

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



DİATOMİT VE BİNGÖL ANDEZİTİNİN GEOPOLİMER
KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ

UĞUR YAKUPOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

OCAK - 2023
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Uğur YAKUPOĞLU tarafından hazırlanan “**Diatomit ve Bingöl Andezitinin Geopolimer Kompozit Üretiminde Kullanılabilirliği**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **19.01.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR

Kastamonu Üniversitesi

.....

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Gökhan KAPLAN

Atatürk Üniversitesi

.....

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Hasbi YAPRAK

Kastamonu Üniversitesi

.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V.

Doç. Dr. Osman ÇİÇEK

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Uğur YAKUPOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİATOMİT VE BİNGÖL ANDEZİTİNİN GEOPOLİMER KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ

UĞUR YAKUPOĞLU

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR
EŞ DANIŞMAN:DOÇ. DR. AHMET BENLİ

Bu çalışmada, silis kumunun (SK) kısmi veya tam ikamesi olarak atık andezit kumunun (AK) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (YFC) kısmi ikamesi olarak diatomit tozunun (DT) alkali ile aktive edilmiş hafif harçların özellikleri üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Bu amaçla 16 harç örneği oluşturulmuştur. Örneklerin termal iletkenliği, kuru birim hacim ağırlığı, basınç ve eğilme basıncı değerlendirilmiş, kuru büzülme, yüksek sıcaklık ve donma çözülme dayanıklılığı incelenmiştir. Sonuçlar, %100 AK içeren ancak DT içeriği olmayan karışım ile yaklaşık 60 MPa'lık bir basınç dayanımı elde edildiğini göstermiştir. YFC'nin DT ile değiştirilmesi ise AAH'lerin basınç dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. %20 ve %30 DT içeren AAH karışımları ise en düşük termal iletkenlik sonuçlarını göstermiştir. D20A50 karışımı yüksek sıcaklık etkisine karşı en iyi direnci sergilemiş olup, donma ve çözülme etkisine karşı en iyi direnci gösteren karışımların %10 DT içeren karışımlar olduğu gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER:Alkali ile aktive edilmiş harçlar, Yüksek fırın cürufu, Diatomit, Atık andezit, Mekanik özellikler

Ocak 2023, 118 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

THE AVAILABILITY OF DIATOMITE AND BINGOL ANDESITE IN GEOPOLYMER COMPOSITE PRODUCTION

UĞUR YAKUPOĞLU

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSIST. PROF. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. AHMET BENLİ

In this study has addressed the effects of waste andesite sand (AS) as a partial or complete substitute of silica sand (SS) and diatomite powder (DP) as a partial substitute of ground blast furnace slag (GBFS) on the properties alkali- activated lightweight mortars (AAM). Sixteen mortar specimens were generated for this aim. Thermal conductivity, dry unit weight, compressive and flexural strength were evaluated. Dry shrinkage, high temperature and freeze thaw durability were investigated. The results indicated that the compressive strength of about 60 MPa was obtained for the mixture containing 100%AS but without DP content. Replacing GBFS with DP reduced the compressive strength of AAM mixtures notably. The AAM mixtures containing 20% and 30% DP showed the lowest thermal conductivity results. The mixture D20A50 exhibited the best high temperature resistance and the optimum mixture for the freezing and thawing exposure was observed for the mixtures containing 10% DP.

KEYWORDS: Alkali activated mortars, Blast furnace slag, Diatomite, Waste andesite sand, Mechanical properties

January 2022, 118 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca danışmanlığımı yapan, bilgi birikimiyle çalışmama ışık tutan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a teşekkürlerimi sunarım. Tezimin her aşamasında bana yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen, Bingöl andeziti'ni temin etmemi sağlayan eş danışmanım Doç. Dr. Ahmet Benli'ye teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım boyunca tecrübelerinden yararlandığım ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Gökhan KAPLAN'a, tez jürime katılarak bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren Prof. Dr. Hasbi YAPRAK'a şükranlarımı sunarım. Çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli aileme minnettarım. Tez çalışmam esnasında hayatıma giren ve bir ömür yanımda olmasını istediğim kız arkadaşım Dyt. Özge ZORLU'ya bu zorlu süreçlerdeki desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Yaptığım tez çalışmasının, bilim dünyasına yararlı olmasını temenni ederim.

Uğur YAKUPOĞLU

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	i
TAAHHÜTNAME	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	4
2.1.1 Yüksek Fırın Cürufunun Tanımı ve Özellikleri.....	4
2.1.2 Yüksek Fırın Cürufunun Tarihçesi	5
2.1.3 Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Bağlayıcılar	6
2.1.4 Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	9
2.2 Silis Kumu	10
2.2.1 Silis Kumu Tanımı ve Özellikleri	10
2.2.2 Silis Kumu Bulunuş Şekilleri.....	11
2.2.3 Dünyada ve Türkiye’de Silis Kumu Üretimi ve Rezervleri.....	11
2.2.4 Silis Kumu Kullanım Alanları	14
2.3 Diatomit.....	15
2.3.1 Diatomit Tanımı ve Özellikleri	15
2.3.2 Diatomit Oluşumu.....	16
2.3.3 Diatomitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	18
2.3.4 Dünyada ve Türkiye’de Diatomit Üretimi ve Rezervleri	19
2.3.5 Diatomit Kullanım Alanları	21
2.3.6 Diatomit ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	21
2.4 Andezit	23
2.4.1 Andezit Tanımı ve Özellikleri	23
2.4.2 Andezit Bulunuş Şekilleri	24
2.4.3 Andezitin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri	25
2.4.4 Andezit Üretimi	26
2.4.5 Andezit Kullanım Alanları.....	27
2.4.6 Andezit ile İlgili Yapılan Çalışmalar	28
2.5 Geopolimer	29
2.5.1 Geopolimer Tanımı ve Özellikleri	29
2.5.2 Geopolimer Malzemelerin Bileşenleri.....	33
2.5.3 Geopolimerizasyon	34
2.5.4 Geopolimerlerin Avantajları	36
2.5.5 Geopolimer Betonların Uygulamaları.....	38
2.5.6 Geopolimer ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	40
3. MATERYAL VE METOD	49
3.1 Materyal.....	49

3.2	Metod.....	51
3.2.1	Karışım Tasarımı	51
3.2.2	Geopolimer Karışımının Dökümü ve Kurlenmesi.....	52
3.2.3	Testler	52
4.	SONUÇ VE TARTIŞMALAR	56
4.1	Yayılma Çapı.....	56
4.2	Basınç Dayanımı	57
4.3	Eğilme Dayanımı.....	60
4.4	Kuru Birim Hacim Ağırlık	63
4.5	Isıl İletkenlik.....	65
4.6	Görünür Porozite ve Su Emme.....	67
4.7	Kuruma Büzülmesi.....	69
4.8	Su İşleme Derinliği (Kapılar Etki)	71
4.9	Yüksek Sıcaklık Etkisi	74
4.9.1	Basınç Dayanımı.....	74
4.9.2	Eğilme Dayanımı	78
4.9.3	Kütle Kaybı.....	81
4.10	Donma-Çözülme Etkisi	84
4.10.1	Basınç Dayanımı.....	84
4.10.2	Eğilme Dayanımı	89
4.10.3	Kütle Kaybı.....	92
4.11	Mikroyapı	95
4.11.1	Isı Kürü Uygulanan Karışımların Mikroyapısal Özellikleri	95
4.11.2	Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalan Karışımların Mikroyapısal Özellikleri	96
5.	SONUÇLAR.....	99
KAYNAKLAR	103	
ÖZGEÇMİŞ.....	118	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Yüksek fırın cürufu türleri	4
Şekil 2. 2 Yüksek fırın cürufu üretim aşaması	5
Şekil 2. 3 Silis kumu	10
Şekil 2. 4 Çubuk şekilli bir diatomun görünüşü.....	16
Şekil 2. 5 Elips şekilli bir diatomun iç yapısı	17
Şekil 2. 6 Değişik diatom şekilleri	17
Şekil 2. 7 Dünya 2010 yılı diatomit üretimi.....	20
Şekil 2. 8 Türkiye diatomit yatakları.....	20
Şekil 2. 9 Andezit kayacı örneği	23
Şekil 2. 10 Sialat, iyonik kavramın tetrahedral konfigürasyonu	31
Şekil 2. 11 Alkali aktive edilmiş malzemelerin farklı alt kümelerinin geleneksel Portland çimentoları ve kalsiyum sülfat alüminat bağlayıcı kimyası ile karşılaştırılması	33
Şekil 2. 12 Geopolimerizasyon için kavramsal model	35
Şekil 2. 13 Geopolimer matris seçimini yöneten arzu edilen özellikler	37
Şekil 2. 14 Geopolimer kompozitlerin özellikleri.....	38
Şekil 2. 15 Alkali ile aktive edilmiş betondan yapılmış 20 katlı konut binası.....	39
Şekil 2. 16 Atık malzemeler ve aktivatörlerin ile basınç dayanımı üzerindeki etkisi	42
Şekil 2. 17 Geopolimer ve Portland çimento betonların aside karşı tepkisi	47
Şekil 2. 18 Geopolimer ve Portland çimento betonlarına asit etkisi	48
Şekil 3. 1 YFC ve DT'nin XRD modeli	50
Şekil 4. 1 AK ve DT içeren AAH karışımlarının yayılma değerleri.....	57
Şekil 4. 2 %0 ve %10 DT içerikli numunelerin basınç dayanımları.....	59
Şekil 4. 3 %20 ve %30 DT içerikli numunelerin basınç dayanımları.....	60
Şekil 4. 4 %0 ve %10 DT içerikli numunelerin eğilme dayanımları	62
Şekil 4. 5 %20 ve %30 DT içerikli numunelerin eğilme dayanımları	62
Şekil 4. 6 Numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları	64
Şekil 4. 7 AAH karışımlarının kuru birim hacim ağırlığı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	64
Şekil 4. 8 Termal iletkenlik sonuçları	66
Şekil 4. 9 Termal iletkenlik ile kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki	66
Şekil 4. 10 Gözeneklilik ve su emme	68
Şekil 4. 11 Gözeneklilik ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	68
Şekil 4. 12 Gözeneklilik ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki	69
Şekil 4. 13 %0 ve %10 DT içerikli numunelerin kuruma büzülmesi sonuçları	70
Şekil 4. 14 %20 ve %30 DT içerikli numunelerin kuruma büzülmesi sonuçları	71
Şekil 4. 15 %0 ve %10 DT içerikli numunelerin kapilarite sonuçları	72
Şekil 4. 16 %20 ve %30 DT içerikli numunelerin kapilarite sonuçları	73
Şekil 4. 17 Basınç dayanımı ve kapilarite arasındaki ilişki	73
Şekil 4. 18 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımları	76

Şekil 4. 19 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımları	76
Şekil 4. 20 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri (%).....	77
Şekil 4. 21 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri (%).....	77
Şekil 4. 22 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımları.....	79
Şekil 4. 23 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımları.....	80
Şekil 4. 24 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı değişimleri (%).....	80
Şekil 4. 25 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı değişimleri (%).....	81
Şekil 4. 26 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle kayıpları	83
Şekil 4. 27 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle kayıpları	83
Şekil 4. 28 Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında karışımların basınç dayanımı ve kütle kaybı arasındaki ilişki.....	84
Şekil 4. 29 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki basınç dayanımları	87
Şekil 4. 30 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki basınç dayanımları	87
Şekil 4. 31 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri (%).....	88
Şekil 4. 32 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri (%).....	88
Şekil 4. 33 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki eğilme dayanımları.....	90
Şekil 4. 34 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki eğilme dayanımları.....	91
Şekil 4. 35 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı değişimleri (%).....	91
Şekil 4. 36 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı değişimleri (%).....	92
Şekil 4. 37 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrası kütle kayıpları	93
Şekil 4. 38 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrası kütle kayıpları	94
Şekil 4. 39 Donma-çözülme döngüleri sonrasında karışımların basınç dayanımı ve kütle kaybı arasındaki ilişki.....	94
Şekil 4. 40 90 gün boyunca kürlenmiş referans karışımının mikroyapı görüntüleri	95
Şekil 4. 41 90 gün boyunca kürlenmiş D10A50 karışımının mikroyapı görüntüleri	96
Şekil 4. 42 90 gün boyunca kürlenmiş D30A100 karışımının mikroyapı görüntüleri	96

Şekil 4. 43 900°C'ye maruz bırakılan referans karışımın mikroyapı görüntüleri	97
Şekil 4. 44 900°C'ye maruz bırakılan D10A50 karışımının mikroyapı görüntüleri	97
Şekil 4. 45 900°C'ye maruz bırakılan D30A100 karışımının mikroyapı görüntüleri	98



TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2. 1 Türkiye Silis Kumu Rezervleri ve Özellikleri	13
Tablo 2. 2 Yıllara Göre Dünya Silis Kumu Üretimleri (1000 ton)	14
Tablo 2. 3 Türkiye diatomitlerinin min/max kimyasal değerleri ve bileşim sınır değerleri.....	19
Tablo 2. 4 Magmatik kayaların sınıflandırılması	25
Tablo 2. 5 Andezitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri	26
Tablo 3. 1 YFC ve DT'nin kimyasal bileşimi (kütle olarak yüzde)	49
Tablo 3. 2 Silis ve andezit agregasının fiziksel özellikleri	50
Tablo 3. 3 Sodyum hidroksit'in özellikleri	51
Tablo 3. 4 Sodyum silikat'ın özellikleri.....	51
Tablo 3. 5 AAH karışım tasarımı (kg/m ³).....	51
Tablo 3. 6 Gerçekleştirilen testler, numune büyüklükleri ve test standartları.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
CO_2	: Karbon Dioksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
CaOH_2	: Kalsiyum Hidroksit
CSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
Fe_2O_3	: Demir Oksit
H_2SO_4	: Dihidrojen Sülfat
K_2O	: Potasyum Oksit
KOH	: Potasyum Hidroksit
K_2SiO_3	: Potasyum Silikat
MgO	: Magnezyum Oksit
MgSO_4	: Magnezyum Sülfat
Na_2O	: Sodyum Oksit
Na_2SO_4	: Sodyum Sülfat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na_2SiO_3	: Sodyum Silikat
SiO_2	: Silisyum Dioksit
SO_3	: Kükürt Trioksit

Kısaltmalar

AAH	: Alkali ile Aktive Edilmiş Harç
AAM	: Alkali ile Aktive Edilmiş Malzeme
AK	: Andezit Kumu
ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DT	: Diatomit Tozu
D-Ç	: Donma-Çözülme
HCl	: Hidroklorik Asit
MPa	: Megapascal
NaCl	: Sodyum Klorür
PÇ	: Portland Çimentosu
SK	: Silis Kumu
UK	: Uçucu Kül
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

İnsanlığın karşı karşıya olduğu en ciddi sorunlardan biri olan iklim felaketleri, çoğunlukla endüstriyel tesisler tarafından atmosfere salınan sera gazı emisyonlarından kaynaklanmaktadır (Sasui vd., 2021). Yapılar için geleneksel beton ve harç üretimi, atmosferde bulunan CO₂ emisyonlarının önemli bir kaynağıdır. Geleneksel Portland Çimentosu'nun (PÇ) yaygın olarak kullanılması ve üretilmesi, çevre üzerinde belirgin bir olumsuz etkiye sahiptir. Dünyadaki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'inin PÇ üretiminden kaynaklandığı bildirilmektedir. PÇ ikamelerini bulmak ve CO₂ emisyonlarını azaltmak, PÇ betonunun zararlı etkilerini azaltmak için çok önemlidir. Şu anda PÇ'nin yerine yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin PÇ'den daha iyi fiziksel özellikler ve dayanıklılık özellikleri elde ettiği iddia edilmiştir (Benli, 2019; Colangelo vd., 2017; Rafeet vd., 2019; J. Xie vd., 2019). PÇ'nin bu malzemelerle yer değiştirilmesi, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gibi maliyetini de düşürmektedir. Çimento üretim sürecinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmaya yönelik büyük çabalara rağmen, yıllık olarak üretilen büyük miktarda çimento, alkali ile aktifleştirilmiş malzemeler (AAM) gibi ek ve alternatif bağlayıcı seçimlerini gerektirmektedir. Ek olarak, geleneksel beton ve harçta agrega olarak kullanılan ve inşaat sektöründeki yoğun talep nedeniyle hızla tükenen doğal kum için de alternatifler gerekmektedir (Miller vd., 2018). AAM'ler, Portland çimento esaslı malzemelerden daha çevre dostu olmaları sebebiyle ve CO₂ emisyonlarını düşürmek ile beraber enerji israfını azaltmak için endüstriyel atıkların kullanımına olanak sağladığından dolayı araştırmalarda daha fazla ilgi görmektedir (Jamieson vd., 2015; Yadollahi vd., 2015b, 2015a, 2017; Yadollahi ve Benli, 2017). AAM'lerin veya geopolimerlerin oluşturulması, doğal puzolanlar (volkanik tüf, zeolit ve diatomit), metakaolin, uçucu kül, silis dumanı ve YFC gibi doğal puzolanik malzemelerin veya geri dönüştürülmüş atıkların kullanılmasıyla etkin bir şekilde kolaylaştırılır. Diatomit olarak bilinen tortul kaya, karmaşık yapıli silis hücre iskeletlerini oluşturan tek hücreli diatomların silisli fosilleşmiş iskeletlerinden oluşmuştur. Bu ufacık bitkiler, iskelet sistemlerini oluşturmak için sudan silika çekmek gibi olağanüstü bir kapasiteye sahiptir. Ölü diatomların iskelet kalıntıları, bir diatomit tortusu oluşturmak için yerleşir. Diatomit,

çok ince taneli, yumuşak, topraksı, tebeşir benzeri ve tipik olarak açık renkli bir kayadır. Son derece düşük bir yoğunluğa ve çok ince gözeneklere sahiptir. Esas olarak amorf tipte bir silikadan (silisyum dioksit, SiO_2) ve eser miktarda mikrokristal materyalden oluştuğundan dolayı kimyasal olarak kararlıdır. Diatomit, diatomlarınki gibi açık iskeletleri olan hafif ama oldukça sert bir kayadır. Sıklıkla volkanik ortamlarda ve volkanik olarak aktif bölgelerdeki tortu oluşturan göllerde bulunur (Gencel vd., 2016; Sun vd., 2020; Yılmaz ve Ediz, 2008). Son zamanlarda, çimentonun bileşenlerinden biri olarak diatomit ilavesinden faydalanabileceği kanıtlanmıştır. Diatomit ayrıca çok düşük bir termal iletkenliğe sahiptir ve kimyasalların çoğu ile tepkimeye girmemektedir (Yılmaz ve Ediz, 2008). Diatomit, harçlarda ve betonda çimento veya kumun yerine kullanılmaktadır ancak alkali ile aktiveleştirilmiş malzemelerde diatomitin bağlayıcı veya agrega olarak kullanıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Çimento harçlarına ağırlıkça %5 ila %20 arasında kısmi bir diatomit ikamesi de önceki araştırmalarla önerilmiştir. Katkı maddesi olarak diatomit ve diatomit'in betonun özelliklerine etkisi Aydın ve Gül tarafından incelenmiştir (Aydın ve Gül, 2007). Yazarlara göre, katkı oranındaki bir artış, basınç dayanımında ani bir düşüşe neden olmaktadır. Özellikle yaklaşık 28 günlükken, diatomit puzolanik reaksiyonu daha fazla miktarda hidrat ürünü üretir (Kastis vd., 2006). Stamatakis'in araştırmasına göre çimento katkı maddesi olarak diatomit kullanmanın daha yüksek su ihtiyacı gibi dezavantajları vardır (Stamatakis vd., 2003), ancak laboratuvarında üretilen çimentoların basınç dayanımı Portland çimentosu standardınınkinden daha yüksektir. Fragoulis ve arkadaşlarının araştırmasına göre (Fragoulis vd., 2005) diatomit, yüksek öğütülebilirliği nedeniyle çimentonun özgül yüzey alanını arttırır. Kayacın diatomlu kırıklar, kil granülleri ve kalkerli taneler dahil olmak üzere çok ince taneli bileşenlere sahip olması, yüksek özgül yüzey alanına önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Yüksek özgül yüzey alanına sahip reaktif silika, çimentoya mükemmel mekanik özellikler sağlar. Kalsine diatomit tozu katkılı yüksek mukavemetli harçların düşük ve yüksek sıcaklıklarda mekanik ve mikroyapısal özellikleri Sarıdemir vd. tarafından incelenmiştir. Yazarlara göre, %15 kalsine diatomit tozu içeren harç, test bulgularına göre hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda en yüksek mekanik özellikleri sergilemiştir (Sarıdemir vd., 2020).

Magmatik kayaların bir alt türü olarak andezit, magmatik bir kaya olarak sınıflandırılır. Andezit, hem Türkiye'de hem de dünyada özellikle damlataş, parke, çerçeve ve kaplama üretimi gibi inşaat mühendisliği ve mimari ile ilgili uygulamalarda kullanılmaktadır (Benli, 2019). Andezitin %70'i, çok fazla atık malzeme üreten büyük ölçekli andezit üretim sürecinin madencilik, işleme ve cilalama aşamalarında kaybolmaktadır. Atık andezit kumu (AK), harç ve betonda çimento veya kumun yerine kullanılmıştır. Davraz ve diğerleri (Davraz vd., 2018) atık andezit tozunun yüksek dayanımlı betonun mekanik özellikleri üzerindeki puzolanik etkilerini araştırmışlardır. Yazarlar, 28 ve 90 günlük kür süreleri baz alındığında C40 mukavemet sınıfının elde edilmesi için %10 atık andezit tozu ikamesinin ideal olduğunu belirtmişlerdir. Çelikten (Sarıdemir vd., 2020), atık andezit tozu bazlı geopolimer harçların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemiştir. Bulgular, daha yüksek eğilme ve basınç dayanımı değerleri elde etmek için daha uzun kür sürelerinin kullanılabileceğini göstermiştir. Ek olarak, atık andezit tozu kullanılarak geopolimer sentezi, ekolojik bir harç üretme yöntemi olarak umut vaat etmektedir.

Bildiğimiz kadarıyla, silis kumunun (SK) kısmi veya tam ikamesi olarak atık andezit kumunun (AK) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (YFC) kısmi ikamesi olarak diatomit tozunun (DT) alkali ile aktive edilmiş harçlar (AAH) üzerindeki mekanik etkileri, yalıtım, mikroyapısal ve dayanıklılık özellikleri yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışmada Silis kumunun (SK) AK ile ağırlıkça %0, %25, %50 ve %100 olarak değiştirildiği ve YFC'nin ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 DT ile değiştirildiği on altı harç numunesi üretilmiştir. Geopolimerizasyonu hızlandırmak amacıyla örnekler 80°C'de 24 saat boyunca kürlenmiştir. Termal iletkenlik, kuru birim hacim ağırlık, porozite, su emme, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı dahil olmak üzere çeşitli AK ve DT içeriklerine sahip AAH karışımlarının mekanik, termal, mikroyapısal ve dayanıklılık özellikleri değerlendirildi ve kuruma büzülmesi, su emme, yüksek sıcaklık ve donma çözülme dayanıklılığı incelenmiştir. Ek olarak, AAH'lerin mikro yapısını değerlendirmek için bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) araştırması da yürütülmüştür.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

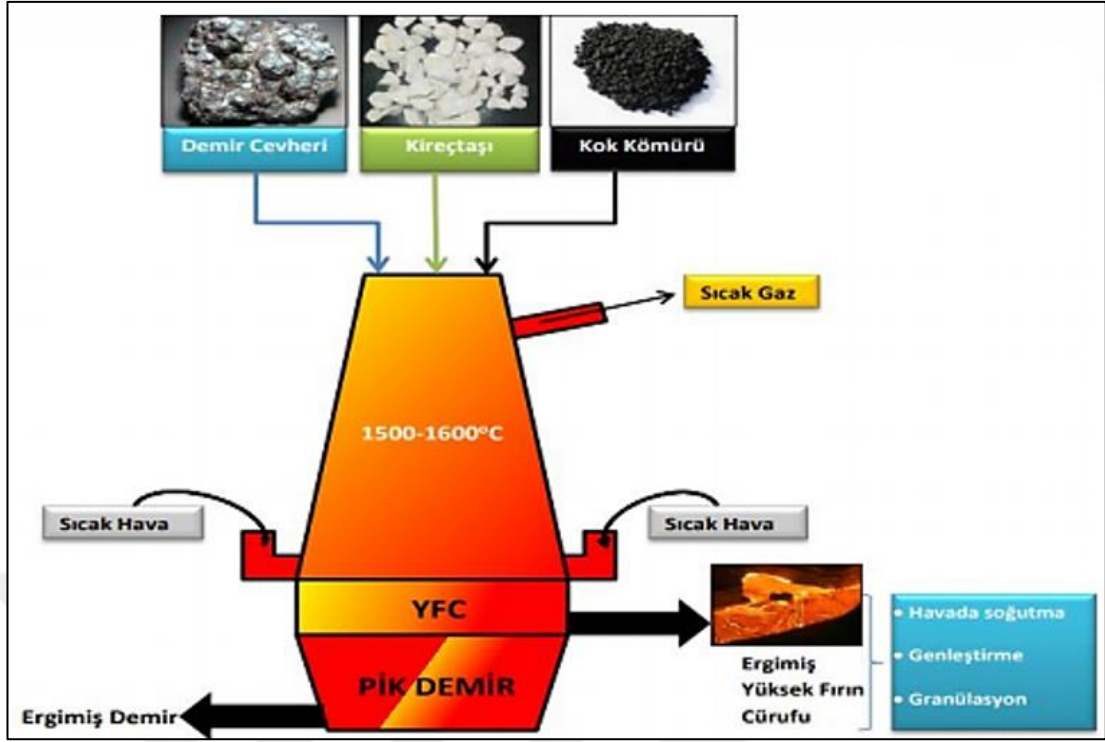
2.1.1 Yüksek Fırın Cürufunun Tanımı ve Özellikleri

Yüksek fırın cürufu (YFC), demir-çelik üretim fabrikalarında demirin üretilmesi sırasında ortaya çıkan alternatif bir üründür. Demir ocağından çıkarılan demir madeni saf demir olarak bulunmaktadır. Ocaktan çıkarılan demir cevherinin muhteviyatına bakıldığında demir oksit ile beraberinde alüminyum, kükürt ve demir madeni harici bir çok farklı maden içermektedir. Demiri saf hale getirmek için yüksek sıcaklıklı fırınlar kullanılarak ayrıştırılır. Kireç taşı bu ayrışma sürecini destekleyici bir madde olarak görev alır. Kömür gerekli olan ısıyı sağlanmasında katalizör görevi üstlenmektedir (Siddique ve Khan, 2011).



Şekil 2. 1 Yüksek fırın cürufu türleri (Engin, 2015)

Devamlı olarak hammadde takviyesi yapılan yüksek fırınlarda sıcaklık 1500-1600°C sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Bu ısı işlem sonucu oluşan atık cüruf fırının üst kısmında, saf demir ise fırının alt kısmında ise pik demir olarak toplanmaktadır. Fırında oluşan iki farklı ürün birbirinden ayrı bir şekilde tahliye edilir. YFC tahliye işlemi iki ürünün ayrışma ısısı korunarak yapılıp kalan pik demir üretilecek ürünün durumuna göre soğutma işlemi uygulanarak fırından tahliye edilir (Siddique ve Khan, 2011).



Şekil 2. 2 Yüksek fırın cürufu üretim aşaması (Engin, 2015)

YFC soğutma işlemlerine göre üç ayrı gruba ayrılmakta olup bunlar havada soğutma, genleştirme, granülasyon olarak sınıflandırılır.

2.1.2 Yüksek Fırın Cürufunun Tarihçesi

Puzolanların tarihi eski çağlara kadar uzanmaktadır. Romalılar döneminde yaşayanlar, pişirilmiş kil, öğütülmüş tuğla yada kiremidin puzolanik malzeme özelliği gösterdiği farkına varmışlardır. Romalılar, pişirilmiş kili, volkanik külü veya volkanik küllü toprağı su ve söndürülmüş kireç ile birleştirerek su altında sertleşen bağlayıcıyı üretmişlerdir. Daha sonra bu tür bağlayıcılara taş parçaları da ilave edilerek günümüz betonuna benzer betonlar üretilmiştir. Osmanlılar döneminde yaygın olarak kullanılan “Horasan harcı” ise kil kullanılarak üretilen çömlek, tuğla, kiremit gibi ürünlerin öğütülerek söndürülmüş kireç ile karıştırılması sonrasında meydana getirilmiştir (Alpaslan, 2012). Puzolanlar doğal ve yapay puzolanlar olarak ayrılmaktadır. Yapay puzolanlardan biri YFC’dir. 1862 yılında Alman bir araştırmacı olan Emil Largens tarafından YFC’yi granüle hale getirmesiyle birlikte YFC ile ilgili çalışmalar başlamıştır. İlk defa 1865 yılında Almanya’da bulunan bir fabrikada YFC esaslı çimento üretilmiştir.

Üretilen bu çimento ticari olarak üretimine ilk kez 1892 yılında Almanya’da daha sonra ise 1896 yılında ABD’de başlanmıştır. Ayrıca 1889 yılında Paris’te yapılan bir yeraltı metrosunda kullanılmıştır. 1950 yılına gelindiğinde ise, YFC beton katkı malzemesi olarak çeşitli ülkelerde kullanılmaya başlanmıştır (T. S. Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Türkiye’de ise YFC son dönemlerde önemli bir bağlayıcı malzeme olmuştur. Kocaeli ilinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından lisanslı olan YFC depolama tesisi bulunmaktadır. İzmir’de ise YFC’lerden parke taşı, büz boru üretimi ve agrega temini için yine bakanlık lisanslı geri dönüşüm tesisi mevcuttur (Uysal ve Bahar, 2018). Türkiye 2006 yılı sonunda 23 milyon ton üretim kapasitesiyle dünya çelik üretiminde 11. sıradadır. Dünyada demir çelik üretimi 1244 milyon tondur ve bu üretimin % 1,87’si ülkemizde gerçekleşmektedir (Topçu ve Canbaz, 2008). Ülkemiz demir çelik endüstrisinde son 15 yıllık zaman diliminde kapasite ve üretim artış hızı bakımından önemli bir yere sahiptir. Ham çelik üretme kapasitesi 2000 yılında yaklaşık 20 milyon ton olan ülkemiz 2013 yılı sonunda bu miktarı 50 milyon ton seviyesine yükselterek, dünya çapında ham çelik üretimi sıralamasında 8. sırada yer almıştır. Ayrıca Türk demir çelik sektörü üretim faaliyetleri açısından büyük oranda YFC oluştuğundan en büyük atık üreticisidir (Kürklü, 2016).

2.1.3 Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Bağlayıcılar

Demir yapımında bir yan ürün olarak oluşan YFC metalürjik cüruf türlerinden biridir. Başlıca bileşenleri SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , FeO olan YFC inşaat sektöründe çimento yerine kullanılmaktadır. İnce öğütülmüş YFC’nin çimento yerine kullanılması teknolojik, ekonomik ve ekolojik açıdan önemli bir uygulamadır. Betonun mekanik özelliklerini ve zayıf asitlere ve tuzlara karşı direncini iyileştirir (Václavík vd., 2012).

(Gök ve Kılınç, 2017) yaptıkları çalışmada YFC ve UK kullanarak ürettikleri geopolimer betonlar üzerinde araştırma yapmışlardır. Çalışmada ağırlıkça %4, %10 ve %20 oranlarında YFC’yi, UK ile yer değiştirmişlerdir. Geopolimerleri aktive etmek için 12 M KOH çözeltisi hazırlamışlardır. Agrega olarak ise ince agrega ve boyutu 12 mm-20 mm arasında değişen kırmataş kullanmışlardır. Numune boyutları 15 cm olan

geopolimerler laboratuvar ortamında havada kür edilmiştir. 7 ve 28 gün kür süresi sonunda dayanımlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda YFC oranının artması basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini ve maksimum basınç dayanımının bu numunelerde görüldüğünü belirtmişlerdir.

(Haha vd., 2011) yaptıkları çalışmada YFC kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Geopolimerleri aktive etmek amacıyla NaOH ve sodyum metasilikat olmak üzere iki ayrı aktivatör kullanmışlardır. Geopolimer numuneleri deney zamanına kadar oda koşullarında kür etmişlerdir. Geopolimer betonlara dayanım, SEM ve XRD testleri yapmışlardır. Numunelerin ilk 1 günlük kür sonrası basınç dayanımını test etmişlerdir ve bu süre sonunda yalnızca NaOH ile aktive edilen numunelerde basınç dayanım değeri görülmüştür. Kür süresi 7 günü tamamlayan numunelerde de yine NaOH ile aktive edilen numunelerin basınç dayanımı maksimum olmuştur. Ancak 180 gün kür sonrası maksimum basınç dayanımı sodyum metasilikat ile aktive edilen YFC'li geopolimer betonlardan elde edilmiştir. Çalışma sonucunda NaOH ile aktive edilen geopolimerlerin erken dayanımının daha yüksek olduğu, sodyum metasilikat ile aktive edilen geopolimer betonların ise nihai dayanımının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

(Deb vd., 2014) yaptıkları çalışmada YFC ve UK kullanarak geopolimer harç üretmişlerdir. Geopolimer harçlar hazırlanırken %10 oranında UK ile %20 oranında YFC'yi yer değiştirerek kullanmışlardır. Çalışmada sodyum silikat/sodyum hidroksit oranını sırasıyla 1,5 ve 2,5 olarak belirlemişlerdir. Geopolimer numuneler ortam şartlarında 23°C ve %70 bağıl nem altında kür edilmişlerdir. Çalışma sonucunda YFC oranı fazla ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı düşük olan numunelerde maksimum dayanım ve işlenebilirlik elde edildiğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda 180 güne kadar YFC içeriği arttıkça dayanımda paralel olarak arttığını ifade etmişlerdir.

(Cheng ve Chiu, 2003) yaptıkları çalışmada YFC ve metakaolin bağlayıcıları ile geopolimer üretmişlerdir. Çalışmada geopolimerleri aktive etmek amacıyla KOH ve Na_2SiO_3 aktivatör olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucu araştırmacılar sıcaklık etkisinin, KOH yoğunluğunun ve Na_2SiO_3 oranının geopolimerlerin priz olma

zamanları üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca YFC içeren geopolimerlerin 79 MPa değeriyle en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Bunun yanı sıra KOH aktivatörünün kullanılmasının da yangın dayanımında olumlu etkileri olduğunu ifade etmişlerdir.

(Bilenler Altundal, 2019) yapmış olduğu tez çalışması kapsamında geopolimer beton ve PÇ betonun durabilite özelliklerini kıyaslamak için çalışma yapmıştır. Çalışmada geopolimer beton üretiminde UK ve YFC bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Çalışmada 3 ayrı oranda, %100 UK, %50 UK ile %50 YFC ve %100 YFC bağlayıcılarını kullanmıştır. Geopolimer betonları aktive etmek amacıyla NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatör olarak belirli oranlarda karıştırılıp kullanılmıştır. Ürettikleri geopolimer ve PÇ betonları %5 H₂SO₄ çözeltisine bırakmıştır. Çalışma sonucunda geopolimer betonların daha iyi dayanım sağladığını belirtmiştir. Ayrıca %50 UK ile %50 YFC karışımında en iyi dayanım elde edilirken, %100 UK içeren geopolimerlerde ise en olumsuz dayanım elde edilmiştir.

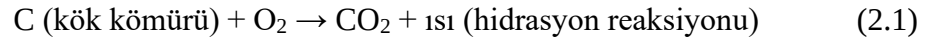
(Bernal vd., 2011) yaptıkları araştırmada YFC bağlayıcılı geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada silis modülü 2.4, %5 Na₂O ve su/bağlayıcı oranı ise 0.42 olacak şekilde karışım hazırlanmıştır. Geopolimer beton numunelerine 25°C sıcaklıkta ve %90 bağıl nem altında 28 gün ve 90 gün kür edilmişlerdir. Araştırmacılar YFC oranlarının artmasıyla geopolimer beton numunelerinin 28 ve 90 gün sonunda dayanımının arttığını belirtmişlerdir.

(Altındal, 2020) yaptığı tez çalışmasında UK ve YFC'yi bağlayıcı olarak kullanmıştır. Alkali aktivatör olarak ise NaOH ile Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Çalışmada 3 ayrı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlar %100 YFC, %75 YFC ile %25 UK ve %50 YFC ile %50 UK olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada kür şartlarının araştırılması amacıyla 13 ayrı kür uygulanmıştır. Çalışma sonucunda kür şartlarının dayanımı etkilediği bulunmuştur. Ayrıca en fazla dayanım %100 YFC içeren betonlarda bulunmuştur. Araştırmacı bunun nedenini YFC'de bulunan yüksek oranda CaO bulundurmasından kaynaklandığını bildirmiştir.

(Chi ve Huang, 2013) UK ve YFC bağlayıcılarını kullanarak harç üretmişlerdir. Alkali kullanılarak aktivasyon işlemi gerçekleştirilen harçların farklı miktarlarda YFC ve UK kullanılmasını incelemişlerdir. Üretilen harç numuneleri üzerinde basınç dayanımı, su emme ve eğilme dayanımı testleri uygulamışlardır. Aynı zamanda Portland çimentolu harçlar üretilerek de bu numuneler arasında kıyaslama yapmışlardır. Çalışma sonucunda YFC ve UK oranı %50 olan numuneler maksimum dayanım göstermişlerdir. Portland çimentolu harçlara göre dayanımları kıyaslandığında ise oldukça yüksek dayanım değerleri elde etmişlerdir.

2.1.4 Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Demir ocağından çıkan demir madenin pik demir haline getirmek için demir ocağından çıkarılan madenden demir dışı maddeleri ve demir bünyesinde bulunan oksijeni ayırmak esastır. Bu doğrultuda fırında aşağıda belirtilen reaksiyonlar oluşturulur. Demir oksitten oksijenin ayrılması reaksiyonları Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3’de ifade edilmektedir (Hewlett ve Liska, 2019).



Silisin demir cevherinden uzaklaştırılma reaksiyonları ise Denklem 2.4 ve Denklem 2.5’de açıklanmaktadır.



2.2 Silis Kumu

2.2.1 Silis Kumu Tanımı ve Özellikleri

Tarihte ilk kez Romalılar tarafından cam imalatında kullanılan silis kumu, silisyum dioksit minerali (SiO_2) içerir (Öbelik, 2011). Silis kumu genel olarak renksiz ya da beyaz renkte ince taneli bir yapıda bulunmaktadır. Yeryüzünde bol miktarda bulunan silis kumunun kimyasal formülü SiO_2 ile gösterilmektedir. Ayrıca silis kumu, saf haldeyken %53,3 oranında oksijen (O) ve %46,5 oranında silis (Si) içermektedir. Mohs skalasına göre sertliği 7 olan silis kumu, ayrıca $2,65 \text{ gr/cm}^3$ özgül ağırlığa ve 1785°C ergime sıcaklığına sahiptir (İpekoğlu, 1999).



Şekil 2. 3 Silis kumu (Akkum, 2022)

Silis kumu, kuvars bakımından zengin olan metamorfik, magmatik ve sedimenter kayaç türlerinin bozunması sonucunda meydana gelen ve 2 mm tane boyutundan küçük kuvars tanelerinin olduğu psammitik dokulu kayaçlardır (Hacıhafızoğlu, 2011). Silisten meydana gelen silis kumu az oranda feldspat, kil, demir oksitler ve karbonatları yapısında barındırabilir. Silis kumları demir oksit içeriyorsa renkleri pembeden kızıla ya da kahverengiye doğru değişebilir (Akçıl vd., 2007).

Silis kumu, oluşumu bakımından ikiye ayrılır. İlki, allohton oluşum olarak adlandırılan ve kuvars bakımından zengin olan sedimanter, metamorfik ve magmatik

kayaç türlerinin ayrışması sonucunda serbest kalan kuvars minerallerinin taşınması ile, içeriğinde kil bulunduran gevşek yapıda bir çimento ile istiflenmesi akabinde meydana gelen oluşumlardır. İkincisi ise, otokton oluşum olarak adlandırılır. Bu oluşumlar, silis bakımından zengin olan kayaç türlerinin bir metamorfizmanın etkisi sonucu ya da faylanma olayı ile yerinde ayrışması sonucunda meydana gelmektedir. Otokton oluşum sonucu meydana gelen bu tür silis kumları, allokton oluşum sonucu meydana gelen silis kumlarına oranla daha az miktarda kirlilik içerirler (S. Bayraktar, 2010).

2.2.2 Silis Kumu Bulunuş Şekilleri

Kuvars yeryüzünde genel olarak silis kumu, kuvars minerali ve kuvarsit olarak üç farklı yapıda bulunur. Silisyum, ilk olarak kimyager Jöns Jakob Berzelius tarafından 1824 yılında keşfedilmiştir. Yerkabuğu, yaklaşık olarak %25,6 oranında silisyum elementinden oluşmaktadır. Silis, oksijenden sonra bileşik halinde en fazla bulunan elementtir (Akkum, 2020). Silika, dokuz farklı kristal formda veya polimorfta bulunur, ancak en yaygın olan üç formu tridimit ve kristobalit olan kuvarstır. Aynı zamanda bir dizi kriptokristalin formda da meydana gelir. Lifli formların genel adı kalsedondur ve akik, oniks ve akik gibi yarı değerli taş versiyonlarını içerir. Granül çeşitleri arasında ise jasper ve çakmaktaşı bulunur. Diatomit ve opal gibi susuz formları da vardır (Tsoar vd., 2004).

Yüksek dereceli silisler genel olarak kayaç tabakalarının altındaki ince damalar halinde konsolide olmayan çökeltilerde bulunur. Ayrıca diğer kayaların içinde kuvars damarları olarak da yer alabilir ve bu damarlar metrelerce kalınlıkta olabilir (Tsoar vd., 2004). İçindeki safsızlıklara bağlı olarak pembe, sarı, mor, süt beyazı gibi çeşitli renklerde oluşmuştur. Renkli kuvarslar süs taşları olarak değerlendirilmektedir (Öbelik, 2011).

2.2.3 Dünyada ve Türkiye’de Silis Kumu Üretimi ve Rezervleri

Kaynaklara göre, Türkiye kuvars kumu rezervi 1.307.414.250 ton olarak belirlenmiştir (Kurşun ve İpekoğlu, 1995). Silis kumu rezervi açısından ülkemizde zengin olan bölgelerimiz İstanbul (Beykoz, Çatalca, Şile, Yalova), Tekirdağ (Safaalan - Saray),

Sinop ve Zonguldak'tır. Şile'deki silis kumu rezervinin büyük bölümü döküm kumu olarak kullanılmaktadır. Yüksek SiO_2 ve düşük Fe_2O_3 içeriklerine bağlı olarak Çatalca silis kumu rezervi ise cam sanayinde kullanılan önemli rezervlerimizi teşkil eder. Bunun yanında Çatalca silis kumları döküm kumu ve züccaciye sektöründe de kullanım alanı bulmaktadır.

Diğer bir silis kumu üretim bölgemiz ise Tekirdağ-Saray-Safalan silis kumlarıdır. Buradaki silis kumların alkali içerikleri daha fazladır ve demir içerikleri düşüktür. Kil içerikleri yüksek olmasına rağmen, yıkama sonucu kolay atılabilmesinden dolayı bu bölgeden üretilen silis kumları cam sanayi üretiminde yer almaktadırlar.

Sinop bölgesinde yer alan silis kumlarının düşük silis içeriği ve yüksek demir değerlerine sahip olmaları sebebiyle cam sanayide kullanıma elverişli değildir. Buna ek olarak ateşe dayanımlarının düşük olması sebebiyle de silika tuğla üretiminde de kullanılamamaktadır. Son olarak Zonguldak bölgesine ait silis kumlarına çeşitli zenginleştirme prosesleri uygulanması sonucu cam-seramik, silika tuğla, refrakter vb. gibi farklı alanlara yönelik olarak kullanıma uygun hale gelmektedir (Kurşun ve İpekoğlu, 1995). Tablo 2.1'de Türkiye silis kumu rezervleri ve özellikleri yer almaktadır.

Dünyadaki silis kumu rezervinin ise rakamsal olarak tam anlamıyla ortaya konulamaması ile birlikte milyar ton düzeyde olduğu tahmin edilmektedir. Silis kumu rezervleri dağılımına bakılacak olursa Avrupa'da; Almanya, Fransa, İngiltere, Hollanda, İspanya, Avusturya, İtalya, Belçika, Rusya, İsveç'de, Kuzey Amerikada; Kanada ve A.B.D'de, Güney Amerika'da; Paraguay, Brezilya, Arjantin, Asya'da; Hindistan, Filipinler, Malezya'da, Afrika'da; Madagaskar, Mısır, Avusturya ve Güney Afrika Cumhuriyeti olmak üzere oldukça yaygın bir coğrafyaya yayıldığını görebiliriz (DPT, 2001).

Tablo 2. 1 Türkiye Silis Kumu Rezervleri ve Özellikleri (Kurşun ve İpekoğlu, 1995)

Bölgeler	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Al ₂ O ₃	%K ₂ O	%Na ₂ O	%CaO	K.K	Rezerv (ton)
İstanbul								
Avcıkoru	97,23	0,95	1,32	0,14	0,06	0,04	1,14	200 000 (1)
Kirazlıyatak	96,5	0,6	2,1	0,39	0,07	0,22	0,3	6 758 692 (2)
Kızılca	97,17	0,38	1,78	0,22	0,05	0,03	0,31	160 000 (1+3)
Karakiraz	98,2	0,41	0,44	0,31	0,06	0,15	0,24	-
Kabakça	97,13	0,5	1,1	0,4	0,07	0,1	0,3	330 000 (3)
Akalan	97,40	0,4	-	0,59	0,06	0,09	0,3	390 000 (3)
Yalıköy	99,1	0,11	0,34	0,062	0,01	0,024	0,11	13 000 000 (1)
Çiftlikköy	97,82	0,6	0,6	0,17	0,01	0,03	0,3	-
Karatepe	96,30	0,6	1,4	0,39	0,05	0,1	0,4	-
Elbasan	93,24	0,5	3,6	0,71	0,12	0,07	1,2	-
Sarıyer	97,4	0,13	1,1	0,18	0,02	0,1	0,31	960 000 (1+2+3)
Elmaklık	98,81	0,31	1,21	0,12	0,03	0,14	0,24	1 900 000 (K)
Dikimce	99,02	0,11	0,12	0,02	0,23	0,02	0,42	800 000 (1)
Beykoz	-	-	-	-	-	-	-	0(K)+60 000(1)
İstanbul Toplam								410 000 000
Tekirdağ	91,63	0,075	4,44	2,55	0,07	0,05	0,31	6 338 773 (2)
Zonguldak	98,40	0,38	0,72	0,02	0,01	0,02	0,25	267 271 875 (1)
Sinop	89,95	2,8	4,3	0,58	0,3	0,19	0,6	37 000 000 (1)
Genel Toplam								720.618.648
1: Mümkün rezerv, 2: Görünür Rezerv, 3: Muhtemel Rezerv, K: Kaynak Rezerv								

Farklı ülkeler arasında bulunan çok çeşitli terminoloji ve spesifikasyonlardan dolayı çoğu ülkede silis kumu ve çakıl üretimi hakkında kesin olarak veri elde edilemese de, Amerika Birleşik Devletleri'nin tahmini dünya üretim rakamlarına göre, önde gelen endüstriyel kum ve çakıl üreticisi ve tüketici olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, Amerika Birleşik Devletlerinde 2019 yılında 35 eyaletteki 308 adet saha operasyonu sonucu, 191 şirket tarafından yaklaşık 5,7 milyar dolar değerinde endüstriyel kum ve çakıl üretimi sağlanmıştır. ABD üretim tonajının yaklaşık %73'ü hidrolik kumu ile paketleme ve çimentolama kumu olarak kullanılmıştır. Cam kumu ve diğer tam taneli silika olarak her biri %7 oranında; döküm kumu olarak %3; seramik hammaddesi olarak diğer öğütülmüş silika ve yapı ürünleri dolgu maddeleri için her biri %2 ve rekreasyonel kum için %1 oranında kullanılmıştır. Aşındırıcılar, kimyasallar, dolgu maddeleri, filtrasyon kumu, metalürjik akış, çatı kaplama granülleri, silis çakıl ve çekme kumu, endüstriyel kum ve çakıl son kullanımlarının kalan %3'ünü oluşturmuştur.

Yeryüzünde silis kumu rezervi oldukça fazla olmasına rağmen bazı durumlarda kalite kaynaklı sorunlar, çevresel kısıtlamalar ve üretim maliyetleri bakımından üretim ekonomik olmayabilir. Yıllara göre dünya silis kumu üretimleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2. 2 Yıllara Göre Dünya Silis Kumu Üretimleri (1000 ton)

Ülkeler	2018	2019
ABD	121000	110000
Avustralya	3000	3000
Bulgaristan	7250	7300
Kanada	2500	2500
Fransa	9310	9300
Almanya	7500	7500
Hindistan	11900	12000
Endonezya	5540	5500
İtalya	14000	14000
Japonya	2520	2500
Kore	4300	4500
Malezya	10000	10000
Meksika	2360	2400
Hollanda	54000	54000
Yeni Zelanda	2320	2300
Polonya	5120	5000
Güney Afrika	2400	2400
İspanya	35500	36000
Türkiye	13500	14000
İngiltere	4000	4000
Diğer Ülkeler	17200	21300
Toplam	335220	329500

2.2.4 Silis Kumu Kullanım Alanları

Silis kumu genelde seramik, cam, döküm sanayiinde, boya, inşaat, plastik sanayiinde, aşındırıcı ve kimyasal üretimi gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Son zamanlarda mutfak tezgahlarının yapımında farklı boyutlarda granül hale getirilmiş olan kuvarslar reçine ile karıştırılarak şekillendirilmesiyle kullanılmaktadırlar.

Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları kurumu'nun 2017 tarihli silis çalışma raporuna göre, satılan ya da kullanılan yaklaşık 102 Mt endüstriyel silis kumu ve çakıldan %73'ü kuyu dolgusu ve çimentolama için, %7'si cam yapım kumu ve %7'si diğer tam taneli silika olarak tüketilmiştir. Diğer başlıca kullanımlar ise, %4 oranında döküm sanayi, her biri %2 olmak üzere yapı ürünleri için diğer öğütülmüş silika ve tam tahıllı dolgu maddeleri ve kimyasallar için ve yine her biri %1 oranında olmak üzere filtrasyon kumu ve rekreasyonel kum için kullanılmıştır (USGS, 2017).

2017 yılında kırma kumu olarak silis kumu tüketiminin 2016 yılına oranla %53 arttığı kaydedilmiştir. Genel olarak ise silis kumu-çakıl tüketimi, silikon ve ferrosilikon metal üretimi için %13 azalma göstermiştir.

2.3 Diatomit

2.3.1 Diatomit Tanımı ve Özellikleri

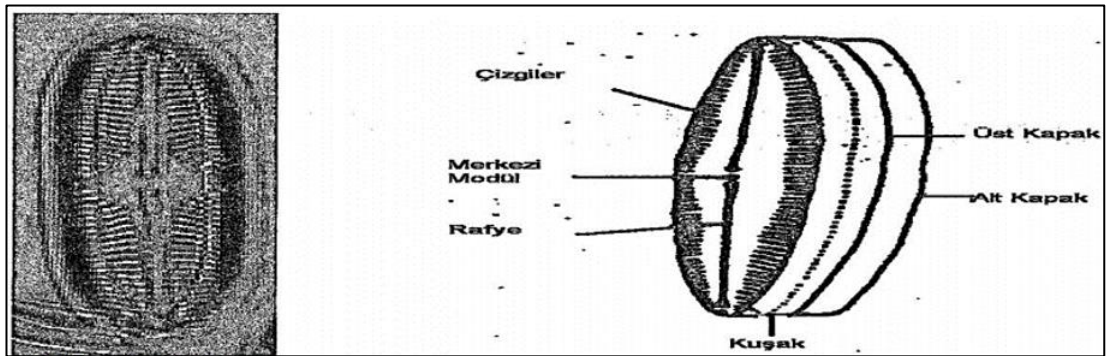
Diatomit ya da kizelgur olarak bilinen yapı, ökaryotik, tek hücreli su yosunlarının zamanla fosilleşmesi ile bunların silisli kısımlarından meydana gelmiş organik ve sedimenter bir çöktir. Aynı zamanda biyolojik kökenli tek doğal mineraldir. Diatomit oluşumunu tamamlayabilmesi için silisli kabuk içeren yapılar bir araya gelerek çökmesi gerekir (Taş ve Çetin, 2012). Genel olarak 50-100 µm boyutlarında olan mikroskobik su yosunları yüksek oranda silis içerir ve yıldız, çubuk, silindir gibi çok farklı şekillerde görülebilir. İleri düzeyde görüntüleme yöntemleri ile incelendiğinde iç kısımları boş, delikli bir yüzey yapısına sahiptir. Bu yapıları sebebi ile oldukça hafiftirler (Dinler, 2012). Kuru özgül ağırlığı 0,15-0,40 g/cm³ aralığındadır. Mohs ölçeğine göre sertliği 4,5-6 arasında değişim göstermektedir. Boşluk oranı yaklaşık %80-85 arasında değişen, gevşek bir yapıya sahiptir ve ele alındığında una benzer bir şekilde dağılım göstermektedir. Yüksek su emme kabiliyeti sayesinde kendi ağırlığının üç katı kadar su emebilir. Doğada renk bakımından beyazdan griye giden bir renk skalası içerisinde görülebilirken yapısında bulunan elementlere göresiyaha kadar farklı renklerde de bulunması mümkündür (Aruntaş, 1996; Savaş, 2012).

Doğal bir puzolan olan diatomit binlerce yıldır, söndürülmüş kireç ile bir araya getirilerek, su altında da dayanım kazanmaya devam etmekte olan beton yapımında kullanılmıştır. Çimentonun keşfinden sonra da mineral malzeme olarak ikame edilerek kullanılmaya devam etmiştir. Genel olarak puzolanların, gerek beton özelliklerine kattığı olumlu etki gerekse ekonomik ve ekolojik sebepler nedeniyle beton sanayisinde önemi gün geçtikçe artmaktadır (S. T. Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

2.3.2 Diatomit Oluşumu

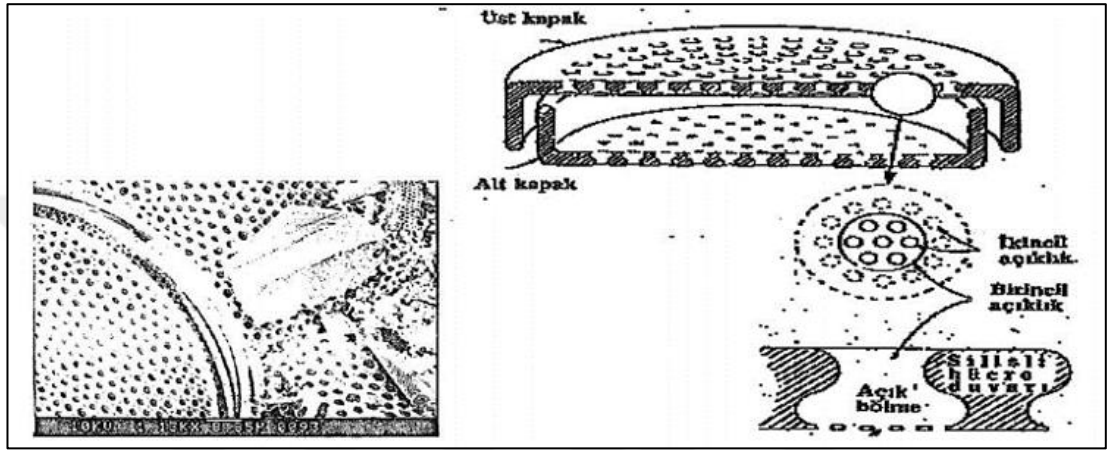
Diatomit, diatom denen ve muhtelif jeolojik devirlerde yaşamış küçük canlıların, protistlerin fosillerinden meydana gelmiştir. Diatomlar, genellikle tatlı veya tuzlu sularda münferit veya koloniler halinde yaşarlar. Diatom denen bu varlıklara, ikiye ayrılabilen bir hücre yapısına sahip oldukları için ve çubuk şeklinde olan türlerinden dolayı botanikte bacilariophyta adı verilmiştir (Hustedt, 1956).

Biri içeride kalan, diğeri onun üzerinden geçen iki parçadan ibaret bir kutuya benzeyen diatomların hücre çeperleri, mekanik olarak birbirinden kolaylıkla ayrılabilir. Üstte yer alan ve büyük olan kapağa epiketa, alt kısımda yer alan kapağa ise hipoteka ismi verilir. Diatom kabuğunun çevresini kapsayan kısma kuşak denir. Yandan görünüşü genellikle dikdörtgene benzeyen diatomların, üstten görünüşleri cinsine göre oldukça değişmektedir. Çubuk şekilli diatomların üzerinde rafe isminde, tek veya iki parça halinde alt kısımdan üst kısma dek uzanan bir yarık bulunmaktadır. Ayrıca kabukların üzerinde diatomitin mukavemetini artıran muhtelif girinti ve çıkıntılar bulunmaktadır (Yıldız, 1997)(Şekil 2.4).



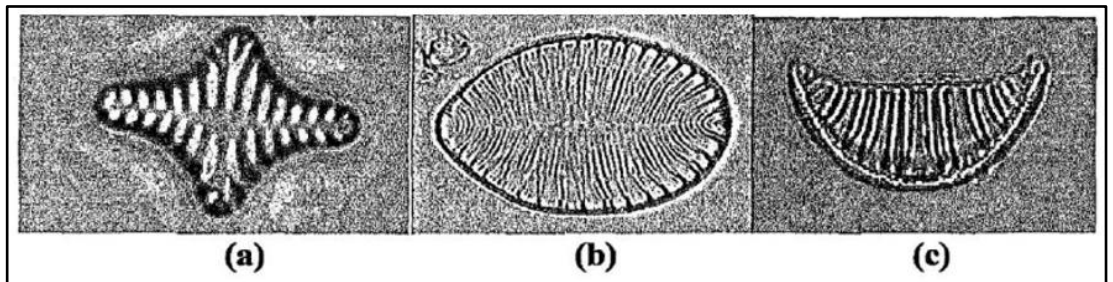
Şekil 2. 4 Çubuk şekilli bir diatomun görünüşü (Yıldız,1997)

Elips ya da dairesel şekle sahip diatomların en küçükleri 2,5 µm çapında, en büyükleri ise nadiren 2 mm çapında bulunmaktadır. Çubuk şekline sahip diatomların boyu ise nadiren 2 mm'yi geçmektedir. Diatomların ortalama çapı ve uzunlukları 5-100 µm arasındadır. Diatom kavkısı üzerinde yer alan deliklerin çapı 0,01 µm'den dahi küçük olabilmektedir. Genel olarak 0,037-0,52 µm arasında olan delik çapları, ortalamada ise 0,25 µm civarındadır (Yıldız, 1997)(Şekil 2.5).



Şekil 2. 5 Elips şekilli bir diatomun iç yapısı (Yıldız,1997)

Diatomlar, bulundukları ve geliştikleri yere bağlı olarak daire ve çubuk şekillerinden farklı olarak yıldız, elips, yarım ay vb. gibi değişik şekillerde de görülmektedir. (Yıldız, 1997)(Şekil 2.6).



Şekil 2. 6 Değişik diatom şekilleri (Yıldız,1997)

Bazı diatom cinsleri (genus), özellikle nitschia denen cinsi çok kirli akarsularda yaşamaktadır. Bakteriler ve bazı organizmalar ile birlikte bu diatom cinsleri, akarsuların kendi kendini temizlemesini sağlayan önemli bir etken olmaktadır. Bir diatom, bir aylık süre zarfında uygun ortam şartlarında bir milyar yeni diatom oluşturabilmektedir.

Diatomların gelişmesi için en uygun çevresel şartlar şunlardır:

- Yeterli SiO_2 miktarı (1-20 mg/lt),
- Nötr veya hafif alkali sular,
- Düşük sıcaklık (3-16 °C),
- Düşük fosfat ve nitrat muhtevası.

2.3.3 Diatomitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Diatomitin çeşitli fiziksel özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Diatomit yüzeyleri, 0,037-0,52 μm boyutlarındaki mikro delikli hücrelerden oluşmaktadır ve yüksek poroziteye sahiptir.
- Diatomitler geniş yüzey alanına sahiptir.
- Diatomit kavrıkları kırılabilir özelliktedir.
- Diatomitlerin ısı, ses ve elektrik iletkenliği oldukça düşüktür.
- Diatomitler beyaz, açık sarı vb. soluk renklere sahiptir.
- Diatomitlerin yoğunluğu (birim hacim ağırlığı) oldukça düşüktür.

Diatomit kimyasal etkilere karşı oldukça dayanıklıdır. Hatta hidroflorik asit dışında çoğu asitten etkilenmemektedir. Bu yapısıyla tercih edilen bir malzeme olmasının sebebi porozite, düşük birim hacim ağırlığı, elastik davranışı, izolasyon ve mukavemet özellikleridir (Dinler, 2012). Diatomitin kimyasal yapısına genel olarak baktığımızda net bir standart oluşturulamamasına rağmen %70-90 arasında SiO_2 'den oluşmaktadır. Diatomitin ticari olarak kullanılabilmesi için SiO_2 %85 değerinin altına düşmemelidir. Bunun dışında en çok %5 Al_2O_3 , %1,5 Fe_2O_3 , %1 CaO , %0,5 MgO , %1 alkali oksit içermelidir. Basınç dayanımı değerleri de 3-18 kgf/cm^2 aralığındadır (Aruntaş, 1996).

Türkiye’deki mevcut 13 değişik diatomit yatağında yapılan incelemelerde kimyasal açıdan ana bileşenlerin üst, alt ve ticari değer açısından sınır değerleri Tablo 2.3’de sunulmuştur (Taş ve Çetin, 2012).

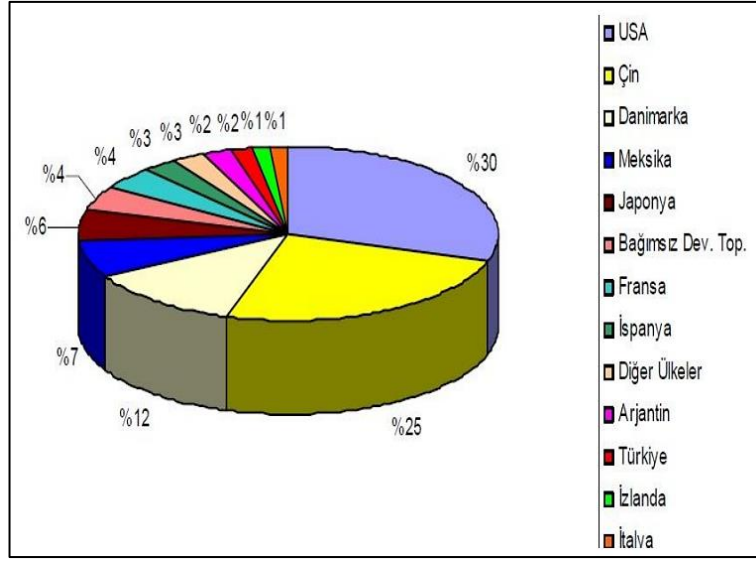
Tablo 2. 3 Türkiye diatomitlerinin min/max kimyasal değerleri ve bileşim sınır değerleri

Kimyasal	%min	%max	%Sınır Değeri
SiO₂	65,42	87,48	En az 85
Al₂O₃	0,81	3,42	En çok 5
Fe₂O₃	0,64	2,48	En çok 1,5
CaO	0,71	9,37	En çok 1
MgO	0,39	7,20	En çok 0,5
A.K	3,54	13,42	
Alkali Oksitler			En çok 1
Kızdırma Kaybı			En çok 6

2.3.4 Dünyada ve Türkiye’de Diatomit Üretimi ve Rezervleri

Dünyanın hemen hemen her yerinde diatomit yataklarına rastlanılmaktadır. Özellikle rezerv bakımından en zengin ülke Amerika Birleşik Devletleridir. Bu sebepten en fazla tüketimde Amerika’da görülmektedir. Avrupa’da ise diatomit tüketiminde Hollanda, Almanya ve İngiltere takip etmektedir. Bunun yanında Kanada ve Avustralya da diatomit kullanımı artmaktadır. Son zamanlarda Ortadoğu ve Arap ülkelerinde kullanımı artmaya devam etmektedir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları kurumu’nun 2017 yılı verilerini baz alarak yapmış olduğu bir çalışmada, üretim açısından Amerika’da %30, Çin’de %25, Danimarka’da %12, Meksika’da %7, Japonya’da %6, Bağımsız Devletler Topluluğu’nda %4, Fransa’da %4, İspanya’da %3, Türkiye’de %2, Arjantin’de %2, İzlanda’da %1, İtalya’da %1 ve diğer ülkelerde %3 oranında diatomit üretimi yapıldığı tespit edilmiştir (USGS, 2017)(Şekil 2.7).



Şekil 2. 7 Dünya 2010 yılı diatomit üretimi (USGS, 2017)

Ülkemizde ise Ankara, Afyon, Kayseri, Balıkesir, Bursa, Çanakkale, Eskişehir, Kütahya, Nevşehir, Van önemli bazı diatomit merkezleri olarak bilinmektedir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001). İngiliz Jeolojik Araştırmaları Doğal Çevre Araştırma Konseyi'nin 2009 yılında gerçekleştirdiği dünya diatomit üretimini belirlemeye yönelik çalışmada, Türkiye'nin en son 1999 yılında 5926 ton diatomit üretimi yaptığı, sonraki yıllarda ise Türkiye'de diatomit üretilmediği tespit edilmiştir (Brown vd., 2011)



Şekil 2. 8 Türkiye diatomit yatakları

2.3.5 Diatomit Kullanım Alanları

Diatomitin birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır. Diatomitler;

- Filtrasyon işlemlerinde filtre yardımcı malzemesi olarak şeker üretiminde, meyve suyu vd. içeceklerin üretiminde, yağların süzülmesi işlemlerinde, su filtrasyonu ve temizlenmesinde, ilaç sanayisinde,
- Katkı maddesi olarak boya, diş macunu, lastik, plastik, ilaç, kozmetik, kâğıt, cila, temizlik maddesi gibi ürünlerin elde edilmesinde,
- Dolgu malzemesi olarak,
- Silis kaynağı şeklinde kimyasal maddelerin hazırlanmasında ve katalizör şeklinde taşıyıcı olarak kimyasal reaksiyonlarda,
- Isı, ses ve elektrik iletkenliğinin düşüklüğü sebebiyle izolasyon malzemesi üretiminde,
- Hafif yapı elemanları imalatında,
- Aşındırıcı ve yüzey arındırıcı olarak kullanılmaktadır (Taş ve Çetin, 2012).

2.3.6 Diatomit ile İlgili Yapılan Çalışmalar

İlkenntapar ve Özsoy, diatomitin yüksek oranda silika minerali içermesi nedeniyle geopolimer harçlarda doğal bir puzolan olarak kullanımını incelemiştir. Kütle bazında %1, %2, %3, %4 ve %5 diatomit içeren uçucu kül bazlı geopolimer harçlar, alkali aktivatör ile 3 farklı (%8, %10 ve %12) Na oranlarında üretilmiştir. Üretilen geopolimer harçlar, 2 farklı kür sıcaklığında (60°C, 90°C) ve 3 farklı kür süresinde (24, 48, 72 saat) ısıl kür işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen test sonuçlarına göre, diatomit ikamesi referans harca göre geopolimer harçların eğilme mukavemetini (%30 mertebesinde), basınç mukavemetini (%35 mertebesinde) ve optimum alkali oranında

aşınma direncini artırmıştır. %2 oranında diatomit ikamesi, 300°C ve 600°C yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra 60°C'de kürlenene geopolimer harçların basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Bu nedenle diatomitin geopolimer harçlarda doğal bir puzolan olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. (İlkentapar ve Özsoy, 2022)

Sinsiri vd. yaptığı çalışmada, uçucu külün diatomit ile değiştirilmesinin geopolimer harçların özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Harç karışımlarında uçucu kül yerine kütlece %0, %60, %80 ve %100 oranında diatomit ilave edilmiştir. Geopolimerizasyonu başlatmak için karışımda sıvı olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılmış olup, karışımlar 75°C sıcaklıkta 24 saat boyunca kür işlemine tâbi tutulmuştur. Sonuçlar, geopolimer harç yapımında uçucu kül yerine diatomit ikamesinin harç numunelerinin işlenebilirliğinde ve basınç dayanımında artışa neden olduğunu ortaya koymuştur. (Sinsiri vd., 2012)

İlkentapar ve Örkemez, diatomit ikamesinin F sınıfı uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, diatomit ikame edilen geopolimer harçların birim ağırlık özellikleri, ultrasonik geçiş hızı, yarmada çekme dayanımı ve ısı iletkenlik katsayısı özellikleri incelenmiştir. Ayrıca geopolimer harçların mikro yapısı üzerine FESEM incelemeleri yapılmıştır. Çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) aktivatör olarak seçilmiş olup, bağlayıcı olarak kullanılan malzemeye oranla ağırlıkça %10 Na^+ içerecek şekilde karışıma ilave edilmiştir. Harç karışımlarında uçucu kül yerine kütlece %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında diatomit ilave edilmiştir. Karışımlara 90°C sıcaklıkta 24 saat boyunca kür işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar, uçucu kül yerine %1, %2 ve %3 oranında diatomit ikamesi ile üretilen geopolimer karışımın referans numuneye göre daha boşluksuz bir yapıda olduğunu ortaya koymuştur. %4 ve %5 oranında diatomit ikame edilmesi ise, geopolimer harcın daha boşluklu bir yapıya sahip olmasına neden olmuştur. Bunlara paralel olarak, uçucu kül yerine %3 oranında diatomit ikame edilmesi ile en yüksek yarma dayanımı, %5 oranında diatomit ikame edilmesi ile ise en düşük ısı iletkenlik katsayısı elde edilmiştir. Ek olarak, diatomit ikame edilen geopolimer harçlarda ısı iletkenlik katsayısı ile yarma dayanımı ($R^2=0,9645$), ultrasonik geçiş hızı ($R^2=0,9275$) ve birim ağırlık değeri ($R^2=0,9327$)

arasında yüksek oranda doğrusal ilişki olduğu sonucuna varılmıştır (İlkentapar ve Örklemmez, 2020).

Yan vd., Hidrojen peroksit yöntemi ile diatomit tozu ilave edilerek açık hücreli diatomit tozları içeren metakaolin bazlı geopolimer köpükler üretmişlerdir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmanın geopolimer numunelerinin mikro yapısı, gözenek yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Numuneler, oda sıcaklığında tipik bir amorf faz yapısı elde etmiştir. Numunelerin görünür gözenekliliği yaklaşık %74'e ulaşmıştır. Numunelerin basınç dayanımı, sıcaklığın 1200°C'ye yükseltilmesiyle de artmıştır (9,28 MPa). Yüksek görünür gözenekliliğe sahip hafif köpüklü geopolimer numunelerinin, membran üretimi ve benzeri endüstriler için büyük potansiyele sahip olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. (Yan vd., 2021).

2.4 Andezit

2.4.1 Andezit Tanımı ve Özellikleri

Andezit kayacı Güney Amerika bölgesindeki Ant dağlarında (Andes) çok yaygın olarak görüldüğü için ismini buradan almış ve ilk defa Von Bush tarafından söz edilmiştir (Çoğulu, 1973).

Andezitler; içerisinde en temel minarelerden olan Plajiyoklaz, Hornblend, Biotit, Ojit, Hipersten barındıran volkanik kökenli yüzey kayalarıdır. Bu kayaç türüne doğada diğer kayalara oranla hacimce daha büyük miktarlarda rastlanır (Uz, 2000).



Şekil 2. 9 Andezit kayacı örneği (Ağaoğlu, 2021)

Andezit ve bazaltlar birbirleri arasında benzerlik geçişleri göstermektedirler, dolayısı ile araştırmacılar belirli kriterler kullanmışlardır. Alman araştırmacılar her iki kayacı birbirinden ayırt edebilmekte, plajiyoklazlardaki anortit (%50) oranın miktarı önem arz edildiği kabul etmişlerdir. Diğer Amerikalı araştırmacılar ise %40 olarak belirtilen renk indisinin gerektiğini öne sürmüşlerdir (Erkan, 1999).

Andezitler, taze yapıda olan kayaçların tane boyutlarına ve mineral oranına göre gri ve açık gri tonları arasındaki renklerde görülür. İnce tane boyutuna ve içerdiği volkan camı miktarına bağlı olarak andezitler koyu gri-siyah arasında renk tonlarında da bulunmaktadır. Ayrıca andezitin bozulması ile birlikte kahverengi ya da kırmızıya yakın renk tonlarına, kloritleşmesi ile birlikte ise gri-yeşilimsi renk tonlarına da rastlanmaktadır (Erkan, 1999).

2.4.2 Andezit Bulunuş Şekilleri

Diyoritlerin yüzey taşı olan andezit, genellikle diyoritlerle aynı yapıda bulunur. Ayrıca afonitik bir hamura sahip olup, profirik dokudadırlar. Andezitler, magmatik kayaçlar sınıfının volkanik grubunda yer almaktadır. Andezit madeni öğeleri biyotit, andezin, hornblent ve asit olarak sıralanabilir. Andezit mikrolitli bir bünyeye sahip olduğu gibi, içerisinde şekilsiz maddeleri de bulundurmaktadır (Uz, 2000).

Andezitler genellikle gri, açık ya da koyu yeşil, pembe ve siyahımtırak renklerde bulunmakta olup, muhtevastaki minerallerin yüzde oranına göre koyu kahverengi ve kızıl renklerde kristalleri de bulunmaktadır (Sayar, M., 1955).

Andezitlerin mineralojik bileşiminde biyotit, plajiyoklaz, piroksen ve hornblend bulunur. Manyetit de kayaçta opak mineral olarak her daim bulunur. Bunların dışında kuvars, alkali feldispat ve çok nadir olarak olivin yer alır.

Andezitler, içerdiği demir-magnezyumlu minerallere göre dört grupta incelenir. Biyotitli andezit, Ojitli andezit, Hiperstenli andezit ve Hornblentli andezit olmak olarak türleri mevcuttur (Aslaner, 1989).

Andezitler, dasitlerle, riyolitlerle ve bazaltlarla birlikte kıta kenarlarında, ada yaylarında ve organik kuşakların çok eski volkaniklerinde bulunan bir volkanik kayadır. Andezitin de içerisinde yer aldığı magmatik kayalar mineralojik bileşimlerine, dokularına ve bulunuş şekillerine göre sınıflandırılır (Pampal, 1991)

Tablo 2. 4 Magmatik kayaların sınıflandırılması (Pampal, 1991)

MAGMATİK KAYAÇ SINIFLAMASI								
AÇIK RENKLİ KAYAÇLAR					ORTA RENKLİ KAYAÇLAR		KOYU RENKLİ KAYAÇLAR	
	Ortoklas Çoğunlukta		Ortoklas & Albit		Plajiyoklas Çoğunlukta		Plajiyoklas Çoğunlukta	Feldispatlı
	Albit Azınlıkta							
	B H P ⁽⁴⁾		B HP		B HP	HBP	P HO	OP HB
	Kuvarslı	Kuvarssız	Kuvarslı	Kuvarssız	Kuvarslı	Kuvarssız	Kuvarslı	Kuvarssız
Faneritik ⁽¹⁾ (Fenokristal) ve tümü kris.	GRANİT	SİYENİT	KUVARS	MONZONİT	KUVARS DİYORİT	DİYORİT	GABRO	PERİDOTİT
	PEGMATİT		MONZONİT				DİYABAZ	HORNBLENİT
	APLİT		GRANODYO					PİROKSENİT
Porfiritik ⁽²⁾	GRANİT PORFİR	SİYENİT PORFİR	KUVARS MONZ.	MONZONİT PORFİR	KUVARS DİYORİT	DİYORİT PORFİR	GABRO PORFİR	
			PORF. GRANOD. PORF.					
Afanitik ⁽³⁾	RİYOLİT	TRAKİT FONOLİT	RİYODASİT	TRAKİAND LATİT	DASİT	ANDEZİT	BAZALT	
(Mikrokrist)								
CAMSI	VİTROFİR (Fenokristal bulunur)							
	OPSİDİYEN VE PEKŞTAYN, PUMİS (Fenokristal bulunmaz)							
1) Faneritik: Çıplak gözle görülebilen her boy kristalli								
2) Porfiritik: Daha iri kristallerin bir camı ve/ya da bir afanitik kristalli hamur içinde bulunması								
3) Afanitik: Çıplak gözle görülemeyen kristalli								
4) B=Biyotit, H=Hornblend, P=Piroksen, O= Olivin. Bu minerallerden bir ya da daha çoğu bulunabilir.								

2.4.3 Andezitin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Yerli ve yabancı araştırmacılar tarafından andezit üzerinde farklı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Andezitlerin taze, ayrılmış, çok ayrılmış ve tamamen ayrılmış hallerdeki mekanik ve fiziksel özellikleri, Tablo 2.5’de verilmiştir (Babal, 1994).

Tablo 2. 5 Andezitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri (Babal, 1994).

Mekanik ve Fiziksel Özellikler	Taze	Az ayrılmış	Çok ayrılmış	Tamamen Ayrılmış
Tek Eksenli, Basınç Dayanımı $f_b(\text{kg/cm}^2)$	1500	1500-600	600-85	85
Elastisite Modülü $E_t(\text{kg/cm}^2 \times 10^5)$	9,7-2,1	3,7	-	-
Poisson Oranı ν	0,037-0,009	0,25	0,33-0,36	-
Porozite n (%)	0,25	6,71-18	18-30	30-60
Özgül ağırlık G_s (gr/cm^3)	2,45	2,45-2,2	2,2-1,93	1,93
Çekme dayanımı f_{yc} (kg/cm^2)	90	90-69,76	-	-
Deprem dalgası hızı (m/sn)	4500	4500-3000	3000-1500	1500-600
Su emme oranı S_k (kütlece %)	1,01	3,65	-	-
Kesme dayanımı τ (kg/cm^2)	192,54	-	-	-

2.4.4 Andezit Üretimi

Kuvaterner ve Tersiyer dönemlerindeki volkanizma hareketleri dolayısıyla meydana gelen andezitik bileşime sahip kor kayaçlar (lav, tuf ve tüfitler) Türkiye'nin İç Anadolu ve Batı belgelerinde sık görülmektedir (Topaş, 2005). Tarihin neredeyse her döneminde, söz konusu kayaçlar her medeniyetten taş ustalarının dikkatini çekmiştir. Agora, odeon, anfî tiyatro ve kale surları gibi yapılarda (örneğin Bergama, Ankara Kalesi, Asos, İzmir Kadife Kale vb.) yapı taşı olarak kullanılan andezitler, özellikle Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde camii, kilise, şifahane, kümbet, kervansaray, medrese, köprü, türbe gibi yapılarda da hem yapı taşı olarak hem de süsleme amaçlı oldukça sık kullanılmıştır. Günümüzde Eczacılık topluluğu tarafından simge olarak kullanılan "kupaya sarılmış yılan" ve Tıp topluluğu tarafından simge olarak kullanılan "çift yılan" figürleri, orjinal olarak Selçuklular tarafından "Çankırı Şifahanesi" önünde andezit taşından yontulmuştur. Fakat buna rağmen geçmişte andezit taşının en sık kullanıldığı kent Ankara'dır. Bu sebeble andezit, "Ankara Taşı" olarak da anılmaya başlamıştır. Ankara içerisinde bordür taşı ve yapı taşı üretme amaçlı faaliyet gösteren andezit ocakları, kent sınırlarının genişlemesiyle belediye mücavir alan sınırları içerisinde kalmıştır. Bu sebeple zamanla faaliyetlerini sona

erdirmek zorunda kalan andezit ocakları, 1970’li yılların başından itibaren tamamen kapanmıştır. Andezit ocaklarının kapanması ile birlikte, Ankara içerisinde bulunan yollarda oldukça fazla beton bordür kullanılmaya başlanmıştır. 1995 yılına gelindiğinde, yollarda beton bordür kullanım oranının %80’leri bulduğu tahmin edilmektedir. Yaklaşık 20 yıl aradan sonra yine Ankara-Gölbaşı’nda andezit taşı işleyen 30’dan fazla fabrika ve atölye kurulmuştur. Daha sonra arzın artması ile andezite olan talep de artmıştır. Son 20 yılda, şehrin görünüşünü değiştiren Hacı Bayram Camii, Dikmen Vadisi, Vedat Dalokay Parkı, Altınpark gibi onlarca çevre düzenleme projesinde döşeme ve kaplama taşı olarak andezit kullanılmıştır (Yener, 2005).

2.4.5 Andezit Kullanım Alanları

Andezitler, bilhassa dış ortamlarda, mermer ve granitin kullanıldığı her alanda kullanılmaktadır. Andezitler;

- Yaygın olarak duvar döşemeleri ve kaplamalarında,
- Darbelere karşı yüksek dayanım sergilemesi dolayısıyla, dekoratif amaçla merdiven basamaklarında,
- Kaldırım yüzeylerinin kaplanmasında ve bordür taşı uygulamasında,
- Duvar üstü harpuшта uygulamasında,
- Park, bahçe ve çevre düzenleme çalışmalarında,
- Mezarlık ve çeşme yapımında,
- Tarihi yapıların özelliklerine uygun olarak kullanılacak malzemeler bulunamaması halinde restorasyon işlemlerinde,
- Dekoratif amaçla çiçeklik, çöp kutusu ve bank yapımında, pencere kenarlarında,

- Zorlu iklim şartlarına karşı dayanıklı olması sebebiyle bazı yapılarda dış cephe kaplama malzemesi olarak,
- Sıcaklığa karşı dayanıklı bir malzeme olduğu ve dekoratif bir görüntü sağladığı için şömine yapımında kullanılmaktadır.

2.4.6 Andezit ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Çelikten, yapmış olduğu çalışmada atık andezit tozu kullanılarak üretilen geopolimer harçların mikroyapısal özelliklerini incelemiştir. Bu özellikleri araştırmak için, alkali aktivatör olarak farklı oranlarda NaOH ve atık andezit tozu kullanılarak geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretilen atık andezit tozu esaslı taze geopolimer harçlar 100°C sıcaklıkta üç farklı periyotta (12, 24 ve 48 saat) kürlenmiştir. Sonuçlar, NaOH miktarı optimum konsantrasyona (12 M) ulaşana kadar andezit bazlı geopolimer harçların ultrasonik geçiş hızının, eğilme dayanımının ve basınç dayanımının NaOH miktarının artmasıyla beraber arttığını ortaya koymuştur. Kür süreleri, atık andezit tozu bazlı geopolimer harçların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini de önemli ölçüde etkilemiştir. Sonuçlar, daha yüksek kür süreleri ile daha yüksek basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinin elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, atık andezit tozu ile geopolimer üretiminin sürdürülebilir harç üretimi ve atıkların ortadan kaldırılması için çözüm vadedebileceği sonucuna ulaşılmıştır. (Çelikten, 2021)

Özkan ve Ceylan, andezit taşlarının kesilmesi sırasında ortaya çıkan ve toz halinde depolanan andezit atıklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanılması ve ekonomiye geri kazandırılması için çimento esaslı kompozitlerde kullanım olanaklarını araştırmışlardır. Bu amaçla, çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında atık andezit ikame edilmesi ile üretilen çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. 28 ve 90 günlük yaşlarda elde edilen sonuçlar, atık andezit tozunun gözenekli yapısından dolayı karışımların gözenekliliğini arttırdığını ve bu nedenle çimento yerine düşük oranlarda (%15 civarı) atık andezit tozu ikame edilmesiyle daha pozitif sonuçlara ulaşıldığını ortaya koymuştur. Çimento yerine %5 oranında atık andezit tozu ikame edilerek

Üretilen imento esaslı numunelerde basınç, eğilme ve çekme dayanımları açısından referans numuneye yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, imento yerine %30 oranında atık andezit tozu ikame edilerek üretilen imento esaslı numunelerde, eğilme ve basınç dayanımları referans numuneye göre sırasıyla 2,31 ve 1,88 kat artmıştır (zkan ve Ceylan, 2022).

2.5 Geopolimer

2.5.1 Geopolimer Tanımı ve zellikleri

Geopolimer, alüminosilikat bakımından zengindir ve bu nedenle imento ailesine benzer özelliklere sahiptir (Hardjito vd., 2004; Lloyd ve Rangan, 2010; Singh vd., 2015). Geopolimer kompozitler, suyun varlığında reaktif değildir, böylece uygun sertleşme için bir alkalın ortamı gerektirmektedir (Adak ve Mandal, 2019; Wongsavd., 2020). Ayrıca, geopolimer alternatif bağlayıcılar, 3 boyutlu bir polimerik yapı oluşturarak yük taşıma yeteneğine sahiptir. Bu durum, geopolimerin alimunosilikat içeriği ile yüksek amorf yapısından kaynaklanmaktadır. Çimento bileşeni güçlü doğal alkalın içeriğine sahiptir, bu nedenle suyla verimli bir şekilde reaksiyona girmektedir (Dao vd., 2019). Bununla birlikte, alkali bir bağlayıcı aktivasyonunun bitişik matrisle bir bağ oluşturması için alkali bir ortam gerektirmektedir (Singh vd., 2015). Geopolimer, alçıtaşı imentosu ile geleneksel Portland imentosu arasındaki en yeni imento trendidir. Gelecekte, dünyanın en yaygın kullanılan inşaat malzemelerinden biri gibi görünmektedir (Amran vd., 2020). 1970'li yıllarda Prof. Joseph Davidovits ve Fransız araştırmacılar tarafından 'geopolimer' terimi adlandırılmış ve alkali çözeltinin alüminosilikat toz malzemelerle birleştirilmesiyle üretilen bir grup bağlayıcı malzeme olarak tanıtılmışlardır (Davidovits, 1994).

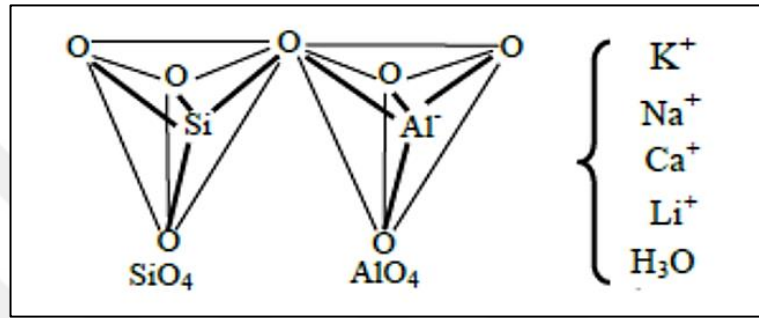
Geopolimer, ısı veya ortam krleme koşullarında farklı formülasyonlarla üretilen çok çeşitli alüminosilikat ürünleri için yaygın olarak kullanılan genel bir terimdir. Geopolimer teknolojisi kozmetik, farmakoloji, tarım, seramik, yalıtım ve beton altyapılarından oluşan çeşitli uygulamalarda gelişen bir teknolojidir (Shayan, 2016). Beton teknolojisinde, geopolimer, önemli çevresel avantajlar sağlamak için geleneksel Portland çimentosuna karşı çıkan çimentosuz ve sürdürülebilir alternatif bir bağlayıcı

olarak kabul edilmektedir. Geopolimer, farklı kür koşullarında silika ve alümina bakımından zengin çok çeşitli kaynak malzemelerden sentezlenen büyük ölçüde amorf alüminosilikat bağlayıcı malzemeler sınıfı olarak ifade edilmektedir. Uçucu kül ve YFC gibi endüstriyel yan ürünler veya kalsineli killeri gibi jeolojik malzemeler alüminosilikat kaynak malzemelere örneklerdir. Geopolimer beton, sürdürülebilirlik ve çevresel etkilere yönelik endişelerin günümüzde inşaat sektöründe önemli hususlar haline gelmesinden bu yana son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Bu nedenle, geopolimer betonun geleneksel Portland çimento betonlarına kıyasla önemli ölçüde daha az çevresel etkiye, potansiyel olarak faydalı mühendislik özelliklerine ve ekonomik özelliklere sahip olduğuna inanılmaktadır (Shayan, 2016).

Geleneksel Portland çimentosu üretimi için büyük miktarda enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji, kil ve kalker karışımlarının yakılması için gerekli olan çok yüksek sıcaklığa ulaşmak için tüketilmektedir. Genel bir kural olarak, bir ton geleneksel Portland çimentosu üretimi nedeniyle neredeyse bir ton CO₂ yayılmaktadır. Bu CO₂ emisyonunun yarısı 1800°C'de kalkeri yakmak için gereken enerjiye, geri kalanı ise CaO yapmak için kalkerden CO₂'nin kimyasal salınımı ile ilişkilendirilir (Davidovits, 1994). Buna karşılık, uçucu kül bazlı geopolimer üretiminin, geleneksel Portland çimentosunun üretimi için neredeyse %60 daha az enerji tükettiği bildirilmiş, bu da atmosfere daha az CO₂ emisyonu ile sonuçlanmaktadır (Li vd., 2004). (Duxson, Fernández-Jiménez, vd., 2007) yaptıkları çalışmada, geleneksel Portland çimentosunun üretimine kıyasla uçucu kül bazlı geopolimer üretiminden %80 daha az CO₂ emisyonu elde edilmektedir. Geopolimer çimento ve betonun çevresel avantajları esas olarak kireç taşının yakılmasının üretim sürecinde yer almamasından ve bu nedenle geopolimerlerin üretimi için çok daha az enerjiye ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır.

Buna ek olarak, geopolimer malzemelerin genellikle uçucu kül ve YFC gibi mevcut atık ürünlerden (yan ürünler) sentezlenmesi, bu atık ürünlerin bertaraf edilmesine olan ihtiyacın azalması nedeniyle doğal kaynakların daha iyi kullanılmasına ve çevresel faydalara olanak sağlamaktadır (Shayan, 2016).

Geopolimer, Davidovits tarafından yarı kristal üç boyutlu alüminasiliklere amorf olarak tanıtılmıştır. Geopolimerin kimyasal yapısı, tüm oksijen atomlarını birbirine bağlayan ve paylaşan SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral zincirli üç boyutlu Si-Al ağından oluşur. Ağın IV⁻ kat koordinasyonunda Al^{3+} 'ın negatif yükünü dengelemek için sistemde Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} gibi pozitif iyonlar gereklidir. NaOH ve KOH tarafından aktive edilen metakaolinden yapılan erken geopolimer bu çerçevenin modeli olmuştur. Ağ yapılandırması Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Olivia ve Nikraz, 2012).



Şekil 2. 10 Sialat, iyonik kavramın tetrahedral konfigürasyonu (Olivia ve Nikraz, 2012)

Polisyalat (PS), polisyalat-siloxo (PSS) ve polisallat-disiloxo (PSDS) olmak üzere üç tür polisyalat vardır. Polisyalatın ampirik formülü aşağıda gösterilen Denklem 2.6 ile belirlenmiştir:

$$\text{Mn}[-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO} - \text{O}]_n \text{wH}_2\text{O} \quad (2.6)$$

Denklemde:

Mn = Alkalın Elemanı (örnek: K veya Na)

n = polimerizasyon derecesi

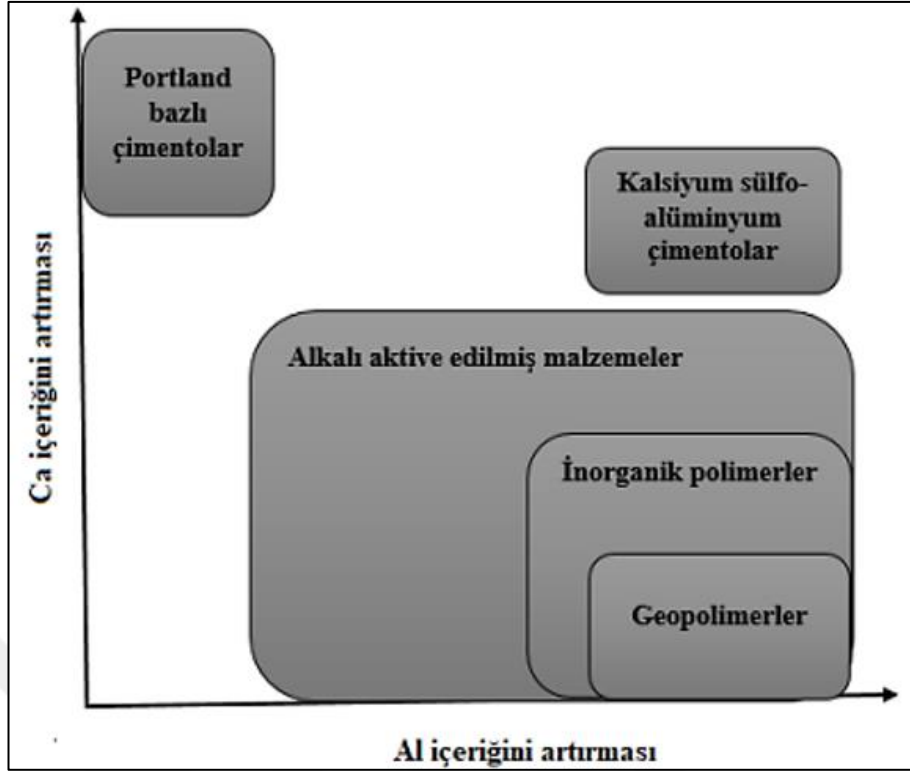
z = 1,2,3

Geopolimer malzemenin gelişimi temel olarak kaynak malzemenin mevcudiyetine bağlıdır. Metakaolin daha çok çeşitli araştırmacılar tarafından geopolimerin erken gelişiminde kullanılmıştır (Alonso ve Palomo, 2001; Van Jaarsveld vd., 2002). Metakaolin geopolimer, iyi mekanik özellikler, yangına dayanıklılık ve deniz suyu ortamlarında iyi dayanıklılık göstermiştir (Cioffi vd., 2003; Kong vd., 2007).

Metakaolin malzemesi sadece pahalı değil, aynı zamanda işlenebilir hale getirmek için çok miktarda sıvıya ihtiyaç duyduğundan araştırma amacıyla sınırlıdır.

Alümina-silikat bakımından zengin olan YFC ve uçucu kül gibi alkali aktivatörlerle aktive edilebilen diğer kaynak malzemelerin geliştirilmesi daha fazla potansiyeldir (Roy, 1999; Swanepoel ve Strydom, 2002). Her iki malzeme de atık olarak bol miktarda bulunan yan ürünlerdendir bu nedenle geopolimer üretmenin ilk maliyeti azaltılabilir. YFC ve uçucu kül geopolimer sırasıyla kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve alumunosilikat olmak üzere farklı nihai ürünler üretmektedir. Şimdiye kadar, her iki malzeme için de çalışmalar, YFC ve uçucu kül geopolimer uygulamalarını daha uygun hale getirmek için hala devam etmektedir.

Gelişiminde, birçok araştırmacı tarafından Geopolimer için kullanılan terminolojinin karışıklığa neden olabileceğini gözlemlemek ilginçtir. Terminolojinin şematik bir ayrımı Şekil 2.11'de verilmiştir. Metakaolin, YFC, uçucu kül, atık çamur (Pacheco-Torgal vd., 2007) ve pirinç kabuğuna (Detphan ve Chindaprasirt, 2009) kadar çeşitli malzemeler, birçok aktivatör türüyle aktive edilen orijinal terminolojiyi biraz değiştirmiştir. (van Deventer vd., 2010) yaptıkları çalışmada, kaynak malzemeye, alkali aktivatöre ve nihai ürüne dayanarak alkali aktive edilmiş malzemelerin, inorganik polimerlerin ve geopolimerlerin tanımını ayırt etmişlerdir. Geopolimerler, son ürünleri olarak alumunosilikat üreten inorganik polimerlerin ve alkali aktive edilmiş malzemelerin bir bölümü olarak tanımlanmaktadır. Kaynak malzeme genellikle alkali metal hidroksit veya silikattan alkali aktivatörler ile düşük kalsiyum uçucu kül ve kalsineli killerdir. İnorganik polimerler, nihai ürün olarak silikat ağını bozmuş alkali ile aktive edilen malzemelerin bir parçasıdır. C-S-H adı verilen nihai bir ürüne sahip alkali ile aktive edilmiş YFC, inorganik polimerlere dâhildir. Daha geniş tip, alkali aktive edilen malzemeler olarak bilinen katı bir silikat tozu ile alkali tuzun reaksiyonundan kaynaklanan herhangi bir bağlayıcı sistemidir.



Şekil 2. 11 Alkali aktive edilmiş malzemelerin farklı alt kümelerinin geleneksel Portland çimentoları ve kalsiyum sülföalüminat bağlayıcı kimyası ile karşılaştırılması (van Deventer vd., 2010)

2.5.2 Geopolimer Malzemelerin Bileşenleri

Geopolimer üretimi için kullanılan iki ana bileşen vardır. Bunlar kaynak malzemeler ve alkali aktivatörlerdir. Kaynak malzemeler hammadde veya öncül olarak da bilinmektedir. Alkali aktivatörler, suda çözülmesi gereken çözelti veya toz şeklinde olabilmektedir.

(Xu ve Van Deventer, 2002) yaptıkları çalışmada, kaynak malzemeler amorf formda yüksek miktarda silikon (Si) ve alüminyum (Al) içermesi gerektiğini bildirmiştir. Kaynak malzemeler kaolinit ve kalsine kaolinit (metakaolin) gibi jeolojik kökenlere (doğal mineraller) sahip olabilir veya uçucu kül ve YFC gibi endüstriyel yan ürün olabilir (Davidovits, 1984). Geopolimer üretimi için kaynak malzemelerin seçimini etkileyen kullanılabilirlik, maliyet, uygulama türü ve son ürünlerin özel talebi gibi çeşitli faktörler vardır (Hardjito ve Rangan, 2005).

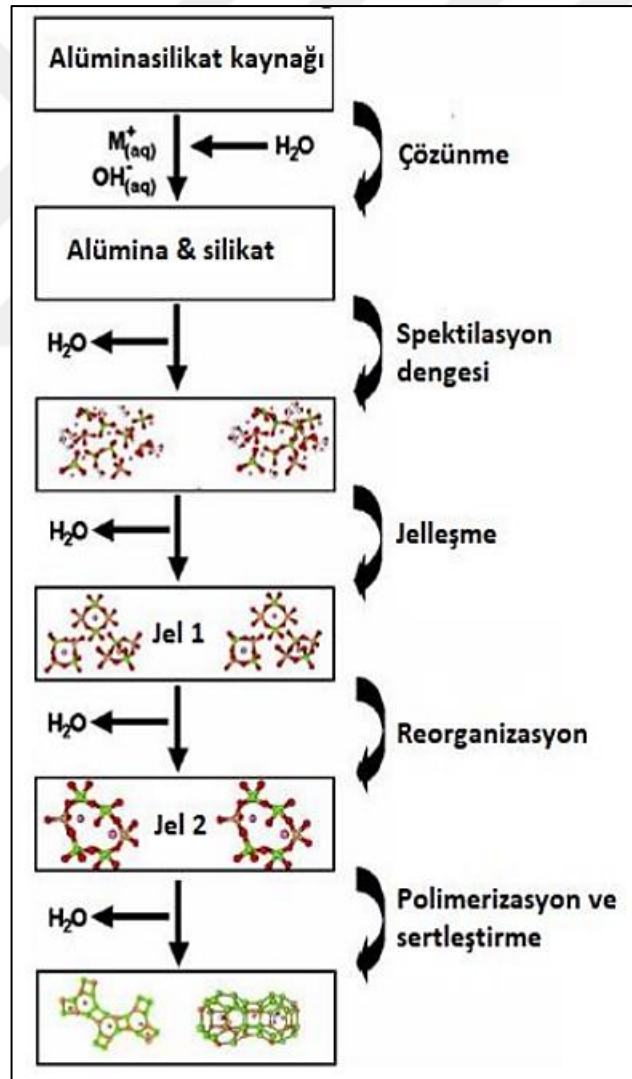
Literatürde doğal zeolit kaynak malzeme kullanılarak yapılan geopolimer malzemelerin özelliklerini ve uygulamalarını araştıran çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Baykara vd., 2017; Hu vd., 2009; Villa vd., 2010). Benzer şekilde, uçucu kül kullanılarak yapılan geopolimer malzemelerin uygulanması ve özellikleri üzerine kapsamlı araştırma çalışmaları vardır (Fernandez-Jimenez vd., 2006; Fernández-Jiménez ve Palomo, 2003; Rangan, 2008). Son olarak, toz kalkerin geopolimer üretimi için kaynak malzeme olarak uygulanmasıyla ilgili sınırlı araştırmalar vardır (Cwirzen vd., 2014; Morsy vd., 2019; Perez-Cortes ve Escalante-Garcia, 2020).

(Rowles, 2004) yaptığı çalışmada, alkali aktivatörler açısından, herhangi bir güçlü alkali çözelti geopolimer malzemelerin üretimi için kullanılabilirliğini bildirmiştir. (Davidovits, 1987) yaptığı çalışmada, eski çağlarda piramitlerin yapımında alkali aktivatör olarak kireç (Ca(OH)_2) çözeltisi ve kaynak malzeme olarak volkanik kül kullandığını bildirmektedir. (Alonso ve Palomo, 2001), ayrıca kireç (Ca(OH)_2)'nin geopolimer malzemelerin üretimi için alkali aktivatör olarak kullanılmasını incelemişlerdir. Günümüzde ise, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) veya potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) çözeltilerinin bir kombinasyonu, geopolimer beton ve harçların üretimi için alkali aktivatörler olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.5.3 Geopolimerizasyon

Geopolimerizasyon mekanizmasını açıklamak için çeşitli araştırmacılar tarafından bazı teoriler üretilmiştir (Duxson, Fernández-Jiménez, vd., 2007; Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005; Jo vd., 2007). Geopolimerizasyon mekanizması, sistemde yüksek pH, konsantre alkali, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık gerektiren zeolite benzer olarak tanımlanmıştır (Davidovits, 1991). Başlangıçta, silika ve alümina içeren alkali ile aktive edilmiş çimento için bir reaksiyon mekanizması Glukhovsky tarafından 1967'de önerilmiştir (Duxson, Fernández-Jiménez, vd., 2007). Bu modelin üç aşaması vardır: yıkım-pıhtılaşma, pıhtılaşma-yoğuşma ve yoğuşma-kristalizasyon. Bu teori, zeolit oluşumu hakkındaki mevcut bilgilere dayanarak alkali aktive edilmiş çimento mekanizmasını inceleyen birçok araştırmacı tarafından detaylandırılmıştır.

(Duxson, Fernández-Jiménez, vd., 2007), Şekil 2.12'deki beş büyük adımdan oluşan geopolimer reaksiyonunun başka bir mekanizmasını önermişlerdir. İlk olarak, kaynak malzemenin yüksek alkali iyonlarla çözünmesi alüminyum ve silikat türleri üretir. İkinci olarak, silikat ve alüminat türleri, alüminosilikat çözeltisi oluşturmak için spektilasyon dengesi aşamasında birbirine karıştırılır. Çözünme işleminden sonra sistemden su salındığı görülür. Üçüncü aşamada, yüksek pH'da yüksek konsantrasyonlu bir çözelti oluştuğunda, jelleşme işlemi geopolimer jel üretimi gerçekleşir. Dördüncü aşama, bir sonraki süreç, geopolimerin gözenek ve mikro yapısının geliştirildiği jel ağının yeniden düzenlenmesidir. Son adımda, üç boyutlu bir geopolimer üretilir.



Şekil 2. 12 Geopolimerizasyon için kavramsal model (Duxson, Fernández-Jiménez, vd., 2007)

Geopolimerizasyonun reaksiyon basamakları çeşitli faktörlerden etkilenir (Olivia, 2011). İlk faktör, malzemedeki amorf silika ve alümina miktarını, silika ve alüminanın çözünme oranını, hammaddenin ve safsızlıkların fiziksel özelliklerini içeren alüminosilikat bileşimi ve mineralojidir. İkinci faktör silikat konsantrasyonu ($\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ oranı), alkali metal katyonlarının türü, alkali çözelti konsantrasyonu ($\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$ oranı, burada M, Na ve K'ye eşittir) ve su içeriği (su/bağlayıcı oranı) ile ilgili aktive edici çözümlerdir. Son etkili faktör, sıcaklığın, kür süresinin ve sıcaklık düzeninin ve nemin etkisini içeren kür koşullarıdır.

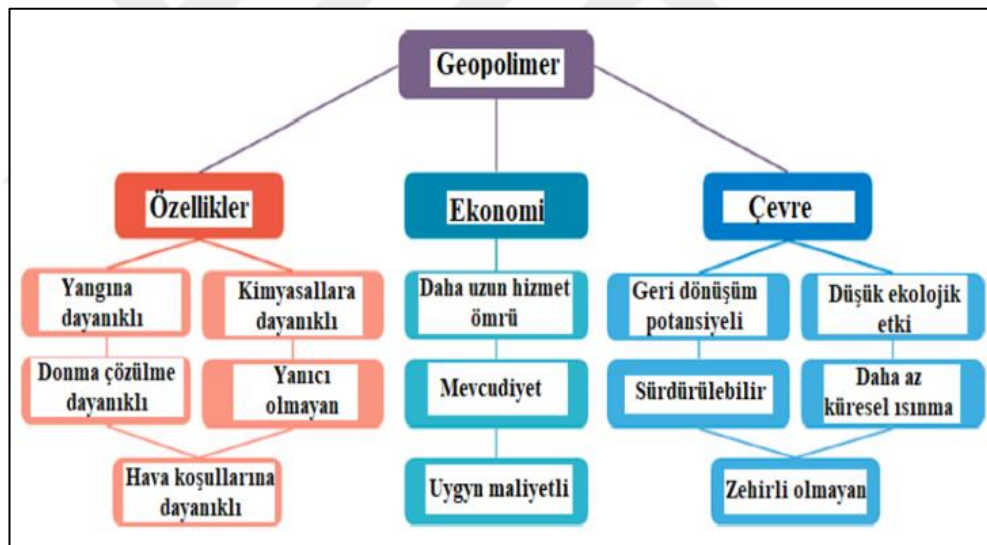
2.5.4 Geopolimerlerin Avantajları

Sürdürülebilirliğin temel amacı, çevre dengesini kesintiye uğratmadan gelecek nesillerin ihtiyaçlarını göz önünde tutarken, mevcut ihtiyaçları karşılamaktır (Mastrucci vd., 2017). Sürdürülebilirliğin temel direkleri ekonomi, toplum, çevredir ve çevreyi korumak için bu direkler korunmalıdır. Sanayi devrimi döneminde, mimarlar ve mühendisler, çevre üzerindeki genel olumsuz etkiyi hafifletmek için sürdürülebilirlik ilkesini yaratıcı bir şekilde kullanmışlardır. Bu nedenle, inşaat malzemelerinde 'sürdürülebilirlik' terimi yeşil bir çevre açısından uygun görünmektedir (Bilodeau ve Malhotra, 2000).

Dünya genelinde her yıl milyonlarca tonda endüstriyel atık üretilerek güvenli bertaraf ve depolamadaki yetersizlik nedeniyle çevresel bir yükümlülük haline gelmektedir. Daha sonra, bu tür atıklar (seramik atık tozu, uçucu kül ve YFC vb.) çevreyi (su ve arazi) kirletmektedir (Mucsi vd., 2014). Son zamanlarda, çeşitli çalışmalar (Hardjito ve Rangan, 2005; Mucsi vd., 2014) bu atık malzemeleri geri dönüştürmenin en iyi yolunun çimento içermeyen geopolimerler üretmek olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, seramik ve beton dâhil olmak üzere atık malzemelerin geopolimer endüstrilerinde agrega olarak yeniden kullanımı mümkündür (Akbarnezhad vd., 2015; M. A. Ariffin vd., 2015).

Geopolimerin kapsamlı üretiminin süreç boyunca kullanılan enerjiyi korumayacağı, aynı zamanda kirliliğin özellikle CO_2 emisyonlarının etkisini en aza indireceği açıktır (Mucsi vd., 2014). (Bondar, 2013) yaptığı çalışmada, alkali aktive alümina silikat ile

yapılan harcın karbon ayak izi ve maliyeti ile ilgili diğer bağlayıcılara göre avantajlarını bildirmiştir. Bu faktörlerin beton endüstrisinde sürdürülebilirliği artırmak için dikkate alınması önemlidir. CO₂ ayak izi ve geopolimer harçların maliyeti ile Portland bazlı çimento ile karşılaştırıldığında bileşimleri arasındaki ilişki kabaca ölçülmektedir. Geopolimer, geleneksel Portland çimentosu ve diğer ticari onarım malzemelerine kıyasla hem asit hem de tuz ortamlarında mükemmel özellikler göstermektedir (Hussin vd., 2015). Benzer şekilde, geopolimer harcı diğer malzemelere göre yüksek erken mekanik özellikler ortaya koymaktadır (Huseien vd., 2018; Phoo-ngernkham vd., 2015; Provis ve Van Deventer, 2009). Ayrıca, geopolimer kaynak malzemeleri atıkları kaynaklara dönüştürmek için umut verici yollar sağlar, böylece daha temiz bir çevreye katkıda bulunmak ve düşük karbon ayak izi beton üretmektedir (Karim vd., 2017; Nayaka vd., 2018). Geopolimerlerin önemli başlı özellikleri Şekil 2.13’de belirtilmiştir.



Şekil 2. 13 Geopolimer matris seçimini yöneten arzu edilen özellikler (Karim vd., 2017)

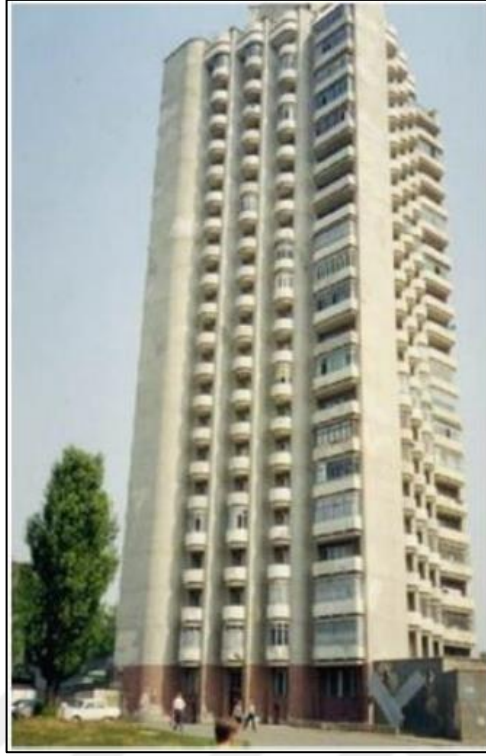
Literatür taraması, geopolimerlerin müthiş mekanik özelliklere sahip ve uzun ömürlü sahip olduğunu göstermiştir. Bu ayırt edici özellikler yüksek sıcaklıklara karşı direnç, asit ve sülfat ortamında yüksek performans, yüksek erken mukavemet, düşük gözeneklilik içermektedir (Şekil 2.14). Tüm bu yönler geopolimer kompozitleri inşaat mühendisliği, otomotiv ve uçak endüstrisi, zemin iyileştirme, prekast yapılar ve beton yapıların güçlendirilmesi alanlarda kullanılmakta olan potansiyel ve elmas bir aday haline getirmektedir.



Şekil 2. 14 Geopolimer kompozitlerin özellikleri (Nayaka vd., 2018)

2.5.5 Geopolimer Betonların Uygulamaları

Geopolimer gelişimi, Ukraynalı bilim adamı Gluskovsky'nin alüminosilikatlar (killer, kayalar, YFC gibi) ve alkali metal çözeltileri kullanarak sentezlenmiş bağlayıcılar üretme olasılığını ilk keşfettiği 1950'lerin sonlarında Ukrayna'da başlamıştır. Gluskovsky, bu bağlayıcılara "toprak çimentosu" ve ilgili betona "toprak silikatları" adını vermiştir. Bu malzeme Mariupol, Ukrayna'da 1960'larda iki adet 9 katlı konut inşa etmek için kullanılmıştır. 50 yıldan fazla bir süreden sonra bu binalar hala ayakta durmaktadır (Almutairi vd., 2021). Geopolimer teknolojisinin kullanılmasıyla yapılan birkaç bina daha vardır. Bununla birlikte, portland çimentosu kullanılmadan alkali aktive edilmiş betondan yapılmış 20 katlı konut binası 1989 yılında Rusya Federasyonu'nun Lieptsk kentinde inşa edilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2. 15 Alkali ile aktive edilmiş betondan yapılmış 20 katlı konut binası (Almutairi vd., 2021)

Geopolimer terimi, ilk olarak 1979'da Joseph Davidovits tarafından, bir alüminosilikat tozun (örneğin uçucu kül, YFC) ve alkalın çözeltisi (sodyum hidroksit ve sodyum silikat) reaksiyonu ile sentezlenen bir bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Davidovits tarafından üretilen uçucu kül bazlı geopolimer beton da agrega (kütleye göre %70-80) ve plastikleştiriciler içermiştir. Genel olarak bu geopolimer betonun üretimi geleneksel beton teknolojisi yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. O zamandan beri araştırmacılar geopolimer betonun mukavemeti ve dayanıklılığı konusunda kapsamlı çalışmalar yürütmektedir (Dawczynski vd., 2017).

Geopolimer teknolojisi, geopolimerlere faydalı olan kontrollü yüksek sıcaklık kür ortamına ek olarak hassas malzemelerin işlenmesinde kontrollü gereksinimlerin nispeten kolaylığı nedeniyle prekast uygulamalarda daha gelişmiştir. Bunun bir sonucu olarak, geopolimer betonun daha önceki uygulamaları demiryolu yataklı ve kanalizasyon borularının üretimindeydi. Bununla birlikte, kolonlar, kirişler ve hatta tünel segmentleri gibi yapısal elemanlar da geopolimer betondan yapılabilir. Kanalizasyon borularının üretiminde, geopolimer betonun tipik özelliği olan agresif çevreye karşı yüksek dayanıklılık ve direnç son derece gereklidir.

Birçok toprak agresif asitler içermektedir. Bu asitler, korozyona neden olarak yeraltına yerleştirilen beton ve çelik üyelerini etkiliyor. (Dawczynski vd., 2017) yaptıkları çalışmada, geopolimer betonun, çelik takviyelerin kullanıldığı uygulamalarda bile Portland çimento beton için iyi bir alternatif olduğundan bildirmişlerdir. Geopolimer betonun sülfat toprakları gibi zorlu ortamlarda beton ihtiyacını karşılaması bildirilmiştir. Böylece, geopolimer beton dayanıklı yapıların üretiminde ve ayrıca çeşitli onarım uygulamalarında sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılabilir.

Geopolimer beton, buz örtüsünü eritmek için tuz kullanıldığında kış mevsimlerinde daha az hasara neden olan klorüre karşı yüksek bir dirence sahiptir. Klorür korozyona karşı yüksek direnci nedeniyle, iskeleler, kıyı köprüleri gibi beton yapılar ve tuzlu suların sürekli saldırısı altında kalacak su altı beton destekleri için geopolimer beton kullanılabilir.

2.5.6 Geopolimer ile İlgili Yapılan Çalışmalar

ASTMC109 / C109M standarda göre betonun basınç dayanımı, inşaat malzemeleri için daha yüksek başlangıç mukavemetinin çok önemli olduğu en önemli fiziksel özelliktir. Eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modüllerini içeren diğer özellikler öncelikle basınç dayanımına bağlıdır. Geopolimer betonun dayanımını kalsiyum içeriği, sodyum hidroksitin molaritesi, bağlayıcı/agrega, çözelti/bağlayıcı, sodyum silikat/sodyum hidroksit, silikat/ Na_2O ve silika/alümina oranları gibi faktörlerden etkilenmektedir. Ayrıca, geopolimer betonun basınç dayanımının gelişimi de kaynak malzemeden, uygulanan kür koşullarından ve parçacık boyutu dağılımından etkilenmektedir (Assi vd., 2018). Isı kürlenmiş uçucu kül bazlı geopolimer beton, 1 gün sonra yüksek basınç dayanımı sağlar. Geopolimer, 80 ila 90°C arasında değişen bir sıcaklıkta kürlenirse, sınırlı saatlerde, dayanımın yaklaşık %90'ı elde edilebilir. Bununla birlikte, ortam koşullarında kür edilen geopolimer beton, geleneksel Portland çimento betonunda olduğu gibi zamanla dayanım elde etmektedir. Tüm kür koşulları uzun süreli dayanımla sonuçlanır (Hardjito ve Rangan, 2005), ve kür sıcaklığı sadece incelenen belirli bir karışımın nihai basınç dayanımını elde etmek için zamanda bir değişikliği tetiklemektedir. Geopolimer betonun mekanik özellikleri, geopolimer

betonun oranlama ve üretimi için kullanılan kaynak malzemelerden önemli ölçüde etkilenmektedir.

(Ismail vd., 2013) yaptıkları çalışmada, geopolimer betonun başlangıç basınç dayanımını değerlendirmek için farklı sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi oranlarına sahip geopolimer betonun üretiminde hammadde olarak metakaolin ve uçucu kül kullanmışlardır. Geopolimer betonun basınç dayanımı, sırasıyla uçucu kül bileşim, yüzey alanı ve parçacık şekillerinden önemli ölçüde etkilenmiştir. Bu çalışmaların sonuçları, Al/Si oranının 2'den büyük artırılmasının geopolimerizasyon işlemini geciktirmesi ve geopolimer betonun başlangıç basınç dayanımını azaltması sonucuna varılmıştır (Al-Mashhadani vd., 2018).

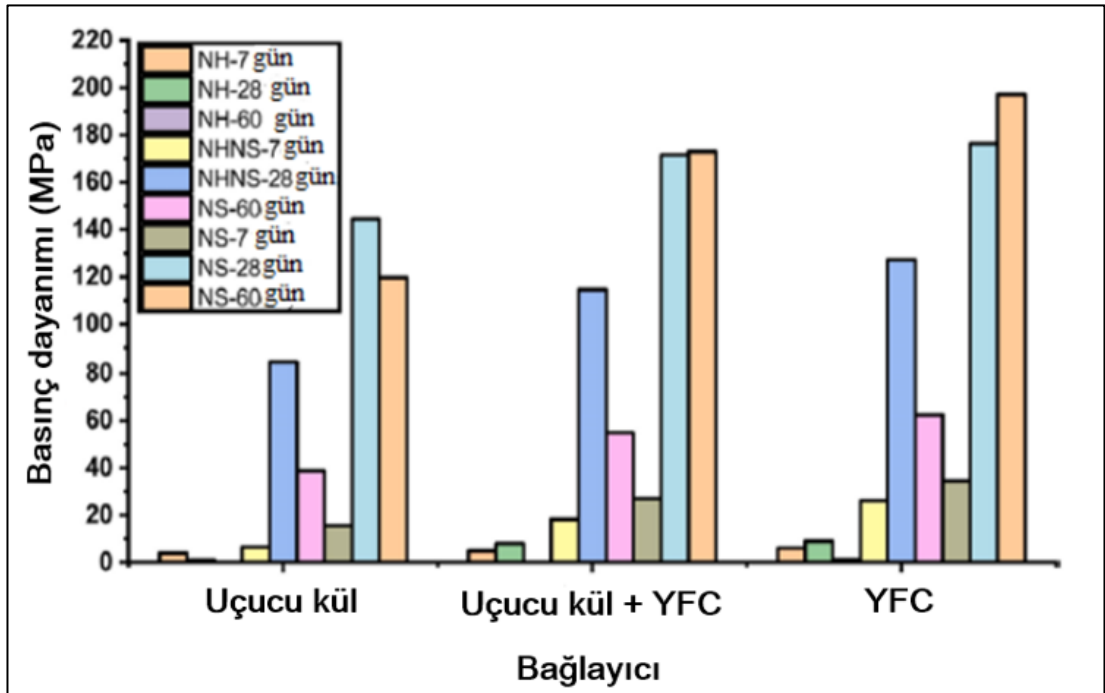
(Huseien vd., 2018) yaptıkları çalışmada, YFC'yi metakaolin ile değiştirerek %0 ila %15 seviyeleri arasında değişen dozajlarla geopolimer harçlar üretmişlerdir. YFC yerine kullanılan metakaolin miktarı %10-15'ten artırıldığında, 28 günlük kür edildikten sonra ortaya çıkan geopolimer harçların basınç dayanımı 42 Mpa'dan 63,1 MPa'ya yükselmiştir.

Çeşitli bilim adamları %50 ve %100 geri dönüştürülmüş beton agrega içeriğine sahip geri dönüştürülmüş beton agrega bazlı geopolimer betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir ve geopolimer betonun basınç dayanımının 7 ila 28 gün arasında yaklaşık %10 arttığını gözlemlemişlerdir (Brake vd., 2016; Nuaklong vd., 2016; Shi vd., 2012). (Petermann vd., 2010) yaptıkları çalışmada, geopolimer üretiminde uygun oranlarda metakaolin ile YFC ve uçucu kül kullanılarak uygun bir basınç dayanımı elde edilebileceğini gözlemlediler. (Palomo vd., 1999) yaptıkları çalışmada, 85°C'de 1 günlük kürlenmiş çeşitli uçucu kül örneklerini aktifleştirmek için 8-12 M sodyum hidroksit kullanmanın, 35 ila 40 MPa arasında değişen basınç dayanımına sahip bir geopolimer malzemeyle sonuçlandığını ortaya çıkarmışlardır. Bununla birlikte, sodyum hidroksit ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=1,23$) için sodyum silikat eklenirse, 90 MPa'ya kadar mukavemet elde edilebilmektedir. Ayrıca, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ sadece önemli bir faktör değildir, aynı zamanda bu gibi durumlarda su/bağlayıcı oranı da göz önünde bulundurulmalıdır (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005; Z. Xie ve Xi, 2001). (Songpiriyakij vd., 2010) yaptıkları çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimer betonda

maksimum basınç dayanımı elde etmek için 15,9 olarak en uygun SiO₂/Al₂O₃ oranını önermişlerdir.

(Naskar ve Chakraborty, 2016) yaptıkları çalışmada, geopolimer betonun yüksek basınç dayanımının gelişimini incelemek için bir dizi deney yapmışlardır. %70 YFC ve %30 uçucu kül karışımı oranı kullanmış ve 66 MPa bir basınç dayanımını elde edilmişlerdir.

Geopolimer hamurların basınç dayanımı aşağıdaki Şekil 2.16'da gösterildiği gibi bağlayıcının yapısına bağlıdır. Artan YFC içeriğinin sodyum silikat (NS), sodyum hidroksit (NH) ve sodyum hidroksit artı sodyum silikat çözeltisi (NHNS) serisi için basınç dayanımında bir artışı tetikleyeceği gözlenmiştir. Bu artış, Alümina ve silika ile reaksiyona gelerek C-A-S-H jeli oluşturan ve geopolimer jellerle aynı anda bulunan kolayca kullanılabilen serbest Ca²⁺ iyonlarından kaynaklanmaktadır (Haneefa vd., 2013; Kumar vd., 2010). Buna ek olarak, alkali çözeltilerin YFC ile reaksiyonu, geopolimerizasyon işleme yardımcı olan ısıнын üretildiği ekzotermik bir reaksiyondur. Bu nedenle, YFC içeriğindeki artış, geopolimer hamurların basınç dayanımını artırmaktadır (Phoo-ngernkham vd., 2015).



Şekil 2. 16 Atık malzemeler ve aktivatörlerin ile basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Phoo-ngernkham vd., 2015)

Herhangi bir yapısal elemanın dayanıklılığı, yıpranma, bozulma, kimyasal saldırı ve aşınmaya karşı direncidir. Dayanıklılık, yapısal bütünlük için olumsuz bir ortamda önemli bir bileşendir. Kılcal su emme, su emme, gözenekli boşluk miktarı, klorür emme, sülfat veya diğer asit saldırıları gibi özellikler geopolimer betonun dayanıklılığına karar verebilmektedir. Ayrıca, geopolimer betonun geleneksel portland çimentosu ile üretilen betondan genellikle daha fazla dayanıklılığa sahip olduğu bildirilmiştir. Geopolimerlerin kullanım avantajlarından biri de geopolimerden oluşan nihai bağlayıcı malzemelerin dış etmenlere karşı performansdır.

(Duan vd., 2017) yaptıkları çalışmada, YFC, uçucu kül ve metakaolin içeren geopolimerin 100 donma-çözülme çevrimine karşı etkisini incelediler ve kalan son kütlenin henüz %80'den büyük olduğunu fark etmişlerdir. Başlangıçta, ilk 25 donma-çözülme çevrim için numune yüzeyinde hamur ve agrega ayrımı ile küçük bir kayıp meydana gelmiştir. Ayrıca, 50 donma-çözülme çevrim tamamlandıktan sonra, parçacıkların etrafındaki hamur kaplamasının bozulduğu ve zayıf temaslı agregaların bir kısmının karışımdan salındığı gözlenmiştir. Son olarak, 100 çevrim tamamlanmasından sonra, çok sayıda parçacığın gevşetildiği, geopolimer betonun kaplamasının bozulduğu ve iç hasarlar gözlemlendiği fark edilmiştir. Artan donma-çözülme çevrimleri, numune kütlesinin azalmasına neden olarak ortaya gelmektedir.

(Topçu vd., 2014) yaptıkları çalışmada, SiO_2 ve Na_2O oranını dalgalandırarak alkali aktive edilmiş kömür alt kül bazlı geopolimer betonun dayanıklılığını ve mikroyapısal özelliklerini incelediler. Donma-çözülme çevrimleri basınç dayanımında azalma olduğunu göstermektedir. SiO_2 /kömür alt külü oranı arttıkça donma-çözülme karşı direncin arttığı sonucuna varmışlardır. (Zhao vd., 2019) yaptıkları çalışmada, YFC içeriğini değiştirerek F sınıfı uçucu kül bazlı geopolimer betonun donma-çözölmeye karşı direncini incelediler. Sonuçlar, %10 kalsiyum miktarı içeren uçucu kül bazlı geopolimer betonun donma-çözülme direncinin yetersiz olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, kalsiyum içeriğinin %10'dan %50'ye yükseltilmesi, donma-çözülme direncinin 5'ten 225 çevrime artmasına neden olacaktır, bu da önemli bir iyileşme göstermektedir. 50 çevrim uygulandıktan sonra geopolimer beton numuneleri mühendislik gereksinimini karşılamaktadır. Bu örnekler 50 çevrinden sonra donma-

çözölmeye karşı direnç göstermiştir, ancak 225 döngüden sonra ağ şeklinde bir çatlak deseni de görölmüştür.

(Shahrajabian ve Behfarnia, 2018) yaptıkları çalışmada, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonun donma-çözölme çevrimlerine karşı direnci üzerinde nano-silika, nanoalümina ve nano-kil içeren nanopartiküllerin etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, nanosilika ve nano-kilin, donma ve çözölme çevrimlerine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonunun mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmada nano-alüminadan daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir.

(Zhao vd., 2019) yaptıkları çalışmada, sırasıyla kür sıcaklığını ve kür süresini değiştirerek kırmızı çamur bulamacı-F sınıfı uçucu külü üzerindeki donma-çözölme çevrimlerin tepkisini incelemişlerdir. Hem mekanik mukavemet hem de mikroyapısal karakterizasyonun sonuçları, kürlenme koşulların, mukavemet gelişimlerini etkileyerek geopolimer numunelerin donma-çözölme direncini etkilediğini göstermektedir. 50°C'de 14 günlük kürlenmiş numuneler, donma-çözölmenin erken aşamasında daha fazla geopolimerizasyon göstermiş, ancak donma-çözölmenin sonraki aşamasında geopolimer jelin kısmi çözönmüştür. 50°C'de 28 günlük kürlenmiş numuneler, donma-çözölme sırasında sadece geopolimer jelin kısmi çözönmemesinin meydana gelmesi muhtemeldi, çünkü mukavemet gelişiminin donma-çözölmeden önce tamamlanması muhtemeldi.

(Nazarpour ve Jamali, 2020) yaptıkları çalışmada, numunelerin donma-çözölme direncini incelemek için geri dönüştürölmüş agrega ile YFC kullanmışlardır. Yazarlar, numunelerin donma-çözölme çevrimlerine karşı uzun süreli bir dirence sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Donma-çözölme çevrimlerin sonuçları, geopolimer betonun basınç dayanımında önemli bir kayıp olmadığını ve bu durumlarda iyi direnç gösterdiğini görölmüştür. Numunelerin dayanım ve ağırlığında 100, 200 ve 300 donma-çözölme çevrimden sonra ölçölen kayıplar sırasıyla %7, %11, %14 ve %2,1, %4-5,5 ve %7,6 çıkmıştır. (Ekinci vd., 2019) yaptıkları çalışmada, donma-çözölmenin volkanik tüf bazlı geopolimer üzerindeki etkisini Nanomedia ve stiren-bütadien lateks kullanarak incelemişlerdir. Yazarlar, sodyum silikat ve sodyum hidroksit alkali bir çözeltisi kullanılırken donmaya karşı önemli bir direnç fark etmiştir. Stiren-bütadien

lateksli numuneler donma-çözölmeye karşı aşırı direnç göstermektedir. Geopolimer betonda nano-silika kullanması matrisi daha yoğun hale getirir, boşluğu doldurur ve dayanıklılık yaklaşımlarında olduğu gibi kararlı tarafını gösteren geopolimerizasyona yardımcı olmaktadır.

(Škvára vd., 2006) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimer numuneleri hazırlanmış ve daha uzun süre magnezyum ve sodyum sülfat çözeltilerinde tabi tutulmuştur. Geopolimerlerin numune bozulması belirtisi olmadığı için sülfatlara direndiğini belirtmişlerdir. Geopolimer numuneleri Portland çimento numuneleri ile karşılaştırıldığında, geopolimer numunelerinde yaklaşık 2 yıl boyunca sürekli olarak çözeltilde tutulduklarında net bir hasar gözlenmemiştir.

(Thokchom vd., 2010) yaptıkları çalışmada, magnezyum sülfat çözeltisindeki uçucu kül bazlı geopolimer harçların performansını incelemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Örnekler 24 haftaya kadar bekletilmek için ağırlıkça %10 magnezyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Örneklerin performansı, görsel görünün, çözeltinin pH'ının değişmesi, ağırlıktaki değişim ve maruz kalma süresi boyunca basınç dayanımı değişikliği açısından değerlendirilmiştir. Örneklerin yüzeyinde başlangıçta yumuşak olan ancak daha sonra sert kristallere dönüştürölen beyaz tortular oluşmuştur. Solüsyonun pH'ı, ilk haftalarda harç örneklerinden göçünü gösteren belirgin bir şekilde artmıştır. 24 hafta sonunda örnekler az ağırlık kazanmış ve basınç dayanımı %56'ya kadar düşmüştür.

(Baščarević vd., 2015) tarafından yapılan çalışmada, iki farklı uçucu kül örneğine dayanan geopolimerler, 365 günlük bir süre boyunca sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisine (50 g/l) maruz bırakılmıştır. Sülfat çözeltisi saldırısının geopolimer harçların dayanımında küçük bir azalmaya neden olduğu bulunmuştur. Na_2SO_4 çözeltilerinin optik emisyon spektroskopisi ile analizi, geopolimer numunelerinin Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılmasının alüminosilikat jel, silikonun elemanlarından birinin sızmasına neden olmuştur. Numunelerin mineralojik analizleri, sülfat iyonları ile reaksiyona bağılı olarak herhangi bir yeni fazın oluşumunu göstermemiştir. Sülfat atağına bağılı olarak alüminosilikat geopolimer jelindeki değişiklikler, elektron mikroskopisi ve nükleer manyetik rezonans ile

araştırılmıştır. Numunelerin sülfat çözeltisi ile işlenmesinin, alüminosilikat jel yapısında Si–O–Si bağlarının kırılmasına neden olduğu bulunmuştur. Si–O–Si bağlarının kırılması ve Si'nin ayrıştırılması, test sırasında sülfat çözeltisinin pH değerindeki artışın bir sonucudur.

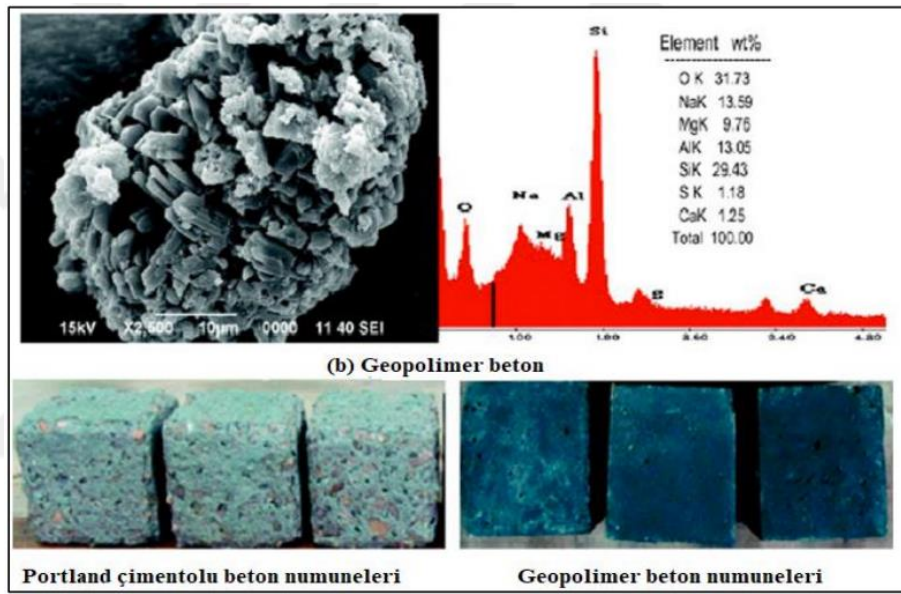
(Rajamane vd., 2012) yaptıkları çalışmada, %5 MgSO₄ ve Na₂SO₄ çözeltilerinde 90 gün boyunca uçucu kül bazlı geopolimer betonun sülfat direncini gözlemlemişlerdir ve kütle kaybının %2,4 olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, uçucu kül bazlı geopolimer beton, Portland çimento betonunda %9-38'e kıyasla daha az olan %2-29 basınç dayanım kaybı göstermiştir. Portland çimento betonun bozulması öncelikle betonun parçalama, genişleme ve çatlaması ile sonuçlanan etrenjit ve fazla alçı oluşumundan kaynaklanmaktadır. Aksine, geopolimer beton genellikle genişlemeye neden olmak için karışımda mono-sulphoaluminat ve Ca(OH)₂ içermemektedir.

(Bakharev, 2005) yaptığı çalışmada, geopolimer betonların asitlere ve sülfatlara karşı üstün direnç gösterdiğini belirtmiştir. (Ismail vd., 2013) yaptıkları çalışmada, sülfürik asidin iyonlaşmasından elde edilen H⁺ iyonlarının geopolimerdeki alüminosilikat ağı zarar verebileceğini gözlemlemişler ve jel polimerden Al³⁺ iyonları ve silisik asit H₄O₄Si üretmişlerdir.

(Petermann vd., 2010) yaptıkları çalışmada sülfat atağı, etrenjit (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26H₂O) ve fazla alçı oluşumu nedeniyle Portland çimento betonun zayıflamasına neden olduğunu ve bunun betonda parçalanma ve çatlama ile sonuçlandığını belirtmişlerdir. Asitlere maruz kaldığında geopolimer malzemeler, kaynak malzemelerin düşük kalsiyum içeriği nedeniyle daha iyi performans gösterir. Ettringit ve alçı taşı geopolimer çimentodan üretilmediği için düşük kalsiyumlu, ısı kür edilmiş uçucu kül bazlı geopolimer çimentoda sülfat atak mekanizması gözlenmediğini belirtmişlerdir.

(Ariffin vd., 2013) yaptıkları çalışmada, sülfürik asidin karışımli kül geopolimer örnekleri üzerindeki etkisini incelemişler ve kontrol örnekleriyle karşılaştırmışlardır. Geopolimer beton, 365 günden fazla bir süre boyunca %2 sülfürik aside maruz kalmış, geopolimer betonda sabit çapraz bağlı alüminat silikat yapısının oluşumu nedeniyle

geleneksel Portland çimentosu ile üretilen betona kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Karışımli kül geopolimer numunesi için kütle ve basınç dayanımındaki kayıplar %8 ve %35 olarak gözlenirken, geleneksel Portland çimento betonu için sırasıyla %20 ve %68 idi. Sülfürik aside maruz kaldığında karışımli kül geopolimer örneğinin SEM görüntüleri (Şekil 2.17) yeni farklı fazlarda kayda değer bir gelişme göstermezken, geleneksel Portland çimentosu ile üretilen betonda yüzeyde yumuşak beyaz çökeltiler gözlenmiş ve 1.5 yıla kadar sülfürik aside maruz kaldığında çok gözenekli hale gelmiştir.



Şekil 2. 17 Geopolimer ve Portland çimento betonların aside karşı tepkisi (Ariffin vd., 2013)

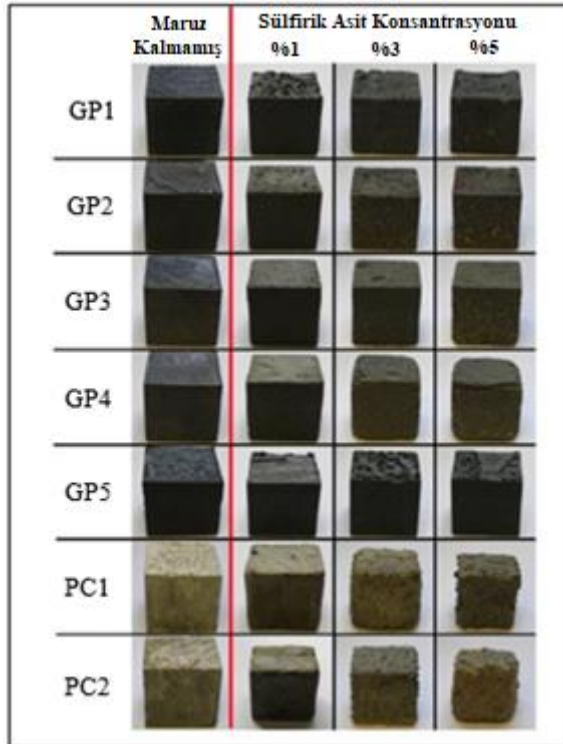
(Deb vd., 2016) yaptıkları çalışmada, Nano-silika ile geopolimer beton içeren numunelerin sülfürik aside maruz kaldığında direnç gösterdiğini fark ettiler. Sonuç, maruz kalma süresi arttıkça, numunenin kütlelerinin yavaş yavaş azaldığını göstermektedir. Nano-silika içermeyen uçucu kül içeren geopolimer beton numunesinde kütle kaybının %5,41 olduğu, %2 Nano-silika içeren karışım için ise 90 günlük aside maruz kaldıktan sonra kütle kaybının %1,9 olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, Nano-silika içermeyen Portland çimento betonunun kütle kaybı %6 olurken, %2 Nano-silika içeren karışım için 90 günlük maruz kaldıktan sonra sırasıyla %2,3 olduğu gözlenmiştir.

(Okoye vd., 2017) yaptıkları çalışmada, silis dumanının varlığında geopolimer betonun dayanıklılığını incelemek için sodyum klorür ve sülfürik asit kullanmışlardır.

Geopolimer betonun mukavemet ve kütlelerindeki kayıpların Portland çimento betonlarından daha az olduğunu bildirmişlerdir. Geopolimer beton asitlere maruz kaldığında kararlı direnci göstermektedir.

(Aiken vd., 2018) yaptıkları çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimerlerin uçucu kül içeriğindeki artışla birlikte gözenekliliğinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, elde edilen reaksiyon ürünleri sülfürik asit saldırısına karşı daha savunmasızdır. Ayrıca, alkali aktivatörün dozajının artırılmasının sülfürik aside karşı dirençte hafif bir etkiye neden olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, geopolimer bağlayıcılar, Şekil 2.18'de gösterildiği gibi Portland çimento betonlarına kıyasla sülfürik asit saldırısına karşı daha fazla direnç göstermiştir.

(Rostami ve Brendley, 2003) yaptıkları çalışmada, sülfürik asit direnci uçucu kül bazlı betonu ve Portland çimento betonunu incelemek için silis dumanı kullanmışlardır. Uçucu kül betonda %4'lük bir kütle kaybı gözlemlemişlerdir. Portland çimento beton için ise 90 gün boyunca %20 sülfürik aside maruz kaldığında kütle kaybı %25 çıkmıştır.



Şekil 2. 18 Geopolimer ve Portland çimento betonlarına asit etkisi (Aiken vd., 2018)

3. MATERYAL VE METOD

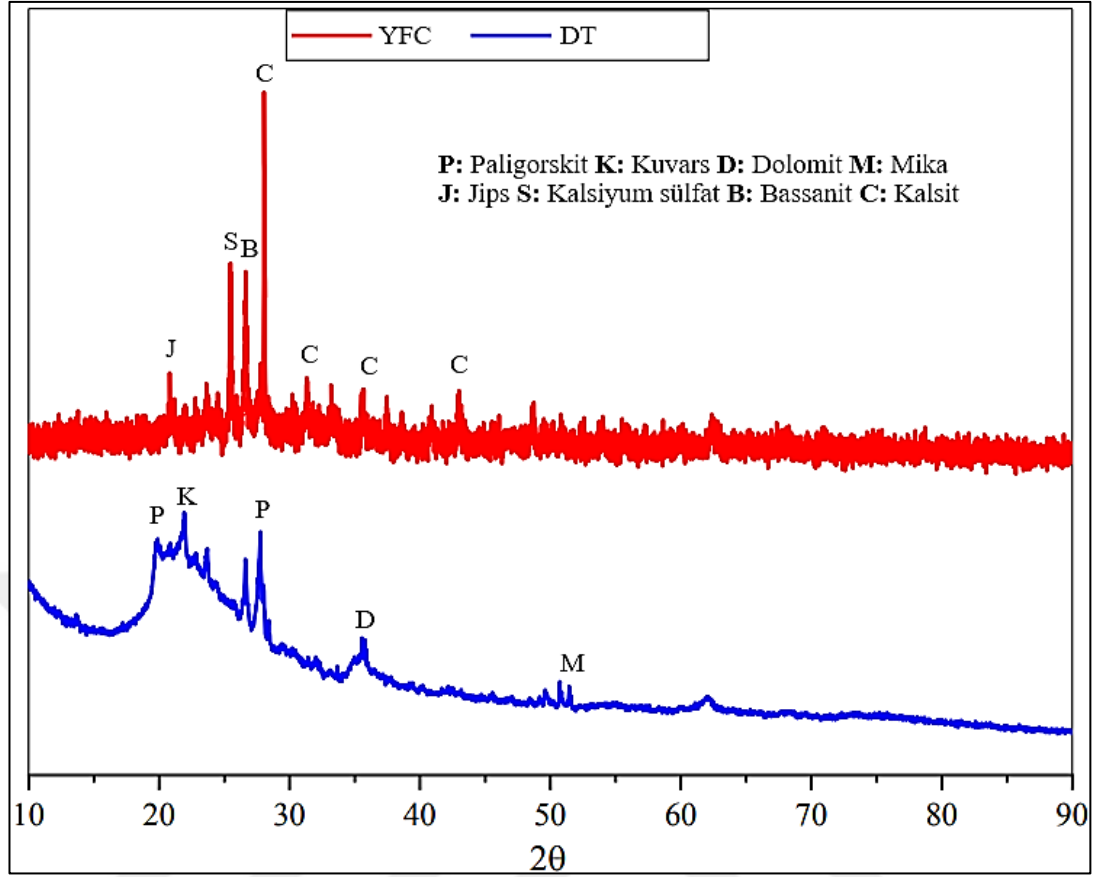
3.1 Materyal

Bu araştırmada bağlayıcı olarak farklı kimyasal bileşimlere sahip olan YFC ve diatomit tozu (DT) kullanılmıştır. YFC'nin özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı (Blaine inceliği) sırasıyla 2,87 ve 4850 cm²/g'dir. YFC'nin ortalama parçacık boyutu 42 µm'dir. Karışımların hazırlanmasında, YFC yerine alüminosilikat malzeme olarak diatomit tozu (DT) %0, %10, %20 ve %30 oranlarında kullanılmıştır. DT'nin özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı sırasıyla 2,03 ve 12300 cm²/g'dir. YFC ve DT'nin kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de sunulmaktadır. Şekil 3.1, YFC ve DT'nin mineralojik özelliklerini göstermektedir. Şekil 3.1'deki XRD modelinde, YFC'lerin yüksek bir amorf faza sahip olduğu görülmektedir. YFC'nin kalsiyum sülfat, bassanit (CaSO₄ · H₂O) ve jips (CaSO₄ + 2H₂O) gibi minerallere sahip olduğu, DT'nin ise kuvars, Paligorskit, jips (CaSO₄ + 2H₂O) ve dolomit (CaMg(CO₃)₂) kristal fazından oluştuğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3. 1 YFC ve DT'nin kimyasal bileşimi (kütle olarak yüzde)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	KK*
YFC	32,3	16,9	0,8	39,5	8,3	0,4	0,6	<0,1	<0,1
DT	61,7	9,15	1,83	13,4	1,52	0,11	0,23	6,38	5,32

*Kızdırma kaybı



Şekil 3. 1 YFC ve DT'nin XRD modeli

Bu çalışmada, %95'ten fazla SiO_2 içeriğine sahip silis kumu (SK) agrera olarak kullanılmıştır. Her bir DT içeriğinde silis kumu (SK) yerine %0, %25, %50 ve %100 oranlarında andezit kumu (AK) kullanılmıştır. Karışımlarda agrega tane boyutu 0-2 mm aralığındadır. Silis ve andezit agregalarının diğer özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. İşlenebilirliği arttırmak amacıyla karışımların hazırlanmasında yeni nesil polikarboksilat eter bazlı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcının katı madde içeriği %33 ve özgül ağırlığı $1,12 \pm 2$ 'dir.

Tablo 3. 2 Silis ve andezit agregasının fiziksel özellikleri

Özellikler	Silis agregası	Andezit agregası
Özgül ağırlık	2,71	2,26
Su emme (%)	3,23	5,78
Maksimum parçacık boyutu (mm)	2,36	2,36
İncelik modülü	2,87	2,74

AAH karışımlarının üretiminde, alkali etkinleştiriciler olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat seçilmiştir. Sodyum hidroksit %99 saf olmasına rağmen beyaz peletler halinde kullanılmıştır. Tablo 3.3 ve 3.4 sırasıyla sodyum hidroksit ve sodyum silikatın teknik özelliklerini vermektedir. Karışımların daha işlenebilir olması için musluktan ilave su kullanılmıştır. Araştırma amacıyla alkali ile aktifleştirilmiş taze betonun kıvamı, polikarboksilat bazlı bir süper akışkanlaştırıcı (SA) beton katkısı ile sağlanmıştır.

Tablo 3. 3 Sodyum hidroksit'in özellikleri

NaOH	Na ₂ CO ₃	Cl	SO ₄	Fe	Al
99	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Tablo 3. 4 Sodyum silikat'ın özellikleri

Na ₂ O	SiO ₂	H ₂ O	Özgül ağırlık	Fe	Ağır metaller	Görünüm
99	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	Saydam

3.2 Metod

3.2.1 Karışım Tasarımı

Tablo 3.5'te deneysel araştırma için oluşturulan AAH karışımlarının malzeme miktarları listelenmiştir. Deneysel araştırma amacıyla silis kumunun %0, %25, %50 ve %100 olmak üzere dört oranda AK ile yer değiştirildiği ve YFC içeriğinin %10, %20 ve %30 olmak üzere 3 oranda DT ile değiştirildiği 16 adet harç numunesi üretilmiştir. Karışımlarda toplam bağlayıcının %5'i oranında süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Geopolimerizasyonu hızlandırmak amacıyla örnekler 80°C'de 24 saat boyunca kürlenmiştir.

Tablo 3. 5 AAH karışım tasarımı (kg/m³)*

Karışım Numaraları	AK(%)	DT(%)	YFC	DT	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Ekstra su	SA	Silis Kumu (SK)	Andazit Kumu (AK)
Referans	0		1000	0	90	210	175	50	496	0
D0A25	25	0	1000	0	90	210	175	50	372	124
D0A50	50		1000	0	90	210	175	50	248	248
D0A100	100		1000	0	90	210	175	50	0	496

Tablo 3.5 Devamı										
D10A0	0	10	900	100	90	210	175	50	390	0
D10A25	25		900	100	90	210	175	50	293	98
D10A50	50		900	100	90	210	175	50	195	195
D10A100	100		900	100	90	210	175	50	0	390
D20A0	0	20	800	200	90	210	175	50	284	0
D20A25	25		800	200	90	210	175	50	213	71
D20A50	50		800	200	90	210	175	50	142	142
D20A100	100		800	200	90	210	175	50	0	284
D30A0	0	30	700	300	90	210	175	50	179	0
D30A25	25		700	300	90	210	175	50	131	48
D30A50	50		700	300	90	210	175	50	90	90
D30A100	100		700	300	90	210	175	50	0	179

*Karışım numarası (Örnek): D10A50: D10/DT %10: 10% DT – A50/AK %50: 50% AK

3.2.2 Geopolimer Karışımının Dökümü ve Kürlenmesi

İlk olarak, bağlayıcı alüminosilikat tozları ve agregalar 2 dakika boyunca 145 rpm'de karıştırılmıştır. İkinci aşamada ise, sonra karışıma NaOH ilave edilerek 145 rpm'de 2 dakika daha karıştırılmıştır. Daha sonra karışıma sodyum silikat ilave edilerek 5 dakika daha karıştırılmıştır. Karışım toplam 9 dakikada hazırlanmıştır. Hazırlanan akışkan geopolimer karışımları kalıplara yerleştirilmiştir. Karışımlar yeterince akışkan olduğu için kalıplara kendiliğinden yerleşmiştir ve vibrasyona ihtiyaç duyulmamıştır. Kalıplama işleminden sonra taze geopolimer karışımları geopolimerizasyon sürecini hızlandırmak amacıyla 5°C/dk hızla ısıtılan bir etüvde 80°C'de 24 saat boyunca kürlenmiştir. Daha sonra numuneler kalıplarından çıkarılarak 25°C sıcaklığa ve %65 neme sahip kür odasında deney gününe kadar muhafaza edilmiştir. Böylece numunelerin su kürü uygulamasına ihtiyaç duyulmadan 25°C sıcaklığa ve %65 neme sahip ortamda kendiliğinden kürlenmesi sağlanmıştır.

3.2.3 Testler

Bu çalışmada karışımların tazelik, dayanıklılık, fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemek için çeşitli testler kullanılmıştır. Tablo 3.6'da gerçekleştirilen testler, her test için hazırlanan numune büyüklükleri ve test standartları listelenmektedir.

Tablo 3. 6 Gerçekleştirilen testler, numune büyüklükleri ve test standartları.

Test	Standart	Numune Büyüklüğü (mm)	Süre (Gün)
Yayılma çapı	ASTM C1437	Taze harç	
Görünür porozite			
Su emme	ASTM C642	50x50x50	28 gün
Kuru birim hacim ağırlık			
Basınç dayanımı	ASTM C349	40x40x160 (kırk örnek)	7, 28 ve 90 gün
Eğilme dayanımı	ASTM C348	40x40x160	
Donma-çözülme etkisi	ASTM C666	40x40x160	40,80 ve 120 döngü
Kuruma büzülmesi	ASTM C596	25x25x285	120. güne kadar
Su işleme derinliği	ASTM C1585	50x50x50	28. güne kadar
Isıl iletkenlik	ASTM D7984	20x50x100	28 gün
Yüksek sıcaklık etkisi		40x40x160	300-600-900 °C

Tablo 3.6’da belirtildiği üzere geopolimer harçların yayılma çapları ASTM C 1437 standardına göre belirlenmiştir. Geopolimer harçların yayılma çapları, X ve Y doğrultusunda ölçülerek tespit edilmiştir.

Geopolimer harçların görünür porozite, su emme ve kuru birim hacim ağırlık özelliklerini tayin etmek amacıyla ASTM C642 standartına göre 50*50*50 mm boyutlarında üretilen küp numunelere 28 günlük kür süresi sonunda arşimet deneyi uygulanmıştır. Numuneler, suya doymun hale gelmesi için 3 gün boyunca su küründe bekletilmiştir. Ardından, numunelerin su içerisindeki ağırlığı arşimet terazisi kullanılarak belirlenmiştir. Bu işlemin sonrasında numuneler sudan çıkarılarak kuru bez yardımıyla doymun kuru yüzey elde edilmiş ve numunelerin ağırlığı hassas terazide ölçülmüştür. Daha sonra numuneler, muhteviyatında bulunan suyu atması için 3 gün boyunca 50°C (±5°C) etüvde bekletilmiştir. 3 günlük süre sonrasında numuneler etüvden çıkarılmış ve etüv kurusu ağırlığı belirlenmiştir.

Geopolimer harçların basınç dayanımları ASTM C349 standartına göre, eğilme dayanımları ise ASTM C348 standartına göre 40*40*160 mm boyutlarında üretilen prizma numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Üretilen numunelere ilk olarak üç noktalı eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı belirlenen numuneler, daha sonra basınç dayanımı deneyinde kullanılmıştır. Karışımların basınç ve eğilme dayanımları 7, 28 ve 90. günlerde belirlenmiştir.

Numuneler, 28 günlük kür süresinin ardından donma-çözülme direncinin belirlenmesi amacıyla donma-çözülme odasına yerleştirilerek ve 40, 80 ve 120 döngüden oluşan bir donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Numuneler, -20°C sıcaklıkta 5 saat boyunca donma etkisine ve +4°C'de 7 saat boyunca çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan 40*40*160 mm boyutlarındaki numunelerin kütle kaybı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Geopolimer harçların donma-çözülme direncini tayin etmek amacıyla ASTM C666 standardı kullanılmıştır.

AAH karışımlarının kuruma büzülmesi değerlerini ölçmek amacıyla 25*25*285 mm boyutlarında harç çubukları üretilmiştir. Harç çubuklarının boyu ilk olarak dökümden 24 saat sonra (kalıptan çıkarıldıktan sonra) ölçülmüştür. AAH numunelerinin boyut değişimlerini belirlemek amacıyla dijital koparatör kullanılmıştır. Üretilen harç çubuklarının kuruma büzülmesi 56. güne kadar 7 gün arayla olmak üzere 120. güne kadar ölçülmüştür. AAH karışımlarının kuruma büzülmesi değerlerini belirlemek amacıyla ASTM C596 standardı kullanılmıştır.

Geopolimer harçların su işleme derinliğini tayin etmek amacıyla ASTM C1585 standardına göre 50*50*50 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiş olup, numuneler deneye başlamadan önce 50°C sıcaklıkta 3 gün boyunca kurutulmuştur. Numunelerin su işleme derinliği 28. güne kadar ölçülmüştür. Ek olarak, geçirimsizliği sağlamak amacıyla AAH numunelerinin yan yüzeylerine sutut malzemesi uygulanmıştır.

AAH karışımlarının ısı iletkenlik özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM D7984 standardına göre 20*50*100 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. 28 günlük kür süresi sonrasında üretilen numunelerin ısı iletkenliği, ısı iletkenlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür.

Geopolimer harçların yüksek sıcaklığa karşı direncini belirlemek amacıyla 40*40*160 mm boyutlarında prizma numuneler üretilmiştir. 28 gün boyunca kür uygulanan numuneler sonrasında 300, 600 ve 900°C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılması için 10°C/dk ısıtma hızında

bir kül fırını kullanılmıştır. Numuneler 300, 600 ve 900°C hedef sıcaklıklara ulaştıktan sonra 2 saat boyunca beklemeye bırakılmıştır. Sonrasında ise numuneler fırında yavaş yavaş soğutulmuş olup, numunelerin kütle kaybı ile mekanik özellikleri belirlenmiştir.

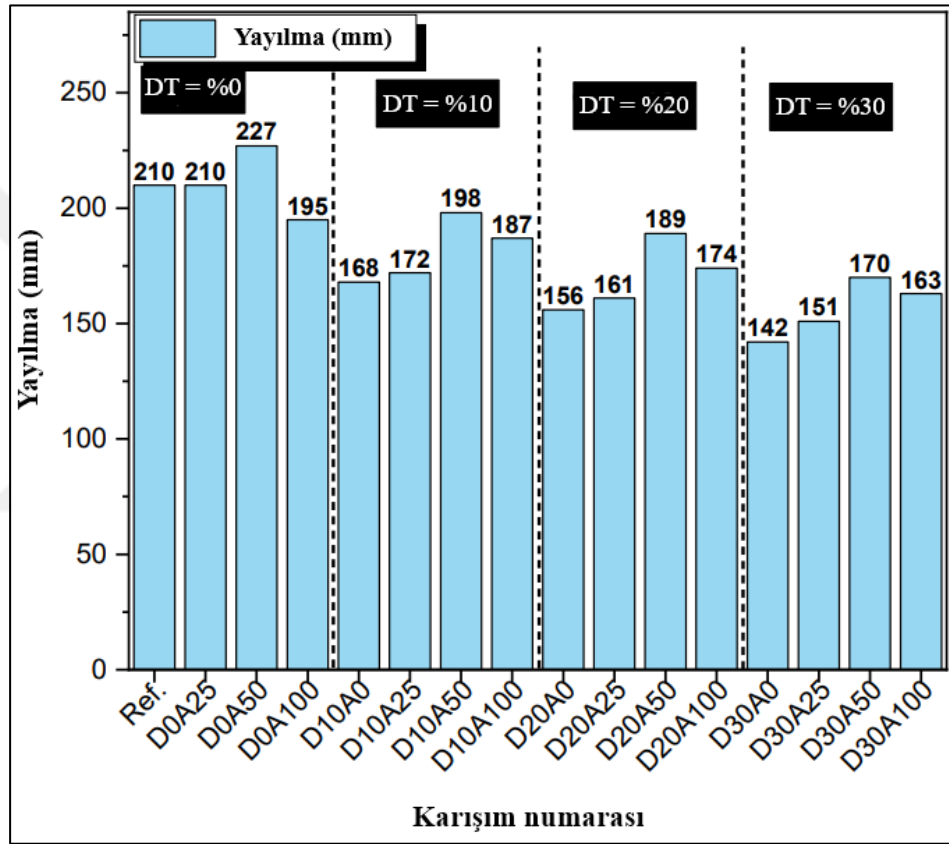


4. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

4.1 Yayılma Çapı

Şekil 4.1, bir bağlayıcı olarak DT'nin ve ince agrega olarak AK'nin AAH karışımlarının yayılma çapı değeri üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.1'de gösterilen tüm AAH karışımları için yayılma çapı 227 mm ila 142 mm arasında değişmektedir. DT içermeyen karışımda ($DT=0\%$), 0% ve 25% AK kullanıldığında yayılma çapı değişmemiştir. Buna karşın, karışım 50% AK içeriğinde en yüksek yayılma çapı değerine ulaşmıştır. Karışım 100% AK içeriğinde ise yayılma çapının 0% DT içeren diğer karışımlara nazaran düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.1'den açıkça görüldüğü üzere, her bir DT içeriğinde SK 25% ve 50% oranında AK ile değiştirildiğinde yayılma değerlerinde artış meydana gelmiştir. SK yerine kullanılan AK oranı 100% 'e ulaştığında ise yayılma değerlerinde hafif bir düşüş görülmektedir. Her bir DT içeriğinde 50% oranında AK içeren karışım en yüksek yayılma değerine ulaşmıştır. İçeriğinde DT bulunup AK bulunmayan karışımlarda ise yayılma çapı en düşük seviyelerde seyretmiştir. 0% DT içeren AAH karışımlarında AK oranı 100% 'e yükseltildiğinde, yayılma çapının referans karışıma kıyasla 7.14% oranında azaldığı görülmüştür. AAH karışımlarında 10% , 20% ve 30% DT içeriğinde AK oranı 0% 'dan 100% 'e çıkarıldığında AAH karışımlarının yayılma çaplarında sırasıyla $11,30$; $11,53$ ve $14,78$ oranında artış gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 100% oranında AK kullanılarak üretilen ve DT içeren taze AAH karışımlarının 100% oranında SK kullanılarak üretilen ve DT içeren AAH karışımlarına göre daha işlenebilir olduğu görülmektedir. Bu gözlem, AAH'lerin genel davranışının değişmesinde AK'nin şeklinin, yüzey morfolojisinin ve parçacık boyutu dağılımının etkili olduğuna atfedilmiştir. Ek olarak, ASTM C33 standardına göre AK'nin incelik modülü, SK'den önemli ölçüde daha düşüktür. YFC'nin DT ile değiştirilmesi, taze AAH karışımlarının akışkanlığını azaltarak işlenebilirliğini düşürmüştür. Harç karışımlarında diatomit tozu oranı arttıkça karışımların işlenebilirliği düşmüştür. Diatomit tozu'nun olağanüstü inceliği ve özgül yüzey alanı, çimento harcının işlenebilirliğinin önemli ölçüde düşmesine sebep olmaktadır. YFC ile karşılaştırıldığında DT, yaklaşık 2,5 kat daha büyük bir özgül yüzey alanı ve 29% daha düşük özgül ağırlığa sahiptir. DT, daha büyük özgül

yüzey alanı ve daha düşük özgül ağırlığı sayesinde YFC'den önemli ölçüde daha fazla su emer. Bu sebeple DT içeren AAH karışımlarının akışkanlığı, DT içeriği arttıkça önemli ölçüde azalır. frustüllerinin (boş, delikli kılıflar) morfolojisi, son derece güçlü kılcal emme kuvveti sağlayarak DT'nin karışım suyunu önemli ölçüde emmesine sebep olmaktadır (Ahmadi vd., 2018; Sharma vd., 2021). AK içermeyen karışımlarda DT içeriğinin %0'dan %10, %20 ve %30'a yükseltilmesi sonucunda karışımların yayılma değerlerinde sırasıyla %20,00; % 25,71 ve %32,38 düşüş gözlemlenmiştir.



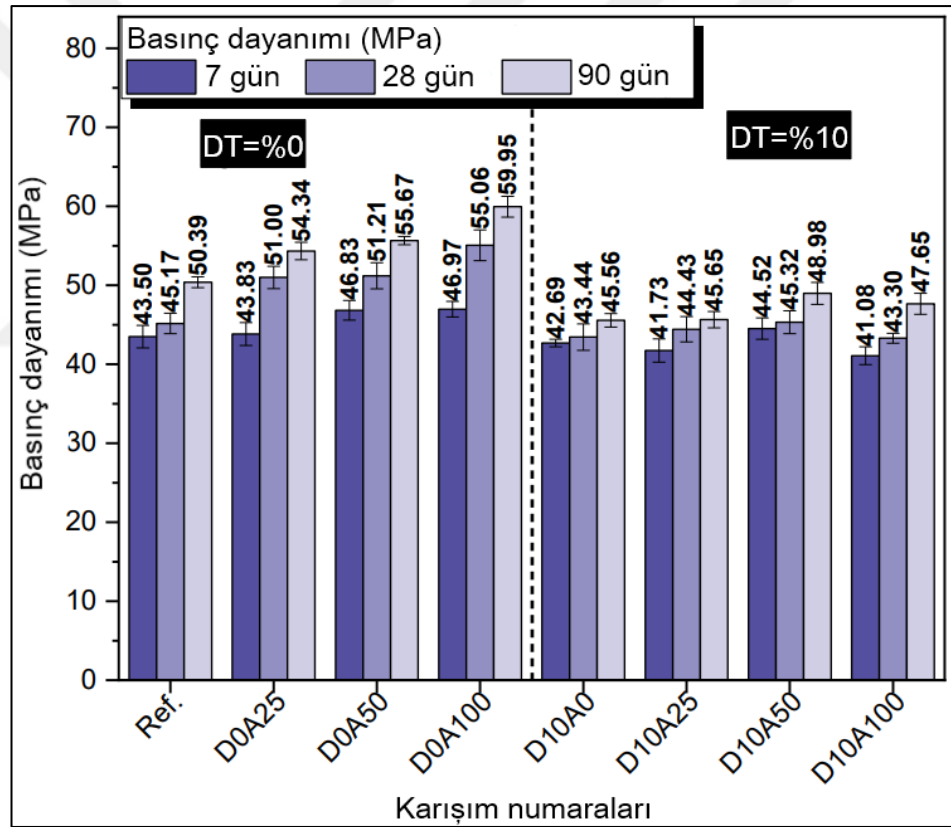
Şekil 4. 1 AK ve DT içeren AAH karışımlarının yayılma değerleri

4.2 Basınç Dayanımı

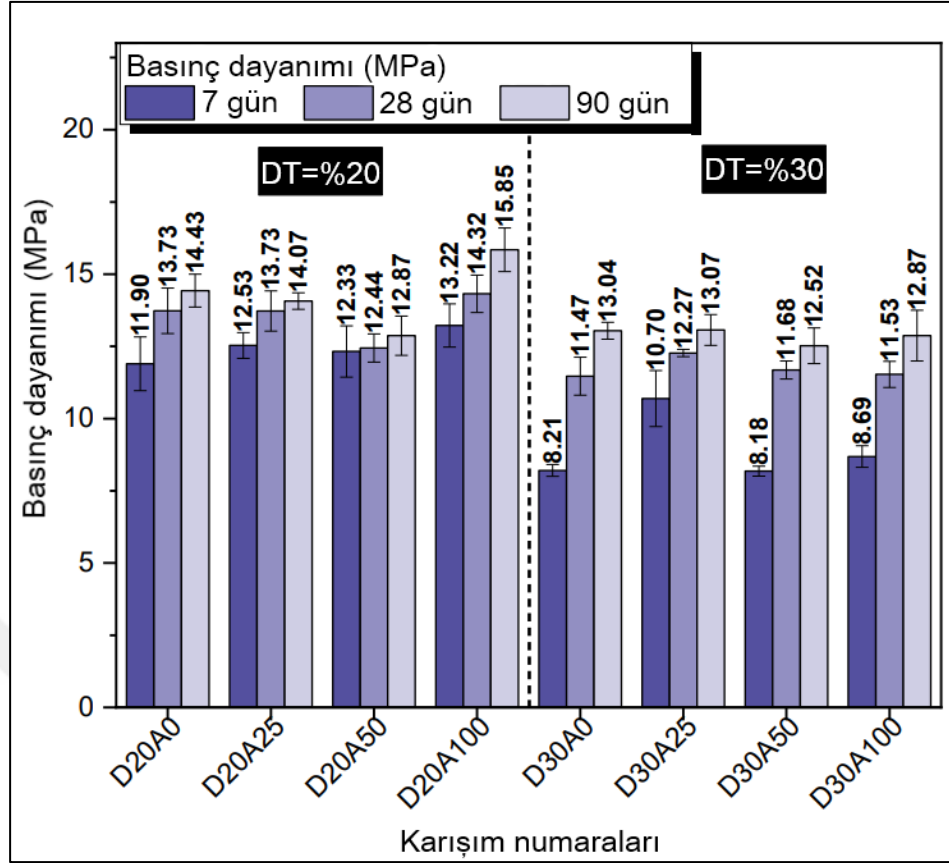
Şekil 4.2 ve Şekil 4.3, bağlayıcı olarak DT ve agrega olarak AK ile üretilen ve 7,28 ve 90 gün boyunca kürlenmiş karışımların basınç dayanımı gelişimini göstermektedir. Şekil 4.2 YFC yerine %0 ve %10 oranında DT içeren karışımların basınç dayanımını, Şekil 4.3 ise YFC yerine %20 ve %30 oranında DT içeren karışımların basınç dayanımını göstermektedir. AK içeren ancak DT içermeyen (DT=%0) karışımların basınç dayanımları 7 günde 43,50 ila 46,97 arasında, 28 günde 45,17 ila

55,06 arasında, 90 günde ise 50,39 ila 59,95 MPa arasında değişmiştir. %0 DT içerikli AAH karışımlarının basınç dayanımı göz önüne alındığında, AK dahil edilen AAH karışımlarının tüm kür süreleri boyunca AK içermeyen referans karışıma oranla daha yüksek basınç dayanımına ulaşmış olduğu Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Buradan SK yerine AK kullanılmasının, AK içeriğinin artmasıyla beraber basınç dayanımının da arttırdığı sonucuna ulaşılabilir. 28 Gün sonra, D0A25, D0A50 ve D0A100 için basınç dayanımı, referans karışıma kıyasla sırasıyla %12,90; %13,37 ve %21,89 oranında artmıştır. 90 gün sonra ise D0A25, D0A50 ve D0A100, referans karışımdan sırasıyla %7,84; %10,47 ve %18,97 oranında daha yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. Gözenekleri doldurmak ve gözenek yapısını iyileştirmek için doğru gradyan ve şekle sahip olan AK partiküllerinin inceliği, basınç dayanımındaki bu artıştan birincil derecede sorumludur. Ayrıca AK malzemesinin pürüzlü ve köşeli dokusu, YFC ve agrega arayüzleri arasındaki bağı iyileştirerek yüksek mukavemet sağlamaktadır. Bu davranış, büyük olasılıkla en büyük kum parçacıkları ile jeopolimerik matris arasındaki arayüzey geçiş bölgesinin başlangıcı dikkate alınarak açıklanabilir. Basınç dayanımı sonuçları önceki çalışmalarla tutarlıdır (Çelikten, 2021; Davraz vd., 2018; Hamidi vd., 2013). DT içermeyen karışımlarda AK oranının artması ile AAH karışımlarının mukavemetinde herhangi bir bozulma gözlemlenmemesi sebebiyle, SK yerine AK ikame edilmesinde yüksek mukavemetli AAH elde etmek için en avantajlı oran %100’dür. Bununla birlikte, YFC'nin olarak %10, %20 ve %30 oranlarında DT ile değiştirilmesi, AK içeriğinden bağımsız olarak özellikle %20 ve %30 DT ikame oranlarında basınç dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. 28 gün sonunda %10 oranında DT içeren numunelerin (D10A0, D10A25, D10A50, D10A100) basınç dayanımları, DT içermeyen numunelerin (Ref., D0A25, D0A50, D0A100) basınç dayanımlarına göre sırasıyla %3,82; %12,88; %11,50 ve %21,35 oranında düşük seyretmiştir. 90 gün sonra ise yine D10A0, D10A25, D10A50, D10A100’ün basınç dayanımları DT içermeyen Ref., D0A25, D0A50, D0A100’e kıyasla sırasıyla %9,58; %15,99; %12,01 ve %20,51 oranında düşüktür. Bu sonuçlar, AK içermeyen ve %25 AK içeren AAH’lerin ileri yaş dayanımlarında dafa fazla düşüş olduğunu göstermiştir. Daha fazla AK içerikli numunelerde ise basınç dayanımı 28-90 gün arasında neredeyse değişmemiştir. YFC’ nin %20 ve %30 oranları arasında DT ile değiştirilmesi ile birlikte basınç dayanımı’nın diğer oranlara benzer ancak daha fazla düştüğü Şekil 4.3’ de gözlemlenebilir. Basınç dayanımındaki

bu düşüşün çoğunlukla AAH yapısının gözeneklerini ve gözenekliliğini artıran DT parçacıklarının kırık ve yüksek derecede mikro gözenekli yapısından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, YFC bileşimi orta derecede alkali koşullar altında C-(A)-S-H benzeri bir jel oluşturmak için reaksiyona girmesine rağmen, DT'nin düşük reaktivitesi jeopolimerik matristeki YFC ve agrega arayüzleri arasındaki bağı zayıflatarak daha düşük mukavemete neden olur (Degirmenci ve Yılmaz, 2009). Diatomit, (Degirmenci ve Yılmaz, 2009) tarafından çimento harcı imalatında olası bir kısmi çimento ikamesi olarak incelenmiştir. Yazarlar, basınç ve eğilme dayanımı, donma-çözülme direnci, sülfat direnci ve su emme testlerinin sonuçlarına dayanarak Portland çimentosu yerine %5'e kadar diatomit kullanılmasını önermişlerdir.



Şekil 4. 2 %0 ve %10 DT içerikli numunelerin basınç dayanımları

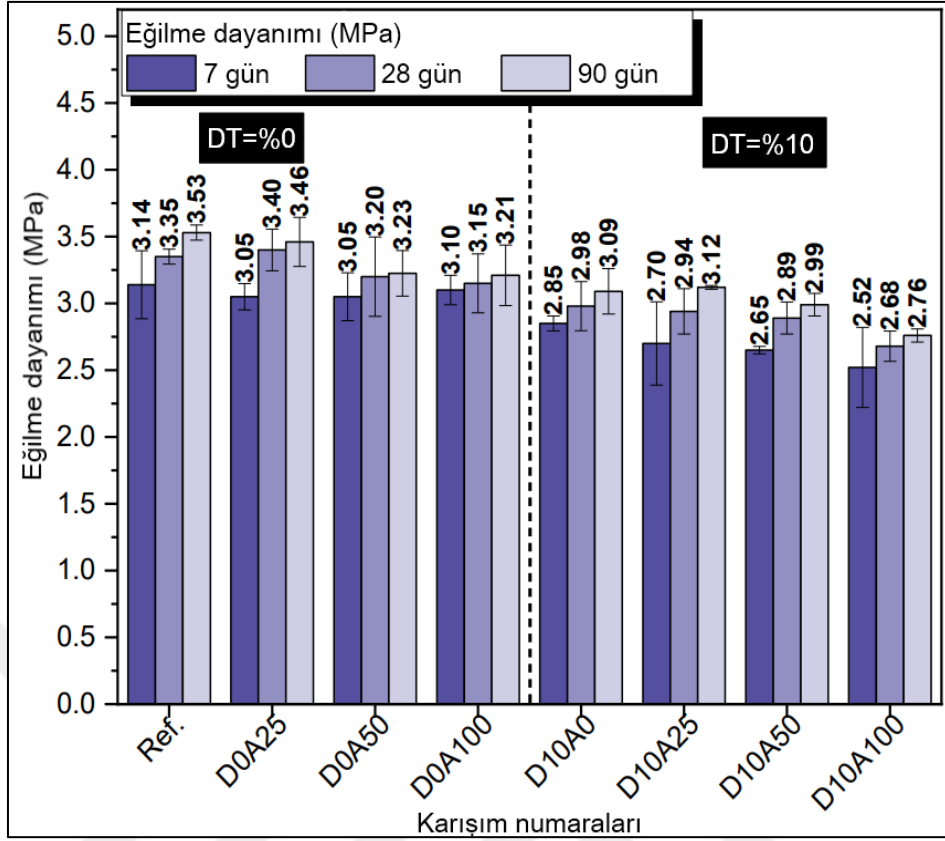


Şekil 4. 3 %20 ve %30 DT içerikli numunelerin basınç dayanımları

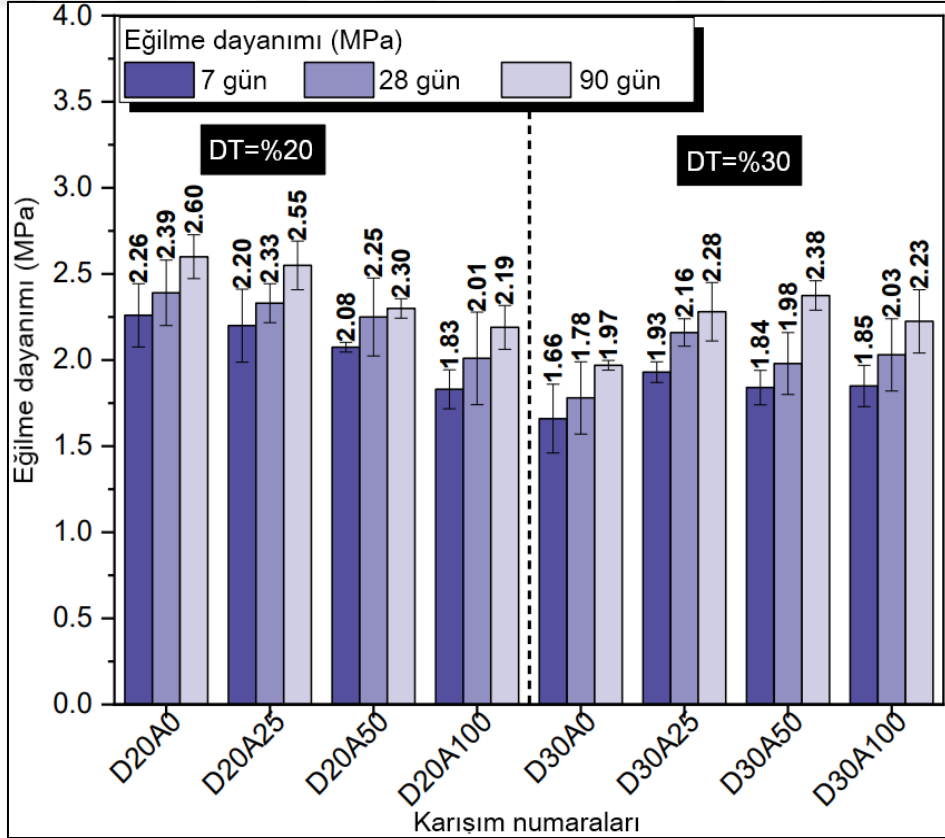
4.3 Eğilme Dayanımı

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5, bir bağlayıcı olarak DT, ince agrega olarak andezit kumu ile üretilen ve 7, 28, 90 gün boyunca kürlenmiş karışımların eğilme dayanımı gelişimini göstermektedir. YFC yerine %0 ve %10 DT içeren karışımların eğilme dayanımı Şekil 4.4'de, YFC yerine %20 ve %30 DT içeren karışımların eğilme dayanımı ise Şekil 4.5'de gösterilmektedir. AK içeren fakat DT içermeyen (DT=%0) karışımların eğilme dayanımları 7 günde 3,05 ila 3,14 MPa, 28 günde 3,15 ila 3,40 MPa ve 90 günde 3,21 ila 3,53 MPa arasında değişmiştir. Şekil 4.4, %0 DT içeriğine sahip AAH karışımlarına AK ilave edilmesinin tüm kür süreleri boyunca eğilme dayanımını referans karışıma kıyasla biraz düşürdüğünü ortaya koymuştur. DT içermeyen karışımlarda SK yerine AK ikame edildiğinde, AK oranının artmasıyla beraber karışımların eğilme dayanımı azalmıştır. 28 günlük D0A50 ve D0A100 karışımları referans karışımdan sırasıyla %4,47 ve %5,97 daha düşük eğilme dayanımına sahip olmasına karşın, D0A25 referans karışıma kıyasla biraz daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir. 90 gün sonra ise D0A25, D0A50 ve D0A100 karışımlarının

tümünde eğilme dayanımı referans karışıma göre sırayla %1,98; %8,50 ve %9,06 oranında daha düşüktür. 90 günün sonunda elde edilen bu veriler, en fazla eğilme dayanımı kaybının DT içermeyip %50 ve %100 oranında AK içeren AAH karışımlarında meydana geldiğini göstermektedir. SK'nın AK ile ikame edilmesinin neden olduğu eğilme dayanımındaki azalmanın birincil açıklaması, Artan AK içeriğine sahip AAH karışımının gözenekliliğindeki artış olabilir. Buna karşılık, YFC'nin bağlayıcı olarak %10, %20 ve %30 oranlarında DT ile değiştirilmesi de AK içeriğinden bağımsız bir şekilde eğilme mukavemetini azaltmıştır. D10A0, D10A25, D10A50 ve D10A100 karışımlarının 28 günlük eğilme dayanımı, DT içermeyen (yani Ref., D0A25, D0A50, D0A100) karışımların eğilme dayanımına kıyasla sırasıyla %11,04; %13,52; %9,68 ve %14,92 oranında daha düşüktür. DT içermeyen Ref., D0A25, D0A50 ve D0A100 karışımları ile %10 oranında DT içeren D10A0, D10A25, D10A50 ve D10A100 karışımları 90 günlük eğilme dayanımı açısından kıyaslandığında ise DT içeren karışımların eğilme dayanımlarında DT içermeyen karışımlara göre sırasıyla %12,46; %9,82; %7,43 ve 14,01'lik bir azalma yaşanmıştır. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, YFC %20 ve %30 oranında DT ile değiştirildiğinde de benzer ancak daha büyük bir dayanım kaybı sergilenmektedir. %0, %10 ve %20 oranında DT içeren AAH karışımlarındaki AK içeriğinin artmasının eğilme dayanımında daha fazla düşüşe sebep olduğu, %30 DT içeren karışımlarda ise AK içeriğinin artması ile beraber eğilme dayanımının da artmış olduğu görülmektedir.



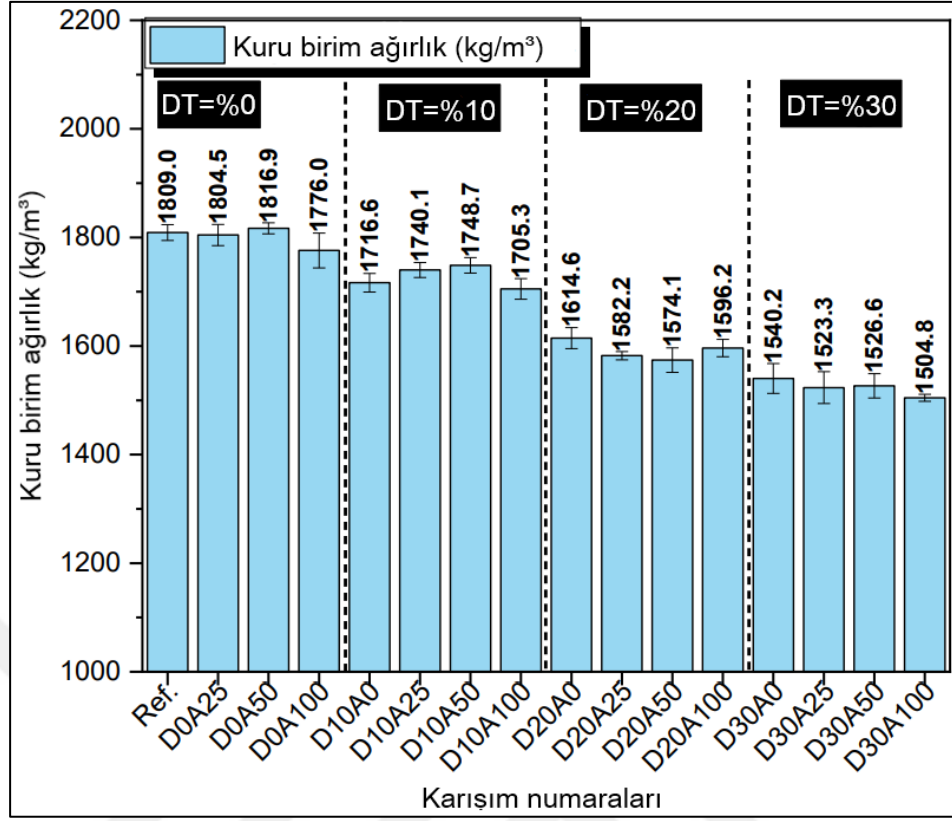
Şekil 4. 4 %0 ve %10 DT içerikli numunelerin eğilme dayanımları



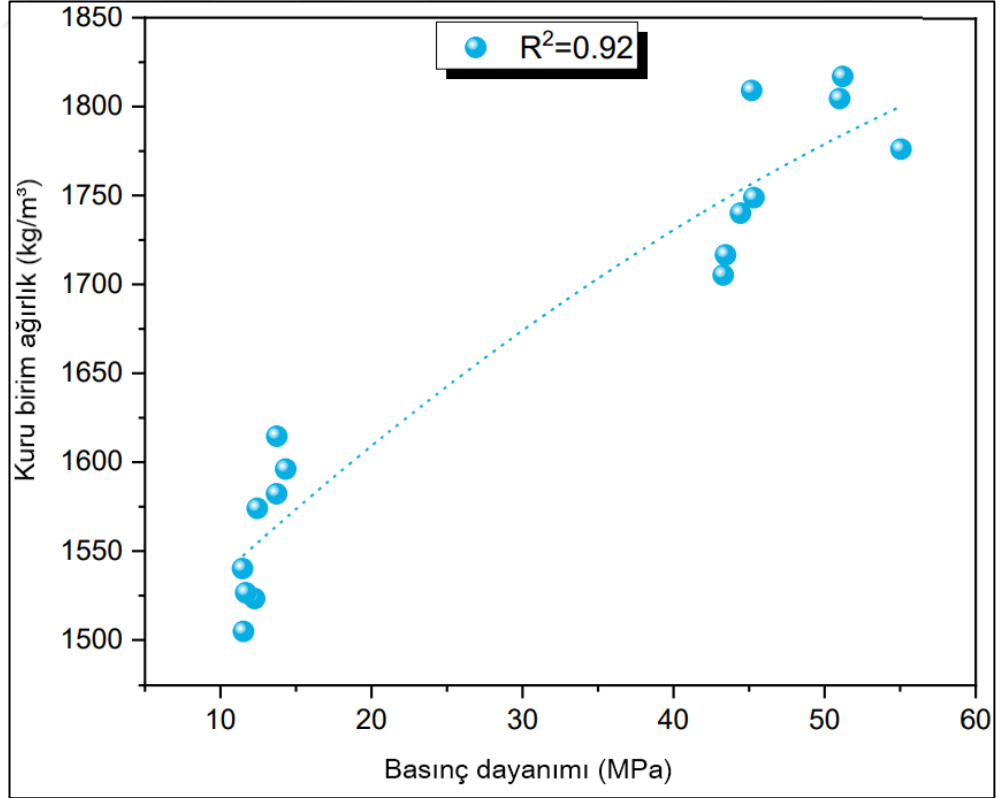
Şekil 4. 5 %20 ve %30 DT içerikli numunelerin eğilme dayanımları

4.4 Kuru Birim Hacim Ağırlık

Şekil 4.6, ince agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT ikame edilmesinin 28 günlük kür süresi sonrasında AAH karışımlarının kuru birim hacim ağırlığını nasıl etkilediğini göstermektedir. AK ve %0 DT içeren AAH karışımlarının kuru birim hacim ağırlığı 1776 kg/m^3 ile $1816,9 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Şekil 4.6’da görüldüğü üzere YFC yerine DT içermeyen AAH karışımları, %10, 20 ve %30 oranında DT içeren karışımlara kıyasla daha fazla kuru birim hacim ağırlık sergilemiştir. Diğer bir deyişle, en yüksek kuru birim hacim ağırlık DT’siz karışımlarda görülmüştür. YFC’nin DT ile değiştirilmesi, AAH karışımlarının kuru birim hacim ağırlığında azalmaya neden olmuş ve en düşük kuru ağırlık, %30 DT içeren karışımlarda görülmüştür. DT içeriği sabit tutularak SK’nın AK ile değiştirilmesi, kuru birim hacim ağırlıkta fazla bir değişime neden olmamıştır. Yalnızca %3’lük bir kuru birim hacim ağırlık artışı veya azalışı meydana gelmiştir. DT’nin kuru birim hacim ağırlığa etkisi göz önüne alındığında ise kuru birim hacim ağırlıkta en büyük düşüş, en yüksek kuru birim hacim ağırlık ve en düşük kuru birim hacim ağırlık için %17,17 olarak belirlenmiştir. AAH karışımlarının kuru birim hacim ağırlığındaki bu düşüşe çoğunlukla düzenli olarak hizalanan önemli sayıda küçük mikroskobik gözeneklerin, yüksek gözenekliliğin ve büyük gözenek hacmine sahip DT partiküllerinin oluşturduğu karmaşık yapının neden olduğu düşünülmektedir. (Phoo-ngernkhama vd., 2013), diatomit ilavesinin yüksek kalsiyumlu uçucu kül içeren geopolimer harçlarına etkilerini araştırmış ve ayrıca diatomit içeriğinin artması ile beraber birim ağırlığın azalma eğiliminde olduğunu göstermiştir. AAH karışımlarının kuru birim hacim ağırlığı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.7’de gösterilmektedir. AAH karışımlarının basınç dayanımı ve birim ağırlığı arasındaki ilişkinin, 0,92’lik bir R^2 değeri ile ilişkili olduğu bulunmuştur.



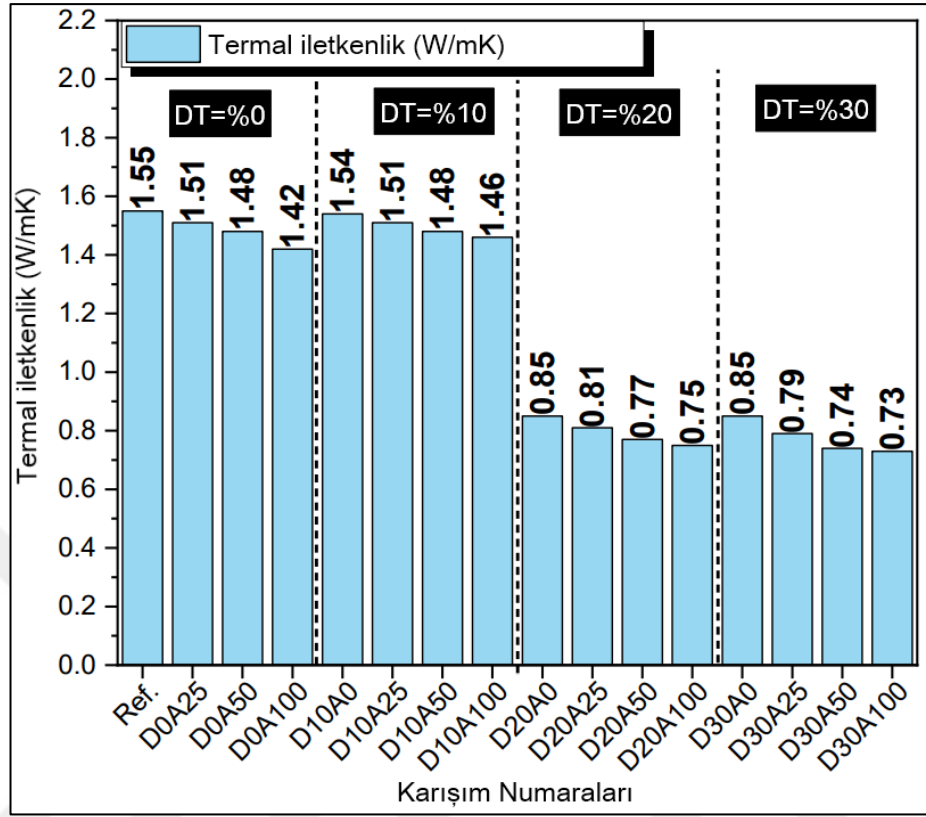
Şekil 4. 6 Numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları



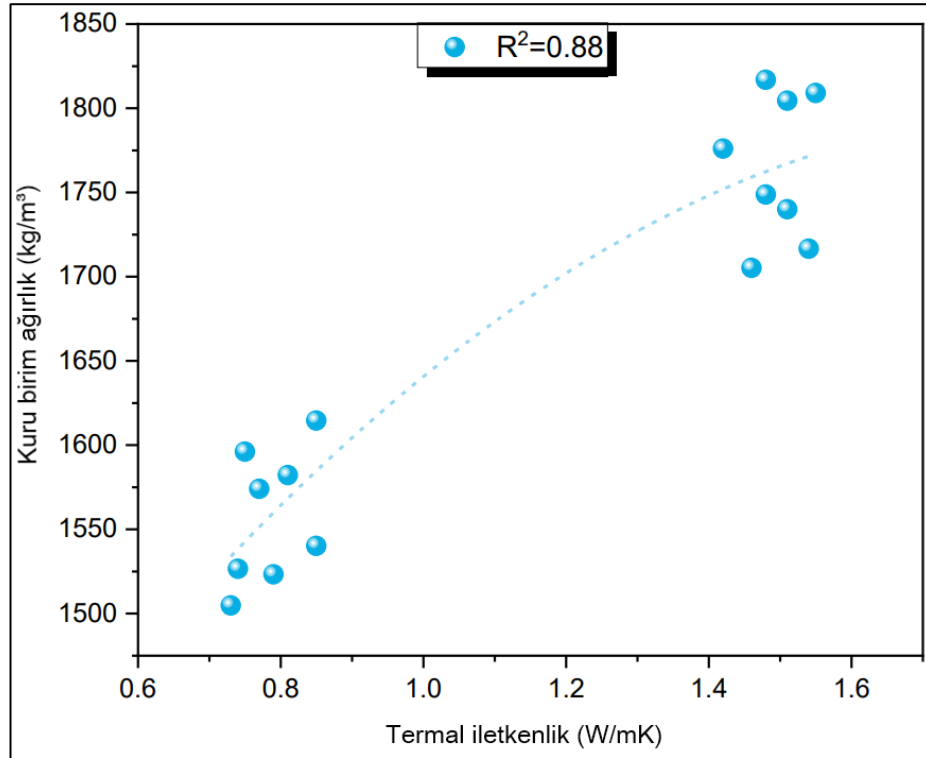
Şekil 4. 7 AAH karışımlarının kuru birim hacim ağırlığı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

4.5 Isıl İletkenlik

İnce bir agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT kullanmanın, 28 günlük bir kür süresinden sonra AAH karışımlarının 1,55 ila 0,73 (W/mK) aralığındaki termal iletkenliği üzerindeki etkisi Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Gözeneklilik, beton yoğunluğu ve çimento matrisi, termal iletkenlik üzerinde doğrudan etkisi olan önemli değişkenlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada, gözeneklilik ve kuru birim hacim ağırlık arttıkça termal iletkenliğin azaldığını gösteren ve önceki araştırmalar ile aynı doğrultuda olan bulgulara ulaşılmıştır (O. Y. Bayraktar, Kaplan, vd., 2021; O. Y. Bayraktar, Soylemez, vd., 2021; Corinaldesi vd., 2011; Demirboğa, 2003; Demirboğa, 2007). D30A100 karışımının en düşük ısı iletkenlik değerine ulaşmasından, YFC yerine DT kullanımının gözenekliliği önemli ölçüde artırdığı ve ısı iletkenliği azalttığı açıktır. Gözeneklilikteki bu artışta birincil olarak AAH yapısının deliklerini ve gözenekliliğini artıran DT parçacıklarının son derece mikro gözenekli ve parçalanmış yapısı sorumludur. Daha önce belirtildiği gibi daha düşük özgül ağırlık da gözeneklilikteki bu artışa ve termal iletkenlikte düşüşe katkıda bulunmuştur. DT içeren AAH numunelerinin daha az geopolimerizasyon göstermesi veya daha düşük hidrasyona sahip hidrasyon ürünleri üretmesi, daha büyük gözenekliliğe ve daha düşük ısı iletkenliğe sahip olması ile açıklanabilir. Diatomit, suda yaşayan diatom iskeletlerinde bulunan yaygın bir biyolojik mineral element olduğundan, eşit dağılmış çok sayıda küçük mikroskobik gözeneğe, yüksek gözenekliliğe ve daha düşük ısı iletkenliğine sahip sofistike bir yapıdadır (You vd., 2016). SK'nın AK ile değiştirilmesi de termal iletkenlik değerlerinde hafif bir düşüşe sebep olmuştur. 28 günlük kür işleminden sonra birim ağırlık ile termal iletkenlik arasındaki ilişki Şekil 4.9'da gösterilmektedir. AAH karışımları için birim ağırlık ve ısı iletkenlik ilişkisinde R^2 belirleme katsayısının 0,97 gibi çok güçlü bir değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Isıl iletkenliğin artması ile kuru birim hacim ağırlığın da arttığı Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4. 8 Termal iletkenlik sonuçları

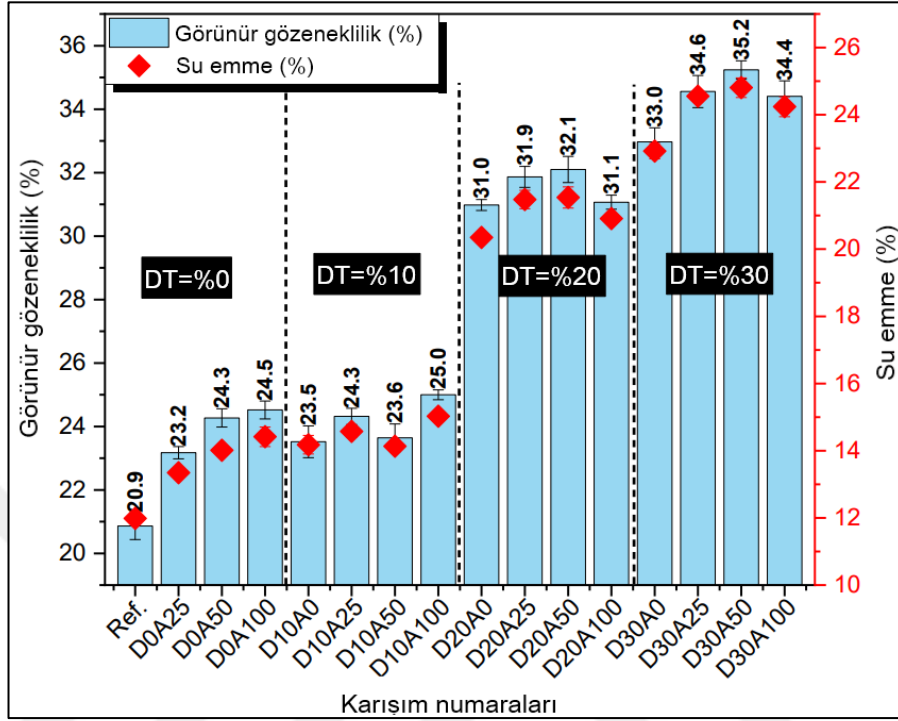


Şekil 4. 9 Termal iletkenlik ile kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

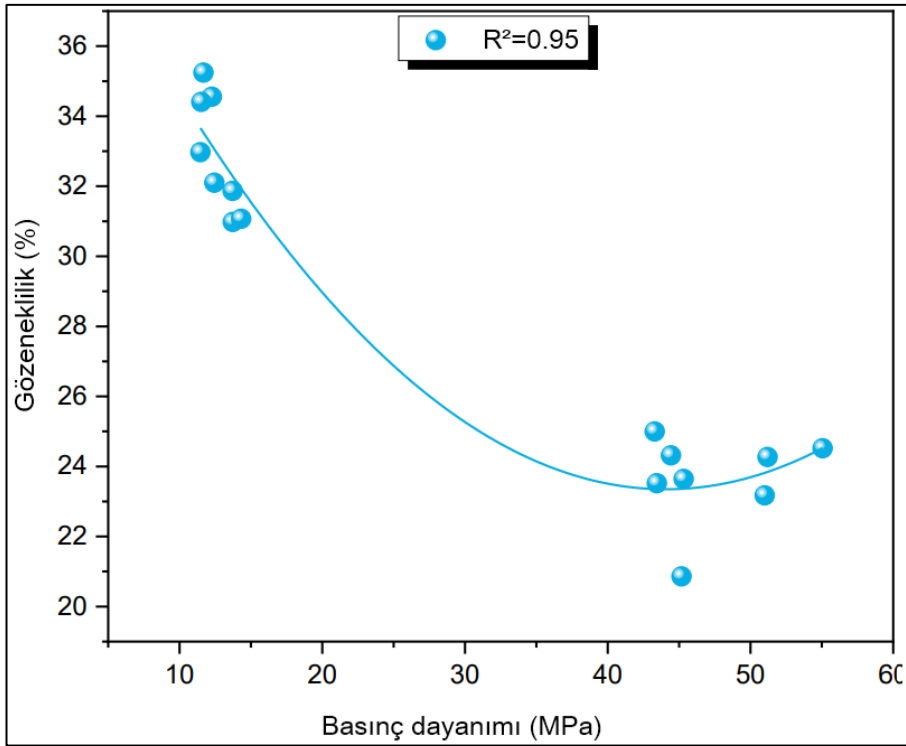
4.6 Görünür Porozite ve Su Emme

Şekil 4.10, bağlayıcı olarak DT ve ince agrega olarak AK kullanımının 28 gün boyunca kürlenmiş AAH karışımlarının gözenekliliği ve su emmesi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.10'dan, kuru birim hacim ağırlık ile gözeneklilik arasında ters bir ilişki olduğu, yani çimento esaslı kompozitlerin kuru birim hacim ağırlığı ne kadar yüksekse, gözenekliliğin o kadar düşük olduğu sonucuna varılmaktadır. Gözenekliliğin Ref., D0A25, D0A50 ve D0A100 karışımlarında %20,9 ila %24,5 arasında, D10A0, D10A25, D10A50 ve D10A100 karışımlarında %23,5 ila %25 arasında, D20A0, D20A25, D20A50, D20A100 karışımlarında %31 ila %32,1 arasında ve D30A0, D30A25, D30A50, D30A100 karışımlarında %33 ila %35,2 arasında değişmiş olduğu Şekil 4.10'da görülmektedir. YFC yerine DT kullanımının gözenekliliği ve su emilimini büyük ölçüde artırdığı ve D30A50 karışımının en yüksek oranda gözenekliliğe sahip olduğu açıktır. DT parçacıklarının çok sayıda mikro gözenekli ve pürüzlü bir yüzeye sahip olması, AAH yapısının gözenekliliğini artırmakta ve dolayısıyla daha fazla su emmesine sebep olmaktadır. Özgül ağırlığın düşük olması da daha önce ifade edildiği gibi AAH karışımlarında gözenekliliğin ve su emiliminin artmasına sebep olmaktadır. Bu durum, DT ikamesi ile AAH numunelerinin daha az geopolimerizasyon sergilemesi veya yüksek gözenekliliğe sebep olan daha az hidrasyon ürünü üretmesi ile açıklanabilir. Geniş özgül alanı ve gözenekli yapısı nedeniyle çimento harcına (%15'in üzerinde) diatomit eklenmesi, nem depolama özelliğini bir miktar iyileştirmektedir (Degirmenci ve Yılmaz, 2009). Diatomit, suda yaşayan diatomların iskeletini oluşturan yaygın bir biyolojik mineral element olduğundan, çok sayıda düzenli olarak dağılmış ince mikroskobik gözeneklere, yüksek gözenekliliğe ve büyük gözenek hacmine sahiptir (You vd., 2016). %20 ve %30 DT içeriğine sahip AAH karışımlarında SK'nın yerine AK ikamesi ile gözeneklilik ve su emme değerleri AK oranına bağlı olarak çok fazla değişiklik göstermemiş, yalnızca hafif bir artış veya azalma göstermiştir. AK'nin gözeneklilik ve su emme üzerindeki etkisinden elde edilen sonuçlar (Davraz vd., 2018) tarafından yapılan çalışma ile uyumludur. AAH karışımlarının su emmesi, Şekil 4.10'da gösterildiği üzere gözeneklilik değerleri ile doğru orantılı olarak değişmiştir. Şekil 4.11'e bakıldığında, AAH karışımlarının basınç dayanımı ve gözenekliliği arasındaki korelasyon için 0,95'lik bir doğrusal regresyon (R^2) elde edilmiştir. Şekil

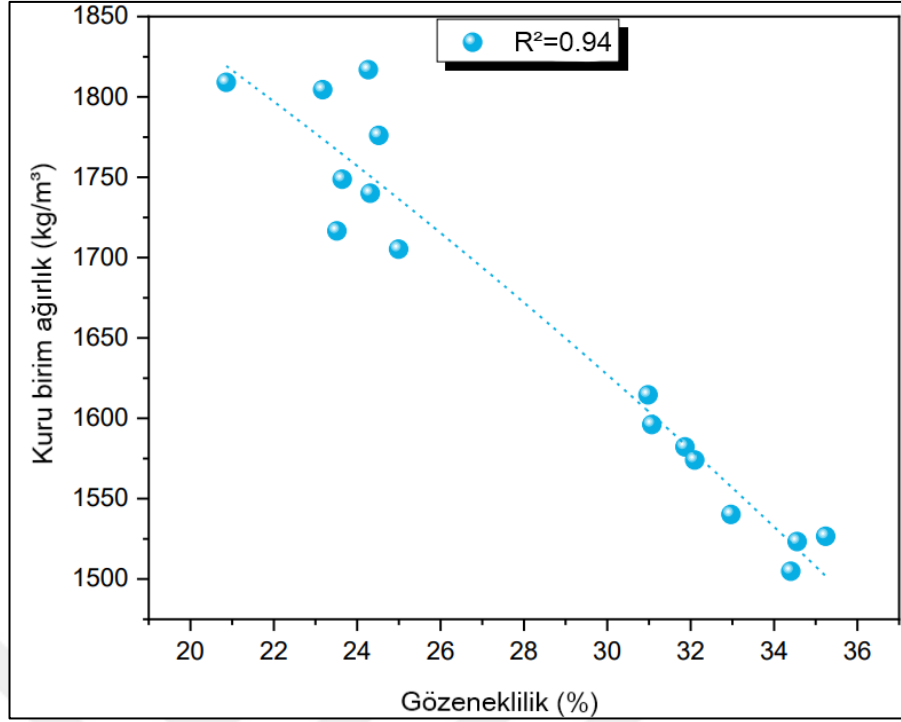
4.12'de gözeneklilik ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiye bakıldığında ise, 0,94'lük R^2 korelasyon katsayısı görülmektedir.



Şekil 4. 10 Gözeneklilik ve su emme



Şekil 4. 11 Gözeneklilik ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

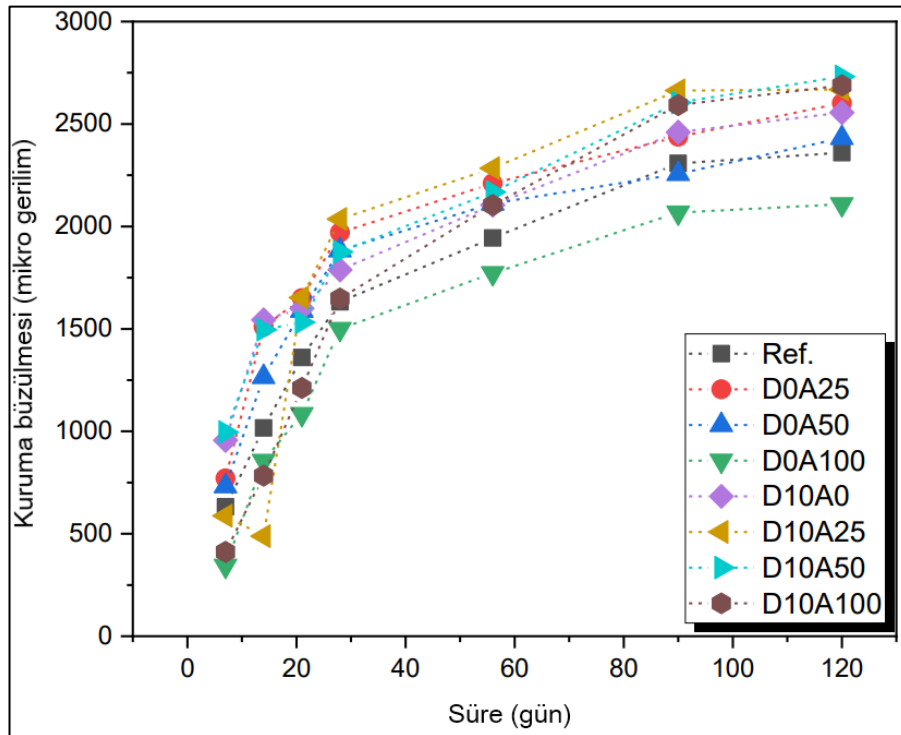


Şekil 4. 12 Gözeneklilik ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

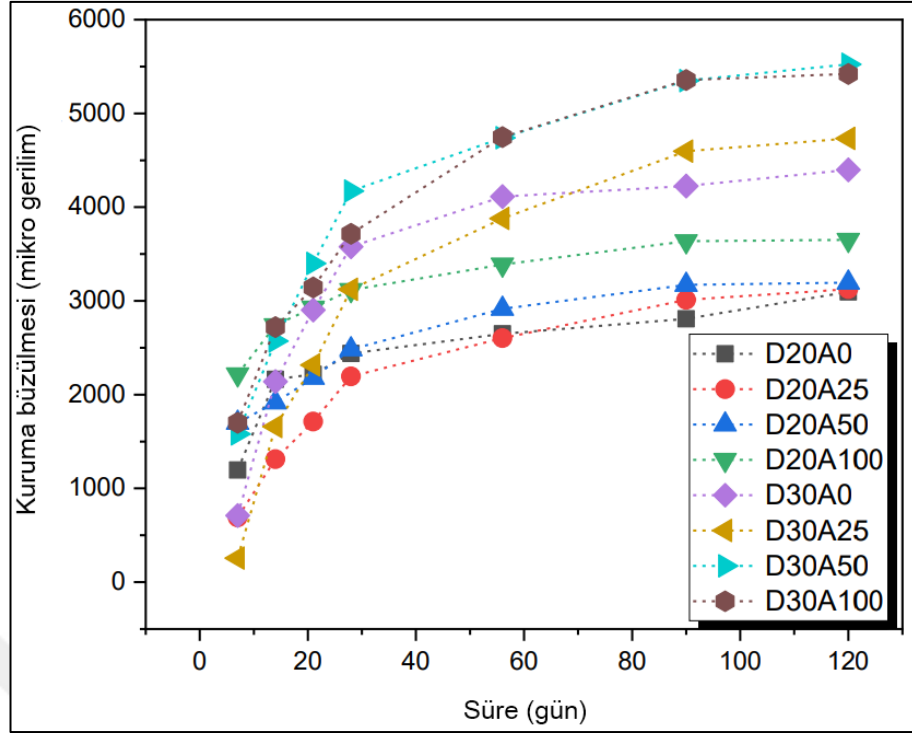
4.7 Kuruma Büzülmesi

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14, AAH karışımlarında ince agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT kullanılmasının 120 günlük kuruma süresi boyunca kuruma büzülmesi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekillere bakıldığında AAH karışımlarında kuruma büzülmesinin ilk 28 gün hızla geliştiği, sonra sabit bir seviyeye gelene kadar gelişimin azaldığı ve daha sonrasında kuruma süresinin daha da uzadığı görülmektedir. AAH karışımlarının büzülme davranışı ve büzülme kontrol yöntemleri kapsamlı bir şekilde oluşturulmuştur. Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında, AAH'ler aşırı derecede büzülmemektedir. Gerçekleşen bu büzülmenin temel sebebi, alkali aktivatörün malzemedeki gözenek boyutunun küçülmesinden kaynaklanan kılcal kuvvet artışıdır. AAH'de jelin iç gözeneklerinde hidrasyon ürünlerine dahil edildiğinde bulunan sudan daha fazla serbest su bulunduğu için, bu alandaki su kaybı belirgin kuruma büzülmesine neden olmuştur (Collins ve Sanjayan, 2000; Neto vd., 2008; Xue vd., 2022). Açıkçası DT ilavesi, Şekil 4.13 ve 4.14'de görüldüğü üzere numunelerin büzülmesini kuruma süreleri boyunca önemli ölçüde arttırmıştır. Basınç dayanımı gelişimi büzülme üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu sebeple söz konusu büzülme artışına DT içeriğinin artması sonucu basınç dayanımının azalması sebep olabilir. SK

yerine AK ikame edilmesi ile, özellikle %20 ve %30 oranında DT içeren AAH karışımlarının büzülme değerleri artış göstermiştir. DT içermeyen AAH karışımları, tüm karışımlar arasında en düşük büzülme değerlerini göstermiştir. D0A100, kuruma süresi sonunda referans karışıma kıyasla %10,68'lik bir azalma ile ve 2108 değeri ile en düşük kuruma büzülmesi değerini sergilemiştir. SK yerine %100 AK ilavesi, büzülmeyi olumlu yönde etkilemiş ve DT'siz karışımlar için büzülmeyi azaltmada olumlu bir etkiye sahip olmuştur. Öte yandan, %50 AK içeren %10 DT katkılı AAH karışımı en yüksek büzülme değerini, AK içermeyen karışım ise bu DT içeriğinde en düşük büzülme değerini göstermiştir. Şekil 4.14'de görüldüğü gibi YFC'lerin %20 ve %30 oranında DT ile değiştirilmesi, AAH karışımlarının büzülme direncini önemli ölçüde azalttı. Diatomitin boşluklu yapısı ve küçük gözeneklerinin bolluğu nedeniyle, diatomit parçacıkları yüksek sıcaklıkta büzüldüğünde mikro gözenekler oluşur. Diatomit ikamesinin gözeneklilik üzerinde büyük etkisi olduğu açıktır (You vd., 2016). %30 oranında DT içeren AAH karışımlarının (D30A0, D30A25, D30A50, D30A100) büzülme değerleri ile DT içermeyen AAH karışımlarının (Ref., D0A25, D0A50, D0A100) büzülme değerleri karşılaştırıldığında, sırasıyla %86,35; %81,86; %127,14 ve %157,11 oranında büzülme artışı görülmüştür.



Şekil 4. 13 %0 ve %10 DT içerikli numunelerin kuruma büzülmesi sonuçları

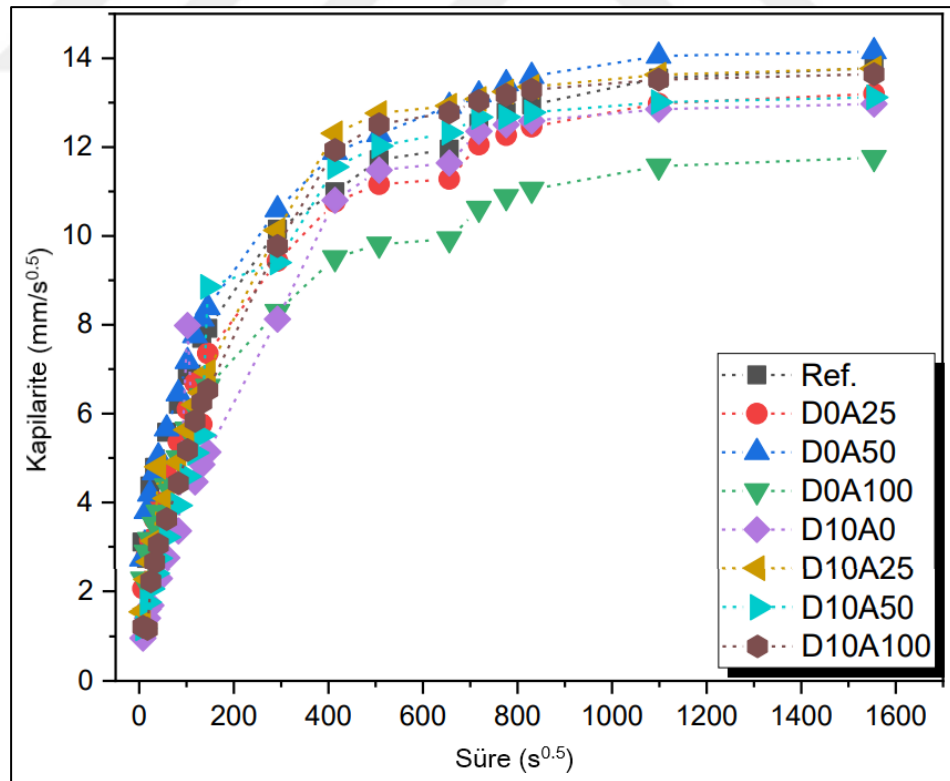


Şekil 4. 14 %20 ve %30 DT içerikli numunelerin kuruma büzülmesi sonuçları

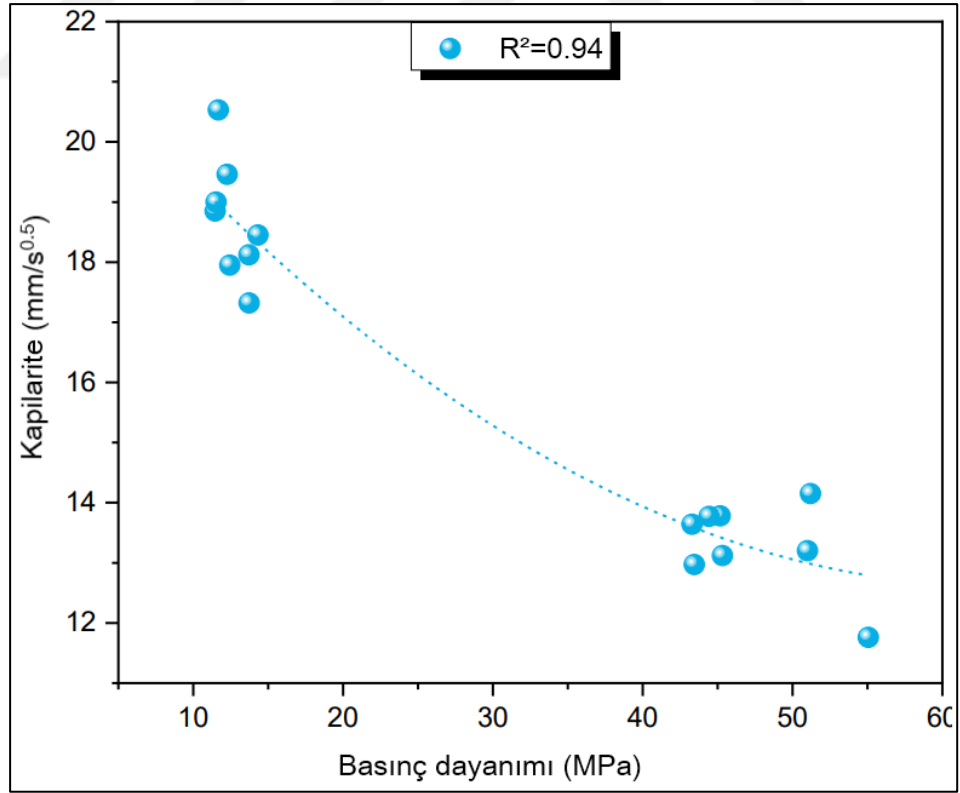
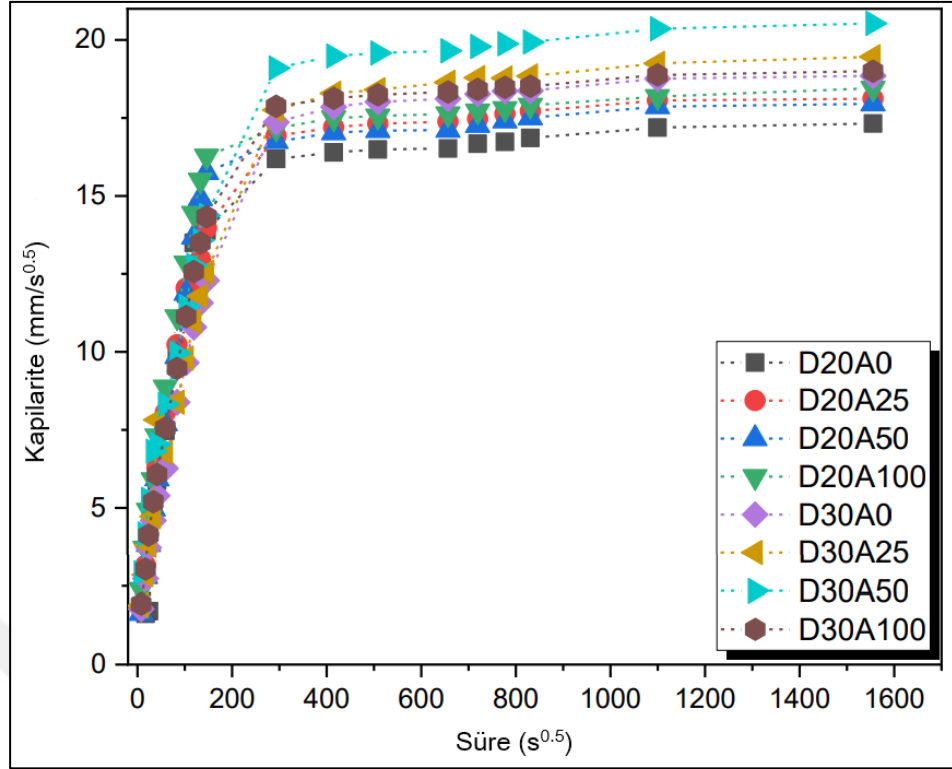
4.8 Su İşleme Derinliği (Kapılar Etki)

AAH ve geopolimer bağlayıcıların dayanıklılığını değerlendirmede önemli bir husus kapilaritedir. Ömrü boyunca betonun bozulmasının ana nedeni, kılcal boşluklardan sülfat ve karbonatların girmesidir. Betonun geçirgenlik özelliklerini ölçmek için kullanılan birçok teknikten biri de kapilarite testidir. İnce agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT ikamesinin 28 güne kadar AAH karışımlarının kapilaritesi üzerindeki etkisi Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmektedir. Şekillerde AAH karışımlarında kapilaritenin ilk periyotta keskin bir şekilde arttığı, daha sonra ise sabit bir düzeye ulaştığı ve değişmediği görülmektedir. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da görüldüğü gibi, DT ikamesinin test süresi boyunca AAH numunelerinin kapilaritesini büyük ölçüde artırdığı açıktır. DT içeriğindeki artışın basınç dayanımını düşürerek kapilariteyi artırmış olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.17 göz önüne alındığında da basınç dayanımı gelişiminin kapilarite üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. SK yerine AK ikamesinin de DT oranına bağlı olarak kapilarite üzerinde olumlu ya da olumsuz etkisi vardır. DT içermeyen ve %100 AK içeren AAH karışımı (D0A100), 28 günlük süre sonunda referans karışıma kıyasla %14,65 azalma ile $11,76 \text{ mm/s}^{0.5}$ ’lik en düşük kapilarite değerini göstermiştir. Önceden de belirtildiği

gibi en düşük kapilariteye sahip karışım, en yüksek basınç dayanımını sergilemiştir. Öte yandan %0 DT içeriğinde %50 AK içeren karışım en yüksek kapilariteyi gösterirken, %10 DT içeren AAM karışımları içerisinde en düşük kapilariteyi AK içermeyen D10A0 karışımı göstermiştir. AK ikamesi ile diğer karışımların kapilaritesi aslında çok fazla değişmemiştir. Şekil 4.16'da görülebileceği gibi, YFC yerine %20 ve %30 oranında DT ikamesi, AAH karışımlarının kapilaritesini artırmıştır. Diatomit ikamesinin gözeneklilik üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıktır (You vd., 2016). Gözenekliliğin artması da kapilarite artışına neden olur. %30 oranında DT içeren AAH karışımlarının (D30A0, D30A25, D30A50, D30A100) kapilarite değerleri ile DT içermeyen AAH karışımlarının (Ref., D0A25, D0A50, D0A100) kapilarite değerleri karşılaştırıldığında, sırasıyla %36,79; %47,42; %45,08 ve %161,56 oranında kapilarite artışı görülmüştür. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi, AAH karışımlarında kapilarite ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin 0,94'lük bir R^2 değerine sahip olduğu bulunmuştur. Kapilarite ile basınç dayanımının ilişkili olduğu ve basınç dayanımı düştükçe kapilaritenin artış gösterdiği Şekil 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4. 15 %0 ve %10 DT içerikli numunelerin kapilarite sonuçları



4.9 Yüksek Sıcaklık Etkisi

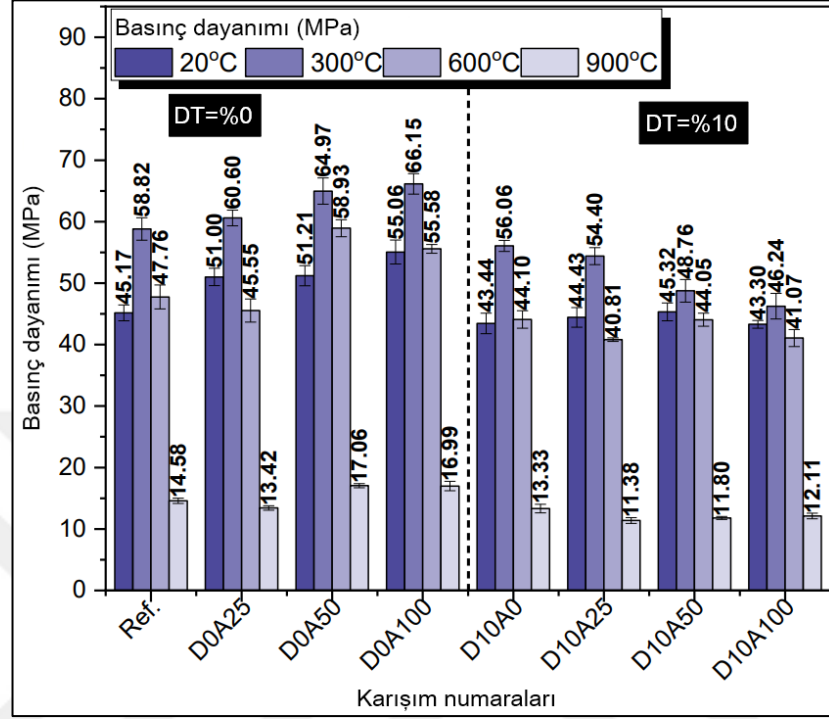
28 gün boyunca kürlenene AAH numuneleri 300, 600 ve 900°C 'de yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Bu uygulama için 5°C/dk ısıtma hızı kullanılmıştır. Numuneler 300, 600 ve 900°C'lik hedef sıcaklıklara ulaştıktan sonra 2 saat boyunca aynı sıcaklıkta bekletilmiştir. Daha sonra, numuneler fırında ve oda sıcaklığında kademeli olarak soğutulmuştur. Yüksek sıcaklık direncini yorumlamak için mekanik özellikler ve kütle kaybı kullanılmıştır

4.9.1 Basınç Dayanımı

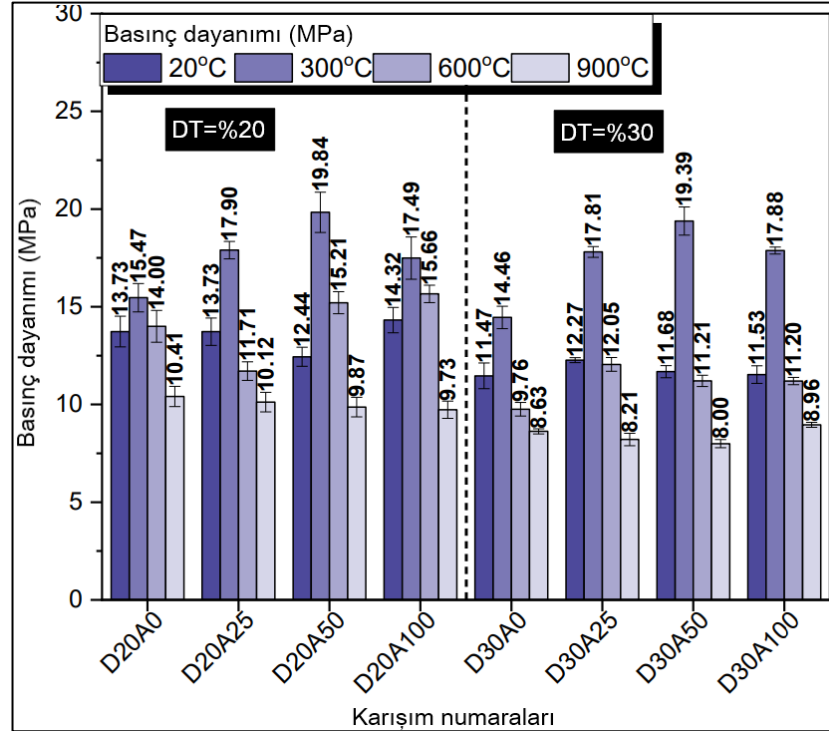
Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da, ince agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT ikamesinin 28 gün boyunca kürlenene ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılan AAH karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisini gösterilmektedir. AAH numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişim yüzdeleri ise Şekil 4.20 ve 4.21'de gösterilmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere, tüm AAH numuneleri 300°C'ye maruz kaldıktan sonra numunelerin basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. Söz konusu artış, bu sıcaklıklarda daha yüksek bir dayanım geliştirmek için C-S-H minerallerinin gelişimine yardımcı olan reaksiyona girmemiş YFC ve DT parçacıklarının neden olduğu daha fazla geopolimerizasyona atfedilebilir (Song vd., 2022). Ayrıca ısıtma işlemi, daha fazla hidratasyona teşvik eden ve sonuç olarak kimyasal limitleri artıran buhar ve "içsel otoklavlama" oluşumuna neden olur. YFC yerine DT ikame edildiğinde, AAH karışımlarının basınç dayanımı yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra özellikle %20 ve %30 DT içeriğinde büyük ölçüde artmıştır. 300°C'de %0 DT içeriğine sahip karışımlarda en yüksek dayanım artışını %30,2 ile referans karışım sergilemiştir ve %26,9'luk dayanım artışı ile yüksek sıcaklığa karşı en iyi ikinci direnci %50 AK içeren D0A50 karışımı göstermiştir. Ayrıca %50 AK içeren D0A50 karışımı, 600°C'lik yüksek sıcaklık karşısında da %15,1 dayanım artışı ile en iyi direnci sergileyen karışım olmuştur. 900°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ise, DT içermeyen karışımlar arasında en düşük basınç dayanımı kaybı görülen karışım %66,7 dayanım kaybı ile yine D0A50 karışımıdır. %10 DT içeriğinde AK içermeyen karışım (D10A0), 300°C ve 600°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla %29,0 ve %1,5'lik bir dayanım artışı ile en yüksek

dayanım artışına sahip olmuştur. Aynı karışım 900°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra da %69,3 dayanım kaybı ile %10 DT içeren karışımlar arasında yüksek sıcaklığa karşı en iyi direnci sergilemiştir. %10 DT içeriğine sahip ve 300°C sıcaklığa maruz kalan karışımlarda, dayanım artışının AK ikamesi ile birlikte azaldığı görülmektedir. Şekil 4.18 göz önünde bulundurulduğunda, %10 DT içeren AAH karışımları arasında 600 ve 900°C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra en kötü performansı D10A25 karışımı göstermiştir. %20 DT içeriğinde, tüm sıcaklıklarda AK ikamesinin olumlu etkisi gözlenmiştir. %20 DT ve %50 AK ikamesi içeren D20A50 karışımı, 300°C ve 600°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla %59,4 ve %22,2 oranında önemli ölçüde basınç dayanımı artışı sergilemiştir. Aynı karışım, 900°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ise %20,7 dayanım kaybı ile tüm karışımlar arasında yüksek sıcaklığa karşı en iyi direnci sergileyen karışım olmuştur. D20A100 karışımı, %20 DT içeren karışımlar arasında 900°C 'lik yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra en kötü performansı göstermiştir. Hafif agregaların düşük termal genleşme değerleri ve yüksek sıcaklıklarda daha yüksek termal kararlılıkları sayesinde, hafif agregalar ile standart betonlardan daha iyi yangın direnci sergileyen hafif betonlar üretilbildiği belirtilmiştir (Benli vd., 2020; Karatas vd., 2019; Koksall vd., 2012, 2015, 2021). Artan DT ve AK içeriği ile mekanik özelliklerde meydana gelen iyileşmenin, kütleme işlemi esnasında gözenekliliğin artmasından ve daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla geopolimerizasyon ve hidrasyon ürünü üretilerek gözenekliliğin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.21'de açıkça görüldüğü üzere, %20 ve %30 DT içeren karışımlar, %0 ve 10 DT içeren karışımlara kıyasla mükemmel yüksek sıcaklık direnci göstermiştir. Genel olarak bakıldığında, 300°C ve 600°C'ye maruz kalan karışımlarda basınç dayanımı artışı gözlenirken, 900°C'ye maruz kalan karışımlarda basınç dayanımının düştüğü belirlendi. %30 DT içeriğinde, diğer DT içeriklerine oranla daha fazla basınç dayanımı artışı görülmüştür. %30 DT ve %0, %25, %50 ve %100 AK içeren karışımlar (D30A0, D30A25, D30A50, D30A100) 300°C sıcaklığa maruz bırakıldığında, basınç dayanımlarında sırasıyla %26,1; %45,1; %66,0 ve %55,0 oranında artış gözlenmiştir. 900°C 'lik yüksek sıcaklık etkisi dikkate alındığında, %30 DT ve %100 AK içeren karışım (D30A100), %30 DT içeren karışımlar arasında en iyi performansı ve %22,3 ile en düşük dayanım düşüşünü sergilemiştir. Bu sonuçlar, DT'nin yüksek sıcaklıklarda yüksek özgül alanına, önemli

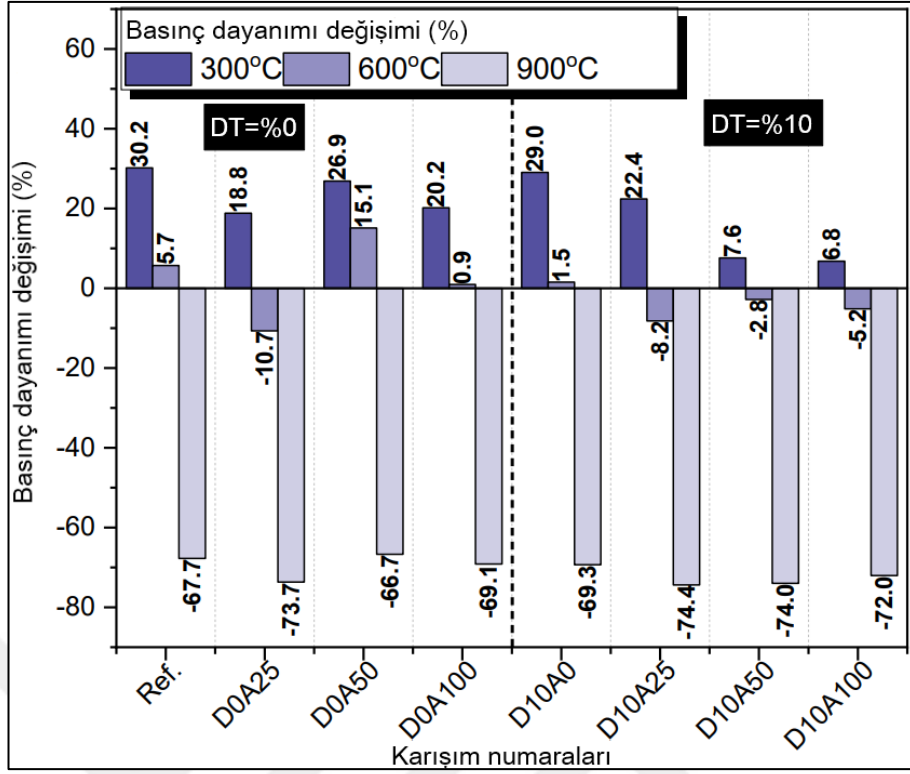
ölçüde su emme yeteneğine ve dikkate değer termal ve kimyasal kararlılığına bağlanabilir (Qin vd., 2015).



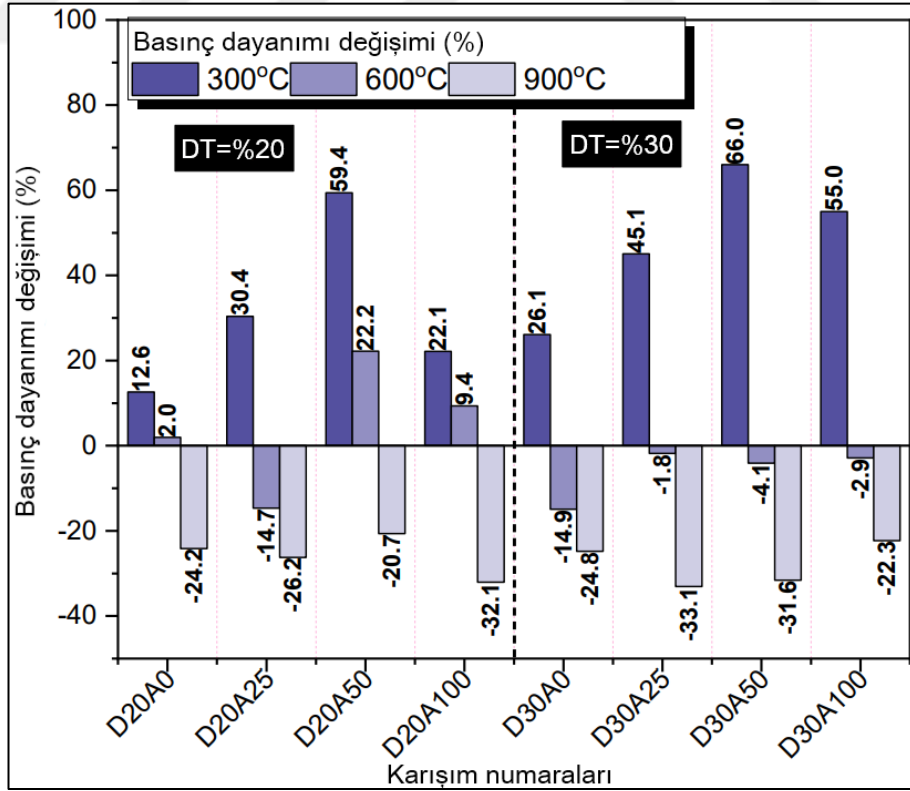
Şekil 4. 18 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımları



Şekil 4. 19 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımları



Şekil 4. 20 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri (%)

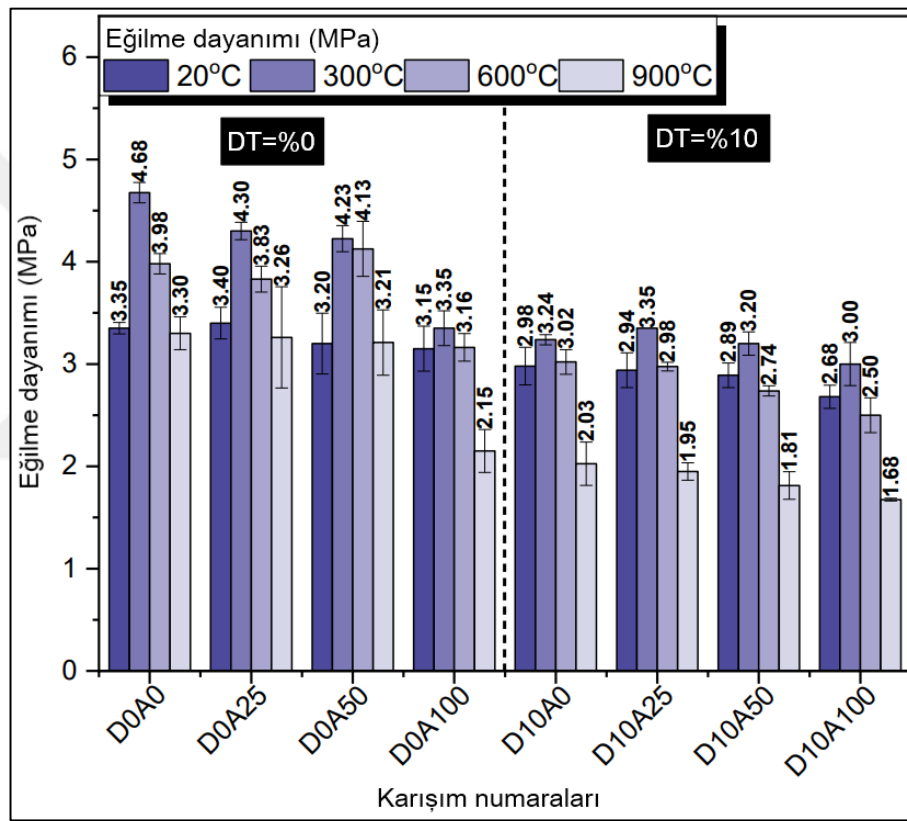


Şekil 4. 21 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri (%)

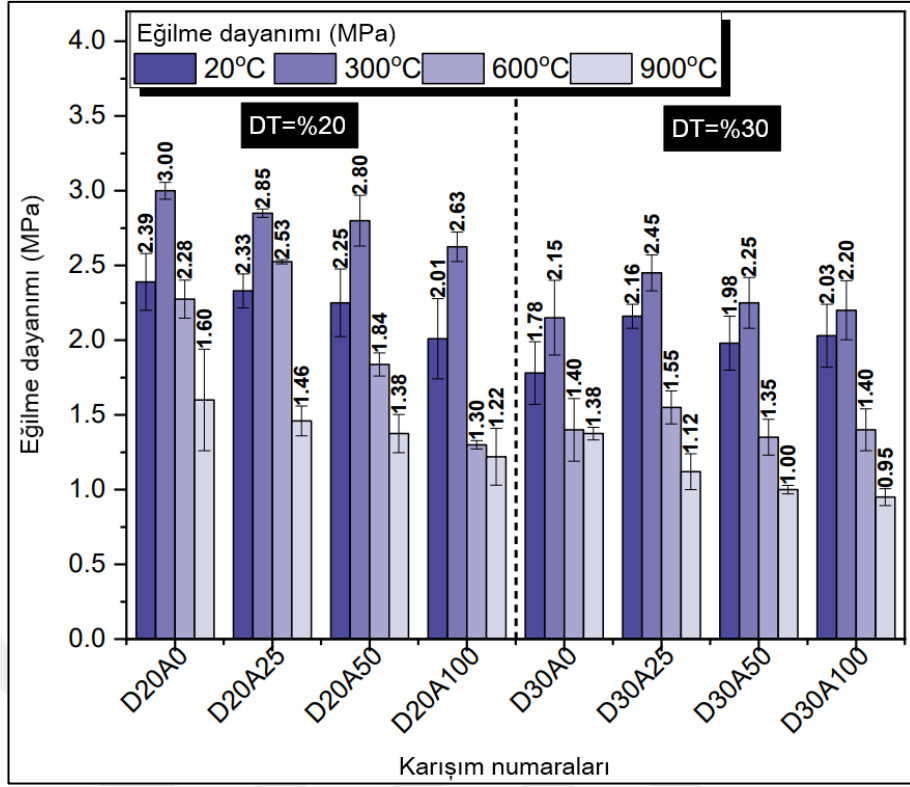
4.9.2 Eğilme Dayanımı

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de, ince agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT ikamesinin 28 gün boyunca kürlenene ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılan AAH karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisini gösterilmektedir. AAH numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı değişim yüzdeleri ise Şekil 4.24 ve 4.25’de gösterilmektedir. Basınç dayanımı performansına benzer şekilde, 300°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra tüm AAH karışımlarının eğilme dayanımları artış göstermiştir. Bu artış, C-S-H jellerinin gelişimine yardımcı olan ve yüksek sıcaklıklarda direncini artıran reaksiyona girmemiş YFC ve DT parçacıklarının neden olduğu daha fazla geopolimerizasyona atfedilebilir (Song vd., 2022). Buhar üretmeye ve "içsel otoklavlama"ya ek olarak ısıtma, artan hidrasyonu destekler ve dolayısıyla kimyasal limitleri yükseltir. AAH'ye 300°C ve 600°C’de uygulanan ısı işlem reaksiyona girmemiş YFC taneleri ile kalan hidroksil anyon miktarı arasında reaksiyonu artırarak bir hidrotermal reaksiyona (içsel otoklavlama) neden olur. Elde edilen sonuçlar daha önceki araştırmalarla tamamen tutarlıdır (Aydın ve Baradan, 2012, s.; Bakharev vd., 1999; Ramadan vd., 2021; Rashad vd., 2016). YFC yerine DT kullanıldığında AAH karışımlarının yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldıktan sonraki eğilme dayanımı, basınç dayanımı performansının aksine büyük ölçüde düşmüştür. Artan DT içeriği, özellikle 900°C’ye maruz kaldıktan sonra eğilme dayanımını oldukça düşürmektedir. SK yerine AK ikamesi ise, AAH karışımlarının eğilme dayanımı performansı üzerinde genellikle olumsuz etki göstermiştir. DT içermeyen karışımların eğilme dayanımları, tüm sıcaklık aralıklarında DT içeren karışımlara oranla daha yüksek seyretmiştir. D0A50 karışımı 300, 600 ve 900°C’de sırasıyla %31,9; %28,8 ve %0,3'lük eğilme dayanımı artışıyla en iyi performansı sergiledi. Ancak %0 DT içeriğinde %100 AK içeren karışım (D0A100), 900°C’de yüksek sıcaklık etkisine karşı en kötü dirence sahiptir. %10 DT içeriğinde D10A25 karışımı, 300°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra %13,9'luk bir eğilme dayanımı artışıyla en yüksek dayanım artışına sahip olmuştur. Açıkça görüldüğü gibi, 900°C’de AK içeriğinin artması ile karışımların eğilme dayanımları azalmış ve en kötü performans 600°C ve 900°C 'den sonra sırasıyla %6,7 ve %37,7'lik eğilme dayanımı düşüşüyle D10A100 karışımında gözlenmiştir. %20 DT ve %100 AK içeren karışım (D20A100), 300°C’ye maruz kaldıktan sonra en büyük eğilme dayanımı artışı, 600°C

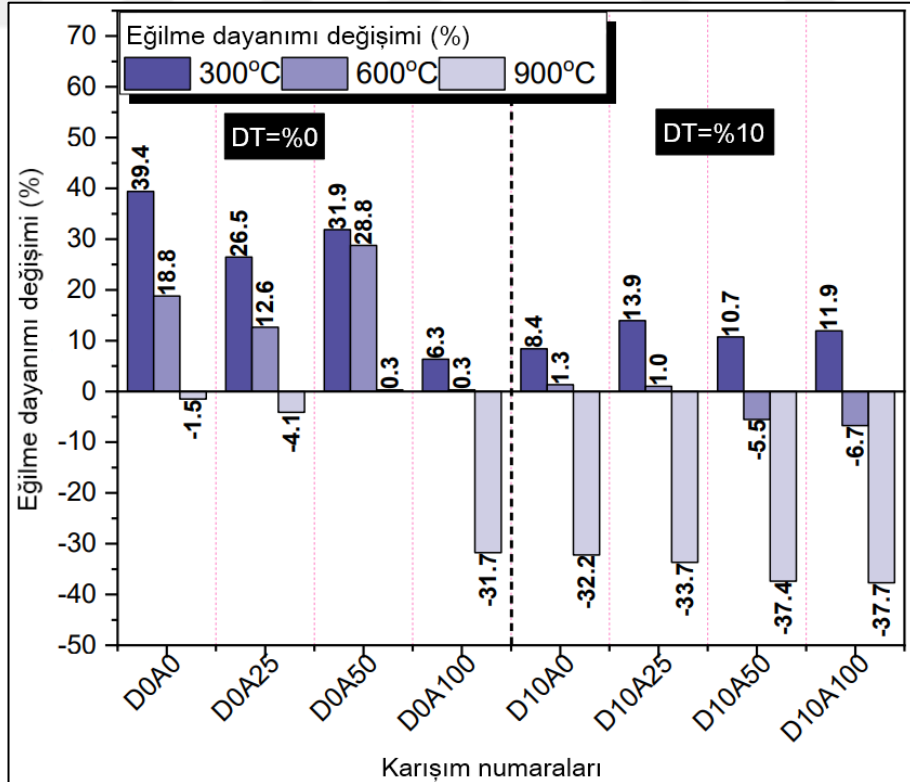
ve 900°C'ye maruz kaldıktan sonra ise en büyük eğilme dayanımı düşüşü gözlenmiştir. Öte yandan %30 DT içeriğinde 300°C'de AK ikamesinin artırılması eğilme dayanımında artışa neden olurken, 600°C ve 900°C'de AK ikamesinin artırılması genellikle eğilme dayanımında düşüşe neden olmuştur. %30 DT içeriğinde, tüm sıcaklık aralıkları için D30A0 karışımı en yüksek eğilme dayanımı performansını göstermiştir. AK içeriğindeki artışın, DT içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımını olumsuz etkilediği sonucuna varılabilir. Bu durum, DT ve AK içeriğindeki artışla birlikte AAH karışımlarının artan gözenekliliğine bağlanabilir.



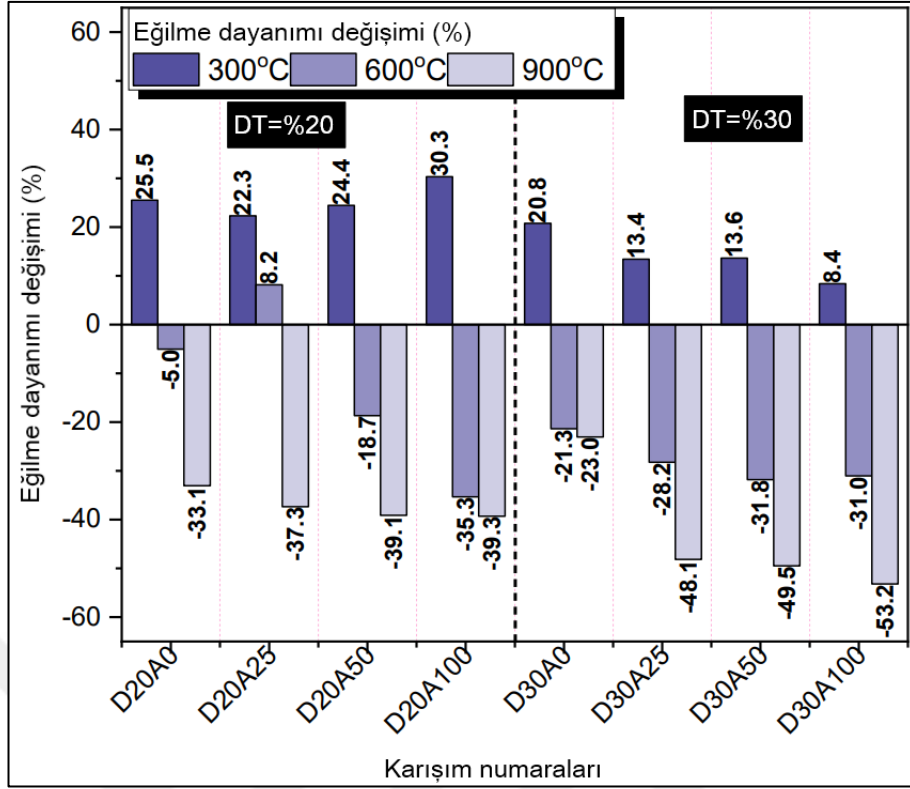
Şekil 4. 22 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımları



Şekil 4. 23 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımları



Şekil 4. 24 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı değişimleri (%)

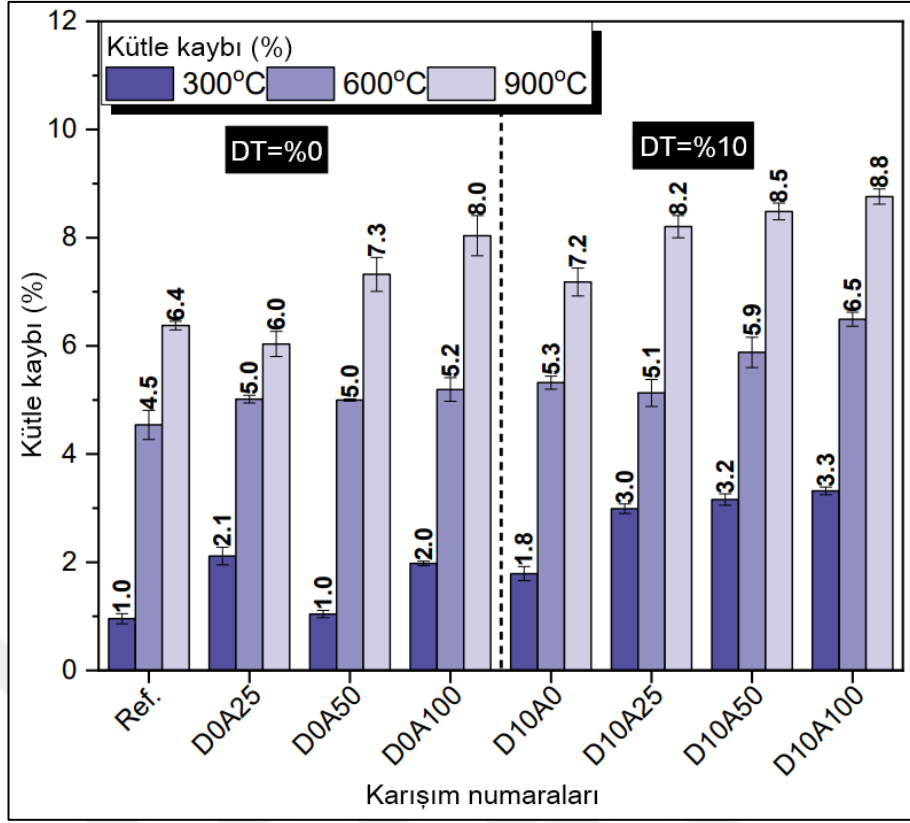


Şekil 4. 25 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı değişimleri (%)

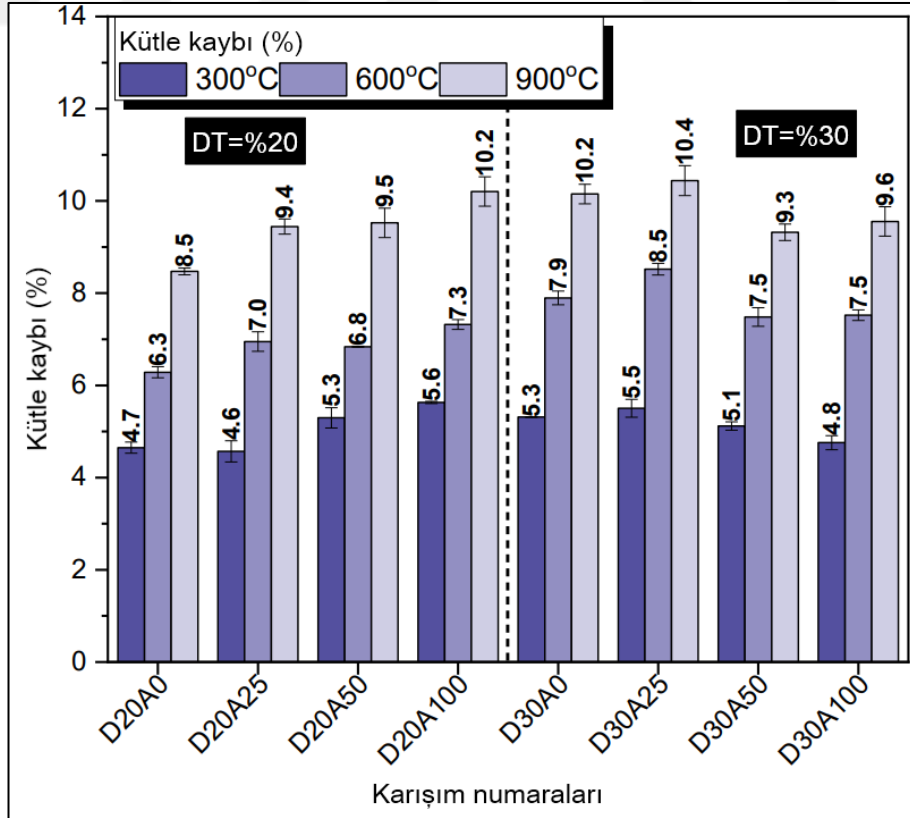
4.9.3 Kütle Kaybı

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de, ince agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT ikamesinin 28 gün boyunca kürlenene ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılan AAH karışımlarının ortalama kütle kaybı üzerindeki etkisini gösterilmektedir. Tüm AAH karışımlarında maruz kalınan sıcaklık arttıkça karışımların kütle kaybı da artmıştır. Ayrıca, sonuçlar AAH karışımlarında kullanılan DT ve AK içeriğinin artmasıyla beraber kütle kaybının da arttığını ortaya koymaktadır. DT içermeyen karışımlar arasında, %100 AK içeren D0A100 karışımında özellikle 600°C ve 900°C sıcaklığa maruz kalmanın ardından sırasıyla %5,2 ve %8,0 oranında en büyük kütle kayıpları gerçekleşmiştir. %10 DT içeriğinde de benzer sonuçlar elde edilmekle beraber, karışımlarda daha fazla kütle kaybı yaşanmıştır. DT içermeyen karışımlarda olduğu gibi, %10 DT içeren karışımlar arasında da %100 AK ikame edilen D10A100 karışımı yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra en büyük kütle kaybını yaşayan karışımdır. D10A100 karışımı, 600°C ve 900°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla %6,5 ve %8,8’e varan kütle kaybı yaşamıştır. %20 DT içeriğinde de benzer sonuçlar elde edilmekle beraber,

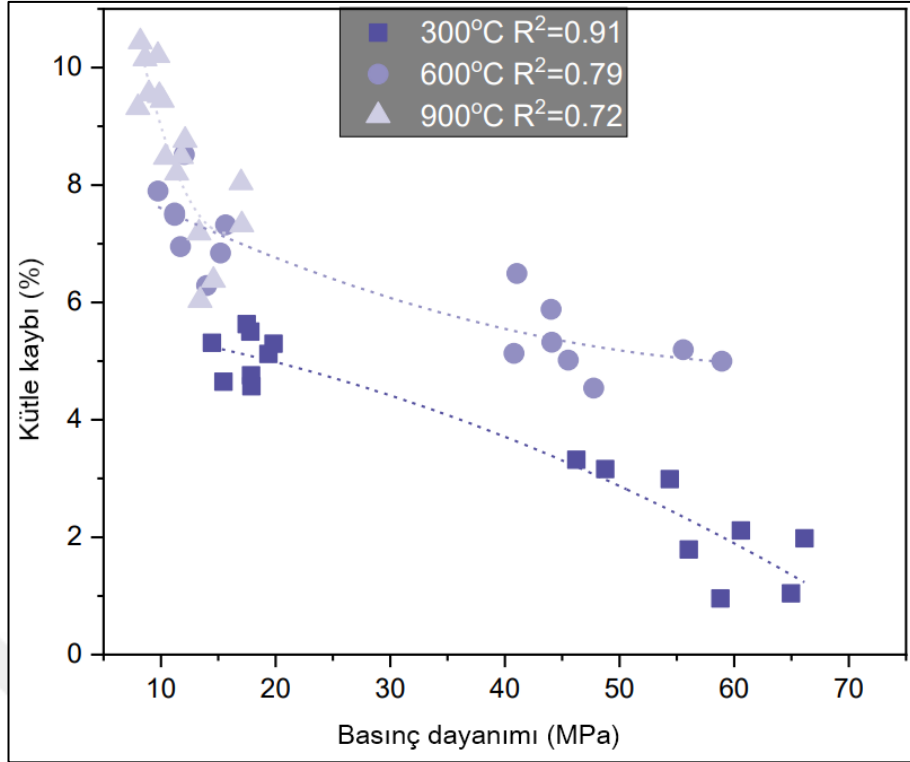
önceki %0 ve %10 DT içeriklerine nazaran daha büyük kütle kayıpları meydana gelmiştir. %20 DT içeren karışımlar arasında, yüksek sıcaklıklarda en büyük kütle kaybı %100 AK içeren D20A100 karışımında gerçekleşmiştir. D20A100 karışımında, 600°C ve 900°C sıcaklığa maruz bırakılmanın ardından sırasıyla %7,3 ve %10,2 oranında kütle kaybı meydana gelmiştir. %0, 10 ve %20 DT içeren diğer karışımların aksine, %30 DT içeren karışımlar arasında en yüksek kütle kaybı %25 AK içeren D30A25 karışımında gerçekleşmiştir. D30A25 karışımında, 600°C ve 900°C'de sırasıyla %8,5 ve %10,4'e varan kütle kayıpları meydana gelmiştir. 600°C'nin altında YFC-DT bağlayıcılarında başka hiç bir bileşen ayrışmadığı için, kalsit dekarbonizasyondan daha düşük sıcaklıklardaki ağırlık kayıplarının su kayıplarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Emilen su yaklaşık 150°C'de, kimyasal olarak bağlı su molekülleri yaklaşık 300°C'de yok olur. OH grupları ise 700°C'ye kadar bulunmaya devam edebilir (Duxson, Lukey, vd., 2007; Perez-Cortes vd., 2021). Şekil 4.28'de görülebileceği gibi, AAH karışımlarının basınç dayanımı ve kütle kaybı arasındaki ilişkinin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklarda sırasıyla 0,91; 0,79 ve 0,72 R^2 değerlerine sahip olduğu keşfedilmiştir. Basınç dayanımı ve kütle kaybı ilişkisinin ters orantılı olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, basınç dayanımı yüksek olan numunelerde daha az kütle kaybı meydana gelmiştir.



Şekil 4. 26 %0 ve %10 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle kayıpları



Şekil 4. 27 %20 ve %30 DT içerikli karışımların yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle kayıpları



Şekil 4. 28 Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında karışımların basınç dayanımı ve kütle kaybı arasındaki ilişki

4.10 Donma-Çözülme Etkisi

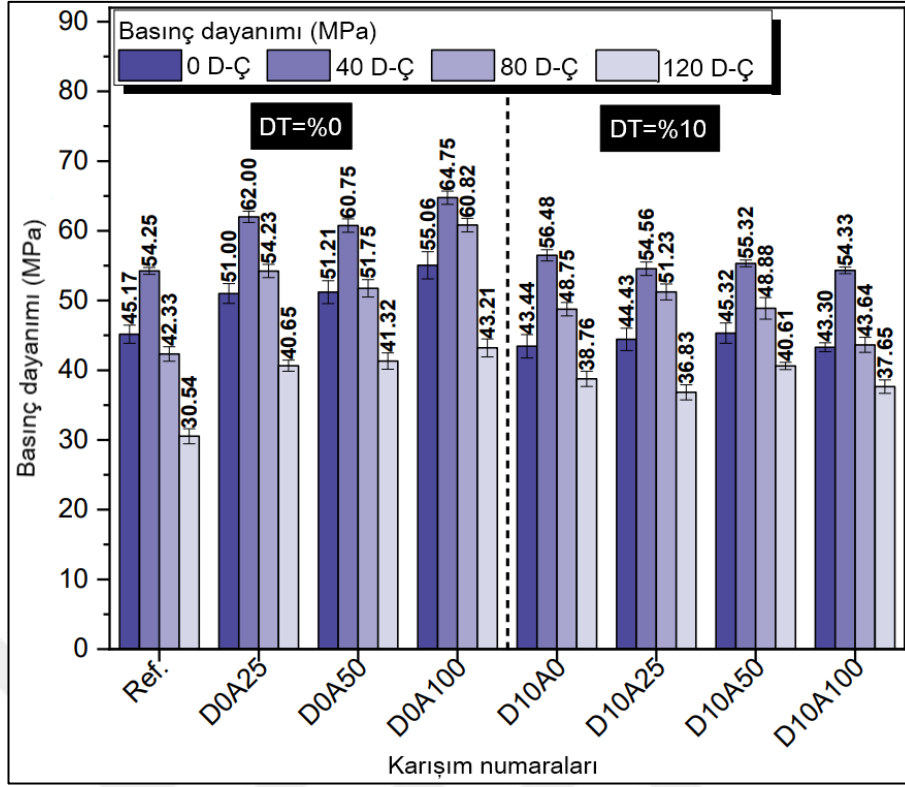
İnce agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT ikamesinin 40, 80 ve 120 donma-çözülme döngüsüne maruz kalan AAH karışımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Donma-çözülme direncinin belirlenebilmesi için ASTM C666 standardı kullanılmıştır. 40, 80 ve 120 donma-çözülme döngüsü gerçekleştirildikten sonra, her karışımdan üç adet numunenin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kütle kaybı incelenmiştir.

4.10.1 Basınç Dayanımı

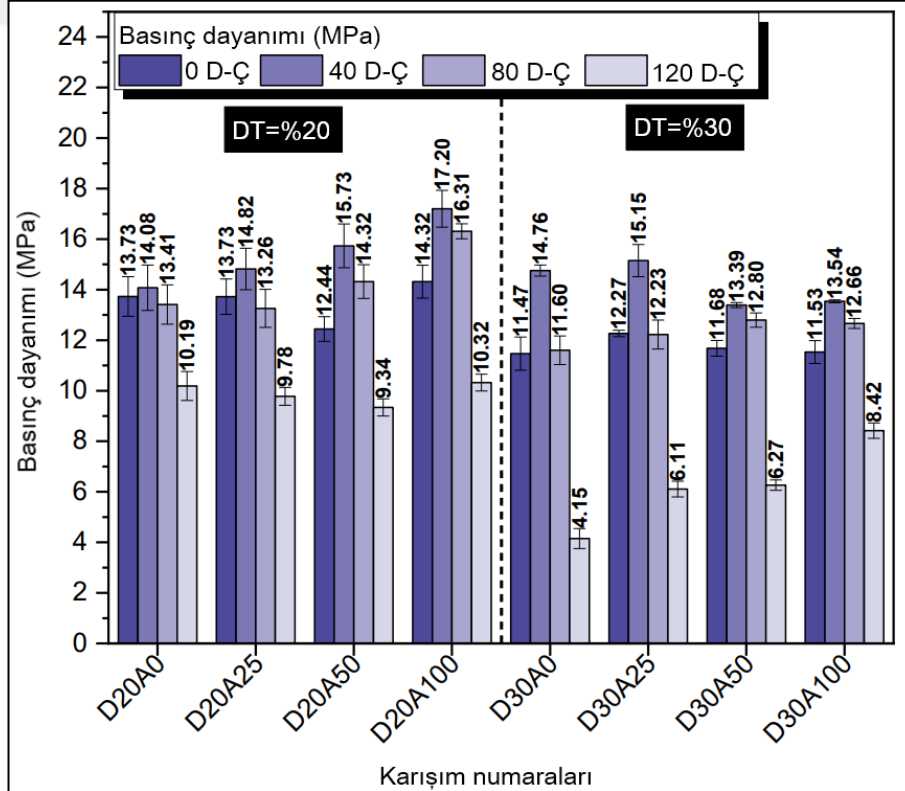
"Donma-çözülme direnci" terimi, bir malzemenin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilecek aşırı sıcaklık değişimlerini tolere etme kapasitesini tanımlar. Donma-çözülme (D-Ç) etkisi, hafif betonun daha fazla gözenekliliği ve serbest su tutma kapasitesi nedeniyle önemli bir dayanıklılık sorunu kaynağı olabilir. AAH numunelerindeki jel kıvrımlılık derecesi, gözeneklerin dağılımı ve gözeneklerin hacminin tümü donma-çözülme direncini etkiler. AAH numuneleri

çözülürken iç gerilimi serbest kalır ve gözenek hacmi azalır. Sonrasında ise daha fazla su emiliminin bir sonucu olarak gözeneklerde daha fazla buz hacmi oluşur. Bu genişleme, matris duvarlarında sıkıştırma gerilimi üretir. Bu testten sonra AAH karışımlarında gözenek çapları ve toplam gözeneklilik artmasına rağmen, gözeneklerin nihai hacim değişikliği matrisin elastik/plastik gerinimlerinden (yani kalıcı/geri kazanılmış deformasyonlardan) kaynaklanır. Hacim genişmesi ve daralmasının getirdiği yükleme ve boşaltmayı yorulma yüklemesi olarak modellemek mümkündür (Abdollahnejad vd., 2020; O. Y. Bayraktar, Eshtewı, vd., 2021; O. Y. Bayraktar, Kaplan, vd., 2021; O. Y. Bayraktar, Soylemez, vd., 2021; O. Y. Bayraktar vd., 2022; Gencel, Benli, vd., 2021). Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da, ince agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT ikamesinin 28 gün boyunca kürlenene ve 0, 40, 80 ve 120 gün D-Ç döngüsüne tabi tutulan AAH karışımlarının ortalama basınç dayanımı üzerindeki etkisini gösterilmektedir. AAH numunelerinin donma-çözülme etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişim yüzdeleri ise Şekil 4.31 ve 4.32'de gösterilmektedir. 40 D-Ç döngüsünden sonra tüm karışımların basınç dayanımı artışı göstermesinin zıttına, 120 D-Ç döngüsünden sonra tüm karışımların basınç dayanımı düşmüştür. Bu dayanım artışı, devam eden geopolimerizasyona bağlanabilir. %0 DT içeriğinde, en yüksek dayanım artışı %21,6'lık artış ile D0A25 karışımı için ölçülmüştür. Başlangıçta en düşük basınç dayanımına sahip olan referans karışım ise 40 D-Ç döngüsünde %20,1'lik dayanım artışı ile DT içermeyen karışımlar arasında en iyi ikinci basınç dayanımı değişimini göstermiştir. Referans karışım, 80 ve 120 D-Ç döngüsünden sonra ise DT içermeyen diğer karışımlara oranla çok daha fazla dayanım kaybı yaşamıştır. SK yerine AK ilavesinin AAH karışımlarının D-Ç direncini arttırdığı ve %50 AK içeren karışımın %19,3 ile en az basınç dayanımı kaybına sahip olduğu görülmüştür. Tüm D-Ç döngüleri arasında (40,80 ve 120 döngü) %10 oranında DT içeren karışımlar en iyi donma-çözülme direncini göstermiştir. 40 ve 80 D-Ç döngüsünden sonra, en büyük basınç dayanımı artışı D10A0 ve D10A25 karışımlarında elde edilmiştir. 120 D-Ç döngüsü sonrasında ise en düşük dayanım kaybı %10,4 ile %50 AK içeren D10A50 karışımında gerçekleşmiştir. Donma-çözülme etkisine maruz kalma için optimum karışımın YFC yerine %10 DT içeren karışımlar olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, (Degirmenci ve Yılmaz, 2009) tarafından önceden yapılan bir çalışma ile desteklenmiştir. Yazarlar, %10 ve %15 diatomit içeren harçların donma ve çözülmeden kaynaklanan hasarlara karşı daha fazla

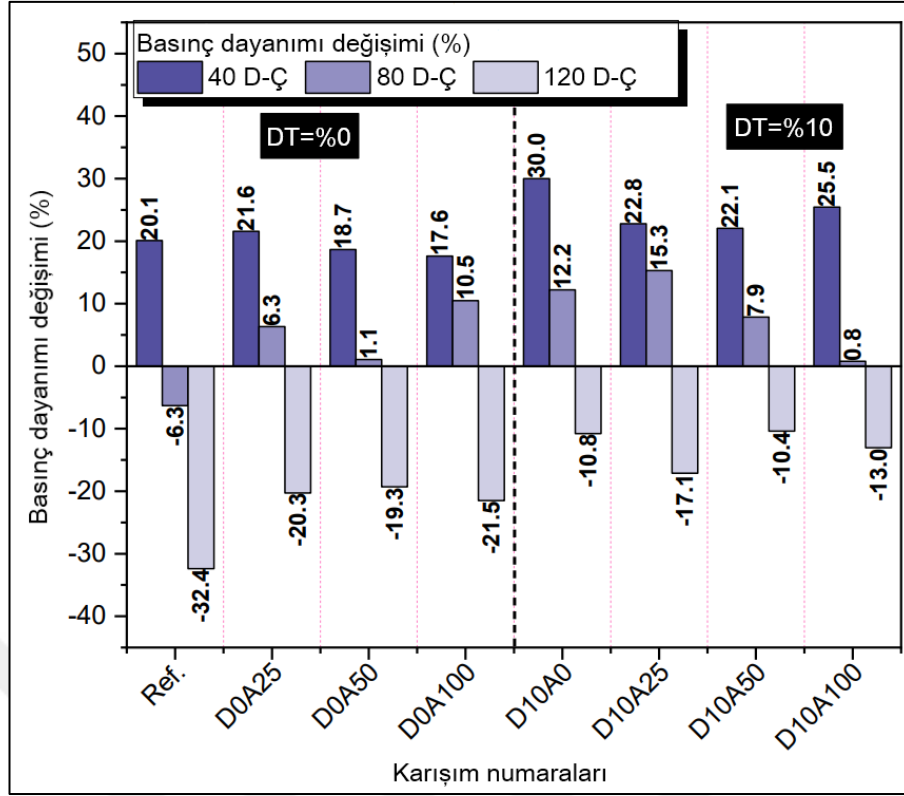
direnç gösterdiğini kanıtlamıştır. %20 DT içeren tüm karışımlarda (D20A0,D20A25,D20A50,D20A100), 40 D-Ç döngüsünden sonra dayanım artışı gözlemlenmiştir. Bu karışımlar arasında yüksek dayanım artışı D20A50 karışımında gerçekleşmiştir. D20A50 karışımında, 40 ve 80 D-Ç çevriminden sonra sırasıyla %26,4 ve %15,1'lik dayanım artışı meydana gelmiştir. Aynı karışım (yani D20A50), 120 D-Ç döngüsüne maruz kaldığında da %20 DT içeren karışımlar arasında en az dayanım kaybı gerçekleşen karışımdır. Karışımlar 120 D-Ç döngüsüne maruz bırakıldığında, en iyi D-Ç direncini %0, %10 ve %20 DT içeriğinin yanı sıra %50 AK içeren AAH karışımları sergilemiştir. Önceki karışımlar gibi %30 DT içeren tüm karışımlarda da 40 D-Ç döngüsünden sonra dayanım artışı gözlemlenmiştir. D30A0 karışımı, 40 D-Ç döngüsünden sonra %28,7 dayanım artışı ile %30 DT içeren karışımlar arasında en yüksek dayanım artışı görülen karışım olmuştur. %30 DT içeren ve 40 D-Ç döngüsüne maruz bırakılan karışımlarda, AK içeriğinin artmasıyla dayanım artışının düştüğü görülmektedir. Fakat aynı DT içeriğinde (DT=%30) AK içeriğinin artması, 80 ve 120 D-Ç döngüsüne maruz bırakılan karışımlarda D-Ç direncini iyileştirmiştir. D30A100 karışımı, 80 ve 120 D-Ç döngüsüne tabi tutulduğunda en az dayanım kaybı gerçekleşen karışımdır. Betonun donmaya ve çözölmeye karşı korunması, görüldüğü gibi hava girişi ile sağlanabilir. AK ikamesi ile birlikte birim ağırlığın azalması ve gözenekliliğin artması, hava girişine neden olan etkenlerdir (O. Y. Bayraktar, Eshtewı, vd., 2021; O. Y. Bayraktar, Soylemez, vd., 2021; O. Y. Bayraktar vd., 2022; Gencel, Benli, vd., 2021). Sonuçlar, SK yerine %50 AK ve YFC yerine %10 DT ikame edilerek elde edilen D10A50 karışımının tüm karışımlar arasında en iyi donma-çözölme direncini gösterdiğini kanıtlamıştır.



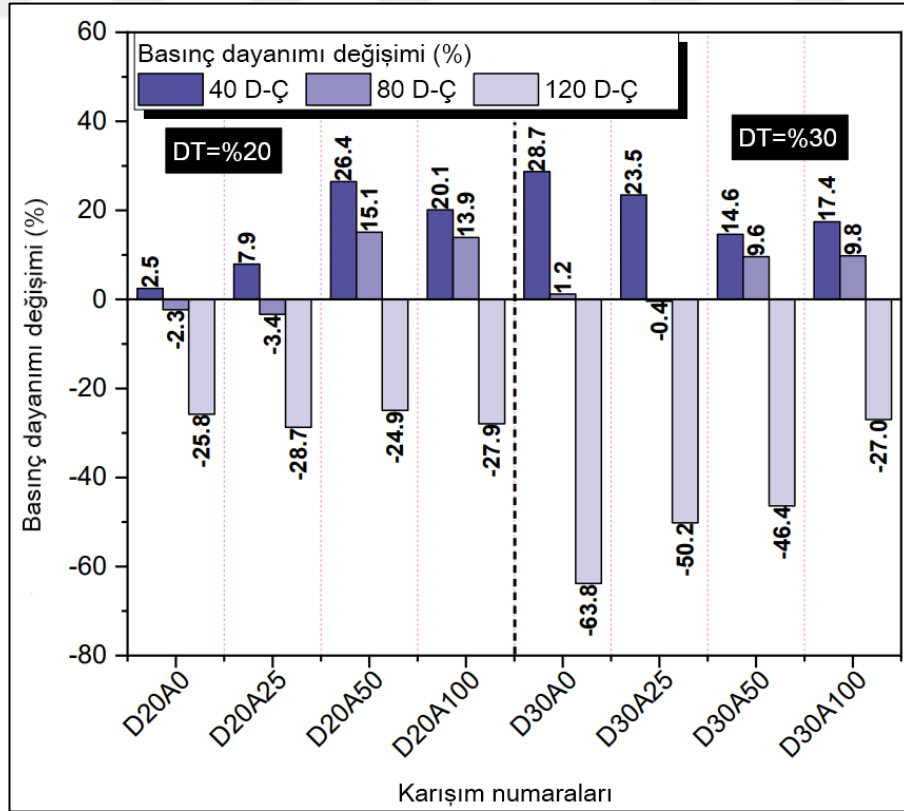
Şekil 4. 29 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözölme etkisi sonrasındaki basınç dayanımları



Şekil 4. 30 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözölme etkisi sonrasındaki basınç dayanımları



Şekil 4. 31 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri (%)

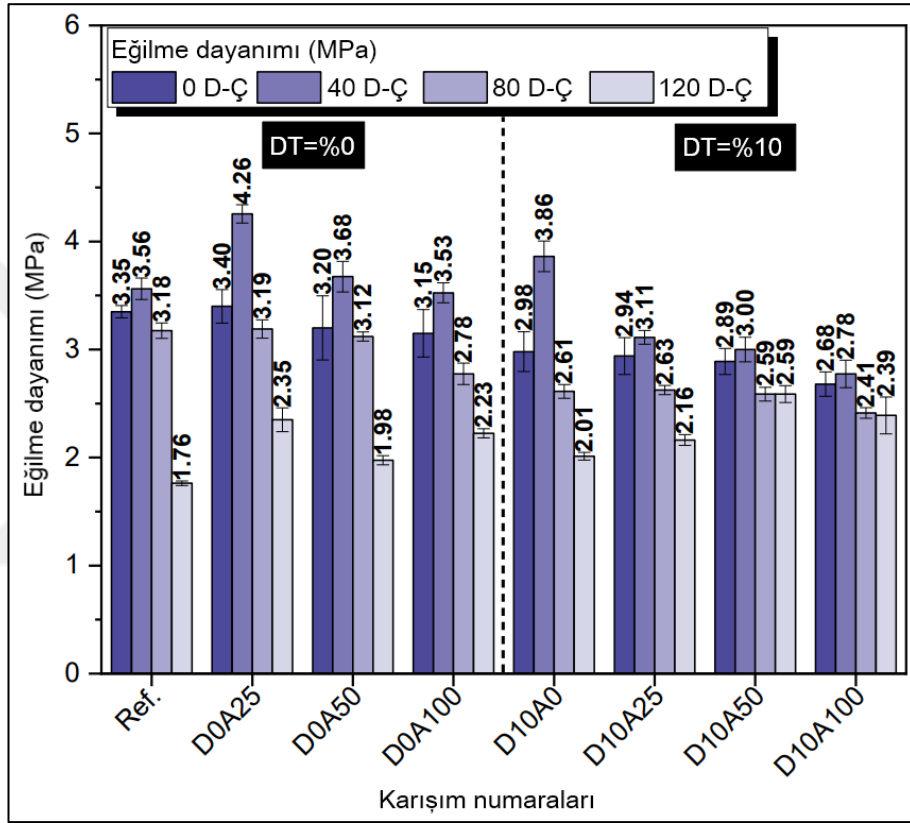


Şekil 4. 32 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri (%)

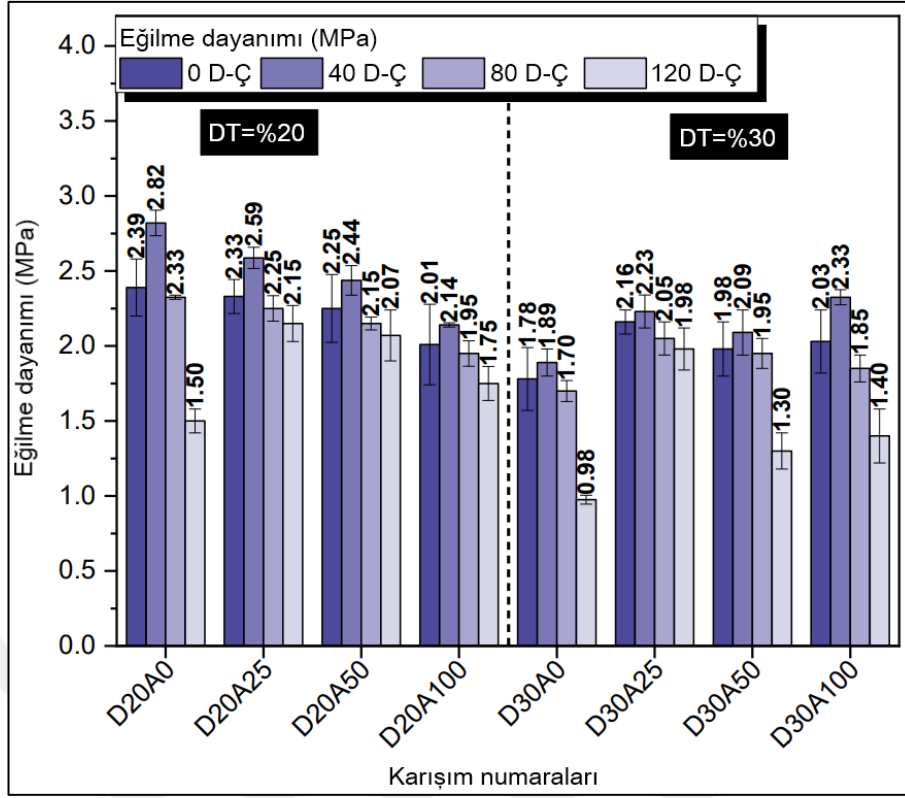
4.10.2 Eğilme Dayanımı

Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de, ince agrega olarak AK ve bağlayıcı olarak DT ikamesinin 28 gün boyunca kürlenerek 0, 40, 80 ve 120 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan AAH karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisini gösterilmektedir. AAH numunelerinin D-Ç çözülme döngüsü sonrasındaki eğilme dayanımı değişim yüzdeleri ise Şekil 4.35 ve 4.36’da gösterilmektedir. Basınç dayanımına benzer şekilde, tüm karışımların eğilme dayanımları 40 D-Ç döngüsünden sonra artış göstermiş, fakat 80 ve 120 D-Ç döngüsünden sonra düşmüştür. %0 DT içeriğinde, 40 D-Ç döngüsünden sonra en büyük eğilme dayanımı artışı basınç dayanımında da olduğu gibi %25 ile D0A25 karışımında görülmüştür. Bu dayanım artışı, geopolimerizasyonun devam etmesinden kaynaklanır. AK oranının %50 ve %100’e ulaştığı D0A50 ve D0A100 karışımlarında ise, AK oranının yükselişi 40 D-Ç döngüsüne maruz kalan karışımların eğilme dayanımı gelişimini düşürmüştür. DT içermeyen (DT=%0) ve 80 D-Ç döngüsüne maruz kalan karışımlar incelendiğinde, en düşük dayanım kaybı %2,5 ile %50 AS içeren karışımda görülmüştür. Yine DT içermeyen karışımlar 120 D-Ç döngüsüne maruz bırakıldığında ise en iyi D-Ç direnci SK yerine %100 AK ikame edilen D0A100 karışımı sergilemiştir. %10 DT içeriğinde, 40 D-Ç döngüsünden sonra en büyük eğilme dayanımı artışı basınç dayanımına benzer şekilde %29,5 ile D10A0 karışımında görülmüştür. D10A25, D10A50 ve D10A100 karışımlarında ise, AK oranının yükselişi 40 D-Ç döngüsüne maruz kalan karışımların eğilme dayanımı gelişimini düşürmüştür. Dayanım artışındaki bu azalma, AK ikamesinin geopolimerizasyonu azaltmasından kaynaklanabilir. Öte yandan %10 DT içeriğinde SK’yı %50 ve %100 AK ile değiştirmek, 80 ve 120 D-Ç döngüsünde eğilme dayanımı kaybını yaklaşık %10’lara düşürerek D-Ç direncini artırmıştır. %20 DT içeriğinde de AAH karışımlarında benzer eğilme dayanımı davranışı gözlenmiştir. %20 DT içeriğinde, karışımlar 40 D-Ç döngüsüne maruz bırakıldıktan sonra en büyük eğilme dayanımı artışı basınç dayanımına benzer şekilde %18 ile D20A0 karışımında görülmüştür. Bununla birlikte, 40 D-Ç döngüsünden sonra AK içeriğinin artması eğilme dayanımı gelişimini düşürmüştür. D20A25 karışımı, 120 D-Ç döngüsü sonrasında tüm AAM karışımları arasında %7,7 ile en az dayanım kaybına ve en iyi D-Ç direncine sahip olmuştur. %0, %10 ve %20 DT içeren karışımlarda AK içeriğinin artmasıyla beraber eğilme dayanımı yükselişi azalmış olmasına rağmen, %30 DT

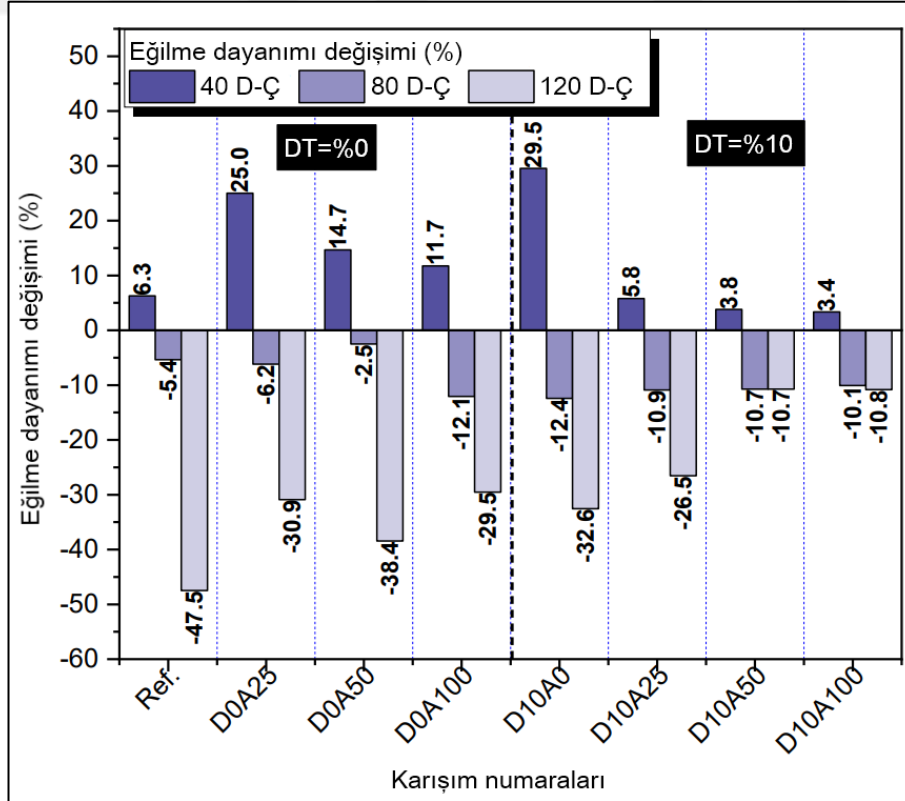
içeren karışımlarda AK oranının artması ile eğilme dayanımındaki yükseliş daha da artmıştır. %30 DT içeriğine sahip D30A100 karışımında, 40 D-Ç döngüsü sonrasında %14,3'lük bir dayanım artışı meydana gelmiştir. %20 DT içerikli karışımlarda görüldüğü gibi %30 DT içeriğinde de 120 D-Ç döngüsü sonrasında en iyi D-Ç direncini %8,3 dayanım kaybı ile %25 AK ikame edilen D30A25 karışımı göstermiştir.



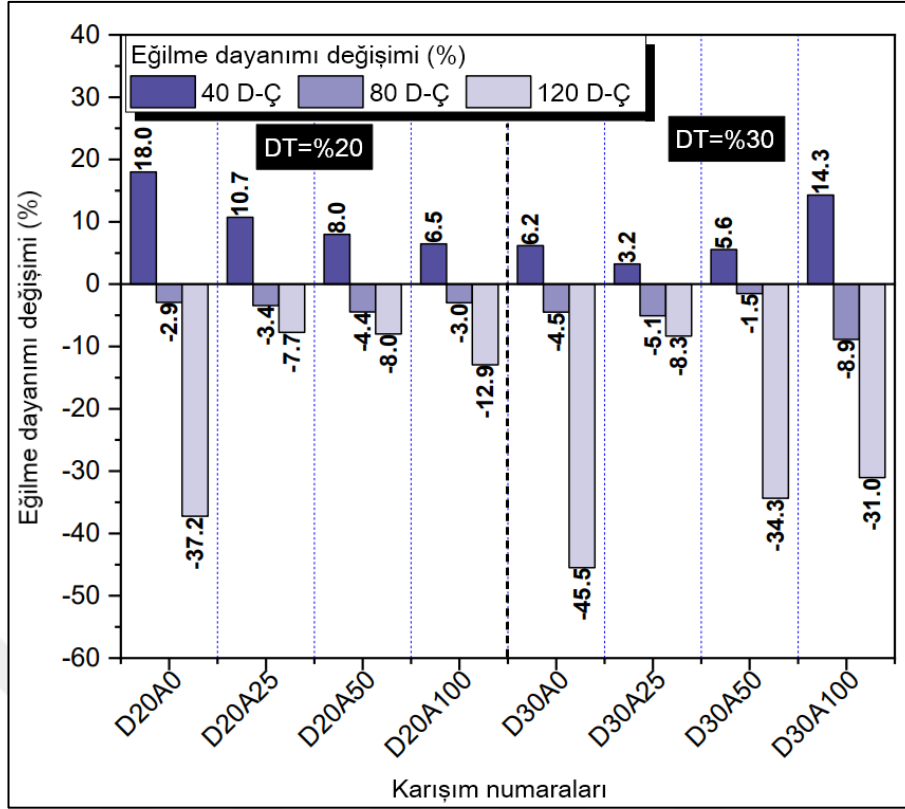
Şekil 4. 33 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki eğilme dayanımları



Şekil 4. 34 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki eğilme dayanımları



Şekil 4. 35 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı değişimleri (%)

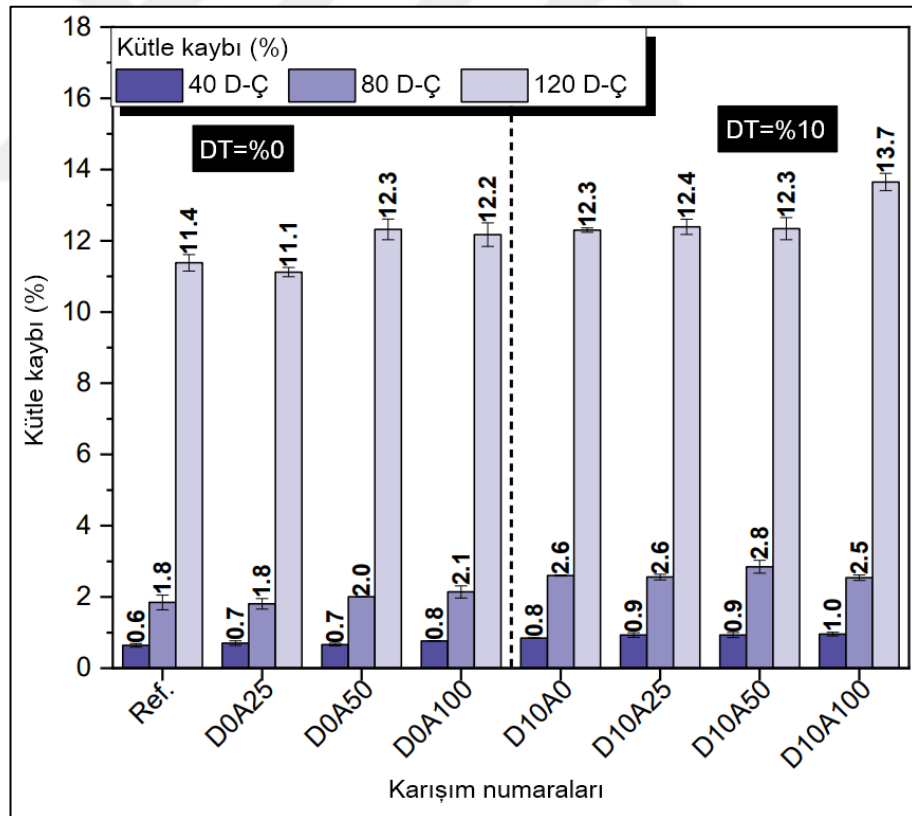


Şekil 4. 36 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı değişimleri (%)

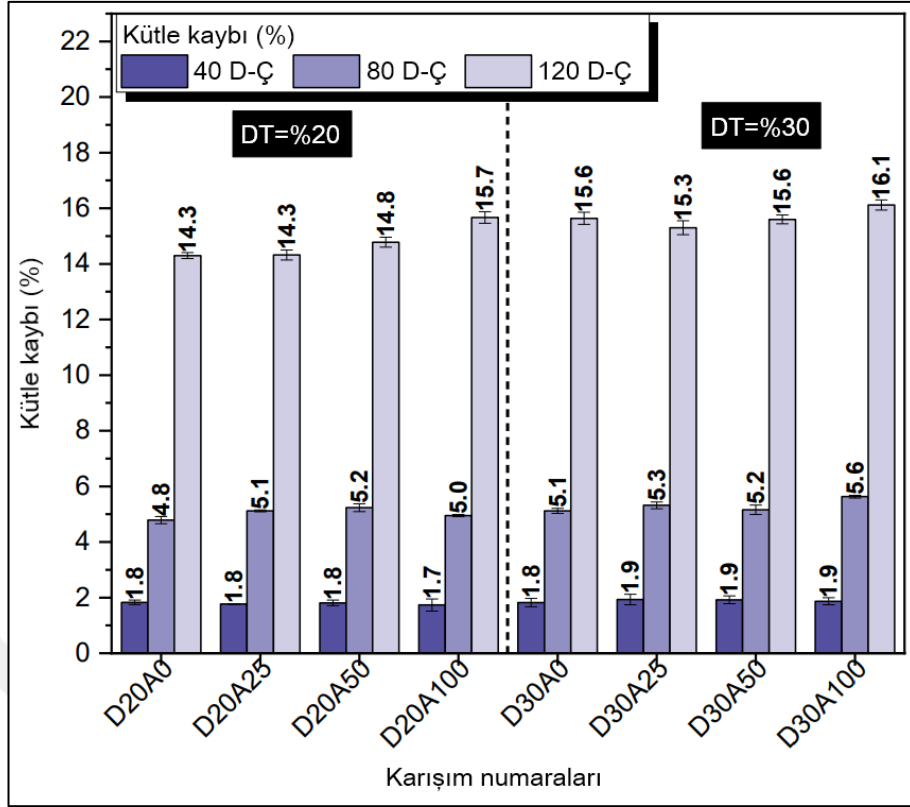
4.10.3 Kütle Kaybı

40, 80 ve 120 D-Ç döngüsünün neden olduğu AAH karışımlarının bozulma derecesini tahmin etmek için, Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da gösterildiği gibi AAH karışımlarının kütle değişimi kullanılmıştır. 40, 80 ve 120 D-Ç döngüsüne maruz bırakılan tüm karışımlarda kütle kaybı gerçekleşmiştir. D-Ç döngü sayılarının artmasıyla karışımlarda daha fazla kütle kaybı gözlenmiştir. SK yerine AK ikamesi, AK’nin daha gözenekli yapısından dolayı AAH numunelerinin kütle kaybını artırmıştır. YFC’nin DT ile değiştirilmesi de AAH karışımlarının kütle kaybını artırmıştır. D-Ç döngülerine maruz kaldıktan sonra en büyük kütle kaybı, %30 DT içeriğine sahip numunelerde ölçülmüştür. Kütle kaybındaki bu artış, numunelerin iç yapısının hızlı bir şekilde bozulmasından kaynaklanabilir. %0 DT içeriğine sahip karışımlar arasında D-Ç etkisine maruz kaldıktan sonra en büyük kütle kaybı, özellikle 120 D-Ç döngüsünde %50 ve %100 AS içeren karışımlarda ölçülmüştür. D0A100 karışımında, 80 ve 120 D-Ç döngüsünde sırasıyla %2,1 ve %12,2 oranında kütle kaybı gerçekleşmiştir. %10 DT içeriğine sahip karışımlarda da benzer sonuçlar elde

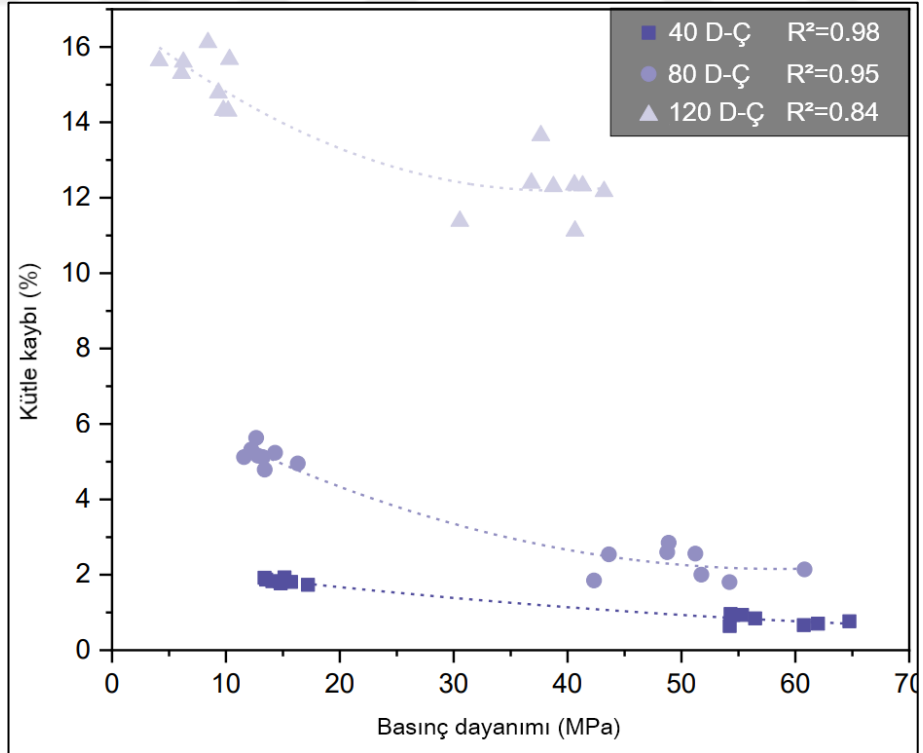
edilmiştir. 120 D-Ç döngüsüne maruz kaldıktan sonra en büyük kütle kaybı, SK yerine %100 oranında AK ikame edilen D10A100 karışımında ölçülmüştür. %10 DT içeren tüm karışımların kütle kaybı, 40 ve 80 D-Ç döngüleri sonrasında birbirine çok yakın olmuştur. %20 DT içeren numunelerde de benzer sonuçlar elde edilmiş olup, kütle kayıplarının daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. 120 D-Ç döngüsüne maruz kaldıktan sonra en büyük kütle kaybı, yine SK yerine %100 oranında AK ikame edilen karışımda görülmüştür. %20 DT içeriğinde numunelerin kütle kaybının birbirine çok yakın olduğu Şekil 4.38’de görülmektedir. Aslında, tüm D-Ç döngülerinde %20 ve %30 DT içeren numunelerin kütle kaybında da büyük bir fark görülmemiştir. Bu araştırmada, D-Ç döngülerinden sonra meydana gelen basınç dayanımı değişimleri ve kütle kaybı değişimleri birbiriyle uyumludur. Şekil 4.39, önceki çalışmalarda (Gencel, Bayraktar, vd., 2021; Kaplan vd., 2021) olduğu gibi, AAH numunelerinin basınç dayanımı ile kütle kaybı arasındaki doğrudan ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4. 37 %0 ve %10 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrası kütle kayıpları



Şekil 4. 38 %20 ve %30 DT içerikli karışımların donma-çözülme etkisi sonrası kütle kayıpları

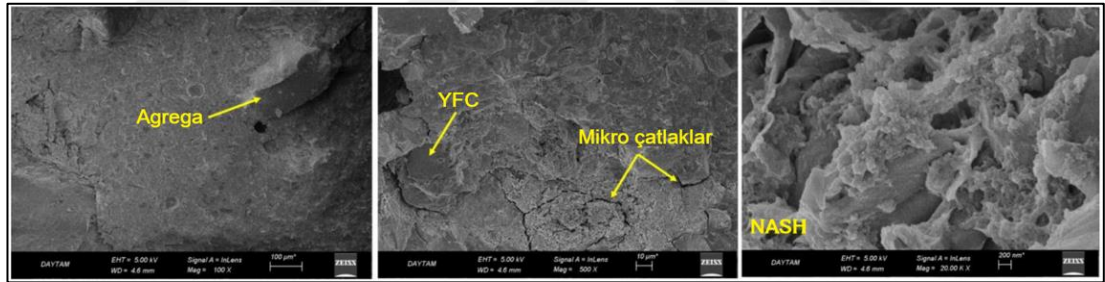


Şekil 4. 39 Donma-çözülme döngüleri sonrasında karışımların basınç dayanımı ve kütle kaybı arasındaki ilişki

4.11 Mikroyapı

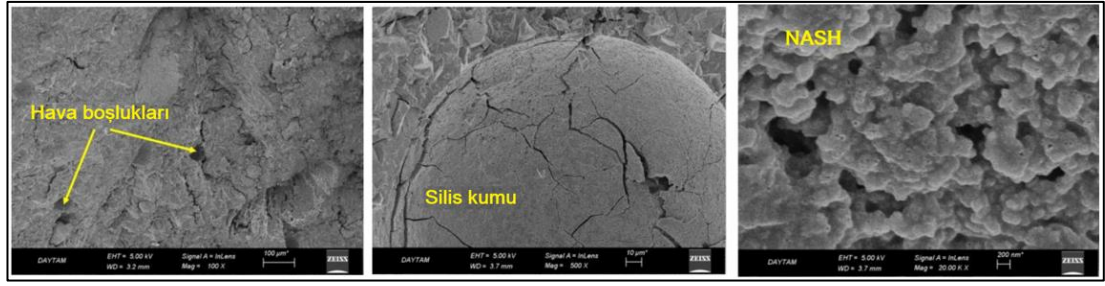
4.11.1 Isı Kürü Uygulanan Karışımların Mikroyapısal Özellikleri

Referans karışımın farklı büyütmelerdeki mikroyapı özellikleri Şekil 4.40'da verilmiştir. Matris içerisinde küresel hava boşluklarının olduğu ve bu boşlukların genellikle 10 µm'den küçük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca pasta ve agrega arasındaki aderansın oldukça iyi olduğu görülmektedir. Pasta ve agrega arasındaki ara yüzey oldukça yoğun olduğu için, mikro çatlak oranı çok düşüktür. Matristeki mikro çatlakların 80°C'de uygulanan termal külden kaynaklandığı düşünülmektedir. Matrisin bazı kısımlarında ise bir mikro çatlak ağı gözlenmiştir. Ek olarak, matrise gömülmüş ancak hidrate olmayan YFC taneleri belirlenmiştir. 90 günlük basınç dayanımı 50 MPa olan referans karışımında matrisin oldukça yoğun olduğu belirlenmiştir. YFC'nin matristeki alkali çözeltilerle reaksiyonu sonucunda nano ölçekli N-A-S-H jeli oluşmuştur.



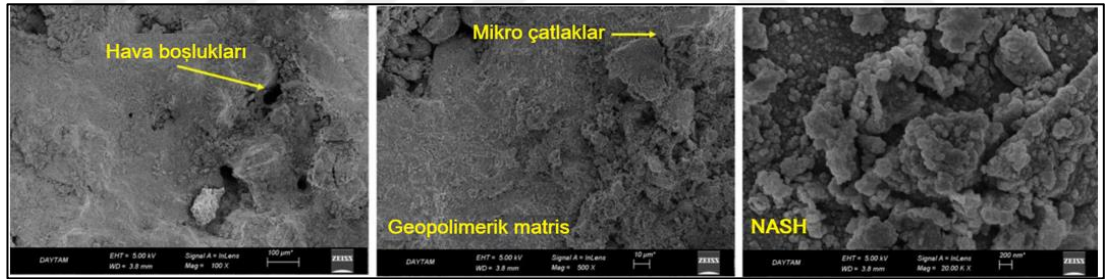
Şekil 4. 40 90 gün boyunca kürlenmiş referans karışımın mikroyapı görüntüleri

90 gün boyunca kürlenmiş D10A50 karışımının matrisi, yaklaşık 10 µm çapında hava boşluklarına sahipti (Şekil 4.41). Bu boşlukların genel olarak küre şeklinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu boşlukların polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Matris içerisinde mikro çatlak ağı olduğu tespit edilmiştir. Bu çatlaklar termal kürlenme işlemi esnasında oluşan rötre çatlaklarıdır. Ancak, silis kumu çatlaklarının basınç dayanımı testinin ardından olduğu keşfedilmiştir. SEM incelemelerinde pasta-agrega ara yüzeyinin oldukça yoğun olduğu görülmüştür. Zaten D10A50 karışımında, 90. günde yaklaşık 50 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu, pasta-agrega arayüzeyinin yoğun olduğunun kanıtıdır. Matriste yoğun bir N-A-S-H jeli de keşfedilmiştir. Bu jel, YFC ve DT'nin alkali çözeltilerle aktivasyonu nedeniyle oluşmuştur.



Şekil 4. 41 90 gün boyunca kürlenmiş D10A50 karışımının mikroyapı görüntüleri

Şekil 4.42, 90 günlük kürlenme işlemi sonrasında yaklaşık 13 mpa'lık bir basınç dayanımına ulaşmış olan D30A100 karışımının SEM resimlerini göstermektedir. Basınç dayanımı düşük olduğundan, pasta-agrega arasındaki arayüzey geçiş bölgesinde mikro çatlaklar gözlenmiştir. Diğer karışımlarda olduğu gibi D30A100 karışımında da küresel hava kabarcıkları tespit edilmiştir. DP oranı %30 olmasına rağmen matriste nano ölçekli N-A-S-H jelleri saptanmıştır. Bazı bölgelerde matrisin yoğun olduğunun görülmesiyle birlikte, düşük amorfizm derecesine sahip DT basınç dayanımını düşürmüştür. Ortaya çıkan N-A-S-H jellerinin genellikle YFC'den kaynaklandığı düşünülmektedir.

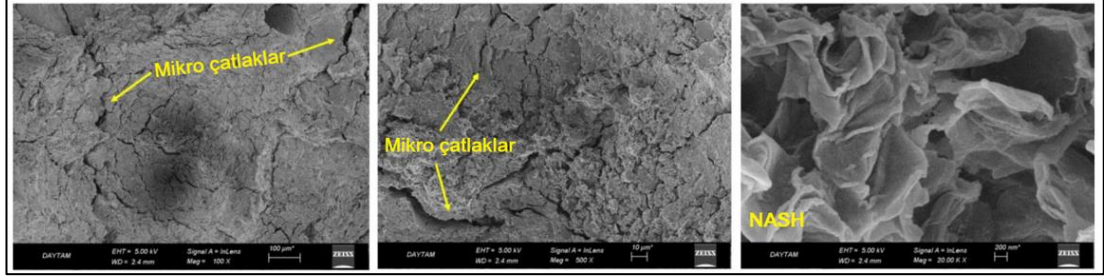


Şekil 4. 42 90 gün boyunca kürlenmiş D30A100 karışımının mikroyapı görüntüleri

4.11.2 Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalan Karışımların Mikroyapısal Özellikleri

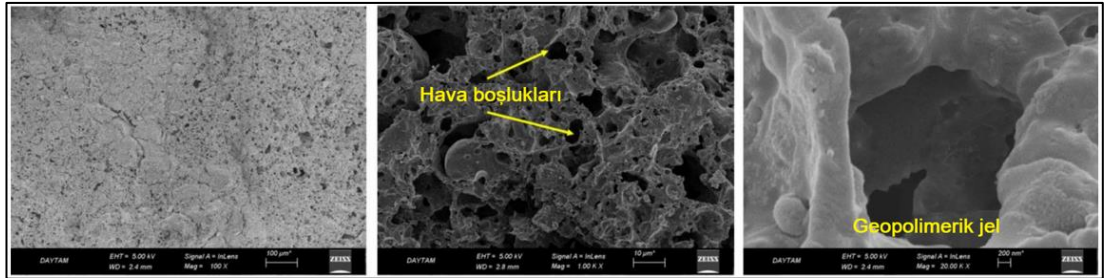
900°C sıcaklığa maruz bırakılan referans karışımın mikroyapısal özellikleri Şekil 4.43'de verilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra matristeki küresel mikro çatlakların sayısı artmıştır. Ek olarak, mikro çatlakların genişliğinin de arttığı tespit edilmiştir. 900°C sıcaklığa maruz kalmasına rağmen matrisin bazı kısımlarında N-A-S-H jellerinin varlığı gözlenmiştir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde bu jellerin 900°C'de zarar gördüğü, ancak varlığını sürdürdüğü belirlenmiştir. Karışımların ısı iletkenlik katsayıları geleneksel betondan daha düşük olduğu için, 900°C sıcaklık

etkisi harcın orta noktasına ulaşamamıştır. Ayrıca, yüksek gözeneklilik nispeten yüksek ısıнын yayılmasını yavaşlatmaktadır.



Şekil 4. 43 900°C'ye maruz bırakılan referans karışımın mikroyapı görüntüleri

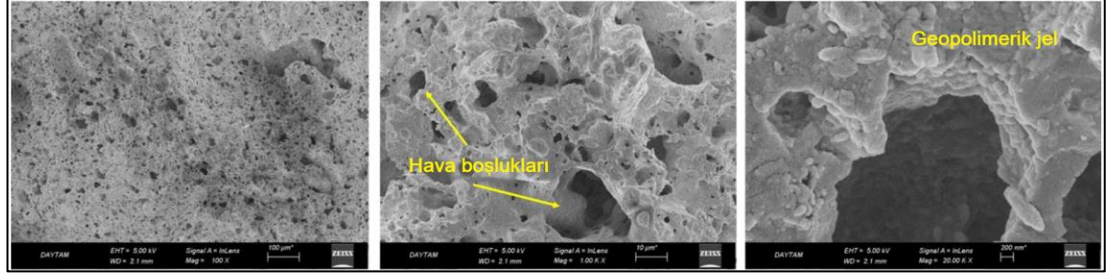
900°C sıcaklığa maruz kalan D10A50 karışımının matrisinde gözle görülür derecede yüksek gözeneklilik gözlenmektedir (Şekil 4.44). Bu boşlukların karışıma %10 oranında DT ikame edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. DT suyunu kaybettiğinde gözenekli bir yapıya dönüşebilir. Oluşan bu boşlukların çapı genellikle 10 µm'den küçüktür. DT kullanılan bu karışımlarda yüksek sıcaklığın etkisiyle gözeneklilik arttığı için, yüksek ısıнын difüzyonu daha da yavaşlamıştır. Bu nedenle, N-A-S-H jellerinin matriste nispeten hasar gördüğü tespit edilmiştir. Ancak DT, yüksek sıcaklık etkisi ile aktive olarak yeni bir jeopolimerik jelin oluşmasına yardımcı olmuştur.



Şekil 4. 44 900°C'ye maruz bırakılan D10A50 karışımının mikroyapı görüntüleri

%30 oranında DT ikame edilen D30A100 karışımında da benzer mikro yapı görüntüleri elde edilmiştir (Şekil 4.45). DT, bünyesindeki suyu kaybettikçe daha gözenekli bir forma dönüşür. Gerçekte, bazı yüzeylerde 10 µm'den büyük gözenekler tespit edilmiştir. Ayrıca %30 DT kullanılan D30A100 karışımının gözenekliliği arttığı için ısı iletkenlik katsayısı düşmüştür. Isıl iletkenlik katsayısının düşmesi, harcın merkezindeki sıcaklık etkisini azaltmıştır. Bu nedenle DT daha düşük bir sıcaklıkta

aktif olarak geopolimerik jeller oluşturmuş ve bu jellerdeki varlığını 900 °C'ye kadar sürdürmüştür.



Şekil 4. 45 900°C'ye maruz bırakılan D30A100 karışımının mikroyapı görüntüleri

5. SONUÇLAR

- YFC'nin DT ile değiştirilmesi, taze AAH karışımlarının yayılma çapını düşürmüştür. Diğer bir deyişle, kullanılan DT oranı arttıkça karışımların yayılma çapı düşmüştür. Tüm DT ikame oranlarında (%0, %10, %20 ve %30) AK kullanılmadığında en düşük yayılma çapı elde edilmiş, %50 oranında AK kullanılması ise yayılma çapını en yüksek değerlere ulaştırmıştır. Buradan, %50'ye kadar AK ikamesinin karışımların işlenebilirliği artırdığı sonucuna varılabilir.
- YFC'nin DT ile değiştirilmesi, AAH karışımlarının basınç dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır. Karışımlarda SK yerine AK ikame edilmesinin ise basınç dayanımı üzerinde fazla etkisi yoktur. Bununla birlikte, muhtevasında DT bulunmayan ancak SK yerine %100 oranında AK bulunan karışım (D0A100), 90 günün sonunda yaklaşık 60 MPa ile en yüksek basınç dayanımı değerine ulaşmıştır.
- Karışımların 7,28 ve 90. gün eğilme dayanımı verileri incelendiğinde, karışımlarda kullanılan DT oranının artmasıyla beraber eğilme dayanımının önemli ölçüde azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. AK ikamesi ise karışımların eğilme dayanımını fazla etkilememekle beraber, genellikle düşürmüştür. Buradan, karışımlarda basınç ve eğilme dayanımlarının paralellik gösterdiği sonucuna varılabilir.
- YFC'nin DT ile değiştirilmesi, AAH karışımlarının kuru birim hacim ağırlığında azalmaya neden olmuş ve en düşük kuru birim hacim ağırlık, %30 DT içeren karışımlarda görülmüştür.
- D30A100 karışımının en düşük ısı iletkenlik değerine ulaşmasından, YFC yerine DT ikamesinin gözenekliliği önemli ölçüde artırdığı ve ısı iletkenliği azalttığı sonucuna varılabilir. SK yerine AK kullanılması da karışımların ısı iletkenliğini az da olsa düşürmüştür.

- YFC yerine DT kullanılması, karışımların porozitesini ve su emme değerlerini büyük ölçüde artırmıştır. D30A50 karışımında en yüksek görünür porozite ve su emme değerleri elde edilmiştir.
- Karışıma DT'nin dahil edilmesi, kuruma büzülmesini önemli ölçüde artırmaktadır. DT içermeyen AAH karışımları, tüm karışımlar içerisinde en düşük büzülme değerlerini sergilemiştir. D0A100, kuruma süresi sonunda referans karışıma kıyasla %10,68'lik bir azalma ile 2108 mikro gerilimlik en düşük kuruma büzülmesi değerine sahip olmuştur.
- DT içermeyen ve %100 AK içeren AAH karışımı (D0A100), 28 günlük süre sonunda referans karışıma kıyasla %14.65 azalma ile $11.76 \text{ mm/s}^{0.5}$ 'lik en düşük kapilarite değerini göstermiştir. En düşük kapilarite değerine sahip olan karışım, aynı zamanda en yüksek basınç dayanımını sergilemiştir.
- %20 DT ve %50 AK ikamesi içeren D20A50 karışımı, 300°C ve 600°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla %59.4 ve %22.2 oranında önemli ölçüde basınç dayanımı artışı sergilemiştir. Aynı karışım, 900°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ise %20.7 dayanım kaybı ile tüm karışımlar arasında yüksek sıcaklığa karşı en iyi direnci sergileyen karışım olmuştur.
- YFC yerine DT kullanıldığında AAH karışımlarının yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldıktan sonraki eğilme dayanımı, basınç dayanımı performansının aksine büyük ölçüde düşmüştür. DT içeriğinin artması, özellikle 900°C'ye maruz kaldıktan sonra eğilme dayanımını oldukça düşürmektedir. SK yerine AK ikamesi ise, AAH karışımlarının eğilme dayanımı performansı üzerinde genellikle olumsuz etki göstermiştir.
- Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan AAH karışımlarında kullanılan DT ve AK içeriğinin artmasıyla beraber kütle kaybının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, basınç dayanımı yüksek olan numunelerde yüksek sıcaklık etkisi altında daha az kütle kaybı meydana gelmiştir.

- 40 D-Ç döngüsü sonrasında karışımların basınç ve eğilme dayanımlarında artış görülmekle beraber, 120 D-Ç döngüsü sonrasında azalma görülmüştür. 120 D-Ç döngüsü sonrasında referans karışımında yaklaşık 30 MPa basınç dayanımı elde edilirken, D30A100 karışımında yaklaşık 8 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Donma ve çözülme etkisine karşı en iyi direnci gösteren karışımların %10 DT içeren karışımlar olduğu gözlenmiştir. DT oranının %10'un üzerine çıkmasıyla D-Ç döngülerinden sonra basınç ve eğilme dayanımlarının önemli ölçüde azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Tüm karışımlarda kütle kaybının 40 D-Ç döngüsü sonrasında %2'nin altında olduğu tespit edilmiştir. 120 D-Ç döngüsü sonrasında ise karışımlarda %11'in üzerinde kütle kaybı meydana gelmiştir. Karışımlarda YFC yerine kullanılan DT oranı arttıkça kütle kaybı da artmıştır.
- Yüksek sıcaklık etkisinden sonra matristeki küresel mikro çatlakların sayısı artmıştır. Ek olarak, mikro çatlakların genişliğinin de arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca karışımlarda kullanılan DT oranının artmasıyla gözenekliliğin arttığı, dolayısıyla ısıl iletkenlik katsayısının düştüğü gözlenmiştir.
- Karışımlarda YFC yerine DT ikame edilmesi, karışımların kuru birim ağırlığını azaltarak daha hafif bir geopolimer elde etmemizi sağlamıştır. Ayrıca DT ikamesi karışımların ısıl iletkenliğini düşürerek yüksek sıcaklık etkisine ve donma-çözülme etkisine karşı daha dirençli kompozitler elde edilmesini sağlamıştır.
- Bunlara karşın YFC yerine ikame edilen DT oranının artmasıyla karışımların işlenebilirliği, basınç ve eğilme dayanımı performansı, kuruma büzülmesi ve kapilaritesi olumsuz yönde etkilenmiş olup, kompozitlerin görünür porozitesi ve su emmesi artmıştır.
- Bunlara karşın YFC yerine ikame edilen DT oranının artmasıyla karışımların işlenebilirliği, basınç ve eğilme dayanımı performansı, kuruma büzülmesi ve kapilaritesi olumsuz yönde etkilenmiş olup, kompozitlerin görünür porozitesi ve su emmesi artmıştır.

Sonuç olarak, DT ikameli geopolimerler taşıyıcı yapı elemanlarının tasarımından ziyade, hafif, ısıl iletkenliği düşük, yangın gibi yüksek sıcaklıklara ve donma-çözölme etkisine maruz kaldığında performansını koruyabilen yapı malzemelerinin üretiminde kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- Abdollahnejad, Z., Mastali, M., Woof, B., ve Illikainen, M. (2020). High strength fiber reinforced one-part alkali activated slag/fly ash binders with ceramic aggregates: Microscopic analysis, mechanical properties, drying shrinkage, and freeze-thaw resistance. *Construction and building materials*, 241, 118129.
- Adak, D., ve Mandal, S. (2019). Strength and durability performance of fly ash-based process-modified geopolymer concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), 04019174.
- Ağaoğlu, D. (2021). Isparta yöresi andezit trakit kayaçlarından krakle sır yapımı ve seramik yüzeylerde uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü*.
- Ahmadi, Z., Esmaili, J., Kasaei, J., ve Hajialioghli, R. (2018). Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite. *Sustainable Materials and Technologies*, 16, 47-53.
- Aiken, T. A., Kwasny, J., Sha, W., ve Soutsos, M. N. (2018). Effect of slag content and activator dosage on the resistance of fly ash geopolymer binders to sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, 111, 23-40.
- Akbarnezhad, A., Huan, M., Mesgari, S., ve Castel, A. (2015). Recycling of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 152-158.
- Akçıl, A., Tuncuk, A., ve Deveci, H. (2007). Kuvarsın saflaştırılmasında kullanılan kimyasal yöntemlerin incelenmesi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 46(4), 3-10.
- Al-Mashhadani, M. M., Canpolat, O., Aygörmüş, Y., Uysal, M., ve Erdem, S. (2018). Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and building materials*, 167, 505-513.
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., ve Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.
- Alonso, S., ve Palomo, A. (2001). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Materials Letters*, 47(1-2), 55-62.
- Alpaslan, L. (2012). Atık lastik ve yüksek fırın cürufu ikameli çimentoların yüzey özelliklerinin çimento harçlarının fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Altındal, İ. (2020). Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi. Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

- Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., ve El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679.
- Ariffin, M. A., Hussin, M. W., Samadi, M., Lim, N. H. A. S., Mirza, J., Awalluddin, D., ve Othman, N. (2015). Effect of ceramic aggregate on high strength multi blended ash geopolymer mortar. *Jurnal Teknologi*, 77(16).
- Ariffin, M. A. M., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W., Tahir, M. M., ve Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and building materials*, 43, 80-86.
- Aruntaş, H. Y. (1996). Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği. Doktora tezi. *Mimarlık, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye*.
- Aslaner, M. (1989). Kor ve kor kırıntılı kayaçlar. *Karadeniz Teknik Üniversitesi*.
- Assi, L. N., Deaver, E. E., ve Ziehl, P. (2018). Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 167, 372-380.
- Aydın, S., ve Baradan, B. (2012). High Temperature Resistance of Alkali-Activated Slag-and Portland Cement-Based Reactive Powder Concrete. *ACI Materials Journal*, 109(4).
- Aydın, A. C., ve Gül, R. (2007). Influence of volcanic originated natural materials as additives on the setting time and some mechanical properties of concrete. *Construction and building materials*, 21(6), 1277-1281.
- Babal, M. (1994). *Ankara Kent içi Yollardaki Andezit ve Yapay Bordür Taşlarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35(4), 658-670.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., ve Cheng, Y.-B. (1999). Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and concrete research*, 29(10), 1619-1625.
- Baščarević, Z., Komljenović, M., Miladinović, Z., Nikolić, V., Marjanović, N., ve Petrović, R. (2015). Impact of sodium sulfate solution on mechanical properties and structure of fly ash based geopolymers. *Materials and Structures*, 48(3), 683-697.
- Baykara, H., Cornejo, M. H., Murillo, R., Gavilanes, A., Paredes, C., ve Elsen, J. (2017). Preparation, characterization and reaction kinetics of green cement: Ecuadorian natural mordenite-based geopolymers. *Materials and Structures*, 50(3), 1-12.

- Bayraktar, O. Y., Eshtewi, S. S. T., Benli, A., Kaplan, G., Toklu, K., ve Gunek, F. (2021). The impact of RCA and fly ash on the mechanical and durability properties of polypropylene fibre-reinforced concrete exposed to freeze-thaw cycles and MgSO₄ with ANN modeling. *Construction and Building Materials*, 313, 125508.
- Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., ve Benli, A. (2022). The effect of recycled fine aggregates treated as washed, less washed and unwashed on the mechanical and durability characteristics of concrete under MgSO₄ and freeze-thaw cycles. *Journal of Building Engineering*, 48, 103924.
- Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Gencel, O., Benli, A., ve Sutcu, M. (2021). Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag. *Construction and Building Materials*, 288, 123128.
- Bayraktar, O. Y., Soylemez, H., Kaplan, G., Benli, A., Gencel, O., ve Turkoglu, M. (2021). Effect of cement dosage and waste tire rubber on the mechanical, transport and abrasion characteristics of foam concretes subjected to H₂SO₄ and freeze-thaw. *Construction and Building Materials*, 302, 124229.
- Bayraktar, S. (2010). Çatalca (İstanbul) Batısı Kuvarsit ve Kuvars Kumu Yataklarının Jeokimyasal-Mineralojik İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Benli, A. (2019). Mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing binary and ternary mixes of fly ash and silica fume. *Structural Concrete*, 20(3), 1096-1108.
- Benli, A., Karatas, M., ve Toprak, H. A. (2020). Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 239, 117895.
- Bernal, S. A., de Gutiérrez, R. M., Pedraza, A. L., Provis, J. L., Rodriguez, E. D., ve Delvasto, S. (2011). Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and concrete research*, 41(1), 1-8.
- Bilenler Altundal, M. (2019). Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Katkılı Geopolimer Betonların% 5 Sülfürik Asit Etkisinde Mekanik Davranışı. Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Bilodeau, A., ve Malhotra, V. M. (2000). High-volume fly ash system: Concrete solution for sustainable development. *Materials Journal*, 97(1), 41-48.
- Bondar, D. (2013). Geo-polymer concrete as a new type of sustainable construction materials. *Proceedings of the Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (ICSCMT)*, 18-21.

- Brake, N. A., Allahdadi, H., ve Adam, F. (2016). Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 113, 536-543.
- Brown, T. J., Bide, T., Walters, A. S., Idoine, N. E., Shaw, R. A., Hannis, S. D., Lusty, P. A. J., ve Kendall, R. (2011). World mineral production 2005-2009. *Nottingham, UK: British Geological Survey*.
- Cheng, T.-W., ve Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals engineering*, 16(3), 205-210.
- Chi, M., ve Huang, R. (2013). Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and building materials*, 40, 291-298.
- Cioffi, R., Maffucci, L., ve Santoro, L. (2003). Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinite residue. *Resources, Conservaation and Recycling*, 40(1); 27-38.
- Colangelo, F., Cioffi, R., Roviello, G., Capasso, I., Caputo, D., Aprea, P., Liguori, B., ve Ferone, C. (2017). Thermal cycling stability of fly ash based geopolymer mortars. *Composites part b: engineering*, 129, 11-17.
- Collins, F., ve Sanjayan, J. G. (2000). Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1401-1406.
- Corinaldesi, V., Mazzoli, A., ve Moriconi, G. (2011). Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials ve Design*, 32(3), 1646-1650.
- Cwirzen, A., Provis, J. L., Penttala, V., ve Habermehl-Cwirzen, K. (2014). The effect of limestone on sodium hydroxide-activated metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 66, 53-62.
- Çelikten, S. (2021). Mechanical and microstructural properties of waste andesite dust-based geopolymer mortars. *Advanced Powder Technology*, 32(1), 1-9.
- Çoğulu, H. E. (1973). Petrografi ve Petroloji, 1. Baskı, *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Yayınları, İstanbul*.
- Dao, D. V., Ly, H.-B., Trinh, S. H., Le, T.-T., ve Pham, B. T. (2019). Artificial intelligence approaches for prediction of compressive strength of geopolymer concrete. *Materials*, 12(6), 983.
- Davidovits, J. (1984). Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process. Google Patents.
- Davidovits, J. (1987). Ancient and modern concretes: What is the real difference? *Concrete International*, 9(12), 23-28.

- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: İnorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994). Geopolymers: Man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. *Journal of Materials education*, 16, 91-91.
- Davraz, M., Ceylan, H., Topçu, İ. B., ve Uygunoğlu, T. (2018). Pozzolanı effect of andesite waste powder on mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 165, 494-503.
- Dawczynski, S., Krzywón, R., Gorski, M., Dubinska, W., ve Samoszuk, M. (2017). *Geopolymer concrete-applications in civil engineering*.
- Deb, P. S., Nath, P., ve Sarker, P. K. (2014). The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials ve Design (1980-2015)*, 62, 32-39.
- Deb, P. S., Sarker, P. K., ve Barbhuiya, S. (2016). Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, 72, 235-245.
- Degirmenci, N., ve Yılmaz, A. (2009). Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. *Construction and Building Materials*, 23(1), 284-288.
- Demirboğa, R. (2003). Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. *Energy and buildings*, 35(2), 189-192.
- Demirboğa, R. (2007). Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures. *Building and Environment*, 42(7), 2467-2471.
- Detphan, S., ve Chindaprasirt, P. (2009). Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(6), 720-726.
- Devlet Planlama Teşkilatı. (2001). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, 2001, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Toprak Sanayii Hammaddeleri III (Kuvars kumu, Kuvarsit, Kuvars) Çalışma Grubu Raporu. *Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara*.
- Dinler, E. (2012). Yüksek sıcaklığın diatomit katkılı harçlar üzerindeki etkilerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Duan, P., Yan, C., ve Zhou, W. (2017). A novel water permeable geopolymer with high strength and high permeability coefficient derived from fly ash, slag and metakaolin. *Advanced Powder Technology*, 28(5), 1430-1434.

- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., ve van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.
- Duxson, P., Lukey, G. C., ve van Deventer, J. S. (2007). Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 C. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3044-3054.
- Ekinci, E., Türkmen, İ., Kantarci, F., ve Karakoç, M. B. (2019). The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction and Building Materials*, 201, 257-267.
- Erdoğan, S. T., ve Erdoğan, T. Y. (2007). Puzolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri. 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 263-275.
- Erdoğan, T. S., ve Erdoğan, T. Y. (2007). Kimyasal katkı maddeleri ve tarihi geçmişleri. 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 2, 21-34.
- Erkan, Y. (1999). *Magmatik Petrografi*, 3. Baskı, Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayını, Ankara.
- Fernandez-Jimenez, A. M., Palomo, A., ve Lopez-Hombrados, C. (2006). Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 103(2), 106.
- Fernández-Jiménez, A., ve Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements☆. *Fuel*, 82(18), 2259-2265.
- Fernández-Jiménez, A., ve Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and concrete research*, 35(10), 1984-1992.
- Fragoulis, D., Stamatakis, M. G., Papageorgiou, D., ve Chaniotakis, E. (2005). The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 205-209.
- Gencil, O., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Benli, A., Martinez-Barrera, G., Brostow, W., Tek, M., ve Bodur, B. (2021). Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials*, 294, 123607.
- Gencil, O., Benli, A., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Sutcu, M., ve Elabade, W. A. T. (2021). Effect of waste marble powder and rice husk ash on the microstructural, physico-mechanical and transport properties of foam concretes exposed to high temperatures and freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 291, 123374.

- Gencel, O., del Coz Diaz, J. J., Sutcu, M., Koksall, F., Rabanal, F. P. Á., ve Martinez-Barrera, G. (2016). A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 113, 732-740.
- Gök, S. G., ve KILINÇ, K. (2017). Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Concrete. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 123-131.
- Hacıhafızoğlu, H. (2011). Silis kumunun zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemler ve flotasyon ile manyetik ayırma yöntemlerinin demir giderimi bakımından karşılaştırılması. *Türkiye Maden Mühendisleri Odası Madencilik Dergisi*, 44.
- Haha, M. B., Le Saout, G., Winnefeld, F., ve Lothenbach, B. (2011). Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 301-310.
- Hamidi, M., Kacimi, L., Cyr, M., ve Clastres, P. (2013). Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement. *Construction and Building Materials*, 47, 1268-1277.
- Haneefa, K. M., Santhanam, M., ve Parida, F. C. (2013). Performance characterization of geopolymer composites for hot sodium exposed sacrificial layer in fast breeder reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 265, 542-553.
- Hardjito, D., ve Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., ve Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- Hewlett, P., ve Liska, M. (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Butterworth-Heinemann.
- Hu, M., Zhu, X., ve Long, F. (2009). Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 762-768.
- Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., ve Ariffin, M. A. M. (2018). Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1557-1566.
- Hussin, M. W., Bhutta, M. A. R., Azreen, M., Ramadhansyah, P. J., ve Mirza, J. (2015). Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 48(3), 709-720.
- Hustedt, F. (1956). *Kieselalgen (Diatomeen)*. Kosmos, Gesellschaft der Naturfreunde.

- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Brice, D. G., Kilcullen, A. R., Hamdan, S., ve van Deventer, J. S. (2013). Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 48, 1187-1201.
- İlkenntapar, S., ve Örklemmez, E. (2020). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Harçlara Diatomit İkamesinin Isı İletkenliğe Etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 36(3), 312-324.
- İlkenntapar, S., ve Özsoy, A. (2022). Investigation of mechanical properties, high-temperature resistance and microstructural properties of diatomite-containing geopolymer mortars. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(6), 1-12.
- İpekoğlu, B. (1999). Kuvars, Kuvarsit, Kuvars Kumu. *İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, Türkiye Endüstriyel Mineraller Envanteri*, 102, 106.
- Jamieson, E., McLellan, B., Van Riessen, A., ve Nikraz, H. (2015). Comparison of embodied energies of Ordinary Portland Cement with Bayer-derived geopolymer products. *Journal of Cleaner Production*, 99, 112-118.
- Jo, B.-W., Park, S.-K., ve Park, M.-S. (2007). Strength and hardening characteristics of activated fly ash mortars. *Magazine of concrete research*, 59(2), 121-129.
- Kaplan, G., Coskan, U., Benli, A., Bayraktar, O. Y., ve Kucukbaltacı, A. B. (2021). The impact of natural and calcined zeolites on the mechanical and durability characteristics of glass fiber reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 311, 125336.
- Karatas, M., Benli, A., ve Toprak, H. A. (2019). Effect of incorporation of raw vermiculite as partial sand replacement on the properties of self-compacting mortars at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 221, 163-176.
- Karim, M. R., Hashim, H., Razak, H. A., ve Yusoff, S. (2017). Characterization of palm oil clinker powder for utilization in cement-based applications. *Construction and Building Materials*, 135, 21-29.
- Kastis, D., Kakali, G., Tsivilis, S., ve Stamatakis, M. G. (2006). Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. *Cement and concrete research*, 36(10), 1821-1826.
- Koksal, F., Gencel, O., Brostow, W., ve Lobland, H. H. (2012). Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite. *Materials Research Innovations*, 16(1), 7-13.
- Koksal, F., Gencel, O., ve Kaya, M. (2015). Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 88, 175-187.

- Koksal, F., Nazlı, T., Benli, A., Gencel, O., ve Kaplan, G. (2021). The effects of cement type and expanded vermiculite powder on the thermo-mechanical characteristics and durability of lightweight mortars at high temperature and RSM modelling. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00709.
- Kong, D. L., Sanjayan, J. G., ve Sagoe-Crentsil, K. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and concrete research*, 37(12), 1583-1589.
- Kumar, S., Kumar, R., ve Mehrotra, S. P. (2010). Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of materials science*, 45(3), 607-615.
- Kurşun, İ., ve İpekoğlu, B. (1995). ‘Türkiye kuvars kumu potansiyeline genel bir bakış. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye*, 21, 22.
- Kürklü, G. (2016). Oda Sıcaklığında Kür Edilen Granüle Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 356-367.
- Li, V. C., Lepech, M. D., Wang, S., Weimann, M. B., ve Keoleian, G. A. (2004). Development of green engineered cementitious composites for sustainable infrastructure systems.
- Lloyd, N., ve Rangan, V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. *Proceedings of the Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies*, 1493-1504.
- Mastrucci, A., Marvuglia, A., Leopold, U., ve Benetto, E. (2017). Life Cycle Assessment of building stocks from urban to transnational scales: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 316-332.
- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., ve Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and concrete research*, 114, 115-124.
- Morsy, M. S., Rashad, A. M., Shoukry, H., ve Mokhtar, M. M. (2019). Potential use of limestone in metakaolin-based geopolymer activated with H₃PO₄ for thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 229, 117088.
- Mucsi, G., Lakatos, J., Molnár, Z., ve Szabó, R. (2014). Development of geopolymer using industrial waste materials. *Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE*, 9, 1.
- Naskar, S., ve Chakraborty, A. K. (2016). Effect of nano materials in geopolymer concrete. *Perspectives in science*, 8, 273-275.
- Nayaka, R. R., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Yusoff, S. B., ve Alnahhal, M. F. (2018). High volume cement replacement by environmental friendly industrial by-product palm oil clinker powder in cement–lime masonry mortar. *Journal of Cleaner Production*, 190, 272-284.

- Nazarpour, H., ve Jamali, M. (2020). Mechanical and freezing cycles properties of geopolymer concrete with recycled aggregate. *Structural Concrete*, 21(3), 1004-1012.
- Neto, A. A. M., Cincotto, M. A., ve Repette, W. (2008). Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 565-574.
- Nuaklong, P., Sata, V., ve Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- Okoye, F. N., Prakash, S., ve Singh, N. B. (2017). Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *Journal of cleaner Production*, 149, 1062-1067.
- Olivia, M. (2011). *Durability related properties of low calcium fly ash based geopolymer concrete* [PhD Thesis]. Curtin University.
- Olivia, M., ve Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials ve Design (1980-2015)*, 36, 191-198.
- Öbelik, Y. (2011). *Cam hammaddesi mineralojisi ve cam teknolojisi* [PhD Thesis]. Yüksek Lisans tezi, Niğde Üniversitesi.
- Özkan, Ş., ve Ceylan, H. (2022). The effects on mechanical properties of sustainable use of waste andesite dust as a partial substitution of cement in cementitious composites. *Journal of Building Engineering*, 58, 104959.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., ve Jalali, S. (2007). Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 933-941.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., ve Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323-1329.
- Pampal, S. (1991). Geoteknik Harita Alımı: Ankara Ve Yakın Çevresinin Geoteknik Harita Alımı Ön Çalışması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 6(1-2).
- Perez-Cortes, P., Cabrera-Luna, K., ve Escalante-Garcia, J. I. (2021). Alkali-activated limestone/metakaolin cements exposed to high temperatures: Structural changes. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104147.
- Perez-Cortes, P., ve Escalante-Garcia, J. I. (2020). Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaolin—A comparison of strength, microstructure and sustainability with portland cement and geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123118.
- Petermann, J. C., Saeed, A., ve Hammons, M. I. (2010). Alkali-activated geopolymers: A literature review.

- Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., ve Chindaprasirt, P. (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer. *Construction and Building Materials*, 91, 1-8.
- Phoo-ngernkhama, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., ve Sinsiri, T. (2013). *High calcium fly ash geopolymer containing diatomite as additive*.
- Provis, J. L., ve Van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications*. Elsevier.
- Qin, Y., Leng, G., Yu, X., Cao, H., Qiao, G., Dai, Y., Zhang, Y., ve Ding, Y. (2015). Sodium sulfate–diatomite composite materials for high temperature thermal energy storage. *Powder Technology*, 282, 37-42.
- Rafeet, A., Vinai, R., Soutsos, M., ve Sha, W. (2019). Effects of slag substitution on physical and mechanical properties of fly ash-based alkali activated binders (AABs). *Cement and Concrete Research*, 122, 118-135.
- Rajamane, N. P., Nataraja, M. C., Dattatreya, J. K., Lakshmanan, N., ve Sabitha, D. (2012). Sulphate resistance and eco-friendliness of geopolymer concretes. *Indian Concrete Journal*, 86(1), 13.
- Ramadan, M., Amin, M. S., Waly, S. A., ve Mohsen, A. (2021). Effect of high gamma radiation dosage and elevated temperature on the mechanical performance of sustainable alkali-activated composite as a cleaner product. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104087.
- Rangan, B. V. (2008). Fly ash-based geopolymer concrete.
- Rashad, A. M., Sadek, D. M., ve Hassan, H. A. (2016). An investigation on blast-furnace slag as fine aggregate in alkali-activated slag mortars subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1086-1096.
- Rostami, H., ve Brendley, W. (2003). Alkali ash material: A novel fly ash-based cement. *Environmental science ve technology*, 37(15), 3454-3457.
- Rowles, M. R. (2004). The structural nature of aluminosilicate inorganic polymers: A macro to nanoscale study. PhD Thesis. *Curtin University*.
- Roy, D. M. (1999). Alkali-activated cements opportunities and challenges. *Cement and concrete research*, 29(2), 249-254.
- Sarıdemir, M., Çelikten, S., ve Yıldırım, A. (2020). Mechanical and microstructural properties of calcined diatomite powder modified high strength mortars at ambient and high temperatures. *Advanced Powder Technology*, 31(7), 3004-3017.
- Sasui, S., Kim, G., Nam, J., van Riessen, A., ve Hadzima-Nyarko, M. (2021). Effects of waste glass as a sand replacement on the strength and durability of fly

- ash/GGBS based alkali activated mortar. *Ceramics International*, 47(15), 21175-21196.
- Savaş, M. (2012). *Diatomit ve zeolit ikameli betonların kimyasal etkilere karşı davranışlarının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sayar, M. (1955). *Mineroloji ve Jeoloji, İTÜ Matbaası, İstanbul*.
- Shahrajabian, F., ve Behfarnia, K. (2018). The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 176, 172-178.
- Sharma, N., Sharma, P., ve kr Verma, S. (2021). Influence of Diatomite on the properties of mortar and concrete: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1116(1), 012174.
- Shayan, A. (2016). Specification and use of geopolymer concrete in the manufacture of structural and non-structural components: Review of literature.
- Shi, X. S., Wang, Q. Y., Zhao, X. L., ve Collins, F. (2012). Discussion on properties and microstructure of geopolymer concrete containing fly ash and recycled aggregate. *Advanced Materials Research*, 450, 1577-1583.
- Siddique, R., ve Khan, M. I. (2011). *Supplementary cementing materials*. Springer Science ve Business Media.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., ve Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- Sinsiri, T., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., ve Chindaprasirt, P. (2012). The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar. *Computers and Concrete*, 9(6), 427-437.
- Škvára, F., Kopecký, L., Nemecek, J., ve Bittnar, Z. (2006). Microstructure of geopolymer materials based on fly ash. *Ceramics-Silikaty*, 50(4), 208-215.
- Song, Q., Guo, M.-Z., ve Ling, T.-C. (2022). A review of elevated-temperature properties of alternative binders: Supplementary cementitious materials and alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*, 341, 127894.
- Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., ve Chindaprasirt, P. (2010). Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(3), 236-240.
- Stamatakis, M. G., Fragoulis, D., Csirik, G., Bedeleian, I., ve Pedersen, S. (2003). The influence of biogenic micro-silica-rich rocks on the properties of blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 177-184.

- Sun, M., Zou, C., ve Xin, D. (2020). Pore structure evolution mechanism of cement mortar containing diatomite subjected to freeze-thaw cycles by multifractal analysis. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103731.
- Swanepoel, J. C., ve Strydom, C. A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied geochemistry*, 17(8), 1143-1148.
- Taş, B., ve Çetin, M. (2012). Biyolojik orijinli tek doğal mineral: Diatomit. *Tübbas Bilim Dergisi*, 5(2), 28-46.
- Thokchom, S., Ghosh, P., ve Ghosh, S. (2010). Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of engineering science and technology review*, 3(1), 36-40.
- Topçu, İ. B., ve Canbaz, M. (2008). Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçlarda donma çözümü. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 1-16.
- Topçu, İ. B., Toprak, M. U., ve Uygunoğlu, T. (2014). Durability and microstructure characteristics of alkali activated coal bottom ash geopolymer cement. *Journal of cleaner production*, 81, 211-217.
- Tsoar, H., Blumberg, D. G., ve Stoler, Y. (2004). Elongation and migration of sand dunes. *Geomorphology*, 57(3-4), 293-302.
- URL-1. <http://siliskum.net/>, Erişim Tarihi: 22/08/2022.
- URL-2. http://www.topasgrup.com/canmersan/urunler/andezit_teknik.html, Erişim Tarihi: 25/08/2022.
- URL-3. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/minerals-yearbook-metals-and-minerals>, Erişim Tarihi: 01/09/2022.
- URL-4. <http://www.topasgrup.com/canmersan/urunler/andezitmakale.html>, Erişim Tarihi : 11/09/2022
- Uysal, F. F., ve Bahar, S. (2018). Curuf çeşitleri ve kullanım alanları. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 37-52.
- Uz, B. (2000). Maden-jeoloji-jeofizik mühendisliğinde petrografi prensipleri. Birsan yayınevi.
- Václavík, V., Dirner, V., Dvorský, T., ve Daxner, J. (2012). The use of blast furnace slag. *Metalurgija*, 51(4), 461-464.
- Van Deventer, J. S., Provis, J. L., Duxson, P., ve Brice, D. G. (2010). Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. *Waste and Biomass Valorization*, 1(1), 145-155.

- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S., ve Lukey, G. C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3), 63-73.
- Villa, C., Pecina, E. T., Torres, R., ve Gómez, L. (2010). Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2084-2090.
- Wongsa, A., Siri wattanakarn, A., Nuaklong, P., Sata, V., Sukontasukkul, P., ve Chindaprasirt, P. (2020). Use of recycled aggregates in pressed fly ash geopolymer concrete. *Environmental Progress ve Sustainable Energy*, 39(2), e13327.
- Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C., ve Fang, C. (2019). Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Composites Part B: Engineering*, 164, 179-190.
- Xie, Z., ve Xi, Y. (2001). Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1245-1249.
- Xu, H., ve Van Deventer, J. S. (2002). Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals engineering*, 15(12), 1131-1139.
- Xue, L., Zhang, Z., Liu, H., Jiang, Y., ve Wang, H. (2022). Drying shrinkage behavior of hybrid alkali activated cement (HAAC) mortars. *Construction and Building Materials*, 316, 126068.
- Yadollahi, M. M., ve Benli, A. (2017). Stress-strain behavior of geopolymer under uniaxial compression. *Computers and Concrete*, 20(4), 381-389.
- Yadollahi, M. M., Benli, A., ve Demirboga, R. (2017). Application of adaptive neuro-fuzzy technique and regression models to predict the compressive strength of geopolymer composites. *Neural Computing and Applications*, 28(6), 1453-1461.
- Yadollahi, M. M., Benli, A., ve Demirboğa, R. (2015a). Effects of elevated temperature on pumice based geopolymer composites. *Plastics, Rubber and Composites*, 44(6), 226-237.
- Yadollahi, M. M., Benli, A., ve Demirboğa, R. (2015b). The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 94, 767-774.
- Yan, S., Feng, X., Yang, Y., ve Xing, P. (2021). Effects of high-temperature exposure on properties of lightweight geopolymer foams incorporating diatomite powders. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 18(6), 2158-2168.
- Yıldız, A. (1997). Seydiler (Afyon) diyatomit cevherinin jeolojisi ve izolasyon tuğlası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Yüksek Lisans, Afyon Kocatepe Üniversitesi*.

- Yılmaz, B., ve Ediz, N. (2008). The use of raw and calcined diatomite in cement production. *Cement and Concrete Composites*, 30(3), 202-211.
- You, G., Bi, J., Chen, Y., Yin, C., ve Wang, C. (2016). Effect of diatomite additive on the mechanical and dielectric properties of porous SiO₂-Si₃N₄ composite ceramics. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 31(3), 528-532.
- Zhao, R., Yuan, Y., Cheng, Z., Wen, T., Li, J., Li, F., ve Ma, Z. J. (2019). Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 222, 474-483.

