

**T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KALSİYUM LİGNO SÜLFONAT KULLANILARAK KİLLİ BİR ZEMİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞÜKRÜ ÇAĞDAŞ KALKAN

TEMMUZ - 2021

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KALSİYUM LİGNO SÜLFONAT KULLANILARAK KİLLİ BİR ZEMİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞÜKRÜ ÇAĞDAŞ KALKAN

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Erdiñ KESKİN

Temmuz - 2021

ETİK BEYAN

Kırlareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza
Şükrü Çağdaş Kalkan
...../...../.....

ÖZET

KALSİYUM LİGNO SÜLFONAT KULLANILARAK KİLLİ BİR ZEMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Şükrü Çağdaş Kalkan

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Erdiñç KESKİN

07 2021, 81 sayfa

Birçok yapının inşaat sürecinde problemlili zeminlerle karşılaşılmaktadır. Bu tarz problemlili zeminlerle karşılaşılmaması durumunda genellikle iki yöntemden birine başvurulmaktadır: Birinci yöntem inşaat sahasının değiştirilmesi, ikinci yöntem ise zemin iyileştirme tekniklerinin kullanılmasıdır. Birçok projede inşaat sahasının değiştirilmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle genellikle zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında killi bir zeminin kalsiyum ligno sülfonat ile iyileştirilmesi ve iyileştirme sonuçlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında Kırklareli şehir merkezinde bulunan bir araziden zemin numunesi alınmış ve deneysel çalışmaların yapılması amacıyla Kırklareli Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarına getirilmiştir. İlk olarak zemin numunesinin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Geoteknik özellikleri belirlenen zemin numunesinin dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla zemin numunesine farklı oranlarda kalsiyum ligno sülfonat katılmıştır. Kalsiyum ligno sülfonat miktarı, zeminin kuru ağırlığının % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3 ve % 4'ü olarak belirlenmiştir. Ayrıca kür süresine bağlı olarak değişimin incelenmesi amacıyla en uzun süre 365 gün olacak şekilde farklı kür sürelerinde karışım numuneleri hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda zemine kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde kayda değer bir değişimin olmadığı görülmüştür. Dayanım özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla serbest basınç mukavemeti ve kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Yapılan dayanım deneyleri sonucunda serbest basınç mukavemeti ve CBR değerlerinin artan kür süresi ile birlikte artış gösterdiği açık olarak ortaya konulmuştur. Serbest basınç

mukavemeti değerlerinde doğal zemin numunesine göre en fazla 10 kat artış görülürken, CBR değerlerinde doğal zemin numunesine oranla 26 kata varan artışlar meydana geldiği görülmüştür. Tez kapsamında yapılan çalışmaların ışığında kalsiyum ligno sülfonatın zemin iyileştirmesinde kullanılabilir olduğu açık olarak görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kil, Kalsiyum Ligno Sülfonat, CBR, Serbest Basınç Mukavemeti.



ABSTRACT

STABILIZATION OF CLAYEY SOIL WITH CALCIUM LIGNOSULFONATE

Şükrü Çağdaş Kalkan

MSc Thesis

Kirklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Erdiñ KESKİN

07 2021, 81 pages

Problematic soils are encountered during the construction process of many buildings. In case of encountering such problematic soils, one of two methods is generally applied. It can be executed using techniques including removal / replacement and soil stabilization. In many projects, it is not possible to change the construction site. For this reason, soil stabilization techniques are often used. In this thesis, it is aimed to improve a clayey soil with calcium lignosulfonate and to examine the improvement results. For this purpose, a number of experimental studies have been carried out. Within the scope of the experimental study, soil samples were taken from a field located in Kırklareli city center and brought to Kırklareli University Geotechnical Laboratory for experimental studies. First, the geotechnical properties of the soil sample were determined. In order to improve the strength properties of the soil sample whose geotechnical properties were determined, calcium lignosulfonate was added to the soil sample at different rates. The amount of calcium lignosulfonate was determined as 0.5%, 0.75%, 1%, 2%, 3% and 4% of the dry weight of the soil. In addition, in order to examine the change depending on the curing time, mixture samples were prepared at different curing times, with the longest 365 days. As a result of the experiments, it was observed that there was no significant change in the optimum water content and maximum dry unit volume weight values when calcium lignosulfonate was added to the soil. In order to determine the strength properties, unconfined compressive strength and California Bearing Ratio (CBR) tests were carried out. As a result of the strength tests, it has been clearly demonstrated that the unconfined compressive strength and CBR values increase with increasing curing time. It was observed that the unconfined compressive strength values increased up to 10 times compared to the natural soil sample, while the CBR values increased up to 26 times compared to the natural soil sample. With the studies carried out within the scope of the thesis, it has been clearly seen that calcium lignosulfonate can be used in soil improvement.

Keywords: Clay, Calcium Lignosulfonate, CBR, Unconfined Compressive Strength.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans alıŐmasında gerek literatr taramasında ve gerekse deneysel alıŐmalarda benden her trl yardımı esirgemeyen baŐta Sayın Dr. Öğr. Üyesi Erdin Keskin'e, ArŐ. Gör. Dr. İlker Őahinođlu'na, ArŐ. Gör. Onur Yavan'a ve Kırklareli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı görevlilerine teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Tez Sunum Düzeni.....	3
2. YÜZEYSEL ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	5
2.1 Çimento Katkısı İle Zemin İyileştirme	5
2.2 Uçucu Kül Katkısı İle Zemin İyileştirme	10
2.3 Pirinç Kabuğu Külü Katkısı İle Zemin İyileştirme.....	14
2.4 Kireç Katkısı İle Zemin İyileştirme	15
2.5 Kalsiyum Ligno Sülfonat İle Zemin İyileştirme.....	21
3. AKIŞ DİYAGRAMI, YÖNTEM VE MALZEME	33
3.1. Akış Diyagramı	33
3.2. Kullanılan Malzemeler	34
3.2.1. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan zemin numunesi	34
3.2.2. Kalsiyum ligno sülfonat	35
3.3. Yöntem.....	36
3.3.1. Zemin numunesinin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi	37
3.3.1.1. Elek analizi.....	37
3.3.1.2. Kıvam limitleri	37
3.3.1.3. Özgül ağırlık.....	38
3.3.1.4. Kompaksiyon	38
3.3.1.5. Serbest basınç	38
3.3.1.6. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)	38
3.3.2. Zemin numunesinin kalsiyum ligno sülfonat ile iyileştirilmesi.....	39
3.3.2.1. Kıvam limitleri	39
3.3.2.2. Özgül ağırlık.....	39
3.3.2.3. Kompaksiyon	39
3.3.2.4. Serbest basınç	39
3.3.2.5. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)	40

3.3.2.6. SEM görüntüleri.....	40
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	41
4.1. Katkısız Zemin Numunesine Ait Deney Sonuçları.....	41
4.1.1. Elek analizi.....	41
4.1.2. Kıvam limitleri.....	43
4.1.3. Özgül ağırlık.....	45
4.1.4. Kompaksiyon.....	45
4.1.5. Serbest basınç deneyi.....	47
4.1.6. CBR deneyi.....	52
4.1.7. SEM görüntüleri.....	56
5. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	61
5.1. Kıvam Limitleri Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	61
5.2. Kompaksiyon Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	62
5.3. Serbest Basınç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	63
5.4. CBR Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	70
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2.1. Genel geçer çimento katkı maddesi zemin karışım oranları	6
Çizelge 2.2. Zemin malzemesinin özellikleri	7
Çizelge 2.3. Farklı çimento oranları ve optimum su oranı serbest basınç dayanımları.....	7
Çizelge 2.4. Zemin özellikleri	8
Çizelge 2.5. Zemin özellikleri	9
Çizelge 2.6. Doğal zeminin özellikleri	11
Çizelge 2.7. Uçucu kül katkısı oranlarına göre kıvam limitleri değişimi.....	12
Çizelge 2.8. Doğal numune maksimum kuru birim hacim ağırlık ve serbest basınç mukavemet değerleri.	13
Çizelge 2.9. Serbest basınç mukavemet değerleri	14
Çizelge 2.10. Doğal zemin numunesinin özellikleri.....	18
Çizelge 2.11. W_{opt} ve maksimum kuru birim hacim ağırlık verileri.	19
Çizelge 2.12.CBR deney verileri.....	20
Çizelge 2.13. Kıvam limitleri deney sonuçları.....	21
Çizelge 2.14. Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık sonuçları.....	22
Çizelge 2.15. 28 günlük UCS deney sonuçları.....	22
Çizelge 2.16. Donma çözünme döngüsünde serbest basınç mukavemeti değişimi.....	23
Çizelge 3.1. Zemin numunesinin bazı fiziksel özellikleri	35
Çizelge 3.2. Kalsiyum ligno sülfatın fiziksel ve kimyasal özellikleri	36
Çizelge 5.1 Kıvam limitleri özet tablo.....	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1. Anlık ve 28 günlük serbest basınç mukavemet değerleri.....	8
Şekil 2.2. 7-14-28-56 Günlük kür süresi sonucundaki göçme değerleri sıralaması.....	9
Şekil 2.3. İngiltere'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları.	11
Şekil 2.4. 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımı karşılaştırması.....	12
Şekil 2.5. Şişme miktarlarındaki değişim.....	15
Şekil 2.6. Plastisite indisi ve pH metre deney verilerindeki değişim.	19
Şekil 2.7. Doğal zemin numunesinin farklı su ve kireç türündeki karışımlara göre serbest basınç mukavemet değişimi.....	20
Şekil 3.1. Tez kapsamında yapılan çalışmaların akış diyagramı.....	33
Şekil 4.1. Elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi.....	42
Şekil 4.2. Elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi (detaylı görünüm)....	42
Şekil 4.3. Kalsiyum Ligno sülfonat katkısının artmasıyla likit limit değerindeki değişim.....	43
Şekil 4.4. Kalsiyum Ligno sülfonat katkısının artmasıyla plastik limit değerindeki değişim.....	44
Şekil 4.5. Kalsiyum Ligno sülfonat katkısının artmasıyla plastisite indisi değerindeki değişim.....	44
Şekil 4.6. Kalsiyum Ligno sülfonat katkısının arttırılması ile özgül ağırlık değerindeki değişim.....	45
Şekil 4.7. Katkısız zemin numunesi için kompaksiyon eğrisi.....	46
Şekil 4.8. Kalsiyum Ligno sülfonat katkılı zemin numuneleri için kompaksiyon eğrisi.	46
Şekil 4.9. Katkılı ve katkısız zemin numuneleri için kompaksiyon eğrisi.	47
Şekil 4.10. Katkısız zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.....	48
Şekil 4.11. % 0,5 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.....	49
Şekil 4.12. % 0,75 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.....	49
Şekil 4.13. % 1 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.....	50
Şekil 4.14. % 2 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.....	50

Şekil 4.15. % 3 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.....	51
Şekil 4.16. % 4 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.....	51
Şekil 4.17. Katkısız zemin numunesi için CBR eğrisi.	52
Şekil 4.18. % 0,5 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.	53
Şekil 4.19. % 0,75 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.	53
Şekil 4.20. % 1 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.	54
Şekil 4.21. % 2 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.	54
Şekil 4.22. % 3 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.	55
Şekil 4.23. % 4 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.	55
Şekil 4.24. Katkısız zemin numunesi için SEM görüntüleri.	57
Şekil 4.25. % 0,5 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.....	57
Şekil 4.26. % 0,75 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.....	58
Şekil 4.27. % 1 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.....	58
Şekil 4.28. % 2 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.....	59
Şekil 4.29. % 3 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.....	59
Şekil 4.30. % 4 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.....	60
Şekil 5.1. Kalsiyum ligno sülfonat katkısının artmasıyla optimum su muhtevsındaki değişim.....	62
Şekil 5.2. Kalsiyum ligno sülfonat katkısının artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki değişim.	63
Şekil 5.3. Anlık kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.	64
Şekil 5.4. 1 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.....	65
Şekil 5.5. 7 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.....	66

Şekil 5.6. 28 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.....	66
Şekil 5.7. 90 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.....	67
Şekil 5.8. 120 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.....	68
Şekil 5.9. 365 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.....	69
Şekil 5.10. Farklı kür ve farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişimin toplu halde gösterimi.....	69
Şekil 5.11. Katkısız ve % 0,5 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.....	70
Şekil 5.12. Katkısız ve % 0,75 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.....	71
Şekil 5.13. Katkısız ve % 1 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.....	71
Şekil 5.14. Katkısız ve % 2 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.....	72
Şekil 5.15. Katkısız ve % 3 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.....	72
Şekil 5.16. Katkısız ve % 4 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.....	73
Şekil 5.17. Farklı kür ve farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında CBR değerindeki değişimin toplu halde gösterimi.....	74

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim 2.1. Pirinç kabuğu ve pirinç kabuğu külü.....	14
Resim 2.2. Zemin Gevşetme.....	17
Resim 2.3. Kireç serme işlemi.....	17
Resim 2.4. Zemin karıştırılması işlemi.....	17
Resim 2.5. Sulama işlemi	17
Resim 2.6. Zemin Sıkıştırma İşlemi	17
Resim 2.7. Plaka yükleme testi.....	17
Resim 3.1. Asılbeyli köyünden alınan zemin numunesi.	34
Resim 3.2. Kalsiyum ligno sülfonatın fotoğrafı.....	35

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
CH	Yüksek plastisiteli kil
CD	Drenajlı üç eksenli basınç deneyi
CU	Drenajlısuz üç eksenli basınç deneyi
CL	Düşük plastisiteli kil
CLS	Sodyum ligno sülfonat
CSR	Döngüsel stres oranı
CSS	Kritik kesme gerilimi
E_s	Sekant deformasyon modülü
ERI	Erozyon endeksi
EC	Spektroskopisi ve elektriksel iletkenlik
FTIR	Fourier dönüşümü kızılötesi
KBH	Kuru birim hacim ağırlık
KLS	Kalsiyum ligno sülfonat
LL	Likit limit
LS	Ligno sülfonat
M_r	Esneklik modülü
N	Döngüsel döngü sayısı
PI	Plastisite indisi
PL	Plastik limit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SP	Kötü derecelendirilmiş kum
UCS	Serbest basınç testi
$W_{Doğal}$	Doğal su muhtevası
W_{opt}	Optimum su muhtevası

1. GİRİŞ

Şantiye alanlarında taşıma dayanımı düşük zeminlerle karşılaşılması sonucunda zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır. Zeminlerin iyileştirilmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemlerini derin zemin iyileştirme ve yüzeysel zemin iyileştirme olarak iki ana başlık altında toplayabiliriz. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri çoğunlukla karayolu ve demiryolu projelerinde taban zemininin iyileştirilmesi için kullanılır. Karayolu ve demiryolu projelerinde uygulanan zemin iyileştirme yöntemleri sonucunda temel ve alt temel tabaka kalınlıklarında önemli ölçüde azalma meydana gelmektedir. Temel ve alt temel tabaka kalınlıklarının azalması ile birlikte yapı maliyetleride önemli oranda azalma meydana gelmektedir. Derin zemin iyileştirme teknikleri ise genellikle yüzeysel zemin iyileştirme tekniklerinden farklı olarak dayanma yapıları ve yapı temelleri vb. alanlarda tercih edilmektedir. Farklı zeminlerde optimum zemin iyileşmesinin sağlanabilmesi için zemin özelliklerine göre iyileştirme yöntemleri seçilmelidir [1].

Başlıca yüzeysel zemin iyileştirme yöntemlerini aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [2].

- Drenaj yöntemi
- Kompaksiyon yöntemi
- Kireç ile iyileştirme
- Bitüm katkısı ile iyileştirme
- Kimyasal katkıları ile iyileştirme
- Çimento ile iyileştirme
- Kireç+uçucu kül ile iyileştirme
- Pirinç kabuğu külü ile iyileştirme
- Kimyasal maddeler ile zemin iyileştirme

Drenaj yöntemi ile zemin iyileştirmesinin ana prensibi zemin su muhtevasının azaltılmasıdır. Su muhtevasının azaltılması ile birlikte taşıma gücünün artırılması hedeflenmektedir. Su muhtevasının yüksekliği, özellikle kili zeminlerde dayanım ve taşıma gücü değerlerinde azalmaya sebep olur. Bu nedenle zeminin dayanımın korunabilmesi için, iyileştirme yapılacak bölgeden suyun uzaklaştırılması ve bölgeye su girişinin önlenmesi oldukça önemlidir. İyileştirme yapılan bölgedeki iyileşmenin kalıcı olması için drenaj sisteminin su muhtevasını bölgedeki her noktada sabit su muhtevasında tutması gerekmektedir [3].

Kompaksiyon yöntemi zemin taneciklerinin arasındaki hava boşluklarının minimuma indirilmesi neticesinde daha stabil bir yapıya bürünmeleri için zemine çeşitli aletler yardımıyla titreşimli veya titreşim yük uygulaması suretiyle azami sıkılaştırması işlemidir.

Kompaksiyon işleminden sonra zeminin stabil yapıya bürünebilmesi için maksimum birim hacim ağırlığın belirlenmesi gerekmektedir. Maksimum birim hacim ağırlık su muhtevası ve kompaksiyon enerjisine bağlı bir değişkendir.

Zemin sıkışabilirliği iki parametreye bağlıdır. Bu parametreler su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıktır zemine su ilave edilmesi ile birlikte optimum su muhtevasına kadar zemin daneleri yağlanma etkisi gösterir ve daha kolay sıkışır. Optimum su muhtevasından sonra sıkışma azalmaktadır. Bu nedenle optimum su muhtevası değerinin doğru olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Laboratuvarda yapılacak kompaksiyon deneyleri sonucunda optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenebilir [4].

Kireç ile iyileştirme tekniği en eski zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Romalılar tarafından yol yapında kullanılmıştır. Killi bir zemine %3-8 sönmüş kireç ilave edilmesi neticesinde olumlu sonuçlar vermektedir. Bu pozitif etki kil minerallerinin kireç molekülleri- ile girdiği tepkime sonucunda kil minerallerini boşlukları doldurması ile sağlanır [5].

Bitüm katkısı ile zemin iyileştirmesi sonucunda ise granüler zeminlerde taneler arasında güçlü bir bağ oluşturularak taşıma gücünün artırılması, kohezyonlu zeminlerde ise suya karşı dayanımı yüksek bir zemin elde edilmesi amaçlanmaktadır [6].

Çimento ile zeminin karıştırılması ile uygulama alanı bulan çimento ile zemin iyileştirme yöntemi Türkiye’de sıklıkla kullanılmaktadır. Laboratuvar deneyleri ve testleri sonucunda elde edilen optimum çimento yüzdesi ortalama olarak iyi derecelendirilmiş kumlarda %2-6, killi zeminlerde ise %8-12 değerindedir. Ancak uygulama sahasında uniform bir karıştırma sağlanamayacağından dolayı uygulama yapılırken çimento oranları bir miktar artırılır [7].

Kireç + uçucu kül ile zemin iyileştirme termik santrallerin bacalarından ekektro filtrelerde toplanan küller kireç ile karışımı hazırlandığında iri taneler arasında boşlukları kaplar. Bu nedenle kireç ile iyileştirme ince taneli zeminlerde etkili olurken kireç + uçucu kül karışımı iri taneli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılır. Zeminin basınç ve çekme mukavemeti yükselir [8].

Kimyasal katkılar ile zemin iyileştirme çeşitli moleküler yapıdaki kimyasalların laboratuvar analizler ve deneyler sonucunda genellikle ince taneli zeminlerde iyileştirme amacıyla kullanılan yöntemlerdir.

1.1 Tezin Amacı

İnce taneli bir zeminin Kalsiyum Ligno Sülfonat katkısı kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan iyileştirme sonucunda zemin fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimler incelenmiştir.

1.2 Tez Sunum Düzeni

Birinci bölümde giriş, tezin amacı ve tez sunum düzeni hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tez kapsamında kullanılan malzeme ve yöntem hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler sunulmuştur.

Beşinci bölümde deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler birbirleriyle karşılaştırılarak iyileştirmenin etkisi irdelenmiştir.

Altıncı bölümde ise, tez kapsamında yapılan çalışmalarla ilgili genel bir değerlendirme yapılarak önerilerde bulunulmuştur.



2. YÜZEYSEL ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Köylerden şehirlere artan göç nedeniyle şehirlerde artan yapılaşma sonucunda zemin taşıma gücü yetersiz parsellerde yapılaşma kaçınılmaz olmuştur. Zemin taşıma gücü düşük parsellerde zemin iyileştirmesi yapılarak parselde sağlıklı bir yapılama sağlanabilmektedir.

Zemin iyileştirme yöntemlerinin temel amaçları

- Zeminin taşıma gücünü arttırmak
- Oturmaları azaltmak
- Permeabiliteyi azaltmak
- Yüklemelerden oluşacak deformasyonları azaltmak
- Deprem esnasında oluşabilecek sıvılaşma ihtimalini azaltmak
- Sanayi ve tarım ürünlerinden çıkan atık malzemenin değerlendirilmesi
- Yeraltı su seviyelerinin korunmasıdır

Zemin iyileştirme yöntemleri genel olarak iki ana başlık altında toplanmaktadır. Bunlar yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri ve derin zemin iyileştirme yöntemleridir. Karayolları ve demiryollarında en çok kullanılan iyileştirme yöntemi yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleridir. Yüzeysel zemin iyileştirme teknikleri genel olarak zemine bir katkı malzemesi katılması suretiyle yapılmaktadır. Bu bölümde bazı zemin iyileştirme tekniklerinden kısaca bahsedilmiştir.

2.1 Çimento katkısı ile zemin iyileştirme

Bilindiği üzere çimentonun ana bileşenleri kireç taşı ve kildir. Bunun yanında demir cevheri, kum, boksit vb. yardımcı malzemelerde kullanılmaktadır. İlk işlem olarak bu malzemeler ön karıştırma ve kırma işlemi yapılır. İkinci olarak ise kırma işlemi yapılan hammadde öğütülerek toz haline getirilir. Bu toz halindeki ham madde “farin” olarak adlandırılır. Üçüncü olarak ise dönel fırınlarda 1500-1600 °C işlem gören farin fırın

içerisinden çıkışa yaklaştıkça sıvılaşmaya başlar. İnce taneli farin birleşerek klinker tanelerini oluşturur. Portland çimentosu klinkerin bir miktar alçı taşı ve çimento tipine bağlı olarak kalker, uçucu kül vb. katkıları ile bilyalı değirmenlerde öğütülmesi sonucunda ince toz haline getirilmesi sonucunda kullanıma hazırlanır. 100 gr zemin numunesi için gerekli genel geçer çimento miktarı Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çimento ile zemin iyileştirme granüler ve kohezyonlu zeminlerde kullanılabilir. Çimento ile zemin iyileştirme zeminlerin deformasyon ve dayanım özelliklerini mühendislik açısından arttırmak için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu yaygın kullanımının en önemli nedenlerinden birisi de ülkemizde çimentonun kolay ulaşılabilir olmasıdır.

Yüzeysel zemin iyileştirilmesinde çimento katkı maddesi genellikle hareketli yüklerin fazla olduğu projelerde kullanılmaktadır. Karayolu, demiryolu ve havaalanı pistleri gibi projelerde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu projelerde çimento katkı maddesi ile zemin iyileşmesindeki amaç ise; temel alt malzemesinin taşıma değerini arttırmak ve temel alt malzemelerinin toplam yüksekliğini azaltmaktır [9].

Çizelge 2.1. Genel geçer çimento katkı maddesi zemin karışım oranları

Zemin Tipi	100 gr Zemin Numunesi İçin Çimento Miktarı
İnce Kırılmış Kaya	0.5-1
İyi Derecelendirilmiş Kumlu Kil Çakılları	2-4
İyi Derecelendirilmiş Kum	2-4
Kötü Derecelendirilmiş Kum	4-6
Kumlu Kil	4-6
Siltli Kil	6-8
Kil	8-12
Doğal Zemin	10-15

İyileştirme işlemi uygulanan zemine en yüksek dayanım ve iyileşme için katkı malzemesi olarak katılacak çimentonun ve optimum su oranının belirlenmesi en önemli faktördür. Öncelikle çalışma sahasından alınan zemin örneğine ait zemin parametrelerinin belirlenmesi için elek analizi, birim hacim ağırlık, kompaksiyon, kıvam limitleri ve Los Angeles aşınım deneyleri yapılır.

Örneğin Uray ve diğerleri (2016) yaptığı, araştırmalar sonucunda ocaktan alınan kırma taş dolgu malzemesi zemin iyileştirmesinde ise çimento CEM I 32,5 portland çimentosu kullanmışlardır. Zemin örneğine ait zemin parametrelerinin belirlenmesi için elek analizi, birim hacim ağırlık, kompaksiyon, kıvam limitleri ve Los Angeles aşınma deneyleri yapılır. Kompaksiyon deneyi sonucunda optimum su muhtevası % 6,4 maksimum kuru birim hacim ağırlık 22,8 kN/m³ olarak bulunmuştur. Yapılan diğer deneylerin sonucunda elde edilen veriler Çizelge 2.2’de verilmiştir. Farklı çimento oranları için optimum su muhtevasında hazırlanan karışımın serbest basınç değerleri ise Çizelge 2.3 verilmiştir [10].

Çizelge 2.2. Zemin malzemesinin özellikleri

Özgül Ağırlık	2,6
Optimum Su Muhtevası (%)	6,4
Minimum Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	16,7
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	22,8
Çakıl (%)	48
Kum (%)	31
Kil+Silt (%)	21
Los Angeles (%)	18
Likit Limit	NP
Plastisite İndisi	NP

Çizelge 2.3. Farklı çimento oranları ve optimum su oranı serbest basınç dayanımları

Çimento Oranı (%)	Serbest Basınç Dayanımı (kN/m ³)	Kuru Birim Hacim Ağırlığı(kN/m ³)
2	1,12	22,46
3	2,74	22,86
4	3,90	22,25
5	5,04	23,74

Çizelge 2.3 incelendiğinde çimento oranının artması ile birlikte serbest basınç değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

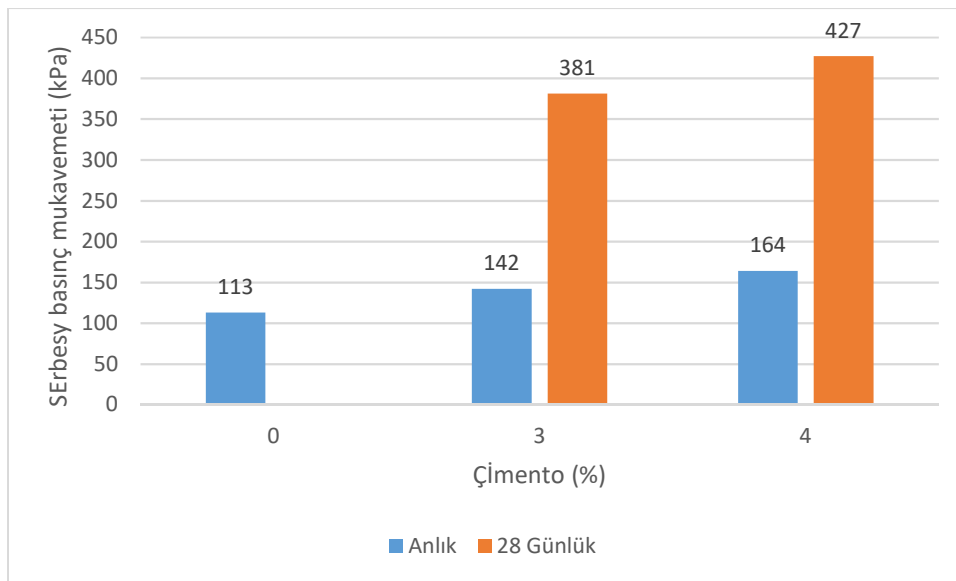
Kalava (1992) yaptığı çalışmalarda çimento ile zemin iyileştirme yöntemi sıkışma problemi olan ve suya direnişi zayıf olan zeminlerde kullanılır. Çimento ile zemin

iyileştirmede çimentonun doğal zemin numunesinin ağırlığına oranı ortalama olarak %5-%15 aralığında değişmektedir. Çimentonun zemin numunesinin ağırlığına olan oranı doğal zemin numunesinin durumuna bağlıdır. Yapılan çalışmalarda çimentonun doğal zemin numunesinin ağırlığına oranı doğal zemin numunesine bağlı olarak %8-15 aralığında en yüksek mukavemete ulaştığı gözlemlenmiştir [11].

Ayan ve diğerleri (2020) killi bir zemin numunesine çimento katkısı ile 0 ve 28 günlük minyatür proktor kabında serbest basınç testine tabi tutmuşlardır. İyileştirilen zeminin özellikleri Çizelge 2.4 de verilmiştir. Çimento katkısı ile minyatür proktor kabında hazırlanan numunelerin 0 ve 28 günlük serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 2.1’de verilmiştir [12].

Çizelge 2.4. Zemin özellikleri

Likit Limit (%)	101
Plastik Limit (%)	21,5
Plastisite İndisi (%)	79,5
Kum (%)	5
Silt (%)	30
Kil	65
Dane özgül ağırlığı (g/cm ³)	2,72
Organik madde oranı (%)	3,5



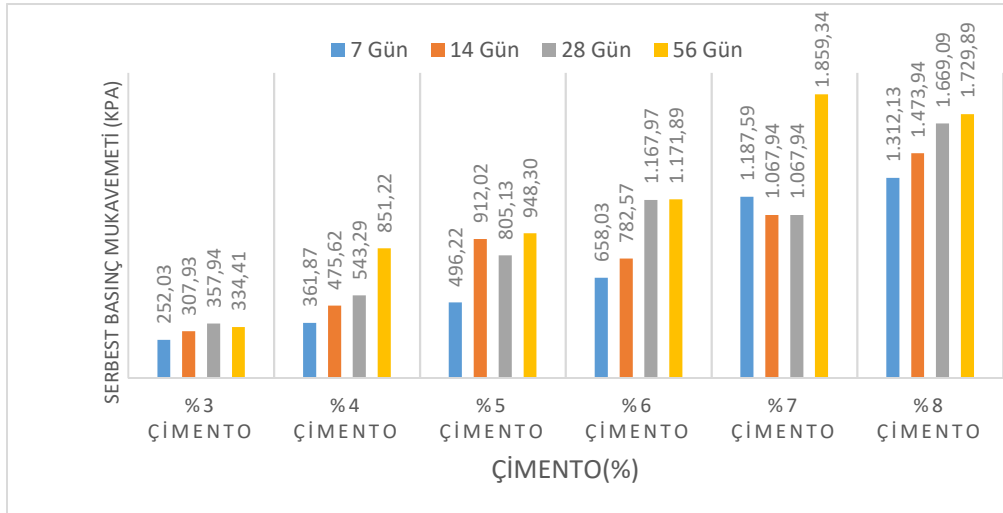
Şekil 2.1. Anlık ve 28 günlük serbest basınç mukavemet değerleri.

Tumluur (1992) yaptığı araştırma çalışmalarında, Adana ilinin Çukurova ilçesinin Seyhan ırmağının yatağından getirilen kum numunesini kullanmıştır. Zemin numunesinin zemin özellikleri Çizelge 2.5. de verilmiştir [13].

Çizelge 2.5. Zemin özellikleri

Dane birim hacim ağırlığı (γ_s)	2,68 g/cm ³
Zemin Sınıfı	SP (Kötü derecelendirilmiş kum)
İri daneli kum (%)	% 0
Orta daneli kum (%)	% 34
İnce daneli kum (%)	% 66
Optimum su oranı (W_{opt}) (%)	%5,81
Max. birim hacim ağırlık	1,64 g/cm ³

Zemin özelliklerinin ve optimum su muhtevasının belirlenmesinin zemin numunesinin ağırlığına oranla % 3-4-5-6-7-8 çimento eklenmiş ve 7-14-28-56 günlük kürler halinde serbest basınç numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu serbest basınç numunelerinin serbest basınç sonuçları aşağıda Şekil 2.2 verilmiştir.



Şekil 2.2. 7-14-28-56 Günlük kür süresi sonucundaki göçme değerleri sıralaması.

Yapılan deneyler sonucunda genel olarak zemin numunelerinin serbest basınç mukavemeti değerindeki artışın kür süresinin artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür.

2.2 Uçucu kül katkısı ile zemin iyileştirme

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek için yakılan öğütülmüş kömürün yanmasıyla birlikte cüruf ve çeşitli tiplerde küller ortaya çıkmaktadır. Uçucu kül ise yanma sonucunda çıkan gazlar ile birlikte atmosfere salınmadan önce siklonlarda ve elektro statik filtrelerle yakalanmasıyla kirliliğin bir nebze önüne geçilmiş olmaktadır. Filtrelerden toplanan uçucu kül zemin iyileştirme, hazır beton üretim alanlarında vb. alanlarda kullanılmaktadır [13]. İngiltere'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları Şekil 2.3'te verilmiştir.

Uçucu küllerin sınıflandırılması

ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları uçucu küllerin sınıflandırılmasında kullanılmaktadır [14].

ASTM C 618 standardına göre, uçucu küller F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayrılır.

TS EN 197-1 standardına göre ise V ve W sınıflarına ayrılır.

Uçucu küllerin kullanım alanları

Dolgu uygulamalarında;

Zemin iyileştirmesinde katkı olarak

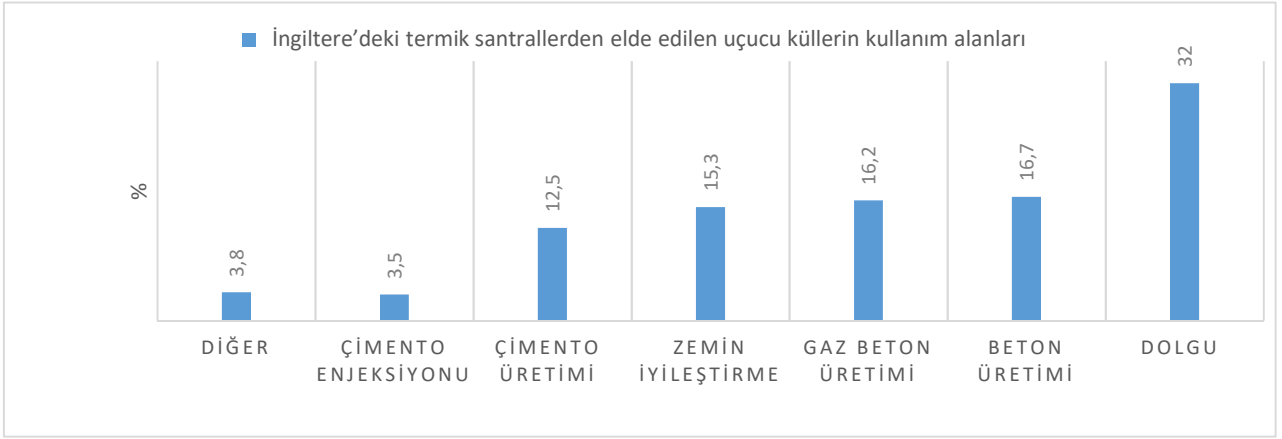
Gaz beton imalatında yardımcı bileşen olarak

Yalıtım malzemelerinde yardımcı bileşen olarak

Tuğla Üretiminde yardımcı bileşen olarak

Katı atık sahası yeraltı suyunun korunması için katkı maddesi olarak kullanılır

Çimento ve beton imalatında katkı malzemesi olarak kullanılabilir



Şekil 2.3. İngiltere’deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları [15].

Yılmaz (2016) zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanımı hakkında yaptığı araştırmasında kullandığı doğal zemin numunesini örneğini Bayburt şehrinin Demirözü ilçesinden temin etmiştir. Doğal zemin numunesine % 5-10-15-20-25-30 oranında uçucu kül optimum su muhtevasında eklenip serbest basınç testine tabi tutmuştur. Doğal zemin numunesinin özellikleri Çizelge 2.6’da verilmiştir [16].

Çizelge 2.6. Doğal zeminin özellikleri

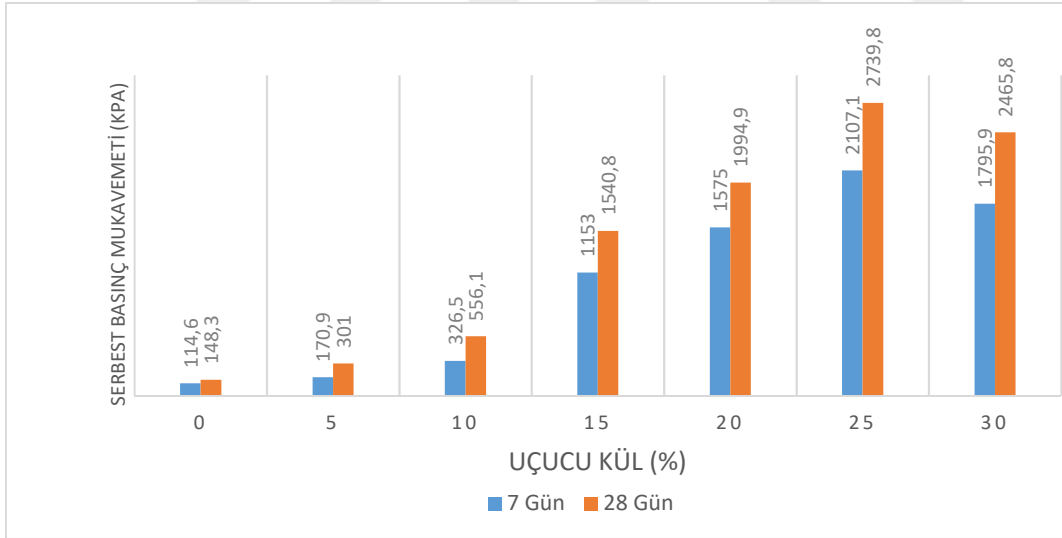
Zemin Sınıfı	CL(Düşük Plastisiteli Kil)
Likit Limit (Ll)	% 48,8
Plastik Limit (Pl)	% 26,5
Plastisite İndisi (PI)	% 22,3
Optimum Su Oranı (W_{opt})	% 23

Doğal zemine katılan uçucu kül katkısının kıvam limitlerine olan etkisi incelendiğinde ise doğal zemine katılan % 5 uçucu kül katkısı ile plastisite indisinde yarı yarıya bir düşüş gerçekleşmiştir. Çizelge 2.7’de deneyler sonucunda elde edilen kıvam limitleri tablo halinde gösterilmiştir [16].

Çizelge 2.7. Uçucu kül katkısı oranlarına göre kıvam limitleri değişimi

Uçucu Kül (%)	Likit Limit (%)	Plastik limit (%)	Plastisite indisi (%)
0	48,8	26,5	22,3
5	45,0	34,0	11,0
10	44,8	33,8	11,0
20	43,4	33,2	10,2
25	42,7	33,0	9,7
30	42,0	32,0	10,0

Doğal zemine % 0-5-10-15-20-25-30 oranında uçucu kül katkısı ve optimum su muhtevası oranında su katılarak 7 ve 28 gün olmak üzere iki farklı kür süresinde serbest basınç numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan serbest basınç numuneleri kür süresinin dolmasından sonra serbest basınç testine tabi tutulmuştur. Şekil 2.4’de 7 gün ve 28 günlük serbest basınç dayanımı birleşik grafiği verilmiştir [16].



Şekil 2.4. 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımı karşılaştırması.

Şekil 2.4’de görüldüğü üzere doğal zemin numunesine uçucu kül katılması ile birlikte serbest basınç mukavemeti değerlerinde önemli oranda artış gerçekleşmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı doğal zemin numunesine %25 uçucu kül ve optimum su oranında hazırlanan karışımın 28 günlük kür süresinin sonunda elde edilmiştir [16].

Çetin (2011) yüksek platisiteli (CH) killi bir doğal zeminde uçucu kül katkısı ile zemin iyileştirme çalışmalarında bulunmuştur. 7 gün sonunda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve serbest basınç mukavemet değerleri çizelge 2.8’de verilmiştir [17].

Çizelge 2.8. Doğal numune maksimum kuru birim hacim ağırlık ve serbest basınç mukavemet değerleri.

Uçucu kül (%)	Optimum su muhtevası	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Maksimum serbest basınç mukavemeti (kN/m ²)
0	27	15,00	170,5
5	24	15,60	314
10	24	15,60	475
15	25	15,50	326

Çizelge 2.8’de görüldüğü gibi doğal zemin numunesine katılan %10 oranındaki uçucu kül katkısı ile birlikte serbest basınç mukavemeti 2,79 kat artış göstermiştir. Doğal zemin numunesine eklenen % 15 oranındaki uçucu kül ise doğal zemin numunesine göre 1.91 kat artış göstermiştir. Örnek doğal zemin ve uçucu kül karışımı için en ideal karışım doğal zemin ve %10 uçucu kül olarak belirlenmiştir [17].

Öksüz (2006) ve diğerleri uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanımı ile ilgili deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmalarda, kumlu doğal zemin numunesine, çimento ve uçucu kül katmışlardır. Karışımda çimento oranı %5 sabit iken uçucu kül oranı % 0-5-10-15-20 si olacak şekilde farklı miktarlarda uçucu kül katkısı kullanmışlardır. Hazırladıkları karışımları 36 mm çapında 72 mm boyunda kalıplarda 3 tabaka 50 vuruş olacak şekilde sıkıştırıp serbest basınç numunesi hazırlamışlardır. Hazırladıkları serbest basınç numunelerini 7-14-28-56 günlük kür sürelerinin sonucunda serbest basınç testine tabi tutmuşlardır. 7-14-28-56 günlük kür sürelerindeki serbest basınç değerleri çizelge 2.9’da tablo olarak verilmiştir [18].

Çizelge 2.9. Serbest basınç mukavemet değerleri

Uçucu Kül Oranı (%)	Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)			
	7 Gün	14 Gün	28 Gün	56 Gün
0	346,17	398,15	616,84	769,82
5	573,69	944,38	1318,01	1764,22
10	667,83	1083,63	1501,40	1847,57
15	927,71	1650,46	1870,13	2111,37
20	1693,61	2410,47	3292,09	4210,98

Çizelge 2.9’da görüldüğü üzere doğal zemin numunesine uçucu kül ilave edilmesi ile birlikte serbest basınç mukavemet değerinde %100 ile %500 arasında bir mukavemet artışı meydana geldiği tespit edilmiştir.

2.3 Pirinç kabuğu külü katkısı ile zemin iyileştirme

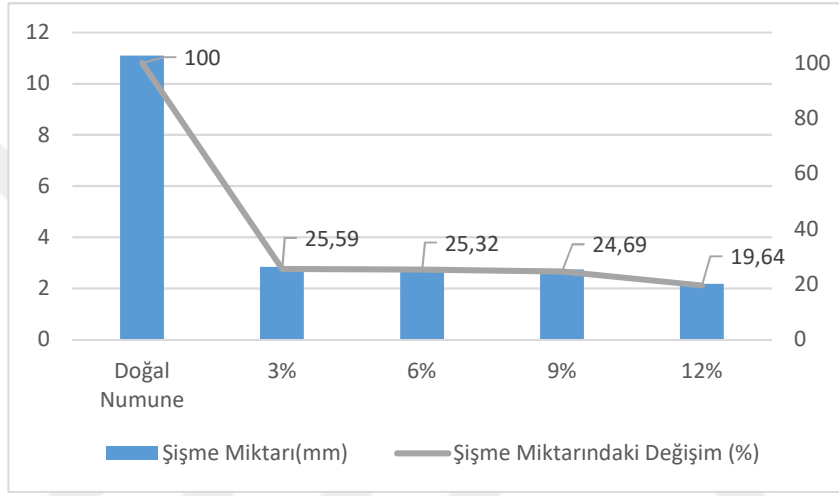
Pirinç kabuğu, çeltik üretimi neticesinde ortaya çıkan bir tarım ürününün atığıdır. Pirinç kabuğu yapısında% 95-97 oranında SiO₂, bulundurur pirinç kabukları yakıldıktan sonra hızlı bir şekilde soğursa amorf SiO₂, yavaş soğursa kristal SiO₂ şeklinde oluşur. Amorf şekilde yüzey alanı 50-60 m²/gr gibi bir değerdir [19].



Resim 2.1. Pirinç kabuğu ve pirinç kabuğu külü

Keskin ve diğerleri (2018), öncelikle bentonit kiline katkısız, % 3 pirinç kabuğu külü ile akabinde % 6, % 9, % 12 pirinç kabuğu külü eklemiş ve proktor deneyi yapmıştır. Bu deneyler neticesinde optimum su muhtevasını belirlenmiştir. Ardından optimum su muhtevası değerinde CBR(California Bearing Ratio) kalıpları içerisinde sıkıştırılarak

anlık, 28 günlük kür süresince bekletilmiştir. Ardından 4 gün kür havuzunda bekletilmiştir ve şişme değerleri kayıt edilmiştir. 4 gün sonunda doğal zemin % 3-6-9-12 pirinç kabuğu külü katkısı şişme değerleri 11,1 mm, 2,84 mm, 2,81 mm, 2,74 mm, 2,18 mm olarak bulunmuştur. % 3-6-9-12 pirinç kabuğu külü katkısı doğal zemine göre sırasıyla % 74,41, % 74,68, % 75,31, % 80,36 oranında şişme değerlerinde azalma olmuştur. Bu bilgiler doğrultusunda pirinç kabuğu külünün zemin şişmelerini azalttığı görülmüştür [20].

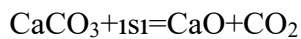


Şekil 2.5. Şişme miktarlarındaki değişim

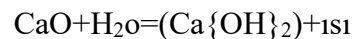
2.4 Kireç katkısı ile zemin iyileştirme

Zemin iyileştirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan kireç türü sönmüş kireçtir. Zemin iyileştirme işleminde sönmemiş kirecin yaygın olarak kullanılmamasının nedeni yakıcı ve tehlikeli olmasıdır. Kireç söndürülmesi işlemi esnasında yaklaşık olarak bünyesine %30 oranında su alır. Bu durum göz önünde tutulduğu zaman doğal su muhtevasının optimum su muhtevasından çok yüksek olduğu durumlarda su muhtevasının dengelemek için dengeleyici bir özelliği vardır [21].

Sönmemiş Kireç(Cao)



Sönmüş Kireç(Ca{OH}_2)



Kireç ile zemin iyileştirmede yapılan laboratuvar uygulamaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Plastik limit ve likit limit deneyi
- Yıkamalı elek deneyi
- pH metre deneyi
- Minyatür kompaksiyon deneyi
- Serbest basınç deneyi
- CBR deneyi
- Taramalı elektron mikroskobu
- X-ışını kırınım deneyi
- Enerji dağılım spektroskopisi

Laboratuvar deneyleri sonucunda optimum su muhtevası ve kireç karışım yüzdeleri belirlenir. Laboratuvar sonuçlarına göre killi bir doğal numuneye kireç katkısı ilave edildiği zaman molekül yapıları değişir ve tekrar eski haline döndürülemez. Genel geçer kabullere göre doğal zemin numunesine % 5-10 'u arasında kireç katkısı eklenir. Bu eklenen kireç katkısı ile çoğunlukla kohezyonlu (killi) zeminlerde daneler arası bağ kuvvetini artırır ve plastisitesini azaltır. Bu iyileşmelerin sonucunda zemini mukavemeti ve şekil değiştirme modülünde artış gözlemlenirken şişme değerinde azalma meydana gelir. Bu yeni zemin değerlerindeki değişimlerden dolayı zeminin mühendislik değerleri artar.

Kireç ile zemin iyileştirme adımları

1. Zemin gevşetilir (Resim 2.2.)
2. Kireç serme işlemi yapılır (Resim 2.3.)
3. Kireç ile zemin karıştırılır (Resim 2.4.)
4. Sulama işlemi yapılır (Resim 2.5.)
5. Sıkıştırma işlemi yapılır (Resim 2.6.)

6. Çeşitli Testler yapılır(Ör: Plaka yükleme deneyi) (Resim 2.7.)



Resim 2.2. Zemin Gevşetme



Resim 2.3. Kireç serme işlemi



Resim 2.4. Zemin karıştırılması işlemi



Resim 2.5. Sulama işlemi



Resim 2.6. Zemin Sıkıştırma İşlemi



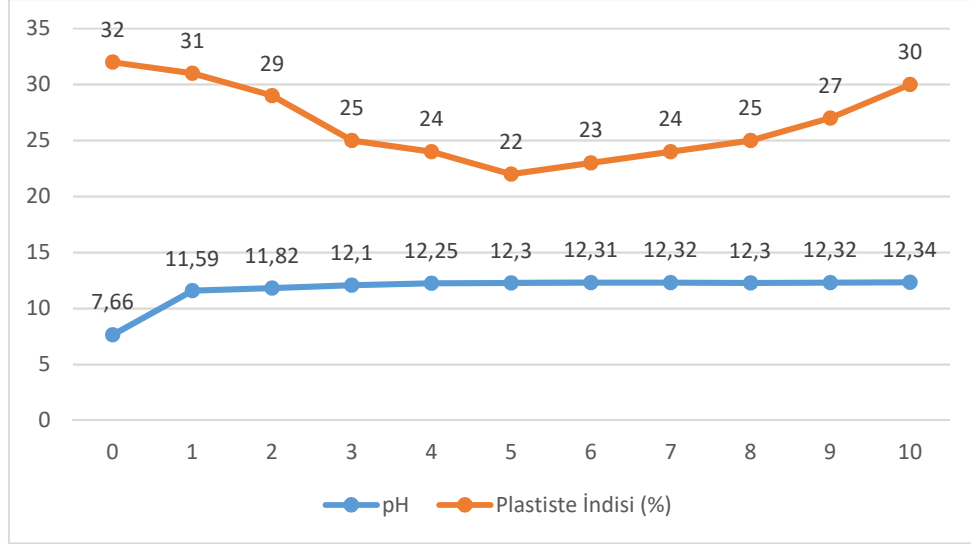
Resim 2.7. Plaka yükleme testi

Kızılcelik (2010) yapmış olduğu çalışmada yüksek plastisiteli (CH) bir kili hem sönmüş kireç hem de sönmemiş kireç olmak üzere iki farklı kireç ile iyileştirmiştir. İlk olarak doğal zemin numunesinin özellikleri belirlenmiştir bu özellikler izelge 2.10 de verilmiştir [22].

Çizelge 2.10. Doğal zemin numunesinin zellikleri

Zemin Sınıfı	CH (Yüksek Plastisiteli Kil)
Likit Limit (LL)	% 53
Plastik Limit (Pl)	% 21
Plastisite İndisi (PI)	% 32
Optimum Su Oranı (W_{opt})	% 15,5
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık	15,5 kN/m ³
Doğal Zemin Su Muhtevası ($W_{doğal}$)	% 27,5
akıl	% 0
Kum	% 10,24
Kil - Silt	% 89,76
pH	7,66

Çalışmada optimum kireç miktarına pH testi sonucunda karar verilmiştir. pH değerini 12,30'a çıkararak kireç miktarı optimum kireç miktarı olarak belirlenmiştir. Deney verileri incelendiğinde pH değerini 12,30'a %5 kireç oranı ile ulaştığı sonucuna varılmıştır. Böylelikle kıvam limitleri ile elde edilen optimum kireç değerini pH metre ile sağlaması yapılarak % 5 olarak belirlenmiştir. Plastisite indisi ve pH metre deney verilerindeki değişim Şekil 2.6.da verilmiştir [22].



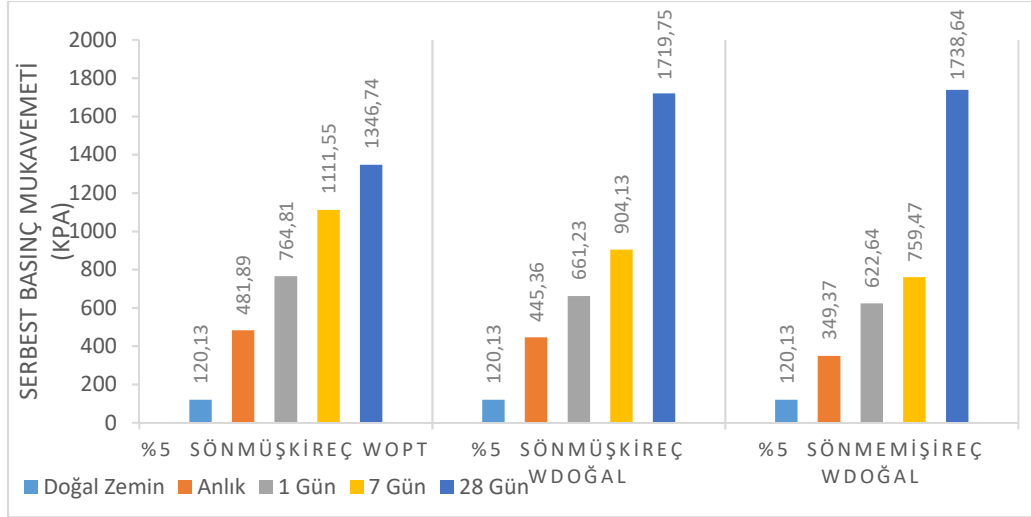
Şekil 2.6. Plastisite indisi ve pH metre deney verilerindeki değişim.

Optimum kireç oranı belirlendikten sonra optimum su miktarının belirlenebilmesi için modifiye Harvard minyatür kompaksiyon deneyi kullanılmıştır. Harvard minyatür kompaksiyon deneyinde iç hacmi 62,27 cm³ olan kalıplar kullanılmıştır. Harvard minyatür kompaksiyon deneyinde doğal numuneye belirlenen optimum kireç oranı %5 kireç ve %5 oranında su eklenerek özel çekici ile 5 katman olmak üzere sıkıştırılarak bir numune hazırlanmaktadır. Hazırlanan numune kalıp+ zemin olarak tartılır ve %5 oranında su eklenerek ikinci bir numune hazırlanır ve bu işlemler kalıp+ zemin ağırlığı düşene kadar devam eder. Bu adımların sonucunda elde edilen %5 kireç ve doğal zemin numunesi karışımına ait W_{opt} ve maksimum kuru birim hacim ağırlık verileri Çizelge 2.11.'de verilmiştir [22].

Çizelge 2.11. W_{opt} ve maksimum kuru birim hacim ağırlık verileri.

Kireç Oranı (%)	W_{opt} (%)	Maks. Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
% 0	15,5	15,40
% 5	21,5	14,70

Optimum su ve optimum kireç oranlarının belirlenmesinden sonra serbest basınç deneyi numuneleri modifiye Harvard minyatür kompaksiyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyi için hazırlanan numunelerin farklı su ve kireç türündeki karışımlara göre serbest basınç mukavemet değişimi Şekil 2.7'de verilmiştir [22].



Şekil 2.7. Doğal zemin numunesinin farklı su ve kireç türündeki karışımlara göre serbest basınç mukavemet değişimi.

Yapılan çalışmalar neticesinde görülmüştür ki sönmüş ve sönmemiş % 5 kireç doğal su muhtevası oranında su ile karıştırılıp hazırlanan numuneler serbest basınç testine tabi tutulduğu zaman doğal numunenin serbest basınç mukavemetine göre 13,5 kata yakın serbest basınç mukavemet değer artışı sağlanmıştır [22].

Serbest basınç mukavemet değer değişimlerin belirlenmesinden sonra şişme değerindeki değişim ve 2,5-5 mm de aldığı yüklerin belirlenmesi için CBR numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 96 saat boyunca suyun içinde bekletilip şişme değerleri deformasyon saati ile ölçülmüştür. 96 saatin sonunda serbest basınç cihazında teste tabi tutulmuştur sonuçlar Çizelge 2.12’de verilmiştir [22].

Çizelge 2.12.CBR deney verileri

	Doğal Zemin		% 5 Sönmüş Kireçli Malzeme	
Şişme Miktarı (mm)	2,75		0,45	
Penetrasyon (mm)	2,5	5,0	2,5	5,0
Yük (kN)	0,628	0,844	2,796	4,689
CBR Değeri (%)	5	4	21	23

CBR deneyi sonrası %5 sönmüş kireç katkılı malzemenin doğal zemin numunesine göre şişme miktarı 5 kat azalmıştır [22].

2.5 Kalsiyum Ligno Sülfonat ile Zemin İyileştirme

Kimyasal katkı ile zemin iyileştirme çeşitli moleküler yapıdaki kimyasalların laboratuvar analizler ve deneyler sonucunda genellikle ince taneli zeminlerde iyileştirme amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Örneğin kireç, çimento, uçucu kül, Kalsiyum ligno sülfonat vb. yöntemler ile zemin iyileştirme yöntemleride kimyasal katkı ile zemin iyileştirmenin alt başlıkları olarak sıralanabilir.

Bu bölümde İtaretürde kalsiyum ligno sülfonat ile ilgili yapılmış çalışmalar özetlenerek sunulmuştur.

Ta'neganbadi'nin (2018) kalsiyum ligno sülfonat ile ilgili yaptığı çalışmalarından elde ettiği sonuçlar Çizelge 2.13'de verilmiştir [23].

Çizelge 2.13. Kıvam limitleri deney sonuçları.

% Ls	Likit Limit %	Plastik Limit %	Plastisite İndisi %
%0 (Doğal Zemin)	55	23	29
%0,75 Ls	39	25	14
%2 Ls	41	26	15
%3 Ls	43	26	17
%4 Ls	44	26	18

Bahram Ta'neganbadi (2018), standart proktor deneyini sırasıyla % 0-0,5-0,75-1-2-3-4 oranında kalsiyum ligno sülfonat maddesini zemin numunesine ekleyerek yapmıştır. Optimum su muhtevası standart proktor deyinde elde edilen en yüksek kuru birim hacim ağırlığın yapıldığı deneydeki su muhtevası değeri olarak belirlenmiştir. Bahram Ta'neganbadi standart proktor deneyinden elde ettiği verilere göre serbest basınç deneyi yapmıştır. Farklı oranlarda kalsiyum ligno sülfonat yüzdeleri için elde edilen serbest basınç sonuçları Çizelge 2.15'de gösterilmiştir [23].

Çizelge2.14. Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık sonuçları

Katkı maddesi	Katkı (%)	W _{opt} (%)	Kuru birim hacim ağırlık(kN/m ³)
Doğal Zemin	0	21,25	16,3
LS	0,5	21,43	16,2
LS	0,75	21,51	16,2
LS	1	21,61	16,1
LS	2	21,91	16,1
LS	3	22,15	16
LS	4	22,31	15,9

Çizelge2.15. 28 günlük UCS deney sonuçları.

Kalsiyum ligno sülfonat(%)	Düşey gerilme (KPa)
0	276,11
0,5	381,12
0,75	397,74
1	347,89
2	339,93
3	318,70
4	297,22

Ta'neganbadi (2018) optimum kimyasal katkı yüzdesi olan %0,75 ve doğal zeminin 28 günlük serbest basınç numunelerine donma çözünme testi uygulamıştır. Bu test ülkemizde TS3449 standardında yapılmaktadır. Donma çözünme testi 2 saat -20 °C havada donma ve 1 saat 5 °C çözünmeden oluşmaktadır. Yapılan bu iki adım bir döngü olarak adlandırılmaktadır. Bu döngüler gerçekleştirilen zemin numunelerine serbest basınç değerleri okuması yapılır ve değerlerdeki değişimler gözlenir. Bu deneyin amacı doğal şartlarda iklim değişikliğinden dolayı zeminde yapılan işlemdeki değişimler gözlenmektedir. Böylelikle sahada yapılan iyileştirmenin doğa şartlarına göre dayanımı test edilmektedir [23].

Çizelge 2.16. Donma çözünme döngüsünde serbest basınç mukavemeti değişimi

Donma çözünme döngüsü	Serbest basınç değeri (KPa)	
	Doğal zemin	%0,75 Ls katkılı zemin
0	276,21	397,74
1	246,84	329,13
2	200,17	311,30
3	183,62	293,10
4	118,53	214,81

Yapılan çalışmalar sonucunda ligno sülfonat ve doğal zemin numunesi karışımının zemin numunesinin mühendislik özelliklerinde pozitif bir etki yarattığı gözlemlenmiştir [23].

Noorzad ve Ta'negonbadi (2018) çalışmalarında Amol şehrinden alınan killi bir zemini % 0,75 ligno sülfonat katkısı kullanarak numunenin şişme ve konsolidasyon değişimlerini gözlemlenmişlerdir. Plastik limitte önemli bir değişim olmazken, likit limit %55'ten %39'a değerine ulaşarak likit limitte yaklaşık %30'luk bir iyileşme meydana getirmiştir. Bu likit limitteki düşüş neticesinde plastisite indisinde %15'lik bir azalmaya neden olmuştur. Şişme oranı %2,59'dan %1,75 düşmüştür. Katkısız zemine de konsolidasyon kat sayısı $7,92 \times 10^{-4}$ cm²/s iken ligno sülfonat ile iyileştirilen zeminde konsolidasyon kat sayısı $6,12 \times 10^{-4}$ cm²/s değerini elde etmişlerdir [24].

Chen ve diğeri (2014) çalışmalarında ligno sülfonat ile kumlu silt ile zeminin iyileştirilmesi ile ilgili araştırmalar yapmıştır. Araştırmaları sonucunda optimum ligno sülfonat oranını %2 olarak tespit etmiştir ve üç eksenli test için bu oranı kullanmıştır. Esneklik modülü 1000 döngü için ligno sülfonat ile iyileştirilen toprak doğal zemin numunesine kıyasla artmıştır [25].

Chen ve diğeri (2014) ligno sülfonat ile kesme kuvvetindeki değişimleri incelemek için doğal zemin olarak kumlu silt (%49 silt ve %42 kum ve %9 kil) ve ligno sülfonat (%0,5-1-2-3-4) oranında katkı ile optimum su oranında karıştırılmıştır. Optimum ligno sülfonat oranı %2 olarak tayin edilmiştir. %2 ligno sülfonat değerine kadar serbest basınç değeri (UCS) doğal zemin numunesine göre önemli ölçüde artış göstermiştir. CU ve CD testlerinde sapma gerilimi ($\epsilon = \%25$) ligno sülfonat katkısı katılmış topraklarda doğal zemin numunesine göre 9 kPa'dan fazla arttığı tespit etmişlerdir [26].

Chen ve diğeri (2014) ligno sülfonat katkısı ile kumlu siltin davranışları üzerine teorik bir çalışma yapmışlardır. Ligno sülfonat katkısı katılmış doğal zemine serbest basınç testi (UCS) üç eksenli konsolidasyonlu ve drenajsız (CU) ve konsolidasyonlu ve drenajlı CD kesme testleri doğal zemine ve ligno sülfonat katkılı zemine yapılmıştır. Yapılan testler optimum ligno sülfonat oranı olarak belirlenen %2 için yapılmıştır. CU ve CD test sonuçlarında iyileşme sağlanmıştır. Eş değer konsolidasyon gerilme/akma gerilim yaklaşık %10 seviyesindedir [27].

Chen ve diğeri (2015) yaptıkları çalışmalarda kullandıkları doğal zemin kumlu silttir. Doğal zemin ve ligno sülfonat karışımında optimum değer olarak %2 değerini tespit etmişlerdir. Artan çevrim sayısı ile histerik döngü değişiklikleri sonucunda $N > 40.000$ esneklik modülü (M_r) azalmış. En yüksek M_r değeri %2 ligno sülfonat ve kumlu silt karışımında elde edilmiştir. M_r değeri artarken döngüsel stres oranı (CSR) azalmıştır [28].

Liang ve diğeri (2020) yaptıkları çalışmada doğal zemin örneği olarak kumlu toprak kullanmışlardır. Doğal zemin numunesinin iyileştirilmesi için üç farklı katkı maddesi kullanmışlardır. Bu katkı maddeleri sodyum silikat, ligno sülfonat ve sodyum poliakrilattır. Ligno sülfonat için kritik kesme gerilimi (CSS) deki artış oranı %23,2 ve erozyon endeksindeki artış oranı (ERI) %43,8 olarak belirlenmiştir [29].

Alazigha ve diğeri (2017) yaptıkları çalışmalarda doğal zemin olarak sitli kil kullanmışlardır. Ligno sülfonat katkısı ile karıştırılan doğal zemin numunelerini

mikroskobik olarak incelemişlerdir. İncelemeleri sonucunda şişmenin su miktarı ile yakından ilişkili olduğu görülmüştür. Ligno sülfonatın hidrofobik özelliğinden dolayı su geçirimsizlik artmıştır ve bu durumda şişme derecesinde azalma gerçekleşmiştir [30].

Alazigha ve diğerleri (2016) yaptıkları çalışmada kullandıkları doğal zemin numunesi siltli kildir (% 9 kum, % 53,6 silt, % 36 kil ve % 1,4 diğer) bu doğal zemin numunesini ligno sülfonat katkısı katılarak şişme davranışındaki değişimleri incelemişlerdir. Optimum ligno sülfonat oranı % 2 olarak belirlenmiştir. Ligno sülfonatın eklenmesinden sonra likit limit % 91 den % 76 ya düşmüştür. Plastik limitte az bir artış olmuştur ancak plastisite indisinde % 52 den % 32 ye bir düşüş meydana gelmiştir. Parçacık boyutu dağılımında ise kil boyutlu parçacıkların oranı % 36'dan % 20 ye düşmüştür. % 2 oranında ligno sülfonat ile karıştırılan zemin numunelerinde şişme değeri % 6'dan % 4,6'ya düşmüştür. Doğal zemin numunesinin şişme basınç büyüklüğü 105 kPa olarak ölçüldü ancak % 2 LS'den sonra 84 kPa değerine düşmüştür. % 2 LS katkı oranından sonra ise şişme yüzdesi artmıştır. Sonuç olarak Ligno sülfonat katkısı katılan zemin örneklerinde nem içeriğini azalttığı ve dolayısıyla zemin numunesinin şişme potansiyelini düşürdüğünü tespit etmişlerdir [31].

Indraratna ve diğerleri (2013) yaptıkları çalışmada kumlu ve siltli bir zemin numunesinin erozyon değerini belirlemek için teorik bir modelleme yapmışlardır. Erozyon parçacıkları arasındaki bağların oluşmasıyla başlar zemin parçacıklarına uygulanan hidrodinamik gerilmeler tarafından kırılır. Ligno sülfonat katkı oranı olarak % 0,2-0,6-1,2 oranları seçilmiştir. Ligno sülfonat işlem görmüş siltli kumlu doğal zeminin gerilme şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesi için kesme deneyleri yapılmıştır deneyler sonucunda görmüşlerdir ki kesme mukavemeti orta derecede artmıştır. Bu artışa bağlı olarak birim hacim başına pike kadar olan gerilme enerjisi artmıştır. Araştırmada Ligno sülfonat ve kumlu silt karışımında etkili bir iyileştirme yöntemi olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul sonucunda mühendislerin inşaat sahasında zemindeki erozyonu ortadan kaldırmak için zemine karıştırılacak ligno sülfonat miktarının belirlenmesinde rol oynar [32].

Vijayan ve Sasikumar (2019) yaptıkları çalışmada kaolin kilini ligno sülfonat ile stabilizasyonu üzerine çalışmalar yapmışlardır. Optimum ligno sülfonat katkı yüzdesi % 4 olarak belirlemişlerdir. Ligno sülfonat ilavesi ile likit limit azalırken plastik limit değerinde artış gözlemlenmiştir [33].

Athukorala (2013) yaptığı çalışmada doğal zemin numunesi olarak siltli kum kullanmıştır. Yaptığı çalışmada geleneksel katkı malzemelerini (kireç, uçucu kül, cüruf, vb.) katkı malzemelerini çevresel sorunlara (toprağın ve yer altı suyunun pH değişikliğinden dolayı tarımsal ve su ürünleri yetiştiriciliği, vb.) yol açtığından dolayı kullanmamıştır. Bu doğrultuda ligno sülfonat erozyona ve dağılabilir zeminlerin iyileştirmesinde umut verici bir katkı olduğu kanaat getirmiştir. Yapılan karışımlarda ligno sülfonat oranı % 0,2-1,2 arasında değişen katkı oranları kullanılmıştır. Yapılan kesme testlerinde artan ligno sülfonat miktarı ile içsel sürtünme açısı kesme mukavemetininde arttığı gözlemlenmiştir. Hacimsel değişiklikler ise ligno sülfonat katkısı ile karıştırılan doğal zemin numunesinin ligno sülfonat katılmayan doğal zemin numunesine oranla daha az sıkıştığı gözlemlenmiştir [34].

Mathew ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada doğal zemin numunesi olan deniz kilini(% 1 kum,% 36 silt, % 63 kil) çimento ve sodyum ligno sülfonat katkısı ile iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Doğal zemin numunesi ile sodyum ligno sülfonat karışımı için optimum sodyum ligno sülfonat oranı % 5 olarak tespit etmişlerdir. % 5 sodyum ligno sülfonat ile yapılan serbest basınç testlerinde (ucs) doğal zemin numunesine göre % 52.4 lük dayanım artışı görülmüştür. Elektriksel iletkenlik toprağın verimliliğini belirlemede önemli bir yöntemdir. % 5 Ligno sülfonat ile işlenen zeminin elektriksel iletkenliği 1500-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığındadır ve doğal zemin numunesi de 1500-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığındadır. Eklenen ligno sülfonat zeminin bitki örtüsü cinsinden verimliliğini neredeyse değiştirmemiştir. İdeal elektriksel iletkenlik ise 1800-2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığındadır [35].

Konnur ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada doğal zemin olarak killi bir zemin kullanmışlardır. Katkı maddesi olarak gölet külü ve sodyum ligno sülfonat kullanmışlardır. Gölet külü için % 0-6-12-18-24 oranlarında sodyum ligno sülfonat ise % 1-2-3-4 oranlarında standart proktor testine tabi tutulmuştur. Yapılan testler sonucunda doğal zemin numunesi ile karıştırılan gölet külü için optimum değer olarak % 18 değeri sodyum ligno sülfonat için ise % 2 değerini bulmuşlardır. Tespit edilen optimum gölet külü ve ligno sülfonat oranları için maksimum kuru birim hacimler sırasıyla 1,55 gm/cm^3 , 1,61 gm/cm^3 su muhtevaları ise sırasıyla % 24 ve % 22 olarak tespit edilmiştir. % 22 su muhtevası oranlıdaki doğal zemin numunesi optimum gölet külü oranı ve % 1-2-3-4 oranında katılan sodyum ligno sülfonat oranı ile karıştırıldığında görülmüştür ki karışımda elde edilen maksimum kuru birim hacim değerleri % 2 sodyum ligno sülfonatın

maksimum kuru birim hacim ağırlığını geçmemiştir. Bu bağlamda sodyum ligno sülfonat tek başına daha iyi sonuçlar vermiştir [36].

Vinod ve diğerleri (2012) yaptıkları çalışmalarda Ligno sülfonat katkısı ile karıştırılmış doğal zemin numunesinin elastisite modülü değerindeki değişimler için araştırma yapmışlardır. Minaralli montmorillonit içeren zemin numunelerine ligno sülfonat katkısı katıldığında E/qu modülün kırılma gerilmesinin azalmadan katkı ile arttığı görülmüştür. %1'den daha az çimento katılmış doğal zemin numuneleri ile kıyaslandığında ise E/qu modülünün ligno sülfonata benzer değişim gösterdiği gözlemlenmiştir [37].

Koohpeyma ve diğerleri (2013) lignosülfonatin kili kumlu zeminler üzerindeki erozyon oranına etkisini araştırmışlardır. Doğal zemin numunesi ligno sülfonat karışımı için ligno sülfonat katkı oranı olarak % 0,4-1-2-3 doğal zemin ligno sülfonat karışımları hazırlanmıştır. Doğal zemin numunesine eklenen % 3 ligno sülfonat erozyon katsayısını 0.01020 den 0.000017 değerine düşürür. Bu erozyon katsayısındaki azalış yüzdesel bazda % 99,83 lük yüksek bir düşüştür. Öte yandan doğal zemin numunesi ve ligno sülfonat karışımının doğal zemin numunesinin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası oranlarına çok fazla etkilemediği görülmüştür [38].

Vakili ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmada killi(% 45 kil,% 49 silt ve % 9 kum) bir doğal zemin numunesinin ligno sülfonat ve polipropilen elyaf katkıları katılmasıyla erozyon davranışındaki değişiklikleri incelemiştir. % 2 ligno sülfonat ve % 0,35 polipropilen elyaf doğal zemin numunesinin dağılılırlığını % 100 den %23 düşürmüştür. % 2 oranında tek başına kullanılan ligno sülfonat katkısı 7 ve 28 günde sırasıyla % 188 ve % 376 oranında mukavemet artışı göstermiştir. % 2 ligno sülfonat +% 0,35 polipropilen elyaf oranında karışımda kullanıldığında ise 7 ve 28 günde sırasıyla % 639 ve % 2541 oranında mukavemet artışı sağlamıştır. % 2 ligno sülfonat +% 0,35 polipropilen elyaf karışımı en düşük erozyon oranını vermiştir [39].

Vakili ve diğerleri (2017) ligno sülfonat ve elektroosmoz uygulaması ile yüksek oranda dağılan kilin iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. % 0,5-1-1,5 oranında ligno sülfonat ile karıştırılan doğal zemin numunesinin 7 günlük kür süresi sonucunda en düşük en düşük dağılım değerine % 1,5 ligno sülfonat karışımı doğal zemin numunesine göre % 57,88'lik bir düşüş ile % 30,87 değeri elde edilmiştir. Ligno sülfonat ve elektroosmoz uygulaması ile başlangıçtaki dispersiviteyi % 65 oranında azaltmayı başarmıştır. Yüksek dağılan kil dağılmayan kil sınıfına geçmiştir. UCS (Serbest basınç mukavemeti) ise doğal

zemine % 1,5 oranında ligno sülfonat katkısı uygulandığında UCS değerleri 1, 7 ve 28 günlük kür süreli sonucunda sırasıyla % 47,% 63 ve % 139 oranlarında mukavemet artışı sağlamışlardır. %1,5 oranında ligno sülfonat ve elektroosmoz uygulaması ile 1 günde UCS mukavemet değerinde % 131'lik bir artış gerçekleşti. Yapılan çalışmada görüldü ki elektroosmoz uygulaması sadece dağılılabirliği değil UCS değerinde arttırmaktadır [40].

Athukorala ve diğerleri (2013) ligno sülfonat katkısı ile karıştırılmış zeminin iç erozyon davranışının modellenmesi hakkında çalışma yapmışlardır. Doğal zemin numunesi olarak siltli kum kullanılmıştır. Doğal zemin ve ligno sülfonat karışımında ligno sülfonat oranı olarak % 0,1-0,2-0,4-0,6 oranları kullanılmıştır. Erozyon direnci toprak erozyonu katsayısı ve erozyonu başlatan kritik kayma gerilmesi şeklinde tanımlanmıştır. Artan ligno sülfonat miktarı ile kritik kayma gerilmesinin arttığı ve toprak erozyonu katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmada önerilen model laboratuvar deneylerinde benzer durumda ligno sülfonat ile karıştırılmış doğal zemin numunesinin erozyon davranışının hesaplanmasında yardımcı olmaktadır [41].

Alazigha (2015) yaptığı çalışmasında şişen zeminlerin şişme potansiyelini ve stabilizasyon mekanizmalarını denetlemede ligno sülfonatın etkisi üzerine araştırma yapmıştır. Şişme potansiyeli, zeminin yüzde şişmesi ve şişme basıncı cinsinden ele alınmıştır. Doğal zemin ve ligno sülfonat karışımında optimum ligno sülfonat oranı % 2 olarak tespit edilmiştir. % 2 ligno sülfonat ve doğal zemin numunesi karışımı sonucunda likit limit(LL) değeri % 96'dan % 51'e düştüğü plastisite indisinin (PI) ise % 51' den % 32'ye düştüğü pH değerinin ise 7,43 den 7,17 neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmiştir. %2 ligno sülfonat ve doğal zemin numunesi karışımında 7gün kür süresi sonucunda şişme oranı % 6,0'dan % 4,7'ye % 22'lik bir düşüş gerçekleşirken, şişme basıncında 105 kPa'dan 84 kPa'ya % 20 oranında düşüş gerçekleşmiştir. % 2 ligno sülfonat ve doğal zemin numunesi karışımının şişme oranı 7 günden fazla kür sürelerinden sonrada azalama göstererek uzun vadeli bir iyileştirme sağlayabileceğini kanıtlamıştır. Karşılaştırma için % 2 çimento katkısı ile hazırlanan özdeş numunede ise şişme oranında % 33 azalırken pH değeri artmış ve % 2 ligno sülfonat ile hazırlanan örneğe göre kırılma anında gevrek bir kırılma eğilimindedir. Laboratuvar testlerine göre ligno sülfonatın düşük şişen zeminler için iyi bir alternatif olduğu öne sürülmüştür [42].

Dajiang ve diğeri (2020) genişlemeye duyarlı topraklarda kullanılan kalsiyum ligno sülfonatın stabilizasyon mekanizması üzerine araştırma çalışması yapmışlardır. Doğal zemin olarak montmorillonit ve kaolin (% 13,7 silt, % 42,4 kil, % 43,9 kum) kullanılmıştır. Optimum kalsiyum lignosülfonat oranı % 4 olarak tayin edilmiştir. Doğal zemin numunesi % 4 kalsiyum ligno sülfonat ile karıştırıldığında 28 günlük serbest basınç dayanımında % 56,5'lik bir azalma ve şişme oranında % 23,8'lik bir azalma meydana gelmiştir. Doğal zemin numunesinin şişme oranı (genişleme testi diye çevirdi) % 2,1 olarak tespit edilmiştir. % 4 kalsiyum ligno sülfonat ile karıştırılan doğal zeminin şişme değeri % 1,6'dır bu değerinde % 23,8'lik bir azalmaya karşılık gelmektedir. Yapılan testler sonucunda kalsiyum ligno sülfonatın zemin parçacıkları arasında güçlü bir bağlantı oluşturup zemin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür [43].

Alazigha ve diğeri (2019) genişleyen zeminlerin stabilizasyonu için ligno sülfonatın potansiyel kullanımı üzerine araştırmalar yapmışlardır. Doğal zemin numunesi içerik olarak % 35,4 kil, % 55,6 silt ve % 10 kumdan oluşmaktadır. Doğal zemin ve ligno sülfonat karışım oranı ise %2 olarak uygulanmıştır. % 2 ligno sülfonat eklenen zeminin şişme yüzdesi % 23 azalmıştır. UCS (serbest basınç testi) 265 kPa'dan 285 kPa'ya % 7,5'lik bir artış göstermiştir. Çimento katkısı ile karşılaştırmak amacı ile % 2 oranında çimento eklenerek yapılan UCS testinde ise %10,6'lık bir yükselme sağlanmış ancak pH 7,43'ten 9,65'e yaşanan artış neticesinde betonarme ve çelik yapı sistemlerinin kullanım ömürlerinin azalmasına, yeraltı sularının kirlenmesine ve toprağa zarar verebilir. Ligno sülfonatın genişleyen zeminlerin stabilizasyonu alternatif bir katkı maddesi olarak kullanılabilir [44].

Vinod ve diğeri (2010) ligno sülfonat katkısı ile karıştırılmış kilin iç erozyon davranışı hakkında araştırma yapmışlardır. Doğal zemin numunesi dispersif kildir. Doğal zemin ligno sülfonat karışım oranları ise % 0,2-0,4-0,6 olarak kullanılmıştır. Erozyon testi sonuçları ligno sülfonatın doğal zemin ile karıştırılması sonucunda hidrolik kesme gerilme değerini artış yaşanmıştır bu artışa bağlı olarak zemin erozyonu kat sayısının azaldığı görülmüştür [45].

Ta'negonbadi ve Noorzad (2017) yaptıkları çalışmada ligno sülfonat kullanarak killi zeminlerin stabilizasyonu üzerine araştırma yapmışlardır. Doğal zemin numunesi olarak Amol şehriden alınan CH tipi bir killi zemin kullanılmıştır. Ligno sülfonat doğal zemin karışımlarında ligno sülfonat oranı % 0,5-0,75-1-2-3-4 olarak karışımlar hazırlanmış

testler sonucunda optimum ligno sülfonat oranı olarak % 0,75 belirlenmiştir. doğal zemin numunesine göre % 0,75 ligno sülfonat doğal zemin karışımı UCS (Serbest Basınç Testi) test sonuçları % 44 artış göstermiştir. Sekant modülü (E_{50}) ise %164 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. 4 adet ıslanma kuruma döngüsü sonucunda doğal zemin numunesi ve % 0,75 ligno sülfonat karışımının doğal zemin numunesinin mukavemet değeri 1.8 kat daha fazladır. Bu stabilizasyon yöntemi zeminin gevrek davranmasına yol açmadan rijitliğini ve UCS değerini arttırmıştır [46].

Sezer ve diğerleri (2016) yaptıkları çalışmalarında suyun ligno sülfonat ile kısmi yer değiştirmesi ile sıkıştırılmış kum-kil karışımlarının dayanım ve geçirgenliğini incelemiştir. Doğal zemin olarak bentonit ve kum karışımı kullanmışlardır. %2 ligno sülfonat ilavesi bentonitin sünekliğini az bir oranda arttırırken mukavemet artışı olarak karışımlar için, % 10 değeri ile sınırlandırmışlardır. Kum bentonit karışımına su ile birlikte % 0,5-1-2 oranında ligno sülfonat ilavesiyle mukavemetinde az bir artış sağlanmıştır. Suyun ligno sülfonat ile kısmen değiştirilmesi, mukavemet ve geçirgenlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bu etki, %1'e kadar artan ikame seviyesi için daha belirgindir. Suyun ligno sülfonat ile kısmi ikamesinin mukavemeti biraz arttırdığı ve geçirgenliği azalttığı ve ikame seviyesi arttıkça bu etkinin daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Ek olarak, test sonuçları ligno sülfonat ikamesinin optimum su içeriğinin kuru tarafında daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır [47].

Ta'negonbadi ve Noorzad (2018) çalışmalarında ligno sülfonatla stabilize edilmiş kilin fiziksel ve jeoteknik uzun vadeli özellikleri hakkında araştırma yapmışlardır. Doğal zemin numunesi olarak Amol şehrinden alınan CH tipi bir killi zemin kullanılmıştır. Ligno sülfonat eklenmesi ile zeminin fiziksel ve mukavemet özellikleri iyileşmiştir. Zeminin uzun vadeli iyileşmesi zemin parçacıkları arasındaki kohezyon değerinin 1 kPa'dan 7 kPa'ya yükselmesinden kaynaklanmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinde kilin ligno sülfonat ile iyileştirmesi sonucunda görülmüştür kilin parçacık bazında kümelenmiş olduğu ve bu kümelenmeye bağlı olarak kilin dayanımında artışa neden olmuştur [48].

Indraratna ve diğerleri (2012) ligno sülfonat ile işlenmiş zeminlerin kimyasal ve mineralojik davranışları üzerine araştırmalarda bulunmuşlardır. Zemin numunesi olarak CH sınıfı bir kil kullanmışlardır. UCS (serbest basınç testli) sonuçlarına göre ligno sülfonat ve zemin numunesi karışımı mukavemetinin ve kesme kuvvetinin ligno sülfonat

ve kür süresi ile arttığı görülmüştür. Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FTIR), Spektroskopisi ve Elektriksel İletkenlik (EC) analizleri sonucunda kil mineralojisine stabilizasyonunda önemli bir etkisi olduğu görülmüştür [49].

Indraratna ve diğerleri (2015) yaptıkları çalışmada ligno sülfonat ile işlenmiş siltli kumun kesme davranışı üzerine araştırmalar yapmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda doğal zemin numunesi ve ligno sülfonat karışımının kayma gerilmesinin arttığı gözlemlenmiştir. Sekant deformasyon modülü (Es) ise ligno sülfonat oranının artmasıyla lineer olarak artmıştır. Araştırmalar sonucunda ligno sülfonatın siltli kumu stabilize etmek için kimyasal katkı olarak kullanabileceğimiz çıkarımı yapılmıştır [50].

Fernandez ve diğerleri (2020) yaptıkları çalışmada kalsiyum ligno sülfonatın killi bir zeminin şişme potansiyeline olan etkisi hakkında araştırma yapmışlardır. Kalsiyum ligno sülfonat(CLS) ilavesinden sonra likit limit ve büzülme limit değerlerinde sırasıyla %50 ve % 24 oranında iyileşme sağlanmıştır. Kil ve % 3-5 oranında kalsiyum ligno sülfonat (CSL) karışımlarının sonucunda şişme potansiyelinde % 60 ile 70 arasında bir düşüş gerçekleşmiştir. Ancak % 3 CSL+kil karışımının sıkıştırılabilirliği %30 artarken % 5 CSL+ kil karışımının sıkıştırılabilirliği %30 azalmıştır. UCS (Serbest Basınç Testi) sonuçlarında görülmüştür ki kalsiyum ligno sülfonat (CSL) katkılı killin daha yüksek deformasyonlarda kırılmıştır. Kalsiyum ligno sülfonatın (CSL) kilin şişme potansiyelini azaltmada ve daha yüksek yükler altında kırılmasına sağlayarak killin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür [51].

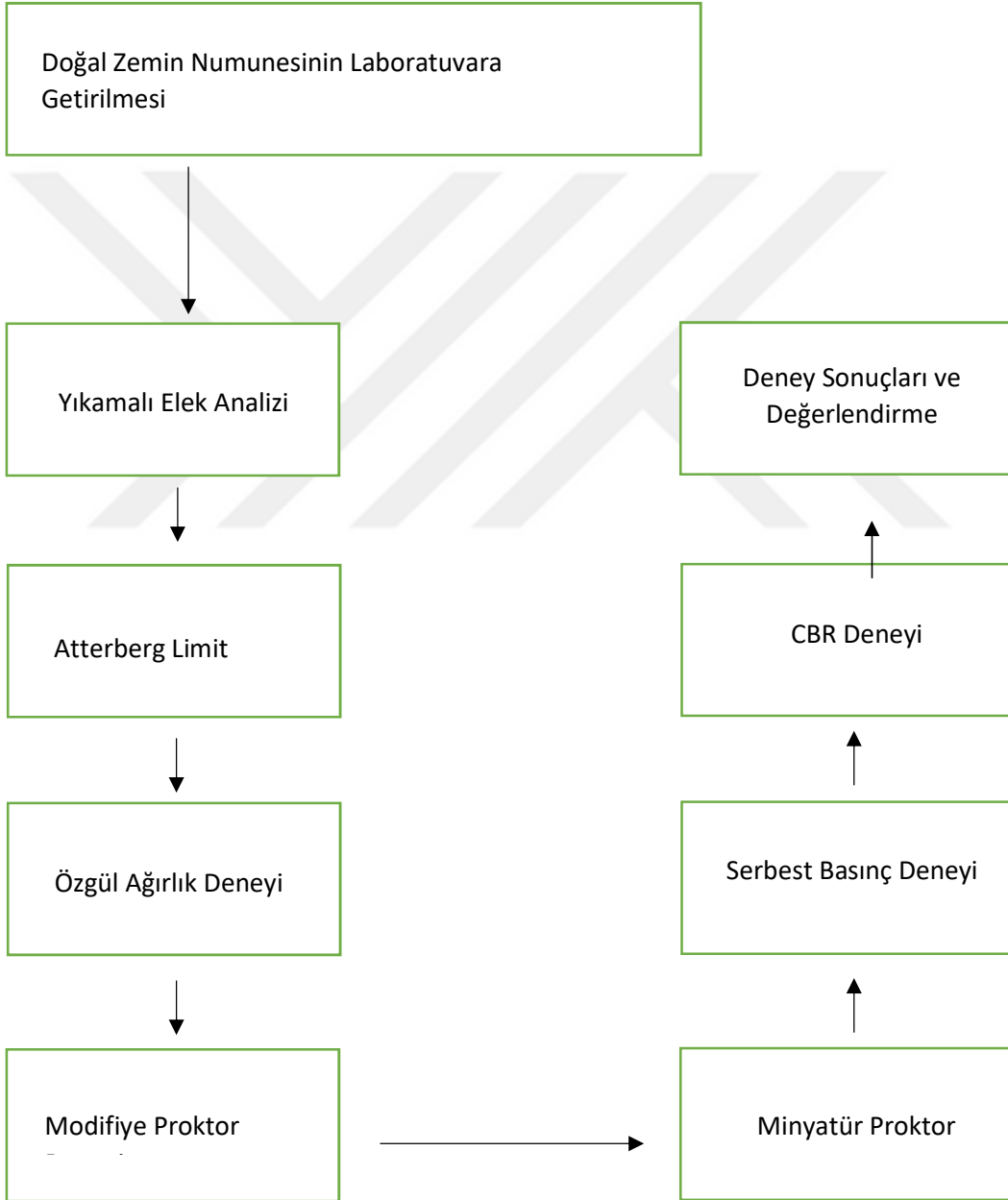
Noorzad ve Ta'negonbadi (2018) yaptıkları çalışmada ligno sülfonat ile stabilize edilmiş şişen kilin mekanik özellikleri hakkında araştırma yapmışlardır. Doğal zemin numunesi olarak CH sınıfı kil kullanmışlardır. UCS (Serbest Basınç Testi) ve kıvam limitleri testlerinden elde edilen sonuçlar optimum kil + ligno sülfonat karışımında ligno sülfonat oranı olarak % 0,75 olduğu belirlenmiştir. Zemine % 0,75 ligno sülfonat katılması ile LL değerinde büyük bir düşüş olmuştur ancak PL değerinde önemli bir değişim olmamıştır. LL deki düşüşe bağlı olarak PI değerinde önemli bir azalma sağlamıştır. Kilin şişme oranı ve basıncı % 0,75 ligno sülfonat ile karıştırılmasından sonra şişme oranı % 2,59'dan % 1,73'e şişme basıncı ise 33 kPa'dan 25 kPa'ya düşmüştür. Bu düşüş PL(Plastisite İndisi) değerindeki azalma yol açmıştır. Görülmüştür ki ligno sülfonat katkı maddesi ile killi zeminlerin stabilizasyonunda ve mühendislik özelliklerinin geliştirilmesinde alternatif olarak kullanılabilir [52].



3. AKIŞ DİYAGRAMI, YÖNTEM VE MALZEME

Bu bölümde tez araştırması kapsamında kullanılan akış planı, malzeme ve yöntemler anlatılmıştır.

3.1. Akış Diyagramı



Şekil 3.1. Tez kapsamında yapılan çalışmaların akış diyagramı

3.2. Kullanılan Malzemeler

Tez araştırması kapsamında Kırklareli ile Asilbeyli köyü arasında bulunan kil çömlek vb. ürünler üreten bir zanaatkarın kil hammaddesini çıkardığı alandan alınan killi zemin numunesi ve kil numunesinin iyileştirilmesi amacıyla kalsiyum ligno sülfonat katkısı kullanılmıştır.

3.2.1. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan zemin numunesi

Çalışmalar çerçevesinde iyileştirmeye çalışılan zemin numunesi, Asilbeyli köyü sınırı içerisinde kalan bir araziden alınmıştır. Zemine ait fotoğraf Resim 3.1.'de gösterilmiştir.



Resim 3.1. Asilbeyli köyünden alınan zemin numunesi.

Kırklareli Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarına getirilen zemin numunesinin bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Zemin numunesinin bazı fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Optimum Su Muhtevası	% 14
Mak. Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	18,12 (kN/m ³)
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,72 gr/cm ³
Likit Limit (%)	%51
Plastik Limit (%)	%19
Plastisite İndisi (%)	%32

3.2.2. Kalsiyum ligno sülfonat

Doğal zeminin iyileştirilmesi amacıyla katkı malzemesi olarak kalsiyum ligno sülfonat (C₂₀H₂₄Ca₁₀S₂) kullanılmıştır. Kalsiyum ligno sülfonat özelliğini kaybetmemesi için 25 kg paketler halinde paketlenmiş bir şekilde kuru bir ortamda saklanmıştır. Araştırmada kullanılan kalsiyum ligno sülfonatın fotoğrafı Resim 3.2’de ve fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.2. Kalsiyum ligno sülfonat

Çizelge 3.2. Kalsiyum ligno sülfatın fiziksel ve kimyasal özellikleri [53]

Cas Numarası	8061-52-7
Kimyasal Formülü	C ₂₀ H ₂₄ Ca ₁₀ S ₂
Renk	Kiremit rengi
Lignosulfonate içeriği	>%50 ~ 65
Ph	4-6
Suda Çözünme	≤ %0,5 ~ 1,5
Nem	≤%7
Moleküler Ağırlık(g/mol)	528,60656
Hidrojen Bağı Donör Sayısı	1
Hidrojen Bağı Alıcı Sayısı	10
Dönebilen Tahvil Sayısı	10
Tam Kütle(g/mol)	528,04368
Monoizotopik Kütle (g/mol)	528,04368
Topolojik Polar Yüzey Alanı	179 Å ²
Ağır Atom Sayısı	33
Karmaşıklık	732
Kovalent Bağlı Birim Sayısı	2
Kuru Madde	%95
Şeker	% 25
Kül	% 12
Çözünürlük	Suda kolay çözünür

3.3. Yöntem

Deneysel araştırma iki kademedeyapılmıştır. İlk kademedeylaboratuvara getirilen zemin numunesinin başlıca geoteknik özelliklerinin belirlenmesi ve sonrasında ise zemin numunesinin iyileştirilmesi ve iyileştirme sonuçlarına göre doğal zemin numunesinin mühendislik niteliklerindeki değişimler incelenmiştir.

3.3.1. Zemin numunesinin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi

Zemin numunesinin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneylerin tamamı ASTM standartlarına göre yapılmıştır. Tez kapsamında yapılan deneyler elek analizi, kıvam limitleri, hidrometre, özgül ağırlık, modifiye kompaksiyon, serbest basınç, kaliforniya taşıma gücü (CBR) deneyleri olarak sıralabilir.

3.3.1.1. Elek analizi

Zeminlerin dane dağılımına ve zemin sınıflarının belirlemek amacıyla ASTM D422 standardında uygun olarak yıkamalı elek analizi deneyi yapılmıştır [54].

Elek analizi testi doğal zemin numunesi en az 4 set yapılmıştır. Kuru zemin numunesinden 300-350 gr arasında doğal zemin örneği alınmıştır. Alınan örnekler öncelikle 200 numaralı elekte yıkanmıştır. Elekten akan su berraklaşınca kadar su altında eleme işlemine devame edilmiştir. Elek üstünde kalan zemin örneği 24 saat boyunca 105 °C sıcaklıktaki etüvde bekletilerek kurumaları sağlanmıştır. Elekler, elek analizi standardına uygun bir şekilde elek açıklıkları büyükten küçüğe doğru dizilerek eleme işlemi yapılmıştır. Dizilen eleklerin elek üstlerinde kalan numuneler tartılarak elde edilen verilerden dane dağılımı grafikleri çizilmiştir.

3.3.1.2. Kıvam limitleri

Kıvam limitleri ASTM D318 standardına göre yapılmıştır [55]. Kıvam limiti deneyi 40 numaralı elekten elendikten sonra elek altında kalan zemin numunesi kullanılarak yapılmıştır. Elek altında kalan zemin numunesine saf su eklenerek homojen bir şekilde karıştırılarak deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan homojen karışım Casagrande likit limit cihazı ile likit limit deneyi yapılmıştır. Homojen bir şekilde karıştırılmış zemin numunesinden bir miktar zemin örneği alınarak cam bir yüzeyde 3 mm kalınlığa kadar yuvarlanmıştır. 3 mm kalınlıktaki çubuklarda çatlama ve kopmalar başlamasından sonra likit limit değeri elde edilmiştir.

3.3.1.3 Özgül ağırlık

Zemin numunelerinin özgül ağırlıkları ASTM D854 standardında göre belirlenmiştir [56]. Zeminin özgül ağırlığı Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Doğal zemin numunesi için deney 6 tekrar şeklinde yapılmıştır.

$$G_s = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (3.1.)$$

m_1 = Piknometre ağırlığı.

m_2 = Piknometre + kuru numune

m_3 = Piknometre + kuru numune + su

m_4 = Piknometre + su

3.3.1.4. Kompaksiyon

Kompaksiyon deneyleri ASTM D698 standardına uygun bir şekilde 4,5 kg ağırlığındaki tokmak 45 cm yükseklikten 5 tabaka ve her tabakaya 25 vuruş düşürülmesi suretiyle yapılmıştır [23]. Kompaksiyon deneyi doğal zemin numunesine 3 tekrar olacak şekilde yapılmıştır.

3.3.1.5. Serbest basınç

Zemin numuneleri harward minyatür kompaksiyon kalıbında modifiye kompaksiyon enerjisi uygulanarak sıkıştırılmış ve serbest basınç numuneleri hazırlanmıştır. Zemin numuneleri anlık, 1 günlük, 7 günlük, 28 günlük, 90 günlük, 120 günlük ve 365 günlük kür süreleri için hazırlanmıştır. Her kür süresi için en az 4'er adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri kür süreleri sonunda serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur.

3.3.1.6. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)

Doğal zemin için kompaksiyon deneyi ile belirlenen optimum su muhtevasında hazırlanan zemin numuneleri CBR kalıplarına yerleştirilmiştir. Ardından anlık 1 günlük, 7 günlük, 28 günlük ve 186 günlük kür sürelerinde bekletilen zemin numuneleri 4 gün boyunca su içerisinde bekletilmiştir. Bu süreçte CBR numunelerindeki şişme miktarları ölçülmüştür. Şişme miktarı ölçülen CBR numuneleri 4 gün sonunda su içerisinden çıkartılmış ve CBR deneyine tabii tutulmuştur.

3.3.2. Zemin numunesinin kalsiyum ligno sülfonat ile iyileştirilmesi

Doğal zemin numunesinin özellikleri belirlendikten sonra zemin iyileştirme yapılmıştır. Serbest basınç dayanımı ve kaliforniya taşıma oranı deneyleri yapılarak iyileştirme sonucunda dayanım özelliklerinde meydana gelen farklılıklar incelenmiştir.

İyileştirme çalışmaları kapsamında doğal zemin numunesine zeminin kuru ağırlığının % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3, % 4 oranlarında kalsiyum ligno sülfonat katkısı katılmıştır. Farklı katkı yüzdelerinde ve farklı kür sürelerinde hazırlanan zemin numuneleri üzerinde kıvam limitleri, özgül ağırlık, kompaksiyon, serbest basınç dayanımı ve CBR deneyleri yapılmıştır.

3.3.2.1. Kıvam limitleri

Doğal zemin numunesine zeminin kuru ağırlığının % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3, % 4 oranlarında kalsiyum ligno sülfonat katkısı katılarak likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda kil numunesinin plastisite özelliklerindeki değişimler incelenmiştir.

3.3.2.2. Özgül ağırlık

Zemine kalsiyum ligno sülfonat eklenmesi sonucunda özgül ağırlık değerindeki değişimin incelenmesi amacıyla doğal zemin numunesine zeminin kuru ağırlığının % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3, % 4 oranlarında kalsiyum ligno sülfonat katkısı katılmıştır. Hazırlanan karışımlar üzerinde her bir katkı yüzdesi için en az 6 tekrar olacak şekilde özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

3.3.2.3. Kompaksiyon

Doğal zemin numunesine zeminin kuru ağırlığının % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3, % 4 oranlarında kalsiyum ligno sülfonat katkısı katılarak kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Katkılı ve katkısız zeminler üzerinde yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki değişimler incelenmiştir.

3.3.2.4. Serbest basınç

Serbest basınç deney numuneleri doğal zemin numunesine zeminin kuru ağırlığının % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3, % 4 oranlarında kalsiyum ligno sülfonat katkısı katılarak hazırlanmıştır. Katkılı zeminler kompaksiyon deneyi ile belirlenen optimum su muhtevası

değerleri kullanılarak harward minyatür kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan zemin numuneleri anlık, 1 günlük, 7 günlük, 28 günlük, 90 günlük, 120 günlük ve 365 günlük kür süreleri için en az 4'er numune olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri kür süreleri sonunda serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur.

3.3.2.5. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)

CBR deney numuneleri doğal zemin numunesine zeminin kuru ağırlığının % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3, % 4 oranlarında kalsiyum ligno sülfonat katkısı katılarak hazırlanmıştır. Kompaksiyon deneyi ile belirlenen optimum su muhtevasında hazırlanan zemin numuneleri CBR kalıplarına yerleştirilmiştir. Ardından anlık 1 günlük, 7 günlük, 28 günlük ve 186 günlük kür sürelerinde bekletilen zemin numuneleri 4 gün boyunca su içerisinde bekletilmiştir. Bu süreçte CBR numunelerindeki şişme miktarları ölçülmüştür. Şişme miktarı ölçülen CBR numuneleri 4 gün sonunda su içerisinden çıkartılmış ve CBR deneyine tabii tutulmuştur.

3.3.2.6. SEM görüntüleri

Doğal ve % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3, % 4 kalsiyum ligno katkılı zeminlerin mikro yapıdaki değişimlerinin incelenebilmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri 1000, 5000, 10000 ve 20000 kat olmak üzere farklı yakınlaştırma değerleri için alınmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular bu bölümde sunulmuştur. İlk olarak zeminin bazı fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar sonucunda belirlenen zeminin geoteknik özellikleri verilmiştir. Ardından zemin numunesine farklı oranlarda kalsiyum ligno sülfonat katılarak zemin numunesinin geoteknik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler sunulmuştur.

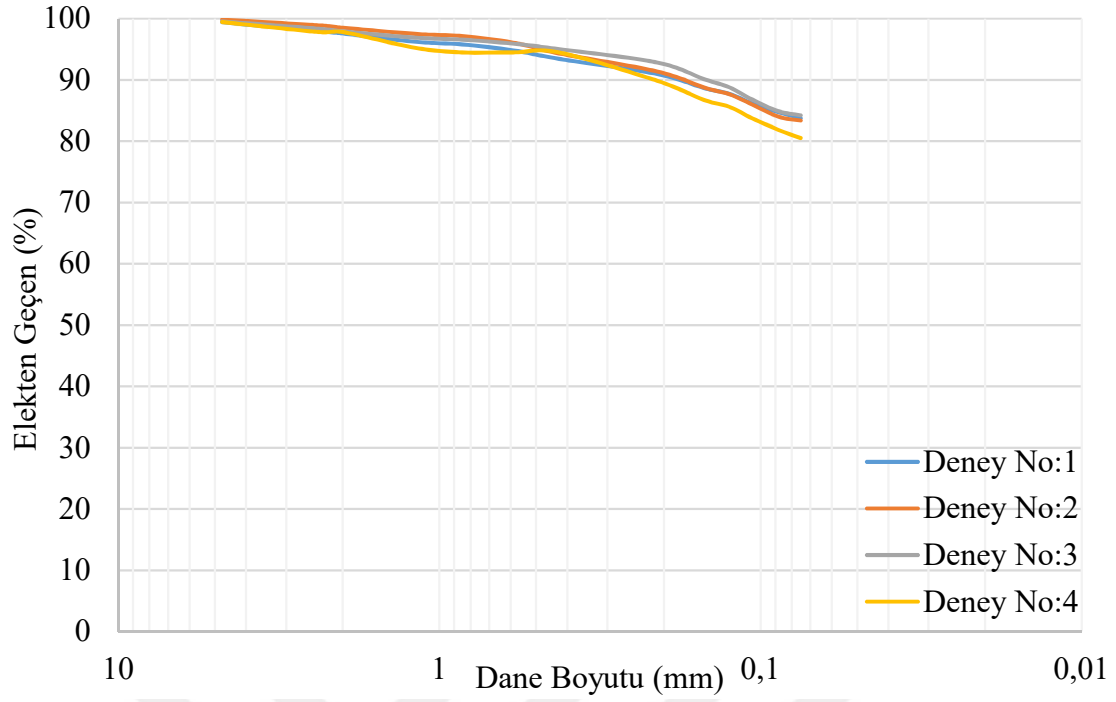
4.1. Katkısız Zemin Numunesine Ait Deney Sonuçları

Kırklareli ili Asilbeyli köyünde bulunan bir araziden temin edilen zemin numunesinin geoteknik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla zemin numunesine Kırklareli Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bir dizi deney yapılmıştır. Yapılan bu deneyler sırasıyla elek analizi, kıvam limitleri, hidrometre, özgül ağırlık ve kompaksiyon deneyleridir. Bu kısımda sırasıyla zemin numunesine yapılan deneyler ve deneyler sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

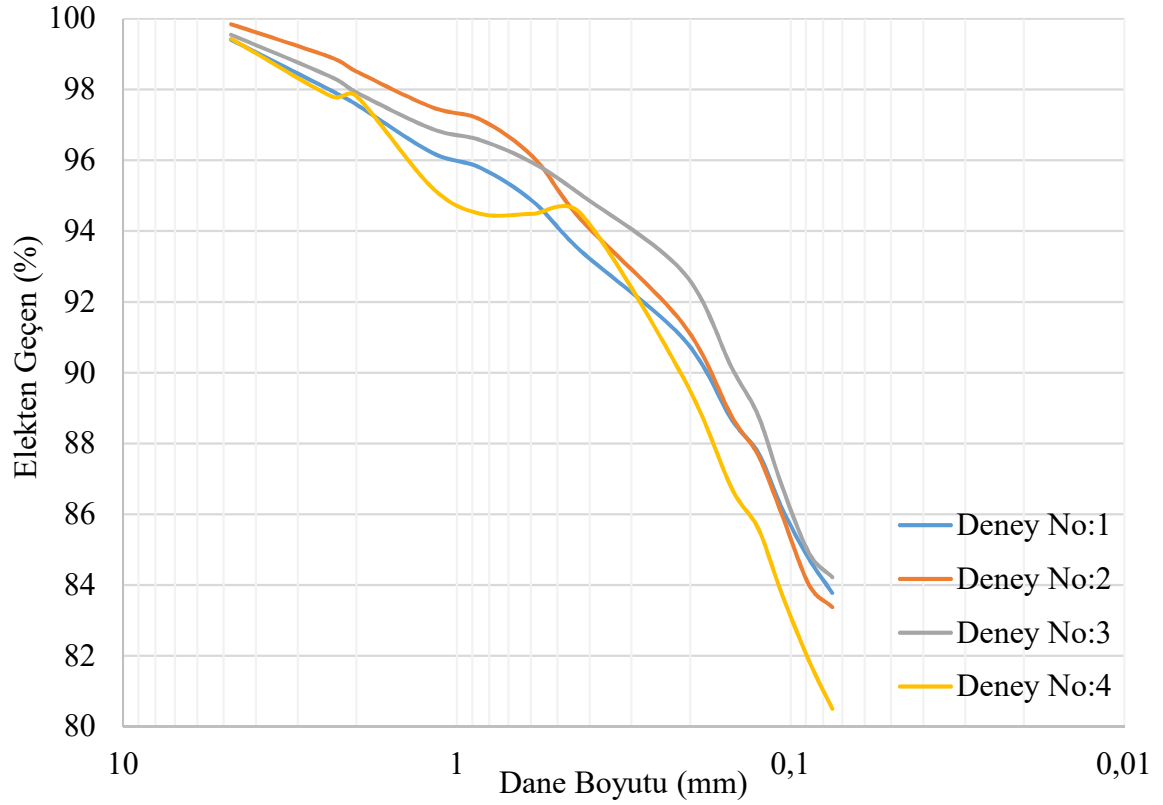
4.1.1. Elek analizi

Deneysel çalışmada kullanılacak zemin numunesinin dane dağılımının belirlenebilmesi amacıyla elek analizi deneyleri yapılmıştır. Araziden temin edilen zemin numuneleri laboratuvara çuvallara doldurularak getirilmiştir. Zemin numunelerinin aynı özellikleri temsil edip etmediğini belirleyebilmek amacıyla rasgele seçilen 4 çuvaldan alınan zemin numuneleri üzerinde elek analizi deneyi yapılmıştır.

Yapılan elek analizleri sonucunda elde edilen granülometri eğrileri Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de verilmiştir. Şekil 4.1.'de yüzde olarak elekten geçen malzeme miktarı 0 ile 100 arasında gösterilirken, Şekil 4.2.'de ise eğrilerin daha detaylı görülebilmesi amacıyla 80 ile 100 arasında gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi.



Şekil 4.2. Elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi (detaylı görünüm)

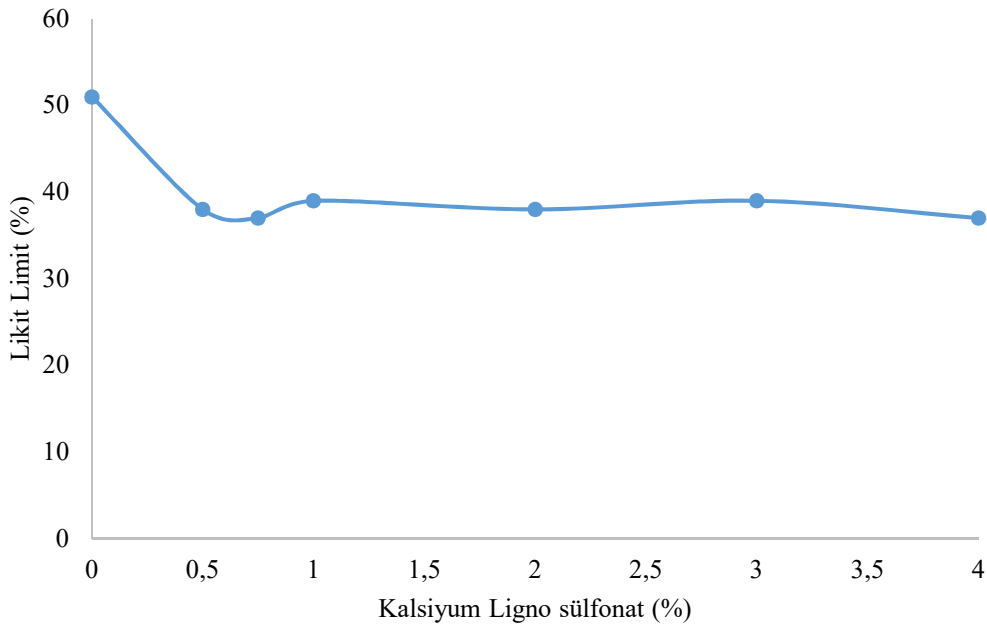
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilen grafikler incelendiğinde tüm deneylerin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmekle beraber Deney No:1, Deney No:2 ve Deney No:3’ün birbirlerine daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. İlk 3 deney sonucuna göre zemin içerisindeki inceler oranı %83,5 ile % 84,5 aralığında değişirken 4.deney sonucunda bu değer % 80,5 olarak bulunmuştur.

4.1.2. Kıvam limitleri

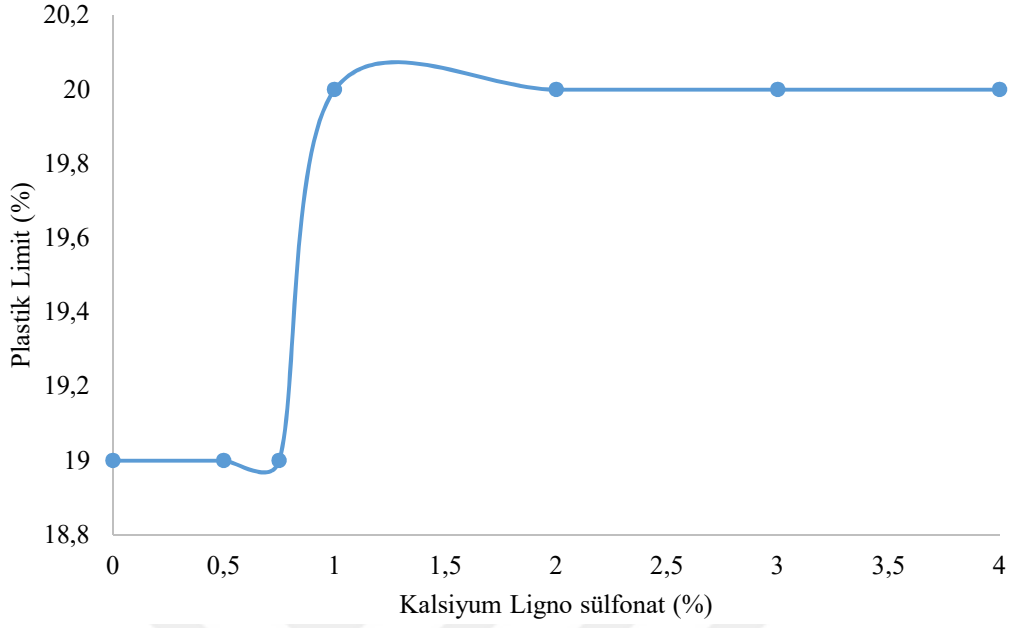
Zemin numunesine katkısız ve farklı oranlarda kalsiyum ligno sülfonat katılarak zemin numuneleri likit limit ve plastik limit deneylerine tabi tutulmuştur.

Kıvam limitlerinde meydana gelen değişimlerin incelenmesi amacıyla zemin numuneleri üzerinde ilk olarak herhangi bir katkı katılmadan deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda doğal numunenin likit limit değeri %51, plastik limit değeri %19 ve plastisite indisi %32 olarak bulunmuştur.

Katkısız numune üzerinde yapılan çalışmalardan sonra zemin numunesine sırasıyla zeminin kuru ağırlığının % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3 ve % 4’ü oranlarında kalsiyum ligno sülfonat eklenmiştir. Mümkün olduğunca homojen bir karışım elde etmek amacıyla karışıma su ilave edildikten sonra karışım yaklaşık 1 saat boyunca spatula yardımıyla karıştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerindeki değişimler sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te verilmiştir.

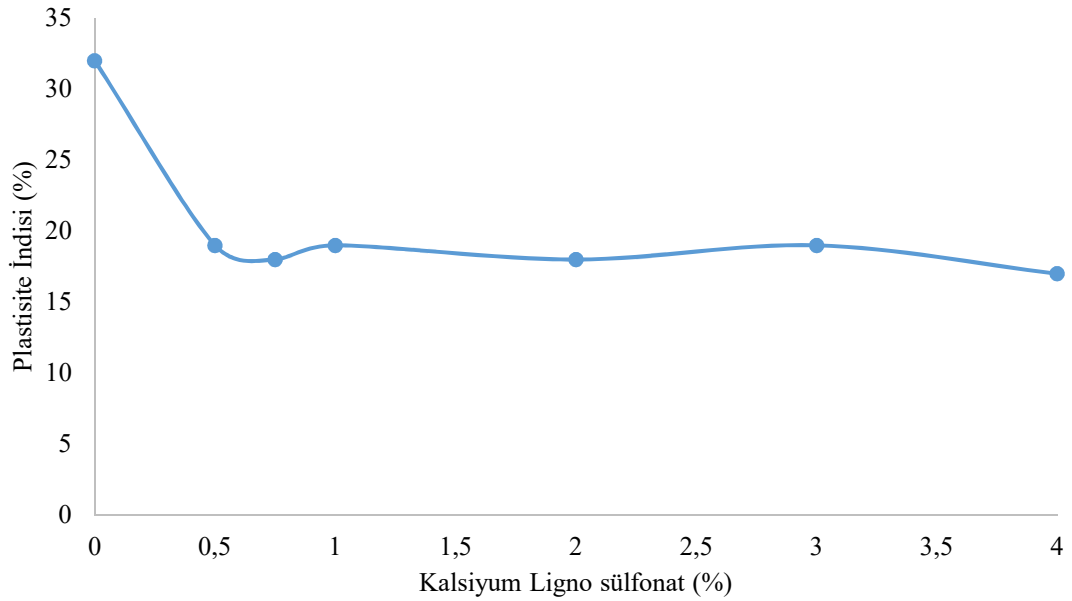


Şekil 4.3. Kalsiyum Ligno sülfonat katkısının artmasıyla likit limit değerindeki değişim.



Şekil 4.4. Kalsiyum Ligno sülfonat katkısının artmasıyla plastik limit değerindeki değişim.

Şekiller incelendiğinde zemine kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda likit limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma eğilimi, plastik limit değerinde ise artış eğilimi meydana geldiği açık olarak görülmektedir.

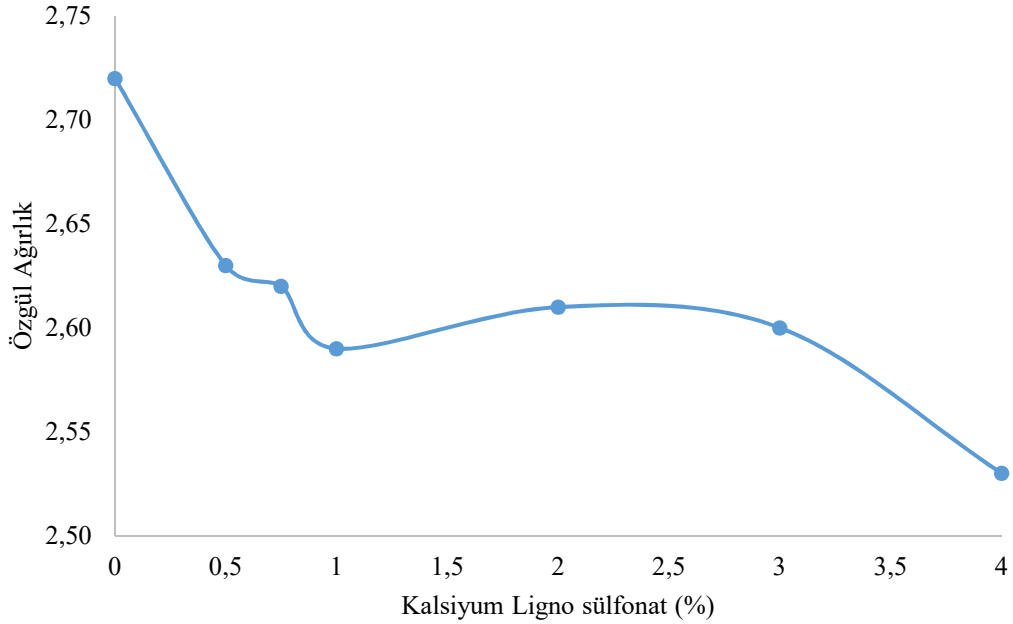


Şekil 4.5. Kalsiyum Ligno sülfonat katkısının artmasıyla plastisite indisi değerindeki değişim.

4.1.3. Özgül ağırlık

Zemine farklı oranlarda kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda zeminin özgül ağırlığındaki değişimin incelenmesi amacıyla özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

İlk olarak zemine herhangi bir katkı katılmadan katkısız zeminin özgül ağırlık değeri belirlenmiştir. Ardından zemin numunesine 6 farklı oranda kalsiyum ligno sülfonat katılarak katkılı zeminlere ait özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir. Özgül ağırlık deneyleri katkılı ve katkısız zemin numuneleri için 6 tekrar olacak şekilde yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.6.'da grafik olarak sunulmuştur.

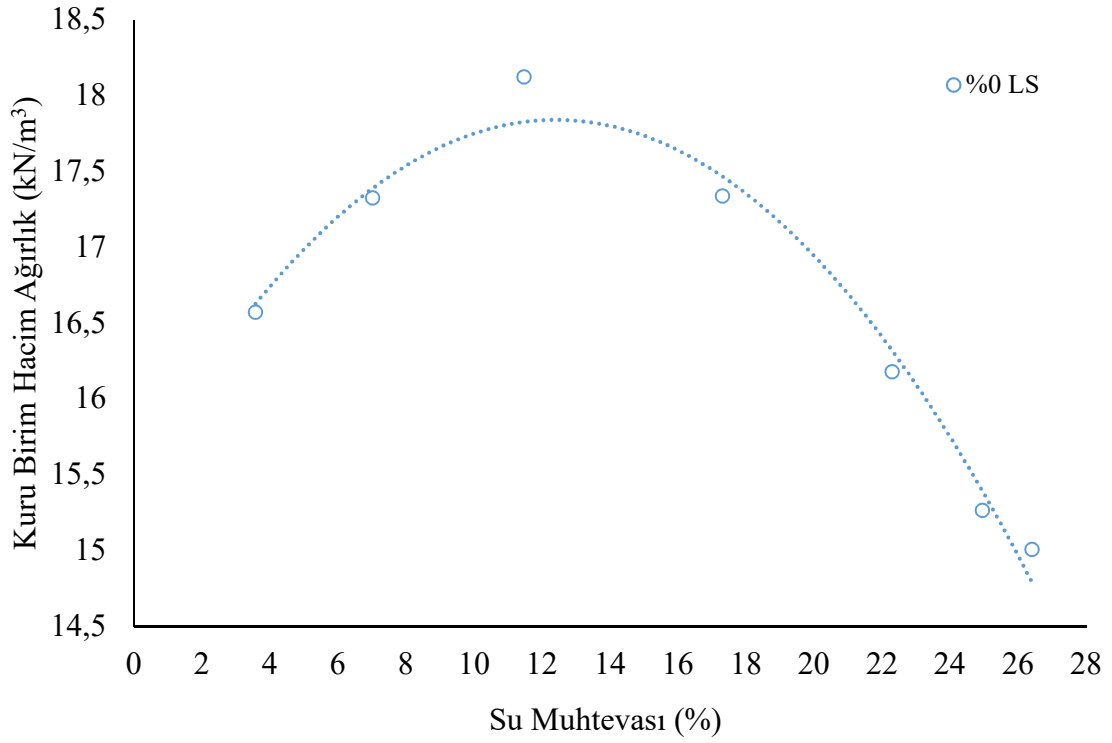


Şekil 4.6. Kalsiyum Ligno sülfonat katkısının arttırılması ile özgül ağırlık değerindeki değişim.

Şekil 4.6.'da her bir katkı yüzdesi için tekrarlan 6 özgül ağırlık deneyinin ortalamaları verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi zemine kalsiyum ligno sülfonat katkısının katılması ile birlikte özgül ağırlık değerlerinin azaldığı görülmektedir.

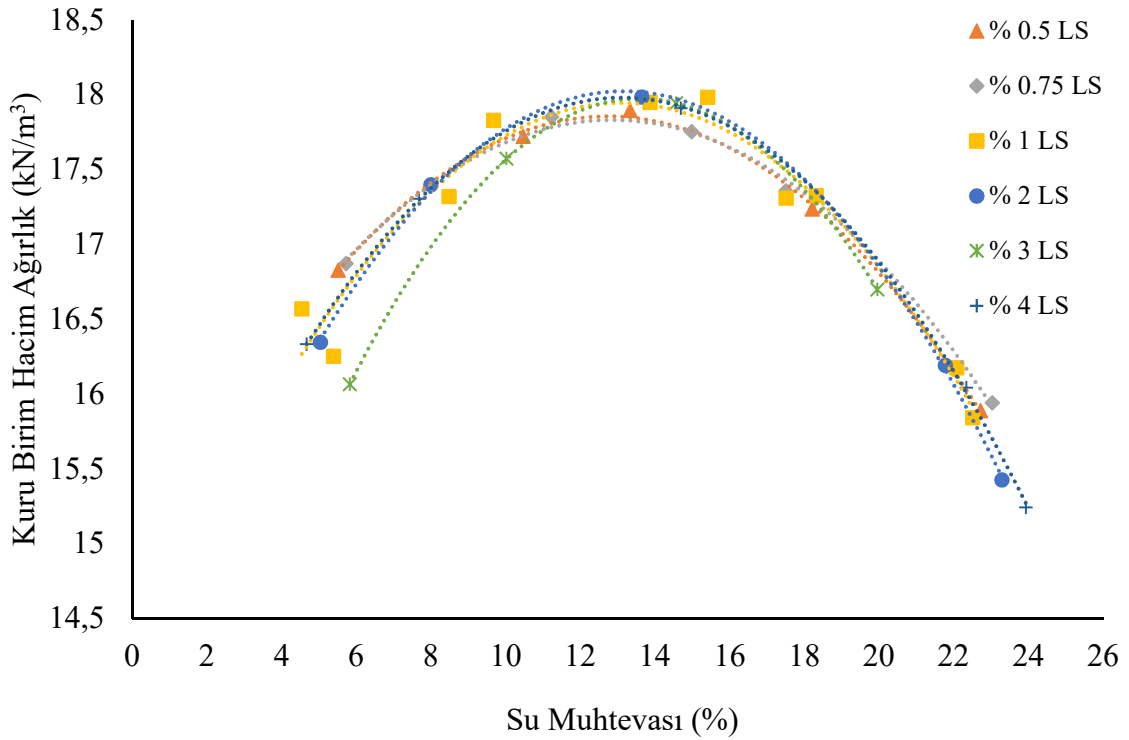
4.1.4. Kompaksiyon

Zemin numunesine ait optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının belirlenebilmesi amacıyla kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Zeminin ilk olarak katkısız durumu için kompaksiyon özellikleri belirlenmiştir. Katkısız zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi Şekil 4.7.'de verilmiştir.



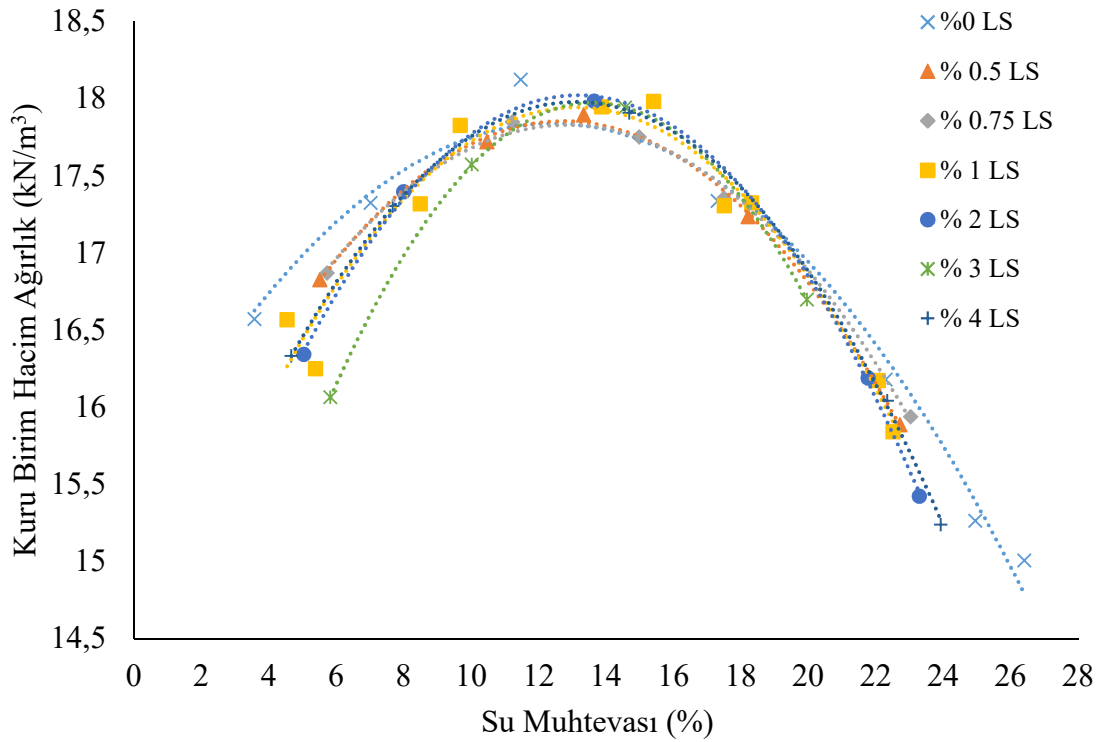
Şekil 4.7. Katkısız zemin numunesi için kompaksiyon eğrisi.

Farklı oranlarda kalsiyum ligno sülfonat katılan zeminler üzerinde yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 4.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Kalsiyum Ligno sülfonat katkılı zemin numuneleri için kompaksiyon eğrisi.

Şekil 4.9.'da katkısız ve katkılı zemin numuneleri için elde edilen kompaksiyon eğrileri tek bir grafik halinde sunulmuştur. Grafik incelendiğinde katkılı numuneler için maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerlerinde bir miktar artış, optimum su muhtevası değerlerinde ise bir miktar artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca zemin numunesine kalsiyum ligno sülfonat katılması ile birlikte kompaksiyon eğrisinin kollarında bir daralma meydana geldiği görülmektedir.



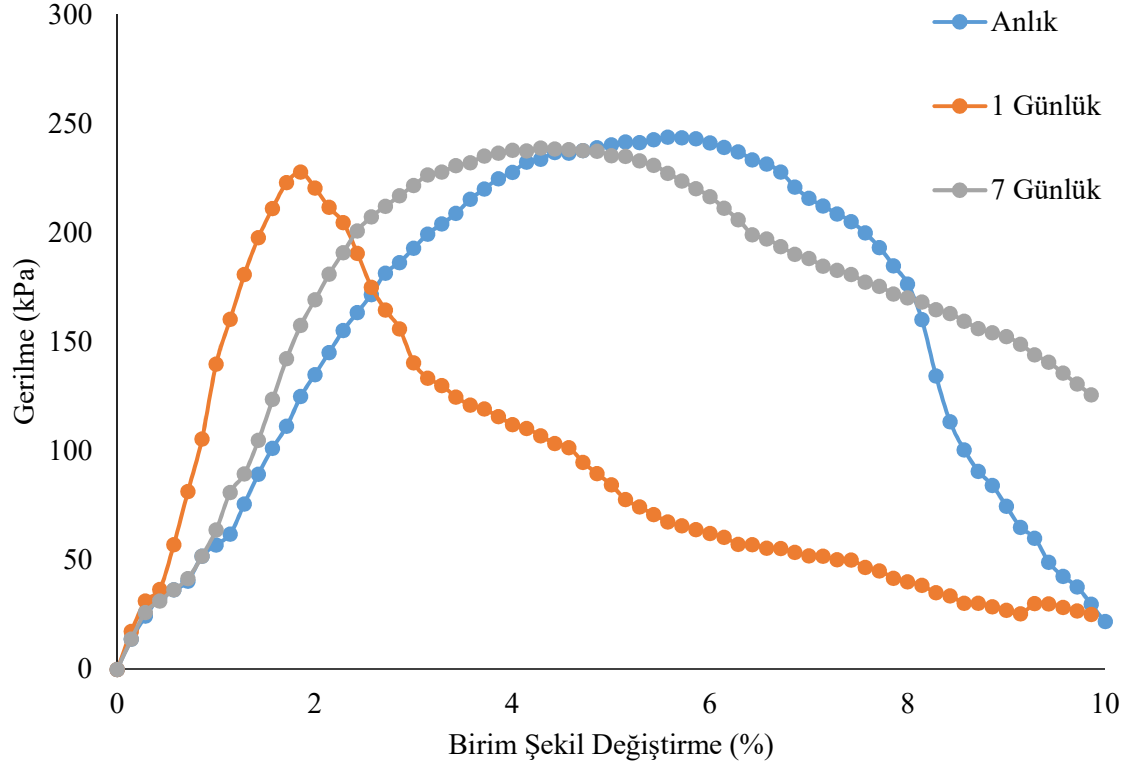
Şekil 4.9. Katkılı ve katkısız zemin numuneleri için kompaksiyon eğrisi.

4.1.5. Serbest basınç deneyi

Zemine kalsiyum ligno sülfonat karıştırılması sonucunda dayanım değerlerindeki değişimin incelenmesi amacıyla serbest basınç deney sonuçları incelenmiştir. Zemine katkı katılması ile meydana gelen değişim miktarının ölçülebilmesi için ilk olarak katkısız deney numuneleri üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Ardından ise zemine farklı oranlarda kalsiyum ligno sülfonat katılmış ve farklı kür sürelerinde (anlık, 1 günlük, 7 günlük, 28 günlük, 90 günlük, 120 günlük ve 365 günlük) kür edilerek serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur.

Serbest basınç numuneleri kompaksiyon deneyi yardımıyla bulunan optimum su muhtevaları kullanılarak Harvard kompaksiyon cihazı kullanılarak hazırlanmıştır.

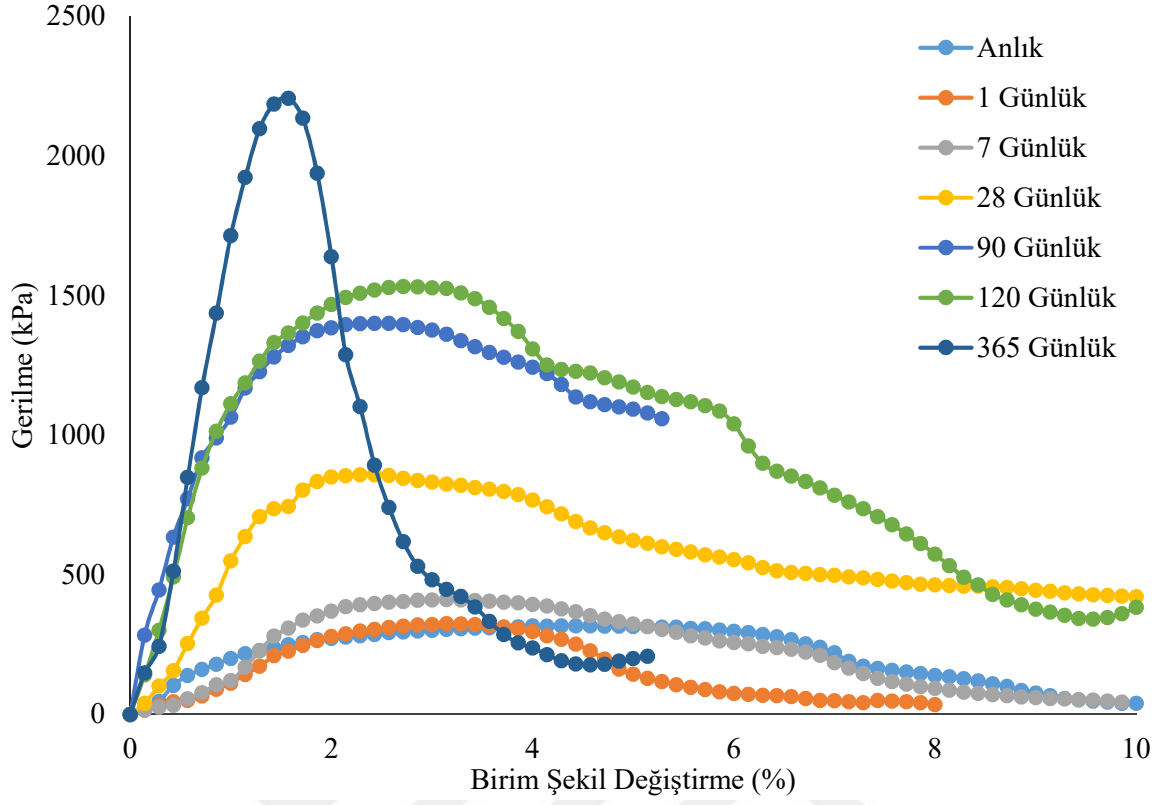
Şekil 4.10.'da katkısız zemin numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir.



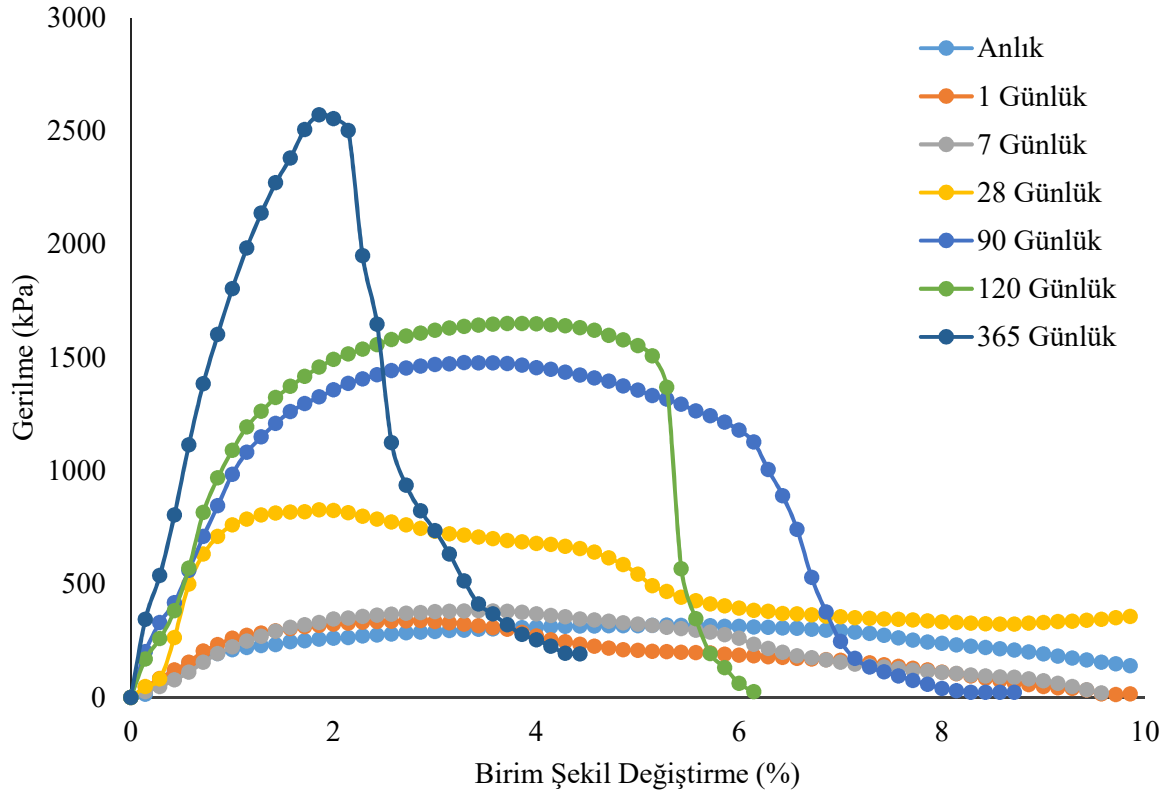
Şekil 4.10. Katkısız zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.

Şekil 4.10.'da görüldüğü üzere yapılan 3 deney sonucu da birbirine yakın değerler vermiştir. Serbest basınç dayanımı katkısız zemin numunesi için ortalama 226 kPa olarak bulunmuştur.

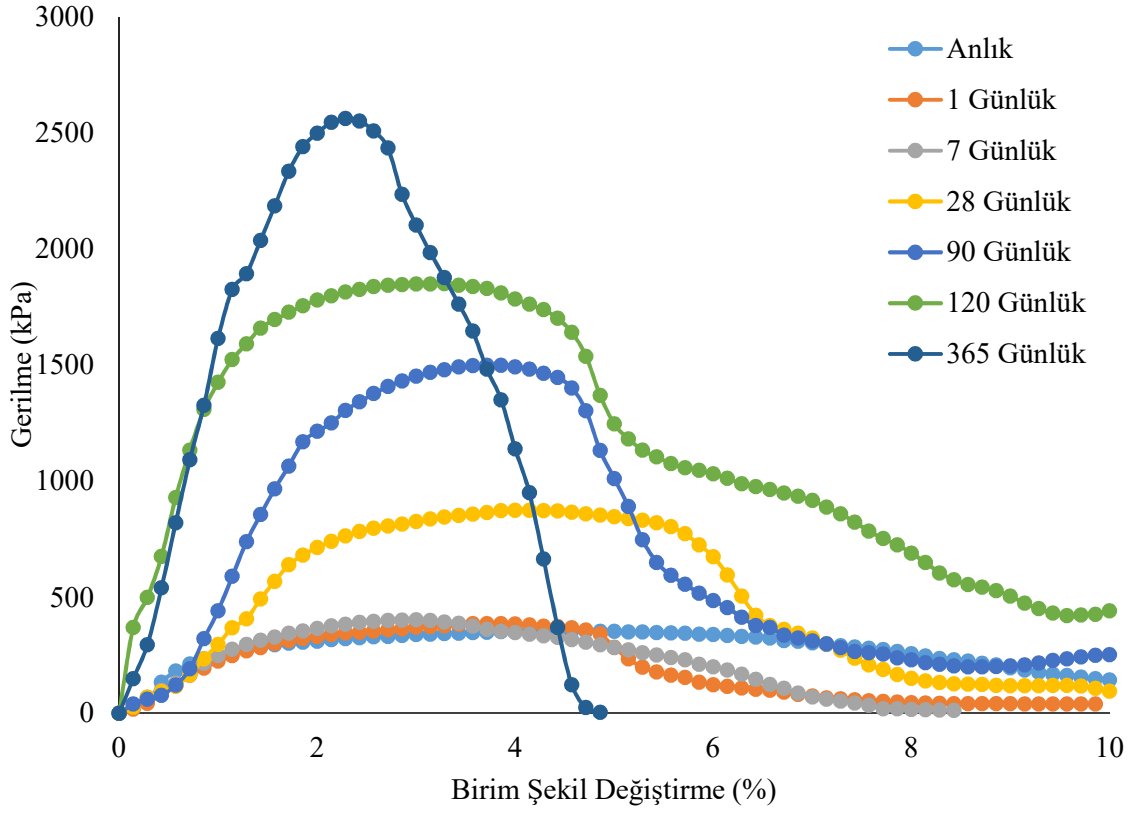
Katkılı zemin numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen grafikler anlık, 1günlük, 7 günlük, 28 günlük, 90 günlük, 120 günlük ve 365 günlük olmak üzere sırasıyla Şekil 4.11. ile Şekil 4.16. arasında sunulmuştur.



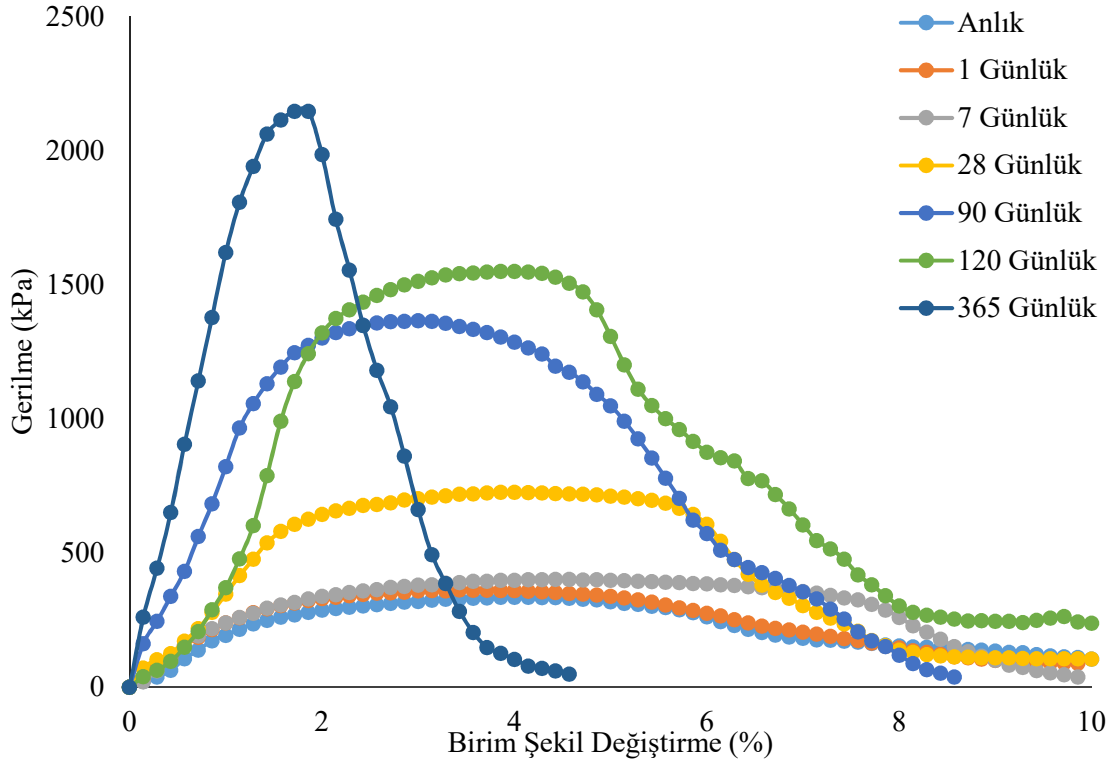
Şekil 4.11. % 0,5 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.



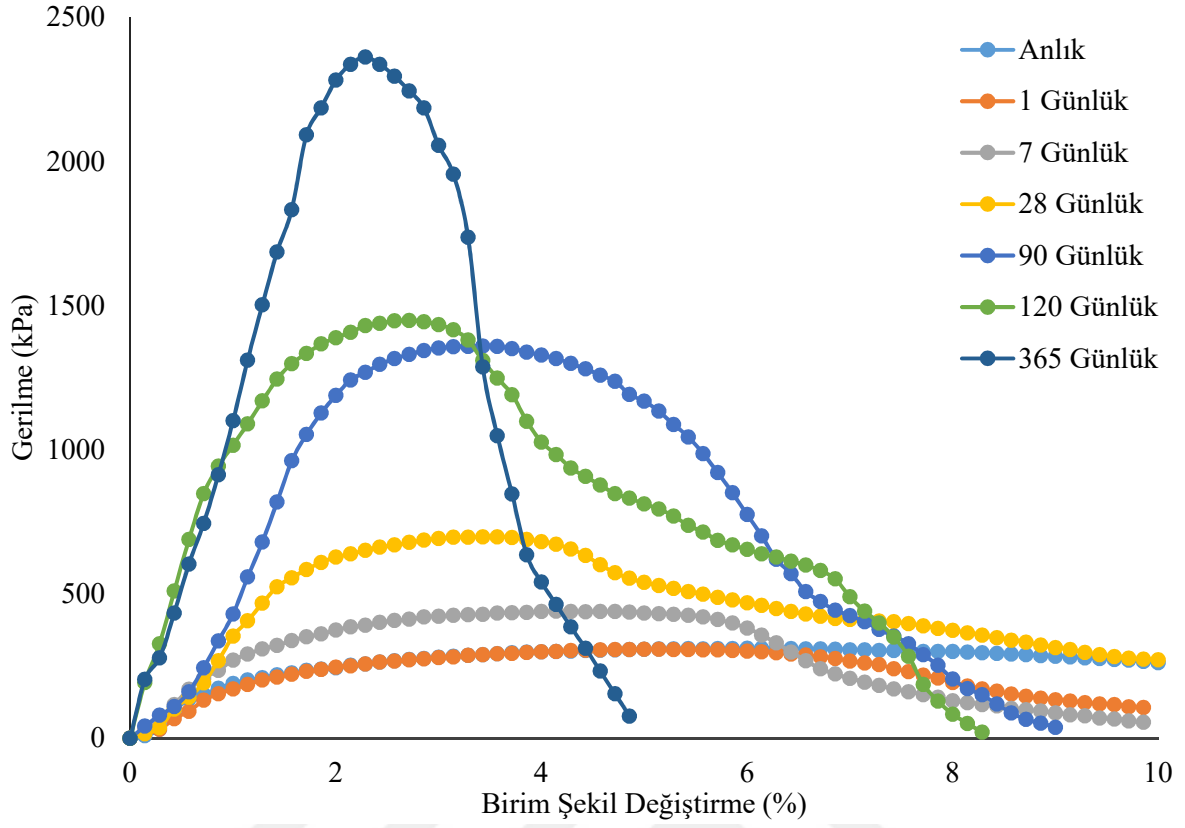
Şekil 4.12. % 0,75 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.



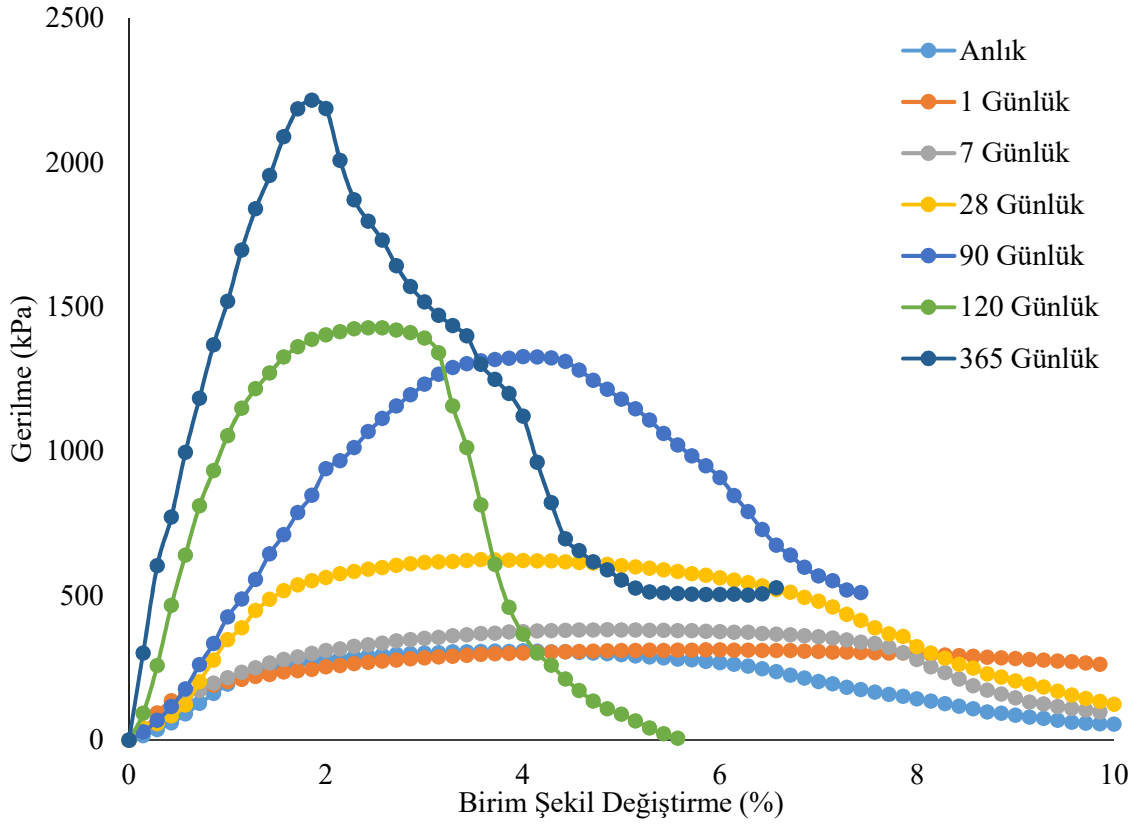
Şekil 4.13. % 1 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.



Şekil 4.14. % 2 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.



Şekil 4.15. % 3 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.



Şekil 4.16. % 4 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç deney sonuçları.

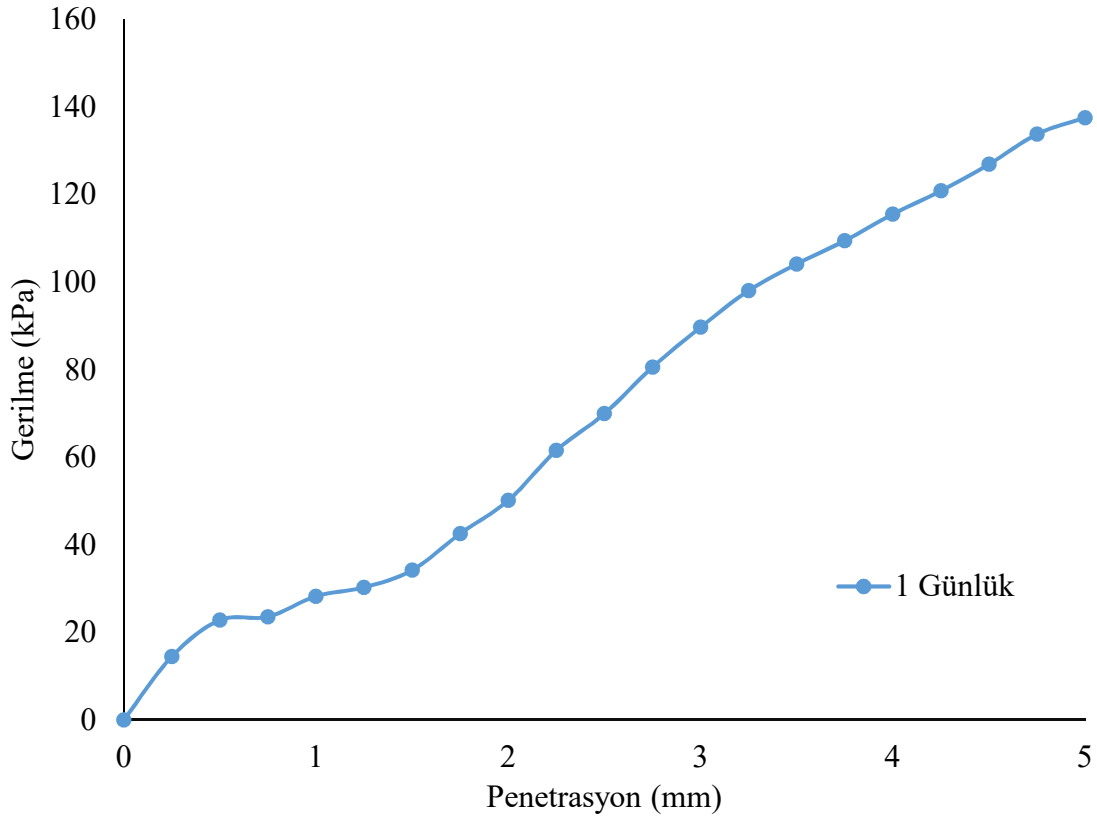
Şekil 4.11. , 4.12. , 4.13. , 4.14. , 4.15. ve 4.16. incelendiğinde zemine kalsiyum ligno sülfonat katılması ile birlikte serbest basınç dayanımlarında ciddi artışlar meydana geldiği görülmektedir. Kür süresinin artmasıyla paralel olarak serbest basınç dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir.

4.1.6. CBR deneyi

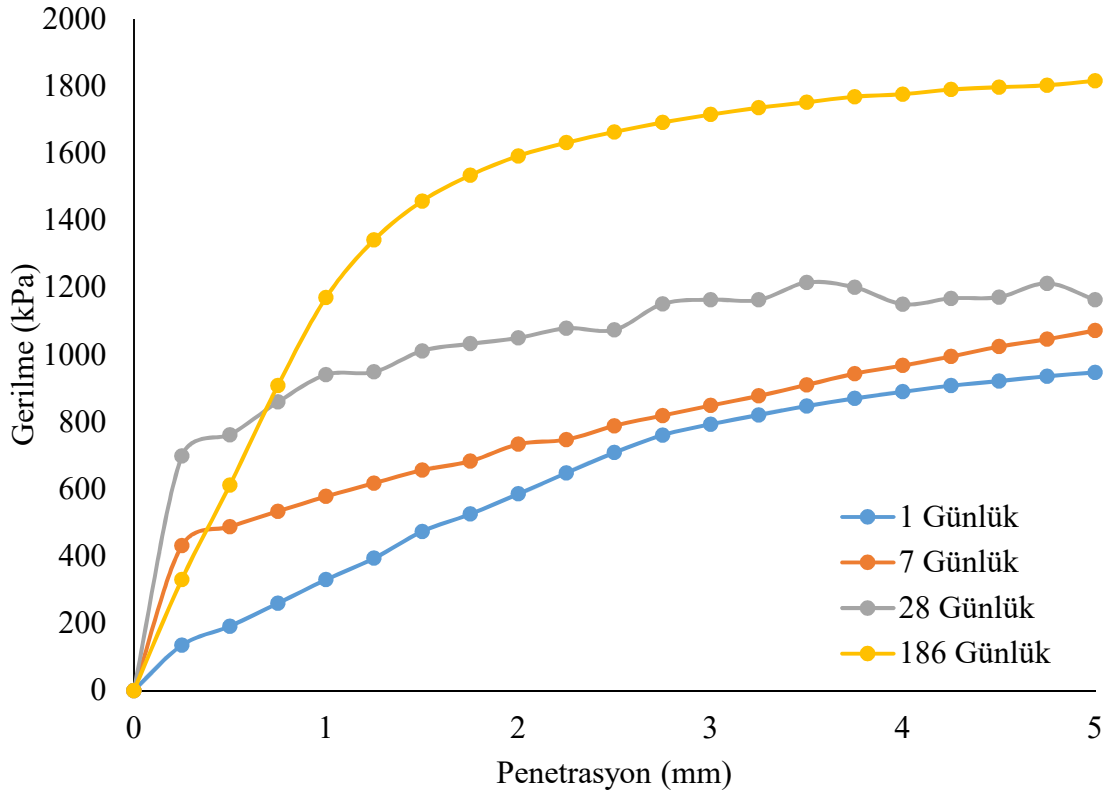
Katkılı zeminlerde meydana gelen dayanım değişimlerinin daha detaylı incelenebilmesi amacıyla serbest basınç deneyinden sonra katkılı ve katkısız zemin numuneleri üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır.

Dayanımdaki artışın kür süresi ile birlikte artarak devam ettiği serbest basınç deneyi ile belirlenmiştir. Aynı artışın CBR deneylerinde olup olmadığını kontrol etmek amacıyla farklı kür süresine bağlı değişim incelenmiştir. Bu nedenle 1 günlük, 7 günlük, 28 günlük ve 186 günlük CBR değerleri belirlenmiştir.

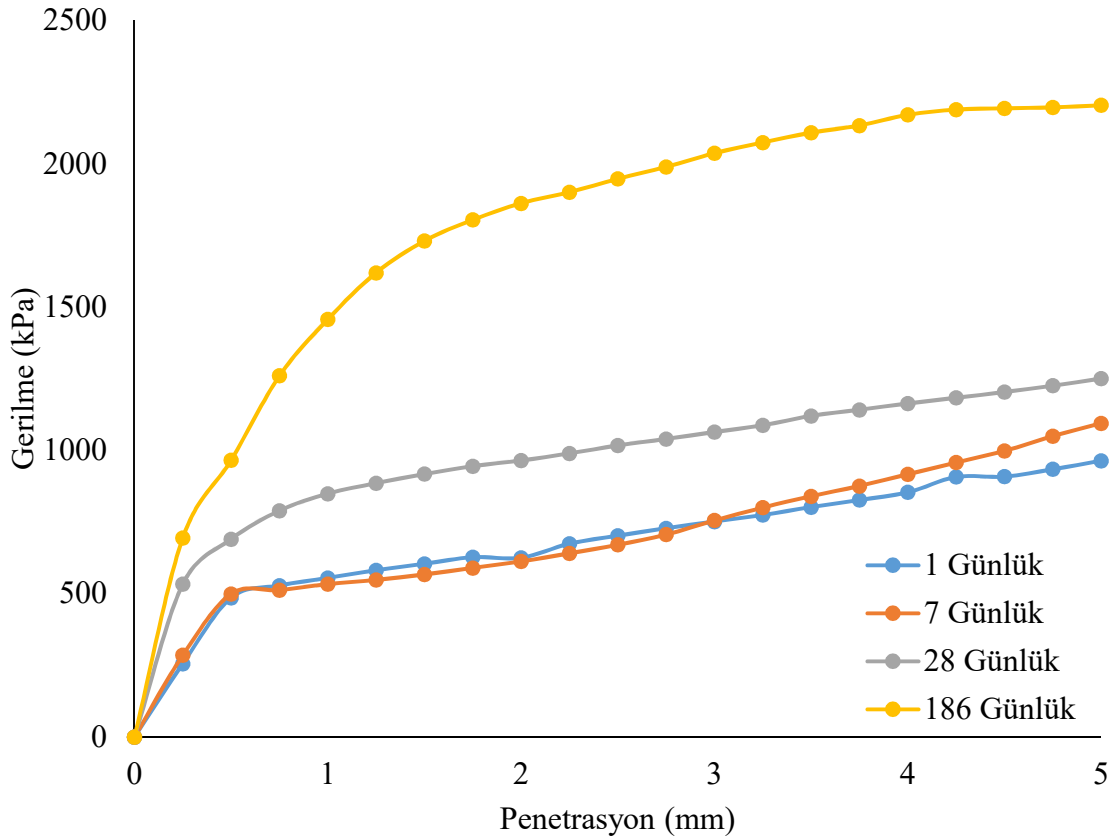
CBR deneyi uygulanacak deney numuneleri belirlenen kür sürelerinde bekletildikten sonra 4 gün boyunca su dolu bir havuzun içerisinde tutulmuştur. Bu 4 gün boyunca katkılı ve katkısız zeminde meydana gelen şişme değerleri takip edilmiştir.



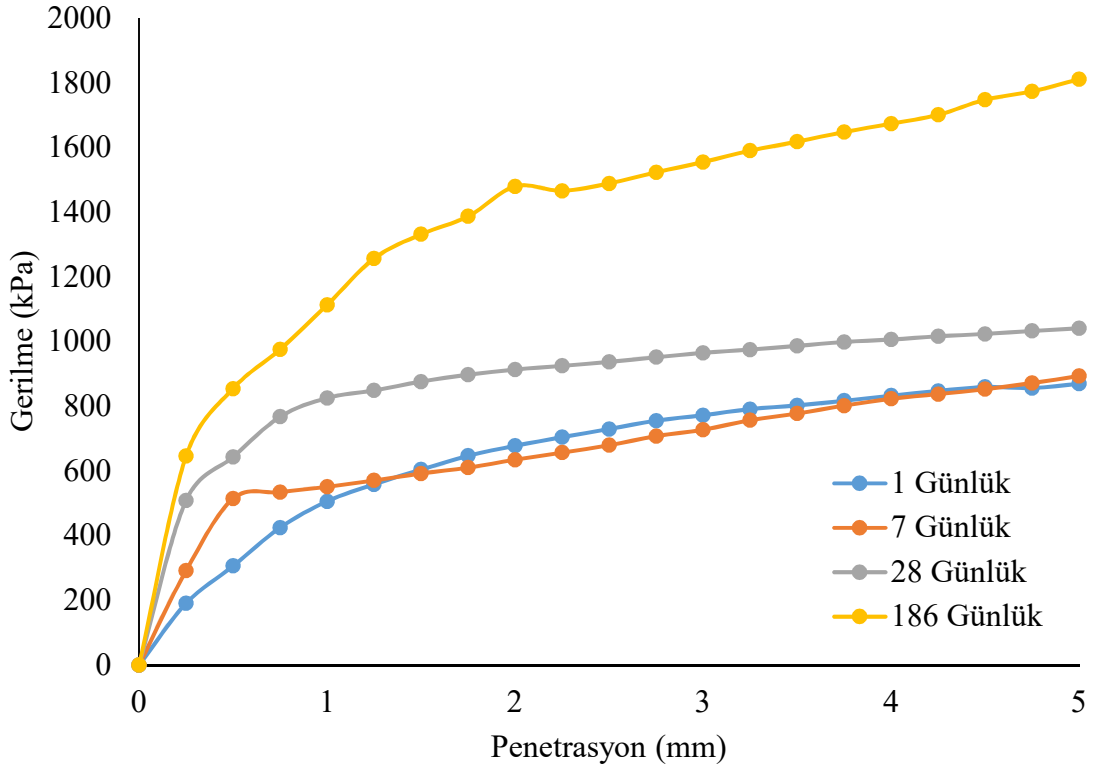
Şekil 4.17. Katkısız zemin numunesi için CBR eğrisi.



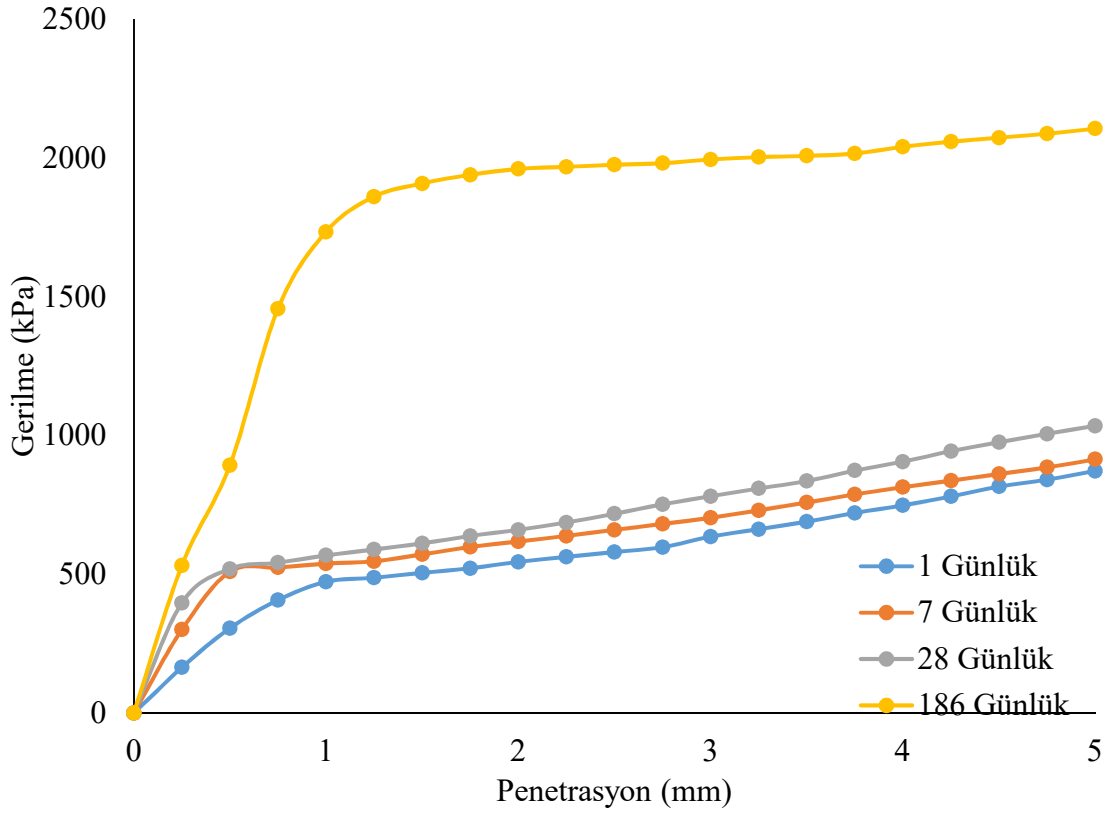
Şekil 4.18. % 0,5 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.



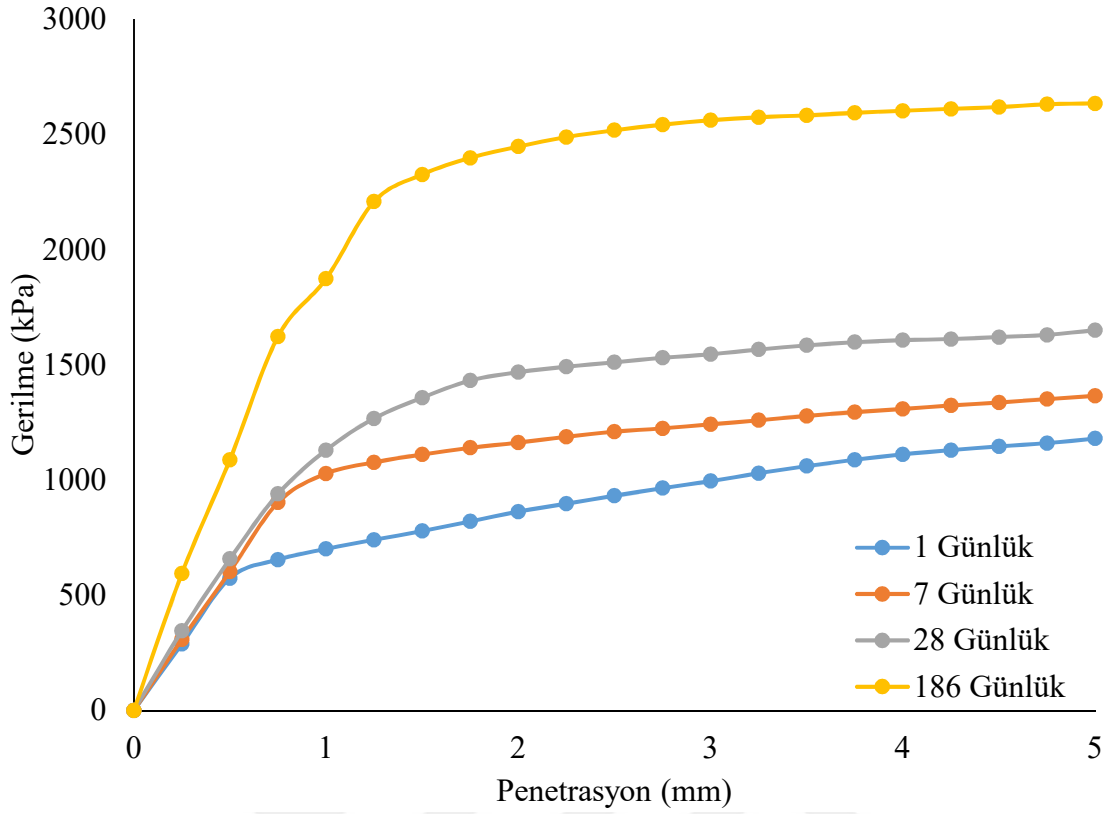
Şekil 4.19. % 0,75 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.



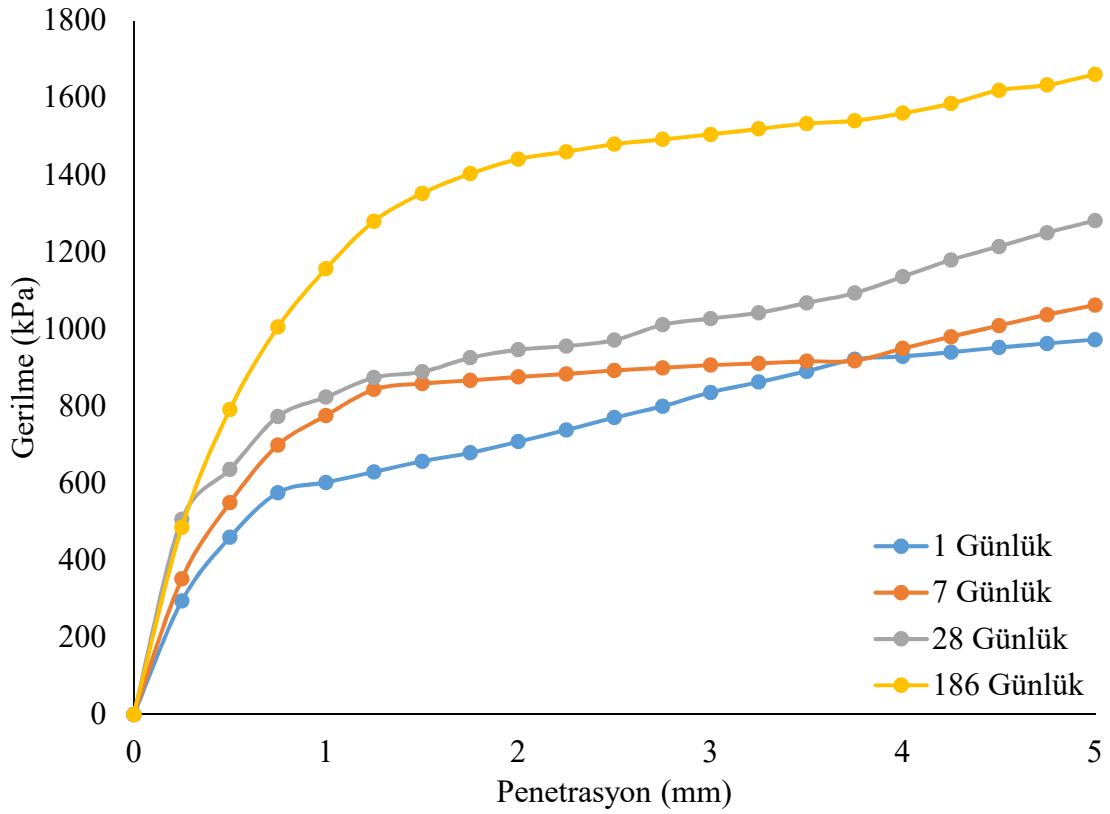
Şekil 4.20. % 1 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.



Şekil 4.21. % 2 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.



Şekil 4.22. % 3 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.



Şekil 4.23. % 4 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zemin numuneleri için farklı kür süreleri sonunda elde edilen CBR eğrileri.

Şekil 4.17.'de katkısız deney numunesi için CBR deney sonucunda elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi gösterilmiştir. Katkısız zemin numunesi için 5 mm penetrasyona karşılık gelen maksimum gerilme değeri 140 kPa mertebesinde olmuştur.

Şekil 4.18., 4.19., 4.20., 4.21., 4.22. ve 4.23. 'de sırasıyla % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3 ve % 4 kalsiyum ligno sülfonat katkılı zemin numuneleri için CBR deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri verilmiştir.

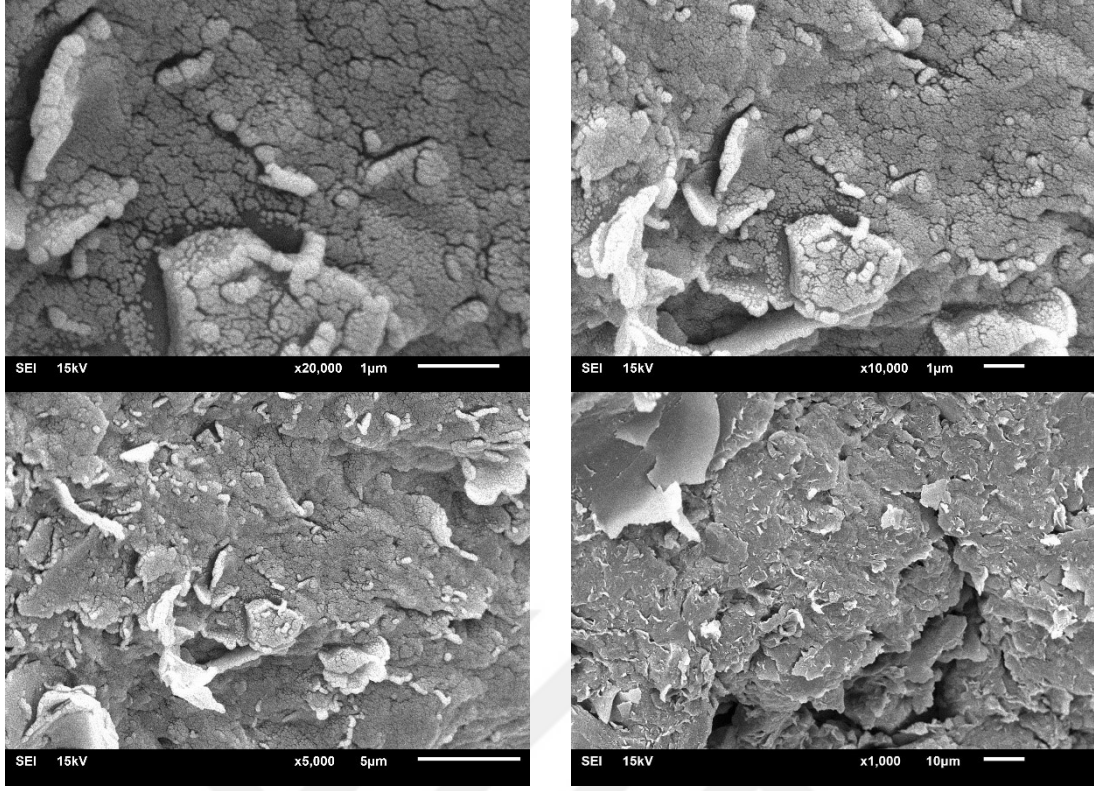
Katkılı zemin numuneleri için 186 gün kür süresi sonunda 5 mm penetrasyona karşılık gelen maksimum gerilme değerleri yine sırasıyla 1815 kPa, 2205 kPa, 1812 kPa, 2106 kPa, 2635 kPa ve 1661 kPa olarak bulunmuştur. Gerilme değerleri incelendiğinde katkısız zemin numunesine oranla 15 ila 26 kat arasında artışlar olduğu gözlemlenmiştir.

4.1.7. SEM görüntüleri

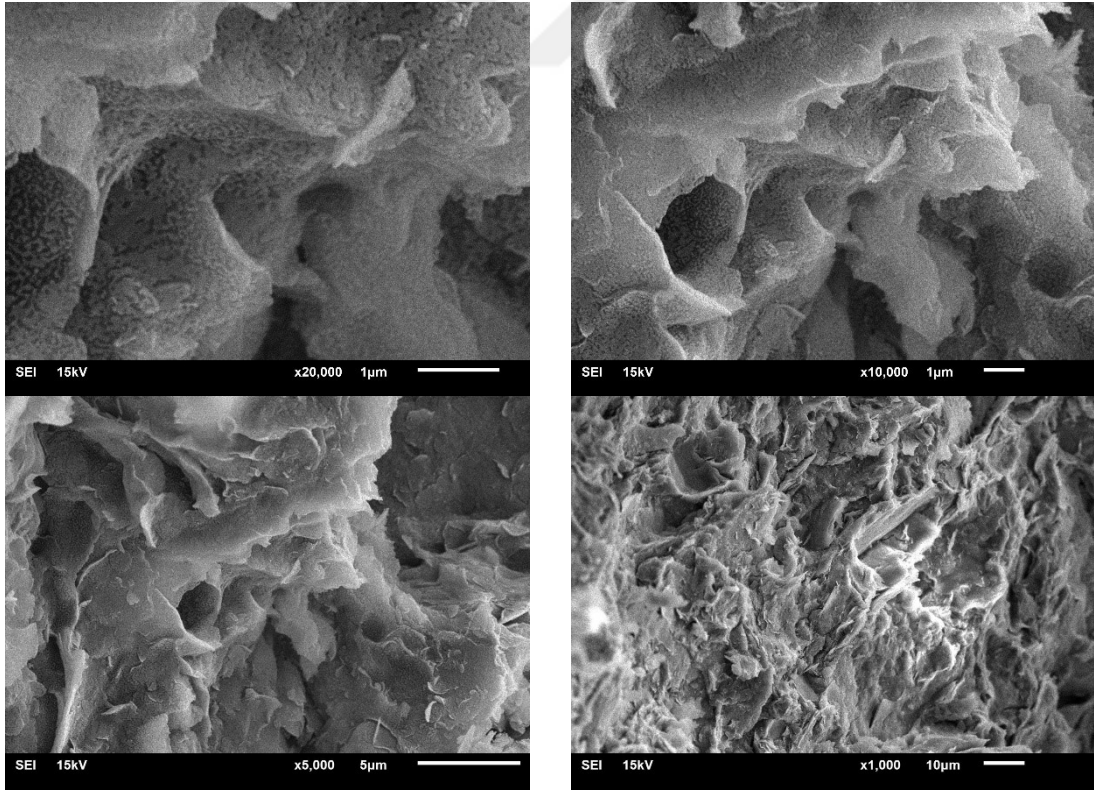
Katkılı ve katkısız zeminlerin mikro yapıdaki değişimlerinin incelenebilmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri 1000, 5000, 10000 ve 20000 kat olmak üzere farklı yakınlaştırma değerleri için alınmıştır.

Şekil 4.24.'de katkısız zemin numunesi için elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.25., 4.26., 4.27., 4.28., 4.29. ve 4.30.'da sırasıyla % 0,5, % 0,75, % 1, % 2, % 3 ve % 4 kalsiyum ligno sülfonat katkılı zemin numuneleri için alınan SEM görüntüleri sunulmuştur.

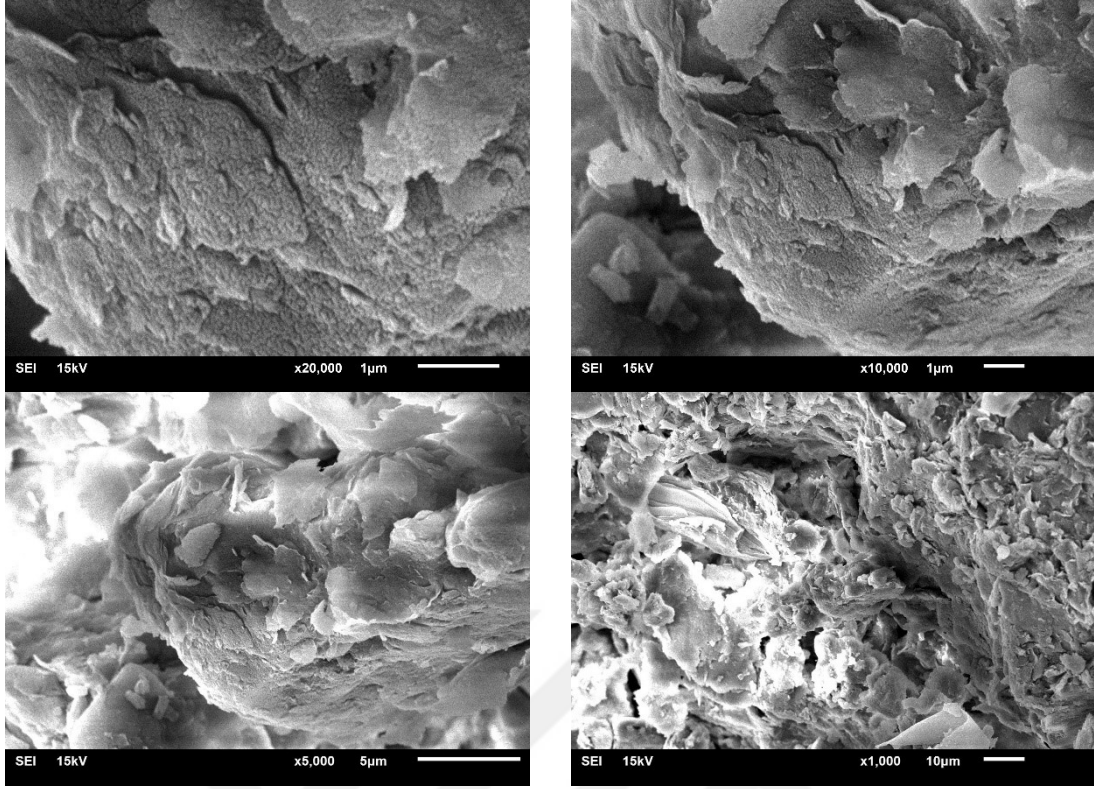
SEM görüntüleri incelendiğinde mikro yapıdaki değişimin katkısız duruma göre belirgin bir şekilde değiştiği ve çimentolaşma ürünlerinin oluştuğu görülmektedir.



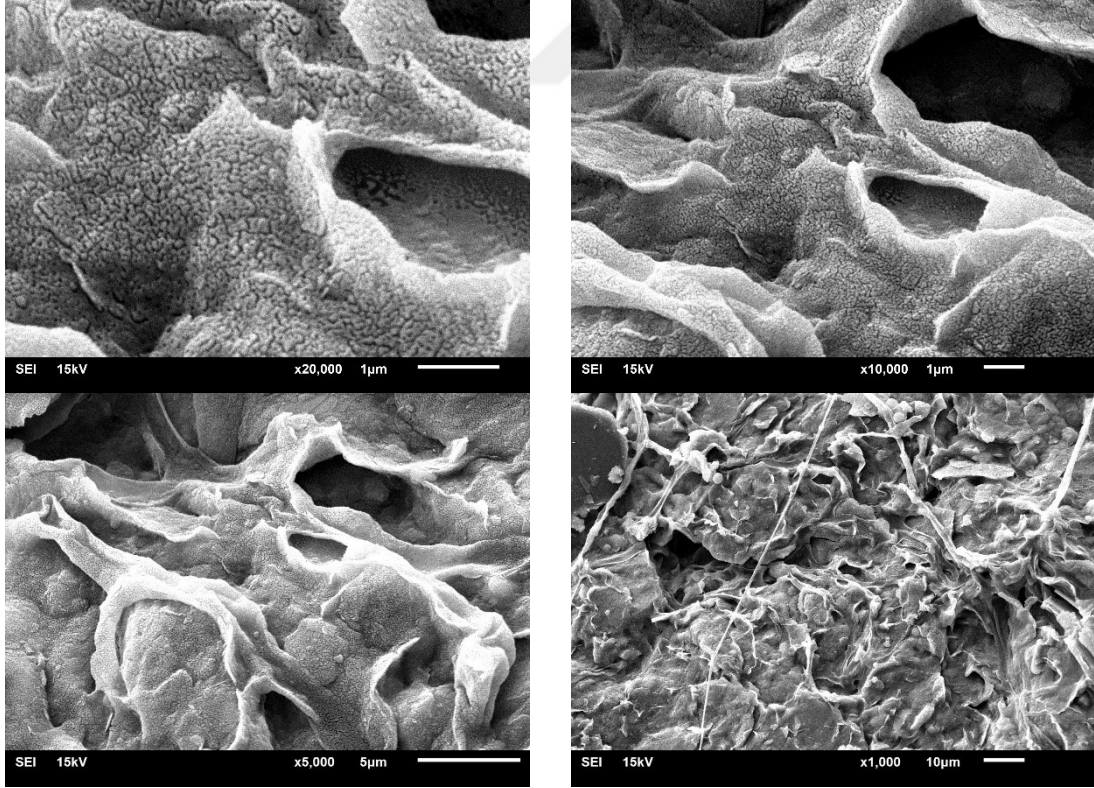
Şekil 4.24. Katkısız zemin numunesi için SEM görüntüleri.



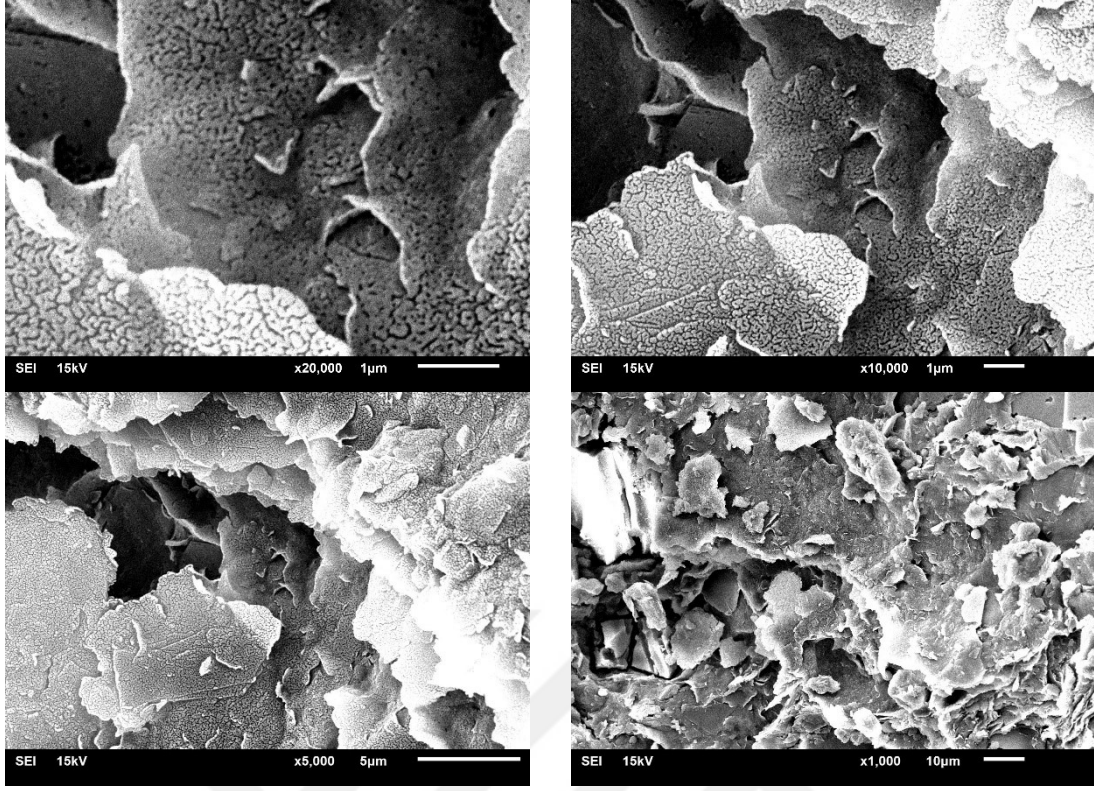
Şekil 4.25. % 0,5 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.



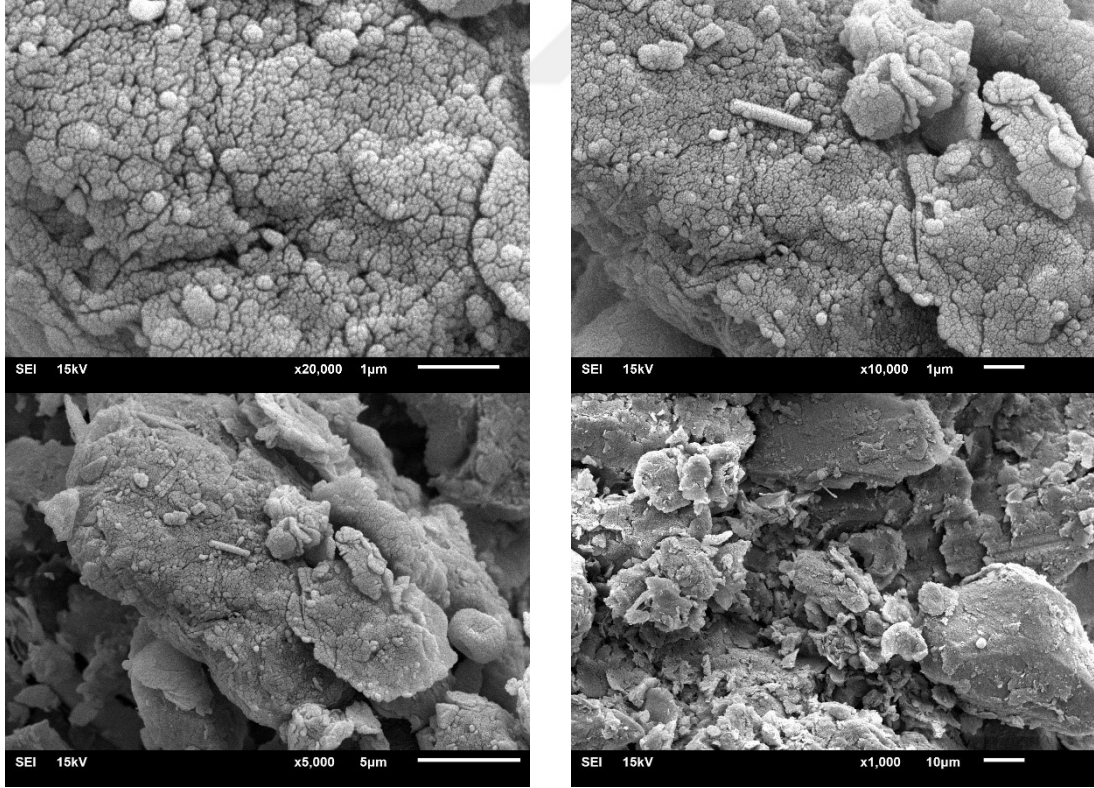
Şekil 4.26. % 0,75 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zemin numuneleri için SEM görüntüleri.



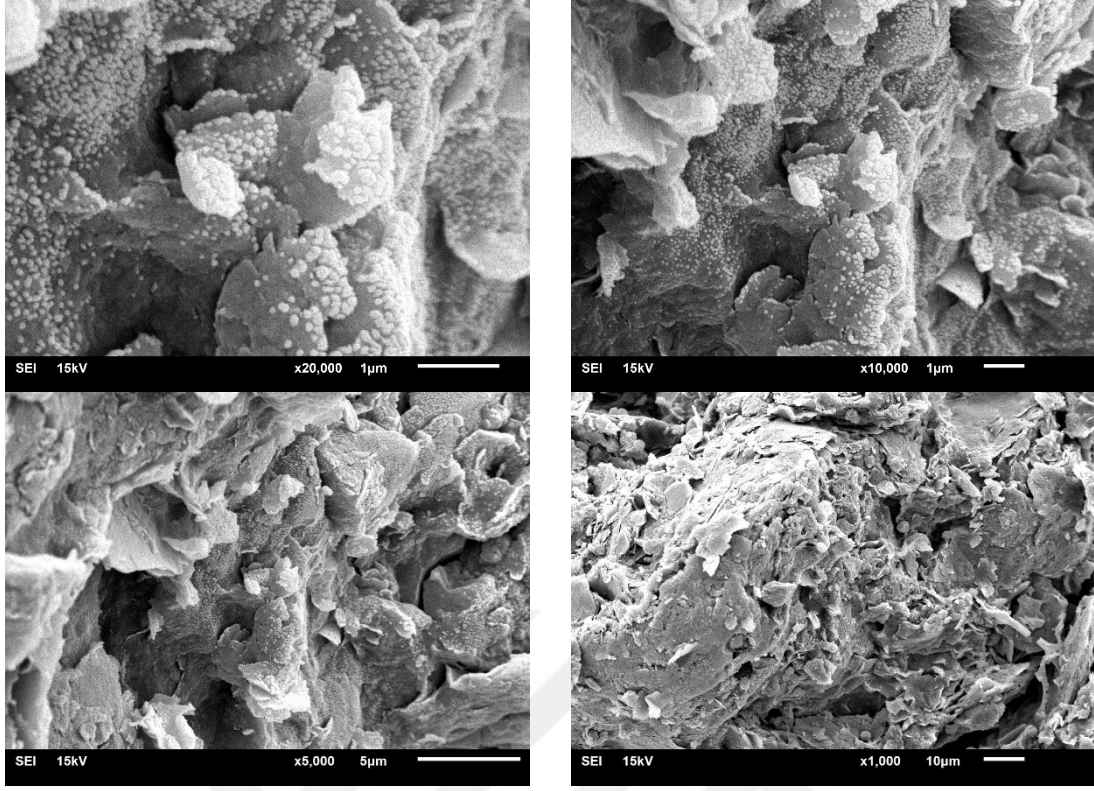
Şekil 4.27. % 1 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zemin numuneleri için SEM görüntüleri.



Şekil 4.28. % 2 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.



Şekil 4.29. % 3 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.



Şekil 4.30. % 4 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zemin numuneleri için SEM görüntüleri.

5. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde deneysel çalışma sonucunda elde edilen bulguların birbirleri ile karşılaştırılarak irdelenmesi amaçlanmıştır.

5.1. Kıvam Limitleri Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kıvam limitleri deneyleri sonucunda elde edilen değerler özetlenerek Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Kıvam limitleri özet tablo

Katkı Miktarı	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
% 0 LS	51	19	32
% 0,5 LS	38	19	19
% 0,75 LS	37	19	18
% 1 LS	39	20	19
% 2 LS	38	20	18
% 3 LS	39	20	19
% 4 LS	37	20	17

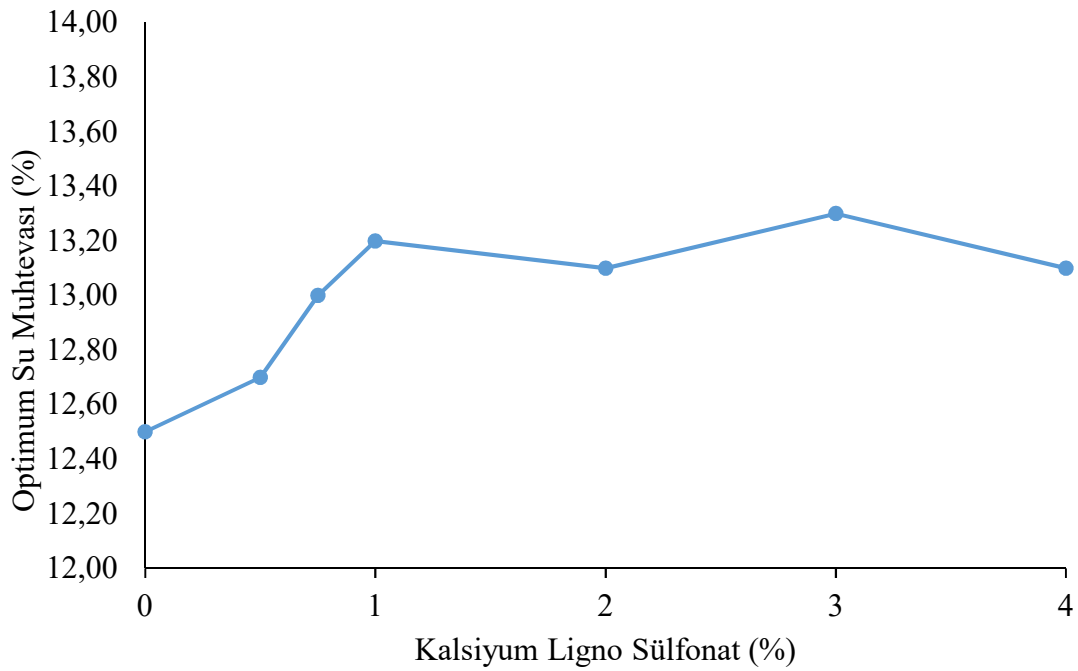
Çizelge 5.1.’de görüldüğü üzere zemine kalsiyum ligno sülfonat eklenmesi durumunda likit limit değerinde ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Kalsiyum ligno sülfonat miktarının artması ile birlikte bu azalma devam etmemiş likit limit değerlerinde yatay bir görüntü gözlemlenmiştir.

Plastik limit değerinde ise kalsiyum ligno sülfonat eklenmesi ile birlikte dikkate alınmayacak düzeyde bir artış meydana gelmiştir. Plastik limit değeri için katkının herhangi bir etki yaratmadığı söylenebilir.

Plastisite indisi değerinde ise likit limit değerinde meydana gelen azalma ile paralel bir azalma meydana geldiği görülmektedir.

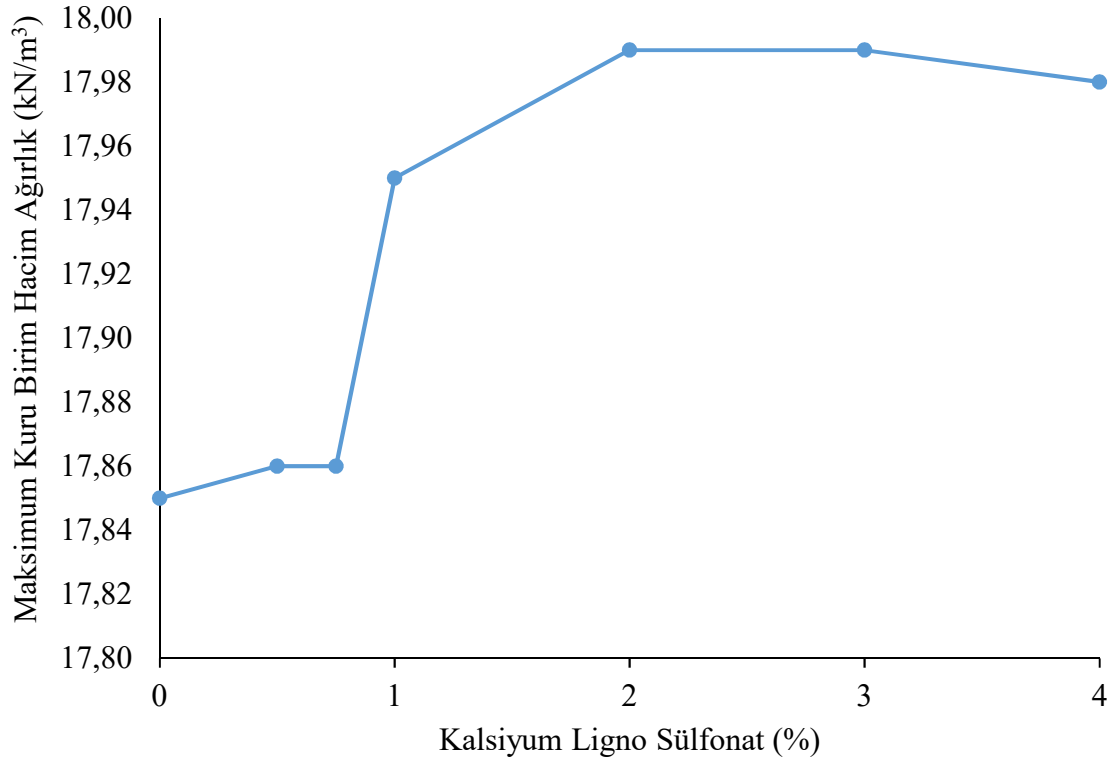
5.2. Kompaksiyon Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.'de özetlenerek sunulmuştur. Şekil 5.1.'de kalsiyum ligno sülfonat miktarının deęiŐimiyle birlikte optimum su muhtevasındaki değişim, Şekil 5.2.'de ise kalsiyum ligno sülfonat miktarının deęiŐimiyle birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlık değerindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Kalsiyum ligno sülfonat katkısının artmasıyla optimum su muhtevasındaki değişim.

Şekil 5.1.'de grldğ üzere katkısız zeminin optimum su muhtevası %12,5 iken zemine kalsiyum ligno sülfonat katılması ile birlikte yaklaşık % 13 seviyesine yükselmiŐtir. Bu sonuçların ardından optimum su muhtevası değerinde ciddi bir artış görülmemekle birlikte bir miktar artış meydana geldiği söylenbilir.



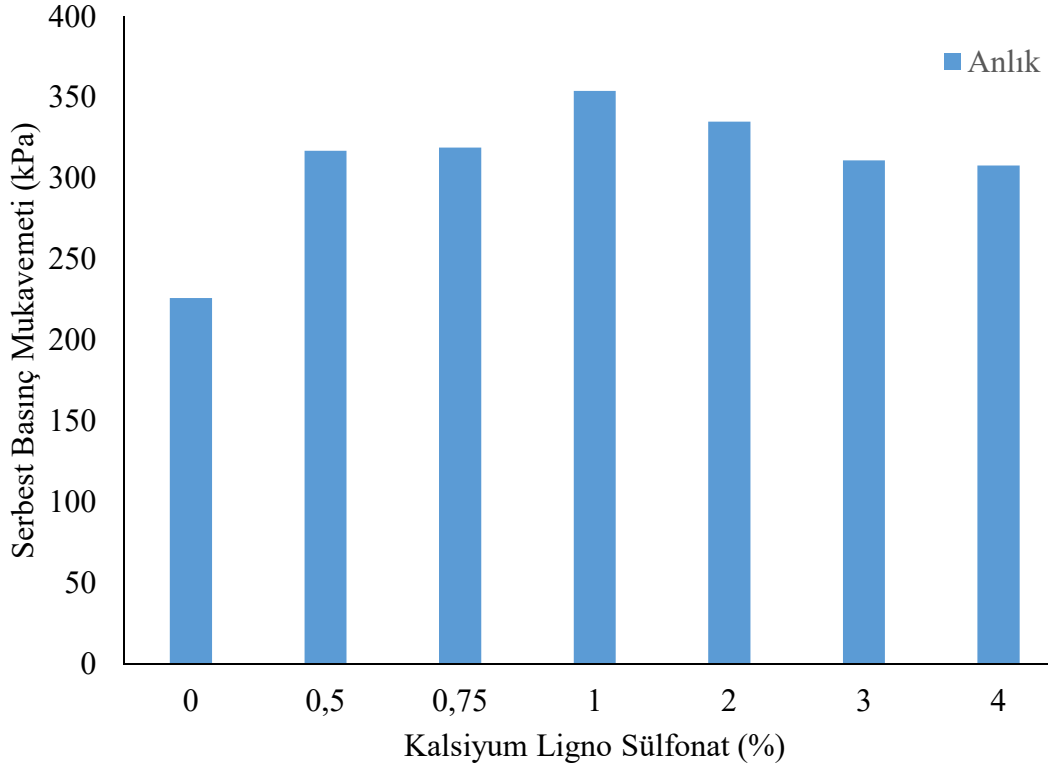
Şekil 5.2. Kalsiyum ligno sülfonat katkısının artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki değişim.

Şekil 5.2.'de zemine kalsiyum ligno sülfonat katkısının katılması ile birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlığında meydana gelen değişim grafik olarak gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi zemine katkı katılması ile birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlığı 17,85 kN/m³ değerinden 17,99 kN/m³ değerine kadar artış göstermiştir. Bu değerler arasındaki fark oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Zemine kalsiyum ligno sülfonat katılması ile birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlığında artış meydana geldiği söylenebileceği gibi bu artışın oldukça düşük seviyelerde kaldığı unutulmamalıdır.

5.3. Serbest Basınç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

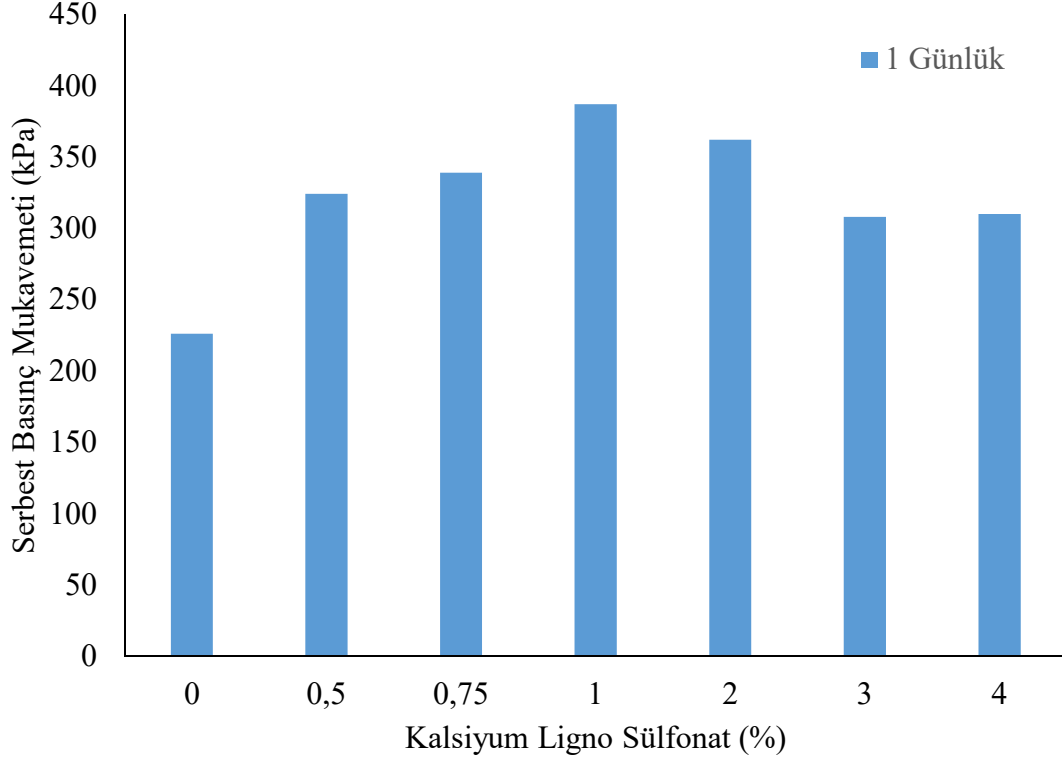
Serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Bölüm 4'te verilmiştir. Bu bölümde ise farklı katkı oranları ve farklı kür süreleri için deneyler sonucunda elde edilen maksimum serbest basınç mukavemeti değerleri birbirleri ile karşılaştırılarak verilmiştir. Hem katkı oranının etkisi hem de kür süresinin etkisinin gösterilmesi hedeflenmiştir.

Şekil 5.3. ile Şekil 5.9. arasında sırasıyla anlık, 1 günlük, 7 günlük, 28 günlük, 90 günlük, 120 günlük ve 365 günlük kür süreleri için zemine farklı oranlarda kalsiyum ligno sülfonat katılması ile birlikte serbest basınç mukavemetinde gerçekleşen değişimler gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Anlık kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.

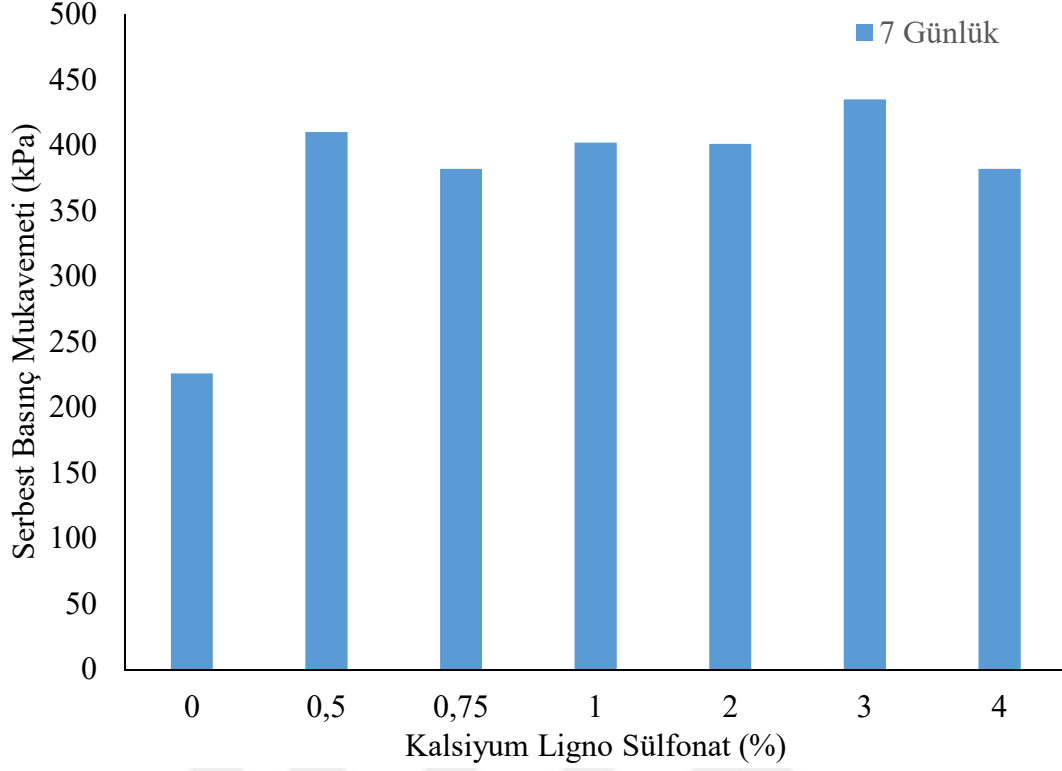
Şekil 5.3.'de görüldüğü gibi anlık kür süresi için katkısız zemin numunesinin serbest basınç mukavemeti 226 kPa iken zemine katkı katılması ile bu değerde artış olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek artış zemine %1 oranında kalsiyum ligno sülfonat katılmasıyla birlikte meydana gelirken en düşük artış ise % 4 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda gerçekleşmiştir. Yüzde 1 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda serbest basınç mukavemetindeki artış 1,57 kat olurken, %4 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda 1,36 kat olmuştur.



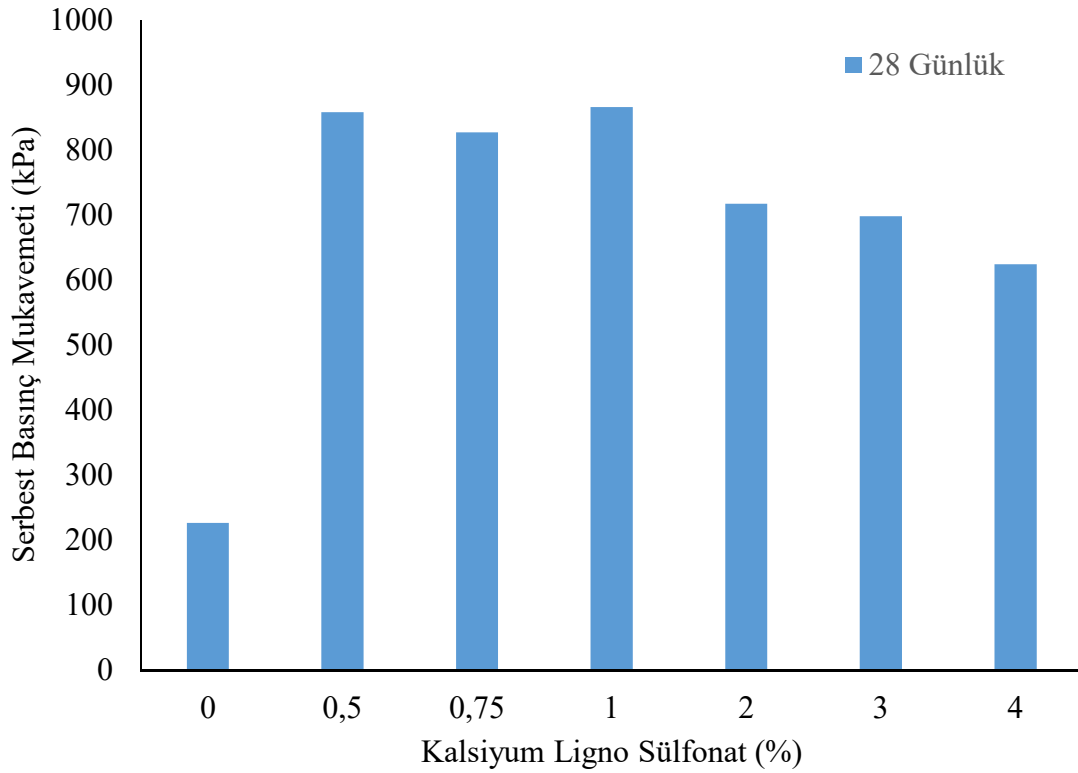
Şekil 5.4. 1 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.

Şekil 5,4 incelendiğinde 1 günlük kür süresi sonunda en yüksek artışın zemine %1 oranında kalsiyum ligno sülfonat katılmasıyla birlikte meydana gelirken en düşük artış ise % 3 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda gerçekleşmiştir. Yüzde 1 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda serbest basınç mukavemetindeki artış 1,71 kat olurken, % 3 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda 1,36 kat olmuştur.

Şekil 5.5.'de ise 7 günlük kür süresi sonunda en yüksek artışın zemine %3 oranında kalsiyum ligno sülfonat katılmasıyla birlikte meydana gelirken en düşük artış ise % 4 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda gerçekleşmiştir. Yüzde 3 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda serbest basınç mukavemetindeki artış 1,92 kat olurken, % 4 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda 1,69 kat olmuştur.

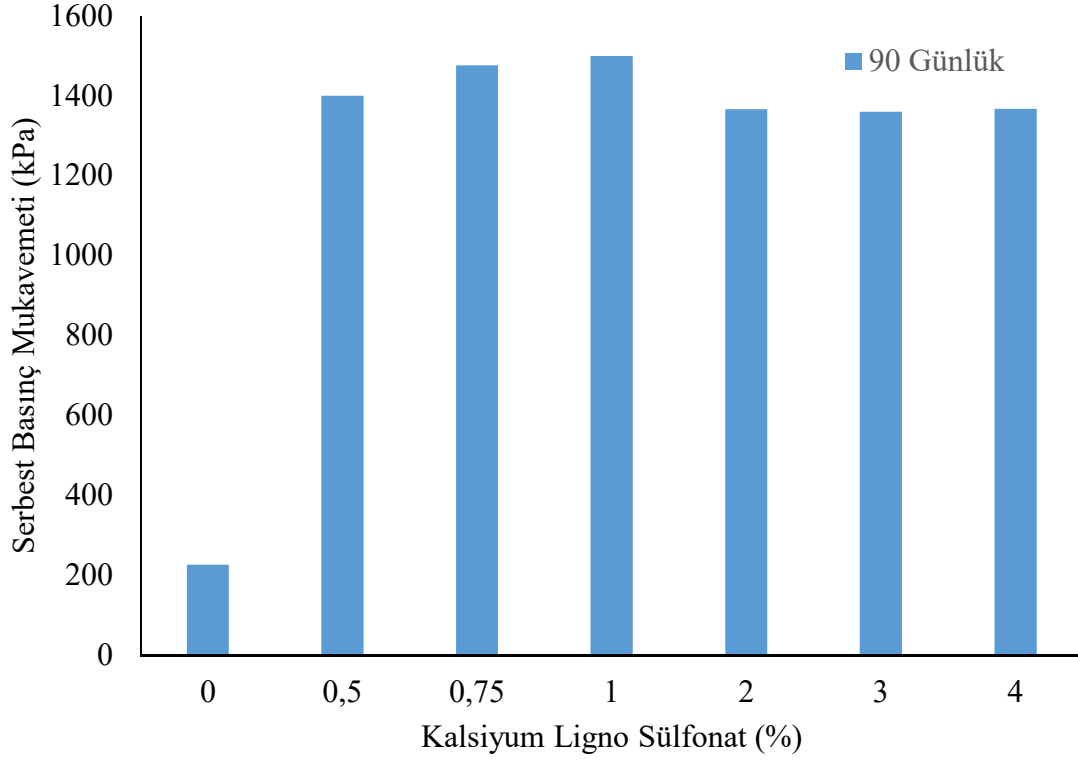


Şekil 5.5. 7 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.



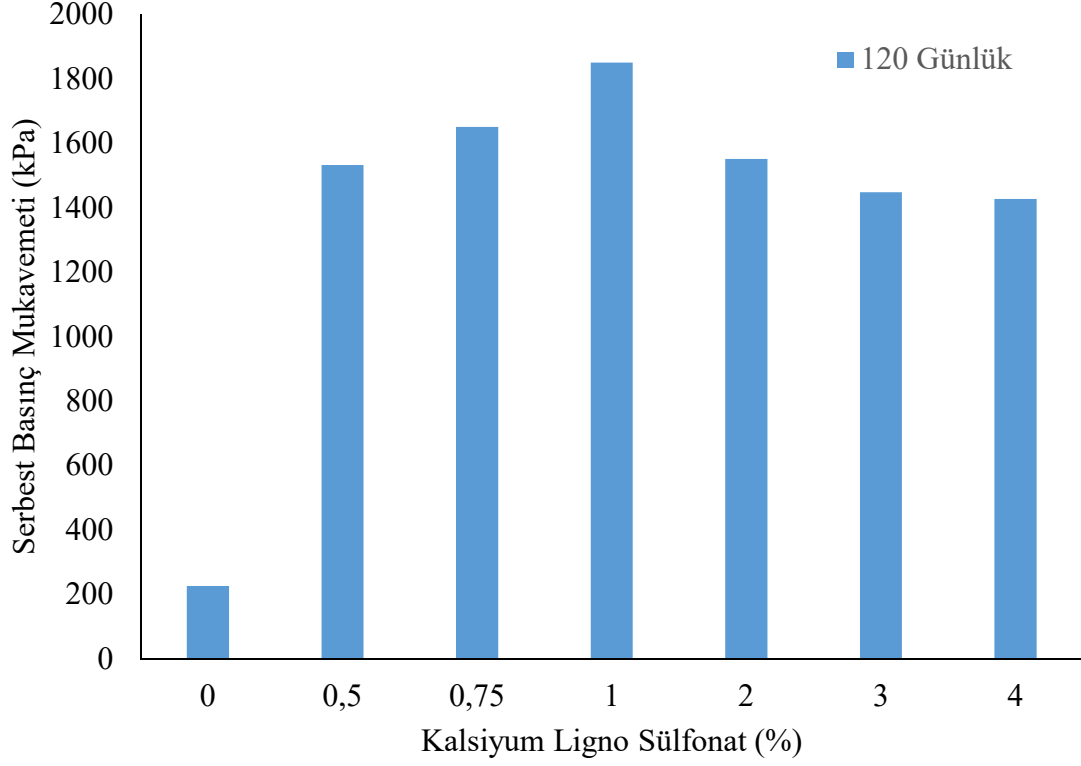
Şekil 5.6. 28 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.

Şekil 5.6.'da 28 günlük kür süresi sonunda en yüksek artışın zemine %1 oranında kalsiyum ligno sülfonat katılmasıyla birlikte meydana gelirken en düşük artış ise % 4 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda gerçekleşmiştir. Yüzde 1 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda serbest basınç mukavemetindeki artış 3,83 kat olurken, % 4 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda 2,76 kat olmuştur.



Şekil 5.7. 90 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.

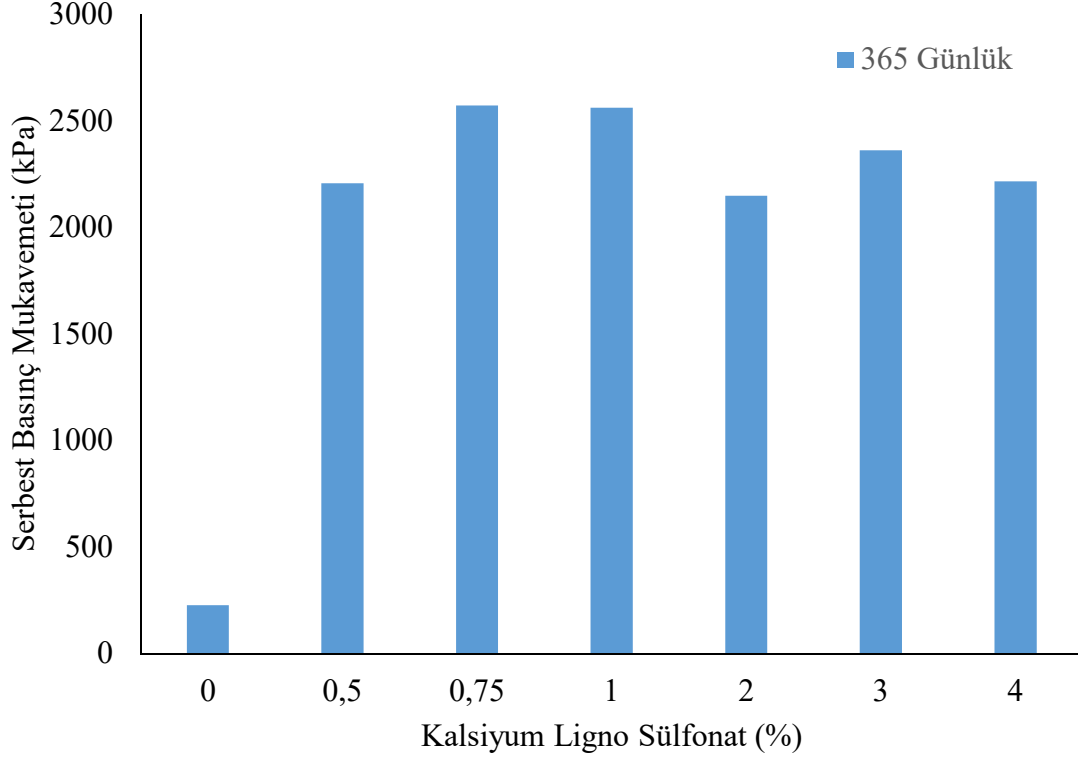
Şekil 5.7.'de 90 günlük kür süresi sonunda en yüksek artışın zemine %1 oranında kalsiyum ligno sülfonat katılmasıyla birlikte meydana gelirken en düşük artış ise % 3 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda gerçekleşmiştir. Yüzde 1 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda serbest basınç mukavemetindeki artış 6,63 kat olurken, % 3 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda 6,01 kat olmuştur.



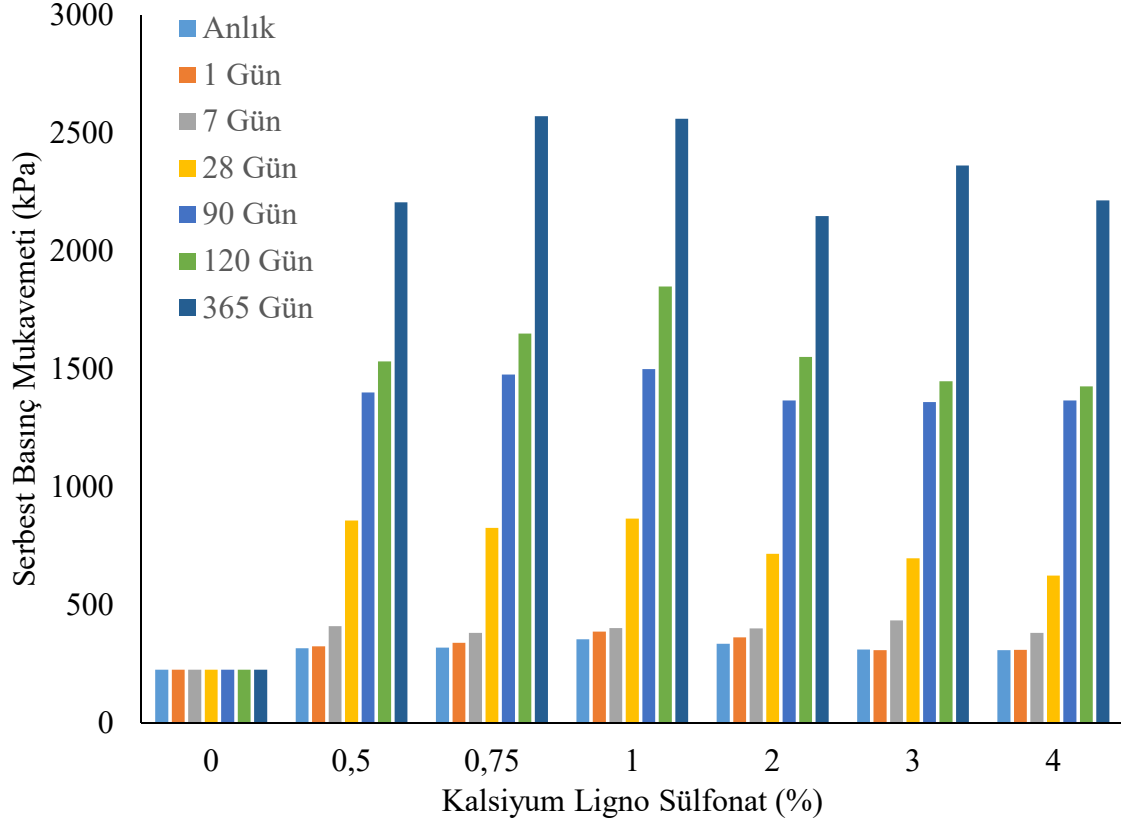
Şekil 5.8. 120 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.

Şekil 5.8.'de 120 günlük kür süresi sonunda en yüksek artışın zemine %1 oranında kalsiyum ligno sülfonat katılmasıyla birlikte meydana gelirken en düşük artış ise % 4 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda gerçekleşmiştir. Yüzde 1 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda serbest basınç mukavemetindeki artış 8,19 kat olurken, % 4 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda 6,31 kat olmuştur.

Şekil 5.9.'da 365 günlük kür süresi sonunda en yüksek artışın zemine %0,75 oranında kalsiyum ligno sülfonat katılmasıyla birlikte meydana gelirken en düşük artış ise % 2 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda gerçekleşmiştir. Yüzde 0,75 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda serbest basınç mukavemetindeki artış 11,40 kat olurken, % 2 kalsiyum ligno sülfonat katılması durumunda 9,50 kat olmuştur.



Şekil 5.9. 365 Günlük kür süresi için farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişim.



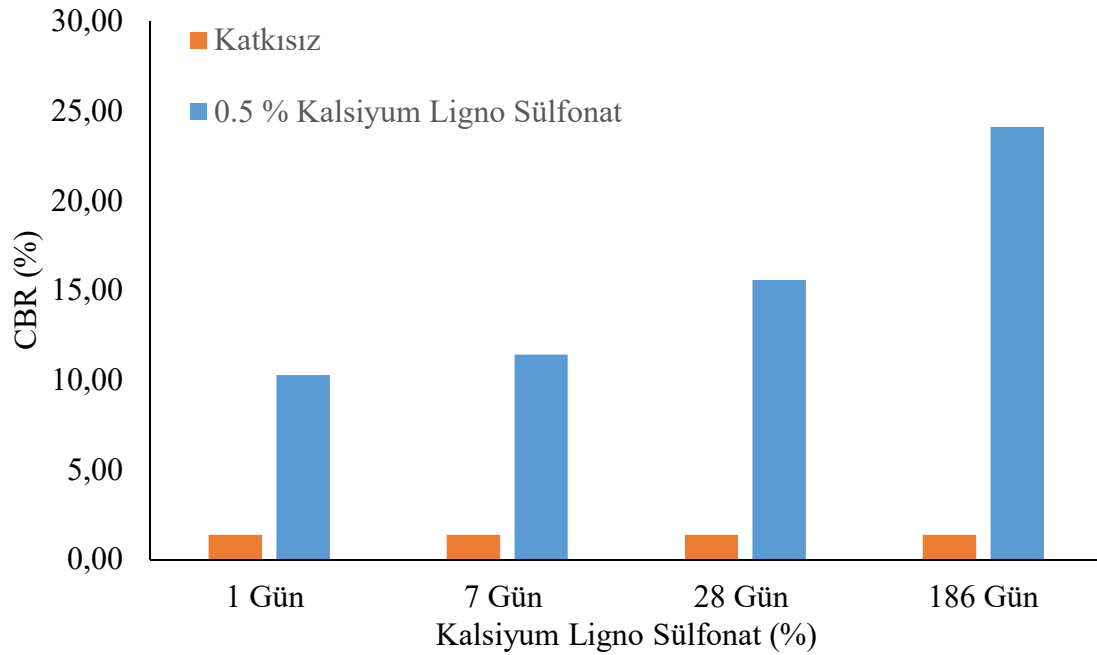
Şekil 5.10. Farklı kür ve farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında serbest basınç mukavemetindeki değişimin toplu halde gösterimi.

Şekil 5.10.'da serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen tüm serbest basınç mukavemeti değerleri toplu halde gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere zemine katkı katılması ve kür süresinin artması ile birlikte serbest basınç mukavemeti değerlerinde ciddi artışlar meydana geldiği açık olarak görülmektedir.

5.4. CBR Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

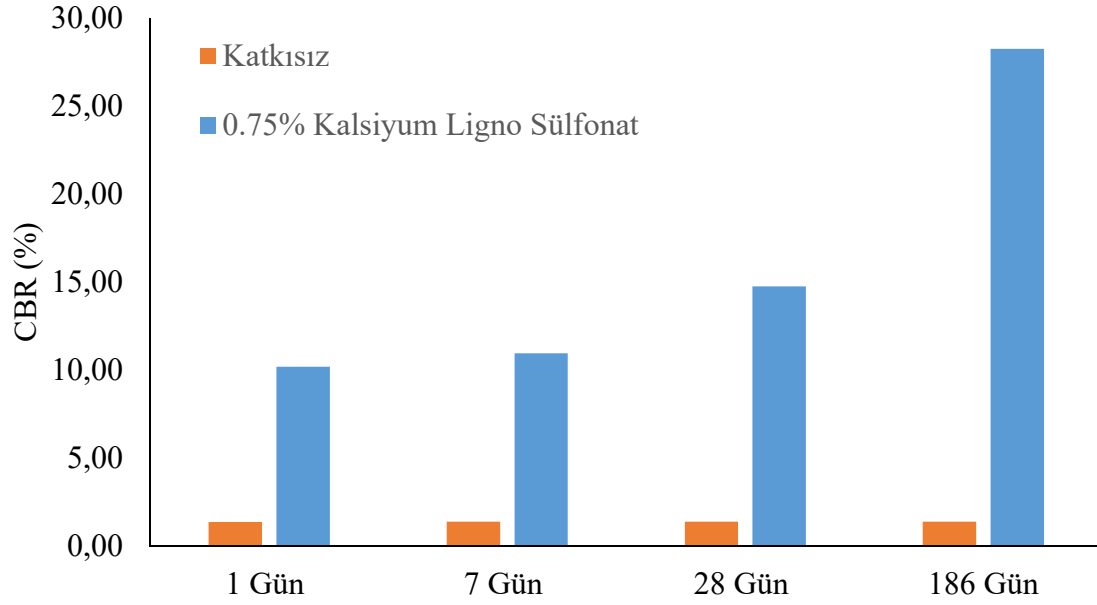
Bir önceki bölümde CBR deneyi sonucunda elde edilen gerilme-deformasyon grafikleri verilmiştir. Bu bölümde ise kür süresi ve katkı yüzdesini değişimi ile birlikte CBR değerlerindeki değişimler gösterilmiştir.

Şekil 5.11. ile Şekil 5.16. arasında katkısız zemin numunesi ile sırasıyla %0,5, %0,75, %1, %2, %3 ve %4 kalsiyum ligno sülfonat katkılı zemin numunelerinden elde edilen CBR değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



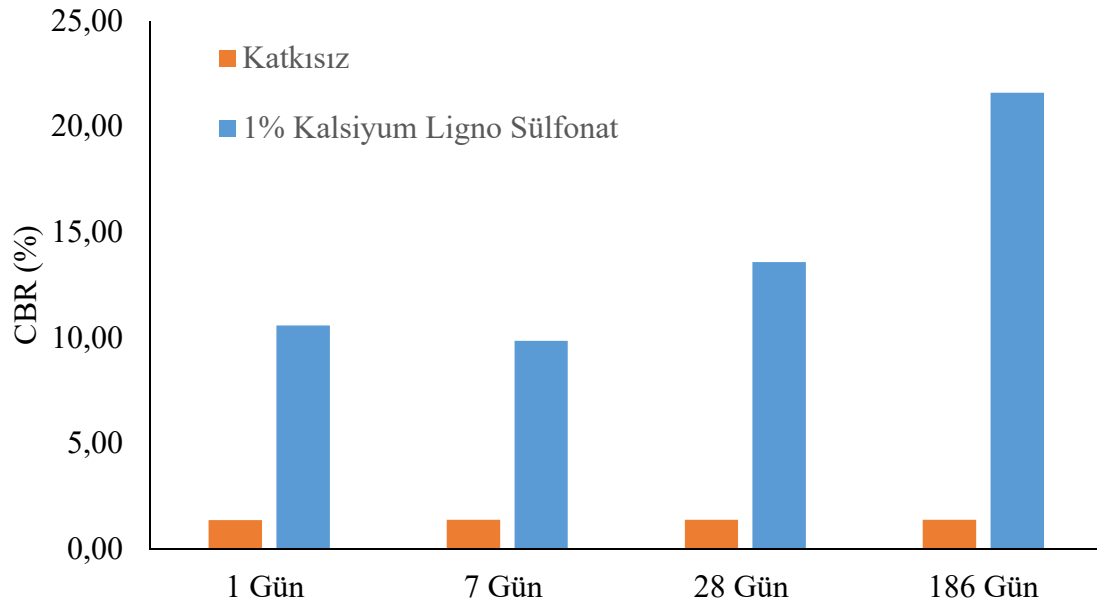
Şekil 5.11. Katkısız ve % 0,5 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkılı zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.

Şekil 5.11.'de katkısız zemin numunesi ile % 0,5 kalsiyum ligno sülfonat katkılı zeminler için kür süresi ile CBR değerindeki artış gösterilmiştir. CBR değerinde kür süresine bağlı olarak 7,55 ila 17,47 kat artış gerçekleştiği görülmüştür.



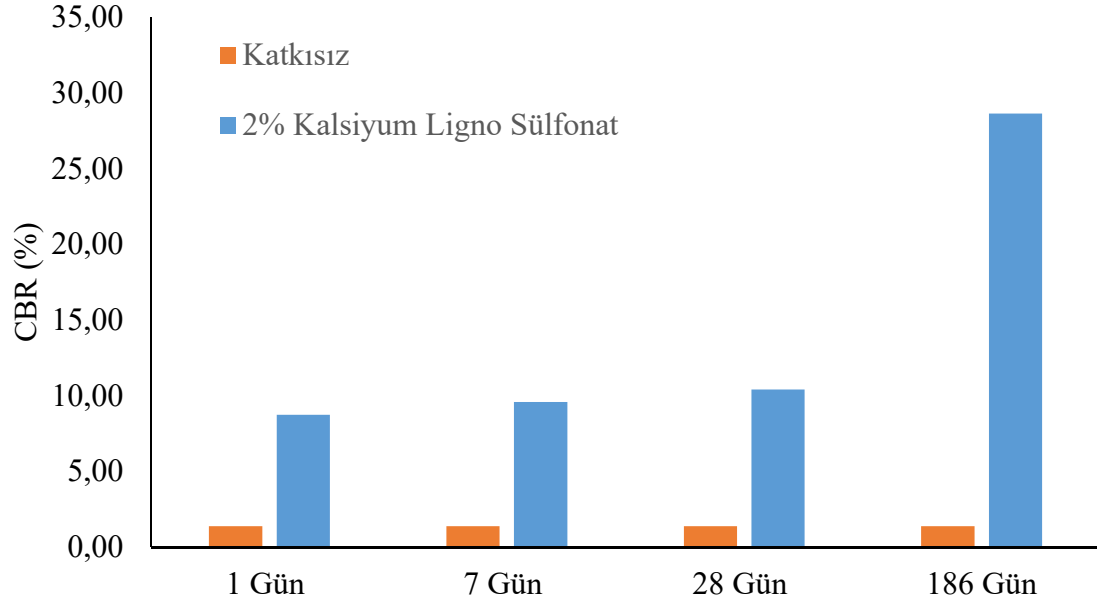
Şekil 5.12. Katkısız ve % 0,75 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.

Şekil 5.12.'de katkısız zemin numunesi ile % 0,75 kalsiyum ligno sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile CBR değerindeki artış gösterilmiştir. CBR değerinde kür süresine bağlı olarak 7,38 ila 20,46 kat artış gerçekleştiği görülmüştür.



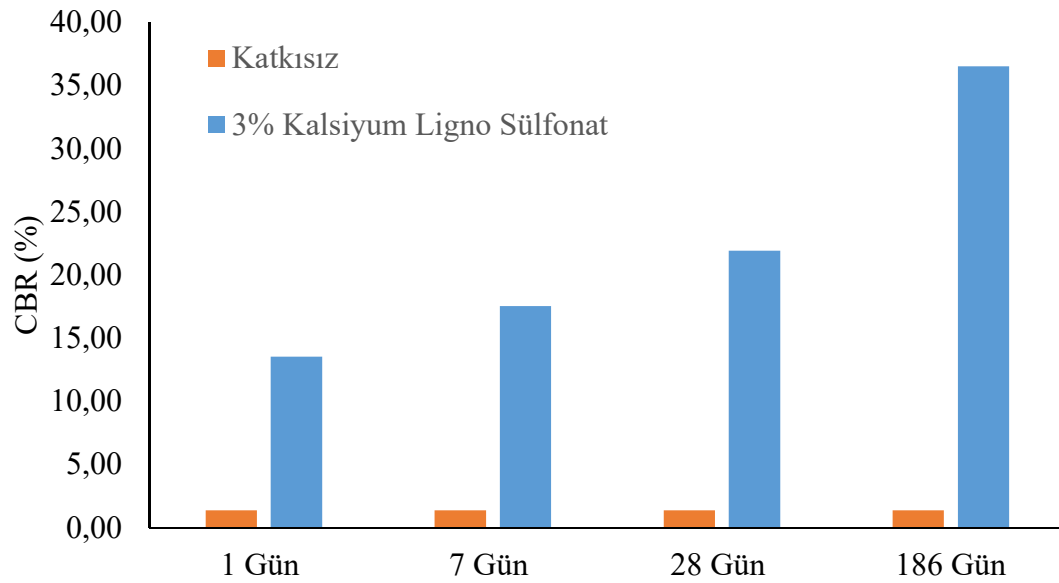
Şekil 5.13. Katkısız ve % 1 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.

Şekil 5.13.'de katkısız zemin numunesi ile % 1 kalsiyum ligno sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile CBR değerindeki artış gösterilmiştir. CBR değerinde kür süresine bağlı olarak 7,66 ila 15,64 kat artış geręekleştii görülmüştür.



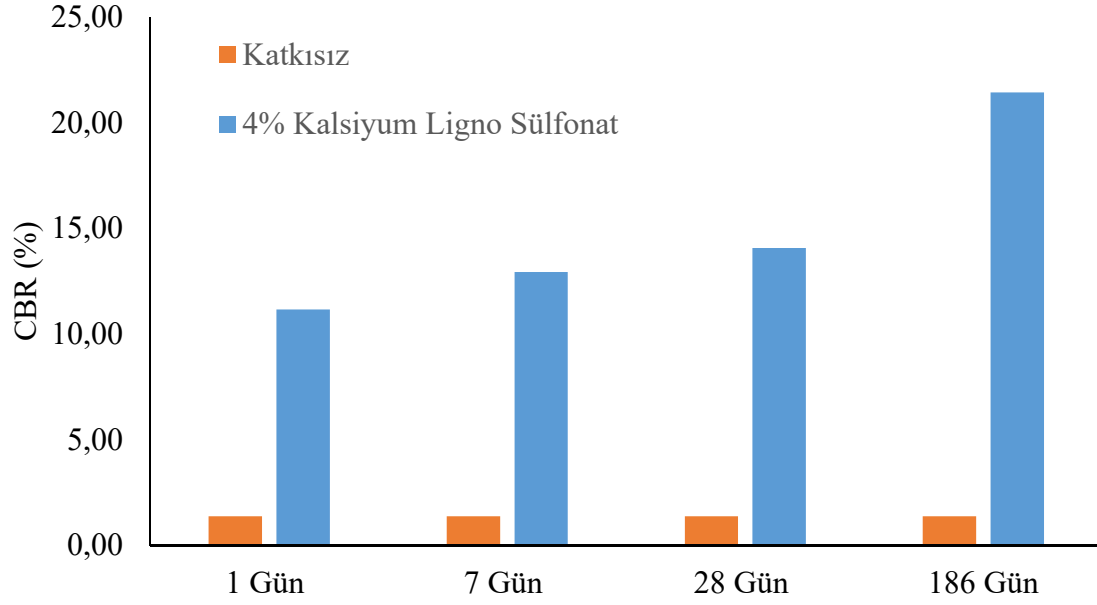
Şekil 5.14. Katkısız ve % 2 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.

Şekil 5.14.'de katkısız zemin numunesi ile % 2 kalsiyum ligno sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile CBR değerindeki artış gösterilmiştir. CBR değerinde kür süresine bağlı olarak 6,32 ila 20,75 kat artış geręekleştii görülmüştür.



Şekil 5.15. Katkısız ve % 3 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.

Şekil 5.15.'de katkısız zemin numunesi ile % 3 kalsiyum ligno sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile CBR değerindeki artış gösterilmiştir. CBR değerinde kür süresine bağlı olarak 9,80 ila 26,46 kat artış gerekleştiiği görölmüştür.

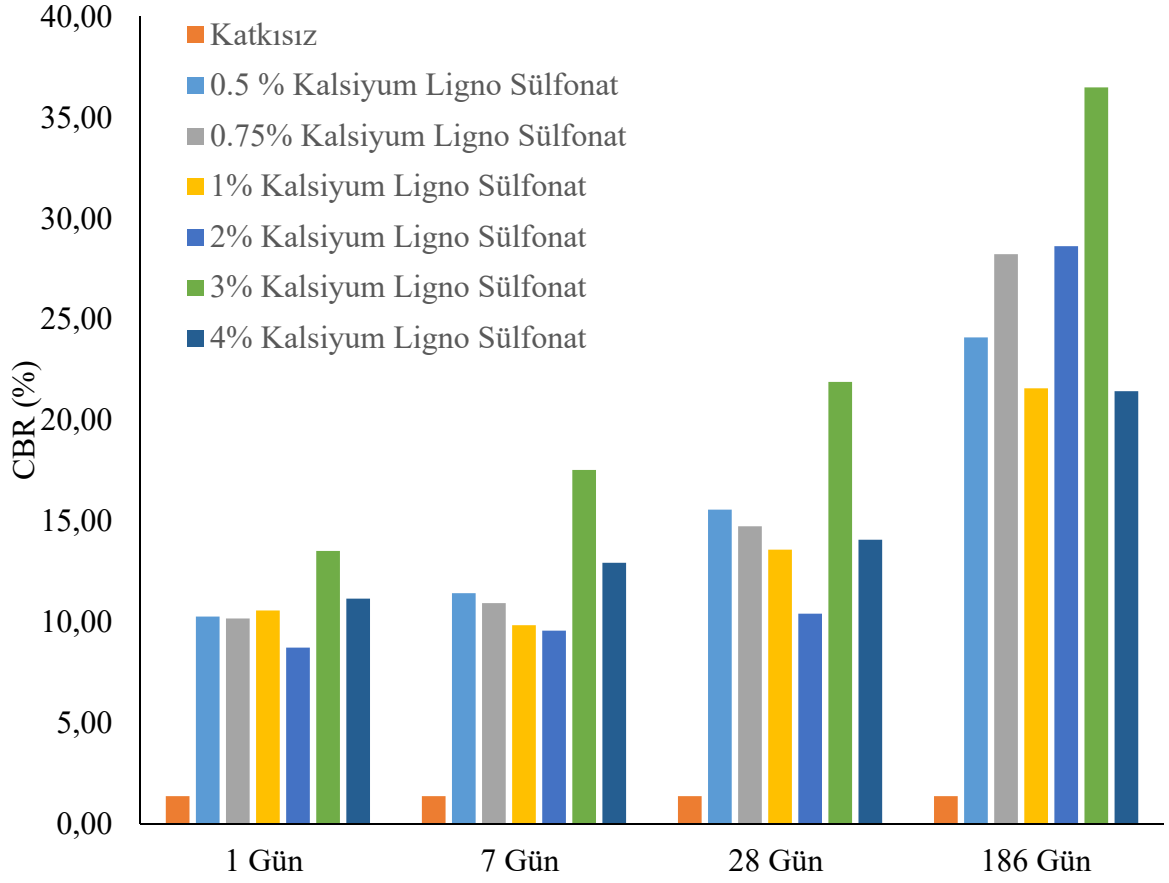


Şekil 5.16. Katkısız ve % 4 Kalsiyum Ligno Sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile birlikte CBR değerlerindeki değişim.

Şekil 5.16.'da katkısız zemin numunesi ile % 4 kalsiyum ligno sülfonat katkıli zeminler için kür süresi ile CBR değerindeki artış gösterilmiştir. CBR değerinde kür süresine bağlı olarak 8,09 ila 15,94 kat artış gerekleştiiği görölmüştür.

Şekillerden de göröldüğü gibi zemine kalsiyum ligno sülfonat katkısı katılması ile birlikte CBR değerlerinde önemli ölçüde artış meydana gelmiştir. Kür süresinin artmasıyla beraber CBR değerlerindeki artışta devam etmiştir. Şekil 5.17.'de katkıli ve katkısız tüm numuneler üzerinde yapılan CBR deneylerinden elde edilen CBR değerleri toplu halde gösterilmiştir.

Şekil 5.17.'de açıkça göröldüğü üzere kalsiyum ligno sülfonat katkıli zeminlerin CBR değerlerinde kür süresinin artmasıyla birlikte önemli oranda artışlar meydana gelmiştir.



Şekil 5.17. Farklı kür ve farklı kalsiyum ligno sülfonat oranlarında CBR değerindeki değişimin toplu halde gösterimi.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında yapılan kompaksiyon deney sonuçları incelendiğinde, zemine kalsiyum ligno sülfonat katılması ile optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde bir miktar artış meydana geldiği görülmüştür. Hem optimum su muhtevasında hem de maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki artışların oldukça düşük seviyelerde olmasından dolayı zemine kalsiyum ligno sülfonat katılmasının optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu söylenebilir.

Serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, zemine kalsiyum ligno sülfonat katılması ile birlikte serbest basınç mukavemeti değerlerinde önemli oranda artış meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca kür süresi ile paralel olarak serbest basınç mukavemeti değerlerinde artış devam etmiştir.

CBR deneyleri sonucunda elde edilen CBR değerleri incelendiğinde serbest basınç deney sonuçlarında olduğu gibi kür süresi ve katkı miktarına bağlı olarak CBR değerlerinde önemli derecede artış meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca zemine kalsiyum ligno sülfonat katılması ile birlikte serbest şişme değerlerinde de kayda değer düşüşler meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Bilindiği üzere karayolu üstyapı tasarımlarındaki en önemli parametre CBR değeridir. Taban zeminin CBR değerine göre temel ve alttemel tabakalarının kalınlıkları belirlenmektedir. Temel ve alttemel tabaka kalınlıkları ne kadar az olursa maliyetinde o kadar az olacağı aşikardır. Özellikle ülkemiz gibi taşıma maliyetlerinin yüksek olduğu ülkelerde yol imalatlarında temel ve alttemel tabakalarının kalınlıklarının yol maliyetlerine etkisi oldukça yüksektir.

Tez çalışması sonucunda karayolu veya demiryolu güzargahlarında, çalışma kapsamında kullanılan zemin gibi oldukça düşük CBR değerine sahip ince daneli zeminlere rastlanması durumunda zemine kalsiyum ligno sülfonat katkısının katılması ile birlikte taban zeminin CBR değerinde ciddi artışlar meydana geleceği beklenmektedir. CBR değerinde meydana gelecek bu artışlar neticesinde yol inşaatlarının maliyetlerinde ciddi anlamda bir ekonomi sağlanabileceği düşünülmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda aşağıdaki çalışmaların yapılması önerilmektedir.

- Tez kapsamında yüksek plastisiteli bir kil üzerinde çalışmalar yapılmıştır. İlerleyen çalışmalarda farklı plastisiteli (düşük, orta, yüksek) killer üzerinde çalışmalar yapılarak kalsiyum ligno sülfonat katkısının kullanılabilirliği incelenebilir.
- Tez kapsamında kalsiyum ligno sülfonat katkısının zeminin konsolidasyon ve geçirgenlik özelliklerine etkisi ile ilgili çalışma yapılmamıştır. İlerleyen çalışmalarda iyileştirmeye bu açıdan da bakılabileceği düşünölmektedir.
- Kalsiyum ligno sülfonat ile iyileştirme yapılan bu zeminin farklı katkılarla (kireç, çimento, uçucu kül vb.) iyileştirilmesi ve iyileştirme sonuçlarının birbirleri ile karşılaştırılması şiddetle önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Türköz**, ‘Şişen Killerin Kireç Katkısı İle Stabilizasyonu Ve Eskişehir- Meşelik Killerine Uygulanması’ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XIX, S.2, 2006 25.01.2006
- [2] **Emine Ayan** ‘Derin Zemin Güçlendirme Yöntemleri Ve Uygulamadan Örnekler’ Haziran 2009
- [3] **Uzuner, B., A.**, 1995, “Temel Mühendisliğine Giriş”, Derya Kitabevi, Trabzon
- [4] **Emine Ayan** ‘ Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri Ve Uygulamadan Örnekler’ Haziran 2009
- [5] **Emine Ayan** ‘ Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri Ve Uygulamadan Örnekler’ Haziran 2009
- [6] **Selçuk Bildik** ‘Zemin İyileştirme Yöntemleri’ İmo meslek içi eğitim 3’ncü oturum 15.11.2017
- [7] **Kayabalı ,K. And Mollamahmutoğlu, M.**, Geoteknik Mühendisliği Elkitabı, McGraw- Hill El Kitapları, Robert W. Day. Gazi Kitabevi, Fersa Matbaası, 600s. 2004.(Selcuk Üni Selçuk-Teknik Dergisi Issn 1302-6178 Journal Of Selcuk-Technic Cilt 8, Sayı:3-2009 Volume 8, Number:3-2009)
- [8] **Selçuk-Teknik Dergisi** Issn 1302-6178 Journal Of Selcuk-Technic Cilt 8, Sayı:3-2009 Volume 8, Number:3-2009
- [9] **Adnan Yetkin Çetin**-Haziran 2011-Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu
- [10] **Esra Uray**, Sadrettin Sancioğlu, E. Aslı Çubukçu Ve M. Doğukan Erdem ‘Çimento İle Stabilizasyonda Optimum Çimento Oranının Belirlenmesi’ 1. Ulusal Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu 12 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum
- [11] **İsmail Kalava** ‘Killerin Çimento Ve Kireç İle Stabilizasyonu’ 1992
- [12] **Ensar Ayan, Aydın Kavak, Ümit Kut** ‘Kilin Kireç Ve Çimento İle Stabilizasyonu’ International Marmara Sciences Congress 4-5.12.2020 Sayfa=338-345
- [13] **Eftelioğlu, M., Bowders, J. J.**, 1992, Permeability Testing Of Fly Ash/Grout Specimens, Environmental Geotechnology, Pp: 495-501, Balkame, Rotterdam

- [14] **Pelin Türker, Bahadır Erdoğan Fehime Katnaş, Asım Yeğınobalı** ‘Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri’ Tçmb / Ar-Ge / Y03.03 Temmuz 2009
- [15] **Url-1** < <http://www.ukqaa.org.uk/wp-content/uploads/Annual-ash-statistics-2014-Public-domain-table-bar-chart.pdf> > Ash Statistics For 2014
- [16] **Fatih Yılmaz** ‘Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Kullanımı’ Isem2016, 3rd International Symposium On Environment And Morality, 4-6 November 2016, Alanya – Turkey
- [17] **Adnan Yetkin Çetin** ‘Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu’ Haziran 2011
- [18] **Koray Öksüz Ve A.Azım Yıldız** ‘Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı’ Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Yık:2006 Cilt:15-3
- [19] **Mehta,P.K.**, ‘Puzzılanıc And Cemmentitious By Products As Mineral Admixtures For Concrete’ Fly Ash,Silica Füme, Slag And Other Mineral By-Products İn Concrete Vol Acı Sp 79, 1983 Pp 1-46
- [20] **Keskin, E., Şahinoğlu, İ, Yavan, O.**, "Pirinç Kabuğu Külü İle İyileştirilen Killi Zeminlerin Serbest Şişme Değerlerinin İncelenmesi", 3. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresi, Pp350-351, Kocaeli, Türkiye, 04 Mayıs 2018
- [21] **Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi** 16-17 Ekim 2008, Selçuk Üniversitesi, Konya Aydın Kavak , Ahmet Gürkan Güngör, Cihat Avşar, Birgül Atbaş
- [22] **Murat Kızılcılık** ‘Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç İle Stabilizasyonu’ Kocaeli, 2010
- [23] **R. Noorzad And B. Ta'negonbadi** ‘Volume Change Behavior Of Stabilized Expansive Clay With Lignosulfonate’ Received 7 January 2018; Received İn Revised Form 23 May 2018; Accepted 6 August 2018
- [24] **Faculty Of Civil Engineering**, Babol Noshirvani University Of Technology, Babol, Iran. Received 7 January 2018; Received İn Revised Form 23 May 2018; Accepted 6 August 2018
- [25] **Qingsheng Chen And Buddhima Indraratna** ‘Deformation Behavior Of Lignosulfonate-Treated Sandy Silt Under Cyclic Loading’ 2014
- [26] **Qingsheng Chen1 And Buddhima Indraratna** ‘Shear Behaviour Of Sandy Silt Treated With Lignosulfonate’ July 2, 2014 Submitted To: Canadian Geotechnical Journal

- [27] **Qingsheng Chen , Buddhima Indraratna John Carter ,** Cholachat Rujikiatkamjorn ‘A Theoretical And Experimental Study On The Behaviour Of Lignosulfonate-Treated Sandy Silt ‘ Computers And Geotechnics 61 (2014) 316–327
- [28] **Chen, Indraratna And Rujikiatkamjorn** ‘Behaviour Of Lignosulfonate-Treated Soil Under Cyclic Loading’ 29/04/2015
- [29] **Liang, Y., Jim Yeh, T-C., Ma, C., Zhang, J., Xu, W., Yang, D., Hao, Y.,** ‘Experimental Investigation On Hole Erosion Behaviors Of Chemical Stabilizer Treated Soil, Journal Of Hydrology’ (2020),
- [30] **D.P. Alazigha, B. Indraratna, J.S. Vinod, A. Heitor,** ‘Mechanisms Of Stabilization Of Expansive Soil With Lignosulfonate Admixture’, Transportation Geotechnics (2017)
- [31] **Alazigha, Indraratna, Vinod And Ezeajugh** ‘The Swelling Behaviour Of Lignosulfonate-Treated Expansive Soil’ 23/03/2016
- [32] **Indraratna, Buddhima; Athukorala, Rasika;** And Vinod, Jayan, "Estimating The Rate Of Erosion Of A Silty Sand Treated With Lignosulfonate" (2013). Faculty Of Engineering And Information Sciences - Papers: Part A. 713.
- [33] **Geethu Vijayan, Aswathy Sasikumar** ‘Stabilisation Of Clayey Soil By Using Lignosulfonate’ 02 Feb 2019
- [34] **Athukorala, Rasika,** Geotechnical Characteristics Of An Erodible Soil Stabilised By Lignosulfonate – An Analytical Perspective, Doctor Of Philosophy Thesis, Department Of Civil, Mining And Environmental Engineering, University Of Wollongong, 2013. [Http://Ro.Uow.Edu.Au/Theses/3909](http://Ro.Uow.Edu.Au/Theses/3909)
- [35] **Anitha Susan** “Study On Marine Clay Replaced Withsodium Lignosulfonate And Cement” Ijert, Vol 6, Issue 3, Pp. 496-498 March 2017
- [36] **Sangamesh Konnur,** Sahana Antaratani ‘Ground Improvement By Stabilization Technique Using Pond Ash And Sodium Ligno Sulphonate’issn (Print): 2393-8374, (Online): 2394-0697, Volume-4, Issue-11, 2017
- [37] **Vinod, J S.; Mahamud, M A. A; And Indraratna, B:** ‘Elastic Modules Of Soils Treated With Lignosulfonate’ 2012, 487-492.
- [38] **Hamid Reza Koohpeyma, Amir Hossein Vakili, Hossein Moayedi, Alireza Panjsetooni, And Ramli Nazir** ‘Investigating The Effect Of Lignosulfonate On Erosion Rate Of The Embankments Constructed With Clayey Sand’ 9 October 2013

- [39] **Amir Hossein Vakili , Javad Ghasemi , Mohamad Razip Bin Selamat , Mahdi Salimi, Mohammad Sadegh Farhadi** ‘Internal Erosional Behaviour Of Dispersive Clay Stabilized With Lignosulfonate And Reinforced With Polypropylene Fiber’ Received 23 April 2018 Received In Revised Form 28 September 2018 Accepted 26 October 2018
- [40] **Amir Hossein Vakilia, Mohammad Kaedi,** Mehdi Mokhberi, Mohamad Razip Bin Selamat, Mahdi Salimi ‘Treatment Of Highly Dispersive Clay By Lignosulfonate Addition And Electroosmosis Application’ Applied Clay Science 152 (2018) 1–8 28 November 2017
- [41] **Rasika Athukorala, Buddhima Indraratna And Jayan S. Vinod** ‘Modeling The Internal Erosion Behavior Of Lignosulfonate Treated Soil’ Geo-Congress 2013 Asce 2013 (1872-1881)
- [42] **Alazigha, Dennis Pere,** The Efficacy Of Lignosulfonate In Controlling The Swell Potential Of Expansive Soil And Its Stabilization Mechanisms, Doctor Of Philosophy Thesis, School Of Civil, Mining And Environmental Engineering, University Of Wollongong, 2015. <https://Ro.Uow.Edu.Au/Theses/4483>
- [43] **Wu Dajiang, She Wei, Wei Luansu, Zuo Wenqiang, Hu Xiangyu, Hong Jinxiang, Miao Changwen** ‘Stabilization Mechanism Of Calcium Lignosulphonate Used In Expansion Sensitive Soil’ Journal Of Wuhan University Of Technology-Mater. Sci. Ed. Wwww.Jwutms.Net Oct. 2020 (847-855)
- [44] **Alazigha, Dennis Pere; Vinod, J S. Indraratna, Buddhima;** And Heitor, Ana, "Potential Use Of Lignosulfonate For Expansive Soil Stabilisation" (2019). Faculty Of Engineering And Information Sciences - Papers: Part B. 3319.
- [45] **Vinod, J S.; Indraratna, Buddhima; And Mahamud,** M A. A: Internal Erosional Behaviour Of Lignosulfonate Treated Dispersive Clay 2010, 549-554. <https://Ro.Uow.Edu.Au/Engpapers/913>
- [46] **Bahram Ta'negonbadi, Reza Noorzad** ‘Stabilization Of Clayey Soil Using Lignosulfonate’ Transportation Geotechnics 12 (2017) 45–55
- [47] **A. Sezer ,Et Al .** , "An Investigation Into Strength And Permittivity Of Compacted Sand-Clay Mixtures By Partial Replacement Of Water With Lignosulfonate," Acta Physica Polonica A , Vol.130, No.1, Pp.23-27, 2016
- [48] **Bahram Ta'negonbadi, Reza Noorzad** ‘Physical And Geotechnical Long-Term Properties Of Lignosulfonate-Stabilized Clay: An Experimental Investigation’ Transportation Geotechnics 17 (2018) 41–50
- [49] **Buddhima Indraratna, M. A. A. Mahamu And J S Vinod,** ‘Chemical And Mineralogical Behaviour Of Lignosulfonate Treated Soils’ Geocongress 2012 © Asce 2012 P: 1146-1155

- [50] **Indraratna, Buddhima; Athukorala, Rasika; And Vinod, Jayan S.**, "Shear Behaviour Of A Lignosulfonate Treated Silty Sand" (2015). Faculty Of Engineering And Information Sciences - Papers: Part A. 4211.
- [51] **M.T. Fernandez, S. Orlandi, M. Codevilla, T.M. Piqué, D. Manzanal**, Performance Of Calcium Lignosulfonate As A Stabiliser Of Highly Expansive Clay, *Transportation Geotechnics* (2020), Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100469>
- [52] **Noorzad, Reza & Ta'negonbadi, Bahram.** (2018). Mechanical Properties Of Expansive Clay Stabilized With Lignosulfonate. *Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hydrogeology*. 51. Qjgeh2017-050. 10.1144/Qjgeh2017-050.
- [53] **Indian Geotechnical Conference 2017** Geonest(Experimental Investigation Of Lateritic Soil Treated With Calcium Lignosulfonate)
- [54] **Astm D422-63e2, (2007)**, Standard Test Method For Particle-Size Analysis Of Soils (Withdrawn 2016), Astm International, West Conshohocken, Pa.
- [55] **Astm D4318-17e1, (2017)**, Standard Test Methods For Liquid Limit, Plastic Limit, And Plasticity Index Of Soils, Astm International, West Conshohocken, Pa.
- [56] **Astm D854-14, (2014)**, Standard Test Methods For Specific Gravity Of Soil Solids By Water Pycnometer, Astm International, West Conshohocke