

Yüksek Sıcaklıklara Maruz Pirofillit Katkılı İnce Taneli Zeminlerin Fiziksel ve
Dayanım Özelliklerinin Araştırılması

Egemen Oturak

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2024

Investigation of Physical and Strength Properties of Pyrophyllite Added Fine-
Grained Soils Exposed to High Temperatures

Egemen Oturak

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

December 2024

Yüksek Sıcaklıklara Maruz Pirofillit Katkılı İnce Taneli Zeminlerin Fiziksel ve
Dayanım Özelliklerinin Araştırılması

Egemen Oturak

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ

Aralık 2024

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Egemen Oturak**'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Yüksek Sıcaklıklara Maruz Pirofillit Katkılı İnce Taneli Zeminlerin Fiziksel ve Dayanım Özelliklerinin Araştırılması.” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ

Üye: Doç. Dr. Hasan SAVAŞ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Eren BALABAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Murat Türköz danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yüksek Sıcaklıklara Maruz Pirofillit Katkılı İnce Taneli Zeminlerin Fiziksel ve Dayanım Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 23/12/2024

Egemen Oturak

İmza

ÖZET

Günümüzde artan nüfus ile birlikte, uygun mühendislik özelliklerine sahip olmayan zeminler üzerinde yapılaşma ihtiyacı, çeşitli zemin stabilizasyon yöntemlerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Stabilizasyon yöntemi olarak geleneksel biçimde kullanılan katkı malzemelerinin olumsuz çevresel etkileri, lojistik ve maliyet problemleri, daha sürdürülebilir, kolay temin edilebilir ve ucuz alternatif katkı malzemelerinin araştırılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Nüfus artışı ile birlikte yükselen enerji ihtiyacı, yüksek sıcaklıkların zemin özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği dolayısıyla olumsuz bir durumda insan ve çevre sağlığına tehdit oluşturabilecek termik ve nükleer enerji santralleri gibi tesislerin çoğalmasına sebep olmuştur. Ayrıca, artan orman yangınları da yüksek sıcaklıkların zeminlerin davranışı ve mühendislik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesini önemli bir araştırma konusu yapmaktadır.

Bu çalışmada, geoteknik mühendisliğinde nadiren kullanılan bir mineral olan Pirofillit kullanılarak düşük plastisiteli kil (CL) zeminin değişen sıcaklıklar, katkı içeriği ve kür süresi koşullarında mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Zemin numuneleri kuru ağırlıklarının %0, %10, %20 ve %30'u kadar Pirofillit katkısı ile 7 ve 21 günlük kür süreleriyle stabilize edilmiş ve 25°C, 100°C, 200°C ve 500°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Zeminlerin fiziksel ve mukavemet özelliklerini değerlendirmek için Standart Proktor Kompaksiyon Deneyleri, Konsolidasyonsuz-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyleri ve Serbest Basınç Dayanımı Deneyleri yapılmıştır. Amaç, Pirofillit ile stabilize edilmiş zeminlerin termal değişimler altındaki performansını değerlendirmek ve zemin stabilizasyon yöntemleri ve sıcaklığın zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi ile ilgili literatüre katkıda bulunmaktır.

Anahtar Kelimeler: Stabilizasyon, Pirofillit, Yüksek Sıcaklık Etkileri, Üç Eksenli Basınç Deneyi, Serbest Basınç Deneyi, Kompaksiyon, Dayanım

SUMMARY

Today, with the increasing population, the need for construction on soils that do not have suitable engineering properties has led to the development of various soil stabilization methods. The negative environmental impacts, logistical and cost problems of the additives traditionally used as stabilization methods have led to the need to search for more sustainable, easily available, and inexpensive alternative additives. Increasing energy demand along with population growth has led to the proliferation of facilities such as thermal and nuclear power plants, where high temperatures can significantly affect soil properties, thus posing a threat to human and environmental health in an adverse situation. In addition, the increasing number of forest fires makes studying the effect of high temperatures on the behavior and engineering properties of soils an important research topic.

In this study, the engineering properties of low plasticity clay (CL) soil were investigated under varying temperatures, additive content, and curing time conditions using Pyrophyllite, a mineral rarely used in geotechnical engineering. The soil samples were stabilized with 0%, 10%, 20%, 20%, and 30% of their dry weight of Pyrophyllite admixture with curing times of 7 and 21 days and exposed to temperatures of 25°C, 100°C, 200°C, and 500°C. Standard Proctor Compaction Tests, Unconsolidated Undrained Triaxial Compressive Tests, and Unconfined Compressive Strength Tests were performed to evaluate the physical and strength properties of the soils. The aim was to assess the performance of Pyrophyllite stabilized soils under thermal changes and to contribute to the literature on soil stabilization methods and the effect of temperature on the engineering properties of soils.

Keywords: Stabilization, Pyrophyllite, High-Temperature Effects, Triaxial Compression Strength Test, Unconfined Compression Strength Test, Compaction, Strength.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen, sabır gösteren, beni yönlendiren ve öğrencisi olmaktan gurur duyduğum danışman hocam Prof. Dr. Murat Türköz'e sonsuz şükran, minnet ve saygılarımı sunarım.

Geoteknik mühendisliğini daha iyi öğrenmeme yardımcı olan, yüksek lisans eğitimi süresince yardımlarını benden esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan'a, Doç. Dr. Hasan Savaş'a ve Arş. Gör. Dr. Hakan Bilici'ye teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olduklarını hissettiğim aileme destek, anlayış ve sabırlarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Zemin Stabilizasyonu ve Yöntemleri	3
2.2. Katkı Malzemeleri ile Zemin Stabilizasyonu	5
2.2.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu	5
2.2.2. Çimento ile zemin stabilizasyonu	8
2.2.3. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu.....	11
2.2.4. Yüksek fırın cürufu ile stabilizasyon	13
2.2.5. Diğer katkı malzemeleri ile stabilizasyon	15
2.3. Sıcaklığın Zeminlerin Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkileri	19
2.4. Pirofillit Minerali ve Özellikleri	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Materyal	33
3.1.1. Zemin Numunesi	33
3.1.2. Pirofillit	36
3.2. Yöntem.....	37
3.2.1. Kompaksiyon deneyi (Standart Proktor).....	39
3.2.2. Serbest basınç dayanımı deneyi	40
3.2.3. Konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi (UU)	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
4.1. Kompaksiyon Deneyi Sonuçları	45

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
4.1.1. Katkı oranı etkisinin incelenmesi.....	45
4.1.2. Sıcaklık etkisinin incelenmesi.....	49
4.2. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları.....	53
4.3. Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU) Sonuçları.....	61
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri	4
2.2. Dehidroksilasyonun Silika ve Alümina yapıları üzerindeki etkisi	21
2.3. Uygulama sıcaklığının maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği üzerindeki etkisi	22
2.4. Yumuşak zeminin SEM görüntüleri:200 amplifikasyon faktörü	23
2.5. Kohezyon ve kayma direnci açısının sıcaklıkla değişimi.....	25
2.6. Farklı sıcaklık seviyelerinde Kaliforniya taşıma oranındaki değişim	27
3.1. Çalışmada kullanılan zemin numunesi	33
3.2. Zemin numunesine ait dane dağılım eğrisi.....	34
3.3. Çalışmada kullanılan zeminin plastisite kartındaki yeri.....	35
3.4. Çalışmada kullanılan zemine ait tane kompaksiyon eğrisi.....	35
3.5. Bilyalı Değirmen ile öğütülen Pirofillit katkısı	36
3.6. Kompaksiyon (Standar Proktor) test ekipmanları	39
3.7. Kompaksiyon deneyi sırasında sıkıştırma işlemi ve sıkıştırılmış numunenin kalıptan krikoyardımla çıkarılması.....	40
3.8. Serbest basınç deneyine ait örnek Mohr dairesi ve mukavemet zarfı	41
3.9. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan özel olarak üretilmiş bir kalıp.....	42
3.10. Çalışmada kullanılan serbest basınç dayanımı deney ekipmanı.....	42
3.11. Doymuş zemine ait Mohr dairesi ve göçme zarfı grafiği örneği.....	43
3.12. Toplam mukavemet ve efektif mukavemet zarfının şematik diyagramları.....	44
3.13. Çalışmada kullan üç eksenli basınç deneyi ekipmanları	44
4.1. Farklı sıcaklıklara maruz numunelerin katkı oranına göre kompaksiyon karakteristiklerinin değişimi.....	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

4.2. Farklı derecede sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin maksimum kuru yoğunluk değerlerinin katkı oranına göre değişimi	47
4.3. Farklı derecede sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin optimum su muhtevası değerlerinin katkı oranına göre değişimi	48
4.4. Farklı yüzdelerde katkı oranı uygulanmış numunelerin sıcaklık etkisine göre kompaksiyon karakteristiklerinin değişimi	49
4.5. Farklı oranlarda katkı malzemesi ile stabilize edilmiş numunelerin maksimum kuru yoğunluk değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	51
4.6. Farklı oranlarda katkı malzemesi ile stabilize edilmiş numunelerin optimum su muhtevası değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	52
4.7. Oda sıcaklığı koşulundaki SBD deneyi gerilme-deformasyon eğrileri.....	53
4.8. 100°C sıcaklık koşulundaki SBD deneyi gerilme-deformasyon eğrileri.....	54
4.9. 200°C sıcaklık koşulundaki SBD deneyi gerilme-deformasyon eğrileri.....	54
4.10. 500°C sıcaklık koşulundaki SBD deneyi gerilme-deformasyon eğrileri.....	54
4.11. Katkısız numunelerin SBD deneyi gerilme-deformasyon grafikleri.....	58
4.12. %10 katkı içeren numunelerin SBD deneyi gerilme-deformasyon grafikleri.....	58
4.13. %20 katkı içeren numunelerin SBD deneyi gerilme-deformasyon grafikleri.....	58
4.14. %30 katkı içeren numunelerin SBD deneyi gerilme-deformasyon grafikleri.....	59
4.15. SBD değerlerinin sıcaklık derecesi, katkı oranı ve kür süresine göre değişimi	60
4.16 Oda sıcaklığı koşulundaki UU deneyi gerilme-deformasyon eğrileri.....	64
4.17. 100°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi gerilme-deformasyon eğrileri.....	65
4.18. 200°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi gerilme-deformasyon eğrileri.....	66
4.19. 500°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi gerilme-deformasyon eğrileri.....	67
4.20. Oda sıcaklığı koşulundaki UU deneyi göçme zarfları.....	68
4.21. 100°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi göçme zarfları.....	69
4.22. 200°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi göçme zarfları.....	70
4.23. 500°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi göçme zarfları.....	71
4.24. Kohezyon değerlerinin uygulanan koşullara göre değişimi	72

ŞEKİLLER DİZİNİ**Sekil****Sayfa**

4.25. İçsel sürtünme açısı değerlerinin uygulanan koşullara göre değişimi.....	72
4.26. Oda sıcaklığındaki numunelerin göçme zarfları.....	73
4.27. 100°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin göçme zarfları	73
4.28. 200°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin göçme zarfları	74
4.29. 500°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin göçme zarfları	74
4.30. Katkısız numunelerin göçme zarfları	75
4.31. %10 katkı içeren numunelerin göçme zarfları.....	75
4.32. %20 katkı içeren numunelerin göçme zarfları.....	76
4.33. %30 katkı içeren numunelerin göçme zarfları.....	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları	12
2.2. Tipik yüksek fırın cürufu bileşimleri.....	14
2.3. Deney sonuçları	23
2.4. Farklı normal gerilmeler altında tüm numunelerin maksimum kayma gerilmeleri.	26
2.5. Başlıca 5 tür pirofillit mineralinin tipik kimyasal içerikleri	30
2.6. Pirofillit termal faz dönüşümü.....	30
2.7. Pirofillitle işlenmiş S1 ve S2 kodlu zeminlerin farklı kürleme sürelerindeki serbest basınç değerleri.....	32
3.1. Çalışmada kullanılan zeminin geoteknik özellikleri	37
3.2. Tez çalışmasında kullanılan Pirofillit mineralinin kimyasal içerikleri.....	38
3.3. Tez çalışmasında kullanılan Pirofillit mineralinin fiziksel özellikleri.....	38
3.4. Deney programı	39
4.1. Katkı oranı-sıcaklık değişimine bağlı kompaksiyon karakteristikleri.....	46
4.2. Sıcaklık-katkı oranı değişimine bağlı kompaksiyon karakteristikleri	50
4.3. Sıcaklık değerlerine göre gruplandırılmış serbest basınç deneyi sonuç değerleri.....	55
4.4. Katkı oranlarına göre gruplandırılmış numunelerin SBD sonuç değerleri.....	57
4.5. Sıcaklık derecesine göre gruplandırılmış numunelerin dayanım parametreleri değerleri	62
4.6. Katkı oranına göre gruplandırılmış numunelerin dayanım parametreleri değerleri	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

A	Aktivite
τ	Kayma gerilmesi
σ	Normal gerilme
σ'	Efektif gerilme
c	Kohezyon
c_u	Drenajsız kohezyon
c'	Efektif kohezyon
ϕ	İçsel sürtünme açısı
γ	Birim hacim ağırlık
ρ_d	Kuru birim yoğunluk
w	Su muhtevası
w_{opt}	Optimum su muhtevası
G_s	Özgül ağırlık
q_{un}	Serbest basınç dayanımı
ϵ_u	Göçme anındaki birim deformasyon
kPa	Kilo paskal

Kısaltmalar

Açıklama

AASHTO	Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaştırma İdareciler Derneği
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
MKY	Maksimum kuru yoğunluk
OSM	Optimum su muhtevası
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopisi
UU	Konsolidasyonsuz-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi
XRD	X ışınımı kırımı

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde nüfus artışı ile birlikte yeni araziler üzerinde yapılaşma ihtiyacı doğmuştur. Fakat, her arazi yapılaşma için uygun mühendislik özelliklerine sahip olmadığı için çeşitli zemin stabilizasyon (iyileştirme) metotları geliştirilmiştir. Böylelikle, zeminlerin istenilen mühendislik özelliklerine sahip olması hedeflenmektedir. Zemin stabilizasyonu yöntemlerini yüzeysel stabilizasyon ve derin stabilizasyon yöntemleri olarak iki farklı kategoride sınıflandırabiliriz. Kimyasal stabilizasyon, yüzeysel stabilizasyon olarak adlandırılan, çeşitli katkı maddeleri (çimento, uçucu kül, kireç vs.) ile zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Derin stabilizasyon yöntemleri, teçhizat maliyeti ve uygun teçhizatın tedarikinde yaşanabilecek bazı sorunlardan dolayı planlama sorunlarına ve ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Yüzeysel zemin stabilizasyon yöntemleri ile derin zemin stabilizasyon yöntemlerine göre daha hızlı ve daha ekonomik çözümler üretilebilmektedir.

Artan nüfus artışına paralel olarak gerekli olan enerji ihtiyacı da artmıştır. Bu sebeple ülkemizde ve dünyada termik santraller, nükleer santraller gibi enerji üretim tesisleri sayısı ve çeşitliliğinde artış görülmektedir. Özellikle nükleer santral gibi yüksek sıcaklıkların mevcut olduğu tesislerde sıcaklığın zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi incelenmelidir çünkü yüksek sıcaklıkların etkisiyle zeminlerde veya atık sahalarında meydana gelebilecek problemler ciddi derecede insan sağlığı ve çevre sorunlarına yol açabilir. Bu sebeple tasarım aşamasındaki mühendislik özelliklerini uzun süre koruyabilen ve yüksek sıcaklığın olumsuz etkilerine karşı dayanıklı zeminlere ihtiyaç duyulmaktadır (Çirkin ve Aksoy, 2022). Zeminler, vahşi orman veya turba yangınları sebebiyle de yüksek sıcaklıklara maruz kalabilir. William (1997), Dünya çapında artan yangınlar sebebiyle sıcaklığın killi zeminler üzerine etkisine dikkat çekilmesine neden olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca, atıklar ile kirlenmiş zeminlerin ısı işlemler kullanılarak arıtılmasını incelemek için literatürde birçok çalışma mevcuttur. Günümüzde, tüm bu sebeplerden dolayı zeminler üzerinde sıcaklık etkisi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Kireç, çimento, uçucu küller zeminlerin çeşitli geoteknik özelliklerini geliştirmek için kullanılan geleneksel ve yaygın stabilizatörlerdir. Ancak kireç taşından kireç üretimi

yaklaşık 900°C ve 1100°C'lik yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen kalsinasyon süreçleri içerir ve bu süreçler CO₂ salınımı meydana getirir (Bell, 1996). Açığa çıkan CO₂ çevre üzerinde olumsuz etkilere sahip olacaktır. Ayrıca, kalsiyum bazlı minerallerin kontrolsüz tüketimi önemli bir sorun olup belirli yatakların aşırı kullanılması kaynakların tükenmesine yol açabilir (Birchal vd., 2000). Uçucu küller, pirinç kabuğu külleri gibi katkı malzemelerinin geoteknik problemlerinde kullanılması ağır metal içeriği nedeniyle yer altı suyu kirliliği gibi çevre ile etkileşimlerinde ciddi bir endişe kaynağıdır. Bu yüzden, mühendisler için hem çevre dostu hem de ekonomik bir yöntem benimsemek önemli bir konudur. Bu problemler, zeminin stabilize edilmesinde kalsiyum bazlı olmayan minerallerin kullanılmasıyla giderilebilir. Kalsiyum bazlı olmayan bu mineraller, geleneksel katkı maddelerine kıyasla daha ucuzdur. Bu nedenle, doğal mineral yataklarını etkin bir şekilde kullanmak amaçlanabilir.

Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı çalışmada kullanılan numuneler %0, %10, %20 ve %30 oranında pirofillit mineral katkıları ile stabilize edilmiş olup 100°C, 200°C ve 500°C sıcaklıklara maruz bırakılarak mühendislik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Standart Proktor Deneyleri, Konsolidasyonsuz-Drenajsız Üç Eksenli (UU) Deneyleri ve Serbest Basınç (SB) Deneyleri yapılarak zeminlerin hem katkı malzemesi oranı değişimiyle, hem de sıcaklık etkisiyle fiziksel ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Dolayısıyla katkı malzemesinin sıcaklık değişimi etkisiyle yüksek sıcaklığa karşı performansı da incelenmiştir. Bu çalışmada, ince daneli zemini farklı yüksek sıcaklıklara maruz bırakarak literatürde sıcaklığın mühendislik özelliklerine etkisine dair yapılan çalışmalara ve katkı malzemeleri ile stabilizasyon yöntemlerine daha önce geoteknik problemlerinde çok az kullanılmış olan “Pirofillit Minerali” kullanarak katkı sunmak amaçlanmıştır.

Birinci bölümde, çalışma konusunun amaç ve kapsamı detaylı bir şekilde ele alınmıştır. İkinci bölümde, stabilizasyon yöntemleri, kimyasal stabilizasyon yöntemleri, pirofillit minerali ve sıcaklığın zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi hakkında literatür çalışması yapılmıştır. Üçüncü bölümde, materyal ve yöntem açık bir şekilde ifade edilmiştir. Dördüncü bölümde, ilgili deneylerin sonuçları paylaşıp bulgular arasındaki ilişkiler tartışılmıştır. Beşinci bölümde ise çalışma hakkında öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Zemin Stabilizasyonu ve Yöntemleri

Giriş bölümünde belirtildiği gibi günümüzde artan yapılaşma ihtiyacından dolayı yeni araziler üzerinde inşaat faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi kaçınılmaz olup bu arazilerde çeşitli mühendislik problemleriyle karşılaşmaktadır. Bu karşılaşılan mühendislik sorunlarının çözümleri için çeşitli iyileştirme yöntemleri sahaya özgü koşullar neticesinde uygulanmaktadır.

Stabilizasyon; zeminin hedeflenen mühendislik özelliklerinin çeşitli yöntemler ile iyileştirilmesi olarak açıklanır ve iyileştirme, ıslah, sağlamlaştırma olarak adlandırılabilir. Ayrıca projenin özelliğine göre; taşıma gücü kapasitesini arttırmak, beklenen oturmaları ve deformasyonları azaltmak veya önlemek, geçirimsizliği azaltmak gibi amaçları olabilmektedir (Uzuner, 2000).

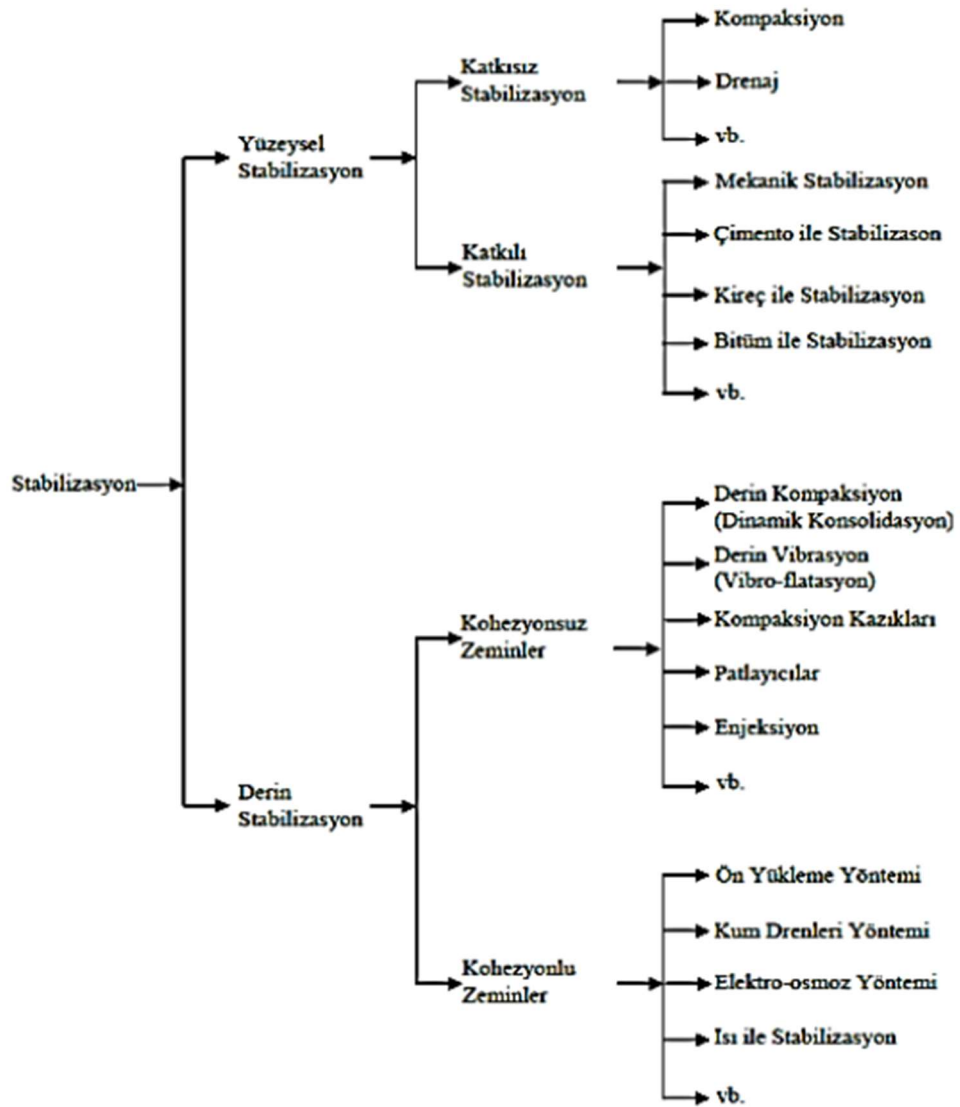
Zemin içerisindeki mevcut boşlukların azaltılması, zemin boşluklarının çeşitli karışımlar enjekte edilerek doldurulması, yer altı su seviyesinin düşürülmesi veya zeminin su içeriğinin azaltılması ya da çeşitli yöntemlerin uygulanmasıyla zeminin mevcut mühendislik karakteristiklerinin güçlendirilmesi zemin stabilizasyonunun temel ilkeleridir (Sağlam, 1985).

Zemin iyileştirme yöntemlerini yapı yükleri ve iyileştirme derinliği koşullarına göre yüzeysel ve derin stabilizasyon olarak iki farklı kategoride incelemek mümkündür.

Yüzeysel Stabilizasyon: Zeminlerin fazla derinliklerde işlem yapmaya ihtiyaç duymadan yüzeysel olarak iyileştirme yapılması işlemidir ve genellikle üst yapı yüklerinin fazla olmadığı projelerde uygulanır. Yüzeysel zemin ıslahı, katkılı ve katkısız zemin stabilizasyonu olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Özyıldırım (1989), katkısız zemin stabilizasyonunun, mevcut zeminin herhangi bir katkı malzemesi ilave edilmeden yapılan iyileştirmeler olduğunu ve katkılı stabilizasyonun zeminlere çeşitli katkı maddeleri enjekte

ederek bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmek ve buna bağlı olarak istenilen mühendislik özelliklerini geliştirmek olduğunu ifade etmektedir.

Derin Stabilizasyon: Zemin yüzeyinden metrelerce derinliklere kadar iyileştirme işlemlerinin uygulandığı yöntemdir ve genellikle üst yapı yüklerinin çok fazla olduğu projelerde uygulanır. Derin iyileştirme yöntemleri, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilecek olmasına göre iki farklı kategoride sınıflandırılır. Yeşilyurt (2022), başlıca derin iyileştirme yöntemlerini jet grout, enjeksiyon, vibro kompaksiyon, taş kolonlar olarak ifade edilebileceğini belirtmiştir.



Şekil 2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri (Yılmaz, 2015; Tuğlu, 2022)

2.2. Katkı Malzemeleri ile Zemin Stabilizasyonu

Kimyasal tekniklerle stabilizasyonun sağlanması zeminin içerisine bazı katkı malzemeleri katılarak zeminin katılan malzemeler ile reaksiyon oluşturmaları neticesinde zemin özelliklerinde iyileştirmeye gidilmesidir (Lambe vd., 1990).

Son yıllarda, katkı malzemeleri kullanarak, problemli zeminlerin mühendislik özellikleri üzerinde iyileştirilme sağlanıp sağlanamayacağı araştırılmaktadır. Yüksek inşaat maliyetlerinin düşürülmek istenmesi nedeniyle alternatif katkı malzemeleri ile zemin iyileştirme yöntemleri araştırılmaktadır. Atık malzemelerin stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmasına ilişkin çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir (Yeşilyurt, 2022).

Günümüzde maden atıklarının artması ve depolanmasının zorlaşması nedeniyle, bu atıkların geri dönüşümü ve tekrar değerlendirilebilmesi oldukça önem kazanmıştır. Madensel atıkların fiziksel özelliklerinin zemin yapısıyla uyumlu olması, geoteknik mühendislerini bu atıkların zemin iyileştirme işlemlerinde kullanılması konusunda bilimsel araştırmalara yöneltmiştir. Akademik araştırmalar, bazı madencilik ve endüstriyel atıkların zeminlere ilave edilmesinin, zemin mukavemet özelliklerini geliştirdiğini ve katkılı zemin stabilizasyonuna çeşitli faydalar sağladığını ortaya çıkarmıştır (Balatan, 2019).

Edil (2011), genellikle yüksek miktarda atık malzeme oluşturan ve temin edilmesi ekonomik ve hızlı olan endüstriyel ya da madensel atık malzemelerin, zeminlerin stabilizasyon işlemlerinde kullanılmasının daha uygun olacağını ifade etmiştir.

Kocabey (2019), zemin stabilizasyonunu problemli zeminlere katkılar eklenerek mühendislik özelliklerinde iyileşme olarak tanımlamış olup kireç, çimento, bitüm ve uçucu külün sık kullanılan katkılar olduğunu ifade etmiştir.

2.2.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu

Özellikle ince daneli zeminleri stabilize etmek için yaygın olarak kullanılan kireç türleri; yüksek kalsiyumlu hidratlı kireç [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], kalsitik sönmemiş kireç (CaO) vb. kireç türleridir. Zeminlerinin çoğunu stabilize etmek için kullanılan kireç miktarları genellikle

%5-%10 civarındadır. Killi bir zemine kireç katkısı eklendiğinde iki reaksiyon meydana gelir; kation değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon. Bu reaksiyonlarda killeri ilişkili tek değerliye sahip kationların yerini iki değerlikli kalsiyum iyonları alır. Kationlar, bu değişim işlemi için afinitelerine göre bir seri halinde sıralanabilir:



Herhangi bir kation yakınındaki iyonların yerini alabilir. Örneğin kalsiyum iyonları bir kildeki potasyum ve sodyum iyonlarının yerini alabilir. Flokülasyon-aglomerasyon, kil partiküllerini daha büyük partiküller oluşturması için bir araya toplama eğilimi olarak tanımlanabilir. Flokülasyon-aglomerasyon, killi zeminin dokusunda önemli bir değişiklik meydana getirir. Böylece, likit limit azalır ve plastik limit artar dolayısıyla plastisite indeksi azalır, büzülme limiti artar, işlenebilirlik artar ve zeminin mukavemet-deformasyon performansı iyileşir.

Zemin ve kireç arasındaki puzolanik reaksiyon, kireç ile zeminin silika ve alüminası arasında çimento malzemesi oluşturmak için bir reaksiyon içerir. Bu reaksiyon şu şekildedir:



Burada, C = CaO, S = SiO₂ ve H = H₂O'dur. Puzolanik reaksiyon uzun bir süre boyunca devam edebilir.

Kirecin ilk %2-%3'lük katkısı zeminin işlenebilirliğini ve mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Zeminlere kireç ilavesi aynı zamanda sıkıştırma özelliklerini de etkiler (Das ve Sivakugan, 2016).

Phanikumar ve Raju (2020), CH sınıfı kil zemine çeşitli oranlarda kireç çamuru ve her bir kil-kireç çamuru karışımına ayrıca %10 çimento ekleyerek ve farklı gün sayılarında kürleyerek killerin çeşitli indeks ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kireç ilavesi sayesinde şişen zeminlerin suya karşı hassasiyetinin azaldığını ve şişme problemine karşı partiküller arasında güçlü bağlar oluşturduğunu ifade ederek hazırladıkları karışımlarda kireç çamuru içeriğinin artırmasıyla Serbest Şişme İndeksi değerlerinde önemli ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Kireç içeriğinin artmasıyla birlikte, kireç tarafından suyun adsorbsiyonu nedeniyle optimum nem içeriği de artmıştır. Kil-kireç karışımlarına %10

çimento eklendiğinde, maksimum kuru yoğunluk düşük kireç içeriklerinde bile artmıştır. Kireç artışıyla hem serbest basınç dayanımlarında hem de CBR değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Kirece ek olarak %10 çimento eklendiğinde tüm karışımlarda çimentosuz karışımlara göre dayanım artışları gözlemlenmiştir.

Zeminin kireç ile stabilizasyonunda Ca^{2+} iyonlarının yüksek yüklemesi nedeniyle kil partikülleri birbirine yapışır (koagülasyon). Koagülasyon nedeniyle sürtünme açısı artar ve kohezyon değeri de yükselir. Kireç ilavesi, sonuç olarak zeminin mukavemetinin artmasına neden olarak yük taşıma kapasitesinin artmasına yol açar (Szendefy, 2013).

Manzoor and Yousuf, (2020) kireç uygulamasının genel zemin mukavemeti üzerindeki etkisini kontrol etmek için Serbest Basınç, Kaliforniya Taşıma Oranı ve Üç Eksenli Basınç deneylerini gerçekleştirmiş ve sürekli puzolanik reaksiyonlardan kaynaklanan çimentolaşma süreci nedeniyle optimum bir kireç ilavesi değerine kadar kayma dayanımı, çekme mukavemeti ve taşıma kapasitesinde net bir artış olduğunu bildirmişlerdir.

Oluwatuyi vd. (2020), stabilizasyonun ham petrolle kirlenmiş kaolin kilinin dayanım, sıkışabilirlik, sızıntı ve rijitlik gibi çeşitli geo-çevresel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Kireç ve çimento 1:2 oranında karıştırılmış ve ham petrolle kirlenmiş kaolin kiline farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) ve farklı kür sürelerinde (0g, 7g, 14g, 28g) stabilize edici bağlayıcı olarak eklenmiştir. Katkısız kilin serbest basınç değeri 116 kPa iken 28 gün kürlü %15 katkılı numunenin değeri 1160 kPa olmuştur. %15'ten sonraki katkılı numunelerin serbest basınç değerlerinde (örneğin %20 katkılı numuneler) az da olsa bir düşüş meydana gelmiş olup bu yüzden optimum katkı oranının %15 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sekant modülünün (E_s), katkı ve kür oranı ile değişimini incelemişlerdir. Çimento-kireç içeriğinin %5'ten %15'e çıkarılmasıyla, stabilize kilin sekant modülü değerleri kürlenmemiş ve 28 günlük kürlenmiş numuneler için sırasıyla 3,12 MPa'dan 3,8 MPa'ya ve 21,33 MPa'dan 35,26 MPa'ya yükselmiştir. %20 çimento-kireç ilavesiyle, stabilize kilin sekant modülü değerleri kürlenmemiş ve 28 günlük kürlenmiş numuneler için sırasıyla 3,52 MPa ve 33,68 MPa'ya yükselmiştir. Araştırmacılar, stabilize edici bağlayıcı ve kil numune arasındaki reaksiyonun hızlı bir biçimde gerçekleşen katyon değişimi ve parçacık kümelenmesiyle (particle aggregation) başladığını ve bunun numunelerdeki dayanım artışının ana sebebi olabileceğini ifade etmişlerdir.

Bao vd., (2022) yaptıkları çalışmada dört farklı sıcaklık seviyesinde (30°C, 100°C, 200°C ve 300°C) muamele edilen beş kireç içeriğine (%0, %3,5, %7, %10,5 ve %14) sahip yüksek sıcaklık altında kireçle stabilize edilmiş l s n mekanik, mukavemet özelliklerini ve i  mineral değişimlerini araştırmıştır. Sıcaklık arttı  a serbest basınç ve kesme dayanımlarında artış ve kireç katkısının belirli bir orana kadar dayanıma olumlu etki sağladığı görülmüştür. En yüksek mukavemet parametreleri (c ve  ) %7 kireç katkısında, en yüksek dayanım değeri %7 katkı ve 300°C sıcaklıkta görülmüştür. Araştırmacılar XRD ve diğer termal analiz sonuçlarına göre mukavemet artışının esas olarak sönmemiş kireç s n ml me (the quicklime slaking reaction) reaksiyonu, puzolanik reaksiyon ve kristalleşme reaksiyonundan kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Rao ve Pupanna (2005), zemin numunelerine %4 ve %7 kireç ilave edip 25°C sıcaklıkta ve 1 saat ile 400 gün arası değişen çeşitli zaman aralıklarında k rleyip pH, iletkenlik ve serbest basınç dayanımı değişimlerini incelemişlerdir. K rleme süresi arttı  a pH ve iletkenlik değerlerinde azalma görülmüş olup sebebini kil kafesinin     nmesinde hidroksil iyonlarının tüketilmesi ve kireç-montmorillonit puzolanik reaksiyonlarının reaksiyon ürünlerine kalsiyum ve sodyum iyonlarının katılması olarak açıklamışlardır. Dayanım değerlerinde ise ciddi artışlar görülmüştür, bu artışların sebebini puzolanik reaksiyonlara dayandırmışlardır. Ayrıca, daha önceden literatürde yapılmış bir çalışmayı baz alarak daha yüksek kürleme sıcaklığının kireç-zemin arasındaki reaksiyona olumlu etkidiğini açıklamışlardır.

2.2.2. Çimento ile zemin stabilizasyonu

Çimento literatürde doğal kireçtaşı ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen bağlayıcı malzeme olarak ifade edilmektedir. Çimento stabilizasyonunda kohezyonlu ve organik olmayan iyi derecelenmiş granüler zeminler ve düşük plastisiteli kill r de kullanılmaktadır. Çimento, özellikle otoyol ve toprak barajların yapımında, zemin için stabilize edici bir malzeme olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ayrıca  imento, şev stabilizasyonu, derin kazı stabilizasyonu ve dolgu altındaki konsolidasyon oturmalarını hızlandırmak için de kullanılır. Portland  imentosu genellikle yüzey stabilizasyonu için kullanılır. Portland  imentosunun iyileştirme

projelerinde yaygın olarak kullanılmasının temel nedeni, kolay tedarik edilmesi, yüksek mukavemete sahip olması ve diğer bazı kimyasal karışımlara göre daha ucuz olmasıdır (Ghabaee, 2015).

Çimento kullanırken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar zemin sınıfı ve su/çimento oranıdır. Düşük veya aşırı su miktarı, plastisite ve basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Kılıç, 2008). Çimentonun su ile temasından sonra hidrasyon reaksiyonu hızlı bir şekilde başlar. Zeminin çimento ile ıslah edilmesi, kireç ile stabilizasyonda gerçekleşen reaksiyonlara benzer reaksiyonlar üretir. Portland çimentosunun hidrasyonu, farklı bileşikler ve jeller oluşturan ve zeminin kimyasal yapısında değişime neden olan bir pozolanik reaksiyondur. Hidrasyon reaksiyonu iki aşamadan oluşur, ilk aşamada taneler arasında bağlar oluşur ve ikinci aşamada zeminin sertleşmesine yol açan pozolanik reaksiyonlar oluşur. Bu kimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak, zemin stabilizasyonu için en önemli aşama ikinci aşama olan pozolanik reaksiyondur. Pozolanik reaksiyon zeminin türüne bağlı olarak gelişebilir. Pozolanik reaksiyon sona erene kadar karışımının mukavemeti artmaya devam eder (Bergado ve Anderson, 1996).

Portland çimentosunun hidrasyon reaksiyonu:



Pozolanik reaksiyonu:



(C₂S:Dikalsiyumsilikat, C₃S:Trikalsiyumsilikat, aq:Su, CSH:Kalsiyumsilikahidrat, CH:Kalsiyumhidroksit, C:CaO, S:SiO₂, H:H₂O)

Granüler topraklar ve düşük plastisiteye sahip killi zeminler çimento stabilizasyonu için en uygun olanlardır. Kalsiyum killeri çimento ilavesiyle daha kolay stabilize olurken, doğası gereği genişleyen sodyum ve hidrojen killeri kireç stabilizasyonuna daha iyi yanıt verir. Bu nedenlerden dolayı, stabilize edici malzemenin seçiminde gerekli özen gösterilmelidir. Ayrıca, kireçte olduğu gibi çimento da killi zeminin likit limitini düşürmeye, plastisite indeksini ve işlenebilirliğini artırmaya yardımcı olur. Çimento stabilizasyonu, likit limit 45 ila 50'den az ve plastisite indeksi yaklaşık 25'ten az olduğunda killi toprak için etkilidir (Das ve Sivakugan, 2016).

Hashemi vd., (2022) çalışmalarında CL sınıfı kaolinit kilini farklı oranlarda çimento (%0, 5, 10 ve 20) ile karıştırıp 7 gün süreyle kürlemiştir ve 25-600°C arası değişen sıcaklıklara maruz bırakarak konsolidasyon ve geçirgenlik katsayılarındaki değişimleri incelemiştir. Çimento içermeyen numunelerin geçirgenlik katsayısı sıcaklık 400°C'ye yükseldikçe artmıştır. %10 çimento içeren numunelerin geçirgenlik katsayısı ise sıcaklık yükseldikçe azalmıştır. Böylece, % 10 çimento ilavesinin nükleer atık gömülmesinin zararlı çevresel zorluklarını azaltmada etkili olabileceğini önermişlerdir.

Tran vd., (2023) yaptıkları çalışmada kürleme sıcaklığının çimento hamurunun hidrasyon süreci ve çimento ile stabilize edilmiş kohezyonsuz veya kohezyonlu zeminler üzerindeki etkilerini incelenmiş ve tartışmıştır. Yaptıkları literatür incelemeleri sonucunda, stabilize edilmiş zeminler donma sıcaklığının altında kaldığında, zemin türünden bağımsız olarak daha düşük bir hidrasyon oranı kaydedildiğini ve yüksek kürleme sıcaklıklarında (çalışmada incelenen 50°C'ye kadar) daha yüksek hidrasyon oranları ve daha fazla mukavemet kazanımı ile sonuçlandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, çimento ile stabilize edilmiş zeminlerin kürleme sıcaklığındaki artış ile nihai mukavemetinin kazanılmasında olumlu etkidiği belirtilmiştir.

Pandey ve Rabbani (2017), araştırmalarında kompaksiyon, plastisite ve dayanım özelliklerini geliştirmek için çimento kullanarak zemin stabilizasyonunu incelemiştir. Zemin numunesinin serbest basınç dayanım değerlerini çimento oranı ve kür süresi ile arttığını, çimento oranı artışıyla optimum su muhtevasında artış gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

Shooshpasha ve Shirvani, (2015) yaptıkları çalışmada kumlu zemine %2.5, 5 ve 7.5 oranlarında kireçli Portland çimentosu eklemiştir ve 7, 14 ve 28 gün süreyle kürlemiştir. Deney sonuçlarına göre, kireç oranı artışıyla optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukta sırasıyla azalma ve artış görüldüğünü, kireç oranı artışıyla birlikte serbest basınç dayanımının doğrusal bir artış gösterdiğini ayrıca kürleme süresinin de dayanım değerlerine olumlu etkilediğini, kayma mukavemeti parametreleri açısından ise artan katkı oranıyla hem kohezyon hem içsel sürtünme açısında artış olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca kohezyonun, içsel sürtünme açısına göre daha belirgin artış gösterdiğini

ve katkı artışıyla zeminin daha gevrek yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu gevrek davranışı, elastisite modülündeki artışla ve birim deformasyonda azalmayla açıklamışlardır.

2.2.3. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu

Türker vd. (2003), uçucu külün, termik santrallerde toz şeklindeki kömürün yakılmasıyla oluşan ve siklonlarda veya elektrostatik çökticilerde toplanan baca gazları tarafından taşınan önemli bir yan ürünü olduğunu ifade etmiştir. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu ortaya çıkan erimiş malzeme soğutulur ve gaz akışıyla kısmen veya tamamen küresel olan çok ince kül parçacıklarına (0,5-150 mikron) dönüştürülür.

Uçucu külün ana bileşenleri SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün türüne göre değişmektedir (Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2). Ayrıca, MgO , SO_3 , alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı değer aralıkları uçucu külün türünü karakterize etmektedir (Türker vd., 2003).

Uçucu küller ASTM C 618 standardına göre C ve F olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar:

a) Toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı %70'in üzerinde olan ve bitümlü kömürden üretilen uçucu küller F sınıfına aittir. Aynı zamanda bu tip uçucu küllerde CaO oranı %10'dan az olduğundan düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılır. F sınıfı uçucu küller, puzolanik karakteristiğe sahiptir.

b) Toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan ve linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilenler C sınıfı uçucu küllerdir. Aynı zamanda, CaO oranı %10'dan fazla olduğu için C sınıfı uçucu küller, yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılır. Bu tür uçucu küller, puzolanik özelliğine ilaveten ayrıca bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

Çizelge 2.1. Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları

Kimyasal İçerik	F Sınıfı Kül	C Sınıfı Kül
SiO ₂	43,6-64,4	23,1-50,5
Al ₂ O ₃	19,6-30,1	13,3-21,3
Fe ₂ O ₃	3,8-23,9	3,7-22,5
CaO	0,7-6,7	11,5-29,0
MgO	0,9-1,7	1,5-7,5
Na ₂ O	0-2,8	0,4-1,9
Kızdırma Kaybı	0,4-7,2	0,3-1,9

Alkaya (2009), termik santrallerde üretilen uçucu kül miktarının aşırı miktarda artması ile uçucu külü atık olarak depolamak yerine, yan ürün olarak değerlendirebilmenin yollarını aramak gerektiğini ifade etmiştir. Uçucu külün özelliklerinden yararlanılarak, zemin iyileştirme malzemesi olarak stabilizasyon işlemlerinde kullanılabilmesi ile kötü mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin iyileştirilmesinde ekonomik bir çözüm olacağını, farklı kullanım alanları tespit edilerek kullanımın arttırılması ile depolanma sonucu oluşan çevre sorunlarını azaltmanın yanında termik santrallerin etkinliğinin artacağını belirtmiştir.

Raman vd., (2016) üç farklı killi numuneler (CL, CH) numunelere %12 oranında uçucu kül ilave edip 0°C'den 250°C'ye değişen farklı sıcaklıklarda test etmiştir. Bu çalışma, zeminlerin kayma mukavemetinin iyileştirilmesini belirlemek, sorunlu zeminlerin özelliklerini iyileştirmede optimum uçucu kül yüzdesini belirlemek ve zeminlerin şişme potansiyelini azaltmak için yapılmıştır. Sonuç olarak sıcaklık arttıkça zeminin Atterberg limiti azaldığını, basınç dayanımında bir artış, zeminin şişme özelliği, sıcaklık arttıkça serbest şişme indeksinde azalma ve sıcaklığın artışı ile optimum nem içeriğinde azalma, kuru yoğunlukta artış görüldüğünü ifade etmişlerdir.

Kireç ve uçucu kül stabilizasyonunun temel mekanizması, ilk aşamada etki değişimi ve flokülasyonu içerir ve daha sonra daha uzun bir süre devam eden puzolanik reaksiyonlar meydana gelir. Zemin özelliklerinde önemli değişiklikler meydana gelir ancak bu değişiklikler zemin mineralojisine, kireç türüne, zamana, sıcaklığa vb. bağlıdır. Uçucu kül ile işlenmiş zeminler de sıkıştırılabilirlikte kayda değer bir düşüş göstermiş ve dönüşümlü

ıslanma-kuruma veya donma-çözülme döngülerinden kaynaklanan mukavemet kaybına karşı daha fazla direnç göstermiştir (Khillar vd., 2022).

Savaş vd., (2018) yaptıkları C ve F sınıfı uçucu külleri kullanarak dispersif zeminlerin stabilizasyonunda kullandıkları çalışmada, C sınıfı uçucu külün F sınıfına göre dispersif zeminin stabilizasyonunda daha etkili olduğunu ve bunun C sınıfı küldeki kireç içeriğinin daha yüksek olması sebebiyle F sınıfı uçucu kül içeren numunelere göre daha fazla katyon değişimi, flokülasyon ve aglomerasyon olayı meydana gelmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Uçucu külle stabilize edilmiş zeminlerin sürdürülebilirliğini artırmak için ikincil katkı maddelerinin (enzim ve kireç) etkinliğini ortaya koyulması amaçlanmıştır. 1:500 oranında seyreltilmiş enzimin %1'i ile birleştirildiğinde uçucu kül stabilizasyonunun etkinliğinin önemli ölçüde artırılabilceği bulunmuştur. %2 kireç ilavesi de taşıma kapasitesini artırmıştır. Kombine katkı maddeleriyle stabilize edilen üstyapı, üstyapının aşınma tabakası kalınlığını %60'a kadar azaltmaktadır; bu da üstyapının toplam maliyeti açısından tasarrufun yanı sıra katkı maddesinin üretiminde karbon ayak izinin azaltılması ve uçucu kül bağlayıcıların atıklarının azaltılması gibi sürdürülebilirlik etkileriyle doğrudan ilişkilendirilebilir. Bu araştırmanın faydaları arasında uçucu kül atıklarının değerlendirilmesi, aşınma tabakası malzemesi olarak kullanılan doğal kaynaklardan tasarruf edilmesi ve stabilizasyon için alternatif bir çözüm geliştirilmesi yer almaktadır (Renjith, 2021).

2.2.4. Yüksek fırın cürufu ile stabilizasyon

Yüksek fırın cürufu (YFC), demir üretiminde bir yan ürün olarak ülkemizde her yıl büyük miktarlarda üretilmekte ve çelikhane cürufu ile birlikte, demir-çelik üretim endüstrisinde yan ürün olarak ortaya çıkan ürünlerin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu işlemlerde bir tonluk demir-çelik üretimi sonucunda yaklaşık 400 kg civarında cüruf atığı ortaya çıkmaktadır. Bu 400 kg'lık cüruf atığının yaklaşık olarak 250 ile 300 kg kadarı yüksek fırın cürufu, 100 ile 150 kg civarı ise çelikhane cürufundan oluşmaktadır.

Ergitme işlemi, kok kömürü malzemesinin bir yüksek fırında yaklaşık 3.000°C sıcaklıkta yakılmasıyla erimiş demire indirger. Cüruf malzemesi, akışkandaki kirecin (kireçtaşı veya dolomit) demir cevheri ve kok kömürü külündeki silika ve alümina ile kimyasal olarak birleşmesiyle oluşur. Çizelge 2.2'de yüksek fırın, cüruf malzemesinin tipik mineralojik bileşimleri listelenmektedir.

Çizelge 2.2. Tipik yüksek fırın cürufu bileşimleri (Lewis, 1982)

Constituent	Weight (%)
Lime (CaO)	32 – 45
Magnesium oxide (MgO)	5 – 15
Silica (SiO ₂)	32 – 42
Alumina (Al ₂ O ₃)	7 – 16
Sulphur (S)	1 – 2
Iron oxide (FeO, Fe ₂ O ₃)	0.1 – 1.5
Maganese oxide (MnO)	0.2 – 1.0

Pathak vd., (2014) kil zemini stabilize etmek için ve çeşitli mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi incelemek için kuru numune ağırlığına göre belirli yüzdelerde (%0, %5, %10, %15, %20, %25) öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu malzemesi kullanmıştır. YFC yüzdesinin artmasıyla optimum nem içeriği azalmaya devam ederken maksimum kuru yoğunluk artmakta olduğu görülmüş olup, dolayısıyla zeminin sıkıştırılabilirliği artmakta ve zemini daha yoğun ve sert hale getirmektedir. Üç eksenli test sonucu, YFC yüzdesi arttıkça kohezyonun (c) azaldığını, iç sürtünme açısının (ϕ) ise önemli ölçüde arttığını ve böylece zeminin daha az kohezyonlu ve daha dirençli hale geldiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, YFC yüzdesi artışıyla serbest basınç dayanım değerleri artmıştır ve bu artış, katkı malzemesiyle parçacıkların daha yakın şekilde konumlanması ve boşluk oranının azalmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Patil vd., (2021), zeminin stabilizesi için kullandıkları yüksek fırın cürufu ve uçucu kül karışımının stabilize performansı açısından optimum karışımı %15 uçucu kül ve %5 yüksek fırın cürufu olduğunu ifade etmişlerdir ve uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkı oranı arttıkça maksimum kuru yoğunlukta artış, optimum su muhtevasında azalım olduğunu ifade etmişlerdir.

Dispersif killer, granüle yüksek fırın cürufu ve bazik oksijen fırın cürufu kullanılarak tatmin edici bir şekilde stabilize edilebilir. Özellikle bazik oksijen fırın cürufu uygulaması, zemin dağılımının üstesinden gelebilir, plastisite indeksinde bir düşüşe neden olabilir ve basınç dayanımını artırabilir. Kısa kürlenme sürelerinde, bazik oksijen fırın cürufu ve yüksek fırın cürufunun dispersiviteyi kontrol etmedeki rolü esas olarak iyon değişimi fenomenine atfedilebilir. Bu aynı zamanda katkı maddesi içeriği arttıkça EC (elektriksel iletkenlik) değerinin artması, daha floküle bir yapıya neden olması ve erozyona daha az eğilimi olan daha büyük partiküller üretmesi ile de açıklanabilir. SEM mikrografları da yeni çimentolaşma bileşiklerinin oluşumunu desteklemekte ve kil mineralinin XRD pik yoğunluğunda gözlemlenen azalma ile tutarlı olarak işlenmiş zemin numunelerinde yönlenmiş yapının floküle yapıya doğru yeniden düzenlendiğini ortaya koymaktadır (Goodarzi ve Salimi, 2015).

Smaida vd., (2023) farklı oranlarda kum ve silt içeren numunelere belirli oranlarda yüksek fırın cürufu ilave ederek stabilizasyon tekniğini değerlendirmek için bir dizi testler gerçekleştirmişlerdir. Serbest basınç dayanımı ve kesme dayanımı değerleri aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu yüzdesine ve kür süresine bağlı olarak iyileşmektedir. Katkı yüzdesinin, priz süresi boyunca zeminin mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Katkı maddesindeki artışın, daha iyi zemin güçlendirmesi anlamına gelen iyi derecelendirilmiş dane dağılımları ile sonuçlanmasına neden olduğunu ve kırılmış kum (crushed sand) karışımlarının sıkıştırılabilirliği silt karışımlarından daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, katkının zeminin kompaksiyon özelliklerine olumlu etkidiği görülmüştür.

2.2.5. Diğer katkı malzemeleri ile stabilizasyon

Günümüzde, inşaat projelerinde yüksek ve güvenilir performans ve dayanıklılık beklentileri vardır. Farklı katkı malzemeleri zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirerek bu beklentileri karşılamakta büyük kolaylıklar sağlayabilir. İnşaat projelerinin maliyetleri, malzeme maliyetleriyle doğrudan ilişkili olduğundan daha ekonomik katkı malzemelerinin ve optimum dozajlarının tespit edilmesi bir gerekliliktir. Çimento, kireç, uçucu kül gibi geleneksel zemin stabilizasyon malzemelerinin çevresel etkileri, üretimindeki CO₂ salınımı ve maliyetleri göz önüne alındığında çevre dostu alternatifler arayışı önemli bir konu haline

gelmiştir. Ayrıca, malzeme bilimi ve geoteknik mühendisliği alanındaki ilerlemeler, yeni katkı malzemelerinin geliştirilmesine ve mevcutların iyileştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sebeplerden dolayı son yıllarda, çeşitli katkı malzemeleri ve geosentetik malzemeler kullanılarak zemin stabilizasyonu üzerine yapılan araştırmaların arttığı gözlemlenmektedir ve geoteknik mühendisliğinin önemli bir konusu haline gelmiştir.

Şişen zeminlerin stabilizasyonunda zeminin şişme davranışını iyileştirmek için kalsiyum klorit ve sodyum klorit çoğunlukla kullanılmaktadır. Ancak, tuzların zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisi zemin türü ve içeriğine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bugüne kadar yapılmış çalışmalar incelendiğinde; özellikle yüksek limit değerlerine sahip olan zeminlerde etkili olduğu görülmektedir. Zeminlerin su muhtevalarını korumasını, büzülme limitinin ve kayma dayanımının artmasını sağlarlar. Ayrıca zemin içerisindeki suyun donma derecesinin düşmesini sağlamalarıyla donmadan kaynaklanan şişme probleminin iyileştirilmesinde başarılı olarak kullanılmışlardır (Demir ve Kılıç, 2010; Çetin, 2003).

Endüstriyel atıkların bir araya getirilmesiyle oluşturulan geopolimerlerin zemin dayanımını etkili bir şekilde iyileştirdiği keşfedilmiştir. Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltisi mukavemeti artırabilir. Bu nedenle, cüruf ile oluşturulan geopolimer aracılığıyla zemin güçlendirmesi, zeminin mekanik özelliklerini geliştirmek için etkili ve uygun maliyetli bir teknik olabilir. Zemin içinde geopolimer emülsiyonlarının oluşumu SEM ve XRD testleri ile doğrulanmıştır. Sertleşmeden (solidification) sonra yeni mineraller oluşmadığından, geopolimer emülsiyonlarının bağlayıcı etkisi kaçınılmaz olarak zayıf zeminlerin mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Endüstriyel atık bazlı geopolimerler ile zemin stabilizasyonu, zemin iyileştirme, alt temel ve kaplamaların temel tabakasına fayda sağlayabilir. Ayrıca, bu zemin stabilizasyon yöntemi sadece endüstriyel katı atıkların daha iyi kullanılmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda son derece uygun maliyetli ve çevresel olarak sürdürülebilirdir. Geopolimer ile işlenmiş endüstriyel atıkların kullanımı doğal kaynakları korur, çevre dostudur ve tarım arazileri üzerindeki bertarafı en aza indirmeye yardımcı olur (Ayoub ve Khan, 2023).

Çimen vd., (2020), yüksek plastisiteli (CH) Eşen kiline ve Sodyum Bentonit kiline %2 ve %10 oranlarında amorf silika katkısı ilave ederek likit limit, plastik limit,

kompaksiyon, tek eksenli serbest basınç ve sabit hacimli şişme testleri gerçekleştirmiştir. Amorf silika katkısının likit limit ve plastisite değerlerini azaltırken plastik limit değerini artırdığı, kuru birim hacim ağırlıkta artış sağladığı gözlemlenmiştir. %10 katkının Eşen kilinin, %2 katkının bentonitin serbest basınç dayanımında daha etkili olduğu ve ayrıca şişme basıncının azaltılmasında etkili olmadığı ifade edilmiştir. Araştırmacılar, şişmenin azaltılması için amorf silikanın kile kireç ile birlikte karıştırılmasının verimli olabileceğini önermiştir.

Savaş (2016), CH ve ML sınıfı iki farklı zemine %2 oranında kireci sabit tutarak farklı oranlarda (%0, %1, %3, %6, %10, %15 ve %20) zeolit katkısı ekleyerek dağılma, şişme, konsolidasyon, iğne deliği deneylerini kireç ve doğal zeolitin dispersif zeminlerin şişme ve konsolidasyon özelliklerine etkisini incelemek için gerçekleştirmiştir. Kireç ve zeolit katkıları zeminlerin şişme ve dispersif özelliklerini etkili bir şekilde iyileştirmiştir. Bu iyileşme, zeminlerin farklı değiştirilebilir sodyum yüzdesi değerlerine bağlı olarak farklı katkı seviyelerinde gerçekleşmiştir. Ayrıca, dispersif zeminlerin sıkıştırılabilirliği önemli ölçüde azalmıştır, ki bu durumun sebebi kirecin, zeolit ve zemin arasındaki puzolanik reaksiyonu olarak ifade edilmiştir. Test sonuçlarına göre, %2 kireç ve %3 doğal zeolit, dispersif zeminlerin şişme potansiyelini azaltmada en etkili stabilizatör olmuştur. Bu sonuçlar, kireç ve zeolit katkılarının dispersif zeminlerin iyileştirilmesinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Saran ve Demiröz, (2022), bazalt fiber ve uçucu kül ile stabilize edilmiş problemlili kil zeminin geoteknik özelliklerini araştırmak amacıyla deneysel ve istatistiksel bir çalışma gerçekleştirmiştir. %3 kireç ilavesi puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla her numunede uygulanmıştır. Bazalt fiber içeriğinin kompaksiyon üzerinde bir etkisi olmadığını fakat kireç ve uçucu kül ilavesiyle birlikte optimum su muhtevası değerleri artarken maksimum kuru yoğunluk değerinin azaldığı görülmüştür. Bazalt fiber ve uçucu kül katkısı ile serbest basınç ve çekme dayanımında büyük oranda artış gözlemlendiğini, bazalt fiber uzunluğunun serbest basınç dayanımı üzerinde etkisi olmadığını ifade etmişlerdir. 18 mm bazalt fiber uzunluğu, %1 bazalt fiber, %10 uçucu kül ve 56 gün küresi Her iki deney için optimum parametreler olarak elde edilmiştir.

Luan vd., (2023) yaptıkları çalışmada vinil asetat-etilen türü sıvı polimeri zemin stabilizatörü olarak kullanılmıştır. Serbest basınç dayanımı değerlerinin stabilizör içeriği ve kür süresiyle pozitif ilişkiye sahip olduğu görülmüştür. Stabilizatör kil içine eklendiğinde, üç stabilize mekanizması açıklanmıştır; bunlardan ilki, toprağın mikro yapısı için gözenek doldurma etkisidir. İkincisi, hidrofilik grup (-OOCCH₃) kil partiküllerinin yüzeyindeki negatif iyonla iyonik, hidrojen ve Van der Waals bağlarını içeren fizikokimyasal bağlarla kimyasal reaksiyona girebilmesidir. Üçüncüsü, polimerdeki uzun zincirli makromoleküllerin birbirleriyle bağlantılı olan kil partikülünün yüzeyine sarılması ve böylece kararlı bir membran yapısı oluşturabilmesidir. Böylece, dayanım performansı iyileşmiştir.

Öntürk (2011), yaptığı tez çalışmasında, CH sınıfı kaolen kiline % 15 kireç + % 15 uçucu kül ve farklı oranlarda (%10, %15 ve %20) polisaj malzemesi ekleyip farklı sürelerde kürleyerek hazırladığı karışımlar ile kompaksiyon ve CBR deneyleri yapmıştır. Kompaksiyon deneylerinde artan polisaj katkısıyla beraber hem maksimum kuru yoğunluk hem de optimum su muhtevası değerlerinde artış görülmüştür. Kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre en uygun karışım kuru birim yoğunlukta yaklaşık %20 artış ile (12.38 kN/m³) 28 gün kürlü, %20 polisaj katkılı numunede elde edilmiştir.

Ural (2019), yaptığı proje çalışmasında Bilecik/Bozüyük bölgesinden temin ettiği kum zeminler üzerine farklı oranlarda çimento katkısı ve farklı uzunluklarda geotekstil ilavesiyle numunelerin geoteknik özelliklerini incelemiştir. 28 gün kürlenmiş numunelerde çimento miktarı arttığında ve geotekstil uzunluğu 3 mm'den 6 mm'ye çıktığında dayanım artarken, uzunluk 12 mm'ye çıktığında dayanımın 3 mm'lik geotekstilli karışımın dayanımından büyük fakat 6 mm'lik geotekstil karışımın dayanımından düşük olduğunu ifade etmiştir.

Türköz vd., (2018), kireç ve silis dumanı katkılarının, şişme ve dispersif özellikler gösteren zemin numunesinin dağılılabirliği, şişme potansiyeli ve mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlemişlerdir. Öte yandan, atık bir malzeme olan silis dumanının tek başına kullanılmasından ziyade kireç ile birlikte kullanılmasının çok daha etkili olduğu ve yüksek plastisiteye sahip bu zeminin mühendislik özelliklerini başarılı bir şekilde geliştirdiğini ifade etmişlerdir. SEM analizi sonucunda gözlenen gelişmiş yapısal

bütünlük ve boyuta bağlı olarak, mukavemet deneylerinde %3 kireç katkılı serilere kıyasla %3 kireç + %10 silis dumanı katkılı serilerde daha yüksek değerler ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir.

Ojuri vd. (2022), atık malzemelerin, karayolu lateritik zemininin (düşük plastisiteli kil/siltli kil) alt temel malzemesi olarak katkı stabilizasyonunda yeniden kullanım potansiyelini ve bu tür katkıların zemin stabilizasyon işlemi sırasında kireç içeriğini azaltmadaki etkisini araştırmıştır. %10 kireç katkılı zeminler ile %6 kireç + %7 inek kemiği tozu (cow bone powder) + %1 plastik atık katkılı zeminlerin kompaksiyon, CBR, serbest basınç, kesme kutusu, permeabilite, hidrolik iletkenlik ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numuneler ıslatma-kurutma döngülerinden geçirilerek dayanıklılık performansları da incelenmiştir. Kesme kutusu deneyleri, optimum atık-kireç karışımı (%6 kireç + %7 inek kemiği tozu + %1.0 plastik atık) için zemin kohezyonunun (c) 38 kN/m²'den 28 kN/m²'ye düştüğünü ve içsel sürtünme açısının 29°'den 45°'ye yükseldiğini göstermiştir. %10 kireç (L10) katkısı 33 kN/m² ve 41° değerleri kaydetmiştir. Bu da inek kemiği tozunun kireç ile etkili bir şekilde reaksiyona girerek çimentolu malzemeler oluşturduğunu ve zeminin geoteknik özelliklerini geliştirdiğini göstermektedir. Plastik atık granülleri de zeminin kayma özelliklerini etkili bir şekilde iyileştirdiği belirtilmiştir.

2.3. Sıcaklığın Zeminlerin Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkileri

Sıcaklık, zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle aşırı sıcaklık değişimleri, zeminlerin kimyasal yapısı, taşıma kapasitesi ve stabilitesi üzerinde ciddi sonuçlar doğurabilir. Giriş bölümünde ifade edildiği gibi yüksek sıcaklıkların mevcut olduğu tesislerde sıcaklığın zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi incelenmelidir çünkü yüksek sıcaklıkların etkisiyle zeminlerde veya atık sahalarında meydana gelebilecek problemler ciddi derecede insan sağlığı ve çevre sorunlarına yol açabilir. Bunun yanı sıra, son yıllarda, iklim değişikliğinin etkileri ve buna bağlı olarak orman yangınları giderek daha belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak ve uyum sağlamak için, sıcaklık ile zeminlerin mühendislik özellikleri arasındaki ilişkiyi anlamak için, sıcaklığın zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak ve yönetmek, birçok alanda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Dehidrasyon: Killi zeminin dehidrasyonu, artan sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra meydana gelen ilk olaydır. Bu süreçte killi zeminin silikat katmanları arasındaki su buharlaşır (Brindley, 1975: Hashemi vd., 2022). Dehidrasyon, gözenek suyunun ve emilen suyun ortadan kaldırılmasıyla sonuçlanır. Gözenek suyu, sıcaklığın 100C'ye kadar artmasından sonra ortadan kalkarken, emilen ve katmanlar arası su, sıcaklık 300C'ye kadar çıktıkça ortadan kalkar (Gharib vd., 2019: Hashemi vd., 2022). Dehidrasyon ayrıca plastisiteyi, ince taneli ve iri taneli zeminin gözenekliliğini değiştirir ve katyon değişim kapasitesini azaltır. Ayrıca, dehidrasyon zemin katmanları arasındaki mesafeyi azaltarak kütlesini azaltır (Emmerich vd., 1999: Hashemi vd., 2022). Dehidrasyon nispeten tersine çevrilebilir bir reaksiyondur ve zemin, sıcaklıktaki düşüşle birlikte su emme kabiliyetini koruyabilir.

Dehidroksilasyon: Dehidroksilasyon, hidroksil grubunun (OH) bir su molekülü oluşturarak serbest bırakıldığı ısıtma işlemini içerir (Frost ve Vassallo, 1996). Oktahedral katmandaki iki hidroksil grubu arasında bir reaksiyon meydana gelir. Bu süreç, belirli hidroksil bölgelerinde proton delokalizasyonu gerektirir.



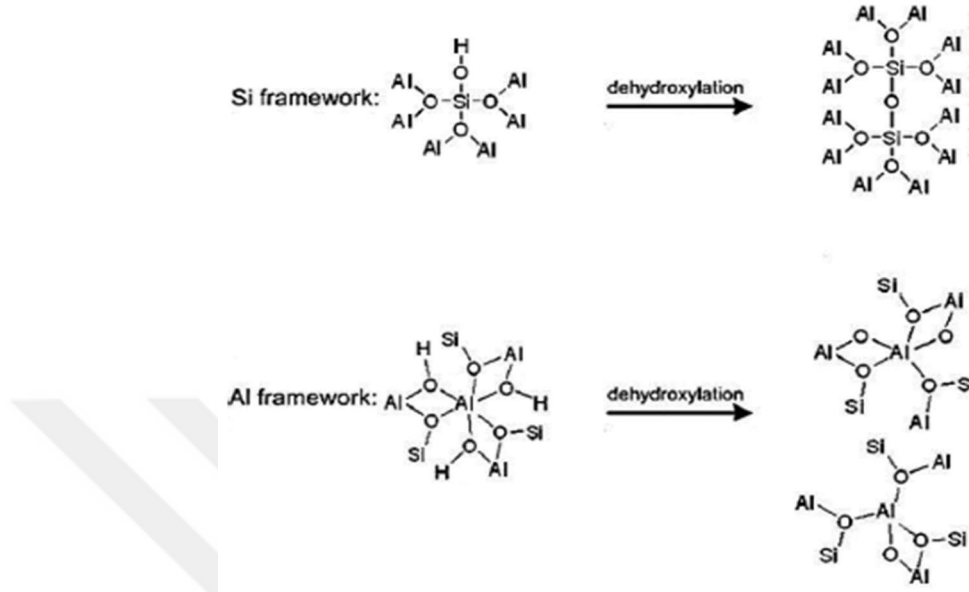
Kaolinitin dehidroksilasyonunun genel olarak kabul edilen mekanizması, serbest kalan iki hidroksil arasındaki aşağıdaki gibi oluşan etkileşimdir:



Dehidroksilasyon yoluyla yapısal suyun serbest bırakılmasının sonucu alüminosilikatların polimerik yapısının bozulması ve bükülmesidir, bu da düzensiz yapıya neden olur (Sperinck vd., 2011).

Dehidroksilasyon, 400°C ile 1000°C arasında meydana gelen ve killi zeminin kristalize yapısından suyun uzaklaştırılması ve zemin minerallerinin tahrip edilmesiyle sonuçlanan endotermik bir reaksiyondur. Kil mineral yapısının bozulması daha sonra amorf

şekiller oluşturur. Şekil 2.2, hidroksil eliminasyonunun Silika (Si) ve Alümina (Al) yapıları üzerindeki etkisini göstermektedir.

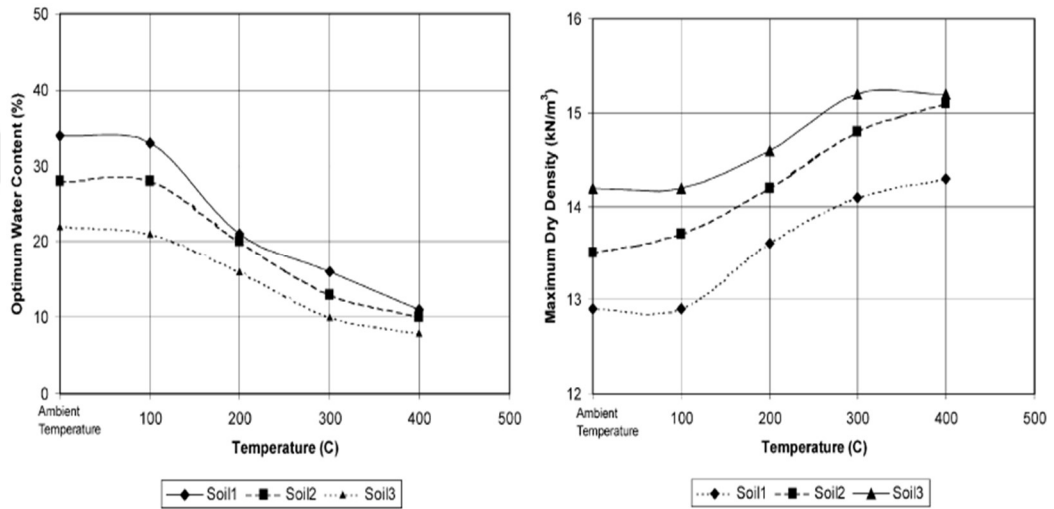


Şekil 2.2. Dehidroksilasyonun Silika ve Alümina yapıları üzerindeki etkisi (Mitchell ve Soga, 2005; Hashemi vd., 2022)

Çoğu killi zeminde dehidroksilasyon belirli bir termal aralıkta meydana gelir. Örneğin, kaolinitteki dehidroksilasyonun termal aralığı 300-600°C'dir, bu da kristalleşmiş yapıları ve metakaolin oluşumunu yok eder. Metakaolin, hidroksil grubunun salınmasından sonra oluşan amorf kalıntıdır. İllitin dehidroksilasyonu 350-600°C termal aralığında başlar ve 700-850°C santigrat derece arasındaki sıcaklıklarda kristalize yapısı bozulur. Montmorillonit gibi smektit kili, 500-2000°C santigrat derece arasındaki sıcaklıklarda dehidroksile edilir. İlite benzer şekilde, smektit kili başlangıçta kristalleşmiş yapının bazı kısımlarının bozulmadan kaldığı stabil bir faz oluşturur. Bu yapı daha sonra 800°C tamamen yok olur.

Abu-Zreig vd., (2001) CH, CL ve MH sınıfı üç farklı zemini 100, 200, 300 ve 400°C sıcaklıklara maruz bırakarak sıcaklığın atterberg limitleri, dane boyu dağılımı, kompaksiyon karakteristikleri, şişme potansiyeli ve dayanım üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, 100°C'den daha yüksek ısı işlemin, test edilen zeminlerin likit ve plastik limitlerinde, optimum su içeriğinde, serbest basınç dayanımında ve şişme basıncında düşüşe neden olduğunu ortaya koymuştur. Fakat, maksimum kuru yoğunluk değerlerinde sıcaklık

artışıyla birlikte hafifçe artış görülmüştür. 400 °C'de ortalama likit limit, optimum su içeriği ve şişme basıncı sırasıyla %80, %65 ve %94 oranında azalmıştır. Bununla birlikte, 400 °C'de, plastik limitler ve serbest basınç dayanımı test edilen tüm zeminler için tamamen ortadan kalkmıştır. Kuru yoğunluktaki artışa rağmen zeminin daha yüksek sıcaklıkta mukavemetini kaybetmesinin nedeni, organik maddesinin yok olması ve zemin parçacıklarını agregalar halinde topaklaştırma ve zemin mukavemetini koruma eğiliminde olan kohezyonun ortadan kalkması olarak açıklanmıştır.



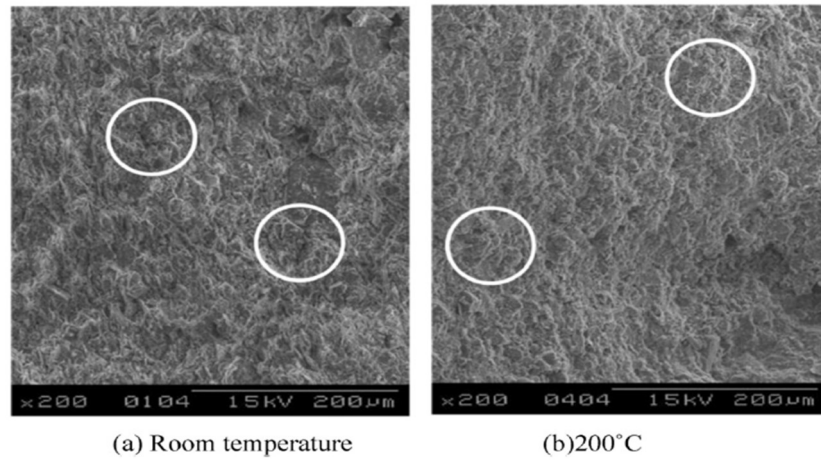
Şekil 2.3. Uygulama sıcaklığının maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği üzerindeki etkisi (Abu-Zreig vd., 2001)

Tan vd., (2003) CH sınıfı iki farklı kil zemini 100°C'den 1000°C'ye değişen farklı sıcaklıklara maruz bırakarak Atterberg limitleri, kompaksiyon karakteristikleri ve özgül gravite değerlerindeki değişimleri incelemiştir (Çizelge 2.3) Deney sonuçlarına göre, optimum su muhtevası değerleri 400-1000°C arasında az değişmesine rağmen 100-400°C değerlerinde radikal değişimler görülmüştür. 100-400°C değerlerinde maksimum kuru yoğunluk artmıştır ancak 400-1000°C arasındaki artış daha ılımlıdır. Likit limit değerleri 100-300°C arasında hızlı bir şekilde azalırken, 300-1000°C aralığında fark edilebilir bir değişim görülmemiştir. Plastik limit değerleri, 100-400°C arasında hızlı bir şekilde azalırken, 400°C'den daha yüksek sıcaklıklarda zeminler plastik olmayan (non-plastic) davranış göstermişlerdir. Özgül gravite değerleri 100 ve 600°C aralığında sıcaklıkla birlikte hızla azalırken, 600 ve 1000°C aralığında bu azalma çok yavaştır.

Çizelge 2.3. Deney sonuçları (Tan vd., 2003)

Temp. (°C)	Optimum water content (%)		Maximum dry density (kN/m ³)		Liquid limit (%)		Plastic limit (%)		Specific gravity	
	Clay 1	Clay 2	Clay 1	Clay 2	Clay 1	Clay 2	Clay 1	Clay 2	Clay 1	Clay 2
100	27.4	36.0	15.8	11.9	53.1	71.2	32.7	44.0	2.78	2.64
200	25.3	35.9	15.9	12.4	50.6	65.6	29.3	39.0	2.78	2.62
250	23.5	31.6	16.0	13.3	43.0	43.2	14.5	26.5	2.76	2.58
300	20.3	26.0	16.3	15.2	30.1	25.5	5.2	9.3	2.72	2.55
400	17.5	17.6	16.6	16.8	26.6	24.2	NP	NP	2.58	2.48
500	17.4	16.4	16.7	16.5	24.6	23.2	NP	NP	2.54	2.45
600	17.4	16.4	16.7	16.5	24.6	22.9	NP	NP	2.50	2.43
800	17.2	16.3	16.6	16.5	24.4	21.3	NP	NP	2.50	2.42
1000	17.0	16.0	16.6	16.5	23.4	21.2	NP	NP	2.49	2.42

Chen vd. (2016) kil zemin numunesini 105-200°C arasında değişen farklı seviyelerdeki sıcaklıklara sırasıyla 150 ve 240 dakikalık sürelerle maruz bırakarak çeşitli deneyler ve özel test aparatları yardımıyla kuru yoğunluk, su içeriği, doygunluk, birim şekil değişikliği, ısı iletkenliği ve mikro yapısındaki değişimler incelenmiştir. Aynı süre boyunca daha yüksek sıcaklıklara maruz kalındığında kuru yoğunluk artmış ve doygunluk azalmıştır. Daha uzun süre maruz kalma, özellikle 105 °C ile 150 °C arasındaki sıcaklıklar için daha büyük değişikliklerle sonuçlanmıştır. Doygun killi zemin numunelerinin morfolojisi 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra önemli ölçüde değişmiştir ki bu durum artan partikül topaklanması ve yoğunlaşması ile karakterize edilmesiyle açıklanabilir (Şekil 2.4). Zemin daha uzun süre daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldıkça zemin hacmi azalmıştır. Hacimdeki azalmaya numuneden su ve buharın boşalması, buhar basıncının neden olduğu parçacıkların hareketi ile dane kırılması ve organik maddenin ayrışması gibi fiziksel ve kimyasal reaksiyonların neden olduğu ifade edilmiştir.



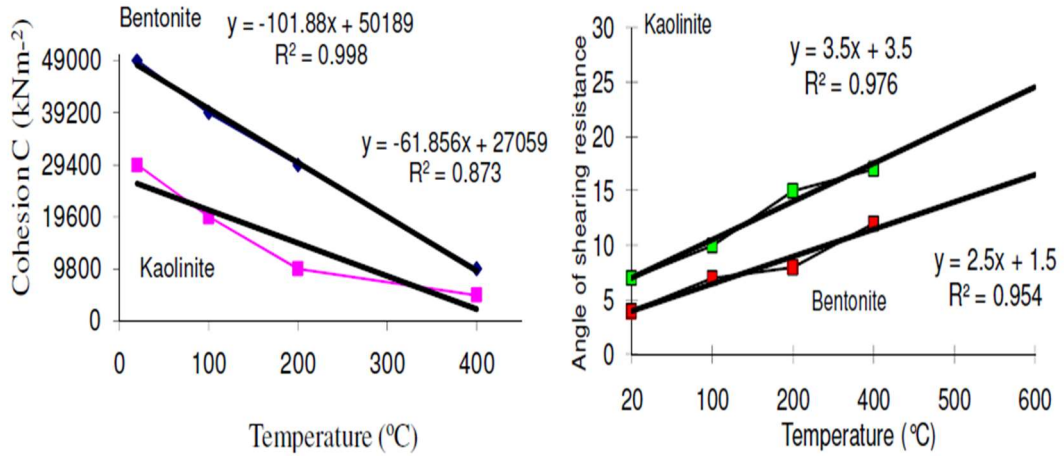
Şekil 2.4. Yumuşak zeminin SEM görüntüleri: 200 amplifikasyon faktörü (Chen vd. 2016)

Joshi vd., (1994) saf kil (pure clay), kaolinit ve bentonit killlerinden oluşturdıkları toplam altı adet numune örneklerini 100-700°C arasında değişen sıcaklıklara maruz bırakmışlardır. İşlem sıcaklığı arttıkça serbest basınç mukavemetinin özellikle kaolinit için 400 ila 500 °C arasında, kaolinit-bentonit karışımları için 500 ila 600 °C arasında ve bentonit için 600 ila 700 °C arasında arttığını göstermektedir. Kil numunelerin mukavemeti, 110°C'den dehidroksilasyon sıcaklığına kadar işlem sıcaklığındaki artışla kademeli olarak artmasına rağmen dehidroksilasyonun ötesindeki sıcaklıklarda, mukavemetteki artış oranı daha belirgindir. Isıl işlemin katyon değişiminde ve sıkıştırılabilirlikte azalmaya ve parçacık boyutunda artışa neden olduğu görülmüştür.. Isıl işlemle üretilen agregalar, çakıl ve kırılmış kaya için dayanıklı ve ekonomik ikameler sağlayabileceği ifade edilmiştir.

Sıcaklığın sodyum sülfatın hidrasyon durumu üzerindeki etkisinin bir sonucu olarak hafif yapılarda ve zeminlerde hasara neden olduğunu göstermiştir. Sıcak havalarda suyun yukarı doğru göçü, buharlaşma ve tuzların birikmesi söz konusudur. Bu nedenle sülfat konsantrasyonu üst birkaç metrede yüksek olabilir. 90°F üzerindeki sıcaklıklarda Na₂SO₄'ün büyük bir miktarı suda çözünür (100 gm suda 52 gm kadar). Yaklaşık 55°F'nin altındaki sıcaklıklar sodyum sülfatın kristalleşmesine neden olur ve oluşan kristaller Na₂SO₄ molekülü başına 10H₂O molekülüne kadar bağlanabilir. Bu kristalleşme ve kristal hidrasyon süreçleri toprak yapısına karşı bir genleşmeye ve bunun sonucunda zemin yüzeyinin kabarmasına neden olabilir Blaser ve Scherer (1969).

Yılmaz (2011), kaolinit ve bentonit killlerinde, ısıl işlemin dane boyutunun yanı sıra su içeriği, özgül ağırlık, plastisite, aktivite indeksi, şişme ve sıkışma indeksi ve mukavemet özellikleri üzerindeki etkisi açısından incelenmiştir. Tüm numuneler çeşitli sıcaklıklara (sırasıyla 100, 200, 400, 500 ve 600°C) ısıtılmış ve maksimum sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. Isıl işlem daha büyük kil/silt partiküllerinin oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Termogravimetrik analiz (TG) çalışmaları, kaolinit ve bentonit yapılarının her ikisi de kısmen tahrip olduğunu ancak hidroksil grupları arasındaki daha zayıf bağlar nedeniyle, düşük sıcaklıklarda bentonit kaolinite kıyasla daha hızlı bir ağırlık kaybına uğradığını göstermiştir. Tüm numunelerin mukavemet parametreleri üzerindeki ısıl işlem etkilerini belirlemek için üç eksenli basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Kohezyon ve kayma direnci açısı değerlerinin numuneler işlendiğinde büyük ölçüde değiştiği bulunmuştur.

Kayma direnci açısı ile her iki malzemenin ısıtma işlemi arasında güçlü korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Kayma direnci açılarının, ısıtma işlemi görmüş kaolinit ve bentonitin tane boyutu dağılımına bağlı olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 2.5. Kohezyon ve kayma direnci açısının sıcaklıkla değişimi (Yılmaz, 2011)

Termal iyileştirme kirletici konsantrasyonlarını azaltmada etkilidir, ancak zeminin işlev görme kabiliyetini de değiştirebilir. En uygun maliyetli ve verimli iyileştirme projeleri için bu iki sonuç dengelenmelidir. Optimum ısıtma süresi ve sıcaklığı farklı kirletici türleri arasında değişkendir ve süreyi ya da sıcaklığı artırmak zemin özelliklerinin bozulmasına neden olur. 220°C'nin altında, biyolojik oluşumlar kısa vadede azalsa da, zeminler kısa süreli (örn. 1 saatten az) ısıtmadan çok fazla etkilenmez. Ancak 220°C'nin üzerinde zemin organik içeriği azalır ve hidrofobik bir kondensata dönüşebilir. Sıcaklıklar yaklaşık 300°C'e ulaştığında, zemin organik içeriği hızla azalır, zemin pH'ı artar ve besin kullanılabilirliği değişir, bu da bitki ve mikrobiyal biyokütle üretiminin azalmasına neden olur. 450°C'nin üzerindeki sıcaklıklar, sadece 30 dakika ısıtıldıktan sonra zemin organik içeriğinde büyük düşüşler gösterir. Buna ek olarak, zemin mineralojisi çökmeye başlar ve zemin partikül boyutu dağılımı ağırlıklı olarak kum boyutlu partiküllere dönüşür. Bu değişikliklerle birlikte pH dramatik bir şekilde artar ve mevcut besin maddeleri keskin bir şekilde azalarak hem bitkiler hem de toprak mikroorganizmaları için elverişsiz koşullar yaratır (O'Brien vd., 2018).

Alpaydın ve Aksoy, (2023) çalışmalarında farklı oranlardaki kum-bentonit karışımlarına tinkal (tincal) ve üleksit (ulexit) türü bor katkısı ekleyerek oda sıcaklığı ve

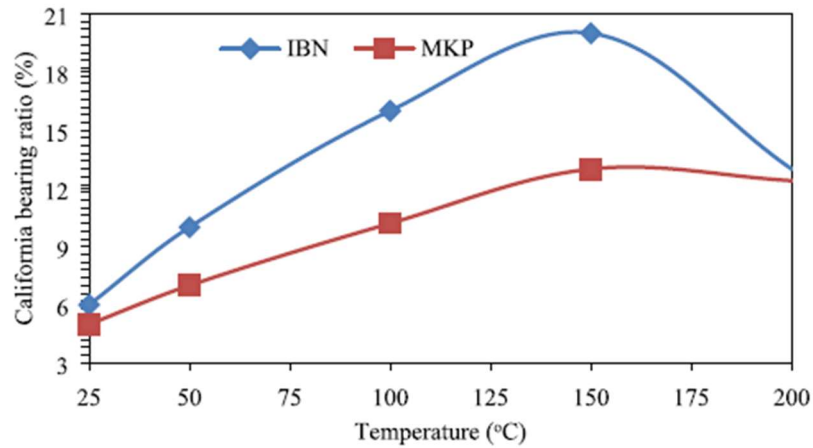
80°C sıcaklıkta kayma mukavemeti davranışını incelemişlerdir (Çizelge 2.4). Yapılan deneylerin sonuçları, bor katkısı ile kum-bentonit karışımlarının kayma mukavemetinin artan sıcaklıkla birlikte arttığını göstermektedir. Bor ilavesinin kum-bentonit karışımlarının yüksek sıcaklıktaki kayma mukavemetini artırdığı sonucuna varılabileceği görülmüştür. Saha uygulamalarında bor, kum-bentonit karışımlarının kayma mukavemetini artırmak için kullanılabileceği ancak tinkalin etkisi uleksite kıyasla daha belirgin olabileceği ifade edilmiştir.

Çizelge 2.4. Farklı normal gerilmeler altında tüm numunelerin maksimum kayma gerilmeleri (Alpaydın ve Aksoy, 2023)

Group	Sample	$\tau_{\max}$ (kPa)			
		Room temperature		80°C	
		$\sigma_v = 98.1$ kPa	$\sigma_v = 196.1$ kPa	$\sigma_v = 98.1$ kPa	$\sigma_v = 196.1$ kPa
10% Bentonite	Tincal	63.1	92.4	–	–
	Ulexite	38.0	85.0	63.1	134.6
	10B-90S	92.0	157.1	83.6	146.5
	9B-81S-10T	92.3	160.1	82.4	148.0
	8B-72S-20T	85.0	150.0	76.6	160.3
	9B-81S-10U	96.3	152.5	97.0	161.1
20% Bentonite	8B-72S-20U	68.5	110.8	98.7	152.8
	20B-80S	49.9	63.1	47.4	65.6
	18B-72S-10T	61.3	95.4	60.9	102.5
	16B-64S-20T	65.3	91.2	49.4	97.1
	18B-72S-10U	53.4	67.3	70.5	91.6
	16B-64S-20U	51.4	65.3	63.9	102.9

Attah ve Etim, (2020) AASHTO zemin sınıflandırma sistemine göre sınıflandırdıkları iki farklı zemin numunelerini (A-7-6 ve A-7-5) farklı sıcaklıklara (25, 50, 100, 150 ve 200 °C) maruz bırakarak Atterberg Limiti, Kompaksiyon, Kaliforniya Taşıma Oranı, Serbest Basınç Dayanımı ve Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy) testleri yapmıştır (Şekil 2.6). Atterberg limitinin sıcaklık artışı ile azaldığını, maksimum kuru yoğunluğun ise sıcaklık artışı ile arttığını görülmüştür. Sıcaklık artışı ile optimum su içeriği için önemli bir değişiklik görülmemiştir. Her iki zemin için de en yüksek CBR 150°C'de elde edildiği gibi, her iki zeminin katyon değişim kapasitesi 150°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda önemli ölçüde azalmıştır. Her iki zeminin de serbest basınç dayanımı sıcaklıkla birlikte azalmış ve kür süresiyle birlikte beklenen şekilde artmıştır. SEM analizi, sıcaklık değişimiyle birlikte morfolojik değişimin, toprak dokularının deformasyonu veya parçalanması, temel mineral bileşimindeki değişimin yanı sıra ısıtma sırasında

meydana gelen fizikokimyasal ve kimyasal süreçlerdeki değişimlerden kaynaklanabileceğini ifade edilmiştir. 150°C sıcaklık zemin davranışını iyileştirmek için önerilen en uygun sıcaklık olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.6. Farklı sıcaklık seviyelerinde Kaliforniya taşıma oranındaki değişim (Attah ve Etim, 2020)

Rushdiansyah ve Markawie, (2021) OH-MH sınıfı örselenmemiş yumuşak zemine ait numuneleri 22, 40, 60 ve 70°C sıcaklıklara maruz bırakarak sıcaklık değişikliklerinin zeminin sıkıştırılabilirliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sıcaklıktaki artış, zemin sıkıştırma indeksi (Cc), konsolidasyon katsayısı (Cv) ve şişme indeksi (Cs) olarak adlandırılan zemin sıkıştırılabilirlik parametrelerini sırasıyla %3, %33 ve %22 oranında artırmıştır. Ayrıca, yumuşak kilin sızdırma özellikleri de artan sıcaklıkla birlikte %32 oranında artmıştır. Yoğun ısının zeminin sıkıştırılabilirliğinin yüksek olmasından sorumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

2.4. Pirofillit Minerali ve Özellikleri

Pirofillit, kimyasal formülü $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ olan bir alüminyum silikat mineralidir. Kimyasal içeriği yaklaşık %65-70 SiO_2 , %25-30 Al_2O_3 ve % H_2O 'dur. 6309 sayılı Maden Kanunu kapsamına 1976 yılında girmesinden sonra gelişen anlayış değişikliği ile beraber madencilik tekniği açısından daha bilimsel açıdan incelenmeye başlanmıştır. Bunun sonucunda maden arama ve işletme teknikleri gelişmiş, hammadde olarak kullanım alanı ve sektörlerdeki oranı zamanla artış göstermiştir. (Cornish 1983; Mutlu vd., 2015). Pirofillit,

genel olarak seramik ve beyaz çimento üretiminde, refrakter endüstrisinde, böcek ilaçlarında, dolgu malzemesi olarak ise kağıt, krem, deterjan, sert ve yumuşak lastik, kozmetik, sabun, tekstil, boya ve cam endüstrisinde kullanılmaktadır.

Pirofillit mineralinin bazı karakteristik özellikleri:

Kristal yapısı: Pirofillit kristalleri levhamsı ya da lifli (asbestin) olabilir. Öğütüldüğünde, kristaller yapıya bağlı olarak plakalara/tanelere veya liflere ayrılır. Her bir tanecik veya lif, gipsit $[Al(OH)_3]$ tabakaları arasına sıkıştırılmış iki silikat tabakasından oluşan tabaka benzeri bir yapıya sahiptir.

Sertlik ve yüzey hissi: Pirofillit çok yumuşaktır, Mohs sertliği 1-2 arasında değişir ve yüzeyi pürüzsüz ve sabunlu bir his verir

Renk ve optik özellikler: Pirofillitin rengi, demir oksit gibi safsızlıkların içeriğine bağlı olarak beyazdan elma yeşiline veya kahverengimsi yeşile kadar değişir. Yapraklı çeşidi parlak inci parlaklığına sahipken masif olanı donuktur. Kırılma indisi 1,55-1,60 arasında değişir (bkz. keten tohumu yağı 1,48, normal cam 1,53, talk 1,54-1,59, titanyum dioksit 2,40, elmas 2,42).

Özgül ağırlık: Yumuşaklığına göre oldukça yüksek bir özgül ağırlığa sahiptir; 2,8.

Mekanik özellikler: Pirofillit kristalini oluşturan ince folyalar/tabakalar (folia) esnek olmasına rağmen elastik değildir. Sonuç olarak pirofillit iyi bir mekanik dayanıma sahiptir ve bu nedenle ondan yapılan yapılar ve eşyalar dayanıklıdır.

Elektriksel özellikler: Yüksek dielektrik dayanımına sahip zayıf bir elektrik iletkenidir (dielektrik dayanımı, elektrik yalıtımının bir ölçüsüdür ve bir yalıtım malzemesinin bozulmadan önce dayanabileceği voltajdır).

Plastisite: Hidrofobiktir (yani suya karşı isteksizdir) ve bu nedenle su ile karıştırıldığında plastik bir kütle oluşturmaz. Bu özellik, suyun yapışmak yerine kayma eğilimi göstermesi nedeniyle yüzeyinin kayganlığından kaynaklanmaktadır.

Yanma özellikleri: 400°C'de su molekülleri uzaklaşmaya başlar ve 700-800°C'de pirofillit tamamen susuz hale gelir ve kırılır veya yaprak halinde dökülür. 1100°C'ye kadar ısıtıldığında, silikanın bir kısmı da kararlı camsı bir formda (kristobalit) olan serbest silika olarak kopar ve pirofillit mullite dönüşür (bkz. talk için karşılık gelen sıcaklık 1300°C'dir, ancak mullit yerine klinoenstatite dönüşür). Mullit, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ bileşimine sahip ve %71,8 Al_2O_3 ve %28,2 SiO_2 içeren bir alüminyum silikattır. Pirofillitten salınan silikanın bir kısmı, 1810°C'ye kadar stabil olan camsı bir kompozit malzeme oluşturmak için mullit ile yakından karışmış halde kalır. Birçok gazın, silikatın, oksidin vb. kimyasal saldırılarına karşı dayanıklıdır, termal şoklara, aşınmaya ve aşınmaya karşı dirençlidir ve yüksek elektriksel direnç, çekme dayanımı, basınç dayanımı ve darbe dayanımına sahiptir. Pirofillitteki %5'lik düşük su içeriği, fırınlama sırasında düşük büzülme sağlar.

Termal özellikler: Pirofillitte, termal özellikler söz konusu olduğunda hem metallerin hem de suyun avantajları bir araya getirilmiştir. Bir metal gibi hızlı bir şekilde ısınır ve daha sonra bir metalin aksine su gibi ısıyı uzun süre muhafaza eder ve saatler boyunca yavaş bir şekilde yayar. Bu görünüşte anormal davranış, yüksek özgül ısı ve zayıf termal iletkenliğin bir kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Yüksek özgül ısı, sıcaklıktaki birim artış için bir pirofillit kütlesinin büyük miktarda ısıyı emebileceği anlamına gelirken, zayıf termal iletkenlik, emilen ısının hızlı bir şekilde dışarı akmadığı anlamına gelir. Pirofillit yakıldığında ısı iletkenliği daha da azalır (Chatterjee, 2009).

Türkiye, pirofillit maden rezervine sahip az sayıda ülkeden biridir ve ülkemizin bu avantajı iyi kullanması gerekmektedir. Ülkemizin zengin rezervleri Pütürge masifinde bulunmaktadır. Bu masife bağlı olarak Pütürge (Malatya) ve Sincik (Adıyaman) ilçeleri sınırları içerisinde pirofillit maden ruhsatları verilmiştir. Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.6'da sırasıyla başlıca 5 tür pirofillit mineralinin tipik kimyasal içerikleri ve termal faz dönüşümü aralıkları verilmiştir.

Çizelge 2.6. Başlıca 5 tür pirofillit mineralinin tipik kimyasal içerikleri (Uygun ve Solakoğlu, 2002)

	Tip A (Yüksek alüminalı)	Tip B (Düşük silisli)	Tip C (Yüksek silisli)	Tip D (Serisitli)	Tip E (Düşük alkali)
SiO ₂	54.5	64.4	74.9	77.7	75.8
Al ₂ O ₃	37.9	25.6	17.4	15.6	16.2
Fe ₂ O ₃	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2
K ₂ O	0.5	0.9	1.1	2.8	0.3
Na ₂ O	0.1	0.3	0.6	0.1	0.1
SO ₃	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6
TiO ₂	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6
Cr (ppm)	100	120	58	55	69
Mn (ppm)	7	4	1	10	9
AK	2.6	4.7	2.7	3.2	5.0
SM	1.4	2.5	4.2	4.9	4.6

Pirofillit ısı genleşme kat sayısı düşük olan ve ısı şoklara dayanıklı olan bir madendir. Bu sebeple termal etkilere karşı dayanıklıdır. Pirofillit içeren seramik malzemeler fiziksel özellikleri açısından porselene benzemektedir ve yüksek mekanik dayanımı sergilemektedir (Mutlu, 2020). Bunun yanı sıra oldukça uygun maliyetlidir.

En kritik noktalardan biri pirofillitin 1200°C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta mullite dönüşmesidir. Mullit, Al_{4+2x}Si_{2-2x}O_{10-x} kimyasal formülüne sahip bir alüminyum silikattır ve ayırt edici teknik özelliklere sahiptir. Bu özellikler arasında düşük genleşme katsayısı, düşük ısı iletkenliği ve erimiş metallerden kaynaklanan korozyona karşı direnç yer alır. Bu nedenle, mullit refrakter bir malzeme olarak ve yer ve duvar karoları gibi seramik uygulamalarında feldspat ve silika yerine kullanılır (Ali vd., 2021; Li vd., 2014; Brincia vd., 2017).

Çizelge 2.7. Pirofillit termal faz dönüşümü (Erdemoğlu vd., 2020)

Thermal Transformation Phase	Heating Temperature
Removal of water whether surface, in pores, and/or adsorbed	<450 °C
Dehydroxylation	780 °C < T < 1100 °C
Formation of amorphous SiO ₂	950 °C < T < 1100 °C
Formation of mullite and crystallization of cristobalite from amorphous SiO ₂	T > 1200 °C

Son zamanlarda, tarımsal verimliliği artırmak ve sürdürmek için alüminosilikat minerallerinin kullanımına yönelik küresel ilgi artmaktadır. Kil minerallerinin toprağın besin maddelerini tutma kabiliyetini artırabildiği bilinmektedir. Pirofillitin adsorpsiyon, iyon değişimi ve talk benzeri yapısı gibi benzersiz özellikleri, pirofillitin tarımda toprak düzenleyici olarak kullanılmasına yol açmıştır (Hasanbegović vd., 2021).

Pirofillit, tarımda gübre taşıyıcı olarak kullanılır ve toprağın besin maddelerini tutma yeteneğini geliştirir ve sızıntıyı azaltır. Ayrıca, bir alüminosilikat minerali olan pirofillit, mineralin yüksek yüzey alanı, yüksek katyon değiştirme kapasitesi ve geniş gözenek hacmi nedeniyle topraktaki ağır metalleri tutmak için kullanılır ve ağır metallerin iç katmanlarına girmesine ve tutulmasına izin verir. Çeşitli çalışmalar pirofillitin Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Cd ve Cr dahil olmak üzere topraktaki ağır metallerin hareketliliğini azaltma kabiliyetini kanıtlamıştır (Ali vd., 2021).

Terzic vd., (2023) yaptıkları çalışmada seramiklerde %50 kil ikamesi ve harçlarda %30'a kadar çimento ikamesi olarak pirofillit katkısı kullanmıştır. XRD, SEM, DTA ve TGA testleri uygulanarak fiziko-mekanik özelliklere pirofillit katkısının etkisi incelemiştir. Pirofillit, çimento hidratasyonu sırasında ilave puzolan olarak işlev görmesi harçlarda pirofillitin, Portland çimentosu bazlı harçların basınç dayanımı ve refrakterliğindeki artışı etkileyen ilave mineral fazları (alit, belit, vollastonit ve gehlenit) yayması olarak değerlendirilmiştir. % 20'ye kadar pirofillit ilavesi, performanslarında bozulma olmaksızın yapı veya refrakter harçlarda (1000°C'de ısıtılmış) kullanılabileceği önerilmiştir. Araştırma, pirofillitin yüksek sıcaklıkta işlenmiş yapı malzemeleri üretmek için bir kaynak olarak verimliliğini ve uygunluğunu kanıtlamıştır.

Mansour ve Chaid (2017), Portland çimentosu, su, silis kumu, pirofillit ve hacimce %1 oranında polipropilen lifler ile hazırlanan hidrolik betonda çimentonun kısmi ikamesi olarak pirofillit katkısının kullanımını araştırmaktadır. Pirofillitin çimento kütlesine göre %10, %20 ve %30 arasında değişen oranlarda ikame edilmesinin lif takviyeli betonların fiziksel-mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Pirofillit katkı oranı arttıkça normal kıvam (normal-consistency) değerlerinde çok az da olsa bir artış görülmüş olup bunun mineralin su absorbe edebilmesiyle ifade etmişlerdir. Yoğunluk değerlerinde pirofillit artışıyla beraber azalma söz konusu olup bunun nedeni pirofillitin yoğunluğunun

çimentodan daha küçük olmasıdır. Çekme ve sıkıştırma dayanımlarında ise pirofillit katkısıyla bir azalma görülmüş olup bu dayanım kaybının sebebi yavaş gelişen puzolanik etkileşim olarak açıklanmıştır ve bu yüzden pirofillit kullanımının betonun sertleşme sürecini yavaşlatıp dayanımda azalmaya sebep olduğu ifade edilmiştir. %10 pirofillit katkısında diğer katkı oranlarına göre daha iyi sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir.

Arun vd., (2020) iki farklı CH sınıfı kil zeminin pirofillit kullanılarak %5, %10, %15 ve %20 gibi farklı oranlarda stabilize edilme olasılığı araştırılmıştır. Başlangıçta pirofillit ilavesindeki sıkışma karakteristiği Standart Proktor Testi ile, mukavemet karakteristiği ise 0, 3, 7, 14 ve 28. günler gibi çeşitli kür sürelerinde yapılan Serbest Basınç Testine ve 4 ve 7. günlerde yapılan Kaliforniya Taşıma Oranı Testi'ne dayanarak yapılmıştır (Çizelge 2.7). Pirofillit katkısı artışıyla maksimum kuru yoğunluk değerlerinde azalma, optimum su muhtevasında artış görülmüştür. Katkı oranı artışıyla dayanım testlerinde artış görülmüş olup maksimum kuru yoğunlukta azalma olmasına rağmen bu dayanım artışları DDL (diffuse double layer) kalınlığında azalma ve zemin ile katkı arasında katyon değişim kapasitesindeki artışın sebep olabileceği ifade edilmiştir. %15'lik katkı oranının zemin stabilizasyonu için nominal bir yüzde olarak seçilebileceği önerilmiştir. Sonuç olarak, mukavemet artışı gözlemlerinden pirofillitin kalsiyum bazlı katkılar yerine zemini stabilize etmek için etkili bir stabilizatör olarak kullanılabileceği sonucuna varılabilir. Böylece, zeminin davranışını iyileştirmek için uygun maliyetli ve çevre dostu bir yöntem olacağı belirtilmiştir.

Çizelge 2.8. Pirofillitle işlenmiş S1 ve S2 kodlu zeminlerin farklı kürleme sürelerindeki serbest basınç değerleri (Arun vd., 2020)

Percentage of admixture	Unconfined Compressive Strength (kPa)				
	Curing Periods (days)				
	0 days	3 days	7 days	14 days	28 days
S1+0%P	93	-	-	-	-
S1+5%P	95	98	106	113	122
S1+10%P	99	112	116	128	133
S1+15%P	104	116	130	141	144
S1+20%P	113	135	143	149	154
S2+0%P	81	-	-	-	-
S2+5%P	108	115	125	135	142
S2+10%P	114	133	152	178	189
S2+15%P	133	154	179	219	231
S2+20%P	140	169	202	234	253

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

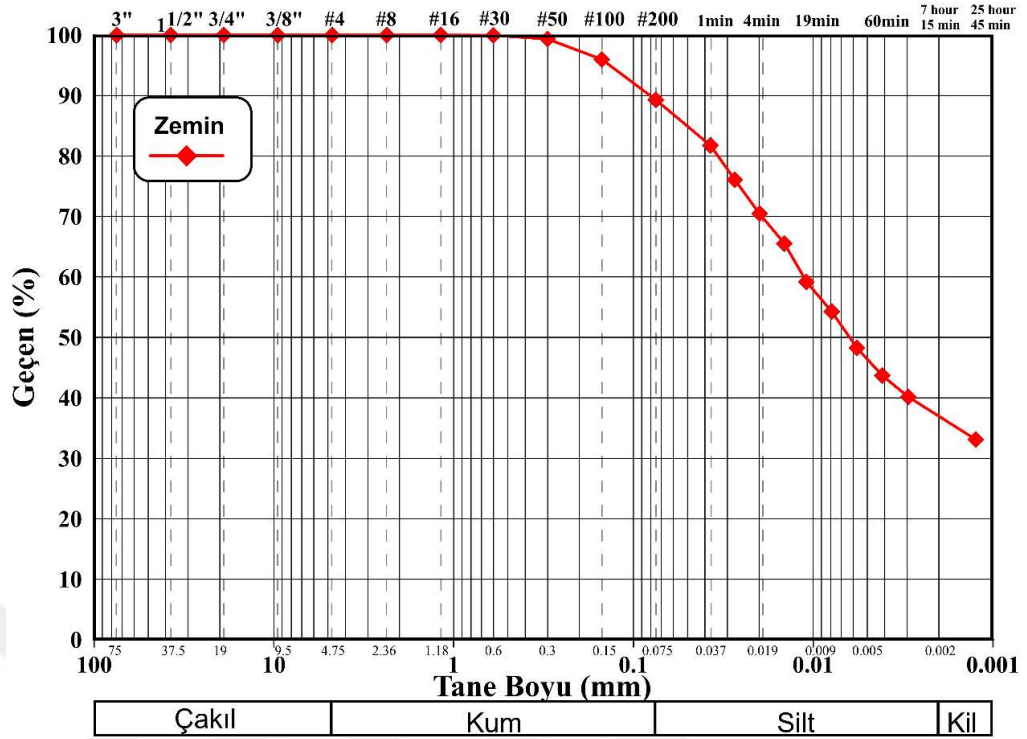
3.1.1. Zemin numunesi

Bu çalışmada kullanılan zemin numunesi, yüzeyden yaklaşık 0.5-1.0 m derinlikten açılan sondaj çukurundan alınmıştır. Çıkarılan numuneler plastik torbalara yerleştirilerek Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'na nakledilmiştir. Şekil 3.1'de çalışmada kullanılan zemine numunesine ait görsel sunulmuştur.



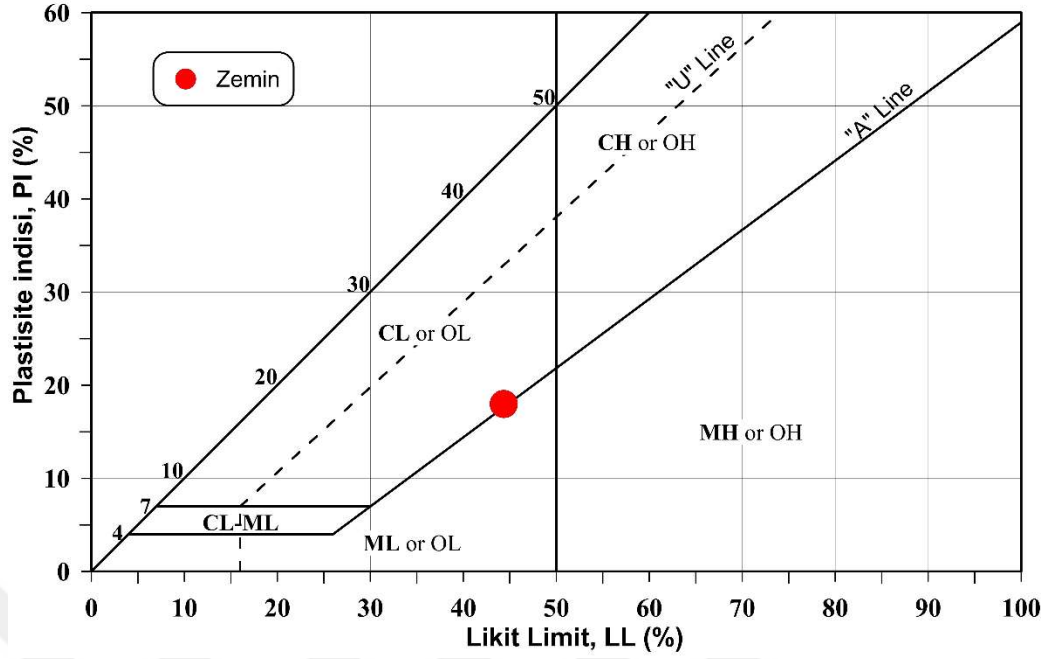
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan zemin numunesi

İlk olarak, zemin dane çapı dağılımını belirlemek için numuneler üzerinde elek analizi (ASTM D 422-63) ve hidrometre (ASTM D 7928-21) yapılmıştır. Daha sonra ince dane sınıflandırması için gerekli olan kıvam limiti deneyi yapılmıştır (ASTM D 4318). Özgül ağırlık deneyi ise ilgili ASTM (ASTM D 854) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de dane dağılım eğrisi gösterilmiştir.



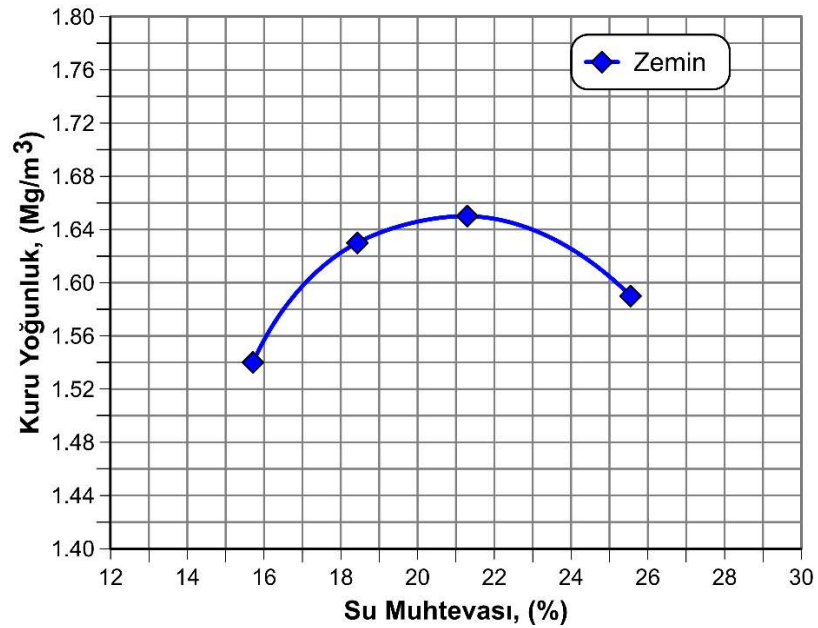
Şekil 3.2. Zemin numunesine ait dane dağılım eğrisi

Dane dağılımı analizi sonuçlarına göre, zemin numunesinin %0 çakıl, %11 kum, %52 silt ve %37 kil içerdiği tespit edilmiştir. Zemin numunesinin aktivite (A) ve özgül ağırlık (G_s) değerleri sırasıyla 0.49 ve 2.71'dir. Likit limit ve plastisite indeksi, kohezyonlu zeminlerin doğası hakkında bilgi sağlayan önemli değişkenlerdir. Numunenin likit limit (LL) ve plastisite indeksi (PI) değerleri sırasıyla %45 ve %18 olarak belirlenmiş olup, bu değişkenlere bağlı olarak plastisite grafiğindeki konumları Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Zemin numunesi ASTM D 2487'ye göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan zeminin plastisite kartındaki yeri

Zemin numunesinin maksimum kuru yoğunluk (MKY) ve optimum su muhtevası (OSM) olarak tanımlanan kompaksiyon karakteristiklerini belirlemek için ASTM D 698 standardında Standart Proktor kompaksiyon testi gerçekleştirilmiştir. Kompaksiyon eğrisi Şekil 3.4'te sunulmuştur. Çalışmada kullanılan zeminin geoteknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan zemine ait tane kompaksiyon eğrisi

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan zeminin geoteknik özellikleri

Özellikler	Zemin
Çakıl (%)	-
Kum (%)	11
Silt (%)	52
Kil (%)	37
Atterberg Limitleri	
Likit Limit (%), LL	45
Plastik Limit (%), PL	27
Plastisite İndisi (%), PI	18
Özgül Ağırlık, Gs	2.71
Aktivite, A	0.49

3.1.2. Pirofillit

Katkı maddesi olarak kullanılan pirofillit, $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ kimyasal formülüne sahip alüminyum silikat hidroksitten oluşan bir filosilikat mineralidir. Kimyasal özellikleri Çizelge 3.2'de ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Çalışmada kullanılan Pirofillit minerali Bilyalı Değirmen makinesinde öğütüldükten sonra karışımlara ilave edilmiştir. Şekil 3.5'te çalışmada kullanılan katkı malzemesi gösterilmiştir



Şekil 3.5. Bilyalı Değirmen ile öğütülen Pirofillit katkısı

Çizelge 3.2 Pirofillit'te SiO_2 yüzdesinin %68-71 arasında değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, Çizelge 3.3'te gösterildiği gibi, pirofillitin özellikle sertliği ve özgül ağırlığı zemin numunesinden daha yüksektir.

Çizelge 3.2. Tez çalışmasında kullanılan Pirofillit mineralinin kimyasal içerikleri

Al_2O_3 %	SiO_2 %	Na_2O %	MgO %	K_2O %	CaO %
19-22	68-71	0.75	0.41	1.26	0.51
TiO_2 %	Fe_2O_3 %	Cr_2O_3 %	Mn_2O_3 %	SO_3 %	LOI %
Max 0.75	Max 0.40	Max 80ppm	Max 50ppm	Max 1.5	
0.41	0.35	0.0055	0.0014	0.17	3.85

Çizelge 3.3. Tez çalışmasında kullanılan Pirofillit mineralinin fiziksel özellikleri

Fiziksel Durum	Katı
Görünüş	Granül/Toz
Renk	Krem
Koku	Yok
Özgül Ağırlık	2.8
pH	Veri Yok
Parlama Noktası	Bilinmiyor
Sertlik (Mohs)	5
Kırılma İndisi	1.57

3.2. Yöntem

Deneylerde kullanılmak üzere laboratuvara getirilen zemin numunesinin homojenize edilmesi için bir dizi numune hazırlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda ilk olarak zemin numunesi doğal nem içeriğinden dolayı etüvde 105 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca bekletilerek kurutulmuştur. Etüvden topak halinde çıkan zemin parçaları plastik havaneli yardımıyla ezilmiştir. Zemin numunesi içinde bulunabilecek çakıl gibi büyük boyutlu taneleri ayırmak için 4 numaralı elekten elenmiştir. Bu sayede homojen bir dağılım elde etmek amaçlanmıştır. Elde edilen zemin numunesi bez çuvallarda 2 hafta boyunca

laboratuvar koşullarında muhafaza edilmiştir. Çuvallara yerleştirilip bekletilen zemin numunesinin sabit su içeriğine ulaşması sağlanmıştır. Böylece mühendislik deneylerinde kullanılacak zemin numunesinin her deney öncesinde etüvde bekletilerek kurutulmasına gerek kalmadan, bez çuval içerisindeki tespit edilen mevcut su içeriği dikkate alınarak aşağıda açıklanan deneyler gerçekleştirilmiştir. Sabit başlangıç su içeriğine sahip numuneler kuru ağırlıklarının %10, %20 ve %30'u oranında Pirofillit katkısı ile homojen bir şekilde karıştırılmıştır.

Numunelerin hazırlanması için gerekli olacak kompaksiyon karakteristiklerini (optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk) belirlemek için Standart Proktor enerji seviyesinde kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, Serbest Basınç ve Üç Eksenli Basınç Deneylerinde kullanılacak numunelerin optimum değerlerde hazırlanması için karıştırılması gereken numune, su ve katkı ağırlıkları tespit edilmiştir. Bu değerlere göre hazırlanan karışımlar hava geçirmez plastik torbalarda ilgili kür süresi (7 ve 21 gün) boyunca desikatör içerisinde muhafaza edilmiştir.

Sıcaklık etkisinin gözlemleneceği numuneler kürlenmeye bırakılmadan önce özel etüvlerde ilgili sıcaklıklara (100°C, 200°C ve 500°C) 12 saat maruz bırakılmıştır. Sabit başlangıç su içeriğine sahip numuneler kuru ağırlıklarının ilgili yüzde oranında Pirofillit katkısı ile homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra katkı malzemesinin zemin parçacıkları ile daha iyi etkileşime girmesi için bir miktar su (kuru ağırlığın yaklaşık %5'i kadar) daha ilave edilerek karıştırılıp hava geçirmez plastik torbalarda muhtevanın tüm numuneye daha iyi yayılması için 1 gece süreyle muhafaza edilmiştir. Daha sonra bu numuneler özel etüvlerde ilgili sıcaklıklara 12 saat süreyle maruz bırakılmıştır. Etüvden çıkarılan numuneler laboratuvar koşullarında ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) soğutulduktan sonra optimum değerlerinde karışımlar hazırlanmış olup hava geçirmez plastik torbalarda ilgili kür süresi boyunca desikatör içinde (7 ve 21 gün) kürlenmeye bırakılmıştır.

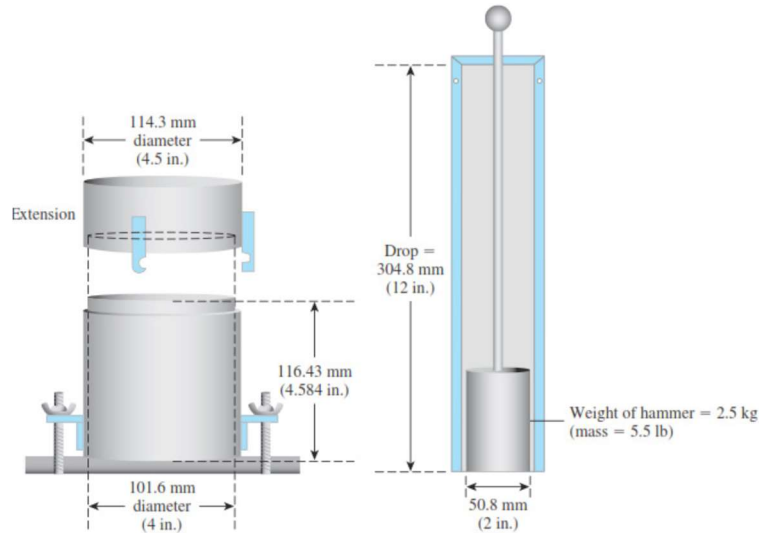
Çalışma boyunca yapılan ve sonuçları değerlendirilen tüm deneyler Çizelge 3.4'te sunulan deney programı görselinde sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Deney programı

Katki (%)	Kompaksiyon deneyleri (Deney öncesi uygulanan sıcaklık)				Üç eksenli basınç deneyleri (UU) (Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan örnekler için bulunan kompaksiyon karakteristiklerinde hazırlanmış)												Serbest basınç deneyleri (SB) (Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan örnekler için bulunan kompaksiyon karakteristiklerinde hazırlanmış)											
					Oda Sıcaklığı		100 C°		200 C°		500 C°		Oda Sıcaklığı		100 C°		200 C°		500 C°		Oda Sıcaklığı		100 C°		200 C°		500 C°	
					Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)		Kür süresi (Gün)	
	Oda Sıcaklığı	100 C°	200 C°	500 C°	7	21	7	21	7	21	7	21	7	21	7	21	7	21	7	21	7	21	7	21	7	21	7	21
0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
20	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

3.2.1. Kompaksiyon deneyi (Standart Proktor)

Kompaksiyon deneyinin amacı, zemin numunesinin farklı su içeriği oranlarına sahip hazırlanmış numuneler üzerinde deneyin tekrar edilmesiyle proktor eğrisinin ve optimum su muhtevası değerindeki kuru birim hacim ağırlığın tespit edilmesidir. Deneyde kullanılan sıkıştırma kalıbı ve çekicinin detayları Şekil 3.6'da ve deneyin yapılışı ile ilgili görsel içerikler Şekil 3.7'de sunulmuştur.



Şekil 3.6. Kompaksiyon (Standart Proktor) test ekipmanları (Das, 2010)

Kompaksiyon deneyi öncesinde pirofillit ve zemin homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra, ilk sıkıştırma deneyi için gerekli su karışımına eklenmiş ve tekrar karıştırılmıştır. Numuneler 101,6 mm çapında ve 944 cm³ hacmindeki bir kalıpta 3 katman halinde ve her katmana 30,5 mm yükseklikten 2,5 kg'lık bir çekiç düşürülerek elde edilen enerji altında sıkıştırılmıştır. Standart Proktor yöntemine göre 600 kN-m/m³ enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir (ASTM D 698-12). Zemine aktarılan enerji seviyeleri, kullanılan tokmak ve vuruş sayılarının standart olması sebebiyle her deney aşamasında aynıdır. Deney, sıkıştırılmış zemin kütleinde bir azalma olana kadar yaklaşık %3 su içeriği artışlarıyla tekrarlanmıştır. Deney sonucunda ölçümü yapılacak olan zemin parçacıklarının kalıp içindeki numunenin hem alt hem üst tarafından alınmasına dikkat edilmiştir.



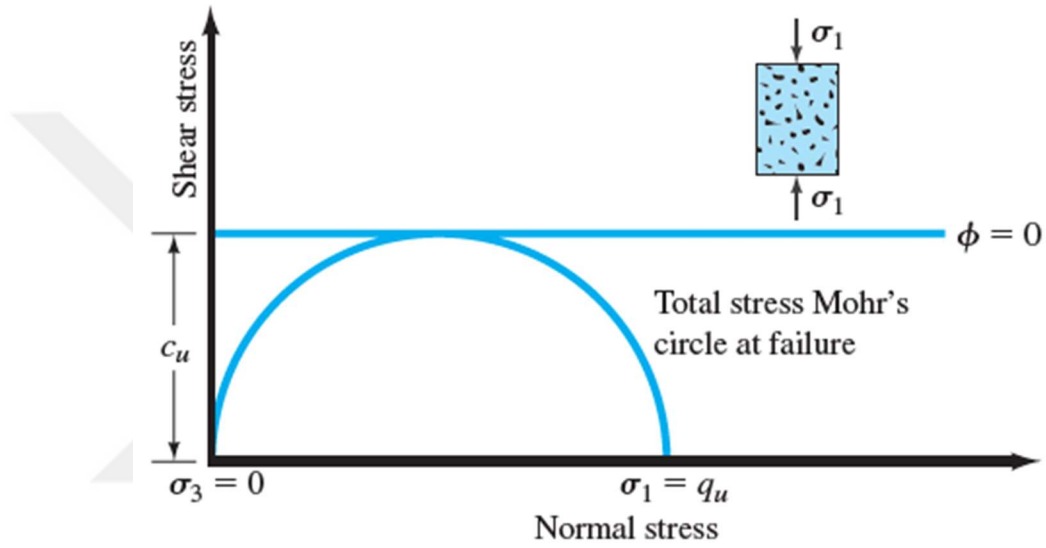
Şekil 3.7. Kompaksiyon deneyi sırasında sıkıştırma işlemi ve sıkıştırılmış numunenin kalıptan kriko yardımıyla çıkarılması

3.2.2. Serbest basınç dayanımı deneyi

Serbest basınç deneyi, herhangi bir çevre basıncı olmadan numuneye düşeyde eksenel yük uygulanarak yapılan bir deneydir. Bu yüzden, kendi kendini dik tutamayan kum zeminler üzerinde bu deney uygulanamaz. Eksenel yük artışları ile beraber numunenin değişen eksenel şekil değiştirmesi ölçülüp kaydedilir ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilir. Zeminin serbest basınç dayanımı (q_u) değeri eksenel gerilmenin (göçme anındaki eksenel şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerilme değeri) ulaşabildiği en büyük değerdir. Deney esnasında drenaj koşulları takip edilemediğinden dolayı drenajsız kayma

mukavemeti değerine hızlı yüklemeler ile ulaşılabilceği var sayılır. Göçme anındaki serbest basınç dayanımının yarısı zemin numunesinin drenajsız kohezyon değeridir. Bu değer, denklem 3.1’de gösterilmiştir. Şekil 3.8’de, serbest basınç deneyi sırasında ulaşılan göçme anındaki gerilme durumunu gösteren Mohr dairesi ve drenajsız kayma mukavemeti zarfı verilmiştir.

$$\tau = c_u = q_u / 2 \quad (3.1)$$



Şekil 3.8. Serbest basınç deneyine ait örnek Mohr dairesi ve mukavemet zarfı
(Das ve Sivakugan, 2016)

Hızlı ve kolay uygulanabilir bir deney olması sebebiyle stabilize edilmiş zeminlerin dayanım özelliklerinin araştırılmasında oldukça yaygın kullanılan bir deneydir. Bu çalışmada, serbest basınç dayanımı deneyleri ASTM D 2166-00 standardına göre yapılmıştır. Numuneler, 100 mm yüksekliğinde ve 50 mm çapında özel olarak üretilmiş paslanmaz çelik tüplerde sıkıştırılarak hazırlanmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan özel olarak üretilmiş bir kalıp

Hidrolik krika kullanılarak tüplerden çıkarılan numunelerin boyutları ve kütleleri kontrol edilmiştir. Killi zeminlerin mukavemetini etkileyen farklı etkenler arasında kürlenme süresi çok önemli bir faktördür. Stabilizasyonun mukavemet üzerindeki etkisi sadece zamanın değil ayrıca sıcaklık ve nemin bir fonksiyonudur (Mitchell ve Hooper, 1961). Bu nedenle, kür süresinin numunelerin mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için, boyutları ve kütleleri kontrol edilen numuneler streç filmlere sarıldıktan sonra 7 ve 21 gün boyunca laboratuvar ortamında desikatörde bekletilmiştir. Serbest basınç dayanımı deneyleri dakikada 1 mm deformasyon uygulayan otomatik bir yükleme makinesi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10).

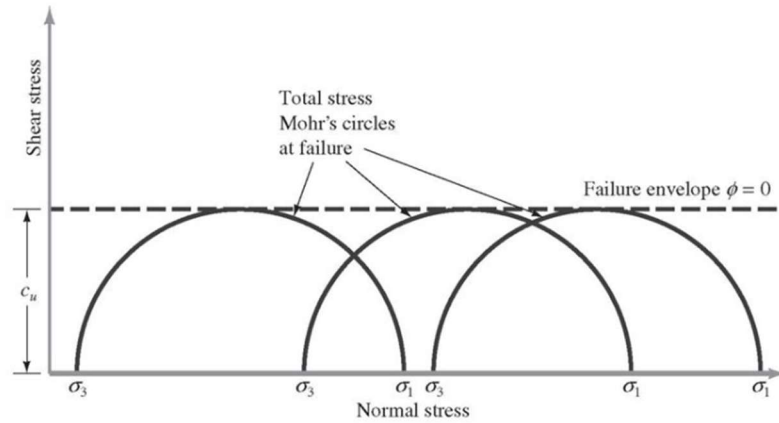


Şekil 3.10. Çalışmada kullanılan serbest basınç dayanımı deney ekipmanı

3.2.3. Konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi (UU)

Konsolidasyonsuz-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneylerinde (UU), numunelerin konsolidasyonuna ve drenajına izin verilmeden hızlı bir şekilde göçmesi sağlanarak drenajsız kayma mukavemeti parametreleri elde edilir. Drenaj suyu vanaları kapatılarak deney sırasında zemin numunesinden su çıkışına izin verilmez ve dolayısıyla numune içinde oluşan boşluk suyu basıncı ölçülemez. Çeşitli hücre basınçları uygulanarak zemin numunesi kırılır ve göçme anında oluşan gerilmeler ile Mohr daireleri çizilerek kayma mukavemeti parametreleri bulunur. Kayma mukavemeti parametreleri (c ve ϕ) toplam gerilmeler cinsinden ifade edilmektedir. Bu tür bir deney ile zeminin deprem veya ani yükleme sonucu oluşan göçmeler altındaki davranışı temsil edilir.

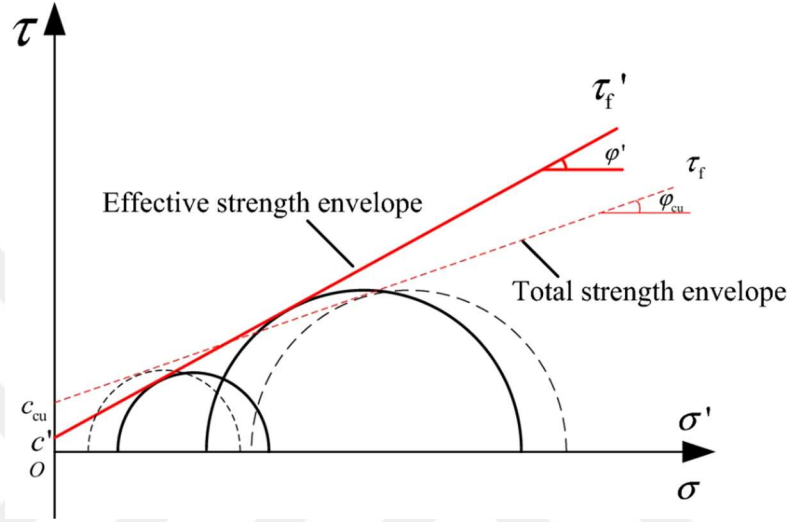
Eğer bu deneyde kullanılan numune suya doygun ise göçme zarfı yatay olacaktır (Şekil 3.11). Bu durumda, içsel sürtünme açısı (ϕ) = 0 olacak, kayma mukavemeti (τ) ise drenajsız kohezyon değerine (c_u) eşit olacaktır. $\tau = c = c_u$ olacaktır. Şekil 3.12’de toplam ve efektif mukavemet zarfının şematik grafiği sunulmuştur.



Şekil 3.11. Doymuş zemine ait Mohr dairesi ve göçme zarfı grafiği örneği

Bu çalışmada, Konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç testi (UU) 50, 100 ve 200 kPa hücre basınçları ile gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 1 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Numune makineye yerleştirilirken önce altına gözenekli bir taş ve filtre kağıdı yerleştirilmiştir. Numuneye gözenekli taşın üzerine yerleştirildikten sonra büyük bir dikkatle su geçirmez membran geçirildi. Membran geçirildikten sonra yükün etki edeceği başlık numunenin üzerine yerleştirildi ve membran başlığın üzerine yerleştirildi. Su temasını

önlemek için numunenin alt ve üst kapağına yuvarlak halkalar takılmıştır. Daha sonra, bir basınç hücresi yerleştirildi ve hücrenin içi hava kalmayana kadar su ile dolduruldu. Su ile doldurulan hücreye çevre basıncı uygulanmış ve zemin numunesinin konsolide olmasına izin verilmeden yükleme yapılmıştır. Şekil 3.13, UU deneyinin gerçekleştirildiği deney sistemini göstermektedir.



Şekil 3.12. Toplam mukavemet ve efektif mukavemet zarfının şematik diyagramları (Zhang, C. et al, 2022)



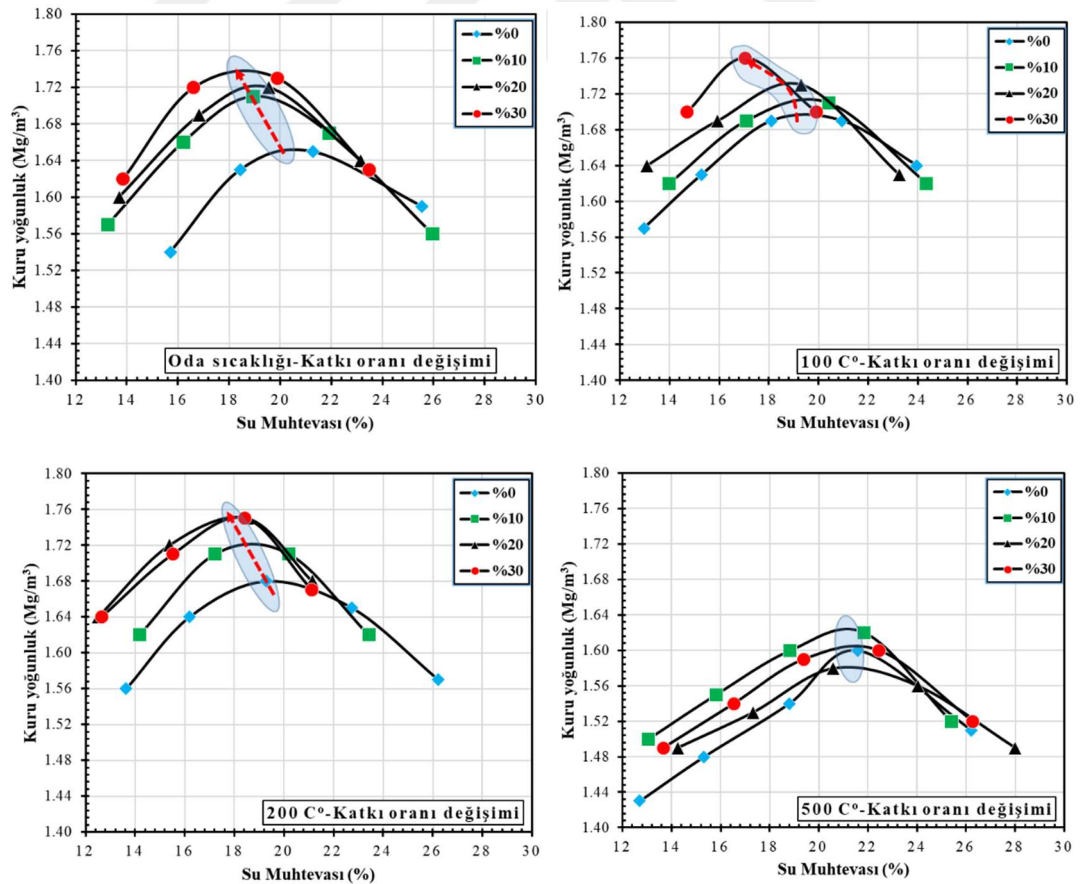
Şekil 3.13. Çalışmada kullan üç eksenli basınç deneyi ekipmanları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

4.1.1. Katkı oranı etkisinin incelenmesi

Çalışma kapsamında, farklı derecede sıcaklıklara (25, 100, 200 ve 500°C) maruz bırakılmış ve farklı oranlarda Pirofillit katkı malzemesi (%0, %10, %20 ve %30) içeren karışımlar kullanılarak yapılan kompaksiyon deneylerinden elde edilen kompaksiyon eğrileri bu bölüm içerisinde tartışılmıştır. Şekil 4.1’de uygulanan her bir farklı sıcaklık derecesinde katkı oranı değişimine göre gruplandırılmış kompaksiyon eğrileri sunulmuştur. Ayrıca Çizelge 4.1’de sıcaklık-katkı oranı değişimine bağlı kompaksiyon karakteristiklerinin sayısal değerleri sunulmuştur.



Şekil 4.1. Farklı sıcaklıklara maruz numunelerin katkı oranına göre kompaksiyon karakteristiklerinin değişimi

Çizelge 4.1. Katkı oranı-sıcaklık değişimine bağlı kompaksiyon karakteristikleri

Katkı (%)	Oda sıcaklığı		100C°		200C°		500C°	
	W _{opt} (%)	ρ _d _{maks} (Mg/m ³)	W _{opt} (%)	ρ _d _{maks} (Mg/m ³)	W _{opt} (%)	ρ _d _{maks} (Mg/m ³)	W _{opt} (%)	ρ _d _{maks} (Mg/m ³)
0	20.5	1.652	19.4	1.697	19.6	1.680	21.3	1.600
10	19.1	1.710	19.4	1.713	18.8	1.721	21.1	1.625
20	19.0	1.723	18.9	1.732	18.1	1.751	21.1	1.581
30	18.6	1.738	17.1	1.760	18.2	1.750	21.4	1.605

Oda sıcaklığındaki ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) kompaksiyon deneyi sonuçları değerlendirildiğinde katkı oranı artışıyla birlikte maksimum kuru yoğunluk (MKY) değerlerinde artış, optimum su muhtevası (OSM) değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. %10, %20 ve %30 yüzdelerindeki katkı ilavesi MKY değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %3.51, %4.30 ve %5.21 oranında artışa, OSM değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %6.82, %7.31 ve %9.26 oranında azalmaya sebep olmuştur. Özellikle %10 katkı seviyesindeki değişimler diğer katkı oranlarında görülen değişimlere göre daha belirgin olmuştur. %30 katkı ilavesi en iyi kompaksiyon karakteristik değerlerini sağlamıştır.

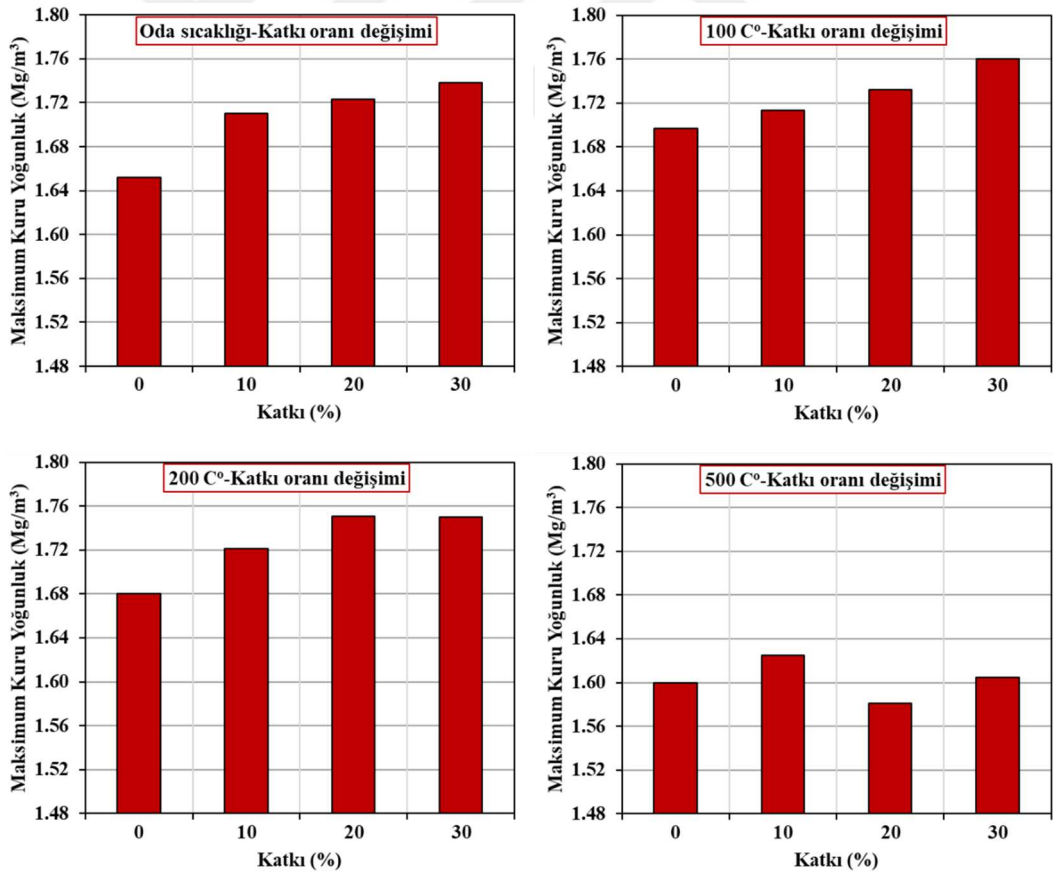
100°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin kompaksiyon sonuçları değerlendirildiğinde oda sıcaklığındaki ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) değişimlerle benzer değişimler olduğu görülmüştür. Katkı oranı artışıyla birlikte MKY artış, OSM değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. %10, %20 ve %30 yüzdelerindeki katkı ilavesi MKY değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %0.94, %2.06 ve %3.71 oranında artış OSM değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %0, %2.57 ve %11.85 oranında azalmaya sebep olmuştur. Özellikle %30 katkı seviyesindeki değişimler diğer katkı oranlarında görülen değişimlere göre daha belirgin olmuştur. %30 katkı ilavesi en iyi kompaksiyon karakteristik değerlerini sağlamıştır.

200°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin kompaksiyon sonuçları değerlendirildiğinde, oda sıcaklığı ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) ve 100°C sıcaklık sonuçlarında olduğu gibi

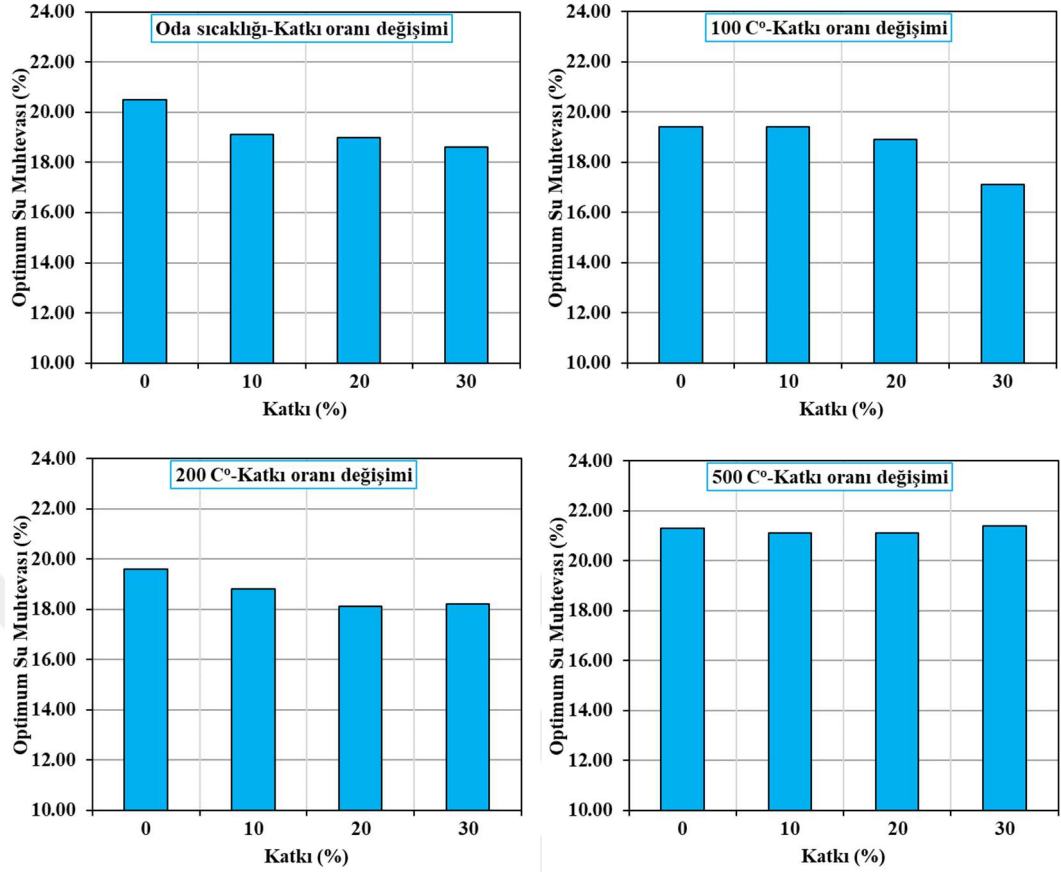
artan katkı ilavesiyle MKY artış, OSM azalma olduğu görülmüştür. %10, %20 ve %30 yüzdelerindeki katkı ilavesi, MKY değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %2.44, %4.22 ve %4.16 oranında artış, OSM değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %4.08, %7.65 ve %7.14 oranında azalmaya sebep olmuştur. %20 ve %30 katkı ilavesi en iyi kompaksiyon karakteristik değerlerini sağlamıştır.

500°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin kompaksiyon sonuçları diğer sıcaklıklardaki sonuçlar ile karşılaştırıldığında farklı bir durum görülmüştür. Bu sıcaklık etkisiyle birlikte katkı ilavesinin kompaksiyon karakteristikleri üzerinde kayda değer bir etki etmediği sonucuna varılmış olup sonuç değerleri arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır.

Farklı derecede sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin MKY ve OSM değerlerinin katkı oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Farklı derecede sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin maksimum kuru yoğunluk değerlerinin katkı oranına göre değişimi



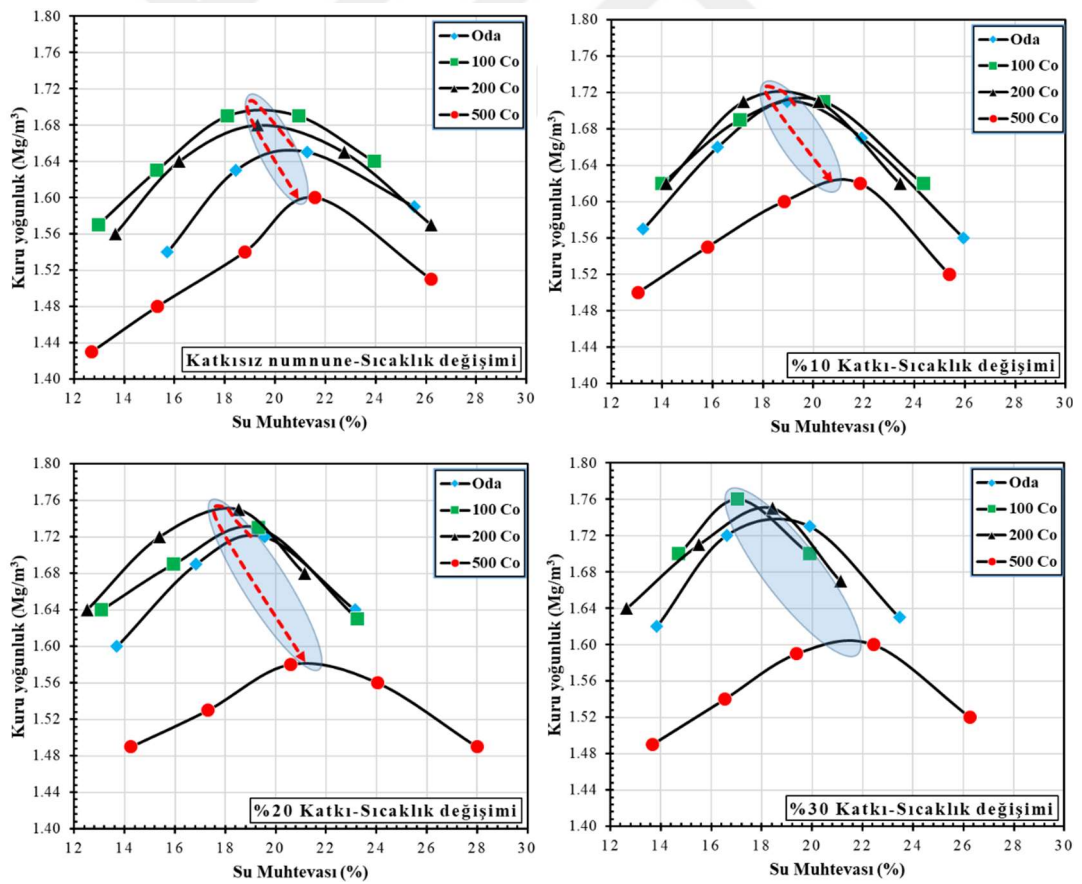
Şekil 4.3. Farklı derecede sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin optimum su muhtevası değerlerinin katkı oranına göre değişimi

Genel olarak değerlendirildiğinde, artan Pirofillit katkı yüzdesi maksimum kuru yoğunluğun artmasına ve optimum su içeriğinin azalmasına neden olmuştur fakat 500°C sıcaklığa maruz bırakılmış numuneler incelendiğinde katkı malzemesinin kompaksiyon karakteristikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür ve farklı oranlardaki katkı yüzdelерinin etkileri arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır. Bu duruma katkı malzemesi ve zemin numunesi yapısının yüksek sıcaklık nedeniyle bozulması, mineralojinin çökmesi, partikül boyutu dağılımının bozulması gibi fiziksel ve kimyasal reaksiyonların sebep olduğu düşünülmektedir. Ancak, 500°C hariç ısı işlemlere maruz bırakılmış numunelerde gerçekleşen kuru yoğunluktaki artış, zemin özelliklerinin iyileştiğinin bir göstergesidir. Bu sonuçlardan farklı olarak, Arun vd. (2020), yaptıkları çalışmada Pirofillit katkısını iki farklı CH sınıfı kil numuneye %0'dan %20'ye kadar artan miktarlarda ilavesiyle kuru yoğunlukta azalma, su içeriğinde artış tespit etmişlerdir. Bunun sebebini katkı malzemesi ile zemin arasında gerçekleşen iyon değişiminin difüz çift tabaka kalınlığında bir azalmanın kuru yoğunlukta bir düşüşe neden olabileceği olarak açıklamışlardır. Rahman (1986) tarafından,

hem katkı maddesinin hem de zeminin özgül ağırlığının ve tane boyutu dağılımının kuru yoğunlukta değişikliklere neden olabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Pirofillit katkısının yüksek özgül ağırlığı kuru yoğunlukta artışa katkıda bulunmuş olabilir. Ayrıca, Pirofillit mineralinin sertliği ve zemin numunesine kıyasla daha düşük su emme kapasitesinin su muhtevası değerlerinde düşüşe neden olmuş olabileceği değerlendirilmektedir.

4.1.2. Sıcaklık etkisinin incelenmesi

Şekil 4.4’de, sıcaklık değişiminin kompaksiyon karakteristikleri üzerindeki etkisinin incelendiği, uygulanan katkı malzemesi yüzdesine göre gruplandırılmış proktor eğrilerinin grafikleri sunulmuştur. Çizelge 4.2’de katkı oranı-sıcaklık değişimine bağlı kompaksiyon karakteristiklerinin sayısal değerleri sunulmuştur.



Şekil 4.4. Farklı yüzdelerde katkı oranı uygulanmış numunelerin sıcaklık etkisine göre kompaksiyon karakteristiklerinin değişimi

Çizelge 4.2. Sıcaklık-katkı oranı değişimine bağlı kompaksiyon karakteristikleri

Sıcaklık (C°)	Katkısız		%10 Katkı		%20 Katkı		%30 Katkı	
	$\rho_{d_{maks}}$ (Mg/m ³)	W_{opt} (%)	$\rho_{d_{maks}}$ (Mg/m ³)	W_{opt} (%)	$\rho_{d_{maks}}$ (Mg/m ³)	W_{opt} (%)	$\rho_{d_{maks}}$ (Mg/m ³)	W_{opt} (%)
Oda	1.652	20.5	1.710	19.1	1.723	19.0	1.738	18.6
100	1.697	19.4	1.713	19.4	1.732	18.9	1.760	17.1
200	1.680	19.6	1.721	18.8	1.751	18.1	1.750	18.2
500	1.600	21.3	1.625	21.1	1.581	21.1	1.605	21.4

Katkısız numunelerin sıcaklığa bağlı değişen kompaksiyon sonuçları incelendiğinde en iyi kompaksiyon karakteristikleri 100°C sıcaklıkta, 1.697 Mg/m³ MKY ve %19.4 OSM değerleriyle görülmüştür. 100°C sıcaklık uygulamasıyla başlangıç sıcaklık değerine göre MKY değerinde yaklaşık olarak %2.72 oranında artış söz konusu olup OSM değerinde ise %5.36 oranında azalış söz konusudur. 200°C sıcaklıkta kuru yoğunluk değerinde küçük bir azalış, su muhtevası değerinde küçük bir artış ortaya çıksa da önemli bir değişiklik görülmemiştir. Fakat, 500°C sıcaklık durumu incelendiğinde kompaksiyon karakteristiklerinde olumsuz bir değişim söz konusudur.

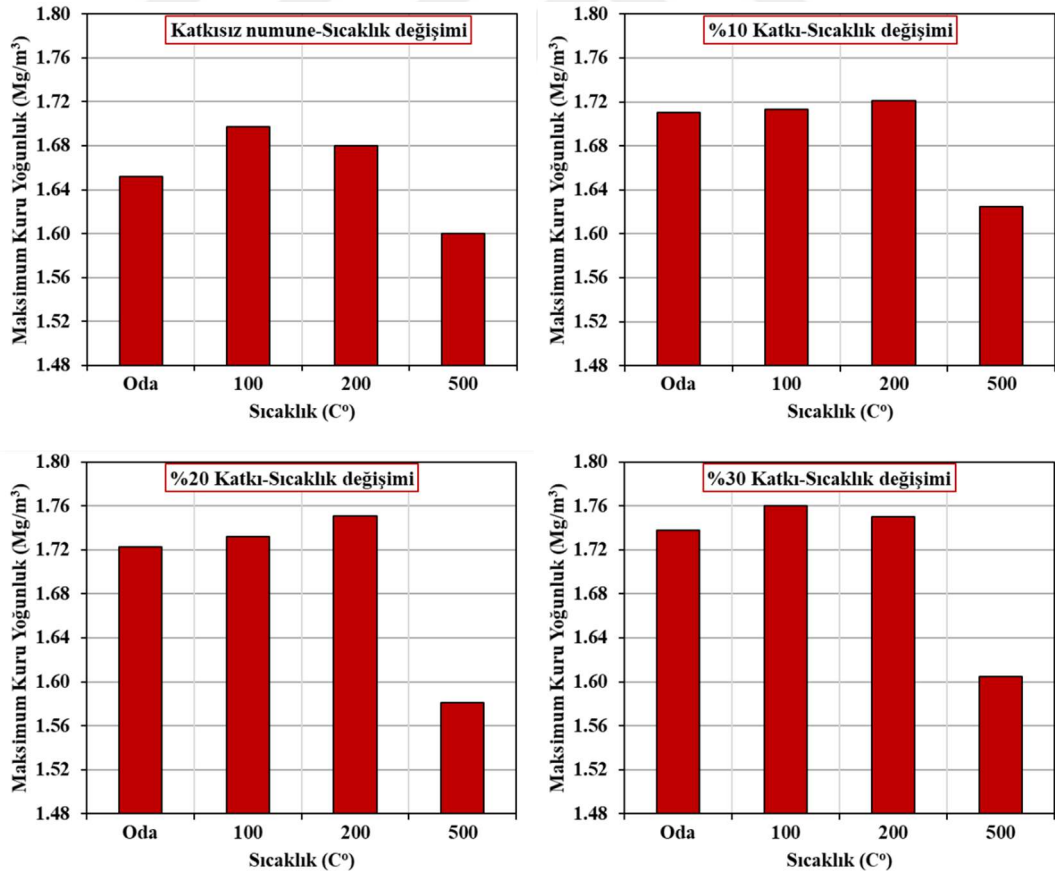
%10 katkı içeren numunelerin sıcaklığa bağlı değişen kompaksiyon sonuçları incelendiğinde en iyi kompaksiyon karakteristikleri 200°C sıcaklıkta, 1.721 Mg/m³ MKY ve %18.8 OSM değerleriyle görülmüştür. Ancak bu değerler oda sıcaklığındaki (22 ± 3°C) ve 100°C sıcaklıktaki sonuçlar ile karşılaştırıldığında kompaksiyon karakteristiklerindeki değişimler çok sınırlı oranlarda gerçekleşmiştir, yani radikal bir değişim söz konusu değildir. 500°C sıcaklık durumu incelendiğinde, yine katkısız numunelerde olduğu gibi MKY değerlerinde azalış, OSM değerlerinde artış görülmektedir.

%20 katkı içeren numunelerin sıcaklığa bağlı değişen kompaksiyon sonuçları incelendiğinde en iyi kompaksiyon karakteristikleri 200°C sıcaklıkta, 1.751 Mg/m³ MKY ve %18.1 OSM değerleriyle görülmüştür. Bu değerler başlangıç sıcaklık değeri olan oda sıcaklığı (22 ± 3°C) ile karşılaştırıldığında MKY %1.56 oranında artış, OSM değerinde %4.73 azalış tespit edilmiştir. Artan sıcaklık ile beraber kompaksiyon karakteristiklerinde

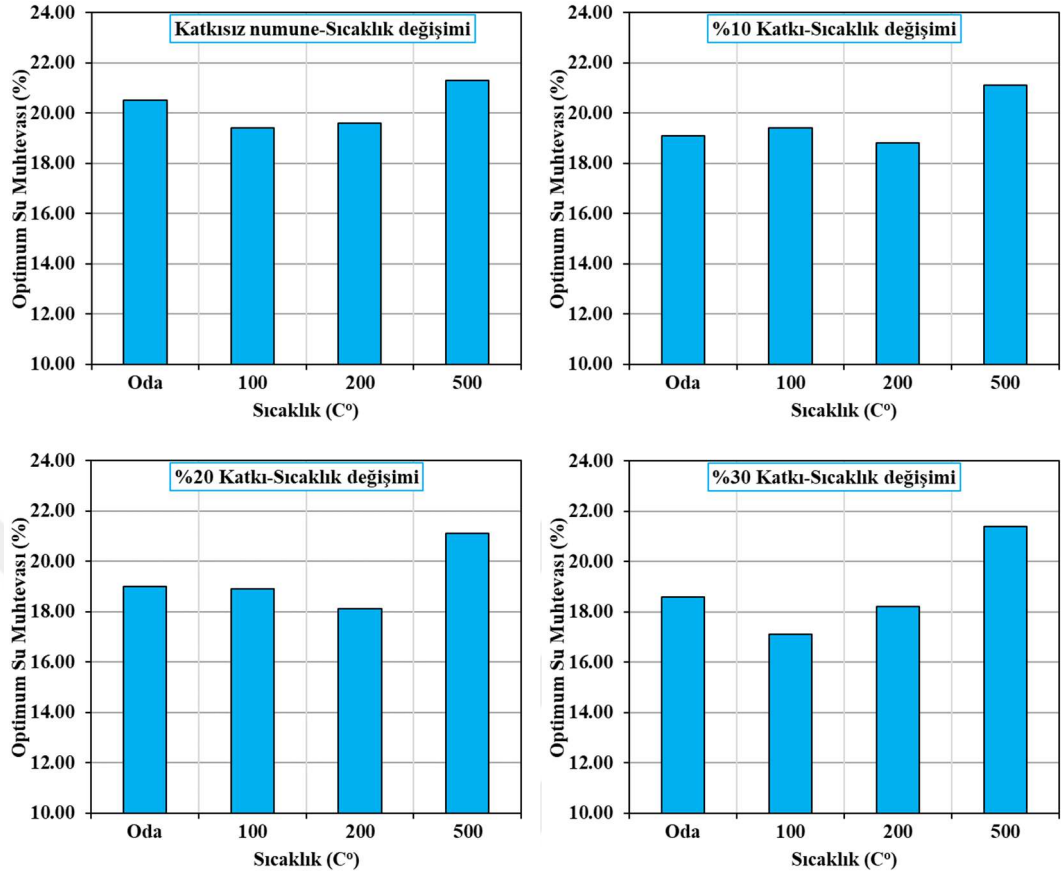
olumlu değişimler söz konusu olsa da 500°C sıcaklıkta bu durum değişmiştir. Diğer katkı oranlarında olduğu gibi bu derecedeki sıcaklık uygulaması kompaksiyon karakteristikleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu görölmüştür.

%30 katkı içeren katkı içeren numunelerin sıcaklığa bağlı değişen kompaksiyon sonuçları incelendiğinde en iyi kompaksiyon karakteristikleri 100°C sıcaklıkta, 1.760 Mg/m³ MKY ve %17.1 OSM değerleriyle görölmüştür. Bu değerler başlangıç sıcaklık değeri olan oda sıcaklığı (22 ± 3°C) ile karşılaştırıldığında MKY %1.26 artış, OSM %8.06 azalış görölmektedir. Yine diğer katkı oranlarındaki deney sonuçlarında göröldüğü gibi 500°C sıcaklık uygulaması numunenin kompaksiyon karakteristiklerini olumsuz olarak radikal biçimde değiştirmiştir.

Farklı oranlarda katkı malzemesi ile stabilize edilmiş numunelerin MKY ve OSM değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri de sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Farklı oranlarda katkı malzemesi ile stabilize edilmiş numunelerin maksimum kuru yoğunluk değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.6. Farklı oranlarda katkı malzemesi ile stabilize edilmiş numunelerin optimum su muhtevası değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

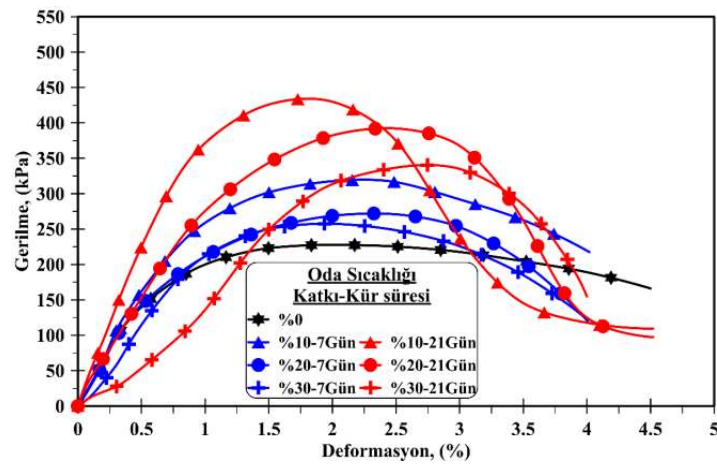
Genel olarak, sıcaklığın katkısız ve farklı oranlarda (%10, %20, %30) Pirofillit katkılı numunelerin kompaksiyon karakteristikleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, 100°C ve 200°C sıcaklık uygulamalarının az derecede olsa da kompaksiyon karakteristiklerini olumlu bir şekilde değiştirdiği tespit edilmiştir. Benzer davranış Abu-Zreig vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada da görülmüştür. Sıcaklık uygulaması ile zeminin yapısal suyunun buharlaşması sonucu danelerin birbirine daha yakın, daha yoğun şekilde sıkışabileceği dolayısıyla MKY değerlerinde bir artışa ve OSM değerlerinde azalığa sebep olabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, sıcaklık uygulamaları danelerin yüzey sertliğinin artmasına neden olabilir ve böylece kompaksiyon deneyinde daha yüksek yoğunluk değerleri elde edilebilir. Katkısız ve %30 katkılı numunelerde en iyi kompaksiyon deneyi sonuçlarına 100°C sıcaklıkta ulaşılmışken, %10 ve %20 katkılı numunelerde ise 200°C sıcaklıkta ulaşılmıştır. 500°C sıcaklık uygulaması zeminin kompaksiyon karakteristiklerini olumsuz olarak değiştirmiştir ve maksimum kuru yoğunluk değerinde düşüşe, optimum su

muhtevası değerinde artışa sebep olmuştur. Bu duruma, dehidroksilasyon sonucu gerçekleşen endotermik reaksiyonların zeminin yapısında bozulmalara neden olduğu düşünülmektedir. Sperinck vd. (2011), dehidroksilasyon yoluyla zemin yapısında düzensizliğe neden olan olgunun yapısal suyun serbest bırakılması sonucu olarak alüminosilikatların polimerik yapısının bozulması olduğunu ifade etmiştir. 500°C sıcaklığın, özellikle hidroksil (OH⁻) grupları içeren kil minerallerin kristal yapısında bozulmaya yol açtığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, 500°C gibi yüksek sıcaklıklar, organik bileşenlerin yanmasına ve daneler arasındaki bağların zayıflamasına neden olur. Bu durum, zeminin kompaksiyon davranışını olumsuz etkilediği değerlendirilmektedir.

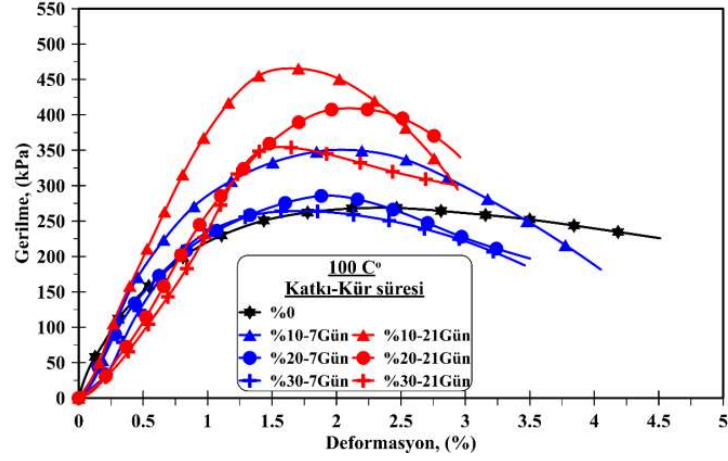
4.2. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Bu çalışmada, farklı derecedeki sıcaklıklara maruz bırakılmış (25, 100, 200 ve 500°C) ve farklı oranlarda Pirofillit katkı malzemesi (%0, %10, %20, %30) içeren numuneler, 7 ve 21 gün süreyle kürlenerek serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık etkisinin, kür süresinin ve katkı oranının, SBD (serbest basınç dayanımı) değerleri ve göçme birim deformasyon değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

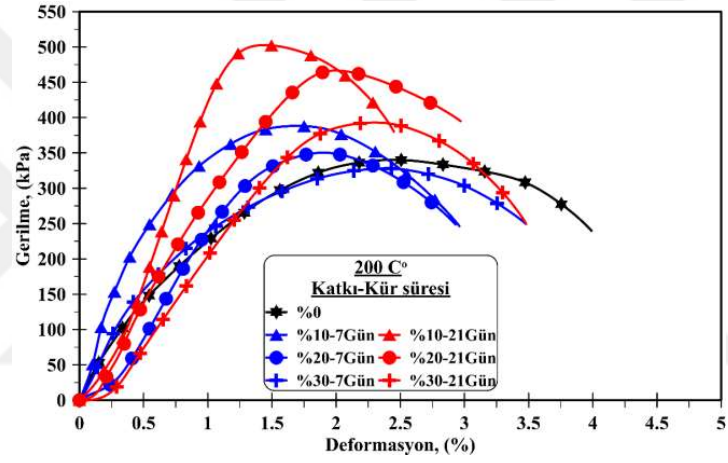
Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da farklı derecedeki sıcaklıklara maruz bırakılmış numunelerin serbest basınç deneyi sonuç grafikleri gösterilmiştir. Çizelge 4.3'te sıcaklık değerlerine göre gruplandırılmış gerilme-deformasyon değerlerini gösteren SBD sonuç çizelgesi sunulmuştur.



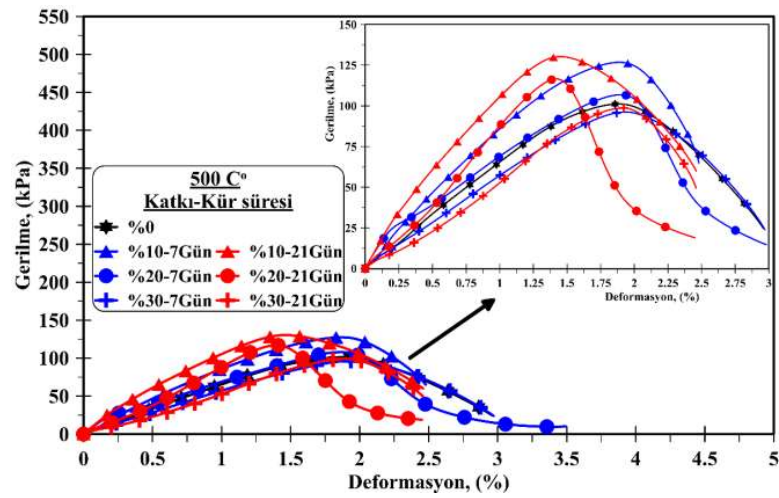
Şekil 4.7. Oda sıcaklığı koşulundaki SBD deneyi gerilme-deformasyon eğrileri



Şekil 4.8. 100°C sıcaklık koşulundaki SBD deneyi gerilme-deformasyon eğrileri



Şekil 4.9. 200°C sıcaklık koşulundaki SBD deneyi gerilme-deformasyon eğrileri



Şekil 4.10. 500°C sıcaklık koşulundaki SBD deneyi gerilme-deformasyon eğrileri

Çizelge 4.3. Sıcaklık değerlerine göre gruplandırılmış SBD deneyi sonuç değerleri

Sıcaklık (C°)	Katkı (%)	7 Gün		21 Gün	
		q _{un} (kPa)	ε _u (%)	q _{un} (kPa)	ε _u (%)
Oda	0	227.6 (kürsüz)	1.94 (kürsüz)		
	10	317.60	2.09	432.20	1.72
	20	271.30	2.46	392.60	2.44
	30	257.60	1.94	340.30	2.76
100	0	269.6 (kürsüz)	2.28 (kürsüz)		
	10	350.20	1.95	468.10	1.58
	20	285.90	1.78	410.00	2.08
	30	263.50	1.71	356.20	1.58
200	0	340.3 (kürsüz)	2.46 (kürsüz)		
	10	388.10	1.69	508.20	1.38
	20	350.40	1.97	472.10	1.98
	30	328.10	2.33	397.80	2.16
500	0	101.2 (kürsüz)	1.86 (kürsüz)		
	10	126.20	1.79	130.20	1.28
	20	106.3	1.81	116.5	1.45
	30	96.20	1.95	98.4	1.83

Serbest basınç deneyi değerlerinde sıcaklık etkisi incelendiğinde, 200°C'ye kadar sıcaklık artışı ile birlikte dayanım değerlerinde artış görülürken, 500°C'de dayanım değerlerinde radikal düşüşler meydana gelmiştir. Bu durum, katkı oranı fark etmeksizin her farklı katkı oranı ve kür süresi koşulunda geçerli olmuştur. En belirgin dayanım artışı, 200°C sıcaklığa maruz bırakılan, 21 gün kürlen, %10 Pirofillit katkılı numunede görülmüştür. Saf numunenin serbest basınç dayanımı 227.6 kPa değerindeyken bahsi geçen sıcaklık, katkı oranı ve kür süresi koşulunda %123.28 oranında artış ile 508.2 kPa değerine ulaşmıştır. En yüksek dayanım değerleri, her katkı içeriği ve her kür süresi koşullarında 200°C ısıtma işlemine maruz kalan numunelerde görülmüştür. En düşük dayanım değeri, 500°C sıcaklığa maruz bırakılan, 7 gün kürlen, %30 Pirofillit katkılı numunede meydana gelmiştir. %57.73

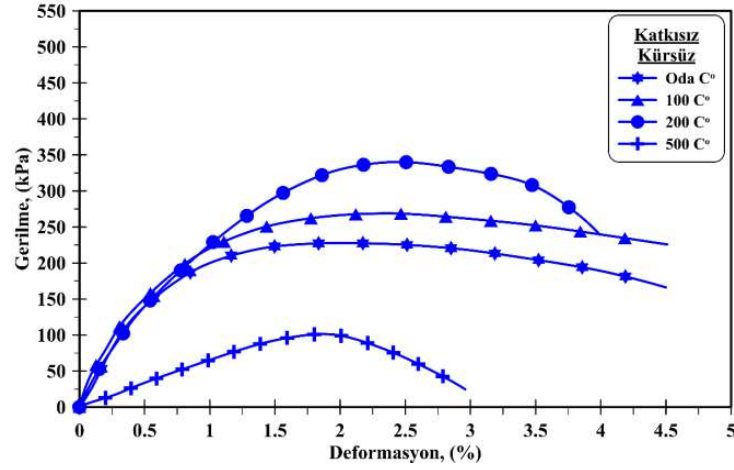
oranında dayanım azalımı ile 96.2 kPa değerine ulaşılmıştır. 500°C ısıtma işlemine maruz kalan bütün numunelerde, katkı içeriği ve kür süresi koşulları fark etmeksizin en düşük dayanım değerleri görülmüştür. 200°C'ye kadar ısıtma işleminin, zeminin kuru yoğunluk değerlerinde artışa sebep olduğu kompaksiyon deneyi sonuçlarında incelenmiştir. Ayrıca bu ısıtma işlemlerinin zemin ile katkı malzemesi arasında katyon değişim kapasitesini artırabileceği, puzolanik reaksiyonların gerçekleşmesi ile kimyasal sertleşmeye yol açabileceği düşünülmekte olup bu tür yapısal değişikliklerin dayanımdaki artışın önemli sebepleri olabileceği değerlendirilmektedir. Ancak, 500°C gibi yüksek sıcaklıkta dehidroksilasyon ile birlikte yapısal bağların hasar görmesi, zemin ve katkı malzemesi yapısında meydana gelebilecek termal çatlaklar, dayanımda ortaya çıkan düşüşlerin sebepleri olarak değerlendirilmektedir.

Dayanım değerlerinin yanı sıra, göçme birim deformasyon seviyeleri incelendiğinde, katkı malzemesi içeren numunelerde sıcaklık artışı ile birlikte birim deformasyon değerleri arasında anlamlı bir ilişki görülmemiştir. Fakat, katkı içermeyen numunelerde, dayanım değerlerinde olduğu gibi 200°C sıcaklığa kadar deformasyon değerlerinde artış, 500°C sıcaklıkta düşüş söz konusudur. Saf numunenin göçme anındaki birim deformasyonu %1.94 seviyesindeyken, 200°C sıcaklıkta %26.8 oranında artış ile %2.46 seviyesine ulaşmıştır. 500°C sıcaklıkta birim deformasyon değeri ise %4.12 gibi küçük bir orandaki azalış ile %1.86 seviyesine ulaşmıştır. 200°C'ye kadar uygulanan ısıtma işlemlerinde zemin içerisinde bulunan minerallerde termal genleşme ve hafif yumuşama etkisinin göçme birim deformasyon değerinde artışa sebep olabileceği, 500°C'de uygulanan ısıtma işlemlerinde zeminin mineral yapısındaki bozulmalar ve termal çatlakların kırılma dayanımına sebep olabileceği dolayısıyla göçme birim deformasyon değerinde düşüşe sebep olabileceği değerlendirilmektedir.

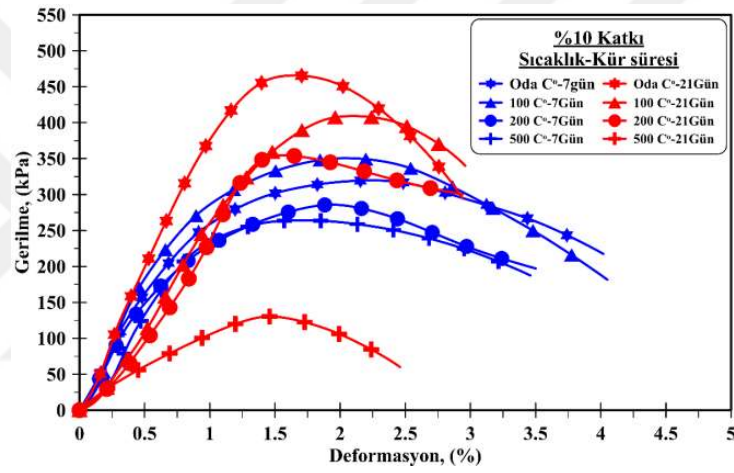
Çizelge 4.4'te içerdikleri katkı oranlarına göre gruplandırılmış numunelerin gerilme-deformasyon değerlerini gösteren serbest basınç deneyi sonuç çizelgesi sunulmuştur. Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de farklı oranlarda katkı malzemesi içeren numunelerin SBD deneyi gerilme-deformasyon eğrileri gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Katkı oranlarına göre gruplandırılmış numunelerin SBD deneyi sonuç değerleri

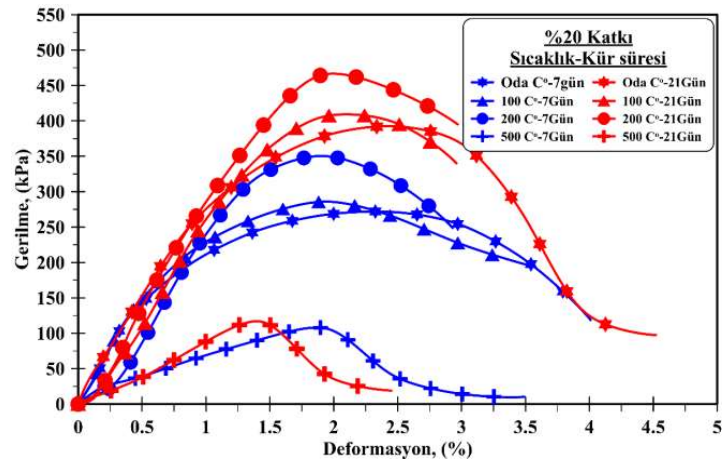
Katkı (%)	Sıcaklık (C°)	7 Gün		21 Gün	
		q _{un} (kPa)	ε _u (%)	q _{un} (kPa)	ε _u (%)
0	Oda	227.6 (kürsüz)	1.94 (kürsüz)		
	100	269.6 (kürsüz)	2.28 (kürsüz)		
	200	340.3 (kürsüz)	2.46 (kürsüz)		
	500	101.2 (kürsüz)	1.86 (kürsüz)		
10	Oda	317.6	2.09	432.2	1.72
	100	350.2	1.95	468.1	1.58
	200	388.1	1.69	508.2	1.38
	500	126.2	1.79	130.2	1.28
20	Oda	271.3	2.31	392.6	2.44
	100	285.9	1.78	410.0	2.08
	200	350.4	1.97	472.1	1.98
	500	106.3	1.81	116.5	1.45
30	Oda	257.6	1.94	340.3	2.76
	100	263.5	1.71	356.2	1.58
	200	328.1	2.33	397.8	2.16
	500	96.2	1.95	98.4	1.83



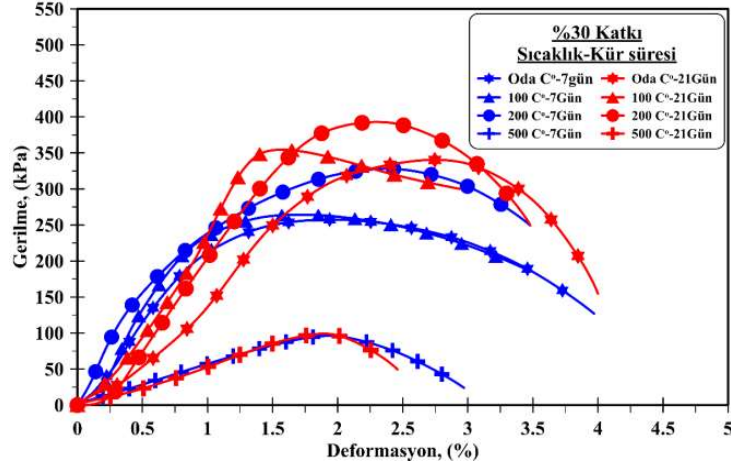
Şekil 4.11. Katkısız numunelerin SBD deneyi gerilme-deformasyon grafikleri



Şekil 4.12. %10 katkı içeren numunelerin SBD deneyi gerilme-deformasyon grafikleri



Şekil 4.13. %20 katkı içeren numunelerin SBD deneyi gerilme-deformasyon grafikleri

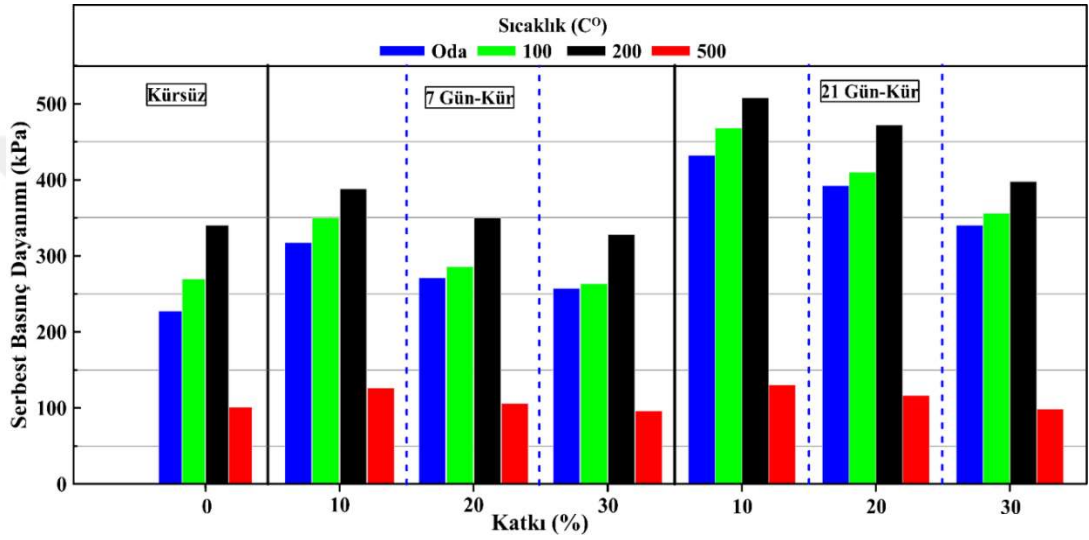


Şekil 4.14. %30 katkı içeren numunelerin SBD deneyi gerilme-deformasyon grafikleri

Serbest basınç deneyi sonuçlarında katkı oranı etkisi değerlendirildiğinde, %10 Pirofillit katkı seviyesinin dayanım üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu görülmektedir. Her bir farklı sıcaklık ve kür süresi koşulunda, %10 Pirofillit katkısı ile en iyi dayanım değerlerine ulaşılmıştır. %10 katkı içeriği ve 21 gün kür süresi uygulamasıyla, oda sıcaklığı ($22 \pm 3^\circ\text{C}$), 100°C , 200°C ve 500°C ısıtma koşullarına maruz bırakılmış katkısız (saf) numunelere göre SBD değerleri sırasıyla %89.89, %73.62, %49.43 ve %28.65 oranında artmıştır. Ancak, %10'dan daha fazla katkı ilavelerinde, katkı oranı artışı ile birlikte dayanım değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Özellikle, 7 gün kürlenmiş %30 katkılı numuneler, ısıtma işlemleri söz konusu olduğunda dayanım değerlerinde aynı ısıtma işlemine maruz bırakılmış saf zemin numunelerine göre negatif değişimler görülmüştür. Oda sıcaklığı ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) koşulunda, 7 gün kürlenmiş %30 katkılı numunenin dayanım değeri %13.18 oranında artış ile 257.6 kPa değerine ulaşmıştır. Ancak, %30 katkılı ve 7 gün kürlenmiş numunelerin diğer tüm ısıtma koşullarında (100°C , 200°C ve 500°C) katkısız saf numunelere göre dayanım değerlerinde sırasıyla %2.22, %3.58, %4.94 oranında düşüş gerçekleşmiştir. %10 katkı oranı seviyesinde en yüksek dayanım değerlerinin görülmesinde, katkı malzemesinin zemin matrisine en uygun oranda eklenerek boşlukları doldurup yoğunlaşmayı artırabilmesi ve kimyasal tepkimelerin en verimli şekilde gerçekleşebileceği optimum oran olabileceği değerlendirilmektedir. Yapılan kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre, %30 katkı seviyesinde karışımların en yüksek kuru yoğunluk değerlerine sahip olmasına rağmen serbest basınç deneylerinde dayanım değerlerinin azalma sebebi olarak ise Pirofillit mineralinin tabakalı bir yapıya sahip olan filosilikat minerali olması, dolayısıyla katkı miktarı artışı ile daha fazla kaygan yüzey oluşturarak zemin ile bağlanmayı/sürtünmeyi

zorlaştıracılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, katkı oranı artışı ile birlikte mikrogözenekliliğin artabileceği düşünülmektedir. Bu yapısal değişimlerin dayanımdaki negatif değişimlere neden olabileceği değerlendirilmektedir.

Dayanım değerlerinin yanı sıra, göçme birim deformasyon seviyeleri incelendiğinde, tüm ısıtım işlem koşulları dahil olmak üzere değişen katkı oranları ile birim deformasyon değerleri arasında anlamlı bir ilişki görülememiştir.



Şekil 4.15. SBD değerlerinin sıcaklık derecesi, katkı oranı ve kür süresine göre değişimi

Serbest basınç deneyi sonuçlarında kür süresinin etkisi incelendiğinde, uygulanan her ısıtım işlemde, 21 günlük kür süresinde, 7 günlük kür süresine göre daha büyük dayanım değerleri elde edilmiştir. 7 gün boyunca kürlenmiş numuneler arasında en yüksek dayanım değeri, %10 katkılı 200°C ısıtım işlemine maruz kalan numunede 388.1 kPa değeri ile elde edilmiştir. 21 gün boyunca kürlenmiş numuneler arasında en yüksek dayanım değeri, %10 katkılı 200°C ısıtım işlemine maruz kalan numunede 508.2 kPa değeri ile elde edilmiştir. Bu aynı katkı oranı ve ısıtım işlemi koşulunda, 21 gün kürlenme ile 7 gün kürlenme koşuluna göre dayanımda %30.94 oranında bir artış gerçekleşmiştir. Ancak, 500°C ısıtım işlemine maruz kalan numunelerde, kürlenme işlemlerinin dayanım değerlerine etkisi çok sınırlı derecede gerçekleşmiştir. 500°C ısıtım işlemi ve %10, %20, ve %30 katkı içeriği koşullarında, 21 gün kür uygulaması, 7 günlük kür uygulamasına göre dayanımda sırasıyla %3.16, %9.59 ve %2.28 oranında artış sağlamıştır. Kürlenme işlemleri, 500°C sıcaklığın olumsuz dayanım

etkilerine karşı yeterli iyileştirme performansı sergileyememiştir. Bunun sebebi olarak, yüksek ısı işlem sonucu Pirofillit mineralinin ve zeminin yapısındaki yapısal göçmeler olabileceği değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, dayanım değerlerine olumlu etki edecek fiziksel ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşmemiş olduğu düşünülmektedir.

Uzun süre kürlleme, Pirofillit katkısı ve zemin arasında gerçekleşen puzolanik reaksiyonların ve katyon değişim süreçlerinin daha fazla gelişmesine olanak tanır, böylece iç yapı yoğunlaşabilir ve bağlar güçlenebilir. Ayrıca, 21 gün kürlenmiş karışımlarda muhteva dağılımı daha homojen şekilde gerçekleşebilir. Böylece tüm bu süreçlerin, katkı malzemesinin zeminle daha iyi bütünleşmesine ve dayanım artışına katkıda bulunabileceği dolayısıyla daha uzun süreli kür uygulamalarının dayanım değerlerine daha olumlu etki edeceği değerlendirilmektedir. Kür süresi ile göçme birim deformasyonları arasında açıklanabilir bir korelasyon bulunamamıştır.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan Pirofillit katkılı ve saf zemin numunelerinin serbest basınç deney sonuçları, Arun vd., (2020) yaptığı çalışmadaki SBD deneyi sonuçları ile özellikle serbest basınç dayanımı-katkı oranı ilişkisi açısından benzerlik göstermektedir.

4.3. Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU) Sonuçları

Konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi (UU), serbest basınç dayanımı deneyine kıyasla çevre yüklerinin dayanım parametreleri üzerindeki etkisini inceleme imkanı sunar. Numunenin çok yönlü gerilme koşullarındaki davranışını daha doğru yansıtır. Konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyinin (UU) sonuçları, numunenin doygunluk derecesine bağlı olarak farklılık gösterir. Tamamen doygun ince daneli zeminlerde göçme zarfı yatay bir çizgi oluşturur ve dayanım, yalnızca drenajsız kohezyon etkisi altındadır. Kısmi, doygun numunelerde ise drenajsız kohezyonun yanı sıra içsel sürtünme açısı da dayanım üzerinde etkili olur. Bu durum, UU deneyinin farklı doygunluk koşullarında zemin davranışını daha detaylı bir şekilde değerlendirme imkanı sunduğunu gösterir.

Çizelge 4.5'te uygulanan sıcaklık derecesine göre gruplandırılmış ve Çizelge 4.6'da katkı oranına göre gruplandırılmış numunelerin dayanım parametreleri değerleri verilmiştir.

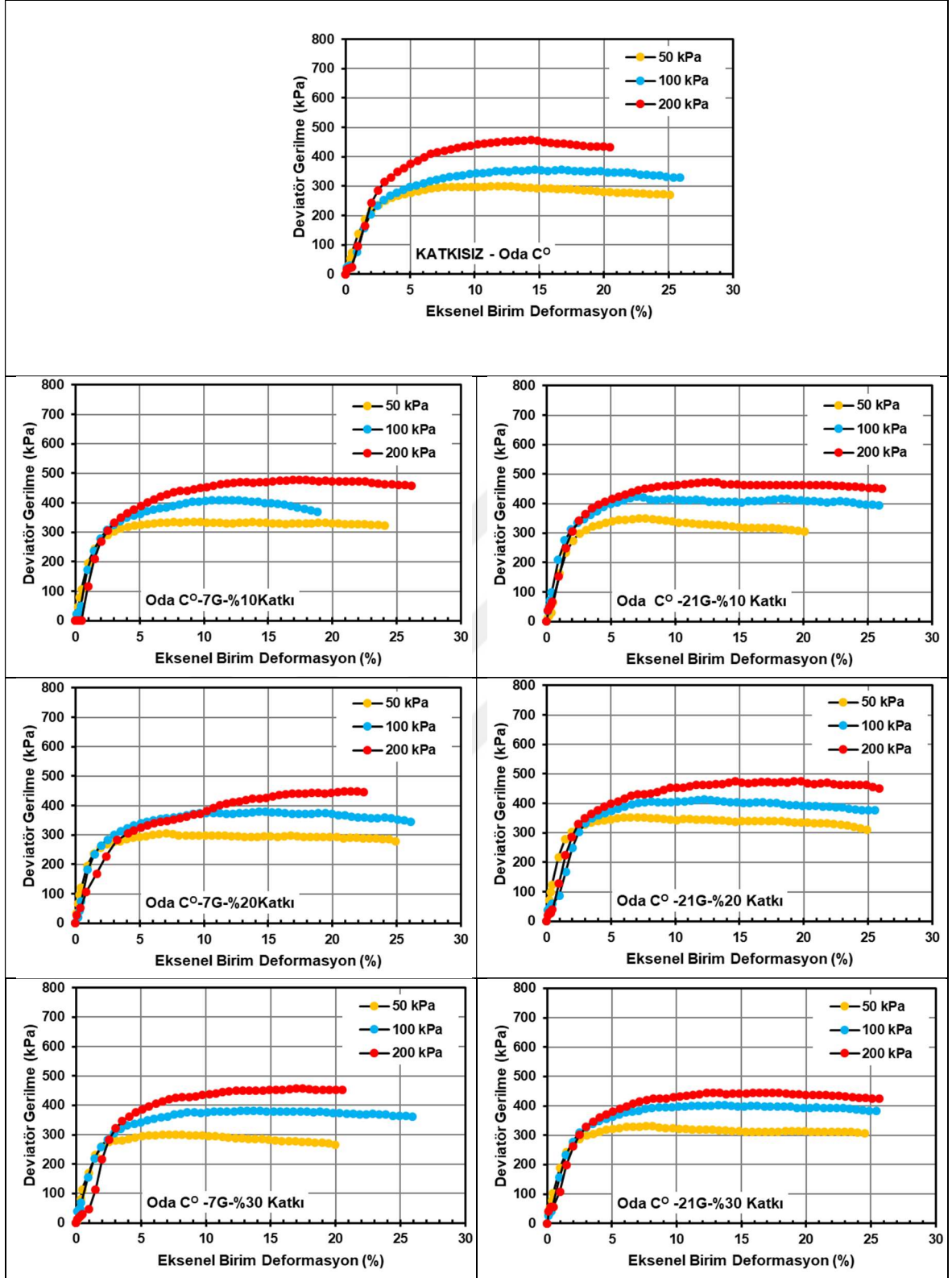
Şekil 4.10’da UU deneylerinin gerilme-deformasyon eğrileri sunulmuştur. Şekil 4.11’de UU deneyi göçme zarfları sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Sıcaklık derecesine göre gruplandırılmış numunelerin dayanım parametreleri değerleri

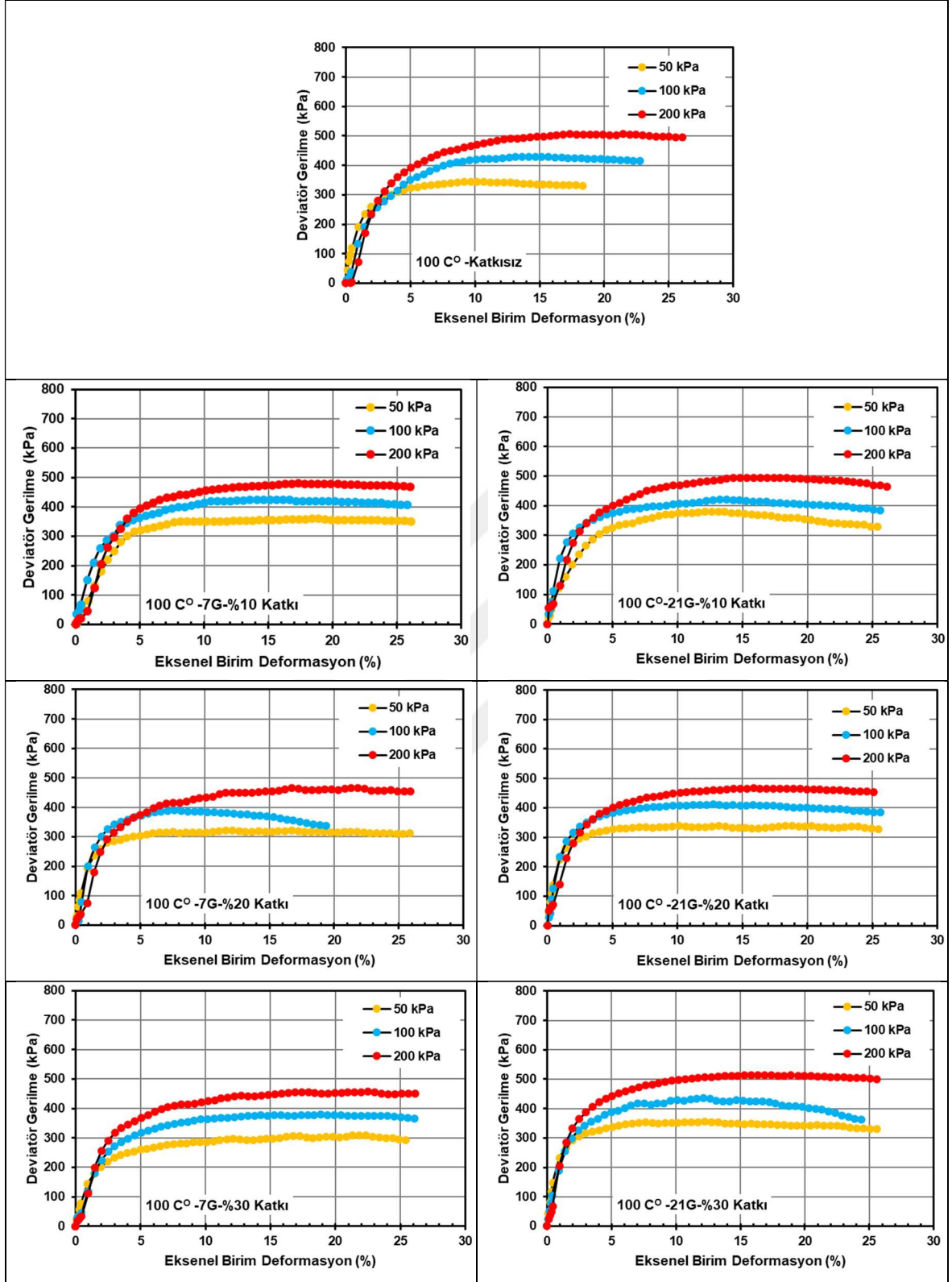
Sıcaklık (C°)	Katkı (%)	7 Gün		21 Gün	
		c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
Oda	0	87.45 (kürsüz)	19.92 (kürsüz)		
	10	107.80	18.37	122.21	15.74
	20	98.61	17.86	119.80	16.45
	30	92.09	19.13	116.30	15.63
100	0	105.88 (kürsüz)	20.14 (kürsüz)		
	10	123.95	16.24	128.81	16.03
	20	101.29	18.51	115.06	16.85
	30	94.52	19.08	110.22	19.81
200	0	115.75 (kürsüz)	21.74 (kürsüz)		
	10	132.10	20.87	142.65	24.02
	20	124.18	23.24	127.64	19.79
	30	122.65	19.24	123.86	18.59
500	0	64.95 (kürsüz)	26.55 (kürsüz)		
	10	68.40	25.97	53.60	29.81
	20	61.60	26.58	50.15	30.40
	30	50.23	27.72	59.22	30.28

Çizelge 4.6. Katkı oranına göre gruplandırılmış numunelerin dayanım parametreleri değerleri

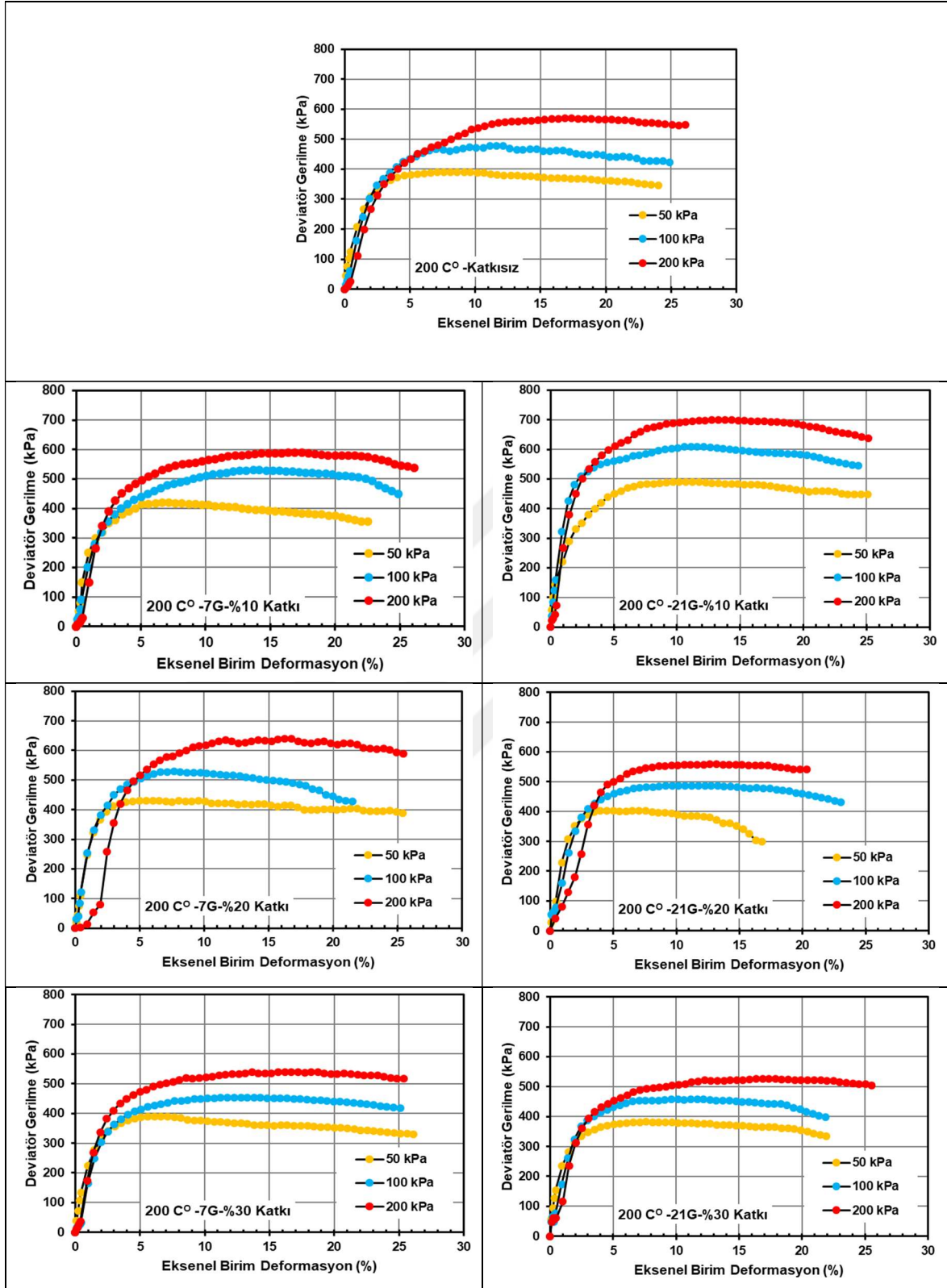
Katkı (%)	Sıcaklık (C°)	7 Gün		21 Gün	
		c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
0	Oda	87.45 (kürsüz)	19.92 (kürsüz)		
	100	105.88 (kürsüz)	20.14 (kürsüz)		
	200	115.75 (kürsüz)	21.74 (kürsüz)		
	500	64.95 (kürsüz)	26.55 (kürsüz)		
10	Oda	107.80	18.37	122.21	15.74
	100	123.95	16.24	128.81	16.03
	200	132.10	20.87	142.65	24.02
	500	68.40	25.97	53.60	29.81
20	Oda	98.61	17.86	119.80	16.45
	100	101.29	18.51	115.06	16.85
	200	124.18	23.24	127.64	19.79
	500	61.60	26.58	50.15	30.40
30	Oda	92.09	19.13	116.30	15.63
	100	94.52	19.08	110.22	19.81
	200	122.65	19.24	123.86	18.59
	500	50.23	27.72	59.22	30.28



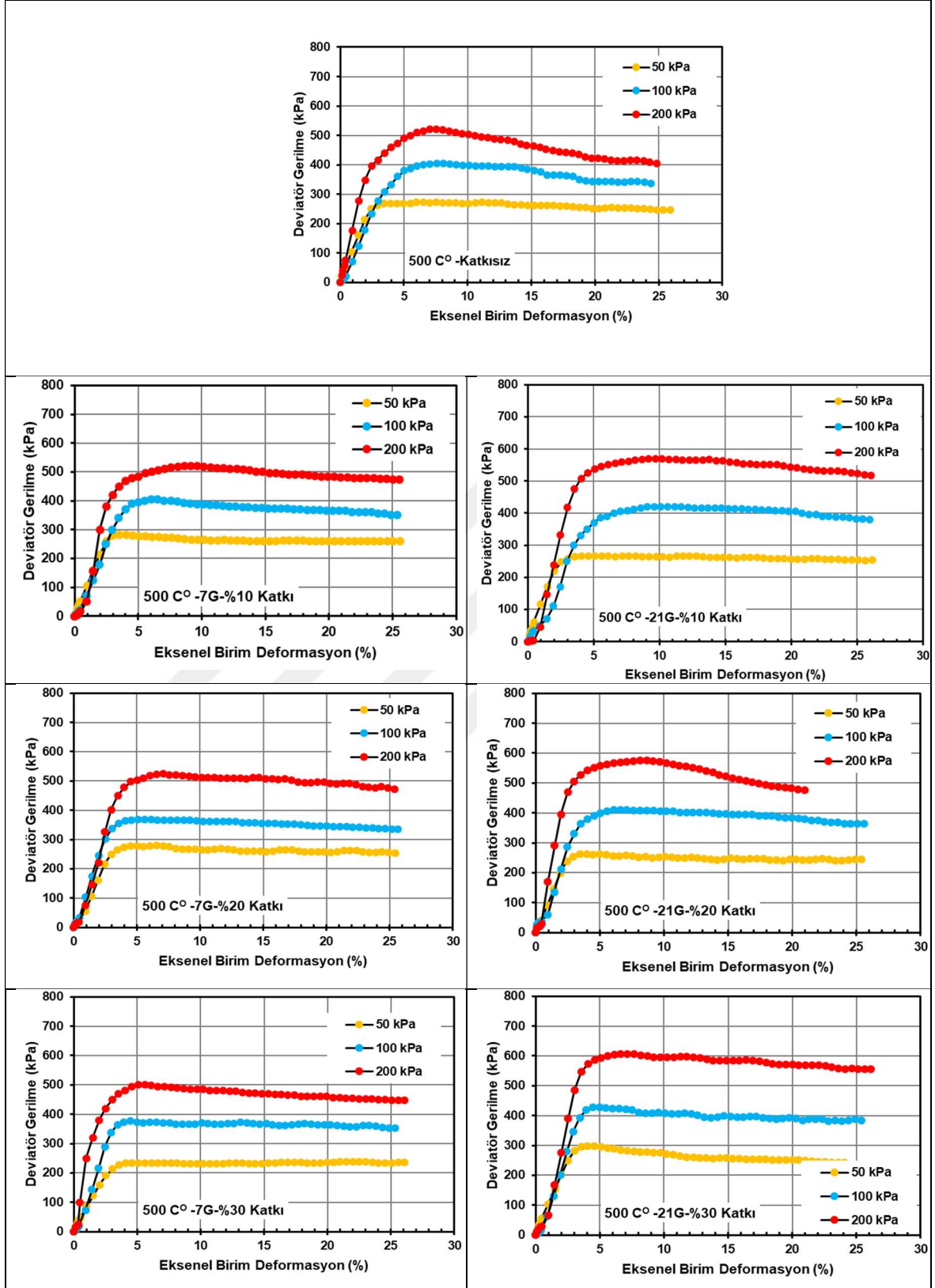
Şekil 4.16 Oda sıcaklığı koşulundaki UU deneyi gerilme-deformasyon eğrileri



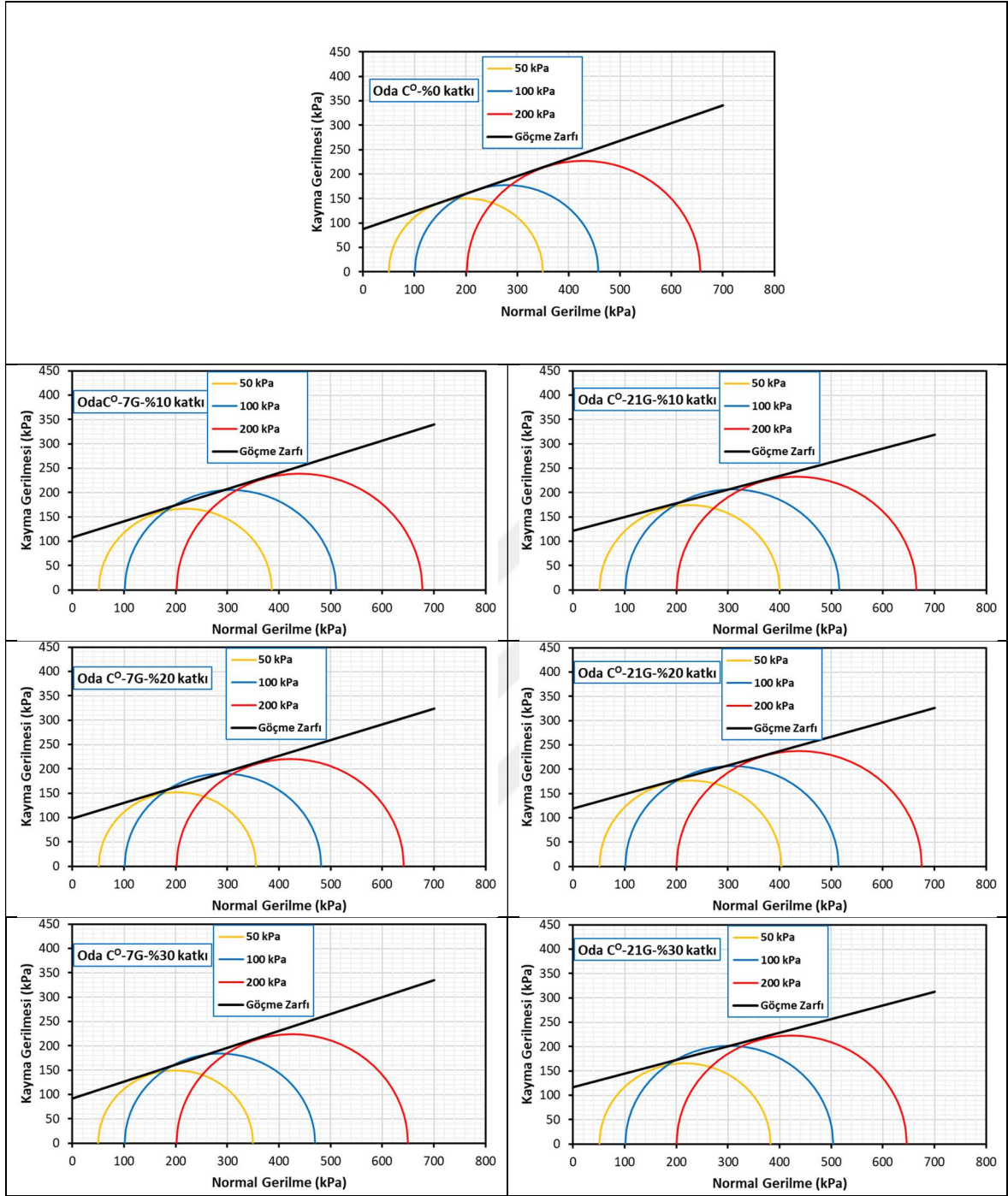
Şekil 4.17. 100°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi gerilme-deformasyon eğrileri



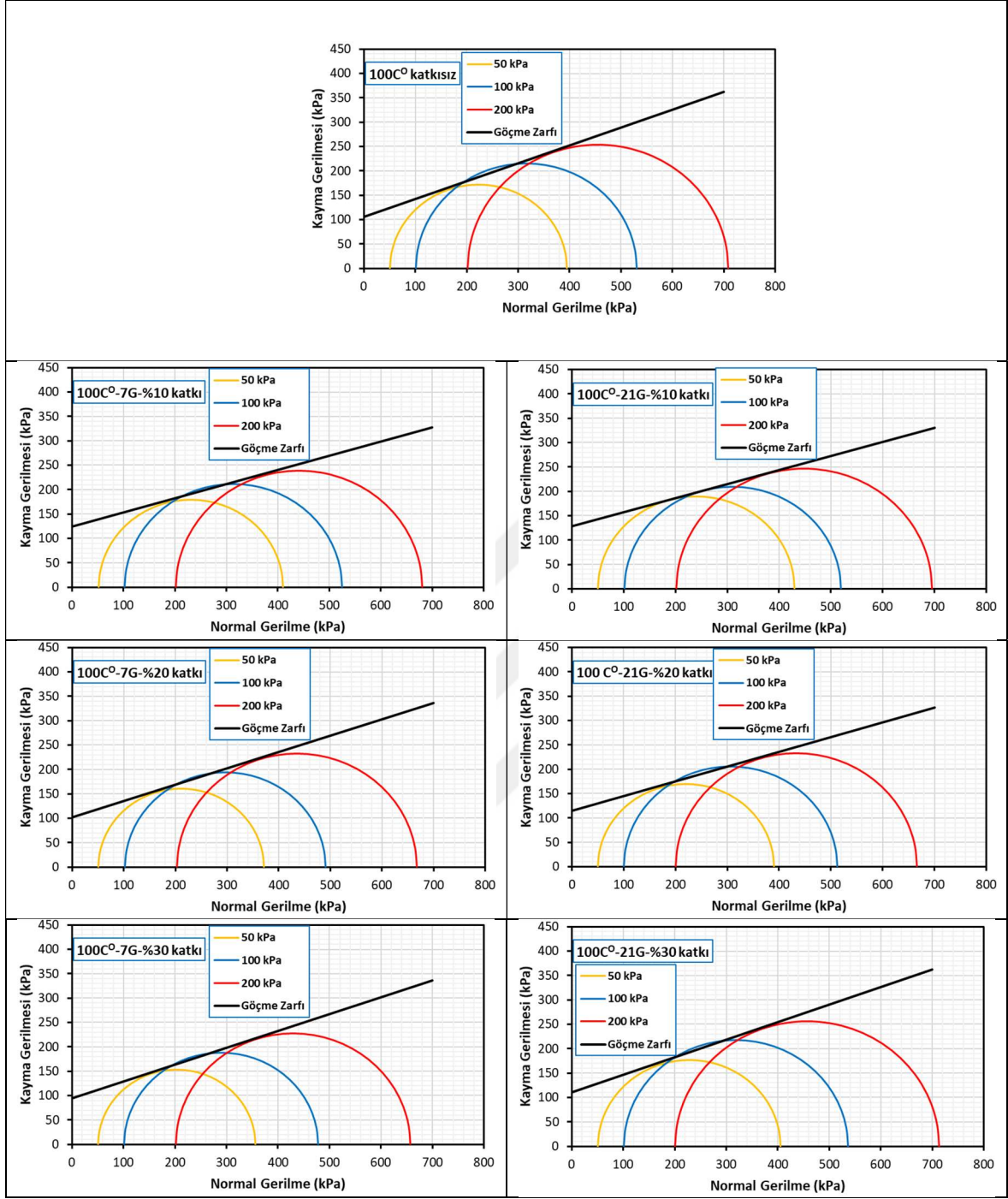
Şekil 4.18. 200°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi gerilme-deformasyon eğrileri



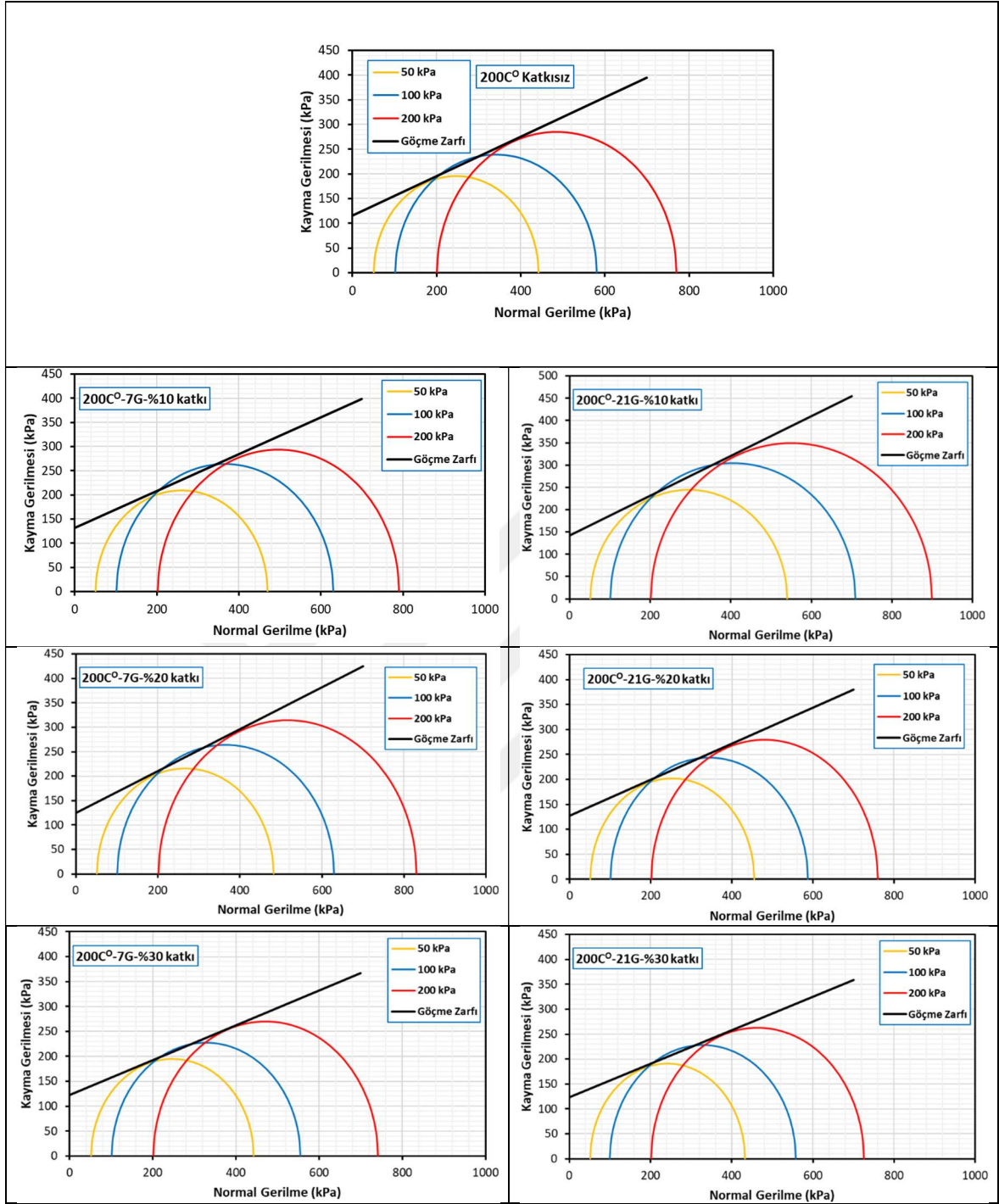
Şekil 4.19. 500°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi gerilme-deformasyon eğrileri



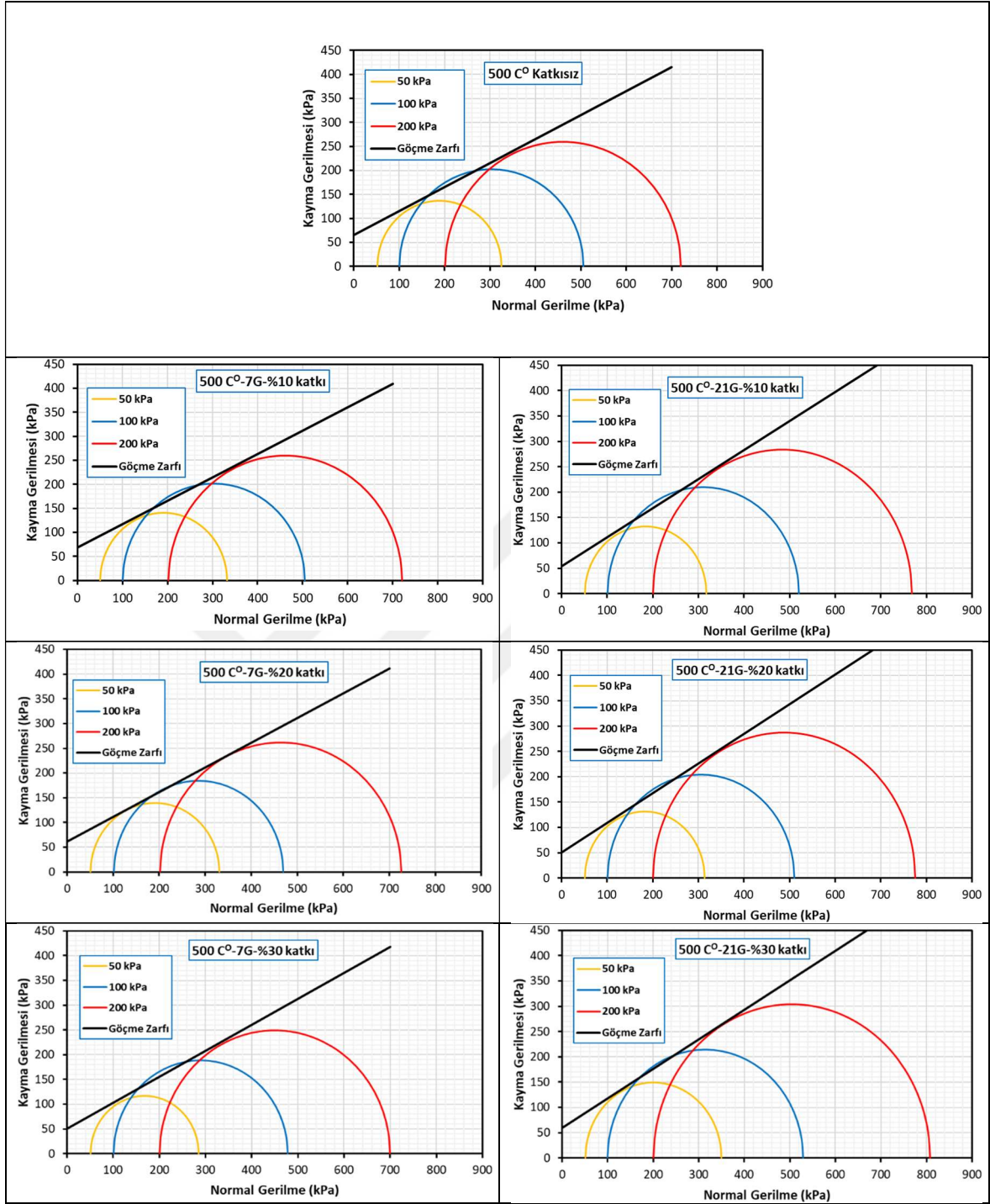
Şekil 4.20. Oda sıcaklığı koşulundaki UU deneyi göçme zarfları



Şekil 4.21. 100°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi göçme zarfları

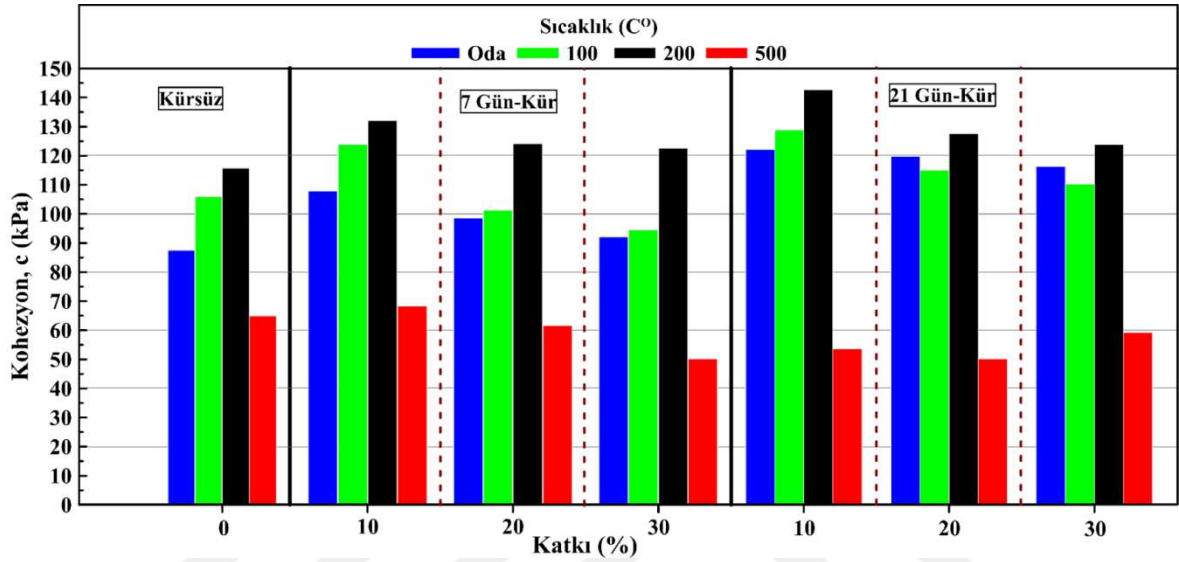


Şekil 4.22. 200°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi göçme zarfları

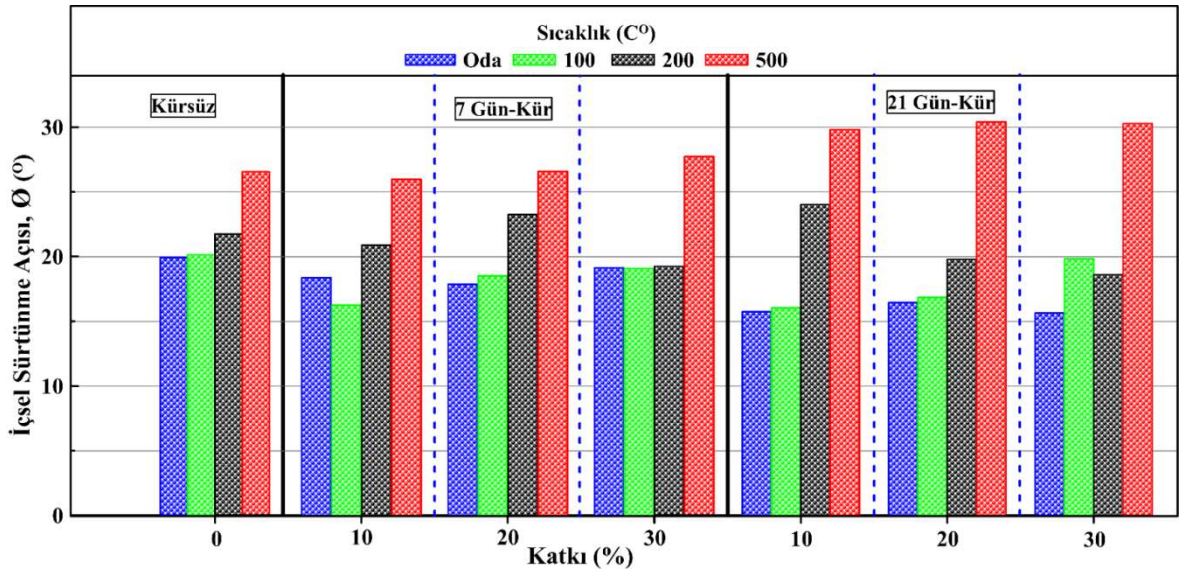


Şekil 4.23. 500°C sıcaklık koşulundaki UU deneyi göçme zarfları

Şekil 4.24'te kohezyon değerlerinin, Şekil 4.25'de içsel sürtünme açısı değerlerinin sunulmuştur. Bu grafiklerle, farklı oranlardaki Pirofillit içeriğinin, çeşitli kürleme süreleri ve sıcaklıklarda uygulanan ısıt işlemlerin, göçme zarfları ve kayma dayanımı parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı üzerindeki etkilerini daha iyi açıklayan veriler sağlanması amaçlanmıştır.

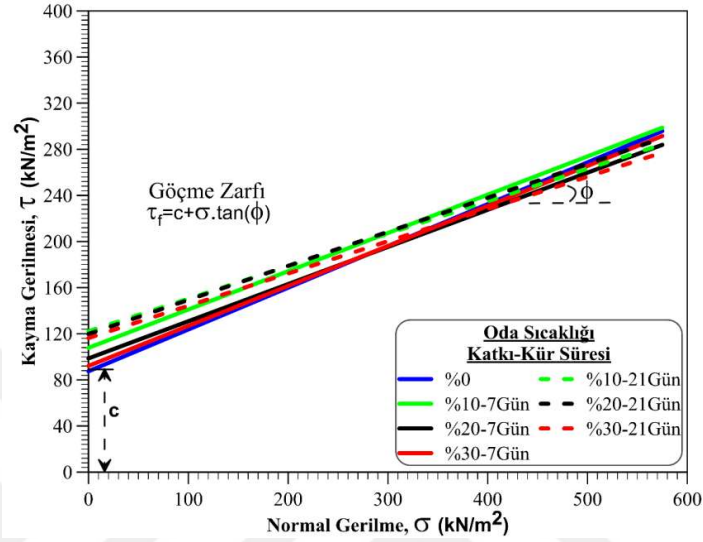


Şekil 4.24. Kohezyon değerlerinin uygulanan koşullara göre değişimi

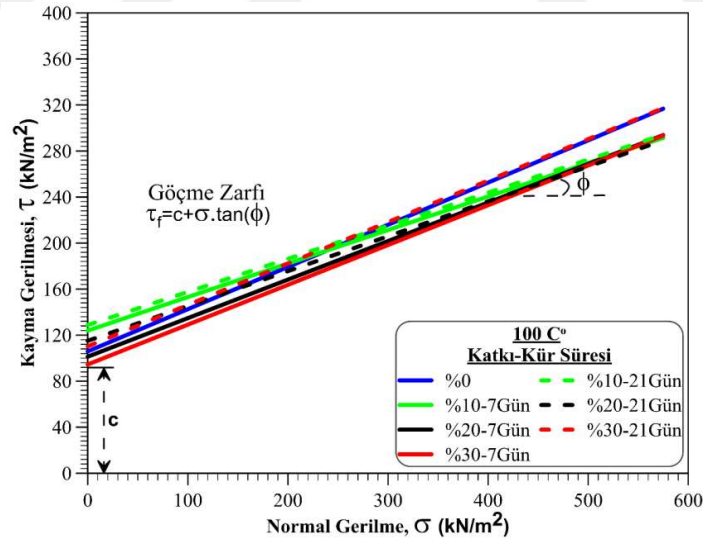


Şekil 4.25. İçsel sürtünme açısı değerlerinin uygulanan koşullara göre değişimi

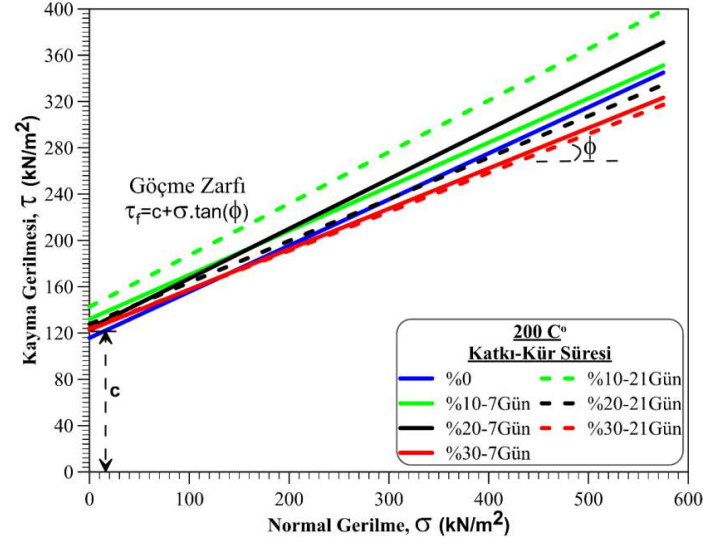
Şekil 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29’da farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin değişen katkı oranı ve kür süresi koşullarına göre göçme zarfları grafikleri sunulmuştur. Şekil 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33’te farklı oranlardaki katkı içeriğine sahip numunelerin değişen sıcaklık ve kür süresi koşullarına göre göçme zarfları grafikleri sunulmuştur.



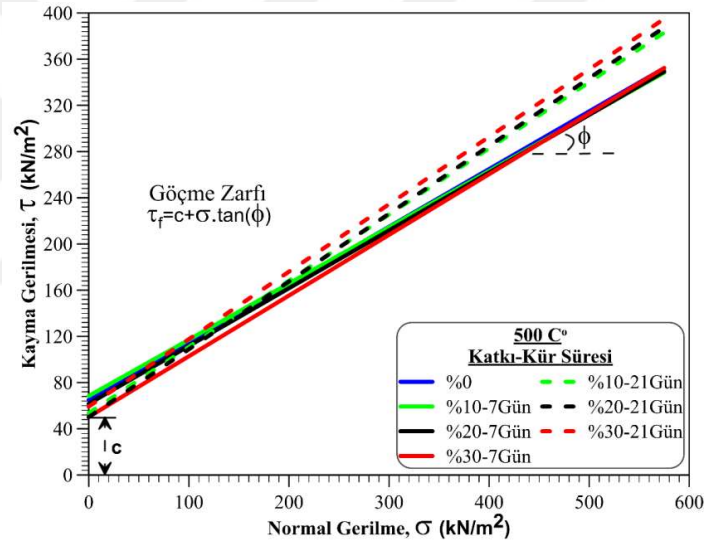
Şekil 4.26. Oda sıcaklığındaki numunelerin göçme zarfları



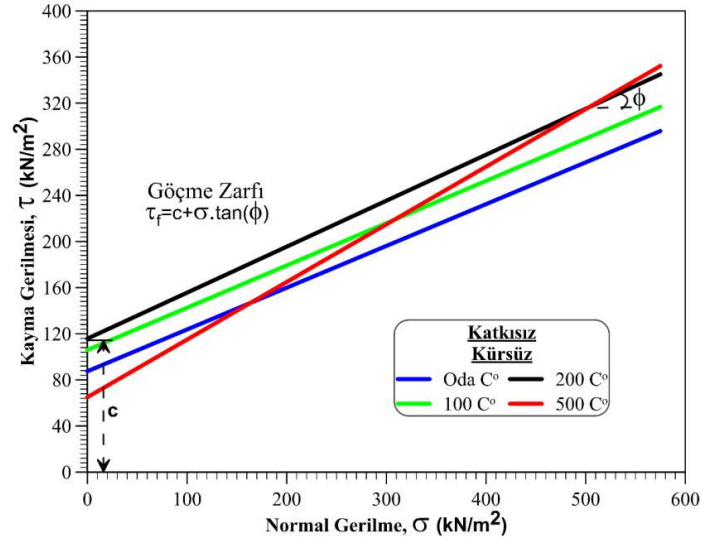
Şekil 4.27. 100°C sıcaklığına maruz bırakılan numunelerin göçme zarfları



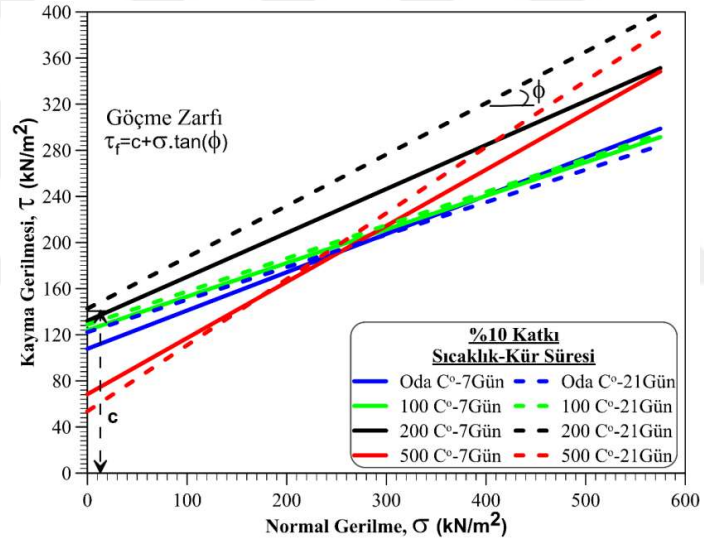
Şekil 4.28. 200°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin göçme zarfları



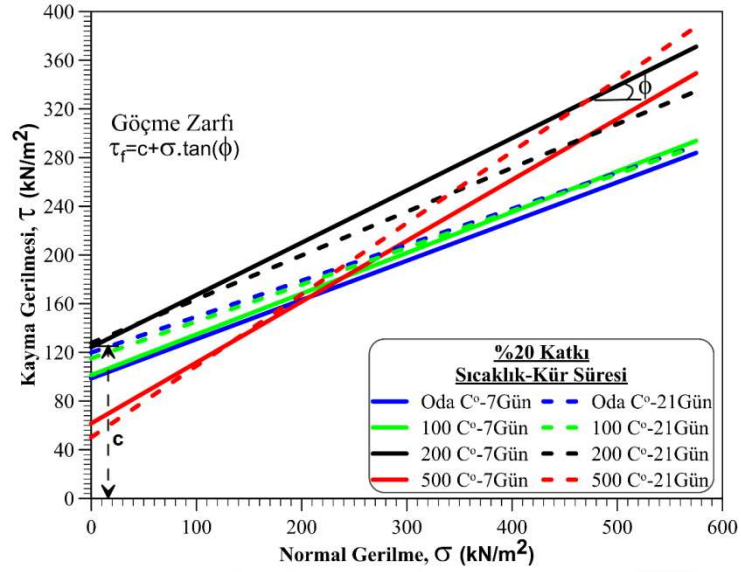
Şekil 4.29. 500°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin göçme zarfları



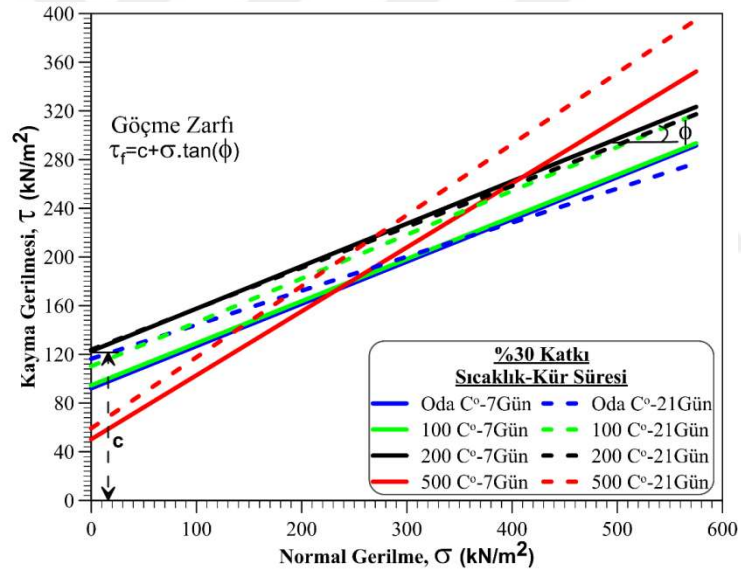
Şekil 4.30. Katkısız numunelerin göçme zarfları



Şekil 4.31. %10 katkı içeren numunelerin göçme zarfları



Şekil 4.32. %20 katkı içeren numunelerin göçme zarfları



Şekil 4.33. %30 katkı içeren numunelerin göçme zarfları

Bu çalışmada, farklı derecedeki sıcaklıklara maruz bırakılmış (25, 100, 200 ve 500°C) ve farklı oranlarda Pirofillit katkı malzemesi (%0, %10, %20, %30) içeren numuneler, 7 ve 21 gün süreyle kürlenerek konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen numunelerin doygunluk dereceleri %74-%89 değerleri arasında değiştiğinden dolayı deney sonucunda hem drenajsız kohezyon değerlerine hem de içsel sürtünme açısı değerlerine ulaşılmıştır. Kohezyon, zemin danelerinin birbirlerine daha iyi bağlanmalarını sağlamaktadır. İnce dane içeriği yüksek

zeminlerde kohezyon daha belirgin olup özellikle doygun olmayan zeminlerde kayma dayanımının önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

UU deneyi sonuçları değerleri üzerinde katkı oranı etkisi incelendiğinde, en büyük kohezyon değerleri ısıtıl işlem ve kür süresi koşulları fark etmeksizin her koşulda %10 Pirofillit katkısı içeren numunelerde görülmüştür. En büyük kohezyon değerine 200°C ısıtıl işlem uygulanmış, %10 Pirofillit katkısı içeren ve 21 gün süreyle kürlenmiş numunede 142.65 kPa değeri ile ulaşılmıştır. Bu değer, ısıtıl işleme maruz kalmamış saf numunenin 87.45 kPa seviyesindeki kohezyon değerine göre %63.12 oranında daha fazladır. Ancak, %10 Pirofillit katkısının ısıtıl işlemlere maruz bırakılmamış katkısız numunelerde içsel sürtünme açısı üzerinde etkisi negatif yöndedir. Oda sıcaklığı ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) koşulunda %10, %20 ve %30 katkı içeren numunelerde, içsel sürtünme açısı değeri, saf numunenin 19.92°'lik değerine göre sırasıyla %7.78, %10.34 ve %3.96 oranında düşüş görülmüştür. Ayrıca, her bir farklı ısıtıl işlem ve 7 gün kürleme koşulunda, %10 katkılı numunelerde, aynı ısıtıl işleme maruz bırakılmış saf numunenin içsel sürtünme açısına göre daha küçük değerler görülmüştür. Fakat, 100°C, 200°C ve 500°C ısıtıl işlem uygulamalarında katkı oranı değişimi ile hem 7 gün kürlenen numuneler hem de 21 gün kürlenen numunelerdeki içsel sürtünme değerleri arasında belirli bir korelasyon bulunamamıştır.

Kohezyon değerleri, tıpkı serbest basınç dayanımı değerlerinde olduğu gibi tüm ısıtıl işlem ve kürleme koşullarında, %10 katkı seviyesinde aynı ısıtıl işleme maruz bırakılmış saf numunelere göre maksimum değerlere ulaşmıştır. Oda sıcaklığı ($22 \pm 3^\circ\text{C}$), 100°C, 200°C ısıtıl işlem koşullarında, %10 Pirofillit katkısı içeren 21 gün süreyle kürlenmiş numunelerin kohezyon değerlerinde, aynı ısıtıl işleme maruz bırakılmış saf numunelerin kohezyon değerlerine göre sırasıyla %39.74, %21.65, %23.23 oranlarında artış görülürken 500°C ısıtıl işle koşulunda 7 gün kürlenmiş numunede %5.31 oranında artış görülmüştür. %10 oranının üzerindeki katkı içeriklerinde, kohezyon değerleri artan katkı oranıyla azalmaktadır. Bu sonuçlar, yapılan her iki deneyin sonuçlarının genellikle tutarlı olduğunu ve optimum katkı oranının %10 Pirofillit katkısı olduğunu ifade ederek birbirlerini doğrulamaktadır. UU deneyi sonucu tespit edilen bu katkı oranı ile ilgili hususların, serbest basınç dayanımı kısmında açıklanan sebeplerle aynı sebeplere sahip olduğu değerlendirilmektedir.

UU deneyi sonuçları değerleri üzerinde uygulanan ısı işlemi etkisi incelendiğinde, değişen katkı içeriği ve kür süresi koşulları fark etmeksizin en büyük kohezyon değerlerine 200°C ısı işlemi maruz bırakılmış numunelerde ulaşılmıştır. Kohezyon değeri, ısı işlemi uygulanmayan katkısız numunede 87.45 kPa değerindeyken, 200°C ısı işlemi uygulandığında %32.36 oranında artarak 115.75 kPa değerine ulaşmıştır. En büyük artış oranı, %33.28 oranında artış ile %30 katkı içeren, 7 gün kürlenmiş, 200°C ısı işlemi maruz bırakılmış numune ile ısı işlemi uygulanmayan numune arasında gerçekleşmiştir. 200°C ısı işlemi kadar, artan sıcaklık ile beraber kohezyon değerleri arasında genel olarak olumlu bir ilişki görülmüştür. Fakat, 500°C sıcaklıktaki ısı işlemleri söz konusu olduğunda kohezyon değerlerinde radikal oranda düşüşler meydana gelmiştir. Hem katkı oranı artışı hem de kür süresi artışı 500°C sıcaklığın olumsuz etkilerine karşı etkili olamamıştır. UU deneyi sonucu tespit edilen bu sıcaklık etkisi ile ilgili hususların, serbest basınç dayanımı kısmında açıklanan sebeplerle aynı sebeplere sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Sıcaklık değişiminin içsel sürtünme açısı değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, dikkate değer sonuçlar fark edilmiştir. 200°C'ye kadar ısı işlemlerinde, sıcaklık artışı ile birlikte içsel sürtünme değerlerinde genel olarak küçük artışlar söz konusuysa 500°C sıcaklık uygulamasıyla içsel sürtünme değerlerinde radikal artışlar meydana gelmiştir. Herhangi bir ısı işlemi ve katkı uygulanmayan saf numunenin içsel sürtünme açısı 19.92° değerindeyken, 500°C ısı işlemi maruz bırakılan ve 21 gün süreyle kürlenen %20 Pirofillit katkılı numunede %52.61 oranında artış ile 30.40° değerine, yine aynı koşullara sahip %30 Pirofillit katkılı numunede %52.01 oranında artış ile 30.28° değerine ulaşmıştır. 500°C'de zemin daneleri dehidroksilasyon gibi yapısal bozulmalara uğrayarak kohezyon özelliklerini kaybetmektedir. Böylece zemin, bağlayıcı özelliklerini yitirdiği için kum zeminler gibi davranmaya başlar; yani yük taşıma kapasitesi içsel sürtünmeye dayanır. Bu bozulma, yüksek sıcaklıkların zemindeki kil karakteristiklerini ortadan kaldırarak kum gibi bir davranış sergilemesine yol açtığı değerlendirilmektedir.

UU deneyleri sonucunda elde edilen kayma dayanımı parametresi olan kohezyon üzerinde kür süresi etkisi incelendiğinde, 500°C sıcaklık uygulaması dışındaki 200°C'ye kadar uygulanan ısı işlemlerinde, kür süresindeki artışın kohezyon değerleri üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ancak, kür süresi etkisi, ısı uygulamalarındaki sıcaklık

arttıkça daha az etkili olmaktadır. Kür uygulaması özellikle ısıtıl işlem uygulanmayan numunelerin kohezyon değerlerinde daha belirgin oranda artışlara sebep olmuştur.

Kürleme süresinin, içsel sürtünme açısı değerleri üzerine etkisi incelendiğinde, 500°C ısıtıl işlem uygulanmış numunelerdeki içsel sürtünme açısı artışı diğer sıcaklıklarda ısıtıl işlem görmüş numunelerdeki değişimlere göre daha çok belirgindir. Diğer sıcaklıklardaki ısıtıl işlemlere maruz bırakılmış numunelerdeki içsel sürtünme açısı değişimleri ile kür süresi arasında anlamı bir ilişki görülmemiştir. Ancak, 500°C gibi yüksek sıcaklık değerindeki ısıtıl işlem ve 21 günlük uzun kürleme uygulaması, kil zemini daha daneli yapı davranışı göstermesine neden olmuştur. 500°C ısıtıl işleme maruz bırakılmış ve 21 gün süreyle kürlenmiş katkılı numunelerde düşük kohezyon değerleri, yüksek içsel sürtünme açısı değerleri dikkat çekicidir. %20 Pirofillit katkılı, 500°C ısıtıl işleme maruz bırakılan ve 21 gün kürlenen numunede en düşük kohezyon değeri olan 50.15 kPa, en yüksek içsel sürtünme açısı değeri olan 30.40° elde edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kullanılan zemin numunelerinin mühendislik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra, uygulaması ve temini esnasında olumsuz çevresel etkileri geleneksel katkı malzemelerine göre çok sınırlı olan, ucuz ve sürdürülebilir bir katkı malzemesinin, zemin örneğinin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu nedenle, çalışmada Pirofillit minerali stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan zemin numuneleri, kuru ağırlıklarının %10, %20 ve %30'u kadarıyla Pirofillit minerali ile 7 ve 21 gün süre boyunca kürlenmiş olup bu mineralin kısa ve uzun süreli kür etkileri de araştırılmıştır.

Katkı malzemesi ile stabilizasyonun yanı sıra, ısıtma işlemleri ile stabilizasyon methodu geliştirmek ve değişen sıcaklık değerlerinin incelenen zemin numunelerinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, katkısız ve farklı süreler ile kürlenmiş katkılı numuneler on ikişer saat boyunca oda ($22 \pm 3^\circ\text{C}$), 100°C , 200°C ve 500°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır.

Farklı katkı içeriğine sahip, farklı süreler boyunca kürlenmiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtma işlemleri maruz bırakılmış katkılı malzemeler ile katkısız malzemelerin mühendislik özelliklerinin araştırılması için bir dizi zemin mekaniği laboratuvar deneyleri uygulanmıştır. İlgili koşullara sahip hazırlanan numuneler sırasıyla; Standart Proktor Kompaksiyon Deneyi, Serbest Basınç Deneyi ve Konsolidasyonsuz-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi olmak üzere üç farklı deneye tabi tutulmuştur. Bu çalışma kapsamında, elde edilen sonuçlar ve önerilen aşağıda sunulmuştur.

- Bu çalışma kapsamında yapılan Kompaksiyon Deneyi (Standart Proktor) sonuçları incelendiğinde, 200°C 'ye kadar olan ısıtma işlemlerinde maksimum kuru yoğunluk (ρ_{dmax}) değerleri artarken, optimum su muhtevası (w_{opt}) değerleri azalmıştır. Ancak, 500°C 'ye sahip ısıtma işlemlerinde ρ_{dmax} değerleri önemli ölçüde azalmış olup, w_{opt} değerleri artış göstermiştir. Bu durum, yüksek sıcaklığın zemin danelerinde yapısal bozulmaya ve gevşek bir yapıya neden olmasıyla değerlendirilmektedir. Oda sıcaklığı ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) ve katkısız

numune koşulunda ρ_{dmax} ve w_{opt} değerleri sırasıyla 1.652 Mg/m³ ve %20.5 iken, 500°C ve %30 katkı koşulunda ρ_{dmax} ve w_{opt} değerleri sırasıyla %2.84 oranında azalarak 1.605 Mg/m³ değerine ve %4.20 oranın artarak %21.4 değerine ulaşmıştır. Özellikle, 100°C ve 200°C ısıtma işlemlerinde, kompaksiyon karakteristikleri değerlerinde olumlu değişimler görülmüştür.

- Kompaksiyon karakteristiklerine katkı oranı etkisi incelendiğinde, 200°C'ye kadar olan ısıtma işlemlerinde katkı oranı arttıkça ρ_{dmax} değerlerinde artış, w_{opt} değerlerinde azalma eğilimi görülmüştür. Özellikle %10 katkı oranı seviyesinde, ρ_{dmax} değerlerinde daha belirgin bir artış gerçekleşmiştir. 100°C ısıtma işlemi ve %30 katkı koşulunda, 1.76 Mg/m³ ile en yüksek ρ_{dmax} değerlerine, %17.1 ile en düşük w_{opt} değerine ulaşılmıştır. Bu değerler, oda sıcaklığındaki (22 ± 3°C) saf numunenin kompaksiyon karakteristikleri ile karşılaştırıldığında, ρ_{dmax} değerlerinde %6.53 artış, w_{opt} değerlerinde %16.58 azalış görülmüştür. Ancak, 500°C sıcaklıktaki ısıtma işlemine maruz kalan numunelerde Pirofillit katkısı yüksek sıcaklığın kompaksiyon karakteristikleri üzerindeki olumsuz etkilerine karşı etkili olamamıştır.
- SBD deney sonuçları, katkı oranı, sıcaklık ve kür süresi değişkenlerinin dayanım değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. %10 katkı oranı, her sıcaklık ve kür süresi koşulunda en iyi dayanım değerlerini sağlayan katkı oranı olmuştur. Ancak katkı oranı arttıkça, yani katkı oranı %20 ve %30 değerlerine ulaştığında, her ısıtma işlemi ve kür süresi koşulunda dayanım değerlerinde düşüş görülmektedir. %10 katkı oranında, katkı malzemesinin zeminin boşluklarını optimum şekilde doldurup yoğunlaşmayı artırarak kimyasal tepkimeleri verimli hale getirdiği için en yüksek dayanım değerleri elde edildiği değerlendirilmektedir. Ancak %30 katkı oranında, Pirofillit mineralinin tabakalı yapısı nedeniyle zeminle bağlanmayı zorlaştıran kaygan yüzeyler oluşmakta ve mikrogözeneklilik artışı dayanımı olumsuz etkilemesi gibi yapısal değişimlerin, dayanımdaki azalmaların temel nedeni olduğu düşünülmektedir.

- SBD deney sonuçları üzerinde sıcaklık etkisi incelendiğinde, 100°C ve 200°C gibi ısıtma işlemlerin kürlenme süresinin etkisiyle SBD değerleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle 200°C ısıtma işlem uygulamaları, katkı oranı ve kür süresi değişenleriyle birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği sıcaklık değeri olmuştur. 200°C'ye kadar olan ısıtma işlemler, zeminin kuru yoğunluğunu artırarak katyon değişim kapasitesini ve puzolanik reaksiyonları destekleyip dayanımda iyileşme sağladığı düşünülmektedir. Ancak, 500°C sıcaklığa sahip ısıtma işlemler, dayanım üzerinde önemli derecede olumsuz etkilere sebep olmuştur. En düşük dayanım değerleri bu ısıtma işlem koşullarında görülmüştür. 500°C gibi yüksek sıcaklıklarda, dehidroksilasyon, yapısal bağların zayıflaması ve termal çatlaklar oluşması nedeniyle dayanımda düşüşler gözlemlendiği değerlendirilmektedir.
- SBD deneylerinde kür süresi, katkı oranı ve sıcaklık değerlerinden bağımsız olarak dayanımı artıran en önemli parametrelerden biridir. Kürsüz numuneler ile kıyaslandığında, kür süresi 7 güne uzatıldığında dayanımda ciddi bir artış gözlemlenmiş, 21 günlük kür süresi ise dayanımı maksimum seviyeye çıkarmıştır. Genel olarak, %10 katkı oranı, 200°C sıcaklık ve 21 günlük kür süresi kombinasyonu en yüksek SBD değeri sağlarken, kür süresi, 500°C gibi yüksek sıcaklıkların olumsuz etkilerine karşı etkili olamamıştır. %10 katkı oranı, 200°C sıcaklık ve 21 günlük kür süresi kombinasyonu, saf numunenin 227.6 kPa değerindeki dayanımını %123.28 oranında artırarak 508.2 kPa değerine ulaştırmıştır. En düşük dayanım değeri, 96.2 kPa değeri ile 500°C ısıtma işlem, %30 katkı oranı ve 7 günlük kür süresi kombinasyonunda görülmüştür. Bu koşul, saf numunenin 227.6 kPa değerindeki dayanım değerini %57.73 oranında azaltmıştır.
- Göçme anındaki birim deformasyon (ϵ_u) değerlerinin katkı oranı, sıcaklık ve kür süresiyle dayanım kadar tutarlı bir korelasyon göstermemektedir. Bu durum, mikro yapısal heterojenlikten, sıcaklık kaynaklı termal çatlaklardan ve farklı kür sürelerinin malzeme esnekliği üzerindeki karmaşık etkilerinden kaynaklanıyor olabilir. Deformasyon kapasitesi, dayanımdan daha karmaşık

bir mekanizmaya bağılı olup, özellikle mikro yapıdaki değişimlerin etkisiyle tutarsızlık gösterebilir. Bu nedenle, ϵ_u değerlerindeki farklılıkları anlamak için malzemenin mikro yapısal özelliklerine daha detaylı bir inceleme gerekebilir.

- Konsolidasyonsuz-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU) sonuçları incelendiğinde, katkı oranı %10 oranındayken kohezyon değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle %10 katkı oranı, hem 7 günlük hem de 21 günlük kür sürelerinde en yüksek kohezyon değerlerini sağlamıştır. Ancak katkı oranının %20 ve %30'a yükselmesi, kohezyon değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Bu durum, katkı miktarının optimal düzeyi aşması durumunda zeminin iç yapısında olumsuz etkiler yaratabileceğini ve kimyasal reaksiyonların etkinliğinin azalabileceğini göstermektedir.
- UU deneyleri sonuçlarına sıcaklık etkisi incelendiğinde, oda sıcaklığı ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) ve 100°C ısıtma işlem koşullarında katkı oranı ve kür süresi arttıkça kohezyon değerlerinde artış gözlemlenirken, 200°C sıcaklık ise katkı ve zemin arasındaki etkileşimlerin en üst düzeyde gerçekleştiği bir sıcaklık olarak öne çıkmıştır. Ancak 500°C gibi yüksek sıcaklık zeminin kohezyonunda ciddi bir düşüşe neden olmuştur. Bu durum, yüksek sıcaklıkların zemin yapısında bozulmalara ve minerallerin dehidroksilasyonuna yol açtığını düşündürmektedir. Buna karşın, 500°C ısıtma işlemlerde içsel sürtünme açısından artış, zeminin kohezyonlu bir yapıdan kum benzeri bir davranışa geçiş yaptığını ve kayma dayanımının daha çok partikül temasına dayandığını ortaya koymaktadır.
- Kür süresi, kohezyon parametresi üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. 21 günlük kür süreleri, hemen hemen tüm sıcaklık ve katkı oranları için 7 günlük kür sürelerine kıyasla daha yüksek kohezyon değerleri sağlamıştır. Bu artış, katkı maddesi ile zemin arasındaki kimyasal bağlanmaların kür süresi boyunca devam ettiğini ve zamanla daha güçlü bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Uzayan kür süresi sayesinde zemin içindeki reaksiyonların

tamamlanması ve mikro çatlakların iyileşmesi sağlanarak dayanımda gözle görülür bir artış elde edildiği değerlendirilmiştir.

- En yüksek kohezyon değeri, 200°C ısıtma işlemi, %10 katkı oranı ve 21 gün küre süresi koşulunda 142.65 kPa değeri ile görülmüştür ve saf numunenin 87.45 kPa kohezyon değerinden %63.12 oranında daha fazladır. En düşük kohezyon değeri ise 500°C ısıtma işlemi, %30 katkı oranı ve 7 gün küre süresi koşulunda 50.23 kPa değeri ile görülmüştür ve saf numunenin kohezyon değerinden %42.56 oranında daha azdır.
- İçsel sürtünme açısı (ϕ) ile katkı oranı ve küre süresi arasında belirgin bir korelasyon kurulamamaktadır, çünkü ϕ değerleri, zemin taneciklerinin mekanik sürtünme özelliklerine daha duyarlı olduğundan bu parametrelerden daha az etkileniyor olabilir. Ancak 500°C sıcaklıkta ϕ değerindeki artış, zeminin kohezyonlu bir yapıdan daha granüler bir yapıya geçiş yaptığını ve bu yapıda partiküller arası mekanik etkileşimlerin ön plana çıktığını göstermektedir. Diğer sıcaklıklarda ise ϕ değerleri daha rastlantısal bir dağılım sergileyerek katkı oranı ve küre süresine güçlü bir yanıt vermemektedir, bu da ϕ 'nin zemin davranışını tanımlamada tek başına belirleyici bir parametre olmadığını ortaya koymaktadır.

Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar neticesinde Pirofillit minerali ve termal stabilizasyon ile ilgili yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Katkı oranı, küre süresi ve özellikle sıcaklık etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi, kimyasal ve mikroyapısal değişimlerin incelenebilmesi için XRD ve SEM analizlerinin yapılması önerilmektedir.
- 300°C, 400°C ve hatta 750°C ve 1000°C gibi farklı sıcaklıklara sahip ısıtma işlemleri farklı süreler boyunca uygulanarak numunelerin mühendislik özelliklerindeki değişimler incelenebilir böylece farklı termal stabilizasyon yöntemleri geliştirilebilir.

- Kuru ağırlığın %5, %15 ve %25'i gibi oranlarda Pirofillit katkısı içeren karışımlar hazırlanıp deneylere tabi tutulabilir ve bu numuneler farklı stabilize edici katkılarla birlikte kullanılarak karşılaştırmalı analizler yapılabilir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- A. Smaida, M. Cheddad, A. Hamadi, K. Hadi, M.B. Slim, H. Cherfa, A.Bouguerroua, S. Haddadi, (2023). Stabilization of dune sand using crushed sand, silt and blast furnace slag for use in road field. *Construction and Building Materials*, Volume 406, 133397, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133397>.
- A.K. Pathak, V. Pandey, K. Murari, J.P. Shingh, (2014). *International Journal of Engineering Research and Applications*. ISSN : 2248-9622, Vol. 4, Issue 5 (Version 2), pp.164-171.
- A.R. Goodarzi, M. Salimi, (2015). Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag. *Applied Clay Science*, Volume 108, Pages 61-69, ISSN 0169-1317. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.024>.
- Ali M., Ahmed H., Ahmed H., Mohammed H (2021). Pyrophyllite: An Economic Mineral for Different Industrial Applications. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app112311357>
- Ali U., Solakoğlu E. (2002). Pütürge Masifindeki Pirofillit Yataklarının Jeolojisi ve Kökeni. *MTA Dergisi* 123-124. 13-19.
- Alkaya D, (2009). Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi. *Electronic Journal of Construction Technologies*, 5 (1) 61-72.
- Alpaydin, S.G., Yukselen-Aksoy, Y., (2023). Investigation of shear strength of sand–bentonite mixtures with boron additives at high temperature for energy geo-structures. *Environmental Earth Sciences*. 82, 256. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10972-6>.
- Attah, I.C., Etim, R.K., (2020). Experimental investigation on the effects of elevated temperature on geotechnical behaviour of tropical residual soils. *SN Applied Sciences*. 2, 370. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2149-x>.
- Ayub F., Khann S. A., (2023). An overview of geopolymers composites for stabilization of soft soils. *Construction and Building Materials*. Volume 404, 133195, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133195>.
- B.R. Phanikumar, E. Ramanjaneya Raju. (2020). Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilised with lime sludge and cement. *Soils and Foundations*. 60(1). 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.01.007>.
- Balatan F. (2019). Kurşun-çinko maden atığının zemin stabilizasyonunda değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Bell, F.G., (1996), Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), p: 223-237.

- Birchal V S, Rocha S. D. F. & Ciminelli V. S. T. (2000). The effect of magnesite calcination conditions on magnesia hydration. *Miner Engineering*, 13, 1629-1633.
- Blaser, H., & Scherer, D. J. (1969). Expansion of Soils Containing Sodium Sulphate Caused by Drop in Ambient Temperature. *Proceedings of an International Conference Held at Washington, D.C. Issues 103*, Pages 150-160.
- Braja M. Das & N. Sivakugan, (2016). *Introduction to Geotechnical Engineering*, Second Edition. Cengage Learning. Boston, USA. ISBN: 978-1-305-25732-0.
- Brindley, G., (1975). Thermal transformations of clays and layer silicates. *Proceedings of the international clay conference*, Applied Publishers Wilmette, IL., 119-129.
- Chatterjee, Kaulir Kisor (2009). *Uses of industrial minerals, rocks, and freshwater*. Nova Science Publishers, Inc. New York. ISBN 978-1-60741-400-1 (E-Book).
- Cornish, B.E., (1983). Pyrophyllite, in Lefond S.J *Industrial Minerals and Rocks*. SME Publications. 1085-1108. New York.
- Çimen, Ö., Dereli, B., Coşan, F. Ş. (2020). İki Farklı Kil Zeminin Stabilizasyonunda Amorf Silika Katkısı Kullanımının Karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 102-109.
- Çirkin, İ., Yükselen Aksoy, Y. (2022). Pomza, Perlit ve Cam Elyaf Katkılarının Yüksek Sıcaklık Altındaki Kum-Kaolin Karışımlarının Kayma Dayanımı Davranışına Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 24(71), 657-663. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247128>
- Das, B.M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*. Seventh Edition, Cengage Learning, Stamford, 666 Pages, USA.
- E. Hasanbegović, J. Huremović, S. Žero, (2021). Adsorption capacity of nitrate from artificial fertilizers and soil on pyrophyllite. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 18:3731–3738. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03135-2>
- Emmerich, K., Madsen, F.T. & Kahr, G., (1999). Dehydroxylation behavior of heat-treated and steam-treated homoionic cis-vacant montmorillonites. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 47, No. 5, 591-604. doi:10.1346/CCMN.1999.0470506
- Erdemoğlu, M.; Birinci, M.; Uysal, T, (2020). Thermal Behavior of Pyrophyllite Ore during Calcination for Thermal Activation for Aluminum Extraction by Acid Leaching. *Clays Clay Miner.* 68, 89–99.
- Frost R. L., & Vassallo A. M., (1996). The dehydroxylation of the kaolinite clay minerals using infrared emission spectroscopy. *Clays and Clay Minerals*. 44(5), 635-651.
- Ghabae, S. (2015). Kireç ile stabilize edilmiş bentonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi. [Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı] İstanbul.

- Gharib, M., Arjomand, M.A., Abdi, M.R. & Arefnia, A., (2019). Influence of chitin nanofiber and rice husk ash on properties and bearing resistance of soft clay soils. *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*. Vol. 32, No. 3, 373-380. doi: 10.5829/ije.2019.32.03c.04
- Gülgün Yılmaz (2011). The effects of temperature on the characteristics of kaolinite and bentonite. *Scientific Research and Essays*. Vol. 6(9), pp. 1928-1939. DOI: 10.5897/SRE10.727.
- Hashemi, M., Marandi, S. M., & Vahidi, M. (2022). The Effect of Heat on the Settlement Properties of Cement-stabilized Clay Soil. *International Journal of Engineering*, 35(5), 1056-1063. <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.05b.20>
- K. Öntürk, (2011). Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı. (Yüksek Lisans Tezi).
- K. Venkat Raman, P.Dayakar, S. Sankaran, (2016). Study on the effect of fly ash with the expansive soil on different temperatures. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, Volume 9 Issue 2.
- Kılıç, G. (2008). Çimento İle Zemin Stabilizasyonu. [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. İstanbul.
- Kocabey, S. (2019). Düşük plastisiteli killerin kireçle stabilizasyonunda inceliğin etkisi. (Yüksek Lisans Tezi). Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 533972)
- L. Khillar, S. Pattnaik, P. Pradhan, S. R. Pradhan, S. Samal, (2022). Stabilization of Soil Using Fly Ash. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, Volume 10 Issue V. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.42335>
- Lewis, D. 1982. Properties and uses of iron and steel slags: Report no. 182-6. National Slag Association (U.S.A).
- M. Türköz, H. Savaş, G. Taşçı, (2018). The effect of silica fume and lime on geotechnical properties of a clay soil showing both swelling and dispersive features. *Arabian Journal of Geosciences*. 11: 735. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4045-x>
- M.S. Mansour, R. Chaid, (2017). Effect of combination of phyrophyllite and polypropylene fibers on the mechanical behavior of reinforced concrete. 13ème Congrès de Mécanique. (Meknès, Maroc).
- Majed M Abu-Zreig, Nabil M Al-Akhras, Mousa F Attom, (2001). Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils. *Applied Clay Science*, Volume 20, Issue 3, Pages 129-135. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(01\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00066-7).
- Manzoor & Yousuf. (2020). Stabilisation of Soils with Lime: A Review. *Journal of Materials Environmental Science*. 11(9). 1538-1551.

- Mitchell, J.K. and Soga, K., (2005). Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons New York, Vol. 3.
- Mutlu H. S. (2020). Seramik Sırlarında Pirofillit Kullanımı. İnönü University International Journal of Social Sciences. 9(2). 555-563.
- Mutlu, H.S., Uysal, T., Göktaş, M., Erdemoğlu, M., 2015. Seramik Bünye ve Sır Reçetelerinde Pirofillit Kullanımıç 16. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 143-151, Çanakkale.
- N. Ural, (2019). Çimento Katkılı ve Geotekstil ile İyileştirilen Sıvılaştırılabilir Kumlu Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İncelenmesi. T.C. Bilecik Şey Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Sonuç Raporu. Proje No: 2017-01.BŞEÜ.03-05
- O.O. Ojuria, P.O. Osagieb, B.D. Oluyemi-Ayibiowub, O.G. Fadugbab, M.O. Tanimolab, V.B. Chauhanc, O.O. Jayejeheb. (2022). Eco-friendly stabilization of highway lateritic soil with cow bone powder admixed lime and plastic granules reinforcement. Cleaner Waste Systems. Volume 2, 100012, ISSN 2772-9125. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100012>
- Oluwatuyi O. E, Ojuri O. O., Khoshghalb A., (2020). Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 12(1). 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.010>.
- Özaydın, K. (1989). Zemin Mekaniği. İstanbul: Birsen Yayınevi. 261 s.
- Özcan Tan, Lale Yılmaz & A. Şahin Zaimoğlu, (2003). Variation of some engineering properties of clays with heat treatment. Materials Letters, Volume 58, Issues 7-8, Pages 1176-1179. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.08.030>.
- Pandey A., Rabbani A. (2017). Soil Stabilisation Using Cement. International Journal of Civil Engineering and Technology. Volume 8, Issue 6. pp. 316-322.
- Patil R. P., Shirke N. N., Deshpande C. K., Kumbhar S. A., Waghmode R. B., Shinge A. U., Chavanpatil G. N. (2021). Study on Soil Stabilization by Using Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. Volume 9:Issue 8. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.37793>
- Peter L. O'Brien, Thomas M. DeSutter, Francis X.M. Casey, Eakalak Khan, Abbey F. Wick, (2018). Thermal remediation alters soil properties-a review. Journal of Environmental Management, Volume 206, Pages 826-835. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.052>.
- R. C. Joshi, Gopal Achari, D. Horsfield, & T. S. Nagaraj, (1994). Effect of heat treatment on strength of clays. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, Page 1080-1088.

- R. Renjith, D. Robert, S. Setunge, S. Costa, A. Mohajerani, (2021). Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction. *Journal of Cleaner Production*, Volume 294, 126264, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126264>.
- Rusdiansyah, Markawie, (2021). The Effect of Temperature On Some Engineering and Consolidation Properties of Soft Soil. *Journal of Applied Engineering Science*. 19(3), 750-756. DOI:10.5937/jaes0-29477.
- S. Demir, M. Kılıç, (2010). Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Zemin İyileştirme Yöntemleri. *GOÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(1), 95-104.
- Sağlam, A. (1985), Zemin ıslah metotları. Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Adana.
- Savaş H., Türköz M., Seyrek E., Ünver E. (2018). Comparison of the effect of using class C and F fly ash on the stabilization of dispersive soils. *Arabian Journal of Geosciences*. 11:612. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3976-6>
- Shooshpasha I., Shirvani R. A., (2014). Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils. *Geomechanics and Engineering*, Vol. 8, No. 1 (2015) 17-31. <https://doi.org/10.12989/gae.2015.8.1.017>
- Sperinck, S., Raiteri, P., Marks, N., Wright, K. (2011). Dehydroxylation of kaolinite to metakaolinite molecular dynamics study. *Journal of Materials Chemistry*. 21, 2118-2125.
- Sudhakar M. Rao & P. Shivananda, (2003). Role of curing temperature in progress of lime-soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23: 79–85. DOI: 10.1007/s10706-003-3157-5
- Szendefy J. (2013). Impact of the soil stabilization with lime. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Paris.
- Thien Q Tran, Hwanik Ju, Tu-Nam Nguyen, Tung P Hoang, Sherif L. Abdelaziz, & Alexander S Brand. (2023). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1289. doi:10.1088/1757 899X/1289/1/012097.
- Tuğlu, H. (2022). Tuğla atıklarının düşük plastisiteli kil zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği (Yüksek Lisans Tezi).
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinobalı, A. (2003). Türkiye’de Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ankara.
- Uzuner, B. A. (2013). *Temel Mühendisliğine Giriş (5.Baskı)*. Trabzon: Derya Kitabevi, 342-359.
- Uzuner, B.A., 2000, *Temel Mühendisliğine Giriş*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

- Weixing Bao, Haibo Wang, Hongpeng Lai, Rui Chen, (2022). Experimental study on strength characteristics and internal mineral changes of Lime-stabilized loess under High Temperature, *Construction and Building Materials*, Volume 351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128945>
- William, R., 1997. Burning bush. *Fire Engineering* 150 (3), 4 pp.
- Y. Luan, X. Ma, Y. Ma, X. Liu, S. Jiang, J. Zhang, (2023). Research on strength improvement and stabilization mechanism of organic polymer stabilizer for clay soil of subgrade. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 19, ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02397>.
- Yeşilyurt A. (2022). Yumurta kabuğu tozu ve zeolitin zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin standart deneyler ile araştırılması (Yüksek Lisans Tezi).
- Yılmaz, F. (2015). Tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin standart deneyler ve bilgisayarlı tomografi tekniği ile araştırılması (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 397321)
- Zhang, C., Pan, Z., Yin, H. vd., (2022). Influence of clay mineral content on mechanical properties and microfabric of tailings. *Sci Rep* 12, 10700 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15063-3>
- Zhengfa Chen, Hehua Zhu, Zhiguo Yan, Li Zhao, Yi Shen, Anil Misra, (2016). Experimental study on physical properties of soft soil after high temperature exposure. *Engineering Geology*, Volume 204, Pages 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.014>.