Tip I) ve kimyasal olarak reaktif katkıları (Puzolanik/Hidrolik) (Tip II). İnert katkıları, su ile kimyasal reaksiyona girmeyen ve bağlayıcılık özelliği bulunmayan maddelerdir; bu katkıları, betonun reolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılır ve betonun işlenebilirliğini artırarak, daha homojen bir karışım elde edilmesini sağlar. Puzolanlar ise tek başlarına bağlayıcılık özelliği göstermemelerine rağmen, çimentonun hidratasyon ürünleri ile reaksiyona girerek bağlayıcılık kazanırlar. Bu maddeler, genellikle silisli veya alüminli yapıya sahip olup, betonun dayanıklılığını ve kimyasal direncini artırır. Hidrolik bağlayıcıları ise su ile doğrudan reaksiyona girerek sertleşme özelliği gösteren maddelerdir ve betonun erken dayanım kazanmasını sağlar [30,31]. Her üç katkı tipi de KYB'nin işlenebilirlik, dayanıklılık ve mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Mineral katkıların su ile reaksiyonlarına göre yapılan sınıflandırılma Tablo 2.1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1. Mineral katkıların su ile reaksiyonuna göre sınıflandırılması [37]

Tip I	İnert veya yarı inert	Mineral filler (kalker, Dolomit vs.)
		Pigmentler
Tip II	Puzolanik	Uçucu kül
		Silis Dumanı
	Hidrolik	Yüksek fırın cürufu

İnert katkıları: Bu katkıları, çimento gibi aktif malzemelere kıyasla kimyasal reaksiyonlara katılmasalar da, karışımda boşlukları doldurarak betonun kompakt hale gelmesini sağlarlar. İnert katkıları, betonun işlenebilirliğini artırarak kohezyon ve ayrışma direncini iyileştirir, böylece karışımın homojen bir şekilde kalıplara yerleşmesine yardımcı olurlar. En yaygın kullanılan inert katkıları arasında CaCO_3 (kalsiyum karbonat (kalker)) ve dolomit yer alır; bu maddeler çimento tüketimini azaltarak maliyeti düşürmek ve betonun viskozitesini artırmak amacıyla kullanılır. Ayrıca, pigmentler de betonun renk özelliklerini değiştirmek için kullanılan inert katkıları arasında yer alır [31].

Puzolanlar: KYB’de sıklıkla kullanılan puzolanik mineral katkıları arasında uçucu kül, silis dumanı ve volkanik tüf gibi maddeler yer almaktadır. Bu maddeler, çimento hidrasyonu sırasında açığa çıkan Ca(OH)_2 (kalsiyum hidroksit) ile kimyasal reaksiyona girerek ek bağlayıcı fazlar oluşturur. Bu sayede, çimento hamurunun bağlayıcılık özelliklerini iyileştirir ve betonun geçirgenliğini azaltarak dayanıklılığını artırır. Bu da betona dış etkenlere karşı daha fazla dayanıklılık kazandırır [44,45].

Hidrolik Bağlayıcılar: Hidrolik bağlayıcılar ise su ile temas ettiklerinde doğrudan sertleşme gösterirler. Bu katkıları arasında yüksek fırın cürufu en bilinenidir. Hidrolik özellik gösteren bu maddeler, betonun erken dönemde yüksek dayanım kazanmasını sağlar ve uzun vadede suya ve kimyasal maddelere karşı direncini artırarak betonun genel dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirir. [42].

2.3.5. Kimyasal Katkıları

KYB üretiminde kimyasal katkı maddeleri, betonun performansını artırmak ve işlenebilirliğini optimize etmek amacıyla kullanılır. Bu katkıları, beton karışımına eklenerek, betonun su/çimento oranını azaltırken işlenebilirliğini korur ve dayanıklılığını artırır. Bununla birlikte, her kimyasal katkı maddesi, belirli avantajlar sağlarken, uygun şekilde kullanılmadığında

bazı dezavantajlara da neden olabilir [46]. Aşağıda KYB'de kullanılan başlıca kimyasal katkı maddelerinin tanımları, kullanım alanları, faydaları ve potansiyel zararları açıklanmıştır.

Süper akışkanlaştırıcılar (SA), betondaki su miktarını azaltmaksızın işlenebilirliği artıran yüksek performanslı kimyasal katkı maddeleridir. Bu katkılar, çimento partiküllerini birbirinden ayırarak betonun akışkanlığını artırır ve vibrasyon gerektirmeden yerleşmesine olanak sağlar [31]. Özellikle KYB üretiminde ince ve karmaşık kalıpların doldurulmasında yaygın olarak kullanılır. Bunun yanı sıra, su/çimento oranı düşük olan beton karışımlarında, betonun akışkanlığını artırarak daha homojen ve dayanıklı bir karışım elde edilmesine katkıda bulunur [30]. SA, su miktarını önemli ölçüde azaltırken betonun ayrışmasını ve terlemesini önleyerek betonun dayanıklılığını artırır. Bu özellikleri sayesinde daha homojen bir beton yapısı elde edilmesini sağlar [42]. Ancak, SA'nın aşırı kullanımı, betonun priz süresinin uzamasına ve kıvam kayıplarına neden olabilir. Ayrıca, fazla miktarda kullanıldığında betonun çatlama riski artabilir, bu da uzun vadede betonun performansını olumsuz etkileyebilir [47].

Viskozite artırıcı katkılar (VAK), betonun kıvamını ve stabilitesini koruyarak ayrışmayı önleyen kimyasal maddelerdir. Bu katkılar, ince agrega oranı düşük olan KYB karışımlarında, betonun kohezyonunu artırmak amacıyla kullanılır [37]. Özellikle ayrışma ve terleme problemlerinin görülebileceği düşük ince malzeme oranına sahip karışımlarda tercih edilirken, su altı beton dökümleri ve yüksek viskozite gerektiren uygulamalarda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [48]. VAK, betonun viskozitesini ve kohezyonunu artırarak, yerleşim sırasında karışımın bütünlüğünü korur ve betonun daha homojen bir yapıya kavuşmasını sağlar. Bu katkılar, betonun ayrışmasını ve terlemesini önleyerek, yapının uzun vadeli dayanıklılığını artırır [49]. Ancak, yanlış dozajlama yapıldığında betonun kıvamı aşırı derecede artabilir, bu da betonun pompalanmasını ve yerleşmesini zorlaştırabilir. Aşırı VAK kullanımı, betonun işlenebilirliğini olumsuz yönde etkileyebilir [45].

Su azaltıcı katkılar, betonun akışkanlığını koruyarak karışımdaki su miktarını azaltan kimyasal maddelerdir. Bu katkılar, su/çimento oranını optimize ederek betonun mukavemetini artırmayı hedefler [44]. Su azaltıcı katkılar, özellikle yüksek dayanımlı beton üretiminde ve düşük su/çimento oranına sahip KYB karışımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu katkılar, betonun dayanıklılığını artırırken aynı zamanda işlenebilirliğini korumaya yardımcı olur [30]. Su azaltıcı katkılar, betonun işlenebilirliğini iyileştirirken, kullanılan su miktarını azaltarak daha yüksek mukavemetli bir yapı elde edilmesini sağlar. Ayrıca, betonun sertleşme sürecinde daha az büzülme ve çatlama meydana gelir, bu da betonun uzun vadeli dayanıklılığını olumlu yönde etkiler [47]. Ancak, aşırı su azaltıcı katkı kullanımı, betonun priz süresini uzatabilir ve işlenebilirliğini olumsuz etkileyebilir. Bunun yanında, yanlış dozajlama betonun ayrışma riskini artırabilir, bu da betonun homojenliğini ve performansını olumsuz yönde etkileyebilir [42].

Hava sürükleyici katkıları, betona mikroskobik hava kabarcıkları ekleyerek, betonu donma-çözülme döngülerine karşı daha dayanıklı hale getiren kimyasal katkı maddeleridir [37]. Özellikle soğuk iklimlerde ve donma-çözülme döngüsünün sık yaşandığı bölgelerde tercih edilen bu katkıları, betonun dayanıklılığını artırmak ve uzun ömürlü olmasını sağlamak amacıyla KYB üretiminde yaygın olarak kullanılır [31]. Hava sürükleyici katkıları, betonun donma-çözülme döngüsüne karşı direncini artırarak, betonun çatlama riskini önemli ölçüde azaltır. Bununla birlikte, betonun işlenebilirliğini de iyileştirerek daha homojen bir karışım elde edilmesine katkı sağlar [30]. Ancak, bu katkı maddelerinin aşırı kullanımı, betonun mukavemetini azaltabilir. Fazla miktarda hava sürüklenmesi betonun yoğunluğunu düşürerek, uzun vadede betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilir [47].



3. PUZOLANİK MALZEME OLARAK DIATOMİT

3.1. Tanımı ve Tarihçesi

Diatomit, jeolojik süreçler boyunca oluşmuş doğal bir silis kayaç türüdür ve temel olarak diatom adı verilen tek hücreli mikroskobik alglerin fosilleşmesiyle meydana gelir. Bu diatomlar, deniz, göl ve tatlı su ortamlarında yaşarlar ve öldüklerinde silisli hücre duvarları tortul olarak birikmeye başlar. Zamanla, bu birikimlerin üzeri yeni tortularla kaplanarak basınç altında sıkışır ve diatomit oluşur. Diatomitin oluşumu milyonlarca yıl süren doğal süreçlerle gerçekleşmiştir ve günümüzde yaygın olarak kullanılan bir mineral haline gelmiştir [50].

Diatomit ilk kez 1836 yılında Alman bilim insanı Christian Gottfried Ehrenberg tarafından bilimsel olarak tanımlanmıştır. Ehrenberg, mikroskobik organizmaların büyük miktarlarda silisli tortu oluşturduğunu fark etmiş ve bu maddeyi "kieselguhr" olarak adlandırmıştır. Diatomit, ilk keşfedildiğinde bilimsel bir merak olarak görülse de, zamanla endüstriyel kullanımı fark edilmiş ve geniş bir yelpazede ticari uygulamalara girmiştir [51,52].

Tarihsel gelişiminde diatomit, 19. yüzyılın sonlarına doğru endüstriyel olarak önem kazanmaya başlamıştır. Özellikle 1860'lı yıllarda Alfred Nobel, dinamit üretiminde diatomiti bir dolgu malzemesi olarak kullanmıştır. Nobel, diatomitin yüksek gözenekliliği sayesinde nitrogliserini güvenli bir şekilde emdirerek, patlayıcı üretiminde bir devrim yaratmıştır [51]. Bu dönemde diatomitin kullanımı, filtrasyon malzemesi olarak da genişlemiştir. İlk olarak bira, şarap ve kimyasal üretimlerinde filtrasyon maddesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Diatomit, sıvılardaki ince partikülleri etkili bir şekilde filtreleme yeteneği sayesinde, gıda ve içecek endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [11,53].

20. yüzyılın başlarından itibaren diatomit, yeni kullanım alanları bulmaya devam etmiştir. Özellikle inşaat sektöründe ısı yalıtımı, dolgu malzemesi ve hafif yapı elemanları üretiminde önemli bir bileşen haline gelmiştir. Diatomitin düşük yoğunluğu, yüksek gözenekliliği ve termal yalıtım özellikleri sayesinde bu alanlarda tercih edilmiştir. 1920'li ve 1930'lu yıllarda Amerika Birleşik Devletleri, dünya diatomit üretiminin merkezine yerleşmiş ve bu alandaki liderliğini günümüze kadar sürdürmüştür [54]. Bugün ABD, diatomit üretiminde dünya genelinde lider konumda olup, başlıca üretim alanları Nevada, Oregon ve California eyaletleridir (Şekil 3.1) [51].

Türkiye'de diatomit yataklarının keşfi ise 20. yüzyılın ortalarına dayanmaktadır. Türkiye'deki ilk diatomit yatakları Eskişehir ve Kütahya bölgelerinde bulunmuş ve maden işletmeciliği açısından önemli bir kaynak olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Türkiye'de çıkarılan diatomit, öncelikle inşaat ve tarım sektörlerinde kullanılmaktadır. Özellikle inşaat sektöründe diatomit, hafif agregalar, yalıtım malzemeleri ve çimento katkı maddesi olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda, Türkiye'de diatomitin çevre dostu özellikleri ve sürdürülebilir

bir malzeme olması sebebiyle beton teknolojilerinde kullanımına yönelik araştırmalar artmıştır [55].



şekil 3.1. Doğal diatomit rezervi görselleri; a. Nevada, Oregon/USA, b. Afyonkarahisar/Türkiye [56]

Diatomit tarih boyunca bilimsel bir keşif olarak başlamış ve endüstriyel bir devrimle geniş bir kullanım alanına yayılmıştır. Filtrasyon, ısı yalıtımı, hafif yapı malzemeleri ve patlayıcı üretiminde kullanılan diatomit, günümüzde çevre dostu ve çok yönlü bir mineral olarak dikkat çekmektedir. Türkiye de bu mineralin üretiminde potansiyele sahip ülkeler arasında yer almakta ve özellikle inşaat sektöründeki uygulamalarıyla öne çıkmaktadır.

3.2. Kullanım Alanları

Diatomit, geniş bir kullanım yelpazesine sahip olup, en önemli uygulama alanlarından biri filtrasyon işlemleridir. Diatomit, yüksek gözenekliliği ve düşük yoğunluğu sayesinde sıvıların (bira, şarap, su ve kimyasal maddeler gibi) saflaştırılmasında etkin bir filtreleme malzemesi olarak kullanılır. Filtrasyon işleminde, küçük partikülleri tutma kapasitesi nedeniyle bu süreçlerin verimliliğini önemli ölçüde artırır. Diatomitin gözenekli yapısı, sıvıların içindeki ince parçacıkların yakalanmasına olanak tanır ve bu da onu özellikle gıda, içecek ve kimya endüstrileri için ideal bir filtreleme aracı yapar [57].

Diatomitin bir diğer önemli kullanım alanı fonksiyonel dolgu işlemleridir. Bu tür dolgu malzemeleri, nihai ürünlerin özelliklerini iyileştirerek performanslarını artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Diatomitin hafifliği, dayanıklılığı, kimyasal inörtlüğü, ısı, ses ve elektrik izolasyonundaki etkinliği, yüksek gözeneklilik ve emicilik gibi özellikleri, bu alandaki kullanımını öne çıkarmaktadır. Başlıca kullanım alanları arasında boya, plastik, lastik, kâğıt, ilaç, kozmetik, cila, kibrit, diş macunu ve kimya sanayileri yer almaktadır [53].

İnşaat sektöründe diatomit, hafif agrega ve yalıtım malzemesi olarak kullanılır. Yüksek termal yalıtım kapasitesi, inşaat malzemelerinde enerji verimliliğini artırırken, yapının ısı iletkenliğini düşürür. Beton üretiminde de çimento katkı maddesi olarak diatomit kullanımı, betonun işlenebilirliğini ve dayanıklılığını artırırken, aynı zamanda çevre dostu bir malzeme olmasını sağlar. Diatomitin düşük yoğunluğu ve yüksek termal direnci, hafif ve enerji verimli yapı malzemelerinin üretiminde önemli bir avantaj sunar. Ayrıca, yangın dayanımı ve aşırı sıcaklıklara karşı direnci nedeniyle refrakter malzeme olarak da inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir [58].

Tarım sektöründe, diatomit toprak düzenleyici olarak kullanılır. Gözenekli yapısı sayesinde su tutma kapasitesini artırarak bitki köklerinin suya erişimini kolaylaştırır ve toprak yapısının iyileşmesine katkı sağlar. Ayrıca, pestisit taşıyıcı olarak kullanıldığında, böcek kontrolünü optimize eder ve tarım ürünlerinin korunmasına yardımcı olur. Diatomitin doğal yapısı, çevreye zarar vermeden zararlı böceklerin fiziksel olarak yok edilmesini sağlar. Bu da, tarım alanında kimyasal pestisit kullanımını azaltarak çevreye dost bir çözüm sunar [59].

Diatomit ayrıca termal yalıtım amacıyla yüksek sıcaklık uygulamalarında da kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda dahi termal dayanıklılığı bozulmaz, bu da onu özellikle fırınlar, kazanlar ve diğer ısı işlem ekipmanlarında kullanım için ideal hale getirir. Isı iletkenliği düşük olan diatomit, enerji tasarrufu sağlayarak endüstriyel süreçlerde kullanılan ısı işlem ekipmanlarının verimliliğini artırır. Diatomitin bu özelliği, özellikle metalürji, seramik ve cam sanayi gibi yüksek sıcaklık gerektiren alanlarda önem kazanmaktadır [19].

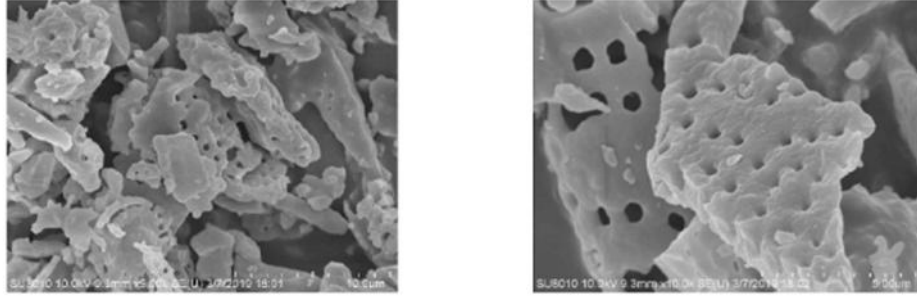
3.3. Dünya’da ve Türkiye’de Rezerv Durumu

Diatomit, dünya genelinde yaygın olarak bulunan ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir doğal silis mineralidir. Dünyada özellikle Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Danimarka, Japonya ve Peru gibi ülkeler diatomit üretiminde öne çıkmaktadır. Bu ülkelerde diatomit, genellikle filtrasyon, dolgu maddesi, ısı yalıtımı, tarım ve inşaat sektörlerinde kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri, dünya diatomit üretiminin büyük bir kısmını karşılamakta ve özellikle filtrasyon endüstrisinde lider konumda bulunmaktadır [60]. Dünya genelinde diatomit rezervleri bol olmakla birlikte, kullanım alanlarına yönelik talep giderek artmaktadır. Bunun yanı sıra, çevre dostu ve hafif bir malzeme olması nedeniyle inşaat sektöründe, özellikle beton ve harç üretiminde kullanımı da yaygınlaşmaktadır [60].

Türkiye’deki diatomit yatakları (Şekil 3.2) genellikle tatlı su ortamlarından oluşan, kil, tuf ve tüfit katkılı çökellerden meydana gelmiştir. Özellikle İç Anadolu Bölgesi, rezerv hacmi açısından en büyük potansiyele sahiptir [61]. Batı Anadolu Bölgesi’ndeki yataklar ise farklı endüstriyel uygulamalar için ticari kaliteye uygundur. Bu yataklar, coğrafi olarak dört ana bölgede toplanmaktadır:

1. İç Anadolu Bölgesi: İç Anadolu'nun güneydoğusunda Kayseri, Nevşehir ve Niğde illerinde yoğunlaşan diatomit yatakları, Türkiye'nin en büyük rezervlerini barındırmaktadır. Özellikle Kayseri-Hırka diatomit yatağı, 21 metre kalınlığa ulaşan diatomit seviyeleri ile ülkenin en büyük yataklarından biridir [62]. Bu bölgedeki diatomitlerin genellikle tatlı su habitatlı olduğu ve %40'tan fazlasının diatom kabuklarından oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca Ürgüp, Ihlara Vadisi ve Belisırma gibi yerlerde de diatomit yatakları mevcuttur. Melendiz Çayı çevresinde bulunan diatomitler, yüksek silis içeriği ve endüstriyel kullanım potansiyeliyle dikkat çekmektedir [63].
2. Ankara-Çankırı Bölgesi: Çankırı'nın Çerkeş, Orta ve Şabanözü ilçelerinde Akhasan, Karaağaç ve Bastak diatomit yatakları bulunmaktadır. Bu yatakların bir kısmı işletilmekte olup, Ankara'da Güvem, Gürcüköy, Başberket ve Gücügöz alanlarında da diatomit zuhurları tespit edilmiştir. Bu bölgedeki diatomitlerin yüksek gözenekli yapısı, düşük yoğunluğu ve su emme kapasitesiyle ticari kaliteye uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Ankara diatomitlerinin filtrasyon malzemesi olarak kullanılabilmesi ve portland çimentosunda puzolanik malzeme olarak değerlendirilebileceği saptanmıştır [60,64].
3. Batı Anadolu Bölgesi: Afyon-Seydiler, Kütahya-Alayunt ve Uşak-Kayağıl gibi yerlerde diatomit yatakları araştırılmıştır. Özellikle Kütahya-Alayunt diatomitlerinin 15 milyon tonluk rezervi bulunduğu ve farklı silis içeriklerine sahip damarlarla ticari potansiyele sahip olduğu tespit edilmiştir[55,65]. Bu yataklardan elde edilen diatomitler, dolgu malzemesi, seramik ve filtrasyon gibi farklı endüstriyel alanlarda kullanılacak özelliklere sahiptir. Aydın-Karacasu, Denizli-Tırkaz ve Balıkesir-Gönen bölgelerinde de diatomit zuhurları tespit edilmiştir.
4. Doğu Anadolu Bölgesi: Bu bölgede diatomit yataklarına dair literatürde detaylı bilgiler bulunmamaktadır. Ancak Neojen dönemindeki linyit araştırmalarında diatomitlerin tespit edilmesi ve bölgedeki yaygın volkanizma, burada da diatomit yataklarının bulunabileceğine işaret etmektedir [60].

[67]. Taramalı elektron mikroskopuyla analiz edilen bazı diatomit görüntüleri Şekil 3.3’de sunulmuştur[68].



Şekil 3.3. Diatomitin taramalı elektron mikroskobu görselleri [68]

Diatomit, düşük ısı iletkenliği ile de bilinir; düşük sıcaklıklarda (100-300°C) 0.08 kcal/m².C°.h, yüksek sıcaklıklarda (800°C ve üzeri) ise 0.11 kcal/m².C°.h civarında bir ısı iletkenliği gösterir. Erime noktası ise içerdiği safsızlıklara bağlı olarak 1000-1590°C arasında değişir. Bu özellikleri nedeniyle refrakter bir malzeme olarak da değerlendirilebilir. Diatomit, kimyasal olarak inerttir ve çoğu kimyasala karşı dirençlidir; sadece yüksek sıcaklıkta kuvvetli bazlardan ve HF (hidroflorik asit) gibi kuvvetli asitlerden etkilenir [64,69].

Türkiye'deki 13 farklı diatomit yatağı üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda, diatomitin kimyasal bileşimi ve ticari potansiyeli detaylı olarak incelenmiştir. Diatomitin ticari değere sahip olabilmesi için belirli kimyasal kriterleri karşılaması gerekmektedir. Bu kimyasal özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir [11,70].

Tablo 3.1. Diatomitin ticari değeri bakımından kimyasal bileşim sınır değeri [11]

Kimyasal Bileşen	Sınır Değeri
SiO ₂	En az 85
Al ₂ O ₃	En fazla 5
Fe ₂ O ₃	En fazla 1.5
CaO	En fazla 1
MgO	En fazla 0.5
Alkali Oksitler	En fazla 1
Kızdırma Kaybı	En fazla 6

3.5. Puzolanik Aktivitesi

Puzolanik malzemeler, tek başlarına belirgin bir bağlayıcılık özelliği göstermeyen ya da oldukça sınırlı bir bağlayıcılık sergileyen, ancak ince taneli ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir. Bu malzemeler, genellikle silis veya silis ve alümin içermektedir. Ayrıca yapılarında demir oksit, kalsiyum oksit, karbon ve alkali bileşenler de bulunabilmektedir [71]. Puzolanlar, literatürde doğal ve yapay olmak üzere iki ana kategori altında sınıflandırılmıştır. Doğal puzolanlar, volkanik tüfler, volkanik camlar, volkanik küller, ısı işlem görmüş killer, şeyller ve diatomitli topraklar gibi materyalleri içerirken; yapay puzolanlar, endüstriyel süreçlerin yan ürünleri olan silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi bileşenlerden oluşmaktadır [72].

Diatomit, yüksek oranda amorf silis içeriği sayesinde etkili bir doğal puzolanik malzeme olarak değerlendirilmektedir. Puzolanik aktivite, diatomitin kalsiyum hidroksit ve su ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelleri oluşturma kapasitesini ifade eder. Bu jeller, betonun bağlayıcılık özelliğini artırırken dayanım ve dayanıklılığını da önemli ölçüde iyileştirmektedir [73]. Ancak, diatomitin puzolanik aktivitesi, içerdiği amorf silis miktarına ve yapısal özelliklerine bağlıdır; yüksek kil minerali içeriği bu aktiviteyi olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, bazı diatomit çeşitleri, 700°C ile 1000°C arasında ısı işleme tabi tutularak amorf silis miktarı artırılmakta ve puzolanik aktivitesi güçlendirilmektedir.

Diatomit, yüksek su ihtiyacı nedeniyle beton üretiminde dikkatli bir şekilde yönetilmesi gereken bir malzemedir. Karışımın su-çimento oranı doğru şekilde ayarlandığında, diatomit ile üretilen beton, sülfat etkilerine ve alkali-silika reaksiyonlarına karşı yüksek direnç göstermektedir [50]. Bu özellik, diatomiti çimento ile ikame edilerek beton üretiminde ideal bir katkı maddesi haline getirmektedir.

Puzolanik malzemelerin etkinliği, genellikle ince taneli yapıya sahip olmalarına ve amorf özellik taşımalarına bağlıdır. Diatomit, bu gereklilikleri karşılması nedeniyle çimento esaslı malzemelerde öne çıkmaktadır. Ayrıca, çevre dostu bir malzeme olması, diatomitin sürdürülebilir inşaat uygulamaları için önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir. Bu özellikleri ile diatomit, hem teknik performansı hem de çevresel avantajları bir araya getiren etkili bir yapı malzemesi olarak değerlendirilebilir [74].

4. MATERYAL VE METOT

Bu araştırmada, mineral katkı maddeleri olarak diatomit ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan KYH numunelerinin taze ve sertleşmiş durumdaki dayanım ve dayanıklılık özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, dozajı 630 kg/m³ olan kontrol numunesi dahil olmak üzere toplam 19 farklı karışım hazırlanmıştır. Her deney için, her karışımından üçer adet numune dökülmüştür. KYH karışımlarında, Portland çimentosunun belirli oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) diatomit ile değiştirilmesiyle farklı ikili karışımlar oluşturulmuştur. Üçlü karışımlarda, toplam mineral katkı oranı %30'u aşmayacak şekilde düzenlenmiş, diatomit miktarı sabit tutularak çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül ilave edilmiştir. Bu doğrultuda, %5 diatomit sabit kalmak kaydıyla %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında uçucu kül; %10 diatomit sabit kalmak kaydıyla %5, %10, %15, %20 oranlarında uçucu kül; %15 diatomit sabit kalmak kaydıyla %5, %10, %15 oranlarında uçucu kül; ve %20 diatomit sabit kalmak kaydıyla %5 ve %10 oranlarında uçucu kül kullanılarak beş seri halinde toplamda 19 farklı numune üretilmiştir.

KYH'lerin taze haldeki performansları, mini çökme-yayıma ve viskozite testleri ile analiz edilmiştir. Harçların yayılmaları, EFNARC (European Federation of National Trade Associations) standartları doğrultusunda, mini çökme-yayıma deneyinde 240-260 mm aralığında tutulmuş ve su/bağlayıcı oranı bu doğrultuda belirlenmiştir. Karışım oranlarının belirlenmesinin ardından, her bir kür süresi için 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara üçer adet numune dökülmüştür. Sertleşmiş prizmatik numuneler, 20±2 °C sıcaklıkta 3, 28 ve 90 gün boyunca kür havuzunda bekletildikten sonra, mekanik performanslarını değerlendirmek için üç noktalı eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca, 90 günlük kür işlemi sonrası tekrarlı donma-çözülme döngülerine maruz bırakılan numunelerin ağırlık değişimleri ve dayanımları da değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, bir seri numune magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmeden önce her bir numunenin ağırlığı ölçülmüş ve 180 gün boyunca sülfat çözeltisinde bekletildikten sonra ağırlık artışları belirlenmiştir. Bu işlemlerin ardından, numuneler üç noktalı eğilme ve basınç testlerine tabi tutulmuştur. Her karışım oranına uygun olarak 50x50x50 mm boyutlarında üçer adet küp numune hazırlanmıştır. 28 gün boyunca kür edilen sertleşmiş küp numuneler üzerinde porozite, toplam su emme, yoğunluk ve kapiler su emme testleri gerçekleştirilmiş, bu veriler dayanıklılık özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

4.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu deneysel çalışmada kullanılan portland çimentosu, mineral ve kimyasal katkıları, dere agregası ile karışım suyunun temel özellikleri aşağıda detaylandırılmıştır.

4.1.1. Çimento

Bu tez çalışmasında, Elazığ'ın Baskil ilçesinde bulunan Seza Çimento fabrikasında üretilen CEM-I 42.5 R sınıfı Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal bileşimi Tablo 4.1'de, fiziksel özellikleri ise Tablo 4.2'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4.1. CEM I 42.5 R sınıfı Portland çimentosu kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler, %	CEM I 42.5 R
SiO ₂	18.35
AL ₂ O ₃	4.73
Fe ₂ O ₃	3.62
CaO	63.05
MgO	1.57
SO ₃	3.28
K ₂ O	0.81
Na ₂ O	0.19
Kızdırma kaybı	4.12
Çözünmeyen kalıntı	0.39

Tablo 4.2. CEM I 42.5 R sınıfı Portland çimentosu fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	CEM I 42.5 R
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.11
Özgül yüzey (cm ² /g)	3780
Priz başlama süresi (dk)	145
Priz sona erme süresi (dk)	245
Hacim sabitliği (mm)	1

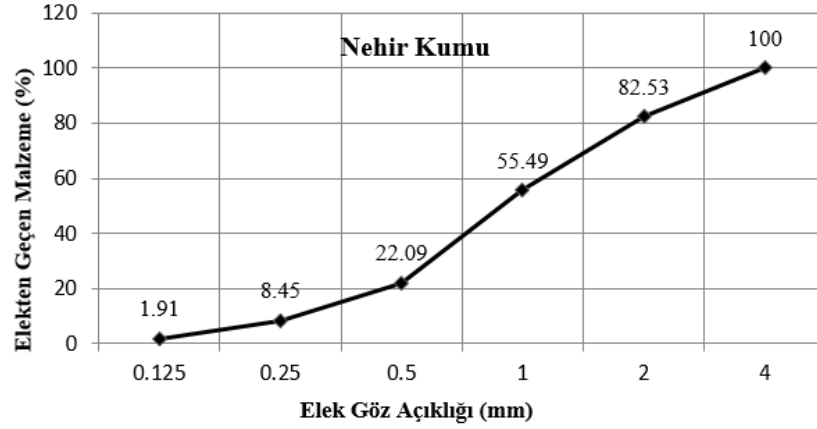
4.1.2. Agregata

Bu çalışmada kullanılan agregata (Şekil 4.1), Elazığ ilindeki Murat Nehri'nden temin edilmiştir. KYH deneylerinde, agregatanın maksimum tane çapı 4 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Agregat

Agregatın granülometri eğrisi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bununla birlikte, agregatın doymuş kuru yüzey özgül ağırlığı 2.63 g/cm^3 olarak ve su emme oranı ise %1.95 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2. KYH'de kullanılan agregatın granülometri eğrisi

4.1.3. Mineral Katkılar

Bu tez çalışmasında, mineral katkı maddesi olarak diatomit ve C sınıfı uçucu külün bu katkıların KYH üretiminde kullanılabilirlikleri incelenmiştir.

Diatomit

Çalışmalarda kullanılan diatomit (Şekil 4.3), Eskişehir bölgesinden NB Global Madencilik ve Kimya Sanayi Ticaret A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Tane boyutu 10 µm altında olan bu diatomit, çimento yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilerek karışımlarda kullanılmıştır. Diatomitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.3'te sunulmuştur.

Tablo 4.3. Diatomitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	Diatomit
SiO ₂ (%)	60.98
Al ₂ O ₃ (%)	9.35
Fe ₂ O ₃ (%)	3.86
CaO (%)	2.34
MgO (%)	2.52
SO ₃ (%)	0.38
Kızdırma kaybı (%)	20.31
Özgül Ağırlık	2.41
Çözünmeyen kalıntı	0.26



Şekil 4.3. Diatomit

Uçucu Kül

Çalışmalarda kullanılan C sınıfı uçucu kül (Şekil 4.4), Sivas bölgesindeki Kangal Termik Santrali Elektrik Üretim A.Ş. den temin edilmiştir. Karışımlarda, %5 diatomit sabit tutularak %5 ile %25 arasında değişen oranlarda uçucu kül, %10 diatomit sabit tutularak %5 ile %20 arasında

uçucu kül, %15 diatomit sabit tutularak %5 ile %15 arasında uçucu kül ve %20 diatomit sabit tutularak %5 ile %10 oranlarında uçucu kül çimento yerine ikame edilmiştir. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. C sınıfı uçucu kül fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşenler, %	CEM I 42.5 R
SiO ₂	21.27
AL ₂ O ₃	8.20
Fe ₂ O ₃	4.39
CaO	28.03
MgO	2.63
SO ₃	6.95
Kızdırma Kaybı	7.48
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2.40



Şekil 4.4. Uçucu Kül

4.1.4. Kimyasal Katkılar

Bu çalışmada, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. den tedarik edilen, modifiye polikarboksilat esaslı polimer yapısına sahip ve 1.07 g/cm³ yoğunluğundaki ViscoCrete SF 18 adlı yüksek performanslı SA kullanılmıştır. Çalışmada, SA miktarı 8 kg/m³ olarak belirlenmiş ve tüm harç karışımlarında aynı oran korunmuştur. SA'nın özellikleri Tablo 4.5'te sunulmuştur [75].

Tablo 4.5. Akışkanlaştırıcı katkının özellikleri

Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1.07 (gr/cm ³)
pH Değeri	3-7
Donma Noktası	-10 (°C)
Suda Çözünebilir Klorür Yüzdesi	Maksimum 0,1%, klorür içermez

4.1.5. Magnezyum Sülfat (MgSO₄) Çözeltisi

Bu çalışmada, magnezyum sülfat çözeltisi hazırlamak için MgSO₄·7H₂O kullanılmış ve deneylerde ağırlıkça %10 oranında magnezyum sülfat içeren bir çözelti hazırlanmıştır.

4.1.6. Su

Deneyisel çalışmalarda, KYH karışımlarının hazırlanması ve kür işlemleri için Elazığ (Merkez) şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

4.1.7. KYH Karışım Hesabı

Deneyisel çalışmalar kapsamında, kontrol numunesi de dahil olmak üzere toplam 19 farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda agrega, çimento, diatomit, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı ve su temel bileşenler olarak kullanılmış, bağlayıcı malzeme miktarı ise sabit tutulmuş ve 630 kg/m³ olarak belirlenmiştir. İkili karışımlarda, CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosunun %5, %10, %15 ve %20 oranlarında diatomit ile ikame edilmesiyle dört farklı numune hazırlanmıştır. Üçlü karışımlarda ise mineral katkı oranının %30'u geçmemesi şartıyla on dört farklı numune tasarlanmıştır. Bu karışımlarda, %5 diatomit sabit tutularak uçucu kül oranları %5, %10, %15, %20 ve %25 olarak, %10 diatomit sabit tutularak uçucu kül oranları %5, %10, %15 ve %20 olarak düzenlenmiştir. Ayrıca %15 diatomit sabit tutularak %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül kullanılmış, %20 diatomit sabit tutularak ise uçucu kül oranları %5 ve %10 olarak belirlenmiştir.

Karışımlarda maksimum tane boyutu 4 mm olan dere agregası kullanılmıştır. Tüm karışımlarda, toplam bağlayıcı miktarı 630 kg/m³ ve süper akışkanlaştırıcı miktarı 8 kg/m³ sabit tutulmuş; standart yayılmayı sağlamak için su, agrega ve su/çimento oranları her bir karışım için yeniden belirlenmiştir.

1 m³ harç için hesaplanan toplam agrega miktarı, Denklem 4.1'e göre belirlenmiştir. EFNARC'ın işlenebilirlik ve performans açısından belirlediği standart, bu karışımların optimize edilmesi için temel alınmıştır

$$\frac{A}{\gamma_{ag}} = 1000 - \left[\frac{C}{\gamma_c} + \frac{D}{\gamma_d} + \frac{UK}{\gamma_{uk}} + \frac{SA}{\gamma_{sa}} + W + H \right] \quad (4.1)$$

A : 1 m³ betonda kullanılacak dere agregası miktarı (kg)

Ç : 1 m³ betonda kullanılacak çimento miktarı (kg)

D : 1 m³ betonda kullanılacak diatomit miktarı (kg)

UK : 1 m³ betonda kullanılacak uçucu kül miktarı (kg)

SA : 1 m³ betonda kullanılacak süper akışkanlaştırıcı miktarı (kg)

W : 1 m³ betonda kullanılacak su miktarı (kg)

H : 1 m³ betondaki havanın hacmi (dm³)

γ_{ag} : Dere agregasının özgül ağırlığı (kg/dm³)

γ_c : Çimentonun özgül ağırlığı (kg/dm³)

γ_d : Diatomitin özgül ağırlığı (kg/dm³)

γ_{uk} : Uçucu külün özgül ağırlığı (kg/dm³)

γ_{sa} : Süper akışkanlaştırıcının özgül ağırlığı (kg/dm³)

Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanan KYH karışım oranları Tablo 4.6'da sunulmuştur.

Tablo 4.6. KYH karışım oranları

Karışım Kodu	MUHTEVA(Kg/m ³)							
	CEM I 42.5R	UK	D	Kum	Sika Viscocrete SF 18	Su	Su/Toz (Hacimce) (%)	Su/Toz (Ağırlıkça) (%)
KONTROL	630	0	0	1367.5	8	234	1.10	0.36
D5+UK5	567	31.5	31.5	1325.6	8	245	1.12	0.38
D5+UK10	535.5	63	31.5	1291.4	8	255	1.16	0.40
D5+UK15	504	94.5	31.5	1257.2	8	266	1.20	0.42
D5+UK20	472.5	126	31.5	1223.0	8	277	1.24	0.44
D5+UK25	441	157.5	31.5	1188.8	8	287	1.28	0.46
D10+UK5	535.5	31.5	63	1212.6	8	287	1.31	0.45
D10+UK10	504	63	63	1152.1	8	308	1.39	0.48
D10+UK15	472.5	94.5	63	1144.3	8	308	1.38	0.49
D10+UK20	441	126	63	1110.1	8	319	1.42	0.51
D15+UK5	504	31.5	94.5	1060.2	8	345	1.56	0.54
D15+UK10	472.5	63	94.5	999.8	8	366	1.64	0.58
D15+UK15	441	94.5	94.5	1005.1	8	361	1.61	0.58
D20+UK5	472.5	31.5	126	881.5	8	413	1.86	0.66
D20+UK10	441	63	126	821.1	8	434	1.94	0.70

Karışım oranları belirlendikten sonra, KYH üzerinde mini çökme yayılma ve viskozimetre gibi taze harç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, basınç dayanımı, üç noktalı eğilme, sülfat çözeltisi ve tekrarlı donma çözülme döngülerine tabi tutulduktan sonra basınç ve üç noktalı eğilme testleri ile toplam su emme gibi sertleşmiş harç deneyleri de uygulanmıştır. Bu deneyler için her bir karışımdan on beşer adet olmak üzere toplamda 285 adet 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numune ve her bir karışımdan üçer adet olmak üzere toplamda 57 adet 50 mm boyutunda küp numune hazırlanmıştır.

4.2. Taze Harç Deneyleri

KYH karışımlarının işlenebilirlik özellikleri, EFNARC kriterleri doğrultusunda mini çökme yayılma testi ile değerlendirilmiş, ayrıca viskozimetre kullanılarak karışımların viskozite değerleri ölçülmüştür.

4.2.1. Mini Çökme Yayılma Deneyi

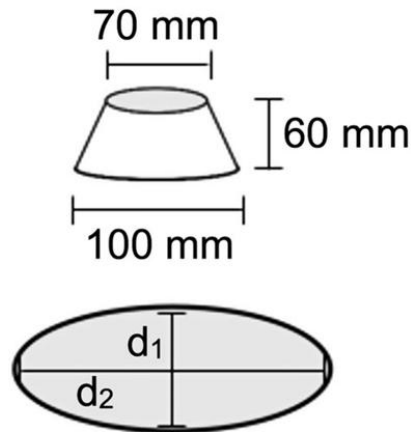
KYH'nin doldurma kapasitesini ve akışkanlığını ölçmek amacıyla EFNARC [37] standartlarına uygun olarak mini çökme-yayılma testi uygulanmıştır. Bu testte, taban çapı 100 mm, üst çapı 70 mm ve yüksekliği 60 mm olan kesik koni formunda bir aparat kullanılır (Şekil 4.5). Kalıbın geniş ağzı, düz ve temiz bir yüzeye yerleştirilerek harç, sarsılmadan ve sıkıştırılmadan dar ağızdan kalıba doldurulur. Ardından koni, yavaşça yukarı doğru kaldırılarak harcın kendi kendine yayılması sağlanır. Harcın yayıldığı iki dik doğrultuda ölçülen çaplar alınarak aritmetik ortalaması hesaplanır ve bu yayılma çapı 240-260 mm aralığında olmalıdır (Şekil 4.6). Elde edilen bu çap değerine göre bağlı çökme-yayılma değeri, Denklem 4.2'de belirtilen formül ile hesaplanır. Bu yöntem, harçların işlenebilirlik özelliklerini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

$$\Gamma_m = [d/d_0]^2 - 1 \quad (4.2)$$

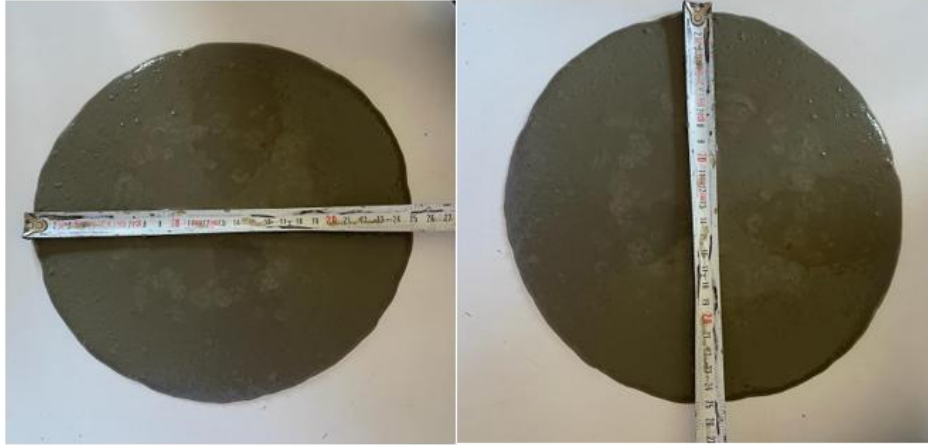
Γ_m : Bağlı çökme-yayılma değeri

d: Deney sonucunda ölçülen ortalama yayılma Çapı (mm)

d_0 : Kesik koninin taban çapı (100 mm)



Şekil 4.5. Mini çökme yayılma deney aparatı ve düzeneği



Şekil 4.6. Mini çökme-yayıma çapının ölçümü

4.2.2. Viskozimetre Deneyi

Belirlenen KYH karışımları, karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra cam beher içerisine dökülmüştür. Viskozite ölçümleri için Brookfield DV-E model cihaz kullanılmıştır (Şekil 4.7). Cihazın numuneye uygun olarak belirlenen 4 mm çapındaki dönel ucu, harç içerisine yerleştirilmiştir. Cihaz, 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarla çalıştırılarak, harcın dönel uca uyguladığı burulma momenti (tork) değeri ölçülmüştür. Her bir açısal hızda, cihazda okunan tork değerlerine göre viskozite değişimleri (η) hesaplanmıştır. 100 devir/dk hızdan sonra, hız kademeli olarak azaltılmış ve aynı ölçümler tekrar edilmiştir. Tüm bu veriler toplanarak, KYH karışımları için viskozite-açısal hız grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 4.7. Brookfield DV-E model viskozimetre cihazı

4.2.3. KYH Karışımlarının Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kür İşlemi

Deneylerde üç noktalı eğilme ve basınç testleri için 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik kalıplar, su emme testleri için ise 50 mm boyutlarında küp kalıplar kullanılmıştır (Şekil 4.8). Kalıplar, düzgün bir şekilde yağlandıktan sonra, belirlenen karışım oranlarına uygun olarak hazırlanan KYH numuneleri, herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmaksızın kendi ağırlıklarıyla kalıplara dökülmüştür. Harçların kalıplara döküldükten sonra priz alması için numunelerin üstü cam yüzeyle kapatılarak korunmuştur. Priz süresi, hava sıcaklığına bağlı olarak 24 ila 48 saat arasında değişmiş, bu süre sonunda numuneler kalıplardan çıkarılmıştır. Numuneler, deney gününe kadar $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta tutulan şehir şebeke suyunda kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 4.9). Kür süreleri 3, 28 ve 90 gün olarak belirlenmiş, ayrıca bazı numuneler 28 günden sonra toplam 180 gün boyunca %10'luk magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.8. KYH'lerin kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 4.9. Şebeke suyunda kür edilen numuneler



(a)

(b)

Şekil 4.10. (a) Magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin ilk hali. (b) Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin son hali

4.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri

Belirli süreler boyunca kür ortamında bekletilen numunelere çeşitli sertleşmiş harç testleri uygulanmıştır.

4.3.1. Üç Noktalı Eğilme ve Basınç Deneyi

Deneyel çalışmada, taze harç özelliklerine göre belirlenen 19 farklı KYH karışımı, her birinden üç numune olacak şekilde 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik kalıplara dökülmüştür. Numuneler, 20 ± 2 °C sıcaklıkta bulunan Elazığ şehir şebeke suyunda 3, 28 ve 90 gün boyunca kür işlemine tabi tutulmuş; belirli bir seri ise 28 gün süreyle şehir şebeke suyunda bekletildikten sonra, toplam kür süresi 180 günü tamamlayacak şekilde magnezyum sülfat çözeltisinde kür işlemine tabi tutulmuştur. Kür süreleri sonunda TS EN 196-1 [76] standardına uygun olarak üç noktalı eğilme (Şekil 4.11) ve basınç testleri (Şekil 4.12) UTEST UTCM 6420 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, her numuneye 0.2 kN/s yükleme hızıyla üç noktalı eğilme testi uygulanmış ve ikiye ayrılan numuneler, basınç testine tabi tutulmuştur. Basınç testinde 2.4 kN/s yükleme hızı kullanılarak numunelerin dayanım değerleri ölçülmüş ve her iki testin sonucunda elde edilen dayanım değerlerinin ortalama değerleri hesaplanarak raporlanmıştır.



Şekil 4.11. Üç noktalı eğilme testi



Şekil 4.12. Basınç testi

4.3.2. Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri

Her bir karışımdan üç adet olacak şekilde, 50 mm boyutlarında toplam 57 adet küp numune hazırlanmıştır. TS EN 12390-7 [77] standardına uygun olarak, numuneler önce 24 saat süreyle su içinde bekletilerek doygun hale getirilmiştir. Daha sonra numunelerin havada ve Arşimet terazisi ile su içerisinde asılı haldeki ağırlıkları ölçülmüştür. Numuneler, 105±5 °C sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa ulaşana dek kurutulmuş ve etüv kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda, denklemler (4.3-4.7) kullanılarak, tüm karışımların etüv kuru yoğunluğu, doygun kuru yüzey yoğunluğu, görünür yoğunluğu, toplam su emme kapasitesi ve porozite değerleri hesaplanmıştır.

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

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

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

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

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

W₁: Numunenin etüvde kurutulmuş ağırlığı (gr)

W₂: Numunenin su içerisindeki ağırlığı (gr)

W₃: Numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı (gr)

4.3.3. Kapiler Su Emme Deneyi

Her bir karışımdan üçer numune olacak şekilde hazırlanan toplam 57 adet 50 mm'lik küp numuneler, 28 gün boyunca kür havuzunda bekletildikten sonra, sabit ağırlığa ulaşmaları için 105±5°C'de hava sirkülasyonlu etüvde kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler, oda sıcaklığında soğutulduktan sonra etüv kurusu ağırlıkları ölçülmüştür. Ardından, yan yüzeyleri izole edilip tekrardan ağırlıkları ölçülmüş ve taban kısmı 5 mm suya batacak şekilde düzenek içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 4.13). Bu numuneler, ASTM C1585 standardına [78] göre kapiler su emme testi için belirli zaman aralıklarında sudan çıkarılarak yüzeyindeki serbest sular temizlendikten sonra 0.01 g hassasiyetle tartılarak kütle artışları kaydedilmiştir (Şekil 4.14). Su emme ölçümleri 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dakikalık sürelerde yapılmış ve Denklem 4.8 ile kapilarite katsayıları hesaplanmıştır. Bu yöntemle, numunelerin su alma kapasiteleri ve kapiler davranışları analiz edilmiştir.

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

K: Kapiler su emme katsayısı (cm²/s)

Q: Emilen su miktarı (cm³)

t: Geçen süre (s)

A: Su ile temas eden numune alanı (cm²)



Şekil 4.13. Yan yüzeyleri izole edilmiş numunelerin su emmesi



Şekil 4.14. 24 saatlik sürenin ardından numunelerin su emmiş görüntüleri

4.3.4. Donma-Çözülme Deneyi

Bu çalışmada, her biri üçer adet olmak üzere 19 farklı karışımdan toplam 57 adet 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, 90 gün boyunca şehir şebeke suyunda kür işlemine tabi tutularak suya doymun hale getirilmiştir. Deneyler sırasında, numunelerin donma-çözülme döngüleri sonrası kütle değişimlerini değerlendirmek amacıyla, her bir numunenin doymun kuru yüzey (DKY) ağırlıkları ölçülmüştür. Ardından numuneler, ASTM C666 [79] standardına göre donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. -20 °C'de 6 saat boyunca dondurulmuş ve +20 °C'de 2 saat boyunca çözdürülmüştür (Şekil 4.15-4.17). Bu işlem 25 döngü boyunca tekrarlandıktan sonra DKY ağırlıkları tekrar ölçülmüştür. Toplam 50 döngü tamamlandığında numunelerin DKY ağırlıkları bir kez daha kaydedilmiş ve elde edilen veriler analiz edilmiştir. Son olarak, dayanım özelliklerini değerlendirmek amacıyla numunelere üç noktalı eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.



Şekil 4.15. +20 °C’de çözdürülen numuneler



Şekil 4.16. Donma-çözülme döngülerine tabi tutulan numunelerin son durumu



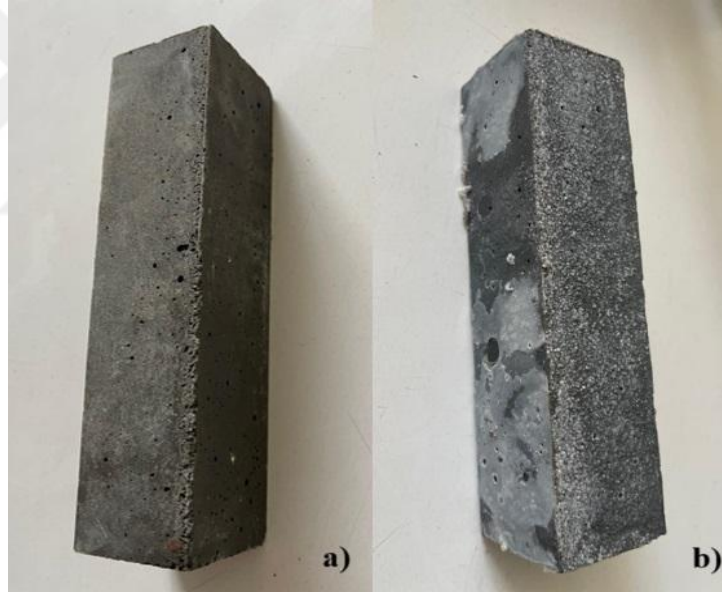
Şekil 4.17. Donma-çözülme döngüleri sonrası numunelerin yakından görünümü

4.3.5. Sülfat Çözeltisi Deneyi

Bu çalışmada, her biri üçer adet olmak üzere 19 farklı karışımdan toplam 57 adet, 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numune hazırlanmıştır. Numuneler, başlangıçta 28 gün süreyle şehir suyuyla küretilmiştir. Küretilmenin ardından, numunelerin DKY ağırlıkları ölçülerek başlangıç ağırlık değerleri kaydedilmiştir. Ardından numuneler, ASTM C1012-13 [80] standardına göre sülfat çözeltisi deneyine tabi tutulmuştur. Numuneler, toplam küretilme süresi 180 gün olacak şekilde, %10'luk $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilmiştir. Çözeltiden çıkarılan numunelerin ağırlık değişimleri tekrardan DKY ölçümleri yapılarak değerlendirilmiştir (Şekil 4.18, Şekil 4.19). Küretilme işlemleri tamamlandıktan sonra numuneler, dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla üç noktalı eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.18. Sülfat çözeltisinden çıkarılan numunelerin görünümü



Şekil 4.19. a) Sülfat çözeltisine maruz kalmayan numune b) Sülfat çözeltisine maruz kalan numune

4.3.6. Mikroyapı Analizi

180 günlük sülfat maruziyeti sonrasında, %20 diatomit ve %20 diatomit + %10 uçucu kül içeren numuneler, XRD ve SEM/EDS analizlerine uygun olacak şekilde ince toz formuna getirilmiştir. Malzemelerin yüzey morfolojileri, farklı büyütme seviyelerinde Hitachi SU3500 model SEM cihazı ile incelenmiştir. Ayrıca, taranan alanlarda elementel dağılımı belirlemek amacıyla Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) ve EDS haritalama analizleri, Oxford INCA X-ışını spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, 19 farklı karışıma ait özellikler, taze ve sertleşmiş harç deneyleriyle kapsamlı olarak değerlendirilmiştir.

5.1. Taze Harç Deney Sonuçları

KYH'lerin taze durumdaki işlenebilirlik, kıvam ve akışkanlık özelliklerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen testlerin sonuçları aşağıda sunulmuştur.

5.1.1. Mini Çökme-Yayıma Deney Sonuçları

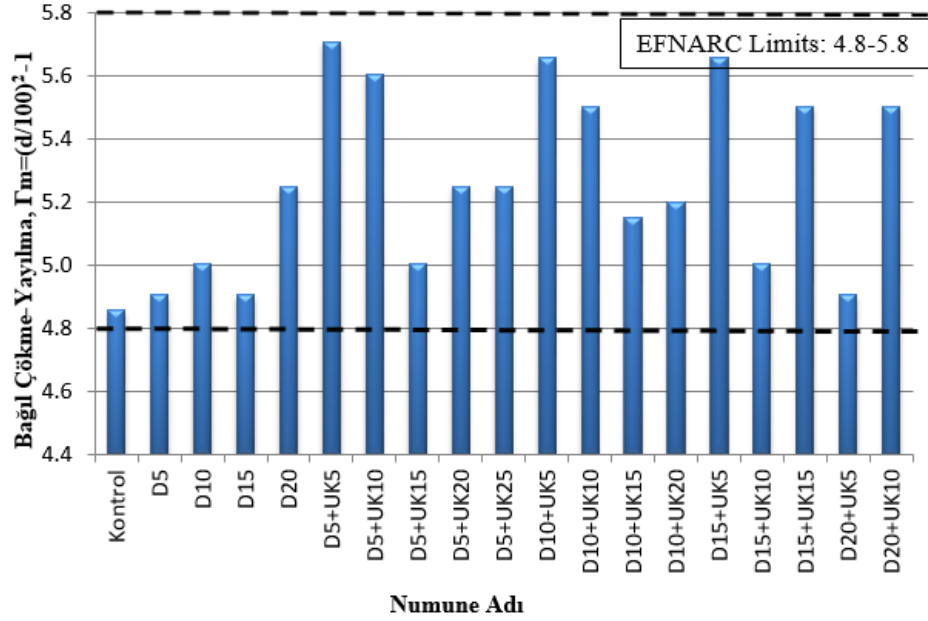
Taze harç karışımlarının akışkanlık ve kıvam özelliklerini değerlendirmek için, EFNARC (2002) standartları doğrultusunda mini çökme-yayıma deneyi uygulanmıştır. Deney sırasında, karışım oranları EFNARC'ın önerdiği 240-260 mm'lik çökme-yayıma referans değerleri doğrultusunda ayarlanmıştır.

Yapılan testler sonucunda, tüm KYH karışımlarının elde edilen çökme-yayıma değerleri Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Mini çökme-yayıma deney sonuçları

Karışım Kodu	Çökme-Yayıma (mm)	Bağıl Çökme-Yayıma
Kontrol	242	4.9
D5	243	4.9
D10	245	5.0
D15	243	4.9
D20	250	5.3
D5+UK5	242	5.7
D5+UK10	259	5.6
D5+UK15	257	5.0
D5+UK20	245	5.3
D5+UK25	250	5.3
D10+UK5	250	5.7
D10+UK10	258	5.5
D10+UK15	255	5.2
D10+UK20	248	5.2
D15+UK5	249	5.7
D15+UK10	258	5.0
D15+UK15	245	5.5
D20+UK5	255	4.9
D20+UK10	243	5.5

Tablo 5.1’de yer alan çökme-yayılma değerleri, Denklem 4.2 kullanılarak bağıl çökme-yayılma değerlerine dönüştürülmüş ve bu hesaplamaların grafiği Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Bağıl çökme-yayılma grafiği

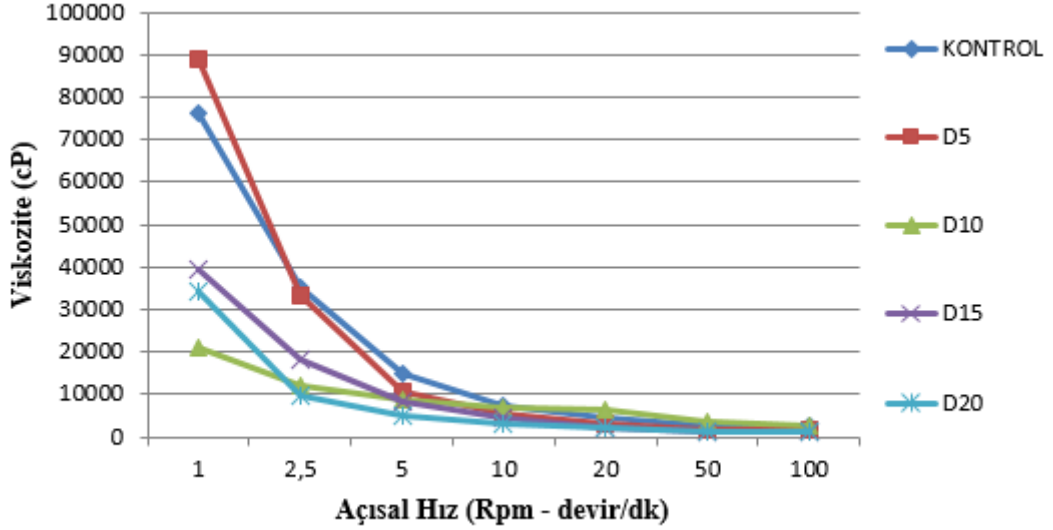
Sonuçlardan elde edilen grafik incelendiğinde, tüm değerlerin EFNARC (2002) tarafından belirtilmiş olan sınır değerlere uyduğu görülmektedir.

5.1.2. Viskozite Dene sonuçları

KYB'nin istenilen akıcılık ve ayrışmaya karşı direnç özelliklerini sağlayabilmesi için uygun viskozite değerine sahip olması önemlidir. Bu nedenle, tüm KYH karışımlarının işlenebilirlik ve kıvam özelliklerini değerlendirmek amacıyla, karıştırma işleminin hemen ardından harçlar behere alınarak 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısız hızlarda viskozite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım için elde edilen viskozite değerleri (cP) Tablo 5.2'de, bu değerlerin grafiğe dönüştürülmüş hali ise Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te sunulmuştur.

Tablo 5.2. Farklı açısız hızlarda KYH karışımlarının viskozite değerleri

KARIŞIM ADI	Açısız Hız (Rpm)						
	1	2.5	5	10	20	50	100
KONTROL	76300	35000	14720	7550	4600	2650	2425
D5	89100	33480	10550	5510	3120	1760	1760
D10	21000	12080	8640	6970	6470	3375	2570
D15	39500	18000	8180	4470	2365	1304	1227
D20	34200	9680	5180	3310	2040	1360	1234
D5+UK5	71200	25680	10030	5350	3945	3310	3185
D5+UK10	100000	23480	11120	5750	3790	2495	2455
D5+UK15	52200	17170	9330	5120	3185	2825	2555
D5+UK20	93900	26600	11960	5850	3295	2175	2205
D5+UK25	85200	25240	9240	5670	3165	2425	2399
D10+UK5	35600	17130	12750	10040	7565	4640	2225
D10+UK10	72800	28560	11740	6955	3860	3318	3119
D10+UK15	38500	15480	7380	4880	3635	3080	2942
D10+UK20	59600	20280	9800	5650	3540	2958	2762
D15+UK5	20600	10580	6800	4330	3425	3055	2917
D15+UK10	21600	10060	5840	4330	3315	2738	2560
D15+UK15	21000	10880	6940	4610	3600	3030	2882
D20+UK5	20500	8960	5160	3780	3285	3702	2895
D20+UK10	24300	9520	5780	3470	2270	1520	1475



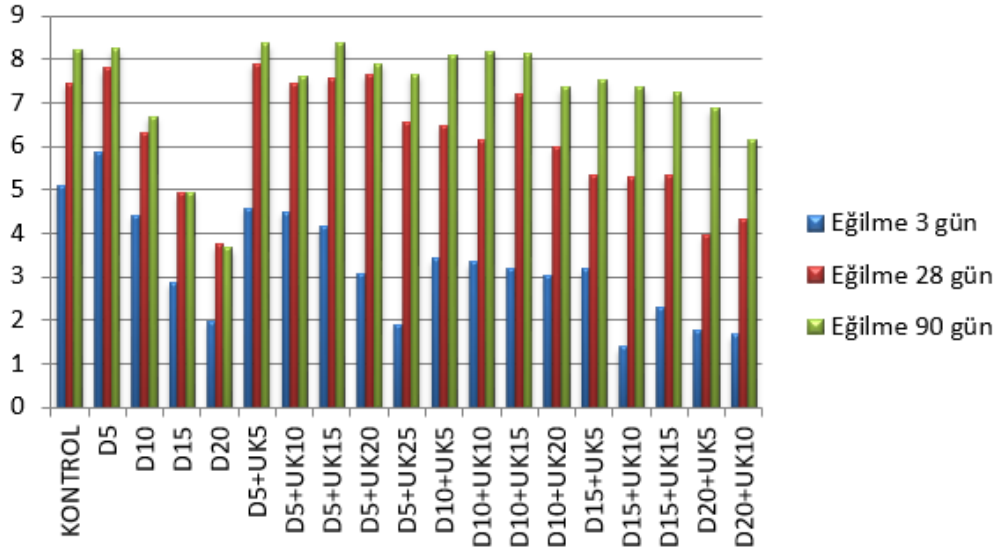
Şekil 5.2. İkili karışımların viskozite grafiği

Tablo 5.3. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri

NORMAL KÜR DEĞERLERİ						
Karışım Adı	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)			Basınç Dayanımı (MPa)		
	3 gün	28 gün	90 gün	3 gün	28 gün	90 gün
KONTROL	5.11	7.45	8.23	22.70	50.93	59.23
D5	5.86	7.80	7.68	25.34	43.91	52.96
D10	4.42	6.32	6.68	18.17	39.44	47.48
D15	2.86	4.91	4.92	10.86	30.78	35.96
D20	1.96	3.75	3.66	6.51	24.46	28.30
D5+UK5	4.58	7.89	8.36	20.69	42.54	51.35
D5+UK10	4.49	7.45	7.58	19.18	38.97	44.79
D5+UK15	4.15	7.58	8.36	16.23	37.16	41.26
D5+UK20	3.08	7.65	7.90	12.14	34.55	38.68
D5+UK25	1.90	6.56	7.65	6.97	31.52	34.74
D10+UK5	3.43	6.48	8.09	13.38	34.00	36.68
D10+UK10	3.34	6.14	8.18	12.26	31.13	34.71
D10+UK15	3.19	7.21	8.13	10.64	32.05	34.76
D10+UK20	3.03	5.97	7.34	9.96	29.04	30.10
D15+UK5	3.18	5.35	7.51	9.80	32.52	34.82
D15+UK10	1.39	5.27	7.35	4.01	26.82	30.98
D15+UK15	2.29	5.33	7.22	7.22	26.17	29.64
D20+UK5	1.78	3.95	6.86	4.55	22.83	26.43
D20+UK10	1.67	4.34	6.14	4.08	20.99	23.18

Tablo 5.3'teki veriler esas alınarak, numunelerin eğilmede çekme dayanım değerlerinin kür süreleri ve karışım oranlarına göre nasıl değiştiğini gösteren grafik, Şekil 5.4'te sunulmuştur.

NORMAL KÜR



Şekil 5.4. Üç noktalı eğilmede çekme dayanımı grafiği

Tablo 5.3'teki verilere göre, 3 günlük eğilme dayanımında en düşük değer, 1.388 MPa ile D15+UK10 numunesinde gözlemlenmiştir. Buna karşılık, en yüksek değer ise 5.862 MPa ile D5 numunesinde elde edilmiştir. Şekil 5.4'teki grafikte de görülebileceği gibi, ikili karışımlarda %5 oranında diatomit içeren D5 numunesi, kontrol numunesine kıyasla %14.6 oranında daha yüksek bir dayanım ile en yüksek eğilme dayanımını göstermiştir. Ancak, diatomit oranının artmasıyla birlikte dayanım değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Üçlü karışımlara bakıldığında, en yüksek eğilme dayanımı 4.577 MPa değeriyle D5+UK5 numunesinde tespit edilmiştir. Diatomit oranının tüm seviyelerinde (%5, %10, %15, %20), UK oranının artmasıyla birlikte dayanım değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

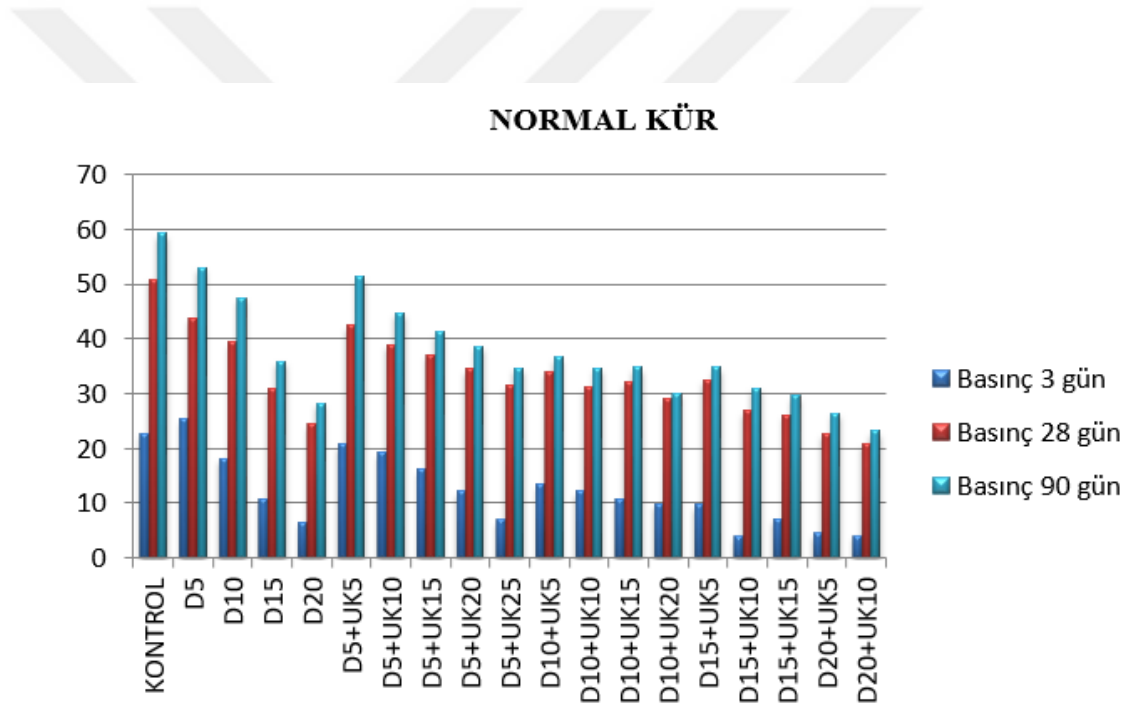
28 günlük eğilme dayanımları değerlendirildiğinde, en yüksek değer 7.893 MPa ile D5+UK5 numunesinde elde edilmiştir. En düşük dayanım ise 3.753 MPa ile D20 numunesinde gözlemlenmiştir. İkili karışımlar arasında D5 numunesi, kontrol numunesine kıyasla %4.6 oranında daha yüksek bir dayanım göstermiştir. Ancak diatomit oranının artmasıyla birlikte dayanım değerlerinin belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Üçlü karışımlarda, D5+UK5 numunesi hem kontrol numunesine kıyasla %5.8 oranında daha yüksek dayanım göstermiş hem de tüm numuneler arasında en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır.

90 günlük eğilme dayanım değerlerinde D5+UK15 numunesi 8.365 MPa değeriyle en yüksek dayanıma sahip olurken D20 numunesi 3.667 MPa değeriyle en düşük dayanıma sahip olmuştur. Nihai dayanım değerlerinde kontrol numunesi tüm ikili karışımlardan daha yüksek bir dayanıma sahip olmuştur. Üçlü karışımlarda ise düşük oranda diatomit içeren numuneler kontrol

numunesinden daha yüksek veya benzer dayanım performansı gösterirken yüksek oranda diatomit içeren numuneler kontrol numunesinden düşük dayanım performansı göstermiştir.

Ayrıca Şekil 5.4'teki grafik incelendiğinde, D5 numunesinin erken yaşta en yüksek dayanımı göstermesi ve 90 günlük nihai dayanım değerlerinin kontrol numunesine yakın seviyelerde olması, bu karışımı erken yaş dayanımının önemli olduğu projeler için cazip bir seçenek haline getirmektedir. Öte yandan, D5+UK10 numunesi 3 günlük erken yaş dayanımında en düşük eğilme dayanımı sergilemesine rağmen, 90 günlük nihai dayanımda bu açığı kapatarak kontrol numunesine yakın bir performans göstermiştir. Bu durum, D5+UK10 numunesinin uzun vadeli dayanım açısından potansiyelini ortaya koymaktadır.

Tablo 5.3'teki veriler esas alınarak, numunelerin basınç dayanım değerlerinin kür süreleri ve karışım oranlarına göre nasıl değiştiğini gösteren grafik, Şekil 5.5'te sunulmuştur.



Şekil 5.5. Basınç dayanımı grafiği

Tablo 5.3'teki verilere göre, 3 günlük basınç dayanımında en düşük değer, 4.016 MPa ile D15+UK10 numunesinde gözlemlenmiştir. Buna karşılık, en yüksek değer ise 25.349 MPa ile D5 numunesinde elde edilmiştir. Şekil 5.5'teki grafikten de görüldüğü gibi, ikili karışımlarda %5 oranında diatomit içeren D5 numunesi, kontrol numunesine kıyasla %11.6 oranında daha yüksek bir dayanım göstererek, en yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. Bununla birlikte, artan diatomit oranıyla dayanım değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Örneğin, %10 diatomit içeren D10 numunesi, kontrol numunesine göre %19.96 daha düşük bir dayanım göstermiştir. %15 ve %20 diatomit oranlarına sahip D15 ve D20 numunelerinde bu azalma sırasıyla

%52.13 ve %71.30'a kadar ulaşmıştır. Üçlü karışımlarda, en yüksek basınç dayanımı 20.696 MPa ile D5+UK5 numunesinde tespit edilmiştir. Ancak, diatomit oranının tüm seviyelerinde (%5, %10, %15, %20), UK oranının artışıyla dayanım değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Örneğin, D5+UK10 numunesi, kontrol numunesine göre %15.5 daha düşük dayanım göstermiş, D5+UK25 numunesinde ise bu fark %69.3'e kadar çıkmıştır.

28 günlük basınç dayanımlarında en yüksek değer, 50.930 MPa ile Kontrol numunesinde elde edilmiştir. En düşük dayanım ise 20.999 MPa ile D20+UK10 numunesinde gözlemlenmiştir. Şekil 5.5'teki grafikten de görülebileceği gibi, ikili karışımlarda %5 diatomit içeren D5 numunesi, 43.917 MPa değeriyle kontrol numunesine kıyasla %13.8 daha düşük bir dayanım sergilemiş, ancak diğer ikili karışımlarla karşılaştırıldığında en yüksek dayanım performansını göstermiştir. Diatomit oranının artmasıyla birlikte dayanım değerlerinde belirgin azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, D10 numunesi 39.449 MPa dayanım gösterirken, bu değer kontrol numunesine göre %22.5 daha düşüktür. D20 numunesinde ise dayanım kaybı %51.9'a kadar çıkmıştır. Üçlü karışımlarda, en yüksek dayanım değeri 42.542 MPa ile D5+UK5 numunesinde gözlemlenmiştir. Bu değer, kontrol numunesine kıyasla %16.5 oranında daha düşük olsa da üçlü karışımlar arasında en iyi performansı sergilemiştir. Ancak hem diatomit hem de UK oranlarının artışıyla dayanım değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Örneğin, D5+UK10 numunesi 38.974 MPa dayanım göstererek kontrol numunesine göre %23.4 daha düşük bir performans sergilemiştir. D20+UK10 numunesinde ise dayanım kaybı %58.7 seviyesine ulaşmıştır.

90 günlük basınç dayanımında en yüksek değer, 59.233 MPa ile Kontrol numunesinde elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük dayanım değeri, 23.187 MPa ile D20+UK10 numunesinde gözlemlenmiştir. Şekil 5.5'teki grafikte de görülebileceği gibi, nihai dayanım açısından kontrol numunesi, tüm ikili ve üçlü karışımlardan daha yüksek bir dayanım performansı göstermiştir. İkili karışımlar arasında, D5 numunesi 52.961 MPa dayanım değeriyle kontrol numunesine en yakın performansı sergilemiş ancak %10.6 oranında daha düşük dayanım göstermiştir. Diatomit oranının artmasıyla dayanım değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Örneğin, D10 numunesi kontrol numunesine göre %19.8 daha düşük dayanım sergilerken, D20 numunesinde bu fark %52.2'ye ulaşmıştır. Üçlü karışımlar incelendiğinde, D5+UK5 numunesi 51.358 MPa dayanımıyla en iyi performansı göstermiş, ancak bu değer kontrol numunesine kıyasla %13.3 oranında daha düşük kalmıştır. Artan UK oranının dayanım üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir; örneğin, D5+UK10 numunesi kontrol numunesine göre %24.4 oranında daha düşük bir dayanım sergilerken, D5+UK25 numunesinde bu oran %41.4 seviyesine ulaşmıştır.

5.2.2. Sülfat Etkisi Sonrası Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

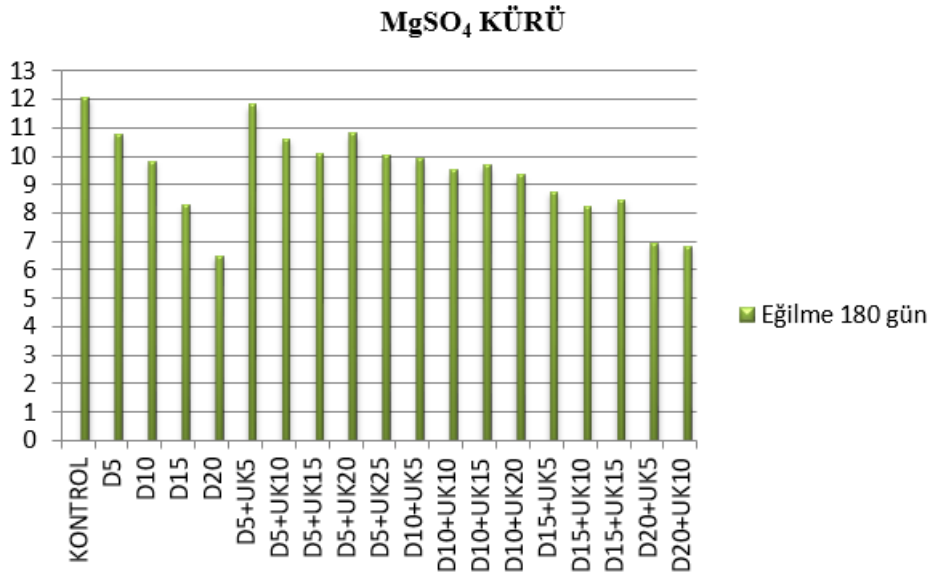
40x40x160 mm boyutlarında hazırlanan prizmatik KYH numunelerinin sülfat atağına karşı dayanıklılığını incelemek amacıyla, numuneler ilk olarak 28 gün boyunca şehir şebeke suyunda kür

edilmiş, ardından toplamda 180 gün olacak şekilde %10 MgSO₄ çözeltisinde bekletilmiştir. Bu süreçlerin sonunda, numunelere üç noktalı eğilmede çekme ve basınç testleri uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar ise Tablo 5.4'te sunulmuştur.

Tablo 5.4. MgSO₄ çözeltisinde kür edilen KYH'lerin eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri

MgSO₄ KÜR DEĞERLERİ		
Karışım Adı	Eğilme 180 gün	Basınç 180 gün
KONTROL	12.08	57.09
D5	10.79	47.57
D10	9.82	45.20
D15	8.27	34.76
D20	6.50	25.64
D5+UK5	11.86	49.28
D5+UK10	10.59	48.60
D5+UK15	10.11	45.34
D5+UK20	10.81	45.06
D5+UK25	10.01	44.22
D10+UK5	9.90	47.06
D10+UK10	9.51	41.16
D10+UK15	9.67	43.25
D10+UK20	9.32	38.76
D15+UK5	8.73	39.37
D15+UK10	8.21	31.82
D15+UK15	8.46	26.77
D20+UK5	6.94	25.61
D20+UK10	6.83	21.86

Tablo 5.4'teki veriler esas alınarak, numunelerin karışım oranlarına göre eğilmede çekme dayanım değerlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 5.6'te sunulmuştur.



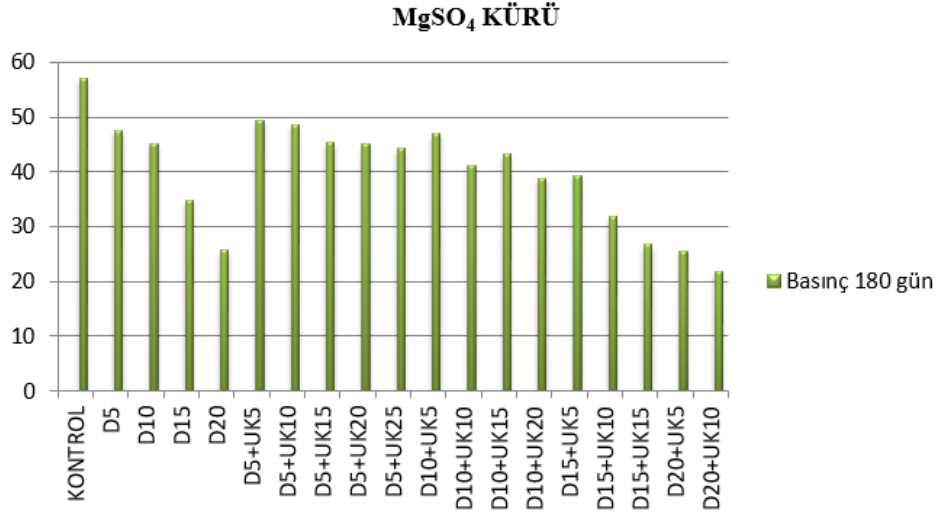
Şekil 5.6. MgSO₄ çözeltilisinde kür edilen numunelerin eğilme çekme dayanım grafiği

Kontrol numunesi, sülfat ortamında en yüksek eğilme çekme dayanımı performansını göstermiştir. 180 gün boyunca sülfat çözeltilisinde bekletilen kontrol numunesi, 12.083 MPa değerine ulaşarak diğer katkılı karışımlardan daha yüksek bir dayanım sergilemiştir. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi, ikili karışımlarda D5 numunesi, 10.790 MPa dayanım değeriyle kontrol numunesine en yakın performansı göstermiş, ancak bu değer kontrol numunesinden %10.7 oranında daha düşük kalmıştır. D10, D15 ve D20 numunelerinde ise diatomit oranının artmasıyla dayanım değerlerinde belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Özellikle D20 numunesinde dayanım kaybı %46.2 seviyesine ulaşmıştır.

Üçlü karışımlarda, D5+UK5 numunesi 11.826 MPa dayanım değeriyle kontrol numunesinden yalnızca %2.1 oranında daha düşük bir performans sergilemiştir. Bu, düşük UK oranlarının sülfat ortamındaki dayanım üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığını göstermektedir. Ancak, UK oranının artışıyla dayanım değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Örneğin, D5+UK10 numunesi %12.3, D5+UK25 numunesi ise %17.1 oranında kontrol numunesine göre daha düşük dayanım sergilemiştir. Benzer şekilde, üçlü karışımlarda diatomit oranının artırılması da dayanım üzerinde olumsuz bir etki yaratmış, bu durum özellikle D20+UK10 numunesinde dayanımın %43.5 oranında azalmasıyla belirginleşmiştir.

Kontrol numunesinin eğilmede çekme dayanımı, 90. gün sonunda 8,23 MPa olarak ölçülmüştür. Sülfat etkisinin değerlendirildiği 180. gün sonunda ise 12,08 MPa değerine yükselmiştir. Bu durum, eğilmede çekme dayanımında yaklaşık %46,22 oranında bir artışa işaret etmektedir.

Tablo 5.4'teki veriler esas alınarak, numunelerin karışım oranlarına göre basınç dayanım değerlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 5.7'de sunulmuştur.



Şekil 5.7. MgSO₄ çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanım grafiği

Kontrol numunesi, sülfat çözeltisinde en yüksek basınç dayanımını sergilemiştir. 180 günlük sülfat kürünün ardından kontrol numunesinin basınç dayanımı 57.097 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.7’de görüldüğü gibi, ikili karışımlarda D5 numunesi, 47.579 MPa dayanım değeriyle kontrol numunesine en yakın performansı göstermiştir. Ancak, bu değer kontrol numunesinden %16.7 oranında daha düşük kalmıştır. D10, D15 ve D20 numunelerinde ise diatomit oranının artmasıyla dayanım değerlerinde belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Özellikle D20 numunesinde dayanım kaybı %55.1 seviyesine ulaşmıştır.

Üçlü karışımlar incelendiğinde, en yüksek dayanım değeri D5+UK5 numunesinde ölçülmüştür. 49.283 MPa dayanım değeriyle bu numune, kontrol numunesine göre %13.6 oranında daha düşük bir performans sergilemiştir. Benzer şekilde, D10+UK5 numunesi 47.066 MPa dayanım değeriyle kontrol numunesine en yakın performans gösteren diğer üçlü karışım olmuştur. Bununla birlikte, hem diatomit hem de UK oranının artmasıyla dayanım değerlerinde belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Örneğin, D5+UK10 numunesi kontrol numunesine göre %14.87 oranında daha düşük bir dayanım sergilemiş, D5+UK25 numunesinde bu oran %22.56 seviyesine ulaşmıştır. Daha yüksek diatomit ve UK oranlarına sahip numunelerde dayanım kaybı daha belirgin hale gelmiştir. Örneğin, D20+UK10 numunesinde dayanım, kontrol numunesine göre %61.69 oranında daha düşük ölçülmüştür.

Kontrol numunesinin basınç dayanımı, 90. gün sonunda 59,23 MPa olarak ölçülmüştür. Sülfat etkisinin değerlendirildiği 180. gün sonunda ise 57,09 MPa değerine düşmüştür. Bu durum, basınç dayanımında yaklaşık %3,61 oranında bir azalmaya işaret etmektedir.

5.2.3. Sülfat Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim

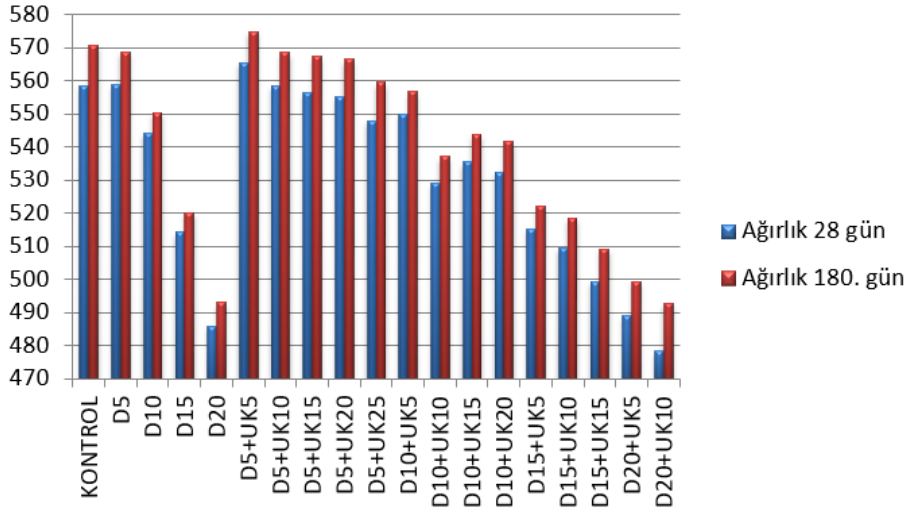
40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik KYH numunelerinin sülfat çözeltisinde bekletildikten sonra ağırlık değişimlerini incelemek amacıyla, numuneler öncelikle 28 gün boyunca şehir şebeke suyunda kür edilmiştir. Bu kür işleminin ardından, numunelerin DKY ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra, toplam süre 180 güne tamamlanacak şekilde, %10 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin yeniden DKY ağırlıkları ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te gösterilmiştir. Bu analiz, sülfat etkisinin numune ağırlıkları üzerindeki değişimini gözlemlemek açısından önem arz etmektedir.

Tablo 5.5. Sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri

Karışım Adı	MgSO ₄ KÜR DEĞERLERİ	
	28 gün	180 gün
KONTROL	558.53	570.86
D5	558.83	568.76
D10	544.23	550.33
D15	514.28	520.23
D20	485.93	493.16
D5+UK5	565.54	574.83
D5+UK10	558.50	568.66
D5+UK15	556.47	567.40
D5+UK20	555.32	566.46
D5+UK25	547.96	559.50
D10+UK5	549.98	556.66
D10+UK10	528.89	537.16
D10+UK15	535.45	543.86
D10+UK20	532.48	541.66
D15+UK5	515.30	522.00
D15+UK10	509.53	518.63
D15+UK15	499.41	509.23
D20+UK5	489.06	499.50
D20+UK10	478.46	492.83

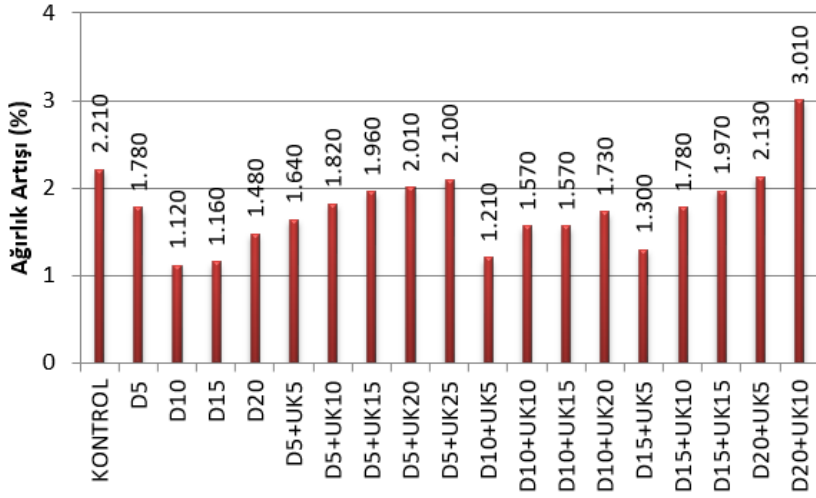
Tablo 5.5'teki veriler esas alınarak, numunelerin karışım oranlarına göre ağırlık değerlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 5.8'de sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 5.9'da numunelerin %10 MgSO₄ çözeltisinde bekletildikten sonra meydana gelen ağırlık artışı yüzdesel olarak gösterilmiştir.

MgSO₄ KÜRÜ



Şekil 5.8. MgSO₄ çözeltisinde kür edilen numunelerin ağırlık değişim grafiği

MgSO₄ KÜRÜ



Şekil 5.9. MgSO₄ çözeltisinde kür edilen numunelerin ağırlık artışları (%)

Şekil 5.9'da görüldüğü üzere, tüm numuneler arasında en düşük ağırlık artışı, %1.16 ile D15 numunesinde gözlemlenmiştir. Bu değere en yakın sonuçlar, %1.12 ile D10 numunesinde ve %1.21 ile D10+UK5 numunesinde elde edilmiştir. Kontrol numunesi, %2.21 ağırlık artışı ile diğer numunelerin büyük bir kısmından daha yüksek bir performans sergilemiştir. Ancak, D20+UK10 numunesi, %3.00 ağırlık artışıyla tüm numuneler arasında en yüksek değere ulaşmıştır ve kontrol numunesini bu anlamda geride bırakmıştır.

Genel olarak, numunelerde ağırlık artışı, hem diatomit hem de UK oranlarının etkisine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Diatomit oranının yüksek olduğu numunelerde ağırlık artışının

genellikle düşük olduğu, ancak UK katkısının artışıyla ağırlık artışında göreceli bir yükselme olduğu görülmüştür.

5.2.4. Donma-Çözülme Etkisi Sonrası Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

40x40x160 mm boyutlarında prizmatik olarak hazırlanan KYH numunelerinin donma-çözülme döngülerine karşı dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla, numuneler öncelikle 90 gün süreyle şehir şebeke suyunda kür edilmiştir. Kür işleminin ardından numuneler, -20 °C’de 6 saat dondurulmuş ve ardından +20 °C’de 2 saat çözdürülerek toplamda 50 tekrarlı donma-çözülme döngüsüne tabi tutulmuştur. Bu işlemlerin tamamlanmasının ardından, numuneler üzerinde üç noktalı eğilme ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.6’da sunulmuştur.

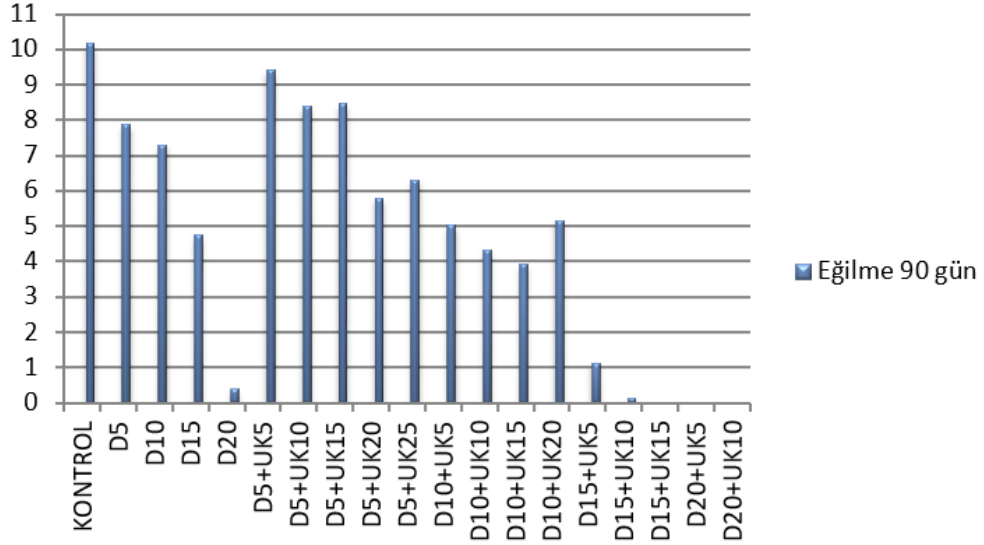
Tablo 5.6. Donma-Çözülme döngülerine tabi tutulan numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanım değerleri

DONMA-ÇÖZÜLME DAYANIM DEĞERLERİ		
Karışım Adı	Eğilme 90 gün	Basınç 90 gün
KONTROL	10.16	56.55
D5	7.87	58.14
D10	7.28	42.48
D15	4.74	36.39
D20	0.38	-
D5+UK5	9.41	57.81
D5+UK10	8.38	45.87
D5+UK15	8.46	45.37
D5+UK20	5.78	42.18
D5+UK25	6.29	38.23
D10+UK5	5.01	45.45
D10+UK10	4.31	35.31
D10+UK15	3.91	36.92
D10+UK20	5.14	30.47
D15+UK5	1.12	23.61
D15+UK10	0.13	-
D15+UK15	-	-
D20+UK5	-	-
D20+UK10	-	-

Yüksek diatomit oranına sahip bazı numuneler donma-çözülme döngülerinden sonra dayanımı ölçülemeyecek düzeye gelmiştir.

Tablo 5.6’daki veriler esas alınarak, numunelerin karışım oranlarına göre eğilmede çekme dayanım değerlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 5.10’da sunulmuştur.

DONMA-ÇÖZÜLME



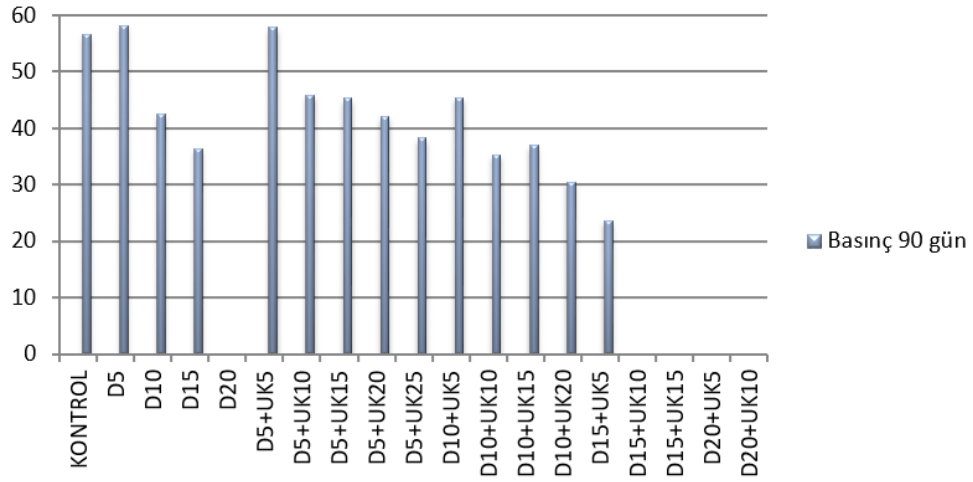
Şekil 5.10. Donma-çözülme döngüsü sonrası eğilmede çekme dayanım grafiği

Tablo 5.6'daki verilere göre, kontrol numunesi 10.168 MPa değeriyle tüm numuneler arasında en yüksek eğilme dayanımını göstermiştir. İkili karışımlar arasında, D5 numunesi 7.871 MPa dayanım değeriyle en yüksek performansı sergilemiştir. Ancak bu değer, kontrol numunesine kıyasla %22.6 oranında daha düşüktür. Diatomit oranının artışıyla birlikte ikili karışımların dayanım değerlerinde belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Örneğin, D20 numunesi yalnızca 0.382 MPa dayanım göstermiş ve kontrol numunesine kıyasla %96.24 oranında daha düşük bir performans sergilemiştir.

Üçlü karışımlar incelendiğinde, D5+UK5 numunesi 9.416 MPa dayanım değeriyle kontrol numunesine en yakın performansı göstermiştir ve bu fark yalnızca %7.4 olmuştur. Ancak, artan UK oranı ile dayanım değerlerinde azalmalar kaydedilmiştir. Örneğin, D5+UK25 numunesi 6.293 MPa dayanım değeriyle kontrol numunesinden %38.1 oranında daha düşük bir performans sergilemiştir. Diatomit oranının yüksek olduğu üçlü karışımlarda dayanım kaybı daha belirgin hale gelmiştir. D15+UK15, D20+UK5 ve D20+UK10 numunelerinde dayanım değerleri ölçülememiştir.

Tablo 5.6'daki veriler esas alınarak, numunelerin karışım oranlarına göre basınç dayanım değerlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 5.11'de sunulmuştur.

DONMA-ÇÖZÜLME



Şekil 5.11. Donma-çözülme döngüsü sonrası basınç dayanım grafiği

Tablo 5.6'daki verilere göre, kontrol numunesi, 56.554 MPa basınç dayanımıyla donma-çözülme dayanımı açısından referans olarak en yüksek değerlere yakın bir performans sergilemiştir. Ancak, tüm numuneler arasında en yüksek basınç dayanımı, 58.149 MPa ile D5 numunesinde gözlemlenmiştir. Bu değer, kontrol numunesine kıyasla %2.8 oranında daha yüksektir.

İkili karışımlar incelendiğinde, artan diatomit oranının basınç dayanımı üzerinde belirgin bir azalma etkisi yarattığı görülmektedir. Örneğin, D10 numunesi %24.88 oranında, D15 numunesi ise %35.61 oranında kontrol numunesine göre daha düşük basınç dayanımı göstermiştir. Diatomit oranının en yüksek olduğu D20 numunesinin dayanımı ise ölçülemediği görülmüştür.

Üçlü karışımlar arasında, D5+UK5 numunesi, 57.817 MPa basınç dayanımı ile kontrol numunesinden %2.2 oranında daha yüksek bir performans göstermiştir. Ancak, UK oranının artmasıyla birlikte dayanım değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Örneğin, D5+UK25 numunesi, kontrol numunesine göre %32.4 oranında daha düşük bir dayanım değeri göstermiştir. Artan diatomit oranının etkisiyle üçlü karışımlarda dayanım kaybı daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 5.11'de de görüldüğü gibi, D15+UK10 ve D20+UK10 aralığındaki numunelerde dayanım değerleri ölçülemediği görülmüştür.

5.2.5. Donma-Çözülme Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim

40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik KYH numunelerinin tekrarlı donma-çözülme döngüleri sonrası ağırlık değişimlerini değerlendirmek amacıyla bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, numuneler 90 gün süreyle şehir şebeke suyunda kür edilmiştir. Kür işlemi tamamlandıktan sonra, numunelerin DKY ağırlıkları ölçülmüştür. Ardından, numuneler 25 tekrarlı

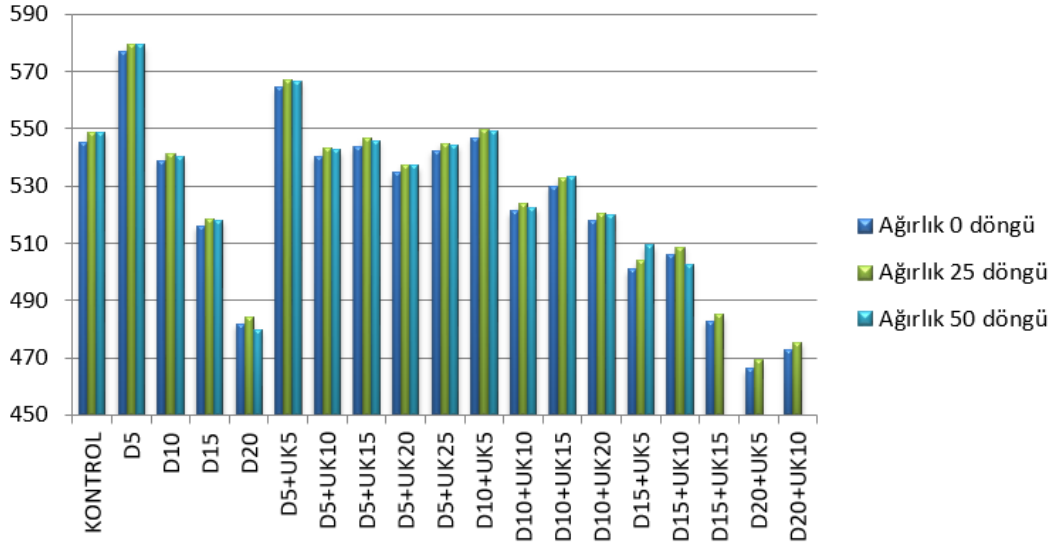
donma-çözülme döngüsüne tabi tutulmuş ve bu döngülerin ardından DKY ağırlıkları tekrar ölçülerek kaydedilmiştir. Bu işlem döngüler tekrar edilerek sürdürülmüş ve 50. döngü sonunda numunelerin DKY ağırlıkları bir kez daha ölçülmüştür. Elde edilen tüm veriler Tablo 5.7'de sunulmuştur.

Tablo 5.7. Tekrarlı donma-çözülme döngüleri sonrası numunelerin ağırlık değişimi

Karışım Adı	Donma-Çözülme		
	0 döngü	Ağırlık 25 döngü	50 döngü
KONTROL	545.50	548.95	548.95
D5	577.13	579.42	579.47
D10	538.94	541.38	540.45
D15	516.10	518.64	518.05
D20	481.77	484.15	479.97
D5+UK5	564.53	567.05	566.78
D5+UK10	540.39	543.28	542.71
D5+UK15	543.78	546.65	545.99
D5+UK20	534.81	537.54	537.14
D5+UK25	542.38	544.89	544.46
D10+UK5	547.00	549.81	549.42
D10+UK10	521.26	523.76	522.64
D10+UK15	529.96	532.66	533.41
D10+UK20	518.01	520.36	520.13
D15+UK5	500.89	504.0	509.48
D15+UK10	506.21	508.71	502.73
D15+UK15	482.83	485.12	-
D20+UK5	466.33	469.19	-
D20+UK10	472.93	475.37	-

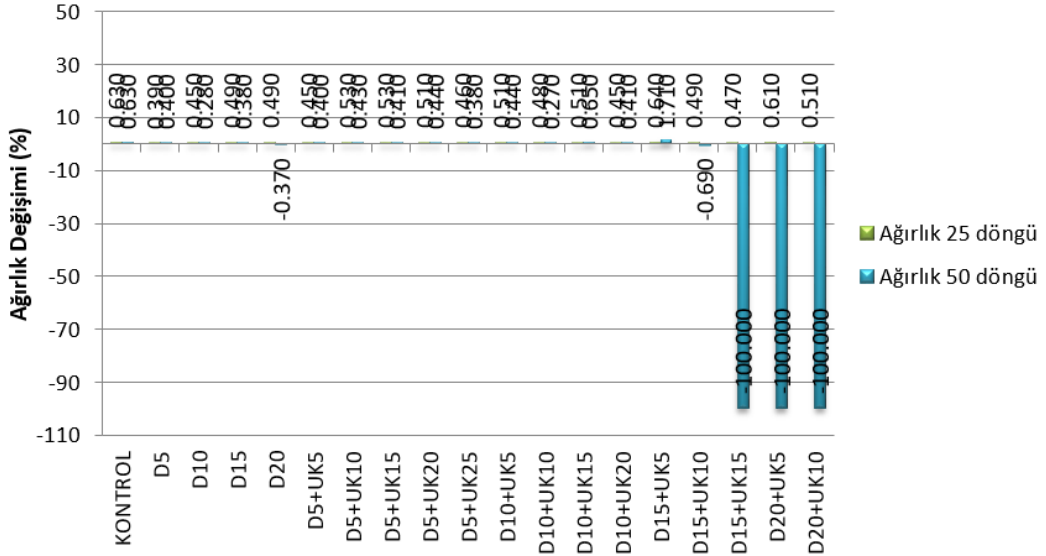
Tablo 5.7'deki veriler esas alınarak, numunelerin karışım oranlarına göre ağırlık değerlerindeki değişimi gösteren grafikler Şekil 5.12 ve 5.13'te sunulmuştur.

Donma-Çözülme



Şekil 5.12. Tekrarlı donma-çözülme döngüleri sonrası numunelerin ağırlık değişim grafiği

Donma-Çözülme



Şekil 5.13. Tekrarlı donma-çözülme döngüleri sonrası numunelerin ağırlık değişim yüzdeleri

Tablo 5.7'deki verilere göre, kontrol numunesi, 25 ve 50 döngü sonrasında %0.63 oranında kütle artışıyla donma-çözülme çevrimlerine karşı nispeten stabil bir performans göstermiştir.

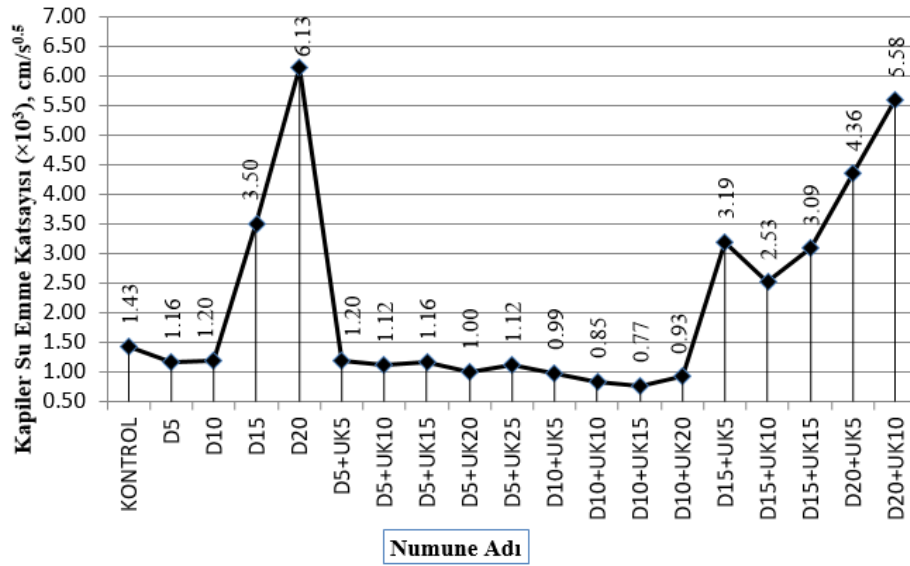
İkili karışımlar incelendiğinde, 25 döngü sonrasında ağırlık artış oranının en az olduğu numune, %0.39 ile D5 numunesidir. Diatomit oranının artışıyla birlikte ağırlık artışlarında bir yükselme gözlemlenmiştir. Örneğin, D10 numunesinde bu oran %0.45 iken, D15 ve D20 numunelerinde %0.49 seviyesine ulaşmıştır. Ancak 50 döngü sonrasındaki ağırlık artışları

incelendiğinde durum tam tersine dönmüş; D5 numunesi %0.40 oranında en yüksek ağırlık artışını gösterirken, D10 numunesinde bu oran %0.28, D15 numunesinde %0.38 olmuştur. D20 numunesinde ise %0.37 oranında ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. Bu durum, artan diatomit oranının uzun döngülerde kütle kaybını artırdığını ortaya koymaktadır.

Üçlü karışımlar arasında, 25 döngü sonrasında en yüksek ağırlık artış oranı, %0.64 ile D15+UK15 numunesinde gözlemlenmiştir. Buna en yakın değer ise %0.61 ile D20+UK5 numunesinde elde edilmiştir. Ancak, 50 döngü sonrası ağırlık değişimlerinde farklı bir tablo ortaya çıkmıştır. D15+UK5 numunesi, % 1.71 oranında ağırlık artışıyla tüm numuneler arasında en yüksek performansı sergilemiştir. Bununla birlikte, D15+UK10 numunesinde %0.69 oranında ağırlık kaybı gözlemlenmiş ve D15+UK15, D20+UK5, D20+UK10 numunelerinde ağırlık ölçümleri yapılamamıştır.

5.2.6. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite Deney Sonuçları

Kapiler su emme deneyi verileri, Denklem (4.8) yardımıyla hesaplanarak kapiler su emme katsayıları elde edilmiş ve bu değerler Şekil 5.14'te grafiksel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 5.14. Kapiler su emme katsayıları

Şekil 5.14'te görüldüğü gibi, ikili karışımlar arasında D5 ve D10 numunelerinin kapiler su emme katsayıları kontrol numunesinden daha düşük bulunmuştur. Kontrol numunesinin kapiler su emme katsayısı $1.43 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^{1/2}$ olarak ölçülmüşken, D5 ve D10 numunelerinde bu değer sırasıyla 1.16 ve 1.20 olarak tespit edilmiştir. Ancak, diatomitin gözenekli bir yapıya sahip olması nedeniyle, artan diatomit oranıyla birlikte kapiler su emme katsayısında belirgin artışlar

gözlemlenmiştir. Örneğin, D15 numunesinin kapiler su emme katsayısı 3.50, D20 numunesinin ise 6.13 olarak ölçülmüştür.

Üçlü karışımlar incelendiğinde, %5 ve %10 oranında diatomit içeren tüm üçlü karışımların kapiler su emme katsayılarının kontrol numunesinden daha düşük olduğu görülmüştür. Örneğin, D5+UK5, D5+UK10 ve D10+UK5 numunelerinde kapiler su emme katsayıları sırasıyla 1.20, 1.12 ve 0.99 olarak ölçülmüştür. Bu karışımlara eklenen UK oranının artışıyla kapiler su emme katsayısının daha da düştüğü tespit edilmiştir. D10+UK15 numunesinin kapiler su emme katsayısı 0.77 olarak belirlenmiş, bu da UK oranının artışının kapiler su emme özelliklerini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

Diatomit oranı %15 ve %20 olan üçlü karışımlarda da benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Örneğin, D15+UK5 numunesinin kapiler su emme katsayısı 3.19 olarak ölçülmüşken, aynı oranlarda diatomit içeren ancak daha yüksek UK oranlarına sahip D15+UK10 ve D15+UK15 numunelerinde bu değer sırasıyla 2.53 ve 3.09 olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde, %20 diatomit içeren üçlü karışımlardan D20+UK5 numunesinin kapiler su emme katsayısı 4.36 iken, D20+UK10 numunesinde bu değer 5.58'e yükselmiştir. Diatomit oranının artışı kapiler su emme katsayısını artırırken, UK oranının artışı bu katsayıyı düşürmüştür.

KYH numunelerinin etüv kurusunda, su içerisindeki ve doymun kuru yüzeyde ölçülen ağırlıklarına ilişkin veriler Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8. KYH numunelerinin etüv kurusu, su içerisindeki ve doymun kuru yüzey ağırlıkları

KARIŞIM ADI	Etüv Kurusu Ağırlık (W₁, gr)	Su İçindeki Ağırlık (W₂, gr)	DKY Ağırlık (W₃, gr)
KONTROL	257.66	156.94	274.56
D5	255.62	154.52	274.62
D10	241.77	145.98	266.03
D15	218.64	130.34	248.71
D20	191.44	113.91	229.11
D5+UK5	256.06	151.70	272.19
D5+UK10	255.68	147.66	271.47
D5+UK15	244.81	141.37	261.56
D5+UK20	233.99	131.60	248.97
D5+UK25	241.07	135.15	258.80
D10+UK5	243.16	142.32	262.74
D10+UK10	234.65	134.73	255.63
D10+UK15	233.98	133.13	253.47
D10+UK20	233.57	134.29	256.61
D15+UK5	223.45	133.47	250.96
D15+UK10	214.01	129.41	248.18
D15+UK15	218.94	128.81	248.07
D20+UK5	199.00	117.71	232.10
D20+UK10	196.59	116.10	232.99

Tablo 5.8'deki verilere dayanarak, Denklem (4.4), (4.5), (4.6) ve (4.7) yardımıyla KYH numunelerinin yoğunluk, toplam su emme kapasitesi (%) ve porozite (%) değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların sonuçları Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da sunulmuştur.

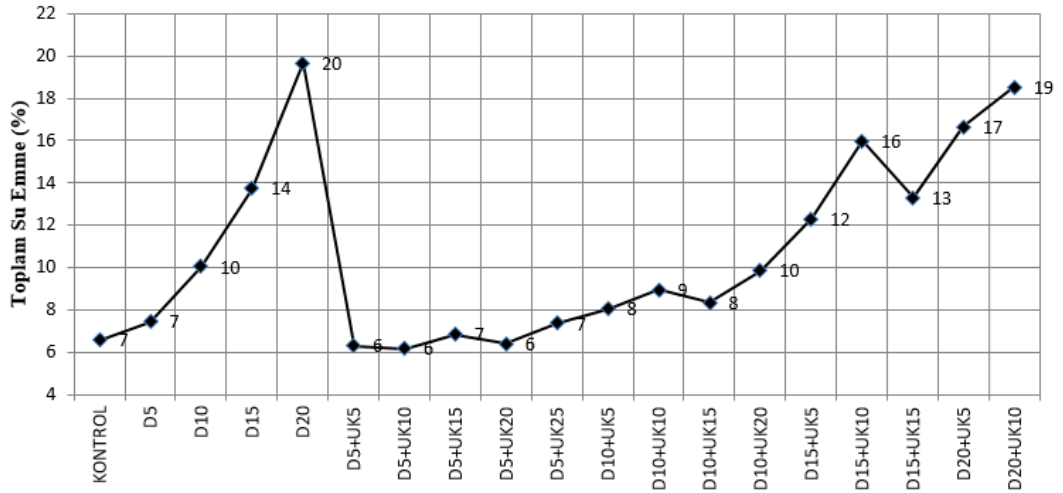
Tablo 5.9. 50x50x50 mm'lik küp numunelerin yoğunlukları

KARIŞIM ADI	DKY Yoğunluk (gr/cm³)	Görünür Yoğunluk (gr/cm³)
KONTROL	2.33	2.56
D5	2.29	2.53
D10	2.22	2.52
D15	2.10	2.48
D20	1.99	2.47
D5+UK5	2.26	2.45
D5+UK10	2.19	2.37
D5+UK15	2.18	2.37
D5+UK20	2.12	2.29
D5+UK25	2.09	2.28
D10+UK5	2.18	2.41
D10+UK10	2.11	2.35
D10+UK15	2.11	2.32
D10+UK20	2.10	2.35
D15+UK5	2.14	2.48
D15+UK10	2.09	2.53
D15+UK15	2.08	2.43
D20+UK5	2.03	2.45
D20+UK10	1.99	2.44

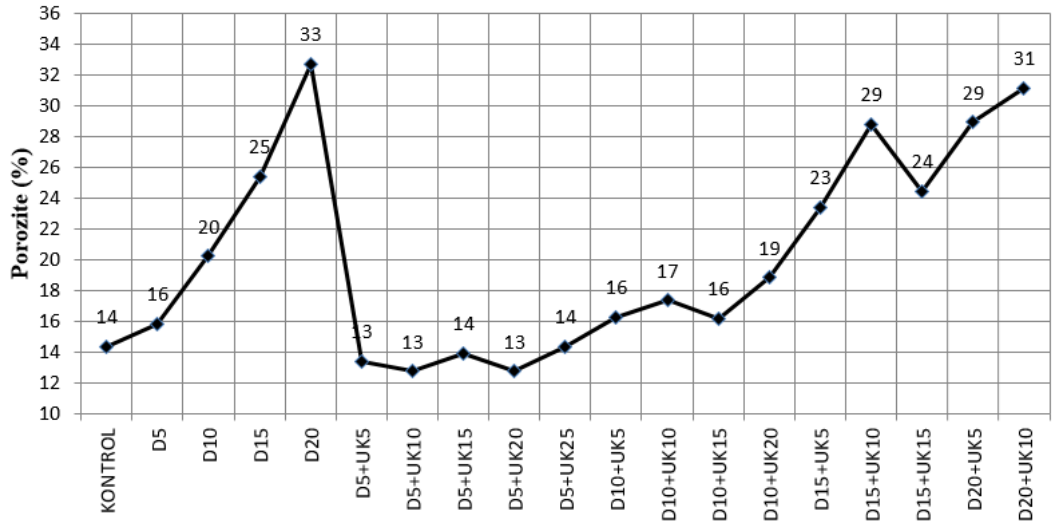
Tablo 5.10. 50x50x50 mm boyutlu küp numunelerin toplam su emme kapasitesi ve porozite değerleri

KARIŞIM ADI	Toplam Su Emme Kapasitesi (%)	Porozite (%)
KONTROL	6.56	14.37
D5	7.43	15.82
D10	10.04	20.21
D15	13.75	25.40
D20	19.67	32.69
D5+UK5	6.30	13.39
D5+UK10	6.17	12.75
D5+UK15	6.84	13.94
D5+UK20	6.40	12.77
D5+UK25	7.36	14.34
D10+UK5	8.05	16.26
D10+UK10	8.94	17.36
D10+UK15	8.33	16.19
D10+UK20	9.87	18.84
D15+UK5	12.31	23.41
D15+UK10	15.97	28.77
D15+UK15	13.30	24.42
D20+UK5	16.64	28.94
D20+UK10	18.52	31.14

Tablo 5.10'daki verilere dayanarak, KYH numunelerinin toplam su emme ve porozite değerlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da sunulmuştur.



Şekil 5.15. Toplam su emme kapasitesi değişimleri



Şekil 5.16. Porozite değişimleri

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'deki grafikler incelendiğinde, tüm ikili karışımların kontrol numunesine kıyasla daha yüksek su emme ve porozite değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, diatomit içeriğinin artışıyla su emme ve porozite özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

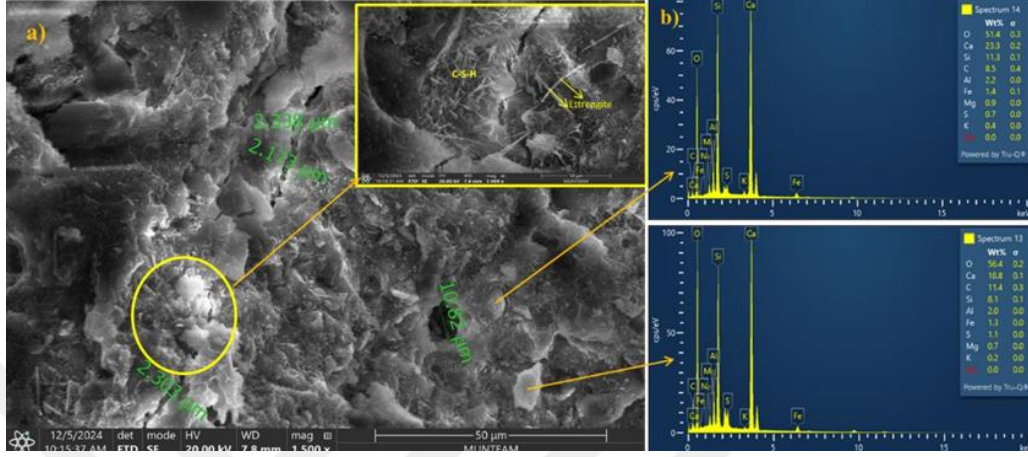
Üçlü karışımlar incelendiğinde, belirli oranlarda UK eklenmesinin, aynı diatomit oranına sahip ikili karışımlara kıyasla toplam su emme ve porozite değerlerinde iyileşmeler sağladığı görülmüştür. Özellikle, D5+UK5, D5+UK10 ve D5+UK20 numunelerinde toplam su emme ve porozite değerlerinin kontrol numunesinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, UK katkısının, karışımın gözeneklilik yapısını düzenleyerek su emme ve porozite özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

5.2.7. Faz Analizi

SEM/EDS mikroyapı analizleri, sülfat etkisi öncesi ve sonrası D20 ile D20UK10 numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.17a ve 5.17b, sülfat etkisine maruz kalmamış D20 numunesine ait SEM/EDS görüntülerini içermektedir. Şekil 5.17a'nın 5000x büyütme ile incelenmesinde, numunede C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jelleri ile birlikte mikroskobik düzeyde çatlak oluşumları tespit edilmiştir. Hidratasyon sürecinde gelişen bu C-S-H jelleri, bağlayıcılık özelliği kazandırarak harcın mekanik dayanımına doğrudan katkı sağlamaktadır [81].

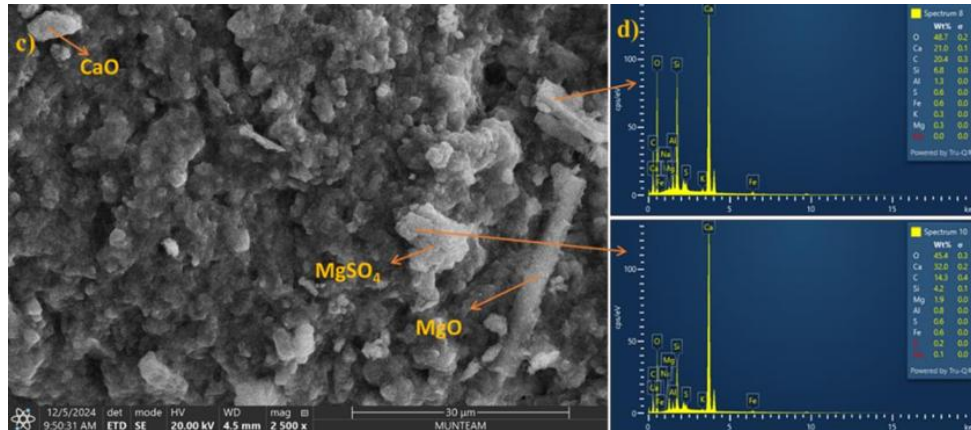
Yapılan mikroyapısal incelemelerde gözlemlenen çatlak genişlikleri sırasıyla 2.338 μm , 2.175 μm ve 2.308 μm olarak ölçülmüş; ayrıca 10.82 μm çapında bir boşluk alanı tespit edilmiştir. Erken yaş hidrasyonu esnasında oluşan, karakteristik iğne benzeri morfolojiye sahip etrenjit kristalleri de belirlenmiştir. Şekil 5.17b'de sunulan EDS analizinde, Spectrum 13 ve Spectrum 14 bölgelerinden elde edilen verilere göre elementlerin ağırlık yüzdeleri hesaplanmıştır. Spectrum 13'te yüksek oranda O (%56.4), C (%11.4), Ca

(%18.8) ve Si (%8.1) saptanmış olup; ayrıca Al, Fe, S, Mg ve K elementleri de düşük oranlarda tespit edilmiştir. Bu element dağılımı, C-S-H fazına işaret eden tipik O, Ca ve Si yoğunluklarını doğrulamakta ve analiz sonuçları ile uyumluluk göstermektedir.



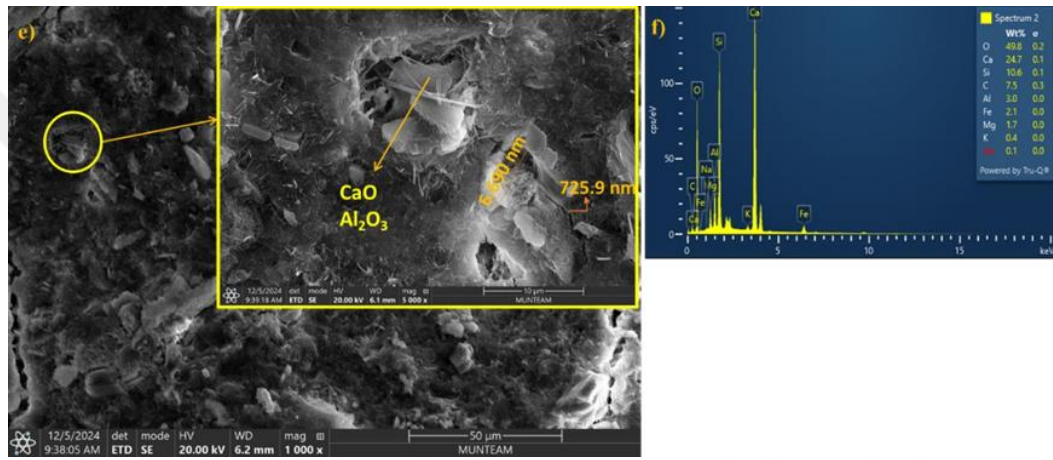
Şekil 5.17. D20 numunesinin sülfat saldırısından önce a) SEM ve b) EDS görüntüleri

Şekil 5.18c ve 5.18d'de, farklı morfolojik yapılar sahip CaO ve MgO partiküllerinin yanı sıra MgSO₄ varlığına dair bulgular yer almaktadır. Spectrum 8 analizinde; Ca (%21.0), C (%20.4), O (%48.7) ve Si (%6.8) gibi ana elementlerin yanı sıra, eser miktarda Mg, S, K, Fe ve Al da tespit edilmiştir. Özellikle Mg ve S'nin birlikte bulunması, MgSO₄ oluşumunun göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Bu bölgedeki mikroyapısal bütünlük ve çatlak oluşumunun gözlemlenmemesi, ilgili numunenin dayanım performansı ile doğrudan ilişkilendirilmiştir [82]. Spectrum 10 analizinde ise yüksek Ca (%32.0) içeriği, C (%14.3), O (%45.4) ve Si (%4.2) ile birlikte CaO varlığına işaret etmektedir.



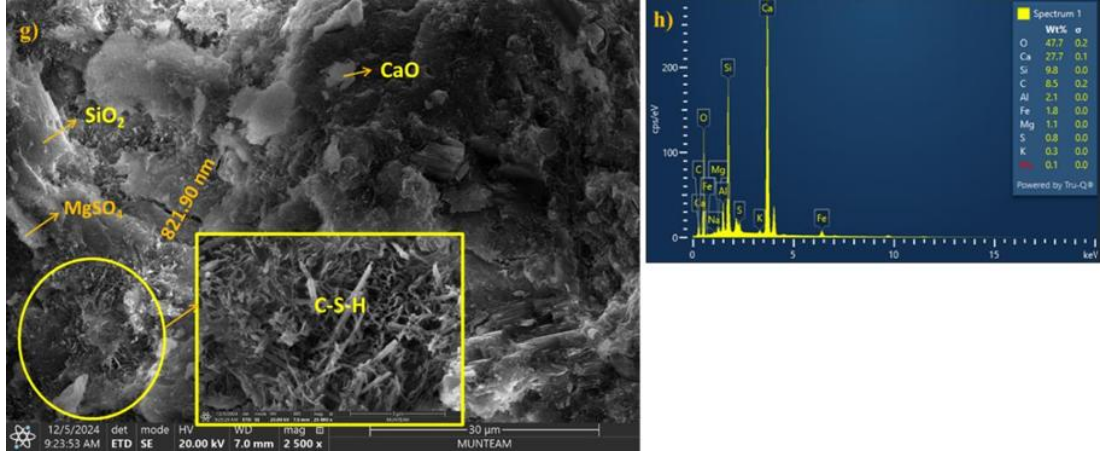
Şekil 5.18. D20 numunesinin sülfat saldırısından sonra c) SEM ve d) EDS görüntüleri

İlgili illüstrasyon, 1000x büyütmede genel mikroyapıyı, 5000x büyütmede ise daha yoğun ve kompakt bir yapı örüntüsünü ortaya koymaktadır. Şekil 5.19e’de büyütülen alanda CaO ve Al₂O₃ kristallerine ait morfolojik ayrımlar net şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 5.19f’ye ait EDS analizinde; O (%49.8), Si (%10.6), Ca (%24.7), Al (%3.0), C (%7.5), Fe (%2.1), Mg ve K (%1.7) oranlarında element dağılımları tespit edilmiştir. Özellikle yüksek Si ve Al oranları, UK katkısının kimyasal etkisini desteklemekte; yüksek Ca oranı ise C-S-H fazlarının varlığını işaret ederek çimentolu matrisin hidratasyon kapasitesini teyit etmektedir. Bu veriler, mineral katkı içeriğinin silikat ve alüminat yönünden zengin olduğunu doğrular niteliktedir.



Şekil 5.19. D20UK10 numunesinin sülfat saldırısından önce e) SEM ve f) EDS görüntüleri

Şekil 5.20g’de, %20 diatomit ve %10 uçucu kül içeren, sülfat etkisine maruz bırakılmış numuneye ait SEM görüntüsü yer almaktadır. Görüntüde CaO, SiO₂ ve MgSO₄ fazları açıkça seçilebilmektedir. Mg ve S elementlerinin eş zamanlı varlığı, MgSO₄ tuzlarının yapıya entegre olduğunu ve bu durumun magnezyum sülfat etkisini doğruladığını göstermektedir. MgSO₄ kristallerinin karakteristik morfolojisi ve yapıda tespit edilen magnezyum yoğunluğu, sülfat etkisinin mikroyapısal düzeyde gözlemlendiğini desteklemektedir. Ayrıca, sülfat reaksiyonu sonucu oluşan 821.90 nm genişliğindeki çatlak, hasarın mikroskobik boyutta geliştiğini ortaya koymaktadır. Şekil 5.20h’de yer alan EDS analizine göre, D20F10 numunesinde O, Ca, Si, C, Al, Fe, Mg ve S elementlerinin ağırlık oranları sırasıyla %47.7, %27.1, %9.8, %3.7, %2.5, %1.8, %1.1 ve %0.9 olarak belirlenmiştir. Bu veriler, C-S-H fazının belirgin biçimde geliştiğini ve katkı maddelerinin sülfat etkisi altında hidratasyon süreçlerini destekleyerek bağlayıcılık özelliğini koruduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.20. D20UK10 numunesinin sülfat saldırısından sonra e) SEM ve f) EDS görüntüleri

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, KYH numunelerinin çeşitli mekanik, dayanıklılık ve işlenebilirlik özelliklerini incelemek amacıyla belirli oranlarda diatomit ve uçucu kül katkıları çimento ikamesi olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, işlenebilirlik ve kıvam özelliklerini değerlendirmek için mini çökme-yayıma ve viskozimetre deneyleri uygulanmış; mekanik özelliklerin tespiti için eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tüm karışımlara ait numunelerde kapiler su emme, toplam su emme ve porozite değerleri hesaplanmıştır.

- Tüm karışımların mini çökme-yayıma testi sonuçlarının, EFNARC (2002) tarafından belirlenen uygun değer aralıklarında olduğu tespit edilmiştir.
- İkili karışımlarda diatomit oranının artmasıyla birlikte başlangıç viskozite değerlerinde azalma meydana geldiği ve bu etkinin düşük açılma hızları (1-10 Rpm) aralığında daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Yüksek diatomit oranına sahip karışımların (D10, D15, D20) kontrol numunesine kıyasla daha akışkan bir yapı sergilediği görülmüştür. Açılma hız oranının artmasıyla, tüm numunelerin viskozite değerlerinin kontrol numunesine yakınsama eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, uçucu kül ve diatomit oranlarının artışı başlangıçta viskoziteyi düşürmüştü, ancak açılma hız arttıkça bu farkların azaldığı gözlemlenmiştir.
- 3 günlük kür süresi sonucunda %5 diatomit içeren D5 numunesi kontrol numunesine kıyasla %11.6 oranında daha yüksek bir dayanım göstererek tüm numuneler arasında en yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. Bununla birlikte, diatomit oranının artmasıyla dayanım değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Üçlü karışımlarda, en yüksek basınç dayanımı D5+UK5 numunesinde tespit edilmiştir. Ancak, diatomit oranının tüm seviyelerinde (%5, %10, %15, %20), UK oranının artışıyla dayanım değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.
- 28 günlük kür süresi sonunda, en yüksek basınç dayanımı kontrol numunesinde elde edilmiştir. %5 diatomit içeren D5 numunesi, kontrol numunesine %13.8 farkla en yakın basınç dayanımını göstermiştir. İkili karışımlarda, diatomit oranının artmasıyla basınç dayanımının belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Üçlü karışımlar arasında ise en yüksek dayanım değeri, D5+UK5 numunesinde gözlemlenmiş olup bu değer kontrol numunesine kıyasla %16.5 daha düşük bulunmuştur.
- 90 günlük kür süresi sonunda en yüksek basınç dayanımı kontrol numunesinde elde edilmiştir. İkili karışımlar arasında, %5 diatomit içeren D5 numunesi, kontrol numunesine en yakın performansı sergilemiş ancak dayanım değeri %10.6 oranında daha düşük bulunmuştur. Diatomit oranının artışıyla dayanım değerlerinde belirgin

bir azalma gözlemlenmiş, %20 diatomit içeren D20 numunesinde bu fark %52.2'ye ulaşmıştır. Üçlü karışımlar incelendiğinde, en iyi performans D5+UK5 numunesinde elde edilmiş ancak bu değer, kontrol numunesine kıyasla %13.3 oranında daha düşük kalmıştır. Bununla birlikte, UK oranının artmasıyla dayanım değerlerinde daha fazla azalma meydana gelmiş ve D5+UK25 numunesinde bu fark %41.4 seviyesine ulaşmıştır.

- Portland çimentosunun %5 diatomit veya %5 diatomit ve %5 UK oranlarında ikame edilmesi durumunda, nihai basınç ve eğilme dayanımlarının kontrol numunesine yakın değerler sergilediği gözlemlenmiştir.
- 180 gün boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde, en yüksek dayanımın kontrol numunesine ait olduğu tespit edilmiştir. Kontrol numunesine en yakın dayanımı, %2.1 oranında azalma ile D5+UK5 numunesi göstermiştir. İkili karışımlar arasında ise, %5 diatomit içeren D5 numunesi en yüksek dayanımı sergilemiş olup, bu değer kontrol numunesine göre %10.7 oranında daha düşüktür.
- 180 gün boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, en yüksek dayanımın kontrol numunesine ait olduğu tespit edilmiştir. Kontrol numunesine en yakın dayanımı, %13.6 oranında azalma ile D5+UK5 numunesi göstermiştir. İkili karışımlar arasında ise, %5 diatomit içeren D5 numunesi en yüksek dayanımı sergilemiş olup, bu değer kontrol numunesine göre %16.7 oranında daha düşüktür.
- 180 gün boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin ağırlık artışları incelendiğinde, tüm numuneler arasında en düşük ağırlık artışı, %1,16 ile D15 numunesinde gözlemlenmiştir. Bu değere en yakın sonuçlar, %1,12 ile D10 numunesinde ve %1,21 ile D10+UK5 numunesinde elde edilmiştir. Kontrol numunesi, %2,21 ağırlık artışı ile diğer numunelerin büyük bir kısmından daha yüksek bir performans sergilemiştir.
- Portland çimentosunun %5 diatomit ve %5 UK oranlarında ikame edilmesi durumunda, sülfat atağına karşı kontrol numunesine yakın değerler sergilediği gözlemlenmiştir.
- CaO ve MgO gibi oksit fazlarının mevcudiyeti, bağlayıcının daha yoğun ve kompakt bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. $MgSO_4$ gibi tuz bileşikleri ise mikroyapıdaki boşlukları doldurarak mikrogözenekliliği azaltıcı bir etki sağlamaktadır. SEM/EDS analizleri, mineral katkıların sülfat saldırısının şiddetini azaltarak mekanik dayanım kaybını sınırladığını ortaya koymuştur. Sülfat iyonlarının matrise nüfuzu sonucu

etrenjit ve jips oluşumu gözlenirse de, çatlak gelişiminin sınırlı kalması, bu yapıların sülfata karşı etkin bir direnç sergilediğini göstermektedir.

- Donma-çözülme döngüleri sonrasında, kontrol numunesi tüm numuneler arasında en yüksek eğilme dayanımını göstermiştir. İkili karışımlar arasında, %5 diatomit içeren D5 numunesi en yüksek performansı sergilemiş, ancak bu değer kontrol numunesine kıyasla %22.6 oranında daha düşük bulunmuştur. Diatomit oranının artışıyla ikili karışımlarda dayanım değerlerinde belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Üçlü karışımlar incelendiğinde, en iyi performans D5+UK5 numunesinden elde edilmiş ve bu numunenin dayanım değeri kontrol numunesine göre yalnızca %7,4 daha düşük bulunmuştur. Ancak, artan UK oranı ile dayanım değerlerinde azalmalar kaydedilmiştir; örneğin, D5+UK25 numunesi kontrol numunesine kıyasla %38,1 oranında daha düşük bir performans sergilemiştir. Diatomit oranının yüksek olduğu üçlü karışımlarda dayanım kaybı daha belirgin hale gelmiş, D15+UK15, D20+UK5 ve D20+UK10 numunelerinde dayanım değerleri ölçülememiştir.
- Donma-çözülme döngüleri sonrasında, D5 numunesi tüm numuneler arasında en yüksek eğilme dayanımını göstermiş olup, bu değer kontrol numunesine kıyasla %2,8 oranında daha yüksektir. Bununla birlikte, diatomit oranının artışıyla ikili karışımlarda dayanım değerlerinde belirgin azalmalar kaydedilmiştir. Üçlü karışımlar incelendiğinde, en iyi performans D5+UK5 numunesinden elde edilmiş ve bu numunenin dayanım değeri kontrol numunesinden %2,2 oranında daha yüksek bulunmuştur. Ancak, artan UK oranı ile dayanım değerlerinde düşüş yaşanmış; örneğin, D5+UK25 numunesi kontrol numunesine kıyasla %32,4 oranında daha düşük bir performans sergilemiştir. Diatomit oranının yüksek olduğu üçlü karışımlarda dayanım kaybı daha belirgin hale gelmiş ve D15+UK10 ile D20+UK10 aralığındaki numunelerde dayanım değerleri ölçülememiştir.
- Donma-çözülme döngüleri sonrasında, ikili karışımların kontrol numunesine kıyasla daha düşük ağırlık değişimleri gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak Diatomit oranının artışıyla, özellikle yüksek gözeneklilik nedeniyle uzun döngülerde kütle kaybının arttığı tespit edilmiştir. Örneğin, D20 numunesinde %0,37 oranında ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Bu, diatomitin gözenekli yapısının su emmeye yatkın olduğu ancak donma sırasında oluşan iç gerilimler nedeniyle parçalanma riskinin arttığını göstermektedir. Üçlü karışımlarda, yüksek diatomit ve UK oranlarına sahip numunelerde dayanıklılık düşüşü daha belirgin olmuş, D15+UK10 ve D20+UK10 aralığındaki numunelerde ağırlık kayıpları gözlemlenmiş ve bazı numunelerde ölçüm yapılamamıştır.

- Portland çimentosunun %5 diatomit veya %5 diatomit ve %5 UK ile ikame edilmesi, donma-çözülme döngülerine karşı kontrol numunesine yakın hatta bazı durumlarda daha üstün performans sergilediğini göstermiştir.
- KYH numunelerinin kapiler su emme katsayıları incelendiğinde, ikili karışımlarda D5 ve D10 numunelerinin kontrol numunesine kıyasla daha düşük kapiler su emme katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak diatomitin gözenekli yapısı nedeniyle, diatomit oranının artışıyla birlikte kapiler su emme katsayısının belirgin bir şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle D20 numunesinde en yüksek kapiler su emme katsayısının elde edilmesiyle net bir şekilde ortaya konmuştur. Üçlü karışımlar incelendiğinde ise aynı oranda diatomit içeren ikili karışımlara kıyasla, UK ikamesinin kapiler su emme katsayısını iyileştirerek daha olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir.
- Diatomit içeren tüm ikili karışımların, kontrol numunesine kıyasla daha yüksek su emme ve porozite değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, diatomit içeriğinin artışıyla malzemenin gözeneklilik yapısının su emme ve porozite özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Üçlü karışımlar incelendiğinde ise belirli oranlarda UK eklenmesinin, aynı diatomit oranına sahip ikili karışımlara kıyasla toplam su emme ve porozite değerlerinde iyileşmeler sağladığı belirlenmiştir. Özellikle D5+UK5, D5+UK10 ve D5+UK20 numunelerinde toplam su emme ve porozite değerlerinin kontrol numunesinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, UK katkısının karışımın gözenek yapısını düzenleyerek su emme ve porozite özelliklerini olumlu yönde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] G. De Schutter, P.J.M. Bartos, P. Domone, J. Gibbs, Self-Compacting Concrete, N.D.
- [2] T.R. Surya, M. Prakash, K.S. Satyanarayanan, A.K. Celestine, N. Parthasarathi, Compressive Strength Of Self Compacting Concrete Under Elevated Temperature, *Mater. Today Proc.* 40 (2020) S83–S87. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.746>.
- [3] T.H.E. Mechanical, P. Of, S. Compacting, The Mechanical Properties Of Self Compacting, (N.D.).
- [4] M. Okamura, H; Ouchi, Self Compacting Concrete - Research Paper, *J. Adv. Concr. Technol.* 1 (2003) 5–15.
- [5] M. Karatas, A. Benli, F. Arslan, The Effects Of Kaolin And Calcined Kaolin On The Durability And Mechanical Properties Of Self-Compacting Mortars Subjected To High Temperatures, *Constr. Build. Mater.* 265 (2020) 120300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120300>.
- [6] C.I. Goodier, Institutional Repository Development Of Self-Compacting Concrete, (2015).
- [7] S. Assié, G. Escadeillas, V. Waller, Estimates Of Self-Compacting Concrete “Potential” Durability, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1909–1917. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.034>.
- [8] M. Şahmaran, H.A. Christianto, I.Ö. Yaman, The Effect Of Chemical Admixtures And Mineral Additives On The Properties Of Self-Compacting Mortars, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 432–440. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003>.
- [9] B.A. Tayeh, H.M. Hamada, I. Almeshal, B.H.A. Bakar, Durability And Mechanical Properties Of Cement Concrete Comprising Pozzolanic Materials With Alkali-Activated Binder: A Comprehensive Review, *Case Stud. Constr. Mater.* 17 (2022) E01429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.E01429>.
- [10] Z. Lv, A. Jiang, J. Jin, Influence Of Ultrafine Diatomite On Cracking Behavior Of Concrete: An Acoustic Emission Analysis, *Constr. Build. Mater.* 308 (2021) 124993. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124993>.
- [11] M. Çetin, B. Taş, C.Y. Ordu, Biyolojik Orijinli Tek Doğal Mineral Diatomit, (2012) 28–46.
- [12] M. Uysal, S. Üniversitesi, M. Fakültesi, İ.M. Bölümü, The Investigation Of Mineral Additive Concretes On The Behavior Of Freezing-Thawing Cycles, (N.D.).
- [13] T. Kaya, S. Yazıcıoğlu, A.E. Çerçevik, Kaplamalı Beton Basınç Dayanımına Donmaçözülmenietkisi, *Mühendislik Bilim. Ve Tasarım Derg.* 4 (2016) 59. <https://doi.org/10.21923/jesd.12497>.
- [14] H. Gou, M. Sofi, Z. Zhang, H. Zhu, M. Zhu, P. Mendis, Durability Development Of Lightweight And High-Strength Engineered Cementitious Composites Subject To Combined Sulfate–Chloride Attack Under Freeze–Thaw Cycles, *Constr. Build. Mater.* 408 (2023) 133659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133659>.
- [15] S. Saraç, M. Karatas, A. Benli, The Effect Of Dunit Powder And Silica Fume On The Viscosity, Physico-Mechanical Properties And Sulphate Resistance Of Self-Compacting Mortars, *Constr. Build. Mater.* 375 (2023) 130970. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130970>.
- [16] M. Dener, M. Karatas, M. Mohabbi, Sulfate Resistance Of Alkali-Activated Slag/Portland Cement Mortar Produced With Lightweight Pumice Aggregate, *Constr. Build. Mater.* 304 (2021) 124671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124671>.
- [17] B. Yilmaz, N. Ediz, The Use Of Raw And Calcined Diatomite İn Cement Production, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.003>.
- [18] C. Li, G. Li, D. Chen, K. Gao, Y. Cao, Y. Zhou, Y. Mao, S. Fan, L. Tang, H. Jia, The Effects Of Diatomite As An Additive On The Macroscopic Properties And Microstructure Of Concrete, *Materials (Basel)*. 16 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16051833>.
- [19] D. Taoukil, Y. El Meski, M. Lhassane Lahlaoui, R. Djedjig, A. El Bouardi, Effect Of The Use Of Diatomite As Partial Replacement Of Sand On Thermal And Mechanical Properties Of Mortars, *J. Build. Eng.* 42 (2021) 103038. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103038>.

- [20] Z. Ahmadi, J. Esmaeili, J. Kasaei, R. Hajjalioghli, Properties Of Sustainable Cement Mortars Containing High Volume Of Raw Diatomite, *Sustain. Mater. Technol.* 16 (2018) 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.05.001>.
- [21] P. Posi, S. Lertnimooolchai, V. Sata, P. Chindaprasirt, Pressed Lightweight Concrete Containing Calcined Diatomite Aggregate, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 896–901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.094>.
- [22] E. Türk, Y.L. Tezi, Öğütülmüş Bazalt İle Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Durabilite Özellikleri, (2022).
- [23] H. An, L. Tezi, Öğütülmüş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Yüksek Sıcaklık Direnci, (2020).
- [24] E. Türk, M. Karataş, M. Dener, Rheological, Mechanical And Durability Properties Of Self-Compacting Mortars Containing Basalt Powder And Silica Fume, *Constr. Build. Mater.* 356 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129229>.
- [25] J. Jin, Properties Of Mortar For Self-Compacting Concrete, Phd Thesis, Dep. Civ. Environ. Eng. Univ. Coll. London (2002) 398.
- [26] P. Ramanathan, I. Baskar, P. Muthupriya, R. Venkatasubramani, Performance Of Self-Compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures, *Ksce J. Civ. Eng.* 17 (2013) 465–472. <https://doi.org/10.1007/S12205-013-1882-8>.
- [27] S. Compacting, C. Applications, I.N.T.H.E. World, Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları, (N.D.) 428–438.
- [28] K.E. Alyamaç, R. İnce, Investigation Of Self-Compacting Concrete By The Size Effect Fracture Model, *Concrete* (2010) 27–30.
- [29] İ. Gökalp, A. Ördek, M. Özen, H. Ekim, Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları, (2008) 428–438.
- [30] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Theoretical Concepts Of Stress Wave Propagation In Solids*, 2001.
- [31] K.W. Day, *Properties Of Concrete*, 2021. <https://doi.org/10.4324/9780203967874-11>.
- [32] Ellitan, Beton Yol İnşaatında Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanılması Üzere Bir Arastırma, *Экономика Региона* 19 (2009) 19.
- [33] E. Çiçekliyurt, Köprü Ve Tünel Güçlendirme İnşaatlarında Kyb Kullanımı, (1999) 417–426.
- [34] S.E.E. Profile, Kendiliğinden Yerleşen Betonların Üretimi Ve Son Yıllardaki Gelişimi, (2023).
- [35] Ermco Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Avrupa Kılavuzu, (N.D.).
- [36] Topçu İ.B., Bilir T., H. Baylavlı, Properties Of Self Compacted Concrete, *Eng&Arch.Fac. Eskişehir Osmangazi Univ. Xxı* (2008) 1–21.
- [37] Efnarc, The European Guidelines For Self-Compacting Concrete, *Eur. Guidel. Self Compact. Concr.* (2005) 63. <http://www.efnarc.org/pdf/sccguidelinesmay2005.pdf>.
- [38] S. Yayın, *Türk Standardı*, (2005) 28–30.
- [39] M.Ş. Yön, F. Arslan, M. Karatas, A. Benli, High-Temperature And Abrasion Resistance Of Self-Compacting Mortars Incorporating Binary And Ternary Blends Of Silica Fume And Slag, *Constr. Build. Mater.* 355 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129244>.
- [40] M. Sari, E. Prat, J.F. Labastire, High Strength Self-Compacting Concrete Original Solutions Associating Organic And İnorganic Admixtures, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 813–818. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00037-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00037-X).
- [41] M. Tokyay, *Cement And Concrete Mineral Admixtures*, 2016. <https://doi.org/10.1201/B20093>.
- [42] R. Siddique, *Waste Materials And By-Products İn Concrete*, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74294-4>.
- [43] G. Ayim-Mensah, M. Radosavljevic, Influence Of Ground Granulated Blast Furnace Slag On The Compressive Strength And Ductility Of Ultra High-Performance Fibre Reinforced Cementitious

- Composites, Cement 8 (2022) 100030. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100030>.
- [44] J. Justice, K. Kurtis, Influence Of Metakaolin Surface Area On Properties Of Cement-Based Materials, *J. Mater. Civ. Eng. - J Mater Civ. Eng* 19 (2007). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2007\)19:9\(762\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:9(762)).
- [45] S. Wild, J.M. Khatib, Pergamon P11 Soos-8846(96)00187-L Portlandite Consumption In Metakaolin Cement Pastes And Mortars, *Cem. End Concr. Res.* 27 (1997) 137–146.
- [46] C. Druta, Thesis : Tensile Strength And Bonding Characteristics Of Self-Compacting Concrete, (2003).
- [47] K. Scrivener, A. Capmas, Lea's Chemistry Of Cement And Concrete, Calcium Aluminate Cem. (2004) 713–782.
- [48] A. Palomo, M.W. Grutzeck, M. Blanco-Varela, Alkali-Activated Fly Ashes - A Cement For The Future, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1323–1329.
- [49] B. Kumar, L. Sengupta, M. Lr, Influence Of Ground Granulated Blast Furnace Slag On Properties Of Concrete Paement, 07 (2019) 25. <https://doi.org/10.15623/ijret.2018.0713004>.
- [50] A. Ergün, Effects Of The Usage Of Diatomite And Waste Marble Powder As Partial Replacement Of Cement On The Mechanical Properties Of Concrete, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 806–812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002>.
- [51] G. Özbey, N. Atamer, Kizelgur (Diatomit) Hakkında Bazı Bilgiler, (1987) 493–502.
- [52] O. Ersoy, M. Rençberoğlu, D. Karapınar Güler, Ö.F. Özkaya, A Novel Flux That Determines The Physico-Chemical Properties Of Calcined Diatomite In Its Industrial Use As A Filler And Filter Aid: Thenardite (Na₂so₄), *Crystals* 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/cryst12040503>.
- [53] Ş. Temel, Diatomit, Sepiyolit Ve Mikalı Kum'un Kuru Zenginleştirilmesi, İstanbul Tek. Üniv. Fen Bilim. Enstitüsü. (2014).
- [54] P. Moyle, T. Dolley, Chapter E: History And Overview Of The U.S. Diatomite Mining Industry, With Emphasis On The Western United States, (2003).
- [55] İ. Bentli, Kütahya-Alayunt Diyatomit Cevherinin Zenginleştirilebilirliğinin Araştırılması, (2001).
- [56] M. Çetin, B. Taş, C.Y. Ordu, Biyolojorijinli Tek Doğalmineral Diyatomit A Natural Mineral With Biological Origin : Diatomite, (2012) 28–46.
- [57] S.É. Ivanov, A. V. Belyakov, Diatomite And Its Applications, *Glas. Ceram. (English Transl. Steklo İ Keramika)* 65 (2008) 48–51. <https://doi.org/10.1007/S10717-008-9005-6>.
- [58] N. Sharma, P. Sharma, S. Kr Verma, Influence Of Diatomite On The Properties Of Mortar And Concrete: A Review, *Iop Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1116 (2021) 012174. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1116/1/012174>.
- [59] Sedat Karaman, Bahattin Oztoprak, Can Burak Sisman, Usage Possibilities Of Diatomite In The Concrete Production For Agricultural Buildings, *J. Basic Appl. Sci.* 11 (2015) 31–38. <https://doi.org/10.6000/1927-5129.2015.11.05>.
- [60] A.H. Uygun, Diatomit Jeolojisi Ve Yararlanma Olanakları, *Bilim. Madencilik Derg.* 15 (1976) 31–38.
- [61] M.T. Ve Arama Enstitüsü, Türkiye Diyatomit Envanteri, Maden Tetkik Ve Arama Enstitüsü, 1968. <https://books.google.com.tr/books?id=7do9maeacaaj>.
- [62] J. Kurumu, A. Piyosen, Hırka (Kayseri) Diyatomit Yatağının Jeokimyası Ve Oluşumu, (1976) 127–132.
- [63] F. Fak, F.B. Dergisi, O. May, S. Fen, E. Fak, F.E. Fak, Seasonal Changes Of Epipellic (Aksaray-Ihlara) Diatoms Of Melendiz Stream, (2006) 1–12.
- [64] H.Y. Aruntaş, M. Albayrak, H.A. Saka, M. Tokyay, Investigation Of Diatomite Properties From Ankara-Kızılcahamam And Çankırı-Çerkeş Regions, *Turkish J. Eng. Environ. Sci.* 22 (1998) 337–344. <http://journals.tubitak.gov.tr/engineering/abstract.htm?id=2312>.
- [65] İ. Bentli, Kütahya-Alayunt Diyatomit Cevherindeki Safsızlıkların Hidrosiklon Ve Kalsinasyonla

- Giderilmesi Removal Of Impurities From Kütahya-Alayunt Diatomite Ore By Hydrocyclone And Calcination, Eylül 49 (2010) 13–21.
- [66] Endüstriyel Hammaddeler, (N.D.).
- [67] D. Harwood, Diatomite, *Diatoms Appl. Environ. Earth Sci. Second Ed.* (2010) 570–574. <https://doi.org/10.1017/Cbo9780511763175.034>.
- [68] M. Sun, C. Zou, D. Xin, Pore Structure Evolution Mechanism Of Cement Mortar Containing Diatomite Subjected To Freeze-Thaw Cycles By Multifractal Analysis, *Cem. Concr. Compos.* 114 (2020) 103731. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103731>.
- [69] M. Sarıdemir, S. Çelikten, A. Yıldırım, Mechanical And Microstructural Properties Of Calcined Diatomite Powder Modified High Strength Mortars At Ambient And High Temperatures, *Adv. Powder Technol.* 31 (2020) 3004–3017. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.024>.
- [70] A. Yıldız, A. Gürel, Y.G. Dursun, Karacaörenyöresi Nevşehir diatomitlerinin fizikokimyasal özellikleri ve kullanım alanları, *Maden Tetk. Ve Aram. Derg.* 152 (2016) 167–184. <https://doi.org/10.19076/mta.58887>.
- [71] M. Sarıdemir, The Strength Properties Of Alkali-Activated Ground Diatomite Mortars, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.* 5 (2016) 124–134. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/279709>.
- [72] H. Yılmaz Aruntaş, Diatomitlerin Çimentolu Sistemlerde Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği, (1996).
- [73] X. Shuqiang, J. Wang, Q. Ma, X. Zhao, T. Zhang, Study On The Lightweight Hydraulic Mortars Designed By The Use Of Diatomite As Partial Replacement Of Natural Hydraulic Lime And Masonry Waste As Aggregate, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.062>.
- [74] E. Gökkonca, Diatomit Katkılı Harçların Bazı Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerinin Değişiminin İncelenmesi, (2010).
- [75] S. Viscocrete, Sika ® Viscocrete ® -Sf 18, (2007) 2–4.
- [76] Ts En 196–1, Çimento Deney Metotları, Türk Stand. Enstitüsü, Ankara. (2002)., (N.D.).
- [77] R.K. Standardi, T.S. En, T.S.E.T. Kurulu, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ts En 12390-7, (2010).
- [78] Astm International, “Astm C 1585 04 : Standard Test Method For Measurement Of Rate Of Absorption Of Water By Hydraulic-Cement Concretes,” American Society For Testing And Materials., Pp. 1–6, 2007, [Online]. Available: www.astm.org, (N.D.).
- [79] “Standard Test Method For Resistance Of Concrete To Rapid Freezing And Thawing 1.,” (N.D.).
- [80] A.- 2013, “‘Standard Test Method For Length Change Of Hydraulic Cement Mortars Exposed To A Sulfate Solution.’ Astm C1012–13, West Conshohocken, Pa,” 2024, P. 2024., (N.D.).
- [81] M. Şahin Yön, Mechanical, Durability And Microstructure Properties Of Eco-Friendly Self-Compacting Mortars With Addition Of Volcanic Scoria, Silica Fume And Boron Waste As Cement Replacement, *Constr. Build. Mater.* 462 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139894>.
- [82] Q. Huang, L. Zhao, C. Zhao, D. Liu, C. Wang, Microstructure Change Of Nanosilica–Cement Composites Partially Exposed To Sulfate Attack, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 14 (2020). <https://doi.org/10.1186/S40069-020-00401-4>.

ÖZGEÇMİŞ

Büşra KARABULUT

KİŞİSEL BİLGİLER

[Redacted Personal Information]

ARAŞTIRMACI BİLGİLERİ

Öğrenci Orcid ID : 0009-0000-0912-1819
Danışman Orcid ID: 0000-0002-3705-8463

EĞİTİM BİLGİLERİ

[Redacted Education Information]

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Brookfield DV-E model cihaz: Viskozimetre deneyi
- ✓ UTEST UTCM 6420 cihazı: 3 noktalı eğilmede çekme ve basınç dayanım deneyleri
- ✓ Bilgisayar programlama dili: MATLAB

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. B. Karabulut, M. Ş. Yön ve M. Karataş, "Öğütülmüş diyatomitin kendiliğinden yerleşen harçların erken dayanımına etkisi", Fırat Üni. Deny. ve Hes. Müh. Derg., vol. 3, no 3, pp. 350-361, Ekim 2024.