



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü



# GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAR İÇİN YENİ BİR STABİLİZASYON ÖNERİSİ

Yüksek Lisans Tezi

Esma RAHAT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir  
2024



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

# GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAR İÇİN YENİ BİR STABİLİZASYON ÖNERİSİ

Esmâ RAHAT

Danışman: Doç. Dr. Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir  
2024



Esma RAHAT tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Geoteknik Mühendisliğinde Sürdürülebilir Yapılar için Yeni Bir Stabilizasyon Önerisi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 05/09/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:****İmza**

<b>Jüri Başkanı</b>	<b>: Doç. Dr. Tuğba ESKİŞAR TEFCİ</b>	.....
<b>Raportör Üye</b>	<b>: Dr. Öğr. Üyesi Devrim Ş. ERDOĞAN</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Doç. Dr. Hasan Fırat PULAT</b>	.....



**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ****ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Geoteknik Mühendisliğinde Sürdürülebilir Yapılar için Yeni Bir Stabilizasyon Önerisi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

05/ 09 / 2024

Esmâ RAHAT



**ÖZET****GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAR  
İÇİN YENİ BİR STABİLİZASYON ÖNERİSİ**

RAHAT, Esmâ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ

Eylül 2024, 84 sayfa

Bu çalışmada perlit içeren zeminlerin, perlit içeren zemin geopolimerlerinin, atık cam tozu içeren zeminlerin ve atık cam tozu zemin geopolimerlerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Örneklere zeminin kuru ağırlığınca %10-50'si kadar perlit veya atık cam tozu eklenmiştir. Zemin geopolimer örnekleri 7 günden 180 güne kadar değişen farklı kür sürelerine tabi tutulmuş ve kür sıcaklığı olarak 20 veya 40°C seçilmiştir. Farklı özelliklere sahip zemin gruplarını incelemek üzere Atterberg limitleri, kompaksiyon, serbest basınç mukavemeti, direkt kesme kutusu ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Perlit içeren zemin geopolimerlerinde, likit aktivatör olarak sodyum hidroksit ile çalışılmıştır. Atık cam tozu içeren zemin geopolimerlerinde sodyum hidroksit ile sodyum silikat da kullanılmıştır. Sadece perlit içeren zeminlerde perlit içeriği arttıkça likit limit ve plastik limitinde azalma olmuştur. Perlit içeren zemin geopolimerlerinde kür süresi ve kür sıcaklığı artışı mukavemette artışa yol açmıştır. 180 gün boyunca 40°C'de küre bırakılan %60 kaolin+%40 perlit+ 6M sodyum hidroksit içeren zemin geopolimer örneğinin serbest basınç mukavemeti 7920 kPa olarak bulunmuştur. Sadece atık cam tozu içeren zeminlerde, atık cam tozu içeriği arttıkça kuru birim hacim ağırlık artarken, optimum su içeriğinde azalma olmuştur. Atık cam tozu içeren zemin geopolimerlerinde en yüksek mukavemet 90 gün boyunca 40°C'de küre bırakılan %70 zemin+%30 atık cam tozu içeren grupta 8923 kPa olarak bulunmuştur. Perlit içeren zeminlerde, perlit içeriği arttıkça konsolidasyon sürecinde başlangıç boşluk oranı azalmıştır. Perlit içeren zemin geopolimerlerinde kür süresi ve kür sıcaklığı kohezyon ve içsel sürtünme açısını arttırmış, sıkışma indislerini de azaltmıştır. Sonuçta, geopolimerizasyon uygulamasının zeminin geomekanik özelliklerini iyileştirici etkileri olduğu ispat edilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Geopolimerizasyon, perlit, atık cam tozu, likit aktivatör, zemin iyileştirme



**ABSTRACT****A NEW STABILIZATION PROPOSAL FOR SUSTAINABLE  
STRUCTURES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING**

RAHAT, Esma

MSc. in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tuğba ESKİŞAR TEFCİ

September 2024, 84 pages

In this study, it was aimed to examine the mechanical properties of perlite-containing soils, perlite-containing soil geopolymers, waste glass powder-containing soils and waste glass powder soil geopolymers. Perlite or waste glass powder was added to the samples at the rate of 10-50% of the dry weight of the soil. Soil geopolymer samples were subjected to different curing times ranging from 7 days to 180 days, and 20 or 40°C was selected as the curing temperature. Atterberg limits, compaction, unconfined compressive strength, direct shear and consolidation tests were carried out to examine soil groups with different properties. In soil geopolymers with perlite, only sodium hydroxide was used as a liquid activator. Sodium silicate has also been used along with sodium hydroxide in soil geopolymers containing waste glass powder. In soils containing only perlite, as the perlite content increased, the liquid limit and plastic limit decreased. In soil geopolymers containing perlite, increasing the curing time and curing temperature led to an increase in strength. The unconfined compressive strength of the soil geopolymer sample containing 60% kaolin + 40% perlite + 6M sodium hydroxide, which was left to curing at 40°C for 180 days, was 7920 kPa. In soils containing only waste glass powder, as the waste glass powder content increased, the dry unit weight increased, while the optimum water content decreased. The highest strength in soil geopolymers containing waste glass powder was 8923 kPa in the group containing 70% soil + 30% waste glass powder, which was left to curing at 40°C for 90 days. In perlite-containing soils, as the perlite content increased, the initial void ratio decreased during the consolidation process. In soil geopolymers containing perlite, the curing time and curing temperature increased the cohesion and internal friction angle and reduced the compression indices. As a result, it is proven that geopolymerization application has improving effects on the geomechanical properties of the soil.

**Keywords:** Geopolymerization, perlite, waste glass powder, liquid activator, soil improvement



## ÖNSÖZ

Zemin iyileştirme uygulamalarında geleneksel zemin iyileştirilmesinde kullanılan çimento, kireç vb. katkı malzemelerine ek olarak yeni malzemeler ile zemin iyileştirmesinin yapılması uzun yıllardır bilim insanlarının ilgisini çeken bir konu olmuştur. Ülkemizdeki perlit rezervinin kullanılması için yeni yöntemlerin bulunması ve doğa dostu bir malzeme olan camın geri dönüşümü için alternatifler üretilmek istenmektedir. Ayrıca, zemini iyileştirme çalışmalarında geopolimerlerin kullanılması çevre açısından sürdürülebilir bir çözüm olabilmektedir. Yukarıda bahsi geçen malzemeler ve yöntem ile zemin iyileştirme çalışmaları literatürde oldukça kısıtlı olup bu konu hakkında yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında, perlit veya atık cam tozunun farklı likit aktivatörler ile zeminde yapabileceği geomekanik değişiklikler incelenmiş ve zemin iyileştirmesinin sağlanması için yeni bir yaklaşım sunulmuştur.

İZMİR

05/09/2024

Esmâ RAHAT



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	ix
ÖNSÖZ .....	xi
İÇİNDEKİLER .....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xviii
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	7
2.1 Geopolimerizasyon Hakkında Yapılan Çalışmalar .....	7
2.2 Perlit Hakkında Yapılan Çalışmalar .....	11
2.3 Cam Tozu Hakkında Yapılan Çalışmalar .....	13
3. MALZEME VE YÖNTEM .....	17
3.1 Malzemeler .....	17
3.1.1 Kaolin Kili .....	17
3.1.2 Ham Perlit .....	17
3.1.3 Atık Cam Tozu .....	18
3.1.4 Likit Aktivatörler .....	19
3.2 Yöntemler .....	19
3.2.1 Atterberg limitleri deneyi .....	21
3.2.2 Kompaksiyon deneyi .....	22
3.2.3 Serbest basınç mukavemeti deneyi .....	23

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
3.2.4 Direkt kesme kutusu deneyi.....	24
3.2.5 Konsolidasyon deneyi.....	25
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	27
4.1 Perlit İçeren Zeminler .....	27
4.1.1 Atterberg limitleri .....	27
4.1.2 Kompaksiyon parametreleri .....	28
4.1.3 Serbest basınç mukavemeti.....	29
4.1.4 Direkt kesme kutusu deneyi.....	30
4.2 Perlit İçeren Zemin Geopolimerleri .....	33
4.2.1 Kompaksiyon parametreleri.....	33
4.2.2 Serbest basınç mukavemeti.....	34
4.2.2.1 Kür süresi.....	34
4.2.2.2 Molarite.....	37
4.2.2.3 Perlit içeriği .....	41
4.2.2.4 Sıcaklık.....	42
4.2.3 Direkt kesme kutusu deneyi.....	43
4.2.4 Konsolidasyon deneyi.....	47
4.3 Atık Cam Tozu İçeren Zeminler .....	51
4.3.1 Atterberg limitleri .....	51
4.3.2 Kompaksiyon parametreleri .....	52
4.3.3 Serbest basınç mukavemeti.....	53
4.4 Atık Cam Tozu Zemin Geopolimerleri.....	54
4.4.1 Atterberg limitleri .....	54
4.4.2 Kompaksiyon deneyi.....	55

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
4.4.3 Serbest basınç mukavemeti .....	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
5.1 Atterberg limitleri .....	61
5.2 Kompaksiyon deneyi .....	61
5.3 Serbest basınç mukavemeti deneyi.....	62
5.4 Direkt kesme kutusu deneyi .....	63
5.5 Konsolidasyon deneyi.....	64
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	66
TEŞEKKÜR .....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	84

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Türkiye perlit yatakları haritası(DPT, 2001) .....	4
Şekil 3.1. İzmir-Cumaovası'ndaki perlit maden yığını.....	18
Şekil 3.2. Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan numunelere ait dane boyu dağılımları	18
Şekil 3.3. Casagrande deney aleti .....	22
Şekil 3.4. Plastik limit deneyi numuneleri .....	22
Şekil 3.5. Kompaksiyon deneyi kalıp parçaları ve tokmağı .....	23
Şekil 3.6. Serbest basınç mukavemeti deneyi için hazırlanmış numune örnekleri	23
Şekil 3.7. Serbest basınç mukavemeti deney aleti .....	24
Şekil 3.8. Direkt kesme kutusu deney aleti.....	25
Şekil 3.9. Konsolidasyon deney aleti.....	26
Şekil 4.1. Perlit içeren zeminlerin plastisite kartında gösterimi .....	28
Şekil 4.2. Perlit içeren zeminlerin kompaksiyon eğrileri.....	28
Şekil 4.3. Perlit içeren zeminlerin serbest basınç mukavemetleri.....	30
Şekil 4.4. Perlit içeren zeminlerin boşluk oranı-gerilme grafiği.....	31
Şekil 4.5. 20°C kür süresine göre (a) 2M, (b) 4M ve (c) 6M örneklerin serbest basınç mukavemeti gelişimleri.....	35
Şekil 4.6. 40°C kür süresine göre (a) 2M, (b) 4M ve (c) 6M örneklerin serbest basınç mukavemeti gelişimleri.....	36
Şekil 4.7. Farklı perlit içeriğinde NaOH molaritesinin etkisi .....	38
Şekil 4.8. Şekil 4.8. 9M NaOH konsantrasyonlu zemin örnekleri.....	40
Şekil 4.9. Sabit kür süresindeki perlit içeriğine göre mukavemet değişimleri .....	42
Şekil 4.10. Zemin örneklerinde sıcaklık etkisi.....	43
Şekil 4.11. a. 80K20P b. 20°C 1 günlük 80K20P4M c. 20°C 7 günlük 80K20P4M ve.....	44
Şekil 4.12. 20°C küre bırakılan zemin örneklerinin kesme kutusu parametreleri .	46
Şekil 4.13. 40°C küre bırakılan zemin örneklerinin kesme kutusu parametreleri .	47
Şekil 4.14. %40 perlit zemin geopolimerlerinin 28-90 gün kür süresine göre boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi .....	48

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.15. Farklı perlit ve molarite içeriğindeki zemin geopolimerlerinin boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi .....	50
Şekil 4.16. Zeminin farklı atık cam tozu oranlarına göre Atterberg limitleri.....	51
Şekil 4.17. Atık cam tozu içeren zeminlerde non-plastik davranışın gözlemlenmesi .....	52
Şekil 4.18. Atık cam tozu içeren zeminlerin kompaksiyon eğrileri .....	52
Şekil 4.19. Atık cam tozu ilavesinin serbest basınç mukavemeti-birim deformasyon üzerine etkileri .....	53
Şekil 4.20. a. 6M %10 NaOH: %90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> b. 6M %30 NaOH:%70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> c. 8M %10 NaOH:%90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> d. 8M %30 NaOH:%70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> içeren örneklerin Atterberg limitleri.....	55
Şekil 4.21. a. 6M %10 NaOH: %90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> b. 6M %30 NaOH: %70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> c. 8M %10 NaOH: %90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> d. 8M %30 NaOH: %70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> içeren örneklerin kompaksiyon eğrileri.....	56
Şekil 4.22. Farklı likit aktivatörlerle hazırlanan a. 20°C’de b. 40°C’de küre tabi tutulan 100Z örneğinin kür süresi-serbest basınç mukavemeti ilişkisi.....	57
Şekil 4.23. Farklı atık cam tozu içeriklerinde hazırlanan ve 20°C’de küre tabi tutulan a. 8M(10:90) likit aktivatörü b. 8M(30:70) likit aktivatörü i c. 6M(10:90) likit aktivatörü d. 6M(30:70) likit aktivatörü içeren örneklerin kür süresi-serbest basınç mukavemeti ilişkisi.....	59
Şekil 4.24. Farklı atık cam tozu içeriklerinde hazırlanan ve 40°C’de küre tabi tutulan a. 8M(10:90) likit aktivatörü b. 8M(30:70) likit aktivatörü i c. 6M(10:90) likit aktivatörü d. 6M(30:70) likit aktivatörü içeren örneklerin kür süresi-serbest basınç mukavemeti .....	60
Şekil 5.1. Zemin örneklerine ait kompaksiyon parametreleri.....	62
Şekil 5.2. Serbest basınç mukavemeti .....	63
Şekil 5.3. Kesme kutusu parametreleri .....	64

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Kaolin kilinin geoteknik özellikleri .....	17
Çizelge 3.2. Perlit içeren zeminlere ait deney programı .....	20
Çizelge 3.3. Atık cam tozu içeren zeminlere ait deney programı .....	20
Çizelge 4.1. Perlit içeren zeminlerin Atterberg limitleri.....	27
Çizelge 4.2. Perlit içeren zeminlerin kesme kutusu parametreleri.....	30
Çizelge 4.3. Perlit içeren zeminlerin konsolidasyon parametreleri .....	32
Çizelge 4.4. Perlit içeren zemin geopolimerlerinin kompaksiyon parametreleri...34	
Çizelge 4.5. 20-40°C’de farklı perlit içeriğinde geopolimer zeminlerin sıkışması indisi.....	50

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\gamma$	Kuru Birim Hacim Ağırlık
$\omega$	Su İçeriği
$q_u$	Serbest Basınç Mukavemeti
$\varepsilon$	Düşey Deformasyon
$\sigma'$	Efektif Gerilme
<u>Kısaltmalar</u>	
$Al_2O_3$	Alümina
$CL$	Düşük Plastisiteli Kil
$CO_2$	Karbondiyoksit
$KOH$	Potasyum Hidroksit
$LL$	Likit Limit
$M$	Molarite
$ML$	Düşük Plastisiteli Silt
$NaOH$	Sodyum Hidroksit
$Na_2SiO_3$	Sodyum Silikat
$PL$	Plastik Limit
$PI$	Plastisite İndisi
$SiO_2$	Silika



## 1. GİRİŞ

İnşaat malzemelerinin mevcut durumu, toplumların büyüme hızına ve ekonomik kalkınmasında çok büyük bir etken olarak görülmektedir. Günümüzde, yüzeysel zeminlerin iyileştirilmesi için çimento stabilizasyonu sıklıkla tercih edilmektedir. İklim ve çevre değişikliğinde çimentonun yarattığı büyük paya sahip karbon ayak izinin azaltılması için küresel girişimler yürütülmektedir (Kızıltan ve Doğan, 2021).

Portland çimentosu çok iyi bağlayıcılık özelliği olan ve yapı malzemesi olarak insanların ihtiyaçlarına cevap verebilen bir üründür fakat çimentonun üretilebilmesi için gerekli hammaddelerin çok yüksek sıcaklıklarda pişirilmesine ihtiyaç vardır. Bu sıcaklıklara ulaşabilmek için fosil yakıtların kullanılması gereklidir. Hammaddelerin pişirilmesi ve fosil yakıt kaynaklı olarak CO<sub>2</sub> emisyonu gerçekleşmektedir. 1 ton Portland çimentosu üretilirken beraberinde 0.95-1 ton CO<sub>2</sub> emisyonu ortaya çıkmaktadır (Kim ve Lee, 2013; Ma 2016; Faqir vd., 2019). Dünya çapında üretilen sera gazı emisyonunun, çimento endüstrisi yaklaşık %7'sini oluşturduğu tahmin edilmektedir (Criado vd., 2007; Parhi vd., 2018). CO<sub>2</sub> ve sera gazlarının da sebep olduğu etkiler, dünyanın ortalama sıcaklığının geçen yüzyıla kıyasla 0.8°C arttırmıştır (Chang vd., 2017; Luo ve He, 2021). Çimento üretimiyle ilişkili sera gazlarının depolanmasını azaltmak için çimentonun kısmen veya tamamen yerini almak üzere çeşitli endüstriyel yan ürünler yaygın olarak kullanılmaktadır (Thomas vd., 2022).

İnşaat sektöründeki sorunları azaltmak için alternatif bağlayıcı malzemeler, CO<sub>2</sub> emisyonlarının kontrolü ve üretimde hammadde olarak atık ve yan ürünlerin artırılması üzerine araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmıştır (Maddalena vd., 2018; Tang vd., 2019). Yaygın olarak kullanılan yan ürünlere örnekler şu şekilde verilebilir; uçucu kül (Mehra vd., 2016), yüksek fırın cürufu (Zawrah vd., 2016), taş atıkları (Kumar vd., 2016, Kumar vd., 2018), bakır atıkları, tuğla atıkları, lastik külü (Thomas ve Gupta, 2016), silika dumanı (Vaibhav vd., 2019), hindistan cevizi kabuğu ve fiberler (Alyousef vd., 2020), pirinç kabuğu külü (Siddika vd., 2018, Siddika vd., 2021) ve benzeri ürünler çimentoya ek olarak kullanılacak malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Araştırma konularından biri de geopolimer kompozitlerdir.

1980'lerin başında yeni bir bağlayıcı malzeme olan “geopolimer”, sıradan Portland çimentosunun bir ikamesi olarak ortaya çıkmıştır (Davidovits, 2002).

“Geo” terimini uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silika dumanı vb. gibi jeolojik veya endüstriyel malzemeleri temsil ederken, “polimer” terimini aynı birimden türetilen bir molekül zincirinin adı olarak tanımlanabilmektedir (Younis vd., 2020). Polimer, bir veya birden fazla monomer türünden türetilen, tekrar eden alt birimden oluşan çok büyük moleküllerden veya makromoleküllerden oluşan bir malzeme türüdür. Polimerizasyon, monomer olarak adlandırılan nispeten küçük moleküllerin kimyasal olarak birleşerek polimer olarak adlandırılan zincir benzeri veya ağ molekülü ürettiği herhangi bir süreç olarak adlandırılmaktadır. Monomer moleküllerinin hepsi aynı olabilir veya iki, üç veya daha fazla farklı bileşiği temsil edebilmektedir. Puzolanik içeriğine sahip malzemelerin alkalilerle aktive edilmesiyle yeni bir bağlayıcı elde edilebilmektedir. Elde edilen bu malzemeye geopolimer adı verilmektedir. Geopolimerler, Portland çimentosunun aksine çok düşük miktarlarda CO<sub>2</sub> emisyonu gerçekleştirmektedir ve bu rakam ton başına 0.184 olarak belirtilmektedir (Davidovits vd., 1990). Davidovits (1989) geopolimerlerin yapısal birimini AlO<sub>4</sub> ve SiO<sub>4</sub> tetrahedronlardan oluşan bir çeşit inorganik polimer olarak tanımlanmaktadır. Uçucu kül, cüruf, pirinç kabuğu külü, atık cam, metakaolin ve alkali malzeme gibi endüstriyel yan ürünlerden sentezlenebilmektedir (Duxson vd., 2007). Geopolimer üretimi için öncül malzemenin işlenmesi, geleneksel çimentoya kıyasla daha az CO<sub>2</sub> emisyonu içermektedir (Saini ve Vattipalli, 2020). Geopolimer üretimi sayesinde çimento üretimi sırasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub> emisyonlarının %75-80’ne varan oranda azalabildiğini göstermişlerdir (Habert vd., 2011; Davidovits, 2013; Al Muhit vd., 2013; Faisal ve Muhammad, 2016; Awoyera ve Adesina, 2019; Sahoo ve Singh, 2022).

Geopolimerin oluşumu ile ilgili birçok araştırma mevcuttur. Davidovits (2015), geopolimer sentezinin üç safhada gerçekleştiğini bunlarında alüminosilikatların kuvvetli alkali çözeltilerde çözünmesi, serbest iyon gruplarının dağılımı ve polikondenzasyon olduğunu belirtmektedir. Geopolimerlerin oluşması çok hızlıdır ve neredeyse bu safhayı aynı anlarda gerçekleştirmektedir. Bu sebeple belirtilen bu üç safhayı birbirinden ayırt etmek mümkün olmamaktadır (Li vd., 2004; Özdal, 2019). Geopolimerlerin dayanımı harç içerisinde gözeneklere, gözeneklerin büyüklüğüne ve şekline bağlıdır. Gözenek çapları 15 nanometreden küçük olanların harcın dayanımını etkilemediği düşünülmektedir. Gözeneklerin hacmi ve dağılımı Si/Al oranından direkt etkilenmektedir. %10-15 alüminosilikatlı matris oluşumu için gerekli olan minimum Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı içeren hammaddeler iyi bir dayanım vermektedir (Obonyo vd., 2011). Geopolimer stabilizasyonu, komşu kil partiküllerine yapışan daha kalın ve sıkı bir matris

halinde katılaşan sodyum ve kalsiyum alüminosilikat jelinin oluşturulmasıyla gerçekleşir (Ayub ve Khan, 2023).

Geopolimerlerin oluşumundaki reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Davidovits, 2015).

- Si- Al içeren maddeler + Alkaliler → Geopolimer ara bileşeni
- Geopolimer ara bileşeni + Alkaliler → Geopolimer

Reaksiyonlarda da görüldüğü üzere geopolimerin yapısında su bulunmamaktadır. Alkali bir aktivatör ile karıştırıldığında, "geopolimerizasyon" adı verilen üç fazlı bir kimyasal çoklu reaksiyon zinciri yoluyla geopolimer oluşur ve bu da zemin parçacıklarının imentolanmasına yol açmaktadır (Cristelo vd., 2012; Liu vd., 2016; Phummiphan vd., 2016, Abdullah vd., 2020). Bir başka ifade ile; geopolimerler, alkali aktivatör çözeltisinde çözünmüş alüminosilikat malzemelerin oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta geopolimerizasyonu ile sentezlenerek, amorf bir faz ve üç boyutlu silikoalüminat ağ yapısı oluşurmaktadır (Palomoa vd., 1999; De Silva vd., 2007; Ren vd., 2017; Cong ve Cheng, 2021).

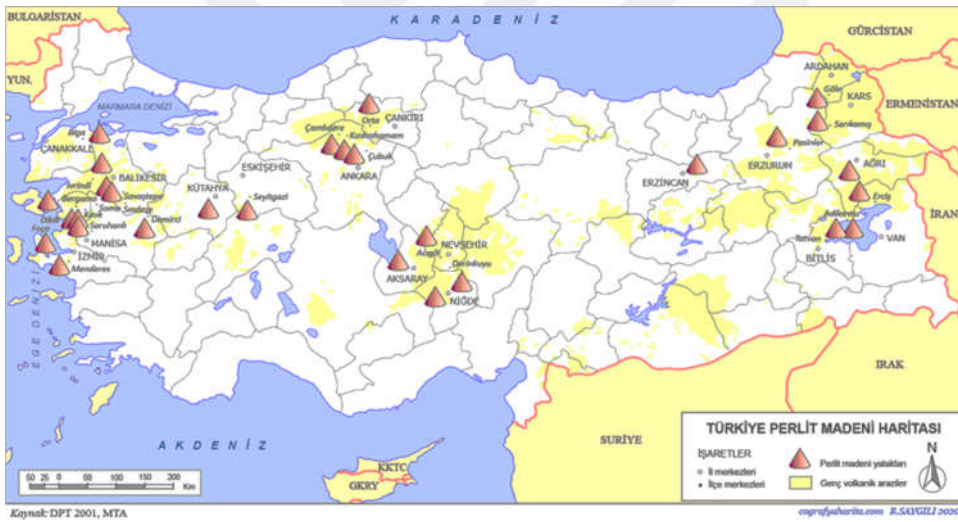
Geopolimerizasyon süreci şunları içermektedir (Duxson vd., 2007): (i) yüksek konsantrasyonlu alkali ortamda bulunan hidroksil iyonlarının (OH<sup>-</sup>) etkisiyle alüminosilikat mineralinin çözünmesi; (ii) özünmüş Al ve Si komplekslerinin difüzyonu; (iii) artık alkali katyon (örneğin sodyum Na<sup>+</sup>) polikondenzasyonu; (iv) jel oluşumu; (v) yeniden yapılanma ve (vi) kürlenme süresi ve kristalleşmeden sertleşmeye kadar jel gelişimi olarak tanımlanmaktadır.

Nihai geopolimer ürün, sertleşmeden sonra oldukça iyi bağlanma özelliklerine sahip olan sodyum alüminyum silikat hidrat (N-A-S-H) kimyasal yapısı ile temsil edilir (Garcia-Lodeiro vd., 2015).

Dünya perlit üretiminin yaklaşık %97'sini gerçekleştiren başlıca 6 ülke Türkiye, Yunanistan, ABD, Japonya, Macaristan ve İtalya'dır (Suzette, 2016). Türkiye, Dünya perlit rezervinin yaklaşık %74'üne sahiptir ve 6.6 milyon ton dünya perlit rezervinin yaklaşık 4.5 milyon tonu Türkiye'ye aittir (Ramezianpour vd., 2016).

Dünya ve Türkiye’de, en yaygın perlit kullanımı inşaat sektöründe görülmektedir. Bu sebeple, dünya perlit tüketimi de inşaat sektöründeki dalgalanmalardan oldukça etkilenmektedir. Şekil 1.1’de ülkemizdeki perlit yatakları görülmektedir.

Doğal bir kaynak olan perlit, ısıyla genişleyen volkanik bir camdır. Perlit, yüksek  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriği nedeniyle puzolanik bir malzeme olarak kabul edilen camsı volkanik bir kayaç türüdür (Rashad, 2016). Perlitteki en önemli özellik yapısındaki %2-5 arasında bulunan sudur ve bu su perlite kararlılık katmaktadır (Erdoğan ve Çelikten, 2022). Perlit geliştirilmiş olarak kullanılabilirdiği gibi ham olarak da kullanım alanlarına sahiptir. Genleştirilmiş perlit, ham perlitin 750-1100°C sıcaklığa aniden ısıtılmasıyla oluşan gözenekli, düşük yoğunluklu, beyaz renkli hafif bir malzemedir. Ham perlit geliştirildiğinde hacim olarak yaklaşık 10-30 kat büyümektedir (DPT, 2001; Oktay vd., 2017; Yıldırım ve Baba, 2018; El Mir vd., 2020).



Şekil 1.1. Türkiye perlit yatakları haritası(DPT, 2001)

Genleştirilmiş perlitin yapısında nitrat, sülfat, ağır metal, fosfor, radyoaktif element ve organik madde bulunmadığından kimyasal olarak oldukça saftır. Organik bir yapısı olmadığı içinde oldukça uzun ömürlüdür ve sahip oldukları yetenekleri uzun süre taşıyabilmektedirler. pH aralığı 6.6-8 arasında olduğundan nötrdür ve kimyasal tepkimeye girmez. Bu sebeple perlit, gıda, ilaç ve kimyasal malzeme üretiminde de kullanılabilir. Ham perlit yapısında silisli ve alüminyumlu birleşikler bulunduğundan kalsiyum esaslı bağlayıcılarla kimyasal tepkimeye girerek hidrolik aktivite gösterir. Bu özelliğinden dolayı perlit yapı sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır (Oktay vd., 2017; Uluer vd., 2018).

Çevre kirliliğine katkıda bulunan önemli atıklardan biri de camdır. Dünya genelinde depolanan atık camın tahmini hacmi yılda yaklaşık 200 milyon tondur (Mirzahosseini ve Riding, 2015). Zemin iyileştirme çalışmalarında atık camın geri dönüştürülmesi, atık depolama sahalarına gönderilecek cam miktarını azaltarak karbon ayak izinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir.

Amorf yapıya sahip camlar, yüksek silis içeriğine sahip olup kimyasal bileşimlerinde alüminyum olmamasına rağmen, öğütülmüş cam tozunun alkalilerle etkileşime girebilmektedir (Jin, 2001; Cyr, 2012). Jin (2001) ve Cyr (2012), camın likit aktivatör eklendikten sonra diğer geopolimerler gibi yüksek dayanımlara ulaşabileceğini göstermişlerdir.

Bu tez çalışması kapsamında, ülkemizde çokça bulunan perlit veya atık camın geopolimerizasyon uygulamasında kullanımı ile zemin tabakalarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma 4 grupta incelenebilir:

1. Grup: Perlit-zemin karışımlarını içerir. Atterberg limitleri, kompaksiyon, konsolidasyon, serbest basınç ve direkt kesme deneyleri ile örneklerin mekanik özellikleri incelenmiştir.
2. Grup: Perlit içeren zemin geopolimerlerinden oluşmaktadır. Kompaksiyon, konsolidasyon, serbest basınç ve direkt kesme deneyleri ile örneklerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Likit aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ile çalışılmıştır.
3. Grup: %10 perlit ve %90 kil içeren yeni bir zemin hazırlanmıştır. Düşük bir perlit içeriği, zeminin bağlayıcı özelliğini artırmak içindir. Zemin örneklerinin Atterberg limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılarak ilgili zemin parametrelerinin nasıl bir değişim gösterdiği incelenmiştir.
4. Grup: 3. Gruptaki zeminin geopolimerizasyonu sağlanmıştır. Likit aktivatör olarak oranları değişen şekilde sodyum hidroksit (NaOH)-sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ile çalışılmıştır. Örneklerin Atterberg limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri ile mekanik özellikleri incelenmiştir.

Zemin geopolimerizasyonu, karbon ayak izi ve zararlı gaz emisyonlarını önemli ölçüde azaltan, çevre dostu inşaat çözümleri sunan bir uygulamadır. Zeminlerin geopolimerizasyonu, killeri stabilize etmek için perlit gibi değerlendirilebilecek madenlerden veya cam gibi endüstriyel atıklardan

yararlanarak gelişmiş mekanik özellikler, mukavemet ve dayanıklılık sunar; ayrıca zemin stabilizasyonu için sürdürülebilir bir çözüm sunar. İncelenen örneklerde, sıkıştırma, sıkışma, kayma mukavemeti parametrelerinin iyileştiği ispat edilmiştir.



## 2. GENEL BİLGİLER

Geopolimerizasyon hakkındaki literatür çoğunlukla yapı malzemeleri anabilim dalına ait olup, geoteknik anabilim dalındaki araştırmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu kısımda öncelikle geopolimerizasyon, ardından perlit ve cam tozu katkısı ile ilgili olan literatür çalışmaları sunulmuştur.

### 2.1 Geopolimerizasyon Hakkında Yapılan Çalışmalar

Xu ve Van Deventer (2002), çalışmalarında, uçucu kül, kaolinit ve albit olmak üzere üç endüstriyel malzeme seçmiştir. Uygun reaksiyon parametreleri kullanıldığında, üç bileşenli sistemin en yüksek basınç dayanımına ve en düşük çatlama olasılığına sahip geopolimerler oluşturduğunu göstermektedir. Uçucu kül ve albitin daha yüksek reaktivitesinin, kaynak malzemeler ve jel fazı arasındaki etkileşimin ve reaksiyona girmemiş büyük albit partiküllerinin neden olduğu takviye etkisinin bu tatmin edici mekanik davranıştan sorumlu olduğu belirtilmiştir.

Zhang vd. (2013), zeminlerin stabilizasyonunda geopolimerlerin uygulanabilirliğini incelemek amacıyla, zayıf bir kili farklı konsantrasyonlarda (optimum su içeriğinde stabilize edilmemiş zeminin ağırlıkça %3 ila 15'i arasında değişen) metakaolin bazlı geopolimer ile stabilize etmiştir. Geopolimer ile stabilize edilmiş zemin numuneleri serbest basınç dayanımı deneyi, kürlleme sırasında hacim ölçümleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir. Deney sonuçları, geopolimer konsantrasyonları ile stabilize zemin numunelerinin serbest basınç dayanımının, yenilme geriniminin ve Young modülünün arttığını ve kürlleme sırasındaki büzülme gerinimlerinin azaldığını göstermiştir. Mikroyapısal analizler, stabilize edilmiş zeminde geopolimer jellerin oluşumunu doğrulamış ve zeminin stabilizasyondan sonra daha homojen ve kompakt mikroyapılar oluşturma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, metakaolin bazlı geopolimerin killi zeminler için etkili bir zemin stabilizatörü olabileceğini göstermiştir. Geopolimer ile stabilize edilmiş zeminlerin uzun vadeli performansı, endüstriyel atıklardan sentezlenen geopolimerlerin kullanımı ve zemin stabilizasyonunda geopolimer uygulamasının finansal ve çevresel maliyeti üzerine daha fazla çalışma yapılmaya değer olduğu belirtilmiştir.

Ma vd. (2013), uçucu kül ile geopolimer macun elde etmek için farklı oranlarda sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktive edilmiş, 7 ve 28

gün boyunca 40°C'de küre tabii tutmuşlardır. Geopolimerlerin boşluk yapılarını ve su geçirgenliklerini araştırmışlar ve Portland çimentosundan elde edilen macun ile boşluk yapılarını karşılaştırmışlardır. Yüksek silisyum içeren alkali çözelti ile aktifleştirilmiş uçucu külün boşluk yapılarının, çimento kullanılarak elde edilen macundan farklı olduğu görülmüştür. 28 gün küre tabii tutulan geopolimerlerin su geçirimsizliğinin çimento hamurundan daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Morsy vd. (2014), çok çeşitli atık alüminosilikat malzemelerin geopolimerizasyonu mükemmel kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip yeni yapı malzemelerine dönüşmesini sağlayabileceğini belirtmiştir. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranlarının uçucu kül kullanılarak 80°C'de geopolimer sentezinin fizibilitesi üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 olarak çalışılmıştır. Sonuçlar, kür süresi arttıkça basınç ve eğilme dayanımının arttığını göstermiştir. Ayrıca, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 0.5'ten 1.0'a yükseldikçe basınç dayanımı artmakta ve daha sonra azalmaktadır. Geopolimer numunelerinin SEM analizi ile yapılan morfoloji çalışmaları, geopolimer jelin uçucu kül partiküllerine ve sürekli bir matris içine gömülü gözeneklere sahip olduğunu göstermiştir. Sodyum silikat/sodyum hidroksit = 1'de homojen ve daha az gözenekli mikroyapı gözlenmiştir.

Erdoğan (2015), ortam sıcaklığında sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileriyle aktive edilen perlit bazlı geopolimer harcın 40 MPa'ya kadar ulaşan basınç dayanımları elde edilebildiğini ve daha yüksek kür sıcaklıklarında daha yüksek dayanım elde edilebildiklerini belirtmiştir.

Swain (2015) çalışmasında hem geopolimer bileşenlerinin hem de biyopolimer bileşenlerinin etkilerini incelemiştir. Sodyum bazlı likit aktivatörler ve katkı maddesi olarak uçucu kül geopolimer bileşenleri olarak, ayrıca zantan sakızı ve guar sakızı da biyopolimer bileşenleri olarak kullanmıştır. Geopolimerin etkinliği, serbest basınç mukavemeti açısından incelemiştir. Mukavemet sonuçları açısından %40 uçucu kül ve %10 aktivatör eklenen zeminin daha yüksek olduğu ve geopolimerin biyopolimerden daha etkili olduğunu da gözlemlemiştir.

Kozhukhova vd. (2016), çalışmalarında en etkili likit aktivatörlerin belirlenmesi için alkali bileşenlerle perlit geopolimer bağlayıcının dört bileşimi olan NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kullanmış ve 65°C'de 24 saat boyunca küre tabii tutmuşlardır. Ardından deney numunelerini kalıptan çıkarılıp ve 28 güne

kadar ortam koşullarında sertleşmesini sağlamışlardır. NaOH-KOH bazlı perlit geopolimer bağlayıcının 28 günlük mikro yapısında, görünür kristal oluşumları olmaksızın kompakt bir mikro yapı gösterdiğini saptamışlardır.

Phetchuay vd. (2016), kil zemin ile kalsiyum karbür atığı ve uçucu kül bazlı bir geopolimer oluşturarak kilin mukavemetinin gelişimini ve karbon ayak izini araştırmışlardır. Kullanılan likit aktivatör, sodyum silikat çözeltisi ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum hidroksit (NaOH) karışımıdır. Kil zeminin mukavemetinin, uçucu kül içeriğine ve NaOH konsantrasyonuna bağlı olduğunu bulmuşlardır. Geopolimer uygulaması yapılan zeminlerin karbon ayak izlerinin çimento ile stabilize edilmiş zeminlerden %22-%43 aralığında daha düşük olduğunu saptamışlardır.

Ayyappan vd. (2017), yumuşak kil ve kum karışımlarında geopolimer uygulamasının yüksek mukavemet, düşük maliyet, düşük enerji tüketimi ve düşük  $\text{CO}_2$  emisyonları ile umut verici bir alternatif olduğunu belirtmişlerdir. Metakaolin bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş killi zemin örneklerinde serbest basınç mukavemeti artmış ve bu yöntemin etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olabileceğini göstermişlerdir.

Zhu vd. (2020), yumuşak zeminin iyileştirilmesi için düşük karbonlu çimentolu bir malzeme olan geopolimer kullanımına ilişkin çalışmayı sunmuşlardır. Geopolimerin farklı karışım oranlarıyla stabilize edilmiş yumuşak zeminin Atterberg limitleri ve serbest basınç mukavemetleri dahil olmak üzere geoteknik özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlara göre, geopolimerle stabilize edilmiş zeminin likit ve plastik limitlerini ve serbest basınç mukavemetini artırmada etkili olduğunu, ancak plastisite indeksini azalttığını göstermişlerdir. XRD ve SEM-EDS kullanılarak yapılan mikro incelemede, kalsiyum alüminosilikat hidratın (C-A-S-H) stabilize zeminde oluşan ana çimento malzemesi olduğunu doğrulamaktadır. C-A-S-H jelinin, stabilize zeminin boşluklarını doldurduğunu ve zemin parçacıklarını birbirine çimentolayarak daha yoğun ve daha güçlü bir mikro yapının oluşmasına ve dolayısıyla işlenmiş zeminin mekanik özelliklerinin iyileşmesine yol açtığını belirtmişlerdir.

Eskisar ve Aksu (2020), kil, killi kum ve kum zeminler üzerinde yapılan bir araştırma da farklı likit aktivatörlerle zemin türüne ve geopolimerizasyon metoduna göre elde edilecek zemin parametrelerinin önemli ölçüde değişebildiğini göstermişlerdir. Geopolimerizasyonu tetiklemek için iki metot düşünülmüştür. Bunlardan birincisinde örnekler kür süreleri boyunca özel

tasarlanmış 38°C sıcaklıkta bir odada bekletmişlerdir. İkinci yaklaşımda ise örnekler 1 gün boyunca 80°C sıcaklıkta bir etüvde bekletilerek ardından 20°C (%95 r.n.) sıcaklıktaki kür odasında küre bırakmışlardır. Sonuçta, kum ve killi kum örneklerinde, optimum su içeriğine kadar likit aktivatör kullanılması iyileştirmenin sağlandığı, kil zeminlerinde optimum su içeriğinin yaklaşık iki katı kadar likit aktivatör kullanılmasıyla mukavemette artış olduğunu rapor etmişlerdir.

Sukprasert vd. (2021), temel altı zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılmak üzere siltli kil bir zeminde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimerin kullanımını deneysel olarak incelemişler, NaOH konsantrasyonu ve kür sıcaklığı değiştirilerek üretilen numuneleri kıyaslamışlardır. Farklı oranlarda NaOH konsantrasyonu ile siltli kil, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu geopolimerlerinin 7 günlük serbest basınç dayanımlarının 50-80°C'lik kür sıcaklıklarıyla artmaya başladığını bulmuşlardır. Artan NaOH konsantrasyonu ile serbest basınç dayanımının arttığını ve N-A-S-H jelleri üreterek geopolimerin iç yapısını güçlendirmiş olduğunu saptamışlardır.

Zainal vd. (2022), çalışmalarında kür sıcaklığının kaolin geopolimer hamurunun özellikleri üzerindeki etkisine odaklanmışlardır. Alternatif olarak kaolini, çevreye karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımını azaltmak amacıyla beton hamuru yapımında bağlayıcı olarak kullanmışlardır. Kaolin geopolimer hamuru, kaolin ve alkali aktivatörlerin 0.8:1 katı/sıvı oranıyla karıştırılmasıyla elde etmişlerdir. Alkali aktivatör çözeltilerini 0.2:1 oranında Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH olacak şekilde hazırlamışlardır. Hazırlanan karışım numuneleri, küp kalıplara (50 mm x 50 mm x 50 mm) yerleştirilmiş ve sertleşene kadar 24 saat bekletmişlerdir. Daha sonra numuneler etüvde 24 saat boyunca 60, 70 ve 80°C'de küre tabi tutmuşlardır. Numuneleri 28 günün sonunda basınç dayanımı ve mikro yapı açısından test etmişlerdir. 70°C kür sıcaklığına sahip kaolin geopolimer hamurunun, 60°C ve 80°C kür sıcaklıklarına kıyasla en yüksek basınç dayanımına (1.04 MPa) sahip olduğunu kanıtlamışlardır. 70°C kür sıcaklığının mikro yapısının geopolimerizasyonda gözeneksiz bir şekilde tam olarak gerçekleştiğini göstermişlerdir.

Odeh ve Al-Rkaby (2022), uçucu kül ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit/sodyum silikat çözeltisi kullanılarak stabilize edilen killi zeminin (farklı kum yüzdelerine sahip) mekanik, dayanıklılık ve mikroyapı özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Geopolimer uygulanmış numuneler, asidik

ortamlara ve klorürlere karşı yüksek direnç göstermiştir. SEM sonuçlarına göre, partiküller arası temaslar ve jel oluşumu ile sertleşmenin neden olduğu bağlanma sonucu oluşan kil dokusunda değişimler olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre, zeminin stabilizasyonu için uçucu kül geopolimer bağlayıcı kullanmanın geoteknik uygulamalarda çimentoya uygun bir alternatif olduğu sonucuna varılabilir.

Açikkapı (2023), bağlayıcı malzemelerin yüzey alanının ve kimyasal içeriğinin geopolimerlerin aktivasyonunu etkilediğini, aktivasyonun gerçekleşebilmesi için parçacık boyutunun küçük ve camsı faz içeriğinin fazla olması gerektiğini ancak bağlayıcıların içerdiği camsı fazın, su ile karşılaştığında bağlayıcılık özelliği kazanamadığını göstermiştir. Bu camsı fazın, bir alkali aktivatör kullanılarak aktive edildiğinde bağlayıcılık özelliği kazanabildiğini belirtmiştir.

## **2.2 Perlit Hakkında Yapılan Çalışmalar**

Azizi (2007), ısı yalıtımı, ses yalıtımı ve depreme dayanıklılık avantajları açısından önemli üstünlükleri olan perlitin, inşaat sektöründe değerlendirilmesi ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayabileceğini belirtmiştir.

Calik ve Sadoglu (2014), smektit kil mineralleri içeren zeminin sınıflandırma, kesme mukavemeti ve dayanıklılık özellikleri üzerinde perlit ve perlit-kireç katkılarının etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Zemin-perlit ve zemin-perlit-kireç olmak üzere iki tip karışım, farklı perlit yüzdeleri ile hazırlanmış ve optimum su içeriklerinde standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Dayanıklılık deneyleri için 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde numuneler ve kesme kutusu deneyi için 60 mm kenarlı kare numuneler alınmış ve desikatörde deney zamanına kadar muhafaza edilmiştir. Likit ve plastik limitleri belirlemek için de örselenmiş numuneler alınmıştır. Zemin, kireç ve perlit ilavesinin neden olduğu mikro yapıdaki puzolanik reaksiyonlar nedeniyle ince kum ve silt davranışı göstermektedir. Her iki numune türü için de artan perlit miktarı ile işlenmiş zeminin görünür kohezyonu azalmasına rağmen, perlit-kireç ile işlenmiş numuneler sadece perlit ile işlenmiş numunelerden daha yüksek görünür kohezyona sahip olmuştur. Artan perlit kullanımı ile içsel sürtünme açısından büyük artışlar elde edilmiştir.

Yılmaz ve Fidan (2018), farklı yüzdelerde eklenen perlitin zemin karışımlarındaki etkisini araştırmışlardır. Killi zemin içerisine, zeminin kuru

ağırlığınca %6 kireç ile birlikte farklı oranlarda (%0, %5, %10, %20, %25, %30) eklenen perlitin dayanım üzerinde pozitif bir etkisi olduğunu saptamışlardır. Deney numuneleri laboratuvarında sıkıştırılarak 7, 28 ve 84 gün boyunca küre tabii tutulmuş ve daha sonra serbest basınç dayanımları saptanmıştır. Sonuçlar, kireçle stabilize edilmiş zemine puzolanik katkı maddesi olarak perlitin eklenmesinin mukavemeti ve dayanıklılığı geliştirdiğini göstermiştir. Artan perlit içeriği ile serbest basınç dayanımının arttığı, kireçten daha ucuz olan doğal puzolan kullanımının zeminlerin dayanım ve dayanıklılığına olumlu etkisi olduğunu ve stabilizasyon maliyetlerinin düşmesine neden olabileceğini göstermektedir.

Karein vd. (2019), çimento yerine %15 oranında genleşmemiş perlit tozu kullanıldığında harçların basınç dayanımının 68.3 MPa'ya kadar ulaştığını saptamışlardır.

Güzelküçük ve Demir (2019), çalışmalarında öğütülmüş perlit ile sodyum hidroksitini aktive edilerek, 50×50×50 mm boyutlarında çimentosuz perlit esaslı kompozit küp numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numuneleri 24 ve 48 saatlik kür süresinde ve 90°C ve 110°C kür sıcaklığında bekletmişlerdir. Karışımda kullanılacak NaOH çözeltilerinin molaritelerinin sırasını 7.7, 11.6 ve 15.5 olarak vermişlerdir. Karışımlar için en iyi kür süresini, optimum çözeltinin NaOH molaritesini ve kür sıcaklığına bağlı olarak en yüksek basınç dayanımlarını belirlemişlerdir. Kür sıcaklığındaki artış ile erken dönemde dayanımların daha fazla artış gösterdiğini ve ilerleyen dönemlerde reaksiyon süresinin artması ile kür sıcaklığındaki artış ile dayanımların azaldığını saptamışlardır.

Voottipruex vd. (2022), çalışması kapsamında perlite 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 molar konsantrasyonlarında NaOH eklenerek perlit içeren geopolimer numuneleri elde etmişlerdir. Perlit içeren geopolimer yumuşak kil ile kuru ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarıyla karıştırılmış ve elde edilen numuneler 25 ve 70°C'de 7, 14 ve 28 gün küre tabii tutmuşlardır. Örneklerdeki NaOH miktarının ve kür süresinin arttırılması ile serbest basınç dayanımlarında artış olduğunu saptamışlardır.

### 2.3 Cam Tozu Hakkında Yapılan Çalışmalar

Vaitkevičius vd. (2014), çalışmalarında beton içerisinde silika kaynağı olarak cam tozunun kullanılmasının beton özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, cam tozu kuvars yerine kullanıldığında yüksek dayanım vermiştir.

Soliman ve Tagnit-Hamou (2017), çalışmalarında ince cam tozunun ultra yüksek performanslı betonda kullanıldığında, silis dumanı ve çimento arasındaki boşlukları doldurmak için faydalı olduğunu rapor etmişlerdir.

Tho-In vd. (2018), çalışmalarında atık cam tozu ve yüksek kalsiyumlu uçucu kül içeren geopolimer macunların basınç dayanımları ve mikro yapılarını incelemişlerdir. Betonda geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması, atıkların ve doğal malzeme kaynaklarının tüketiminin azaltılması açısından cazip bir alternatif olduğunu göstermişlerdir. Geopolimer macunları üretmek için ortalama parçacık boyutu 21.26 mm olan yüksek kalsiyumlu uçucu kül, ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 içeriklerinde atık cam tozu ile değiştirilmiştir. Atık cam tozlarını, ortalama parçacık boyutları sırasıyla 4.65 ve 11.72 mm olan öğütülmüş floresan lamba camı ve öğütülmüş şişe camından elde etmişlerdir. Likit aktivatör olarak NaOH (sodyum hidroksit) ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (sodyum silikat) kullanılmıştır. Optimum alkali sıvı/bağlayıcı oranı 0.6 ve NaOH: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı 1.0 olarak bulunmuştur. Tüm numuneler 48 saat 60±2°C'de küre bırakılmış ve deney gününe kadar 23±2°C'de tutulmuştur. Sonuçlar, atık cam tozunun, 7 günlük kür sonunda 34-48 MPa'lık basınç dayanımına ulaşabilecek geopolimer macunlar üretmek için uçucu kül yerine kullanılabileceğini göstermiştir.

Bilgen (2015), çalışmasında bentonit kiline ağırlıkça %3; %5; %10; %20 ve %25 oranlarında cam tozu karıştırılarak numuneler hazırlamıştır. Hazırlanmış olan numuneler üzerinde modifiye Proktor deneyi, serbest basınç dayanımı deneylerini uygulamıştır. Katkısız halde hazırlanan bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım değeri 178 kPa olarak belirlenirken, %25 cam tozu katkısı ile hazırlanan numunelerin 28 günlük dayanımının 4.5 kat artarak 795 kPa değerine ulaştığı saptanmıştır. Sonuçlar cam tozunun bentonit kilinin dayanımında artış sağladığını göstermiştir.

Canakci vd. (2016), çalışmalarını atık cam tozu ilavesiyle killi zeminde iyileştirme gözlemlemek amacıyla yapmışlardır. Atık camlar ezilerek No.200 (75 µm) elekten geçirilmiş ve kilin kuru ağırlığının %3, 6, 9 ve 12'si oranında kil ile

karıştırılmıştır. Artan cam tozu oranı ile maksimum kuru birim hacim ağırlık artarken, optimum su içeriğinde azalma olduğunu bulmuşlardır. Karışımı yapılan örnekler 3, 7 ve 28 gün küre tabii tutulduktan sonra örneklerin serbest basınç dayanımını tespit etmişlerdir. %6 cam tozu içeriğine kadar dayanım artarken, bu değerden sonra eklenen cam tozu dayanımı azalttığını saptamışlardır. Deney sonuçları, kile atık cam tozu ilavesinin kilin dayanım ve kıvam özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Benny vd. (2017), atık cam tozunun geoteknik uygulamalarda kullanımını araştırmak amacıyla standart Proktor ve serbest basınç dayanımı deneylerini gerçekleştirerek, cam tozunun killi zeminin dayanımı ve kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Farklı oranlarda cam tozu ekleyerek (%2, %4, %6, %8 ve %10), maksimum zemin dayanımının elde edildiği yüzdeyi belirlemeyi hedeflemişlerdir. Yapılan deney sonuçlarına göre, zemin içerisine optimum %8 oranında cam tozunun eklenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Cam tozu içeriğinin artmasıyla birlikte, zeminin kuru birim hacim ağırlığının arttığı gözlemlenmiştir.

Khan vd. (2018), işlenmemiş zeminin fiziksel, kimyasal ve mühendislik özelliklerini göz önünde bulundurarak, zeminin stabilize edilmesi için cam tozu ilavesi üzerine çalışmışlardır. Farklı oranlarda (%4, %8 ve %12) cam tozu eklemişlerdir. Gradasyon, özgül ağırlık, standart Proktor deneyi ve Atterberg limitleri deneyleri gerçekleştirilmiştir. Cam tozu ilavesinin, plastisite indisi (PI), likit limit (LL) ve plastik limit (PL) değerlerini azalttığı gözlemlenmiştir. Optimum stabilizatör miktarının %8 cam tozu olduğu belirlenmiştir. Katkılı zeminlerde maksimum kuru birim hacim ağırlığının arttığı ve optimum su içeriğinin azaldığı bulgusu elde edilmiştir.

Bilondi vd. (2018a), killi zeminlerin mekanik davranışını iyileştirmek amacıyla geri dönüştürülmüş cam tozu katkılı bir geopolimerin uygunluğunu araştırmışlardır. Geri dönüştürülmüş cam tozu içeriğinin etkisi, çözelti molar konsantrasyonu, kür süresi ve kür sıcaklığı gibi parametrelerin etkileri üzerinde çalışmışlardır. Likit aktivatör olarak NaOH kullanılmıştır ve cam tozu %0 ila %25 oranlarında kullanılmıştır. Kür sıcaklığı 25 ila 70°C arasında değişmiş ve kür süresi 7, 28 ve 91 gün olarak belirlenmiştir. Numunelerin mekanik davranışını belirlemek için serbest basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geopolimer kullanılarak stabilize edilen numunelerin serbest basınç dayanımlarının stabilize edilmemiş numunelere kıyasla arttığını göstermektedir.

Javed ve Chakraborty (2020), atık cam tozu kullanarak üretim maliyetini azaltmayı ve çevre dostu bir zemin stabilizasyonu sağlamayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada, kohezyonlu bir zeminde cam tozunun etkisi farklı indeks özellikleri ve geoteknik mühendislik deneyleri ile incelenmiş ve ana zeminle karşılaştırılmıştır. Optimum cam tozu yüzdesini belirlemek için, zemin numunelerine farklı oranlarda (%2, %4, %6, %8 ve %10) cam tozu eklenmiştir. Likit Limit (LL), Plastik Limit (PL) ve Plastisite İndeksi (PI) cam tozu içeriği arttıkça sürekli olarak azalmıştır. Serbest basınç dayanımı ise %8 cam tozu oranında  $133.5 \text{ kN/m}^2$  olarak ölçülmüş, bu oran %10 cam tozu eklenmesiyle  $119.7 \text{ kN/m}^2$ 'ye kadar düşmüştür. Araştırmacılar, cam tozunun optimum yüzdesinin zeminin kuru ağırlığının %8'i olduğunu belirlemişlerdir.

Xiao vd. (2020), geopolimerin hazırlanmasında atık cam tozu ve F sınıfı uçucu kül gibi geri dönüştürülmüş iki malzemeden yararlanmışlardır. İşlenmemiş zemin, farklı oranlarda atık cam tozu ile değiştirilmiş ve geopolimer stabilizasyonu öncesi ve sonrası mekanik davranışlar incelenmiştir. Tüm geopolimerle stabilize edilen numuneler, etkin bir şekilde mukavemet özelliklerini göstermiş ve geopolimer stabilizasyonunun etkinliğini kanıtlamıştır. Numunelerin hazırlanma sürecinde, daha yüksek kür sıcaklığının ve bağıl nemin daha iyi mekanik davranışlarla sonuçlandığı belirtilmiştir. Atık cam tozunun yüzeyinin alkali çözültide çözünebilir olduğu ve özellikle  $40^\circ\text{C}$ 'de geopolimerizasyona daha uygun olduğu vurgulanmıştır. Mikroyapı analizleri, %98 bağıl nem ve  $40^\circ\text{C}$ 'de küre tabi tutulan geopolimer zeminlerin en kompakt mikro yapıya ve en yüksek geopolimerizasyon derecesine sahip olduğunu, buna karşın küre tabi tutulan örneklerin ise büyük miktarda reaksiyona girmemiş parçacıklar içerdiğini göstermiştir.

Ramezani vd. (2023), çalışmalarında, şeker kamışı küspesi külü, cam tozu ve silis dumanı esaslı geopolimerlerin kötü derecelenmiş kumlu zeminlerin mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemeyi hedeflemişlerdir. Geopolimerizasyonun etkisini değerlendirmek için farklı likit aktivatörlerle (NaOH ve KOH) hazırlanan geopolimer numunelerini 7, 28 ve 91 gün boyunca küre tabi tutmuşlardır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için serbest basınç dayanımı deneylerini gerçekleştirmişler ve mikro yapı özelliklerini anlamak için taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD) ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, cam tozu ve silis dumanının ilavesinin, şeker kamışı küspesi külü bazlı geopolimer örneklerinin serbest basınç dayanımını artırdığını göstermiştir.

Mohammadzadeh vd. (2023), zemini iyileştirmede en etkili kombinasyonun %15 cam tozu katkısı ve 3M NaOH konsantrasyonu olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, kr süresinin artmasıyla mukavemetin arttığını, ancak kr süresi uzadıķça bu artışın daha küçük değerlerle geręekleřtiđini belirtmişlerdir.

Jamalimoghadam vd. (2024), bulgularında alkali aktivatör konsantrasyonu olarak 2M, %15 cam tozu iğeriği ve 90 gün kür süresi ile stabilizasyonda daha yüksek verimlilik olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte, 6M'lık alkali aktivatör iğeriğinin olumsuz etkilerinin olduğu ve mukavemetinde bir azalmaya yol ağtığını belirtmişlerdir.



### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1 Malzemeler

##### 3.1.1 Kaolin Kili

Bu tez çalışma kapsamında kullanılan kil zemin Çanakkale'den toz formda temin edilmiştir.

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre kil zeminin zemin sınıfı belirlenmiştir (ASTM D2487, 2020). Tez çalışması kapsamında kullanılan zemin “düşük plastisiteli kil” olarak bulunmuştur. Zemin sınıfı sembolü CL olarak belirlenmiştir. İnce daneli zeminlerin sınıflandırılmasında gerekli olan Atterberg limitleri deneyleri ASTM D4318 (2018) standardına uygun şekilde yapılmıştır. Çalışmada kullanılan zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriği gibi özellikleri kompaksiyon deneyi ile ASTM D698 (2021) standardına uygun olarak bulunmuştur. Söz konusu deneylerden elde edilen zemin parametreleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kaolin kilinin geoteknik özellikleri

Geoteknik Özellik	Değeri
Zemin Sembolü	CL (düşük plastisiteli kil)
Likit Limit (%)	32
Plastik Limit (%)	20
Plastisite İndisi (%)	12
Optimum Su İçeriği (%)	19.5
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	16.7
Özgül Ağırlık	2.55

##### 3.1.2 Ham Perlit

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan ham perlit İzmir –Cumaovası'ndaki bir maden yatağından temin edilmiştir (Şekil 3.1). Gradasyon eğrisinin tespitinden sonra örnek hazırlamada kullanılacak perlit elek açıklığı 0.425 mm olan (No.40) elekten geçirilerek kullanılmıştır. ASTM D6913 (2021) standardına uygun olarak ham perlit için dane boyu dağılımı eğrisi Şekil 3.2'de verilmiştir. Ham perlit katkısının zemin sembolü SW (iyi derecelenmiş kum) özgül ağırlığı ise 2.24 olarak belirlenmiştir. Ogawa vd. (1998), perlitin yüzeyinde silanol (Si-OH) gruplarının ve kil trombositlerinin kenarlarında silanol grubuna bağlı hidroksil gruplarının bulunduğu ve bu nedenle perlitin kil yüzeyi tarafından tutulduğunu

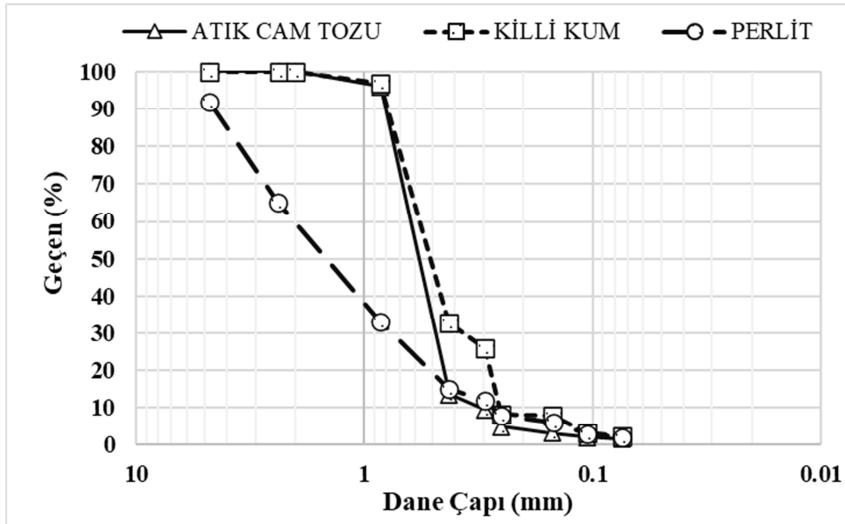
belirtmişlerdir. Bu sebeple bu tez çalışmasında kil-perlit karışımlarının davranışlarının değerlendirilmesi düşünülmüştür.



Şekil 3.1. İzmir-Cumaovası'ndaki perlit maden yığını

### 3.1.3 Atık Cam Tozu

Çalışma kapsamında, %10 perlit - %90 kaolin kilinden oluşturulan ana zemin ile ağırlıkça farklı oranlarda (%0, %10, %20, %30, %40, %50) cam tozu karışımlarından oluşan zemin örnekleri ile hazırlanmıştır. Zeminin sembolünün "SC", zemin türünün killi kum olduğu belirlenmiştir. Atık cam tozu İzmir-Bornova'da bir cam-ayna geri dönüşüm tesisinden temin edilmiştir. Killi kumun ve atık cam tozunun gradasyon eğrileri ASTM D6913 (2021) standardına uygun olarak Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan numunelere ait dane boyu dağılımları

### 3.1.4 Likit Aktivatörler

Likit aktivatör olarak tez çalışmasında ya sadece NaOH (sodyum hidroksit) çözeltisi veya NaOH (sodyum hidroksit) çözeltisi ile Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (sodyum silikat) kullanılmıştır. Sodyum hidroksit boncuk formda temin edilmiş olup beyaz renkte ve suda kolaylıkla çözünebilecek şekildedir; saflığı %99'dan fazladır. Sodyum silikat sıvı formda temin edilmiştir. 3 modül, 36-38 bome arasındadır. Bu özellikleri ile hızla sertleşebilen yapıdadır. NaOH çözeltisi, monomer oluşturmak için malzemenin silika ve alüminasını çözme potansiyelinin daha yüksek olması nedeniyle kullanılmıştır (Singhi vd., 2016; Yang vd., 2017; Yaghoubi vd., 2018; Fakhrabadi vd., 2021).

Çalışmada, likit aktivatörler sırası ile 2, 4, 6 ve 9M NaOH konsantrasyonları veya 6 ve 8M NaOH konsantrasyonlarında NaOH:Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> bileşimleri şeklinde oluşturulmuştur. NaOH:Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> bileşimi olan likit aktivatörlerin alt grupları şu şekilde belirlenmiştir:

1. 6M %10 NaOH: %90 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>
2. 6M %30 NaOH: %70 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>
3. 8M %10 NaOH: %90 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>
4. 8M %30 NaOH: %70 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

Farklı içeriklerde likit aktivatörler ile hazırlanmış perlit-zemin geopolimerlerinin ve cam tozu-zemin geopolimerlerinin indis ve mekanik davranışlarındaki değişimleri incelenmiştir.

### 3.2 Yöntemler

Bu tez çalışmasında perlit, atık cam tozu ve likit aktivatör katkılarında kil zeminin geoteknik özelliklerinde oluşturduğu etkilerini incelemek üzere detaylı bir deney programı oluşturulmuş olup farklı oranlarda perlit katkısının incelendiği deney programı Çizelge 3.2'de verilirken, farklı oranlarda atık cam tozu katkısının incelendiği deney programı Çizelge 3.3'te verilmiştir. Deney programında belirtilen perlit ve atık cam tozu içerikleri ağırlıkça kuru zemin ile yer değiştiren yüzde cinsinden katkı oranlarını ifade etmektedir.

Çizelge 3.2. Perlit içeren zeminlere ait deney programı

Deney Adı	Perlit İçeriği (%)	NaOH İçeriği (M)	Kür Süresi (gün)	Kür Sıcaklığı (°C)
Atterberg Limitleri	0/10/20/30/40/50	-	-	-
Kompaksiyon	0/10/20/30/40/50	0/2/4/6/9	-	-
Konsolidasyon	0/10/20/30/40/50	0/4/6	28/90	20-40
Serbest Basınç Mukavemeti	0/10/20/30/40/50	0/2/4/6/9	7/14/28/90/180	20-40
Direkt Kesme Kutusu	10/20/30/40/50	0/4	1/3/7	20-40

Çizelge 3.3. Atık cam tozu içeren zeminlere ait deney programı

Deney Adı	Atık Cam Tozu (%)	Likit Aktivatör Türleri	Kür Süresi (gün)	Kür Sıcaklığı (°C)
Atterberg Limitleri	0/10/20/30/40/50	6M (%10 NaOH:%90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	-	-
		6M (%30 NaOH:%70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )		
		8M (%10 NaOH:%90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )		
		8M (%30 NaOH:%70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )		
Kompaksiyon	0/10/20/30/40/50	6M (%10 NaOH:%90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	-	-
		6M (%30 NaOH:%70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )		
		8M (%10 NaOH:%90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )		
		8M (%30 NaOH:%70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )		
Serbest Basınç Mukavemeti	0/10/20/30/40/50	6M (%10 NaOH:%90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	7/28/90	20-40
		6M (%30 NaOH:%70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )		
		8M (%10 NaOH:%90 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )		
		8M (%30 NaOH:%70 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )		

Bu tez çalışmasında tekrardan kaçınmak için zemin örneklerinin isimlendirilmesi tercih edilmiştir. Bu isimlendirme ile örneklerin hangi malzemelerden hangi oranlarla oluşturulduğu anlaşılmaktadır. Aşağıda bu isimlendirmeyi açıklamak üzere birkaç örnek sunulmaktadır:

- 90K10P [%90 Kaolin, %10 Perlit karışımı]
- 90K10P2M [%90 Kaolin, %10 Perlit karışımı, 2M NaOH likit aktivatörü ile hazırlanmış]
- 70Z30CT 6M(10:90) [%70 Zemin, %30 Cam tozu karışımı, 6M NaOH içeren (%10 NaOH: %90 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) likit aktivatörü ile hazırlanmış]

- 90Z10CT 8M(30:70) [%90 Zemin, %10 Cam tozu karışımı, 8M NaOH içeren (%30 NaOH: %70 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) likit aktivatörü ile hazırlanmış]

### 3.2.1 Atterberg limitleri deneyi

Atterberg limitleri belirlenirken ASTM D4318 (2018) standardına uygun olarak likit limit deneyleri ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Kil zeminin ve çeşitli kil-perlit veya zemin-atık cam tozu karışımlarının likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Öncelikle zemin ile perlit veya atık cam tozu kuru olarak karıştırılmıştır. Yukarıdaki çalışma programında belirtilen karışım oranlarına göre deney boyunca zeminin su içeriği artırılarak likit limit belirlenmeye çalışılmıştır. Karışımı yapılan deney numuneleri Casagrande deney aletine (Şekil 3.3) yerleşimi yapıldıktan sonra üst yüzeyi spatula yardımıyla düzeltilmiştir. Casagrande oluk açma bıçağı ile karışımların ortasından bir oluk açılarak, alet üzerinde bulunan kol, kapta bulunan karışımların tabana saniyede 2 kez vuracak şekilde çevrilmiştir. Oluk açıklığı yaklaşık 13 mm kapanana kadar çevirme işlemi devam etmiştir. Oluk 13 mm kapanmaya başladığı anda kol çevrimi durdurularak, kapanan oluktan bir zemin örneği alınıp vuruş sayısı ile kaydedilmiştir. Bu işlem en az 5 noktada su içeriği-darbe sayıları ölçümleri olacak şekilde tekrarlanmıştır. 5 farklı su içeriğindeki vuruş sayısına denk gelen zemin örnekleri alınıp etüve atılmıştır. Etüvde 24 saati tamamlanan zemin örneklerine ait su içeriği elde edilmiştir. Bu 5 noktada elde edilen vuruş sayısı- su içeriği eğrisinin 25 darbeye karşılık gelen su içeriği likit limit değeri olarak belirlenmiştir.

Plastik limit değerinin belirlenebilmesi için elde edilen karışımlara belli bir miktar su eklenerek hamur elde edilmiştir. Bir miktar zemin örneği alınıp avuç içinde yuvarlandıktan sonra cam yüzey üzerinden yuvarlanmak suretiyle iplikler elde edilmiştir (Şekil 3.4). Elde edilen ipliklerin kalınlığı 3 mm altına düştüğünde çatlaklar ve kopmaların olduğu örnekler toplanıp etüve atılmıştır. Bu şekilde en az 3 farklı örnek grubu hazırlanmıştır. Etüvdeki örneklerin 24 saat sonunda su içerikleri belirlenmiştir. 3 farklı su içeriğinin ortalaması zemin örneğinin plastik limit değerini vermiştir.



Şekil 3.3. Casagrande deney aleti



Şekil 3.4. Plastik limit deneyi numuneleri

### 3.2.2 Kompaksiyon deneyi

Saf zeminin ve çeşitli kil-perlit veya zemin-atık cam tozu karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su veya optimum likit aktivatör içerik parametrelerini belirleyebilmek için ASTM D698 (2021) standardını uygun olarak deneyler yapılmıştır. Kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesinde standart Proktor enerjisi ile çalışılmıştır. Her zemin karışımı için zemin örneği kalıba 3 kademe 25 darbe ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.5). Su veya NaOH/  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içeriği her kademe artırılmış, zemin ağırlığı azalmaya başladığı tespit edildikten sonra en az 2 kez daha deneye devam edilmiştir. Her örneğe ait kompaksiyon eğrileri hazırlanmıştır. Böylece, kil-perlit veya zemin-atık cam tozu karışımlarının ve likit aktivatörlü kil-perlit veya zemin-atık cam tozu karışımlarının optimum su veya optimum NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içerikleri ve buna karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur.



Şekil 3.5. Kompaksiyon deneyi kalıp parçaları ve tokmağı

### 3.2.3 Serbest basınç mukavemeti deneyi

Zemin örnekleri hazırlanırken, deney programında belirlenen oranlar dikkate alınarak zemin ve perlit kuru şekilde eklenmiş, üzerine su veya likit aktivatör ( $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) eklenerek homojen bir karışım elde edilmiştir. Hazırlanan zemin örneklerinin boyu ve çapı deney öncesinde kontrol edilmiştir. Her örnek grubu 20 ve 40°C’de küre tabi tutulmak üzere 3’şer adet hazırlanmıştır (Şekil 3.6). Zemin örnekleri 7, (14\*), 28, 90, 180 gün kür süresi boyunca oda sıcaklığında (20°C) veya yüksek sıcaklık odasında (40°C) tutulmuştur. Örnekler, kür süresini tamamladıktan sonra serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.7). Serbest basınç mukavemeti deneyleri ASTM D2166 (2016) standardına göre yapılmıştır. Örnekler 1.42 mm/dk hızla yüklenmiştir. Deneyler %10 deformasyon seviyesine kadar sürdürülmüştür. Her bir zemin örneği için kaydedilen veriler düzenlenerek basınç-eksenel şekil değiştirme grafikleri hazırlanmıştır.

\*: Bazı örneklerde



Şekil 3.6. Serbest basınç mukavemeti deneyi için hazırlanmış numune örnekleri



Şekil 3.7. Serbest basınç mukavemeti deney aleti

### 3.2.4 Direkt kesme kutusu deneyi

Zeminin kesme mukavemeti parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini bulabilmek için geoteknik mühendisliğinin en basit deneylerinden biri olan direkt kesme kutusu deneyi ASTM D3080 (2023) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon deneyindeki numune hazırlama aşamalarının aynısı kesme kutusu deneyi için de gerçekleştirilmiştir. Likit aktivatörlü (NaOH) zemin örneklerinin erken sertleşmesi sonucu numune örnekleri hızlı bir şekilde hazırlanmıştır. Numune örnekleri 3 adet olacak şekilde hazırlanmış ve deney programında belirtilen sürelerde küre tabi tutulmuştur. Zemin örnekleri oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık olmak üzere 2 ayrı grupta incelenmiştir. Kür süresi biten zemin numunesinin üst ve alt kısmına filtre kâğıdı ve poroz taşı yerleştirilmiştir (Şekil 3.8). Hazırlanan zemin örneği deney aleti içerisindeki kesme hücreğine yerleştirilmiştir. Deney aletinin alt ve üst parçasının ayrı hareket etmesini engellemek için vidalarla sıkıştırılmıştır. Yatay yer değiştirme ve düşey yer değiştirme ölçüm cihazının başlangıç okuması sıfır olarak ayarlanmıştır. Kesme kutusu hücresi su ile doldurulmuş ve deney boyunca dolu bir şekilde bırakılmıştır. Kaldıraç koluna istenilen normal gerilme değerleri elde edilebilmesi için 2, 4 ve 8 kg olacak şekilde yükler eklenmiştir. Tüm zemin örnekleri için deneyler drenajlı koşullarda 55 kPa, 110 kPa, 220 kPa normal gerilme uygulanmıştır. Zemin örnekleri su ile doldurulan kesme kutusu hücresinde 24 saat konsolide edildikten sonra kesme işlemi başlatılmıştır. Kesme işlemi başlatılmadan önce alt ve üst kısmı birlikte tutan vidalar çıkartılmıştır. Tüm deneyler 1 mm/dk sabit kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Zemin örneklerinin kırılma anına ulaşana değin yatayda ve düşeyde deformasyonları kontrol edilmiş ve kaydedilmiştir. Üç farklı yükleme değerleri tamamlandıktan sonra zemin örneklerine ait kohezyon ve içsel sürtünme açıları bulunmuştur.



Şekil 3.8. Direkt kesme kutusu deney aleti

### 3.2.5 Konsolidasyon deneyi

Perlit içeren zeminlerin ve perlit içeren zemin geopolimerlerinin sıkışma davranışını incelemek için konsolidasyon deneyi ASTM D2435M (2020) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Zemin örneklerinin, öncesinde yapılmış olan deneylerden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık verisi ve halka hacminin bilinmesi ile sıkıştırılacak zemin ağırlığı bulunularak, halka içerisine yerleştirilmiştir. Mukavemet değeri yüksek çıkan zemin örnekleri için ayrı ayrı hazırlanan numuneler 28 ve 90 gün kür süresi, oda sıcaklığında (20°C) ve yüksek sıcaklık odasında (40°C) küre bırakıldıktan sonra konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9). Deney numuneleri üzerine ilk gün 0.5 kg yük uygulanmıştır. Konsolidasyon deney aletinde bulunan kaldıraç sisteminde uygulanan yük 10 katı olarak numuneye etkilemektedir. 24 saat sonunda uygulanan yük 2 katına çıkarılarak deney devam ettirilmiştir. Yedinci gün numune üzerine 32 kg yük uygulanmış 24 saat sonunda deney sonlandırılmıştır. Sonuç olarak her bir zemin numunesi üzerine 7 gün boyunca sırasıyla 24.98, 49.96, 99.92, 199.85, 399.75, 799.39, 1598.78 kPa gerilme uygulanmıştır.



Şekil 3.9. Konsolidasyon deney aleti

## 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1 Perlit İçeren Zeminler

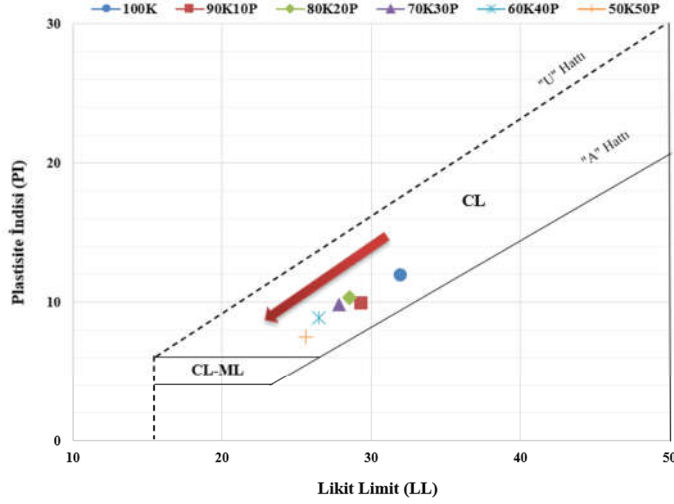
#### 4.1.1 Atterberg limitleri

Perlit içeren zeminlerin likit limit (LL), plastik limit (PL) ve plastisite indisi (PI) üzerindeki etkisi Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Kil zemine kuru zemin ağırlığının sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50’si kadar perlit ilavesi yapılmıştır. Perlit oranının artışı likit limit ve plastik limitte bir azalmaya sebebiyet vermiştir. Dolayısıyla plastisite indisi de azalma eğilimine girmiştir. Plastisite kartında, perlit ilavesinin kademeli olarak CL bölgesinden CL-ML bölgesine doğru bir ilerleme sağladığı görülmüştür (Şekil 4.1).

Cabalar ve Mustafa (2015), çalışmalarında kil matrisindeki kum yüzdesi arttıkça likit limit değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Cabalar vd. (2018) çalışmalarında bentonit kili ile birlikte 2 farklı kum zeminin (Narlı kumu ve kırmataş kum) kuru ağırlıkça %5, %10, %15, %20 karıştırılması sonucu Atterberg limitlerinde azalış olduğunu saptamışlardır. Aziz (2023), çalışmasında, kum-kil ve silt-kil karışımlarının Atterberg limitlerini belirlemek için kil numunelerine farklı oranlarda kum ve silt eklenerek kil-kum ve kil-silt karışımları hazırlamıştır. Yüksek plastisiteli kil numunesinin likit limitinin ve plastisite indeksinin silt ve kum katkısı ile azaldığını gözlemlemiştir. Perlit de, silt ve kum gibi plastik olmayan davranış sergilediğinden bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda Aziz (2023) tarafından yapılmış çalışmalara paralel sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Çizelge 4.1. Perlit içeren zeminlerin Atterberg limitleri

Perlit İçeriği (%)	Örnek Adı	LL	PL	PI
0	100K	32	20	12
10	90K10P	30	19	11
20	80K20P	29	18	11
30	70K30P	28	18	10
40	60K40P	27	17	10
50	50K50P	26	18	8

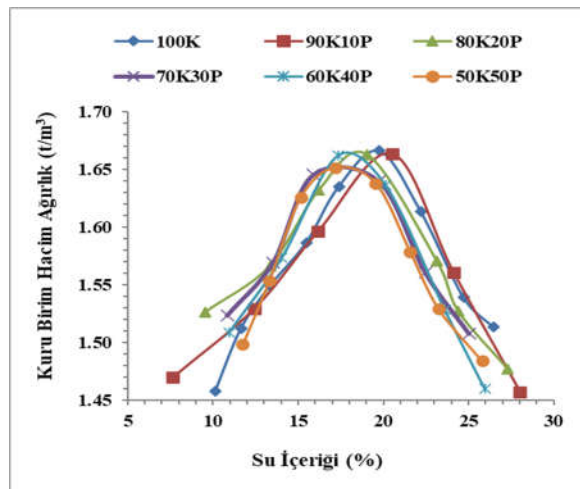


Şekil 4.1. Perlit içeren zeminlerin plastisite kartında gösterimi

Zemin içerisine eklenen %10 perlit içeriğinde zeminin likit limit ve plastik limit değerleri sırasıyla 30 ve 19 bulunurken, %50 perlit içeriğinde zeminin likit limit ve plastik limit değerleri sırasıyla 26 ve 18 olarak bulunmuştur. Zemin içerisine %20 oranından sonra eklenen perlitin, zeminin plastik limitine önemli miktarda etki etmediği ve işlenebilirliğinin aynı kaldığı gözlemlenmiştir.

#### 4.1.2 Kompaksiyon parametreleri

Kompaksiyon deneyleri ile serbest basınç deneyi için hazırlanacak örneklerin optimum su içerikleri belirlenmiştir. Deney programında belirtilen (Çizelge 3.2), tez kapsamında dâhil edilmiş olan her deney grubunun kompaksiyon deneyi ayrı ayrı yapılmıştır. Şekil 4.2, su ile hazırlanan perlit zemin karışımlarına aittir.

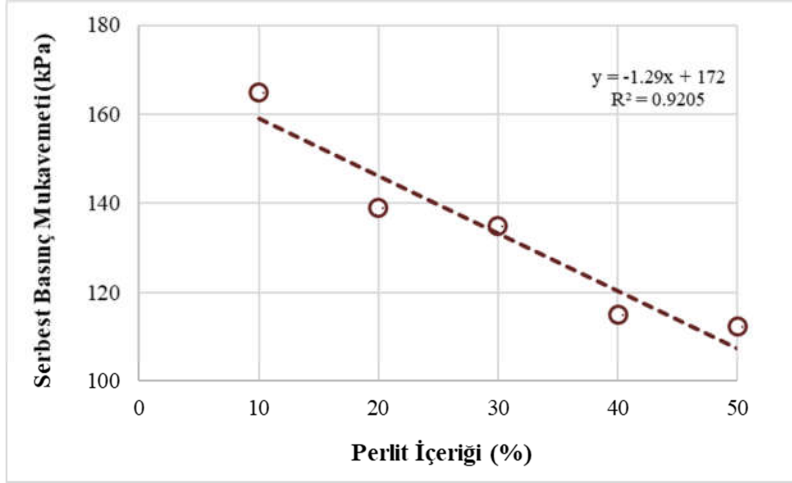


Şekil 4.2. Perlit içeren zeminlerin kompaksiyon eğrileri

Zemine perlit ilavesi ile ilk etapta %10 perlit içeriğinde optimum su içeriğinin zeminin saf haline göre bir miktar arttığı, %20 perlit içeriğinde ise azaldığı görülmüştür. Ancak, sadece %40 perlit içeriğinde optimum su içeriğinin artış eğilimi olduğu tespit edilmiştir. Buna sebep perlitin kendi yapısında mevcut su bulundurmasının kili partiküllerinin negatif yüklü uçlarına daha kolay tutunabileceği bir durum yaratarak bu içerikte efektif olmasıdır. Kil daneleri, yüzeylerinde negatif elektrik yüküne sahip, pozitif yüklü köşeleri bulunan plaka parçalarıdır. Kildeki negatif yükler, elektriksel kuvvetler ve plakaların yüzeye bağlı olan zemin suyundaki katyonlar ile denge durumundadır. Sıvı miktarındaki değişim veya kimyasal bileşimindeki değişim sonucunda, zeminin su kimyasında değişimler olduğu ve bu durumun iç kuvvetleri etkilediği bilinmektedir (Nelson ve Miller, 1992). Cabalar ve Mustafa (2017), kum-kil karışımlarına farklı oranlarda kum eklendikçe su içeriğinde azalma olduğunu saptamışlardır.

#### **4.1.3 Serbest basınç mukavemeti**

Tez çalışmasında öncelikle kil zeminin serbest basınç mukavemeti (SBM) ölçülmüştür. Kil zeminin serbest basınç mukavemeti (SBM) 160 kPa olarak bulunmuştur. Zemin içerisine farklı oranlarda perlit ekleyerek zeminin mukavemetleri belirlenmiştir. %10 perlit içeriğinde mukavemet değeri 165 kPa olurken %50 perlit içeriğinde mukavemet değeri 113 kPa olarak bulunmuştur. Şekil 4.3'te gösterildiği üzere ilk etapta %10 perlit içeriğinde mukavemetin arttığı görülse de, perlit içeriği arttıkça mukavemette azalma olduğu bulunmuştur. Benzer sonuçlar Çalık (2012) tarafından da raporlanmıştır; zemine perlit eklendikçe mukavemette azalma olduğu belirtilmiştir. Serbest basınç deneyinin doğası gereği bir çevre basıncının var olmaması, perlit ilavesi ile non-plastik danelerin hakimiyetine geçen zemin örneklerinin varlığı neticesinde bu sonuçlar elde edilmiştir. İlerleyen paragraflarda, diğer mekanik deney sonuçlarında perlit ilavesinin mekanik özellikleri iyileştirici etkileri de olabildiği gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Perlit içeren zeminlerin serbest basınç mukavemetleri

#### 4.1.4 Direkt kesme kutusu deneyi

Kil ve perlit içeren zeminlerin kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Perlit içeren zeminlerde, perlit eklendikçe kohezyon ( $c$ ) azalırken, içsel sürtünme açısında ( $\Phi$ ) artış olmuştur (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Perlit içeren zeminlerin kesme kutusu parametreleri

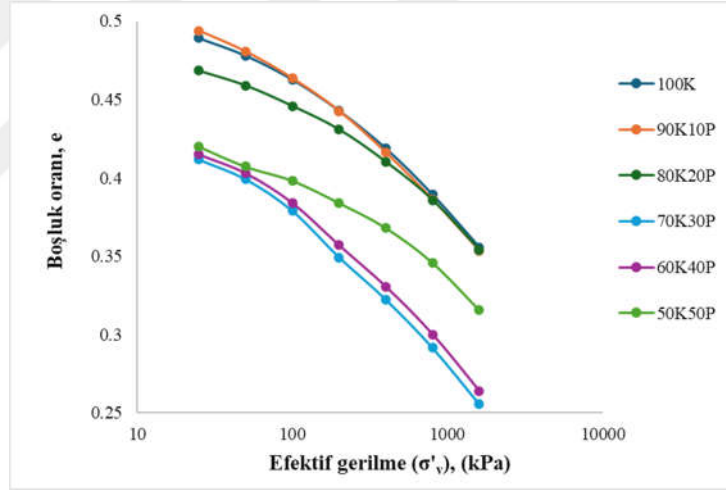
Örnek Adı	$c$ (kPa)	$\Phi$ (°)
100K	18.81	27.63
90K10P	15.67	30.63
80K20P	16.85	30.70
70K30P	13.64	31.03
60K40P	10.43	31.62
50K50P	7.97	36.22

Kumun kesme mukavemeti parametreleri, parçacık boyutuna ek olarak kum ve kil karışımının şeklindeki değişiklik nedeniyle ince dane içeriğinden güçlü bir şekilde etkilenmektedir (Kenny, 1977; Skempton, 1985; Vallejo and Mawby 2000; Monkul ve Ozden, 2007; Hsiao and Phan, 2016; Miftah et al., 2020). Perlit içeren zemin örneklerinde normal gerilme arttıkça, kesme kuvvetlerinde bir miktar da olsa artış olduğu görülmüştür. 220 kPa normal gerilme altında en fazla kesme kuvveti %50 perlit içeriğinde 154 kPa olarak saptanmıştır. Aynı gerilme altında %10 perlit içeriği ile %30 perlit içeriğindeki kesme kuvvetleri birbirine yakın değerler bulunmuş olup, sırasıyla 145.59 kPa ve 145.06 kPa olarak saptanmıştır.

Zemin ince daneler içerdiğinde, ince daneler arasında yapışma veya kohezyon artma eğilimi göstererek bunların ayrılmasını zorlaştırır; sonuç olarak ince danelerin varlığı nedeniyle kumun kesme direnci artma eğilimi gösterir (Ishihara, 1993). Zemin içerisine perlit eklendikçe içsel sürtünme açısından artış olmuştur. Kohezyonda %10 perlit içeriğinde azalış olurken %20 perlit içeriğinde artış olduğu görülmüştür. Perlit içeriği arttıkça kohezyonda azalım olduğu saptanmıştır. Sonuç olarak zemin içerisinde ince danenin varlığı kohezyonda azalım gösterirken, içsel sürtünme açısından artmasına neden olmaktadır.

#### 4.1.5 Konsolidasyon deneyi

Tez çalışmasında, perlit katkısının zeminin sıkışabilirlik üzerindeki etkisi gözlemek için konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deneyler her perlit katkısı için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te perlit içeren zemin örneklerinin boşluk oranı-efektif gerilme ilişkileri verilmiştir.



Şekil 4.4. Perlit içeren zeminlerin boşluk oranı-gerilme grafiği

Perlit içeriği arttıkça, perlit içeren zeminlerin başlangıç boşluk oranında ( $e_0$ ) azalma olurken, sıkışma indisi ( $C_c$ ) %30 perlit içeriğine kadar azalış olduğu görülmüştür. %30 perlit içeriğinde sıkışma indisinde bir miktar artış olurken bu yüzde değerinden sonra tekrardan sıkışma indisinde azalma olduğu görülmüştür (Çizelge 4.3).

Çalışmada kil içerisine non-plastik özellikteki ince perlitin katılmasının, kil-ince kum ile yapılan çalışmalara bir analogi oluşturacağı düşünülmüştür. İnce daneler kum daneleri arasındaki boşlukları, kum danesi temaslarını kırmadan doldurarak boşluk oranında bir azalmaya neden olduğunu ve ince dane içeriğindeki artışla birlikte, boşluklar aşamalı olarak tamamen dolmaktadır. Bu

noktada, boşluk oranı en düşük noktasına ulaşabilmektedir (Lade vd., 1998; Zuo ve Baudet, 2015). Thevanayagam ve Mohan (2000), düşük ince dane içeriklerinde kum danelerinin birbirleriyle temas halinde olduğunu ve zeminin ana iskeletini oluşturduğu belirtmişlerdir. İnce danelerin, kum daneleri arasındaki boşlukları doldurduğunu ve zemin davranışına yalnızca ikincil bir katkı sağladığını ortaya koymuşlardır. Monkul ve Özden (2007) kaolinit-kum karışımları üzerinde konsolidasyon deneyleri gerçekleştirmiş olup %19 ile %34 arasındaki ince içeriğine kadar, sıkıştırma davranışının kum daneleri tarafından kontrol edildiğini belirtmişlerdir. Phanikumar vd. (2012), kum-kil karışımlarının konsolidasyon özellikleri incelemiştir. Numunelerin sıkışma indisi başlangıçta %15 kum içeriğine kadar azalmış, daha sonra daha yüksek kum içeriklerinde artma eğilimi olduğunu rapor etmişlerdir. Mekkiyah ve Al-Khazragie (2015), çalışmalarında kil içerisinde ince kumu farklı oranlarda (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 ve %80) karıştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre, ince kum içeriği arttıkça sıkışma indisinde azalma olduğunu belirtmişlerdir. Karakan ve Altun (2016), ince dane oranı etkisinin, dane çapının büyüklüğüne dayandığı ve %30'dan daha az ince dane içeren zeminlerde, kum daneleri arasındaki boşlukların zemin dayanımına etkisinin olmadığı ve sonuçta boşluk oranını azalttığını belirtmişlerdir. Deng vd. (2017), kil-kum karışımında, kum fraksiyonundaki ince bileşimlerin artmasıyla boşluk oranının da azalma olduğunu saptamışlardır. Sonuçta, yapılan çalışmaya göre sıkışma indisinde önce azalış daha sonra artış olduğu görülmüş, Phanikumar vd. (2012)'ye göre benzer sonuçlar elde edilmiştir. Zemin içerisine perlit eklendikçe boşluk oranında azalma olduğu Deng vd. (2017)'nin çalışmasıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3. Perlit içeren zeminlerin konsolidasyon parametreleri

Örnek Adı	$C_c$	$e_0$
100K	0.097	0.527
90K10P	0.099	0.507
80K20P	0.085	0.490
70K30P	0.104	0.489
60K40P	0.101	0.455
50K50P	0.074	0.414

Tez çalışmasında konsolidasyon eğrilerinden prekonsolidasyon basınçlarının da belirlenmesine çalışılmıştır. Konsolidasyon deneyleri ile saptanan prekonsolidasyon basınçları şu şekildedir: 100K zemininde 150 kPa, %40 ve %50

perlit içeren zeminlerde ise sırası ile 200 ve 310 kPa'dır. Bu durum perlit katkısının prekonsolidasyon basıncını arttırdığını ispatlamaktadır.

## **4.2 Perlit İçeren Zemin Geopolimerleri**

### **4.2.1 Kompaksiyon parametreleri**

Perlit içeren zemin geopolimerlerinin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ile NaOH içeriği arasındaki ilişki incelenmiştir. Bulgulara göre, likit aktivatör oranının artırılması ve perlit içeriğinin artması, maksimum kuru birim hacim ağırlığında bir artışa yol açmaktadır.

Örneğin, “90K10P6M” (%90Kil\_%10Perlit\_6M NaOH) numunesinde maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1.67 \text{ t/m}^3$  iken, “90K10P9M” örneğinde  $1.69 \text{ t/m}^3$  ve “50K50P6M” deneyinde  $1.69 \text{ t/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, “50K50P9M” örneğinde maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1.76 \text{ t/m}^3$  olarak ölçülmüştür. Bu bulgulara dayanarak, kil zeminlere perlit eklenmesiyle kuru birim hacim ağırlığının azaldığı ve optimum su içeriğinin de azaldığı, perlit zemin geopolimer karışımlara perlit ve NaOH eklenmesiyle kuru birim hacim ağırlığının arttığı ve optimum NaOH içeriğinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Farklı perlit içeriğindeki, perlit içeren zemin geopolimerlere 2M, 4M, 6M ve 9M NaOH eklendiğinde optimum NaOH içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlığında artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kompaksiyon deneylerinin sonuçları özet olarak Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Perlit içeren zemin geopolimerlerinin kompaksiyon parametreleri

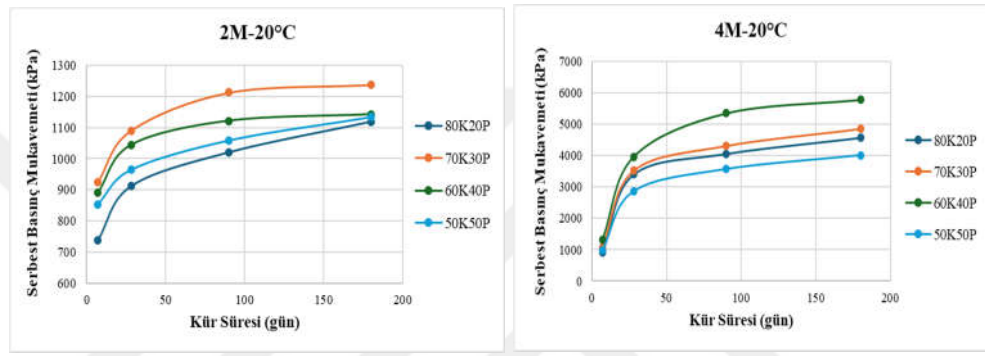
Örnek Adı	Perlit İçeriği (%)	NaOH İçeriği (M)	$\gamma_{kuru,maxs}$ (t/m <sup>3</sup> )	$\omega_{opt}$ (%)
90K10P2M	10	2	1.63	17
90K10P4M	10	4	1.65	18
90K10P6M	10	6	1.67	19
90K10P9M	10	9	1.69	20
80K20P2M	20	2	1.67	16
80K20P4M	20	4	1.69	17
80K20P6M	20	6	1.71	18
80K20P9M	20	9	1.73	18
70K30P2M	30	2	1.70	16
70K30P4M	30	4	1.71	17
70K30P6M	30	6	1.72	17
70K30P9M	30	9	1.73	18
60K40P2M	40	2	1.62	15
60K40P4M	40	4	1.66	16
60K40P6M	40	6	1.70	17
60K40P9M	40	9	1.74	17
50K50P2M	50	2	1.55	15
50K50P4M	50	4	1.62	16
50K50P6M	50	6	1.69	17
50K50P9M	50	9	1.76	17

## 4.2.2 Serbest basınç mukavemeti

### 4.2.2.1 Kür süresi

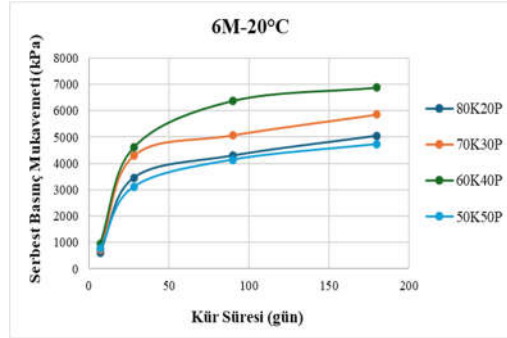
Örneklerin 7-28 gün kür süresinde mukavemetlerinin hızla artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. 28-180 gün aralığında ise mukavemetlerde artış devam etmekle beraber artış miktarının küçüldüğü görülmektedir. 20°C’de küre bırakılan örneklerde mukavemet artışlarının belirli bir zemin:perlit oranını takip ettiği görülmektedir. Ancak bu oran örneklerdeki NaOH molaritesine göre farklılaşabilmektedir. 6M NaOH içeren perlit zemin geopolimerlerinde sıralama 60:40, 70:30, 80:20, 50:50 şeklindedir. Tüm çalışmada en yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri 6M NaOH içeren %60 kaolin-%40 perlit geopolimerlerinde bulunmuştur. Sırası ile bu örneklerin 28, 90 ve 180 gün sonundaki mukavemetleri 4607, 6375 ve 6875 kPa’dır (Şekil 4.5c). NaOH molaritesi azaldıkça ulaşılan serbest basınç mukavemet değerleri de azalmıştır. Örneğin, 4M NaOH içeren %60 kaolin-%40 perlit geopolimerleri yine kendi grubu içerisinde en yüksek serbest basınç mukavemetine ulaşsa da 180 gün sonunda bu örneklerde 5773 kPa ölçülmüştür (Şekil 4.5b). 6M NaOH ve 4M NaOH ile geopolimerize edilen

örneklerde mukavemet sıralamasının aynı örnek gruplarını takip ettiği görülmüştür. Ancak 2M NaOH içeren örneklerde mukavemet sıralaması zemin:perlite oranına göre 70:30, 60:40, 50:50, 80:20 şeklindedir (Şekil 4.5a). 2M NaOH içeren %70 zemin-%30 perlit geopolimerleri 180 günde 1237 kPa mukavemet göstermiştir. 2M NaOH ve 4M NaOH içeren örneklerde mukavemet açısından 5 kate varan bir farklılık görülmektedir. 2M NaOH içeren geopolimerlerde en yüksek mukavemete sahip ilk 3 gruba bakıldığında perlit içeriğinde artış olduğu, halbuki 4-6M NaOH içeren geopolimerlerde en yüksek mukavemete sahip ilk 3 gruba bakıldığında perlit içeriğinde azalış olduğu tespit edilmiştir.



(a)

(b)

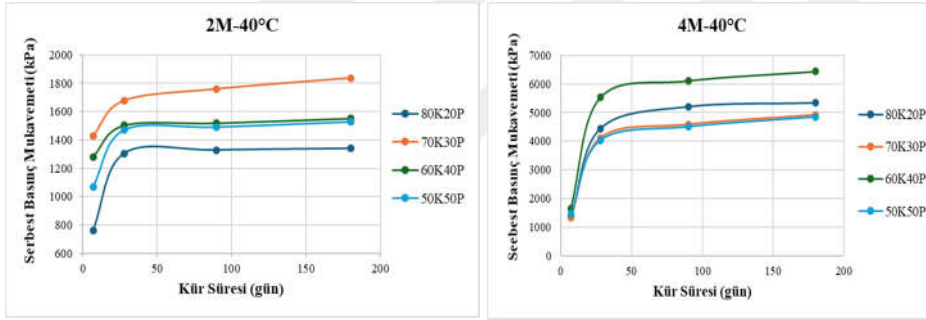


(c)

Şekil 4.5. 20°C kür süresine göre (a) 2M, (b) 4M ve (c) 6M örneklerin serbest basınç mukavemeti gelişimleri

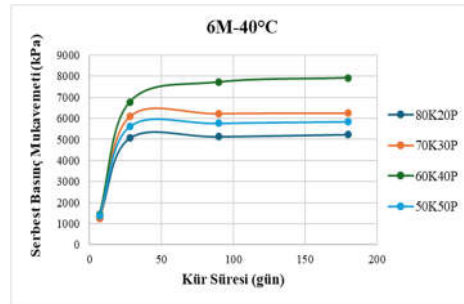
40°C'de küre bırakılan örneklerde 7-28 gün kür süresinde mukavemetlerinin hızla artma eğiliminde olurken, 28-180 gün aralığında ise mukavemetlerde artış devam etmekle beraber artış miktarının az da olsa gerçekleştiği görülmüştür. Mukavemet artışlarının belirli bir zemin:perlite oranına göre sıralaması 6M NaOH içeren geopolimerlerde 60:40, 70:30, 50:50, 80:20 olarak bulunmuştur (Şekil

4.6c). Tüm çalışma grubunda en yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri 28, 90 ve 180 gün kür süresine tabi tutulan 6M NaOH içeren %60 kaolin-%40 perlit zemin geopolimerlerinde bulunmuştur. Sırasıyla bu örneklere ait serbest basınç mukavemeti değeri 6779, 7723 ve 7920 kPa olarak saptanmıştır. Ancak 2M NaOH içeren örneklerde mukavemet sıralaması zemin:perlit oranına göre 70:30, 60:40, 50:50, 80:20 şeklindedir (Şekil 4.6a). 2M sodyum hidroksit içeriğinde 60:40 ve 50:50 perlit zemin geopolimerleri birbirine yakın değerler olduğu saptanmıştır. 2M NaOH içeren %70 kaolin-%30 perlit zemin geopolimerleri 180 günde 1836 kPa mukavemet göstermiştir. 2M NaOH ve 4M NaOH içeren örneklerde mukavemet açısından 5 kata varan bir farklılık görülmektedir. 2M NaOH içeren geopolimerlerde en yüksek mukavemete sahip ilk 3 grup incelendiğinde perlit içeriğinde artış olduğu, halbuki 4-6M NaOH içeren geopolimerlerde en yüksek mukavemete sahip ilk 3 gruba bakıldığında perlit içeriğinde azalış olduğu tespit edilmiştir. Özellikle yüksek sıcaklığın 2M NaOH perlit içeren zemin geopolimerlerinde 500 kPa'ya varan bir mukavemet artışı oluşturabileceği gözlenmiştir.



(a)

(b)



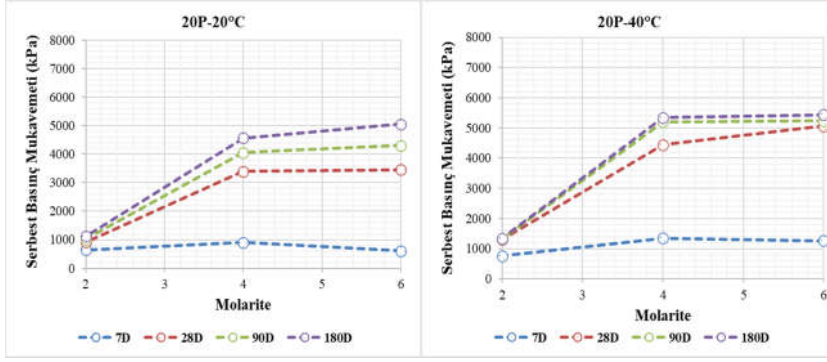
(c)

Şekil 4.6. 40°C kür süresine göre (a) 2M, (b) 4M ve (c) 6M örneklerin serbest basınç mukavemeti gelişimleri

Kür süresi artışı ile meydana gelen zemin iyileştirmesi, geopolimerizasyon sürecinde polimer yapısının rijitlik artışından ileri gelmektedir. Kür süresinin artması ile reaksiyon hızının önemli ölçüde artması mukavemetteki artıştan sorumludur. Tekin (2016), NaOH kullanarak mermer, traverten ve volkanik tüf atıklarıyla gerçekleştirdiği geopolimerizasyon işlemini değerlendirmiştir. Bu tez çalışmasına benzer sıcaklık seviyesinde çalışılmış olup kür süresi en fazla 90 gün seçilmiştir. Bu çalışmada kür süresinin etkisi değerlendirildiğinde tez çalışmasından farklı materyaller kullanılmasına rağmen, kür süresi-mukavemet ilişkilerinin benzer eğrilerle ifade edildiği gözlenmiştir. Voottipruex vd. (2022), 28 güne kadar incelediği perlit-zemin geopolimerleri için %40-%50 perlit kullanılmasını tavsiye etmiştir. NaOH molaritesi açısından da 6M'ın en yüksek mukavemete ulaşmayı sağladığını vurgulamıştır. Tez çalışmasındaki bulgular Voottipruex vd. (2022) çalışması ile bu açıdan uyum arz etmektedir.

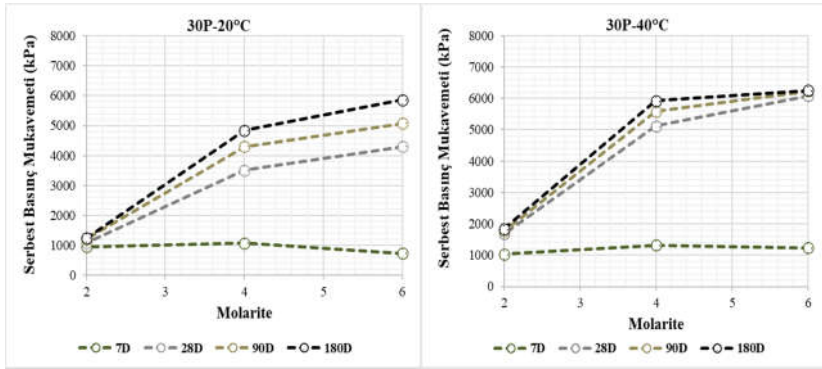
#### 4.2.2.2 Molarite

Şekil 4.7 (a-h)'de perlit içeren zemin geopolimerinin serbest basınç mukavemeti ile sodyum hidroksit çözeltisi konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Numunelerin mukavemeti, 2 ila 6M arasında değişen NaOH çözeltisi konsantrasyonu ile artma eğilimindedir. 7 günlük örnekler molarite incelemesinde daha küçük mukavemet grubunu oluşturarak diğer örneklerden ayrılmaktadır. Diğer kür sürelerinde 20°C'de Şekil 4.7'a, c, e ve 40°C'de Şekil 4.7 f'de, birbirinden farklı ve sürekli artan bir mukavemet eğilimine sahiptir; 20°C'de Şekil 4.7 g ve 40°C'de Şekil 4.7 b, d, h'de 6M NaOH çözeltisi etkisinde birbirlerine yakınsayan mukavemetler göstermiştir. Bu durumda 40°C'de 6M NaOH ve %40 perlit içeren zemin geopolimerleri diğerlerinden ayrılarak en başarılı iyileştirmenin gerçekleştiğini göstermektedir.



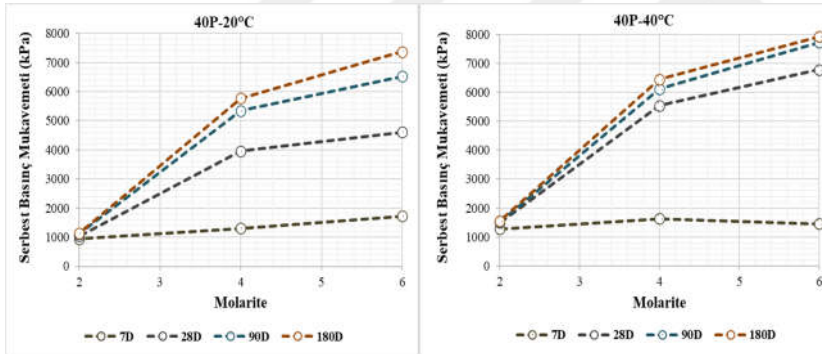
(a)

(b)



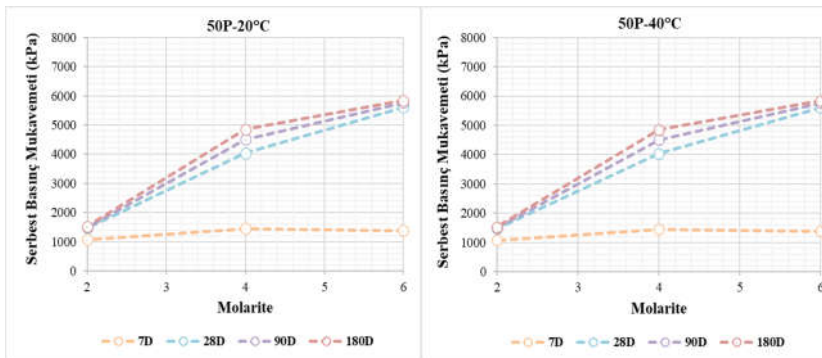
(c)

(d)



(e)

(f)



(g)

(h)

Şekil 4.7. Farklı perlit içeriğinde NaOH molaritesinin etkisi

Sodyum hidroksit molaritesinin zemin içerisindeki perlit oranıyla etkileşimini iyi anlayabilmek için öncelikle perlitin yapısının bilinmesi gereklidir. Perlit, erimiş sodyum potasyum alüminyum silikattan oluşan amorf bir mineraldir. Sodyum hidroksit çözeltisi ne kadar fazla olursa, geopolimerizasyon reaksiyonu sonucu perlitten o kadar fazla silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ayrılmaktadır. Perlit partikülleri tipik olarak hematit partiküllerine kıyasla daha düşük yoğunluğa ve daha büyük partikül boyutuna sahip olduğunu belirtmişlerdir (Abdelaal vd., 2024). Yüksek silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) içerikleri nedeniyle, perlit tozları (ister doğal halde ister yüksek sıcaklıkta kalsine edilmiş halde) beton karışımlarının mukavemetini ve dayanıklılığını artıran puzolanik malzemelerdir (Demirboga vd. 2001; Erdem vd. 2007; Rashad, 2016). Tsaousi vd. (2016), alkali ile aktive edilmiş perlit bazlı macunlar için optimum sentez koşullarının 1.2 ila 1.4 g/mL arasında değişen bir katı-sıvı oranı ve 4 M'lık düşük bir sodyum hidroksit molaritesi kullanılarak elde edildiğini saptamışlardır. NaOH molaritesinin artması, alüminosilikat öncüllerinin çözünmesini teşvik eder, polimerleşmek için bol miktarda silikon ve alüminyum oksijen tetrahedronu serbest bırakır ve sonuç olarak daha fazla N-A-S-H jeli oluşturur. N-A-S-H ve C-A-S-H jelleri genellikle geopolimer kompozitlerin basınç dayanımını olumlu yönde etkilemektedir (Kamhangrittirong vd., 2013). Bu nedenle, NaOH molaritesinin artması, zeminin iyileştirilmesi açısından faydalıdır. Bu sonuç, geopolimerleşmenin yol temellerinde, siltli yumuşak kil ve deniz kili stabilizasyonunda başarılı bir şekilde kullanılabileceği yönündeki savı güçlendirmekte ve yapılan önceki çalışmalardan elde edilen bulgulara paralel olarak bu tez çalışması ile de NaOH molaritesi artışının belirli bir noktaya kadar mukavemeti arttırıcı etkisi olduğu görülmüştür (Phetchuay vd., 2016; Arulrajah vd., 2016; Sukprasert vd., 2021; Zhou vd., 2021).

Bu tez çalışmasında rapor edilmemekle beraber, 6M'dan daha fazla sodyum hidroksit çözeltisi konsantrasyonunun, serbest basınç mukavemetini azalttığı tespit edilmiştir. 9M NaOH çözeltisi içeren örneklerin örnek şekillerinin bozulduğu, örneklerin hızla kuruyarak, çatlak ve kopmaların olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.8). Yüksek konsantrasyonda NaOH çözeltisi, aşırı miktarda sodyum hidroksit üreterek ve zemin danelerinin birbirine tutunmasını sağlayacak yapıyı tahrip etmektedir. Bilondi vd. (2018a), aşırı NaOH'un kildeki katyonlarla reaksiyona girebileceğini, bunun da kil yapısını bozduğunu ve çimentolu ürünlerin oluşumunu engellediğini belirtmiştir.



Şekil 4.8. Şekil 4.8. 9M NaOH konsantrasyonlu zemin örnekleri

Balaraman vd. (2016), sodyum hidroksitin molarite oranında bir düşüş olduğunda geopolimerin mukavemetinin düşük hale geldiğini ve bu nedenle, alkali aktivatörlerin öncüllerle çözünmesi sırasında silika ve alümina arasındaki molarite etkisinin önemini analiz edilmesinin önemli olduğunu belirtmişlerdir. Ghadir ve Ranjbar (2018), sodyum hidroksitin molaritesinin 4 ila 12M arasında artması, alüminosilikat öncüllerinin daha yüksek çözünmesine ve sonuç olarak daha yüksek bağlayıcı jel üretimine neden olduğunu belirtmişlerdir. Bilondi vd. (2018a), geopolimerizasyon uygulamasında ve zemin stabilizasyonu için optimum NaOH konsantrasyonunun kullanılması gerekliliğini göstermiştir. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş cam tozu bazlı bir geopolimer için aktivatörün düşük konsantrasyonları (2M veya 3M), özellikle araştırma koşulları altında uygun mekanik özellikler elde etmek için yeterli olduğunu tespit etmişlerdir. Santhikala vd. (2022), deneysel sonuçlarına göre, uçucu kül bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş şişen zeminin serbest basınç mukavemeti artan bağlayıcı konsantrasyonu ile yükselmiştir. Aktivatörün molaritesi 8M'den 10M'ye çıkarıldığında, uçucu kül bazlı geopolimer stabilize edilmiş şişen zeminin serbest basınç mukavemeti artmış, ancak aktivatörün molaritesi 12M'ye çıkarıldığında serbest basınç mukavemeti azalmıştır. Bu tez çalışması kapsamında düşük NaOH içeriği kullanılmasının maliyet açısından önemine bakıldığında yapılan çalışmalar ile paralellik olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, düşük molarite de çalışılması mukavemet artışında etkili olduğu, yüksek molariteler de zemin numunesinin yapısında bozulmalar olduğu görülürken literatüre bu konu hakkında katkısı bulunan Ghadir ve Ranjbar (2018) ila Bilondi vd. (2018a) çalışmalarında optimum olarak kullanılmasını önerdikleri NaOH molaritesi aralıklarının tez çalışma kapsamında seçilen molarite aralığı ile uyum sağladığı vurgulanmalıdır.

Perlit zemin geopolimerleri, daha düşük NaOH çözelti konsantrasyonlarının yanı sıra daha yüksek kürleme sıcaklıklarında daha hızlı katılaştırmıştır. Tsaousi vd.

(2016), sadece perlit kullanarak 2-4M NaOH çözeltisinin optimum konsantrasyonlarını oluşturduğu gözlemlenmiştir. Tsaousi vd. (2016), 30°C’de 24 saatlik kür süresinden sonra perlitten Si çözünmesinin NaOH konsantrasyonu ile arttığını, ancak NaOH konsantrasyonundaki çok fazla artışın ise fazla miktarda serbest NaOH oluşturduğunu belirtmiştir. Bu durum silikon çözünmesinde yeterli miktarda artışa sebep olmaz (Denklem 1) ve sulu fazda daha düşük SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O kütle oranları oluşturur. Daha düşük SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O kütle oranları, monomer ve oligomer Si türlerinin oluşumunu kolaylaştırır ve dolayısıyla polikondenzasyon olgusunu engeller.

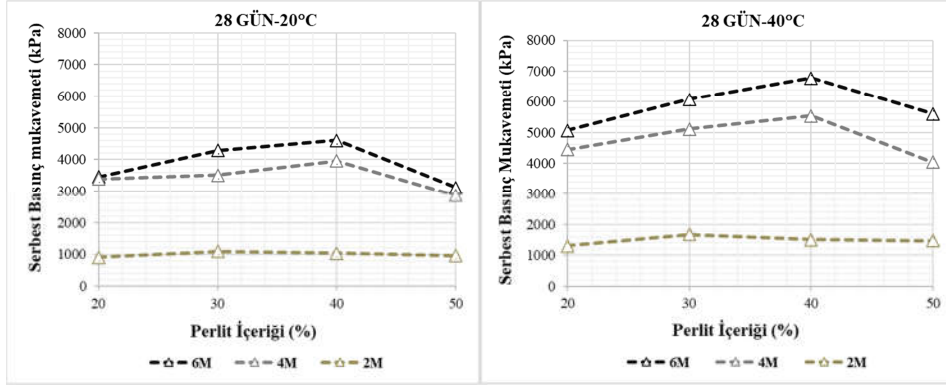


Pratik uygulamada dayanıklılık, ekonomiklik, güvenlik ve uygulanabilirlik dikkate alındığında önerilen NaOH molaritesi 4-6 mol/L’dir. Nispeten düşük bir NaOH molaritesi (2M), zayıf stabilizasyon etkisine neden olurken, nispeten yüksek NaOH molaritesi (9M), geopolimer bağlayıcının akışkanlığını azaltır ve erken sertleşmeye yol açar; bu da derin zemin karıştırması (DSM, deep soil mixing) vb. projelerin yerinde yapımına elverişli olmaz.

#### 4.2.2.3 Perlit içeriği

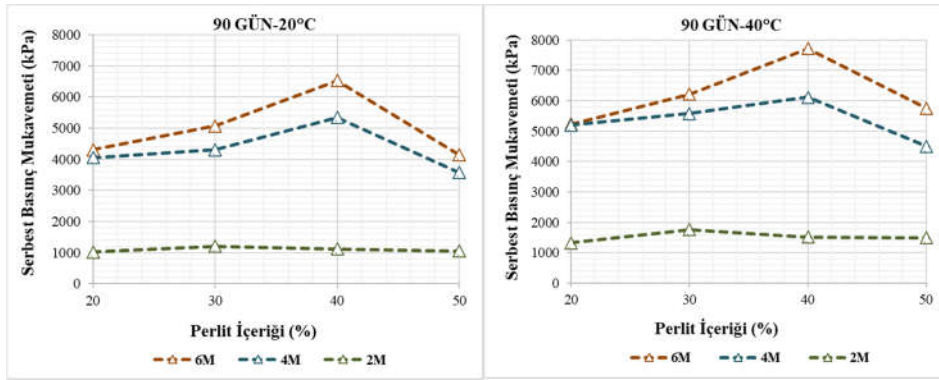
Perlit içeriğine göre mukavemet değişimleri ise Şekil 4.9 (a-d)’de sunulmuştur. Zeminin kür süresine göre gerçek davranışı 28 günden sonra görülebilmektedir. Perlit içeriğine göre 2M NaOH içeren örneklerde belirgin bir mukavemet değişimi tespit edilmemiştir. 4-6M NaOH içeriğine sahip örneklerde %40 perlit içeriği en iyi geopolimerizasyonu sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında zemin iyileştirmesinde perlitin kullanılması ve farklı içeriklerinin sağlayacağı etkiler araştırılmıştır. Konu literatürde kısmen yeni ele alınmaya başladığı için yeterli kaynakçaya ulaşmak mümkün değildir. Konuyla ilgili öne çıkan kaynak Voottipruex vd. (2022) olarak belirlenmiştir. Voottipruex vd. (2022) çalışması incelediğinde perlit-zemin geopolimerleri için %40-%50 perlit kullanılmasını tavsiye etmiştir.



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 4.9. Sabit kür süresindeki perlit içeriğine göre mukavemet değişimleri

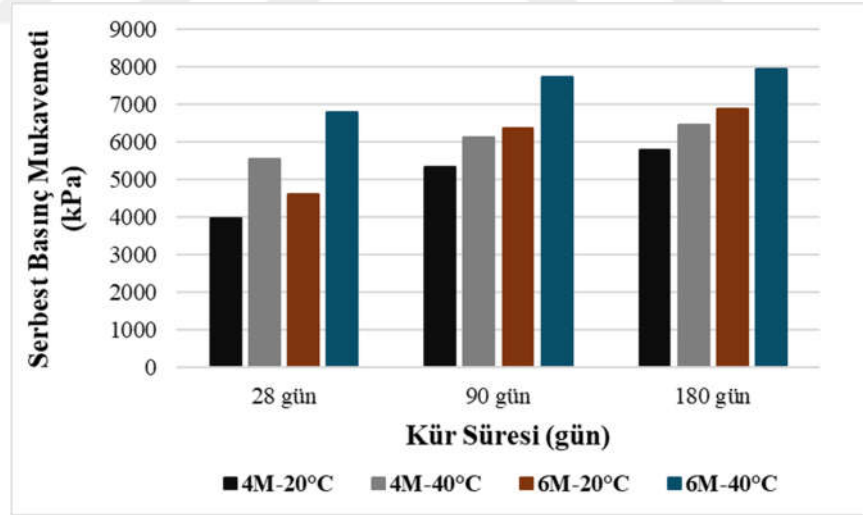
#### 4.2.2.4 Sıcaklık

Örneklere kür sıcaklığının artışı geopolimer bağlayıcının alkali aktivasyonunu hızlandırmaktadır. Şekil 4.10'da 20°C ve 40°C'de küre tabi tutulmuş, %60 kaolin+%40 perlit 4 ve 6M NaOH çözeltisi ile hazırlanan örneklerin karşılaştırması sunulmuştur. Şekil 4.10'daki her kür süresi için 40°C sıcaklığa maruz kalan örneklerin daha yüksek serbest basınç mukavemetine sahip oldukları görülmektedir. Örneğin 28 günlük 4M NaOH içeriğine sahip örneğin serbest basınç mukavemeti 5536 kPa ve 6M NaOH içeriğine sahip örneğin serbest basınç mukavemeti 6779 kPa olarak saptanmıştır.

Kür sıcaklığının 30°C ila 90°C aralığında artırılması basınç dayanımını arttırdığını yapılan çalışmalarında belirtmişlerdir (Swanepoel ve Strydom 2002; Hardjito vd., 2004). Kirschner ve Harmuth (2004), 75°C'de 4 saat boyunca kürlenmenin geopolimerizasyon sürecinin büyük bir kısmını tamamladığını ve malzemenin dayanım özelliklerinde iyi gelişimler olduğunu bildirmişlerdir. Wang

vd. (2004), 24°C’de kürlenmiş çimento fırın tozu-uçucu külünün daha düşük mukavemet verdiğini (28 ve 56 günde sırasıyla 6.9 ve 13.8 MPa) bildirmişlerdir. Ancak yüksek sıcaklıkta mukavemetin iki katına çıktığını saptamışlardır. Bakharev (2005) ısının mukavemet gelişimi için faydalı olduğunu ve yüksek sıcaklıkta 1 aylık küremeye kıyasla mukavemetin sadece 24 saatte gelişebileceğini saptamıştır. Xu vd. (2024) çalışmalarında, 20 ve 40°C’de kürlenmiş örneklerde 40°C’dekilerin daha yüksek serbest basınç mukavemetine sahip olduğunu gözlemlemiştir.

Rovnaník (2010) çalışmasında, geopolimer karışımının daha uzun süre kürlenmesi, sertleşmenin ilk 24 saatinde mukavemet gelişimini hızlandırdığı, 40°C’de 1 saat kürlenmiş geopolimer harcın 1 günlük basınç dayanımı sadece 13 MPa iken, bu küreme 4 saate uzatıldığında dayanım neredeyse üç kat artarak 37 MPa’ya yükseldiğini belirtmiştir. Dayanımların nihai değerlerine yaklaşık 7 günde ulaşıldığını ve bu değerlerin ortam sıcaklığında kürlenmiş referans numunede gözlemlenen değerlerle karşılaştırılabilir nitelikte olduğunu saptamıştır. Çalışma kapsamında yüksek sıcaklıkta daha iyi mukavemetlerin elde edildiği ve geopolimerizasyon da sıcaklığın büyük bir etken olduğu görülürken, Xu vd. (2024) de sıcaklık açısından benzer önerileri rapor etmiştir.

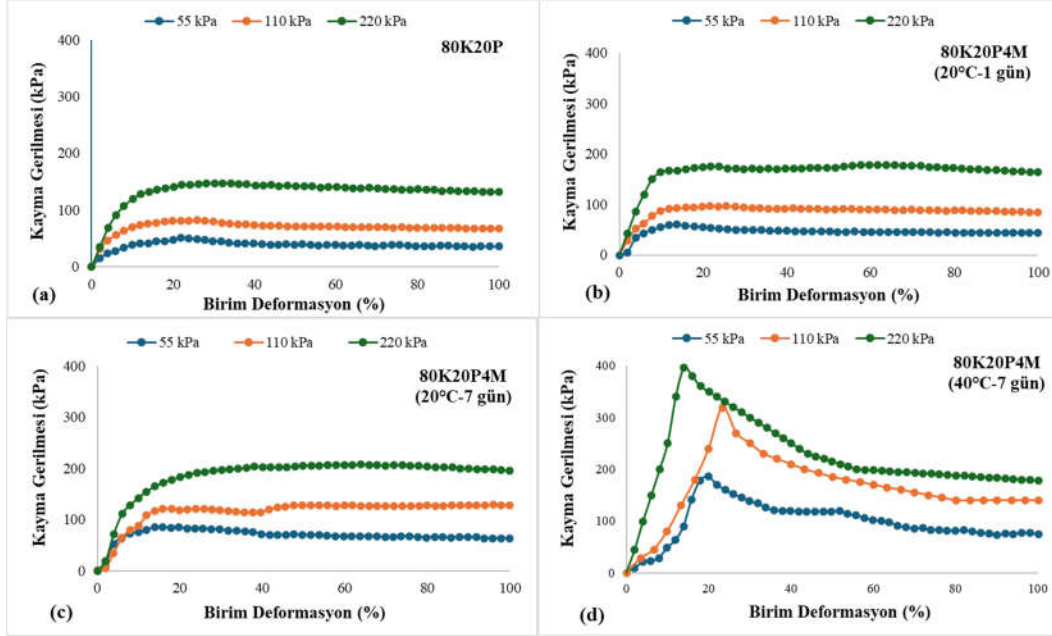


Şekil 4.10. Zemin örneklerinde sıcaklık etkisi

### 4.2.3 Direkt kesme kutusu deneyi

Perlit içeren zemin geopolimerlerinin 20 veya 40°C’de 1/ 3/ 7 gün küre tabii tutularak kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu örneklerde kullanılan NaOH konsantrasyonu 4M’dır. Perlit içeren zemin geopolimerlerinde, kür süresi ve kür sıcaklığı arttıkça hem kohezyonda hem de içsel sürtünme açısından artış

olmuştur. Eğim açısı, kohezyonsuz zeminlerden oluşan malzemelerin dökülmesiyle yavaşça oluşan bir yığının en büyük açısı olarak tanımlanır. Eğim açısını etkileyen faktörler arasında düşme yüksekliği, parçacık boyutu, dane şekli, kum ve tabaka arasındaki sürtünme ve dökme yöntemi yer almaktadır (Taylor, 1948).



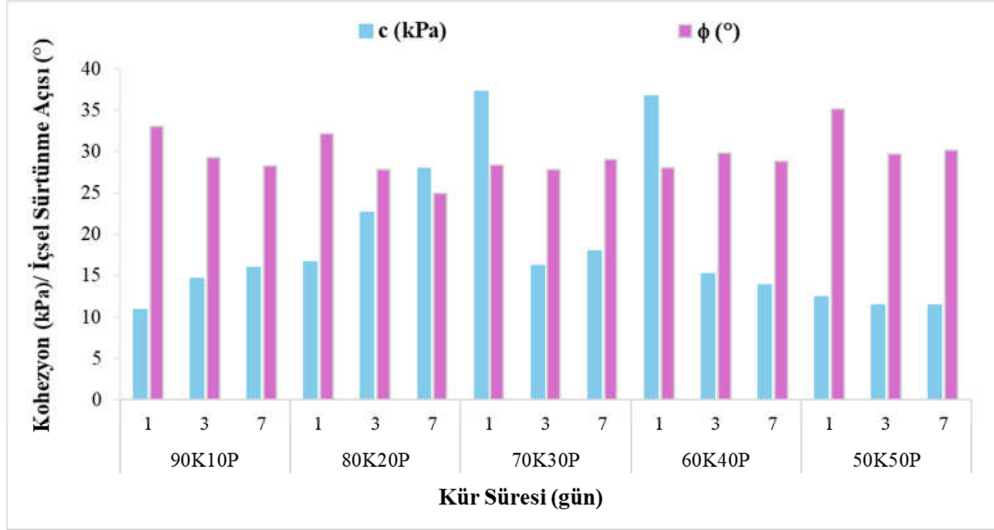
Şekil 4.11. a. 80K20P b. 20°C 1 günlük 80K20P4M c. 20°C 7 günlük 80K20P4M ve d. 40°C 7 günlük 80K20P4M zemin örneklerinin kayma gerilmesi-birim deformasyon ilişkisi

Bir örnek grubunu temsil etmek üzere %20 perlit içeren zemin (Şekil 4.11a) ve %20 perlit içeren zemin geopolimerlerinin (Şekil 4.11b, d) 55, 110 ve 220 kPa normal gerilmeler altında ölçülen kayma gerilmesi- birim deformasyon ilişkileri sunulmaktadır. Su ile hazırlanan örnekte meydana gelen kayma gerilmelerinin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Geopolimerlerle sağlanan iyileştirme etkisi ilk günden 7. güne kadar kayma mukavemetini arttırmaktadır. Kür sıcaklığı artışı ile de elde edilen kayma değerleri en yüksek hallerini almıştır. Şekil 4.11c ve d'de 220 kPa normal gerilme altında ölçülen en büyük kayma gerilmesinin 208 kPa'dan 396 kPa'a çıktığı kür sıcaklığı sayesinde zemin partiküllerinin agregalaşarak daha büyük zemin kümeleri oluşturduğu düşünülmekte ve dış yüklere karşı mukavemetinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir.

20°C'de küre tabii tutulan perlit içeren zemin geopolimer örneklerinde, kür süresi ile %10-20 perlit içeren örneklerde kohezyon artmıştır (Şekil 4.12). Bu artış

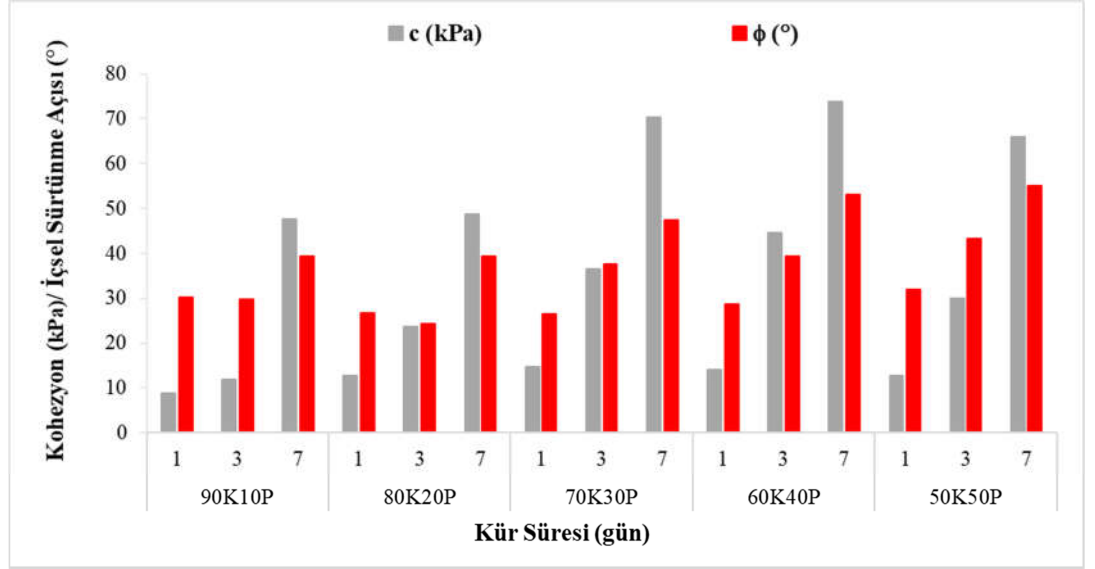
5-9 kPa seviyesindedir. Halbuki %30-40 perlit içeren örneklerde kür süresi ile kohezyon azalmıştır. Bu örneklerde 36-37 kPa olan ilk güne ait kohezyon değeri 7. günde 2-2.5 kat azalım göstermektedir. %50 perlit içeren örnekte kür süresi ile belirgin bir şekilde kohezyonun değişmediği görülmüştür. Bu örneklerde kil danelerinin etkisinden çok non-plastik özellikteki perlit içeriğinin etkin olduğu görülmektedir. İçsel sürtünme açısı değerleri ise %10, 20 ve 50 perlit içeren zeminlerde azalmıştır. Ancak %50 perlit içeren zeminde en yüksek içsel sürtünme açısı değerlerine ulaşılmış (30-35°) kendi içinde kür süresi ile bir miktar azalmıştır. Düşük ince içeriğine sahip kil-kum karışımlarının kesme mukavemeti büyük boyutlu partiküllerin özelliklerine bağlı olduğu ve bu karışımların boşluklarının kısmen ince danelerle dolu olduğu görülmüştür. İnce dane içeriği arttıkça, boşlukların tamamen dolduğu ve büyük boyutlu partiküllerin ince danelerle çevrelendiği belirtilmiştir (Kim vd., 2018). %30 ve 40 perlit içeren zeminlerde ise kür süresi ile belirgin bir değişim göstermemiştir. Bu durum hem kohezyon hem de içsel sürtünme açısı birlikte ele alındığında %30-40 perlit içeriğinin zemin davranışını değiştiren etkisini ortaya koymaktadır.

Alümino-silikat jellerin, zemin geopolimerlerinin kayma mukavemetini hem sürtünme mukavemeti hem de kohezyon dahil olmak üzere değiştirebilmesinin nedeni, kesme mukavemetinin temsil şeklinin, gerçek mukavemet oluşum mekanizmasından farklı olmasıdır. Sürtünme kuvveti ile tutunma arasında belirli bir iç bağlantı mevcuttur. Örneğin doymuş bir zeminin içsel sürtünme açısı teoride sıfırdır ancak zeminde bir sürtünme vardır; çakıllı zeminin her zaman kohezyona sahip olmadığı kabul edilir, ancak katı parçacıklar arasındaki temas ve kapilarite nedeniyle görünür bir kohezyona sahiptir. Bu nedenle kesme mukavemeti analizi için sürtünme dayanımı ve kohezyon birbirinden ayrılamaz. Bu çalışmada, NaOH bağlayıcısının geopolimerizasyonundan oluşan alümino-silikat jellerin bir yandan zeminin boşluklu yapısını doldurabildiği, zemin partiküllerini birbirine tutturabildiği ve zeminin iskelet yapısını stabilize edebildiği, böylece stabilizasyon öncesi bağımsız durumda bulunan kil partiküllerini, agregaları ve floküle parçacıkları birleştirerek daha üstün özellikli büyük daneler haline getirmektedir. Böylece kil partikülleri ilk hallerindeki göreceli hareket yeteneklerini kaybederek daha rijit bir yapıya ulaşır ve yükleme altında kaymaya daha kolay karşı koyar. Bu nedenle, geopolimerle iyileştirilmiş zeminin kayma mukavemeti bir bütün olarak artmaktadır, özellikle kohezyonun en önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. 20°C küre bırakılan zemin örneklerinin kesme kutusu parametreleri

40°C'de küre bırakılan perlit zemin geopolimer örneklerinin kür süresi arttıkça kohezyonunda ve içsel sürtünme açısında artış olduğu görülmüştür (Şekil 4.13). Kür sıcaklığının yükselmesi örneklerin kür süresine bağlı kayma mukavemeti davranışlarını değiştirmektedir. Genel olarak içsel sürtünme açılarının 20°C'de küre tabi tutulan örneklerden daha yüksek olduğu görülebilir. %40 perlit içeren zemin geopolimerleri kohezyon açısından en yüksek değerleri vermektedir. Perlit içeriği arttıkça %40 perlit içeriğine kadar kohezyon sürekli artmıştır. Sadece %50 perlit içeren zeminin kohezyon değerleri %20 ile %30 perlit içeriği arasında yer almakta olup perlitin yine non-plastik etkisi bu bağlamda gözlenmektedir. İçsel sürtünme açısı dikkate alındığında %10-20 perlit içeren zeminler birbirine yakınken %30-%50 perlit içeren zeminler bu grubun değer olarak daha üstünde ve birbirine yakın sürtünme açıları (53-55°) vermektedir. Kesme mukavemeti özellikleri açısından, geopolimer stabilize zeminler için içsel sürtünme açılarının 50°'den yüksek olduğu ve zeminin geopolimer ile karıştırılmasının, killerin başlangıç özelliklerini yarı aşırı konsolide durumdan önemli ölçüde aşırı konsolide duruma getirdiğini ve kesme mukavemeti parametrelerini arttırdığını göstermişlerdir (Rios vd., 2019; Al-Rkaby 2019; Abdullah vd., 2019; Odeh ve Al-Rkaby 2022). Geopolimer ile stabilize edilen zeminin mikroyapısı, kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) ve kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) yoğun yapılarının artan mukavemetin nedeni olduğunu göstermiştir (Teerawattanasuk ve Voottipruex 2019). Sıcaklığın değişimi, bazı ince danelerin geopolimer jel oluşumu yoluyla kohezyonu arttırabilirken, bazı agregalaşmış partiküllerin ise birbirine kenetlenme mekanizmaları nedeniyle içsel sürtünme açısına katkıda bulunabilir.



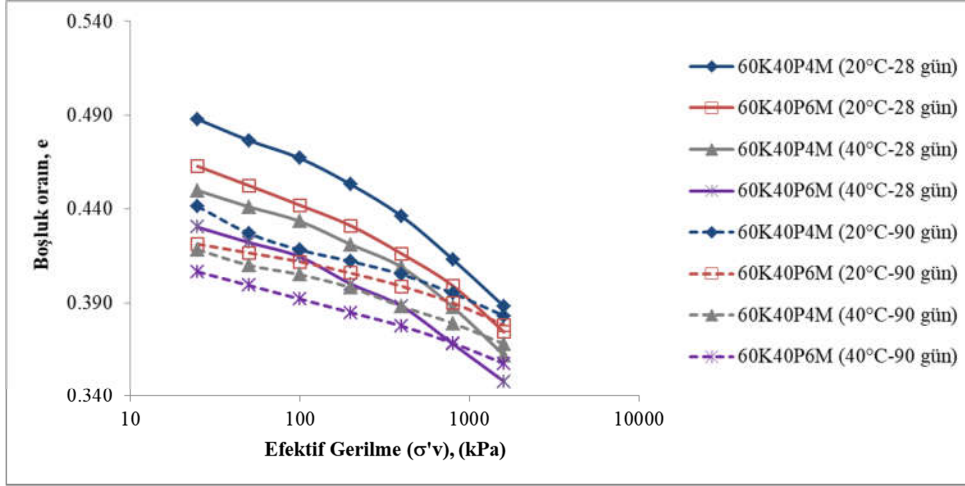
Şekil 4.13. 40°C küre bırakılan zemin örneklerinin kesme kutusu parametreleri

#### 4.2.4 Konsolidasyon deneyi

Tez çalışmasında, seçili örneklerin konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Toplamda 16 adet konsolidasyon deneyi tamamlanmıştır. Serbest basınç deneyleri ile en yüksek mukavemeti veren %40 perlit içeren zeminler odak grup olarak seçilmiştir. 4 veya 6M NaOH içeren zemin geopolimerleri ödometre hücresi boyutunda sıkıştırılarak hazırlandıktan sonra 28 veya 90 gün küre bırakılmıştır. Bu sayede örneklerin uzun dönemdeki konsolidasyon davranışlarının incelenmesi planlanmıştır.

Şekil 4.14'te %40 perlit ve 4-6M NaOH içeren zemin geopolimerlerinin 28-90 gün küre süresi sonrasında elde edilen boşluk oranı – efektif gerilme eğrileri sunulmuştur. Başlangıç boşluk oranı en yüksek olan zemin geopolimeri 60K40P4M(20°C-28 gün) örneğine ait olup, 0.491'dir. Örneklerin standart Proktor sıklığında hazırlanmış olması sebebiyle  $e_0$  değerleri doğal zeminlere nispeten küçüktür. Sabit perlit içeriğinde (%40P) bir inceleme yapıldığında küre süresindeki artışın, NaOH molaritesindeki artışın ve sıcaklık artışının geopolimer örnekler üzerinde etkin olduğu görülmektedir. Tüm bu etkenler zemin örneğinin yapacağı oturma miktarlarını küçültmüştür. 20°C'de küre tabi tutulan örneklerin konsolidasyon eğrileri 40°C'de küre tabi tutulan örneklerden daha yukarıda bulunmaktadır. 90 günlük örneklerin konsolidasyon eğrileri, 28 günlük örneklere göre daha doğrusaldır. 6M NaOH ile hazırlanan zemin geopolimerlerinin oturma eğilimleri daha azdır. Salimi ve Ghorbani (2020), zemin örneklerini 28 gün küre süresi ve 20-45°C küre sıcaklığına tabi tutmuşlardır. Killi zemine kimyasal katkı

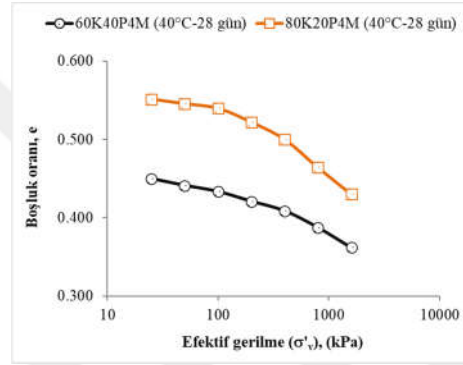
maddelerinin eklenmesinin sıkışma indisinde bir düşüşün olduğu ve bu değişikliklerin daha yüksek sıcaklığa tabi tutulan zemin örneklerinde daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Bu tez çalışmasında da yüksek sıcaklıklarda sıkışma indisinin daha düşük olması, Salimi ve Ghorbani (2020)'nin yaptıkları çalışma ile paralellik olduğu görülmüştür. Bu bölümdeki tüm örneklerin sıkışma parametresi,  $C_c$ , bölüm sonunda yer alan Çizelge 4.5'te sunulmuştur.



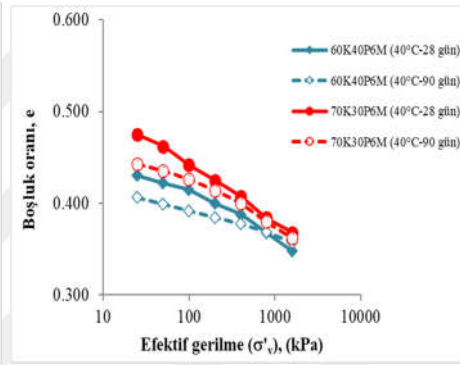
Şekil 4.14. %40 perlit zemin geopolimerlerinin 28-90 gün kür süresine göre boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi

Şekil 4.15a'da perlit etkisini incelemek mümkün olmaktadır. %20 perlit içeren zemin geopolimerinin başlangıç boşluk oranı 0.565, %40 perlit içeren zemin geopolimerininki ise 0.461'dir. %20 perlit içeren zemin geopolimerinde boşlukların daha fazla olması sıkışabilme yeteneğini arttırmaktadır. %40 perlit içeren zemin geopolimeri ise dış yüklere karşı koyabilmekte üstün gelmektedir. 20-40°C kür sıcaklığı ve 28 gün kür süresine tabi tutulan 60K40P4M perlit zemin geopolimer örneğinin sıkışma indisi 0.072 iken 60K40P4M perlit zemin geopolimer örneğinin sıkışma indisi 0.065 olduğu görülmüştür. Bu da kür sıcaklığı ile zemin geopolimerlerinin daha rijit bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.15b'de 6M NaOH ile hazırlanan çeşitli örnekler gösterilmiştir. 90 günlük örneklerde de perlit içeriğinin artması konsolidasyon eğrilerinin daha doğrusal bir hal almasını sağlamıştır. 40°C kür sıcaklığı ve 6M NaOH ile hazırlanan %30 perlit içeriğine sahip zemin geopolimerinin 28 gün sonunda elde edilen sıkışma indisi 0.063 iken %40 perlit içeriğine sahip zemin geopolimerinin sıkışma indisi 0.058 olarak bulunmuştur. Bu da aynı kür sıcaklığına sahip zemin geopolimerlerinde perlit içeriği arttıkça sıkışma indisinde

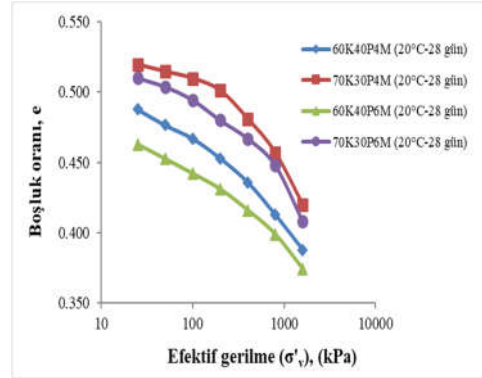
azalma olduğu ve kil danelerindeki boşlukların perlit ile dolarak daha dayanıklı bir hale geldiği görülmüştür. Şekil 4.15c ve d'de NaOH molaritesinin etkisi görülmektedir. 28 ve 90 gün kür süresine tabi tutulan 4M NaOH konsantrasyonundaki zeminlerin %30 ve %40 perlit içeriklerinde her koşulda daha yüksek başlangıç boşluk oranına sahip olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.15e'de ise %50 perlit ilavesinin zemin geopolimerizasyonunda fazla geldiğinin bir göstergesidir. Genel olarak perlit miktarı arttıkça sıkışmanın azaldığı görülmekle beraber, bu oranın %40'a kadar sıkışmayı azaltıcı etkisinin olduğu, ancak bu değerden fazla perlit ilavesinin zeminin likit aktivatör ile birlikte oluşturacağı geopolimer bağlarının yeterince sağlanamaması ile sonuçlandığı bu sebeple konsolidasyon eğrisinin %40 perlit içeren örneğin üzerine çıktığı görülmektedir.



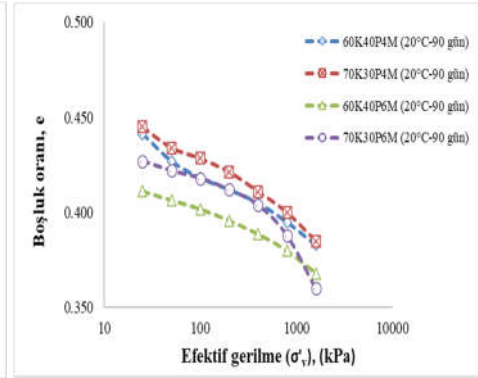
(a)



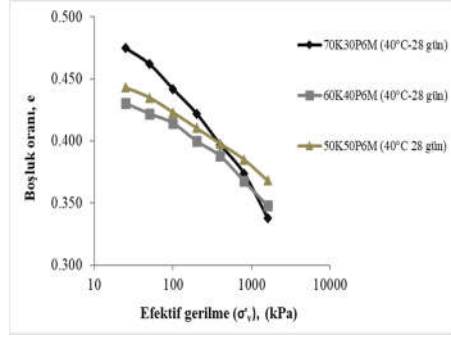
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.15. Farklı perlit ve molarite içeriğindeki zemin geopolimerlerinin boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi

Çizelge 4.5. 20-40°C'de farklı perlit içeriğinde geopolimer zeminlerin sıkışması indisi

Perlit (%)	20°C				40°C			
	4M NaOH	4M NaOH	6M NaOH	6M NaOH	4M NaOH	4M NaOH	6M NaOH	6M NaOH
	28 Gün	90 Gün	28 Gün	90 Gün	28 Gün	90 Gün	28 Gün	90 Gün
20					0.102			
30	0.090	0.040	0.080	0.058			0.063	0.058
40	0.072	0.032	0.063	0.031	0.065	0.033	0.058	0.030
50							0.047	

Sonuçlar, kil zemine likit aktivatör eklenmesinin, sıkışma indisinde bir azalmaya eşlik ettiğini, böylece bu değişikliklerin, daha yüksek sıcaklıkta işlem görmüş numunelerde daha fazla olduğunu göstermiştir. Ayrıca likit aktivatör varlığının ve miktarının numunelerin sıkışabilirliği üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu açıktır. Numunelerin sıkışma indisinin azalması katyon değişimi ve jel oluşumlarına bağlanabilir.

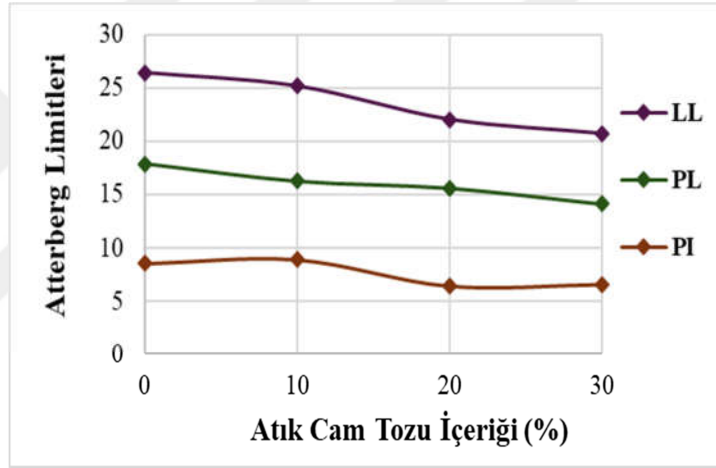
Perlit içeren zemin geopolimerlerinde, prekonsolidasyon basıncının kür süresi ile arttığı tespit edilmiştir. %40 perlit içeriğine sahip, 20°C kür sıcaklığı ve 4M NaOH konsantrasyonlarındaki 28-90 günlük perlit zemin geopolimerlerinin prekonsolidasyon basıncı sırasıyla 300 ve 800 kPa olarak bulunmuştur. Ayrıca, likit aktivatör molaritesi artışı da prekonsolidasyon basıncını artırmıştır. %30 perlit içeriği, 28 gün kür süresine ve 20°C kür sıcaklığındaki zemin geopolimerlerinin 4M'dan 6M'a artması ile prekonsolidasyon basıncı sırasıyla 250 kPa'dan 600 kPa'ya ulaştığı tespit edilmiştir. Bu davranış, N-A-S-H jeli oluşturan ve mukavemetin artmasına neden olan kimyasal reaksiyonlara

atfedilebilir. Bu, stabilize edilmiş zeminin, daha yüksek molarite içeriklerinde fazla oturma meydana gelmeden artan basıncı tolere edebildiği anlamına gelir.

### 4.3 Atık Cam Tozu İçeren Zeminler

#### 4.3.1 Atterberg limitleri

Zemine kuru zemin ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50'si kadar atık cam tozu ilave edilmiştir. Atık cam tozu içeren zeminlerin likit limit (LL), plastik limit (PL) ve plastisite indisi (PI) değişimi Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Eklenen cam tozu ile likit ve plastik limitte azalma olduğu görülmüştür. Likit limit ve plastik limitte azalma olduğu için plastisite indisi de azalmıştır.



Şekil 4.16. Zeminin farklı atık cam tozu oranlarına göre Atterberg limitleri

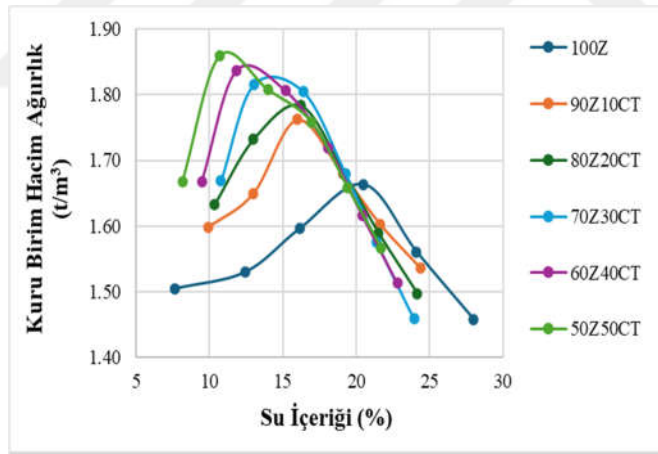
Plastik limit su ile hazırlanan örneklerde cam tozu bulunmadığı durumda 17.87 iken %30 cam tozu içeren örneklerde 14.15'e düşmüştür. İbrahim vd. (2021) yüksek plastisiteli killere atık cam tozu ekleyerek yaptıkları çalışmada da Atterberg limitlerin azaldığını belirtmişlerdir. Ashiq vd. (2022) likit limitte görülen azalmanın cam tozu içinde fazla bulunan ve non-plastik özellik gösteren silikaya bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Su ile gerçekleştirilen Atterberg limitleri deneylerinde zemin içerisine eklenen atık cam tozu ilavesi arttıkça Atterberg limitlerinin düştüğü görülmüştür. Atık cam tozu içeriği %30'u aştıktan sonra plastik limit deneyinin yapılması mümkün olmamış, zemin tamamen non-plastik davranış sergilemiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Atık cam tozu içeren zeminlerde non-plastik davranışın gözlemlenmesi

### 4.3.2 Kompaksiyon parametreleri

Şekil 4.18'de zeminin ve %10, 20, 30, 40 ve 50 atık cam tozu içeren zemin örneklerinin optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları gösterilmiştir. Zemin içerisine atık cam tozu ilavesiyle, zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artış görülürken su içeriğinde azalış gerçekleşmiştir. Kompaksiyon grafiklerinin eğilimi sol yukarı doğrudur.



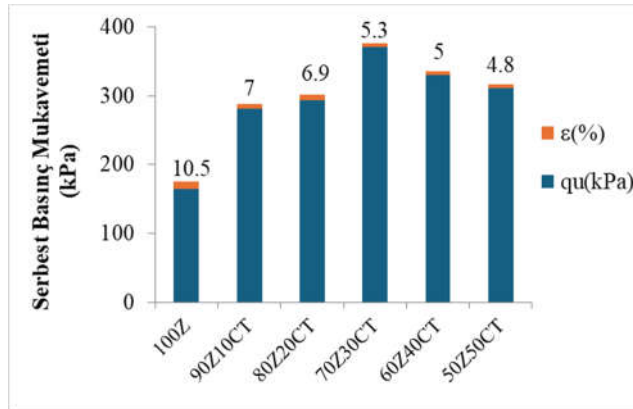
Şekil 4.18. Atık cam tozu içeren zeminlerin kompaksiyon eğrileri

Su ile hazırlanan 100Z örneklerinde optimum su içeriği %20 olarak bulunmuştur. 90Z10CT örneklerinde ise %16 olarak bulunmuştur. Bundan sonra cam tozu artışı ile optimum su içeriği azalmaya devam etmiştir. 100Z örneklerinde en düşük kuru birim hacim ağırlık yine su ile kompakte edilen örneklerde gözlemlenmiş ve  $1.66 \text{ t/m}^3$  olarak bulunmuştur. 90Z10CT örneklerinde ise  $1.76 \text{ t/m}^3$  olarak saptanmıştır. Su içeren örneklerin kompaksiyon karakteristiklerinde en belirgin değişimin 100Z ile 90Z10CT arasında olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile %10 atık cam tozu katkısının, atık cam tozu

kullanılmayan zeminden daha büyük özgül ağırlığa sahip olması nedeniyle maksimum kuru birim hacim ağırlıkları arttırırken atık cam tozunun rijit kürecikler şeklinde bulunması nedeniyle zeminin su tutma kapasitesini azaltarak optimum su içeriğini düşürmüştür. Bununla birlikte likit aktivatör kullanılan zeminlerde dahil olmak üzere 100Z'den 50Z50CT'ye doğru tüm numunelerin kompaksiyon eğrilerinin sol yukarı yönde hareket ettikleri görülmektedir. Cabalar ve Mustafa (2017), çalışmalarında kil zemin içerisine farklı oranlarda kum eklemiş ve maksimum kuru birim hacim ağırlığın artarken optimum su içeriğinde azalma olduğunu saptamışlardır. Yapılan çalışmada kompaksiyon grafiğinin sol üst kısma hareket olduğunu göstermişlerdir. Bu tez çalışmasında literatür ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

### 4.3.3 Serbest basınç mukavemeti

Zemin içine atık cam tozu katılması serbest basınç mukavemetini %30 atık cam tozu içeriğine kadar arttırmıştır (Şekil 4.19). Daha fazla atık cam tozu eklenmesi ise mukavemeti azaltıcı bir etki oluşturmuştur. Çünkü kil partikülleri arasında dolgu görevi görecek cam tozunun dışında zemin ortamında fazladan cam tozu mevcuttur. Zeminin birim deformasyon davranışı ise cam tozu ilavesi ile giderek artan bir hal almıştır. Atık cam tozu ilavesi zemini daha gevrek bir hale getirmektedir. Bunda atık cam tozunun plastik olmayan doğasının bir etkisi söz konusudur. Artan atık cam tozu içeriğiyle, serbest basınç mukavemetindeki azalmanın sebebi atık cam tozunun kohezyonsuz yapısı nedeniyle zemin karışımının kohezyonundaki azalmanın olmasındandır.



Şekil 4.19. Atık cam tozu ilavesinin serbest basınç mukavemeti-birim deformasyon üzerine etkileri

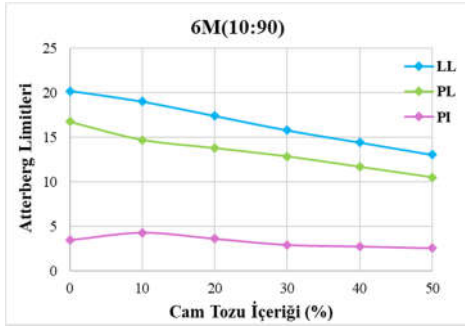
Canakci vd. (2018), killi kum, kötü derecelenmiş kumlu kil ve kötü derecelenmiş kum ile çalışmışlardır. Zemin örnekleri içerisine farklı oranlarda kil ve cam tozu ekleyip 7, 14 ve 28 gün küre tabi tutmalarına rağmen serbest basınç

mukavemetinde azalma olduğunu saptamışlardır. Blayi vd. (2020), çalışmalarında %15 atık cam tozu içeriğinden sonra zeminin mukavemetinde azalım olduğunu saptamışlardır. Ibrahim vd. (2021), yüksek plastisiteli kil içerisine farklı cam tozu eklemiştir. %26-28 cam tozu içeriğine kadar serbest basınç mukavemetinde artış olurken, cam tozu eklendikçe mukavemette azalım olduğunu belirtmişlerdir. Demir ve Cabalar (2024), bentonit zemin içerisine ince ve kaba atık cam tozu ile çalışmışlardır. İnce ve kaba atık cam tozu içeriğinde zemine %30 atık cam tozu eklendiğinde serbest basınç mukavemetinde artış görülürken, atık cam tozu eklendikçe mukavemette azalma olduğunu belirtmişlerdir. Bu tez çalışmasında %30 atık cam tozu içeriğinden sonra mukavemette azalım olduğu, yapılan literatür çalışmalarında da atık cam tozu içeriğinin %15 ila %30 arasında arttığı bu orandan sonra azalım olduğu görülmüştür.

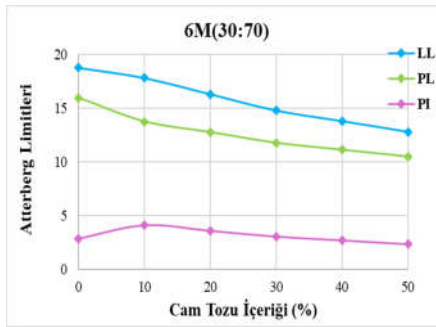
#### 4.4 Atık Cam Tozu Zemin Geopolimerleri

##### 4.4.1 Atterberg limitleri

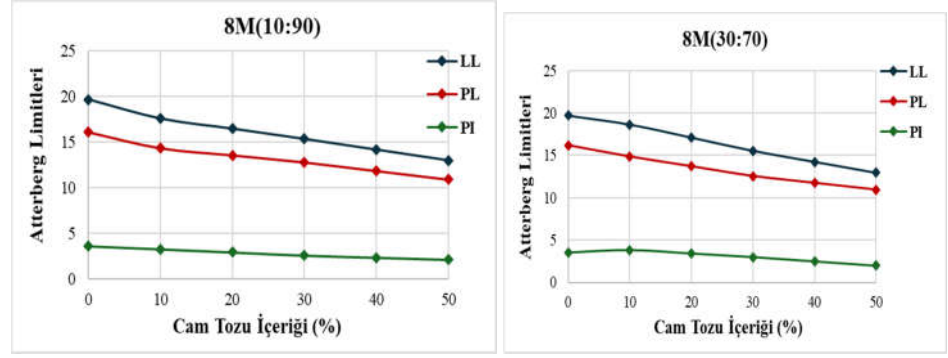
Zemine kuru zemin ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50'si kadar cam tozu ilave edilmiştir. Atık cam tozu zemin geopolimerleri, likit limit (LL), plastik limit (PL) ve plastisite indisi (PI) değişimi Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Eklenen cam tozu ile likit ve plastik limitte azalma olduğu her grup için görülmüştür. Likit limit ve plastik limitte azalma olduğu için plastisite indisi de azalmıştır.



(a)



(b)



(c)

(d)

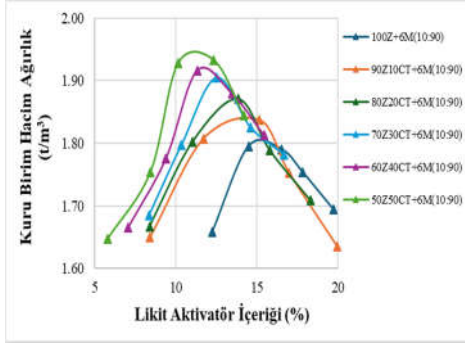
Şekil 4.20. a. 6M %10 NaOH: %90 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> b. 6M %30 NaOH:%70 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> c. 8M %10 NaOH:%90 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> d. 8M %30 NaOH:%70 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içeren örneklerin Atterberg limitleri

100Z zemin örneğinin likit limit değeri 26.42 olup, atık cam tozu içermeyen 6M(10:90) ve 6M(30:70) zemin örneklerinin likit limit değeri sırasıyla 20.17 ve 18.78 olarak bulunmuştur. Sabit molaritede örnek içindeki NaOH miktarının artması ile LL az miktarda azalış göstermiştir. Atık cam tozu içeriğinin en yüksek değeri olan %50 atık cam tozu zemin geopolimerlerinde en düşük likit limit değerleri gözlenmiştir.

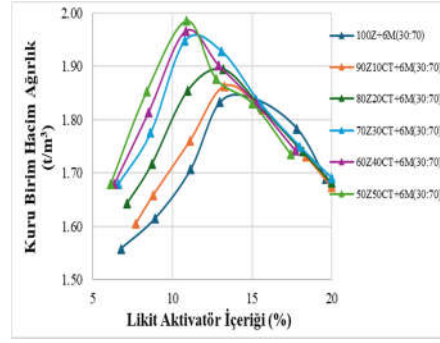
Likit aktivatör içeren örneklerde birbirine yakın plastik limit değerleri saptanmıştır. Likit aktivatör kullanmanın işlenebilirliği arttırdığı gözlemlenmiştir. Plastisite indisi ise 3'ten 2'ye azalmıştır. Tajaddini vd. (2023), düşük plastisiteli kil zemin içine toplamda %5 olacak şekilde bakır cürufu ve atık cam tozu eklemiş, bu örnekleri 5M NaOH içeren likit aktivatör ile stabilize etmiştir. Örneklerin LL, PL ve PI değerlerinin bu tez çalışmasında gözlenen duruma paralel olarak azaldığını raporlamıştır.

#### 4.4.2 Kompaksiyon deneyi

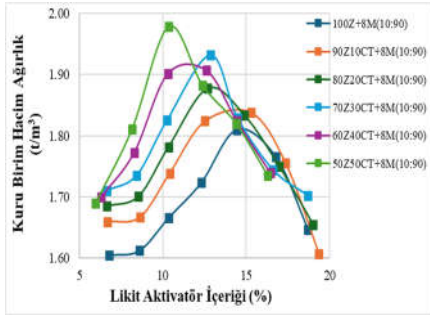
Şekil 4.21'de zeminin ve %10, 20, 30, 40 ve 50 atık cam tozu zemin geopolimer örneklerinin optimum likit aktivatör içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları gösterilmiştir. Zeminlerde atık cam tozu ilavesiyle zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artış görülürken, likit aktivatör içeriğinde azalış olmuştur. Maksimum kuru birim hacim ağırlık tüm gruplarda %50 cam tozu içeriğinde görülmüştür.



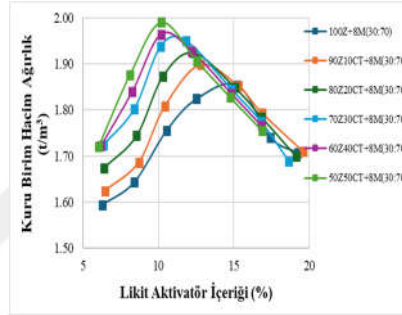
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.21. a. 6M %10 NaOH: %90 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> b. 6M %30 NaOH: %70 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> c. 8M %10 NaOH: %90 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> d. 8M %30 NaOH: %70 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içeren örneklerin kompaksiyon eğrileri

Bununla birlikte likit aktivatör kullanılan zeminlerde dahil olmak üzere 100Z'den 50Z50CT'ye doğru tüm numunelerin kompaksiyon eğrilerinin sol yukarı yönde hareket ettikleri görülmektedir. Dolayısıyla zemin içinde su veya likit aktivatör fark etmeksizin kompaksiyonun davranışının tamamen zemin-atık cam tozu tarafından kontrol edildiği kanıtlanmıştır. Likit aktivatör içeren zeminlerin avantajı kuru birim hacim ağırlıkların su ile hazırlanan zemine göre daha yüksek çıkması dolayısıyla daha rijit yapılar oluşturmasıdır. Serbest basınç mukavemeti deneylerinden önce tespit edilen yüksek kuru birim hacim ağırlıkları mukavemetin artacağına işaret etmektedir.

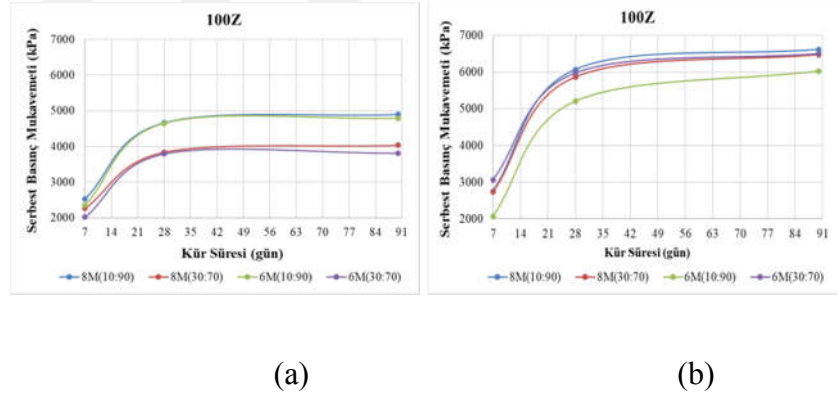
Likit aktivatör olarak 6M %10 NaOH: %90Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 6M %30 NaOH: %70 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 8M %10 NaOH:%90 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 8M %30 NaOH:%70 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılan örneklerde 50Z50CT örneklerinde maksimum kuru birim hacim ağırlık sırasıyla 1.94, 1.98, 1.97 ve 1.99 t/m<sup>3</sup> olarak saptanmıştır.

Tajaddini vd. (2023), 5M NaOH içeren cam tozu katkılı örneklerde de doğal zemine kıyasla cam tozu içeriği arttıkça optimum su içeriğinin azaldığını ve

maksimum kuru birim hacim ağırlığının arttığını göstermiştir. Cam tozunda bulunan en baskın bileşik  $\text{SiO}_2$ 'dir ve  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bağlarının stabilize edilmiş kilin mukavemetini arttırmış olması mümkün olabilir (Fauzi vd., 2016; Mujtaba vd., 2020). Çalışma için seçilen 6M NaOH içeriğinin yeterli gelmiş olduğu ve literatür ile uyum sağlandığı görülmüştür.

#### 4.4.3 Serbest basınç mukavemeti

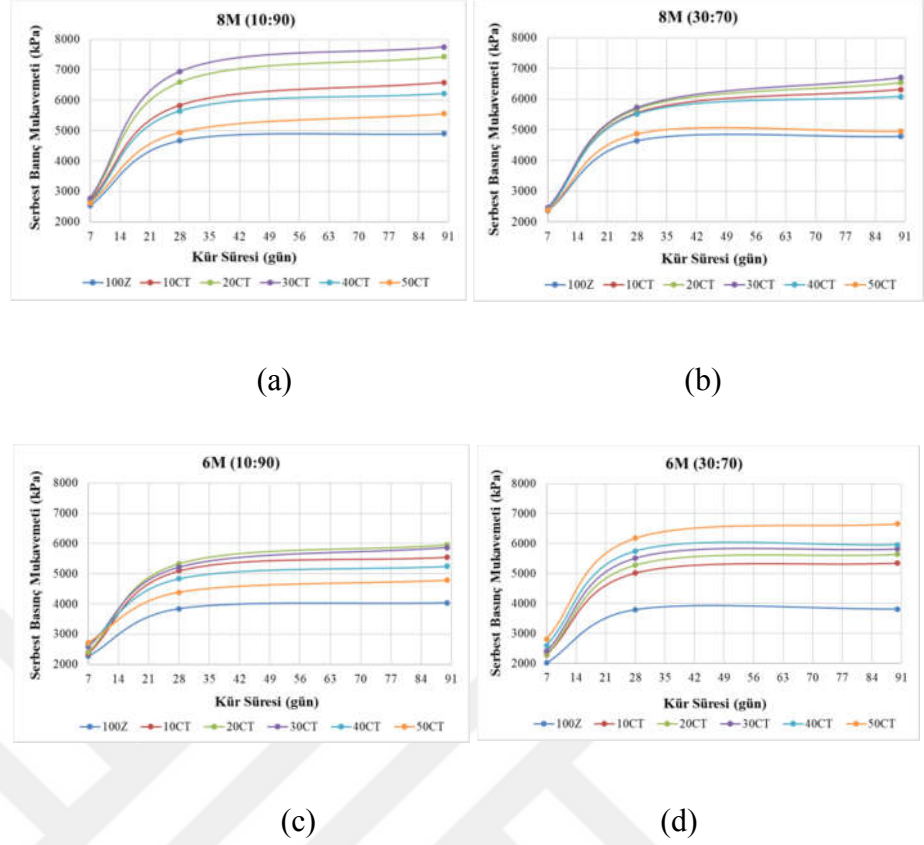
100Z örneğinin farklı oranlarda likit aktivatör etkisini görebilmek için  $20^\circ\text{C}$ - $40^\circ\text{C}$  kür sıcaklığı ve 7/28/90 gün kür süresine tabi tutulmuştur. Zemin içerisine eklenen likit aktivatörlerin  $20^\circ\text{C}$ 'de (oda sıcaklığı) 8M(10:90)-6M(10:90) ve 8M(30:70)-6M(30:70) içeriklerde kür süresine bağlı olarak yakın mukavemet değerleri verildiği görülmüştür (Şekil 4.22a). Aynı zemin örneğinin  $40^\circ\text{C}$ 'de (yüksek sıcaklık) 8M(10:90), 8M(30:70) ve 6M(30:70) likit aktivatör içeriklerinde yakın mukavemet değerleri verirken, 6M(10:90) likit aktivatörü kullanıldığında zeminin mukavemet değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 4.22b). Her iki kür sıcaklığı göz önüne alındığında 100Z örneklerinde en yüksek mukavemet değerleri 8M(10:90) likit aktivatör içeriğinde elde edilmiştir.



Şekil 4.22. Farklı likit aktivatörlerle hazırlanan a.  $20^\circ\text{C}$ 'de b.  $40^\circ\text{C}$ 'de küre tabi tutulan 100Z örneğinin kür süresi-serbest basınç mukavemeti ilişkisi

Örneklerin 7-28 gün kür süresinde mukavemetlerinin hızla artma eğiliminde olduğu ve 28-90 gün aralığında ise mukavemetlerindeki artışın devam ettiği ancak artış miktarının küçüldüğü görülmektedir.  $20^\circ\text{C}$ 'de küre bırakılan örneklerde mukavemet artışlarının belirli bir zemin: atık cam tozu oranını takip ettiği görülmektedir. Fakat bu oran örneklerdeki  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ : NaOH molaritelerine göre de farklılık gösterebilmektedir. 8M(10:90) ve 8M(30:70) likit aktivatör içeren atık cam tozu zemin geopolimerlerinde sıralama 70:30, 80:20, 90:10, 60:40 ve 50:50

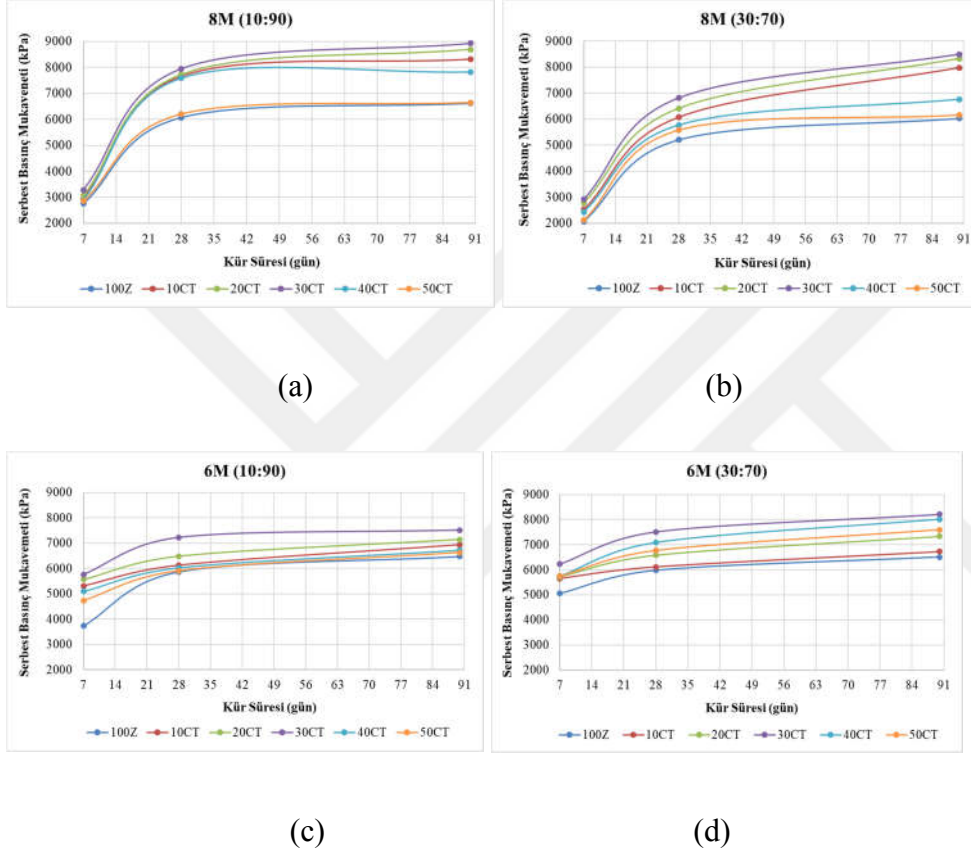
şeklindedir. 90 gün kür süresine tabi tutulan %70 zemin-%30 atık cam tozu zemin geopolimerin 8M(10:90) ve 8M(30:70) likit aktivatör içeriklerinde en yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri sırasıyla 7749 kPa ve 6707 kPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.23a, b). 8M(30:70) likit aktivatör içeriğinde %50 zemin+%50 atık cam tozu örneği 100Z örneğine benzer mukavemet verdiği görülmüştür (Şekil 4.23b). Atık cam tozu içeriğinin %30'dan fazla olduğu deney örneklerinde mukavemetin azaldığı görülmektedir. 6M(10:90) likit aktivatör içeren atık cam tozu zemin geopolimerlerinde sıralama 80:20, 70:30, 90:10, 60:40, 50:50 ve en yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %80 zemin-%20 atık cam tozu zemin geopolimerde 5949 kPa bulunurken, 6M(30:70) likit aktivatör içeren atık cam tozu zemin geopolimerlerin de en yüksek serbest basınç mukavemet değeri %50 zemin-%50 atık cam tozu zemin geopolimerlerin de 6662 kPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.23c, d). Bilondi vd. (2018b) zeminlerde belirli bir miktara kadar cam tozunun geopolimer jelleri güçlendirici bir etki sağladığını, optimum cam tozu miktarı aşıldığında negatif etkileri ortaya çıkabileceğini ve fazlaca bulunan cam tozu likit aktivatör ve partiküller arasında gerçekleşecek kimyasal reaksiyonları baskılayabilmektedir. Bu durumda likit aktivatör yeterince silika ve alüminayı cam tozundan çözecek güçte de olamaz, bu sebeplerle zeminin daha yüksek cam tozu içeriklerinde mukavemeti azalabileceğini belirtmişlerdir. Benzer sonuçlar Bilondi vd. (2018b) çalışması ile aynı olduğu görülmüştür.



Şekil 4.23. Farklı atık cam tozu içeriklerinde hazırlanan ve 20°C’de küre tabi tutulan a. 8M(10:90) likit aktivatörü b. 8M(30:70) likit aktivatörü i c. 6M(10:90) likit aktivatörü d. 6M(30:70) likit aktivatörü içeren örneklerin kür süresi-serbest basınç mukavemeti ilişkisi

Yüksek sıcaklıkta en yüksek mukavemetin %30 atık cam tozu içeriğinde elde edildiği görülmüştür. 8M(10:90) ve 8M(30:70) likit aktivatör içeren atık cam tozu zemin geopolimer de sıralama 70:30, 80:20, 90:10, 60:40 ve 50:50 şeklindedir. 8M(10:90) ve 8M(30:70) likit aktivatör içeriklerinde en yüksek serbest basınç mukavemet değerleri %70 zemin-%30 atık cam tozu zemin geopolimerler de sırasıyla 8923 kPa ve 8498 kPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.24a, b). Kür sıcaklığı geopolimerizasyon ve mukavemet kazanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, düşük kür sıcaklıklarında, geopolimer jellerinin belirgin mukavemete ulaşabilmesi için daha uzun iyileştirme süreleri gereklidir. Bu sebeple, daha düşük poroziteye sahip yüksek kaliteli geopolimer zeminler oluşturulabilmektedir (Yaghoubi vd., 2019). Bu çalışmada yüksek sıcaklıkta (40°C) en yüksek mukavemet %30 atık cam tozu içeriğinde elde edildiği görülmüştür. Bu da yapılan çalışma ile literatür arasında benzerlik olduğunu göstermiştir. 8M(30:70) likit aktivatör içeriğinde 70:30, 80:20 ve 90:10 yakın mukavemet değerleri verirken 60:40 daha düşük değerde kaldığı görülebilmektedir. 6M(10:90) likit aktivatör içeren atık cam tozu geopolimer zemin örneklerinde atık cam tozu içeriği 10, 20, 40 ve 50% olduğunda

mukavemet değerleri birbirine yakın olurken %30 atık cam tozu içeriğinde en yüksek serbest basınç mukavemet değeri 7511 kPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.24c). 6M(30:70) likit aktivatör içeren atık cam tozu zemin geopolimerlerin de %30-%40 atık cam tozu içeriği ile %20-%50 atık cam içeriğine ait mukavemet değerleri birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu grupta en yüksek serbest basınç mukavemet değeri 90 gün kür süresinde %70 zemin-%30 atık cam tozu zemin geopolimer örneğinde 8209 kPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.24d).



Şekil 4.24. Farklı atık cam tozu içeriklerinde hazırlanan ve 40°C’de küre tabii tutulan a. 8M(10:90) likit aktivatörü b. 8M(30:70) likit aktivatörü i c. 6M(10:90) likit aktivatörü d. 6M(30:70) likit aktivatörü içeren örneklerin kür süresi-serbest basınç mukavemeti

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada perlit ve atık cam tozu kullanılarak kaolin kilinin zemin özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Kaolin kili ve zemin geopolimerleri üzerinde Atterberg limitleri deneyleri, kompaksiyon deneyleri, serbest basınç mukavemeti deneyleri, direkt kesme kutusu deneyleri ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylere göre elde edilen sonuçlar aşağıda bir özet halinde sunulmaktadır:

### 5.1 Atterberg limitleri

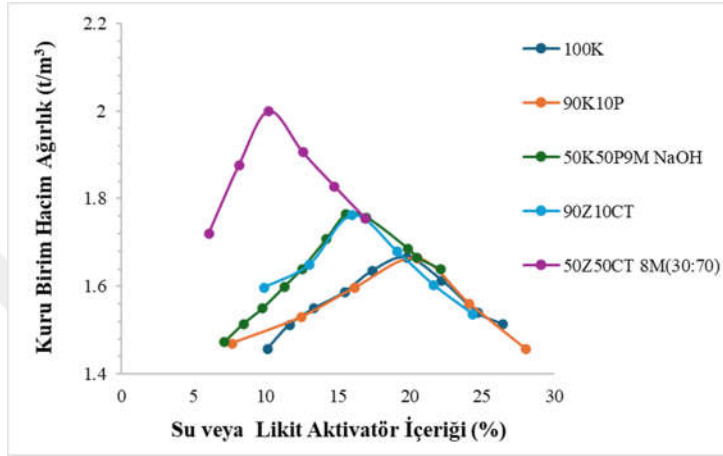
- Kaolin kilinin likit limit ve plastik limiti sırasıyla 32 ve 20 olarak bulunmuştur. Perlit içeriği arttıkça, perlit içeren zeminlerin likit limiti ve plastik limiti azalma olmuştur. %20 perlit içeriğinden sonra perlit içeren zeminin plastik limitinde değişim olmadığı görülmüştür.
- Atık cam tozu zeminlerde, zeminin likit limiti 26 ve plastik limiti 18 olarak bulunmuştur. Atık cam tozu içeriği arttıkça likit limit ve plastik limit değeri azalmıştır. %30 atık cam tozu içeriğinden sonra atık cam tozu zemin non-plastik davranış sergilemiştir.
- Atık cam tozu zemin geopolimerlerinde, likit aktivatör içeriği arttıkça likit limit ve plastik limit değerlerinde azalış olduğu görülmüştür.

### 5.2 Kompaksiyon deneyi

- Kompaksiyon deneyleri sonucunda, perlit içeren zeminde maksimum kuru birim hacim ağırlık  $1.67 \text{ t/m}^3$  ve optimum su içeriği %19.5 olarak bulunmuştur. %10 perlit içeriğinde maksimum kuru birim hacim ağırlık azalırken, optimum su içeriğinden artış olduğu görülmüştür. Perlit içeriği arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği azalmıştır.
- Perlit zemin geopolimerlerinin kompaksiyon deneyleri sonucunda, perlit içeriği ve likit aktivatör içeriği arttıkça maksimum kuru birim hacim artarken, optimum likit aktivatör içeriğinde azalma olduğu görülmüştür. En yüksek değer 50K50P9M NaOH içeriğinde elde edilmiş olup; maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1.76 \text{ t/m}^3$  ve optimum likit aktivatör içeriği %17 olarak saptanmıştır.
- Kompaksiyon deneyleri sonucunda, atık cam tozu zeminlerinde atık cam tozu içeriği arttıkça kuru birim hacim ağırlık artış görülürken, optimum su içeriğinde azalış olduğu görülmüştür. Kuru birim hacim

ağırlıkta en yüksek artış %10 atık cam tozu içeriğinde olduğu saptanmıştır.

- Atık cam tozu zemin geopolimerlerinin, kompaksiyon deneyleri sonucunda kuru birim hacim ağırlık artarken optimum likit aktivatör içeriğinde azalış olduğu görülmüştür. Bu grup içerisinde, en yüksek değerler %50 atık cam tozu içeriğinde olduğu, 50Z50CT 8M(30:70) içeriğinde  $1.99 \text{ t/m}^3$  olarak bulunmuştur. Şekil 5.1’de kompaksiyon deneylerinde elde edilen öne çıkan sonuçlar topluca sunulmuştur.

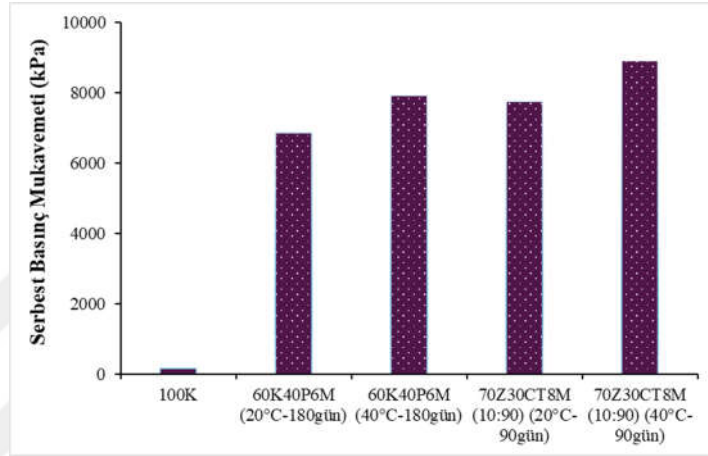


Şekil 5.1. Zemin örneklerine ait kompaksiyon parametreleri

### 5.3 Serbest basınç mukavemeti deneyi

- Serbest basınç mukavemeti deneyleri sonucunda, perlit içeriği arttıkça perlit içeren zeminlerde mukavemette azalım olduğu görülmüştür.
- Perlit içeren zemin geopolimerlerinin serbest basınç deneyleri sonucunda, kür süresi ve kür sıcaklığı arttıkça mukavemette artış olduğu görülmüştür. Bu grup içerisinde en yüksek mukavemet değeri 180 gün kür süresi ve  $20-40^{\circ}\text{C}$  kür sıcaklığında 60K40P6M NaOH örneğinde sırasıyla 6875 kPa ve 7920 kPa olarak bulunmuştur. Perlit zemin geopolimerlerinin sergiledikleri yüksek mukavemet nedeniyle yollarda alt temel malzemesi olarak kullanılabilmesi düşünülmektedir. Ayrıca ham perlitin büyük oranda tüketimini sağlayacak bir çözüm sunulmaktadır; kilin %40’ının perlit ile değiştirilmesi mümkündür.
- Serbest basınç mukavemeti deneylerinde, atık cam tozu içeriği arttıkça mukavemette azalış olduğu saptanmıştır.

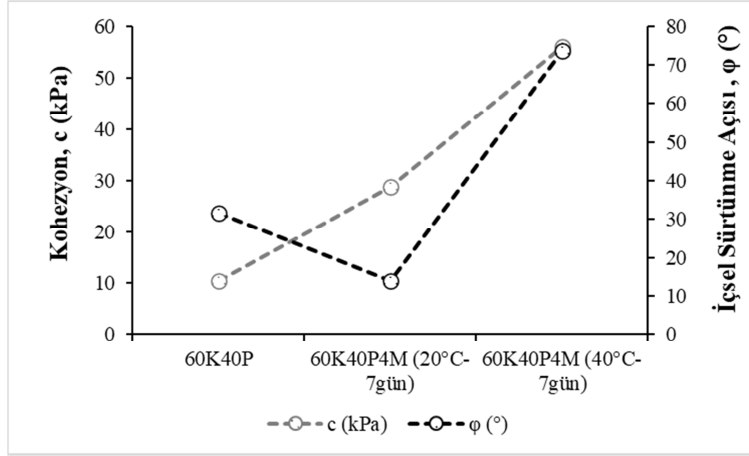
- Atık cam tozu zemin geopolimerlerinin serbest basınç mukavemeti deneylerinde, kür süresi ve kür sıcaklığı arttıkça mukavemette artış olduğu görülmüştür. Bu grup içerisinde, her 2 kür sıcaklığı içinde en yüksek mukavemet değeri 90 gün kür süresinde 70Z30CT numune örneklerinin 8M(10:90) likit aktivatör içeriğinde olup sırasıyla 7749 kPa ve 8923 kPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.2’de serbest basınç mukavemetlerine ait grafik sunulmuş olup, farklı oranlarda perlit ve atık cam tozunun mukavemetteki davranışları gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Serbest basınç mukavemeti

#### 5.4 Direkt kesme kutusu deneyi

- Kesme kutusu deneylerinde, perlit içeriği arttıkça perlit içeren zeminlerde kohezyon %20 perlit içeriğinde artarken perlit içeriği arttıkça azalım göstermiştir. İçsel sürtünme açısı perlit içeriği arttıkça artmıştır.
- Perlit zemin geopolimerlerinin kesme kutusu deneyleri sonucunda, kür süresi ve kür sıcaklığı arttıkça kohezyon ve içsel sürtünme açısı artmıştır. Kesme mukavemeti parametrelerine bakıldığında en yüksek değeri 7 gün kür süresi ve 40°C kür sıcaklığı ile 60K40P4M örneklerinde elde edilmiş olup, içsel sürtünme açısı 56.1° ve kohezyonu 73.8 kPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.3’te farklı kür sıcaklığının zeminlerin kohezyon ve içsel sürtünme açısında oluşturduğu değişimler verilmiştir.



Şekil 5.3. Kesme kutusu parametreleri

### 5.5 Konsolidasyon deneyi

- Perlit içeren zeminlerde, %30 perlit içeriğinde sıkışma indisi artarken perlit içeriği arttıkça sıkışma indisinde azalma olduğu, perlit içeriği arttıkça perlit içeren zeminlerde başlangıç boşluk oranında azalma olduğu görülmüştür.
- Perlit içeren zeminlerde, perlit içeriği arttıkça prekonsolidasyon basıncında artış olmuştur.
- Perlit içeren zemin geopolimerlerinde, perlit içeriği, kür sıcaklığı, kür süresi ve NaOH molaritesi arttıkça sıkışma indisinde azalma olduğu görülmüştür.
- Kür süresi, kür sıcaklığı ve molarite arttıkça perlit içeren zemin geopolimerlerinde prekonsolidasyon basıncında artış olduğu görülmüştür. 20°C 28-90 gün kür süresine tabi tutulan 60K40P4M ve 60K40P6M zemin geopolimer örneklerinin prekonsolidasyon basıncı 300 ve 350 kPa olurken; 40°C 28-90 gün kür süresine tabi tutulan 60K40P4M ve 60K40P6M zemin geopolimer örneklerinin prekonsolidasyon basıncı 400 ve 600 kPa olmuştur.

Perlit ve atık cam tozu zemin geopolimerleri üzerinde yapılan deneylerin sonuçlarına bakıldığında, kil zemine geopolimer oluşturucu öğelerin eklenmesinin; serbest basınç mukavemeti, sıkışabilirlik, dayanıklılık gibi geomekanik parametreleri iyileştirebildiği saptanmıştır. Zemin iyileştirme

çalışmalarında çimentoya alternatif olarak çevreci bir zemin iyileştirme malzemesi ihtiyacı söz konusu olduğunda geopolimerlerin çevre dostu bir malzeme olarak zemin iyileştirme yöntemine alternatifler sunabildiği görülmüştür.



**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Abdullah, H.H., Shahin, M.A., ve Walske, M.L.**, 2019, Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag, *Soils and Foundations*, 59(6), 1906-1920.
- Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Walske, M.L., ve Karrech, A.**, 2020, Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymer for clay stabilization, *Canadian Geotechnical Journal*, 57(9), 1356-1368.
- Açikkapı Y. H.**, 2023, Alkali aktivatörler kullanılmış çelikhane cürüflü harçların mekanik ve dayanıklılık özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli
- Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Mohammadhosseini, H., Mohamed, A.M., Siddika, A., Alrshoudi, F., ve Alaskar, A.**, 2020, Utilization of sheep wool as potential fibrous materials in the production of concrete composites, *Journal of Building Engineering*, 30, 101216.
- Al Muhit, B.A., Foong, K.Y., Alengaram, U.J., ve JUMAAT, M.Z.**, 2013, Geopolymer concrete: A building material for the future, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(2), 11-15.
- Al-Rkaby, A.H.J.**, 2019, Evaluating shear strength of sand-GGBFS based geopolymer composite material, *Acta Polytechnica*, 59(4), 305-31
- ASTM D2166**, 2016, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, s.
- ASTM D4318**, 2017, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, s.
- ASTM D6913**, 2017, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, s.
- ASTM D2435/D2435M-11**, 2020, Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading In Book of Standards (Vol. 4)

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- ASTM D698-12**, 2021, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)), ASTM International, West Conshohocken, PA, s.
- ASTM D3080/D3080M**, 2023, Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained ASTM International
- Ayub, F., ve Khan, S.A.**, 2023, An overview of geopolymer composites for stabilization of soft soils, *Construction and Building Materials*, 404, 133195.
- Abdelaal, A., Elkatatny, S., ve Abdel Fattah, A.M.**, 2024, Perlite incorporation for sedimentation reduction and improved properties of high-density geopolymer cement for oil well cementing, *Scientific Reports*, 14(1), 9707.
- Arulrajah, A., Kua, T.A., Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Mahghoolpilehrood, F., ve Disfani, M.M.**, 2016, Spent coffee grounds–fly ash geopolymer used as an embankment structural fill material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015197.
- Ashiq, S.Z., Akbar, A., Farooq, K., ve Mujtaba, H.**, 2022, Sustainable improvement in engineering behavior of Siwalik Clay using industrial waste glass powder as additive, *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00883.
- Ayyappan, A., Palanikumar, S., Kumar, D., ve Vinoth, M.**, 2017, Influence of Geopolymers in The Stabilization of Clay Soil, *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, Vol. 5, 108-120p.
- Azizi, S.**, 2007, Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Aziz, M.**, 2023, Mechanical properties of a high plasticity clay mixed with sand and low-plastic silt, *Materials Today: Proceedings*.
- Awoyera, P., ve Adesina, A.**, 2019, A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder, *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00268.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Balaraman, R., Vinodh, K.R., Nithiya, R., ve Arunkumar, S.,** 2016, Comparative Study of Geopolymer Concrete in Flyash with Conventional Concrete, *International Journal of Civil Engineering and Technology* (IJCIET), 7(4), 24-36.
- Benny, J.R., Jolly, J., Sebastian, J.M., ve Thomas, M.,** 2017, Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(5), 228-231.
- Bilgen G.,** 2015, Bentonit Kilinin Dayanımının İyileştirilmesi İçin Cam Tozu Kullanımı, 6. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Bilondi, M.P., Toufigh, M.M., ve Toufigh, V.,** 2018a, Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils, *Construction and Building Materials*, 170, 302-313.
- Bilondi, M.P., Toufigh, M.M., Toufigh, V.,** 2018b, Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder–clay geopolymer, *Construction and Building Materials*, 183, 417-428.
- Blayi, R.A., Sherwani, A.F.H., Ibrahim, H.H., Faraj, R.H., ve Daraei, A.,** 2020, Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder, *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00427.
- Cabalar, A.F., ve Mustafa, W.S.,** 2015, Fall cone tests on clay–sand mixtures, *Engineering Geology*, 192, 154-165.
- Cabalar, A.F., ve Mustafa, W.S.,** 2017, Behaviour of sand–clay mixtures for road pavement subgrade, *International Journal of Pavement Engineering*, 18(8), 714-726.
- Cabalar, A.F., Demir, S., ve Akbulut, N.,** 2018, Kil-kum karışımlarının bazı geoteknik özellikleri. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9(2), 871-879.
- Canakci, H., Aram, A. L., ve Celik, F.,** 2016, Stabilization of clay with waste soda lime glass powder, *Procedia engineering*, 161, 600-605.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Canakci, H., Güllü, H., ve Dwle, M.I.K.,** 2018, Effect of glass powder added grout for deep mixing of marginal sand with clay, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(4), 1583-1595.
- Calik, U., ve Sadoglu, E.,** 2014, Classification, shear strength, and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite, *Natural hazards*, 71, 1289-1303.
- Chang, R., Kim, S., Lee, S., Choi, S., Kim, M., ve Park, Y.,** 2017, Calcium carbonate precipitation for CO<sub>2</sub> storage and utilization: a review of the carbonate crystallization and polymorphism, *Frontiers in Energy Research*, 5, 17.
- Cong, P., and Cheng, Y.,** 2021, Advances in geopolymer materials: A comprehensive review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283-314.
- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., De La Torre, A.G., Aranda, M.A.G., ve Palomo, A.,** 2007, An XRD study of the effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio on the alkali activation of fly ash, *Cement and concrete research*, 37(5), 671-679.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., ve Pinto, A.T.,** 2012, Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation, *Construction and Building Materials*, 29, 167-174.
- Cyr, M., Idir, R., ve Poinot, T.,** 2012, Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet, *Journal of Materials Science*, 47(6), 2782-2797.
- Çalık, Ü.,** 2012, Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Davidovits, J.,** 1989, Geopolymers and geopolymeric materials, *Journal of thermal analysis*, 35, 429-441.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Davidovits, J., Comrie, D.C., Paterson, J.H., ve Ritchey, D.J.,** 1990, Geopolymeric Concretes For Environmental Protection, *Concrete International*, 12(7), 30-40.
- Davidovits, J.,** 2002, Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs, *In Geopolymer 2002 conference*, Saint-Quentin, France; Melbourne, Australia: Geopolymer Institute, 29p.
- Davidovits, J.,** 2013, Geopolymer cement. A review, Geopolymer Institute, Technical papers, 21, 1-11.
- Davidovits, J.,** 2015, Geopolymer Chemistry and Applications, Institut Geopolymere, 4.edition, 620s.
- De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., ve Sirivivatnanon, V.,** 2007, Kinetics of geopolymerization: Role of  $Al_2O_3$  and  $SiO_2$ , *Cement and Concrete Research*, 37(4), 512-518.
- Demirboğa, R., Örüng, İ., ve Gül, R.,** 2001, Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes, *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1627-1632.
- Demir, S., ve Cabalar, A.F.,** 2024, Dispersion, viscosity, unconfined compression and bender element testing of bentonite-waste glass mixtures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 28(4), 900-929.
- Deng, Y., Wu, Z., Cui, Y., Liu, S., ve Wang, Q.,** 2017, Sand fraction effect on hydro-mechanical behavior of sand-clay mixture, *Applied Clay Science*, 135, 355-361.
- DPT,** 2001, Endüstriyel hammaddeler alt komisyonu yapı malzemeleri (pomza, perlit, vermikülit, flogopit, genleşen killer), madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı, DPT: 2617- ÖİK: 628, Ankara.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- 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, 2917-2933.
- El Mir, A., Nehme, S.G., ve Assaad, J.J.**, 2020, Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders, *Heliyon*, 6(1).
- Erdem, T. K., Meral, Ç., Tokyay, M., ve Erdoğan, T.Y.**, 2007, Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements, *Cement and Concrete Composites*, 29(1), 13-21.
- Erdogan, S.T.**, 2015, Properties of ground perlite geopolymer mortars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), 04014210.
- Erdoğan, G., ve Çelikten, S.**, 2022, Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan perlit ve uçucu kül esaslı geopolimer harçların mekanik ve mikroyapı özelliklerinin araştırılması, (Master's thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi).
- Eskisar, T., ve Aksu, G.**, 2020, Zeminlerde Tek Fazlı Geopolimerizasyon Uygulaması ve Geopolimerizasyonun Serbest Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8 (3) , 466-478.
- Faisal, M., ve Muhammad, K.**, 2016, Synthesis and characterization of geopolymer from bagasse bottom ash, waste of sugar industries and naturally available china clay, *Journal of Cleaner Production*, 129, 491-495.
- Faqir, N.M., Shawabkeh, R., Al-Harhi, M., ve Wahhab, H.A.**, 2019, Fabrication of geopolymers from untreated kaolin clay for construction purposes, *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 129-137.
- Fakhrabadi, A., Ghadakpour, M., Choobbasti, A.J., ve Kutanaei, S.S.**, 2021, Evaluating the durability, microstructure and mechanical properties of a clayey-sandy soil stabilized with copper slag-based geopolymer against wetting-drying cycles, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 5031-5051.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., ve Fernández-Jiménez, A.,** 2015, An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders, *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*, 19-47.
- Ghadir, P., ve Ranjbar, N.,** 2018, Clayey soil stabilization using geopolimer and Portland cement, *Construction and Building Materials*, 188, 361-371.
- Güzelküçük, S., ve Demir, İ.,** 2019, Perlit Esaslı Geopolimer Kompozitlere Kür Süresi Ve Sıcaklığın Etkisi, *International Journal of Engineering Research and Development*, 11 (2), 730-737.
- Habert, G., De Lacaillerie, J.D.E., ve Roussel, N.,** 2011, An environmental evaluation of geopolimer based concrete production: reviewing current research trends, *Journal of cleaner production*, 19(11), 1229-1238.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M., ve Rangan, B.V.,** 2004, On the development of fly ash-based geopolimer concrete, *Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- Hsiao, D.H., ve Phan, V.T.A.,** 2016, Evaluation of static and dynamic properties of sand-fines mixtures through the state and equivalent state parameters, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 134-144.
- Ibrahim, H.H., Mawlood, Y.I., ve Alshkane, Y.M.,** 2021, Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), 496-503.
- Ishihara K.,** 1993, Liquefaction and flow failure during earthquakes, *Géotechnique*, 43:351-451.
- Jamalimoghadam, M., Vakili, A.H., ve Ajalloeian, R.,** 2024, Wetting-drying impact on geotechnical behavior of alkali-stabilized marl clay with glass powder, *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(6), 205.
- Javed, S. A., ve Chakraborty, S.,** 2020, Effects of waste glass powder on subgrade soil improvement, *World Scientific News*, (144), 30-42.
- Jin, W.,** 2001, Inorganic binders employing waste glass, US Patent, 6,296,699.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Kamhangrittirong P., Suwanvitaya P., Witayakul W., Suwanvitaya P., ve Chindaprasirt P.,** 2013, Factors influence on shrinkage of high calcium fly ash geopolymer paste, *In: Advanced materials research*, vol 610, 2275–2281p.
- Karakan, E., ve Altun, S.,** 2016, Silt Kum Karışımlarının Sıvılaşma Davranışı ve Sıvılaşma Sonrası Hacimsel Deformasyon Özellikleri, *Teknik Dergi*, 27(4), 7593-7617.
- Karein, S.M.M., Balapour, M., ve Karakouzian, M.,** 2019, Improving the hardened and transport properties of perlite incorporated mixture through different solutions: Surface area increase, nanosilica incorporation or both, *Construction and Building Materials*, 209, 187-194.
- Kenny TC.,** 1977, Residual strengths of mineral mixtures, *In: Proceedings 9th International Conference on soil mechanics and foundation engineering*, 155–160p.
- Khan, M.S., Tufail, M., ve Matecullah, M.,** 2018, Effects of waste glass powder on the geotechnical properties of loose subsoils, *Civil Engineering Journal*, 4(9), 2044-2051.
- Kızıltan, B., ve Doğan, D.U.,** 2021, Çimento Sektöründe Karbon Ayak İzlerinin Raporlanması Amacıyla Bir Çerçeve Önerisi, *Çağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 18 (1), 40-58.
- Kim, H.K., ve Lee, H.K.,** 2013, Effects of high volumes of fly ash, blast furnace slag, and bottom ash on flow characteristics, density, and compressive strength of high-strength mortar, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(5), 662-665.
- Kim, D., Nam, B.H., ve Youn, H.,** 2018, Effect of clay content on the shear strength of clay–sand mixture, *International Journal of Geo-Engineering*, 9, 1-12.
- Kirschner, A., ve Harmuth, H.,** 2004, Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials, *Ceramics-silikaty*, 48(3), 117-120.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Kozhukhova, N.I., Chizhov, R.V., Zhernovsky, I.V., ve Strokhova, V.V.,** 2016, Structure formation of geopolymer perlite binder vs. type of alkali activating agent, *International Journal of Pharmacy and Technology*, 8(3), 15338-15348.
- Kumar, S., Gupta, R.C., Shrivastava, S., Csetenyi, L., ve Thomas, B.S.,** 2016, Preliminary study on the use of quartz sandstone as a partial replacement of coarse aggregate in concrete based on clay content, morphology and compressive strength of combined gradation, *Construction and Building Materials*, 107, 103-108.
- Kumar, S., Thomas, B.S., Gupta, V., Basu, P., ve Shrivastava, S.,** 2018, Sandstone wastes as aggregate and its usefulness in cement concrete—A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1147-1153.
- Lade, P.V., Liggio, C.D., ve Yamamuro, J.A.,** 1998, Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, *Geotechnical testing journal*, 21, 336-347.
- Li, Z., Ding, Z., ve Zhang, Y.,** 2004, Development of sustainable cementitious materials, In Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, China, 55-76p.
- Liu, Z., Cai, C.S., Liu, F., ve Fan, F.,** 2016, Feasibility study of loess stabilization with fly ash-based geopolymer, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04016003.
- Luo, Y., ve He, D.,** 2021, Research status and future challenge for CO<sub>2</sub> sequestration by mineral carbonation strategy using iron and steel slag, *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 49383-49409.
- Ma, Y., Hu, J., ve Ye, G.,** 2013, The pore structure and permeability of alkali activated fly ash, *Fuel*, 104, 771-780p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Maddalena, R., Roberts, J.J., ve Hamilton, A.,** 2018, Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements, *Journal of cleaner production*, 186, 933-942.
- Mehra, P., Thomas, B.S., Kumar, S., ve Gupta, R.C.,** 2016, Jarosite added concrete along with fly ash: properties and characteristics in fresh state, *Perspectives in Science*, 8, 69-71.
- Mekkiyah, H.M., ve Al-Khazragie, A.,** 2015, Behavior of clay soil mixed with fine sand during consolidation, *Applied Research Journal*, 1(8), 437-443.
- Miftah, A., Garoushi, A.H.B., ve Bilsel, H.,** 2020, Effects of fine content on undrained shear response of sand-clay mixture, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6, 1-7.
- Mirzahosseini, M., ve Riding, K.A.,** 2015, Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM), *Cement and Concrete Composites*, 56, 95-105.
- Mohammadzadeh, M.A., Toufigh, M.M., ve Toufigh, V.,** 2023, Durability and strength of geopolymer with recycled glass powder base for clay stabilization, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(1), 156-168.
- Monkul, M.M., ve Ozden, G.,** 2007, Compressional behavior of clayey sand and transition fines content, *Engineering Geology*, 89(3-4), 195-205.
- Morsy, M.S., Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y., ve Almusallam, T.,** 2014, Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder, *Arabian journal for science and engineering*, 39, 4333-4339.
- Nelson J.D, ve Miller, D.J.,** 1992, Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering, *John Wiley & Sons*, Inc. New York.
- Obonyo, E., Kamseu, E., Melo, U.C., ve Leonelli, C.,** 2011, Advancing the use of secondary inputs in geopolymer binders for sustainable cementitious composites: a review, *Sustainability*, 3(2), 410-423.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Odeh, N.A., ve Al-Rkaby, A.H.**, 2022, Strength, Durability, and Microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil, *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00988.
- Ogawa, M., Okutomo, S., ve Kuroda, K.**, 1998, Control of interlayer microstructures of a layered silicate by surface modification with organochlorosilanes, *Journal of the American Chemical Society*, 120(29), 7361-7362.
- Oktay, B. M., Odabaş, E., ve Kurnaz, M.**, 2017, Fosfojips ve perlit katkılı sıvaların su emme miktarlarının 24 deneysel tasarım yöntemiyle belirlenmesi, *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 1(1), 18-20.
- Özdal, M.**, 2019, Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme Dayanıklılığının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 68 s.
- 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.
- Phanikumar, B.R., Amshu Malini, C., ve Karthika, R.**, 2012, Swell-consolidation characteristics of artificial sand clay mixes, *Geomechanics and Geoengineering*, 7(1), 69-74.
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., ve Udomchai, A.**, 2016, Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer, *Applied clay science*, 127, 134-142.
- Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Sukmak, P., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., ve Shen, S. L.**, 2016, Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer, *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 877-891.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rashad, A.M.**, 2016, A synopsis about perlite as building material—A best practice guide for Civil Engineer, *Construction and Building Materials*, 121, 338-353.
- Ren, D., Yan, C., Duan, P., Zhang, Z., Li, L., ve Yan, Z.**, 2017, Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack, *Construction and Building Materials*, 134, 56-66.
- Sahoo, S., ve Singh, S.P.**, 2022, Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers, *Construction and Building Materials*, 328, 127078.
- Saini, G., ve Vattipalli, U.**, 2020, Assessing properties of alkali activated GGBS based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica, *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00352.
- Salimi, M., ve Ghorbani, A.**, 2020, Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers, *Applied Clay Science*, 184, 105390.
- Santhikala, R., Chandramouli, K., ve Pannirselvam, N.**, 2022, Stabilization of expansive soil using flyash based geopolymer, *Materials Today: Proceedings*, 68, 110-114.
- Siddika, A., Mamun, M.A.A., ve Ali, M.H.**, 2018, Study on concrete with rice husk ash, *Innovative Infrastructure Solutions*, 3, 1-9.
- Siddika, A., Al Mamun, M.A., Alyousef, R., ve Mohammadhosseini, H.**, 2021, State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 33(5), 294-307.
- Singhi, B., Laskar, A.I., ve Ahmed, M.A.**, 2016, Investigation on soil-geopolymer with slag, fly ash and their blending, *Arabian Journal for science and engineering*, 41, 393-400.
- Skempton AW.**, 1985, Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Géotechnique*, 35:3–18.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Soliman, N. A., ve Tagnit-Hamou, A.,** 2017, Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap, *Construction and Building Materials*, 139, 374-383.
- Sukprasert, S., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Rashid, A.S.A., ve Nazir, R.,** 2021, Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications, *Road Materials and Pavement Design*, 22(2), 357-371.
- Suzette, M.K.,** 2016, Menial commodity summaries 2016, Department of the Interior. US Geological Survey, 1.
- Swain, K.A.J.A.L.,** 2015, Stabilization of soil using geopolymer and biopolymer, National Institute Of Technology: Rourkela, India.
- Swanepoel, J.C., ve Strydom, C.A.,** 2002, Utilisation of fly ash in a geopolymeric material, *Applied geochemistry*, 17(8), 1143-1148.
- Parhi, P.S., Garanayak, L., Mahamaya, M., ve Das, S.K.,** 2018, Stabilization of an expansive soil using alkali activated fly ash based geopolymer, *In Advances in Characterization and Analysis of Expansive Soils and Rocks: Proceedings of the 1st GeoMEast International Congress and Exhibition, Egypt 2017 on Sustainable Civil Infrastructures 1*, Springer International Publishing, 36-50p.
- Ramezani pour, A.A., Karein, S.M.M., Pilvar, A.R., ve Moodi, F.,** 2016, Effect of perlite powder on durability properties of concrete under chloride attack, *In Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Las Vegas, USA.
- Ramezani, S.J., Toufigh, M.M., ve Toufigh, V.,** 2023, Utilization of glass powder and silica fume in sugarcane bagasse ash-based geopolymer for soil stabilization, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4), 04023042.
- Rashad, A.M.,** 2016, A synopsis about perlite as building material–A best practice guide for Civil Engineer, *Construction and Building Materials*, 121, 338-353.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Rios, S., Ramos, C., Viana da Fonseca, A., Cruz, N., ve Rodrigues, C.,** 2019, Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(2), 245-267.
- Rovnaník, P.,** 2010, Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176-1183.
- Tang, Z., Li, W., Hu, Y., Zhou, J.L., ve Tam, V.W.,** 2019, Review on designs and properties of multifunctional alkali-activated materials (AAMs), *Construction and Building Materials*, 200, 474-489.
- Taylor, D.W.,** 1948, Fundamentals of soil mechanics, Vol. 66, No. 2, 161p.
- Teerawattanasuk, C., ve Voottipruex, P.,** 2019, Comparison between cement and fly ash geopolymer for stabilized marginal lateritic soil as road material, *International Journal of Pavement Engineering*, 20(11), 1264-1274.
- Tekin, I.,** 2016, Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes, *Construction and Building Materials*, 127, 607-617.
- Thevanayagam, S., ve Mohan, S.,** 2000, Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands, *Geotechnique*, 50(1), 1-23.
- Tho-In, T., Sata, V., Boonserm, K., ve Chindaprasirt, P.,** 2018, Compressive strength and microstructure analysis of geopolymer paste using waste glass powder and fly ash, *Journal of Cleaner Production*, 172, 2892-2898.
- Thomas, B.S., ve Gupta, R.C.,** 2016, A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1323-1333.
- Thomas, B.S., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S. N., Abdalla, J.A., Hawileh, R.A., ve Hamada, H.M.,** 2022, Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review, *Cleaner Materials*, 3, 100056.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Tsaousi, G.M., Douni, I., ve Panias, D.,** 2016, Characterization of the properties of perlite geopolymer pastes, *Materiales de Construcción*, 66(324), e102-e102.
- Uluer, O., Karağaç, İ., Aktaş, M., Durmuş, G., Ağbulut, Ü., Khanlari, A., ve Çelik, D.N.,** 2018, Genleştirilmiş perlitin ısı yalıtım teknolojilerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(1), 36-42.
- Vaibhav, K.S., Nagaladinni, M., Madhushree, M., ve Priya, B.P.,** 2019, Effect of silica fume on fly ash based geopolymer mortar with recycled aggregates, *In Sustainable Construction and Building Materials: Select Proceedings of ICSCBM 2018*, Springer Singapore, 595-602p.
- Vaitkevičius, V., Šerelis, E., ve Hilbig, H.,** 2014, The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 68, 102-109.
- Vallejo, L. E., ve Mawby, R.,** 2000, Porosity influence on the shear strength of granular material–clay mixtures, *Engineering Geology*, 58(2), 125-136.
- Voottipruex, P., Teerawattanasuk, C., Sramoon, W., ve Meepon, I.,** 2022, Stabilization of soft clay using perlite geopolymer activated by sodium hydroxide, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 8(1), 5.
- Yaghoubi, M., Arulrajah, A., Disfani, M.M., Horpibulsuk, S., Darmawan, S., ve Wang, J.,** 2019, Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay, *Applied Clay Science*, 167, 33-42.
- Yang, B., Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., ve Kim, S.,** 2017, Evaluation of the freeze and thaw durability of road soils stabilized with a biofuel co-product, *In Geotechnical Frontiers 2017*, 125-133p.
- Yıldırım, S.T., ve Baba, E.,** 2018, Bims agregalı ve genleştirilmiş perlit agregalı hafif kompozit harçların özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1(1), 47-52.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Yilmaz, F., ve Fidan, D.**, 2018, Influence of freeze-thaw on strength of clayey soil stabilized with lime and perlite, *Geomechanics & engineering*, 14(3), 301-306.
- Younis, K.H., Salihi, K.A., ve Ibrahim, T.K.**, 2020, An overview of geopolymer concrete including recycled aggregate, *Int. J. Sci. Technol. Res*, 9, 6239-6245.
- Wang, K., Shah, S.P., ve Mishulovich, A.**, 2004, Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders, *Cement and Concrete Research*, 34(2), 299-309.
- Wei, X., Ku, T., Yang, Z., ve Liang, X.**, 2024, Interactive Influence of Water and Fines Contents on the Strength of Compacted Cement-Stabilized Clayey Sands: Insights and Predictive Framework, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(8), 04024222.
- Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Jiang, X., Zhang, Y., Huang, B., ve Hu, W.**, 2020, Evaluation of glass powder-based geopolymer stabilized road bases containing recycled waste glass aggregate, *Transportation Research Record*, 2674(1), 22-32.
- Xu, H., ve Van Deventer, J.S.**, 2002, Geopolymerisation of multiple minerals, *Minerals engineering*, 15(12), 1131-1139.
- Xu, J., Zhang, L., Li, Y., Li, Z., ve Zhao, Y.**, 2024, Mechanical, mineralogical, and microstructural characterization of collapsible loess cured by NaOH solution, *Construction and Building Materials*, 421, 135678.
- Zainal, F.F., Hussin, F.W.M., Nordin, M.N.A., ve Hastuty, S.**, 2022, The effect of curing temperature on the properties of kaolin geopolymer paste, *In Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2169, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.
- Zawrah, M.F., Gado, R.A., Feltin, N., Ducourtieux, S., ve Devoille, L.J.P.S.**, 2016, Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production, *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 237-251.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G., ve Tao, M.,** 2013, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, *Construction and Building Materials*, 47, 1468-1478.
- Zuo, L., ve Baudet, B.A.,** 2015, Determination of the transitional fines content of sand-non plastic fines mixtures, *Soils and Foundations*, 55(1), 213-219.
- Zhu, Y., Chen, R., ve Lai, H.,** 2020, Stabilizing soft ground using geopolymer: An experimental study, In CICTP 2020, 1144-1155p.
- Zhou, H.Y., Wang, X.S., Hu, X.X., Xiong, Z.Q., ve Zhang, X.Y.,** 2021, Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge, *Rock and Soil Mechanics*, 42(8), 4.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecim boyunca yol gösteren, emeğini, ilgisini, sormuş olduğum tüm sorulara güler yüzü ile cevap veren, manevi desteğini eksik etmeyen, her zaman öğrencisi olmaktan gurur duyacağım değerli danışman hocam Doç. Dr. Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma da kullanmış olduğum perlitin temin edilmesinde Pomza Export A.Ş. firması çalışanlarına ve Yük. Maden Müh. Ümit ÜRÜN'e yardımları için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma da kullanmış olduğum kilin temin edilmesinde Troas Enerji ve Dış Tic. Ltd. Şti. firma sahibi Sayın Ali BODUR'a, müdürü Sayın Tuğrul YILDIZ'a ve çalışanı Sayın Erdinç POYRAZOĞLU'na yardımları için teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması boyunca desteklerini eksik etmeyen değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca aldığım tüm kararlar da yanımda olan, desteklerini eksik etmeyen aile üyelerim; babam Hakim RAHAT'a, annem Safiye RAHAT'a, ablam Yasemin ELMASTAŞ'a, kardeşlerim Sema CÖNK'e ve İlayda RAHAT'a, bu süreçte enerjileri ile destek olan canım yeğenlerim Nuh Yamin ELMASTAŞ'a ve Aden CÖNK'e sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

05 / 09 / 2024

Esmâ RAHAT

## ÖZGEÇMİŞ

Esmâ RAHAT, Türkiye Cumhuriyeti vatandaşı olup, ilk ve orta öğrenimini Peker Mahallesi İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini ise Karabağlar Cumhuriyet Lisesi'nde tamamladı. 2014 yılında İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. Lisans eğitimini 2019 yılında tamamladı. 2022 yılının bahar yarıyılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı.

