

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞİŞEN ZEMİNLERİN STABİLİZASYONUNDA KATKI MALZEMESİ OLARAK DENİZ KABUĞU, KİREÇ
VE ZEOLİT KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Senanur KOLOĞLU

**TEMMUZ 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞİŞEN ZEMİNLERİN STABİLİZASYONUNDA KATKI MALZEMESİ OLARAK DENİZ
KABUĞU, KİREÇ VE ZEOLİT KULLANIMI**

Senanur KOLOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 / 06 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 14 / 07 / 2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. S. Banu İKİZLER

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Şişme davranışı gösteren zeminlerin deniz kabuğu, kireç ve zeolit katkısı ile stabilizasyonunu amaçlayan bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenerek tez konumun belirlenmesinde ve sonrasındaki çalışmalarım esnasında gerekli yardım ve desteğini esirgemeyen, bana çıktığım bu yolda her zaman ışık tutan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. S. Banu İKİZLER'e içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi birikimini her daim bizimle paylaşan ve her türlü yardımlarını esirgemeyen sayın Doç. Dr. Zekai ANGİN hocama çok teşekkür ederim.

Yaptığım deneysel çalışma süresince yardım ve teşviğini hiçbir zaman esirgemeyen, bütün imkanları ile her daim yanımda olan saygıdeğer Teknisyen Yüksel HARDAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli vakitlerini ayırarak zeminimin analizlerini yapan, hiçbir sorumu karşılıksız bırakmayan Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü akademisyenlerinden sayın Öğr. Gör. Kübra UZUN hocama minnettarlığımı sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmasında kullanılan zeminin temin edilmesinde her türlü imkan ve yardımlarını sunan Ünye ÇİMENTO FABRİKASI ve çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca destek ve sevgileriyle yanımda olan, beni yetiştirip bugüne getiren sevgili aileme sonsuz sevgilerimi sunar, yüksek lisans çalışmamın ileride yapılacak çalışmalara faydalı olmasını temenni ederim.

Senanur KOLOĞLU

Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Şişen Zeminlerin Stabilizasyonunda Katkı Malzemesi Olarak Deniz Kabuğu, Kireç Ve Zeolit Kullanımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. S. Banu İKİZLER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 14/07/2021

Senanur KOLOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
1.3. Kil Mineralojisi	3
1.3.1. Kaolinit	7
1.3.2. İllit	8
1.3.3. Montmorillonit	9
1.4. Şişen Zeminler	11
1.4.1. Şişmeye Etki Eden Faktörler.....	12
1.4.2. Şişme Parametreleri.....	13
1.4.2.1. Şişme Yüzdesi	14
1.4.2.2. Şişme Basıncı	15
1.4.3. Şişen Zeminlerin Belirlenme Yöntemleri	16
1.4.3.1. Mineralojik Yöntemler ile Belirleme.....	16
1.4.3.2. Kıvam Limitleri ile Belirleme	16
1.4.3.3. Aktivite Yöntemi ile Belirleme	17
1.4.3.4. Potansiyel Hacim Değişimi Yöntemi ile Belirleme.....	19
1.4.3.5. Laboratuvar Deneyleri ile Belirleme	20
1.4.3.5.1. Ödometre Yöntemi ile Belirleme	20
1.4.3.5.2. Serbest Şişme Deneyi ile Belirleme	22
1.5. Şişen Zeminlerin Stabilizasyon Teknikleri.....	23
1.5.1. Mekanik Stabilizasyon.....	24

1.5.2.	Kimyasal Stabilizasyon.....	25
1.5.2.1.	Kireç Katkısı ile Stabilizasyon	25
1.5.2.2.	Çimento Katkısı ile Stabilizasyon	26
1.6.	Literatür Taraması	27
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	40
2.1.	Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	40
2.1.1.	Doğal Zemin Numunesi	40
2.1.1.1.	Mineralojik Özellikler	42
2.1.1.1.1.	XRD Analizi	42
2.1.1.1.2.	DTA Analizi	43
2.1.1.2.	Zeminin Sınıflandırılması	44
2.1.1.3.	Temel Fiziksel Özellikler	47
2.1.1.4.	Kıvam Limitleri	48
2.1.1.5.	Organik Madde Tayini ve Aktivite	48
2.1.1.6.	Geçirimsizlik Özellikleri	49
2.1.1.7.	Kompaksiyon Özellikleri	50
2.1.1.8.	Şişme Özellikleri	51
2.1.1.9.	Dayanım Özellikleri.....	53
2.1.2.	Deniz Kabuğu.....	54
2.1.3.	Kireç.....	56
2.1.4.	Zeolit	56
2.2.	Katkılı Numunelerin Hazırlanması	59
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	62
3.1.	Katkı Malzemelerinin Kıvam Limitlerine Etkisi	62
3.2.	Katkı Malzemelerinin Kompaksiyon Parametrelerine Etkisi	67
3.3.	Katkı Malzemelerinin Şişme Parametrelerine Etkisi	69
3.4.	Katkı Malzemelerinin Dayanım Üzerindeki Etkisi	71
3.5.	Taguchi Yöntemine Göre Optimum Değerlerin Belirlenmesi	76
4.	SONUÇLAR.....	81
5.	ÖNERİLER	85
6.	KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

ŞİŞEN ZEMİNLERİN STABİLİZASYONUNDA KATKI MALZEMESİ OLARAK DENİZ
KABUĞU, KİREÇ VE ZEOLİT KULLANIMI

Senanur KOLOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER
2021, 89 Sayfa

Şişen zeminler inşaat mühendisliği yapılarında ciddi sorunlara neden olmaktadır. Bu tür zeminlerin üzerine inşa edilecek yapılarla serbest şişmeler engellendiği zaman, yapıya önemli zararlar verebilecek gerilmeler oluşmaktadır. Bu problemi kontrol edebilmek için en yaygın olarak kullanılan çözüm yöntemi farklı katkı malzemeleri ile stabilizasyondur. Bu çalışmada deniz kabuğu, kireç ve zeolit gibi alternatif malzemelerin, Ünye Çimento Fabrikası'nın Denizbükü Mahallesinde bulunan kil ocağından temin edilen yüksek plastisiteli kil zeminin (CH) stabilizasyonuna etkisi incelenmiştir. Yüksek plastisiteli kil zemin, ağırlıkça %8 ila %16 oranında deniz kabuğu, %3 ila %8 oranında kireç ve %5 ila %20 oranında zeolit ile karıştırılmıştır. Öncelikle Taguchi yönteminin orthogonal matrisine göre (L25) elde edilmiş deney setleri için kıvam limiti deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen veriler Taguchi Yöntemine göre analiz edilmiş ve en iyi sonucun, deniz kabuğu için %12 ile %14, kireç için %5 ile %6 ve zeolit için %5 ile %10 katkı oranlarında elde edildiği belirlenmiştir. Daha sonra bu yüzdelere kullanılarak Taguchi yönteminin orthogonal matrisine (L4) göre belirlenmiş 4 deney seti hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarla, katkı malzemelerinin kıvam limiti, kompaksiyon parametreleri ve şişme potansiyeli üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin serbest basınç mukavemetinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, %14 deniz kabuğu, %6 kireç ve %5 zeolit içeren SD14K6Z karışımının zeminin şişme stabilizasyonunda en optimum çözüm olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Şişen Zeminler, Şişen Zemin Stabilizasyonu, Şişme Basıncı, Şişme Yüzdesi, Deniz Kabuğu, Kireç, Zeolit

Master Thesis

SUMMARY

USING SEA SHELL, LIME AND ZEOLITE AS ADDITIVES IN THE STABILIZATION OF EXPANSIVE SOILS

Senanur KOLOĞLU

Karadeniz Technical University
Institute of Science and Technology
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER
2021, 89 Page

Swelling soils cause serious problems in civil engineering structures. When free swelling is prevented by structures to be built on such soils, stresses occur that can cause significant damage to the structure. The most commonly used solution method to control this problem is stabilization with different additives. In this study, the effect of alternative materials such as seashell, lime and zeolite on the stabilization of high plasticity clay soil (CH) obtained from the clay quarry in Denizbükü District of Ünye Cement Factory was investigated. High plasticity clay soil mixed with 8% to 16% seashell, 3% to 8% lime and 5% to 20% zeolite by weight. First of all, consistency limit tests were performed for the test sets obtained according to the orthogonal matrix of the Taguchi method (L25). The data obtained from the test results were analyzed according to the Taguchi Method and it was determined that the best results were obtained at the additive ratios of 12% to 14% for seashell, 5% to 6% for lime, and 5% to 10% for zeolite. Then, using these percentages, 4 experimental sets were prepared according to the orthogonal matrix (L4) of the Taguchi method. With the prepared mixtures, the effects of additives on the consistency limit, compaction parameters and swelling potential were investigated. In addition, the changes in the unconfined compressive strength of the 1, 7 and 28-day curing times were investigated. As a result of the experimental studies, it was revealed that SD14K6Z mixture containing 14% sea shell, 6% lime and 5% zeolite is the most optimal solution for swelling stabilization of the soil.

Keywords: Swelling Soils, Soil Stabilization, Swelling Pressure, Swelling Percentage, Sea Shell, Lime, Zeolit

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Silika tetrahedron levha yapısı	4
Şekil 2. Oktahedron levha yapısı	4
Şekil 3. Su molekülü	5
Şekil 4. Killerin etrafında oluşan çift tabakadaki absorbe su ve katyonlar	6
Şekil 5. Kaolinit tabakası temsili	8
Şekil 6. Kaolinit tabakası SEM görüntüsü	8
Şekil 7. İllit minerali temsili	9
Şekil 8. İllit minerali SEM görüntüsü	9
Şekil 9. Montmorillonit kil mineralinin temsili olarak gösterimi	10
Şekil 10. Montmorillonit kil mineralinin SEM görüntüsü	10
Şekil 11. Zeminlerin şişme mekanizması	12
Şekil 12. Sınıflandırma abağı	18
Şekil 13. Şişme indisi ve potansiyel hacim değişikliği ilişkisi	19
Şekil 14. Deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi (ASTM D4546, 2021- Metot A).	21
Şekil 15. Deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi (ASTM D4546, 2021-Metot B).	21
Şekil 16. Zeminin deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi (ASTM D4546, 2021- Metot C).	22
Şekil 17. 19. Yüzyılda Mekanik stabilizasyona uygun yapılan yol inşaatları	24
Şekil 18. Kireç ile stabilize edilen killerin taneleri arasındaki boşluk oranının azalması ...	26
Şekil 19. Zemin numunesinin alındığı alana ait yer bulduru haritası	41
Şekil 20. Zemin numunesinin alındığı saha görüntüsü	42
Şekil 21. Doğal zemin numunesinin X ışını kırınımı analiz sonucu	43
Şekil 22. Doğal zemin numunesinin DTA analiz sonucu	44
Şekil 23. Doğal zeminin dane dağılımı eğrisi	45
Şekil 24. Doğal zemin numunesinin birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre plastisite kartındaki yeri	47
Şekil 25. Düşen seviyeli geçirimsizlik deneyi	50
Şekil 26. Doğal zemin örneğine ait kompaksiyon eğrisi	51
Şekil 27. 17 kPa yükleme altında doğal zemin numunesinin şişme basıncı eğrisi	52

Şekil 28. 17 kPa yükleme altında doğal zemin numunesinin şişme yüzdesi eğrisi.....	52
Şekil 29. 1 kPa yükleme altında doğal zemin numunesinin şişme basıncı eğrisi.....	53
Şekil 30. 1 kPa yükleme altında doğal zemin numunesinin şişme yüzdesi eğrisi.....	53
Şekil 31. Kırım sırasındaki ve kırım sonucundaki doğal zemin numunesi.....	54
Şekil 32. Deniz kabuğu tozu.....	55
Şekil 33. Kireç tozu.....	56
Şekil 34. Zeolit Tozu.....	57
Şekil 35. Plastik limit ve likit limit deneyleri.....	62
Şekil 36. Likit limit ve plastisite indisi deney sonuçlarının Taguchi yöntemine göre “en küçük en iyidir” seçeneğinde analiz verileri.....	64
Şekil 37. Plastik limit deney sonuçlarının Taguchi yöntemine göre “en büyük en iyidir” seçeneğinde analiz verileri.....	65
Şekil 38. Doğal zemin - kireç karışımının kıvam limitleri.....	65
Şekil 39. Doğal zemin - deniz kabuğu karışımının kıvam limitleri.....	66
Şekil 40. Doğal zemin - Zeolit karışımının kıvam limitleri	66
Şekil 41. Karışımlara ait kompaksiyon eğrileri	68
Şekil 42. Deniz kabuğu, zeolit ve kireç katkısının malzemenin şişme yüzdesi değerine etkisi	70
Şekil 43. Deniz kabuğu, zeolit ve kireç katkısının malzemenin şişme basıncı değerine etkisi.....	70
Şekil 44. Ödometre aleti ile şişme potansiyelinin belirlenmesi	71
Şekil 45. Doğal zeminin ve karışımların 1, 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetleri.....	72
Şekil 46. SD12K6Z10 karışımının eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	73
Şekil 47. SD14K6Z5 karışımının eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	74
Şekil 48. SD12K5Z5 karışımının eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	74
Şekil 49. SD14K5Z10 karışımının eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği	75
Şekil 50. Serbest basınç deneyi	75
Şekil 51. 1 günlük serbest basınç mukavemeti sonuçlarının katkı yüzdeleri – S/N oranlarının ortalaması analizi.....	77
Şekil 52. 7 günlük serbest basınç mukavemeti sonuçlarının katkı yüzdeleri – S/N oranlarının ortalaması analizi.....	77
Şekil 53. 28 günlük serbest basınç mukavemeti sonuçlarının katkı yüzdeleri - S/N oranlarının ortalaması analizi.....	78
Şekil 54. Şişme yüzdesi sonuçlarının katkı yüzdeleri – S/N oranlarının ortalaması analizi.....	78

Şekil 55. Şişme basıncı sonuçlarının katkı yüzdeleri – S/N oranlarının ortalaması analizi.....	79
--	----



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Değişik katyon cinslerinin şişme üzerindeki etkisi	5
Tablo 2. Kil minerallerinin özellikleri	7
Tablo 3. Zemin karakteristiklerinin şişmeye potansiyeline olan etkisi.....	13
Tablo 4. Çevresel Faktörlerin Şişmeye Olan Etkisi.....	14
Tablo 5. Zeminlerin likit limit ve plastisite indisine göre şişme derecesi.....	17
Tablo 6. Kil zeminlerinin çeşidine göre aktivite katsayısı	18
Tablo 7. Doğal zemin numunesinin elek analizi	45
Tablo 8. Doğal zemin numunesinin Hidrometre Deneyi Analizi	46
Tablo 9. MIT sınıflandırma sistemlerine göre zeminin dağılım yüzdesi	46
Tablo 10. Doğal zemin örneğinin fiziksel özellikleri	48
Tablo 11. Zeminin Likit Limit, Plastik Limit ve Plastisite İndisi.....	48
Tablo 12. Söndürülmüş toz kalker kirecinin kimyasal analiz değerleri.....	57
Tablo 13. Söndürülmüş toz kalker kirecinin fiziksel analiz değerleri	57
Tablo 14. Zeolit analiz sonuçları	58
Tablo 15. Çalışma kapsamında üretilen karışımlara ait isimlendirmeler.....	60
Tablo 16. Karışımların likit limit, plastik limit ve plastisite indisi sonuçları.....	63
Tablo 17. Taguchi ortogonal matrisine göre belirlenmiş 4 deney seti.....	67
Tablo 18. Karışımlara ait optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık	68
Tablo 19. Katkı malzemelerinin zeminin şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerine etkisi.....	69
Tablo 20. Doğal zemin ve karışımların serbest basınç mukavemeti	72
Tablo 21. Kıvam limitleri için gerçek sonuçlar ile tahmin sonuçlarının kıyaslanması	80
Tablo 22. S14D6K10Z karışımının gerçek deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının kıyaslanması	80

SEMBOLLER DİZİNİ

°C	: Santigrat
Å	: Angstrom
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
A _c	: Aktivite
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CAH	: Kalsiyum alümina hidrate
CaO	: Kalsiyum oksit
CASH	: Kalsiyum alümina-silika hidrate
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CH	: Yüksek plastisiteli inorganik kil
D ₀	: Zeminin ilk çapı
D ₁	: Zeminin son çapı
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
FS	: Serbest Şişme
G _s	: Zeminin özgül ağırlığı
γ _w	: Suyun birim hacim ağırlığı
H ₀	: Zeminin ilk hacmi
H ₁	: Zeminin son hacmi
IS	: Uluslar arası standart
LL	: Likit limit
MH	: Yüksek plastisiteli inorganik silt
MP	: Modifiye Proktor
Ph	: Hidrojen gücü
PL	: Plastik limit
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SP	: Standart Proktor
TS	: Türk Standardı

UCS	: Serbest Basınç Dyanımı
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
V	: Zeminin dane hacmi
V _s	: Şişmeden sonraki zemin hacmi
ω	: Su muhtevası
ω_n	: Doğal Su Muhtevası
ω_{opt}	: Optimum su muhtevası
XRD	: X ışını kırınımı
ρ_n	: Doğal yoğunluk
I _p	: Plastisite indisi
γ_{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Zeminin mühendislik özellikleri ile üzerine inşa edilecek yapıların stabilitesi ve hizmet ömrü birbiriyle doğrudan ilişkilidir. Çünkü zeminin yapı ile olan etkileşimleri ile birlikte yapı ağırlıklarının ve kullanım yüklerinin oluşturduğu gerilmeleri zemin emniyetle karşılayabilmelidir. Bu yüzden mühendislik uygulamalarında yapıların yeterli özelliklere sahip zemin üzerine oturtulmalıdır. Şişen zeminler de geoteknik mühendisliğinin proje aşamasında önemle çalışılması gereken konulardan birtanesidir. Şişen zeminler üzerine yapılması planlanan özellikle yol inşaatları havalimanları gibi hafif yapılarda, taşıma gücünün yetersiz kalabilmektedir. Bu durum ülkemizde olduğu gibi Dünya'nın birçok ülkesinde çok karşılaşılan bir problem olmaktadır. Bu tür zeminler özellikle tropikal ve ılık iklimlere sahip kurak ve yarı kurak bölgelerde sıkça görülmektedir. 1930'lu yılların öncesine kadar yapılarda genellikle hafif ve belirgin çatlaklara yol açmayan ahşap gibi malzemeler kullanıldığından şişen zeminler ile ilgili mühendislik çalışmalarına rastlanılmamaktadır. İlerleyen zamanlarda havaalanı, su kanalları, karayolları gibi hafif yapıların artması ile hasarların zeminde ortuma probleminin dışında başka sebeplerden kaynaklanabileceği düşünülmüş şişen zemin problemi araştırılmaya başlanmıştır. Daha sonra geçmişten günümüze kadar dünyanın birçok yerinde problemin çözümüne uygun stabilizasyon çalışmaları geliştirilmektedir (Fenner vd., 1983).

Geoteknik mühendisleri bu sorunun ortadan kalkması için uygulanması gereken genelleşmiş alternatifler kullanmalıdır. Bunlardan ilki, problemlili zemin tabakasının zayıf özelliklerini olduğu gibi kabul ederek üzerine inşa edilecek mühendislik yapılarına ait temel sistemlerinin bu zayıflıklara karşı koyabilecek şekilde ve tipte tasarlanmasıdır. Ancak bu çözüm ekonomik olmamasının yanı sıra yapının hizmet ömrünü de olumsuz etkilemektedir.

Uygulanması alternatif olan bir diğer yöntem ise zayıf zemini atıp yerine mukavemeti yüksek, sıkı, iri daneli zeminle yer değiştirmesi işlemi olmaktadır. Ancak bu yöntemde zayıf zeminin depo yerine taşınması, yerine konacak uygun zemin için bir malzeme ocağının bulunması, malzeme ocağında hafriyat yapılması, uygun olmayan zeminin olduğu yere taşınması işveren ve yüklenici için zaman "alıcıdır ve çok büyük bir maliyetlere neden

olabilmektedir. Bu sorunlar geoteknik mühendisliğini alternatif yöntemler geliştirmeye yöneltmiştir.

Arazide bulunan, zayıf mühendislik özelliklerine sahip uygun olmayan zeminin farklı katkı malzemeleri ile belirli oranlarda karıştırılarak ıslah etme yöntemi, son yıllarda sıkça uygulanan, maliyet ve yapım sürecinde büyük tasarruf sağlayan avantajlı bir yöntemdir. Bu amaçla bugüne kadar birçok farklı malzeme üzerinde çalışılmıştır. İlk çalışmalarda bitkisel katkı maddeleri kullanılırken günümüzde daha çok doğal yollarla elde edilen veya sanayi ürünü olan kimyasal katkı malzemeleri kullanılmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, Ordu ili Ünye İlçesinin Denizbükü Mahallesinden tedarik edilen mühendislik açısından problemli doğal malzemenin, kireç, deniz kabuğu ve zeolit katkıları ile hazırlanan karışımların, doğal zeminin kıvam limitleri, dayanım, kompaksiyon ve şişme potansiyeli gibi geoteknik özellikleri üzerinde meydana getireceği değişimler incelenilerek, uygun bir stabilizasyon yapıp yapılamayacağının araştırılması ve stabilizasyonda en optimum performansın hangi katkı oranı ya da oranlarında meydana geldiğinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Yüksek Lisans çalışmasında Bölüm 1’de hedeflenen amaçlar ve tez içeriği, çalışmada kullanılan kil mineralinin tanımlanması ve zemin stabilizasyonun tanımı ele alınmıştır. Ardından yüzeysel zemin stabilizasyonun dünya üzerinde yaygın olarak uygulanan yöntemleri, yüzeysel zemin stabilizasyonunda alternatif yöntemlerin kullanımı irdelenmiş ve daha önce yapılan çalışmalara değinilmiştir. Bölüm 2’de kullanılan zemin örneğinin tanımlaması yapılmış ve laboratuvar deneyleri ile fiziksel, mekanik ve dayanım özellikleri belirlenmiştir. Bölüm 3’de ise kireç, deniz kabuğu ve zeolit gibi alternatif malzemeler ile zemin stabilizasyonunun laboratuvar deneyleri ile değerlendirmesi yapılmıştır. Bölüm 4’de bu tezden elde edilen genel sonuçlar, Bölüm 5’de bundan sonraki akademik çalışmalara ışık tutması amacıyla sunulan öneriler Bölüm 6’da ise tez kapsamında yararlanılan kaynaklar olacak şekilde organize edilmiştir.

1.3. Kil Mineralojisi

Yerkabuğu, farklı boyutlarda bulunan ve içerisinde değişik mineraller barındıran kayalardan oluşmaktadır. Bu kayalar rüzgâr, ısı değişim, yağmur suları ve bitki kökleri gibi dış etkiler nedeniyle mekanik ayrışmaya uğramaktadır. Bu döngü içerisinde meydana gelen katı taneler ve aralarında yer alan boşluklar zemin yapısını oluşturmaktadır.

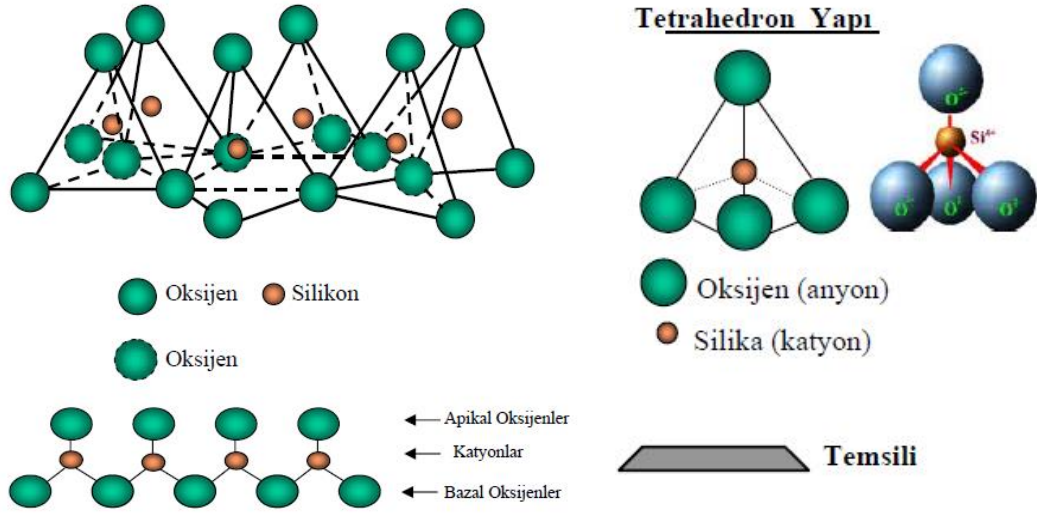
Doğada bulunan zeminler ince ve iri taneli olmak üzere iki grupta toplanmaktadır. İnce taneli zeminlerde taneler arasında kılcallık etkin olduğundan su ile karşılaştıklarında şişme ve büzülme görülmektedir. İri taneli zeminlerde ise su ile temas ettiğinde fazla bir değişim görülmemektedir.

Kil ince taneli zeminler grubunda yer almakta olup, genel olarak volkanik ve tortul kayaların ayrışması sonucu meydana gelen, 2 mikron (0.002 mm) veya daha küçük tane çapına sahip kolloidal taneler olarak tanımlanmaktadır. Tane boyutunun yanında killerin davranış özelliklerini belirleyen en önemli özellik mineralojik oluşumdur. Ayrışma sırasında oluşan fiziksel (ufalanma) ve kimyasal (karbonlaşma ve hidroksilleşme, elektron değişimi) değişimler kil mineralinin yapısını belirlemektedir.

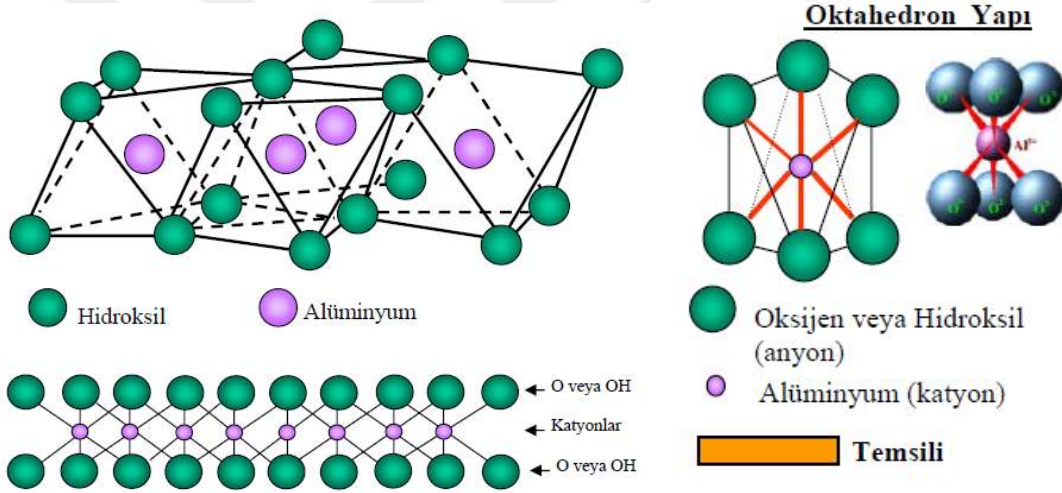
Kil mineralleri karakteristik kristal yapıya sahip çok katlı levhaların belirli bir düzende dizilmesi ile oluşmaktadır ve tipik yapısıyla 15 angstrom (Å) kadar incelikte olduğundan dolayı standart mikroskoplar ile görüntülenememektedir (Nelson ve Miller, 1992). X ışını kırınımı yöntemi, elektron mikroskopları, diferansiyel termal analizler killerin kristal yapısını belirlemede kullanılan yöntemlerdendir.

Kil mineralleri, silika tetrahedral ve alümina veya magnezyum oktahedral tabakası olmak üzere genellikle iki tabaka halinde bulunmaktadır. Silika tetrahedral tabaka tek bir silika atomunun çevresinde 4 oksijen atomunun birleşmesi ile oluşurken oktahedral tabaka ise alüminyum veya magnezyum katyonlarına, 6 adet oksijenin veya hidroksil grubun bağlanması ile oluşmaktadır. Bu tabakadaki katyonlar yerdeğiştirebilme özelliğinden dolayı farklı yapıya sahip olup, çeşitli isimler ile tanımlanmaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981).

Oktahedral ve tetrahedral levha yapıları sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmektedir.

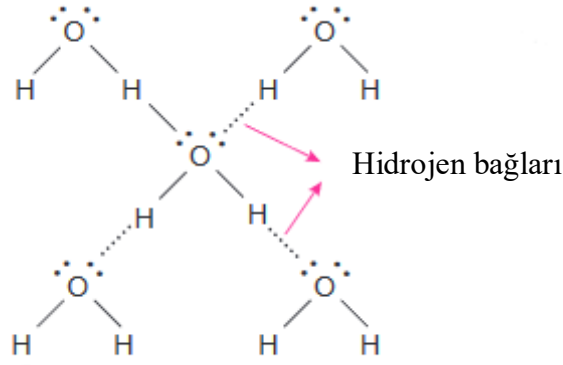


Şekil 1. Silika tetrahedron levha yapısı (Grim, 1974).



Şekil 2. Oktahedron levha yapısı (Grim, 1974).

Kil sistemindeki değişebilen katyonlar kil yüzeyinde yer almayıp farklı uzaklıklarda bulunmaktadır. Pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü kil yüzeyi arasında oluşan elektriksel kuvvet, katyonları yüzeye çekerken termal enerjileri onları yüzeyden uzağa iteler ve böylece tabakalar arasındaki denge korunmaktadır. (Karacan ve Yılmaz, 1998). Su ise Şekil 3’de gösterildiği gibi bir ucu pozitif diğer ucu negatif yüklü polar bir moleküldür ve bu da kil ile su arasındaki bağı açıklamaktadır. Killerin su içeriği; kıvamlılık, dayanım ve yoğunluğu, su tutma enerjisi ise; hacimsel değişim, konsolidasyon ve hidrolik iletkenlik gibi temel özellikleri etkilemektedir. Killerde, su kaybı sonucu oluşan hacimsel büzülme; su emme sonucu oluşan hacimsel şişme gibi istenmeyen sonuçlar bu iki önemli özellikten kaynaklanmaktadır (Gilloi 1968).



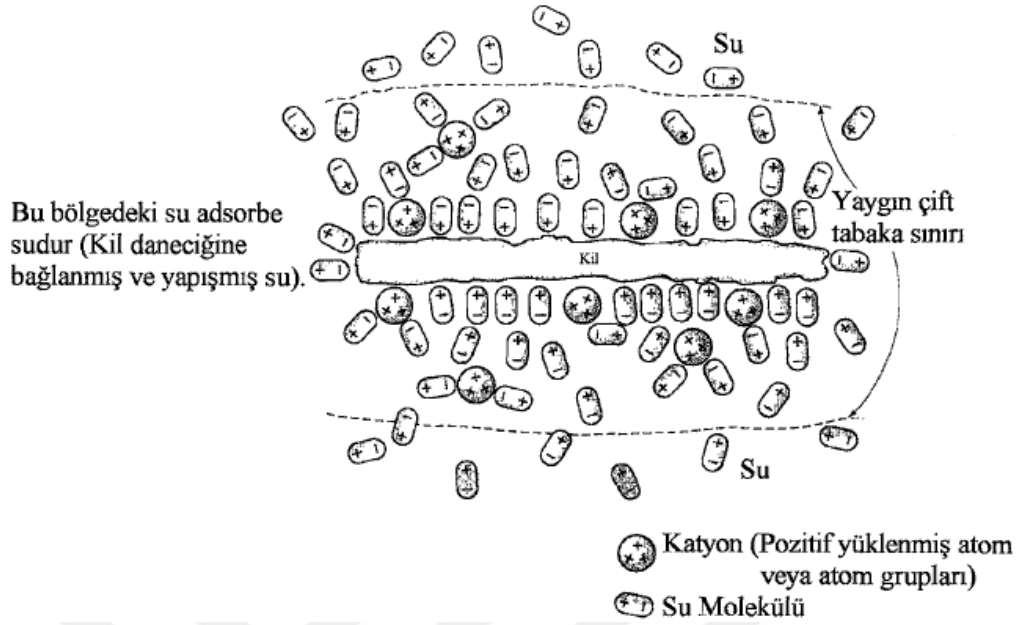
Şekil 3. Su molekülü

Killerin bulundukları ortamdaki katyonları çekebilme özelliğinin mevcutiyyetinden bahsedilmişti. Örneğin bir tuz çözeltisinin içinde bulunan kil minerali, tuzda bulunan Na^+ iyonunu hızlıca absorbe edebilmektedir fakat Na^+ iyonu yüzeye sürekli yapışmamaktadır. Eğer kil potasyum klorit (KCL) çözeltisine konursa Na^+ , K^+ iyonu ile yer değiştirir. Kilin içerisinde absorbe ettiği bu katyonlar da kilin su emerek şişmesi üzerinde oldukça etkilidir. Tablo 1’de değişik katyon cinslerinin şişme üzerindeki etkisi verilmektedir. Bu tablodan da anlaşılacağı gibi Ca montmorillonit, Na montmorillonitten daha az şişme davranışı göstermektedir.

Tablo 1. Değişik katyon cinslerinin şişme üzerindeki etkisi (Genç, 2009).

Katyon Cinsi	Na	Mg	Ca	K	Fe	H
Şişme (%)	29	26	23	21	18	15

Kil danelerinin yüzeyinde bulunan negatif yükler elektriksel dengeyi koruyabilmek için zemin neminde bulunan katyon iyonlarını çekmektedir. Katyonların pozitif yükleri ise su molekülünde bulunan negatif yükleri çekerek katyonlara bağlanmış olur. Daneciğin çekim limitine kadar olan kısımda bulunan ve kalınlığı yaklaşık $1 \cdot 10^{-6}$ mm olan bu su tabakası “çift tabaka” olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4’de gösterildiği gibi, kil daneciğinin negatif yüzeyine bağlanan absorbe su ile katyonlar ve bu katyonlara bağlanan su molekülleri çift tabakayı oluşturmaktadır.



Şekil 4. Killerin etrafında oluşan çift tabakadaki adsorbe su ve kasyonlar

Kil mineralleri kristal yapısının düzenlenme şekline göre üç gruba ayrılmaktadır. Kaolinit genellikle şişme özelliği göstermezken, mika grubu killer, şişme özelliği gösteren fakat önemli sorunlar oluşturmeyen illit ve vermikülütten oluşmaktadır. Smektit grubu killer ise montmorillonitten oluşur ve çok yüksek şişme özelliği gösterirler (Nelson ve Miller, 1992).

Kil minerallerinin tanımlanması için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Üç önemli kil minerali için Mitchell (1993) tarafından yapılan karşılaştırmalı özellikler Tablo 2'de verilmektedir.

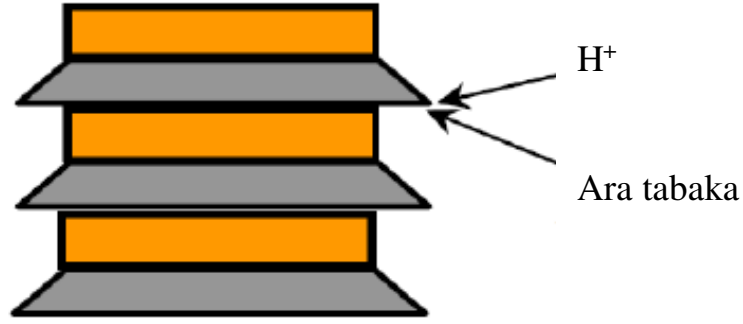
Tablo 2. Kil minerallerinin özellikleri (Mitchell, 1993).

Özellik	Montmorillonit	İllit	Kaolinit
Tane Boyutu (μm)	0.01-1.0	0.02-2.0	0.5-5.0
Tane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	6 köşeli pul
Dış Yüzey Alanı (m^2/g)	70-120	70-100	10-30
İç Yüzey Alanı (m^2/g)	550-650	-	-
Plastisite	Yüksek	Orta	Düşük
Likit Limit	110-710	60-120	29-70
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38
Kohezyon	Yüksek	Orta	Düşük
Şişme Kapasitesi	Yüksek	Orta	Düşük
Elektrik Yükü	0.5-0.9	1.0-1.5	0
KDK ($\text{meq}/100\text{g}$)	80-150	10-40	3-15
Özgül Gravite	2,35-2,7	2,6-3,0	2,6-2,8
Tabakalar arası mesafe (nm)	1.0-2.0	1.0	0.7
Tabakalar arası bağ	Van der Waal's bağları (zayıf çekim kuvveti)	Potasyum iyonları	Hidrojen
Net negatif yük (cmol_c/kg)	80-120	15-40	2-5

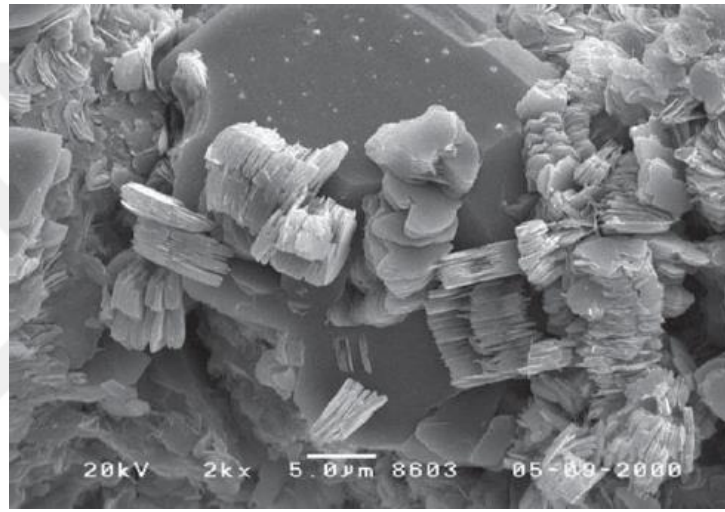
1.3.1. Kaolinit

Kaolinit, kaolin grubuna ait bir mineral olup, dünya yüzeyinde yaygın olarak ılık ve nemli iklime sahip bölgelerde bulunmaktadır. Yapısal olarak bir tetrahedral tabakanın bir oktahedral tabakaya hidrojen bağları ile bağlanması sonucu meydana geldiğinden dolayı 1:1 kil minerali olarak da bilinmektedir. Kaolinit mineralinin dizilimi, Şekil 1 ve Şekil 2’de temsili olarak gösterilen tabakalara göre dizilişi Şekil 5’de, SEM analizi görüntüsü ise Şekil 6’da verilmektedir.

Katmanları birbirine çok güçlü hidrojen bağları ile bağlanmakta olup suyun katmanlar arasına girmesine ve hidratasyona uğramasına izin verilmemektedir. Bu da kaolitin şişme özelliği göstermemesini açıklamaktadır.



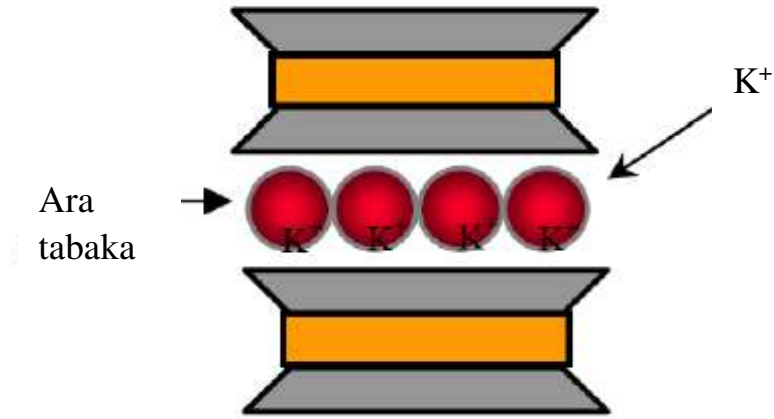
Şekil 5. Kaolinit tabakası temsili (Grim, 1974).



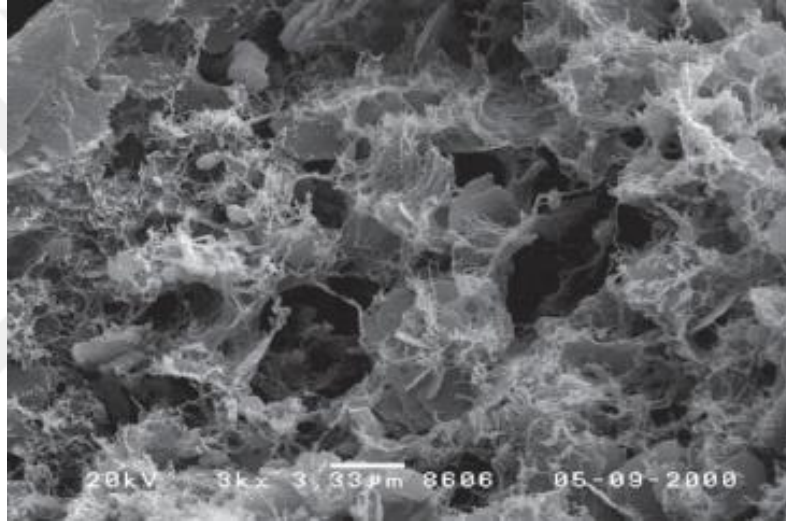
Şekil 6. Kaolinit tabakası SEM görüntüsü (Nelson vd., 2015).

1.3.2. İllit

Mika grubu kil minerallerinden olan illit, tetrahedral ve oktahedral katmanlarının potasyum bağları ile birbirine bağlanmasıyla oluşmaktadır (Şekil 7, 8). İki tetrahedral (silika) katmanın, bir oktahedral katmanla bağlanması sonucu oluştuğundan 2:1 kil minerali olarak da bilinmektedir. Kristal yapı olarak montmorillonite benzer fakat yüzeyinde bulunan negatif yük yoğunluğu montmorillonite oranla daha fazladır. İllitteki katmanlar arası bağ (interlayerbond) montmorillonitden çok daha güçlüdür. Su, bu güçlü bağları kopararak katmanlar arasına girememektedir (Gillot, 1968). İllit minerali genel olarak %15 oranında şişme davranışı göstermektedir.



Şekil 7. İllit minerali temsili (Grim, 1974).



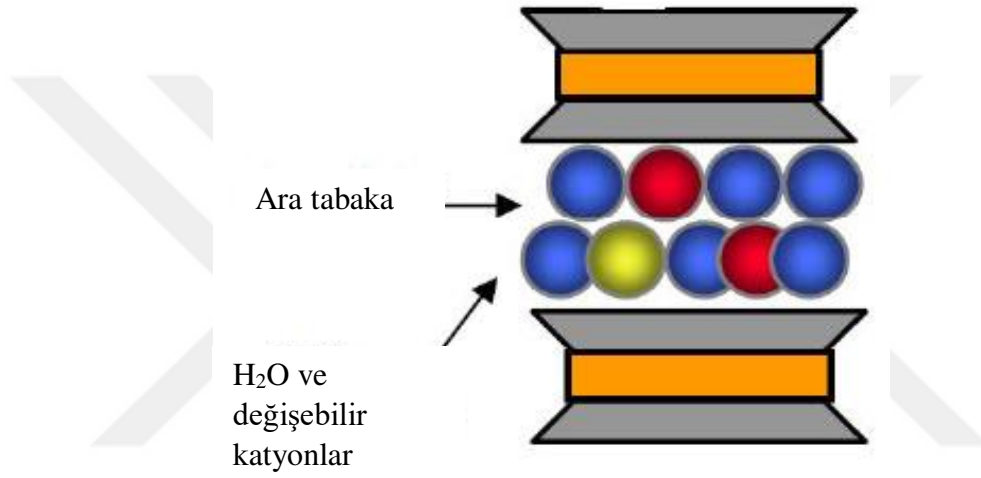
Şekil 8. İllit minerali SEM görüntüsü (Nelson vd., 2015).

1.3.3. Montmorillonit

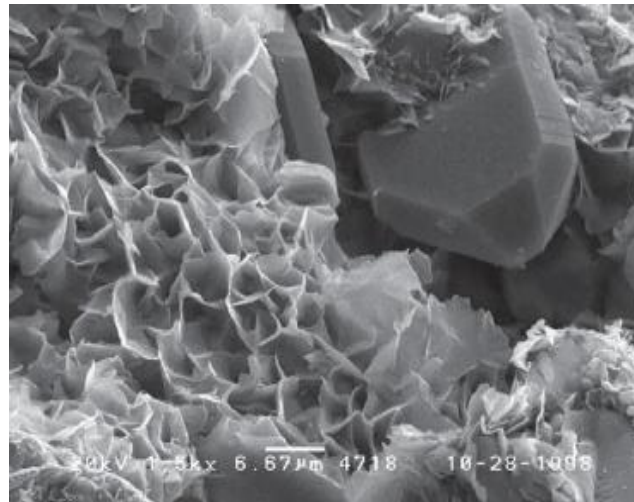
Smektit grubunun esas mineralinden olan montmorillonit, iyi drene olmamış volkanik uçucu külün ayrışması sonucu meydana gelmektedir. Şekil 9 ve Şekil 10'da temsili olarak gösterildiği üzere, montmorillonit kil minerali iki tetrahedron katmanı ile bir oktahedron katmanının birleşmesi ile oluşmaktadır. Mika grubu mineralleri ile benzer diziliş gösterdiği için aynı adlandırma altında 2:1 minerali olarak da tanımlanmaktadır. Tetrahedron levhalarını birbirine bağlayan zayıf Van der Waals kuvvetlerinden dolayı su ve değişebilir katyonlar, katmanlar arasına girerek katmanların ayrışmasına neden olmaktadır.

Montmorillonit minerali çok küçük kristal yapıya sahip olmasına rağmen, hacmi sulu ortamda 20 kata kadar genişleyebilmektedir.

Montmorillonit mineralinin inşaat alanında bulunması durumunda şişmenin engellenebilmesi için uygulanması gereken basınç, inşaat yükünü aşabilmektedir. Bu da otoyol, yol, havaalanı kaplamaları gibi hafif yapılara ciddi zararlar vermektedir. Fakat bu karakteristik özelliği, diyafram duvar gibi sondaja ihtiyaç duyulan yapıların çevresinde oluşabilecek sızıntıları engellemek için kullanılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 9. Montmorillonit kil mineralinin temsili olarak gösterimi



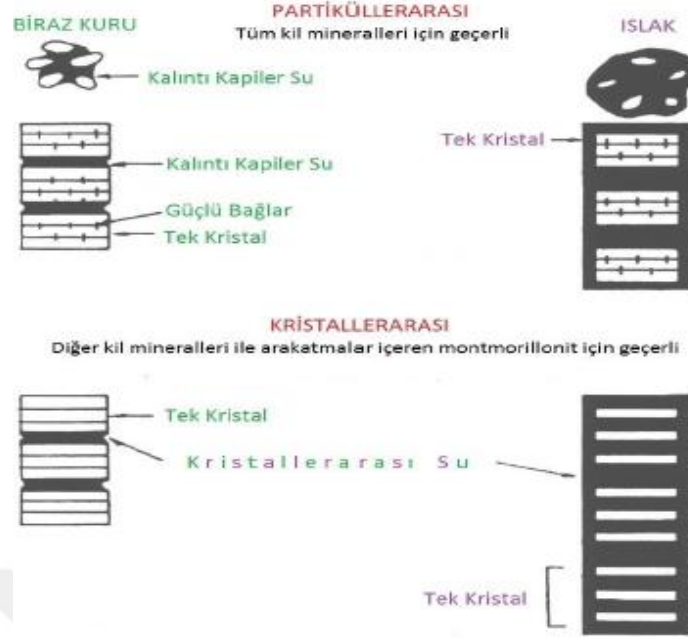
Şekil 10. Montmorillonit kil mineralinin SEM görüntüsü (Nelson vd., 2015).

1.4. Şişen Zeminler

Islatıldığında hacimsel artış göstererek şişen, kurutulduğunda ise hacimsel azalma göstererek büzülen zeminlere “şişen zeminler” denilmektedir. Şişen zeminler dünya üzerinde birçok bölgede yer almaktadır. Genellikle kurak ve yarı kurak iklim koşullarının hacim olduğu bölgelerde görülmektedir. Zeminlerin şişme özelliği, içeriğindeki su miktarına göre değişiklik göstermektedir. Yağmur suları ve yer altı su seviyesindeki değişim dış etmenler zeminin su içeriğini arttırmaktadır. Artan su içeriğiyle doğru orantılı olarak zeminin hacminde de artış meydana gelmektedir. Şişmeyi engellemek için uygulanması gereken basınca ise “şişme basıncı” denilmektedir. Eğer zemin tabakası üzerine inşa edilen yapıların basıncı, şişme basıncından düşük olursa zeminde kabarmalar meydana gelerek yapılarda zamanla ciddi hasarlar oluşturmaktadır. Bu nedenle bir yapı projelendirmeden önce inşa alanını kaplayan zeminin davranışı ve şişme duyarlılığı çok dikkatli analiz edilmeli ve gerekli önemler alınmalıdır.

Yüksek şişme özelliğine sahip olan her kil mineralinin şişme potansiyeli aynı düşünülmemelidir. Kaolinit kili güçlü hidrojen bağları sayesinde bir arada kalıp hemen hemen hiç şişmez iken illit, daha zayıf potasyum bağları ile bağlıdır ve az miktarda şişmektedir. Zayıf Van Der Merve bağları ile birbirine bağlanan montmorillonit killlerinde bağlar arasına giren su, bağları kolayca birbirinden ayırarak şişme davranışına sebep olmaktadır. Zemin içerisinde %10 oranında montmorillonit kilinin bulunması bile zeminin şişme davranışı sergileyeceğini göstermektedir.

Zeminin şişme mekanizması, parçacıklar arası veya kristaller arası olmak üzere iki alanda meydana gelmektedir (Şekil 11). Parçacıklar arası şişme mekanizmasında kil ıslatıldığında kılcal gerilmeler azalarak kilin şişmesine neden olmaktadır. Kristaller arası şişme ise montmorillonit gibi zayıf bağlarla bağlanmış killerde oluşmaktadır. Kil suya doyurulduğunda, su hem basit kristallerin olduğu bölgeye hem de kristalleri oluşturan bireysel katmanlar arasına girerek çok büyük hacimsel artışlara sebebiyet vermektedir.



Şekil 11. Zeminlerin şişme mekanizması (Popescu, 1986).

1.4.1. Şişmeye Etki Eden Faktörler

Şişme davranışını açıklayabilmek adına geçmişten günümüze kadar birçok araştırma yapılmış olup, zeminin şişme davranışını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Geçmişte gerçekleştirilmiş birçok araştırmanın sonucuna göre şişmenin birincil faktörünün başlangıç su muhtevası, kil mineralinin tipi ve miktarı, başlangıç kuru birim hacim ağırlık olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte El-Sohby ve Mazen (1983) tarafından yapılan çalışmaya göre, kilin minerolojik özelliklerinin de şişme üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Aşırı kurumuş veya konsolidasyona uğramış zeminlerde şişen kil mevcut ise, kil taneciklerine elektiriksel kuvvet ile bağlanmış olan katyonlar hidratasyona uğramakta ve içsel gerilmelerin azalmasıyla hacimsel artış meydana gelmektedir. (O'Neill ve Poormoayed, 1980).

Zeminin şişme potansiyeli, zemin karakteristikleri, çevresel faktör ve gerilme durumları olmak üzere üç grup altında birleştirilebilmektedir. Zemin karakteristikleri iç kuvvet alanının temel davranışlarını etkilerken, çevresel faktörler iç kuvvetler sistemini tamamen etkilemektedir (Nelson ve Miller, 1992).

Nelson ve Miller, (1992) yaptıkları araştırmalar sonucunda şişmeyi etkileyen zemin özelliklerini Tablo 3 ve Tablo 4'de belirtildiği şekliyle özetlemişlerdir.

1.4.2. Şişme Parametreleri

Şişen zeminler üzerine önlem alınmadan inşa edilen, bilhassa hafif yapılarda, hasarlar meydana gelmesi kaçınılmaz olduğundan zeminlerin şişme davranışının çok iyi belirlenmesi mühendislik açısından büyük önem taşımaktadır. Şişme davranışı bazen sadece ortamda bulunan suyun değişmesiyle değil, zemine maruz bırakılan mevcut yükün zamanla azalmasıyla da oluşabilmektedir. Bu nedenle her türlü projenin yapım aşamasında inşa alanının şişme potansiyelini tanımlayabilmek adına zeminin şişme yüzdesi ve şişme basıncı gibi parametrelerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Tablo 3. Zemin karakteristiklerinin şişmeye potansiyeline olan etkisi (Nelson ve Miller, 1992).

ETKİLEYEN FAKTÖRLER	TANIMLAMA
Kil Minerolojisi	Şişmeye neden olan kil mineralleri genellikle montmorillonitler ve vermükülitlerdir. İllit ve kaolinit genel olarak şişmez fakat partiküller çok ince ise hacim değişimine sebep olabilir (mikron boyutunun onda birinden az).
Zemin Suyu Kimyası	Şişme, ortamda bulunan katyon yoğunluğuna ve katyon değerine bağlı olarak değişiklikler gösterebilmektedir. Örneğin Mg^{2+} iyonu, Na^+ iyonundan daha az şişmeye sebep olmaktadır.
Zeminin Emiş Gücü	Zeminin emiş gücü bağımsız bir efektif gerilme değeridir ve doymamış zeminde negatif bir kılcal basınç oluşturur.
Plastisite	Genellikle geniş nem aralıklarında plastik davranış gösteren ve likit limiti yüksek olan zeminler in şişme potansiyeli daha yüksektir. Plastisite şişme davranışının bir göstergesidir.
Zemin Yapısı	Topaklanmış kil numuneleri dağınık halde bulunan killerden daha yüksek şişme potansiyeline sahiptir. Zemin yapısı yüksek su içeriğinde yapılan kompaksiyonda değişir. Yoğun sıkıştırılmış bir kil numunesi düşük su muhtevasında normal sıkıştırılmış bir numuneden daha az şişmektedir.
Kuru Yoğunluk	Yüksek yoğunluklu zeminlerde partiküller arasında bulunan güçlü itici bağların oluşturduğu boşluklar daha geniştir ve bu da yüksek şişme davranışına neden olur.

Tablo 4. Çevresel Faktörlerin Şişmeye Olan Etkisi (Nelson ve Miller, 1992).

ETKİLEYEN FAKTÖR	TANIMLAMA
Başlangıçtaki Nem Durumu	Kurutulmaya bırakılan ıslak zemin daha fazla su kaybeder ve başlangıçtaki kuru hacminden daha fazla büzülür. Başlangıçtaki zeminin su emme durumu son halindeki durumuyla bağlantılı olarak düşünülmelidir.
Nem Çeşitliliği	Zeminin nem değişimi çevresel faktörlere bağlı olarak oldukça çeşitli sebeplerden oluşur ve hacim değişimine sebep olur.
İklim	Yağış oranları ve çölleşme büyük nem değişikliklerine neden olmaktadır. En büyük şişme sorunları yarı kurak mevsimlerin yaşandığı bölgelerde görülür.
Yeraltı Suyu Seviyesi	Sığ su tablaları ve dalgalı akan sular nem içerine katkıda bulunur.
Bitki Örtüsü	Bitkiler ve ağaçlar zeminden aldığı suyu tüketir ve zeminin çeşitli alanlarda farklı su içeriklerinde olmasını sağlar.
Permabilite	Yüksek geçirimliliğe sahip zeminler belirli bölgelerden çatlar ve suyun daha kolay iletilmesini sağlar. Bu da şişmenin daha hızlı olmasına sebebiyet verir.
Sıcaklık	Artan sıcaklık nemin kaldırım ve binaların altında kalan soğuk alanlara ulaşmasına neden olur.
Yük Etkisi	Sürsaj yükünün büyüklüğü zeminin su içeriği ve yoğunluğunu etkileyerek hacimde büyük ölçüde değişikliklere sebep olur. Uygulanan dış kuvvetler parçaçıklar arasındaki itme kuvvetini dengeler ve şişme potansiyelini düşürür.

1.4.2.1. Şişme Yüzdesi

Şişme yüzdesi, bir zemin numunesinin suya doyurulması sonucu hacminde meydana gelen değişikliğin ilk hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır. Zemin numunesinin ıslanmasıyla birlikte yanal deformasyonların engellenmesi durumunda meydana gelen düşey

boy değişimi veya eksenel deformasyonların engellenmesi durumunda oluşan yanal çap değişimi şeklinde de tanımlanabilmektedir (Keskin vd.,1992).

şişme yüzdesi, yanal deformasyonların engellenmesi durumuna göre ve düşey deformasyonların engellenmesi durumuna göre denklem 1 ve denklem 2 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$S = (H_1 - H_0)/H_0 * 100 \quad (1)$$

$$S = (D_1 - D_0)/D_0 * 100 \quad (2)$$

Burada;

H_0 : zemin numunesinin ilk hacmi

H_1 : zeminin son hacmi

D_0 : zeminin ilk apı

D_1 : zeminin son çapı

dır.

1.4.2.2. şişme Basıncı

şişen zeminlerin, suyla temas etmesi sonucunda ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında, zemin taneleri arasında oluşan elektiriksel dengenin korunması adına aksi yönde bir basınç meydana gelmekte ve bu basınç şişme basıncı olarak tanımlanmaktadır. şişme basıncının ölçülmesi için farklı birçok yöntem geliştirilmiştir. Ölçülen şişme basınçları ve tahmin edilen kabarma miktarı, zeminlerin şişme özelliklerini ölçmek için kullanılan yöntemden önemli ölçüde etkilenmektedir.

1.4.3. Şişen Zeminlerin Belirlenme Yöntemleri

Mühendislik yapılarının inşa edileceği sahanın önceden araştırılması ve tanımlanması geoteknik mühendisliğinin en önemli adımlarındandır. Bu tanımlamalar neticesinde ise uygun önemler alınmalı ve yapılar güvenli alanlar üzerine oturtulmalıdır. Farklı davranışlara sahip zeminlerin öncelikli olarak belirlenmesi projenin ileriki safhalarının doğru bir şekilde ilerlemesini sağlamaktadır. Buna istinaden literatürlerde belirtilen pek çok tanımlama deneyleri mevcuttur.

1.4.3.1. Mineralojik Yöntemler ile Belirleme

Bir zeminin şişme kapasitesi zeminin mineralojik yapısı ve içinde bulunan kil miktarı gibi özelliklerle doğrudan bağlantılı olup kil minerallerinin katyon değiştirme kapasitesi, üzerlerindeki negatif yük durumu ve tabakalar arasındaki bağlar zeminin şişme potansiyeli konusunda fikir vermektedir. Bu nedenle kil mineralinin türünü belirlemek ve zemini tanımak adına birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı X ışını kırınımı analizi (XRD) olmuştur. X ışını kırınımı analizinde standart maddelerin kırınım çizgileri kullanılarak malzeme belirlenmektedir. Bu analizde kullanılan zemin toz haline getirilir ve cam plaka üzerine yerleştirilir. Numunenin cam plakaya tutunabilmesi ve doğal yapısının ısı ile zarar görmemesi için yüksek ısıda kurutma yapılmamalıdır. Sabit hızda döndürülen numuneye X ışınları gönderilir ve herhangi bir atoma hangi açıyla çarptığı belirlenir. Grafik sonucunda oluşan pik değerlere bakılarak zemin içeriği tanımlanabilmektedir. Diğer mineralojik tanımlamalar için elektron mikroskobu, diferansiyel termal analiz, kimyasal analiz ve boya adsorpsiyonu gibi metotlar kullanılmaktadır.

1.4.3.2. Kıvam Limitleri ile Belirleme

Şişmenin tanımlanması için kullanılan deneylerin hiçbiri henüz standart haline getirilmemiştir. Fakat zeminin kıvam limitleri şişme özelliği hakkında oldukça sağlam bilgiler vermektedir. Zeminin likit limiti ve plastisite indisi arttıkça şişme derecesinin de

arttığı çalışmalar sonucunda gözlemlenmiştir. Literatürde şimdiye kadar pek çok sayıda sınıflandırma yöntemi kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmaların bazısında aynı plastisite indisi değeri için farklı şişme potansiyeli değerleri elde edilmektedir. Bunun nedeni, araştırmaların farklı zemin tiplerinde yapılması, başlangıç zemin koşullarının ve su muhtevası değerlerinin farklı olması gösterilebilir (Nelson ve Miller, 1992). Literatürde, Chen (1988) tarafından yapılan sınıflandırma, en çok kullanılan sistemlerden birisidir ve bu çalışma kapsamında referans alınmıştır. Tablo 5’de zeminlerin likit limit ve plastisite indisine göre şişme derecesi verilmektedir.

Tablo 5. Zeminlerin likit limit ve plastisite indisine göre şişme derecesi (Chen, 1988)

Likit Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Şişme Derecesi
>60	≥35	Çok yüksek
40-60	20-55	Yüksek
30-40	10-35	Orta
<30	0-15	Düşük

1.4.3.3. Aktivite Yöntemi ile Belirleme

Zeminin aktivitesi şişme özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Aktivite katsayısı, atterberg limitleri ve kil içeriğinin birleştirildiği bir katsayıdır ve Skempton (1953) tarafından tanımlanmıştır (Nelson ve Miller, 1992). Aktivite, denklem 3’de belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

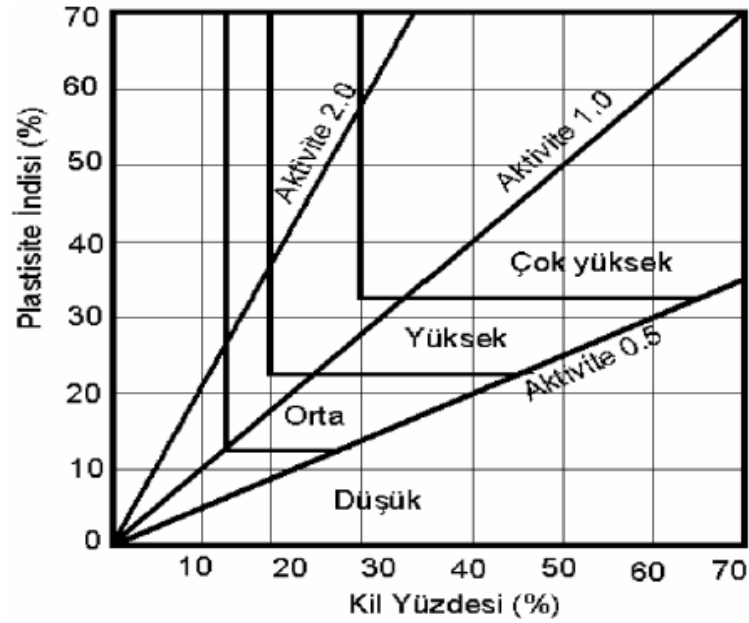
$$Aktivite (A_c) = \frac{\text{Plastisite indisi } (I_p)}{\text{Kil miktarı } (\%)} \quad (3)$$

Skempton (1953), aktivite değerlerine göre; aktivitesi 0.75 değerinden az olan zeminleri inaktif, 0.75 ve 1.25 arasında olan zeminleri normal, 1.25 değerinden fazla olan zeminleri ise aktif kil olarak tanımlamıştır. Kil zeminlerinin çeşidine göre aktivite katsayısının sınıflandırılması Tablo 6’da verilmektedir.

Tablo 6. Kil zeminlerinin çeşidine göre aktivite katsayısı (Skempton, 1953)

Mineral	Aktivite
Kaolinit	0.33-0.46
İllit	0.9
Montmorillonit (Ca)	1.5
Montmorillonit (Na)	7.2

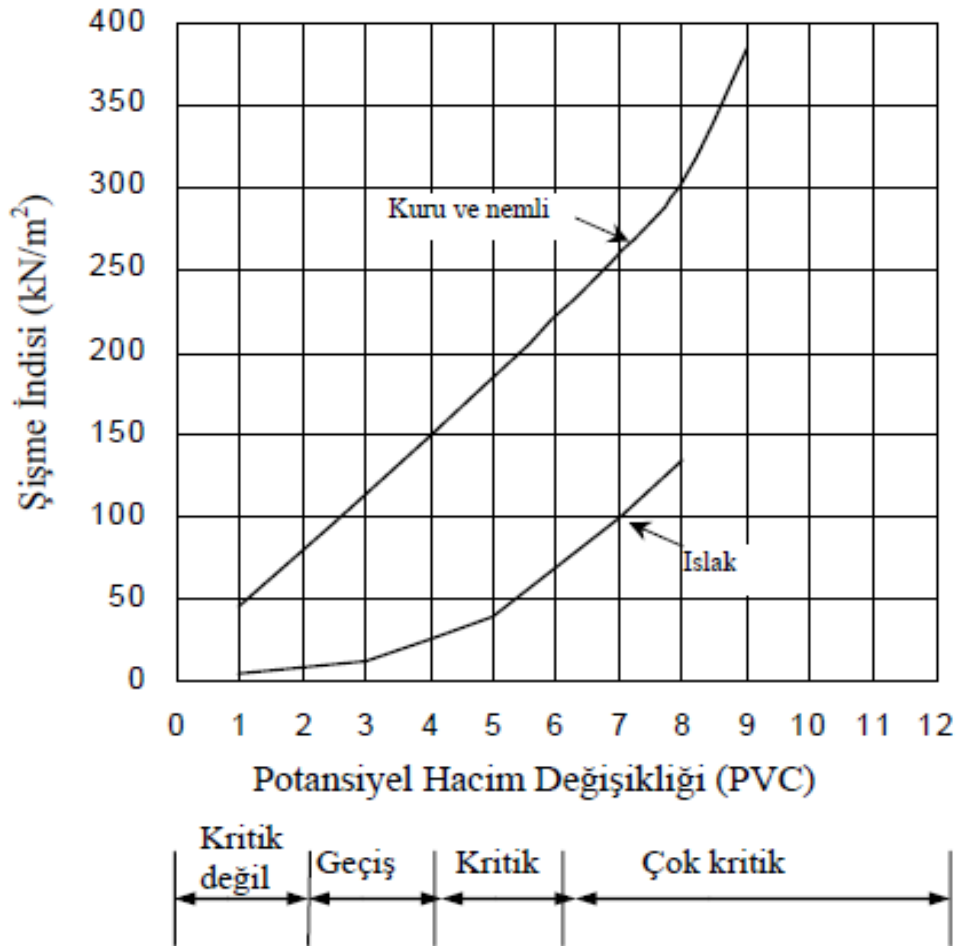
Zeminin içerdiği kil miktarı ve plastisite indisinin şişme özelliğinin derecelendirilmesinde etkili olduğu belirtilmişti. Bu iki özelliğin aktivite ile birleştirilmiş abağı Van Der Merve (1964) tarafından hazırlanmıştır. Sınıflandırma abağı Şekil 12’de gösterilmektedir.



Şekil 12. Sınıflandırma abağı (Van Der Merve, 1964).

1.4.3.4. Potansiyel Hacim Değişimi Yöntemi ile Belirleme

Zeminin potansiyel hacim değişikliğinin bilgisini veren bu yöntem Lambe (1960) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde örselenmiş numune Modifiye Proktor enerjisi (2700 kJ/m^3) altında konsolidasyon aleti halkasında sıkıştırılır ve 140 t/cm ön yüklemeden sonra, yük halkası ile zemin numunesinin şişmesi kısmen engellenilerek numune suya doyurulur. İki saat sonra yük ölçme halkasından okunan değerler basınca çevrilir ve Şekil 13 yardımı ile potansiyel hacim değişimine çevrilir. Her ne kadar kolay ve kullanışlı bir yöntem olsa da sonuçlar şişme potansiyelini vermemektedir. Ancak şişme özelliği gösteren zeminlerin karşılaştırılmasında kullanılabilir.



Şekil 13. Şişme indisi ve potansiyel hacim değişikliği ilişkisi (Lambe, 1960).

1.4.3.5. Laboratuvar Deneyleri ile Belirleme

Laboratuvar deneyleri ile zeminin şişme potansiyelini doğrudan belirlenebilmekte olup, en sık kullanılan iki yöntem odometre ve serbest şişme yöntemleridir.

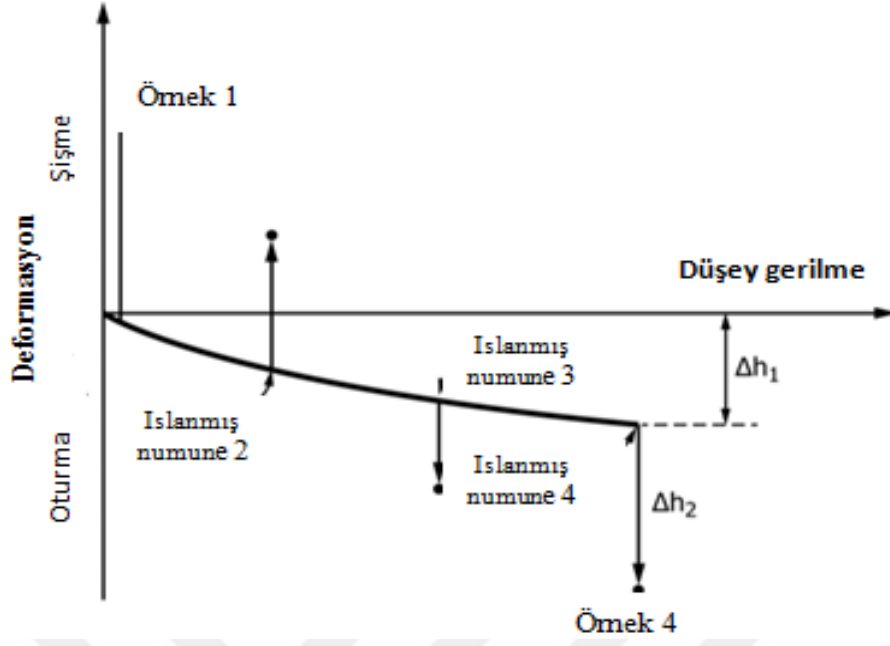
1.4.3.5.1. Ödometre Yöntemi ile Belirleme

Ödometre deneyleri şişme potansiyelinin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemdir. Deneyin amacı şişme basıncı ve şişme yüzdesini belirlemektir. Araştırmacıların elde ettiği çeşitli deney yöntemleri ASTM standartlarında tanımlanmaktadır. ASTM D4546'da (2021) şişme parametrelerinin elde edilmesiyle ilgili üç farklı yöntem önerilmektedir. Bu yöntemlerin tamamında yanıl genişlemelere izin verilmemekte ve zemin su içerisinde doyurulmaktadır.

Metot A: Islatma-sonradan yükleme olarak da adlandırılan bu yöntemde dört veya daha fazla zemin numunesi üzerinde deneyler yapılmaktadır. Konsolidasyon halkasında optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılarak veya sahadan örselenmemiş şekilde alınan en az dört numune, ödometre aletine yerleştirilmektedir. Her numuneye aralarında oturma basıncı da dahil olan farklı basınç uygulanmaktadır.

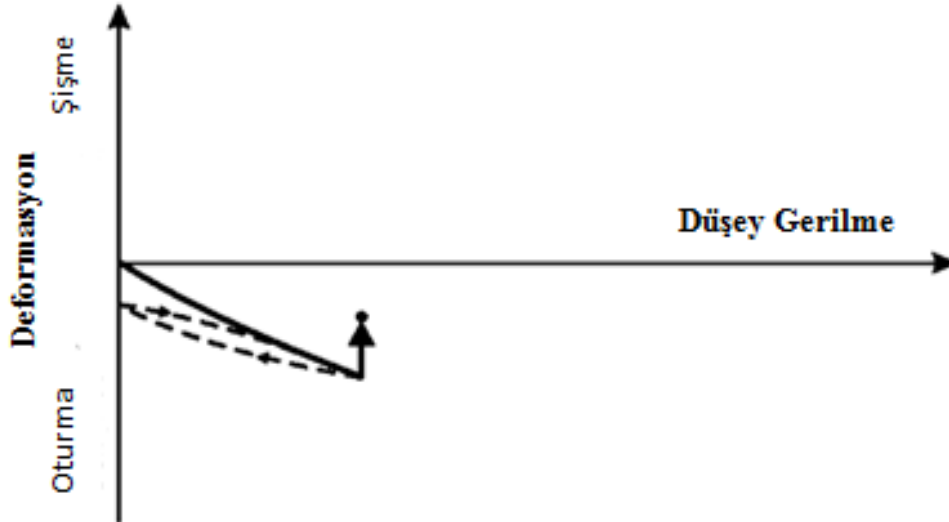
Numunelerde oluşan oturmalar su ilave edilmeden önceki 1 saat içinde okunur (Δh_1) ve numuneler konsolidasyon aletleri içerisinde suya doyurulur. 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 15.0, ve 30.0 dakikada ve 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72 saat sonra birincil şişme veya oturma tamamlayıncaya kadar okumalar alınmaya devam edilmektedir (Δh_2).

Deney sonucunda zeminin son deformasyon okuması ve son su muhtevası ölçülmelidir. Bu yöntemle yapılmış deney sonuçlarına göre oluşturulan grafik verilerinden (Şekil 14), şişmeyi önlemek için gereken minimum düşey basınç olan şişme basıncı veya şişmeye izin veren minimum 1 kPa'lık düşey basınca karşılık gelen serbest şişme yüzdesi bulunabilmektedir.



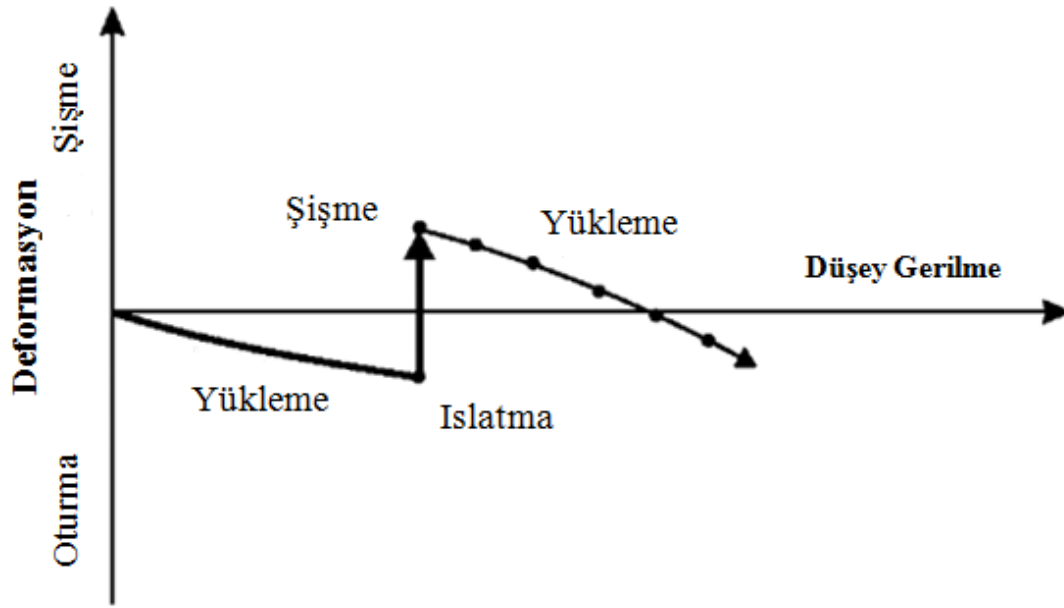
Şekil 14. Deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi (ASTM D4546, 2021- Metot A).

Metot B: Bu deneyde çalışma alanından alınmış veya laboratuvar ortamında optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numuneye 1 kPa, tasarım basıncı veya oturma basıncı uygulanmaktadır. Şekil 15’de gösterildiği gibi uygulanan yük kaldırılarak oluşan deformasyonlar okunur ve numune tekrar yüklendikten hemen sonra suya doyurulur. Metot A’da bahsedilen şekilde deformasyonlar okunur. Deney sonunda okunan şişme yüzdesi kaydedilir.



Şekil 15. Deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi (ASTM D4546, 2021-Metot B).

Metot C: Konsolidasyon halkasına yerleştirilmiş numuneye, numunenin oturma basıncına karşılık gelen basınç uygulanır. Numune konsolidasyon aleti içerisinde suya doyurulur ve Metot A'ya benzer şekilde okumalar kaydedilir. Şişmesi tamamlanan numuneye oturma basıncının üzerinde artan yüklemeler, ASTM D2435'de (2021) tanımlanan konsolidasyon deneyinde belirtilen adımlar ile devam ettirilir. Zeminin başlangıç yüksekliğine geri dönmesini sağlayan basınç, şişme basıncı olarak kaydedilir. Bu yöntemde Şekil 16'da belirtildiği gibi şişme basıncı ve şişme yüzdesi bulunmaktadır.



Şekil 16. Zeminin deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi (ASTM D4546, 2021-Metot C).

1.4.3.5.2. Serbest Şişme Deneyi ile Belirleme

Serbest şişme deneyi ilk olarak Holtz ve Gibbs (1956) tarafından geliştirilmiştir. Uygulaması oldukça kolay olan bu deney, şişme davranışının direk ölçüm yöntemlerinden sailmaktadır. Deneye başlamadan önce 10 g zemin numunesi 24 saat etüvde kurutulur. Etüvden alınan zemin, içinde 100 ml damıtık su olan mezürün içine doldurulur. 24 saat sonra şişen numunenin hacmi okunur ve denklem 4'de verdiği gibi hesaplanmaktadır.

$$FS = \frac{V - V_s}{V_s} * 100 \quad (4)$$

Burada; FS: Serbest şişme

V: Şişmeden sonraki zemin hacmi

V_S : Zeminin dane hacmi ($V_S = \frac{W_S}{G_S} * \gamma_w$)

W_S : Etüvde kurutulmuş zemin ağırlığı

G_S : Zeminin özgül ağırlığı

γ_w : Suyun birim hacim ağırlığı'

dır.

Zeminin dane özgül ağırlığını belirlemek bazen ortam koşullarına bağlı kolay olmamaktadır. Bunun için literatürde önerilen diğer yöntem kullanılabilir. Bu yöntemde damıtık su ile hazırlanan çözelti, aynı şekilde gazyağı ile de hazırlanır. 24 saat sonra mezürlerdeki son hacim yükseklikleri okunur. Denklem 5'de verilen formül ile zeminin serbest şişmesi hesaplanabilmektedir.

$$FS = \frac{V - V_k}{V_k} * 100 \quad (5)$$

Burada; FS: Serbest şişme

V: Numunenin damıtık sudaki son hacmi

V_k : Numunenin gaz yağındaki son hacmi'

dir.

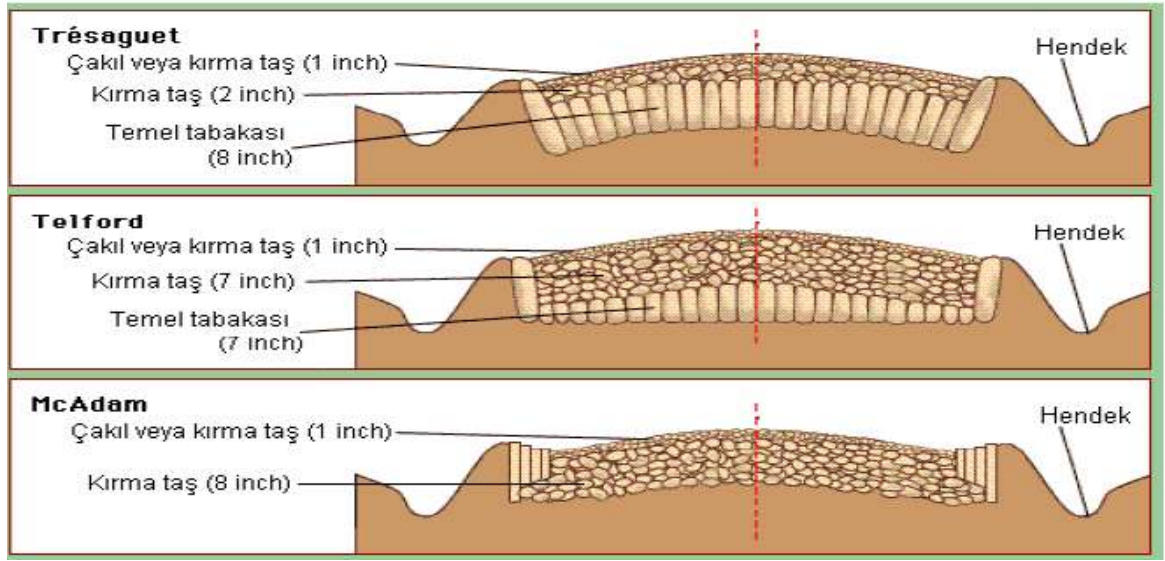
1.5. Şişen Zeminlerin Stabilizasyon Teknikleri

Geoteknik mühendisliğinin çalışma prosedüründe ilk olarak zeminin tanımlanması ve uygun önlemler alınması gerekmektedir. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde şişen zemin üzerine inşa edilen yapılarda, yapı oturma alanları kabarır ve sonucunda çatlaklar ve kırılmalar meydana gelebilmektedir. Bu gibi durumlarda şişen zeminlerin iyileştirme yöntemlerine gidilmesi gerekmektedir. İyileştirme yöntemleri mekanik ve kimyasal olmak

üzere iki başlık altında toplanarak uygulama çeşidi yapı tipi, zemin türü, kullanılacak malzemenin temin edilebilirliği ve ekonomi gibi sebeplere bağlı değişebilmektedir.

1.5.1. Mekanik Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyonda amaç iki ya da daha fazla zeminin uygun oranlarda karıştırılarak istenilen şartları sağlayan bir zemin haline dönüştürebilmektir. Bu yöntemde ince taneli zeminlere iri taneli zeminler karıştırılarak stabilizasyon sağlanmaktadır. Yöntemin ilk kullanım örnekleri Babil ve Roma yollarında görülmektedir (Çalık, 2012). Dönemin yollarının yapımında trafik yüklerinin altına büyük taş bloklar yerleştirilmiştir. 19. yüzyılda bu yöntemin örneklerine rastlanmıştır (Şekil 17).



Şekil 17. 19. Yüzyılda Mekanik stabilizasyona uygun yapılan yol inşaatları (Ingles ve Metclaf, 1973).

Mekanik stabilizasyonda şişme davranışı gösteren zayıf zemin, önceden belirlenmiş derinliklerde kazılarak çıkartılır ve belirli oranlarda kohezyonsuz zeminle karıştırılarak zemini stabilize etmek amaçlanmaktadır. Bu oran için belirlenmiş standart bir metot olmamasına karşın deneme yanılma yöntemi ile optimum karışım oranı belirlenebilmektedir. Mekanik iyileştirmesi yapılan karışık zemin inşa alanına serilir ve klasik yöntemlerle

sıkıştırılır. Elde edilen karışımın granülometrik dağılımı zeminin yoğunluğu, su tutma kapasitesini, stabilizesini ve geçirimsizliğini olumlu yönde etkilemektedir.

1.5.2. Kimyasal Stabilizasyon

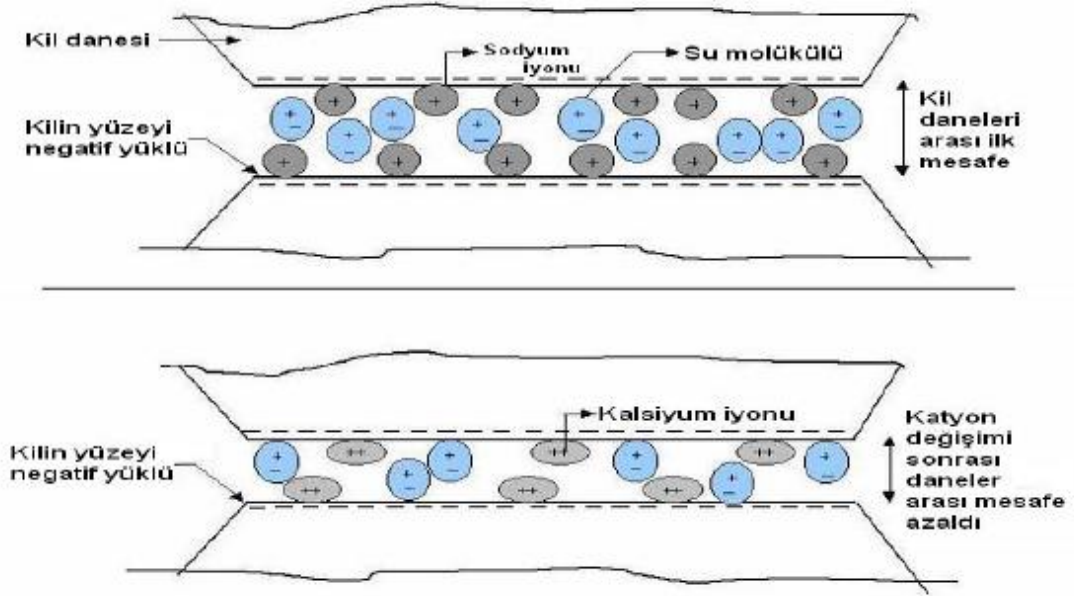
Kimyasal katkıları ile zeminin iyileştirilmesi uzun yıllardan beri süregelen bir işlem olmuştur. Geoteknik mühendisliğinde şişen zeminlerin stabilize edilmesi için birçok malzeme katkı olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler zeminin daneleri arasına girerek kimyasal özelliklerini değiştirerek farklı yapıda yeni zemin oluşmasını sağlamaktadır. Katkı malzemeleri seçilirken malzemenin türüne, ekonomik olmasına, zemin şartlarına ve katkı malzemesinin kullanılabilir olmasına dikkat edilmelidir. Literatür araştırmaları sonucunda da görülmüştür ki kireç ve çimento gibi katkıları en etkili ve en çok kullanılan yöntemlerden olmuştur.

1.5.2.1. Kireç Katkısı ile Stabilizasyon

Zemin stabilizasyonunda kullanılan en eski katkı maddelerinden biri olan kireç, şişen zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirerek kullanımını uygun hale getirmektedir. Kireçle stabilize edilen zeminin plastik limiti artar, likit limiti azalarak daha katı bir hal alır ve şişme potansiyeli azalarak dayanımı artmaktadır. Yapılan çalışmalarda en uygun kireç katkı oranının %2 ile %8 arasında olduğu görülmektedir. Sönmüş kireç (Ca(OH)_2 kalsiyum hidroksit] ve sönmemiş kireç (CaO kalsiyum oksit) kullanılmaktadır. Fakat sönmemiş kireç, su ile temasında zararlı yakıcı reaksiyonlar gösterdiğinden dolayı kullanımı önerilmediğinden, bu çalışmada kullanılan kireç türü sönmüş kireç olmuştur.

Kireç her kil türü ile reaksiyona girmektedir. Fakat kaolinit grubu zeminlerde mühendislik özellikleri açısından fazla bir değişiklik oluşturmazken, montmorillonit türü killerde oldukça farklı bir davranışa sebep olmaktadır. Bunun sebebi bu tür killerin katyon değiştirme kapasitesinin yüksek olması ve kil zemin içerisindeki metalik iyonlar ile kirecin içindeki kalsiyum iyonunun yer değiştirebilmesidir. Bu da, kireç ile stabilizasyon yapılan zeminin mühendislik özelliklerinin iyileşmesine sebep olmaktadır (Bell, 1996).

Kasyon değişimden sonra kil tanelerinde kalsiyum iyonları hakim olmaktadır. Kirecin eklenmesi ile ortamda konsantrasyonu artan Ca^{+2} kasyonu, kil tanelerini birbirine daha fazla yaklaştırmaktadır (Şekil 18). Ayrıca bu kasyonlar kil tanesini saran çift tabaka bölgesinin kalınlığını da azaltıcı etki göstermektedir (Yazıcı, 2004). Azalan bu kalınlık, tanelerin birbirini itme büyüklüğünü engelleyerek birbirine daha yakın olmasına neden olur ve bu olay sonucunda zeminde topaklanmalar meydana gelmektedir. Topak haline gelen zemin taneleri ayrışık halde bulunduğu duruma göre daha az şişme davranışı sergilemektedir.



Şekil 18. Kireç ile stabilize edilen killerin taneleri arasındaki boşluk oranının azalması (Yazıcı, 2004).

1.5.2.2. Çimento Katkısı ile Stabilizasyon

Yapılan çalışmalara bakıldığında çimento ile karıştırılan zeminin, kireç ile karıştırılan zemin davranışıyla benzer özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Çimento katkılı zeminin likit limit, plastisite indisi ve potansiyel hacim değiştirme kapasitesi azalırken kesme kuvveti ve büzülme limiti artmıştır (Chen, 1988). Çimentonun ana hidratasyon ürünleri CSH ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'dir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kil parçacıkları ile karşılaştığında reaksiyon meydana gelerek yeni bileşikler oluşmaktadır. Çimentonun hidratasyonu ile de CSH, CAH ve CASH oluşmaktadır.

ve tüm bu bileşikler zeminin mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde uygun çimento katkı olanlarının %2 ile %6 aralığında olduğu belirtilmiştir.

1.6. Literatür Taraması

Zeminin şişme sorunu uzun yıllardan beri hem Türkiye’de hem de dünyada araştırma konusu olmuştur. Çünkü göz ardı edilmesi mümkün olmayan birçok hasarlara yol açmaktadır. Mühendisler bu soruna çeşitli şekillerde çözümler bulmuşlardır. Bunlardan en çok kullanılan katkı maddesi ile zemin stabilizasyonudur. Çalışmaların ilk zamanlarında bitkisel katkı maddeleri kullanılırken günümüzde daha çok kimyasal katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu bölümde, olumlu sonuçlar veren katkı maddelerinin araştırma sonuçları sunulmaktadır.

Akan vd. (2017) yaptığı çalışmada Burdur’un Bucak ilçesinden alınan kil numunesi kullanmışlardır. Katkısız Zemin elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri, piknometre ve kompaksiyon deneyleri ve serbest şişme deneyleri yapmışlardır. Yapılan tanımlama deneylerinin sonucunda katkısız numunenin CH sınıfı (yüksek plastisiteli kil) olduğunu belirlemiş ve likit limiti %53, plastiklik limiti %20, optimum su muhtevasını %22 bulmuştur. Serbest şişmeye bırakılan numunenin 12mm kadar şiştiği gözlemlenmiştir. Şişme basıncı ödometre deneyine göre 229 kPa olarak hesaplanmıştır. Hazırlanan numuneleri; anında, 48 saat, 1 hafta ve bir ay olmak üzere farklı kür süreleri ile ve 1 ve 2 donma-çözülme çevrimlerinden sonra serbest basınç deneyine tabi tutmuşlardır. Kür süresi arttıkça serbest basınç dayanımı da artmış ve en iyi sonucu 1 aylık kürleme sonucunda 448 kPa olarak vermiştir. Katkı maddeleri olarak kullanılan mermer tozu, pomza tozu ve kireç tozunu No:40 elekten geçirerek kullanmıştır. Numuneler hem katkısız olarak hem de ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında katkılı olarak hazırlanmıştır. Donma-çözülme çevrimlerine maruz kalan %5 ve %10 mermer tozu katkılı numuneler, çevrim sayısının artmasıyla basınç dayanımında büyük ölçüde azalma görülmüştür ve basınç dayanımları en iyi sonucu 320 kPa ile %10 mermer tozu ile 48 saatlik kırımda göstermiştir. %5 pomza tozu ilave edilerek hazırlanan numunelerde kür süresi arttıkça serbest basınç dayanımı artmış ve bir ayın sonunda 560 kPa belirlenmiştir. %10 pomza tozu ilave edilerek hazırlanan numunelerde, kürleme sonunda serbest basınç dayanımında düşüş göstermiştir. Yine de katkısız numune öreceğindeki kadar artamamıştır. Kireç tozunun %5 ve %10 oranda ilave edildiği durumlarda, kür süresinin

artması ile serbest basınç dayanımı yaklaşık 1700 kPa'a kadar artış gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yapılan serbest basınç deneyleri sonuçlarına göre zemin numunesine, kireç ve %5 pomza tozunun katılması basınç dayanımını arttırırken, ağırlıkça %10 pomza ve mermer tozunun tüm karışımlarında serbest basınç dayanımına olumlu bir katkı sağlamadığını görmüşlerdir.

Yılmaz vd. (2018) yaptıkları deneylerde doğal malzeme, uçucu kül ve Bayburt Taşı'nı kullanmıştır. Zemin örneği Bayburt'un Demirözü ilçesinden alınmıştır. Yapılan analizler sonucu zeminin düşük plastisiteli kil (CL) olduğu belirlenmiştir. Yaptıkları literatür araştırması sonucunda uçucu külün ağırlıkça %25 oranında katılmasına karar verilmiştir. Doğal malzemeye uçucu kül ve ağırlıkça %5, 10, 15, 20 oranlarında Bayburt taşı katılarak karışımlar hazırlamışlardır. Deney çalışmasında lazer kırınım yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan karışımların optimum su muhtevası %23.0, likit limiti %48.8, plastik limiti %26.5 maksimum kuru yoğunluk 1.63 Mg/m^3 olarak bulunmuştur. Zeminin tanımlama deneyleri yapıldıktan sonra, serbest basınç deneyine geçilmiştir. Deney numuneleri 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik olarak hazırlanmıştır. Numunelere 7 ve 28 günlük kür işlemi uygulanmıştır. Doğal zeminin basınç dayanımı 7 ve 28 gün için sırası ile 159.42 ve 170.71 kPa belirlenmiştir. Deney sonucunda tüm katkı oranları için serbest basınç mukavemeti artış göstermiştir fakat en iyi sonuç 1280.98 kPa dayanım ile %25 uçucu kül+%10 Bayburt Taşının 28 günlük kür süresiyle belirlenmiştir. Bu orandan fazla Bayburt Taşı kullanımının dayanım değerlerinde düşüşler meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuca bakılarak ince daneli zeminlerde uçucu kül ve Bayburt Taşının birlikte kullanımı ile stabilizasyonun yararlı sonuçlar verebildiği görülmektedir.

Türköz (2006), Çalışmasında aşırı konsolide kil özeliği taşıyan ve "Meşelik kili" olarak tanımlanan zeminin kireç katkısı ile stabilizasyonu araştırmıştır. Yapılan analizler sonucunda zemin örnekleri "yüksek plastisiteli kil (CH) ve silt-kil (CH-MH)" olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışma kapsamında üç farklı bölgeden alınan numune örnekleri üzerinde yapılan tanımlama deneyleri sonucuna göre; likit limit 1. Numune için 56.2, 2. Numune için 62.3, 3. Numune için 70.2 ve plastik limit değerleri sırası ile 30.0 - 29.0 - 28.9 olarak bulunmuştur. Standart Proctor (SP) deneyi ile sıkıştırılan numunelerin enerji seviyesinde dört ayrı katkı yüzdesinde (% 0, 1, 3 ve 5) hazırlanmış numuneler üzerinde serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Her katkı yüzdesinde dört adet numune kullanılmıştır. Aynı işlemler sonra Modifiye Proctor (MP) yeniden gerçekleştirilmiştir. Üçüncü lokasyona ait deneyler farklı üç katkı yüzdesinde (% 0, 2 ve 4) yapılmıştır. Şişme deneyleri standart

ödometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Numuneler önce 7 kPa lık sürsaj yüküne maruz bırakılıp ve suya boğulduktan hemen sonra, farklı zaman aralıklarında serbest şişme değişimi ölçülmüştür. Sıkıştırılmış numunelerin serbest şişme yüzdesi %3 iken, yüksek enerji seviyesinde %8 ile daha yüksek elde edilmiştir. Kireç katkısının etkisi yüksek enerji ile sıkıştırılmış zemin numunelerinde daha yüksek çıkmıştır. Düşük enerjide sıkıştırılan numunelerde ise düşük dozda katkı maddesi kullanımı daha etki olmuştur. Deney sonunda, sönmüş kireç katkısının killerin şişme potansiyelinin kontrolünde başarıyla kullanılabileceği, bu katkının % 3 seviyesinden sonra etkili olduğu gözlemlenmiştir. Kuru yöntemle uygulanan sönmüş kireç katkısının etkisi, kirecin zemin içinde eşit oranda dağılmaması nedeniyle, değişken olmaktadır. Bu durumu kuru yöntemle sönmüş kireç katkısı uygulamasının bir eksikliği olarak değerlendirmiştir.

Yılmaz ve Çelik (2012) yaptıkları çalışmada kil zemine öğütülmüş kum karıştırarak konsolidasyon ve şişme özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Kil numunesini Erzurum'un Oltu yöresinden, 1 m derinlikten alınmıştır. Yapılan USCS sınıflandırmasına göre zeminin CH sınıfı yüksek plastiteli kil olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada ilk önce zeminin geometrik özelliklerini belirlemek için tanımlama deneyleri yapılmıştır. Daha sonra kompaksiyon deneyi ile max kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası belirlenmiş ve bu veriler ışığında konsolidasyon ve şişme özelliklerini belirlemek için ödometre deneyleri yapılmıştır. Kullanılan kile ait XRD analiz sonuçlarına göre hakim kil mineralinin (montmorillonit) olduğu tespit edilmiştir. Likit limiti ve plastik limiti sırası ile %51-%28 bulunmuştur. Kil numunesine de ağırlıkça %10, 20, 30 ve 50 oranlarında öğütülmüş kuvars kumu eklenmiştir ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Konsolidasyon deneyleri 0-50 kPa, 50-100 kPa, 100-200 kPa ve 200-400 kPa yük kademelerinde yapılmış ve daha sonra boşaltma yapılmıştır. Şişme deneyi ise ASTM D 4546-08 Metot C'ye göre yapılmıştır. Saf haldeki kil numunesinin şişme basıncı 32.6 kPa iken %50 kum katılmış kilde bu değer 12 kPa olmuştur. Kum oranı arttıkça şişme basınçlarının düştüğü görülmüştür. Hacimsel sıkışma katsayısı kum oranı arttıkça azalmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kil zemine ağırlıkça %50 öğütülmüş kum katılması sonucunda hacimsel sıkışma katsayısının 2.5 kat azaldığı görülmüştür. Yani oluşacak oturmalar 2.5 kat azalmıştır. Konsolidasyon katsayısının ise 4 kat arttığı belirlenmiştir.

Akbulut vd.'nin (2008) yaptıkları çalışmada yüksek plastisiteli (CH sınıfı) doğal Oltu kilini sedimentasyon ile silt oranı azaltılarak saflaştırılmış kil numuneleri kullanmıştır. Yapılan tanımlama deneyleri sonucunda zemin örneğinin, CH Sınıfı yüksek plastisiteli kil

olduğu ve likit limit, plastik limit sonuçlarının sırası ile %102-35 olduğu belirlenmiştir. Deneylerde kimyasal katkı olarak katyonik bir yüzey aktif madde olan Hexadecyltrimethylammonium bromide kullanılmıştır. Kimyasal katkı oranı ağırlıkça % 0, 5, 8, 9.5, 10, 11 olarak seçilmiştir ve limit deneyleri tekrarlanmıştır. Katkı oranının yaklaşık %6 değerine kadar artmasıyla likit limit değerinin % 50 oranında azalarak %51 olduğu ancak bu yüzdeden sonra likit limit değerinin tekrar artışa geçtiği görülmüştür. Plastik limiti %8 katkı oranında non-plastik bulunmuştur. %8 oranından fazla katılması plastik limit değerlerini arttırmıştır. Katkılı numunelerin düşük plastisiteli silt (MH) sınıfına girdiği görülmüştür.

Genç'in (2009) yaptığı çalışmada kaolin ile %5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında bentonit karıştırılarak şişme potansiyeline sahip numuneler hazırlamıştır. Likit limit, Plastik limit deneyleri yapılmış, Piknometre deneyleri ile karışımların dane birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Yapılan deney sonuçlarına göre en yüksek likit limit değeri %155 ile %30 bentonit+%70 kaolin birleşiminden elde edilmiştir. Plastik limit ise %31 bulunmuştur. Karışımlar Standart proktor deneyine tabi tutulmuş, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Kompaksiyonla elde edilen değişik su muhtevelerinde sıkıştırılan numuneler ile konsolidasyon aletinde serbest şişme deneyleri yapılmış ve numunelerin şişme yüzdeleri hesaplanmıştır. Şişme deneylerinde 1 kPa sürsaj yükleme yapılmıştır. Deney sonucunda en yüksek şişme oranı %30 bentonit + %70 kaolinin %38 su muhtevasında çıktığı gözlemlenmiştir. Aynı yüzdelerin su muhtevası - şişme yüzdesi kıyaslandığında, %38 su muhtevasında numune %31.63 şişerken; %40 su muhtevasında %25.41 şişmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda karışımların likit limit ve plastisite indisi değerlerinin çok yüksek olması karışımların yüksek şişme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Maksimum şişme miktarı bentonit miktarının artmasıyla artmaktadır. Bentonit yüzdesi arttıkça likit limit artmaktadır. Bentonit yüzdesi arttıkça plastik limitte anlamlı bir değişiklik olmamıştır. Şişme yüzdesi su muhtevası değişiminden önemli derecede etkilenmektedir. Şişme yüzdesi su muhtevasının artması ile azaldığını gözlemlenmiştir.

Kazemikhosrowshahi (2014) yaptığı tez çalışmasında kopolimer, homopolimer polipropilen, uçucu kül ve kireç katkısı kullanarak şişen zeminleri stabilize etmeyi amaçlamıştır. Deneyde kullanılan zemin örneği, Canbensan Bentonit Şirketinden temin edilen bentonitin çeşitli oranlarda karıştırılması ile elde edilmiştir. Homopolimer polipropilen katkı maddesi olarak kullanıldığında uzun süre dayanım sağladığı ve dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül Çayırhan termik santralinden ve kireç ise Kimtaş Kireç

Şirketinden temin edilmiştir. Toplamda 1 piknometre deneyi, 3 elek analizi 3 hidrometre analizi, 11 likit limit 8 plastik limit 24 standart proktor ve 20 şişme testi olmak üzere 70 deney yapmıştır. Tüm deneyleri ASTM Standartlarına uygun yapılmıştır. Başlangıçta %420 olan likit limit değerine, ağırlıkça %5-10-15 oranlarında uçucu kül katılmıştır ve en iyi sonuç %200 likit limit değerinin elde edildiği %15 katkı oranında bulunmuştur. Plastisite indisi aynı katkı ile %373 oranından %171'e düşmüştür. Bentonit + %1-3-5-7 kireç karışımlarının sonuçları incelendiğinde en iyi sonuç %7 kireç katkısında görülmüş ve likit limit plastik limit sonuçları sırası ile %165, %33 bulunmuştur. Şişme basıncını belirlemek için ASTM D-4546 Metot C kullanılmıştır. Her karışım için kompaksiyon deneyi yapılmış ve numuneler optimum su muhtevası, maksimum birim hacim ağırlığında sıkıştırılarak deney başlatılmıştır. Başlangıçta saf haldeki bentonitin şişme basıncı 380 kPa bulunmuştur. Bentonite ağırlıkça %0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1 oranlarında kopolimer katkısı eklenmiş ve en iyi sonuç 140 kPa ile %0,7 kopolimer katkısında gözlemlenmiştir. Zemin örneğine yine aynı oranlarda homopolimer polipropilen eklenmiştir. En iyi sonuç 120 kPa şişme basıncı ile %0,7 katkı oranından elde edilmiştir. Ağırlıkça %5-10-15 oranlarında uçucu kül eklenmesi sonucunda en iyi düşüş 329 kPa ile %5 katkı oranında belirlenmiştir. Belirlenen oranlarda kullanılan kireç katkısı ise en iyi sonucu ağırlıkça %3 eklenerek 196 kPa'a kadar düşürmüştür.

Mounika vd (2015) yaptıkları deneysel çalışmada deniz kabuğunu farklı yüzdelerde kullanarak şişme potansiyeli yüksek siyah pamuk kilini stabilize etmeyi amaçlamışlardır. Deney çalışmasında kullanılacak olan zemin numunesi Egupalle şehrinden temin etmişlerdir. Numuneyi IS425 mikron elekten eleyerek kullanmışlardır. Deneyleri IS Hindistan Standardına uygun olarak yapmışlardır. Katkısız zemin numunesine yapılan bazı tanımlama deneylerinin sonuçlarını şu şekilde bulmuşlardır: Likit Limit: %69.05, Plastik Limit: %23.2, Plastik İndis: %45.15, Serbest Şişme İndisi: %88.89, Serbest Basınç Dayanımı: 38.63 KN/m². Katkı olarak kullanılan deniz kabuğunu, öğütüp IS75 mikrondan geçirilerek deney kullanımına hazır hale getmişlerdir. Ağırlıkça %,12 14, 16 ve 18 oranlarında deniz kabuğu zeminle karıştırılarak serbest basınç mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Yapılan deney sonuçlarına göre %16 katkı oranına kadar artış gösteren basınç dayanımı, bu seviyeden sonra düşmeye başlamıştır. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre en iyi sonucu 261 kN/m² ile %16 deniz kabuğu katkısında elde etmişlerdir.

Yaldız'ın (2013), tez çalışmasında Ankara'nın değişik yerlerinden alınan 100 adet zemin örneğini kullanmıştır. Laboratuvarda numaralarına göre istiflenen numuneler sırayla

105±5°C sıcaklık derecesine ayarlanan etüvde 24 saat süreyle kurutulup öğütmüştür. 100 adet numunenin hepsi için kıvam limitleri, 7 kPa altında 24 saat şişmeye bırakılan numunelerin serbest şişme ve şişme basıncı deneyi yapmıştır. Bu değerleri daha sonra regravasyon analizi kullanılarak karşılaştırmıştır. Analizler sonucunda kıvam limitleri ile şişme basıncı arasında yüksek korelasyonlar olduğu, serbest şişme yüzdesinden serbest basıncın %87 oranda doğru tahmin edilebileceği ayrıca basit indisler ile şişme basıncının tayini için yapılan regravasyon analizi sonucunda tahmin edilebilirliğin %77.8 olduğunu belirlemiştir.

Taşçı'nın (2011) yaptığı çalışmada Afyon ilinden alınan ve yüksek şişme potansiyeli gösteren dispersif bir kilin mühendislik özelliklerinin, kireç ve silis dumanı kullanılarak iyileştirilmesini amaçlamıştır. Bu çalışmada malzemenin özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, özgül ağırlık, kıvam limiti, kompaksiyon deneyleri, şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri, dağılma ve iğne deliği deneyleri ve üç eksenli basınç deneylerini uygulamıştır. % 3 kireç ve ağırlıkça %1, 3, 5, 10, 15, 20 oranlarda silis dumanı katılarak hazırlanmış numuneler üzerinde şişme, dispersiyon ve farklı kür sürelerinde dayanım deneyleri yaparak katkının etkisini incelemiştir. Deneyleri yaparken TS1500, TS1900, USBR 5400-89, USBR 5410-89, ASTM D 2850 Standartlarını esas almıştır. Yapılan kıvam limiti deneyleri sonucunda malzemenin katkısız haldeki likit limit ve plastik limitini sırası ile %68, %33 bulmuştur. Malzemeye belirtilen oranlarda silis dumanı eklemiş ve deneyleri tekrar yapmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi düşüş %20 katkı oranında sağlanmıştır. Bu oranda likit limiti %56.5 iken plastik limiti %36 olarak elde etmiştir. Fakat %15 silis dumanı katkısının sonuçları arasında ihmal edilebilir bir düzey olduğundan %15 silis dumanı optimum almıştır. Bu aşamada silis dumanına ek %3 kireç katkısı da eklemek numunenin işlenebilirliğini bitirdiğinden bu deneyler yapılırken kireç katkısı kullanılmamıştır. Katkısız haldeki numunenin şişme basıncını 96.039 kPa olarak elde etmiştir. Bu numuneye ek %3 kireç+ %10 silis dumanı katarak şişme basıncını %95 oranında azaltmış ve 5.657 kPa' a düşürmüştür. Bu nedenle bu oranı yeterli almıştır. 7 kPa sürsaj yükü altında suya boğulan numune %12.22 şişme göstermiştir. Yine aynı şekilde %3 kireç+ %10 silis dumanı katkısı şişmeyi %95 oranında azalttığı için bu oranın ilavesini yeterli bulmuştur.

Çelik (2020) yaptığı çalışmada pomza taşının incelik etkisinin zemin stabilizasyonuna olan etkisini incelemiştir ayrıca pomza taşı, inceltirilmiş pomza ve kireç karışımının zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneylerde kullandığı doğal zemini Bayburt il merkezinden 2 m derinliğe sahip bir çukurdan almıştır. Alınan zemin numunesine

ASTM Standardına uygun şekilde bir dizi tanımlama deneyleri yapmıştır. Bu deneyler sonucunda zeminin CL düşük plastisiteli kil olduğunu belirlemiştir. Doğal zeminin likit limit ve plastik limitini ise sırası ile; %48.88, %26.5 olarak bulmuştur. Ayrıca doğal malzemenin kireç ile karıştırılıp karıştırılamazlığına bakmak için malzemenin organik madde miktarına bakmıştır. Yapılan laboratuvar analizi sonucunda zeminin organik madde miktarı $\%4.8 < \%5$ olduğundan zeminin kireç ile karıştırılabilir sonucunu elde etmiştir. Yapılan serbest basınç deneyi sonucunda doğal haldeki zeminin 7 günlük dayanımı 172.8 kPa iken, 28. günün sonunda 174.6 kPa, 84. günün sonunda ise 17.9 kPa olarak tespit etmiştir. Karışımları, zemin+ %5-10-15-20 oranında ham pomza, zemin + %5-10-15-20 oranında inceltilmiş pomza, zemin + %6 kireç+ %5-10-15-20 oranında ham pomza ve zemin + %6 kireç+ %5-10-15-20 oranında inceltilmiş pomza karışımıyla elde etmiştir. Yapılan serbest basınç deneyi sonucunda zemine kireç katılmasının basınç dayanımını ciddi derecede arttırdığını görmüştür. Karışıma %15 oranına kadar katılan pomza tozunun dayanımı arttırdığı daha fazlasının dayanımı düşürdüğünü gözlemlemiştir. Ham halde katılan pomza tozu inceltilmiş haldekinden daha yüksek dayanım sağlamıştır. En iyi dayanım sonucunu %6 kireç + %15 ham pomza tozundan elde etmiştir. Karışım sonucunda numunenin serbest basınç dayanımını 7, 28, 84 günleri için sırası ile; 696.8, 1118.94, 1985.4 kPa olarak bulmuştur.

Çalık (2012) deneysel doktora çalışmasında, montmorillonit ve nontronit gibi smektit grubu mineraller içeren yüksek plastisiteli killi bir zeminin perlit ve kireç katkılarıyla stabilize etmeyi amaçlamıştır. Çalışma kapsamında kullanılacak zemin örneğini Trabzon İlinin Gürbulak beldesinden temin etmiştir. Laboratuvara getirilen doğal malzeme havada kurutulduktan sonra plastisiteden dolayı topraklar haline gelmiştir. Deneyler için homojen olması açısından tane özelliklerini bozmadan bu topraklar lastik tokmakla ezilerek ufalamıştır. Yapılan tanımlama deneylerinin sonucuna göre doğal malzemenin likit limit ve plastik limit değeri %87.2 ve %28.9 olarak belirlenmiştir. Serbest şişmesi ASTM D 4546'ya (2008) uygun olarak 1 kPa sürsaj yüklemesi altında %7.94, şişme basıncı ASTM D 3877'ye (2008) göre 282 kPa, serbest basınç dayanımı ise 225.5 kPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca XRD analizine göre doğal malzemede baskın olan kil minerallerinin nontronit ve montmorillonit olduğunu gözlemlemiştir. Stabilizasyon çalışması için, %0, 10, 20, 30, 40 ve 50 perlit oranları ile kirecsiz ve %8 (optimum kireç oranı) kireçli karışımlar hazırlamıştır. Kıvam limiti deneyleri için 1, 7, 14 ve 28 günlük kürlenmeler uygulamıştır. Perlit katkısının kullanıldığı numuneler için en iyi sonuçlar perlitin %50 oranında katıldığı ve 1 günlük kürlenme uygulandığı durumda gerçekleşmiştir. Kireç + perlit katkısında ise 7 günden fazla

yapılan kürlenmeler numunenin özelliğini kaybetmesine neden olmuştur. Serbest şişme yüzdesi ve basıncı yine katkısız zeminde olduğu gibi ödometre deney aleti ile yapılmıştır. Şişme yüzdesinin ve şişmenin en iyi sonuçları perlitin %50 oranında katıldığı numunede alınmıştır. Fakat %40 perlit katkısı ile arasındaki değişim ihmal edilebilir düzeyde olduğundan en iyi sonucu kireç + %40 perlit oranında almıştır. Serbest basınç dayanımının en yüksek sonucunu %8 kireç + %30 perlit katkısında 4419.5 kPa olarak hesaplamıştır. Yapılan deneyler sonucunda perlitin %30'dan fazla katılmasının dayanımı düşürdüğünü gözlemlemiştir.

Bisanal ve Badiger (2015) yaptıkları çalışmada deniz kabuğu ile bitüm emülsiyon kullanımının zemin stabilizasyonuna etkisi araştırmıştır. Zemin örneği Belagavi bölgesinin 2 m derinliğinden alınmıştır. Zemini önce hava kurutulup daha sonra IS425 mikron elekten geçirilmişler daha sonra 110C kurularak deneye hazır hale gelmişlerdir. Zemin numunesinin tanımlama deneyleri yapılmıştır. Tüm deneyleri IS standardına uygun hazırlamışlardır. Deney sonuçlarına göre zemin numunesinin likit limit, plastik limit, serbest şişme indisi ve serbest basınç dayanımı sırası ile; %60.60, 20.14 ve 120.6 kPa hesaplanmıştır. Bitüm emülsiyonu hazırlamak için %2 bitüm gaz yağı su ve emülsifer karışımı hazırlamışlardır. Saf zemine ağırlıkça %6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 ve 20 oranlarda deniz kabuğu katılmışlardır. En iyi basınç dayanımını %16 deniz kabuğunun 28 günlük kürlenmesi sonucu elde etmişlerdir. Bu değer 441.03 kPa'dır. Ağırlıkça %6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 ve %8 oranlarında bitüm emülsiyon katkısı eklemişlerdir. IS 2720-1973 Standardına uygun olarak yapılan UCS deneyi sonucu %22 bitüm emülsiyon katkısına kadar basınç dayanımı artmış fakat daha fazla katkı oranlarında azalma görülmüştür. En iyi sonuç 500.31 kPa ile %22 bitüm emülsiyon katkısında elde edilmiştir. Sonuç olarak deney sonuçlarına bakarak deniz kabuğu ve bitüm emülsiyonun birlikte kullanıldığı çalışmalar yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Vinod vd. (2020) yaptıkları deneysel çalışmalarında şişme zeminin deniz kabuğu tozu ve kauçuk tozu ile stabilize etmeyi amaçlamışlardır. Şişen zemin numunesi Hindistan'ın Bannikoppa kasabasından ve 2 m derinlikten alınmıştır. Zemin örneğini IS425 no.lu elekten eleyerek deneye hazır hale getirmişlerdir. Yapılan tanımlama deneyleri sonucuna göre zeminin likit limiti %74.5, plastik limiti %37.57, serbest şişmesi %37 ve serbest basınç dayanımı 158,06 kN/m² bulmuşlardır. Zemin numunesine ağırlıkça %6, 8, 10, 12, 14 oranlarında deniz kabuğu ve %2, 3, 4, 5, 6 oranlarında kauçuk tozu eklemişlerdir. Ayrıca tüm katkı oranlarına ek olarak %12 deniz kabuğu + %2, 3, 4, 5, 6 oranlarında kauçuk tozu

eklenmiştir. Katkılı numunelere yaptıkları serbest basınç deneyleri sonucunda en iyi dayanımı 297.61 kPa ile zemin + %12 deniz kabuğu + 5 kauçuk tozunda elde etmişlerdir.

Demirbaş (2009), çalışmasında Bigadiç zeolitinın şişme potansiyeline etkisini incelemiştir. Balıkesir'in Bigadiç ilçesinde bulunan Etimaden firmasına ait olan Simav ve Tulu madenlerinden bizzat aldığı zeolit (bor yan ürünü) kullanmıştır. Elde edilen zeolit taş formatında olduğu için METÜ İnşaat mühendisliği bölümü malzeme laboratuvarında 40 no.lu elekten geçecek şekilde öğütmüştür. Zemin numunesi olarak laboratuvarında %85 kaolin ve %15 bentoniti karıştırarak kullanmıştır. %5 ile %25 aralığında zeoliti zemin numunesine karıştırarak serbest şişme deneyi yapmıştır. Zeolitin stabilizasyonda etkisini gösterebilmek için çeşitli oranlarda kum ile de kıyaslamıştır. Sonuç olarak likit limit %5 kireç ve %10 zeolit karışımında düşüş göstermiştir. Minimum düşüş ise %5 kum oranında gerçekleştirmiştir. Plastik limit en çok %5 kireç katkısında artmıştır. En düşük artış ise %5 zeolit, %5 kum ve %10 kum katkısında gerçekleşmiştir. Ayrıca zeolit katkısı zemin numunesinin özgül ağırlığını arttırırken, kum ve kireç katkısı özgül ağırlığını azalttığını tespit etmiştir. Serbest şişme oranının düşürmek için en etkili kombinasyon %5 kireç ve %10 zeolit karışımı olmuştur. Ayrıca çalışmasında tüm birleşim oranları için kürlleme yapılmadan, 7 ve 28 günler için kürlleme yaparak şişme yüzdesi ve şişme oranlarına bakmıştır. Bütün kürllemeler için şişme yüzdesi ve şişme oranında düşüş gözlemlemiştir. Maksimum düşüşü ise yüzde 94.8 oranı ile %5 kireç katkısının 28 günlük kürlmesi sonucu gözlemlemiştir. Zeolit katkısı için ise %25 oranında zeolitin 28 gün kürlenmesi, yüzde 76.3 oranı ile maksimum düşüş sağladığını belirtmiştir.

Özkan, (2015) yaptığı çalışmada fosfojips kullanımının zemin örneğinde Atterberg limitleri, şişme potansiyeli ve şişme oranında meydana getirdiği değişimi gözlemlemiştir. Ayrıca fosfojips, yüksek fırın cürufu ve kirecin kürlleme ile şişme potansiyeli ve oranına etkisini incelemiştir. %85 kaolin ve %15 bentonit karıştırarak yapay zemin örneği ile çalışmıştır. Bu çalışmasında kullanılan fosfojips katkısını Bandırma gübre fabrikasında üretilen fosfoalçıdan almıştır. Tüm malzemeleri 50°C'de bir gün boyunca kurutarak çalışmıştır. Çalışmasında %5, 10, 15, 20, 25 oranlarında fosfojips kullanmıştır. Ayrıca çeşitli oranlarda fosfojips + kireç ve fosfojips + yüksek fırın cürufu kullanmıştır. Sonuç olarak en düşük likit limit sonucu %15 fosfojips + %15 öğütölmüş yüksek fırın cürufundan elde etmiştir. Çünkü bu iki madde de plastik olmayan malzemelerdir ve bu da likit limitin düşmesine sebep olmuştur. Plastik limitin en yüksek sonucunu ise %5 fosfojips + %5 kireç katkısında bulmuştur. Plastisite indisi için optimum değeri %15 fosfojips katkısında elde

etmiştir. Fakat en etkili sonucu %15 fosfojips + %15 öğütölmüş yüksek fırın cürufunda elde etmiştir. Şişme potansiyeli %5 %10 ve %15 fosfojips katkısında en iyi düşüş sağlarken, %20 ve %25 oranlarında fosfojips katkısı kullanmak diğer oranlara göre daha az bir düşüş sağlamıştır. Bu nedenle %15 fosfojips katkısı kullanmayı en optimum sonuç olarak seçmiştir.

Dadanlar (2019), yaptığı çalışmada şişen zeminlerin stabilizasyonu için katkı maddesi olarak atık camı kullanmıştır. Çalışmada atık cam tozunu aktive etmek ve jeopolimer oluşumunu desteklemek amacıyla alkali aktivatör olarak kireç (CaO) ve sodyum hidrosit (NaOH) kullanmıştır. Bu sebeple tez çalışmasında atık cam tozunu tercih etmiştir. Tez çalışmasında kullanılan Ankara Kilini; Çankaya ilçesine bağlı Mustafa Kemal Mahallesi, Dumlupınar Bulvarı'ndaki Togo Kuleleri İnşaat alanından, 5-6 m derinlikten örselenmiş örnek olarak almıştır. Atık camı ise kullanılmış soda şişelerinin 50 no.lu elekten geçecek şekilde öğütülmesi ile elde etmiştir. %0, 5, 10, 15, 25, 30 oranlarında cam tozu katkıları ve %15 cam tozu+%5 CaO birleşimini serbest şişme deneyi için hazırlamıştır. Ayrıca %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak için 14 günlük kür koşullarında bekletilen örneklerden alınan parçalar 105 °C'lik etüvde kurutularak 40 no.lu elekten geçirildikten sonra serbest şişme deneyini gerçekleştirmiştir. Deney sonucunda en iyi düşüş sağlayan oran %15 cam tozu + %5 CaO birleşiminden elde etmiştir. Makaslama dayanımı deneyini yapmak için %15 ve %25 oranlarında cam tozu kullanmıştır. %15 oranında cam tozu katkısının zeminin kohezyonunda önemli bir değişiklik göstermediği fakat içsel sürtünme açısında 16.7 derecelik bir artış sağladığını gözlemlemiştir. %25 oranında katkı ile ise kohezyonda düşüş içsel sürtünme açısında ise 12.2 derecelik bir artış elde edilmiştir. Sonuç olarak %25'lik katkıya göre %15'lik katkının daha iyi sonuçlar verdiğini görmüştür. Tek eksenli sıkıştırma dayanımı deneyi için 14 gün kürleme yapmıştır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek dayanımını %15 cam tozu +%5 CaO birleşiminden elde etmiştir. Yapılan diğer deneysel çalışmalar sonucunda da en iyi birleşimin %15 cam tozu +55 CaO birleşiminden elde edildiğini saptamıştır.

Kalkan vd. (2020) yaptıkları çalışmada kuvarsitin sıkıştırılmış killi torağın şişme davranışına etkisini araştırmıştır. Zemin numunesini Erzurum'un Oltu ilçesinde bulunan Oligans havza yataklarından temin etmiştir. Kuvarsit taşını ise Bayburt ilinin Demirözü ilçesinden temin etmiştir. %3, 5, 7 ve 10 oranlarında kuvarsit katkısı kompaksiyon sonucu hesaplanan optimum su muhtevasında zemin numunesi ile homojen karıştırmışlardır. Bütün deneyleri optimum su muhtevasında yapmışlardır. Bu tez çalışmasında likit limit, plastik

limit, şişme yüzdesi, şişme basıncı ve şişme potansiyeli deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre kuvarsit katkısı limit deneyleri sonuçlarında olumlu katkı sağlayarak kil numunesini yüksek plastisiteli zemin gurubundan (CH), düşük plastisiteli guruba (MH) taşımıştır. Yapılan deneyler sonucunda kuvarsit katkısından sonra zeminin şişme basıncında da olumlu derecede azalma görülmüştür ve %15 kuvarsit katkısından sonra şişme basıncı 250 kPa'dan 45 kPa kadar düşmüştür. Aynı şekilde kuvarsit katkısı şişme potansiyelini de olumlu yönde etkileyerek şişme potansiyelini %15 kuvarsit katkısı ile en son %53 değerinden %6 değerine kadar düşürmüştür.

Öztürk vd. (2015) yaptıkları çalışmada Ankara'nın Gölbaşı ilçesinden aldıkları örselenmiş ve örselenmemiş şişen zemin numunesinin şişme potansiyelini ve kireç katkısı ile stabilizasyonunu incelemişlerdir. Kepçe ile açılan 19 araştırma çukurlarının içerisinde seçilen on adet çukurdan 86 mm çapında hem örselenmiş hem örselenmemiş örnek, dört tanesinden ise örselenmiş zemin numunesi almışlardır. Üç zemin numunesinin XRD sonuçlarına göre içerisinde şişme özelliği gösteren monmorillonit kil içerdiğini tespit etmişlerdir. Alınan numuneler çoğunlukla USCS göre CH sınıfı (yüksek plastisiteli kil) olarak tespit edilmiştir. İnceleme alanından alınan numunelere ASTM D-4546 Metot A standartına uygun ödometre deneyi uygulamışlardır. Yapılan ödometre deneyi sonuçlarına göre CH sınıfı zeminlerin ortalama şişme yüzdesi 6.7 iken, ortalama şişme basıncı ise 128 kPa çıkmıştır. Bu çalışmada şişme özelliği gösteren CH sınıfı killere, ağırlıkça %1, 3, 5, 7 ve 9 oranlarında sönmüş kireç katkısı katılmıştır. Her karışım oranı ve katkısız karışımlar için TS 1900-1 standartına uygun olarak standart Proctor deneyi yaparak max kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriğini belirlemişlerdir. Bu veriler ışığında 1 kPa sürsaj yükü altında ödometre deneyleri gerçekleştirilmiş. Sonuç olarak ağırlıkça %5 kireç katkısında şişme yüzdesinin yaklaşık %91 ve şişme basıncının yaklaşık % 73 oranlarında azaldığını tespit etmişlerdir.

Perihar vd. (2019) yaptıkları çalışmada kireçli deri atık külü kullanarak şişen zeminlerin özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu katkı malzemesi plastisite indisinin düşmesine ve zeminin şişme özelliğinin azalmasına sebep olmuştur. Kireçli deri atığını yaklaşık 1000 °C kadar yakıp atık formuna gelene kadar kendi ısısı ve açık oksit koşullar altında yanmaya bırakarak elde etmiştir. Çalışmada kullanılan zemin örneğini Hindistan'ın Madhya Pradesh eyaletinde bulunan siyah-gri formda kilden almıştır. IS Hint standartına göre zeminin MH (yüksek plastisiteli kil) olduğunu tespit etmiştir. Yapılan XRD ve SEM analizlerine göre zeminin kaolin ve yüksek oranda montmorillonit olduğu

görülmüştür. Çalışmalarında limit deneyleri, kompaksiyon parametleri, UCS ve CBR deneyleri ile serbest şişme deneyleri yapmışlardır. Ağırlıkça %2, 4, 6, 8, 10 oranlarında katkı maddesi katılıp aynı deneyler tekrarlanmıştır. Sonuç olarak tüm oranlardaki katkı maddelerinin likit limit değerinde artış sağladığını tespit etmişlerdir. En büyük artış ise %70 den %80 lere ulaştıran %2 katkı oranında gerçekleşmiştir. Plastik limit değeri için yaklaşık %42 değerinden %67 değerine çıkaran %6 katkı oranında en yüksek artış gerçekleşmiştir. Plastisite indisi %2 katkı oranında artış gösterirken diğer tüm yüzdelerde azalma göstermiştir. En iyi sonucu ise %30 değerinde yaklaşık %9 değerine düşüren %6 katkı oranında sağlanmıştır. Serbest basınç deneyi için 4, 7 ve 28 günlük kürlemeler de ekstra yapılmıştır. Başlangıçta 113 kN/m^2 olan basınç dayanımı 28 günlük kür ve %10 katkı oranında 432 kN/m^2 olarak en iyi sonucu vermiştir. Başlangıçta 16.81 mm olan serbest şişme, en iyi sonucu %8 katkısı ile sağlamıştır ve sonuçta 4.96 mm olmuştur. Şişme basıncını belirlemek için ise kompansiyon verilerinden elde edilen optimum su muhtevasında sıkıştırılmış zemin numunesi 5 kPa oturma basıncı altında başlatmışlardır. Katkısız halde 4.2 kg/cm^2 şişme basıncı olan zemin numunesi en iyi sonucu yine %8 katkı oranında sağlamıştır ve şişme basıncını 0.6 kg/cm^2 'e düşürmüştür. Sonuç olarak optimum kireçli deri atık külü oranının %6-8 arasında olduğunu önermişlerdir.

Indiramma vd. (2020) çalışmalarında stabilizasyon için sıkça tercih edilen katkılardan olan uçucu kül ve kireç maddesi kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan zemin numunesi Hindistan'ın Andhra Eyaletinde bulunan Kotala kasabasından, 0.5-2.5 m derinliklerinden alınmıştır. Yapılan hidrometre analizleri sonucu %70 oranında kil içerdiği ve IS sınıflandırmasına göre CH sınıfı zemin olduğunu belirlemişlerdir. Deney süresi iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada %4 ve %8 oranlarında karıştırılmıştır. İkinci aşamada ise %10 uçucu kül + %4 kireç ve %10 uçucu kül + %8 kireç zemin numunesine katılarak deneyler yapılmıştır. Çalışmalarında likit limit, plastik limit, kompaksiyon, serbest şişme ve serbest basınç deneylerini IS Hindistan Standardına uygun olarak yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre; likit limit değeri başlangıçta %56 iken %8 kireç katkısında %38 değerine düşmüştür. %10 uçucu kül + %8 kireç katkısı ile %36'a düşmüştür. Plastik indis ise aynı oranda yalın kireç katkısında %38'den %20'e, aynı oranda uçucu kül ve kireç birleşiminde ise %18'e düşmüştür. Serbest şişme indisi %142 iken %8 kireç katkısında %72'e, %10 uçucu kül + %8 kireç katkısında %70'e düşürülmüştür. Serbest basınç dayanımı katkısız zeminde 28 kN/m^2 olurken, %8 kireç katkısında 75 kN/m^2 , %10 uçucu kül + %8 kireç katkısında ise 45 kN/m^2 dayanımına ulaşmıştır. En iyi sonucu %10 uçucu kül + %8 kireç yüzdesinde elde

etmişlerdir. Fakat %8 kireç katkısı sonuçları ile kıyaslandığında, önemli ölçüde bir değişim görülmediğinden ekonomik olması açısından %8 kireç katkısını optimum olarak almışlardır.

Patel ve Mishra (2017) yaptıkları çalışmada deniz kabuğu tozu kullanarak alt yapı toprağını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Tez çalışmasında katkılı ve katkısız zeminin basit index parametreleri belirlenmiştir. CBR testi yapılmış ve bu veriler ışığında esnek kaldırım dizaynı yapılmıştır. Kalite ve işleyişten taviz verilmeden maliyet tasarrufu analizi yapmışlardır. Çalışmada kullanılan zemin örneğini Valsad şehri yakınlarından 2 m derinlikten almışlardır. Yapılan deney sonuçlarına göre katkısız zemin örneğinin sonuçlarını: Likit limit %41.75, plastik limit %25.28, plastisite indisi %16.67, serbest şişme indisi %60, optimum su içeriği %17.70, serbest basınç dayanımı 51.66 kPa, CBR %2.38 olarak bulmuşlardır.

Çalışmalarında zemine ağırlıkça %12 -15-18 oranlarında deniz kabuğu katmışlardır. Deneyler IS Hindistan Standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi serbest basınç mukavemetini %15 katkı malzemesinde elde etmiş ve 71.27 kPa olarak bulmuşlardır. CBR sonucuna göre en iyi sonucu yine %6.89 ile %15 katkısında elde etmişlerdir. Alt yapı toprağına %15 deniz kabuğu katkısı olumlu sonuç verdiğini saptamışlardır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

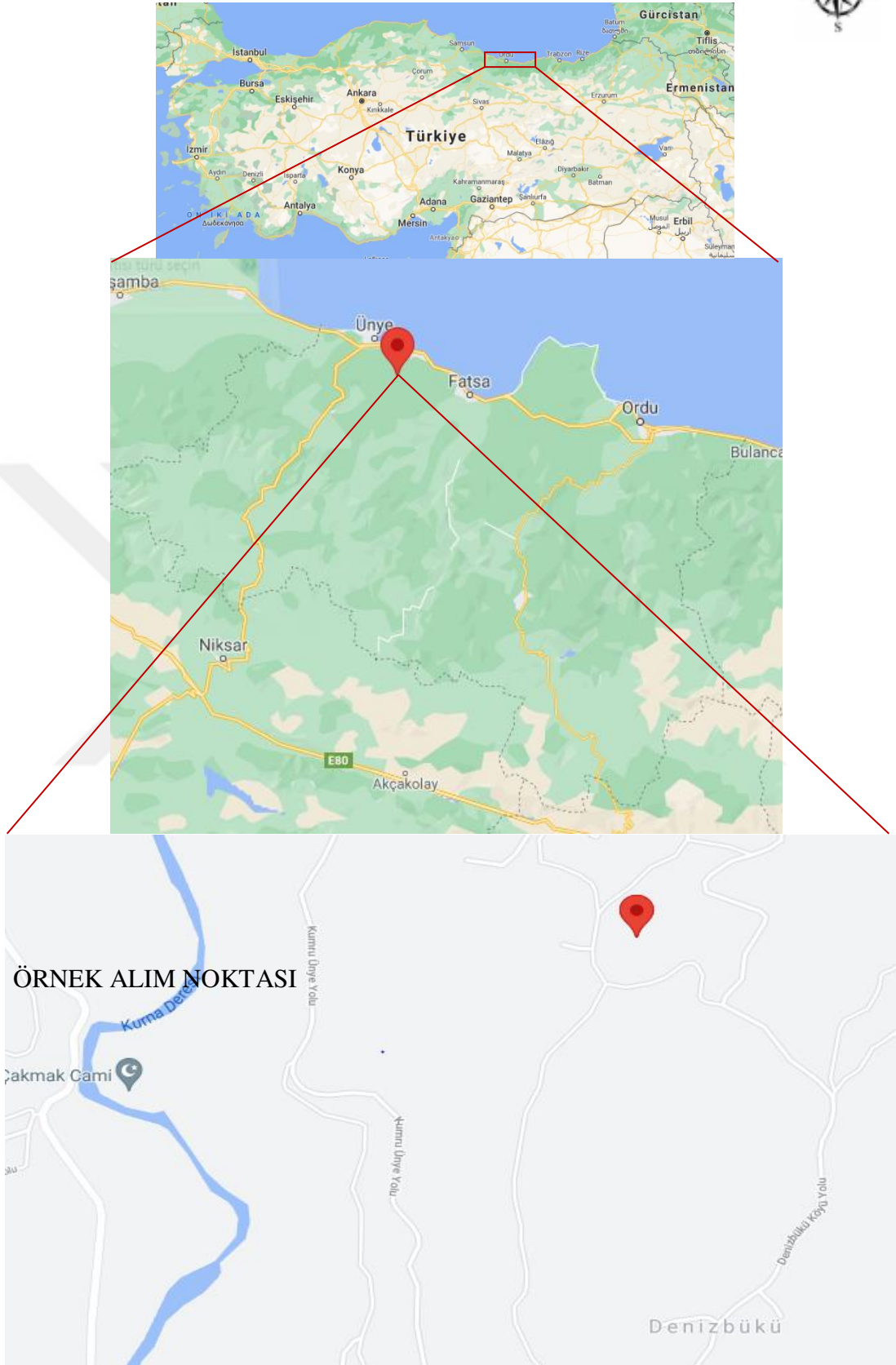
Geçmişten günümüze kadar problemli zeminlere gerek kimyasal gerek doğal katkı maddeleri ilave edilerek zeminde oluşan iyileşmeler araştırılmıştır. İlk çalışmalarda bitkisel katkı maddeleri kullanılırken günümüzde daha çok kimyasal katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında ise şişme potansiyeli yüksek doğal zeminin, çeşitli katkılarla stabilize edilmesi amaçlanmış ve katkı malzemeleri olarak farklı oranlarda deniz kabuğu, kireç ve zeolit kullanılmıştır.

2.1. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Kullanılan katkıların (deniz kabuğu, kireç ve zeolit) doğal malzemenin şişme potansiyeli, dayanım ve kompaksiyon parametreleri özellikleri üzerinde meydana getireceği değişimler ASTM standartları referans alınarak araştırılmıştır.

2.1.1. Doğal Zemin Numunesi

Tez çalışmasında kullanılan zemin numunesi, Ordu'nun Ünye ilçesine bağlı Denizbükü Mahallesi yazlak mevki bölgesinden 1.5 m derinlikten örselenmiş örnek olarak alınarak, (Şekil 19 ve Şekil 20) Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarına getirilmiştir. Laboratuvara getirilen zemin numuneleri öncelikle havada kurumaya bırakılmış ve daha sonrasında uygulanacak deneylerin koşullarına göre etüvde kurutularak kullanılmıştır. Çalışma alanına yakın yerlerde yapılan jeolojik formasyonlar sonucuna göre bölgede, fosilli gri renkli çakıllı kum, oksite ince kumlu silt bulunup zeminin genel olarak içerdiği kil tipi ise sırası ile Smektit/İllit/Kaolen/Klorit/Halloysit/Dikit bulunmuştur (Kalecik, 2019).



Şekil 19. Zemin numunesinin alındığı alana ait yer bulduru haritası



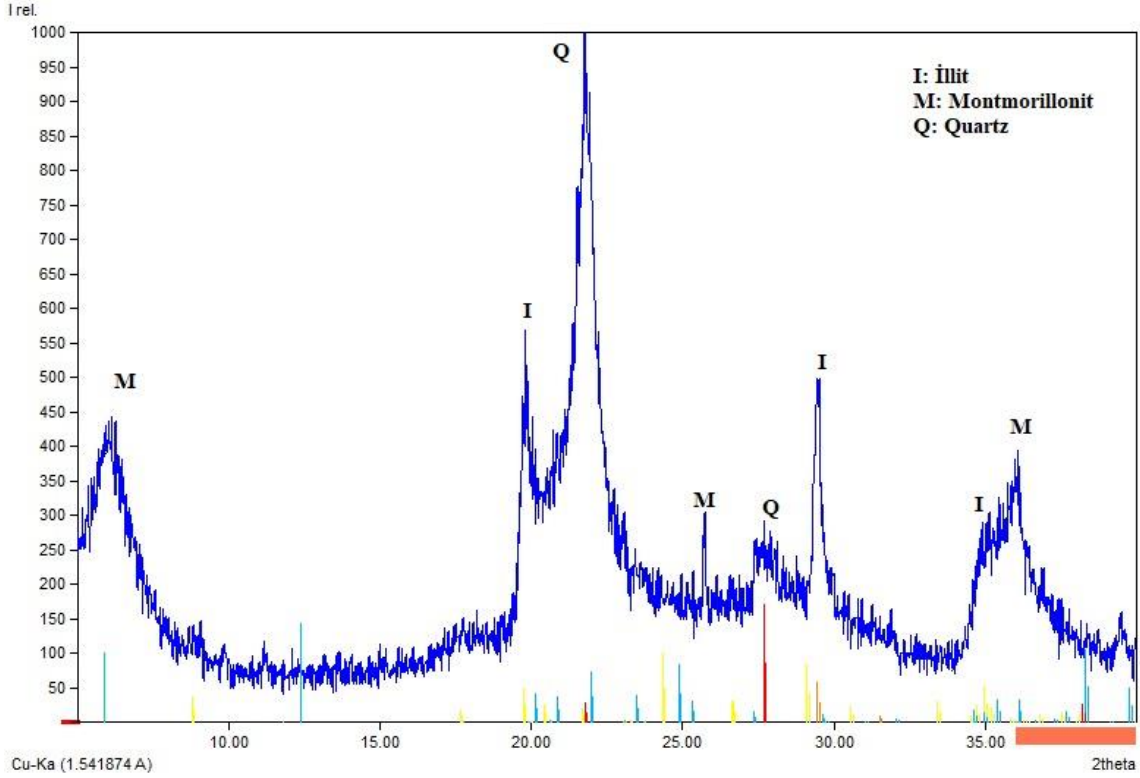
Şekil 20. Zemin numunesinin alındığı saha görüntüsü

2.1.1.1. Mineralojik Özellikler

Zeminlerin yüksek şişme potansiyeline sahip olmasında, içerisinde bulunan minerolojik yapının önemli ölçüde etkisinin olduğundan bahsedilmiştir. Bu çalışmada killerin minerolojik tanımını yapmak için X ışını kırınımı analizi ve diferansiyel termal analiz yapılmıştır.

2.1.1.1.1. XRD Analizi

Bu analizde 200 no.lu elekten elenmiş zemin numunesi cam plakalar arasında, X ışınları gönderen sabit bir kaynağın yuvasına yerleştirilmiştir. Numune sabit bir hızla döndürülürken herhangi bir atoma hangi açıyla çarptığı raporlanmıştır. Zemin numunesinin X-ışını kırınım deseni (difraktogram), Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Laboratuvarında ASTM D 934'e (2013) göre gerçekleştirilmiştir. $2\theta = 5^\circ\text{-}40^\circ$ aralığında sürekli tarama modunda gerçekleştirilen analiz sonucuna göre zemin numunesinin ana kil mineralinin “montmorillonit” olduğu, diğer içeriklerinin ise illit ve karışık kil minerali olduğu tespit edilmiştir (Şekil 21).

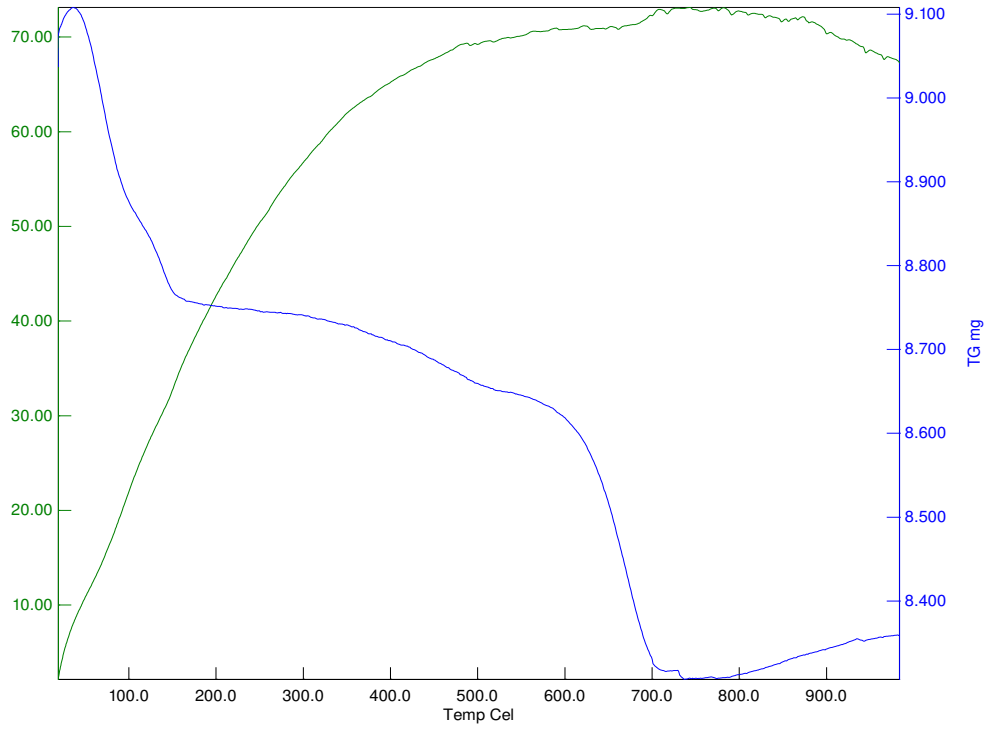


Şekil 21. Doğal zemin numunesinin X ışını kırınımı analiz sonucu

2.1.1.1.2. DTA Analizi

Doğal zemin numunesinin minerolojik yapısını belirlemek için yapılan bir diğer analiz diferansiyel termal analizdir. Bu analiz, sıcaklık etkisi ile karakteristik değişimler gösteren maddelerin kontrolünde kullanılmaktadır. DTA analizinde incelenecek olan malzeme ile su içermeyen inert bir malzemenin aynı sıcaklık altında birbirlerine göre sıcaklık farkları incelenmektedir. İncelenen malzemede kimyasal bir tepkime, faz değişimi gibi olaylardan meydana gelen sıcaklık farkının oluşmasıyla çizilen eğride pikler oluşmaktadır ve ısıl cetvel kullanılarak mineralin cinsi tespit edilmektedir.

Bu analiz için öğütülerek toz haline getirilen zemin numunesi, platin termokalıplar üzerine yerleştirilerek 1000°C'ye kadar ısıtılmıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Laboratuvarında yapılan analiz sonucuna göre doğal zemin numunesinin ana kil mineralinin “montmorillonit” olduğu, diğer içeriklerin ise illit ve karışık kil minerali olduğu tespit edilmiştir. Deney sonunda elde edilen sonuçlar Şekil 22’de verilmektedir.



Şekil 22. Doğal zemin numunesinin DTA analiz sonucu

2.1.1.2. Zeminin Sınıflandırılması

Doğal malzemenin tane dağılımı eğrisini çizebilmek amacıyla iri taneli kısmına yıkamalı elek analizi, ince taneli kısmına ise hidrometre deneyi ASTM D422 (2007) standartına uygun olarak yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre zeminin granülometri eğrisi çizilmiştir. Tablo 7’de gösterilen elek analizi sonuçlarına göre toplam zeminin %73.44’ü 200 no.lu elekten geçmiştir.

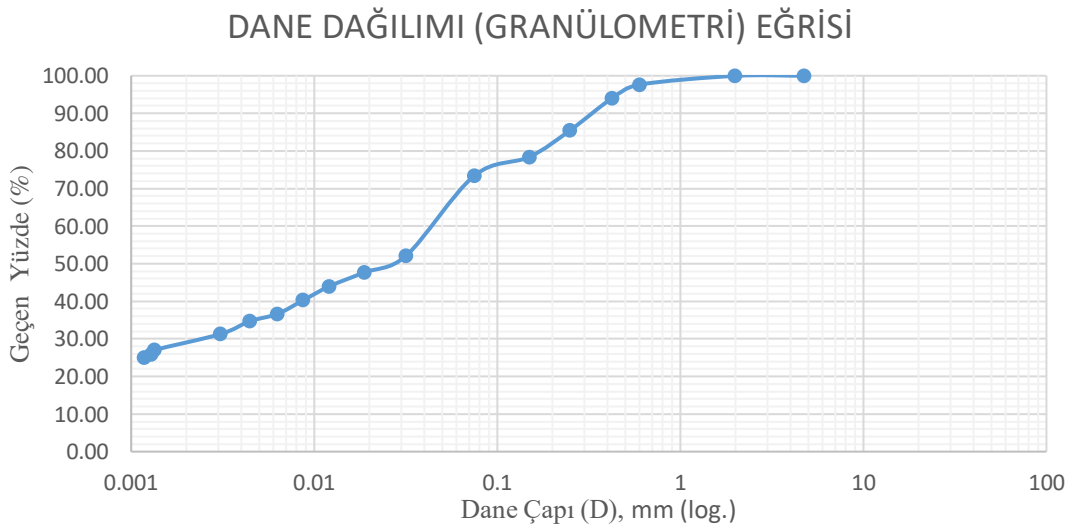
İçinde %73.44 oranında ince dane bulunduran zeminin sınıflandırılması için, hidrometre deneyi yapılarak ince dane dağılımı belirlenmiştir.

Hidrometre deneyi için 200 no.lu elek altına geçen zeminden 50 gr alınarak, sodyumhegzametafosfat (NaPO_3)₆ çözeltisinde 1 gün bekletilmiştir. Çözelti içinde birbirinden ayrılan kil, hidrometre deneyine tabi tutulmuştur ve 72 saat boyunca hidrometre okumaları alınmıştır. Hidrometre deneyi sonucunda ince danelerin dane boyutları belirlenmiş ve Tablo 8’ de gösterilmiştir.

Tablo 7. Doğal zemin numunesinin elek analizi

Elek Çapı (mm)	Elek Ağırlığı (g)	Elek+ Zemin Ağırlığı (g)	Elek Üstü Kalan (g)	Kümülatif Elek Üstü Kalan Toplam Ağırlık (g)	Geçen Ağırlık (g)	Geçen Yüzde (%)
4.75	438.5	438.5	0	0	1000	100.00
2	395.7	395.9	0.2	0.2	999.8	99.98
0.6	312	335.4	23.4	23.6	976.4	97.64
0.425	294.1	329.7	35.6	59.2	940.8	94.08
0.25	281.4	367.3	85.9	145.1	854.9	85.49
0.15	265.9	336.6	70.7	215.8	784.2	78.42
0.075	255.9	305.7	49.8	265.6	734.4	73.44
Tava	356.7	372.9	16.2	281.8	-	

Zeminin elek analizi ve hidrometre sonuçlarına göre granülometri eğrisi belirlenmiş ve Şekil 23’de gösterilmiştir. Dane çapı sınıflandırma sistemine (MIT) göre zeminin, %0.02’si çakıl, %31.98’i kum, %39’u silt ve %29’u kil olarak belirlenmiştir (Tablo 9).



Şekil 23. Doğal zeminin dane dağılımı eğrisi

Tablo 8. Doğal zemin numunesinin Hidrometre Deneyi Analizi

Sıfır Düzeltmesi				1	Numune Ağırlığı, (gr)		50	200 No.lu Elekten Geçen Yüzde (%)		73.44
Menisküs Düzeltmesi				1	Gs		2.625	Hidrometre Numarası		152h
Sıcaklık	Zaman (Dk)	Gerçek Okuma	Rm	L	K	D (mm)	A	Rc	P	Pa
17	2	39	40	9.9	0.0142	0.03177	1.005	38.625	78	57.02
17	6	36	37	10.4	0.0142	0.01880	1.005	35.625	72	52.59
17	15	33.5	34.5	10.8	0.0142	0.01212	1.005	33.125	67	48.90
17	30	31	32	11.2	0.0142	0.00873	1.005	30.625	62	45.21
17	60	28.5	29.5	11.6	0.0142	0.00628	1.005	28.125	57	41.52
18	120	27	28	11.9	0.0141	0.00444	1.005	26.625	54	39.30
19	250	24.5	25.5	12.3	0.0139	0.00309	1.005	24.125	48	35.61
17	1440	22	23	12.7	0.0142	0.00134	1.005	21.625	43	31.92
18	1546	21	22	12.9	0.0141	0.00129	1.005	20.625	41	30.45
18	1860	20.5	21.5	12.9	0.0141	0.00118	1.005	20.125	40	29.71
18	2880	20	21	13	0.0141	0.00095	1.005	19.625	39	28.97
19	3120	19	20	13.2	0.0139	0.00091	1.005	18.625	37	27.49
18	3300	18.5	19.5	13.2	0.0141	0.00089	1.005	18.125	36	26.76
17	4320	18.5	19.5	13.2	0.0142	0.00079	1.005	18.125	36	26.76

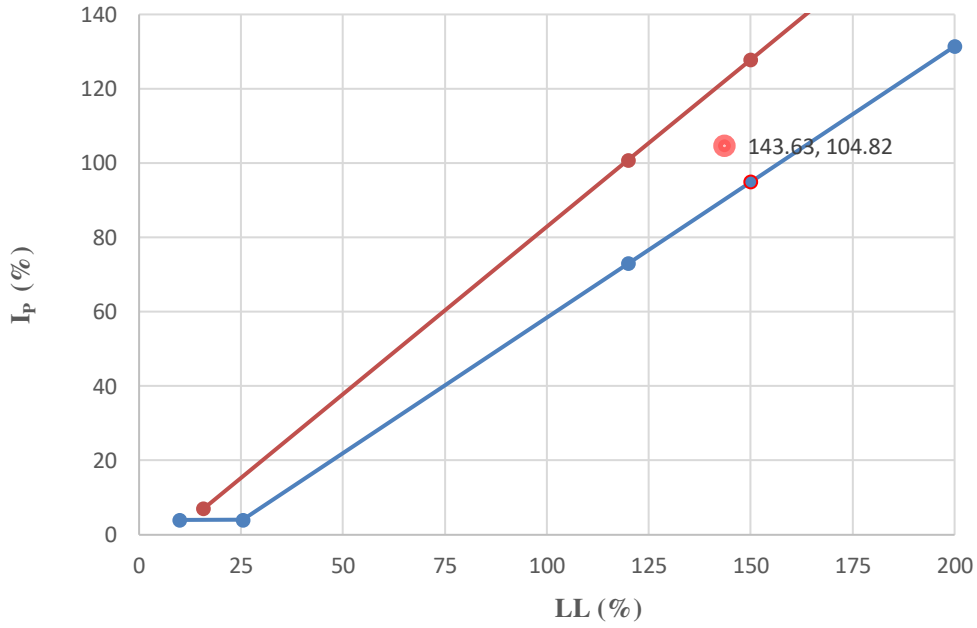
Tablo 9. MIT sınıflandırma sistemlerine göre zeminin dağılım yüzdesi

Sınıflandırma Sistemi	Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)
MIT	0.02	31.98	39	29

MIT sınıflandırma sistemi kıvam limitlerinden bağımsız sınıflandırma yapmaktadır. Buna karşın kıvam limitleri zeminin mühendislik özellikleri üzerinde oldukça etkin olduğundan bu sınıflandırmanın kullanılması tercih edilmemektedir.

Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sisteminde (USCS) zeminler iki harf kullanılarak isimlendirilmektedir. İnce taneli zeminler likit limit ve plastik limit değerlerine göre

Casagrande tarafından önerilen plastisite kartına göre isimlendirilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan doğal zemin numunesinin USCS sınıflandırma sistemine göre CH sınıfı (yüksek plastisiteli inorganik killeri) zemin olduğu belirlenmiştir (Şekil 24). Bir diğer sınıflandırma sistemi olan Amerikan Karayolları sınıflandırma (AASHTO) sistemine göre ise doğal zeminin kıvam limitleri ve dane çapı dağılımı sonuçlarına göre A-7-5 sınıfına dahil olduğu belirlenmiştir.



Şekil 24. Doğal zemin numunesinin birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre plastisite kartındaki yeri

2.1.1.3. Temel Fiziksel Özellikler

Zeminin minerolojik yapısı şişme; şişme potansiyeli, plastisite, dayanım, sıkışma, geçirimsizlik gibi özellikler üzerinde etkin olmaktadır. Fakat mineralojik yapı zeminin fiziksel özellikleri üzerinde doğrudan etkin değildir. Bu nedenle zeminin fiziksel özelliklerini belirlemek için temel zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır.

Zeminin fiziksel özelliklerini belirlemek için silindirik numune alıcı ile alınan zemin örneğinin doğal yoğunluğu ASTM D7263 (2021) standartına göre hesaplanmıştır. Sahadan alınan zemin numunesinin doğal su muhtevası ASTM D2216 (2019) standartına, piknometre

deneyi ile elde edilen özgül ağırlık değeri ise ASTM D 854 (2014) standartına uygun olarak yapılmıştır. Zeminin temel fiziksel özellikleri Tablo 10'da verilmektedir.

Tablo 10. Doğal zemin örneğinin fiziksel özellikleri

Doğal Su Muhtevası (W_n; %)	34
Doğal Yoğunluk (ρ_n; g/cm³)	1.70
Özgül Ağırlık (G_s)	2.625

2.1.1.4. Kıvam Limitleri

ASTM D4318 (2017) standartına uygun olarak yürütülen kıvam limitleri deneyinde, örselenmiş olarak alınan ve 40 no.lu elekten geçen yaklaşık 200 g etüv kurusu zemin numuneleri bir gün süreyle küre bırakıldıktan sonra likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Likit limit deneyi Casagrande deney aleti kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçlarında hesaplanan su muhtevalarına göre zeminin likit limiti %143.63, plastik limiti %38.81 ve plastisite indisi ise %104.82 olarak bulunmuştur (Tablo 11).

Tablo 11. Zeminin Likit Limit, Plastik Limit ve Plastisite İndisi

Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, I_p (%)
143.63	38.81	104.82

2.1.1.5. Organik Madde Tayini ve Aktivite

Organik madde içeren zeminlerin rengi ve kokusunun belirleyici olmasının yanında havada kurutulmuş ve etüvde kurutulmuş şekilde hazırlanmış iki numunenin likit limit deney sonuçlarının karşılaştırmasının yapılması yoluna da başvurulmaktadır. Etüvde kurutulmuş

zeminin likit limit değerinin, havada kurutulmuş zeminin likit limit değerine oranının 0.75 sınır değerinden yüksek veya küçük olmasına göre zemin inorganik veya organik olarak nitelendirilmektedir (Coduto, 2006). Zeminin organik olması mühendislik özellikleri açısından istenmeyen durumdur. Çalışma kapsamında kullanılan zeminin organik madde tayini denklem 6'da verildiği gibi hesaplanmış olup bulunan sonuca göre zeminin organik olmadığına karar verilmiştir.

$$\frac{LL(etüvkurusu)}{LL(havakurusu)} = \frac{143.63}{152.36} = 0.94 \geq 0.75 \quad (6)$$

Aktivite, kilin su ile etkileşiminin ne ölçüde olduğuyla alakalı bir kavram olup zeminin aktivitesinin şişme özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir kriter olduğu Bölüm 1.4.3.3'de bahsedilmiştir. Doğal zemin numunesinin aktivitesi, plastisite indisi ve kil içeriğine bağlı olarak denklem 7'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Ac = \frac{104.82}{29} = 3.61 \quad (7)$$

Tablo 6'da özetlendiği gibi 3.61 kil aktivitesine sahip doğal zemin numunesi, aktif killer grubunda olup kimyasal yapısındaki Smektit grubu kil mineralleri ile şişme potansiyeline sahip olduğu kabul edilebilmektedir.

2.1.1.6. Geçirimlilik Özellikleri

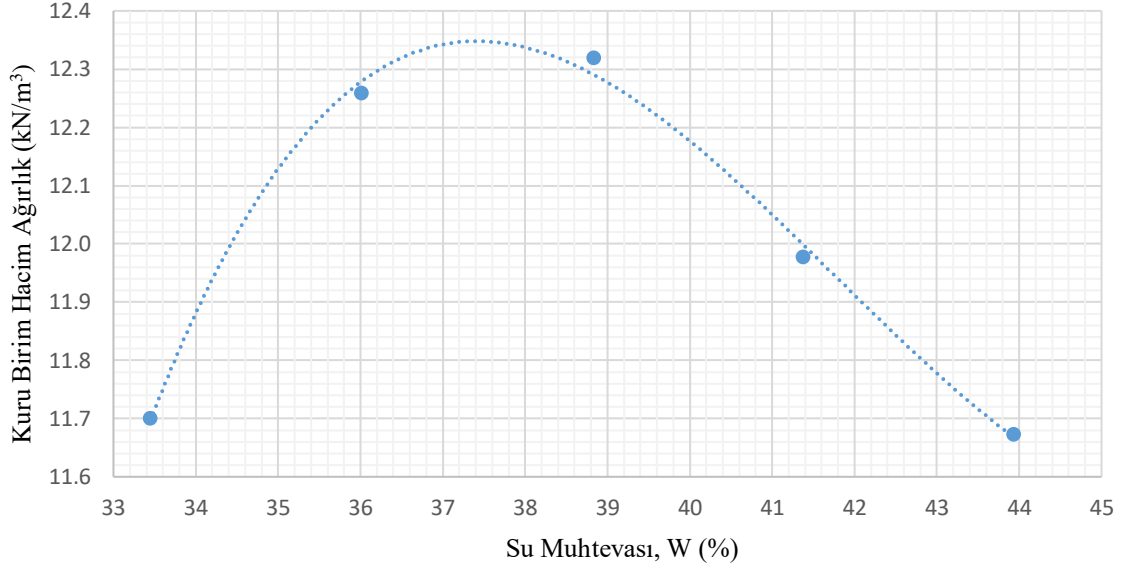
Zemin ortamı boşluklu bir yapı olup, bu boşluklarda su bulunabilmektedir. Bu su hareketsiz durumda olabileceği gibi zemin boşluklarında hareket de edebilmektedir. Zeminin geçirimsizliği ise su akımının mevcudiyetinin bir göstergesi olmaktadır. Kil ve siltli zeminlerin geçirimsizliği oldukça düşükken çakıl ve kumlu zeminlerin geçirimsizliği yüksektir. Optimum su içeriğinde sıkıştırılan numune üzerinde yapılan düşen seviyeli permeabilite deney sonucuna göre zemin numunesinin geçirimsizlik katsayısı $7.5 \times 10^{-9} \text{ cm/sn}$ olarak bulunmuştur (Şekil 25). Casagrande (1938) tarafından yapılan geçirimsizlik çizelgesine göre bu değer CH sınıfı zeminlere ait ve geçirimsiz olarak kabul edilmektedir.



Şekil 25. Düşen seviyeli geçirimsizlik deneyi

2.1.1.7. Kompaksiyon Özellikleri

Araziden alınan zemin örneğinin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerini belirlemek için Standart Proktor Deneyi ASTM D698 (2012) standartına uygun olarak yapılmıştır. Havada kurutulmaya bırakılan zemin numunesine yaklaşık %20 su içeriği katılarak başlanıp, her seferinde yaklaşık %3 artırılarak devam edilmiştir. Bu deneyden elde edilen veriler kullanılarak Şekil 26'da gösterilen kompaksiyon eğrisi çizilmiş ve maksimum kuru birim hacim ağırlık 12.3 kN/m^3 , optimum su muhtevası ise %37.4 olarak bulunmuştur.

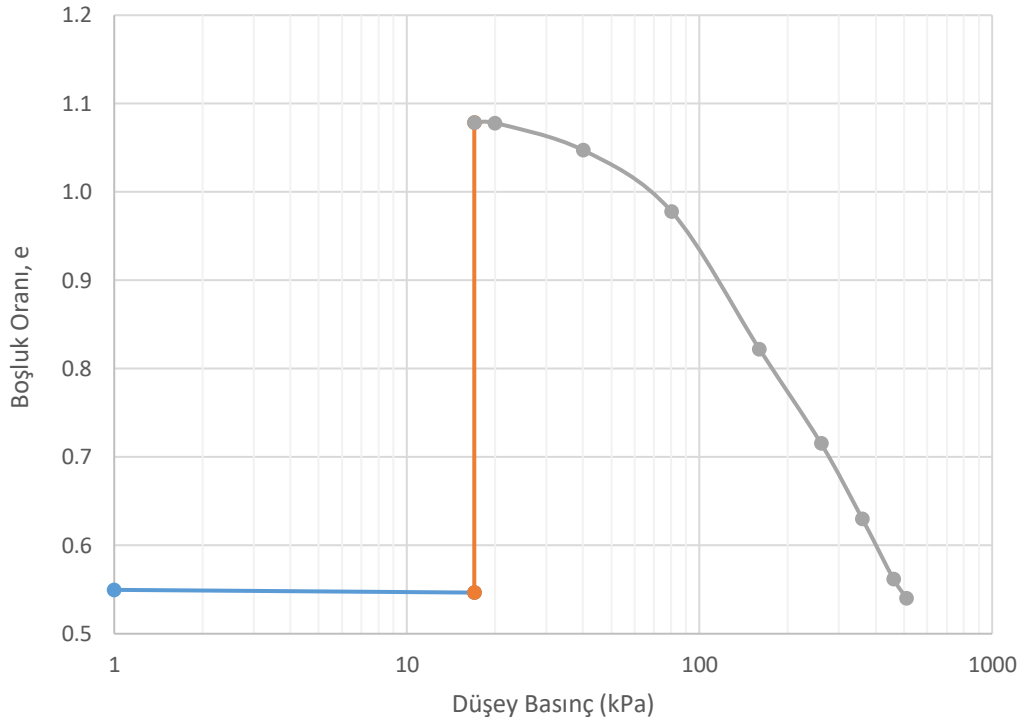


Şekil 26. Doğal zemin örneğine ait kompaksiyon eğrisi

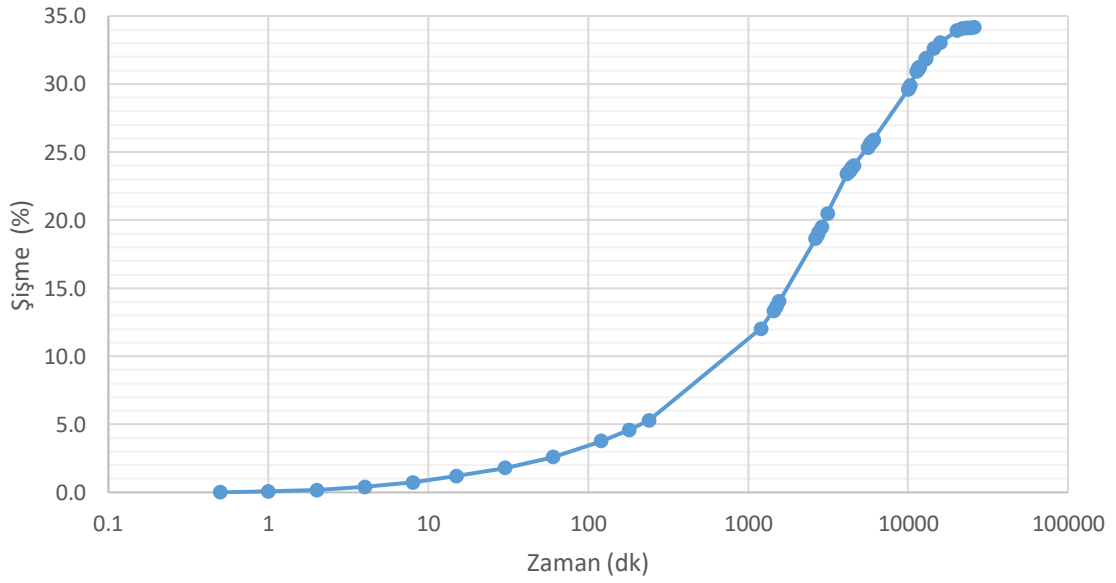
2.1.1.8. Şişme Özellikleri

Çalışmada şişme özellikleri, ASTM D4546 (2021) standardı Metot C'ye uygun olarak belirlenmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numune bir günlük kür süresinden sonra klasik ödometre aletinde 17 kPa'lık sürsaj yük altında şişmeye bırakılmıştır. Deney süresince okumalar alınarak kaydedilmiştir. Şişme tamamlandıktan sonra her basıncın sabit tutulduğu 5, 10, 15, 20, 40, 80... kPa'lık düşey basınçlar, numune başlangıç yükseklik değerine ulaşıncaya kadar uygulanmış ve numunenin başlangıç yüksekliğine geri dönmesini sağlayan basınç, şişme basıncı olarak kaydedilmiştir. Bu deney sonucunda katkısız numunenin şişme yüzdesi %34.15, şişme basıncı ise 480 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 27 ve 28).

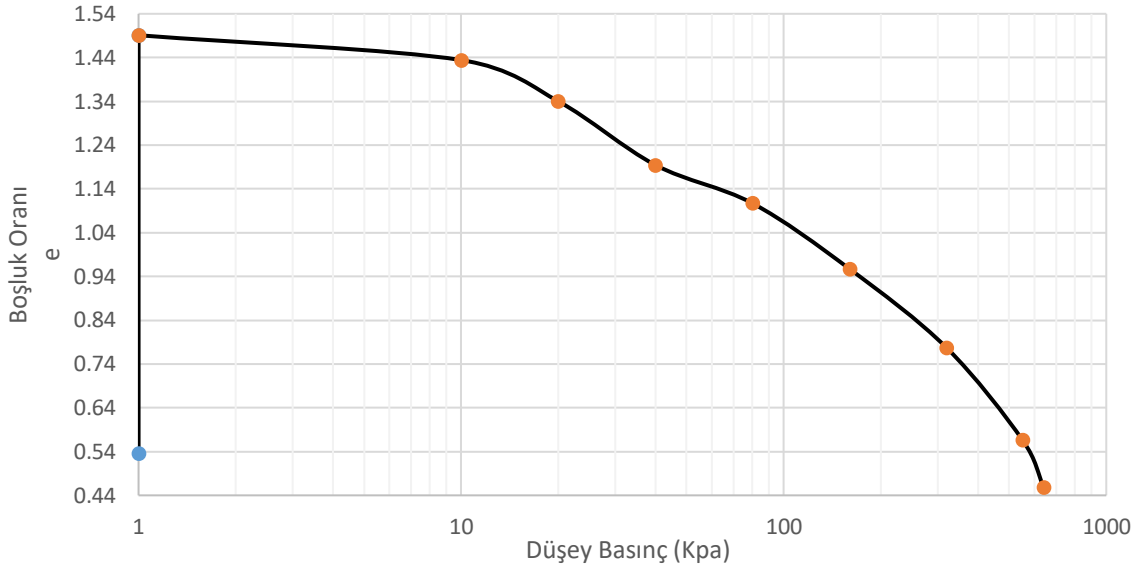
Çalışmanın ilerleyen safhalarında katkılı karışımlar ile şişme deneyi yaparken görülmüştür ki katkılı numuneler 17 kPa'lık yükleme altında şişme davranışı sergilememiştir. Bu duruma, katkılı numunelerin şişme basıncının 17 kPa altında olduğu yorumu yapılmıştır. Katkılı numunelerin şişme yüzdesinin belirlenmesi istenildiğinden dolayı doğal zemin numunesine uygulanan 1 kPa'lık sürsaj yüklemesi altında deney tekrarlanmıştır. Tekrarlanan deney sonucuna göre doğal zeminin şişme yüzdesi %62.17, şişme basıncı ise 580 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 29 ve 30).



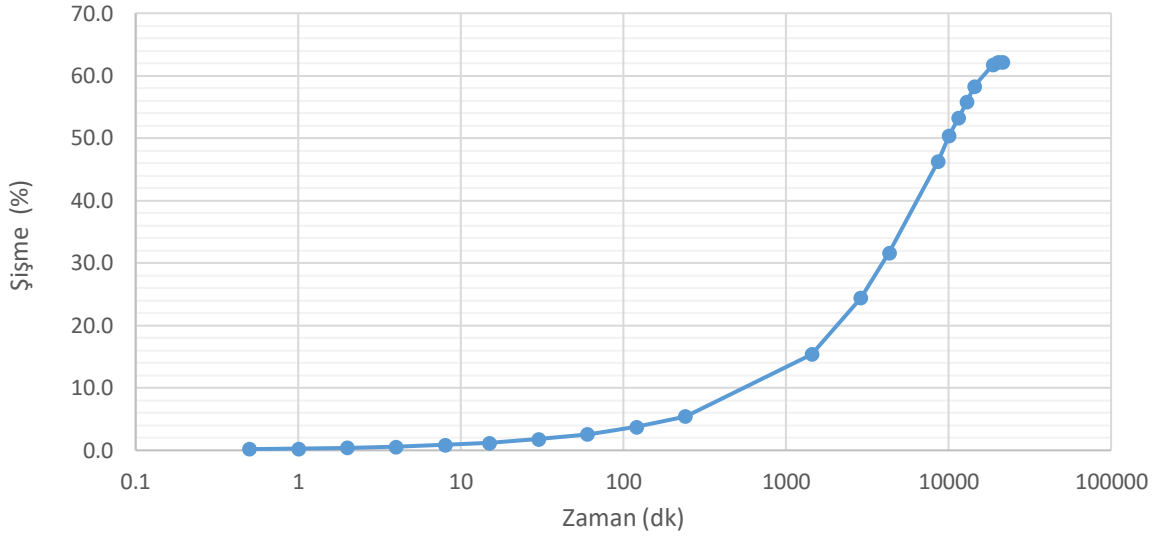
Şekil 27. 17 kPa yükleme altında doğal zemin numunesinin şişme basıncı eğrisi



Şekil 28. 17 kPa yükleme altında doğal zemin numunesinin şişme yüzdesi eğrisi



Şekil 29. 1 kPa yükleme altında doğal zemin numunesinin şişme basıncı eğrisi



Şekil 30. 1 kPa yükleme altında doğal zemin numunesinin şişme yüzdesi eğrisi

2.1.1.9. Dayanım Özellikleri

Optimum su içeriğinde ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılan numune ASTM D2166 (2016) standardına uygun olarak yapılmıştır. Hazırlanan doğal zemin numuneleri, daha sonrasında katkılı numunelerin, 1, 7 ve 28 gün sonunda davranışında oluşabilecek değişimleri görebilmek ve kıyaslama yapabilmek adına 1, 7 ve 28 günlük kür

sürelerine maruz bırakılmıştır. Numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için boy uzunluğu/çap oranı en az iki olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneyde zeminde oluşan boşluk suyu basıncının dışarı çıkmasına izin verilmediğinden deney drenajsız olarak adlandırılmaktadır. Numune serbest basınç aletinde, biri sabit diğeri hareket eden iki plak arasına yerleştirilir ve üst tabaka ile numunenin üst yüzeyi arasında boşluk kalmayacak şekilde ayarlanmıştır. Aletin yük halkası saati ve düşey deformasyon saati sıfırlanarak 1 mm/dk hızında yükleme başlatılmıştır. Ayrıca bu deney hızlı yapılması gereken bir deney olduğundan numune desikatörden çıkarılır çıkarılmaz hemen yüklemeye başlanmıştır. Optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılan üç numune kür süreleri sonunda kırılmış ve ortalamaları alınmıştır. Deney sonucuna göre doğal zemin numunesinin 1, 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri sırasıyla 327.17, 367.07 ve 348.10 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 31).



Şekil 31. Kırım sırasındaki ve kırım sonucundaki doğal zemin numunesi

2.1.2. Deniz Kabuğu

Deniz kabukları, yumuşakçaların dış iskeletlerini oluşturan ve deniz kıyısı yakınlarında elde edilen atık bir malzeme olmasının yanı sıra kireç katkısına benzer olarak %90 oranında da kalsiyum karbonat içermektedir. Küresel alanda kireç ve çimento

stabilizasyonu konusunda muazzam araştırmalar yapılmış olsa da deniz kabuğu gibi yerel malzemelerin zemin stabilizasyonuna etkisinin araştırılması genişletilmelidir. Bununla birlikte günümüzde ğtlmş deniz kabuğunun asfalt katkı maddesi olarak kullanılması üzerinde çalışmalar mevcuttur. Zeminin şişme sorunu, şrsaj yükünün az olduğu yerlerde daha çok karşılaşılan bir problemidir. Havaalanları bu kapsamda düşünülebilir. Ayrıca havaalanları güvenlik açısından genellikle deniz kenarlarına inşa edilen yapılar arasında yer almaktadır. Havaalanları inşa edilirken deniz kenarlarında bulunan deniz kabukları yerinde ğtlp zemin için de katkı maddesi olarak kullanılabilir. Bu özelliğinden dolayı çalışmaya katkı malzemesi olarak seçilmiştir.

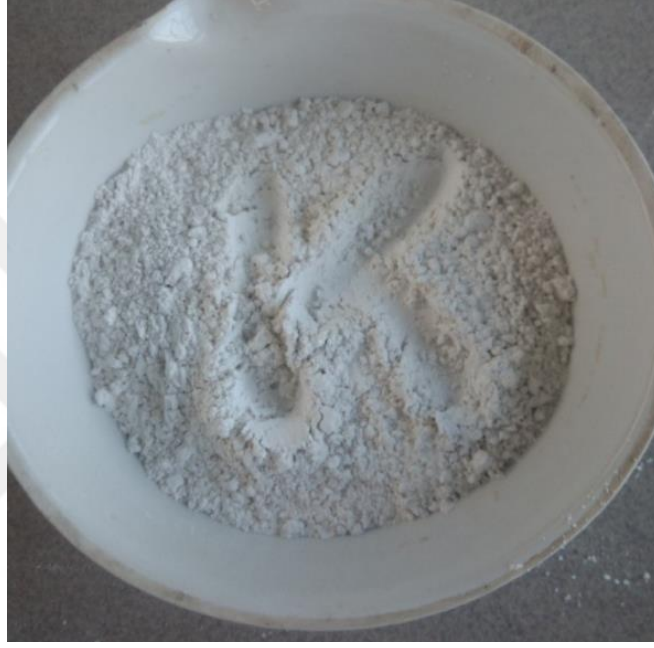
Bu alışma kapsamında deniz kıyılarından temin edilen deniz kabukları Karadeniz Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarına getirilmiştir. Deniz kabukları yıkanıp etüvde 105°C’de 24 saat kurutulmaya bırakıldıktan sonra değirmen yardımıyla ğtlp kullanıma hazır hale getirilmiştir (şekil 32). Deniz kabuğu ile çalışılan araştırmalarda genellikle %6 ile %16 oranlarında deniz kabuğu katkısı kullanılmış ve yine en iyi stabilizasyon sonucu bu değerler aralığında gözlemlenmiştir. Bu sebeple çalışma kapsamında katkı olarak kullanılan deniz kabukları ağırlıkça %8, 10, 12, 14 ve 16 oranlarında eklenmiştir.



şekil 32. Deniz kabuğu tozu

2.1.3. Kireç

Bu çalışma kapsamında Barkisan Kireç Fabrikasının ürettiği CL 80 S Söndürülmüş Toz Kalsiyum Kireci kullanılmıştır (Şekil 33). Tablo 12 ve Tablo 13’de TS EN 459-1’in yapmış olduğu kimyasal ve fiziksel analiz değerleri verilmiştir.



Şekil 33. Kireç tozu

Çalışma kapsamında kullanılacak kireç için optimum değerler %2 ile %8 aralığında elde edildiği literatür taramaları sonucunda gözlemlenmiştir. Bu sebeple çalışmada kullanılacak kireç oranları ağırlıkça %0, 3, 5, 6, 8 olarak seçilmiştir.

2.1.4. Zeolit

Bu çalışmada kullanılan zeolit katkısı Leonardit Biyo Marketten temin edilmiş olup firma tarafından yapılan analiz sonuçları Tablo 14’de verilmiştir. Yapılan literatür taramaları sonucunda optimum zeolit katkı oranlarının %5 ile %25 aralığında olduğu görülmüştür (Demirbaş, 2009). Bu nedenle çalışma kapsamında kullanılacak olan zeolit katkısı ağırlıkça %0, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında seçilmiştir (Şekil 34).

Tablo 12. Söndürölmüş toz kalker kirecinin kimyasal analiz değeri (TS EN 459-1, 2015)

Toplam MgO+CaO %	Min. 80
MgO %	Mak. 5
Kızdırma Kaybı %	Mak. 7
SO ₃ %	Mak. 2
Serbest Su %	Mak. 2

Tablo 13. Söndürölmüş toz kalker kirecinin fiziksel analiz değeri (TS EN 459-1, 2015)

200 M (Elek Üstü)	Mak. 2
90 M (Elek Üstü)	Mak. 7
Birim Hacim Kütlesi (Kg/dm ³)	Mak. 0.6



Şekil 34. Zeolit Tozu

Tablo 14. Zeolit analiz sonuçları

Safılık %96.2	
Fiziksel Özellikler	
Toz Yoğunluğu	1.42 g/cm ²
Katı Yoğunluk	2.143 g/cm ²
Dökülme Yoğunluğu	0.54 g/cm ²
Sertlik	3.5 – 4.0 mohs
Spesifik Yüzey	14.500 cm/g
Renk	Fildişi
Akışkanlaşma Sıcaklığı	1506 C°
Anorganik Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	69.2
Al ₂ O ₃	10.81
TiO ₂	0.08
Fe ₂ O ₃	1.18
Na ₂ O	0.367
K ₂ O	2.78
CaO	2.98
MgO	1.48
P ₂ O ₃	0.021
SO ₂	0.036
Kuru Madde (1500 C°)	10.21
Ph	7.0

2.2. Katkılı Numunelerin Hazırlanması

Kullanılan katkıların (deniz kabuğu, kireç ve zeolit) doğal malzemenin mühendislik özellikleri üzerinde meydana getireceği değişimler standart zemin mekaniği deneyleri ile araştırılmıştır.

Bu araştırma kapsamında yürütülen deneysel çalışmalar Taguchi metodu ile optimizasyon tekniği altında iki aşamada yapılmıştır. Taguchi yönteminde seçilen faktörler ve seviyelere göre ortogonal matris oluşturulup ortaya çıkan deney setleri referans alınarak yapılmış daha az deney sonucuna göre daha fazla deney sonucunu tahmin edebilmek amaçlanmıştır.

Taguchi deney tasarımıındaki ortogonal dizi kullanılarak uygulanacak deney setleri oluşturulmuştur. Katkılar için literatür taraması sonuçlarına göre belirlenmiş en iyi beş katkı yüzdesi seviyeler ve kullanıcak üç katkı malzemesi ise faktörler olarak belirlenmiştir. Tablo 11’de katkılı numunelerin isimlendirilmesi ve Taguchi verilerine göre katkıların kullanılması gereken deney setleri verilmektedir. Doğal malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin ortaya çıkarılması için yapılan zemin mekaniği deneylerinin ardından birinci aşamada Taguchi metodunun ortogonal matrise (L25) göre belirlemiş olduğu birleşim oranları ışığında zeminin şişme davranışı hakkında önemli bilgiler veren kıvam limitleri deneyleri 25 tane birleşim oranı için ayrı ayrı yapılmıştır. Daha sonra elde edilen veriler Taguchi yöntemine göre analiz edilmiş ve programdan alınan verilere göre her katkı için en iyi sonuç veren iki yüzde seçilmiş böylelikle de birinci aşama tamamlanmış olmuştur. Çalışmanın ikinci aşamasında ise bu yüzdelere tekrar Taguchi analiz programına göre dört deney seti olarak belirlenmiş ve belirlenen dört birleşim oranı için kompaksiyon, serbest basınç, şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Taguchi analizi ile dört deney yapılarak 8 deneyin sonucuna ulaşılabilmış ve en iyi sonuç veren birleşim oranı belirlenmiştir.

Tablo 15’de görülen karışımları oluşturan dört materyel (doğal zemin, deniz kabuğu, kireç ve zeolit) kıvam limitleri deneyleri için etüvde değil de havada kurutulduğundan bir miktar su içermektedir. Bu yüzden belirlenen oranlar, toplam karışımdaki kuru ağırlıkça yüzdelere olduğundan sahip oldukları su içerikleri göz önünde bulundurularak istenen oranının sağlanması için kullanılacak nemli malzemelerin miktarları hesaplanmıştır.

Laboratuara getirilen doğal malzeme havada kurutulduktan sonra plastisiteden dolayı topaklar halinde olduğundan ve deneyler için homojen karışımlar hazırlamak gerektiğinden numunenin tane özelliklerini bozmayacak şekilde bu topaklar öğütülerek deneylere hazır hale getirilmiştir.

Tablo 15. Çalışma kapsamında üretilen karışımlara ait isimlendirmeler

No	Sembol	Deniz Kabuğu (%)	Kireç (%)	Zeolit (%)
-	S	0	0	0
1	SD8K0Z0	8	0	0
2	SD8K3Z5	8	3	5
3	SD8K5Z10	8	5	10
4	SD8K6Z15	8	6	15
5	SD8K8Z20	8	8	20
6	SD10K0Z5	10	0	5
7	SD10K3Z10	10	3	10
8	SD10K5Z15	10	5	15
9	SD10K8Z0	10	8	0
10	SD10K6Z20	10	6	20
11	SD12K0Z10	12	0	10
12	SD12K3Z15	12	3	15
13	SD12K5Z20	12	5	20
14	SD12K5Z0	12	5	0
15	SD12K8Z5	12	8	5
16	SD14K0Z15	14	0	15
17	SD14K3Z20	14	3	20
18	SD14K5Z0	14	5	0

Tablo 15' in devamı

No	Sembol	Deniz Kabuğu (%)	Kireç (%)	Zeolit (%)
19	SD14K6Z5	14	6	5
20	SD14K8Z10	14	8	10
21	SD16K0Z20	16	0	20
22	SD16K3Z0	16	3	0
23	SD16K5Z5	16	5	5
24	SD16K6Z10	16	6	10
25	SD16K8Z15	16	8	15

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ordu'nun Denizbükü beldesinden tedarik edilen ve smektit grubu kil minerali içeren yüksek plastisiteli doğal malzemenin stabilizasyonunda, ağırlıkça %8, 10, 12, 14, 16 oranlarında deniz kabuğu, %0, 3, 5, 6, 8 oranlarında kireç ve %0, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında zeolit katkılı karışımlar hazırlanmıştır. Bu katkıların kıvam limiti, kompaksiyon parametreleri, şişme potansiyeli ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca deneyler Taguchi Yöntemine göre iki aşamada yapılarak, yöntemin şişen zeminlerin stabilizasyonunda kullanımının uygunluğu araştırılmıştır.

3.1. Katkı Malzemelerinin Kıvam Limitlerine Etkisi

Taguchi yönteminin ön verilerinden elde edilen 25 farklı karışım oranına göre likit limit ve plastik limit deneyleri yapılarak karışımların plastisite indisleri hesaplanmıştır (Tablo 16).

Deneyler ASTM D4318 (2017) standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 35).



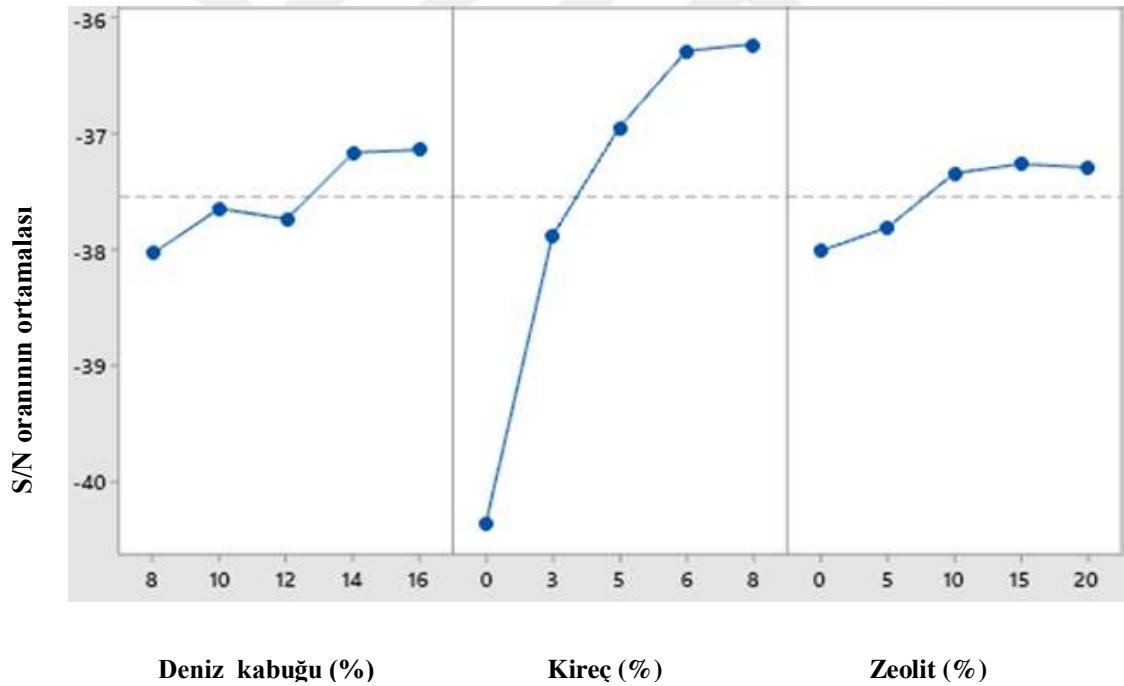
Şekil 35. Plastik limit ve likit limit deneyleri

Tablo 16. Karışımların likit limit, plastik limit ve plastisite indisi sonuçları

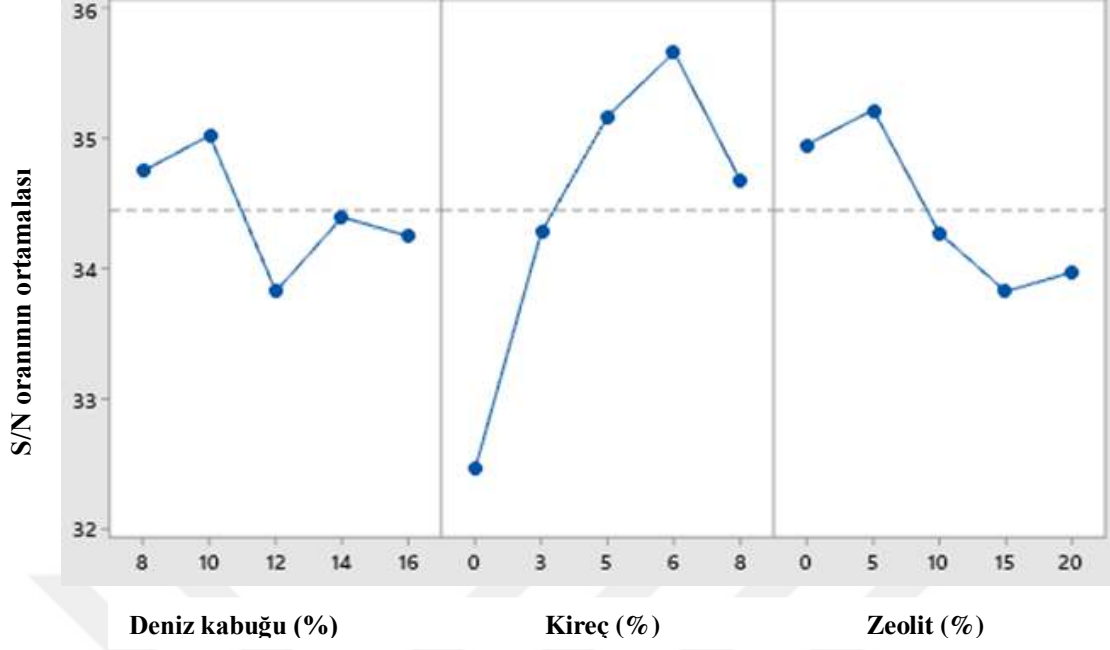
No.	Sembol	LL (%)	PL (%)	I _p (%)
-	S	143.6	38.8	104.8
1	SD8K0Z0	159.7	46.5	113.2
2	SD8K3Z5	106.5	56.0	50.5
3	SD8K5Z10	91.2	59.3	32.0
4	SD8K6Z15	86.8	59.0	27.8
5	SD8K8Z20	84.4	53.5	30.9
6	SD10K0Z5	137.2	57.8	79.4
7	SD10K3Z10	100.0	49.4	50.7
8	SD10K5Z15	85.6	57.4	28.3
9	SD10K8Z0	98.2	60.4	37.9
10	SD10K6Z20	82.9	57.6	25.2
11	SD12K0Z10	123.7	34.9	88.8
12	SD12K3Z15	98.1	49.1	49.1
13	SD12K5Z20	98.3	48.2	50.1
14	SD12K5Z0	82.7	61.9	20.8
15	SD12K8Z5	91.5	55.9	35.5
16	SD14K0Z15	108.3	36.2	72.1
17	SD14K3Z20	91.8	52.2	39.6
18	SD14K5Z0	101.0	63.0	38.0
19	SD14K6Z5	88.3	58.7	29.7
20	SD14K8Z10	81.2	56.9	24.3
21	SD16K0Z20	97.7	38.3	59.5
22	SD16K3Z0	103.7	52.4	51.3
23	SD16K5Z5	89.4	60.1	29.4
24	SD16K6Z10	85.1	63.6	21.5
25	SD16K8Z15	90.3	47.6	42.7

Taguchi yöntemi bu 25 veriyi kullanarak 125 farklı karışım oranı için likit limit, plastik limit ve plastisite indisi sonuçlarını tahmin etmektedir. Taguchi deney tasarım yönteminde ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü (N) faktörüne oranı, kalite karakteristiklerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değer sinyal değeri, ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payı ise gürültü faktörü olarak simgelenmiştir. Elde edilen 125 deney sonucu, likit limit ve plastisite indisi için “en küçük en iyidir” ve plastik limiti için “en büyük en iyidir” seçeneğinde analiz edilmiştir. Analiz sonucuna göre belirlenen grafikler yorumlanarak deniz kabuğu için en iyi katkı oranının %12 ile %14, kireç için %5 ile %6 ve zeolit içinde %5 ile %10 olduğu belirlenmiştir (Şekil 36 ve 37).

Bu değerler belirlenirken en iyi düşüşün hangi değer aralığında olduğu göz önüne alınmıştır.

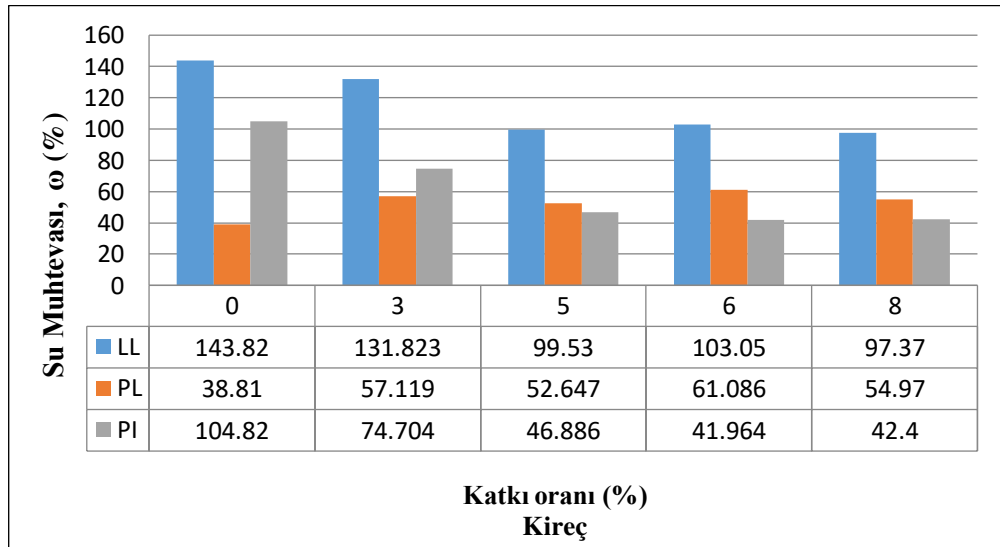


Şekil 36. Likit limit ve plastisite indisi deney sonuçlarının Taguchi yöntemine göre “en küçük en iyidir” seçeneğinde analiz verileri

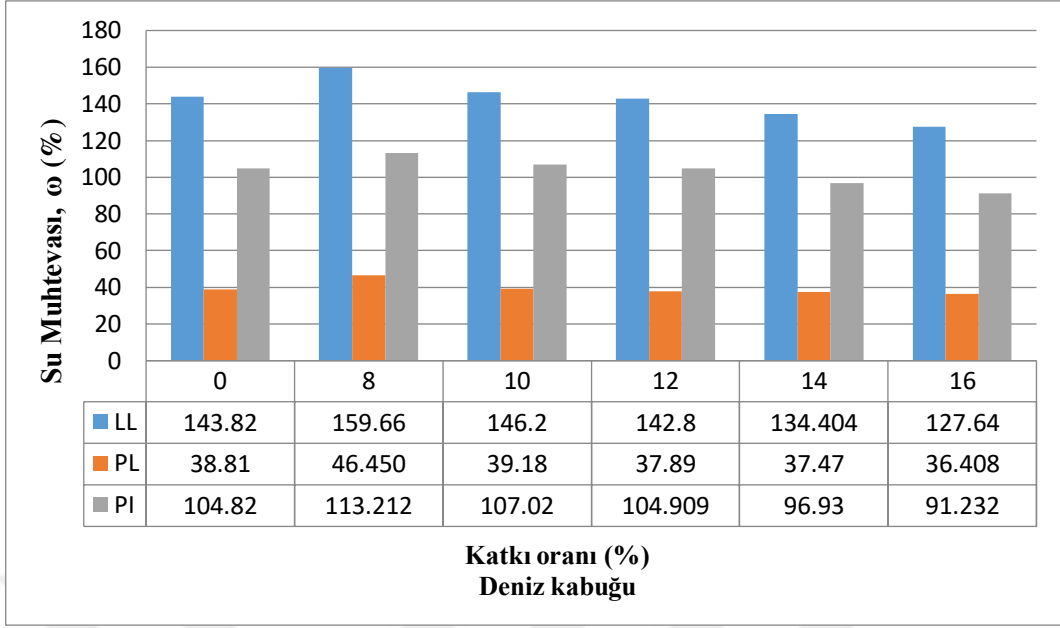


Şekil 37. Plastik limit deney sonuçlarının Taguchi yöntemine göre “en büyük en iyidir” seçeneğinde analiz verileri

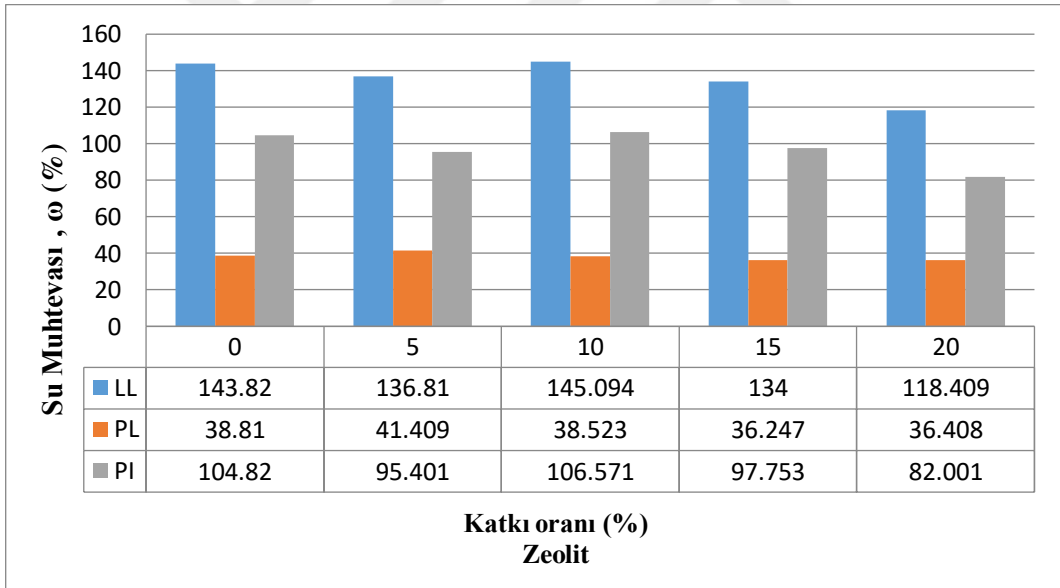
Ayrıca deniz kabuğu, kireç ve zeolit katkılarının tek başına kullanılması durumunda zemin üzerinde oluşturacakları etkileri belirlemek için zeminin şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde önemli bilgiler veren likit limit ve plastik limit deneyleri bulunan katkı yüzdeleri için yapılmıştır. Şekil 38, 39, 40’da katkı oranlarının kıvam limitlerine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 38. Doğal zemin - kireç karışımının kıvam limitleri



Şekil 39. Doğal zemin - deniz kabuğu karışımının kıvam limitleri



Şekil 40. Doğal zemin - Zeolit karışımının kıvam limitleri

Zemine eklenen katkıları ve onların farklı oranlarındaki karışımları ile gerçekleştirilen likit limit ve plastik limit deneyleri sonucunda, deniz kabuğu ve zeolit katkısının kıvam limitleri üzerinde çok fazla etkili olmadığı fakat kireç katkısının zeminin plastisitesi üzerinde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Doğal zemin ve deniz kabuğu karışımının likit limit ve plastisite indisindeki en iyi düşüş, zemine ağırlıkça %16 oranında katılan deniz kabuğu katkısında gözlemlenmiş ve likit limit değeri %11.25, plastisite indisi ise %13 oranında

azalmıştır. Doğal zemin ile ağırlıkça %20 oranında karıştırılan zeolit katkısının likit limit ve plastisite indisindeki en iyi düşüş oranı ise sırası ile %17.67, %21.77 olarak hesaplanmıştır. Zeminin kireç ile farklı oranlarda karıştırılması sonucu plastisitesi oldukça değişmiştir. Zemine tek başına katılan ağırlıkça %8 oranında kireç katkısı, likit limit değerini %32.3, plastisite indisini ise %59.6 oranında düşürmüştür.

3.2. Katkı Malzemelerinin Kompaksiyon Parametrelerine Etkisi

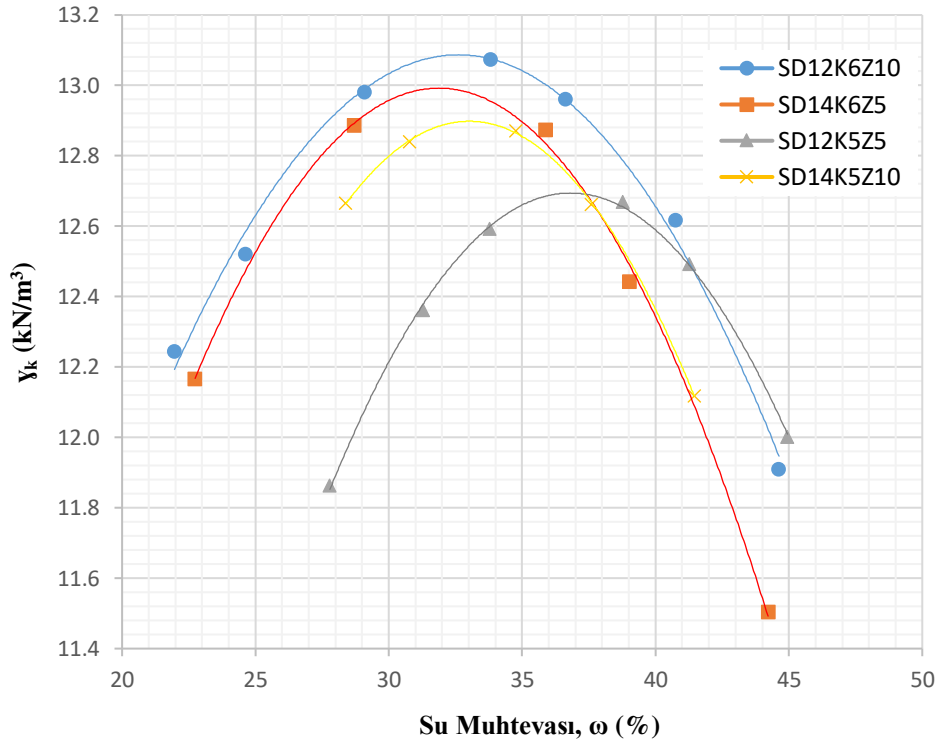
Taguchi yönteminin ikinci aşamasında deniz kabuğu için seçilen ve en iyi sonucu veren %12 ile %14 katkı oranı, kireç için en iyi sonucu veren %5 ile %6 katkı oranı ve zeolit için en iyi sonuç veren %5 ile %10 katkı oranı programa girilmiştir. Taguchi yönteminin ortogonal matrisine göre belirlenmiş olan deney setleri, program tarafından hazırlanmıştır. Tablo 17’de verilen 4 deney setine göre karışımlar hazırlanmış ve ASTM D698 (2012) standartına uygun olarak Standart Proktor deneyi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce havada kurumaya bırakılmış zemin ve katkı malzemelerinin su muhtevası hesaplanmıştır. Malzeme karışım yüzdeleri üzerine hesaplanan su muhtevası da eklenerek belirlenen oranlarda ağırlıkça karıştırılmıştır. Yaklaşık %20 oranında su içeriği ile başlatılan deneye yaklaşık %3 oranında su eklenerek deney adımları standartta belirtilen şekilde tekrarlanmıştır. Karışımın artık sıkıştırılamadığı su muhtevasında deney tamamlanmıştır (Tablo 18). Deney sonunda elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 41’de verilmiştir.

Tablo 17. Taguchi ortogonal matrisine göre belirlenmiş 4 deney seti

No	Sembol	Deniz Kabuğu (%)	Kireç (%)	Zeolit (%)
1	SD12K6Z10	12	6	10
2	SD14K6Z5	14	6	5
3	SD12K5Z5	12	5	5
4	SD14K5Z10	14	5	10

Tablo 18. Karışımlara ait optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık

No	Sembol	ω_{OPT} (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık, γ_{kmax} (kN/m ³)
Katkısız zemin	S	37.4	12.3
1	SD12K6Z10	33.2	13.1
2	SD14K6Z5	32	13.0
3	SD12K5Z5	37	12.7
4	SD14K5Z10	32.8	12.9



Şekil 41. Karışımlara ait kompaksiyon eğrileri

Tablo 18'den de anlaşıldığı gibi SD12K5Z5 karışımında fazla bir değişim görülmezken diğer tüm karışımlar için optimum su muhtevasında (ω_{opt}) düşüş ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında da artış görülmüştür.

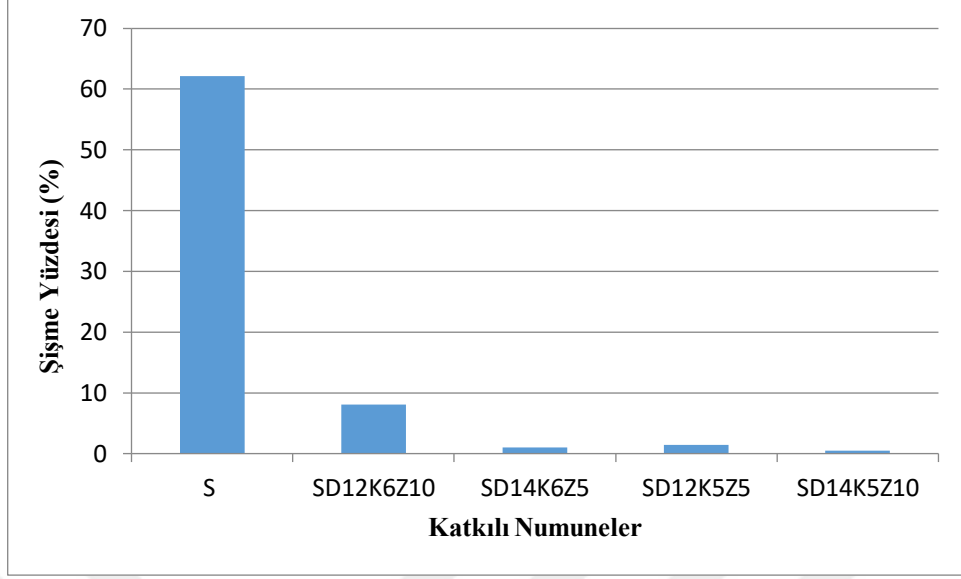
3.3. Katkı Malzemelerinin Şişme Parametrelerine Etkisi

Katkılı numunelerin şişme parametrelerini belirleyebilmek için deneyler ASTM D4546 (2021) standardı Metot C'ye uygun olarak yapılmıştır. Tablo 17'de belirtilen oranlarda hazırlanan numuneler, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmıştır. Bir günlük kür süresinden sonra numuneler klasik ödometre aletinde 1 kPa'lık sürsaj yük altında şişmeye bırakılmıştır (Şekil 44). Deney süresince okumalar alınarak kaydedilmiştir. Şişme tamamlandıktan sonra numuneler başlangıç yükseklik değerine ulaşmaya kadar düşey basınçlar uygulanmış ve numunelerin başlangıç yüksekliğine geri dönmesini sağlayan basınç, şişme basıncı olarak kaydedilmiştir.

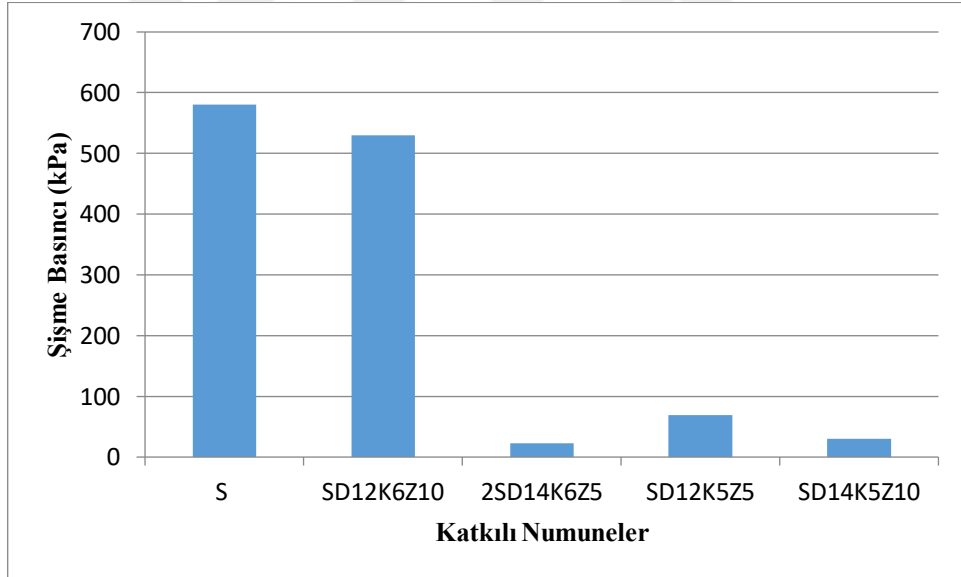
Şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 19'da verilmiştir. Katkı miktarının artışı ile birlikte şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde belirgin bir düşüş görülmektedir (Şekil 42 ve 43). Bu da deniz kabuğu, zeolit ve kirecin birlikte kullanımının kil zeminlerin şişme potansiyeli üzerinde iyileştirme etkisi oluşturduğunu göstermektedir.

Tablo 19. Katkı malzemelerinin zeminin şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerine etkisi

Sembol	Şişme yüzdesi (%)	Şişme basıncı (kPa)
S	62.17	580
SD12K6Z10	8.12	530
SD14K6Z5	1.07	23
SD12K5Z5	1.47	69
SD14K5Z10	0.48	30



Şekil 42. Deniz kabuğu, zeolit ve kireç katkısının malzemenin şişme yüzdesi değerine etkisi



Şekil 43. Deniz kabuğu, zeolit ve kireç katkısının malzemenin şişme basıncı değerine etkisi

Doğal zemin numunesine %12 oranında deniz kabuğu, %6 oranında kireç ve %10 oranında zeolit katkısı eklendiğinde şişme yüzdesi %87 düşerken şişme basıncında fazla bir değişim meydana gelmemiştir. Bunun sebebinin belirtilen oranlarda katılan katkı malzemelerinin zeminin serbest basınç mukavemetini arttırmamasından dolayı karışımın düşey yer değiştirmesine izin vermemesi olduğu düşünülmektedir. SD14K6Z5 ve SD14K5Z10 karışımlarının şişme basıncı ve şişme yüzdesinde belirlenen düşüş ihmal edilebilecek

düzeydedir. %12 deniz kabuğu, %5 kireç ve %5 zeolit katkı oranlarında hazırlanan karışımda şişme basıncı katkısız numuneye nazaran yaklaşık olarak %88, şişme yüzdesi ise %98 oranında azalmıştır. Buna göre, şişme potansiyelinin iyileştirilmesinde %12 deniz kabuğu, %5 kireç ve %5 zeolit katkısı yeterlidir.



Şekil 44. Ödometre aleti ile şişme potansiyelinin belirlenmesi

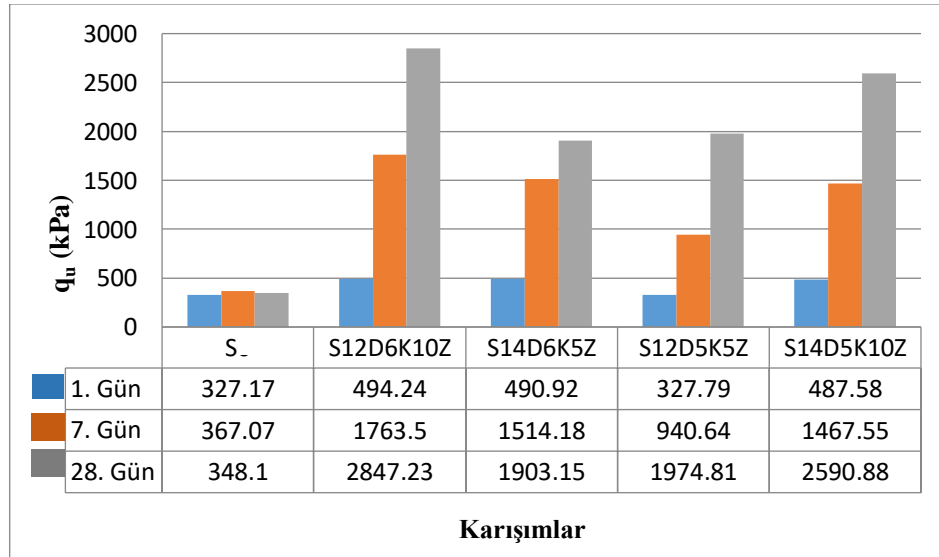
3.4. Katkı Malzemelerinin Dayanım Üzerindeki Etkisi

Katkılı numunelerin dayanım özelliklerini belirlemek için ASTM D2166 (2016) standardına uygun olarak serbest basınç deneyi yapılmıştır. 4 deney seti için karışımlar önce Tablo 17’de belirtilen oranlarda karıştırılarak optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler serbest basınç deney aletinde standarta uygun olarak 1 mm/dk hızında kırılmış ve okumalar kaydedilerek 1, 7 ve 28 günlük kür sonucunda meydana gelen serbest basınç mukavemetleri (q_u) hesaplanmıştır (Tablo 20).

Karışım ve doğal zemine ait serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırmalı gösterimi Şekil 45’de verilmektedir.

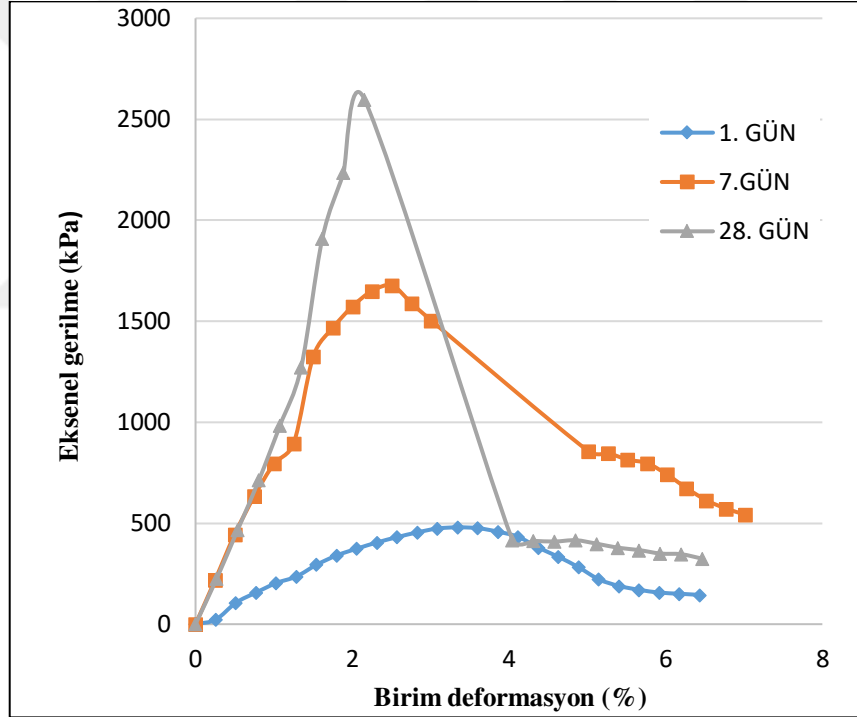
Tablo 20. Doğal zemin ve karışımların serbest basınç mukavemeti

No	Sembol	q_u (kPa)		
		Kür Süresi (Gün)		
		1	7	28
-	S	327.17	367.07	348.1
1	SD12K6Z10	494.24	1763.5	2847.23
2	SD14K6Z5	490.92	1514.18	1903.15
3	SD12K5Z5	327.79	940.64	1974.81
4	SD14K5Z10	487.58	1467.55	2590.88

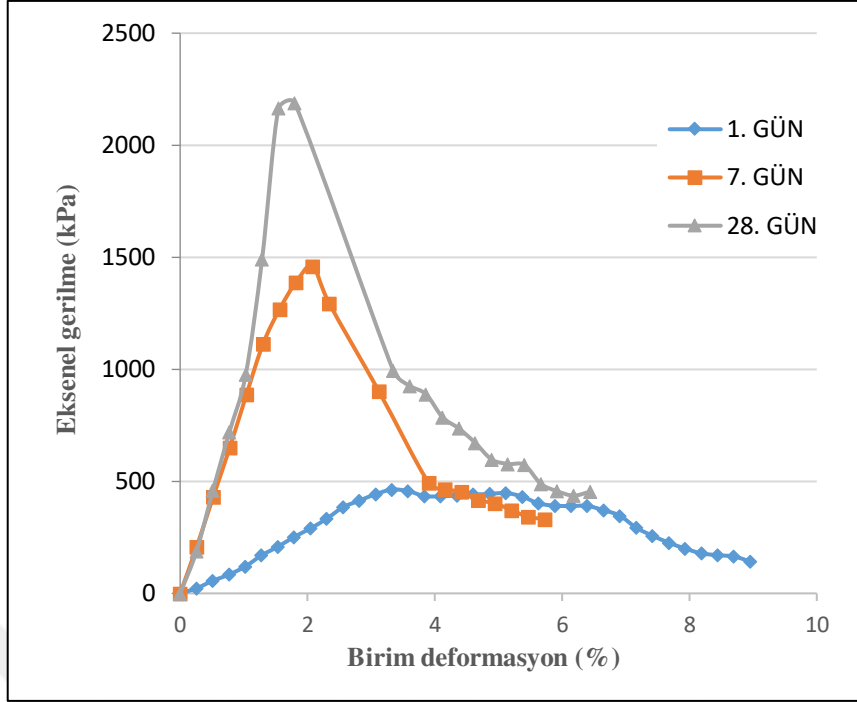


Şekil 45. Doğal zeminin ve karışımların 1, 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetleri

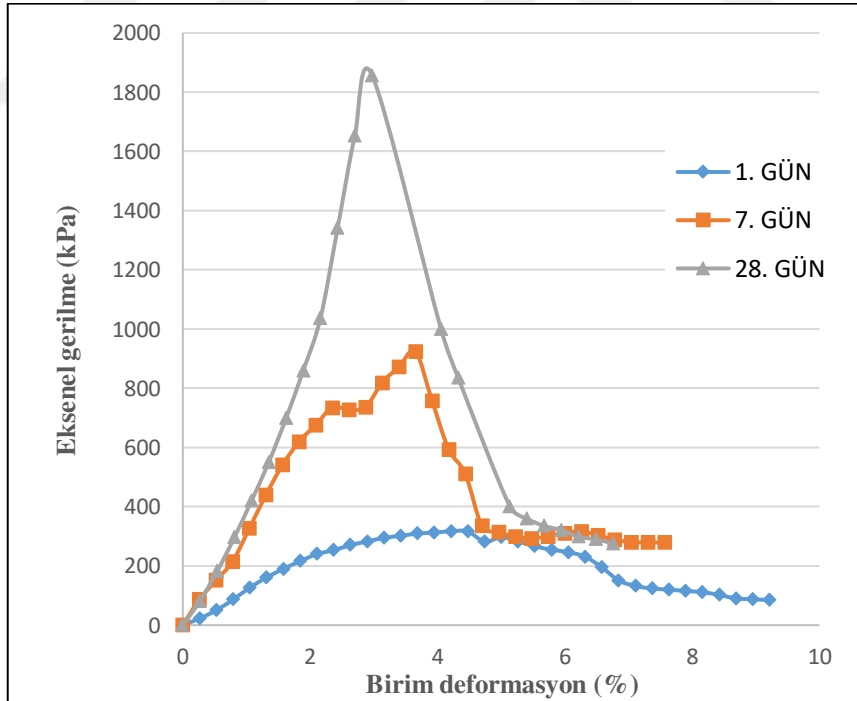
Deney sonuçları göz önüne alındığında tüm karışımların zeminin mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Desikatörde belirlenen kür sürelerinde bekletilen numunelerin 28 günlük kür işlemi, karışımların mukavemetini 1 ve 2 günlük kürlere nazaran yaklaşık 2 kat arttırmıştır (Şekil 50). Zeminin mukavemetinde oluşan en yüksek artış %12 deniz kabuğu, %6 kireç ve %10 zeolit karışımında (SD12K6Z10) elde edilmiş olup, 28 günlük mukavemet %718 artmıştır. SD12K6Z10 karışımında 1 günlük kür süresi sonucu mukavemet 327.17 kPa'dan 494.24 kPa'a çıkarak %51 artış göstermiş, 7 günlük kür süresi sonucunda ise mukavemet 367.07 kPa'dan 1763.5 kPa çıkarak %380 oranında artmıştır. Karışımlara ait 1, 7 ve 28 günlük karışımının eksenel gerilme- birim deformasyon ilişkisi Şekil 46-49'da sunulmaktadır.



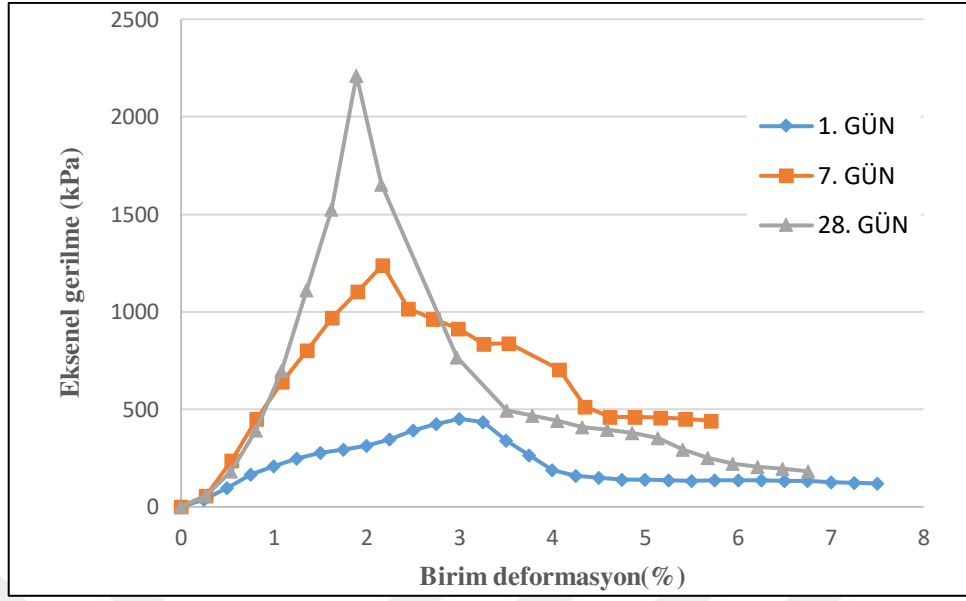
Şekil 46. SD12K6Z10 karışımının eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği



Şekil 47. SD14K6Z5 karışımının eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği



Şekil 48. SD12K5Z5 karışımının eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği



Şekil 49. SD14K5Z10 karışımının eksenel gerilme- birim deformasyon grafiği



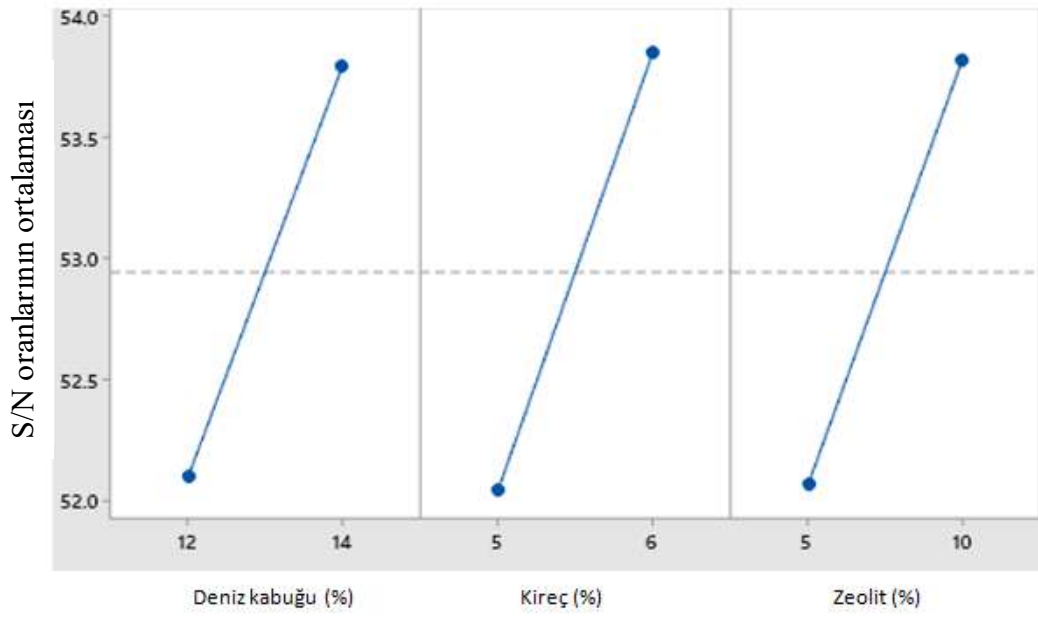
Şekil 50. Serbest basınç deneyi

3.5. Taguchi Yöntemine Göre Optimum Değerlerin Belirlenmesi

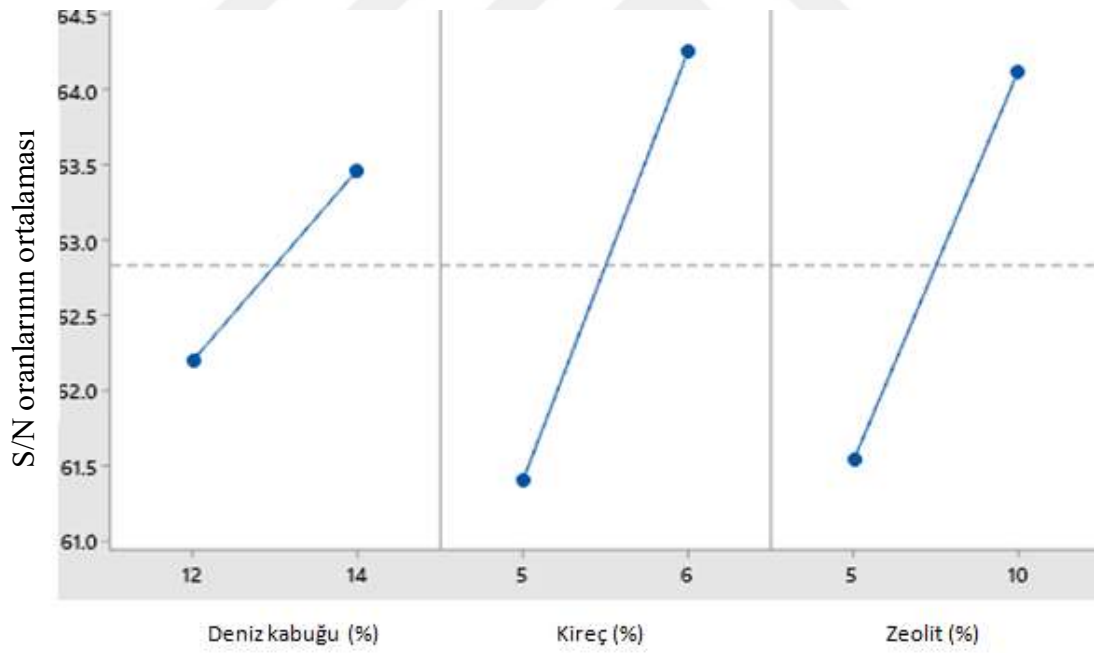
Taguchi yöntemi; parametre, sistem ve tolerans tasarımı üzerine kurulmuş bir deney tasarımı ve optimizasyon yöntemidir. Ortogonal matris dizileri sistemine dayanan Taguchi yöntemi, deneylerin uygulanmasında ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde verimliliği artırarak, deney sayısının önemli ölçüde azaltılmasına olanak sağlamıştır. Çalışma kapsamında yöntem iki aşamada kullanılmıştır. İlk aşamada üç katkı malzemesi faktörler ve katkı maddelerine ait beş yüzde seviyeler olarak seçilmiştir. L25 ortogonal matrisine göre belirlenmiş 25 deney seti için kıvam limiti deneyleri yapılmış ve bu veriler Taguchi yöntemine göre analiz edilerek 125 ayrı karışım için kıvam limitleri belirlenmiştir. Belirlenen kıvam limitlerine göre en iyi sonuç veren iki yüzde her katkı için seçilmiş ve birinci aşama tamamlanmıştır. (Şekil 36).

İkinci aşamada ise üç katkı malzemesi faktörler ve katkı malzemelerine ait iki yüzde seviyeler olarak seçilmiş ve L4 ortogonal matrisine göre belirlenmiş dört deney seti için kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç mukavemeti, şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçları Taguchi yönteminde analiz edilmiş ve dört karışım için deneyler yapılarak 8 ayrı karışım için deney sonuçları belirlenmiştir. Sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değer sinyal değeri, ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payı ise gürültü faktörü olarak simgelenmiştir ve grafikte en yüksek nokta istenilen değeri temsil etmektedir. Analiz sonuçlarına göre 1, 7 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinin S/N oranı kalite karakteristiği en büyük en iyi durumuna göre hesaplanmıştır “en yüksek en iyidir” seçiminde belirlenmiştir (Şekil 51, 52 ve 53). Şişme basıncı ve şişme yüzdesi ise “en küçük en iyidir” seçiminde analiz yapılmıştır (Şekil 54 ve 55).

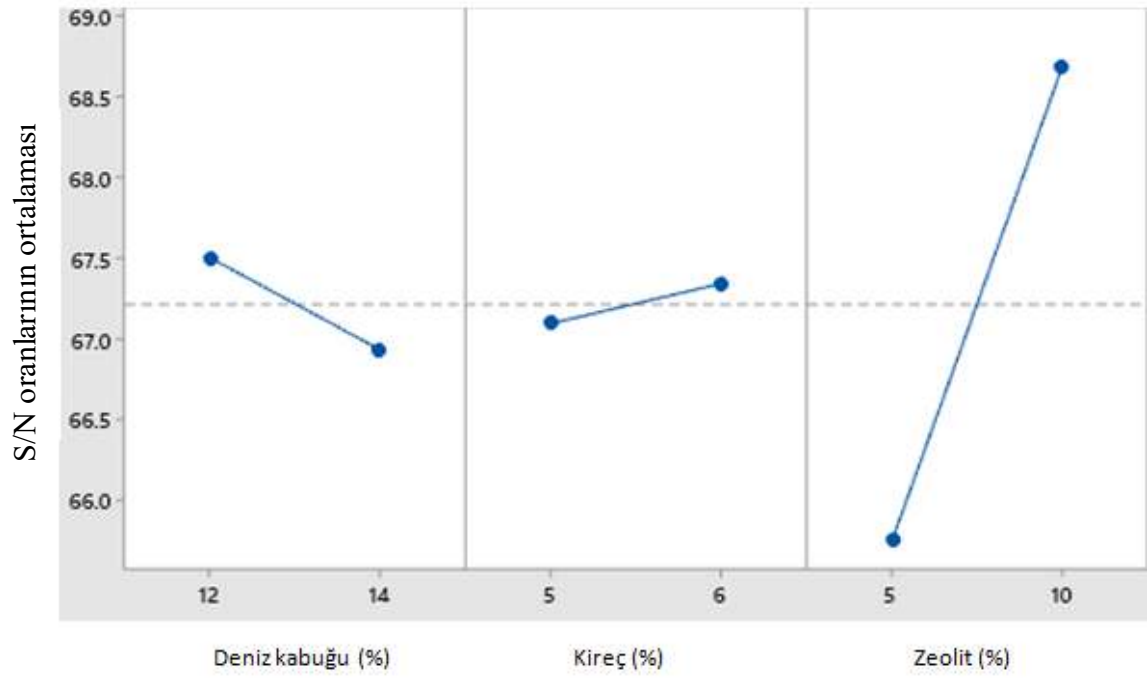
Analiz sonuçları göz önüne alındığında şişme potansiyeli için en iyi düşüşün ağırlıkça %14 deniz kabuğu + %5 kireç + %5 zeolit katkısında olacağı belirlenmiştir. Ayrıca serbest basınç mukavemeti için en iyi artışın %12 deniz kabuğu + %6 kireç + %10 zeolit katkısında olacağı tahmin sonuçlarından elde edilmiştir.



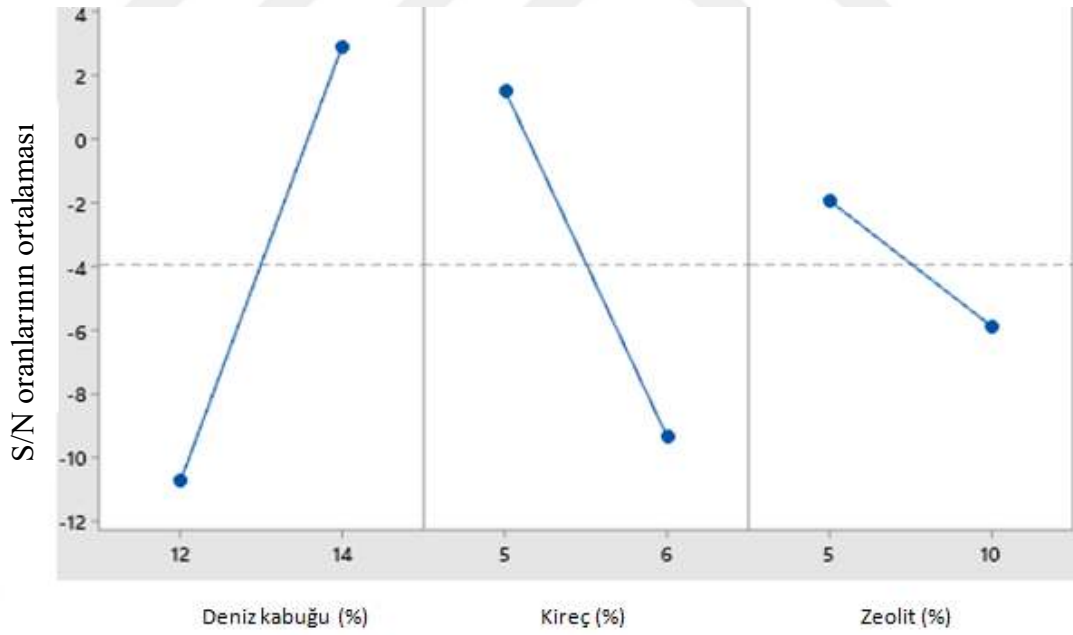
Şekil 51. 1 günlük serbest basınç mukavemeti sonuçlarının katkı yüzdeleri – S/N oranlarının ortalaması analizi



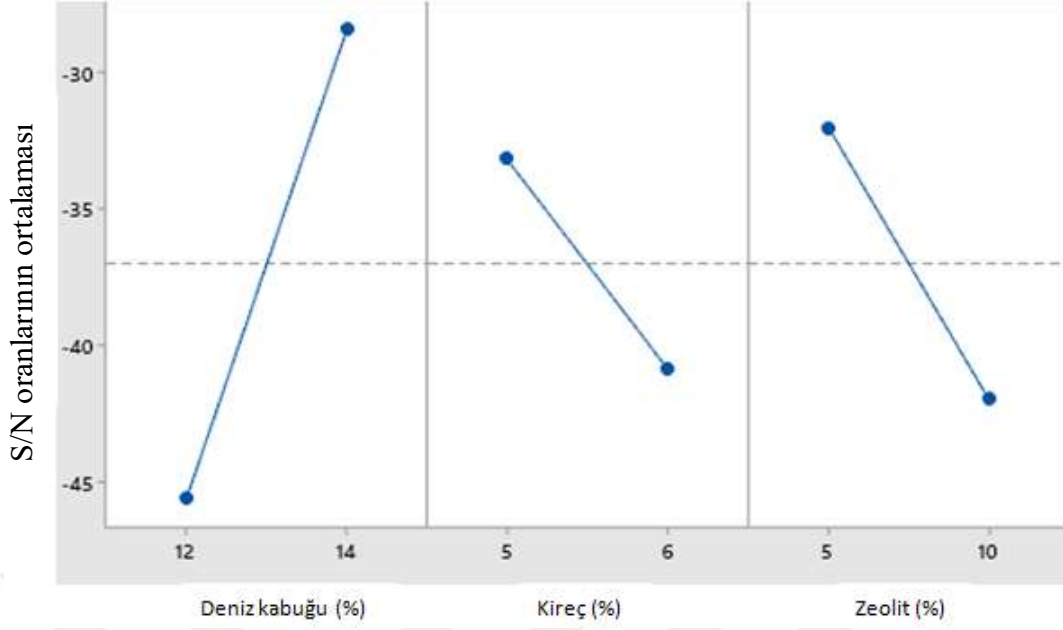
Şekil 52. 7 günlük serbest basınç mukavemeti sonuçlarının katkı yüzdeleri – S/N oranlarının ortalaması analizi



Şekil 53. 28 günlük serbest basınç mukavemeti sonuçlarının katkı yüzdeleri - S/N oranlarının ortalaması analizi



Şekil 54. Şişme yüzdesi sonuçlarının katkı yüzdeleri – S/N oranlarının ortalaması analizi



Şekil 55. Şişme basıncı sonuçlarının katkı yüzdeleri – S/N oranlarının ortalaması analizi

Birinci aşamada farklı yüzdelerde oluşturulmuş deney setleri için yapılan kıvam limitleri sonucu ile Taguchi analizinden elde edilmiş tahmin sonuçları kıyaslanarak yöntemin, benzer çalışmalarda kullanımının uygunluğu test edilmiştir (Tablo 21). Ayrıca ikinci aşamada elde edilen tahmin verileri arasından seçilmiş karışım için (S14D6K10Z) kıvam limiti, kompaksiyon, serbest basınç, şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri yapılmış, bulunan veriler ile tahmin verileri karşılaştırılarak hata oranları tespit edilmiştir (Tablo 22). Böylece Taguchi yönteminin tahmin sonuçları ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar arasındaki ilişki açıklanmıştır.

Taguchi ortogonal dizinlerinden L4'e göre gerçekleştirilen denemelerde likit limit için ortalama mutlak hata %6.17, plastik limit için ortalama mutlak hata %20 ve plastisite indisi için ortalama mutlak hata %15 olarak hesaplanmıştır. Serbest basınç deneyleri içinse ortalama mutlak hata %13.47 ve şişme potansiyeli için mutlak hata %28.92 olarak elde edilmiştir. Böylece analiz sonuçları ile doğrulama deneyi sonucu kıyaslandığında en az hata oranının likit limit deneylerinde olduğu belirlenmiş ve bu deney setlerinin güvenilir ve tekrarlanabilir olduğu gösterilmiştir.

Tablo 21. Kıvam limitleri için gerçek sonuçlar ile tahmin sonuçlarının kıyaslanması

Sembol	LL (%)			PL (%)			I _p (%)		
	Gerçek Sonuç	Tahmin Sonucu	Hata (%)	Gerçek Sonuç	Tahmin Sonucu	Hata (%)	Gerçek Sonuç	Tahmin Sonucu	Hata (%)
S10D	146.2	134.98	7.67	39.18	48.65	24.17	107.32	86.32	19.57
S12D	142.8	133.05	6.83	37.89	42.13	11.19	104.91	90.91	13.34
S14D	134.4	128.31	4.53	37.48	45.52	21.45	92.93	82.79	10.91
S16D	127.6	127.43	0.16	36.41	44.52	22.27	91.23	82.9	9.13
SD12K6Z10	82.32	86.24	4.76	57.59	56.68	1.58	24.73	29.56	19.53
SD14K6Z5	88.34	87.85	0.55	58.69	64.96	10.68	29.65	22.89	22.80
SD12K5Z5	83.74	97.46	16.38	36.25	58.42	61.16	47.49	39.04	17.79
SD14K5Z10	79.59	86.39	8.54	52.37	56.92	8.69	27.23	29.46	8.19
S14D6K10Z	74.45	81.52	9.50	49.21	60.1	22.13	25.24	21.44	15.06

Tablo 22. S14D6K10Z karışımının gerçek deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının kıyaslanması

	q _u (kPa)			Şişme Parametreleri	
	1. gün	7. gün	28. gün	Şişme (%)	Şişme Basıncı (kPa)
Gerçek Sonuç	504.11	1515.48	2648.85	4.88	442
Tahmin Sonucu	572.48	1902.61	2683.23	4.1	257
Hata (%) 	13.56	25.55	1.30	15.98	41.86

4. SONUÇLAR

Şişen zeminler dünyanın birçok bölgesinde olduğu gibi Türkiye’de de en yaygın sorunlardandır. Bu zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan en genel yöntemler, Bölüm 1.5’de anlatılmıştır. Yapılan çalışmada; deniz kabuğu ile kireç ve zeolit gibi alternatif malzemelerin yüzeysel zemin stabilizasyonunda kullanılması ve bu malzemelerin zeminin mukavemetine etkileri incelenmiştir.

Çalışmanın ilk kısmında, kullanılan kil mineralinin tanımlanması ve zemin stabilizasyonun tanımı ele alınmıştır. Ardından dünya üzerinde yüzeysel zemin stabilizasyonunda hem yaygın hem de alternative olarak uygulanan yöntemlerin kullanımı irdelenmiş ve daha önce yapılan çalışmalara değinilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise, kullanılan zemin örneğinin tanımlaması ve laboratuvar deneyleri ile fiziksel, mekanik ve dayanım özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan katkı malzemelerinin özellikleri açıklanmış, katkılı malzemelerin karışım oranlarına değilmiştir.

Çalışmanın son kısmında kireç, deniz kabuğu ve zeolit gibi alternatif malzemelerin zemin stabilizasyonuna etkisini incelemek amacıyla, doğal zemine ağırlıkça %8, 10, 12, 14 ve 16 oranlarında deniz kabuğu, %0, 3, 5, 6 8 oranlarında kireç ve %0, 5, 10, 15, 20 oranlarında zeolit katkısı ile karışımlar hazırlanmıştır. Yüksek plastisiteli kil (CH) zemin üzerinde yapılan kıvam limitleri, kompaksiyon, şişme yüzdesi, şişme basıncı deneyi ve 1, 7 ve 28 günlük kür süresinden sonra gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonrası zeminin, sıkışabilirlik, kıvam, şişme ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Taguchi yönteminin ortogonal matrisine göre (L25) belirlenmiş 25 farklı karışım için kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen veriler Taguchi Yöntemine göre analiz edilmiş ve 125 farklı karışım için sonuçlar elde edilmiştir. Minitab programında analiz edilen verilerin sonuçlarına göre, optimum katkı oranının deniz kabuğu için %12 ile %14, kireç için %5 ile %6 ve zeolit için %5 ile %10 olarak elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında elde edilen en iyi iki yüzde için Taguchi yönteminin ortogonal matrisine (L4) göre belirlenmiş olan 4 deney seti hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarla, katkı malzemelerinin kıvam limiti, kompaksiyon parametreleri, şişme potansiyeli üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin serbest basınç mukavemetinde meydana getirdiği

değişimler değerlendirilmiştir. Taguchi yöntemi analiz sonuçları ile laboratuarda yapılan doğrulama deneylerinin sonuçları kıyaslanmış ve yöntemin güvenilirliği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ve analiz verilerinden aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Ordu'nun Ünye ilçesinden alınan doğal malzemenin, Xışını kırınım analizine göre, montmorillonit gibi yüksek plastisiteli smektit grubu kil mineralleri içerdiği tespit edilmiştir. Bu zemin örneğinin su ile etkileşimi oldukça yüksek olduğundan (Aktivitesi 3.61) mühendislik özellikleri de değişen çevre şartlarından oldukça etkilenecektir. Bu yüzden şişme potansiyeline sahip doğal malzemenin stabilizasyonunun gerekliliği ortaya çıkmıştır.
- Zemine ilave edilen bütün katkı malzemeleri ve onların farklı oranlarındaki karışımları ile gerçekleştirilen kıvam limitleri deneyleri sonucunda, deniz kabuğu ve zeolit katkısının kıvam limitleri üzerinde çok az etkili olduğu fakat kireç katkısının zeminin plastisitesi üzerinde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Zemine yalın halde katılan ağırlıkça %8 oranında kireç katkısı (SD0K8Z0), likit limit değerini %32.3, plastisite indisini ise %59.6 oranında düşürmüştür. Katkı malzemelerinin birlikte kullanıldığı tüm karışımlarda ise likit limit ve plastisite indisi değerlerinde büyük ölçüde azalma olurken plastik limit değerinde artışlar meydana gelmiştir. Kireç zeminin efektif dane çapında ve mikro yapısında önemli değişimlere sebep olduğundan kireç katkılı doğal malzemesinin silt davranışı göstermeye başladığı görülmüştür.
- Kompaksiyon deneyleri sonucunda, zemine ilave edilen bütün katkı malzemelerinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı üzerinde çok etkili olmadığı belirlenmiştir. Zemine ilave edilen katkı malzemeleri ve oranlarının değişmesi, zeminin sıkışabilirliğine herhangi bir katkıda bulunmamaktadır. Optimum su muhtevasında en az düşüş ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta en az artış SD12K5Z5 karışımında görülürken, diğer tüm karışımlar için optimum su muhtevasında (w_{opt}) düşüşler ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ise (kN/m^3) artışlar görülmüştür. Doğal zeminin optimum su muhtevası % 37.4, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $12.3 kN/m^3$ iken, tüm karışımlar için optimum su muhtevası %32 - %37 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise $12.7 - 13.1 kN / m^3$ aralığında

değişmiştir. Zemine ilave edilen bütün katkı malzemeleri zeminin optimum su muhtevasını azaltmıştır. Deniz kabuğu ve zeolit gibi birim hacim ağırlığı yüksek malzemelerin eklenmesi de zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığını arttırmıştır.

- Doğal zemine katkı malzemeleri ilave edilerek hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan şişme yüzdesi deneylerine göre, en küçük şişme değerini ağırlıkça %14 deniz kabuğu, %6 kireç ve %5 zeolit (SD14K6Z5) katılan karışım vermiştir ve ağırlıkça eklenen karışımın şişme yüzdesi % 1.07 olarak belirlenmiştir. Bu karışımın şişme yüzdesi, doğal numunenin şişme yüzdesi değeri göz önüne alındığında % 98 azalmıştır.
- Doğal zemin ile katkı malzemeleri karıştırılarak hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan şişme basıncı deneylerine göre, en düşük şişme basıncı değerini 23 kPa olarak yine ağırlıkça %14 deniz kabuğu, %6 kireç ve %5 zeolit (SD14K6Z5) ilave edilen karışım vermiştir. Karışımın (SD14K6Z5) şişme basıncı değeri, doğal zeminin şişme basıncı değeri göz önüne alındığında % 986 oranında azalmıştır. Ayrıca ağırlıkça %12 deniz kabuğu, %6 kireç ve %10 zeolit (SD12K6Z10) ilave edilen karışım oranının şişme basıncında yalnızca %9 oranında azalma görülmüştür. Bunun nedeni olarak da bu karışımın serbest basınç mukavemetinin çok yüksek olması söylenebilir.
- Doğal zemin ile katkı malzemeleri karıştırılarak hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneylerine göre, en yüksek serbest basınç mukavemeti değerini 28 günlük kür süresinde, ağırlıkça %12 deniz kabuğu, %6 kireç ve %10 zeolit (SD12K6Z10) ilave edilen karışım vermiştir. Bu karışımın 28 günlük serbest basınç mukavemeti 2847.23 kPa olarak belirlenmiştir. Karışımın serbest basınç mukavemeti değeri, doğal numunenin serbest basınç mukavemeti değeri göz önüne alındığında %718 oranında artmıştır.
- Çalışmada Taguchi yöntemi kullanılmış ve yöntem sayesinde daha az deney yapılarak daha fazla deneyin sonucu tahmin edilmiştir. Böylelikle yöntem, deney sayısının önemli ölçüde azaltılmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca Taguchi yönteminin tahmin sonuçları ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar arasındaki hata oranları tespit edilmiştir. Böylece yöntemin

uygunluğu araştırılmıştır. Elde edilen verilere bakıldığında likit limit için ortalama mutlak hata %6.17, plastik limit için ortalama mutlak hata %20 ve plastisite indisi için ortalama mutlak hata %15 olarak hesaplanmıştır. Serbest basınç mukavemeti ortalama mutlak hata %13.47 ve şişme potansiyeli için ortalama mutlak hata %28.92 olarak elde edilmiştir. Bazı deneylerde bulunan yüksek hata oranının sebebi, yöntemin lineerliğe (enterpolasyon) dayalı analiz mantığında çalışması olabilir. Dolayısıyla yöntemin, tanımlanan seviyeler dışında kalan değeri aralıklarında oluşabilecek iniş ve çıkışları saptayamaması, hesaplanan yüksek hata oranlarının sebebi olarak gösterilebilir.

Yapılan bu deneysel çalışmalar, zeminin şişme potansiyelini azaltmak amacıyla zemin ile karıştırılan farklı oranlardaki tüm katkı malzemelerinin şişme stabilizasyonunda etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca elde edilen deney verileri ile Taguchi analiz verileri kıyaslandığında tahmin verileri ile gerçeki değerler arasında güçlü ilişkilerin mevcut olduğu sonucuna varılmıştır.

5. ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, deniz kabuğu, kireç ve zeolitin şişen zemin stabilizasyonu çalışmalarında alternative yöntem olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Deniz kabuğunun bir çevresel atık olması ve bu atık ürünün zemin stabilizasyonunda kullanılmasının hem çevresel hem de ekonomik olarak önemli getirilerinin olması sebebiyle geoteknik uygulamalarında kullanılması uygun olacaktır. Bu konuda yapılabilecek yüksek lisans ve doktora çalışmalarına ışık tutması amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Üç katkı malzemesinin bir arada kullanımı zeminin şişme basıncını katkısız numuneye nazaran yaklaşık olarak %88, şişme yüzdesini ise yaklaşık %98 oranlarında iyileştirmiştir. Bunun yerine daha ekonomik olması açısından katkı maddelerinin ikili kombinasyonları yapılarak şişen zeminlerin iyileştirilmesi üzerinde çalışmalar yapılabilir.
- Şişme potansiyeli deneyleri yapılırken ASTM D4546 (2021) standartı C yöntemine uygun adımlar izlenmiştir. Bu nedenle şişme yüzdesi tamamlandıktan sonra aynı düzenekte şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Bu da bazı karışımların zamanla dayanım kazanmasına ve şişme basıncının çok yüksek değerlerde çıkmasına sebep olmuştur. Bunu önleyebilmek için çalışmalarda şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneyleri ayrı ayrı başlatılıp tekrar yapılabilir.
- Taguchi yönteminin ikinci aşaması olan L4 ortogonal matrisinin elde edilmesinde seçilen iki seviyede analizler yapılmıştır. Bu da yöntemin ara değerlerde oluşabilecek iniş ve çıkışları hesaplayamamasından dolayı hata oranının fazla çıkmasına sebep olmuştur. Hata oranlarını en aza indirebilmek için seçilen seviyelerin sayısı arttırılarak analizler yeniden yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akan, R., Sungur, A., Keskin, S. ve Uzundurukan, S., 2017. İnce Daneli Zeminlerde Katkı Maddelerinin ve Donma-Çözülme Çevriminin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5, 3, 473-478.
- Akbulut, K., Akbulut, S. ve Yetimoğlu, T., 2008. Kimyasal Katkılarla Muamele Edilen Kil Zeminlerin Kıvam Limitleri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi, Selçuk Üniversitesi, 801-806, Konya.
- ASTM, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, Annual Book of ASTM Standards, D422, 04.8, 1-8.
- ASTM, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, Annual Book of ASTM Standards, D698, 04.08, 13.
- ASTM, 2014. Standard Test Method for Specific Gravity of Soils, Annual Book of ASTM Standards, D854, 04.08, 8.
- ASTM, 2015. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter, Annual Book of ASTM Standards, D5856, 04.08, 9.
- ASTM, 2016. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, Annual Book of ASTM Standards, D2166, 04.08, 7.
- ASTM, 2017. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, Annual Book of ASTM Standards, D4318, 04.08, 20.
- ASTM, 2019. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, Annual Book of ASTM Standards, D2216, 04.08,7.
- ASTM, 2020. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, Annual Book of ASTM Standards, D2435, 04.08,14.
- ASTM, 2021. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density and Unit Weight of Soil Specimens, Annual Book of ASTM Standards, D7263, 04.09,7.
- ASTM, 2021. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils, Annual Book of ASTM Standards, D4546, 04.08,10.
- Bell, F., G., 1996. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils, Engineering Geology, 42, 223-237.

- Bisanal, M. ve Badiger, R., 2015. Study on Stabilization of Soil Using Sea Shell and Bitumen Emulsion, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 4, 7, 5875-5882.
- Chen, F. H., 1988. Foundations on Expansive Soils, American Elsevier Science Publ., New York.
- Chen, F.H., 1988, Foundation on Expansive Soils, Elsevier, The Netherlands, Amsterdam.
- Coduto, D. P., 2006. Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar, Gazi Kitapevi, Ankara, 114 s.
- Çalık, Ü., 2012. Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Çelik, Z. H., 2020. Zemin Stabilizasyonunda Pomza Taşının İncelik Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bayburt.
- Dadanlar, A., 2019. Şişen Killerin Stabilizasyonunda Katkı Malzemesi Olarak Atık Cam Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Das, B., 1997. Soil Mechanics Laboratory Manual, Oxford University Press, UK.
- Demirbaş, G., 2009. Stabilization Of Expansive Soils Using Bigadic Zeolite (Boron By-Product), The Degree Of Master Of Science, Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Ankara.
- El-Sohby, M.A., ve Mazen, O., 1983. Mineralogy and Swelling of Expansive Clayey Soils.
- Fenner, J. L., Hamberg, D. J., ve Nelson J. D., 1983. Building On Expansive Soils, Fort Collins, CO: Civil Engineering Department, Colorado State University.
- Genç, S., 2009. Şişen Zeminler ve Bentonit – Kaolin Karışımlarının Şişme Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Grim, R.E., 1953. Clay Minerology, Mc Graw-Hill Book Company, Inc., New York, 384.
- Grim, R.E., 1974. Clay mineralogy, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Holtz, R.D., ve Kovacs, W.D., 1981. An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 733.
- Indiramma P., Sudharani Ch., ve Needhidasan S., 2020. Utilization Of Fly Ash And Lime To Stabilize The Expansive Soil And To Sustain Pollution Free Environment, Materials Today: Proceedings, 22, 694 –700.
- Ingles, O., G. ve Metcalf, J. B., 1973. Soil Stabilization, John Wiley&Sons, New York.

- Kalecik, S., 2019. Ordu İlinde Farklı Jeolojik Anamateryaller Üzerinde Oluşan Toprakların Organik Madde-Kil Mineralleri Arasındaki İlişkilerin Yükseklik ve Sıcaklığa Göre Değişimi, Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Ordu.
- Kalkan, E., Yarbaşı, N., ve Bilici, Ö., 2020. The Effects Of Quartzite On The Swelling Behaviors Of Compacted Clayey Soils, *International Journal Of Earth Sciences Knowledge And Applications*, Research Article, 92-101.
- Kazemikhosrowshahi, S., 2014. Stabilization Of Expansive Soil Using Copolymer, Homopolymer Polypropylene, Fly Ash And Lime, M.Sc. Thesis, İ.T.Ü., Graduate School Of Science Engineering And Technology, İstanbul.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H., ve Ansal, M.A., 1992. Killi zeminlerde yanal şişme davranışları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 14-30.
- Lambe, T.W., 1960. The Character and Identification of Expansive Soils, Soil PVC Meter, Federal Housing Administortion, Technical Studies Program, 701.
- Mitchell, J., K., 1993. Fundamentals of Soil Behaviour 2nd Edition, John Wiley&Sons Inc., New York, 437 s.
- Mounika, K., Narayana, B., Manohar, D., ve Vardhan, K., 2014. Influence Of Sea Shells Powder On Black Cotton Soil During Stabilization, International Journal of Advances in Engineering & Technology, 7, 5, 1476-1482.
- Nelson J., D., Chao, K., C., Overton, D., ve Nelson. E. J., 2015. Foundation Engineering for Expansive Soils, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 385 S.
- Nelson, J. D., ve Miller, D. J., 1992. Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, Wiley and Sons Publishing Company, Department of Civil Engineering Colorado State University, 284 S.
- O'Neill, M.N., ve Poormayed, N., 1980. Methodology For Foundations On Expansive Clays, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 106, 1345- 1367.
- Özkan, i., 2015. Improvement Of Expansive Soils By Using Phosphogypsum, The Degree Of Master Of Science, Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Ankara.
- Öztürk, Y.Z., Ünsal, N., ve Akbaş, S.O., 2015. Gölbaşı (Ankara) Yerleşim Alanını Killerinin Şişme ve Kireç ile İyileştirilme Potansiyellerinin Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30, 2, 309-318.
- Parihar, N.S., Garlapati V. K., ve Ganguly, R., 2018. Stabilization of Black Cotton Soil Using Waste Glass, *Handbook of Environmental Materials Management*, 1- 16.
- Patel, A., ve Mishra, C.B., 2017. Performance of Seashell Powder on Sub-grade Soil Stabilization, Kalpa Publications in Civil Engineering, 1, 150-156.

- Popescu. M. E., 1986. A Comparison between the Behaviour of Swelling and of Collapsing Soils, Engineering Geology, 23, 145-163.
- Skempton, A. W., 1953. The Colloidal Activity of Clays, Paper Presented At Proceeding Of The 3th International Conference Of Soil Mechanics And Foundation Engineering, Switzerland.
- Taşçı, G., 2011. Problemlı Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Türköz, M., 2006. Şişen Killerin Kireç Katkısı ile Stabilizasyonu ve Eskişehir- Meşelik Killerine Uygulanması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Dergisi, 2, 76-87.
- Van der Merve, D.H., 1964, The prediction of heave from the plasticity index and the percentage clay fraction of soils, Civil. Eng. South Africa, 103-107.
- Vinod, B. R., Shobha, R., Raghavendra, B., Rakesh, M., ve Pallavi, S., 2020. Stabilization on Expansive soil using sea shell powder and Rubber powder, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 814, 1-11.
- Yaldız, Ö., 2013. Killi Zeminlerde Şişme Basıncının Basit İndis Parametreleriyle Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yazıcı, V., 2004. Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS), GBFS-Lime Combinations and GBFS Cement, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Yılmaz F., Fidan, D. ve Taş, M., 2018. Uçucu Kül ve Bayburt Taşı ile Zemin Stabilizasyonu, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1, 1, 9-13.
- Yılmaz, I., ve Karacan, E., 1998. Zeminlerin şişme özellikleri, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Cumhuriyet Üniversitesi Dergisi, 52, 17-26, 58140.
- Yılmaz, M., ve Çelik, S., 2012. Kil Zeminin Şişme Basıncı ve Konsolidasyon Özelliklerine Öğütülmüş Kumun Etkisinin Araştırılması, KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15, 2, 32-36.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Şehit Recep Eşiyok İlköğretim Okulunda Bayburt'ta tamamladı. Lise öğrenimini Bayburt Anadolu Lisesinde tamamladıktan sonra 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2018 yılında yüksek onur belgesi ile mezun olduktan sonra 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2018 yılında meslek hayatına başlayan Senanur KOLOĞLU, kontrol elemanı inşaat mühendisi ünvanıyla mesleğine devam etmektedir. İyi derece İngilizce bilmektedir.