



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



ÇEVRE DOSTU BİR KATKI İLE ZEMİN STABİLİZASYONU

Yüksek Lisans Tezi

Aysel DURMUŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2022

T.C.

EGE ÜNİVERSİTESİ

ÇEVRE DOSTU BİR KATKI İLE ZEMİN STABİLİZASYONU

Aysel DURMUŞ

Danışman : Prof. Dr. Alper SEZER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Yüksek Lisans Programı

İzmir
2022

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

15/ 09 / 2022

İmzası

Aysel DURMUŞ

ÖZET**ÇEVRE DOSTU BİR KATKI İLE ZEMİN STABİLİZASYONU**

DURMUŞ, Aysel

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Alper SEZER

Eylül 2022, 164 sayfa

Alkalen katkılar üretim ve kullanım esnasında çevreye zarar verdiklerinden, zemin stabilizasyonunda kullanımı günümüzde bazı soru işaretlerine sebep olmaktadır. Bu çalışmada sürdürülebilir ve çevre dostu bir zemin stabilizasyon yöntemi seçilmiş ve üretimleri ve kullanımları sırasında çevresel problemlere yol açmayan atık bir yan ürün olan sodyum linyosülfonat kullanılmıştır. Kil ve silt zeminlerde kür süresi, sıcaklık, katkı oranı ve geleneksel katkı malzemesi olan kireç ile linyosülfonatın birlikte kullanılarak kil zeminlerde katkı çeşidi etkisi incelenmiştir. Yapılan serbest basınç dayanımı deneyleri sonucunda, farklı sıcaklık ve kür sürelerine bağlı olarak %2 linyosülfonat katkısının dayanımı 2,20 kat, %5 linyosülfonat katkısının 4,25 kat arttırabildiği görülmüştür. %4 kireç ve %2 linyosülfonat katkısı serbest basınç dayanımını 28 gün kür süresinde 12,5 kat arttırabilmiştir. Ancak iki katkı malzemesinin birlikte kullanımı ve yalnızca linyosülfonat kullanımı, dayanım açısından kireç kullanılan kil zeminler ile normal kür koşullarında rekabet edememiştir. Silt zeminlerde açık hava koşullarında katkı oranı arttıkça dayanım artmış ve silt zemine göre %5 linyosülfonat katkısı ile 7 gün kür süresinde dayanım %23,66 artarak optimuma ulaşmıştır. Kesme kutusu deneyleri sonucunda, katkı oranı ve kür süresinin kayma dayanımı parametrelerini arttırdığı, 28 gün kür süresinde %5 linyosülfonat katkısının kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini ve kayma gerilmelerini maksimize ettiği görülmüştür. Taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınım analizleri, bu katkıların kullanımı ile gözlenen davranış değişikliğinin nedenlerini ortaya koymaktadır.

Anahtar sözcükler: Linyosülfonat, atık malzeme, çevre dostu, kaolin kili, silt, mekanik özellikler



ABSTRACT**SOIL STABILIZATION WITH AN ENVIRONMENTAL-FRIENDLY ADDITIVE**

DURMUŞ, Aysel

M.Sc. in Civil Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Alper SEZER

September 2022, 164 pages

Since the production and use of alkaline stabilizers are not environmental-friendly, their use in soil stabilization causes a number of question marks. In this study, a sustainable and environmental-friendly stabilization method is opted and sodium lignosulfonate additive-which is a waste product which causes no environmental problems during their use and production, was used. Specimens prepared using clay and silt were tested to analyze the effects of curing period, curing temperature, additive content. Besides, sodium lignosulfonate and lime are combined to investigate the effect of additive type. As a result of the unconfined compressive strength tests, it was observed that depending on different temperatures and curing period, 2 % and 5% lignosulfonate inclusion could increase the soil strength 2.20 and 4.25 times, respectively. Addition of 4% lime and 2% lignosulfonate increased the unconfined compressive strength 12.5 times after 28 days of curing period. However, the strength of clay specimens improved by use of combination of lime and & lignosulfonate and only lignosulfonate were not as effective of those improved with lime in normal conditions. Silty soils that were cured under room conditions, the soil strength increased with increasing stabilizer content and the strength reached an optimum increasing % 23.66 in 7 days curing period with 5% lignosulfonate additive. As a result of the direct shear tests, it was observed that the effect of content and curing period caused an increase in shear strength identifiers of stabilized soils, 5% lignosulfonate additive maximized the cohesion, internal friction angle and shear stresses as well after 28 days curing period. Scanning electron microscopy and Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX) reveal the basis for changes in behavior of these soils by use of these additives.

Keywords: Lignosulfonate, waste, material, kaolin clay, silt, mechanical properties

ÖNSÖZ

Zeminlerin uygun koşullarda iyileştirilmesi gerekliliği sonucunda, geleneksel katkı malzemelerinin kullanımı ile ortaya çıkan bazı çevresel problemler nedeniyle, sürdürülebilir ve doğa dostu malzemelerin alternatif olarak kullanılabilmesi düşüncesi bu tez çalışmasının oluşmasına katkı sağlamıştır.

Tez çalışmasında, bu konuda yapılmış çalışmaların yazılı kaynaklarından elde edilen bilgiler doğrultusunda bir kaynak oluşturulması amaçlanmıştır.

Yaptığım çalışmada bana yol gösteren ve tezimin şekillenmesine katkı sağlayarak desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Alper Sezer'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İZMİR

15/09/2022

Adı-Soyadı

Aysel DURMUŞ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK.....	ii
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
TABLolar DİZİNİ.....	xxxii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxxiv
1. GİRİŞ	1
2. KOnu İLe İLGİLİ GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	5
2.1 Linyosülfonat Katkısı ile Stabilizasyon.....	7

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

2.1.1 Linyosülfonatların üretim süreçleri ve genel özellikleri.....	7
2.1.2 Linyosülfonat ile stabilizasyon	11
2.2 Kireç Katkısı ile Zemin İyileştirme	44
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	49
3.1 Malzeme	49
3.1.1 Kaolin kili	49
3.1.2 Silt.....	51
3.1.3 Sodyum linyosülfonat katkısının özellikleri	52
3.1.4 Kireç katkısının özellikleri	53
3.2 Deney Programı	54
3.2.1 Serbest basınç deneyi.....	57
3.2.2 Dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyi.....	58
3.2.3 Zemin çeşidi değişimi	61

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.2.4 Katkı çeşidi değişimi	61
3.2.5 Katkı oranı değişimi	62
3.2.6 Kür süresi değişimi	62
3.2.7 Kür sıcaklığı değişimi	63
3.3 Linyosülfonat ile Stabilizasyon	64
3.3.1 Optimum su içeriğinin belirlenmesi	64
3.3.2 Serbest basınç deneyi örneklerinin hazırlanması.....	66
3.3.3 Dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyi örneklerinin hazırlanması.....	69
3.4 Kireç ile stabilizasyon.....	70
3.4.1 Optimum su içeriğinin belirlenmesi	70
3.4.2 Serbest basınç deneyi örneklerinin hazırlanması	70
3.5 Linyosülfonat ve Kirecin Birlikte Kullanımı ile Stabilizasyon	72
3.5.1 Optimum su içeriğinin belirlenmesi	72

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.5.2 Serbest basınç deneyi örneklerinin hazırlanması.....	73
4. BULGULAR.....	75
4.1 Linyosülfonat ile Stabilize Edilen Zeminlerin Serbest Basınç Deney Sonuçları.....	75
4.1.1 Kür süresinin etkisi	75
4.1.2 Katkı oranının etkisi	81
4.1.3.Kür sıcaklığının etkisi.....	104
4.1.4.Katkı çeşidinin etkisi	115
4.2 Linyosülfonat ve Kirecin Beraber Kullanımı ile Stabilize Edilen Kaolin Zeminlerin Serbest Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	123
4.3.Linyosülfonat Kullanılarak Stabilize Edilen Kaolin Zeminlerin Dairesel En Kesitli Direkt Kesme Kutusu Deney Sonuçları.....	132
4.3.1. Linyosülfonat katkılı zeminlerin değişen kür süresi, katkı oranları ve uygulanan normal basınçlara göre kayma gerilmesi- deformasyon davranışı	133
4.3.2. . Linyosülfonat katkılı zeminlerin farklı kür süresi ve katkı oranlarına göre içsel sürtünme açısı ve kohezyon değişimi	140

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.3.3.SEM ve EDX analizi ile mikroyapısal incelemeler	144
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	152
KAYNAKLAR DİZİNİ	157
TEŞEKKÜR	163
ÖZGEÇMİŞ	164



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Lignin yapısı : (a) p-kumaril alkol, (b) koniferil alkol, (c) sinapil alkol (Demuner et al., 2019).....	7
2.2 Linyosülfonatların genel yapısal birimleri, (Arel ve Aydın, 2017)	8
2.3 Sodyum linyosülfonat, $C_{20}H_{24}Na_2O_{10}S_2$ (sodyum tuzu veya linyosülfonik asit), (Aro and Fatehi, 2017)	9
2.4 Linyosülfonat ile stabilize edilmiş dispersif kilin stabilizasyon mekanizması (Jayan S. Vinod et al., 2010)	12
2.5 Linyosülfonat katkısı ile killi zeminde oluşan polimer zinciri ve yumaksı yapı.....	13
2.6 (a) Katkısız saf siltli kum zemine ait SEM görüntüsü, (b) % 0.4 linyosülfonat ile stabilize siltli kum zemine ait SEM görüntüsü, (Buddhima Indraratna, Muttuvel, Khabbaz, & Armstrong, 2008).....	14
2.7 Linyosülfonat ile iyileştirilmiş kaolin kilinin kür süresine göre elektriksel iletkenlik değişimi, (Vinod et al., 2012).....	15
2.8 Stabilize edilmemiş ve linyosülfonat ile stabilize edilmiş şişen kilin mikroskopik görüntüsü, (Ta'neonbadi and Noorzad, 2018)	16
2.9 Amol kili üzerinde linyosülfonat katkısının kıvam limitlerine etkisi	20
2.10 Linyosülfonat katkısı uygulanmış ve uygulanmamış siltli kumun farklı efektif normal gerilmeler altında gerilme -deformasyon davranışının karşılaştırılması (Athukorala, 2013).....	25

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.11 Linyosülfonat uygulanmış kumlu silt zeminin serbest basınç dayanımı (Chen et al., 2014).....	27
2.12 % 2 linyosülfonat katkısı içeren kum-bentonit karışımları için serbest basınç dayanımı testi sonuçları (Sezer et al., 2016)	29
2.13 Linyosülfonat uygulanmış zeminlerin serbest basınç dayanımı, Chavali and Reshmarani (2020).....	31
2.14 CL-ML zemin sınıfındaki bir zeminin linyosülfonat içeriğine bağlı serbest basınç dayanımı test sonuçları, Li et al. (2019).....	32
2.15 7 günlük kür süresi için %1, 2, 3 ve %4 linyosülfonat içeren stabilize edilmemiş ve stabilize edilmiş numuneler için serbest basınç dayanımı testlerinden elde edilen gerilme-deformasyon grafiği, Roshan et al. (2022)	34
2.16 Farklı kürleme sürelerinde % 2 linyosülfonat içeriği kullanılan zeminde serbest basınç dayanımı davranışı, Roshan et al. (2022).....	34
2.17 Donma-çözülme döngülerinin stabilize edilmiş numunenin sınırsız basınç dayanımı üzerindeki etkisi, Roshan et al. (2022).....	35
2.18 Stabilize edilmiş ve güçlendirilmiş numunelerin % 50 mukavemetine eşdeğer deformasyon katsayısı üzerinde donma-çözülme döngüsü etkisi, Roshan et al. (2022).....	35
2.19 Farklı tekrarlı deviatör gerilmeler ve çevre basınçlarında 10.000 yük döngüsünün sonunda elde edilen Esneklik modülleri, Singh and Sahoo (2021).....	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.20 Linyosülfonat ve çimento katkılı kaolin kilinin E/qu değişimi, Ls: Linyosülfonat, C:Çimento (Vinod et al., 2012).....	38
2.21 Farklı yüzdelere ve kür sürelerinde linyosülfonat stabilize zeminlerin dayanımı, Singh et al. (2021).....	40
3.1. Deneysel çalışmada kullanılan kaolin kilinin görüntüsü	49
3.2 Kaolin kilinin granülometri eğrisi.....	50
3.3 Plastik olmayan silt zemin	52
3.4 Plastik olmayan silt zeminin granülometri eğrisi.....	52
3.5 Sodyum linyosülfonat malzemesi	53
3.6 Sönmemiş kireç örneği.....	53
3.7 Serbest basınç deney cihazı.....	58
3.8 Direkt kesme deneyi düzeneği	59
3.9 Dairesel kesitli rijit kutu.....	59
3.10 Çıkıntılı metal plaka, poroz taşlar, dairesel kesici ve üst başlık	60
3.11 1 ve 7 gün süreyle açıkta bekletilen linyosülfonat içeren kaolin numuneleri	63

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.12 Kaolin zeminde linyosülfonat katkısının optimum su içeriği – kuru birim hacim ağırlık ilişkisi.....	65
3.13 Silt zeminde linyosülfonat katkısının optimum su içeriği – kuru birim hacim ağırlık ilişkisi.....	66
3.14 90 günlük kür süresinde bekletilecek olan saf kaolin numunesi.....	67
3.15 28 günlük kürde bekletilmek üzere streç filme sarılarak ağzı kapalı bir kapta bekletilen serbest basınç deneyi numuneleri.....	68
3.16 Kür odasında 1 gün bekletilmiş %1,5 linyosülfonat içeren S+1.5LS-1 ve kür odasında 90 gün bekletilen ve %1 linyosülfonat içeren KL+1LS-90 numunelerinin kırılması	68
3.17 Dairesel kesici içerisinde sıkıştırılmış numune örneği ve streç film ile sarılarak etiketlenen kür odasında bekletilmek üzere hazırlanan dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyi numuneleri	69
3.18 28 gün kürde bekletilen ve %3 kireç içeren KL+3KRÇ-28 numunesi	71
3.19 1 gün kürde bekletilen KL+6KRÇ-1 numunesi	71
3.20 1 günlük kürde bekletilmiş KL+4KRÇ2LS-1 ve KL+2KRÇ1LS-1 numuneleri.....	73
4.1 Kaolin zeminler için linyosülfonat katkısının kür süresine bağlı olarak dayanım değişimi	77

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.2 Silt zeminler için linyosülfonat katkısının kür süresine bağlı dayanım grafiği.....	78
4.3 Linyosülfonat katkılı numunelerde kür süresinin sekant modülüne etkisi.....	79
4.4 Linyosülfonat katkılı silt zeminlerde kür süresine bağlı sekant modülü değerleri.....	80
4.5 1 gün kürlenmiş örneklerde linyosülfonat katkı oranına göre kaolin zeminlerde dayanım değişimi	81
4.6 1 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği	82
4.7 7 gün kürde bekletilen ve kaolin zeminler üzerinde farklı oranlarda linyosülfonat katkısının serbest basınç dayanımına etkisi	83
4.8 1 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği	84
4.9 28 gün kürde bekletilen ve kaolin zeminler üzerinde farklı oranlarda linyosülfonat katkısının serbest basınç dayanımına etkisi	85
4.10 28 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği	86
4.11 90 gün kürde bekletilen ve kaolin zeminler üzerinde farklı oranlarda linyosülfonat katkısının serbest basınç dayanımına etkisi	87

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.12 90 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği	88
4.13 Linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği....	89
4.14 1 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisi	90
4.15 7 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisi	91
4.16 28 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisi	92
4.17 90 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisi	93
4.18 1 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin dayanım-eksenel deformasyon ilişkisinin katkı oranına göre değişimi	94
4.19 1 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı silt zemin numunelerinde deformasyon değişimi	95
4.20 7 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin dayanım-eksenel deformasyon ilişkisinin katkı oranına göre değişimi	96
4.21 7 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı silt zemin numunelerinde deformasyon değişimi	97

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.22 28 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin dayanım-eksenel deformasyon ilişkisinin katkı oranına göre değişimi	98
4.23 90 gün süreyle kürlenene linyosülfonat katkılı silt zemin numunelerinde deformasyon değişimi	99
4.24 28 gün süreyle kürlenene linyosülfonat katkılı silt zemin numunelerinde deformasyon değişimi	99
4.25 28 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin dayanım-eksenel deformasyon ilişkisinin katkı oranına göre değişimi	100
4.26 1 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisinin katkı oranına göre değişimi	101
4.27 7 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisinin katkı oranına göre değişimi	102
4.28 28 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisinin katkı oranına göre değişimi	103
4.29 90 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisinin katkı oranına göre değişimi	104
4.30 Belirlenen 1 gün kür süresi için farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerde sıcaklık değişiminin dayanıma etkisinin sütun grafiği	105
4.31 Belirlenen 1 gün kür süresi için farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerde farklı sıcaklıklardaki dayanım-eksenel deformasyon dağılım grafiği ...	106

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.32 Belirlenen 7 gün kür süresi için farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerde sıcaklık değişiminin dayanıma etkisinin sütun grafiği	107
4.33 Belirlenen 7 gün kür süresi için farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerde açık hava koşullarında dayanım- eksenel deformasyon dağılım grafiği	108
4.34 7 gün kür süresinde sıcaklık değişimine bağlı deformasyonlar	109
4.35 1 gün kür süresinde sıcaklık değişimine bağlı deformasyonlar	109
4.36 Sıcaklık değişimine göre 1gün kür süresinde farklı linyosülfonat katkısı oranlarında silt zeminlerin dayanımları	110
4.37 Açık hava koşullarında farklı linyosülfonat katkısı oranlarında silt zeminlerin dayanım- eksenel deformasyon dağılım grafiği	111
4.38 7 gün kür için sıcaklık değişimine göre farklı LS katkılarında silt zeminlerin dayanımı.....	112
4.39 Farklı kür koşullarında farklı linyosülfonat katkısı içeriklerindeki silt zeminlerin dayanımlarının dayanım- eksenel deformasyon dağılım grafiği.....	113
4.41 1 gün kür süresinde silt numunelerin sıcaklık farkının nokta deformasyon grafiği.....	114
4.40 7 gün kür süresinde silt numunelerin sıcaklık farkının nokta deformasyon grafiği.....	115
4.42 Kireç ve linyosülfonat katkılarının kaolin zeminlerde 1,7, 28 ve 90 gün kür sürelerinde kullanımının dayanımlarının karşılaştırılması.....	116

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.43 1 günlük kür süresi için farklı katkı çeşitlerinin kaolin zeminlerde dayanım- eksenel deformasyon davranışına etkisi.....	117
4.44 7 günlük kür süresi için farklı katkı çeşitlerinin kaolin zeminlerde dayanım- eksenel deformasyon davranışına etkisi.....	118
4.45 28 günlük kür süresi için farklı katkı çeşitlerinin kaolin zeminlerde dayanım- eksenel deformasyon davranışına etkisi.....	119
4.46 90 günlük kür süresi için farklı katkı çeşitlerinin kaolin zeminlerde dayanım- eksenel deformasyon davranışına etkisi.....	119
4.47 1 gün kür süresinde kireç ve linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin nokta deformasyon grafiği	120
4.48 7 gün kür süresinde kireç ve linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin nokta deformasyon grafiği	121
4.49 28 gün kür süresinde kireç ve linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin nokta deformasyon grafiği	122
4.50 90 gün süreyle kürlenmiş kireç ve linyosülfonat katkılı kaolin numunelerinin nokta deformasyon grafiği	122
4.51 Farklı katkıların serbest basınç dayanımlarının belirli kür sürelerinde karşılaştırılması	124
4.52 Kireç katkısı ve farklı iki katkı malzemesinin birlikte kullanıldığı kaolin zemin numunelerin 1 gün kür süresi için dayanım- deformasyon grafiği	125

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.53 Kireç katkısı ve farklı iki katkı malzemesinin birlikte kullanıldığı kaolin zemin numunelerin 7 gün kür süresi için dayanım- deformasyon grafiği	126
4.54 Kireç katkısı kullanılan ve farklı iki katkı malzemesinin birlikte kullanıldığı kaolin zemin numunelerin 28 gün kür süresi için dayanım- deformasyon grafiği	127
4.55 Kireç katkısı kullanılan ve farklı iki katkı malzemesinin birlikte kullanıldığı kaolin zemin numunelerin 90 gün kür süresi için dayanım- deformasyon grafiği ..	128
4.56 Farklı katkıların birlikte kullanımı ve çeşitli katkılarla hazırlanan kaolin örneklerinin 1 gün kür süresi sonunda nokta deformasyon grafiği.....	129
4.57 Farklı katkıların birlikte kullanımı ve çeşitli katkılarla hazırlanan kaolin örneklerinin 7 gün kür süresi sonunda nokta deformasyon grafiği.....	130
4.58 Farklı katkıların birlikte kullanımı ve çeşitli katkılarla hazırlanan kaolin örneklerinin 28 gün kür süresi sonunda nokta deformasyon grafiği.....	131
4.59 Farklı katkıların birlikte kullanımı ve çeşitli katkılarla hazırlanan kaolin örneklerinin 90 gün kür süresi sonunda nokta deformasyon grafiği.....	132
4.60 31.5 kPa yük altında kesme kutusu deney numunelerin katkı oranları ve kür süresine göre gerilme-deplasman davranışı	134
4.61 63 kPa yük altında kesme kutusu deney numunelerin katkı oranları ve kür süresine göre gerilme-deplasman davranışı	135
4.62 94.4 kPa yük altında kesme kutusu deney numunelerin katkı oranları ve kür süresine göre kesme gerilmesi- yer değiştirme davranışı	136

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.63 31.5 kPa altında kesme gerilmesi-deplasman davranışının noktasal gösterimi.....	137
4.64 63 kPa yük altında linyosülfonat katkılı kaolin numunelerinin kesme gerilmelerine karşılık nokta deplasman grafiği	138
4.65 94.4 kPa yük altında linyosülfonat katkılı kaolin numunelerinin kesme gerilmelerine karşılık nokta deplasman grafiği.....	139
4.66 Farklı normal basınçlar uygulanan %0,5 linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin kesme kutusu deneyi numuneleri	139
4.67 Pik içsel sürtünme açısı için 7 ve 28 günlük numunelerde olası gerilme aralıkları.....	141
4.68 Pik içsel sürtünme açısı için 7 günlük numunelerde olası gerilme aralıkları...	142
4.69 Pik içsel sürtünme açısı için 28 günlük numunelerde olası gerilme aralıkları..	143
4.70 (a), Kaolin kilinin (KL0) 3000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (b) % Kaolin kilinin (KL0) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü (Sezer vd., 2016) (c) % 1.5 linyosülfonat katkısı içeren kaolinin (KL+1.5LS) 20000x yakınlaştırılmış görüntüsü (d) % 1.5 linyosülfonat katkısı içeren kaolinin (KL+1.5LS) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü.....	145
4.71 (a), %1 linyosülfonat katkısı içeren kaolinin (KL+1LS) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü (b) %1 linyosülfonat katkısı içeren kaolinin (KL+1LS) 20000x yakınlaştırılmış görüntüsü.....	146

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

- 4.72 (a), %5 linyosülfonat katkısı içeren zeminin (KL+5LS) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü (b) %1,5 linyosülfonat katkısı içeren zeminin (KL+1.5LS) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü..... 147
- 4.73 (a), Linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneğinin 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (b) Linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneğinin 10000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (c) Linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneğinin 100000x yakınlaştırılmış görüntüsü..... 148
- 4.74 (a), %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren kaolin zeminin (KL+4KRC+2LS) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (b) 48 (a), %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren kaolin zeminin (KL+4KRC+2LS) 20000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (c) %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren kaolin zeminin (KL+4KRC+2LS) 100000x yakınlaştırılmış görüntüsü..... 149
- 4.75 (a), Silt zeminin 2000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (b) %0,5 linyosülfonat ilave edilmiş silt zeminini0 (S+0.5LS) 2000x yakınlaştırılmış görüntüsü (c) % 0.5 linyosülfonat ilave edilmiş silt zeminin (S+0.5LS) EDS analizi 150
- 4.76 (a), %5 linyosülfonat katkısı içeren silt zeminin (S+5LS) 2000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (b) %5 linyosülfonat katkısı içeren zeminin (S+5LS) 20000x yakınlaştırılmış görüntüsü..... 151



TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Linyosülfonat ile iyileştirilmiş zeminin kompaksiyon sonuçları.	18
Çizelge 2.2 Geleneksel katkı kullanımını zemin davranışı üzerinde etkisi	47
Çizelge 3.1 Kullanılan zeminin fiziksel özellikleri.....	50
Çizelge 3.2 Kaolin kilinin kimyasal özellikleri.....	51
Çizelge 3.3 Sodyum linyosülfonat teknik özellikleri.....	53
Çizelge 3.4 Serbest Basınç Dayanımı Deneyi Programı.....	55
Çizelge 3.5 Dairesel En Kesitli Direkt Kesme Kutusu Deneyi Programı.....	57
Çizelge 4.1 Linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin kür süresine karşılık gelen serbest basınç dayanımları	76
Çizelge 4.2 Numunelerde uygulanan normal basınç değişimi ile pik..... kayma gerilmeleri.....	140
Çizelge 4.3 Kesme kutusu deneyleri sonucu elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı.....	144



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
CO_2	Karbon dioksit
OH^-	Hidroksil iyonu
HSO_3^-	Hidrojen sülfıt
SO_2	Sülfür dioksit
SO_3^{2-}	Sülfıt
Ca	Kalsiyum
C	Karbon
Na	Sodyum
NH_4	Amonyum
Mg	Magnezyum
Na	Sodyum
CO_2	Karbon dioksit
OH^-	Hidroksil iyonu
HSO_3^-	Hidrojen sülfıt

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
$\Phi (^{\circ})$	İçsel sürtünme açısı
SiO_3	Sodyum Silikat
SO_2	Sülfür dioksit
Al_2O_3	Alüminyum oksit
Fe_2O_3	Demir oksit
TiO_2	Titanyum dioksit
Na_2O	Sodyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit
K_2O	Potasyum oksit
Cr_2O_3	Krom oksit
SO_3	Kükürt trioksit
BaO	Baryum oksit
Ca (OH)_2	Kalsiyum hidroksit
Ca^{2+}	Kalsiyum iyonu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
-----------------	-----------------

Ca^{2+}	Kalsiyum iyonu
------------------	----------------

SiO_2	Silisyum dioksit
----------------	------------------

H_2O	Su
----------------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
E50	Sekant modülü
kPa	Kilo paskal
qu	Serbest basınç dayanımı
LS	Linyosülfonat katkısı
KL	Kaolin
S	Silt
KRC	Kireç
KK	Kesme kutusu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EDX	X-Işını kırınımı
XRD	X-Işını kırınım yöntemi
Ph	Asidite
g/mol	Molar kütle
pKa	Asit ayrışma sabiti
kg/m ³	Kuru yoğunluk

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
gr.	Gram
g/cm ³	Özgöl ağırlık
kN/m ³	Birim hacim ağırlık
mm	Milimetre
cm	Santimetre
kg	Kilogram
c	Kohezyon
CL	Düşük plastisiteli kil
ML	Düşük plastisiteli silt
CH	Yüksek plastisiteli kil
SM	Siltli kum
VJS	Daha yüksek miktarda polimer zinciri durumu
AMS	Daha az miktarda polimer zinciri durumu



1. GİRİŞ

Yapıların temelleri altında taşıyıcı tabaka görevi gören zeminler için, zeminin yapı açısından problem oluşturabilecek yetersiz taşıma gücü, yüksek büzülme ve şişme potansiyeli, yüksek nem duyarlılığı ve zayıf donma- çözülme dayanımı gibi olumsuz mühendislik özelliklerine sahip olması durumunda çeşitli yöntemlerle uygun koşulların sağlanması gerekmektedir. Özellikle ince dane miktarı yüksek, mühendislik özellikleri sınırlı problemlili zeminlerin etkilerinin bertaraf edilmesi amacıyla, yapının yerleşeceği arazinin değiştirilmesi veya elverişsiz zeminlerin atılarak yerine elverişli zeminlerin yerleştirilmesi gibi çözümler, artan kentleşme ile birlikte uygun arazilerin kısıtlılığı ve ekonomik sebeplerle her zaman mümkün olmamaktadır. Temeller, istinat yapıları, şevler, hafif yapılar, kaldırımlar gibi yapıların, uygun mühendislik özelliklerini sağlayabilecek koşullara ulaşabilmesi amacıyla ekonomik ve çevre dostu zemin iyileştirme yapılması ihtiyacı doğmuştur. Zeminlerin mekanik, fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılarak dayanımının yükseltilmesi ve dış kuvvetlerin etkisi altında kalmasına rağmen stabilitesini koruması ve sürdürmesi, zemin iyileştirme veya stabilizasyonu olarak tanımlanabilir. Zemin iyileştirilmesindeki temel hedefler, boşlukların azaltılması, yeraltı su seviyesinin veya zeminin su içeriğinin azaltılması, takviye elemanlarının kullanılması yoluyla zeminlerin güçlendirilmesine dayanmaktadır. Dolayısıyla, zeminlerin zayıf özelliklerinin uygun stabilizasyon metotlarıyla iyileştirilmesi sağlanabilir (Geçkil vd., 2019; Kaymakcı, 2014; Kalkan, 2021).

Zemin iyileştirme yöntemleri arasında uygulanabilirliği en kolay ve en pratik yöntemlerden biri zemine katkı malzemeleri ilave edilmesi yoluyla stabilizasyon sağlamaktır. Zemin stabilizasyonu için geleneksel katkı malzemelerinin kullanımı küresel çapta kabul görmüştür. Geleneksel katkı malzemeleri ile stabilizasyon kireç, çimento, uçucu kül ve bitümlü malzemelerin çeşitli kombinasyonlarının uygulanmasını içermekte ve bu malzemelere erişimin kolaylığı ve ekonomik olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. İnce daneli zemin sınıfında tanımlanan kil

ve mekanik olarak iri dane davranışı, kimyasal süreçlerde ise kil benzeri davranış sergileyen siltli zeminler (Cho et al. 2006), yüksek sıkıştırılabilirlik, yüksek su içeriği, düşük geçirgenlik ve düşük nihai taşıma kapasitesi nedeniyle temel altı malzemesi olarak tercih edilmemektedir. Bununla birlikte genellikle sızdırmazlık amaçlı yapıların tasarımında kullanılmaktadır. Bu koşullardaki zeminlerin, geleneksel ve alkali stabilizatörler olan çimento, kireç, gibi katkı malzemelerinin kullanımıyla kimyasal yapıları değiştirilerek zeminlerin mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanır. Kireç, çimento gibi malzemeler, zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili olmasına rağmen, çeşitli problemlere neden olabilmektedir. Geleneksel katkı malzemelerinin kullanımı ile birlikte ortamın pH değerinin yükselmesiyle yapı ömrünün azaldığı, yeraltı suyunun kalitesinde olumsuz bir etki yarattığı görülmüştür. Alkaliniteye bağlı olarak geleneksel stabilizatörler bitki gelişimini etkilemekte, üretimleri ve uygulanması sırasında gerçekleşen karbondioksit emisyonu ile de çevre maliyetine neden olmaktadır (Koohepeyma et al., 2013; Ta'negonbadi and Noorzad, 2018; Alazigha et al., 2016; Singh et al., 2021; Kitchen et al. 1996; Nalbantoğlu and Tuncer, 2001; Chen and Indraratna, 2015). Dolayısıyla bu alkali geleneksel katkı malzemelerinin kullanımı, hem maliyet hem kanserli partikül madde ve sera gazlarının emisyonu açısından olumsuz çevresel etkileriyle birlikte, yapılarda da sismik stabiliteyi etkileyecek problemlere yol açabilmektedir (Indraratna et al., 2012; Chen and Indraratna, 2015).

Günümüzde kentleşme ve sanayileşme ile birlikte doğal kaynakların yüksek miktarlarda tüketimi, endüstrinin büyümesi ve geleneksel katkı malzemelerinin yol açtığı sorunlar göz önüne alındığında, yan ürünlerin geri dönüştürülmesi veya yeniden kullanılması önem kazanmaktadır. Zeminlerin yeterli süneklik özelliklerini korumanın yanı sıra, gevrek kırılmayı önlemek, sözü edilen çevresel ve ekonomik kaygıların üstesinden gelmek ve stabilizasyon malzemelerine karşı giderek artan talebi karşılamak adına, birçok araştırmacı alternatif olarak sürdürülebilir ve çevre dostu atık katkılar gibi çeşitli ürünlerin zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirme üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Bu bağlamda, pirinç kabuğu külü, kalsiyum karbür atığı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, ksantan en sık kullanılan

malzemelerdir. Son yıllarda ise çeşitli araştırmacıların yenilikçi, sürdürülebilir ve çevre dostu yöntemler aramasıyla birlikte, farklı bir katkı maddesi olarak kağıt ve ahşap endüstrisinin bir yan ürünü lignin bazlı polimer olan linyosülfonatların kullanımı değerli bir rol oynamıştır (Chen and Indraratna, 2014; Tingle and Santoni, 2003; Alazigha et al., 2016; Alazigha et al., 2018; Sezer vd., 2016; Ta'negonbadi and Noorzad, 2018). Linyosülfonatlar, hem diğer süreçlerin yan ürünü olması hem de dünya çapında önemli miktarda atık malzeme olarak türetilmesi sebebiyle orantılı olarak ekonomik olduğu ve çimento, kireç gibi geleneksel katkı malzemeleriyle maliyet bazında rekabet edebilecekleri düşünülmektedir.

Linyosülfonat ilavesinin çevresel etkileri incelendiğinde, geleneksel katkı malzemelerine kıyasla, zeminlerin pH seviyesini değiştirmeden stabilize etmesi olumsuz çevresel etkileri önlemektedir. Çünkü, stabilizasyonu sırasında toksik ve aşındırıcı olmamaktadır. Bu durumda linyosülfonatlar çevre dostu stabilizatörler olarak kabul edilebilir (Desmet et al., 1985; Adams, 1998; Indraratna vd., 2009; Indraratna et al., 2012; Sezer vd., 2016; Vijayan et al., 2019; Singh et al., 2021). Bu malzemelerin zeminleri stabilize etmek için kullanımı, geleneksel stabilizatörlerin aksine kaygı verici gevrek davranışa neden olmadan geçmiş araştırmalar ile faydalı etkisini göstermesi, ekonomik avantajların ve zararlı çevresel etkilerin azaltılmasının yanı sıra, küresel enerji tüketimini ve karbondioksit emisyonlarını azaltması açısından da önemlidir (Ta'negonbadi and Noorzad, 2017; 2018; Vinod and Indraratna, 2011; Sezer vd., 2016; Chen and Indraratna, 2014; Alazigha, 2015).

Yeni bir stabilizatör olarak linyosülfonatların kullanılması, atık yan ürünlerin ve yeşil inşaatın sürdürülebilir kullanımı açısından uygun bir çözüm olarak düşünülmektedir (Alazigha et al., 2016; 2017).

Bu tez çalışmasında, zayıf performans göstermesi sebebiyle kil ve silt gibi ince daneli zeminlerin stabilize edilmesi gerekliliğine istinaden, stabilizasyonu sırasında olumsuz özellikler gösteren geleneksel katkı malzemeleri yerine çevre dostu ve atık bir malzeme olan linyosülfonat ile yer değiştirme sonrasında mekanik özelliklerdeki iyileşme araştırılmıştır. Bu kapsamda, çevre dostu katkı ile mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi, bu ürünlerin potansiyel mühendislik

faidalarının belirlenmesi, geleneksel stabilizasyon malzemelerine alternatif olarak kullanılabilmesi amaçlanmıştır. Performansı iyileştirilmek istenen bu zeminlerde linyosülfonatın geleneksel katkı malzemelerine nispeten az miktarlarda ihtiyaç duyulan atık bir malzeme olması nedeniyle daha ekonomik bir çözüm beklenmektedir. Çalışmada, linyosülfonat katkısı ile geleneksel bir katkı malzemesi olan kireç birlikte kullanılarak ikili katkıların performansı da incelenmiş ve çevre dostu katkının kullanımı sayesinde kireç miktarının azaltılabilmesiyle stabilizasyon sonrası mekanik özellikleri sorgulanmıştır.



2. KONU İLE İLGİLİ GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin dayanımını arttırmak amacı ile çeşitli katkı malzemeleriyle stabilizasyon sağlamak oldukça yaygın olarak kullanılan iyileştirme yöntemlerinden biridir. Çimento ve kireç gibi geleneksel katkı malzemeleri olarak bilinen malzemelerin üretimi ve kullanılması sırasında çevre, doğrudan veya dolaylı olarak etkilenmektedir. Örneğin; 1 ton çimento üretimi sırasında yaklaşık olarak 1 ton CO₂ emisyonu oluşmakta ve küresel karbon emisyonuna çimento endüstrisinin %5 oranında katkısı bulunmaktadır (Worrell et al., 2001). Çimentonun hidratasyonunun bir yan ürünü olan alkalik hidroksit (OH⁻) iyonlarının salınması nedeniyle zeminin pH'ı hızla değiştiğinden ekolojik dengeye zarar vermektedir (Chang et al., 2016). Geleneksel katkı malzemelerinin kullanımı ile birlikte ortam pH'ı arttığından, alkaliniteye bağlı olarak gömülü yapılarda kimyasal aşınmalar oluşması yapının ömrünü azaltmaktadır. Aynı zamanda beton ve çelik çerçevelerde donatı dayanımının da etkilendiği görülmüştür. Alkalinite sebebiyle geleneksel stabilizatörler ile bitki gelişimi kısıtlanmakta, zeminin su tutma ve besleyici öğeleri taşıma performansı azalmakta, yer altı suyu kalitesi düşmekte ve belirli zeminlerin ise akma kapasitesini etkilemekte, üretimleri ve uygulanması sırasında ise gerçekleşen karbondioksit emisyonu ile çevre maliyetine neden olmaktadır. Üretim süreçlerinde küresel enerji yaklaşık %2 oranında tüketilmektedir (Koohpeyma et al., 2013; Ta'negonbadi and Noorzad, 2018; Alazigha et al., 2016; Singh et al., 2021; Kitchen et al. 1996; Nalbantoğlu and Tuncer, 2001; Chen and Indraratna, 2014). Ayrıca, geleneksel stabilizatörlerle zemin stabilizasyonu, özellikle döngüsel yükler altında gevrek davranışa neden olabilmekte, zeminde gevrekliği arttırabilmekte, doğal olarak sismik stabilite bu durumdan etkilenmektedir (Indraratna et al., 2012).

Ek olarak doğal zemin veya doğal malzemelerin çimento esaslı ürünlerle yer değiştirmesi ve bitki örtüsünün engellemesi, bu malzemelerin gün boyu ısı depolamasına ve atmosfere salınmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla ortaya çıkan sıcaklık artışı, kırsal alan ile kentsel alan arasında sıcaklık farkına sebep olur. Yaz aylarında bu durum soğutma sistemlerinin daha fazla çalışmasına ve daha fazla

elektrik tüketimine yol açar (Santamouris and Asimakopoulos, 2001; Bozyigit, et al., 2021).

Bahsi geçen tüm etkiler doğrultusunda istenilen stabilizasyonu sağlamalarına rağmen geleneksel stabilizatörlerin verdiği olumsuz etkiler nedeniyle kullanımı düşündürmektedir. Bu nedenle son yıllarda geleneksel katkı malzemelerinin kullanımı yerine, olumsuz çevresel etkileri bertaraf edebilecek, aynı zamanda zeminin istenilen dayanımını sağlayabileceği düşünülen sürdürülebilir ve çevre dostu katkı malzemeleri ile zeminlerin stabilizasyonu üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu tez çalışması kapsamında çevre dostu ve sürdürülebilir katkı malzemesi olarak sodyum linyosülfonat incelenmiştir.

Linyosülfonat ilavesinin çevresel etkileri incelendiğinde, geleneksel katkı malzemelerine kıyasla avantajı zeminlerin pH seviyesini değiştirmeden stabilize etmesi ve bu sayede bitki örtüsünün gelişimini kısıtlamamasıdır. Böylece zeminlerin permeabilitesini ve biyomühendislik için gerekli beslenmeyi sağlayabilmek için su tutma kapasitesini korumaktadır. Linyosülfonatlar, nispeten uzun vadeli stabilite sağlarken, zemin matrisinde zararlı kimyasal bileşikler üretmeden takviye etkisi sağlayan bir makro yapı üretebilir. Bu durum, linyosülfonatların geleneksel katkı malzemelerinden ayrılmasını sağlayan en önemli özelliklerinden biridir. Çünkü, stabilizasyonu sırasında toksik ve aşındırıcı olmamaktadır. Linyosülfonatların üretimi sırasında da çevreye zararlı etkileri bilinen asetik asetin buharlaştırıldığı bilinmektedir, artan linyosülfonat içeriği ile 10 kg/m²' ye kadar yeraltı suları üzerinde herhangi bir zararlı etki olduğu bildirilmemiştir, bu durumda linyosülfonatlar çevre dostu stabilizatörler olarak kabul edilebilir (Desmet et al., 1985; Adams, 1998; Indraratna vd., 2009; Indraratna et al., 2012; Sezer vd., 2016; Vijayan and Sasikumar (2019) ; Singh et al., 2021). Yapılan çalışmalar ayrıca deniz yaşamında da linyosülfonatların düşük toksisitesini göstermesi nedeniyle güvenli kullanım potansiyelinin arttığına dikkat çekmiştir (Aro and Fatehi, 2017).

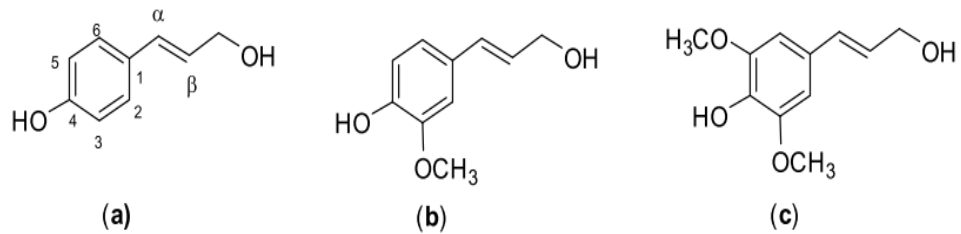
Bu malzemelerin zeminleri stabilize etmek için kullanımı, geleneksel stabilizatörlerin aksine kaygı verici gevrek davranışa neden olmadan geçmiş

araştırmalar ile faydalı etkisini göstermesi, ekonomik avantajların ve zararlı çevresel etkilerin azaltılmasının yanı sıra, küresel enerji tüketimini ve karbondioksit emisyonlarını azaltması açısından da önemlidir (Ta'neonbadi and Noorzad, 2017; 2018; Vinod and Indraratna, 2011; Sezer vd., 2016; Chen and Indraratna, 2014; Alazigha, 2015).

2.1. Linyosülfonat Katkısı ile Stabilizasyon

2.1.1. Linyosülfonatların üretim süreçleri ve genel özellikleri

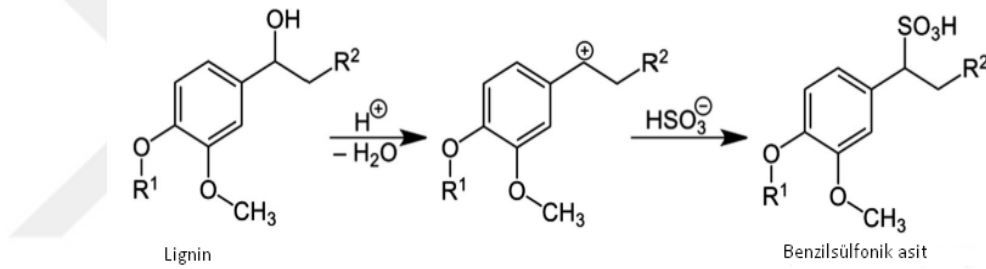
Her molekülde birden fazla fenol grubunun olduğu sürdürülebilir ve çevre dostu çapraz bağlı polimerler olan linyosülfonatlar, ucuz ve bol miktarda bulunan lignin bazlı bir hammadde (Breilly et al., 2021). Su geçirmez bir yapıda olan lignin, bitkide odunsu yapıyı oluşturan maddedir (Büyükdere, 2011). Selülozdan sonra en bol miktarda bulunan ikinci yenilenebilir malzeme olarak lignin, oldukça dallanmış üç boyutlu kompleks yapıdaki bir biyopolimerdir. Ligninler hidroksifenil ünitesi içeren propenol (p-kumaril alkol), guasil ünitesi içeren propenol (koniferil alkol) ve siringil ünitesi içeren propenol (sinapil alkol) olarak üç aromatik bileşik fenilpropan birimden oluşurlar, karmaşık ve amorf yapıda oldukları bilinmektedir (Yang et al., 2015; Büyükdere, 2011; Zhou et al., 2016). Ayrıca ligninde, β -O-4 eter bağları, C-C kovalent bağları (β - β , β -5, β -1, 5-5) ile diğer eter bağları türleri (α -O-4, 4-O-5) bulunur (Demuner et al., 2019).



Şekil 2.1 Lignin yapısı : (a) p-kumaril alkol, (b) koniferil alkol, (c) sinapil alkol (Demuner et al., 2019)

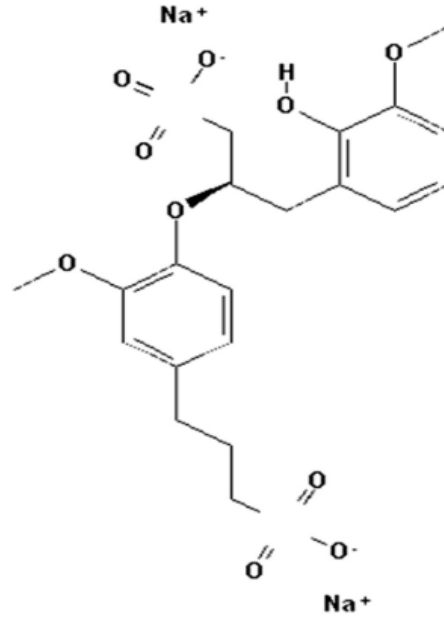
Endüstride esas olarak lignin kağıt hamuru fabrikaları ve ikinci nesil etanol tesislerinde atık olarak üretilmektedir (Demuner et al., 2021; Sameni et al., 2014). Linyosülfonatlar ise kimyasal yöntemlerle ligninin odundan ayrılması ile üretilen, kağıt ve kereste endüstrisinin atık, lignin türevli bir yan üründür (Arel ve Aydın, 2017; Sezer vd., 2016).

Linyosülfonat moleküllerinin mikroskobik yapısı üzerine yapılan çalışmalarda çözelti içerisinde linyosülfonatların mikro jeller oluşturduğu görülmüş, Pla ve Myrvold tarafından linyosülfonatları tanımlamak için rastgele dallanmış bir polielektrolit modeli önerilmiştir (Qiu et al., 2010).



Şekil 2.2 Linyosülfonatların genel yapısal birimleri, (Arel ve Aydın, 2017)

Geleneksel olarak sülfite hamurlaştırma işlemi ile linyosülfonatlar meydana gelir. Sülfite işleminde odun delignifikasyonu nötr sülfite (HSO_3^- ve SO_3^{2-}), bisülfite (HSO_3^- veya asit sülfite (SO_2 ve HSO_3^-) yöntemleriyle genellikle kalsiyum (Ca), sodyum (Na), magnezyum (Mg) ve amonyum (NH_4) tuzlarının varlığında üretilirler (Demuner et al., 2021). En yaygın olarak kullanılan bazlar sodyum ve kalsiyumdur (Aro and Fatehi, 2017). Linyosülfonatların üretimi sırasında bu reaksiyonlar genelde 140°C ile 160°C sıcaklıklar arasında gerçekleştirilir ve asit sülfite için pH 1-2, bisülfite için 3-5 ve nötr sülfite için bu değerler 6 ile 7 arasındadır (Demuner et al., 2019).



Şekil 2.3 Sodyum linyosülfonat, $C_{20}H_{24}Na_2O_{10}S_2$ (sodyum tuzu veya linyosülfonik asit), (Aro and Fatehi, 2017)

Linyosülfonatlar tipik olarak kullanılan bazlar ve işlemlerin pH değerlerine bağlı olarak karakterize edilir ve özellikleri bunlara bağlı olarak değişmektedir. Kimyasal bileşimlerin yanı sıra moleküler ağırlıkları, kökenlerindeki farklılıklar linyosülfonatların davranışını belirlemelerine neden olabilir (Arel ve Aydın, 2017). Örneğin, çıkarıldıkları ağaçların yumuşak odunlu veya sert odunlu veya yapraklı olması moleküler ağırlıklarını etkilemektedir. Sert odunlu kökene sahip linyosülfonatlardan daha düşük moleküler ağırlıklar elde edilir (Büyükdere, 2011). Moleküler ağırlık, linyosülfonatların bağlanma özelliklerini etkilemesi nedeniyle önemlidir. Sülfite hamurlaştırma işleminde baz olarak amonyum kullanıldığında üretilen linyosülfonatlar, genellikle sodyum veya kalsiyum türü linyosülfonatlara kıyasla daha yüksek moleküler ağırlığa sahiptir. Sodyum linyosülfonatlar, kalsiyum linyosülfonatlara göre daha düşük görünür viskozite özelliği gösterir. Bu durum, sodyumun kalsiyumdan daha yüksek bir elektro-kinetik itme kuvvetine sahip olmasıyla açıklanmıştır. İtmenin artmasıyla birlikte viskozite de azalmıştır.

Viskozitenin artması moleküler ağırlığın da arttığının göstergesidir (Aro and Fatehi, 2017). Adsorplanma yetenekleri de moleküler ağırlık ile artmaktadır (Arel ve Aydın, 2017).

Linyosülfonat, elektrostatik itme etkisi sergileyen ilk test edilmiş polimerdir. Bu polimer yüksek bulunabilirliği ve maliyetinin az olması nedeniyle 1930'larda hiçbir değişiklik uygulanmadan kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcılar yerine kullanılmak istenen bu doğal malzeme, karışımda %8 ila %10 oranında, sınırlı bir su azaltma kapasitesi göstermiştir. En ucuz katkı malzemelerinden biri olmasına rağmen, beklenenden az su azaltma kapasitesi gösteren linyosülfonatlar için yapılan sürekli araştırmalar neticesinde moleküler ağırlıklarının 80000 g/mol' e yükseltilmesinin ardından su azaltımını % 20' ye kadar düşürebildiği ve bu sayede işlenebilirliğin geliştiği görülmüştür (Breilly et al., 2021). Elektriksel iletkenlik sonuçları, aynı seviyede su azalmasını devam ettirmek için kalsiyum linyosülfonatlara göre daha az miktarda sodyum linyosülfonatın gerektiğini göstermiştir (Arel ve Aydın, 2017).

Sülfite hamurlaştırma işlemi sırasında, doğal lignin rastgele dağıtılmış α -O-4 eter bağlarının kesilmesi ile parçalanarak sülfonatlı grupları yapısına katar. Bunun sonucunda linyosülfonat molekülü hidrofobik aromatik iskelet ve hidrofilik sülfonik gruplardan oluşur. Bu lipohidrofilik karakter, oluşan linyosülfonatlara belirgin arayüzey aktivitesi ile ıslanırılık, yüzergenlik, dağılılabirlik gibi fiziko-kimyasal özellikler kazandırarak ara yüzey katkı maddesi şeklinde kullanımının önünü açar (Qiu et al., 2010). Sülfonatlı grubun varlığı ile linyosülfonatlar hem anyonik olarak yüklenir hem de suda çözünür. Linyosülfonatların sahip olduğu yüksek suda çözünme özelliği, mevcut sülfonat gruplarının hidrojen iyonlarını kabul etme yeteneğinin bir ölçüsü olan düşük pKa (asit ayrışma sabiti) değerlerine, fonksiyonel grupların çeşitliliğine ligninlere koloidal özellikler sağlayan yapısal özelliklerinden etkilenir (Demuner et al., 2019; Areskog et al 2010; Areskog and Henriksson, 2011; Duval and Lawoko, 2014).

Linyosülfonat karışımda yüzey yüklerini nötralize eder, kalsiyum, magnezyum, sodyum iyonlarıyla kompleks bir yapı oluşturarak, parçacıkların

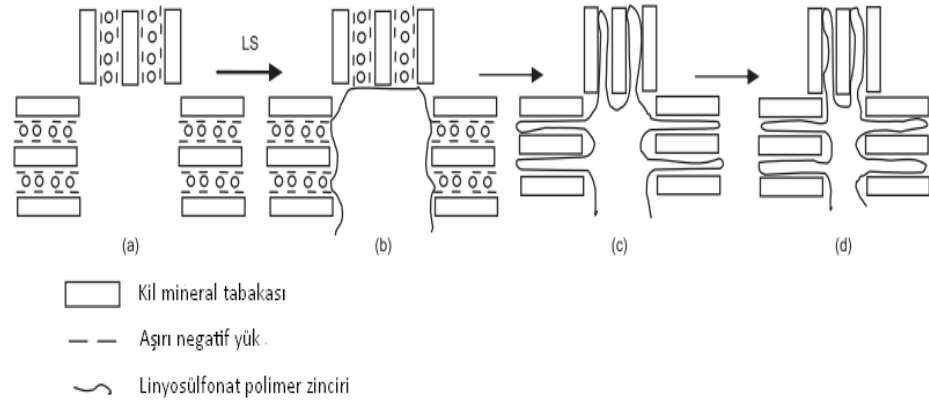
birbirini çekmesi yerine itmesini macun içerisinde tamamen dağılmasını sağlar (Arel ve Aydın, 2017). Ayrıca çapraz bağlanma yoluyla moleküler ağırlıkları arttırıldığı zaman etkili topaklaştırıcı olarak kullanılabilir. Bu malzemeler uzun süredir flokülant olarak kullanılmakla görevlidir (Aro and Fatehi, 2017).

2.1.2. Linyosülfonat ile stabilizasyon

Linyosülfonat uygulanmış zeminler üzerinde yapılan geçmiş araştırmalar, genellikle kil zeminler üzerinde gerçekleştirilmiş olup, zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde linyosülfonat kullanımının faydalı etkisini göstermiştir. Linyosülfonat ile stabilizasyon mekanizması esas olarak, elektrostatik reaksiyon yoluyla linyosülfonat-kil amorf bileşiklerinin oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, özellikle yumuşak zeminler için stabilize edici bir katkı olarak umut vericidir (Indraratna et al., 2012).

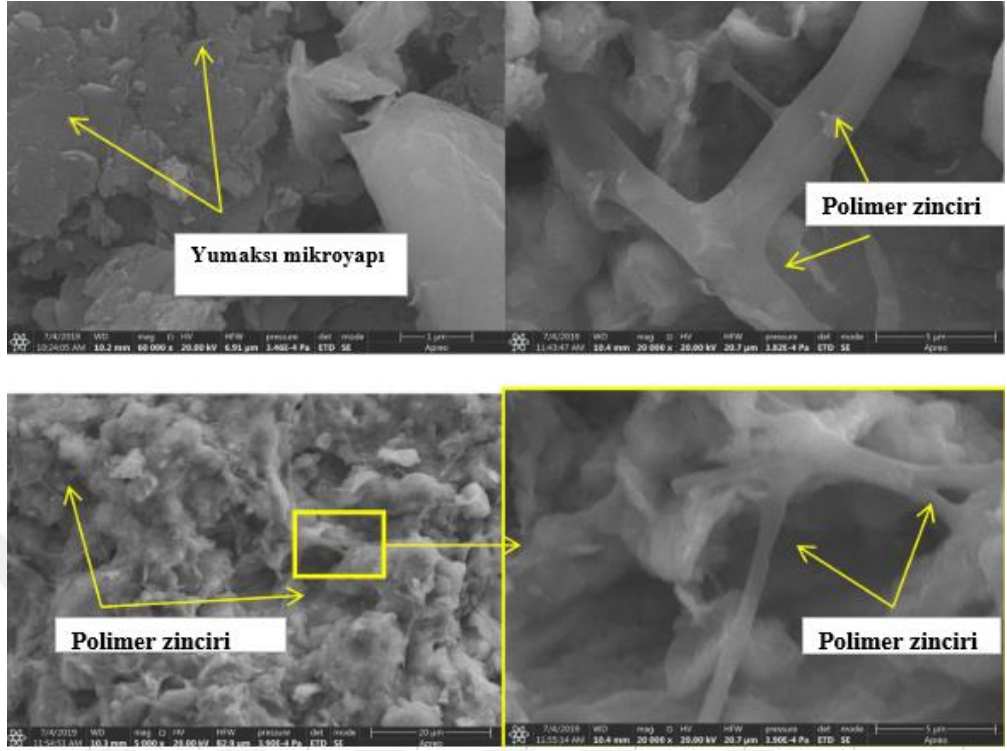
Vinod et al. (2010b), kil parçacıkları ve linyosülfonat etkileşim mekanizması ile ilgili ayrıntılı bilginin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli olduğunu vurgulamıştır. Bu durumda, katkılı ve katkısız durumdaki dispersif kilin mikrokimyasal analizleri yapılmıştır. Bu analizler öncelikle linyosülfonatın, su ile birlikte zemine ilave edildiğinde hidrolize uğrayarak, hidrojen (H^+) ve hidroksil iyonlarına (OH^-) ayrıştığını, böylelikle hidrojen iyonları tarafından protonlanarak suyu serbest bıraktıktan sonra pozitif yüklü bir bileşik oluşturduğunu ve bu pozitif yüklü linyosülfonatın kil mineral yüzeyinin negatif yüklerini elektrostatik reaksiyon sebebiyle nötralize ederek çift tabaka kalınlığının (yani kristal boyutunun) azalmasına ve kil mineralleri ile bağ oluşturmaya sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır. XRD analizi ile linyosülfonat ilaveli kil zeminde kristal boyutlarının küçüldüğü doğrulanarak, reaksiyon sürecinin negatif yüklü kil mineralleri ile pozitif yüklü linyosülfonat arasındaki kil minerallerinin yüzey yükünün azalmasıyla kristal boyutlarında değişiklikler ile sonuçlandığı görülmüştür. Linyosülfonat ilavesi yapılmış dispersif kilin hem saf kilin fonksiyonel gruplarını hem de linyosülfonatın ana fonksiyonel gruplarını içermesi nedeniyle kil mineral kafesleri ile linyosülfonat fonksiyonel grupları arasında

iyonik bağ oluşumunu ve kil minerallerinin ara katman açıklıklarında linyosülfonatın varlığını doğrulamıştır. Kimyasal analizlerin sonucunda stabilizasyon mekanizmasının oluşma biçimi Şekil 2.4’de modellenmiştir.



Şekil 2.4 Linyosülfonat ile stabilize edilmiş dispersif kilin stabilizasyon mekanizması (Jayan S. Vinod et al., 2010)

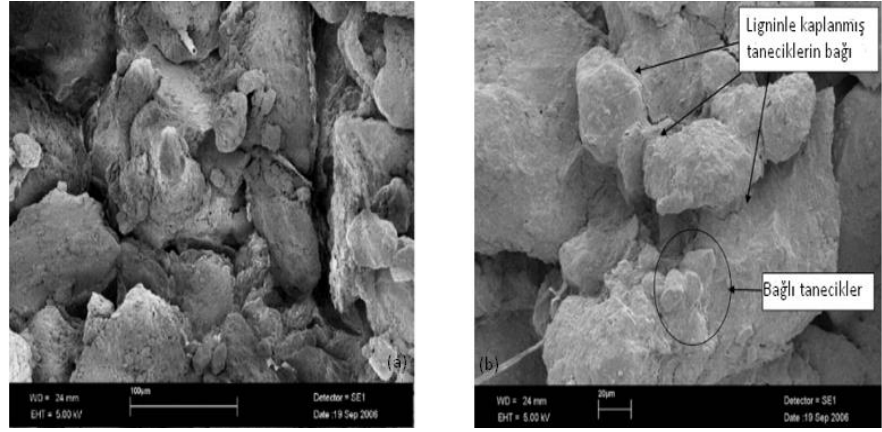
Şekil 2.4’ de görüldüğü üzere ile stabilizasyon mekanizması şu şekilde açıklanabilir: (a) aşırı negatif yüklere sahip kil mineral tabakalarının ara katman bağlanma malzemeleri ile bağlandığı tipik bir zemin mineralojik yapısını göstermektedir. (b) Zemin kitlesi, linyosülfonat ilave edildikten sonra elektrostatik çekim sayesinde kil mineral yüzeyinde adsorpsiyon meydana gelmekte ve (c) daha sonra linyosülfonat, kil mineralinin negatif yüzey yüklerinin nötralizasyonunu sağlayarak kil parçacıkları ile bağlanan bir form oluşturmaktadır. Son olarak, linyosülfonat polimer köprüleme ile bir agrega veya tane kümesi oluşturmak için kil parçacıklarını bir araya getirmektedir. Chavali and Reshmarani (2020), linyosülfonat ile iyileştirilen kil zeminlerde gerçekleştirdiği SEM analizleri sonucunda, kil-linyosülfonat stabilizasyon mekanizmasını doğrulayacak şekilde linyosülfonat ile kil parçacıklarının bir araya gelmesiyle oluşan yumaksı mikroyapı ile linyosülfonat polimer zincirini görüntülemiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Linyosülfonat katkısı ile killi zeminde oluşan polimer zinciri ve yumaksı yapı,

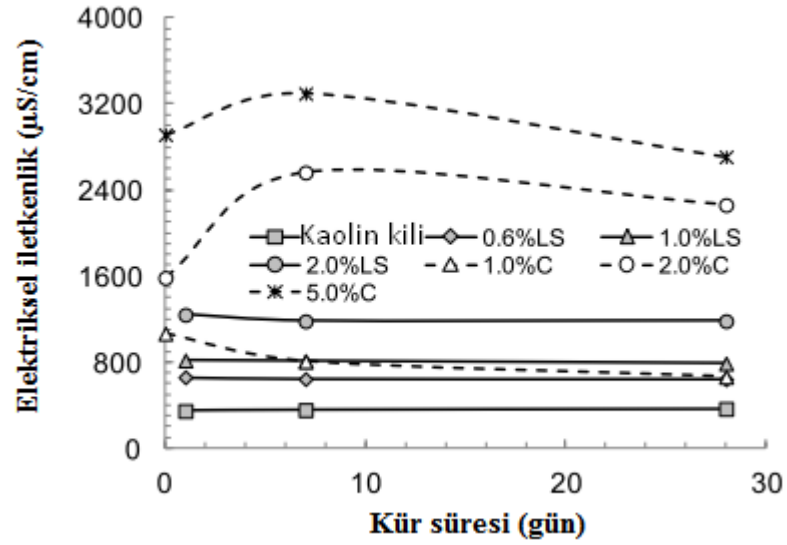
(Chavali and Reshmarani, 2020)

Indraratna et al. (2008), erozyon testleriyle birlikte stabilizasyon mekanizmasını açıklayabilmek için linyosülfonat katkılı zemin için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapmıştır. Şekil 2.6' da görüldüğü üzere, katkısız zeminde zemin daneleri aralarında sınırlar ile birbirinden net bir şekilde ayrı durmaktadır. Linyosülfonat ile işlenmiş zeminde ise daneler şekilde görüldüğü gibi kaplanmıştır. SEM görüntülerine dayanarak, linyosülfonat katkısının kullanımının erozyona dirençli bir yüzey oluşturabilmek için partikülleri birbirine bağlayan çimentolanma ajanları gibi davrandığı belirtilmiştir (Indraratna vd., 2008). Ayrıca, Shulga et al. (2008) linyosülfonatın, kurutulmuş kumlu zeminlerde rüzgâr ve su erozyonuna dayanması için zemin matrisine oldukça güçlü bir takviye etkisi sağlayan toprak makro yapısı geliştirdiğini gözlemlemiştir.



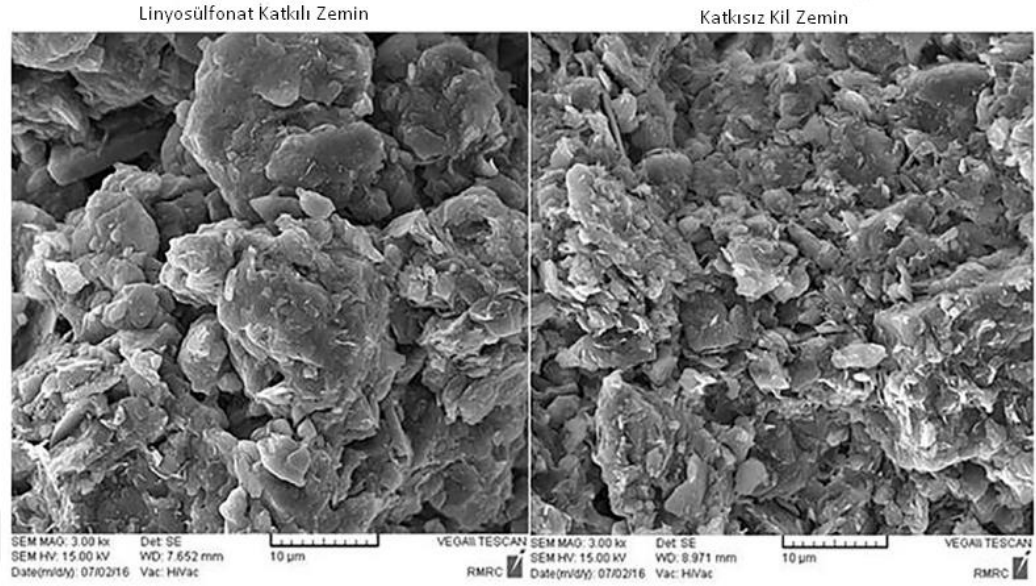
Şekil 2.6 (a) Katkısız saf siltli kum zemine ait SEM görüntüsü, (b) % 0.4 linyosülfonat ile stabilize siltli kum zemine ait SEM görüntüsü, (Buddhima Indraratna, Muttuvel, Khabbaz, & Armstrong, 2008)

Saf kil zeminler ve linyosülfonat katkılı ve çimento katkılı zeminler için elektriksel iletkenlik deneyleri gerçekleştiren Vinod et al. (2012), 10 gr. havada kurutulmuş zeminin 50 ml deiyonize su ile karıştırılması yoluyla bir süspansiyon hazırlamıştır. Linyosülfonat ilavesi ile birlikte, zeminlerin elektriksel iletkenlikleri artmıştır. 7 günlük kür süresi boyunca azalma gösterirken, kür süresinin artmasıyla birlikte sabit kalmıştır (Şekil 2.7). Kürlenme süresine bağlı olarak elektriksel iletkenliğin azalması, su ile temasta kararlı olan ve böylece kararlı zemin agregaları oluşturan kil minerali-linyosülfonat amorf bileşiklerinin oluşumunu gösterdiği şeklinde yorumlanmıştır. Katkı malzemesinin artışına bağlı olarak, çimento ilavesi yapılmış zeminler için elektriksel iletkenlik davranışı linyosülfonat ile benzerlik göstermiştir ancak kür süresi ile değişimi linyosülfonat ilave edilmiş zeminlerin davranışından farklıdır. Elektriksel iletkenliğin kürlenme süresiyle azalma eğilimi, stabilize zeminlerde kararlı bileşiklerin oluşumunu göstermiştir. Öte yandan, uygun miktarı aşan çimento katkısının kullanılması, gözenek sıvısında fazla iyonların varlığını göstermiş ve bu durum kil minerallerinin kür süresi ile yapısının yeniden düzenlenmesine bağlı olduğu daha önce Kamruzzaman et al. (2006) tarafından açıklanmıştır (Vinod et al., 2012).



Şekil 2.7 Linyosülfonat ile iyileştirilmiş kaolin kilinin kür süresine göre elektriksel iletkenlik değişimi, (Vinod et al., 2012)

Linyosülfonat ile işlem görmüş yüksek plastisiteli kil zeminlerin mikroyapısını inceleyen başka bir araştırma Alazigha et al. (2016) tarafından yapılmıştır. XRD analizlerinde, önceki çalışmalarla benzer olarak linyosülfonat ilavesinin sonucunda kil kristallerinin boyutları küçülmüştür. Saf zemin numunesi agregasyon ve bağlayıcı görünümü olmayan yoğun bir kil matrisine sahiptir, boşluklar daha görünür halde ve mikro gözenekler de eşit olmayan bir şekilde dağınık partikül bazlı yapıya kıyasla, stabilize edilen zemin daha büyük fakat daha az agregalar arası dominant gözenek boşluklarına sahip, daha çok bütünleşmiş bir kompozite dönüşmüştür. Kil minerallerinin kristalografik özelliklerinde değişime neden olan kil minerallerinin kapsüllenmesi, zemin partiküllerinin kümelenme hareketinin, stabilizasyonun bir parçası olduğu teorisini ortaya çıkarmış ve önemli kimyasal etkileşimlerden ziyade stabilizasyonun zeminin kristalografik özelliklerindeki değişiklikleri içeren fiziksel yollarla çalıştığı sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde kil mineralleri ile linyosülfonat katkısının mineralojik yapısını inceleyen Ta'negonbadi and Noorzad (2018), SEM incelemelerinde stabilizasyon sonrasında kilin parçacık yapısının kümelenmiş bir form aldığını, bu sayede zemin yapısındaki gözeneklerin küçülerek dayanımı arttırdığını belirtmiştir.



Şekil 2.8 Stabilize edilmemiş ve linyosülfonat ile stabilize edilmiş şişen kilin mikroskobik görüntüsü, (Ta'negonbadi and Noorzad, 2018)

Tingle and Santoni (2003), düşük plastisiteli kil zeminler üzerinde %3, %5 ve %8 oranında kullandığı linyosülfonat katkısı ile birlikte ıslak ve kuru koşullardaki numunelerin optimum su içerikleri ve kuru birim hacim ağırlıklarını incelediğinde, su içeriğinin saf zemine göre azaldığı, ayrıca katkı miktarı arttıkça su içeriğinin azalmaya devam ettiği, kuru yoğunluklarının ise saf zemine göre yükseldiği sonucuna varılmıştır. Islak ve kuru koşullarda test edilmesi, kuru yoğunluk ve su içeriği açısından hemen hemen yakın sonuçlar vermiştir.

Koohpeyma et al. (2013), linyosülfonat katkısı ile stabilize edilmiş killi kum zemin ile saf killi kum zeminin kompaksiyon eğrilerini karşılaştırdığında, linyosülfonat katkısının suda tamamen çözünebilmesi ve kullanım miktarının minimumda yeterli olması nedeniyle maksimum kuru yoğunluk ve optimum nem içeriği dahil olmak üzere kompaksiyon özelliklerini güçlü bir şekilde etkilemediği sonucuna varmıştır. Saf killi kum zeminin kompaksiyon değerleri ile katkılı zeminlerin değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Tingle and Santoni (2003)'

nin çalışmasının aksine, maksimum kuru yoğunlukları katkı miktarı ile birlikte azalmış, optimum nem içeriği de artmıştır.

Muttuvel (2008), çalışmasında iki farklı zemin çeşidi kullanarak linyosülfonat katkısı ile birlikte kompaksiyon özelliklerinin değişimini değerlendirmiştir. Çalışmasında siltli kum ile, dispersif bir kil kullanmış ve her iki zemin türü içinde %0,2, %0,4 ve %0,6 oranında linyosülfonat katkısı kullanmıştır. Dispersif kil için, maksimum kuru yoğunluk 1538 kg/m^3 iken, %0,2 ve %0,4 linyosülfonat katkısı kuru yoğunluğu 1536 kg/m^3 'e düşürmüş, %0,6 linyosülfonat için ise 1534 kg/m^3 değerini vermiştir. Optimum su içeriği ise saf kil zemin için %22 iken, %0,2 ve %0,4 linyosülfonat katkısı için %21,8 iken, %0,6 linyosülfonat katkısı için ise %22,3'e yükselmiştir. Siltli kum zemin için ise maksimum kuru yoğunluk 1711 kg/m^3 iken, %0,2 ve %0,6 linyosülfonat katkısı kuru yoğunluğu sırasıyla 1712 kg/m^3 ve 1716 kg/m^3 'e yükseltirken, %0,4 linyosülfonat için ise 1705 kg/m^3 değerini vermiştir. Optimum su içeriği %10,3 iken, %0,2 ve %0,6 linyosülfonat katkısı için %10,4'e yükselmiş, %0,6 linyosülfonat katkısı için ise %10,2'ye düşmüştür. Sonuç olarak, linyosülfonat ile stabilizasyonun zemin çeşidinden bağımsız olarak, maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu sonucuna varmıştır.

Ta'negonbadi and Noorzad (2017), ise Çizelge 2.1' de görüldüğü üzere standart proktor ile sıkıştırılmış linyosülfonat katkılı ve katkısız kil zeminlerin kompaksiyon özelliklerinde, optimum su içeriğinin katkı miktarı ile hafif bir şekilde arttığını, maksimum kuru yoğunluğun ise hafif bir şekilde azaldığını belirtmiştir. Önceki çalışmalarla benzerlik göstermiştir. Maksimum kuru birim ağırlıktaki bu azalmanın linyosülfonat daha düşük özgür ağırlığa sahip olduğu için ve kil-linyosülfonat karışımlarında, stabilizasyon mekanizmasında belirtildiği gibi yüksek miktarda pozitif yüklü linyosülfonat nedeniyle katyon değişimi gerçekleştiğinden, parçacıkların bir araya gelmesine bağlanmıştır. Kararlı kümeler oluşturan zeminin flokülasyon sonucunda maksimum kuru yoğunluğunun azalmış olabileceği belirtilmiştir. Karışım oluşturulması sırasında kil ve linyosülfonat parçacıklarının

arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar nedeniyle, optimum su içeriğinde sıcaklık artışına bağlı olarak artış gerçekleşmiş olabileceği düşünülmüştür.

Çizelge 2.1 Linyosülfonat ile iyileştirilmiş zeminin kompaksiyon sonuçları

Stabilizör	Katkı İçeriği (%)	Optimum Su İçeriği (%)	Maksimum Kuru Yoğunluk (kN/m ³)
% 0 Kil	–	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

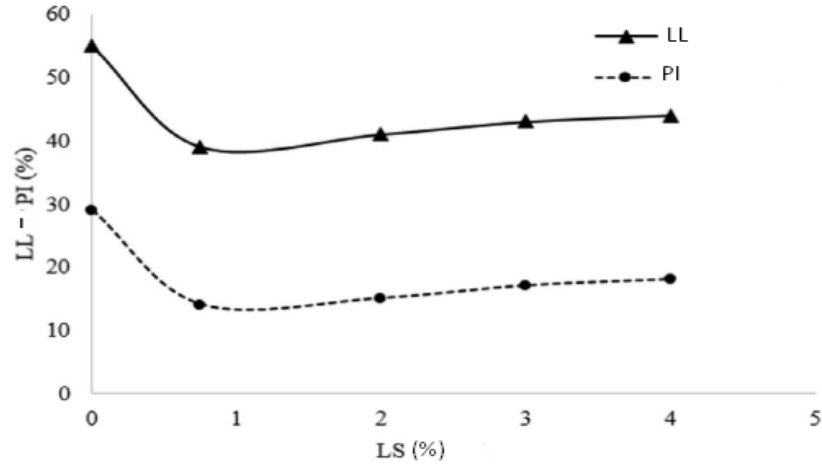
Vijayan and Sasikumar (2019) ise, proktor deneyleri sonucunda optimum su içeriğinin linyosülfonat katkısı ile azaldığını, maksimum kuru yoğunluğun ise linyosülfonat ilavesiyle arttığını bildirmiştir.

Li et al. (2019) tarafından ML ve CL- ML olarak sınıflandırılan iki siltli zemin, linyosülfonat katkısının %5, %10 ve %15 oranında kullanılmasıyla optimum su içeriği ve kuru birim hacim ağırlıkları açısından incelenmiştir. ML için, optimum su içeriği %5 linyosülfonat katkısı ile artmış olsa da katkı miktarı arttıkça düşmüştür. CL- ML için ise tüm katkı miktarlarında optimum su içeriğinde azalma görülmüştür. ML için, kuru birim hacim ağırlıkları %5 ve %10 linyosülfonat katkısı için azalma gösterirken %15 linyosülfonat katkısı ile artmıştır. Diğer zemin türü için, tüm katkı oranlarında kuru birim hacim ağırlıkları saf zeminden düşüktür. Vakili et al. (2018)'de yaptığı çalışmasında kil zemin ile linyosülfonat karışımlarının optimum su içeriğinde linyosülfonat eklenmiş zemin karışımının, saf kil zeminden daha düşük su içeriği gerektirdiğini ve maksimum kuru yoğunluklarının da linyosülfonat katkısı ile azalma eğiliminde olduğu fakat değerlerin birbirine yaklaşık olduğunu göstermiştir.

Alazigha et al. (2017), %2 linyosülfonat ilavesi ile kil zeminde standart proktor enerjisi ile sıkıştırılan numunelerin, linyosülfonat eklendiğinde hem

optimum su içeriğinin hem de maksimum kuru yoğunluğun hafif bir azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Aynı zamanda Alazigha et al. (2016)'daki çalışmasında linyosülfonat katkısının ilave edilmesinden sonra siltli kil bir zeminde likit limitin düştüğünü, plastik limitte hafif bir artış olduğunu, plastisite indisinde %2'lik bir linyosülfonat katkısı ile %51'den %32'ye düşüş olduğunu görmüştür.

Ta'negonbadi and Noorzad (2017)' de benzer olarak yüksek plastisiteli kil üzerinde Atterberg limit deneyleri yapmıştır. %0,75, %2, %3, %4 oranında linyosülfonat ilavesi ile kil zeminde iyileştirme yapmıştır. Şekil 2.9' da görüldüğü üzere, linyosülfonat katkısının artmasıyla birlikte, likit limiti, %0,75 oranında linyosülfonat ile bile %55' ten 39'a önemli ölçüde azalmış, plastik limitte önemli bir değişiklik olmamış, hemen hemen aynı kalmış ve plastisite indisi de azalmıştır. Sonuç olarak, %0,75 oranında bir ilavede zeminin plastisitesine %15' lik önemli bir azalmaya (%29'dan %14'e) yol açmıştır. Plastisitedeki bu değişiklikler, zemin minerallerinin kafes yapısının değişimine, zeminin plastisitesini etkileyen parçacıkların kümelenmesine bağlanabilir. Vijayan and Sasikumar (2019), kaolin kili kullandığı çalışmasında benzer sonuçlar elde etmiştir. Linyosülfonat katkısının artmasıyla likit limit azalmış, plastik limit ise artmış, aynı zamanda plastisite indisinde de linyosülfonat ilavesiyle birlikte önemli bir azalma gerçekleşmiştir.



Şekil 2.9 Amol kili üzerinde linyosülfonat katkısının kıvam limitlerine etkisi

Singh et al. (2021), yüksek plastisiteli kil bir zeminde linyosülfonat katkısı ile büzülme davranışıyla birlikte kıvam limitlerinin değişimini incelemiştir. Şişen bu zeminin likit limiti %1 oranında küçük sodyum linyosülfonat ilavesinden sonra bile Genişleyen toprağın likit limiti %1 kimyasal ilavesinden sonra dahi %136' dan %82' ye kadar düşmüştür, linyosülfonat ilavesi arttıkça likit limit önemli miktarda azalmaya devam ederek, önceki çalışmalarla benzer sonuçlar göstermiştir. Zemin partiküllerinin linyosülfonat ile birlikte agrega formu oluşturması ve linyosülfonatta bulunan hidrofobik karbon zincirinin zeminin kafes yapısına su girişini engellemesi nedeniyle bu durumun gerçekleşmiş olabileceği belirtilmiştir. Plastik limit ise önceki çalışmalara benzer olarak artma eğilimindedir. Plastisite indisi böylece katkı maddesi yüzdesi arttıkça sürekli olarak azalmıştır. Çalışmada kullanılan şişen kil zemin için büzülme limiti %9 civarında olup, zeminin kuruduktan sonra çok yüksek oranda büzüldüğünü göstermektedir. Büzülme indisi ise saf zeminde %127 iken, %1 oranında linyosülfonat ile % 71'e ve % 12 oranında linyosülfonat ile %38' e düşmüştür. Böylece, zeminde indüklenen stabilite göstergelerinden biri olan şişen zeminin hacimsel davranışındaki azalmayı yansıtmaktadır. Büzülme limiti ise linyosülfonat ile birlikte %9'dan %19'a yükselmiştir.

Zhang et al. (2016), silt bir zemini lignin ile stabilize ederek kıvam limitlerini değerlendirmiştir. Lignin ilave edilmiş zeminin Atterberg limitleri, doğal silt zeminden önemli ölçüde yüksek sonuç vermiştir. Belirtilen diğer çalışmaların aksine lignin içeriğindeki artışla birlikte likit limit ve plastik limitin arttığı, plastik indeksin ise bir miktar azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmada zemin ve katkı malzemesi türünün diğerlerinden farklı olduğu unutulmamalıdır. Aynı zamanda lignin ile stabilize edilen siltin serbest basınç dayanımı %12' ye kadar kullanılan lignin oranında anlamlı bir şekilde arttığını ve %12'den sonra kullanılan ligninin dayanımı bir miktar düşürdüğü görülerek, optimum miktar %12 olarak belirlenmiştir. Ek olarak kür süresinden etkilenen lignin katkılı silt zemin, 28 gün kür süresine kadar marjinal bir şekilde artmış daha yüksek kür sürelerinde neredeyse sabit kalmıştır. Yapılan CBR, testi sonuçları da serbest basınç dayanımı testi sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden, stabilize siltin lignin varlığında tepkisini gevrek malzemeden sünek malzemeye çevirdiği gözlemlenmiştir.

Sinha et al. (1957), siltli killi zemin ile lignin kullanarak zeminin mukavemetinde nispeten önemsiz dayanım artışları görmüştür. Ancak, ligninlerin granüler zeminlerde ince daneli zeminlere göre daha etkili olabileceğini düşünmüştür. Gow et al. (1960), ise zemin- agrega karışımında linyosülfonat kullanarak performansını araştırmıştır. 7 gün kürlenmiş numuneler üzerinde yapılan CBR testleri, en büyük artışın ıslanılmamış numunelerde gerçekleştiğini ıslatılmış numunelerde mukavemet artışının belirgin şekilde daha az olduğunu bildirmiş, ayrıca etkili bir stabilizör olabileceğini göstermiştir. Bu durum, linyosülfonatların suda çözünme eğilimi nedeniyle hidrofilik doğasına atfedilmiştir (Hall, 2005).

Tingle and Santoni (2003), düşük plastisiteye sahip kil zemin üzerinde hem geleneksel olmayan katkı maddeleri ile hem de karşılaştırma amacıyla çimento ve sönmemiş kireç ile stabilizasyon uygulamıştır. Hazırlanan numuneler 28 günlük kürlenmenin ardından ıslak ve kuru testlere tabi tutulmuştur. %3, %5 ve %8 oranında kullanılan linyosülfonatın hem kuru hem de ıslak koşullarda dayanımı arttırdığı görülmüştür. %5 civarında linyosülfonat kullanımının optimum katkı miktarı

olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı koşullarda çimento ve kireç kullanımı linyosülfonatın verdiği mukavemetten daha az bir mukavemet sağlamıştır. Aynı zamanda linyosülfonat ıslatma- kurutma döngüleri sırasında sürekli olarak iyi nem direnci sağlamaya devam etmiştir. Aynı şekilde geleneksel stabilizasyon malzemeleri ile geleneksel olmayan stabilizasyon malzemelerini karşılaştırma amaçlı çalışma hazırlayan Hall (2005), bu amaçla kireç, çimento ve kalsiyum bazlı sıvı formda linyosülfonat kullanmıştır. 3, 7, 14 ve 28 günlük kürlenme süreleri belirlenmiş ve numuneler CL, CH ve SM zemin sınıfındaki zeminlerle karıştırılmıştır. Farklı bir hazırlama tekniği kullanan Hall, serbest basınç numunelerinin ilkini karışım hazırlandıktan hemen sonra sıkıştırırken, kalan numuneler 105 dakika dinlendirme süresi ve 15 dakika aralıklarla sıkıştırılmıştır. Buharlaşma kayıplarını önlemek amacıyla plastik ile kapatılarak nem korunmuştur. Sızdırmaz bu numuneler su altında bekletilmiştir. Tingle and Santoni (2003)'nin çalışmalarının aksine, sıvı formdaki linyosülfonat ile iyileştirilen zeminler test edilen geleneksel stabilizatörlere kıyasla oldukça önemsiz bir mukavemet artışı göstermiştir. En az etkili geleneksel stabilizatör pelet halindeki kireç düşük plastisiteli kil zemine göre %156' lık bir mukavemet artışı gösterirken, linyosülfonatlar ile yalnızca %6 ile %18 oranında mukavemet kazanımları elde edilmiştir. Linyosülfonat ile stabilizasyon kürlenme süresine bağımlı bir tepki vermiştir. Kür süresinin 3. gününde 28 günlük dayanımın %91' ini ve 7 gün içinde de %97' sini kazanmıştır. Diğer zemin türleri için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, linyosülfonatın basınç dayanım testinden elde edilen sonuçların geleneksel stabilizörlerle rekabet etmeyen sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bazı durumlarda %50' ye varan mukavemet artışları elde edilse dahi, geleneksel stabilizatörlere kıyasla bu oran çok küçük miktarlarda kalmıştır. Kapalı kür ortamında bekletilen linyosülfonat karışımı zeminlerde, nemin kaçmasına izin verilmediğinden kimyasal reaksiyonlar tarafından harekete geçirilmeyen linyosülfonatın, hapsedilmiş su tarafından zemin parçacıklarına bağlanmasının engellendiği ve yüksek dayanım elde etmek için gereken bağlanmayı sağlayamadığı görülmüştür. Çalışmaya ek olarak incelenen bir diğer konu, sıvı formdaki linyosülfonatların ve geleneksel stabilizörlerin optimum ve optimum su oranı üzerindeki koşullarda davranışydı. Linyosülfonat optimum nem içeriğindeki

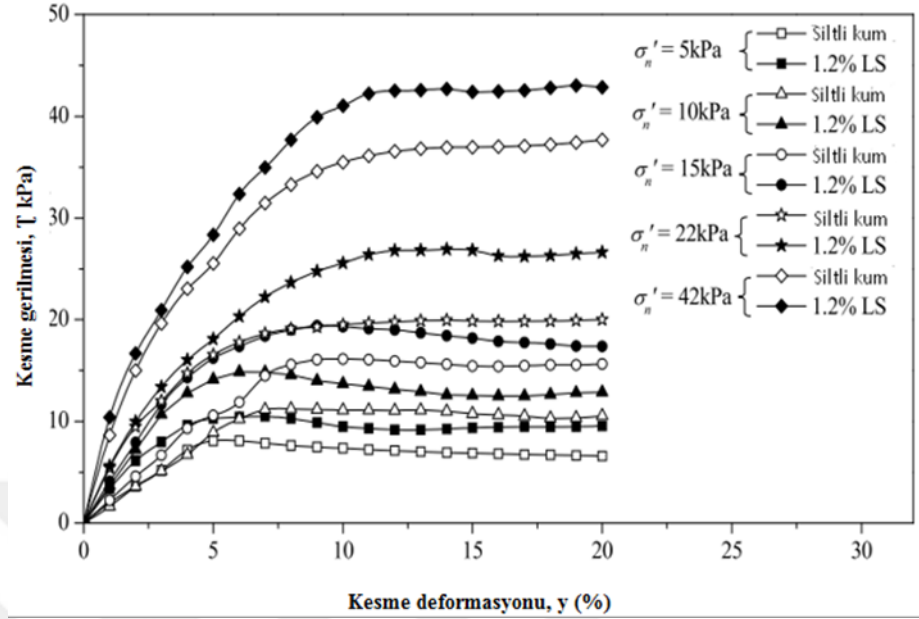
zeminlerde, optimum olmayan koşullara göre daha etkili olmuştur. Bu duruma, suda çözünme yetenekleri ve yüksek nem içeriğine sahip karışımlarda daha fazla seyreltik durumda olmaları neden olmuş olabilir. Geleneksel olmayan sıvı formdaki bu stabilizatörün, kısmen kürlenme koşulları nedeniyle neredeyse etkisiz olabileceği düşünülmüştür. Kullanılan tüm katkı malzemeleri için, mukavemet kazanımlarının çoğu 7 günlük bir kürlenme sürecinin sonunda elde edilmiştir

Zemin stabilizasyonunda lignin bazlı biyoyakıt yan ürünleri kullanarak alt temel zemininin nem duyarlılığını ölçmek isteyen Kim et al. (2012), lignin yan ürünleri ile iyileştirilmiş zeminlerin ve geleneksel uçucu kül ile iyileştirilmiş zeminler ve bu katkı malzemelerinin çeşitli kombinasyonlarının da neme karşı duyarlılığını karşılaştırmak amacıyla deneysel bir test programı uygulamıştır. Bu kapsamda CL sınıfındaki zemin ile lignin bazlı yan ürünler ve uçucu kül %12 oranında kullanılmış ve kombinasyonlarda ise %10'luk lignin bazlı yan ürünler ile %2 oranında uçucu kül karıştırılmıştır. Tüm karışım numunelerinin sıkıştırılmasının ardından, belirlenen kür sürelerini (1 ve 7 gün) tamamlayan numuneler serbest basınç dayanımları ölçülmeden önce kuru ve ıslak ön koşullandırmalara maruz bırakılmıştır. Genel olarak katkı malzemesi uygulanmış zeminler ıslak ve kuru koşullarda, saf zemine göre daha dayanıklı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, uçucu kül katkılı numunelerin, lignin bazlı yan ürünler ile iyileştirilen zemin numunelerine kıyasla ıslatıldıktan sonra mukavemetleri azalmıştır. Daha yüksek lignin içeren yan ürün, uçucu kül ve daha az lignin içeren yan ürün B'ye göre neme karşı direnç göstermede daha etkili olmuştur. Bu çalışmada kullanılan lignin bazlı yan ürünlerin, düşük hacimli yollarda kullanımında zayıf malzemelerin nem direncini geliştirmek için oldukça iyi bir performansa sahip olduğu ve mevcut temel altı malzemelerinin nem direncinin iyileştirilmesi için kullanılabileceği, uçucu külün ağır metallerin sızma potansiyeline sahip olması nedeniyle de hem sürdürülebilir kalkınma hem de olumsuz çevresel koşullar oluşturmaması ile faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.

Indraratna et al. (2012), çalışmasında kaolin kili ve %95 kaolin ile %5 montmorilonit içeren bir kil karışımı ile linyosülfonat katkısı kullanarak zemin

davranışını incelemiştir. Katkılı ve katkısız tüm numuneler, 7 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutulduktan sonra serbest basınç dayanımları ölçülmüştür. Linyosülfonat katkısı kil karışımı içeren zemin için de 0.5, %1 ve %1,5 oranlarında ve kaolin kili için %0,6 ve %1 oranında kullanımı sonucu, katkılı numunelerin dayanımının katkısız numunelere kıyasla daha yüksek sonuçlar verdiği ve linyosülfonat kullanımının artmasıyla birlikte nihai gerilme ile rijitliğin arttığı görülmüştür. Aynı zamanda kür süresi katkılı ve katkısız numunelerde dayanımı etkilemiş, kür süresindeki artışla birlikte artmıştır. Kaolin kili için en yüksek nihai gerilmeyi %1 oranında linyosülfonat kullanımı verirken, kil karışımı için %1,5 oranında linyosülfonat katkısı en yüksek nihai gerilmeyi vermiştir.

Athukorala (2013), çalışmasında, linyosülfonat içeren ve içermeyen siltli kum üzerinde optimum nem içeriğinde hazırlanan ve 7 gün boyunca kürlen numunelerde, gerilme- deformasyon ve hacimsel değişimi ölçmek amacıyla yapılan konsolidasyonlu drenajlı direkt kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 5 kPa efektif gerilme altında gerilme- deformasyon davranışı incelendiğinde, linyosülfonat katkısının artmasıyla birlikte kesme gerilmesinde artışa yol açtığı görülmüştür. Linyosülfonat katkısı, hacimsel davranışı ise genişletici bir etkiye sebep olmuştur. Tüm karışımlar ve saf zemin için pik kayma gerilmeleri belirgin olarak görülmektedir, pik kayma gerilmelerinden sonra birim deformasyon yumuşaması gözlemlenmiştir. Ancak 22 kPa ve 42 kPa normal yükler altında, linyosülfonat uygulanmış zeminlerin hacimsel davranışında genişleme gözlemlenmemiştir. Linyosülfonat katkısının oranı karışım içerisinde arttıkça, uygulanan efektif normal gerilmelerden bağımsız olarak kesme gerilmelerinin de arttığı açıkça görülmüş, ayrıca artan linyosülfonat oranı zeminlerde daha kayda değer bir genişleme davranışına yol açmıştır.



Şekil 2.10 Linyosülfonat katkısı uygulanmış ve uygulanmamış siltli kumun farklı efektif normal gerilmeler altında gerilme -deformasyon davranışının karşılaştırılması (Athukorala, 2013)

Şekil 2.10' da görüldüğü üzere, linyosülfonat ilave edilen tüm siltli kum örnekleri, katkısız zemine göre daha yüksek kesme gerilmeleri ile, sonuç olarak daha yüksek normal gerilmelerde daha yüksek rijitlik ile sonuçlanmıştır. Genel hacimsel deformasyon tepkisi ise hem linyosülfonat uygulanmış zeminlerde hem de katkısız zeminlerde efektif gerilmeler arttıkça, büzülmeye doğru kaymıştır.

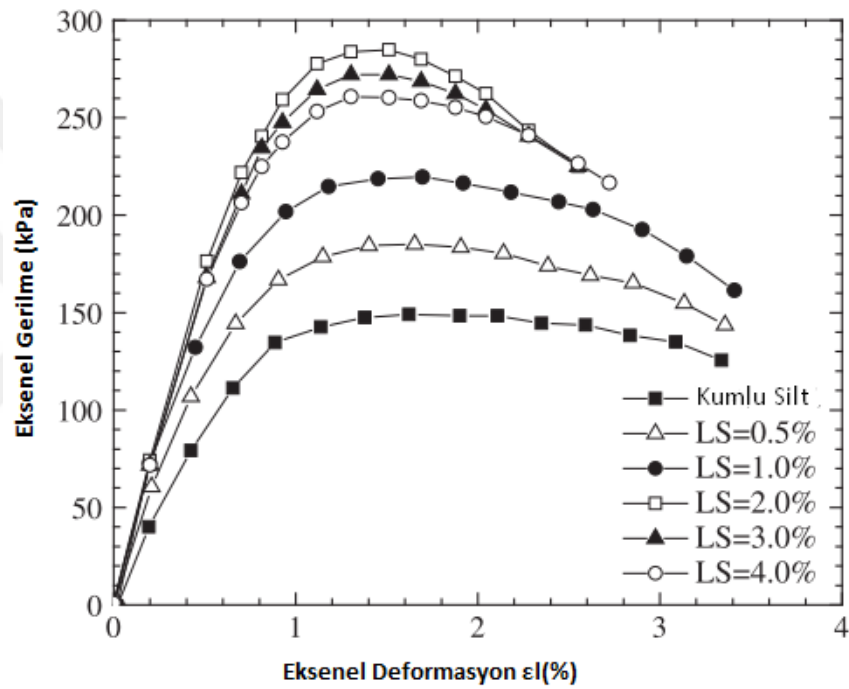
Athukorala (2013) tarafından, belirli efektif gerilmeler altındaki linyosülfonat etkisindeki zeminlerin artan kesme mukavemeti, bulunduğu efektif gerilmelerde linyosülfonat bağlarının kuvveti olarak kabul edilmiştir. Çimento etkisi altındaki zeminlerle yapılan geçmiş literatür çalışmaları ile (Wang and Leung, 2008; Schnaid et al., 2001), kendi çalışması linyosülfonat katkısının etkisi üzerinde karşılaştıran Athukorala (2013), 30- 50 kPa aralığındaki efektif gerilmeler altında linyosülfonat bağlarının kuvvetinin, çimento bağlarından daha zayıf olduğu sonucuna varmıştır. Ancak linyosülfonat katkısının süneklik üzerindeki etkisini incelendiğinde hem işlenmiş hem de işlenmemiş zeminler için gevreklik indeksi linyosülfonat ilavesi ile azalmış ve çimento ile iyileştirilen siltli kumların gevreklik indeksleri karşılaştırıldığında, Wang and Leung (2008), çimento ile iyileştirilmiş Ottawa

kumunun orta derecede gevrek duruma geldiğini ve Schnaid et al., (2001) ise çimento ilavesi ile plastik olmayan siltli kum zeminin çok gevrek olduğunu bildirirken, linyosülfonat katkısının çimentonun yaptığı gibi zeminin sünekliğini önemli ölçüde değiştirmedeği görülmüştür. Aynı zamanda içsel sürtünme açıları, pik ve nihai olarak incelendiğinde linyosülfonat katkısının içsel sürtünme açısını arttırdığı ve karışımdaki linyosülfonat miktarı arttıkça daha yüksek pik ve nihai içsel sürtünme açısı değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Wang and Leung (2008), ve Schnaid et al., (2001)' in çimento ilavesi ile yaptığı literatür çalışmaları ile karşılaştırma yapan Athukorala (2013), siltli kum üzerinde %1,2 oranında linyosülfonat kullanıldığında pik sürtünme açısındaki artışların, %1 çimento ile işlenmiş gevşek Ottawa kumunun yaklaşık iki katı olduğunu gözlemlemiştir. Bununla birlikte, %1-1.2 aralığında kimyasal katkı kullanımında nihai sürtünme açısını arttırmada linyosülfonatın daha etkili görüldüğü bildirilmiştir. Ayrıca sekant deformasyon modülü değişimi incelenmiş ve linyosülfonat katkısı ile birlikte arttığı görülmüştür, buna rağmen çimento ile işlenmiş kumlarla karşılaştırıldığında sekant deformasyon modülü linyosülfonat katkısından önemli ölçüde etkilenmemiştir.

Chen and Indraratna (2014), ince kumlu siltlerin iyileştirilmesinde etkili olabilecek linyosülfonat katkısı ile tekrarlı yüklemeler altında üç eksenli deneyler gerçekleştirmiştir. Aynı döngü sayısındaki eksenel deformasyon, linyosülfonat katkılı numuneler için katkısız numunelerin daha düşük deviatör gerilmesinde bile olduğundan daha düşüktür. Ek olarak, deviatör gerilme yükseldiğinde dahi göçmeye neden olan döngü sayısının katkılı zeminlerde daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durumda linyosülfonat ile stabilize edilmek istenen numunelerin belirli bir döngü sayısı altında göçme durumu için, katkısız numunelere kıyasla uzun ömürlülüğünün çok daha fazla geliştirilebileceği gözlemlenmiştir. Katkılı numunelerde aşırı boşluk suyu basıncında gerçekleşen azalma, partiküller arasındaki bağların bozulmasına ve tekrarlı yüklemeler sırasında numunelerin dilatasyonuna atfedilmiştir. Katkısız zemin numuneleri ile kıyaslandığında, linyosülfonat katkılı numunelerin esneklik modülü önemli ölçüde artmıştır. Tüm

numuneler için, bütün tekrarlı yükleme seviyelerinde ise artan döngü sayısı için esneklik modülü değeri azalmıştır.

Chen et al. (2014), yaptıkları diğer bir çalışmada linyosülfonat uygulanmış kumlu silt bir zeminin serbest basınç dayanımı, konsolidasyonlu drenajlı ve konsolide drenajsız üç eksenli deneyler ile davranışını incelemek istemiştir.



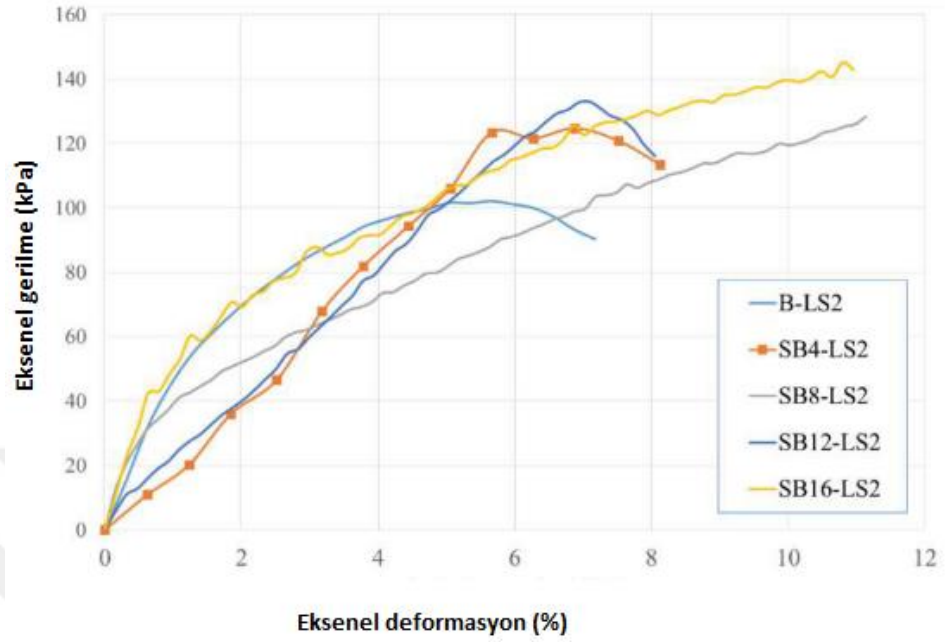
Şekil 2.11 Linyosülfonat uygulanmış kumlu silt zeminin serbest basınç dayanımı (Chen et al., 2014)

Şekil 2.11’ de serbest basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre, %2’ ye kadar linyosülfonat ilavesiyle birlikte dayanım önemli ölçüde artmıştır. %2’den daha fazla linyosülfonat kullanımı dayanımda düşüşe neden olduğundan optimum oran %2 olarak kabul edilmiştir. Buna rağmen, tüm katkı oranlarında serbest basınç dayanımı, katkısız zemine göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Optimum oran %2 olarak bulunduğu için, üç eksenli deneylerde yalnızca %2 oranında linyosülfonat katkısı kullanılmıştır. Linyosülfonat katkısının optimum oranda kullanılmasının bir sonucu olarak akma gerilimi yaklaşık % 10 seviyesinde artmış, konsolidasyonlu

drenajlı ve konsolide drenajsız üç eksenli deneylerin kesme aşaması sırasında rezidüel deviator gerilmeler önemli ölçüde iyileşmiş ve zemin sünek davranışını korurken maksimum artışın % 30' a kadar ulaşabileceği görülmüştür, LS ile muamele edilmiş toprak, konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deney sırasında linyosülfonat uygulanmış zemin numuneleri, uygulanmamış zeminlere göre daha dilatatif bir davranış göstermiştir.

Indraratna et al. (2015) ise siltli kum ile linyosülfonat uygulanmış zeminlerin kesme davranışı ve hacim değişimini araştırmıştır. Direkt kesme deneylerinin sonucunda, linyosülfonat katkısının pik kesme gerilmelerini ve dilatasyonu arttırdığı görülmüştür. Kullanılan linyosülfonat miktarı arttıkça, tüm efektif normal gerilmeler altında kesme gerilmesi ile rezidüel dayanım farkının kesme gerilmesine bölümüyle elde edilen gevreklik indeksinin azaldığı ancak linyosülfonatin sünekliği çimento takviyesi ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde değiştirmedığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca hem pik hem de nihai içsel sürtünme açıları linyosülfonat ile birlikte artmıştır. Çalışmalarında dikkate alınan efektif gerilmeler aralığında 5 kPa, (10 kPa, 15 kPa, 22 kPa ve 42 kPa için) linyosülfonat kullanımının artmasıyla sekant deformasyon modülünün de lineer olarak arttığı görülmüştür. Bu durumda, siltli kumu stabilize edebilmek amacıyla zeminin kendi sünekliğini ve elastisitesini de koruyabilme olanağına imkan sağladığından, çevre dostu bir kimyasal bir katkı olarak kullanılabilmesi çıkarımı yapılmıştır.

Sezer et al. (2016), optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluklarında sıkıştırılmış %4, 8, 12 ve %16 oranlarında bentonit içeren kum- bentonit karışımlarının, su azaltıcı bir katkı olan linyosülfonat ile suyun kısmi yer değiştirmesi ile kullanımı sonucunda dayanımı ve geçirgenliğini incelemeyi amaçlamışlardır. %0,5, 1 ve 2% oranında linyosülfonat katkısı kullanımının kum bentonit karışımlarının mukavemetini az miktarda arttığı görülmüştür. %2 oranında linyosülfonat ilavesinin sünekliği küçük bir oranda arttırmayı başardığı, dayanımdaki artış için ise dikkate alınan karışımlar için %10 değeri ile sınırlandırıldığı belirtilmiştir.



Şekil 2.12 % 2 linyosülfonat katkısı içeren kum-bentonit karışımları için serbest basınç dayanımı testi sonuçları (Sezer et al., 2016)

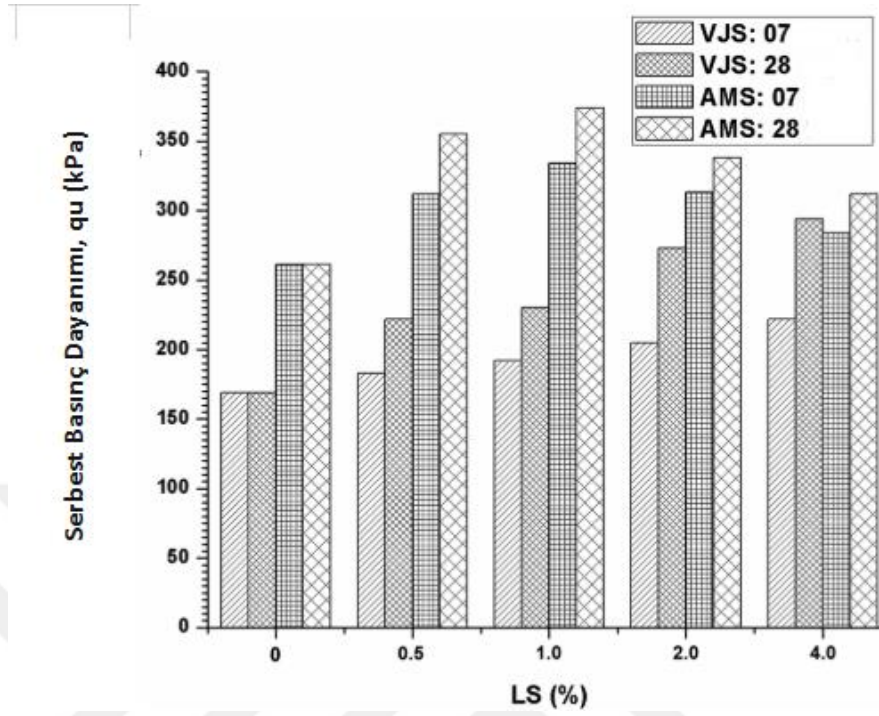
Linyosülfonat ile suyun kısmi yer değiştirmesi ile mukavemet ve geçirgenlik özellikleri üzerinde önemli bir etki yaratıldığı görülmüş, bu durumun %1'e kadar artan ikame seviyesi için daha belirgin olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, linyosülfonat katkısının zemin karışımları üzerindeki etkisinin optimum su içeriğinin kuru tarafında daha etkili olduğu, daha yüksek mukavemete ve daha düşük permeabiliteye neden olduğu deney sonuçları ile ortaya konulmuştur.

Vijayan and Sasikumar (2019), kaolin kili ile linyosülfonat katkısı üzerinde yaptıkları çalışmalarda serbest basınç dayanımlarını ölçmüştür. Test sonuçlarına göre, linyosülfonat ilavesiyle birlikte dayanım artmış ve optimum linyosülfonat oranı % 4 olarak bulunmuştur.

Ta'negonbadi and Noorzad (2018), yüksek plastisiteye sahip bir kil zeminde linyosülfonat katkısının fiziksel ve geoteknik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. %0,5, 0.75, 1, 2, 3 ve %4 oranlarında linyosülfonat kullanılmış ve belirli kür süreleri uygulanmıştır. Tüm linyosülfonat içerikleri için 28 güne kadar

kür süresinde stabilize edilen bu numunelerin serbest basınç dayanımları önemli ölçüde artarken, daha fazla kür süresine tabi tutulan numunelerde serbest basınç dayanımlarındaki artış önemli bulunmamıştır. Bu nedenle uygun kür süresi 28 gün olarak seçilmiştir. Mukavemetin kür süresine bağlı olmasının nedeni, kil partiküllerinin stabilize edici ajan ile absorpsiyonu, kaplanması ve bir araya gelmesini içeren stabilizasyon süreçlerinin zamana bağlı gerçekleşmesi olarak açıklanmıştır. Optimum linyosülfonat içeriği ise bu çalışmada %0,75 olarak seçilmiştir. Linyosülfonat stabilizasyonu ile hacimsel deformasyon azalırken, pik kesme gerilmesi artmıştır. Linyosülfonat ilave edilmesi ile içsel sürtünme açısındaki değişim yalnızca 1°'lik bir artış olduğundan ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Zeminin kırılma zarfı linyosülfonat katkısı sebebiyle yukarı doğru ötelenerek görünür kohezyonu (1 kPa'dan 7 kPa'ya) ve kayma dayanımını yükseltmiştir. Ayrıca, ıslatma ve kurutma döngülerinin UU üç eksenli test sonuçları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, ancak direkt kesme deneylerinde numunelerin pik kesme mukavemetinde %37' ye kadar azalma gerçekleştirdiğinden daha fazla etkilendiği görülmüştür. Linyosülfonat ile stabilizasyona bağlı olarak gevreklik indisinin hafif bir şekilde değiştiği görülmüştür. Tüm numuneler düşük gevreklik indisine sahiptir, dolayısıyla yüksek plastisiteli bu kilin linyosülfonat ile stabilizasyonunun gevreklik indisinde çok büyük bir etki göstermediği belirtilmiştir.

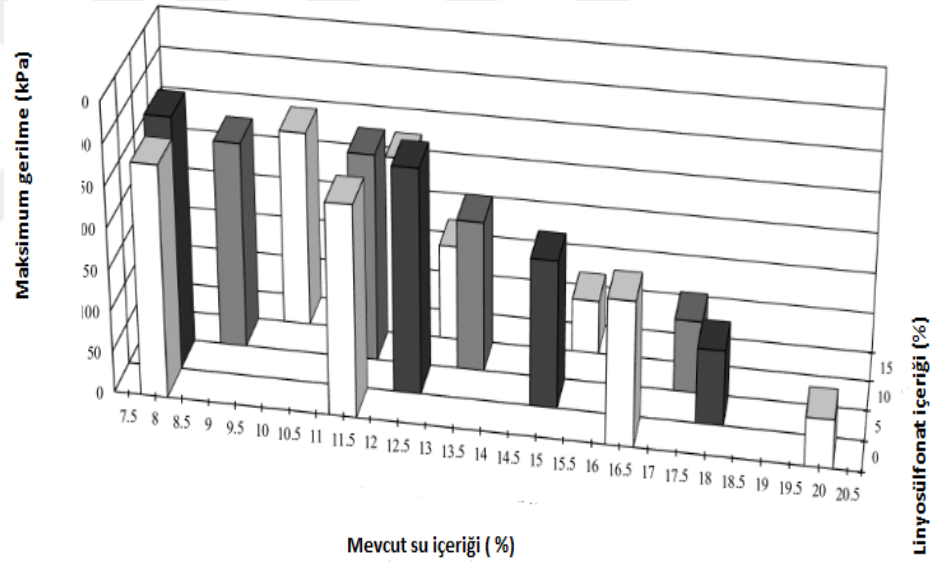
Chavali and Reshmarani (2020), yerel iki çeşit şişen kil zeminin kalsiyum linyosülfonat katkısı varlığında davranışını incelemiştir. Bu amaçla kil zeminler dört farklı içerik oranında (%0,5, 1, 2 ve %4) linyosülfonat ile optimum su oranları ve maksimum kuru yoğunluklarında karıştırıldıktan sonra 7 ve 28 gün boyunca kürde bekletilmiş, ardından serbest basınç dayanımları ölçülmüştür. Sonuçlar, bu katkının şişen zeminlerde kullanıldığında dayanım özelliklerini geliştirmede olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.13 Linyosülfonat uygulanmış zeminlerin serbest basınç dayanımı, Chavali and Reshmarani (2020)

Farklı linyosülfonat içerikleri ve kür süreleri uygulanmış kil zeminlerin serbest basınç dayanımı sonuçlarına göre, Şekil, tüm kür sürelerinde her iki zemin için de dayanımın linyosülfonat katkısı ile artmış olduğu görülmektedir. Burada, VJS durumu daha fazla ince dane içeren (%96) ve kil partiküllerini bağlamak için daha yüksek miktarda linyosülfonat polimer zincirine ihtiyaç duyulmasını ifade ederken, AMS ise daha az miktarda polimer zinciri yeterli olan nispeten daha düşük miktarda ince danelerden (%87) oluşması durumunu ifade etmektedir. LS miktarındaki bir artış, serbest basınç dayanımında bir artışa neden olmuştur. Daha az ince dane içeren zeminde linyosülfonat katkısı %1'lik bir ilaveden sonra dayanımda azalmaya neden olmuş, fakat yine de saf zemine göre dayanımının hala yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Daha yüksek miktarda ince dane içeren zeminde ise linyosülfonat miktarındaki artış, dayanımda artışı devam ettirmiştir. Bu durumda, optimum linyosülfonat kullanımının yanı sıra, zemin stabilizasyonunda ince dane miktarının linyosülfonatin gelişimini etkilediği sonucuna varılabilir.

Li et al. (2019), çalışmalarında iki tip siltli zeminin mukavemetlerini ve durabilitelerini geliştirebilmek amacıyla homojen olarak seyreltilmiş linyosülfonat kullanılmıştır. Bu testler, her toprak için tercih edilen linyosülfonat dozajını, optimum karışım oranını ve maksimum basınç dayanımı artışını ortaya çıkardı. Şekil 2.14’ de görüldüğü üzere, sadece %5 oranında linyosülfonat kullanımı mevcut zemini güçlendirmiştir. Orta ve yüksek olarak belirlenen %10 ve %15 gibi içeriklerin zemin mukavemeti üzerindeki etkisi olumsuz olarak görülmüştür. Optimum karışım oranı ise, gerçek su içeriğinin %8.04’ü ile % 5 linyosülfonat olarak belirlenmiş ve bu oranların kullanımı ile hazırlanan numuneler, zeminin serbest basınç dayanımını % 9.3 arttırmıştır.

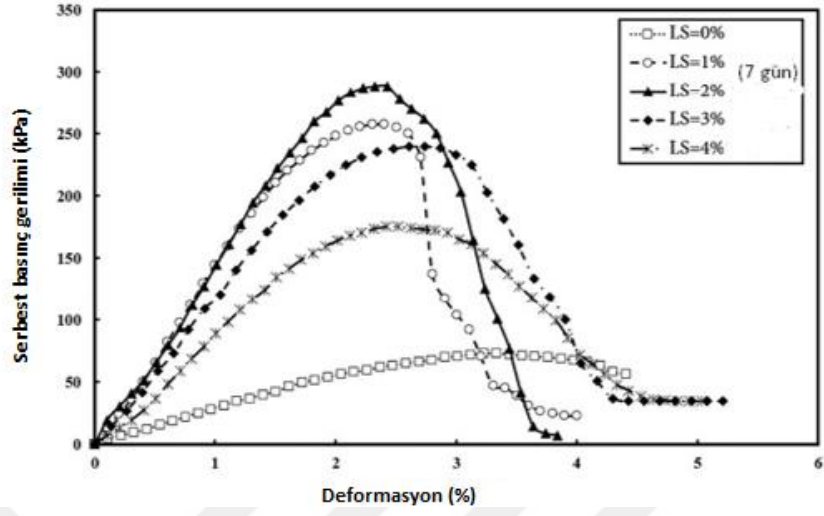


Şekil 2.14 CL-ML zemin sınıfındaki bir zeminin linyosülfonat içeriğine bağlı serbest basınç dayanımı test sonuçları, Li et al. (2019)

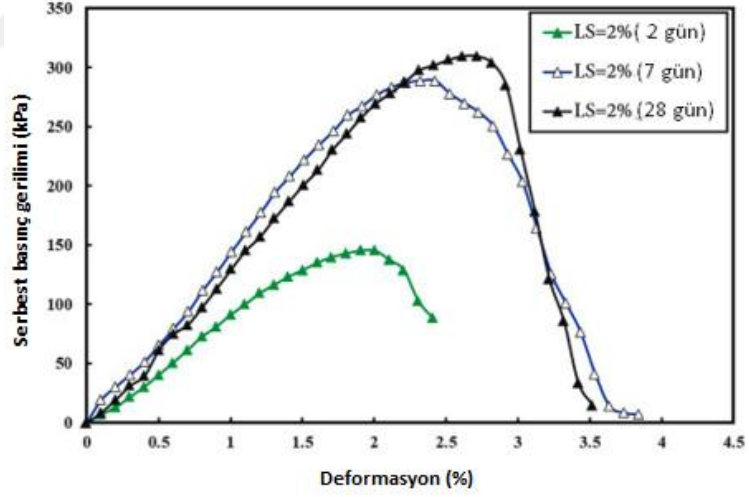
ML zemin sınıfındaki diğer zeminin ise linyosülfonat ile güçlendirilmesi, %5 ve %10 oranında kullanıldığında mukavemeti arttırırken, bu oranların üzerinde kullanımı düşürmüştür. Optimum karışım oranı, mevcut su içeriğinin %11,85'i ile %5 linyosülfonat olarak belirlenmiş ve bu oranların kullanılması basınç dayanımında %225'lik bir artışa neden olmuştur. Durabilite deneyleri, linyosülfonat katkısının her iki siltli zemin türü için de ıslak- kuru dayanıklılığı eşit derecede

iyileştirdiğini ve killi kumlu silt zemin türünde donma- çözünme dayanıklılığını arttırmada önemli ölçüde gelişme sağladığını ortaya koymuştur.

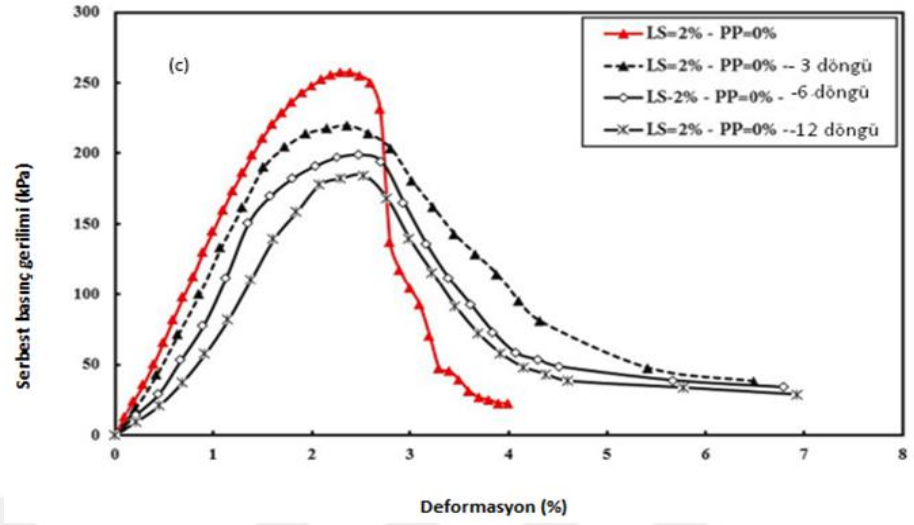
Roshan et al. (2022), sahadan mevcut zemin ardışık donma ve çözülme koşullarına maruz kaldığından, killi kumun donma-çözülme dayanıklılığını linyosülfonat katkısı varlığında ve stabilizatör ve donatı olarak 12 mm uzunluğunda polipropilen liflerinin %0,4 ve %0,8 oranında kullanımında incelenmiştir. Başlangıçta farklı kür sürelerinde (2, 7 ve 28 gün) ve linyosülfonat ilavesi %1, %2, %3 ve %4 oranlarında kullanılmış ve daha sonra hem linyosülfonat uygulanmış hem de uygulanmamış numunelerde donma-çözülme döngüleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.15 (a)' da görüldüğü üzere, 7 günlük bir kürleme süresinde farklı linyosülfonat içerikleri açısından stabilize edilmiş numunelerde %2 linyosülfonat içeren numunenin diğer numunelere göre daha yüksek mukavemete sahip olduğu görülmüştür. Şekil 2.15 (b), %2 linyosülfonat içeren numunelerin serbest basınç dayanımı test sonuçlarına göre kür süresinin etkisini göstermektedir. İstikrarlı bir gelişme 7 günlük kür süresinde görülmüş ve mukavemet de kür süresine bağlı olarak artmıştır. Ancak, mukavemet kazanımının çoğu 7 günlük bir kürleme süresinde elde edildiğinden ve 28 günlük kür süresindeki mukavemet ile arasındaki küçük farktan dolayı uygun kürleme süresi 7 gün ve optimum oran %2 olarak kabul edilmiştir. Linyosülfonat içermeyen saf zeminin donma- çözülme deneyleri sonucunda sadece 6 döngüye dayanabildiği serbest basınç dayanımlarındaki azalma oranının 3 ve 6 donma ve çözülme döngüsünden sonra sırasıyla %37 ve %67 olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, katkısız bu zemin 12 donma-çözülme döngüsüne karşı dayanıklı olmadığından linyosülfonat eklenmiştir. Şekil 2.17 durabilite deneyleri sonucunda linyosülfonat eklenmiş zeminin 12 donma-çözülme döngüsüne dayandığını, 3 döngü sonrasında mukavemetinin %15'ini kaybettiğini ve donma-çözülme döngüleri altında linyosülfonatın kabul edilebilir bir davranış gerçekleştirdiğini göstermiştir. Polipropilen liflerin varlığı çekme kuvveti yarattığından donma-çözülme döngülerindeki artışın neden olduğu çatlak sayısı azalmış, numunelerin davranışı da geliştirilmiştir. Ayrıca ultrasonik darbe hızı (UPV) test sonucu, linyosülfonat stabilizasyonunun tahribatsız olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 2.15 7 günlük kür süresi için %1, 2, 3 ve %4 linyosülfonat içeren stabilize edilmemiş ve stabilize edilmiş numuneler için serbest basınç dayanımı testlerinden elde edilen gerilme-deformasyon grafiği, Roshan et al. (2022)

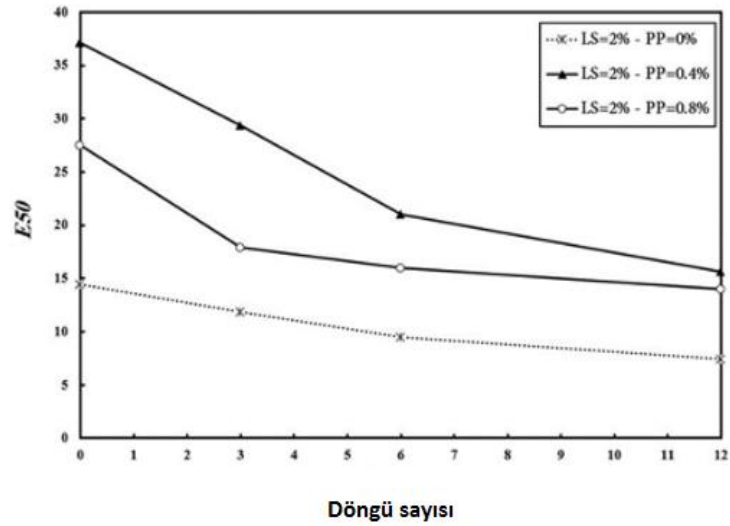


Şekil 2.16 Farklı kürleme sürelerinde % 2 linyosülfonat içeriği kullanılan zeminde serbest basınç dayanımı davranışı, Roshan et al. (2022)



Şekil 2.17 Donma-çözülme döngülerinin stabilize edilmiş numunenin sınırsız basınç dayanımı üzerindeki etkisi, Roshan et al. (2022)

Ek olarak. 12 döngüden sonra stabilize edilen numunelerde numunelerin deformasyon modülü %48 oranında, %0.8 polipropilen elyaf içeren stabilize numunelerde % 49 oranında azalmıştır.



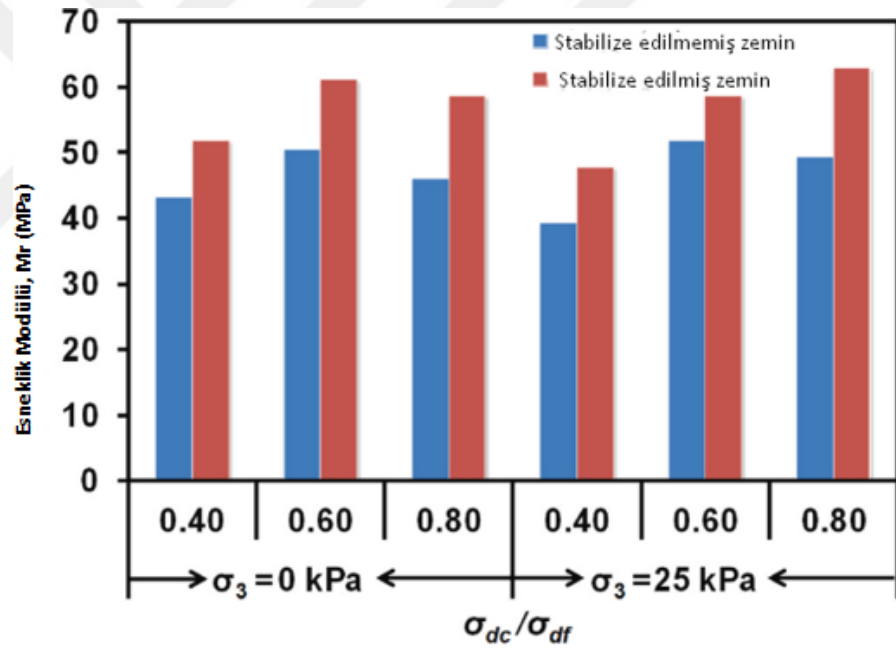
Şekil 2.18 Stabilize edilmiş ve güçlendirilmiş numunelerin % 50 mukavemetine eşdeğer deformasyon katsayısı üzerinde donma-çözülme döngüsü etkisi, Roshan et al. (2022)

Ta'negonbadi and Noorzad (2017), yaptıkları serbest basınç deneyleri sonucunda linyosülfonat kullanarak killi zeminlerin stabilizasyonunu araştırmıştır. % 0.5, 0.75, 1, 2, 3 ve % 4 oranında kullanılan linyosülfonat katkısı optimum olarak % 0.75 bulunmuş ve kil zeminin mukavemetini % 44 arttırmayı başarmıştır. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen 4 adet ıslatma- kurutma döngüleri sonrası optimum oranda linyosülfonat içeren zeminin mukavemeti doğal zeminin mukavemetine kıyasla 1,8 kat daha fazla dayanım vermiştir. Sekant modülü (E_{50}) ise %164 oranında bir iyileşme sağlamıştır. Sonuç olarak, linyosülfonat ile stabilizasyon metodunun zeminde gevrek bir davranışa neden olmadan rijitliğini ve dayanımını arttırdığı ortaya konulmuştur.

Roshan et al. (2020), linyosülfonat katkısı ilave edilmiş kil zeminde ıslatma kurutma döngüleri sonrası davranışlarını incelemiştir. Linyosülfonat ile stabilize edilmemiş zemin, ince daneli kısmın yüksek oranda şişmesi nedeniyle ıslatma-kurutma döngüsüne karşı direnç gösterememiştir. %2 linyosülfonat ile iyileştirilen zemin ise 2 ıslatma- kurutma döngüsüne dayanabilmiştir. Polipropilen liflerin %0.8 oranında linyosülfonat katkısı içeren zeminlere ilave olarak kullanılması durumunda ise, zemin 12 ıslatma-kurutma döngüsüne kadar dayanıklılığını arttırabilmiştir. Bu durumda, linyosülfonat katkısının polipropilen lifler ile birlikte kullanımı önerilmiştir. Ayrıca ıslatma kurutma döngülerinin rijitliği azalttığı belirlenmiştir. Linyosülfonat ile stabilize edilmiş zeminin iki döngüden sonra Sekant modülü %59 oranında azalmış, %0,4 ve %0,8 polipropilen lifler içeren takviyeli numunelerde ise 4 ve 12 çevrimden sonra sırasıyla %48 ve %80 azalmıştır. Stabilize edilmiş numunelerde, birbirini izleyen ıslatma- kurutma döngüleri sonucunda yükseklik değişimine bağlı olarak stabilize edici malzemenin zeminden uzaklaştırıldığı mikro çatlaklar sebebiyle, numunenin suya yerleşmesi sonucunda linyosülfonat partikülleri ile zemin arasında temas yüzeyinin kaybolması mukavemetinde azalma ile birlikte rijitliğin azalmasının sebebi olarak sunulmuştur.

Singh and Sahoo (2021), yüksek plastisiteli kil bir zemini stabilize edebilmek için linyosülfonat katkısının etkisini araştırmıştır. Çalışmalarında 5, 10 ve 21 günlük kürleme periyotları %0.5, 0.75, 1.5, 2.0, 2.5 ve % 3.0 oranında linyosülfonat

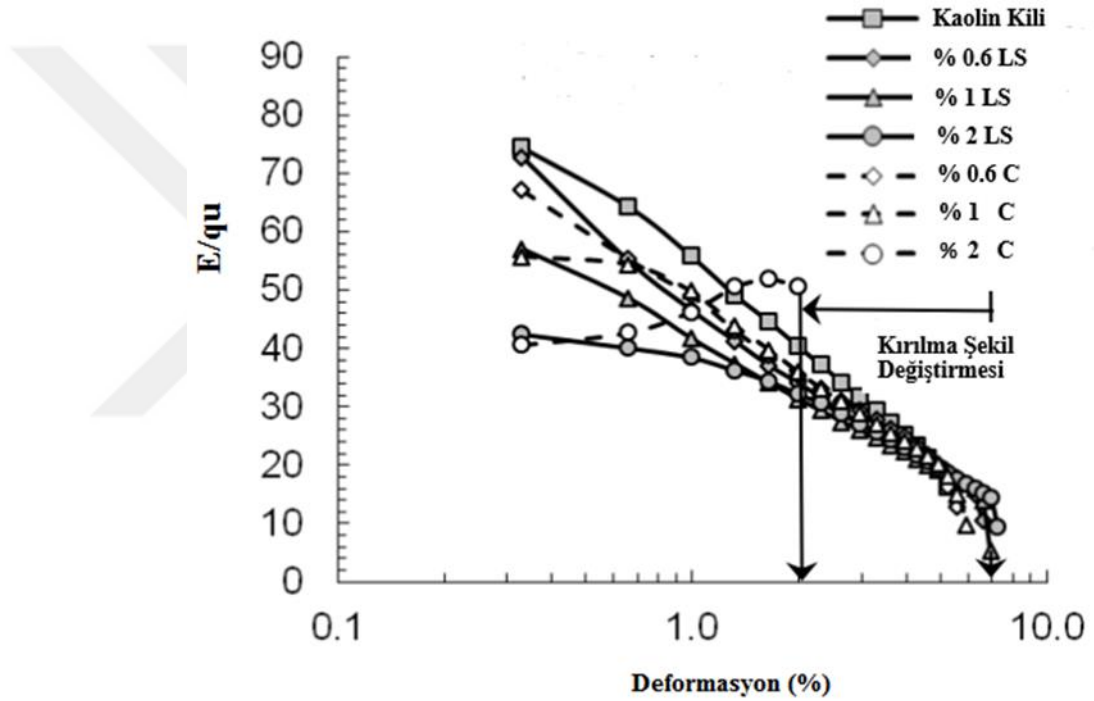
kullanılmış ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Daha sonra optimum linyosülfonat oranında konsolide olmayan drenajsız koşullar altında farklı sınırlayıcı basınçlar ve tekrarlı gerilmeler ile davranışı incelenmiştir. Optimum nem içeriğinin kuru tarafında sıkıştırılan numunelerin serbest basınç dayanımı %2 linyosülfonat ilavesine kadar artarken, daha fazla kullanımda azalmıştır. Dayanımda elde edilen maksimum kazanç ise 10 günlük bir kür süresinde görülmüş ve daha sonra mukavemetteki artış yavaşlamıştır. Stabilize edilmiş numuneler için, yükleme döngülerinin bir fonksiyonu olarak eksenel deformasyondaki artış hızının, stabilize edilmemiş numunelerden çok daha küçük olması, stabilize edilen örneklerin dayanıklılığının artacağını ortaya koymuştur.



Şekil 2.19 Farklı tekrarlı deviatör gerilmeler ve çevre basınçlarında 10.000 yük döngüsünün sonunda elde edilen Esneklik modülleri, Singh and Sahoo (2021)

Linyosülfonat ilave edilmiş zeminlerde esneklik modülündeki önemli ölçüdeki artış, daha yüksek deviatör gerilmelerde, linyosülfonat uygulanmamış zeminler için nispeten daha yüksek olan esnek deformasyondaki azalmaya atfedilmiştir.

Vinod et al. (2012), linyosülfonat katkısı kullanılan killi zeminler için deformasyon, E/q_u cinsinden modülü çimento katkılı kil zeminler ile karşılaştırarak incelemiş ayrıca katkılı zeminler için elektriksel iletkenlik testleri gerçekleştirerek mikro-kimyasal değişimleri ölçmüştür. Tek eksenli basınç deneyi uygulanacak olan numuneler için hem linyosülfonat katkısı hem de çimento katkısı %0,6, %1 ve %2 oranlarında kullanılmıştır. Kür süreleri sonunda numunelerin serbest basınç dayanımı testleri yapılarak E/q_u cinsinden modülü elde edilmiştir.

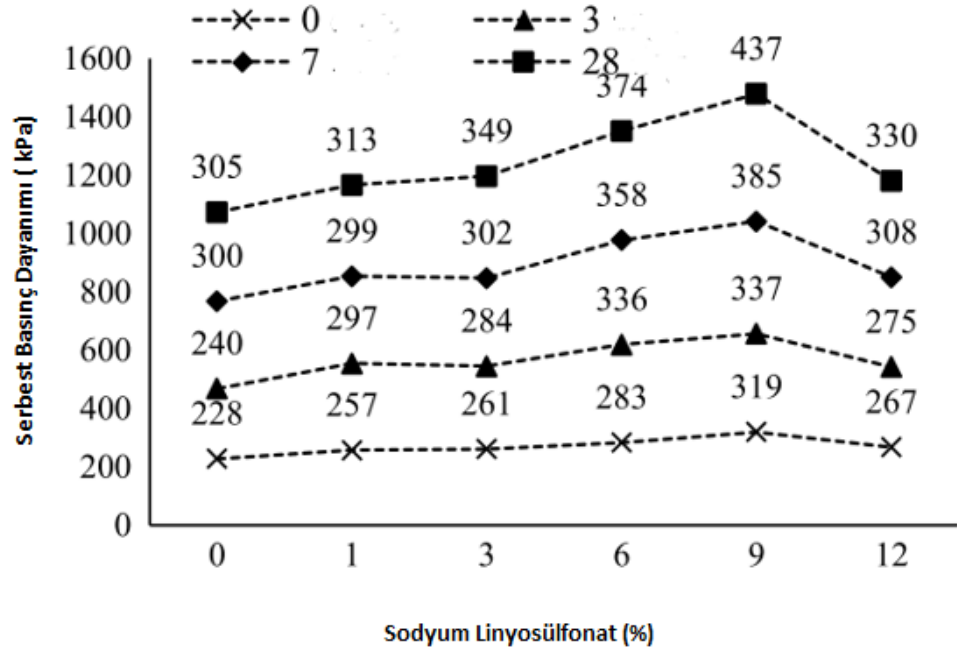


Şekil 2.20 Linyosülfonat ve çimento katkılı kaolin kilinin E/q_u değişimi, Ls: Linyosülfonat, C:Çimento (Vinod et al., 2012)

Linyosülfonat katkısı miktarının artışı ile E/q_u başlangıç değeri azalmıştır, aynı zamanda çimento katkısının artmasıyla da başlangıç değeri azalmıştır (Şekil 2.20). Farklı oranlarda linyosülfonat ile stabilize edilen kaolin kilinin, kırılma şekil değiştirmesi ile işlem görmemiş kaolin kilinin kırılma şekil değiştirmesinin hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. %0,6 ve %1 çimento ile stabilize edilen zeminin kırılma şekil değiştirmesi, linyosülfonat katkılı zeminler ile benzer davranış gösterirken, %2 çimento katkısı ile kırılma şekil değiştirmesi işlenmemiş ve diğer

işlenmiş zeminlere kıyasla çok daha düşük sonuç vermiştir. Sonuç olarak, kaolin kilinin %2 çimento ile iyileştirilmesi zemini oldukça gevrek bir duruma getirmekte, ancak aynı oranda linyosülfonat ile iyileştirilen zemin çimento ile iyileştirilen zemin ile karşılaştırıldığında kırılma şekil değiştirmesini azaltmamıştır. Kürlenme süresine bağlı olarak elektriksel iletkenliğin azalmasının, su ile temasta kararlı olan ve böylece kararlı zemin agregaları oluşturan kil minerali-linyosülfonat amorf bileşiklerinin oluşumunu göstermektedir (Vinod et al., 2012). Katkı malzemesinin artışına bağlı olarak, çimento ilavesi yapılmış zeminler için elektriksel iletkenlik davranışı linyosülfonat ile benzerlik göstermiştir ancak kür süresi ile değişimi linyosülfonat ilave edilmiş zeminlerin davranışından farklıdır. %2,0 çimento ilavesi ile 7 günlük kürlenme süresi boyunca elektriksel iletkenlik artma eğiliminde olup, 28 günlük kürleme sırasında azalmıştır. Elektriksel iletkenliğin kürlenme süresiyle azalma eğilimi, stabilize zeminlerde kararlı bileşiklerin oluşumunu göstermiştir. Öte yandan, %2,0 çimento ile artması, gözenek sıvısında fazla iyonların varlığını göstermiş ve bu durum kil minerallerinin kür süresi ile yapısının yeniden düzenlenmesine bağlı olduğu daha önce Kamruzzaman et al. (2006) tarafından açıklanmıştır (Vinod et al., 2012). Çimento ile iyileştirilmiş zeminlerin modül davranışının, elektriksel iletkenliklerdeki değişimlerle ilgili olabileceği düşünülmüştür. Uygun miktarda çimento ilavesi zemin ile kararlı bileşikler oluşturarak parçacıkları birbirine bağlamakta ve bu durumda çimento bağlayıcı ve dolgu malzemesi olarak çalışmaktadır. Kürlenme süresi elektriksel iletkenlikte azalma ile sonuçlanan zeminin sünek davranışını korurken daha yüksek bir nihai mukavemet verdiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, uygun miktarı aşan düzeyde katkı malzemesi kullanıldığında, bir reaksiyon için yeterli reaktif kil minerali alamayan zeminler daha yüksek miktarda çimentolu bileşikler oluşturarak aşırı miktarda çimentolu bileşiğin varlığına ve bu bileşiklerin kırılma şekil değiştirmesinin azalmasına neden olan ağsı bir yapı üretmesi gevrek davranışa neden olmuştur. Bu, modülü ve kırılma şekil değiştirmesini azaltan ve böylece linyosülfonat ilave edilmiş zeminlere kıyasla yüksek kırılma davranış sergileyen kararsız bileşiklerin varlığını doğrulamıştır.

Singh et al. (2021), bir stabilizatör olarak linyosülfonatın şişen zeminlerin iyileştirilmesi için değerlendirilmesi amacıyla % 0-12 arasında değişen yüzdelerde sodyum linyosülfonat ilavesi ile yüksek plastisiteli şişen kil zeminlerin mukavemet özellikleri incelenmiştir.



Şekil 2.21 Farklı yüzdeler ve kür sürelerinde linyosülfonat stabilize zeminlerin dayanımı, Singh et al. (2021)

Şekil 2.21, linyosülfonat katkılı kil zeminin tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarını göstermektedir. Linyosülfonat katkısının %9'a kadar artışında, 28 günlük kür süresi boyunca mukavemetinin 437 kPa'ya yükseldiği görülmektedir. Tüm kür süreleri için %9' a kadar linyosülfonat katkısı içeriğinde mukavemet artmış fakat %12 oranında kullanılması ile azalmıştır. Artan sodyum linyosülfonat oranı ile mukavemet artışı eğiliminin, zemin parçacıklarının bir araya toplanmasından ve linyosülfonat ile birlikte suya olan afinitesinin azalması sebebiyle gerçekleştiği belirtilmiştir. Ayrıca sonuçlar, kürlenme süresiyle birlikte tüm numuneler için mukavemetin de arttığını göstermiştir. Kür süresi, sodyum linyosülfonatın kil yapısına zaman sağlamıştır. Bununla birlikte, kür süresi ile artan mukavemet, saf kil zemin örneklerine kıyasla, linyosülfonat ilave edilmiş kil

zeminler için yüksek değildir. Bunun nedeni olarak zeminin permeabilitesinin çok düşük olması nedeniyle, ayrıştırma işleminin çok yavaş gerçekleşmesi olduğu belirtilmiştir. Direkt kesme deneyleri sonucunda ise, linyosülfonat ilavesi ile kohezyon değerinin arttığı görülmüştür. Buna rağmen serbest basınç dayanımı deneyleri sonucunda %12 lik linyosülfonat kullanımının dayanımda azalmaya neden olduğu görülürken, en yüksek kohezyon değeri %12 linyosülfonat katkısı varlığında görülmüştür. İki deney sonucunun birbiri ile uyumsuz olmasının nedeni olarak, drenajsız koşullar altında kesme aşamasının gerçekleşmesi gösterilmiştir. Elastisite modülü ise, artan linyosülfonat içeriği ile artış göstermiş, %12 linyosülfonat ilavesinden sonra katkısız zemininkinin altına düşmüştür. Ek olarak, yapılan deneyler sonucunda şişme indisi ve şişme potansiyelinde linyosülfonat ilavesi ile birlikte azalma görülmüş, deneyler sırasında ölçülen pH değerlerinde değişiklik olmaması ile linyosülfonatın çevre dostu bir stabilizatör olarak kullanılabileceği kanıtlanmıştır. İncelenen SEM görüntüleri de deney sonuçları ile uyumlu olarak %1 ile %9 arasında linyosülfonat katkısı kullanımı sırasında zemin yapısında agregasyonun gerçekleştiğini ve %12 linyosülfonat ilavesinde daha küçük boyutlarda agregasyon gerçekleştiğini ve bunun da daha düşük dayanım ile sonuçlandığını göstermiştir.

Fernández et al. (2021), çalışmalarında kalsiyum linyosülfonat katkısının killi bir zeminin şişme potansiyeline olan etkisini değerlendirmiştir. %3 oranında kalsiyum linyosülfonat kullanımı kil zeminin sıkıştırılabilirliğini %30'a kadar arttırmış ancak %5 oranında linyosülfonat kullanımı ile sıkıştırılabilirlik %30 azalmıştır. Serbest basınç deneyleri sonucunda, linyosülfonat katkısı içeren kil zeminin daha yüksek deformasyonlarda kırılma gerçekleştirdiği ve daha yüksek yüklere dayanabilmesi ile kili dayanım açısından iyileştirebildiği görülmüştür. Şişme potansiyeli incelenen linyosülfonat ile stabilize edilen kil zeminde, %3 ile %5 oranında linyosülfonat kullanımı şişme potansiyelini %60- %70 oranında azaltmayı başarmıştır.

Alazigha et al. (2017), yeniden kalıplanmış şişen bir zeminin linyosülfonat katkısı ile şişme potansiyeli, serbest basınç dayanımı, dayanıklılık, geçirgenlik,

konsolidasyon özellikleri gibi mühendislik özelliklerini iyileştirme potansiyelini araştırmıştır. Zeminin şişme potansiyeli, sünekliğini ve pH değerini korurken %2 linyosülfonat ilavesi ile %23 oranında azalmıştır. Linyosülfonat ile stabilize edilmiş zeminlerde tekrarlanan donma-çözülme/ıslatma-kurutma döngülerine karşı direnç geliştirildiği görülmüştür. %2 linyosülfonat katkısı %77 oranında ıslanma-kurutma döngülerine karşı iyileşmiştir. Donma-çözülme döngüleri sonrasında ise, 12. döngünün sonunda linyosülfonat içermeyen zemin kütesinin %7 sini kaybederken, linyosülfonat içeren zemin ise % 3.4' ünü kaybederek dayanım göstermiştir. Karşılaştırma amacıyla %2 oranında çimento ilavesi ile stabilize edilen kil zemin ise 6. donma-çözülme döngüsünün sonunda kütesinin %17' sini kaybetmiştir. Ek olarak %2 linyosülfonat ilavesi, serbest basınç dayanımını 265 kPa'dan 285 kPa'ya yükselterek, %2 çimento uygulamasına benzer sonuç vermiştir. Fakat linyosülfonat işlemi zeminin gevrekliğini değiştirecek olan pH değerini 7.43'ten 9.65'e önemli ölçüde artıran çimentonun aksine, değiştirmeyerek zeminin sünekliğini ve pH değerini korumuştur. Aynı zamanda, konsolidasyon özelliklerinde de gelişme sağlamıştır.

Linyosülfonat ilavesinin zeminin erozyon davranışına olan etkisini inceleyen bazı çalışmalar da yapılmıştır. Örneğin, Indraratna et al. (2008), erozyonu kontrol etmek amacıyla çimento ve linyosülfonat kullanarak kimyasal stabilizasyonu incelemiştir. Erozyona uygun siltli kum ile çimento %0.5, 1, 1.5 ve %2 ve linyosülfonat %0.1, 0.2, 0.4 ve % 0.6 oranlarında seçilmiştir. Bu katkı malzemelerinin erozyonu katsayısını azalttığı ve kritik kayma gerilmesini de önemli ölçüde arttırdığı belirtilmiştir. Erozyona karşı direnci sağlamak için çimentodan daha az miktarda linyosülfonat katkısı yeterli olmuştur. Ayrıca %0,6 oranında linyosülfonat katkısı, %2 çimento katkısına göre daha fazla kritik kayma gerilmesinde artış göstermiştir.

Vinod et al. (2010a), benzer bir çalışma yaparak linyosülfonat katkılı kil zeminlerde iç erozyon davranışını incelemiş ve aynı zamanda linyosülfonat ile stabilize edilmiş kil zemin için bir stabilizasyon mekanizması önermiştir. Dispersif kilde kullanılmak üzere % 0.2 ile % 0.6 oranlarında linyosülfonat ve çimento ilavesi

ile hazırlanan numuneler Indraratna et al. (2008) ile aynı koşullarda kuru yoğunluklarının %95' ine sıkıştırılmış, nem geçirmeyen torbalara sarılarak 7 gün süreyle kür odasında bekletilmiş ve kürlenene numuneler doygunluğa ulaşana kadar aşındırıcı sıvıya daldırılmış, sonrasında numunelerin merkezinde oluşan 10 mm boyutunda bir çatlak içinden iç erozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Beklenildiği üzere linyosülfonat miktarı arttıkça kritik kayma gerilmesi artmış ve toprak erozyonu katsayısı azalmıştır. Linyosülfonat ile iyileştirilmiş dispersif kilin davranışı çimento ile iyileştirilmiş dispersif kil ile karşılaştırılmıştır ve benzer davranış gösterdikleri görülmüştür. Bu sonuçlar Indraratna et al. (2008) ile benzerdir. Koohpeyma et al. (2013)' da zemine %0,4 oranında linyosülfonat katkısının eklenmesi, erozyon hızını büyük ölçüde azaltabilir olduğu ve daha yüksek hidrolik eğimlerde daha etkili performans göstereceğini belirtmiştir.

Vakili et al. (2017), elektro osmoz uygulaması ile yüksek oranda dispersif kilin iyileştirilmesi için %0,5, 1 ve % 1.5 oranında linyosülfonat kullanmıştır. 7 günlük kür süresi sonucunda en düşük en düşük dağılım değerine %1,5 linyosülfonat karışımı ile ulaşılmıştır. Linyosülfonat ve elektro osmoz uygulaması ile başlangıçtaki dispersiviteyi %65 oranında azaltabilmiştir. Serbest basınç dayanımı ise %1,5 oranında linyosülfonat içeriğinin varlığında 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin bitiminde sırasıyla %47, % 63 ve % 139 oranlarında mukavemet artışı sağlayabilmiştir. Kür süresine bağlı olarak da sabit linyosülfonat katkısı içeriğinde mukavemetin arttığı ortaya çıkmıştır.

Vakili et al. (2018), %45 kil, %49 silt ve %9 kum içeren bir doğal zemin numunesinin linyosülfonat ve polipropilen lif takviyelerinin kullanımıyla erozyon davranışındaki değişiklikleri araştırmıştır. %0,35 oranında polipropilen lif ve %2 linyosülfonat zemindeki dağılıbilirliğe %23'e kadar düşürmüştür. 7 ve 28 günde sırasıyla %188 ve %376 oranında mukavemet artışı sağlayan linyosülfonat, polipropilen lif ile birlikte kullanıldığında ise sırasıyla % 639 ve % 2541 oranında mukavemet artışı sağlamıştır. En düşük erozyon hızını da ikisinin birlikte kullanımı sağlamıştır, yine de linyosülfonatın tek başına varlığı erozyon hızını düşürmüştür.

Linyosülfonatların tüm avantajlarına ek olarak stabilize edilmiş numunelerdeki basınç dayanımı incelendiğinde, geleneksel katkı malzemelerine kıyasla istenilen dayanımı elde etmek için daha düşük hacimlerde linyosülfonat kullanımının yeterli olduğu görülmüştür (Sezer vd., 2016). Ayrıca, bu lignin bazlı kimyasal olan linyosülfonat ile stabilizasyon, önemli bir gevrek davranışa yol açmadan zeminin rijitliğini ve mukavemetini arttırabilmesi nedeniyle, dikkat çekicidir (Vinod and Indraratna, 2011; Sezer vd., 2016; Chen and Indraratna, 2014; Alazigha, 2015; Ta'negonbadi and Noorzad, 2017)

2.2. Kireç Katkısı ile Zemin İyileştirme

Günümüzde killi zeminlerin kireç kullanılarak stabilizasyonu, yaygın olarak kullanılan ve bilinen en eski tekniktir. Bir stabilizasyon malzemesi olan kireç ilk olarak, 1924 yılında hidratlı kirecin eklenmesiyle güçlendirilen yol inşaatında kullanılmıştır (McCaustland, 1925; Bell, 1996; Boz, 2017). Kireç, killi zeminleri iyileştirmenin yanı sıra kil ile kirlenmiş agrega temelleri ve hatta çok az veya hiç kayda değer kil içermeyen kalkerli temelleri iyileştirmek veya geri kazanmak için etkili bir şekilde kullanılabilir (Little vd., 1999). Stabilizasyon malzemesi olarak kireç, yol yapımında alt temellerin iyileştirilmesinde, demiryolu ve havaalanı inşaatlarında, dolgularda, stabil olmayan şevlerde, köprü ayakları ve istinat duvarlarında dolgu olarak, kanal kaplaması olarak, temel döşemelerinin altındaki zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır (Anon, 1985,1990; Bell, 1996). Kireç stabilizasyonu, zeminlerde kırılma, yorulma ve kalıcı deformasyonlara karşı dayanımı iyileştirme dahil olmak üzere mühendislik özelliklerinde bir dizi önemli değişiklik yaratır. Aynı zamanda esneklik özelliklerinde gelişme, nemin zararlı etkilerine karşı direnç ve zeminin şişmesini azaltma gibi özelliklerdeki önemli gelişmeler, ağır killer gibi orta ila yüksek derecede plastik zeminlerde görülmektedir (Little et al., 2000)

Ana maddesi tamamen ya da büyük oranda kalsiyum karbonat olan kireçtaşı veya dolomit gibi kalkerli taşlar, atmosferik ortamda yaklaşık olarak 900 C'de yakılır. Bu işlem sonucunda elde edilen kalsiyum oksit, sönmemiş kireçtir (Uğur ve

Güleç, 2016). Sönmemiş kirecin su ile reaksiyona girmesi durumunda ise hidratasyon reaksiyonu sönmüş kireç oluşturur. Kireç, bu söndürme işlemi boyunca ağırlıkça %30 su emme potansiyeline sahiptir (Atay, 2011; Boz, 2017).

Killi bir zemine kireç ilave edilmesiyle zemin özellikleri değişmektedir. Tüm ince daneli zeminlerin, kireç ilavesiyle birlikte daha iyi işlenebilirliğe ve daha düşük plastisiteye sahip olacak şekilde dönüştürülmesi mümkündür. Kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin mukavemet özellikleri, zemin cinsine, kullanılan kireç çeşidi ve ayrıca kullanılma miktarına, ek olarak kür koşullarına bağlıdır. Bu şekilde stabilize edilen zeminlerde mühendislik özelliklerinin değişmesini sağlayan kirecin stabilizasyon mekanizmasıdır. Bu mekanizmalar, katyon değişimi, kilin flokülasyonu ve puzolanik aktiviteleri içermektedir. Hızlı bir şekilde gerçekleşen katyon değişimi ve flokülasyon süreci zeminin kürsüz dayanım, gerilme-deformasyon ilişkilerine ek olarak plastisite, işlenebilirlik ve şişme özelliklerinde ani değişimlere neden olur. Oluşan diğer reaksiyon bağlayıcı reaksiyon olup puzolanik reaksiyondur ve zamana bağlıdır, mukavemet uzun bir süre boyunca kademeli olarak gelişmektedir (Türköz, 2006). Bell (1996)' e göre, bu iki malzeme reaksiyona girdiğinde kireçte bulunan kalsiyum iyonları ile killi zeminlerle ilişkili metalik iyonlar arasında katyon değişimi gerçekleşmektedir. Kil partikülleri, kalsiyum iyon değişimi ile modifiye edilmiş, dağınık, sulu bir çift tabaka ile çevrilidir. Bu durum, kil partiküllerinde elektrik yükünün yoğunluğunu değiştirmesi sebebiyle yığınlar oluşturarak kil parçacıklarını birbirine yaklaştıran ve flokülasyon adı verilen bir süreç oluşturur. Kireç uygulanmış zeminler üzerinde mühendislik özelliklerinin değişimine neden olan birincil etki budur (Malkanthi et al., 2020). Katyon değişimi ile mineral partiküllerinin topaklanması gözlenir ve zeminin plastisitesinde değişimlere neden olan ana unsur olması açısından önemlidir (Kızılçelik, 2010; Boardman vd., 2001).

Katyon değişimine ek olarak, kireç ilavesiyle kildeki alüminli ve silisli mineraller kireçle reaksiyona girerek parçacıkları birbirine bağlayan kalsiyum silikatlar ve alüminatlar üretir (Yıldız ve Soğancı, 2012). Kireç ilavesiyle ortaya çıkan yüksek alkali ortam, reaksiyon ürünleri olarak çöktürülen alümina-silikatların

yavaş çözeltisine yol açar. Pozolanik reaksiyon olan bu tür reaksiyonlar, zemin partiküllerini birbirine bağlayarak flokülasyona katkıda bulunur ve kürlenme meydana geldikçe zeminin güçlenmesini sağlar, uygun sıcaklıkta ve su muhtevasında yıllarca devam eder (Diamond and Kinter, 1966; Bell, 1996; Kızılcıçelik, 2010). Pozolanik reaksiyonlar aşağıdaki eşitliklerle açıklanır (Mallela et al., 2004; Jawad et al., 2014):



Killi zeminlere kireç ilave edildiğinde, ilk olarak zeminin kireç için zeminin afinitesini sağlaması gerekmektedir. Bu, iyonların kil mineralleri tarafından absorbe edilmesi olarak açıklanabilir. Bu durum sağlanıncaya kadar pozolanik reaksiyonlar için uygun değildir. Çünkü, kirecin zemin içinde sabitlendiği ve diğer reaksiyonlara izin vermediği kireç fiksasyonu gerçekleşir (Hilt and Davidson, 1960; Bell, 1996). Kirecin sabitlendiği bu nokta, daha fazla kireç ilavesinin plastik limitte daha fazla değişikliğe neden olmadığı noktadır. Dolayısıyla, bu nokta zeminin maksimum verimi için gereken optimum kireç miktarını gösterir. Zeminde maksimum modifikasyon için gerekli olan kireç miktarı genellikle ağırlıkça %1 ile %3 arasında olmaktadır (Bell, 1996). Kireç stabilizasyonu, montmorilonit kile kaolinitik killere göre daha hızlı etki eder. Montmorilonit killer daha erken dayanım kazanırken, kür süresi arttıkça kaolinitik killerin ilave dayanım kazanımları, montmorilonit killerin kazanımlarından daha yüksektir. Optimum mukavemet kazanımları montmorilonit için yaklaşık %4, kaolinit için %4-6 ve kuvars için %4-8 arasındadır. Ingles and Metcalf (1972), stabilizasyon için ilave edilecek kireç miktarının iyi derecelenmiş kil-çakıl için yaklaşık %3, kumlu kil için %5, siltli kil için %2~4, plastik kil için %3~8, yüksek plastik kil için %3~10 arasında olduğunu belirtmiştir. İnce çatlaklı kayalar, kumlar ve organik topraklar için kireç stabilizasyonu önerilmemektedir (Kızılcıçelik, 2010).

Kireç stabilizasyonu, zeminlerde kırılma, yorulma ve kalıcı deformasyonlara karşı dayanımı iyileştirme dahil olmak üzere mühendislik özelliklerinde bir dizi önemli değişiklik yaratır. Aynı zamanda esneklik özelliklerinde gelişme, nemin zararlı etkilerine karşı direnç ve zeminin şişmesini azaltma gibi özelliklerdeki önemli gelişmeler, ağır killer gibi orta ila yüksek derecede plastik zeminlerde görülmektedir (Little et al., 2000).

Geleneksel katkılarla stabilizasyonun, zemin gevrekliği üzerindeki etkisini incelemek için yapılan bazı çalışmaların sonucu özetlenmiştir. Çizelge 2.2’de görülebileceği gibi, zeminlerin çoğu geleneksel katkılarla stabilize edildikten sonra oldukça gevrek hale gelmiştir.

Çizelge 2.2 Geleneksel katkı kullanımını zemin davranışı üzerinde etkisi

Zemin	Stabilizatör	Mukavemet	Rijitlik	Davranış	Referans
Killi zemin	Alçıtaşı	Artış		Gevrek	Krishnaiah et al. (2020)
Killi zemin	Çimento	Artış		Gevrek	Mahesh et al. (2018)
Deniz kili	Kireç	Artış		Gevrek	Tüylüce (2010)
SP	Alçıtaşı	Artış		Gevrek	Lee et al. (2009)
ML	Çimento	Artış	Artış	Gevrek	Sariosseiri and Muhunthan (2008)
Siltli kum	Çimento	İçeriğe bağlı artış	Artış	İçeriğe bağlı artan gevreklik	Schnaid et al. (2001)
Kum	Çimento	Artış	Artış	Yüksek gevreklik	Abdulla and Kioussis (1997)
Kumlu zemin	Çimento	Artış	Artış	Oldukça yüksek gevreklik	Consoli et al. (1998)

Geçmişte yapılan çalışmalar, geleneksel katkıların kullanımı ile stabilize edilmiş zeminlerin olumlu bir performans göstererek taşıma gücünün artması, büzülme ve şişme potansiyelinde azalma, yumuşak ve dengesiz zeminleri stabilize

etme ve dayanıklılık ve sıvılaşma potansiyeli ile başa çıkma gibi mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Sezer vd., 2016; Bergado et al., 1996; Bell, 1996 ; Horpibulsuk et al., 2004; Horpibulsuk et al., 2010; Indraratna, 1996 ; Lade, 1989; Marri et al., 2012; Muntohar et al., 2012; Little et al., 1987; Vinod, 2011; Indraratna et al., 2015; Roshan et al., 2021).

Bu çalışmalar göstermektedir ki, kireç katkısının zeminlerde taşıma gücünü arttırmaya, şişme ve büzülme potansiyeli gibi özelliklerinde iyileştirme, ayrıca sıvılaşma gibi problemlerin üstesinden gelme, kalıcı deformasyonlara karşı dayanımda iyileşme özellikleri, aynı zamanda zeminin rijitliğini artırma gibi stabilizasyon özellikleri sağlarken gevrek davranışlara neden olmaktadır. Kil zeminler üzerinde zemin matrisine takviye sağlayan makro yapı oluşturan linyosülfonat katkısı ile yapılan çalışmalar ise, linyosülfonat katkısının zeminlerde kompaksiyon özelliklerini değiştirdiği, zeminin likit limitinde düşüşe, plastik limitinde artışa ve plastisitesinde değişime neden olduğu, dayanım, gerilme ve rijitliği olumlu ölçüde ekleyerek zeminlerin mukavemet özelliklerinde artışa, geçirgenlik özelliklerinde düşüşe ve göçmeye karşı uzun ömürlü davranışa neden olurken, aynı zamanda zeminin sahip olduğu sünekliği geleneksel stabilizörlere göre önemli ölçüde etkilemeyerek zeminin davranışını olumlu etkilediği sonuçlarına varılmaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Malzeme

Bu çalışmada, geoteknik özelliklerinin geliştirilmesi istenen kaolin kili ve silt zeminler, linyosülfonat ve sönmemiş kireç katkıları ile desteklenmiştir. Malzemelerle ilgili detaylı bilgiler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

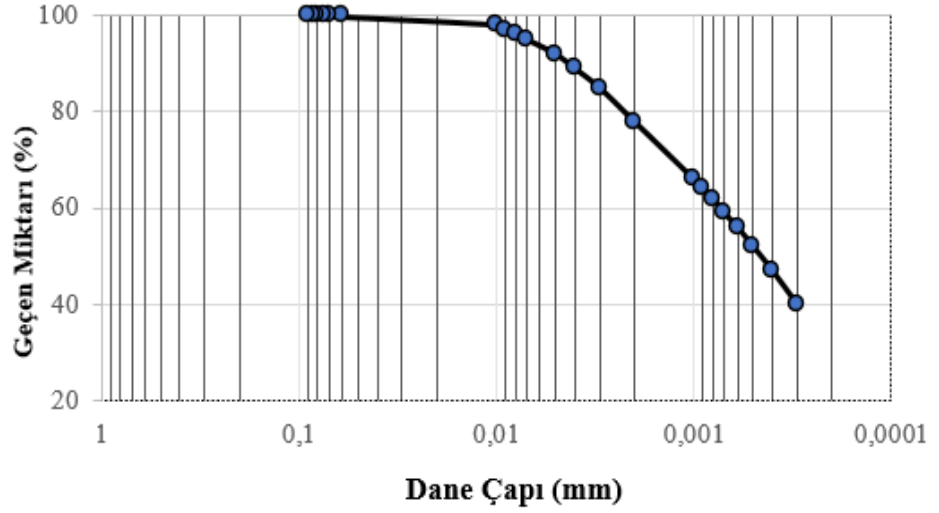
3.1.1. Kaolin kili

Kaolin, esas olarak kaolinit mineralinden oluşan yumuşak beyaz bir kildir ve Çin kili olarak da bilinmektedir. Boyutları 0.1 mikrometre ile 10 mikrometre arasında değişen veya daha büyük olabilen, kabaca altıgen yassı kristallerden oluşmaktadır (Encyclopedia Britannica, 2017).



Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan kaolin kilinin görüntüsü

Çalışmada kullanılan numuneler hazırlanmadan önce kaolin kilinin endeks özellikleri belirlenmiştir. Kil, Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Kaolin kiline ait granülometri eğrisi Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Kaolin kilinin granülometri eğrisi

Kullanılan kil zemin için, kıvam limitleri ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Kullanılan standartlar ile birlikte kil zeminin endeks özellikleri aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir (Çizelge 3.2). Ayrıca kaolin kilinin kimyasal özellikleri üretici firma tarafından sağlanmış ve Çizelge 3.3’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Kullanılan zeminin fiziksel özellikleri

Endeks Özellikleri	Değer	Kullanılan Standart
Likit Limit (%)	56	ASTM D4318-10
Plastik Limit (%)	30	ASTM D4318-10
Plastisite İndeksi (%)	26	ASTM D4318-10
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.62	ASTM D854-14

Çizelge 3.2 Kaolin kilinin kimyasal özellikleri

Bileşenler	%
SiO ₃	69
Al ₂ O ₃	12-17
Fe ₂ O ₃	0,5
TiO ₂	Eser
CaO	0,10
Na ₂ O	0,20
K ₂ O	≤13,17
Cr ₂ O ₃	0,01
SO ₃	≤7,05
BaO	Eser

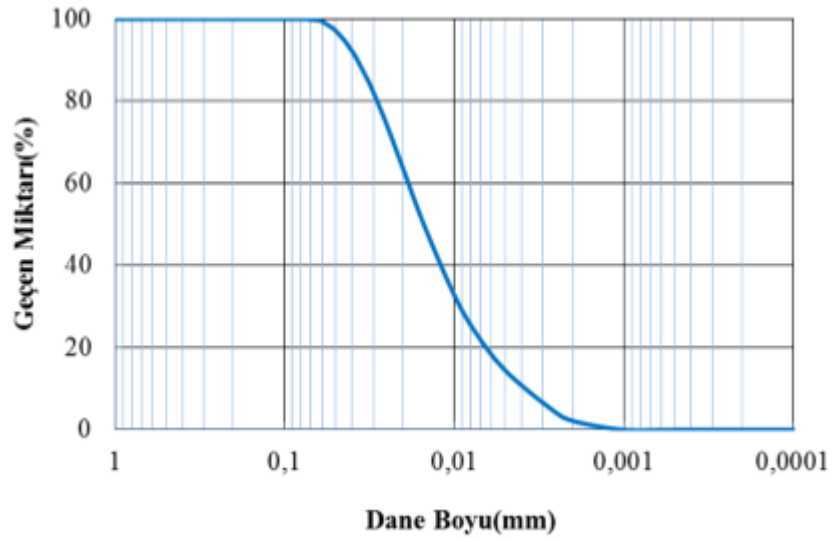
Ayrıca, kaolin kilin kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D698-12'ye göre standart Proktor deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kilin optimum su içeriği %30 ve maksimum kuru birim ağırlığı 1.33 g/cm³ olarak bulunmuştur.

3.1.2. Silt

Deneysel çalışma boyunca kullanılacak olan silt zeminin, Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre zemin sınıfı ML olarak elde edilmiştir. Kullanılan plastik olmayan silt zeminin ASTM D854-14' e göre özgül ağırlığı 2,65 olarak bulunmuştur. Dane boyu dağılımı Şekil 3.4'deki gibidir.



Şekil 3.3 Plastik olmayan silt zemin



Şekil 3.4 Plastik olmayan silt zeminin granülometri eğrisi

3.1.3. Sodyum linyosülfonat katkısının özellikleri

Sarı-kahverengi renkte, kokulu ve toz halde olup, suda tamamen çözünebilir bir malzemedir. Üretici firmadan sağlanan teknik özellikleri Çizelge 3.4' de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Sodyum linyosülfonat malzemesi

Çizelge 3.3 Sodyum linyosülfonat teknik özellikleri

Molekül Formülü	$C_{20}H_{24}Na_2O_{10}S$
Molekül Ağırlığı	534,5
Özgül Ağırlığı	1,28
pH Değeri	4
Toplam Sülfür (%)	3,38

3.1.4. Kireç katkısının özellikleri

Bu tezde çevre dostu malzeme ile kullanımının karşılaştırılması amacıyla sönmemiş kireç kullanılmıştır. Sönmemiş kireç (kostik kireç) renksiz, kübik kristal veya beyaz amorf bir madde ve bazik anhidrittir (The Columbia Encyclopedia, 2017).



Şekil 3.6 Sönmemiş kireç örneği

3.2. Deney Programı

Belirlenen katkı çeşidi, katkı oranları kür süreleri ve sıcaklıklarında hazırlanan numuneler, davranışlarının incelenmesi amacıyla serbest basınç deneyi ve dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneylerine tabii tutulacak şekilde bir deney programı hazırlanmıştır. Ayrıca numunelerin her birinden en az 2 adet hazırlanmıştır ve sonuçlarının ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçlarının incelenirken anlaşılır olması adına numuneler belirli şekillerde kodlanmıştır. Bu kodlamada + ifadesinden önce gelen kısım zemin çeşidini, + ifadesiyle birlikte kullanılan rakam eklenen katkı miktarını ve + ifadesi ile rakamdan sonra kullanılan LS kısaltması linyosülfonat katkısını ifade etmektedir. Örnek olarak kaolin zeminde %5 linyosülfonat kullanılan numunenin ismi KL+ 5LS şeklinde belirlenmiştir. Silt zeminde %5 linyosülfonat katkılı numuneler ise S+ 5LS olarak adlandırılmıştır. Bu numuneler belirlenen kür sürelerinde bekletilmiştir. Zemin çeşidi isimlendirmesinde olduğu gibi, + işaretinden öncesi zemin çeşidini ifade edecek şekilde, + işareti ile birlikte kullanılan rakam eklenen katkı miktarını ve rakamdan sonraki isimlendirme katkı çeşidini gösterecek şekilde, KRÇ ise kireç, LS ise linyosülfonat olduğunu belirtmektedir. Örneğin %3 kireç içeren kaolin zemin, KL+3KRÇ, %6 kireç içeren kaolin zemin KL+6KRÇ şeklinde isimlendirilmiştir. KL+2KRÇ+1LS, %2 kireç ve %1 linyosülfonat içeren, %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren numune KL+4KRÇ+2LS olarak isimlendirilmiştir. Son rakam numunenin kürlenme süresini ifade etmektedir. Kür süresini belirtmek amacıyla yapılan kodlamalarda LS ifadesinden sonra gelen rakam kür süresini belirtmektedir. Örnek olarak kaolin ve %2 linyosülfonat içeren bir karışım 7 gün kürlendiğinde KL+ 2LS-7 olarak, 28 gün kür kürlendiğinde KL+ 2LS-28 şeklinde isimlendirilmiştir. Kür sıcaklığı değişimini belirtmek için örneğin kaolin zeminde %5 linyosülfonat kullanılan ve 1 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilen numunenin ismi KL+ 5LS-1-A şeklinde belirlenmiştir. A harfi numunelerin açıkta yani oda sıcaklığında beklediğinin simgesidir. Silt zeminde %5 linyosülfonat katkılı numuneler ise S+ 5LS-1-A olarak adlandırılmıştır. Dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyleri de serbest basınç dayanımı deneyleri örneklerine benzer olarak isimlendirilmiştir. Yalnızca kür süresini belirten rakamdan sonra -KK ifadesi

getirilerek kodlanmıştır. Örneğin 7 gün süreyle $\pm 20^{\circ}\text{C}$ kür odasında bekletilen ve %5 linyosülfonat içeren dairesel en kesitli direkt kesme kutusu numunesi KL + 5LS-7-KK şeklinde isimlendirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan deney programı kodlamaları ile birlikte Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Serbest Basınç Dayanımı Deneyi Programı

SERBEST BASINÇ DAYANIMI DENEYİ PROGRAMI					
Zemin Cinsi	Katkı Çeşidi	Katkı Oranı (%)	Kür Süresi (Gün)	Kür Sıcaklığı	Kodlama
Kaolin	LS	0	1	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL0-1
Kaolin	LS	0.5	1	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+0.5LS-1
Kaolin	LS	1	1	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+1LS-1
Kaolin	LS	1.5	1	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+1.5LS-1
Kaolin	LS	2	1	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+2LS-1
Kaolin	LS	5	1	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+5LS-1
Kaolin	LS	0	7	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL0-7
Kaolin	LS	0.5	7	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+0.5LS-7
Kaolin	LS	1	7	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+1-7
Kaolin	LS	1.5	7	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+1.5LS-7
Kaolin	LS	2	7	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+2LS-7
Kaolin	LS	5	7	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+5LS-7
Kaolin	LS	0	28	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL0-28
Kaolin	LS	0.5	28	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+0.5LS-28
Kaolin	LS	1	28	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+1LS-28
Kaolin	LS	1.5	28	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+1.5LS-28
Kaolin	LS	2	28	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+2LS-28
Kaolin	LS	5	28	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+5LS-28
Kaolin	LS	0	90	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL0-90
Kaolin	LS	0.5	90	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+0.5LS-90
Kaolin	LS	1	90	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+1LS-90
Kaolin	LS	1.5	90	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+1.5LS-90
Kaolin	LS	2	90	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+2LS-90
Kaolin	LS	5	90	$\pm 20^{\circ}\text{C}$	KL+5LS-90
Kaolin	LS	0	1	Açık Hava	KL0-1-A
Kaolin	LS	0.5	1	Açık Hava	KL+0.5LS-1-A
Kaolin	LS	1	1	Açık Hava	KL+1LS-1-A
Kaolin	LS	1.5	1	Açık Hava	KL+1.5LS-1-A
Kaolin	LS	2	1	Açık Hava	KL+2LS-1-A
Kaolin	LS	5	1	Açık Hava	KL+5LS-1-A
Kaolin	LS	0	7	Açık Hava	KL0-7-A

Kaolin	LS	0.5	7	Açık Hava	KL+0.5LS-7-A
Kaolin	LS	1	7	Açık Hava	KL+1LS-7-A
Kaolin	LS	1.5	7	Açık Hava	KL+1.5LS-7-A
Kaolin	LS	2	7	Açık Hava	KL+2LS-7-A
Kaolin	LS	5	7	Açık Hava	KL+5LS-7-A
Kaolin	Kireç	3	1	± 20°C	KL+3KRÇ-1
Kaolin	Kireç	6	1	± 20°C	KL+6KRÇ-1
Kaolin	Kireç	3	7	± 20°C	KL+3KRÇ-7
Kaolin	Kireç	6	7	± 20°C	KL+6KRÇ-7
Kaolin	Kireç	3	28	± 20°C	KL+3KRÇ-28
Kaolin	Kireç	6	28	± 20°C	KL+6KRÇ-28
Kaolin	Kireç	3	90	± 20°C	KL+3KRÇ-90
Kaolin	Kireç	6	90	± 20°C	KL+6KRÇ-90
Kaolin	Kireç+LS	%2 + %1	1	± 20°C	KL+2KRC+1LS-1
Kaolin	Kireç+LS	%2 + %1	7	± 20°C	KL+2KRC+1LS-7
Kaolin	Kireç+LS	%2 + %1	28	± 20°C	KL+2KRC+1LS-28
Kaolin	Kireç+LS	%2 + %1	90	± 20°C	KL+2KRC+1LS-90
Kaolin	Kireç+LS	%4 + %2	1	± 20°C	KL+4KRC+2LS-1
Kaolin	Kireç+LS	%4 + %2	7	± 20°C	KL+4KRC+2LS-7
Kaolin	Kireç+LS	%4 + %2	28	± 20°C	KL+4KRC+2LS-28
Kaolin	Kireç+LS	%4 + %2	90	± 20°C	KL+4KRC+2LS-90
Silt	LS	0	1	± 20°C	SL0-1
Silt	LS	0.5	1	± 20°C	SL+0.5LS-1
Silt	LS	1.5	1	± 20°C	SL+0.5LS-1
Silt	LS	5	1	± 20°C	SL+5-1
Silt	LS	0	7	± 20°C	SL0-7
Silt	LS	0.5	7	± 20°C	SL+0.5LS-7
Silt	LS	1.5	7	± 20°C	SL+1.5LS-7
Silt	LS	5	7	± 20°C	SL+5-7
Silt	LS	0	28	± 20°C	SL0-28
Silt	LS	0.5	28	± 20°C	SL+0.5LS-28
Silt	LS	1.5	28	± 20°C	SL+1.5LS-28
Silt	LS	5	28	± 20°C	SL+5LS-28
Silt	LS	0	90	± 20°C	SL0-90
Silt	LS	0.5	90	± 20°C	SL+0.5LS-90
Silt	LS	1.5	90	± 20°C	SL+1.5LS-90
Silt	LS	5	90	± 20°C	SL+5LS-90
Silt	LS	0	1	Açık Hava	SL0-1-A
Silt	LS	0.5	1	Açık Hava	SL+0.5LS-1-A
Silt	LS	1.5	1	Açık Hava	SL+1.5LS-1-A
Silt	LS	5	1	Açık Hava	SL+5LS-1-A
Silt	LS	0	7	Açık Hava	SL0-7-A
Silt	LS	0.5	7	Açık Hava	SL+0.5LS-7-A

Silt	LS	1.5	7	Açık Hava	SL+1.5LS-7-A
Silt	LS	5	7	Açık Hava	SL+5LS-7-A

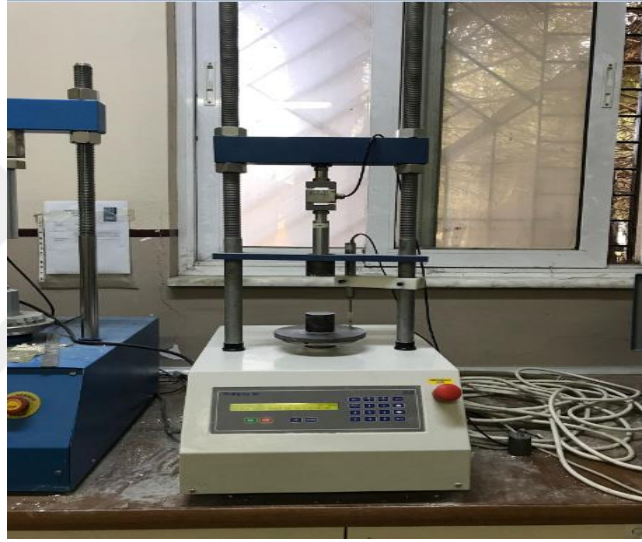
Çizelge 3.5 Dairesel En Kesitli Direkt Kesme Kutusu Deneyi Programı

DAİRESEL KESME KUTUSU DENEY PROGRAMI					
Zemin Cinsi	Katkı Çeşidi	Katkı Oranı (%)	Kür Süresi (Gün)	Kür Sıcaklığı	Kodlama
Kaolin	LS	0	7	± 20°C	KL0-7-KK
Kaolin	LS	0	28	± 20°C	KL0-28-KK
Kaolin	LS	0.5	7	± 20°C	KL+0.5LS-7-KK
Kaolin	LS	0.5	28	± 20°C	KL+0.5LS-28-KK
Kaolin	LS	1	7	± 20°C	KL+1LS-7-KK
Kaolin	LS	1	28	± 20°C	KL+1LS-28-KK
Kaolin	LS	1.5	7	± 20°C	KL+1.5LS-7-KK
Kaolin	LS	1.5	28	± 20°C	KL+1.5LS-28-KK
Kaolin	LS	2	7	± 20°C	KL+2LS-7-KK
Kaolin	LS	2	28	± 20°C	KL+2LS-28-KK
Kaolin	LS	5	7	± 20°C	KL+5LS-7-KK
Kaolin	LS	5	28	± 20°C	KL+5LS-28-KK

3.2.1. Serbest basınç deneyi

Çapı 50 mm ve boyu 100 mm boyutlarındaki silindirik zemin kalıplarında sıkıştırılarak hazırlanmış numuneler, hidrolik kaldırıcı yardımıyla çelik kalıptan çıkarılarak belirlenen kür sürelerince nemini kaybetmemesi için streç filme sarılmış bir şekilde, ağzı kapalı bir kaptaki bekletilmiştir. Kür süreleri biten 50x 100 mm boyutlarındaki silindirik numunelere belirlenen hızda (1.42 mm/dk) eksenel yük uygularken bu sırada uygulanan yüke karşılık oluşan birim deformasyonlarında ölçülmesiyle zeminlerin drenajsız kayma mukavemetinin belirlenmesine olanak sağlayan deney çeşididir. Yanal desteğe ihtiyaç duymayan bir zemin numunesinin eksenel yük altında göstereceği davranışı incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Örneklerin tek eksenli olarak gerilme- deformasyon davranışının belirlenmesi amaçlanır. Serbest Basınç Deney aleti Şekil 3.7' de verilmiştir. İlk olarak küre bırakılmadan önce ağırlığı bilinen numune, kür süresi sonunda tekrar tartılır. Kumpas yardımı ile çap ve boyu ölçülür. Ağırlığı ve boyutları belirlenen numune, Şekil 3.7' de görülen deney cihazına yerleştirilir. Numune yerleşimi sırasında alt

tabana yerleştirilerek, üst taban numunenin tepe noktasına değecek fakat basınç oluşturmayacak şekilde ayarlanır. Numune yerleştirildikten sonra, kuvvet ve deformasyon okuması sıfırlanarak yükleme hızı ayarlanır ve deney başlatılır. Kırılma gerçekleşene kadar deneye devam edilir, gözle görülür bir kırılmanın gerçekleşmemesi durumunda %15' lik eksenel deformasyona ulaşıldığında deney sonlandırılır.



Şekil 3.7 Serbest basınç deney cihazı

3.2.2. Dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyi

Zeminlerin kayma dayanım parametrelerini belirlemek, gerilme-deformasyon davranışını değerlendirmek ve aynı zamanda yüzey sürtünmesini oluşturan parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla yapılmaktadır. Linyosülfonat katkılı örneklerde, kesme davranışını incelemek amacıyla deney programı oluşturulmuştur. Numuneler, spatula ve bıçak yardımıyla 6 cm çapında dairesel kesici içerisinde optimum su içeriğinde sıkıştırılmıştır. Her deney grubundan 3 adet numune alınmıştır. Küre bırakılacak numuneler, kürede beklemeden önce ve sonra tartılmış ve ASTM D3080 standartlarında direkt kesme deneyi uygulanmıştır.

Direkt kesme deney düzeneği Şekil 3.8’ de verilmiştir. Dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu kullanılmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.8 Direkt kesme deneyi düzeneği



Şekil 3.9 Dairesel kesitli rijit kutu

Zemin örneğinin yüzeylerini iyi kavrayabilmesi için çıkıntıları kesme hareketine dik olan metal bir plaka kullanılır. Alt yüzeye sırasıyla poroz taşı ve filtre kağıdı yerleştirildikten sonra üzerine kürde bekletilerek hazırlanmış numune yerleştirilir. Numunenin üzerine tekrar filtre kağıdı ve poroz taşı koyularak üst başlık da yerleştirildikten sonra deney belirlenen kesme hızında başlatılır. Kullanılan poroz taşlar doygun hale getirilmiştir. Metal plaka, poroz taşları ve dairesel kesici ile üst başlık Şekil 3.10’ da gösterilmiştir. Kesme kutusuna yatay kuvvet uygulanırken kutunun hareket etmemesi için cihazda gerekli yerler sabitlenir.



Şekil 3.10 Çıkıntılı metal plaka, poroz taşlar, dairesel kesici ve üst başlık

Yükleme başlığı ile düşey bir yük uygulanırken yüklemede kullanılan boyunduruğun ağırlığı da dikkate alınmıştır. Belirlenen kür sürelerinde bekletilmiş ve kaolin kili zeminlerde her katkı oranı içeren numuneler için üç farklı normal yük (31.5 kPa, 63 kPa ve 94.4 kPa) uygulanmıştır. Normal kuvvet yükleme cihazı ile aktive olan bir yükleme kolu ile uygulanır. Uygulanan kesme kuvveti altında kutunun üst parçası sabit kalırken, alt yüzey yatay bir düzlem üzerinde hareket ederek, numunenin ortasından geçen yatay bir düzlem boyunca zemini kaymaya zorlama prensibi ile çalışmaktadır.

1 mm/dk kesme hızıyla kesilmeye başlayan numunelerin, yük ve deformasyon okuması yapılır. Yatay kuvvet uygulandığı halde kuvvet halkasında yük değeri artmıyor veya aniden bir azalma görüldüğü durumda numunenin kesildiği sonucuna varılır. Eğer numune bu şekilde kesilmemişse %20 deformasyona ulaştığında kesildiği kabul edilerek deney sonlandırılır. Bu prosedür her deney grubu için en az 3 kere tekrarlanmıştır.

3.2.3. Zemin çeşidi değişimi

Farklı zemin tiplerinde katkı etkisini değerlendirmek için kaolin kili ve silt olmak üzere 2 zemin tipi belirlenmiştir. Kaolin zeminler için, %0.5, 1, 1.5, 2, 5 oranlarında linyosülfonat katkısı ve optimum su içeriği kadar su eklenmiştir. Silt zeminler için %0.5, 1.5 ve %5 linyosülfonat katkısı kullanılarak, optimum su içeriğinde değerlendirilmiştir. Tüm numuneler 1, 7, 28 ve 90 gün boyunca ± 20 °C sıcaklıktaki bir odada küre bırakılmıştır. Kür süresi bitiminde numuneler serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur.

3.2.4. Katkı çeşidi değişimi

Geleneksel katkı miktarının etkisi ile linyosülfonat katkısının etkisini karşılaştırmak amacıyla, yalnızca kaolin zeminde olmak üzere geleneksel katkı olan kireç ile de çalışmalar yapılmıştır. Kireç ile literatürde çalışılmış ve yeterli dayanım vermiş olduğu bilinen oranlarda, yani %3 ve % 6 oranlarında kireç, bulunan optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Linyosülfonat katkısı başlangıçta belirlenen şeklindeki gibi %0.5, 1, 1.5, 2, 5 oranlarında kullanılmış ve optimum su içeriklerinde hazırlanmıştır.

Ek olarak kaolin zeminlerin linyosülfonat ile kirecin kısmi yer değiştirmesi ile zemin özelliklerini geliştirebileceği ve linyosülfonatla birlikte kireç kullanımının dayanım için gereken kireç miktarını düşürüp düşüremeyeceği irdelenmiştir. Bu amaçla kaolinlerde kuru ağırlığın %2'si kireç ve %1'i linyosülfonat olacak şekilde ve kuru ağırlığın %4' ü kadar kireç ve % 2'si kadar linyosülfonat katkısı şeklinde 2

örnek grubu hazırlanmıştır. Linyosülfonat katkısı ve kireç katkısı belirlenen oranlarda kaolin zeminle kuru olarak karıştırılmış ve linyosülfonat katkısının karışımın su içeriğini yönettiği düşünülerek, linyosülfonat katkısı miktarınca daha önce belirlenmiş olan optimum su içeriği eklenmiştir. Bu, %1 linyosülfonat içeren örnekler için %27,44 ve %2 linyosülfonat içeren örnekler için %26,68 olarak bulunmuştur. %2 kireç ve %1 linyosülfonat içeren numune KL+2KRÇ+1LS, %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren numune KL+4KRÇ+2LS olarak isimlendirilmiştir. Tüm numuneler 1, 7, 28 ve 90 gün boyunca ± 20 °C sıcaklıktaki bir odada küre bırakılmıştır. Kür süresi bitiminde numuneler serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Silt zeminlerde katkı çeşidi etkisi değerlendirilmemiştir.

3.2.5. Katkı oranı değişimi

Katkı miktarının zeminlere etkisini ve optimum gelişim gösteren katkı miktarını belirleyebilmek amacıyla kaolin zeminlerde %0.5, 1, 1.5, 2, 5 oranlarında, silt zeminlerde %0.5, 1.5, 5 oranlarında linyosülfonat kullanılan örnekler hazırlanarak değişim incelenmiştir. Numuneler ağırlıkça belirlenen oranlarda kuru olarak karıştırılarak, Standart Proktor deneyleri ile belirlenen optimum su oranı miktarınca su eklenerek hazırlanmıştır. Tüm numuneler için 1, 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri belirlenmiş ve numuneler ± 20 °C sıcaklıkta kür süreleri boyunca beklenmiştir. Kür süresi bitiminde tüm numunelerin serbest basınç dayanımları incelenirken, yalnızca linyosülfonat içeren kaolin zeminlerde kesme dayanımları da incelenmiştir.

3.2.6. Kür süresi değişimi

Kür süresinin numuneler üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla, 1, 7, 28 ve 90 gün olmak üzere, optimum su içeriklerinde ve değişik katkı miktarları ve çeşitlerinde hazırlanan her numune ± 20 °C’de bir kür odasında bekletilmiştir. Kür süresi bitiminde tüm numuneler serbest basınç deney aletinde kırılarak dayanımları

incelenmiştir. Kesme kutusu deneyleri için, serbest basınç deneyi örneklerinden farklı olarak 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda kesme dayanımları ölçülmüştür. Kür süresi dayanım kazanabileceği minimum süre düşünülerek belirlenmiştir.

3.2.7. Kür sıcaklığı değişimi

Kür sıcaklığının serbest basınç numuneleri üzerindeki etkisini değerlendirmek ve nemini kaybetmemek üzere streç filmle sarılarak kür odasında bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımları ile karşılaştırmak amacıyla, kaolin zeminlerde % 0.5, 1, 1.5, 2, 5 oranlarında, silt zeminlerde %0.5, 1.5, 5 oranlarında linyosülfonat kullanılarak hazırlanan örnekler, ağzı açık bir kaptaki kür odasında beklemeye bırakılan örneklerin aksine streç film ile sarılmadan oda sıcaklığında beklemeye bırakılmıştır. Tez kapsamında bu numuneler üzerinde 1 ve 7 günlük kür süreleri değerlendirilmiştir. Kür süreleri sonunda numuneler serbest basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.11 1 ve 7 gün süreyle açıkta bekletilen linyosülfonat içeren kaolin numuneleri

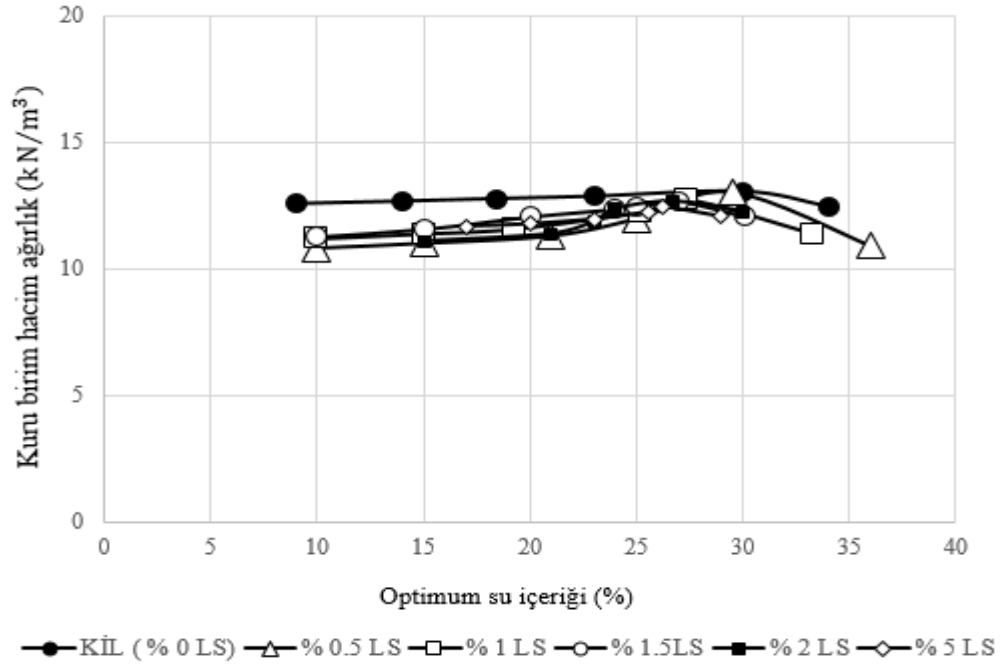
3.3. Linyosülfonat ile Stabilizasyon

Bu bölümde kaolin ve silt zeminin doğal haliyle ve linyosülfonat katkısıyla yer değiştirerek zemin özelliklerini geliştirebileceği irdelenmiştir. Bu amaçla kaolin zeminler için kuru ağırlığın %0, 0.5, 1, 1.5, 2 ve %5' i olacak miktarda sadece linyosülfonat, silt zeminler için ise %0, 0.5, 1.5 ve %5' i olacak şekilde zeminle katkıları karıştırılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle karışımların optimum su içerikleri belirlenerek ardından dayanım testleri gerçekleşene kadar 1, 7, 28, 90 günlük kür sürelerine tabii tutulmuştur. Bu numuneler kür süresi bitimine kadar $\pm 20^{\circ}\text{C}$ nemli bir odada bekletilmiştir. Aynı oranlarda sadece kaolin zeminlerde hazırlanan linyosülfonat katkılı diğer bir grup numune ise 1 ve 7 günlük kür süreleri belirlenerek açık havada bekletilmiştir. Kür süresi bitiminde tüm numunelerde Serbest Basınç Deneyi ile, nemli odada bekletilmiş kaolin zemin ile hazırlanan numunelerde Dairesel en kesitli direkt kesme kutusu Deneyi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm deneyler içerikleri ve incelenen etmenler ile birlikte Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2' de verilmiştir.

3.3.1. Optimum su içeriğinin belirlenmesi

Kaolin-linyosülfonat ve silt-linyosülfonat karışımlarının, sıkıştırma özelliklerinin belirlenebilmesi için ASTM D698-12' ye göre standart Proktor deneyleri yapılmıştır. Başlangıçta, referans olarak katkısız kaolin ve silt zeminlerde Standart Proktor deneyleri yapılmıştır. Deneysel programda kaolinler için %0.5, 1, 1.5, 2 ve % 5 oranında linyosülfonat, silt zeminler için ise % 0, 0.5, 1.5 ve %5 linyosülfonat içeren numuneler hazırlanmıştır. Önce zemin ve linyosülfonatin homojen bir şekilde karıştırılmasının ardından su eklenen zemin, katkı karışımı homojen hale gelinceye kadar karıştırıldıktan sonra tüm numunelerde standart proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan karışımlar 3 tabaka olarak bir kalıba yerleştirilmiş ve sıkıştırma için 30 cm'den düşen 2.5 kg'lık tokmak ile her tabakaya 25 vuruş uygulanmıştır. Sıkıştırmadan önce kalıpların iç yüzeyleri, ekstraksiyon sırasında yan sürtünmeyi önlemek için yağlanmıştır. Numunenin üst, alt ve orta tabakalarından ıslak ağırlığının örneği alınan üç parça ile su içeriği

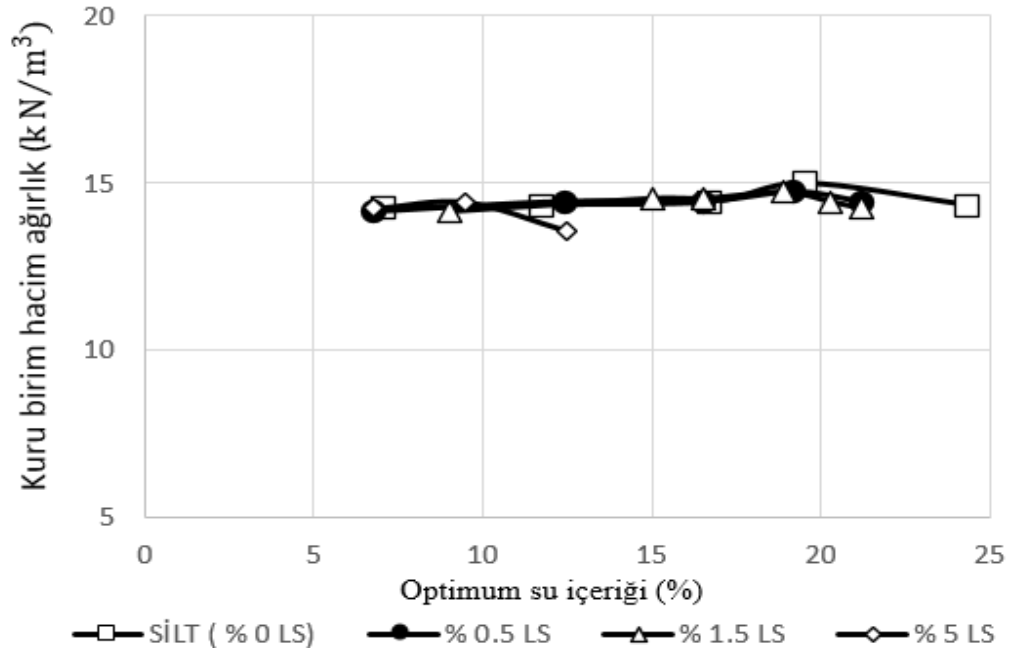
bulunarak aynı işlem, su içeriğinin arttırılması yoluyla farklı su içeriklerinde en az 5 kez tekrarlanmıştır. Numunelerden alınan örneklerin, ıslak ağırlığı ve 1 gün boyunca 105°C fırında bekletilerek elde edilen kuru ağırlığı tartılarak elde edilen sonuçlarla her numunenin kuru birim hacim ağırlığına karşılık su içeriği değişimi bulunmuştur. Çizilen grafikte eğrinin tepe noktasına karşılık gelen noktadaki su içeriği değeri optimum su içeriği olarak belirlenmiştir. Kaolin- linyosülfonat karışımları için Şekil 3.11 ve silt-linyosülfonat karışımları için Şekil 3.12’ de katkısız zemin örneklerinin değerleri ile karışım gruplarının kuru birim hacim ağırlık ve su içeriği grafiği birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Kaolin zeminde linyosülfonat katkısının optimum su içeriği – kuru birim hacim ağırlık ilişkisi

Optimum su muhtevaları saf kaolin için %30, %0,5 linyosülfonat katkısı kullanılan kaolin zemin için %29,51, %1 linyosülfonat katkısı kullanılan kaolin zemin için %27,44, %1,5 linyosülfonat katkısı kullanılan kaolin zemin için %27,02, %2 linyosülfonat katkısı kullanılan kaolin zemin için %26,68, %5 linyosülfonat katkısı kullanılan kaolin zemin için % 26.02 olarak bulunmuştur. Silt

zeminler için ise katkısız silt zemin için optimum su muhtevası %19.44, %0,5 linyosülfonat katkısı kullanılan silt zemin için %19,2, %1,5 linyosülfonat katkısı kullanılan silt zemin için %18,9, %5 linyosülfonat katkısı kullanılan silt zemin için %9,5 olarak bulunmuştur.



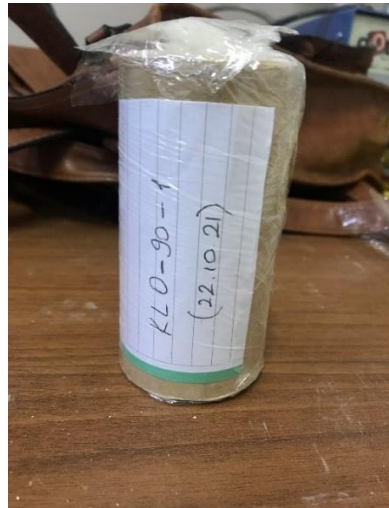
Şekil 3.13 Silt zeminde linyosülfonat katkısının optimum su içeriği – kuru birim hacim ağırlık ilişkisi

3.3.2. Serbest basınç deneyi örneklerinin hazırlanması

Kaolin ve silt zeminin kendi başına ve linyosülfonat katkısı ile birlikte kullanımının zemin dayanımına etkisi incelenmek istenmiştir. Bu nedenle referans olması açısından başlangıçta %0 linyosülfonat içeren saf kaolin ve %0 linyosülfonat içeren saf silt zemin örnekleri hazırlanmıştır. Bu örnekler katkı maddesi eklenen zeminlerle, katkısız zeminler arasında karşılaştırma yapmak için kullanılmıştır. Daha sonra kaolin zeminlerde %0,5, 1, 1.5, 2 ve %5 oranında 5 deneme grubu ve silt zeminler için %0,5, 1.5 ve %5 linyosülfonat içeren 3 farklı deneme grubu oluşturulmuştur. ASTM D698-12 standardına göre yapılmış Standart Proktor Deneyi ile belirlenmiş olan optimum su içerikleri bilinen tüm karışımlar,

katkı malzemesi ve zeminin kuru bir şekilde karıştırılması işleminin ardından, optimum su içeriğinde su eklenmesiyle homojen bir kıvam alana kadar yoğrulmuştur. Standart Proktor çabası altında sıkıştırılarak çapı ve boyu sırasıyla 50 mm ve 100 mm olan silindirik numuneler elde edilmiştir. Sıkıştırılan numuneler kalıptan hidrolik kaldırıcı yardımıyla çıkarılmıştır.

Tüm numuneler için 1, 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri belirlenmiştir. Tüm numuneler kendi optimum su içeriğinde hazırlanarak, dayanım testi gerçekleştirilene kadar nem kaybı olmaması için nemli bir odada ortalama $\pm 20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, streç filme sarılmış bir şekilde ve Şekil 3.13'te gösterildiği gibi plastik bir kaptan saklanmıştır. Kaolin numuneler için ayrıca kür sıcaklığının etkisi de araştırılmak istendiğinden %0, 0.5, 1, 1.5, 2 ve %5 oranında linyosülfonat katkısı ilave edilen örnekler açık havada kurumaya bırakılarak, 1 7 ve 28 günlük kür sürelerinde bekletilmiştir. Böylece $\pm 20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve açık hava koşullarında bekletilen numunelerin aynı kür süreleri içerisinde, kür sıcaklığına bağlı olarak değişimi de incelenmiştir. Kür süresi biten numuneler, ASTM D2166-16' ya göre serbest basınç testine tabi tutulmuş ve 1.42 mm/dk yükleme hızıyla serbest basınç dayanımları belirlenmiştir.



Şekil 3.14 90 günlük kür süresinde bekletilecek olan saf kaolin numunesi



Şekil 3.15 28 günlük kürde bekletilmek üzere streç filme sarılarak ağzı kapalı bir kaptaki bekletilen serbest basınç deneyi numuneleri



Şekil 3.16 Kür odasında 1 gün bekletilmiş %1,5 linyosülfonat içeren S+1.5LS-1 ve kür odasında 90 gün bekletilen ve %1 linyosülfonat içeren KL+1LS-90 numunelerinin kırılması

3.3.3. Dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyi örneklerinin hazırlanması

Kesme kutusu deneyleri, hazırlanan deney programında kaolin numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. 6 cm çapında dairesel olarak spatula ve bıçak yardımıyla aynı hacimde ve mümkün olduğunca aynı birim hacim ağırlığında her katkı oranında üç adet olacak şekilde dairesel kesici içinde optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Referans olarak katkı içermeyen saf kaolin numuneler ile, %0,5, 1, 1.5, 2 ve %5 linyosülfonat içeren numuneler hazırlanmıştır. Dairesel olarak hazırlanan ve kesici aracılığıyla sıkıştırılan bu numuneler 7 ve 28 gün kürde beklemek üzere nem kaybı olmaması için nemli bir odada ortalama $\pm 20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, streç filme sarılmış bir şekilde Şekil 3. 'te gösterildiği gibi plastik bir kapta saklanmıştır. İnce daneli olduğundan rölatif sıklıkları dikkate alınmamıştır. Kür süresi biten numuneler ASTM D3080 standartlarında direkt kesme deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.17 Dairesel kesici içerisinde sıkıştırılmış numune örneği ve streç film ile sarılarak etiketlenen kür odasında bekletilmek üzere hazırlanan dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyi numuneleri

3.4. Kireç ile stabilizasyon

Kaolin zeminlerde geleneksel katkı malzemesi olan kireç ile, çevre dostu malzeme linyosülfonatların etkisini karşılaştırmak amacıyla, ağırlıkça %3 ve %6 oranında kireç içeren numuneler hazırlanmıştır. Öncelikle optimum su içerikleri belirlenerek hazırlanmış olan karışımlar, 1, 7, 28 ve 90 gün kürlenme sonunda Serbest Basınç Deneyi ile dayanımları elde edilmiştir.

3.4.1. Optimum su içeriğinin belirlenmesi

Kaolin- kireç karışımlarının optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlemek için standart proktor deneyleri yapılmıştır. Kaolin ve belirlenen oranlarda kireç homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra numuneler değişik su muhtevalarında 3 tabaka halinde her bir tabakaya, 30 cm' den serbestçe düşen 2,5 kg ağırlığındaki bir tokmakla, 25 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır. Eklenen su içeriği artırılarak deneyler tekrarlanmıştır. Her su içeriğindeki numunelerden 3'er tane örnek alınarak, 1 gün süre ile etüvde bekletilerek tartılmış ve kuru birim hacim ağırlığa karşılık su içeriği değişiminde pik ordinatın karşılığı karışımın optimum su içeriği olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda %3 kireç ile hazırlanan kaolin zeminin optimum su içeriği %36,7 ve % 6 kireç ile hazırlanan kaolin zeminin optimum su içeriği % 33,94 olarak bulunmuştur.

3.4.2. Serbest basınç deneyi örneklerinin hazırlanması

Kaolin ve kireç karışımları, kireç ve zemin örneği olan kaolinin kuru bir şekilde karıştırılmasının ardından, ASTM D698-12 standardına göre yapılmış Standart Proktor Deneyi ile belirlenmiş olan optimum su içeriklerinde su eklenmesiyle homojen bir kıvam alana kadar yoğrulmuştur. Kompaksiyondan önce yanal sürtünmeyi önlemek için kalıbın iç yüzeyi yağlanmıştır. Standart Proktor çabası altında sıkıştırılan silindirik numunelerin çapı ve boyu sırasıyla 50 mm ve 100 mm' dir. Hidrolik bir kaldırma yardımıyla numuneler kalıptan çıkarılmış, dayanım testleri gerçekleşene kadar nem kaybı olmaması streç filme sarılmış bir şekilde nemli bir odada ortalama 20°C sıcaklıkta, plastik bir kaptan saklanmıştır.

Tüm numuneler için 1, 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri belirlenmiştir. ASTM D2166-16' ya göre kür süresi bitiminde numuneler Serbest Basınç deneyine tabii tutulmuş ve 1.42 mm/dk yükleme hızıyla serbest basınç dayanımları belirlenmiştir.



Şekil 3.18 28 gün kürde bekletilen ve %3 kireç içeren KL+3KRÇ-28 numunesi



Şekil 3.19 1 gün kürde bekletilen KL+6KRÇ-1 numunesi

3.5. Linyosülfonat ve Kirecin Birlikte Kullanımı ile Stabilizasyon

Geleneksel katkı malzemesi olan kirecin, çevresel kaygılar ışığında kullanımının azaltılıp azaltılamayacağını görmek amacıyla kaolin zeminde linyosülfonat ile kirecin kısmi yer değiştirmesi %2 kireç ile %1 linyosülfonat olarak %3 katkı malzemesi olacak şekilde ve %4 kireç ile %2 linyosülfonat olarak %6 katkı malzemesi kullanılacak şekilde ayarlanmıştır. Karışımın optimum su oranını linyosülfonat katkısının yönettiği düşünülerek, önceden belirlenen %1 ve %2 lik linyosülfonat katkısı için kullanılan optimum su içeriklerinde Standart Proktor çabası altında sıkıştırılmıştır. Elde edilen silindirik numuneler, 1, 7, 28 ve 90 gün olarak belirlenen kür sürelerinde $\pm 20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bir odada bekletilmek üzere, nem kaybı olmaması için streç filme sarılarak, ağzı kapalı plastik bir kaptaki bekletilmiştir. Kür süreleri bitiminde numunelerin Serbest Basınç dayanımları ölçülmüştür.

3.5.1. Optimum su içeriğinin belirlenmesi

Kaolin zeminde kullanılacak olan kireç ve linyosülfonat katkılarının beraber kullanımları için, karışımları linyosülfonat katkısının su muhtevasının yönettiği düşünülmüştür. Bu nedenle, toplam %3 olarak belirlenen katkı malzemesi olan karışım için %2 oranında kireç, %1 oranında linyosülfonat kullanılacağından, %1 oranında linyosülfonat katkısının kaolin zeminde kompaksiyon deneyleri ile elde edilen optimum su içeriği kullanılmıştır. Aynı şekilde, toplam %6 olarak belirlenen katkı malzemesi olan karışım için %4 oranında kireç, %2 oranında linyosülfonat kullanılacağından, %2 oranında linyosülfonat katkısının kaolin zeminde ASTM D698-12'ye göre yapılan Standart Proktor deneyleri ile elde edilen optimum su içeriği kullanılmıştır. %3 ve %6'lık katkı oranı olan karışımlar için optimum su muhtevaları sırasıyla, %27,44 ve %26,68' dir.

3.5.2. Serbest basınç deneyi örneklerinin hazırlanması

2 farklı çalışma grubu olarak hazırlanan %3 ve %6 katkı malzemesi içeren karışımlar ilk olarak kaolin, kireç ve linyosülfonatın kuru bir şekilde homojen karıştırılması ve ardından bulunan optimum su içeriklerinde su eklenmesi yoluyla hazırlanmıştır. Optimum su muhtevasında hazırlanan kuru karışımlar, su ile homojen duruma gelene kadar yoğrulmuştur. Ardından yanıl sürtünmeyi önlemek amacı ile sırasıyla çapı ve boyu 50 ile 100 mm olan kalıbın iç yüzeyleri yağlanmıştır. Standart Proktor çabası ile 2 farklı çalışma grubu da boyutları 50 x 100 mm olan kalıpta 3 tabaka halinde yerleştirilerek sıkıştırma için 30 cm'den düşen 2.5 kg'lık tokmak ile her tabakaya 25 vuruş olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler hidrolik kaldırıcı yardımı ile kalıptan çıkarılarak silindirik numuneler elde edilmiştir. Elde edilen bu numuneler, diğer tüm çalışma gruplarında olduğu gibi nemini kaybetmemesi için streç filme sarılmıştır ve ağzı kapalı plastik bir kaptaki $\pm 20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bir kür odasında bekletilmiştir. Numuneler KL+2KRC+1LS ve KL+4KRC+2LS şeklinde temel olarak adlandırılmış ve kür süresine göre belirtme yapılmıştır. Örneğin, 7 günlük kür süresine sahip KL+2KRC+1LS numunesi sahip KL+2KRC+1LS-7 şeklinde isimlendirilmiştir. Numunelerin kür süreleri 1, 7, 28 ve 90 gün olarak belirlenmiştir. Kür süresi dolan numuneler, yani 1, 7, 28 ve 90 gün sonunda, Serbest Basınç Deney aletinde 1.42 mm/dk yükleme hızıyla kırılmışlardır.



Şekil 3.20 1 günlük kürde bekletilmiş KL+4KRÇ2LS-1 ve KL+2KRÇ1LS-1 numuneleri



4. BULGULAR

4.1. Linyosülfonat Kullanılarak Stabilize Edilen Zeminlerin Serbest Basınç Deney Sonuçları

Bu tez çalışması boyunca kaolin ve silt zeminler, linyosülfonat malzemesi kullanılarak, bu malzemenin zeminler için katkı malzemesi olabilme ihtimali ile deneylere tabi tutulmuştur. Linyosülfonat katkısı kullanılan zeminler, optimum dayanım koşullarının bulunması amacı ile katkı oranı, kür süresi ve kür sıcaklığı değişiminde serbest basınç deneylerine tabi tutularak değerlendirilmiştir. Ayrıca kaolin zeminlerde yalnızca kireç kullanımı ile geleneksel katkı malzemeleri ile linyosülfonat malzemesinin alternatif olabilme olasılığı ve kireç ve linyosülfonatın beraber kullanımı ile de bu zeminlerin stabilizasyonunda alternatif olabilirliği incelenmiştir.

4.1.1. Kür süresinin etkisi

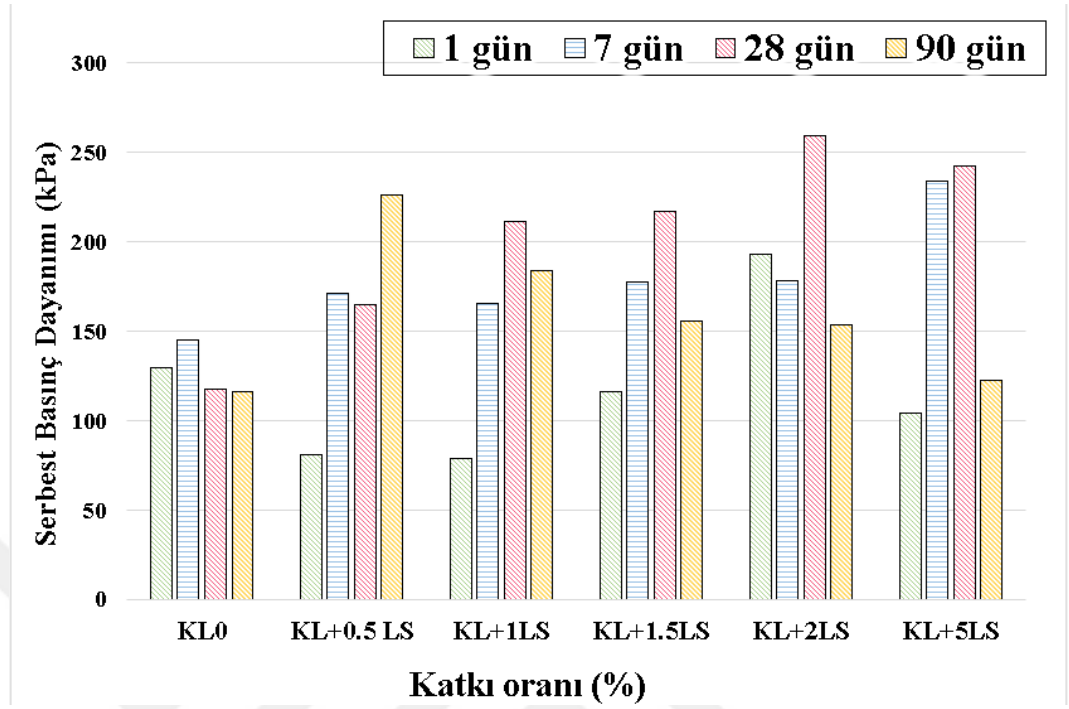
Linyosülfonat katkısının kaolin ve silt zeminlerde kür süresine bağlı olarak vereceği tepkiyi gözlemlemek adına kuru ağırlıklarının çeşitli oranlarında linyosülfonat katkısı ilave edilerek $\pm 20^{\circ}\text{C}$ bir kür odasında 1, 7, 28 ve 90 gün boyunca 4 farklı kür süresinde bekletildikten sonra serbest basınç deney aletinde kırılmıştır. Deney sonuçlarına göre saf kaolin numunesi KL0 için, en yüksek dayanım 7 günlük kür süresinin sonunda elde edilirken, 28 ve 90 gün sonunda dayanımın düştüğü gözlemlenmiştir. %0,5 linyosülfonat içeren KL+05LS numunesi için en yüksek dayanım 90 günlük bir kür süresi sonunda elde edilmiştir. KL+0.5LS numunesinin kür süresi arttıkça dayanımının arttığı görülmüştür. %1 linyosülfonat içeren KL+1LS numunesi için ise 1 günlük kür süresinden sonra kür süresinin artmasıyla 28 güne kadar artarken 90 günlük sürenin sonunda dayanımda düşme eğilimindedir. Fakat 90 günlük kür süresinin sonunda kırılan numunenin dayanımı yine de 1 ve 7 günlük kür süresi sonundaki dayanımdan yüksektir, en yüksek dayanım bu numune için 28 gün sonunda elde edilmiştir. %1,5 linyosülfonat içeren KL+1.5LS numunesi için dayanım kür süresi arttıkça 90 güne kadar artarken,

90 günün sonunda KL+1LS numunesine benzer olarak düşüş göstermiştir. En yüksek dayanım aynı şekilde bu numune için de 28 günün sonunda elde edilmiştir. Burada ise 90 günlük kür süresinin sonunda elde edilen dayanım yalnızca 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen dayanımdan yüksektir. %2 linyosülfonat içeren KL+2LS numunesi için en yüksek dayanım 28 günün sonunda elde edilmiştir. 7 günlük kür süresi sonunda dayanımda hafif bir azalma olurken, 28 gün sonunda dayanım tekrar artmıştır. 90 gün sonunda ise diğer numunelerle benzer olarak azalmıştır. Aynı şekilde %5 linyosülfonat içeren KL+5LS numunesi de kür süresi arttıkça 90 güne kadar artış gösterirken 90 günün sonunda tekrar düşmüştür. Bu numune için 28 ve 90 günlük kür süreleri birbirine yakın dayanım vermiştir.

Düzenli bir şekilde kür süresine göre artış gösteren tek numune %0,5 linyosülfonat içeren KL+0.5LS numunesidir. Bu numune haricinde linyosülfonat içeren tüm numuneler en yüksek dayanımlarını 28 günlük kür süresi sonunda verirken, %0,5 linyosülfonat içeren kaolin zemin numunesi en yüksek dayanımı 90 gün sonunda elde etmiştir. Farklı olarak kaolin numunesi için ise en yüksek dayanım 7. gün sonunda elde edilmiştir. Tüm numunelerin kür süresine bağlı serbest basınç dayanımlarını gösteren grafik Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Numunelerin kür sürelerine karşılık gelen serbest basınç dayanımları ise Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin kür süresine karşılık gelen serbest basınç dayanımları

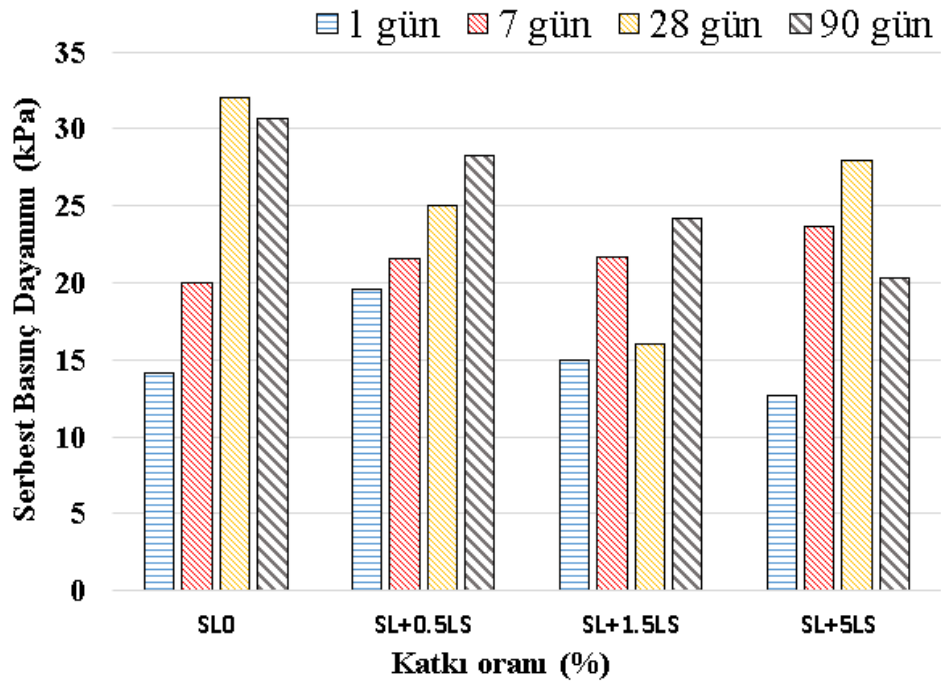
Örnek	Dayanım (kPa)	Örnek	Dayanım (kPa)
KL0-1	129.4	KL+1.5LS-1	116.1
KL0-7	145.4	KL+1.5LS-7	177.9
KL0-28	117.7	KL+1.5LS-28	217.3
KL0-90	116.5	KL+1.5LS-90	156
KL+0.5LS-1	81	KL+2LS-1	193
KL+0.5LS-7	171.4	KL+2LS-7	178.1
KL+0.5LS-28	164.8	KL+2LS-28	259.2
KL+0.5LS-90	226	KL+2LS-90	154
KL+1LS-1	79	KL+5LS-1	104.2
KL+1LS-7	165.3	KL+5LS-7	234
KL+1LS-28	211.5	KL+5LS-28	242.1
KL+1LS-90	184	KL+5LS-90	122.9



Şekil 4.1 Kaolin zeminler için linyosülfonat katkısının kür süresine bağlı olarak dayanım değişimi

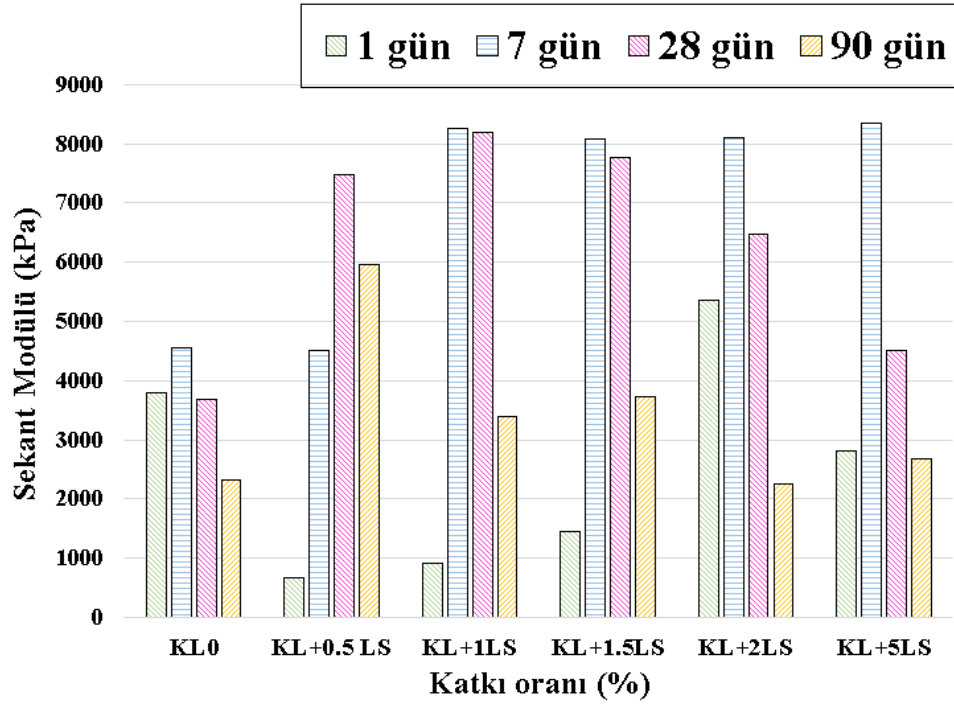
Silt zeminler için linyosülfonat katkısının kür süresine bağlı dayanımı da serbest basınç dayanımı deneyi ile ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre linyosülfonat katkısı ilave edilmemiş saf silt için dayanım 28 güne kadar artış göstermiştir ve en yüksek dayanımı 28. günlük kür sonunda elde edilmiştir. 28 günlük kür süresinden sonra dayanımda azalma olmuştur. %0,5 linyosülfonat içeren SL+0.5LS numunesinin dayanımı kür süresi arttıkça artış göstermiştir. En yüksek dayanım ise 90 gün kür süresi sonunda elde edilmiştir. %1,5 linyosülfonat katkısı içeren silt zemin numunesi SL+1.5LS ise daha fazla kür sürelerinde daha yüksek dayanım sonuçları vermiştir, fakat en yüksek dayanım 90 günlük kür süresinde elde edilirken 7. Günden sonra dayanım düşmüş, daha sonra tekrar artış göstermiştir. 7 günlük kür süresi sonunda görülen dayanım 28 günlük kür süresi sonunda görülen dayanımdan daha yüksektir. Dayanımda düşüş olmasına rağmen 28 günlük kür süresi sonundaki dayanım 1 günlük kür süresi sonundaki dayanımdan yine daha fazladır. %5 linyosülfonat içeren SL+5LS numunesi 28 günlük kür süresine ulaşana kadar kür süresine bağlı olarak dayanımda artış göstermiş, daha sonra 90 güne

ulaştığında dayanım düşmüştür. En yüksek dayanım 28 gün sonunda elde edilmiştir. 90 günlük kür süresinde düşen dayanım değeri, 1 günlük kür sonunda görülen dayanımdan yine de yüksektir. Şekil 4.2 bu sonuçları gösteren grafiği içermektedir.



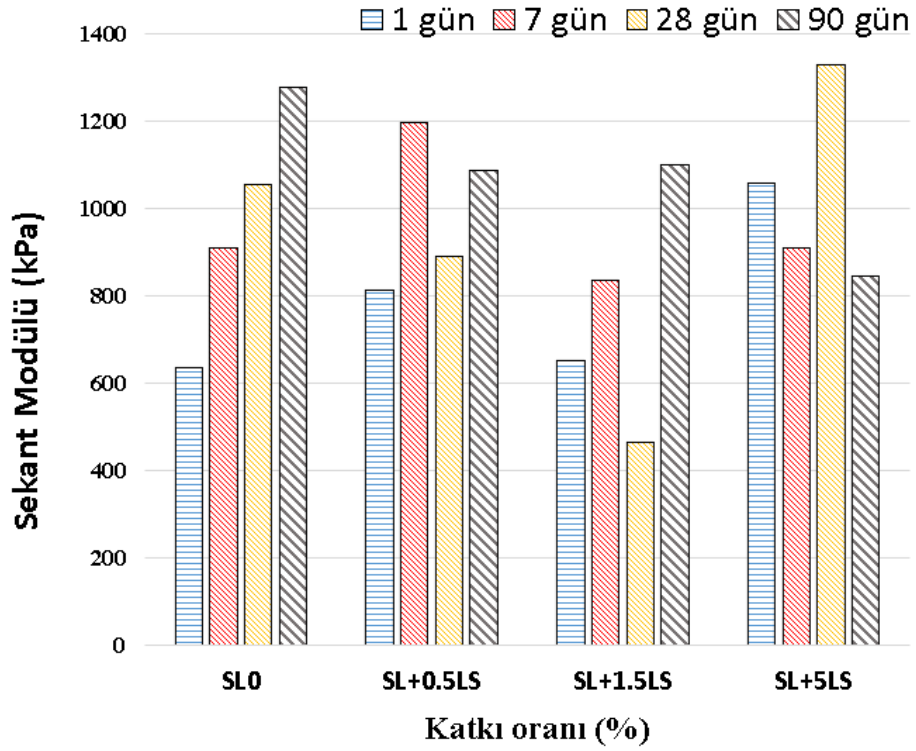
Şekil 4.2 Silt zeminler için linyosülfonat katkısının kür süresine bağlı dayanım grafiği

Linyosülfonat içeren kaolin ve silt zeminlerin kür süresine bağlı deney sonuçlarına göre sekant modülü (E_{50}) de değerlendirilmiştir. Her numunenin kırılma dayanımının yarısının o miktardaki birim deformasyona bölünmesiyle sekant modülü hesaplanmıştır.



Şekil 4.3 Linyosülfonat katkılı numunelerde kür süresinin sekant modülüne etkisi

Şekil 4.3'e göre katkısız kaolin zeminde sekant modülü ilk 7 gün artarken 7 günden sonraki kür sürelerinde düşmüştür. En yüksek sekant modülü değeri 7. günde ortaya çıkmıştır. %0,5 linyosülfonat katkısı içeren KL+0.5LS numunesi için 28 güne kadar kür süresindeki artışla birlikte sekant modülü artmış fakat 90 günlük kür süresi sonunda düşmüştür, en yüksek sekant modülü değeri ise 28 günlük kür süresi sonunda elde edilmiştir. %1 linyosülfonat katkısının sekant modülü 1 günlük kür süresinden sonra 7 ve 28 günlük kür süreleri için ciddi miktarda artış göstermiştir. En yüksek değer 7. Günde görülürken 28 günlük kür sonucu da hemen hemen aynıdır. 90 günlük kür süresi sonunda ise bu değer ciddi miktarda azalmıştır. %1,5 linyosülfonat içeren KL+1.5LS numunesi %1 linyosülfonat içeren numune ile benzer sonuçlar göstermiştir. %2 linyosülfonat katkısı içeren numune ise 7 güne kadar artarken 28 ve 90 günlük kür sürelerinde azalmaya başlamıştır. En yüksek sekant modülü değeri 7 günlük kür süresi sonunda elde edilmiştir. %5 linyosülfonat içeren numunenin de sekant modülü sonuçları %2 linyosülfonat içeren numune ile benzer davranmıştır. Genel olarak en yüksek sekant modülü değerleri 7 günlük kür süresinin sonunda elde edilmiştir. Yalnızca %0,5 linyosülfonat içeren numune en yüksek sekant modülü değerine 28 günlük kür süresi sonunda elde edilmiştir.



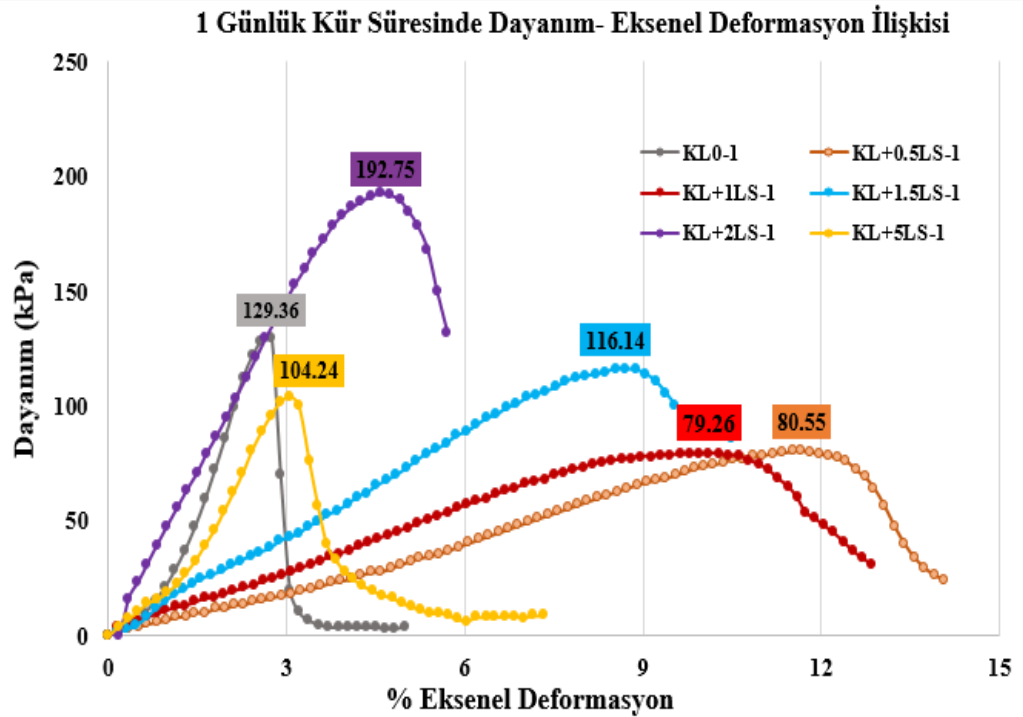
Şekil 4.4 Linyosülfonat katkılı silt zeminlerde kür süresine bağlı sekant modülü değerleri

Şekil 4.4 silt zeminlerin serbest basınç dayanımı sonuçlarına göre kür süresine bağlı olarak sekant modülü değişimini göstermektedir. Katkısız kaolin zemin için sekant modülü kür süresindeki artışla birlikte düzenli olarak artış göstermiştir. %0,5 linyosülfonat içeren SL+0.5LS numunesi ise ilk 7 güne kadar kür süresi ile birlikte artarken, daha sonra düzensiz bir davranış göstererek 28 günlük kür süresinde azalmış ve 90 günlük kür süresinde tekrar artmıştır. En yüksek sekant modülü değeri 7 günlük kür süresi sonunda elde edilmiştir. SL+ 1.5LS numunesinin sekant modülü ise ilk 7 güne kadar kür süresi ile artarken, 28 günlük kür süresi sonunda düşmüş ve 90 günlük kür süresi sonunda tekrar artarak en yüksek sekant modülü değerine ulaşmıştır. %5 linyosülfonat içeren numune diğer tüm numunelerden farklı sekant modülü değerleri göstererek, genelinde kür süresi arttıkça azalma eğiliminde olup, yalnızca 28 günlük kür süresinde artış göstererek en yüksek değerine ulaşmış ve daha sonra bu değer tekrar azalmıştır.

4.1.2. Katkı oranının etkisi

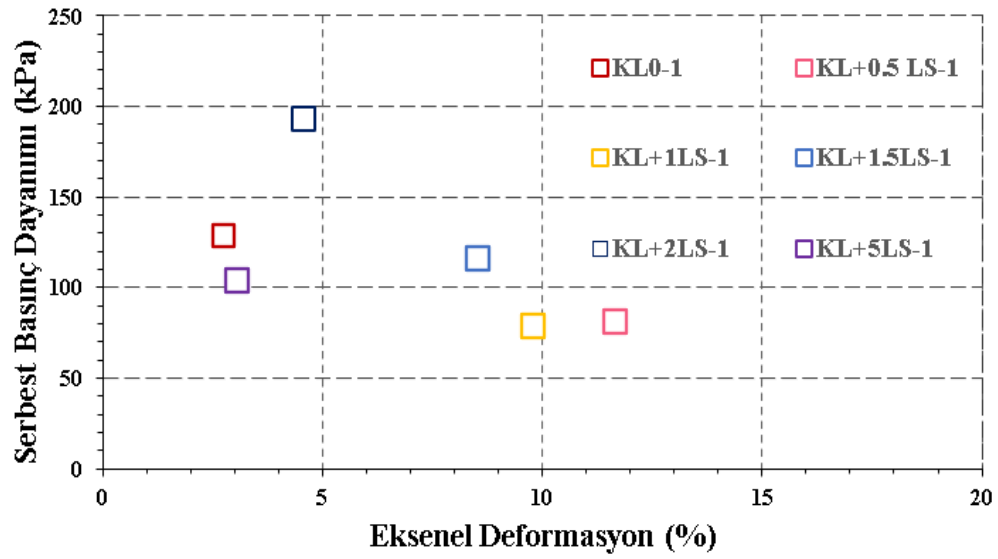
Değişen katkı oranlarında linyosülfonatın silt ve kaolin zeminlerde etkisini değerlendirmek için numuneler $\pm 20^\circ\text{C}$ bir kür odasında 1, 7, 28 ve 90 gün süreyle bekletilmiş daha sonra serbest basınç dayanımı cihazında kırılarak dayanımları ölçülmüştür. Kaolin zeminlerde kullanılan linyosülfonat oranları %0,5, 1,1.5,2 ve %5, silt zeminlerde ise %0,5, 1 1.5 ve %5 oranlarında kullanılmıştır.

Şekil 4.5’ de kür süresi sabit tutularak ve linyosülfonat katkısının miktarı değiştirilerek kaolin zemin içeren numunelerde serbest basınç dayanımları gösterilmiştir. 1 günlük kür süresi içerisinde linyosülfonat katkısının artış miktarı zeminin serbest basınç dayanımında sistematik bir değişime sebep olmamıştır. Yalnızca %2 linyosülfonat içeren KL+2LS-1 numunesi diğer tüm numunelerden daha yüksek dayanım göstermiştir. Bunun dışında diğer katkı oranlarında zeminin serbest basınç dayanımları saf kaolin zemininkinden düşüktür.



Şekil 4.5 1 gün kürlenmiş örneklerde linyosülfonat katkı oranına göre kaolin zeminlerde dayanım değişimi

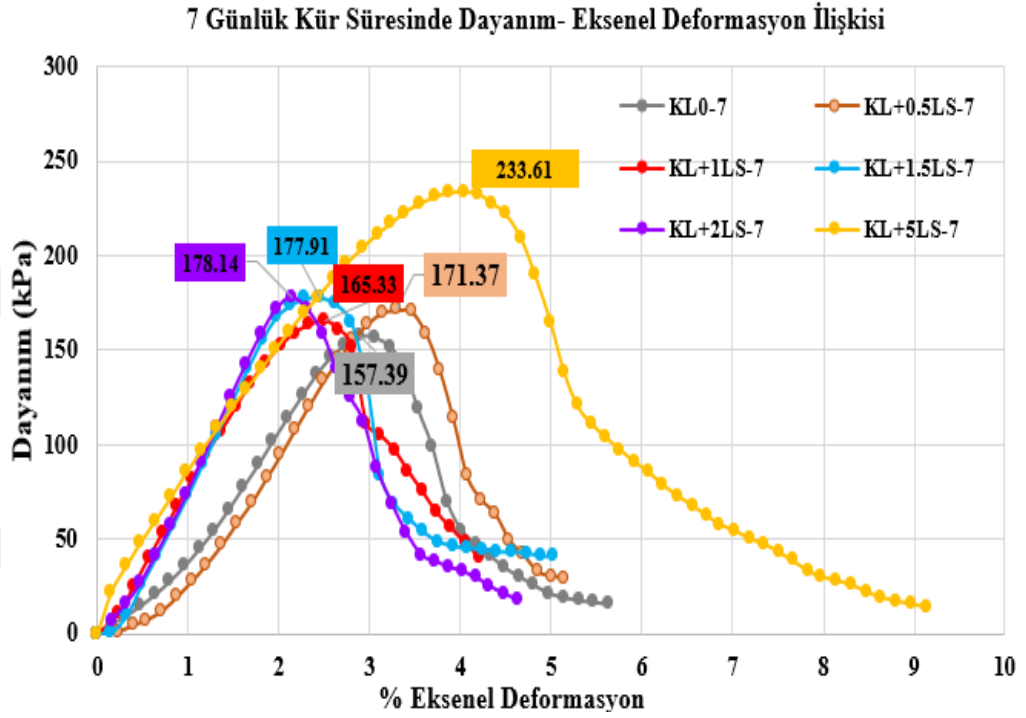
Şekil 4.6’ da serbest basınç dayanımına karşılık linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin eksenel deformasyonları gösterilmiştir. Bu grafiğe göre, linyosülfonat katkısı içeren numunelerin daha yüksek deformasyonlar yaptığı görülmektedir. Deformasyonlar en düşük katkı oranına sahip olan KL+0.5LS-1 numunesinde en fazla iken, katkı miktarı arttıkça deformasyonlar azalarak, katkısız kaolin zeminin deformasyonuna yaklaşmıştır.



Şekil 4.6 1 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği

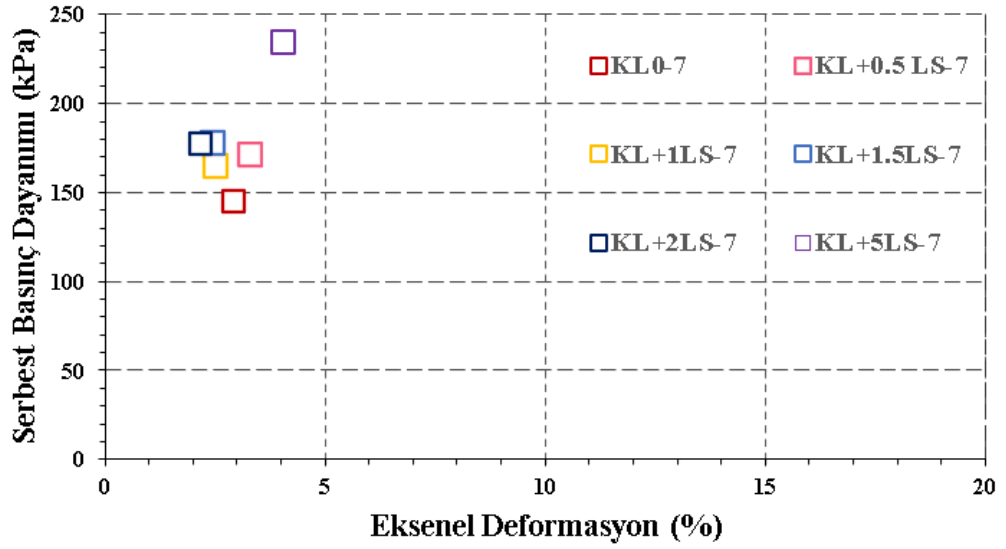
Şekil 4.7’de ise kür süresi olarak 7 gün seçilmiş ve bu kür süresinde farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin serbest basınç dayanımı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere tüm katkı oranlarında dayanım, saf kaolin numunesi KL0-7’den büyüktür. Katkı oranının artmasıyla birlikte dayanımını arttığı görülmüş fakat %1 linyosülfonat içeren numunenin serbest basınç dayanımı, %0,5 linyosülfonat içeren numuneden daha düşük değer vermiştir. Bu istisna dışında katkı miktarının artması ile serbest basınç dayanımı artmıştır. 7 günlük kür süresi için değerlendirildiğinde en yüksek dayanımı ise %5 linyosülfonat katkısı içeren KL+5LS-7 numunesi vermiştir. Kırılmadan önce KL+5LS-7 ve KL+0.5LS-7 numuneleri daha fazla deformasyon gösterebilmiştir. Diğer numuneler ise,

katkısız kaolin zemine göre değerlendirildiği daha yüksek dayanımlarda, daha düşük eksenel deformasyonlarda kırılma gerçekleştirmiştir. %5 ve %0,5 linyosülfonat içeren numuneler dışındaki numuneler benzer davranışta ve yakın dayanımlardadır.



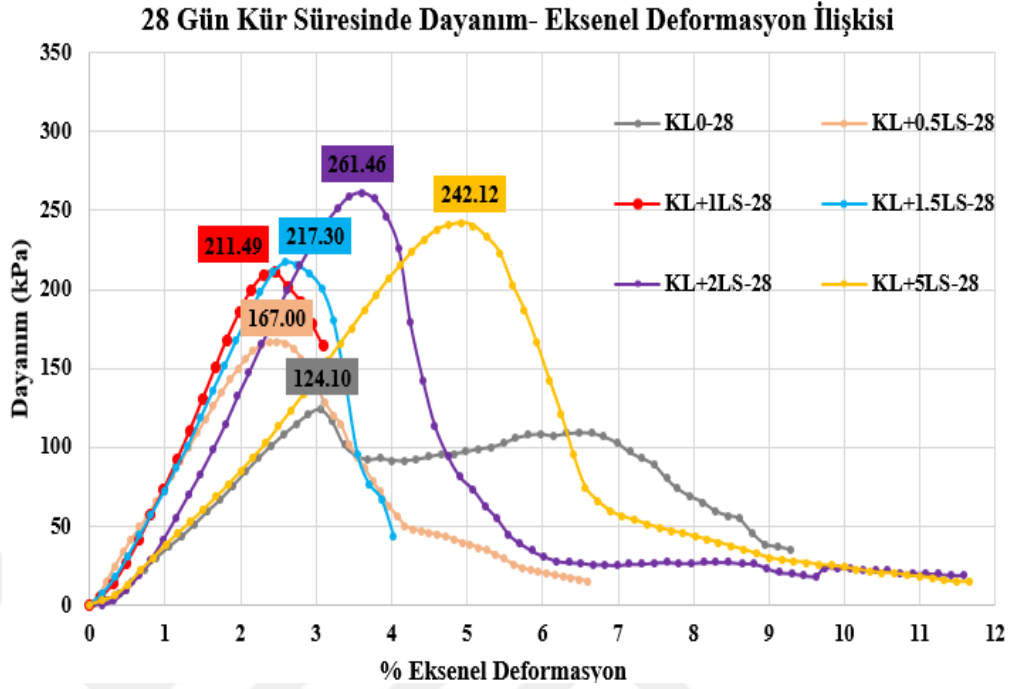
Şekil 4.7 7 gün kürde bekletilen ve kaolin zeminler üzerinde farklı oranlarda linyosülfonat katkısının serbest basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.8 ise 7 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin serbest basınç dayanımına karşılık nokta deformasyon grafiğini göstermektedir. Linyosülfonat katkısı, deformasyonlarda çok önemli değişiklikler oluşturmamıştır. Tüm numuneler %2- %5 aralığında deformasyon göstermiştir.



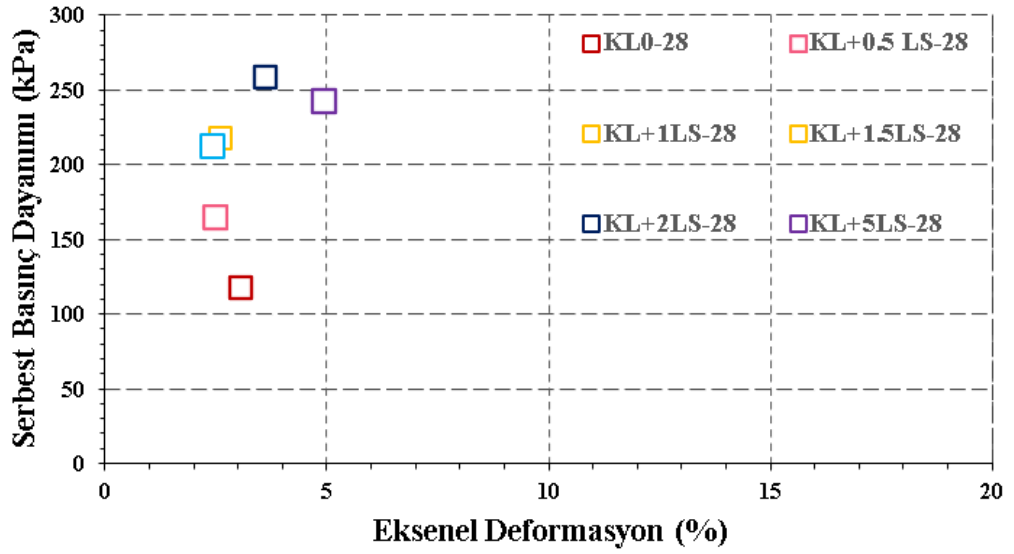
Şekil 4.8 1 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği

Şekil 4.9, 28 gün kür süresine sahip farklı oranlarda linyosülfonat katkısı içeren kaolin zeminlerin dayanımını göstermektedir. 28 günlük kür süresine göre değerlendirildiğinde, numunelerin dayanımı %2 linyosülfonat katkısına kadar katkı miktarı arttıkça artmıştır. %5 oranında katkı kullanıldığında ise dayanım düşmüştür. Yine de tüm katkı oranlarında numunelerin dayanımı saf kaolin numunesi olan KL0-28 numunesine göre daha yüksektir. En yüksek dayanım ise %2 linyosülfonat içeren KL+2LS-28 numunesinde gözlemlenmiştir. %2 ve %5 katkı içeren numunelerde, numunenin daha fazla yük alabildiği ve kırılmadan önce daha fazla deformasyon gösterebildiği görülmüştür. Diğer katkı oranlarında saf kaolin numunesine göre daha yüksek dayanım görülmesine rağmen, kırılmalar daha düşük deformasyonlarda gerçekleşmiştir. KL0-28 numunesi dışında katkı oranı arttıkça numune daha fazla yük alırken, kırılmadan önceki deformasyonlar da daha fazladır. Bu durumda katkılı numunelerin davranışının sünek davranış olduğu gözlemlenmiştir.



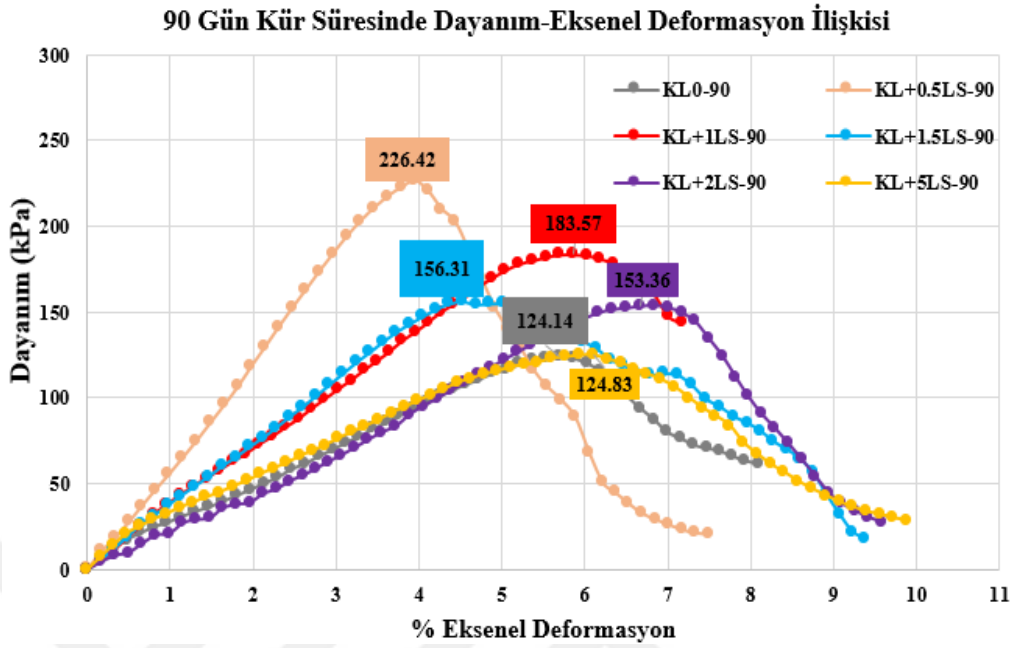
Şekil 4.9 28 gün kürde bekletilen ve kaolin zeminler üzerinde farklı oranlarda linyosülfonat katkısının serbest basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.10 ise 28 günlük numunelerde serbest basınç dayanımına karşılık nokta deformasyon grafiğini göstermektedir. Katkılı numuneler daha yüksek dayanımlar göstermiştir fakat linyosülfonat katkısı kaolin zeminde deformasyonları etkilememiştir. Katkısız kaolin numunesi ve diğer katkılı numuneler %2 ve %5 aralığında deformasyon göstermiştir.



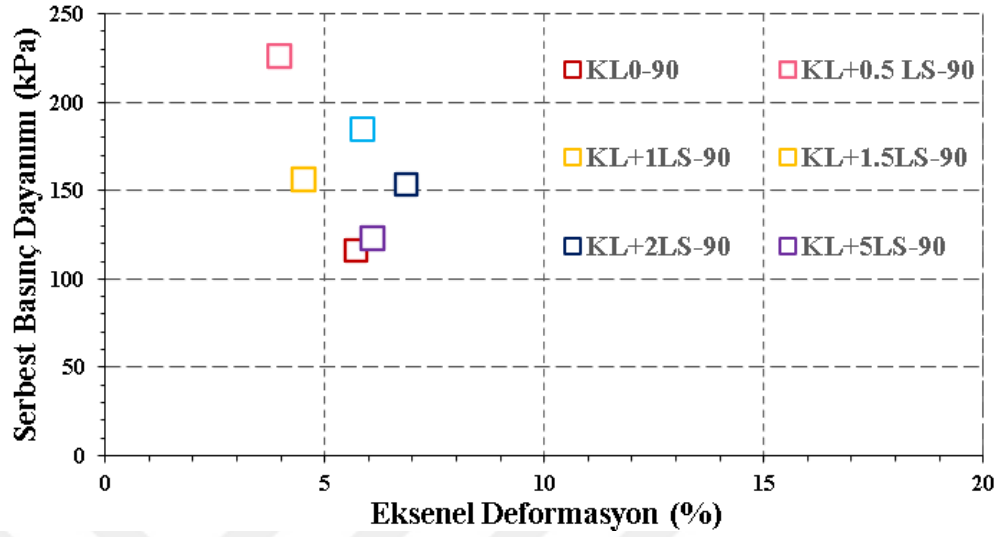
Şekil 4.10 28 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği

Şekil 4.11 linyosülfonat katkısı ilave edilmiş numunelerin 90 günlük kür süresi sonunda serbest basınç dayanımlarının katkı oranına göre değişimini göstermektedir. 90 gün kür süresi sonunda katkı miktarı arttıkça serbest basınç dayanımında azalma gözlemlenmiştir. En yüksek dayanım ise %0,5 linyosülfonat katkısı içeriğine sahip KL+0.5LS-90 numunesinde görülürken, en düşük dayanımı veren katkı içeriği %5 linyosülfonat ile sağlanmıştır. Tüm katkı içeriklerinde görülen dayanımlar katkısız saf kaolin numunesi olan KL0-90 numunesinden yine de daha yüksek sonuçlar vermiştir. Buna rağmen daha yüksek dayanımlarda kırılmaları gerçekleşen KL+0.5LS-90 ve KL+1.5LS-90 numuneleri, saf kaolin numunesinden daha düşük eksenel deformasyonlar göstermiştir. Diğer katkılı numuneler ise kırılmadan önce daha yüksek deformasyonlar gösterebilmiştir. Kırılmadan önce daha yüksek deformasyon kabiliyetine sahip numune %2 linyosülfonat içeren KL+2LS-90 numunesidir. %1, %2 ve %5 linyosülfonat içeriğine sahip numuneler hem kaolinden yüksek dayanım hem de daha yüksek eksenel deformasyon kabiliyeti vermiştir.



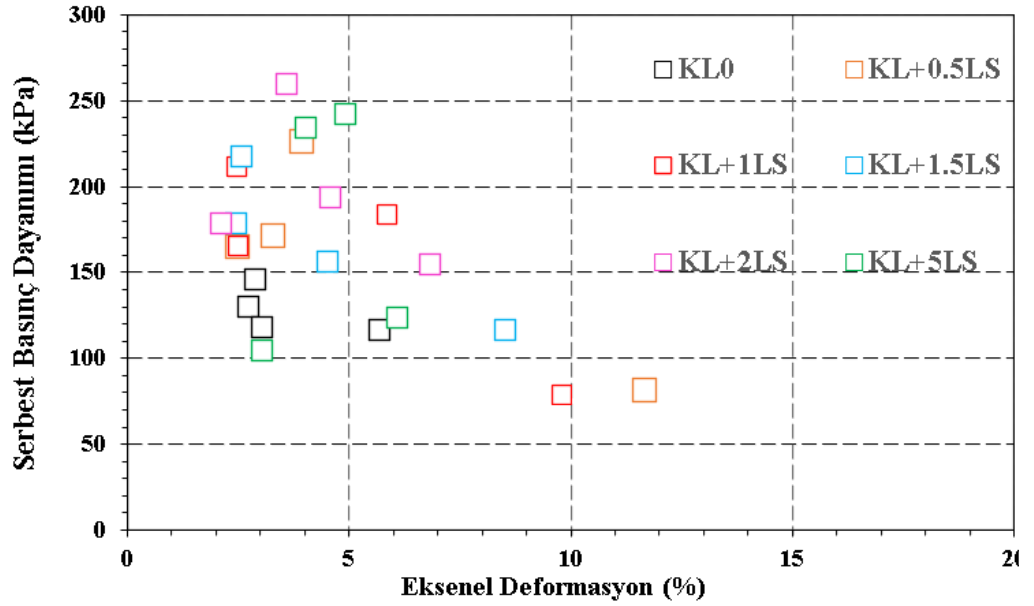
Şekil 4.11 90 gün kürde bekletilen ve kaolin zeminler üzerinde farklı oranlarda linyosülfonat katkısının serbest basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.12 90 gün kür süresinde bekletilmiş kaolin zemin numunelerinin linyosülfonat katkısı ile deformasyondaki değişimini göstermektedir. Genel olarak tüm numuneler %3 ile %7 aralığında deformasyon göstermişlerdir. Düşük linyosülfonat içeren KL+0.5LS-90, KL+1LS-90 ve KL+1.5LS-90 numuneleri katkısız kaolin numunesinden daha düşük deformasyon gösterirken, %2 ve %5 linyosülfonat içeren numuneler çok küçük farklarla katkısız kaolin numunesinden daha yüksek deformasyon göstermiştir. Bu grafiğe göre en yüksek deformasyon gösteren numune KL+5LS-90 numunesidir.



Şekil 4.12 90 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği

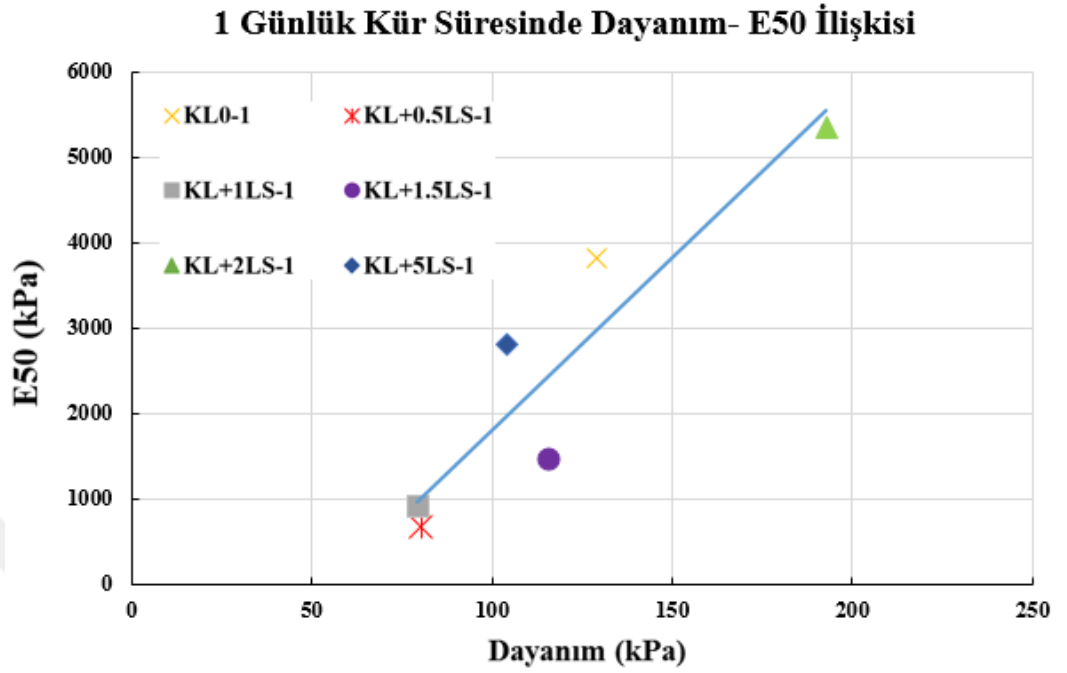
Kür süreleri ile bağlantılı olarak tüm numuneleri katkı oranlarına göre değerlendirdiğimizde, serbest basınç dayanımına karşılık gelen nokta deformasyon grafiğine (Şekil 4.13) göre, numuneler %2 ila %12 aralığında deformasyon göstermiştir. %0,5 linyosülfonat içeren numunelerde deformasyon %12' ye kadar çıkmıştır. Katkısız kaolin numuneleri genel olarak %3 civarında deformasyon göstermiştir. Daha yüksek linyosülfonat katkısı içeren numunelerde, %0,5 ve %1 ile karşılaştırıldığında deformasyonlar daha düşük kalmıştır. Kür süreleri linyosülfonat katkısı içeren numunelerde deformasyonları etkilerken, katkısız kaolin numunelerinde deformasyonları genel olarak etkilememiştir. Yalnızca 90 gün süreyle kürlenen katkısız kaolin numunesinde, deformasyon yükselmiş ve diğer kür sürelerinde neredeyse aynı deformasyonda kalmıştır. Katkılı numunelerde ise kür süreleri değiştiğinde, deformasyonlarda değişiklik göstermiştir.



Şekil 4.13 Linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneklerinde nokta deformasyon grafiği

Deney sonuçlarına göre, kür süresi sabit tutulan ve linyosülfonat içeren bu kaolin numuneler için sekant modülleri de hesaplanmıştır.

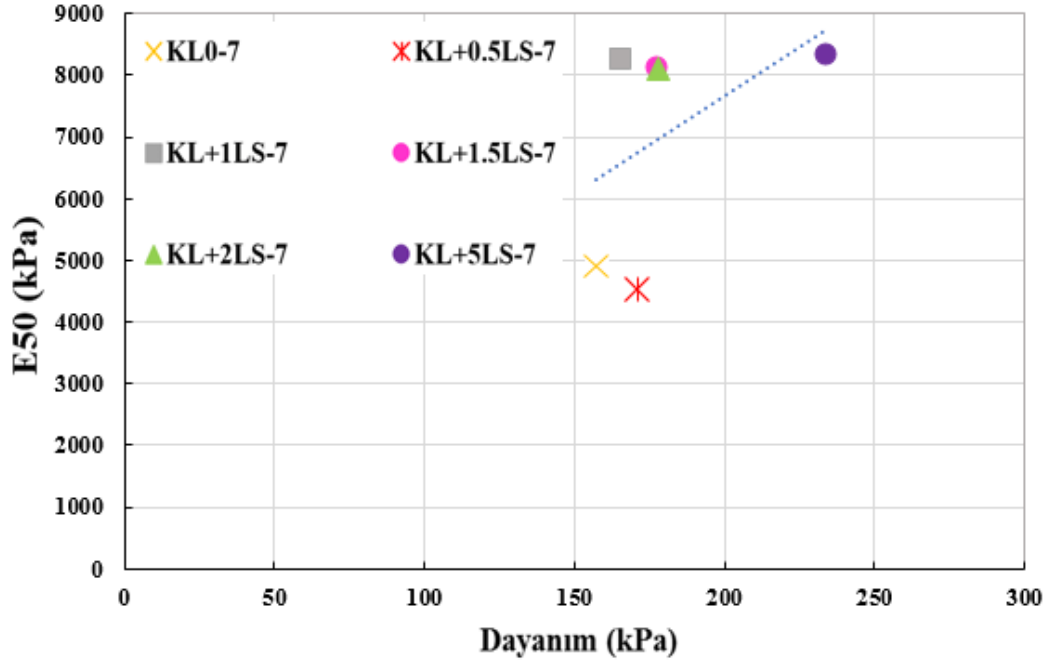
Şekil 4.14'de 1 günlük kür süresi içerisinde en yüksek dayanımı gösteren linyosülfonat içeriği %2 olarak görülmektedir. Şekil 4.14 aynı kür süresi içerisinde linyosülfonat içeriklerine bağlı kaolin zeminlerin sekant modülünü (E_{50}) göstermektedir. Bu sonuçlara göre, en yüksek değeri yine %2 linyosülfonat içeren KL+2LS-1 numunesi vermiştir. Diğer linyosülfonat içerikleri ile karşılaştırıldığında sadece %2 linyosülfonat katkısı ilave edilen kaolinli zemin numunesinin, saf kaolin numunesi KL0-1'den daha rijit olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.14 1 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin sekant modülü- dayanım ilişkisi

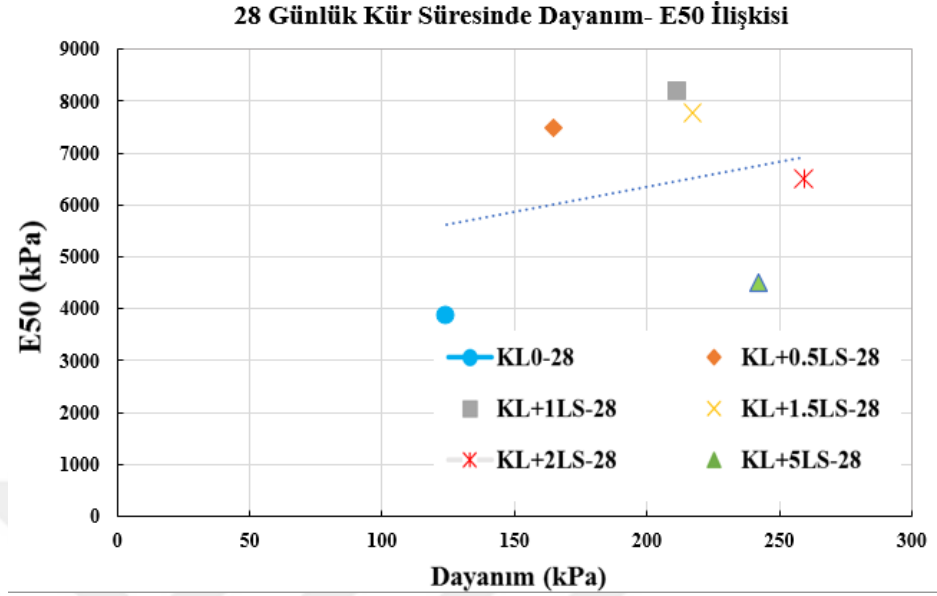
Şekil 4.15 ise 7 günlük kür süresine sahip linyosülfonat içeren kaolinli zeminlerin linyosülfonat oranına göre dayanım ve sekant modülü (E_{50}) ilişkisini göstermektedir. Grafiğe göre, %1 linyosülfonat içeren KL+1LS-7 numunesi haricinde katkılı tüm numunelerin sekant modülü KL0-7 saf kaolin numunesinden yüksektir. Bu durumda en yüksek rijitlik %5 linyosülfonat içeren KL+5LS-7 numunesinde görülmüştür. %1,5 ve %2 linyosülfonat içeren kaolin numuneleri birbirine yakın sonuçlar vermiş ve %1 linyosülfonat içeren numune KL+1LS-7 %5 linyosülfonat içeren kaolin numunesinden sonra en yüksek sekant modülü değerine sahiptir.

7 Günlük Kür Süresinde Dayanım- E50 İlişkisi



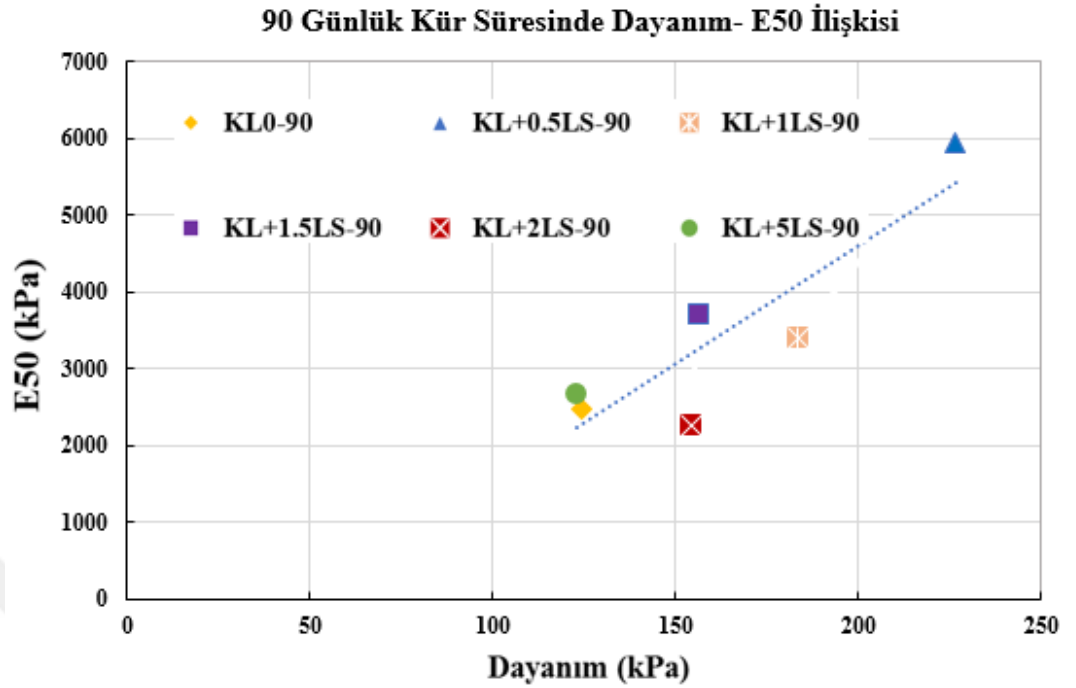
Şekil 4.15 7 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin sekant modülü- dayanım ilişkisi

Şekil 4.16 linyosülfonat katkısının oranına göre kaolin zemin numunelerinde dayanım- sekant modülü arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Katkı içeren tüm numuneler saf kaolin numunesi KL0-28'den fazla rijitlik göstermiştir. %1 linyosülfonat içeren kaolin numunesi en yüksek sekant modülü değerine sahiptir. %1'e kadar linyosülfonat içeriğine bağlı sekant modülü değerinde artış görülürken, katkı içeriği arttıkça bu değer azalmıştır.



Şekil 4.16 28 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin sekant modülü- dayanım ilişkisi

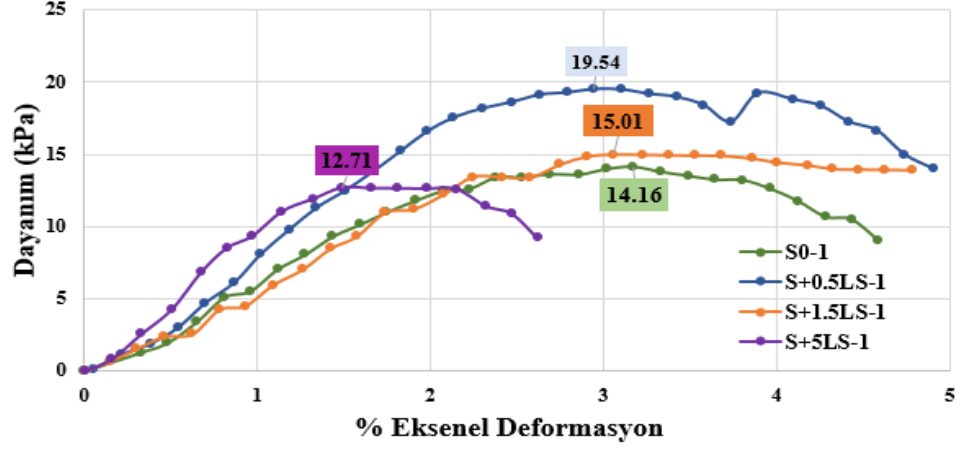
Şekil 4.17' ye göre katkı oranına bağlı olarak linyosülfonatın kaolinli zeminde rijitlik üzerindeki etkisi düzenli değildir. %2 linyosülfonat içeriğine sahip KL+2LS-90 numunesi saf kaolin numunesinden bile düşük sekant modülü değerine sahip iken, %5 linyosülfonat içeren numune kaolin numunesi ile yakın sekant modülü değeri göstermiştir. Ayrıca en düşük linyosülfonat içeriğine sahip %0,5 linyosülfonat içeren KL+0.5LS-90 numunesi en yüksek sekant modülü değerine, yani diğer katkı oranlarına kıyasla daha fazla rijitliğe sahiptir. Düzenli bir şekilde olmasa dahi, %0,5' den daha fazla linyosülfonat içeren numunelerin sekant modülü değeri azalmıştır. %1,5 linyosülfonat katkısından sonraki katkı oranlarında, sekant modülü değerinin saf kaolin numunesinin sekant modülünün altına düştüğü veya yakın değerde olduğu görülmüştür. Rijitlik kazanımı açısından %0,5, %1 ve %1,5 linyosülfonat oranlarından daha yüksek miktarda linyosülfonat kullanımı avantajlı olmamıştır.



Şekil 4.17 90 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin sekant modülü- dayanım ilişkisi

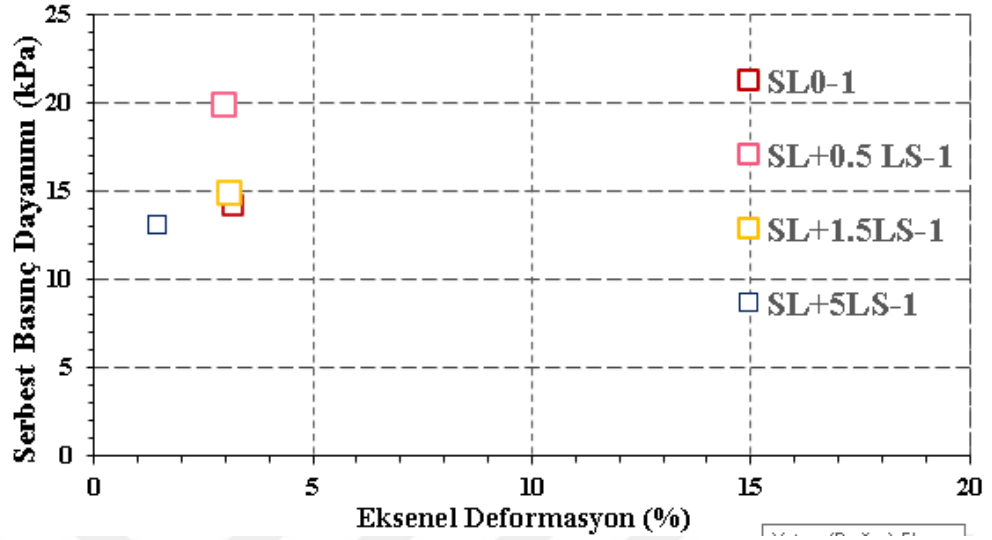
Aşağıdaki şekil (Şekil 4.18), silt zeminlerde katkı oranına göre kür süresi sabit tutularak dayanım ve eksenel deformasyon ilişkisini göstermektedir. Şekil 4.13 incelendiğinde, dayanımın 14.06 kPa'dan katkı oranının %0,5 linyosülfonat eklenmesiyle 19.04'e çıktığı, daha sonra katkı oranı arttıkça düşmeye başladığı görülmektedir. Katkısız silt zeminin dayanımı düşük iken, katkı ilavesiyle de zeminin kayda değer bir dayanım geliştirmediği açıkça görülmektedir. Fakat %1,5 linyosülfonat ilavesine kadar dayanım yine de katkısız silt zeminin dayanımından çok düşük bir miktarda fazladır. %5 linyosülfonat katkısı ile hem dayanım katkısız silt zeminin dayanımının altına düşmüş, hem de deformasyonda düşüş olmuştur. Bu durumda %0,5 linyosülfonat katkısının 1 gün kür süresi için silt zeminde optimum katkı miktarı olduğu söylenebilir.

1 Günlük Kür Süresinde Dayanım- Eksenel Deformasyon İlişkisi



Şekil 4.18 1 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin dayanım-eksenel deformasyon ilişkisinin katkı oranına göre değişimi

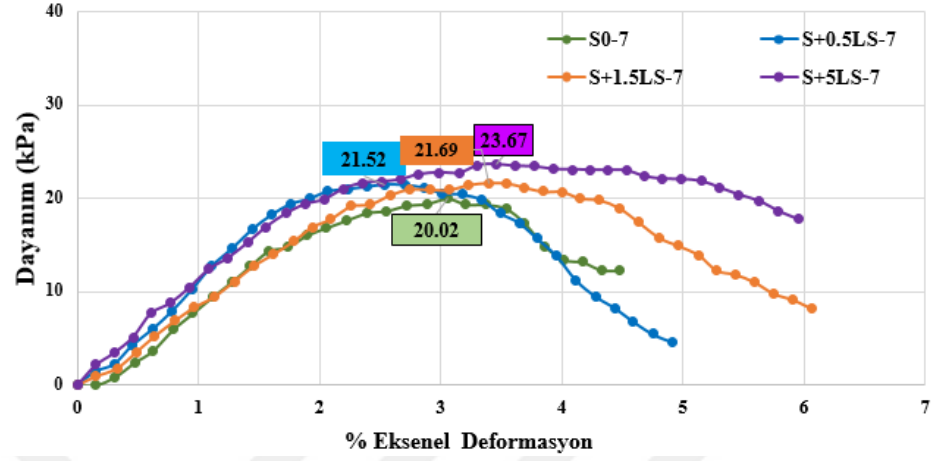
Şekil 4.19 linyosülfonat içeren silt zeminlerde 1 günlük kür süresi sonunda dayanımına karşılık nokta deformasyon grafiğini göstermektedir. Bu durumda, SL+5LS-1 numunesi haricinde katkılı ve katkısız silt numuneleri %3 deformasyon göstermiştir. %5 linyosülfonat ilavesi ile silt zemin numunesinin deformasyonu düşmüştür.



Şekil 4.19 1 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı silt zemin numunelerinde deformasyon değişimi

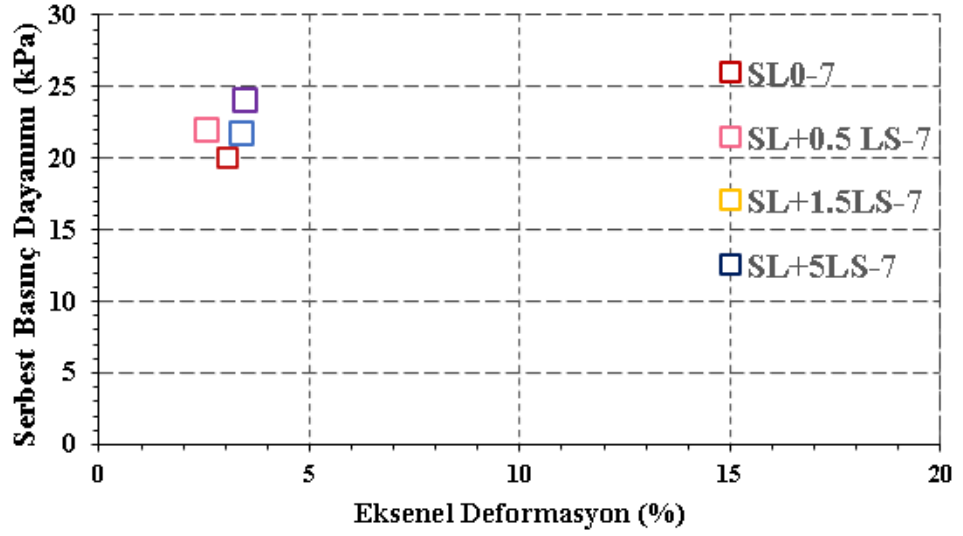
7 gün kür süresi için, silt zeminde linyosülfonat katkısının dayanım- eksenel deformasyon ilişkisinin katkı oranına göre değişimi Şekil 4.20’ de gösterilmiştir. 1 günlük kür süresinde katkı oranının değişimine göre dayanımdan farklı olarak, katkı oranı arttıkça dayanım artmıştır. Fakat en yüksek katkı oranı olarak %5 linyosülfonat kullanıldığında bile, dayanımdaki artış 20.02’den 23.67 kPa’ya çıkabilmiştir. Bunun dışında katkı oranı arttıkça, numune daha yüksek deformasyonlara dayanabilmiştir. Ancak, linyosülfonat katkısının silt zeminin dayanımını geliştirmekte çok büyük bir katkısı olmamıştır.

7 Gün Kür Süresinde Dayanım- Eksenel Deformasyon İlişkisi



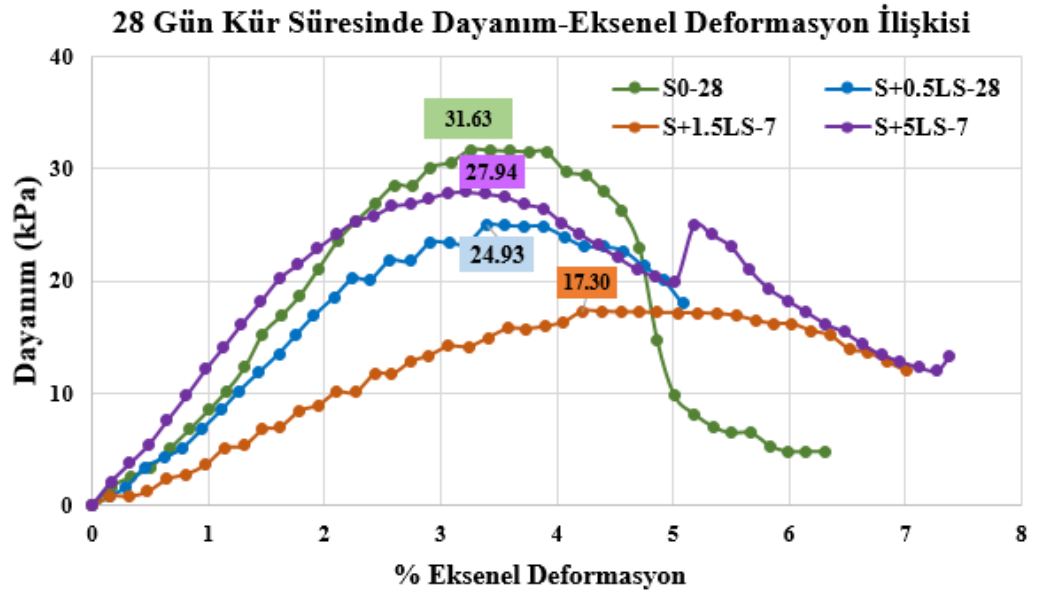
Şekil 4.20 7 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin dayanım-eksenel deformasyon ilişkisinin katkı oranına göre değişimi

Şekil 4.21 7 gün süreyle kürlenen silt zemin numunelerinin linyosülfonat katkısı varlığında deformasyon değişimini göstermektedir. 7 gün kür süresi içinde linyosülfonat katkısının varlığının, silt zeminlerde deformasyon kabiliyetini etkilemediği görülmüştür.



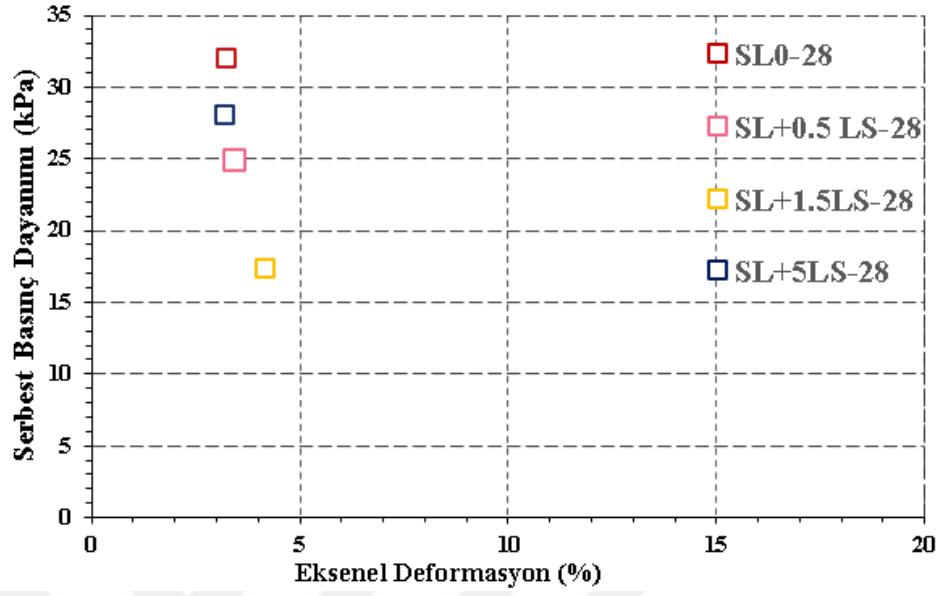
Şekil 4.21 7 gün süreyle kürlenen linyosülfonat katkılı silt zemin numunelerinde deformasyon değişimi

Şekil 4.22 ise 28 günlük kür süresinde, linyosülfonat katkısının artışıyla birlikte silt zemindeki dayanım-eksenel deformasyon değişimini göstermektedir. Şekle göre, saf silt zeminde dayanım 31.63 kPa iken, katkı eklenmesi dayanımı tüm oranlarda düşürmüştür fakat oranlara göre stabil bir düşüş görülmemektedir. Dayanımda en az düşüş %5 katkı oranında gerçekleşirken, en fazla düşüş %1,5 linyosülfonat katkılı numunede görülmüştür. %0,5 linyosülfonat katkısının silt zeminde dayanım- deformasyon grafiği %5 ile %1,5 linyosülfonat katkılı eğrilerin arasında kalmıştır.

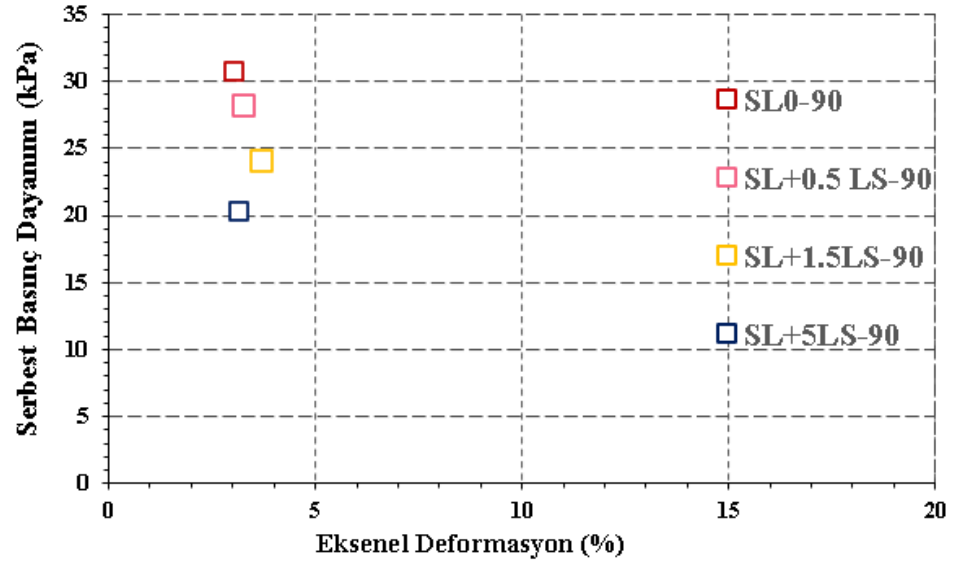


Şekil 4.22 28 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin dayanım-eksenel deformasyon ilişkisinin katkı oranına göre değişimi

Şekil 4.23 28 gün kür süresi içinde silt zemin numunelerinin linyosülfonat katkısı ile deformasyon değişimini göstermektedir. Linyosülfonat katkısı silt zeminin deformasyon kabiliyetini neredeyse etkilememiştir. Şekil 4.24 ise 90 gün kür süresinde linyosülfonat katkısının silt zeminlerde deformasyon değişimini göstermektedir. 90 gün kür süresinde de linyosülfonat katkısı silt zeminin deformasyonunda bir etki göstermemiştir. Numuneler %3 civarında deformasyon göstermiştir. Katkı miktarlarının değişmesi de deformasyonlarda etkili olmamıştır.

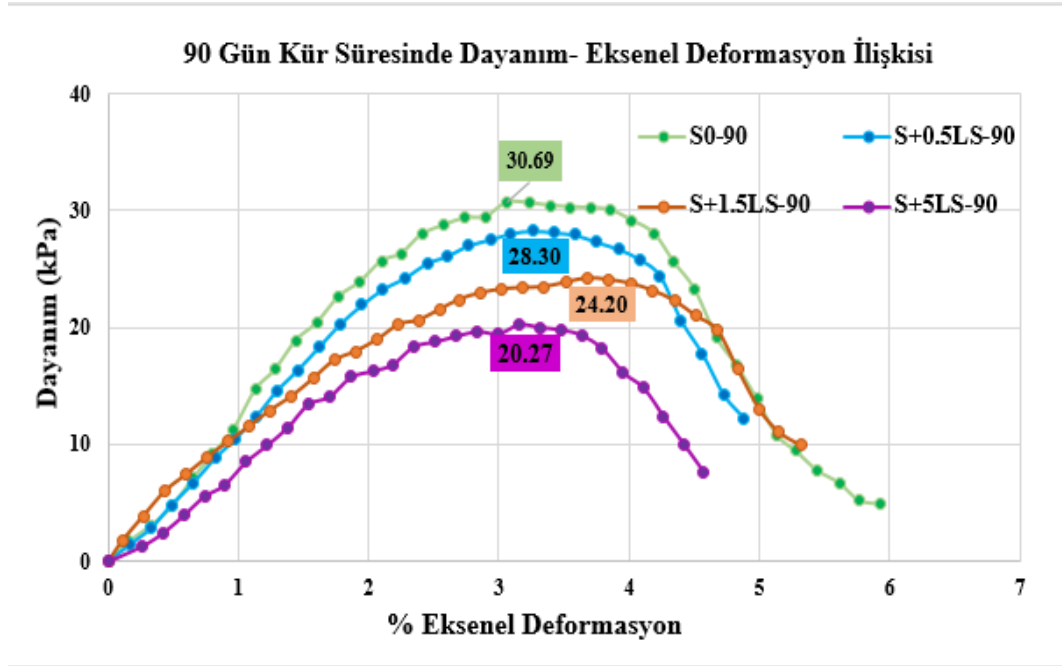


Şekil 4.24 28 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı silt zemin numunelerinde deformasyon değişimi



Şekil 4.23 90 gün süreyle kürlenmiş linyosülfonat katkılı silt zemin numunelerinde deformasyon değişimi

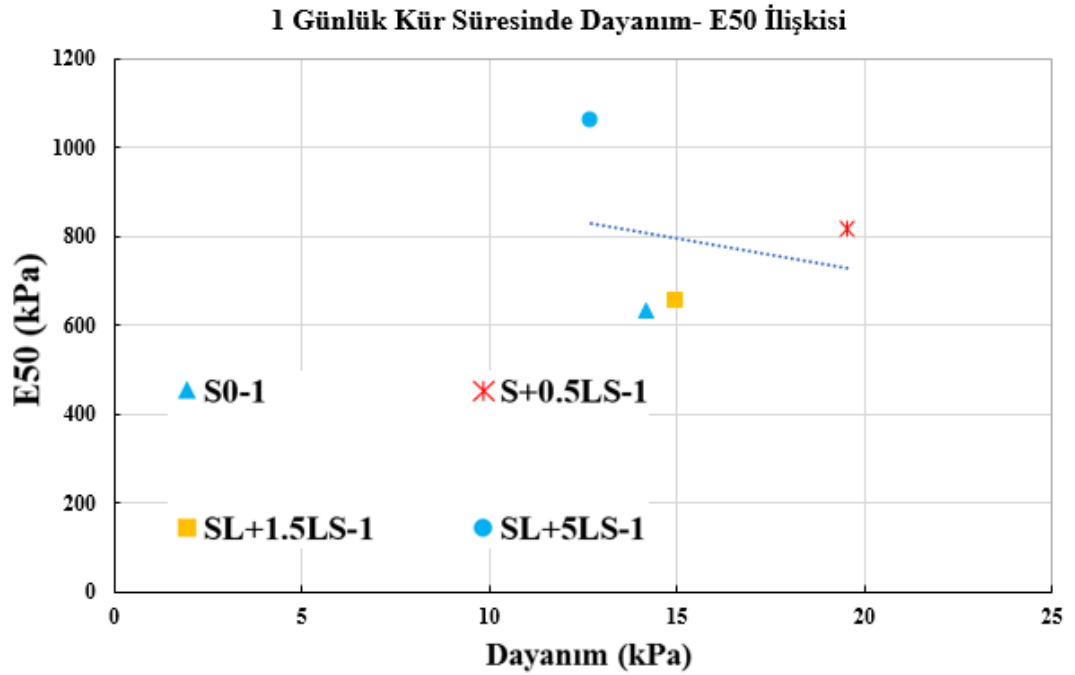
90 gün kür süresinde linyosülfonat katkısı miktarına bağlı olarak silt zemin numunelerinde dayanım-deformasyon grafiği şekil 4.25’de gösterilmiştir. 28 gün kür süresi içerisindeki değişimle benzer olarak en yüksek dayanımı katkısız silt zemin göstermiştir. Farklı olarak katkı miktarı yükseldikçe, dayanımdaki düşüş katkı oranlarına bağlı olarak stabil bir şekilde gerçekleşmiştir. En düşük dayanım en yüksek katkı miktarı olan %5 linyosülfonat katkısında görülmüştür. Katkısız silt zeminin gösterdiği dayanımdan sonra en yüksek dayanım %0,5 linyosülfonat katkısında görülmekte, onu %1,5 linyosülfonat katkısı izlemektedir. Gösterdiği deformasyonlar incelendiğinde, katkısız silt zemin katkılı numunelere göre daha yüksek deformasyonlar gösterebilmiştir. Katkı eklenmesiyle birlikte deformasyon kabiliyetinde hafif bir azalma görülmüştür. %0,5 ve %1,5 linyosülfonat katkılı numunelerde deformasyon kabiliyetinde hafif bir azalma gerçekleşse de katkısız silt zeminin davranışına yakın davranışlar göstermişlerdir. Buna rağmen %5 linyosülfonat katkılı S+5LS-90 numunesinde dayanımda azalma ile birlikte, eksenel deformasyon da azalmış, numune daha düşük deformasyonlarda kırılma gerçekleştirmiştir.



Şekil 4.25 28 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin dayanım-eksenel deformasyon ilişkisinin katkı oranına göre değişimi

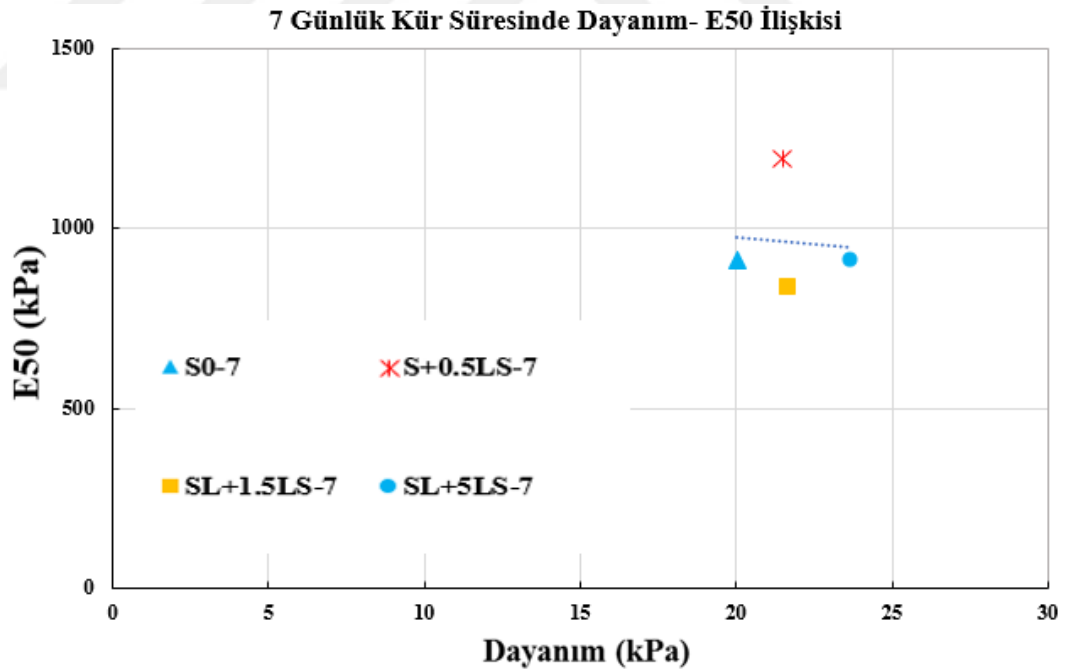
Kaolin zemin numunelerinde olduğu gibi, katkı oranına bağlı olarak silt zeminlerde de rijitlik durumu incelenmiştir. Bunun için sabit kür sürelerinde, katkı miktarı değiştirilerek serbest basınç dayanımları ölçülen katkılı ve katkısız numunelerde, her bir numunenin kırılma dayanımının yarısının o miktardaki birim deformasyona bölünmesiyle sekant modülü (E_{50}) hesaplanmıştır.

Şekil 4.26, kür süresi 1 gün olan ve farklı oranlarda linyosülfonat içeren silt zemin numunelerinin sekant modülü değişimini göstermektedir. Buna göre, en yüksek sekant modülü değerini, en yüksek linyosülfonat katkı miktarını içeren (%5), S+5LS-1 numunesi vermiştir. En düşük değer, katkısız silt zemin numunesinde görülmüştür. Katkı oranının sonuçlar üzerinde stabil bir etkisi görülmemiştir. Örneğin, sadece katkı içeren silt zemin numuneleri kendi aralarında karşılaştırıldığında en yüksek değeri %5 linyosülfonat içeren S+5LS-1 numunesi verirken, en düşük sekant modülü değeri %1,5 linyosülfonat içeren S+1.5LS-1 numunesi göstermiş, %0,5 linyosülfonat içeren numune ise bu iki noktanın arasında bir değer göstermiştir. Ayrıca, 1 günlük kür süresi için, tüm katkı oranlarının silt zemin numunesinin rijitliğinde olumlu bir değişime neden olduğu görülmektedir.



Şekil 4.26 1 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisinin katkı oranına göre değişimi

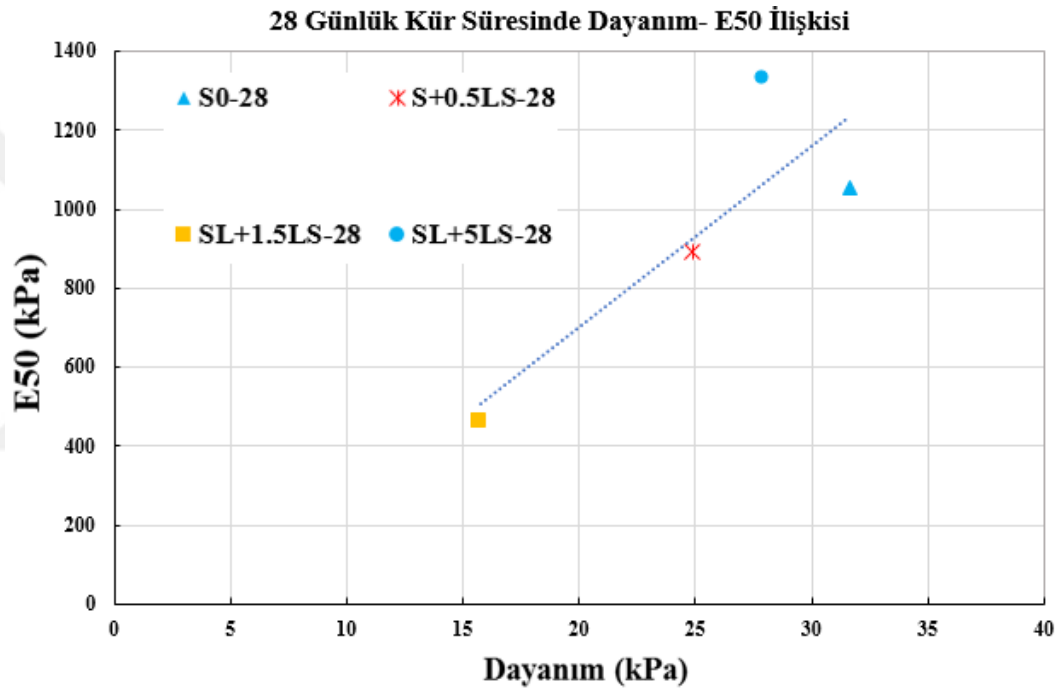
Şekil 4.27 ise 7 gün sabit kür süresinde değişen oranlarda linyosülfonat içeren silt zeminlerde katkı oranının E_{50} (sekant modülü)- dayanım ilişkisinde değişimini göstermektedir. Şekil 4.18' e göre, en yüksek sekant modülü değerini %0,5 linyosülfonat içeren S+ 0.5LS-7 numunesi vermiştir. %5 linyosülfonat içeren numunenin ise silt zeminin rijitliğine bir katkısı yoktur. Sekant modülü değeri silt zeminin sekant modülü değerine eşittir. S+1.5LS-7 numunesi ise rijitliği olumsuz etkileyerek sekant modülü değerini düşürmüştür. Silt zemin numunesinin sekant modülü değeri 910 kPa iken, en yüksek katkıyı sağlayan S+0.5LS-7 numunesi bu değeri sadece 1196 kPa' ya kadar yükseltebilmiştir. Katkı sağlamasına rağmen, önemli miktarda bir artış yaşanmamıştır. Sekant modülü değerini düşüren daha fazla katkı miktarı %5 linyosülfonat içeren silt zemin numunesi ise bu değeri 834 kPa' ya düşürmüştür. Bu durumda hiçbir katkı oranının rijitliği ciddi miktarda etkilemediği söylenebilir.



Şekil 4.27 7 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisinin katkı oranına göre değişimi

Şekil 4.28'de 28 günlük kür süresi içerisinde farklı oranlarda linyosülfonat katkısı içeren silt zeminlerin E_{50} (sekant modülü)- dayanım ilişkisini

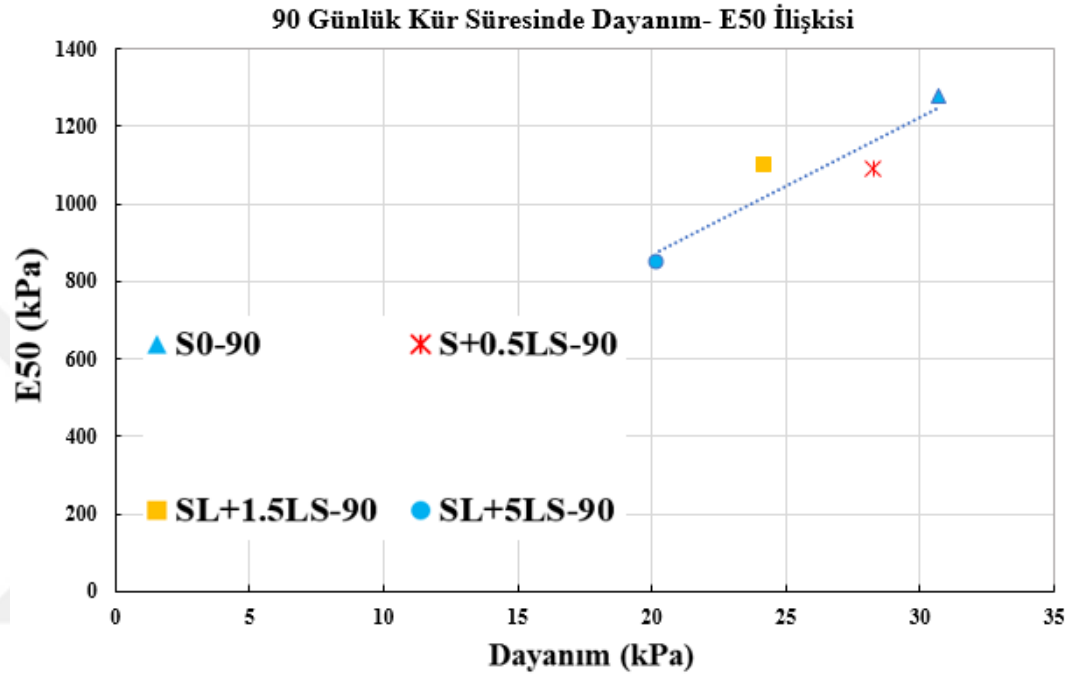
göstermektedir. Bu koşullarda, %5 linyosülfonat katkısı dışında silt zeminin rijitliğine gelişme sağlayan katkı oranları görülmemiştir. %5 linyosülfonat katkılı S+5LS-28 numunesi sekant modülü değerini %26,19 oranında arttırmıştır. Rijitliğe olumsuz etki eden %1,5 linyosülfonat katkısı ise, sekant modülü değerinde %56'lık bir düşüşe neden olmuştur. % 5 linyosülfonat katkısı haricinde değerlendirildiğinde, katkı oranının artmasıyla sekant modülü değerinin düştüğü görülmektedir. Katkı oranına bağlı olarak sekant modülü değerlerinde düzenli bir değişim olmamıştır.



Şekil 4.28 28 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisinin katkı oranına göre değişimi

Verilen şekilde (Şekil 4.29), 90 gün kür süresi içerisinde farklı oranlarda linyosülfonat içeren silt zemin numunelerinin sekant modülü (E_{50})- dayanım ilişkisinin değişimi gösterilmektedir. 90 gün sabit kür süresinde farklı oranlarda linyosülfonat içeren numuneler değerlendirildiğinde, katkı miktarının artmasının düzenli bir değişim yaratmadığı görülmektedir. En yüksek katkı miktarında, en düşük sekant modülü değeri görülmüştür. %1,5 ve %0,5 linyosülfonat içeren S+1.5LS-90 ve S+0.5LS-90 numuneleri birbirine yakın sekant modülü değerleri göstermiştir. Bu değerler sırasıyla 1100 ve 1088 kPa'dır. Katkı miktarı daha fazla

arttığında ise sekant modülü değeri 845 kPa'ya kadar düşmüştür. Genel olarak, herhangi bir katkı oranının rijitlik üzerinde olumlu bir etkisi görülmemiş, aksine rijitliği düşürmüştür.



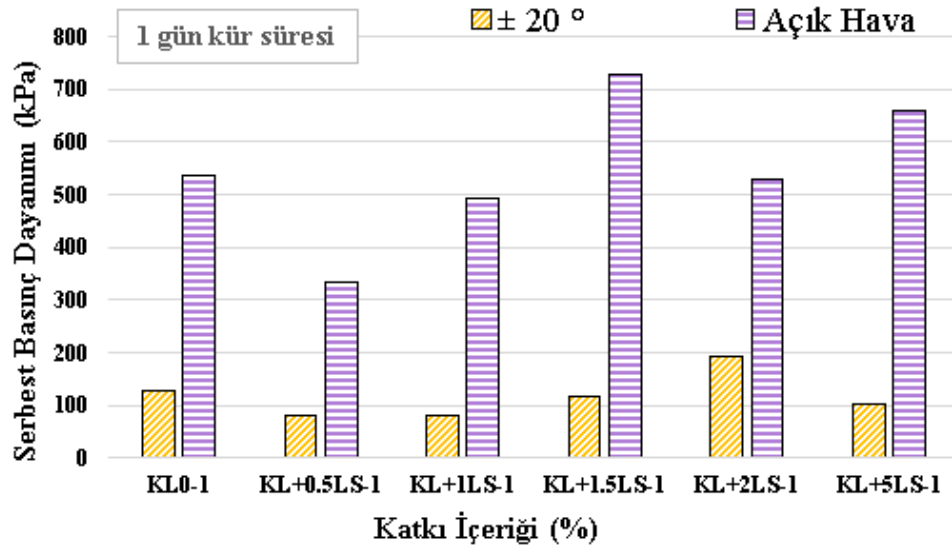
Şekil 4.29 90 günlük kür süresinde linyosülfonat içeren silt zeminlerin sekant modülü-dayanım ilişkisinin katkı oranına göre değişimi

4.1.3. Kür sıcaklığının etkisi

Kür sıcaklığının linyosülfonat katkılı ve katkısız kaolin ve silt zeminlerde etkisini incelemek amacıyla kaolin zeminlerde %0,5, 1, 1.5, 2, 5 oranlarında, silt zeminlerde %0,5, 1.5, 5 oranlarında linyosülfonat kullanılarak hazırlanan her bir numune $\pm 20^{\circ}\text{C}$ bir odada ve aynı kür sürelerinde nemini kaybetmesi için streç filme sarılmadan açık hava koşullarında bekletilmiştir. Her iki sıcaklık koşulları için kür süreleri 1 ve 7 gün olarak seçilmiştir.

Şekil 4.30' a göre, öncelikle tüm numunelerde açık hava koşullarındaki dayanımları, $\pm 20^{\circ}\text{C}$ bir kür odasında bekleyen numunelerin dayanımından

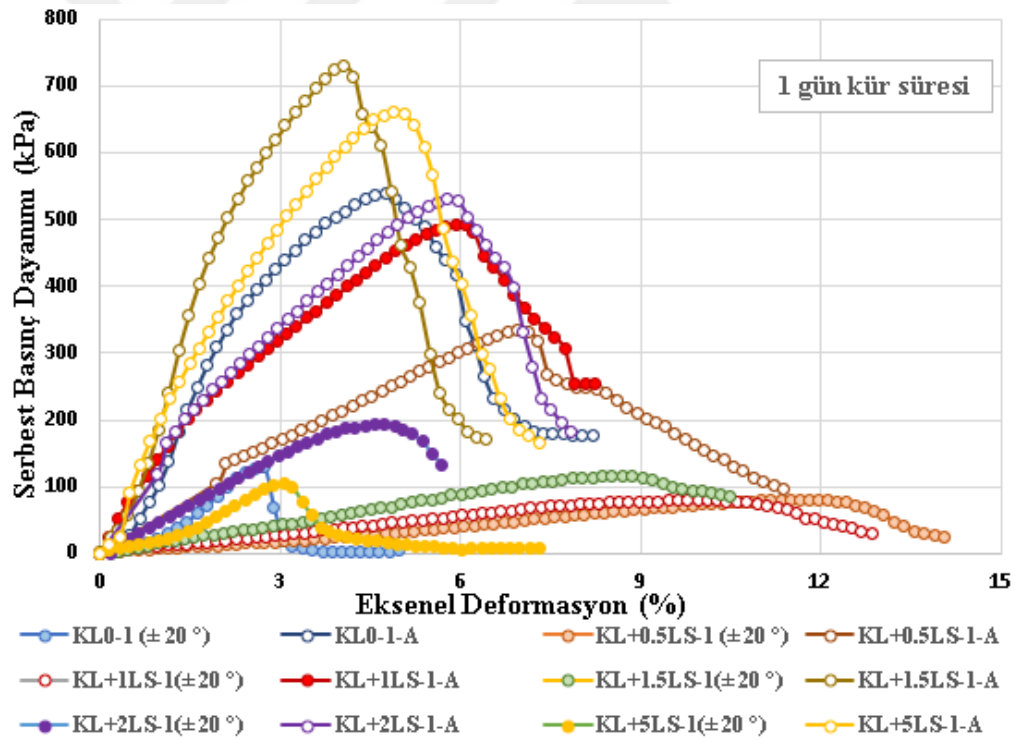
yüksektir. Katkı oranları değişimine göre, saf kaolin zemin ile karşılaştırıldığında, dayanımda düzenli bir artış görülmemiştir. %0,5, %1 ve %2 linyosülfonat içeren kaolin zemin numunelerinin açık hava koşullarında dayanımları, katkısız kaolin zemin numunesinin açık hava koşullarında gösterdiği dayanımdan daha düşük dayanım göstermiştir. En yüksek dayanımı açık hava koşullarında %1,5 linyosülfonat içeren KL+1.5LS-1-A numunesi vermiştir. %5 linyosülfonat içeren numune de katkısız kaolin zemine göre daha yüksek dayanım göstermiş, ancak %1,5 linyosülfonat içeren kaolin zemin numunesine göre daha düşük dayanım göstermiştir. 1 gün kürde bekletilen bu numuneler için, kaolin zemine katkısı olan optimum koşullar, açık havada bekletilen ve %1,5 linyosülfonat katkısı içeren kaolin zemin numunesidir.



Şekil 4.30 Belirlenen 1 gün kür süresi için farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerde sıcaklık değişiminin dayanıma etkisinin sütun grafiği

Şekil 4.31’de 1 gün kür süresinde açık hava ve kür odasında bekletilen numunelerin karşılaştırılmalı dayanım grafiği verilmiştir. Kaolin numunesinin açık hava koşullarında dayanımı artarken deformasyon kabiliyeti de artmıştır. Örneğin

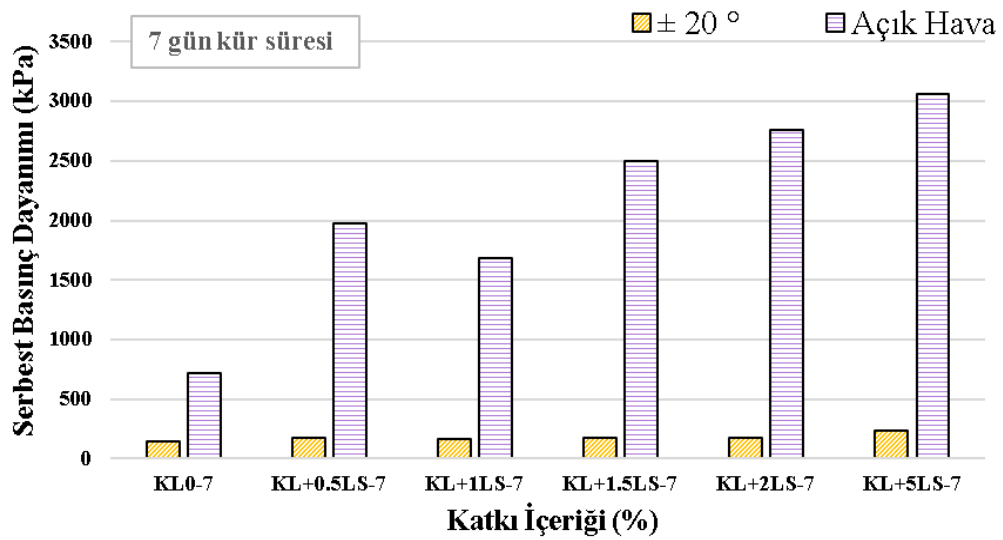
en yüksek dayanım gösteren %1,5 linyosülfonat içeren numune incelendiğinde, dayanım açık hava koşullarında artmış ancak deformasyon kabiliyeti kür odasında bekletilen numuneye göre azalmıştır. %0,5 linyosülfonat içeren açık hava koşullarındaki zemin numunesi dayanımı arttırmaya yardımcı olmuş ancak, açık hava koşullarında normal koşullardan farklı deformasyon davranışı göstermiştir. %0,5, %1 ve %1,5 linyosülfonat içeren numuneler $\pm 20^\circ\text{C}$ odada bekletilen normal koşullara kıyasla, benzer olarak açık hava koşullarında dayanımları yükselirken, daha düşük deformasyonlar göstermişlerdir. Ancak %2 ve %5 linyosülfonat içeren kaolin zemin numuneleri açık hava koşullarında dayanımda artış sağlarken, deformasyon davranışları da normal koşullardaki ($\pm 20^\circ\text{C}$) deformasyon davranışına yaklaşmıştır.



Şekil 4.31 Belirlenen 1 gün kür süresi için farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerde farklı sıcaklıklardaki dayanım-eksenel deformasyon dağılım grafiği

Şekil 4.32 farklı sıcaklık koşullarında, aynı kür süresinde farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin ve katkı içermeyen kaolin zeminlerin

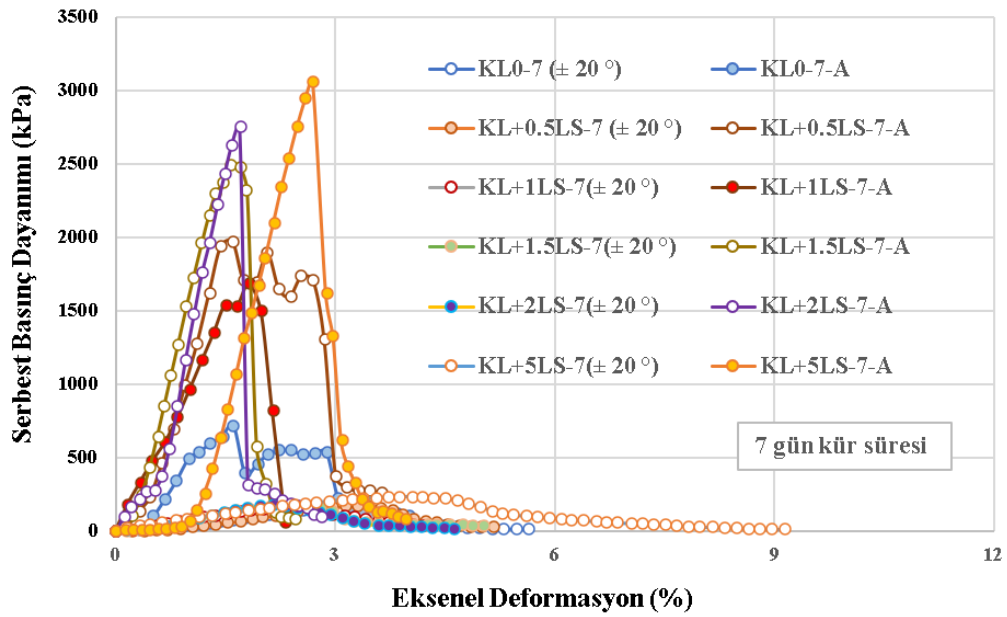
dayanımlarını göstermektedir. Grafiğe göre, tüm katkı oranları için açık havada bekletilen 7 günlük numuneler $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 'lik kür odası koşullarında bekletilen numunelere göre daha yüksek dayanımlar göstermiştir. Sıcaklık koşullarında, açık havada bekletilen numunelerin dayanımlarının ciddi miktarda arttığı görülmektedir. Açık havada bekletilen ve linyosülfonat içeren tüm numunelerin dayanımları, aynı koşulda bekletilen katkısız kaolin zemin numunesine göre daha yüksek dayanım göstermiştir. En yüksek dayanım %5 linyosülfonat içeren KL+5LS-7 numunesinde görülmüştür. %1' lik linyosülfonat katkısı ilavesinden sonraki içeriklerde, açık hava koşullarındaki numuneler katkı oranının artmasıyla birlikte dayanımlarını arttırmıştır. Linyosülfonat ilavesi kaolin zemin için açık hava koşullarında karşılaştırıldığında, en yüksek dayanımı veren %5 linyosülfonat ilavesi ile kaolin zeminin dayanımını aynı koşullardaki katkısız kaolin zemin dayanımına göre 4,25 kat arttırmıştır. Katkısız kaolin zeminin açık hava koşullarında dayanımı 718.7 kPa iken, %5' lik bir linyosülfonat katkısı ilavesi ile 3058.4 kPa'a kadar çıkabilmiştir.



Şekil 4.32 Belirlenen 7 gün kür süresi için farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerde sıcaklık değişiminin dayanıma etkisinin sütun grafiği

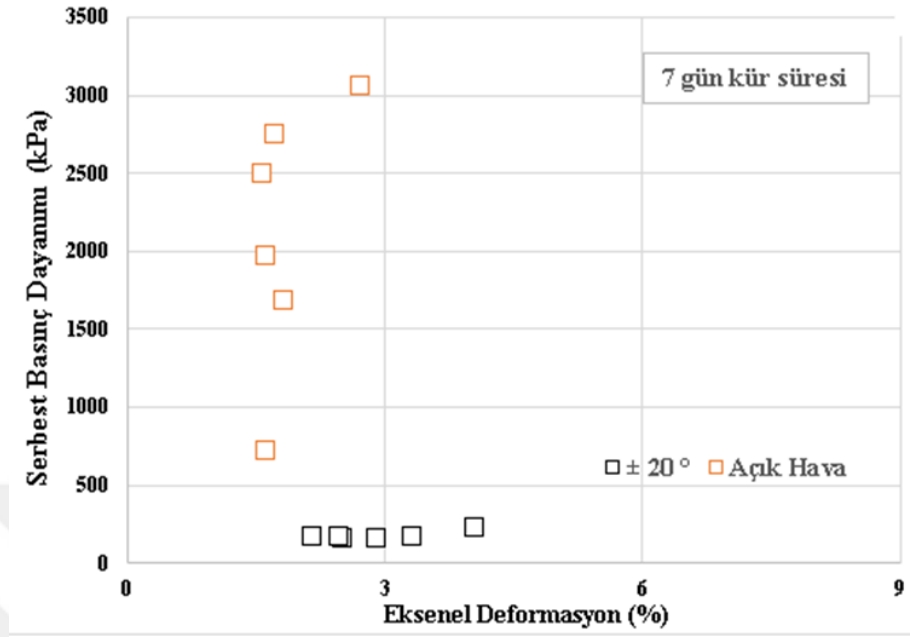
Şekil 4.33 açık hava koşullarında farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerin dayanım ve deformasyon ilişkisinin dağılım grafiğini vermektedir. Tüm

katkı oranlarında dayanımın arttığı görülmektedir, aynı zamanda tüm katkı oranları için açık hava koşullarında deformasyon davranışı kaolin zemine göre farklılık göstermiştir. Bu koşullarda, katkı oranlarının tamamı için deformasyon kabiliyeti katkısız kaolin zemine göre artmıştır. Fakat katkılı ve katkısız tüm numuneler için açık hava koşullarında eğriler, normal koşullarda bekletilen numunelerden farklı davranıştır. Örneğin, açık havada bırakılan %5 linyosülfonat içeren kaolin zemin numunesinin 1 birimlik deformasyon yapması için gereken kuvvet normal koşullardaki malzemeye göre daha fazladır. Yani malzeme rijit davranış göstermiştir.

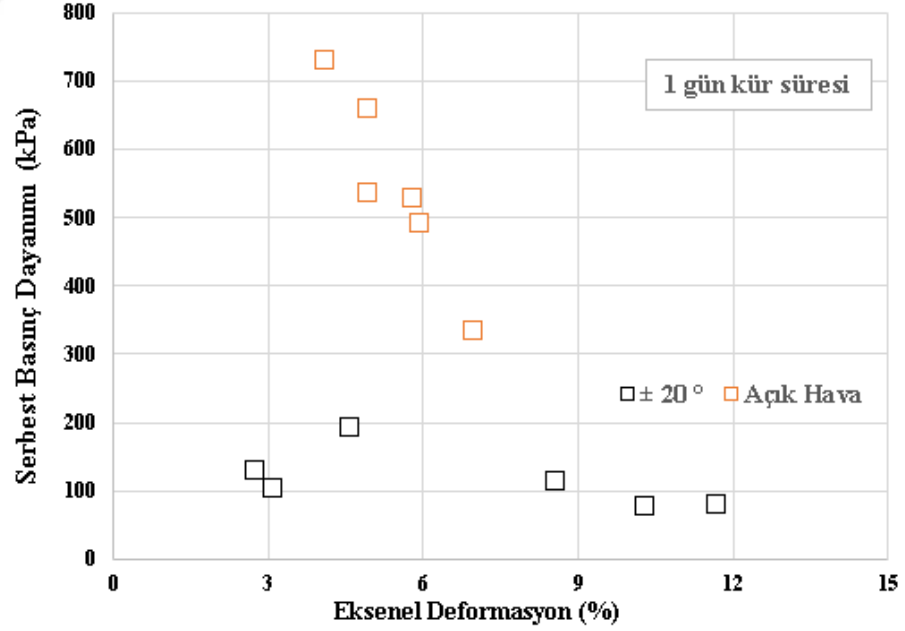


Şekil 4.33 Belirlenen 7 gün kür süresi için farklı oranlarda linyosülfonat içeren kaolin zeminlerde açık hava koşullarında dayanım-eksenel deformasyon dağılım grafiği

1 ve 7 günlük kür sürelerinde sıcaklık farkının oluşturduğu deformasyon değişimleri de incelenmiştir. Her iki kür süresinde de $\pm 20^{\circ}\text{C}$ kür koşullarında numunelerin daha yüksek deformasyonlar gösterdiği açıktır. Açık hava numunelerinde deformasyonlar azalarak numuneler gevrek davranışa eğilimli hale gelmiştir.

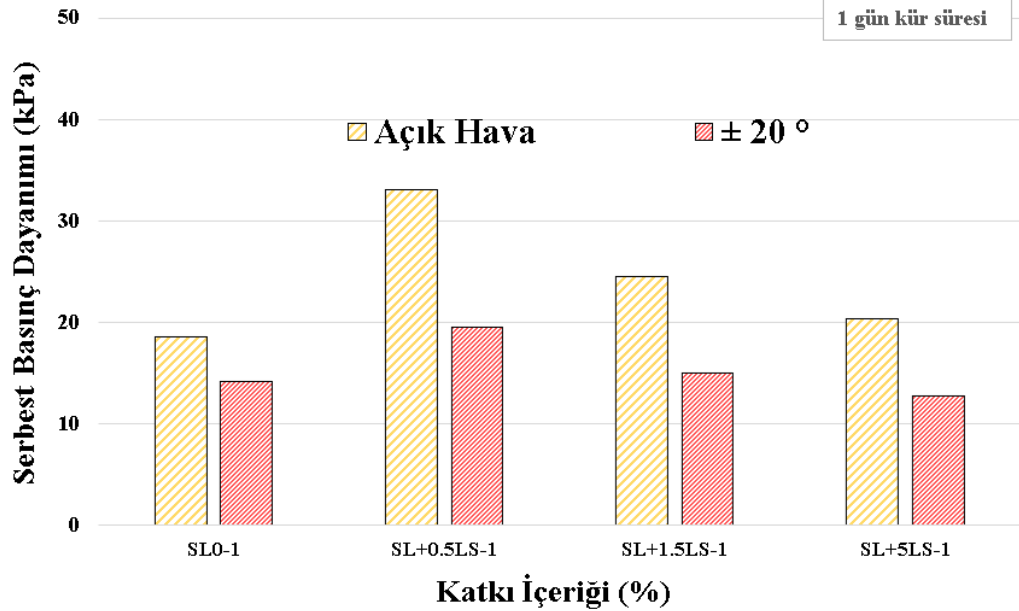


Şekil 4.34 7 gün kür süresinde sıcaklık değişimine bağlı deformasyonlar



Şekil 4.35 1 gün kür süresinde sıcaklık değişimine bağlı deformasyonlar

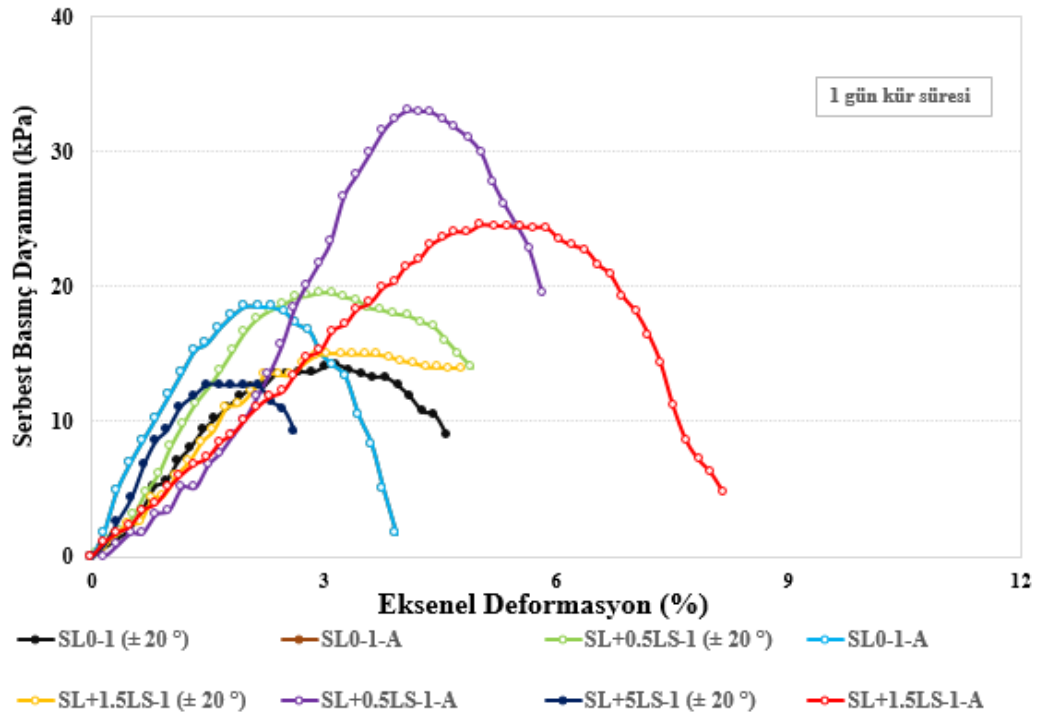
Aynı koşullarda, farklı oranlarda linyosülfonat içeren silt zeminler için de sıcaklık karşılaştırmaları yapılmıştır. Şekil 4. 36, 4.37, 4.38 ve 4.39’da verilmiştir. Açık hava koşulları ile normal kür koşulları karşılaştırıldığında, 1 günlük kür süresi içerisinde katkılı ve katkısız tüm numunelerde dayanım açık hava koşullarında daha yüksek sonuçlar vermiştir. En yüksek dayanımı en düşük katkı oranı olan %0,5 linyosülfonat içeren silt zemin numunesi göstermiş, artan katkı oranlarında dayanım düşmeye devam etmiştir. Tüm katkı oranlarındaki dayanım, saf zemin numunesinden daha fazladır.



Şekil 4.36 Sıcaklık değişimine göre 1gün kür süresinde farklı linyosülfonat katkısı oranlarında silt zeminlerin dayanımları

Şekil 4.37 açık hava koşullarında farklı oranlarda linyosülfonat içeren zeminlerin dayanım- eksenel deformasyon grafiğini vermektedir. %0,5 ve %1,5 linyosülfonat içeren silt zemin numuneleri, açık hava koşullarındaki 1 günlük kür sonunda, katkısız silt zemin numunesine göre daha yüksek dayanım göstermekle birlikte, deformasyon kabiliyetlerini arttırmayı başarmıştır. Buna rağmen %5 linyosülfonat içeren silt zemin numunesi, daha yüksek dayanım gösterirken, silt zemine göre daha düşük deformasyonlar göstermiştir. Açık hava koşullarındaki

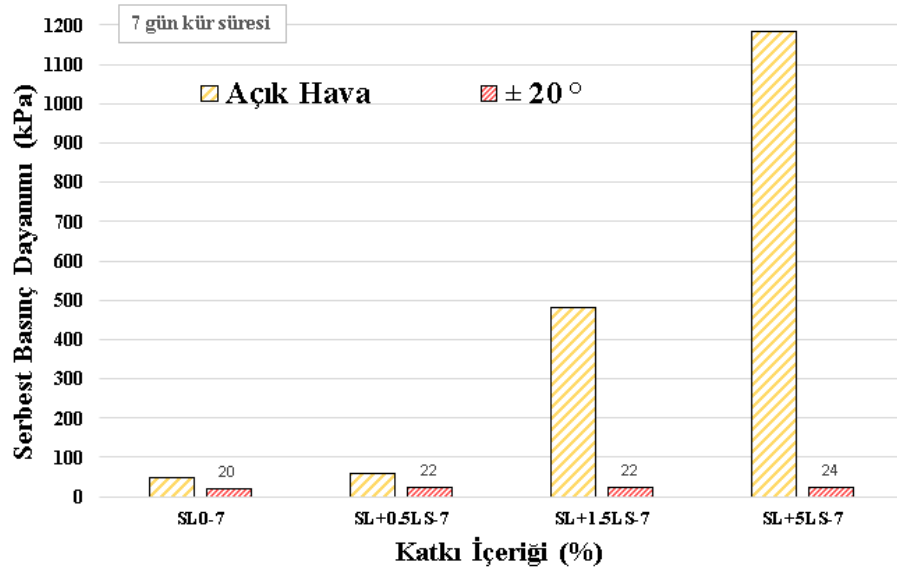
numuneler ile normal koşullar altındaki silt zemin numuneleri karşılaştırıldığında, açık hava koşullarındaki tüm katkılı numuneler normal kür koşullarına göre daha yüksek dayanımlara karşılık daha yüksek deformasyon gösterebilmiştir. Yalnızca $\pm 20^\circ\text{C}$ ' de katkısız silt zemin numunesi, açık hava koşullarındaki silt zemine göre daha düşük dayanımda, daha yüksek deformasyon göstermiştir.



Şekil 4.37 Açık hava koşullarında farklı linyosülfonat katkı oranlarında silt zeminlerin dayanım-eksenel deformasyon dağılım grafiği

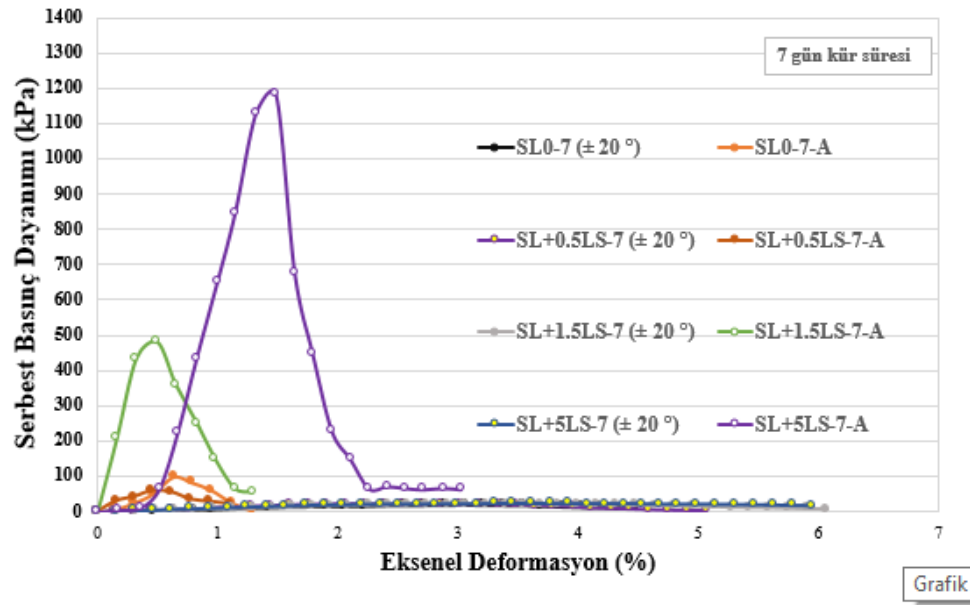
Aynı koşullarda 7 gün kür süresinde silt zemin numuneleri değerlendirilmiştir. Şekil 4.38 açık hava koşullarında ve $\pm 20^\circ\text{C}$ kür odasında bekletilen silt zemin numunelerinin dayanımlarının karşılaştırmasını göstermektedir. Açıkça görüldüğü üzere, tüm zemin numuneleri için açık hava koşullarında zeminler, diğer kür koşullarına göre ciddi miktarda dayanım artışı göstermiştir. Ayrıca, açık hava koşullarında bekletilen numunelerin dayanımında, katkı oranının etkisi görülmektedir. Katkı oranı arttıkça, tüm numuneler için geçerli olarak dayanım da artmıştır. En yüksek dayanımı %5 linyosülfonat içeren ve açık

hava koşullarında bekletilen numune vermiştir. Açık hava koşullarında 1 gün kür süresinde bekletilen %5 linyosülfonat içeren silt numunesi ise, katkılı zeminler arasında en düşük dayanımı vermiştir. Bu durumda %5 linyosülfonat katkılı silt zemin mukavemet kazanımını ilk 7 günde gerçekleştirmiştir. Aynı şekilde diğer katkı içeren silt zemin numuneleri ve katkısız silt zemin numunesi de mukavemet kazanımını ilk 7 günde gerçekleştirmiştir. 1 günlük kür süresinde, açık havada bekletilen numunelerde önemli miktarda artış gerçekleşmezken, 7 günlük kür süresinde ciddi miktarda dayanım kazanımı olmuştur. Örneğin en yüksek dayanım görülen %5 linyosülfonat içeren normal kür koşullarındaki S+5LS-7 numunesinin dayanımı 24 kPa iken, aynı oranda linyosülfonat içeren 7 günlük kür süresinde açık havada bekletilen S+5LS-7-A numunesi 1183.1 kPa kadar dayanıma ulaşmıştır. 7 günlük kür süresinde %5 linyosülfonat içeren silt zemin numunesi için normal kür koşullarında elde edilen dayanım ile açık hava koşullarında elde edilen dayanım karşılaştırıldığında dayanımda 49,3 kat artış yaşanmıştır. Açık hava koşullarında farklı kür sürelerinde elde edilen dayanımlar %5 linyosülfonat içeren silt zemin numunesi için karşılaştırıldığında ise 7 günlük kür süresinde dayanım 58,3 kat artmıştır.



Şekil 4.38 7 gün kür için sıcaklık değişimine göre farklı LS katkılarında silt zeminlerin dayanımı

Şekil 4.39 bahsedilen iki farklı kür koşullarındaki farklı linyosülfonat içeriklerindeki silt zemin numunelerinin 7 günlük kür süresinde gösterdiği dayanım-deformasyon grafiğini vermektedir. Açık hava koşullarındaki tüm numuneler daha yüksek dayanım göstermelerine rağmen, $\pm 20^\circ\text{C}$ kür koşullarına göre daha düşük deformasyonlar göstermişlerdir. Fakat aynı numunelerin birim deformasyonu için uygulanması gereken kuvvet normal koşullardakinden daha yüksektir.

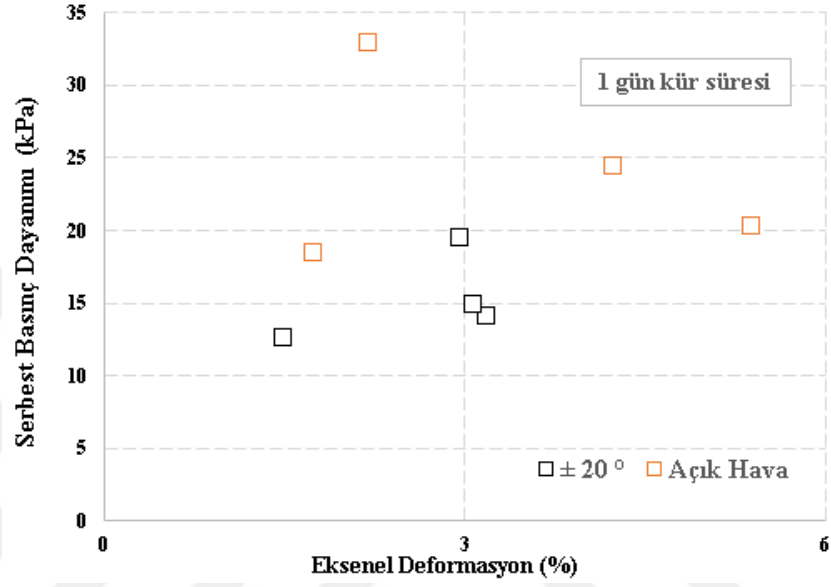


Şekil 4.39 Farklı kür koşullarında farklı linyosülfonat katkıları içeren silt zeminlerin dayanımlarının dayanım- eksenel deformasyon dağılım grafiği

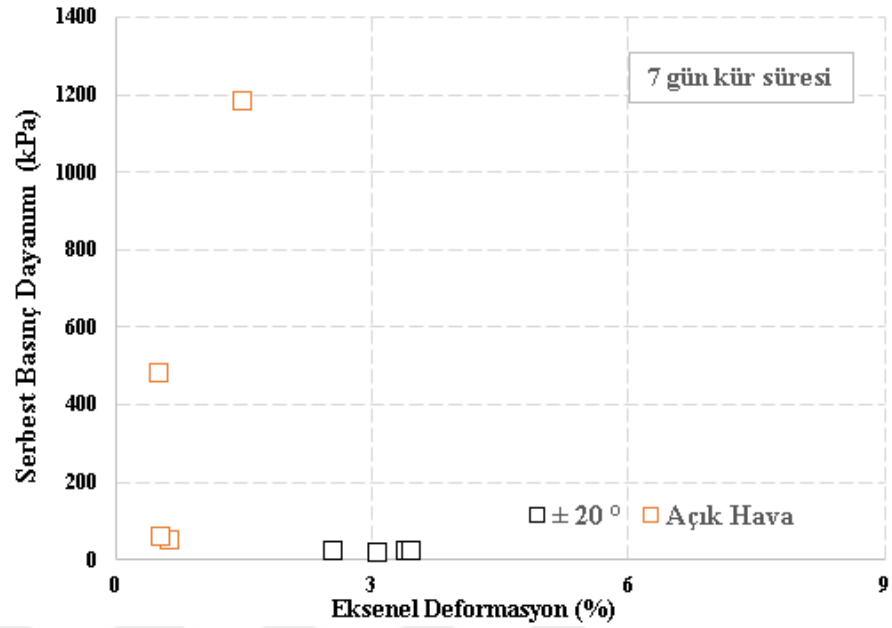
Aynı zamanda bu numunelerin nokta deformasyon grafikleri de aşağıda verilmiştir. Katkılı ve katkısız numuneler, katkı oranlarına bakılmaksızın sıcaklık değişimi gerçekleştiğinde deformasyonlarındaki değişim açısından incelenmiştir. 1 gün kür süresinde açık hava numuneleri, kaolin içeren numunelerden farklı olarak daha yüksek deformasyonlar göstermiştir (Şekil 4.40).

Şekil 4.41'de 7 gün kür süresinde linyosülfonat katkısı varlığında silt zemin numunelerinin kür sıcaklığı değiştirildiğinde deformasyon tepkisi gösterilmiştir. Bu

grafığe göre 1 gün kür süresinden farklı olarak açık hava numuneleri çok düşük deformasyonlarda kırılma gerçekleştirmiştir. Bu durumda kür sıcaklığı ve kür süresi deformasyon tepkisinde etkili olmuştur.



Şekil 4.40 1 gün kür süresinde silt numunelerin sıcaklık farkının nokta deformasyon grafiği



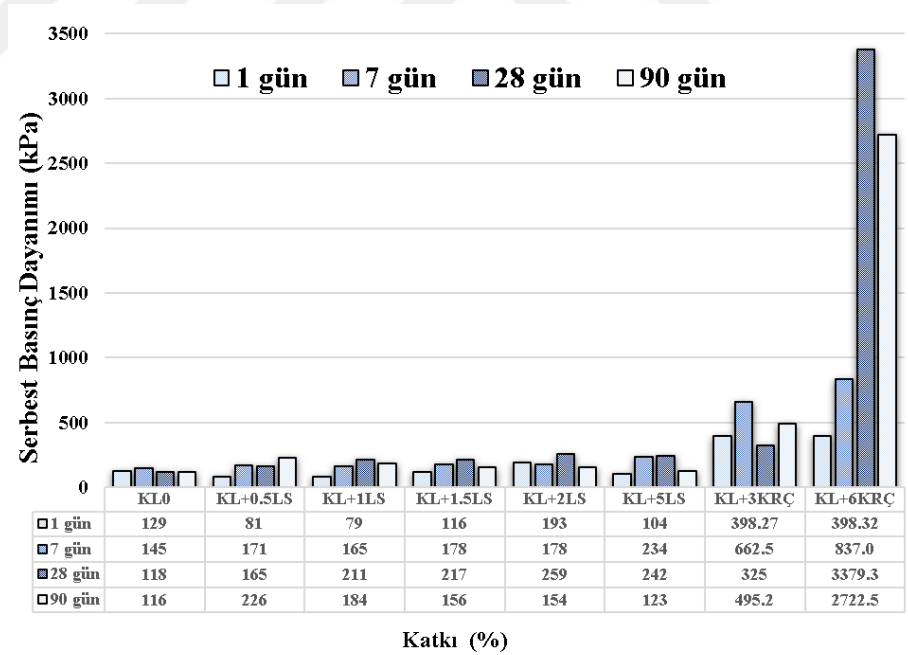
Şekil 4.41 7 gün kür süresinde silt numunelerin sıcaklık farkının nokta deformasyon grafiği

4.1.4. Katkı çeşidinin etkisi

Bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda, etkisi kanıtlanmış fakat stabilizasyonu sırasında olumsuz etkileri olan geleneksel bir katkı olan kireç yerine seçilen ve alternatif olacağı düşünülen çevre dostu ve atık malzeme olarak linyosülfonat katkısının etkisi karşılaştırılarak incelenmiştir. Kaolin zeminlerde %0,5, 1, 1.5, 2 ve %5 linyosülfonat ile kirecin kaolin zeminlerde genel olarak kullanıldığı oranlar olan %3 ve %6 oranı seçilerek, bu katkı oranlarında katkı çeşitlerinin etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 4.42 katkı çeşitlerine göre 1,7,28 ve 90 gün süreyle $\pm 20^{\circ}\text{C}$ kür odasında bekleyen ve yalnızca kireç katkısı ilave edilmiş ve yalnızca linyosülfonat katkısı ilave edilmiş kaolin zeminlerde katkı çeşitlerinin dayanıma etkisini göstermektedir. Linyosülfonat kullanımının geleneksel katkıların olumsuz etkilerini bertaraf edebilmesi açısından alternatif olup olamayacağını değerlendirmek amacıyla, kaolin zeminlerde kireç

kullanılarak elde edilen dayanımlar ile, linyosülfonat katkısı kullanılarak elde edilen dayanımları karşılaştırmaktadır.

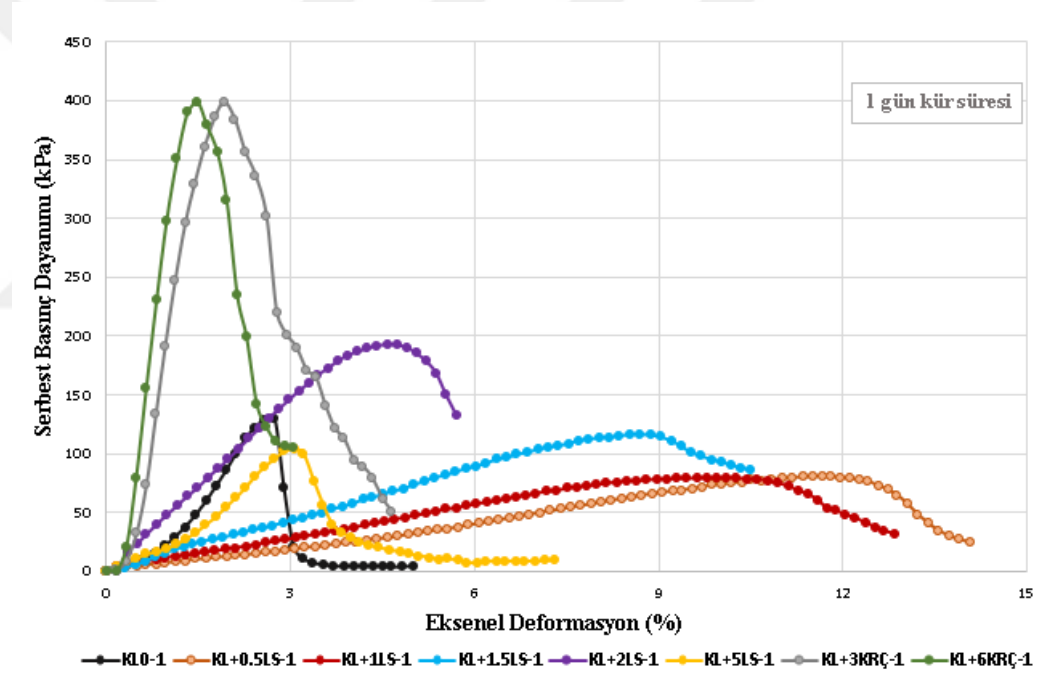
Şekil 4.42’de katkı malzemelerinin dayanımları karşılaştırıldığında, linyosülfonat katkısının kullanıldığı tüm oranlarda ve kür sürelerinde, aynı koşullardaki kireç katkısının sağladığı dayanımları sağlayamadığı görülmektedir. Dayanım açısından normal kür koşullarında değerlendirildiğinde, kaolin zeminlerde linyosülfonat katkısının kireç katkısına alternatif bir katkı olamayacağı, beklenen dayanımlara ulaşamadığı görülmüştür. Bunun yanı sıra kireç katkısı 1 günlük kür süresinde dahi 3,09 kat dayanımda artış sağlamıştır. %6 oranında kireç katkısı kaolin zeminde 28 ve 90 günlük kür sürelerinde 118 ve 116 kPa dayanım veren katkısız kaolin zeminin dayanımını sırasıyla 3379.3 kPa ve 2722.5 kPa’ya çıkarmıştır.



Şekil 4.42 Kireç ve linyosülfonat katkılarının kaolin zeminlerde 1,7, 28 ve 90 gün kür sürelerinde kullanımının dayanımlarının karşılaştırılması

Sabit kür sürelerinde kireç ve linyosülfonat katkılı ve katkısız kaolin zeminlerin serbest basınç dayanımları aynı zamanda dağılım grafikleriyle de

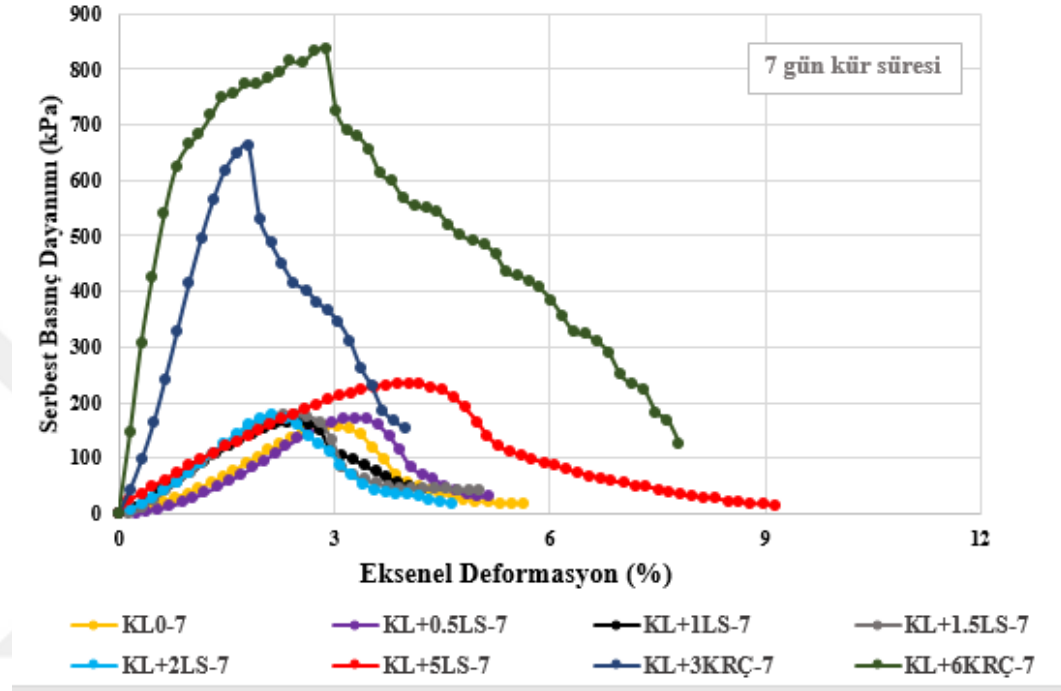
incelenmiştir. Şekil 4.43 farklı katkı çeşitlerinin kaolin zeminler üzerinde 1 gün kür süresiyle birlikte dayanım ve deformasyon davranışına etkisinin dağılım grafiğini göstermektedir. %3 ve %6 kireç içeren KL+3KRÇ-1 ve KL+6KRÇ-1 numunelerinin, bir birimlik deformasyon yapması için gereken kuvvetin linyosülfonat katkısı içeren ve içermeyen kaolin zeminlere kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, kireç katkılarının kaolin zemine sağladığı rijitliğin diğer malzemeye göre daha fazla olduğu da görülmektedir. Ancak linyosülfonat katkısı içeren numuneler, kireç katkısı içeren numunelere göre daha fazla deformasyona ulaşmıştır.



Şekil 4.43 1 günlük kür süresi için farklı katkı çeşitlerinin kaolin zeminlerde dayanım-eksenel deformasyon davranışına etkisi

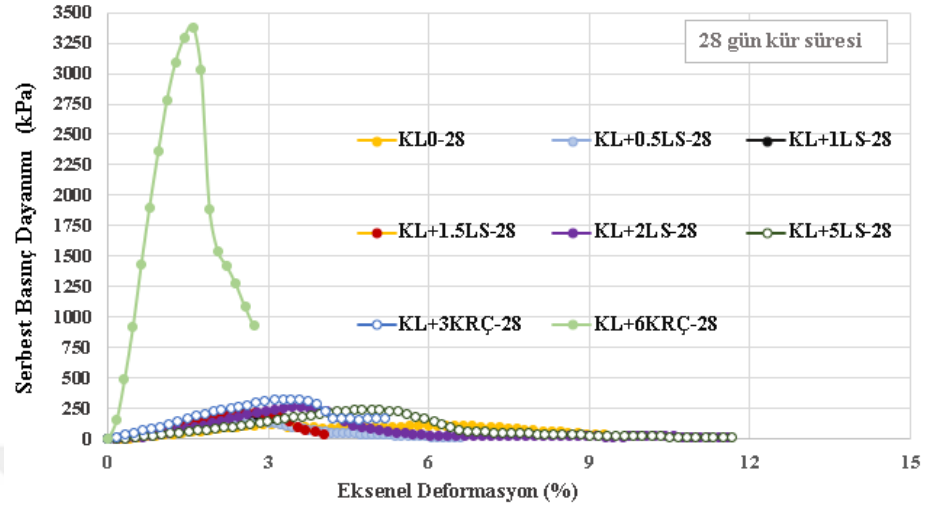
Şekil 4.44 ise 7 günlük kür süresi koşullarında farklı katkı çeşitlerinin dayanım ve deformasyon grafiğini göstermektedir. Bu grafiğe göre, katkısız kaolin zemin numunesi KL0-7 ve linyosülfonat katkılı kaolin numuneleri, 1 günlük kür süresinde olduğu gibi KL+3KRÇ-7 ve KL+6KRÇ-7 numunelerine göre daha düşük dayanım, daha fazla deformasyon göstermiştir. Kireç katkılı numunelerin

dayanımları daha yüksek olmasına rağmen, deformasyon kabiliyetleri diğer numunelere göre azdır.

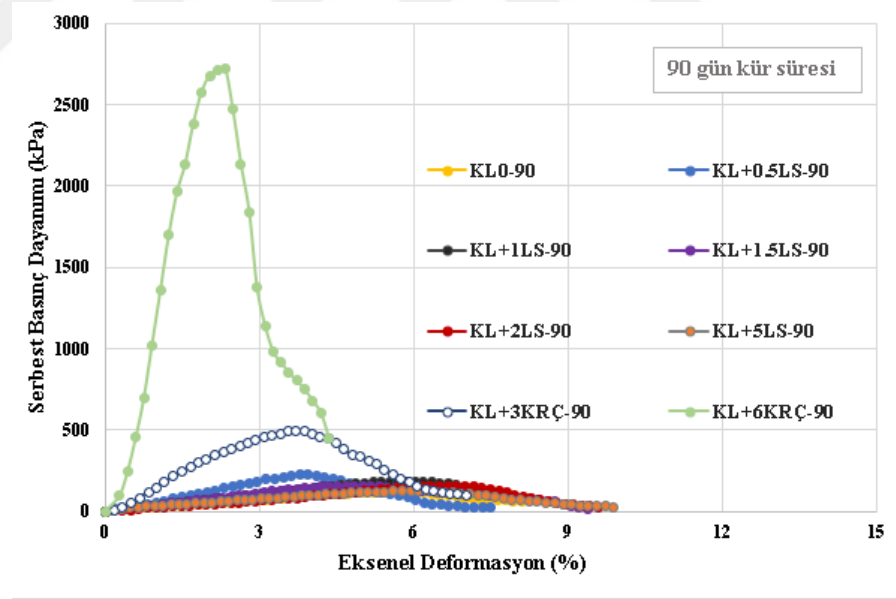


Şekil 4.44 7 günlük kür süresi için farklı katkı çeşitlerinin kaolin zeminlerde dayanım-eksenel deformasyon davranışına etkisi

Aynı zamanda linyosülfonat katkıli numunelerin aksine kireç katkıli numuneler pik dayanıma ulaştıktan sonra gevrek kırılma gerçekleştirmiştir. Şekil 4.45 ve 4.46 incelendiğinde, kireçli katkıların 28 ve 90 günlük kür sürelerinde de öncekilere benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Yalnızca %3 kireç katkıli numunelerin deformasyonları linyosülfonat katkıli numunelere yaklaşmıştır. %6 kireç içeren numuneler 28 ve 90 gün kür sürelerinde yine gevrek kırılmış, aynı zamanda dayanımları en yüksek numunelerken en düşük deformasyonları gösteren numuneler bunlar olmuştur.

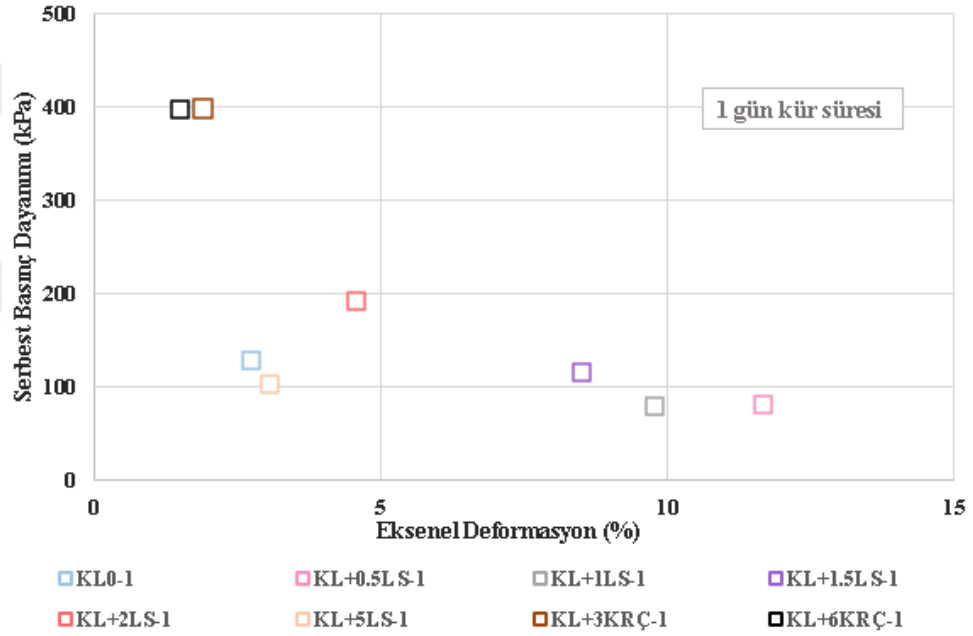


Şekil 4.45 28 günlük kür süresi için farklı katkı çeşitlerinin kaolin zeminlerde dayanım- eksenel deformasyon davranışına etkisi



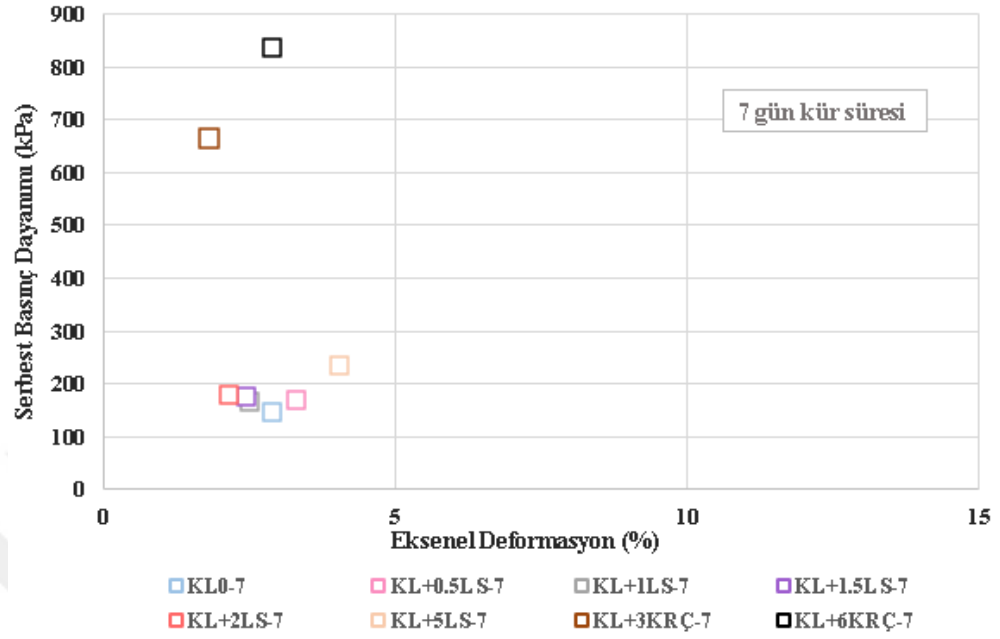
Şekil 4.46 90 günlük kür süresi için farklı katkı çeşitlerinin kaolin zeminlerde dayanım- eksenel deformasyon davranışına etkisi

Aynı zamanda kireç katkısı ve linyosülfonat katkısı içeren kaolin zemin numunelerinde, sabit kür sürelerinde serbest basınç dayanımlarına karşılık nokta deformasyon grafikleri incelenmiştir. Şekil 4.47’ de 1 gün kür süresinde katkı çeşitlerinin deformasyonları görülmektedir. Buna göre, kireç içeren numuneler linyosülfonat katkılı numunelerden çok daha düşük deformasyon aralığında kırılmıştır. Linyosülfonat içeren numunelerin deformasyonu %12’ye kadar çıkarken, yalnızca kireç içeren numuneler %2 ila %3 aralığında deformasyon göstermiştir.



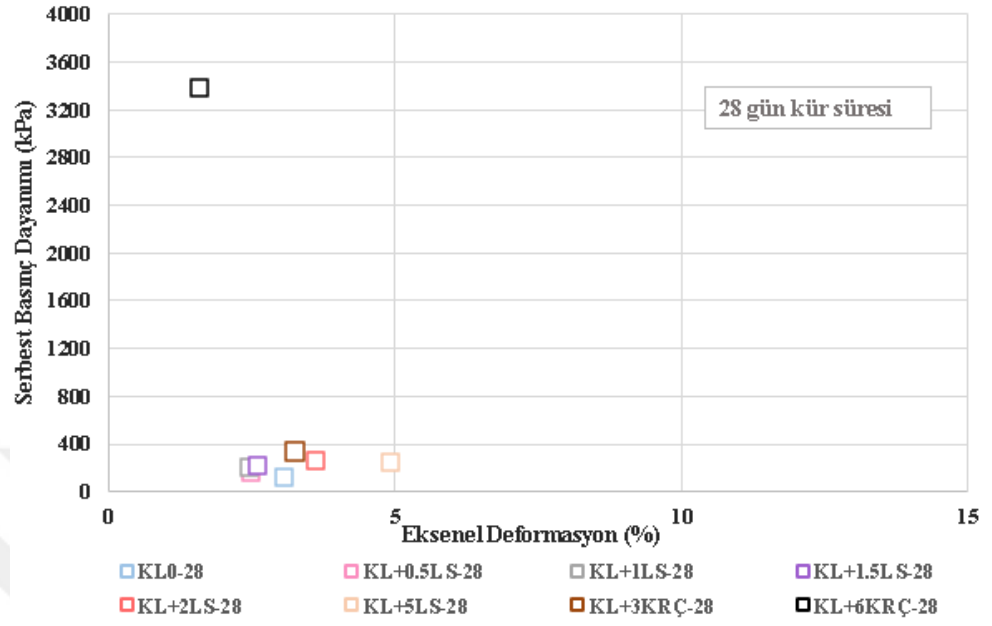
Şekil 4.47 1 gün kür süresinde kireç ve linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin nokta deformasyon grafiği

Şekil 4.48 katkı çeşidine göre 7 günlük kür süresi içerisinde gerçekleşen deformasyon değişimini göstermektedir. Bu grafiğe göre, tüm numuneler hemen hemen aynı deformasyonları göstermiştir. Genellikle %3 aralığında deformasyonlar görülürken, % 5 linyosülfonat içeren kaolin numunesi diğer numunelerden farklı olarak daha yüksek deformasyon gösterebilmiştir. Ancak, 7 gün kür süresinde katkı çeşidi deformasyon tepkisinde etkili olmamıştır.

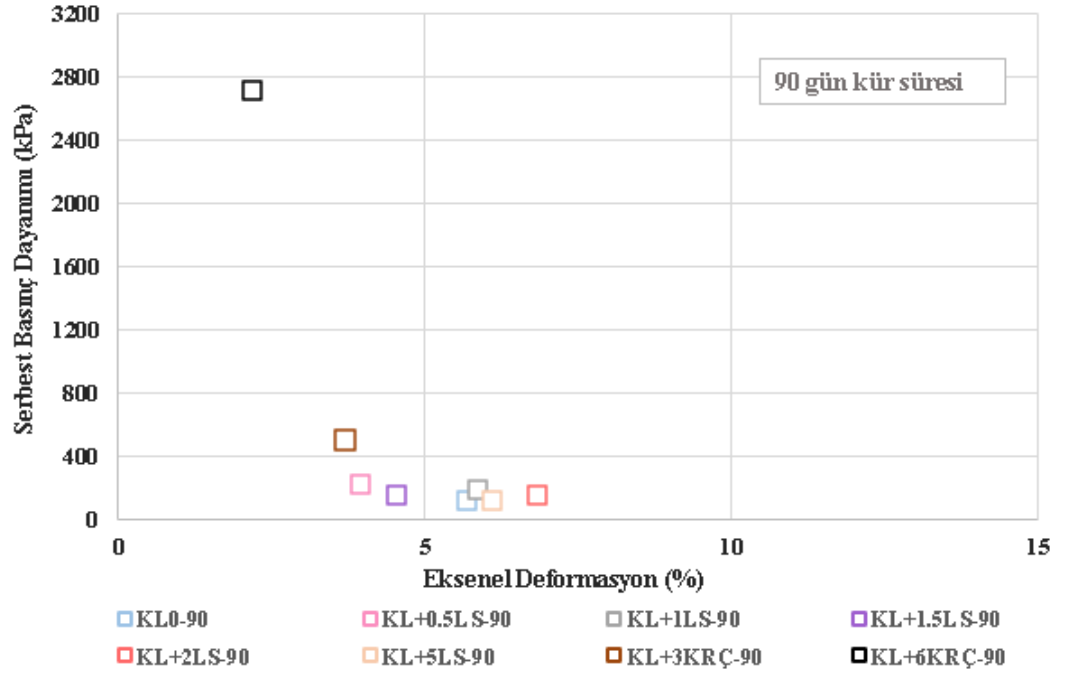


Şekil 4.48 7 gün kür süresinde kireç ve linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin nokta deformasyon grafiği

Şekil 4.49 ve Şekil 4.50 sırasıyla 28 ve 90 gün süreyle kürlenmiş farklı katkı çeşitleri içeren kaolin zemin numunelerinin deformasyon tepkisini göstermektedir. 28 gün kür süresinde %6 kireç içeren kaolin zemin numunesi diğer tüm numunelere göre çok erken deformasyonda kırılmıştır. Diğer katkılı ve katkısız numuneler %3-%5 deformasyon aralığı gösterirken, %6 kireç içeren numune yaklaşık %1 deformasyon göstermiştir. Daha önceki kür sürelerinde %3 kireç içeren numuneler %6 kireç içeren numunelere yakın deformasyon gösterirken 28 gün kür süresinde bu numune linyosülfonat katkılı numunelerin deformasyonuna yaklaşmıştır. 90 gün süreyle bekletilen numunelerin sonuçları da benzerdir. %6 kireç içeren numune en erken deformasyonda kırılırken, diğer katkı oranı ve çeşitlerinde hazırlanan numuneler %3 ve %5 eksenel deformasyon göstermiştir.



Şekil 4.49 28 gün kür süresinde kireç ve linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin nokta deformasyon grafiği

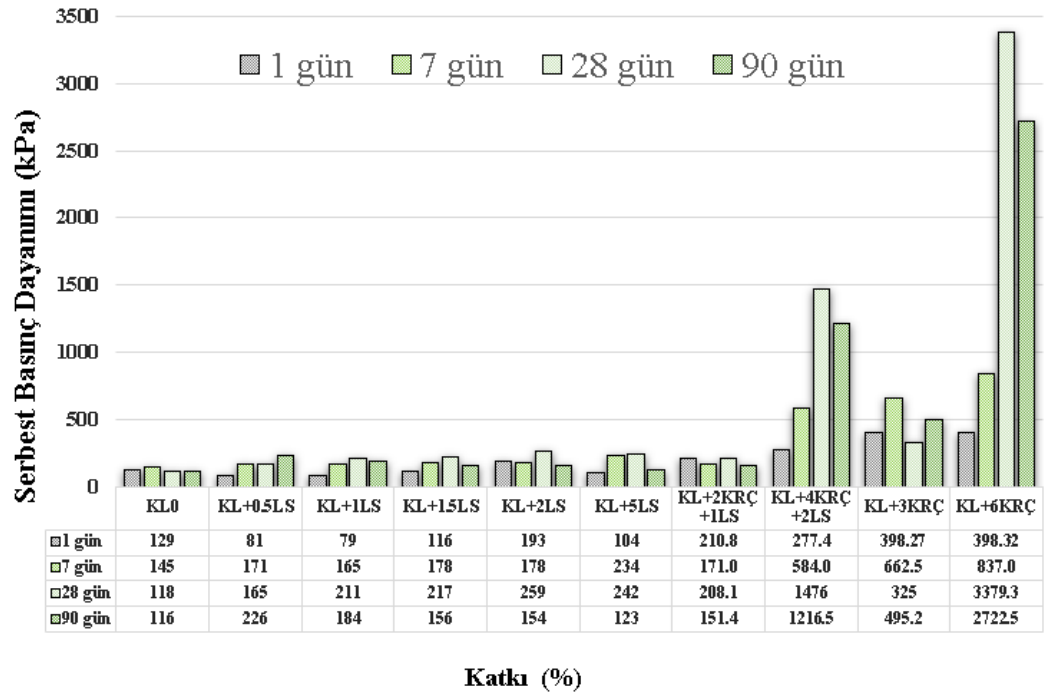


Şekil 4.50 90 gün süreyle kürlenen kireç ve linyosülfonat katkılı kaolin numunelerinin nokta deformasyon grafiği

4.2. Linyosülfonat ve Kirecin Beraber Kullanımı ile Stabilize Edilen Kaolin Zeminlerin Serbest Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

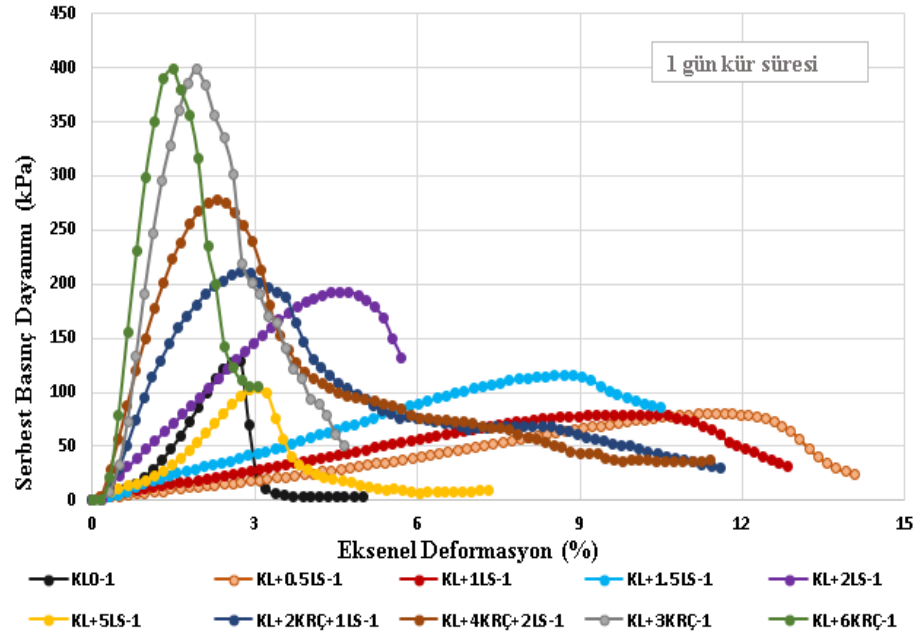
Yalnızca linyosülfonat katkısı içeren kaolin zemin numunelerinin serbest basınç dayanımından yeterli verim alınamadığından ve kireç kullanımı sırasında ve sonrasında oluşan problemler nedeniyle, kullanılan kireç miktarını düşürerek kirecin olumsuz etkilerini azaltmak ve düşürülen kireç miktarı kadar linyosülfonat katkısı ilave edilerek benzer dayanımlara ulaşılması amaçlanmıştır. Bu nedenle, %3 kireç katkısı %2 kireç ve %1 linyosülfonat katkısı olacak şekilde, %6 kireç katkısı %4 kireç ve %2 linyosülfonat katkısı olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu numuneler $\pm 20^{\circ}\text{C}$ kür odasında 1,7, 28 ve 90 gün bekletilerek serbest basınç dayanımları ölçülmüştür. Farklı katkıların birlikte kullanımlarının serbest basınç dayanımları ile, katkılı ve katkısız tüm deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.51' de kullanılan tüm katkı malzemelerinin 1,7, 28 ve 90 gün kür sürelerinde serbest basınç dayanımları verilmiştir. Bu grafiğe göre, KL+2KRÇ+1LS numunelerinin linyosülfonat katkılı kaolin zemin numunelerinden daha fazla dayanım göstermemiş, dolayısıyla beklenen işlevi yerine getirmemiştir. %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren numunelerinin ise 28 ve 90 günlük kür sürelerinde %3 kireç içeren numunelerden daha yüksek dayanımlar, %6 kireç içeren numunelerden daha düşük dayanımlar verdiği fakat linyosülfonat içeren numunelerden de daha fazla serbest basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür. KL+4KRÇ+2LS-28 numunesi optimum dayanımı 28 günlük kür süresinde kazanmıştır. Dayanım açısından bakıldığında KL+4KRÇ+2LS-28 ve KL+4KRÇ+2LS-90 numuneleri linyosülfonat katkılı numunelere ve %3 kireç içeren numunelere kıyasla daha olumlu sonuç vermiştir. Farklı iki katkının birlikte kullanımı sonucunda ortaya çıkan serbest basınç dayanımlarının artışını numuneye linyosülfonat katkısının değil kireç katkısının kazandırdığı düşünülmüştür.



Şekil 4.51 Farklı katkıların serbest basınç dayanımlarının belirli kür sürelerinde karşılaştırılması

1 ve 7 gün kür sürelerinde karşılaştırılan katkı çeşidi grafikleri Şekil 4.52 ve Şekil 4.53’ de verilmiştir. 1 gün kür süresi içerisinde KL+3KRÇ-1 ve KL+6KRÇ-1 numuneleri diğer numunelere göre daha erken deformasyonda, daha yüksek dayanımlarda kırılmıştır. Linyosülfonat katkılı numuneler kaolin zeminin süneklik davranışını korurken, kireç katkılı numunelerin sünek davranıştan uzaklaştığı görülmüştür. Linyosülfonat ve kirecin beraber kullanıldığı numunelerde, malzemenin süneklik davranışı yalnızca kireç kullanılan numunelere benzer davranış göstermiştir.

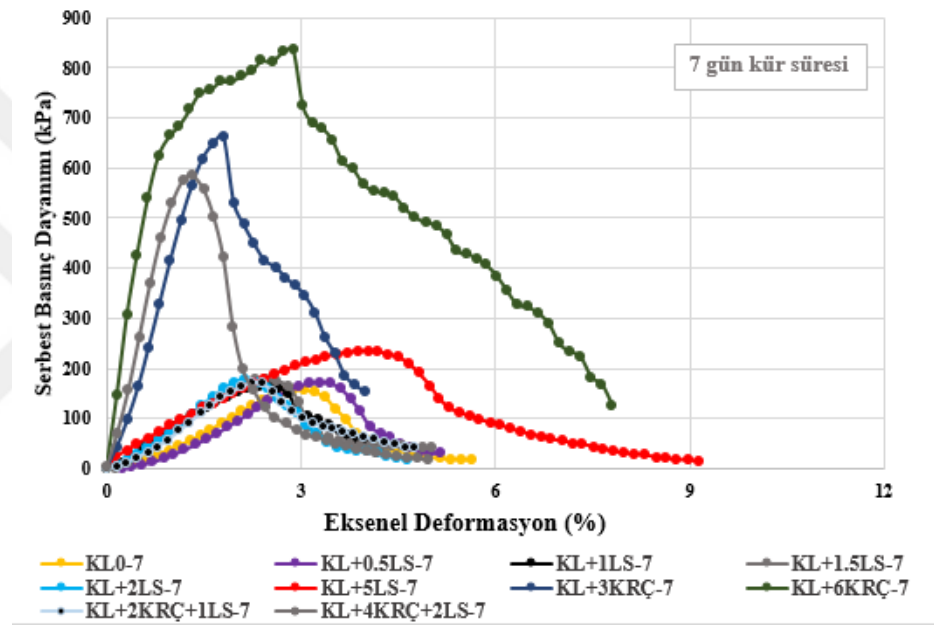


Şekil 4.52 Kireç katkısı ve farklı iki katkı malzemesinin birlikte kullanıldığı kaolin zemin numunelerinin 1 gün kür süresi için dayanım- deformasyon grafiği

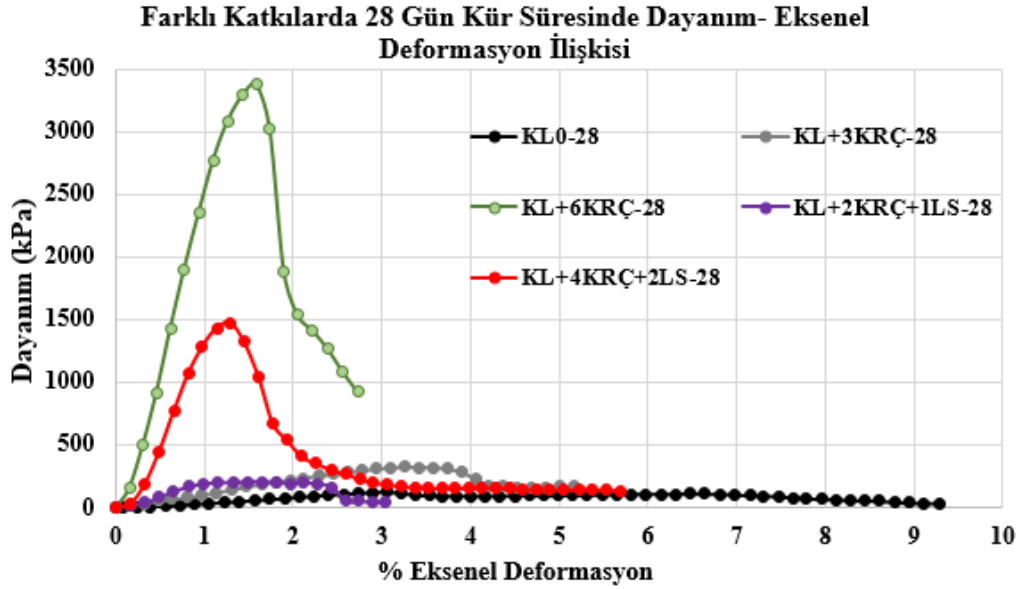
7 gün kür süresi ile bekletilen numunelerde, kür süresinin artmasıyla birlikte genel olarak numunelerin serbest basınç dayanımı artış göstermiştir. Kireç ve linyosülfonat katkılarının birlikte kullanımı sonucunda KL+4KRÇ+2LS-7 numunesi linyosülfonat katkılı numunelere göre yüksek dayanım, yalnız kireç katkılı numunelere göre düşük dayanım göstermiştir. Kireç katkılı numunelerde gevrek davranış görülürken KL+4KRÇ+2LS-7 numunesinin de davranışını içerdiği kireç katkısının yönettiği görülmüştür. Buna karşılık, KL+2KRÇ+1LS-7 numunesi ise diğer linyosülfonat katkılı numuneler ile benzer deformasyon davranışı göstermiştir.

İki farklı malzemenin birlikte kullanımı sonucunda dayanımda gözle görülür artış gösteren fakat yine de %6 kireç katkısının kazandırdığı dayanımdan düşük dayanım veren KL+4KRÇ+2LS-28 ve KL+4KRÇ+2LS-90 numuneleri gösterdikleri deformasyon açısından da incelenmiştir. Optimum dayanım gösterdiği 28 günlük kür süresinde dayanım deformasyon grafiği (Şekil 4.54), kireç içeren

diğer numunelerle karşılaştırılmıştır. KL+4KRÇ+2LS-28 numunesi %6 kireç içeren KL+6KRÇ-28 numunesinin verdiği dayanıma en çok yaklaşan dayanımı sağlamıştır. %6 kireç içeren numunenin dayanımı daha yüksek iken, %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren numunenin deformasyonu ise daha fazladır. En yüksek dayanımları gösteren bu iki numunenin rijitlikleri de daha yüksek ve birbirini takip etmektedir.

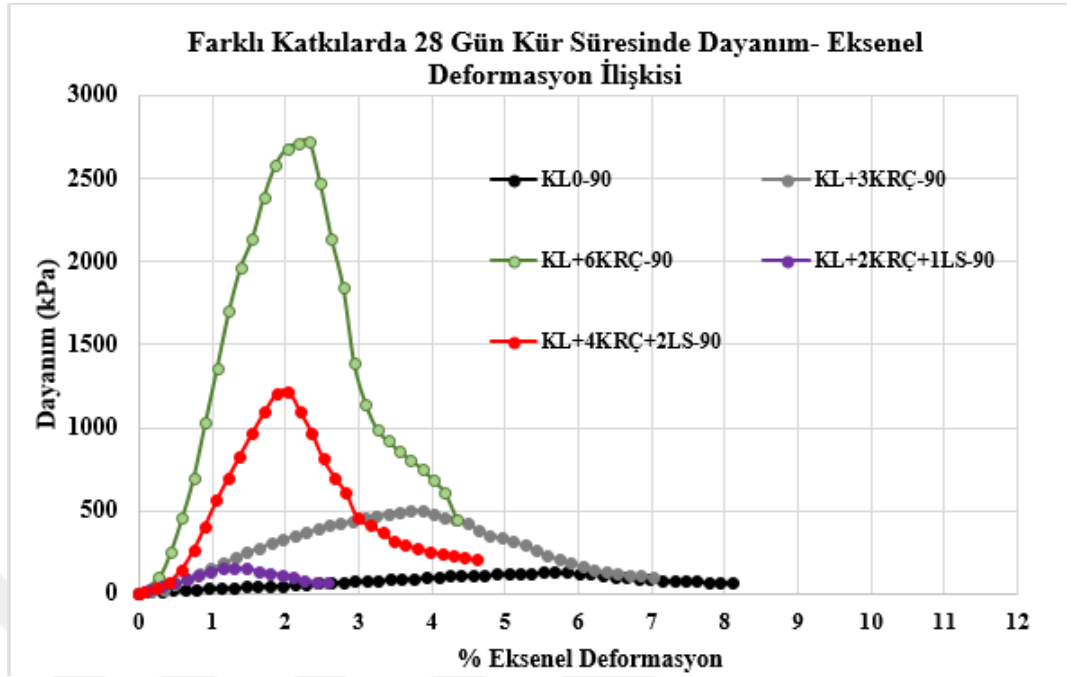


Şekil 4.53 Kireç katkısı ve farklı iki katkı malzemesinin birlikte kullanıldığı kaolin zemin numunelerin 7 gün kür süresi için dayanım- deformasyon grafiği



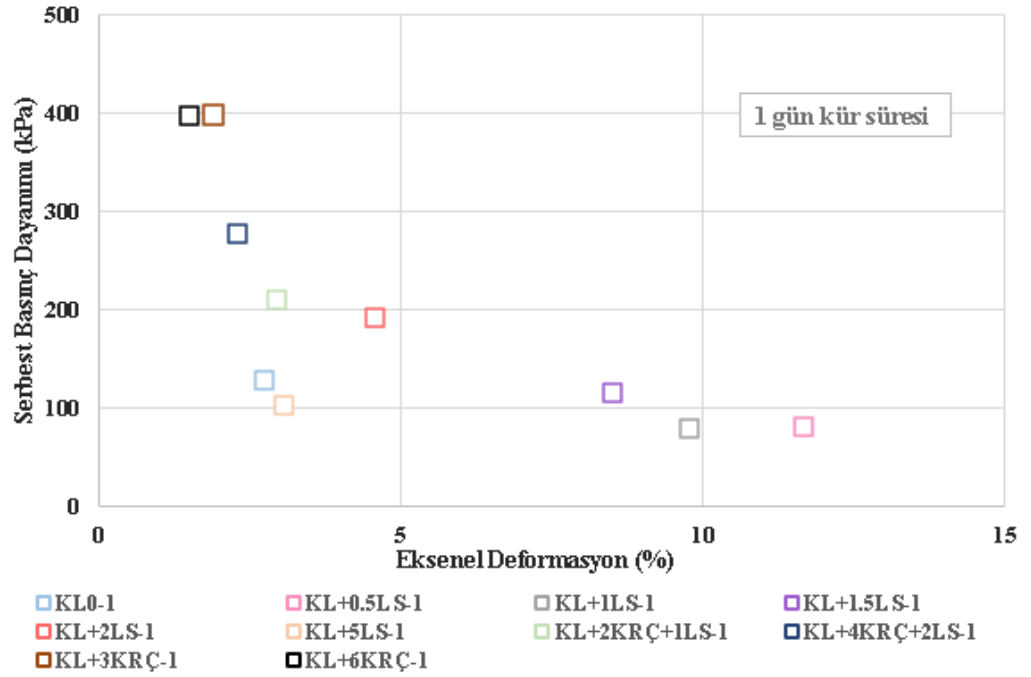
Şekil 4.54 Kireç katkısı kullanılan ve farklı iki katkı malzemesinin birlikte kullanıldığı kaolin zemin numunelerin 28 gün kür süresi için dayanım- deformasyon grafiği

Şekil 4.55'e göre 90 gün kür süresindeki numuneler Şekil 4.54'te verilen 28 günlük kür süresinde gösterilen davranışlara benzer davranış göstermiştir. 90 gün kür süresi için tüm numunelerde deformasyon ve dayanım 28 günlük kür süresinde görülene göre daha azdır. KL+4KRÇ+2LS-28 numunesi %6 kireç içeren kaolin zemin numunesinin dayanımına en yakın dayanımı sağlayabilmiştir. %2 kireç ve %1 linyosülfonat içeren numunenin, kireç katkısının miktarını azaltırken dayanımı arttırması beklentisini yine karşılamadığı görülmüştür. Dolayısıyla bu iki malzemenin bu oranlarda karışımı işe yarar bir sonuç vermemiştir. %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren numunenin deformasyonu daha fazla iken, dayanımı daha önceki verilerde görüldüğü üzere %6 kireç içeren numuneden düşük, diğer katkı oranlarından daha yüksektir. Kireç ve linyosülfonat içeren bu numunelerin eğimi % 6 kireç içeren numuneye göre daha düzgün denilebilir. En yüksek dayanımları gösteren bu iki numunenin rijitlikleri de daha yüksek ve birbirini takip etmektedir.



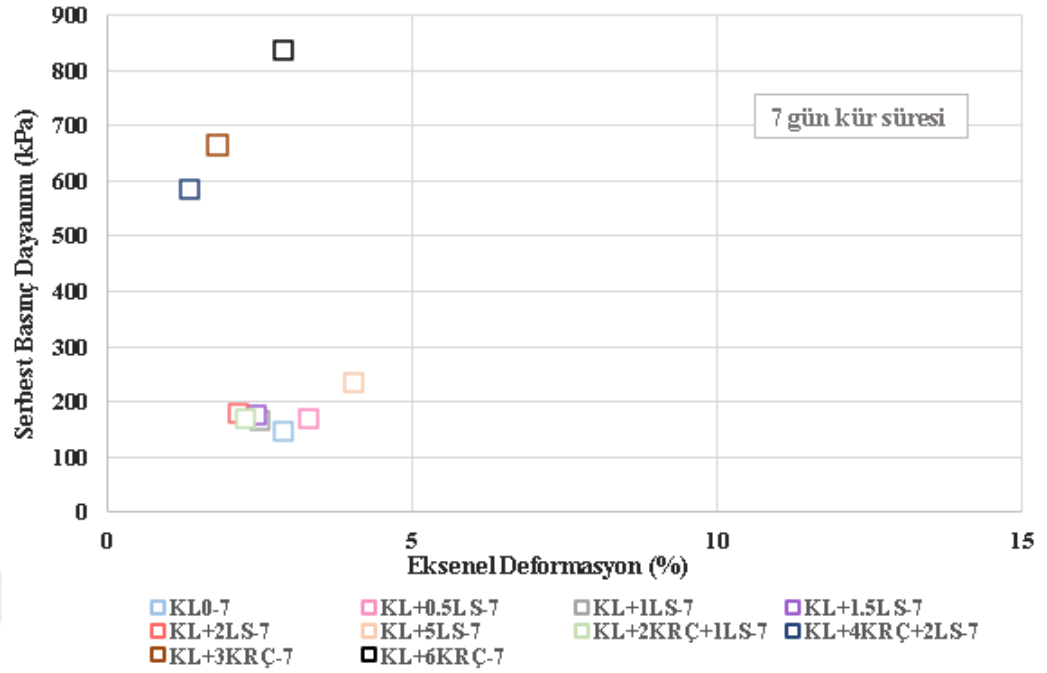
Şekil 4.55 Kireç katkısı kullanılan ve farklı iki katkı malzemesinin birlikte kullanıldığı kaolin zemin numunelerin 90 gün kür süresi için dayanım- deformasyon grafiği

Çeşitli katkıların birlikte kullanıldığı numunelerin nokta deformasyon grafikleri Şekil 4.56, Şekil 4.57, Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da verilmiştir. 1 gün kür süresi sonunda kireç katkılı numuneler %2 deformasyon gösterirken, % 0.5 linyosülfonat katkısı ile birlikte kaolin zemini yaklaşık olarak % 12 deformasyon gösterebilmiştir. Linyosülfonat katkısı içeren numunelerin eksenel deformasyon aralığı %3 ile %12 arasında olmuştur. Linyosülfonat ile kirecin birlikte kullanımı sonucunda deformasyon miktarı yalnız kireç kullanılan örneklere benzer olarak azalmıştır. Bu kür süresinde linyosülfonat katkısının saf kaolin zeminin deformasyonunu arttırmada etkili olduğu söylenebilir (Şekil 4.56).



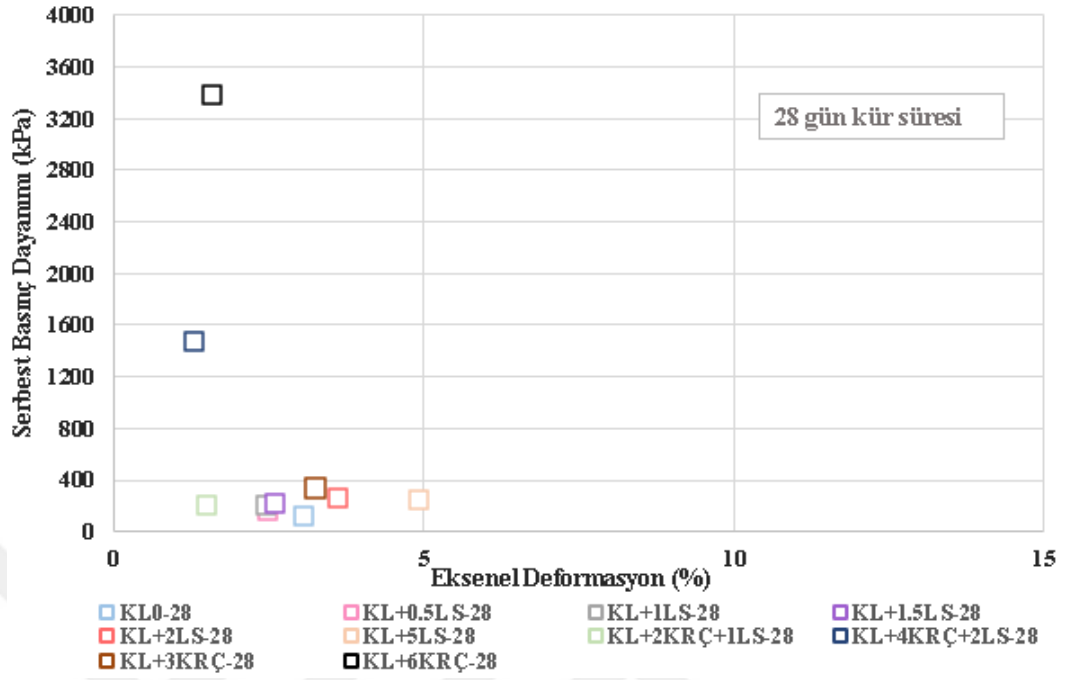
Şekil 4.56 Farklı katkıların birlikte kullanımı ve çeşitli katkılarla hazırlanan kaolin örneklerinin 1 gün kür süresi sonunda nokta deformasyon grafiği

7 gün kür süresi sonunda %2 ile %4 arasında iken kireç katkısı içeren numunelerde bu aralık %1 ile %3 arasında kalmıştır. KL+4KRÇ+2LS-7 numunesi tüm numunelere kıyasla en düşük deformasyonu gösteren numunedir. %0.5 ve %5 linyosülfonat içeren numuneler dışında tüm numuneler katkısız kaolin zemin numunesinden daha düşük deformasyon göstermiştir. (Şekil 4.57).



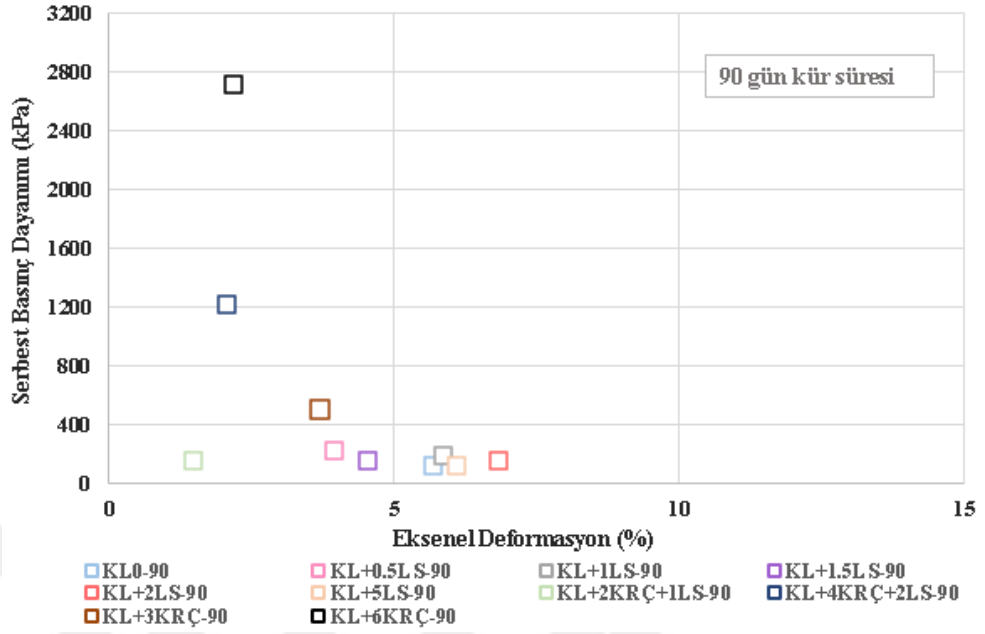
Şekil 4.57 Farklı katkıların birlikte kullanımı ve çeşitli katkılarla hazırlanan kaolin örneklerinin 7 gün kür süresi sonunda nokta deformasyon grafiği

28 gün kür süresi sonunda %3 kireç içeren KL+3KRÇ-28 numunesi linyosülfonat içeren ve katkı içermeyen kaolin zemin numunelerinin deformasyonuna yakın tepki göstermiştir. En düşük deformasyonlar %6 kireç içeren kaolin numunesi ve kireç ve linyosülfonatin beraber kullanıldığı kaolin numuneleri arasında görülmüştür. Bu numuneler %1 civarında eksenel deformasyon gösterirken linyosülfonat içeren numuneler %3 ila %5 arasında eksenel deformasyon göstermiştir. Kür süresinin artması deformasyonların azalmasında etkili olmuştur (Şekil 4.58).



Şekil 4.58 Farklı katkıların birlikte kullanımı ve çeşitli katkılarla hazırlanan kaolin örneklerinin 28 gün kür süresi sonunda nokta deformasyon grafiği

Şekil 4.59’ da 90 gün kür süresine sahip numunelerde nokta deformasyon grafiği gösterilmiştir. 28 gün kür süresi sonundaki numunelerin davranışına benzer olarak en düşük deformasyonlar %6 kireç içeren kaolin numunesi ve kireç ve linyosülfonatın beraber kullanıldığı kaolin numuneleri arasında görülmüştür. Linyosülfonat içeren numunelerde eksenel deformasyon %4 ile %7 arasındadır. 90 gün kür süresi sonunda %3 kireç içeren KL+3KRÇ-90 numunesi linyosülfonat



Şekil 4.59 Farklı katkıların birlikte kullanımı ve çeşitli katkılarla hazırlanan kaolin örneklerinin 90 gün kür süresi sonunda nokta deformasyon grafiği

içeren ve katkı içermeyen kaolin zemin numunelerinin deformasyonuna yakın tepki göstermiştir.

4.3. Linyosülfonat ile Stabilize Edilen Kaolin Zeminlerin Dairesel En Kesitli Direkt Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Kaolin zeminlerde linyosülfonat katkısının kesme kuvveti, içsel sürtünme açısı gibi parametreleri nasıl etkilediğinin incelenmesi amacıyla bu tez çalışması kapsamında serbest basınç dayanımı deneylerinin yanı sıra dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyleri de yapılmıştır. Serbest basınç dayanımı deneylerinde olduğu gibi linyosülfonat katkısı kaolin zeminler üzerinde %0,5, %1, %1,5 %2, %5 oranlarında kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler serbest basınç dayanımı deneyleri sonuçlarına göre linyosülfonat katkılı ve katkısız zeminlerde genellikle ilk 7 ve 28 gün dayanım kazandığı ve 90 günlük kür sürelerinde düşüş göstermesi nedeniyle dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyleri için kür süreleri 7 ve 28 gün olarak

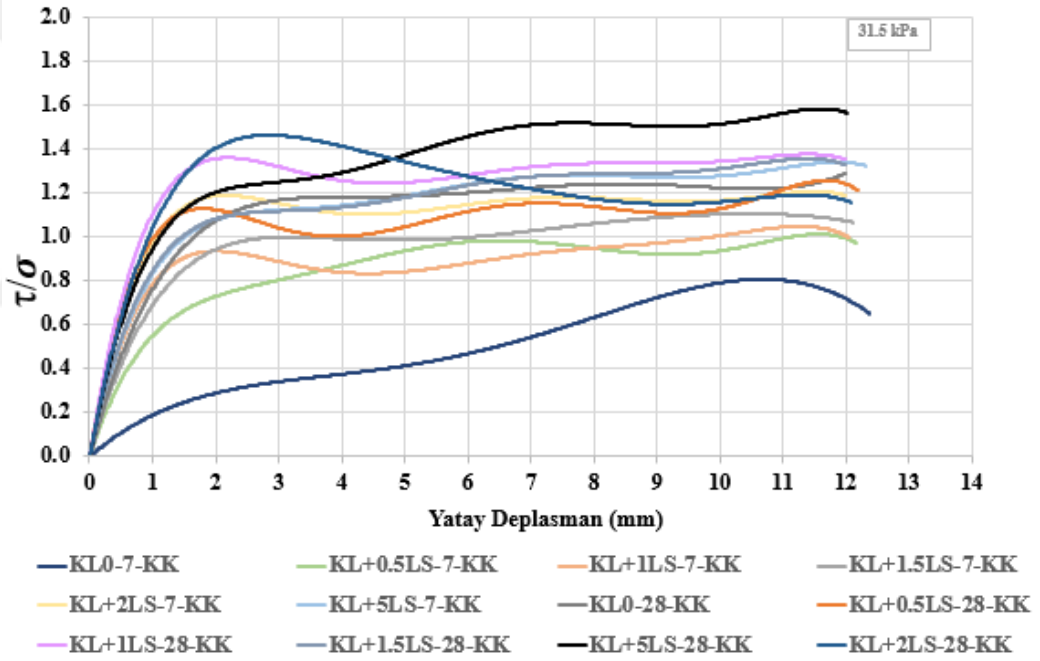
seçilmiştir. Belirli katkı oranlarında kaolin zemin ile karıştırılan numuneler 7 ve 28 gün sürelerle $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 'lik bir kür odasında bekletilmiştir. Kür süreleri biten numuneler için üç farklı normal yük (31.5 kPa, 63 kPa ve 94.4 kPa) uygulanarak dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Linyosülfonat katkılı zeminlerin değişen kür süresi, katkı oranları ve uygulanan normal basınçlara göre kayma gerilmesi-deformasyon davranışı

Üç farklı normal yük altında dairesel kesme deneyi uygulanan katkısız ve %0,5, %1, %1,5, %2 ve %5 oranlarında linyosülfonat katkılı kaolin zemin numuneleri hazırlanarak bu tez çalışması kapsamında, kesme testi parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Öncelikle uygulanan yükün sabit olduğu koşullarda, kür süreleri ve katkı oranları değiştirilerek linyosülfonat katkısının kaolin zeminlerde kesme gerilmeleri ve deformasyon davranışları üzerindeki gelişimleri incelenmiştir. Şekil 4.60, 4.61, 4.62 uygulanan sabit yük altında kür süresi ve katkı oranlarına bağlı olarak katkılı ve katkısız kaolin zemin numunelerinin kesme gerilmeleri ve yer değiştirme ilişkisini vermektedir.

Şekil 4.60' da 31.5 kPa yük altındaki zemin numuneleri için numuneler %20 deformasyona ulaştığında deney sonlandırılmıştır. Bu grafiğe göre, % 20 deformasyona ulaşana kadar en düşük kesme gerilmelerini 7 gün kür süresine sahip olan katkısız kaolin zemin numunesi KL0-7-KK vermiştir. Pik gerilmeye 10 mm'de ulaştıktan sonra gerilmeler azalmıştır. Onu takip eden en düşük gerilme %1 linyosülfonat katkılı KL+1LS-7-KK numunesine aittir. %0,5 katkılı 7 gün kür süresine sahip numune daha yüksek gerilmeler gösterse de %1 linyosülfonat katkılı numune ile davranışları yakındır, ayrıca pik gerilmeye katkısız kaolin zemin numunesinden daha erken deformasyonda ulaşmıştır. 7 günlük kür süresine sahip numunelerde katkı oranlarında, oran arttıkça gerilmeler artmıştır. En yüksek pik gerilmeyi %5 linyosülfonat içeren 7 gün kür süreli numune elde etmiş ve 12 mm' de en yüksek noktaya ulaşmıştır. 28 günlük numuneler, 7 günlük numunelerden

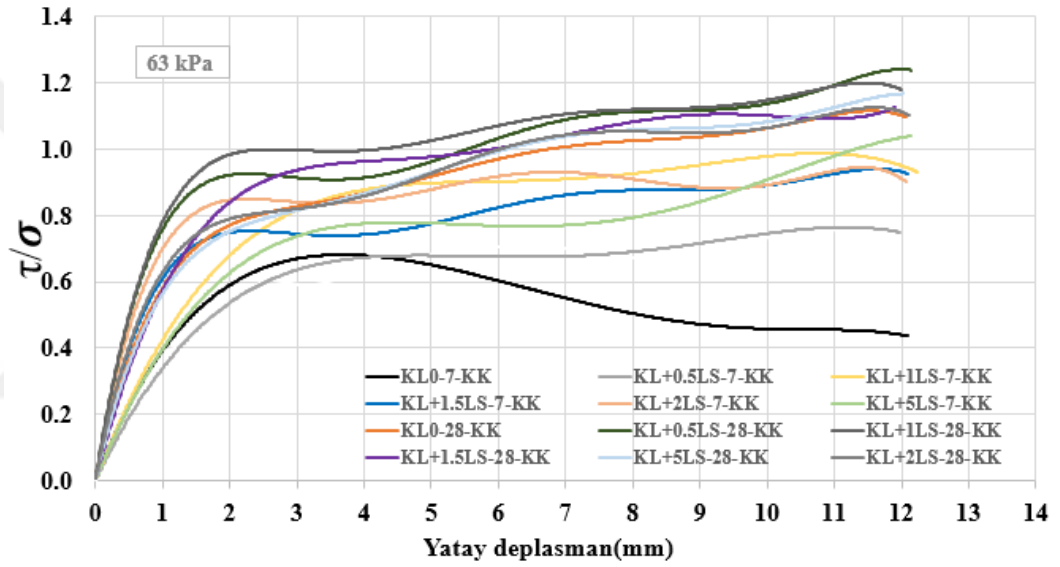
daha yüksek gerilmelere ulaşmıştır. 28 günlük numuneler arasında en düşük pik gerilme %0,5 linyosülfonat içeren numuneden elde edilirken, en yüksek pik gerilme 7 günlük numunede olduğu gibi % 5 linyosülfonat katkılı numuneden elde edilmiştir. Katkı oranlarıyla gerilmeler birbiriyle orantılı olarak artmamıştır. % 1 linyosülfonat katkısı içeren numunede pik gerilme %1.5' den daha yüksek, katkısız kaolin numunesi ise bu iki numuneden düşük fakat % 0.5 katkılı 28 gün kür süresine sahip numuneden daha yüksektir. % 2 linyosülfonat katkısı içeren kaolin numunesi 28 günlük numuneler daha yüksek pik gerilmeler göstermesine rağmen, pik gerilmelere 7 günlük numunelerden daha erken deformasyonlarda ulaşmıştır.



Şekil 4.60 31.5 kPa yük altında kesme kutusu deney numunelerinin katkı oranları ve kür süresine göre gerilme-deplasman davranışı

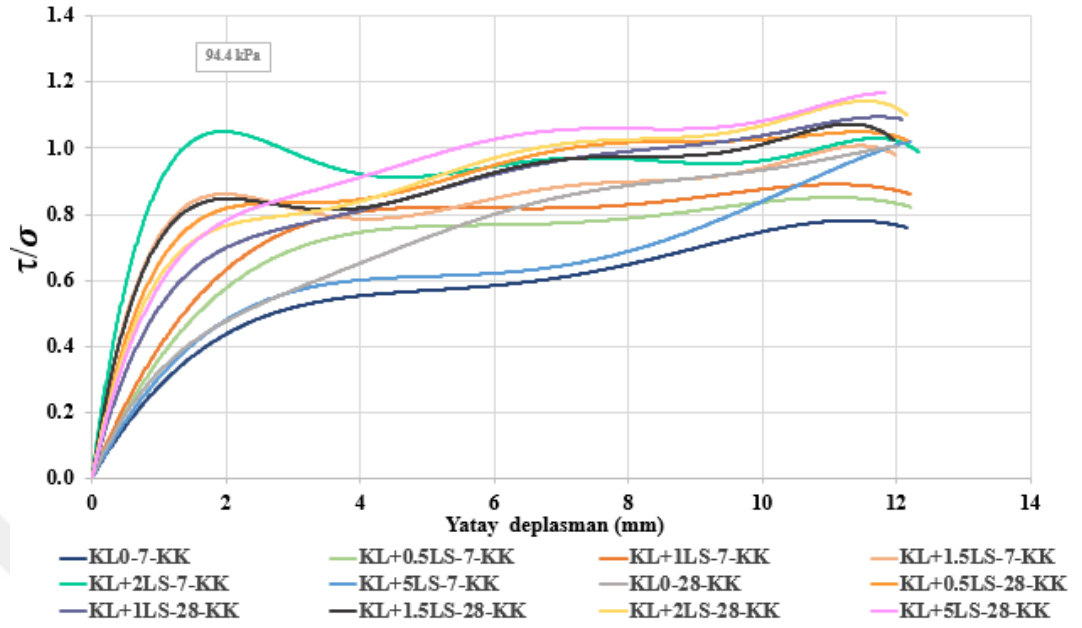
Şekil 4.61 ise 63 kPa yük altında 7 ve 28 gün sürelerle kürde bekletilmiş değişen linyosülfonat katkı oranlarındaki kaolin zemin numunelerinin kesme gerilmesi- deformasyon davranışını göstermektedir. Şekil 4.60 ile benzer olarak her iki yük seviyesinde de en düşük gerilmeleri 7 günlük katkısız kaolin zemin numunesi göstermiştir. Pik gerilmeleri 3.7 mm yer değiştirmede elde etmiştir, daha sonra gerilmeler azalmıştır. 7 günlük kür süresine sahip numuneler için 63 kPa yük

altında, katkılı numuneler katkı oranlarına göre düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. Diğerlerinden daha düşük gerilmelerde ve daha yüksek deformasyonlarda seyreden %5 linyosülfonat katkılı KL+5LS-7-KK numunesi pik gerilmeye 12 mm’de ulaşırken, tüm katkılı numunelerden yüksek pik gerilme göstermiştir. Daha sonraki gerilmeleri %1 ve %2 linyosülfonat katkılı numuneler göstermiştir. %1,5 katkılı numunenin pik gerilmesi daha yüksek, pik gerilmeye ulaşırken ki deformasyonu daha düşüktür.



Şekil 4.61 63 kPa yük altında kesme kutusu deney numunelerin katkı oranları ve kür süresine göre gerilme-deplasman davranışı

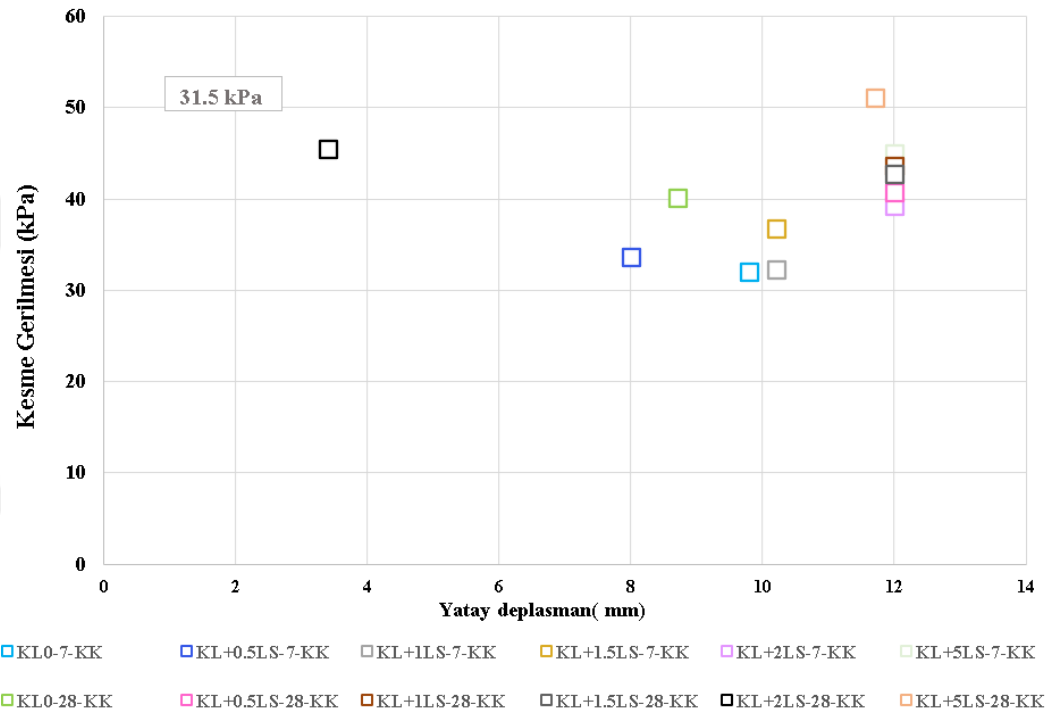
Kür sürelerine göre karşılaştırıldığında, 31.5 kPa yük altındaki numunelerin gösterdiği davranışa benzer olarak tüm numunelerde, 28 günlük kür süresine sahip olan numuneler daha yüksek gerilmelere ve daha yüksek pik gerilmelere ulaşmıştır. Yine benzer olarak en düşük pik gerilme katkısız kaolin zemin numunesinde görülmüştür. En yüksek pik gerilme %0,5 katkılı numunede elde edilmiş, daha sonraki en yüksek pik gerilmeler sırasıyla %5 ve %1 linyosülfonat katkılı numunelerde görülmüştür. %1,5 ve %2 linyosülfonat katkılı numuneler katkısız kaolin zemin numuneleri ile neredeyse benzer deformasyon davranışı göstermiştir.



Şekil 4.62 94.4 kPa yük altında kesme kutusu deney numunelerinin katkı oranları ve kür süresine göre kesme gerilmesi- yer değiştirme davranışı

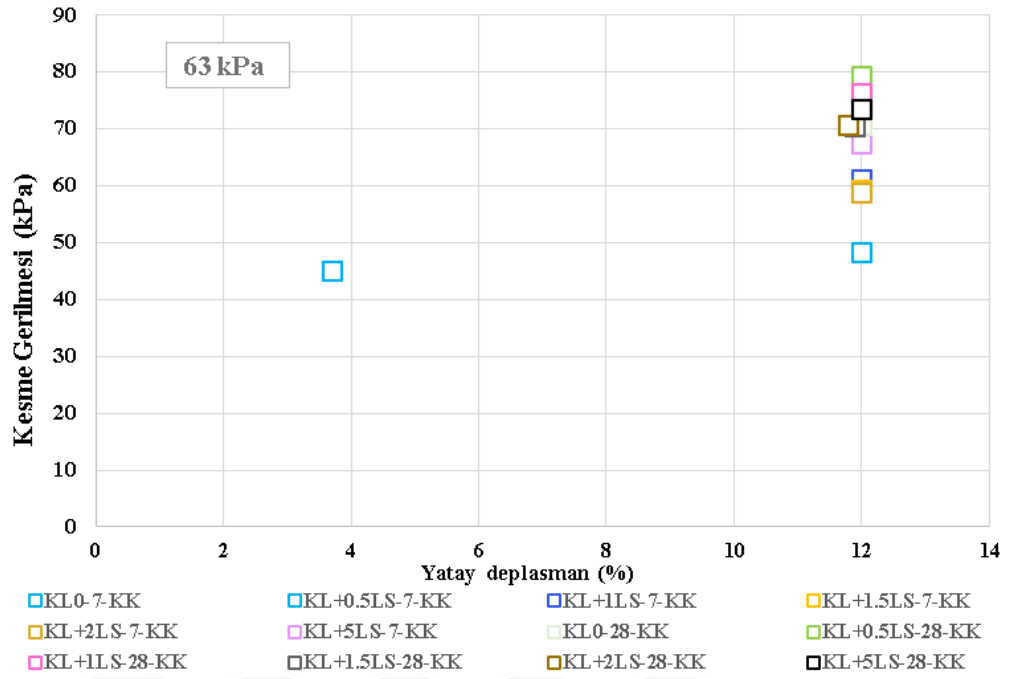
Şekil 4.62, 94 kPa yük altında kesme kutusu deney numunelerinin 7 ve 28 günlük kür sürelerinde katkı oranlarına göre gerilme davranışlarını göstermektedir. 7 gün kür süresine göre incelendiğinde, %5 linyosülfonat içeren kaolin numunesi katkısız kaolin zemin numuneleri ile benzer davranış göstermiş fakat 8 mm' ye ulaştıktan sonra gerilmeleri artarak tüm numuneler arasında en yüksek noktaya ulaşabilmiştir. Pik gerilmelerine %0,5 linyosülfonat içeren kaolin zemin numunesi daha erken deformasyonda ulaşmıştır. %0,5 linyosülfonat katkısından itibaren katkı oranı arttıkça gerilmeler artmıştır, pik gerilme de bu oranlara göre kendini göstermiştir. 28 gün kür sürelerine göre incelendiğinde ise, yine en düşük gerilmeleri katkısız kaolin zemin numunesi göstermiş ve en düşük pik gerilmeye bu numunede görülmüştür. En yüksek pik gerilme ise 7 günlük kür süresindeki numunelere benzer olarak 5 linyosülfonat katkılı numunede gerçekleşmiştir. Pik gerilmeye deney sonunda ulaşmıştır. Tüm numuneler için 28 günlük kür sürelerinde gerilmeler artarak devam etmiştir. Katkılı numunelerde kesme-deformasyon zarfının farklılaştığı, buna bağlı olarak rijitliklerinin de değiştiği görülmektedir.

Farklı basınçlar altında linyosülfonat katkısı içeren kaolin zemin numunelerinin nokta deformasyon grafikleri Şekil 4.63, Şekil 4.65 ve Şekil 4.66'da verilmiştir. Şekil 4.63'te yalnızca %2 linyosülfonat içeren 28 günlük numunenin diğerlerinden farklı olarak erken deformasyonu görülmektedir. Genel olarak 28 günlük numunelerde 12 mm'ye ulaşana kadar kesme gerçekleşmemiştir. Kür süreleri deformasyonu etkilemiştir.



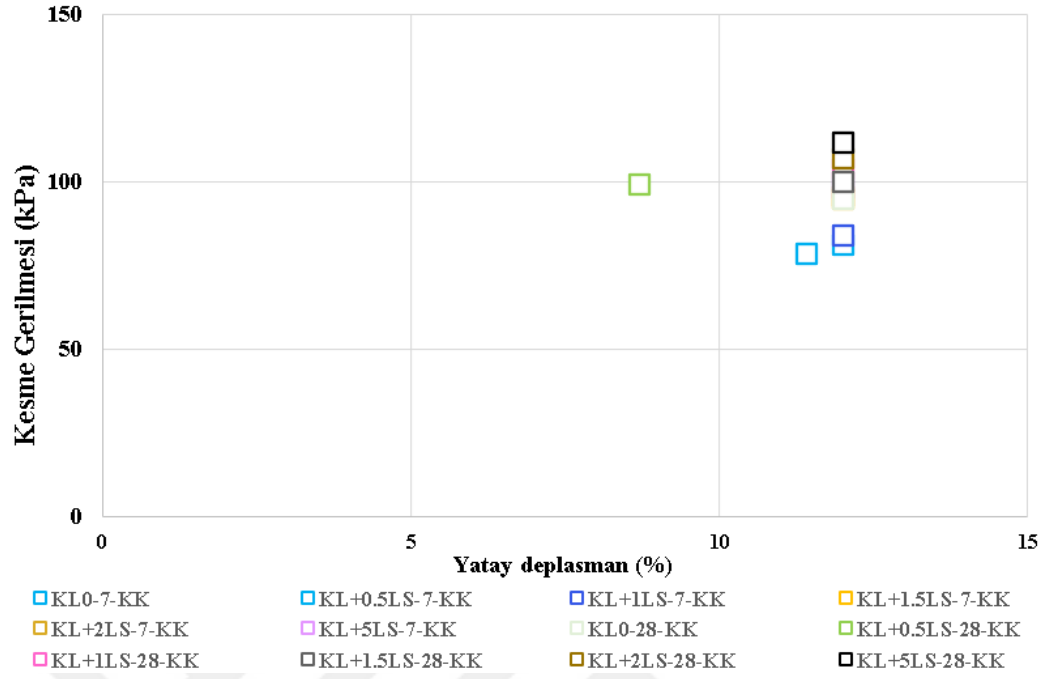
Şekil 4.63 31.5 kPa altında kesme gerilmesi-deplasman davranışının noktasal gösterimi

Şekil 4.64'te 63 kPa yük altında katkılı ve katkısız numunelerin kesme gerilmelerine karşılık gelen deplasman miktarları noktasal olarak gösterilmiştir. Burada açık olarak kür süresinin deplasmanı etkilemediği görülmektedir. Kaolin zemine ilave edilen linyosülfonat katkısı 7 gün kür süresi içerisinde değerlendirildiğinde kaolinin kesmeye uğradığı deplasman miktarını değiştirmiştir. Bunun dışında katkı miktarı değişiminin etkisi olmamıştır. 28 gün kür süresi içinde değerlendirildiğinde, katkı miktarı değişiminin ve kür süresindeki değişimin deplasmanı değiştirmedeği görülmektedir.



Şekil 4.64 63 kPa yük altında linyosülfonat katkılı kaolin numunelerinin kesme gerilmelerine karşılık nokta deplasman grafiği

Şekil 4.65 94.4 kPa altında linyosülfonat katkısı içeren numunelerde kesme gerilmesi ve deplasman davranışının noktasal olarak gösterimini içermektedir. Bu grafiğe göre, kür süresi ve katkı miktarının deplasman miktarını değiştirmekte etkisi olmamıştır. Yalnızca % 0.5 linyosülfonat içeren 28 gün kür süresine sahip olan kaolin zemin numunesi diğer numunelerden erken kesmeye uğramıştır. 28 günlük numunelerde katkı miktarının değişimi sadece kesme gerilmesinin artması ve azalmasında etki göstermiştir.



Şekil 4.65 94.4 kPa yük altında linyosülfonat katkılı kaolin numunelerinin kesme gerilmelerine karşılık nokta deplasman grafiği



Şekil 4.66 Farklı normal basınçlar uygulanan %0,5 linyosülfonat katkılı kaolin zeminlerin kesme kutusu deneyi numuneleri

Çizelge 4.2' de uygulanan normal basınçlar altında numunelerdeki pik kayma gerilmeleri karşılaştırılarak verilmiştir. Basıncın artmasıyla gerilmelerde artış

beklenmiştir. Deney sonuçlarına göre de aynı numune gruplarında, uygulanan basıncın artmasıyla pik gerilmeler de artarak beklenen sonucu vermiştir.

Çizelge 4.2 Numunelerde uygulanan normal basınç değişimi ile pik kayma gerilmeleri

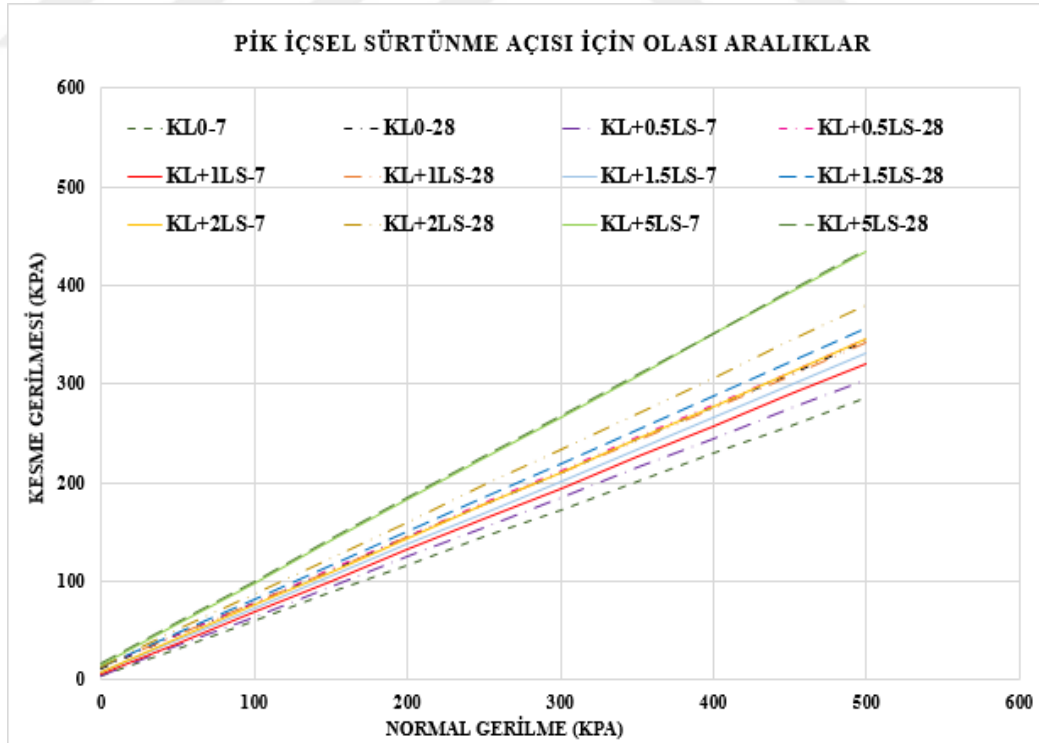
Numune	Normal Gerilme / Pik Kayma Gerilmesi (kPa)		
	Normal Basınç (kPa)		
	31.5	63	94.4
KL0-7-KK	32	45	78.8
KL+0.5LS-7-KK	32.3	48.3	81.2
KL+1LS-7-KK	32.3	61.1	84.1
KL+1.5LS-7-KK	36.8	59.1	94.9
KL+2LS-7-KK	39.3	58.7	95.8
KL+5LS-7-KK	45.0	67.3	98.0
KL0-28-KK	40.2	70.6	95.0
KL+0.5LS-28-KK	40.7	79.3	99.2
KL+1LS-28-KK	43.6	76.1	103.9
KL+1.5LS-28-KK	42.7	70.3	100.3
KL+2LS-28-KK	45.5	70.5	107.0
KL+5LS-28-KK	51.1	73.4	111.8

4.3.2. Linyosülfonat katkılı zeminlerin farklı kür süresi ve katkı oranlarına göre içsel sürtünme açısı ve kohezyon değişimi

Dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilen katkılı ve katkısız zeminlerde, içsel sürtünme açıları ve kohezyon değişimlerinin katkı oranları ve belirlenen 7 ve 28 günlük kür sürelerine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir.

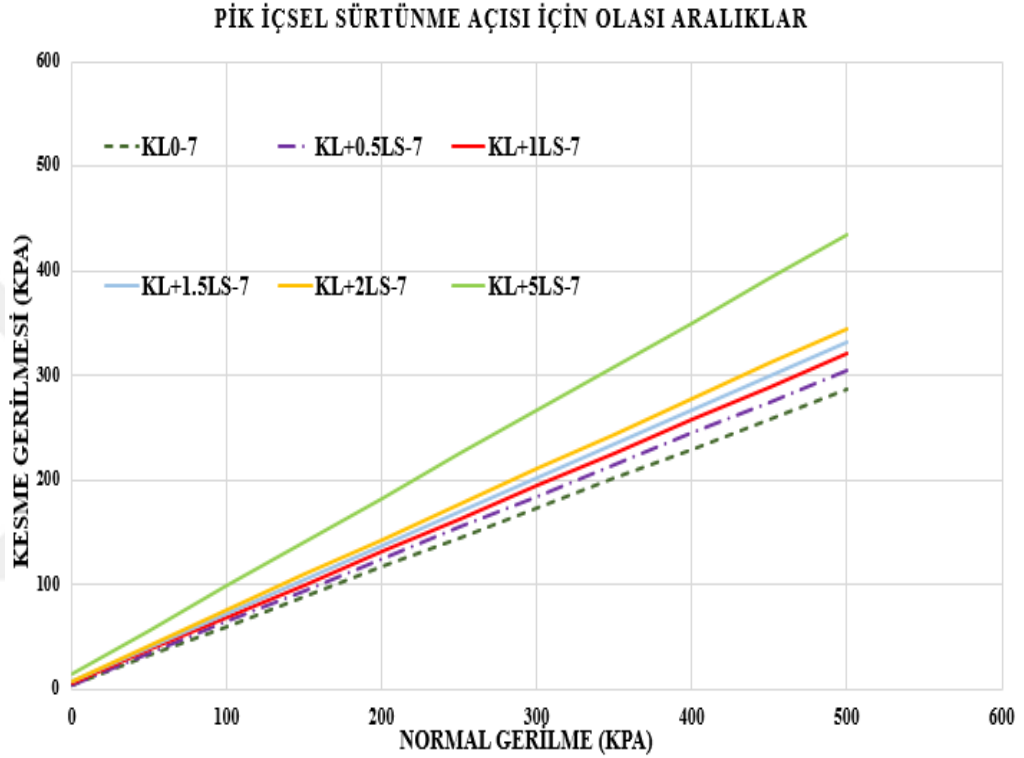
Şekil 4.67 tüm zemin numunelerinin 7 ve 28 günlük kür sürelerinde pik içsel sürtünme açısı değerleri için uygun aralıklarda kesme gerilmelerini, Şekil 4.68 katkılı ve katkısız zemin numunelerinin 7 günlük kür sürelerinde değişimini ve Şekil 4.69 katkılı ve katkısız zemin numunelerinin 28 günlük kür sürelerinde değişimini göstermektedir.

28 günlük numuneler 7 gün kür süresinde bekletilen numunelere göre genellikle daha yüksek gerilme aralıklarında seyretmiştir. %1,5 linyosülfonat ilavesinden sonra 28 günlük numunelerde katkı oranına göre gerilmeler artmıştır. En yüksek gerilme seviyeleri KL+5LS-28- KK numunesinde görülürken, katkı oranına göre düzenli bir artış veya azalış yaşanmamıştır. 7 günlük %5 katkılı zemin numunesi en yüksek gerilmeleri gösteren diğer bir numune olurken, %1 linyosülfonat katkısı içeren zemin numunesinin gerilme seviyeleri KL+2LS-7-KK, KL+0.5LS-28-KK ve katkısız kaolin numunesi KL0-28-KK numunelerinin altında kalmıştır. %5 linyosülfonat içeren numuneleri takip eden sırayla en yüksek gerilmeler %2 linyosülfonat katkılı KL+2LS-28-KK ve %1,5 linyosülfonat katkılı KL+1.5LS-28- KK numunelerinde görülmüştür. Katkısız kaolin numunesinde 28 günlük kür sürelerinde görülen gerilme seviyeleri ile %0,5 linyosülfonat katkılı KL+0.5LS-28- KK ve KL+2LS-7 numunesi hemen hemen benzer seviyelerdedir. (Şekil 4.67).



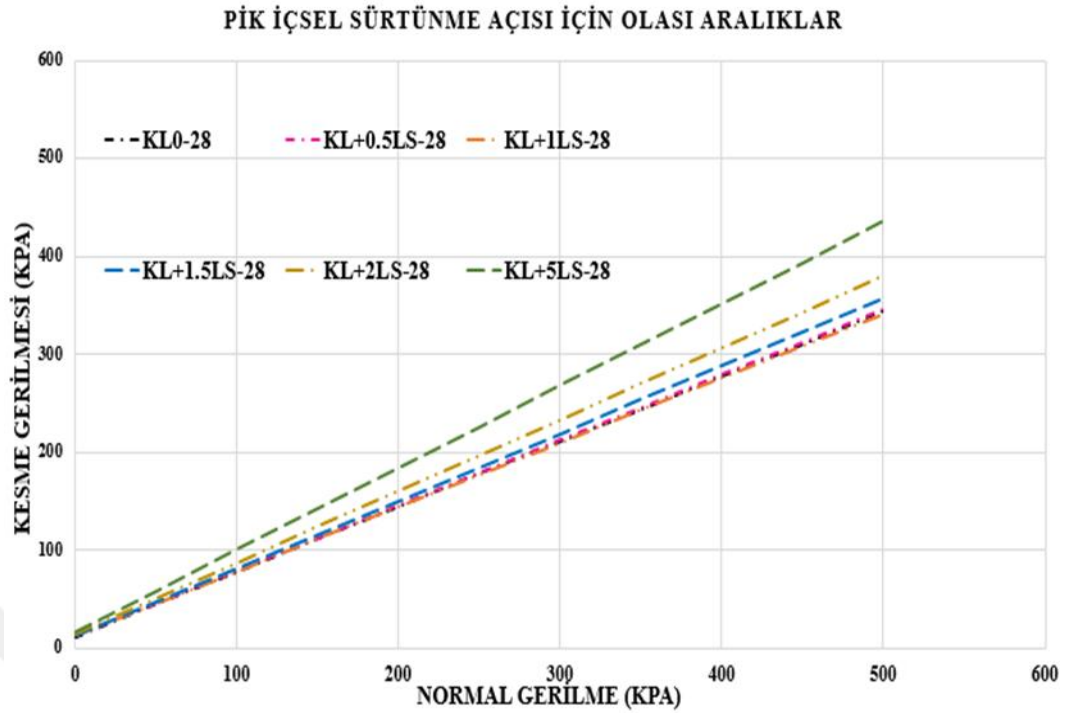
Şekil 4.67 Pik içsel sürtünme açısı için 7 ve 28 günlük numunelerde olası gerilme aralıkları

7 günlük numunelerde en düşük gerilme aralıkları katkısız kaolin numunesinde (KL0-7-KK) görülmüştür, en yüksek ise %5 linyosülfonat içeren (KL+5LS-7-KK) numunedir. 7 gün kür süresinde bekletilen numunelerde katkı oranı arttıkça gerilme seviyeleri de yükselmiştir. (Şekil 4.68).



Şekil 4.68 PİK içsel sürtünme açısı için 7 günlük numunelerde olası gerilme aralıkları

28 günlük numunelerde en düşük gerilme aralıkları %0,5 (KL+0.5LS-28-KK) ve %1(KL+1LS-28-KK) linyosülfonat içeren numunelerde görülmüştür (Şekil 4.43). Katkı oranı arttıkça gerilme seviyeleri artarken, yalnızca %1 linyosülfonat ilaveli zemin numunesinin (KL+1LS-28) gerilmeleri, katkısız kaoline göre düşük kalmıştır. Bu numune haricindeki tüm katkılı numuneler, katkısız kaolin numunesine göre (KL0-28-KK) daha yüksek gerilmeler göstermiştir (Şekil 4.69). Ayrıca KL+5LS-7-KK numunesi KL + 5LS- 28-KK numunesi ile benzer seviyelerde ve 28 gün kür süresinde bekletilen diğer numunelerden daha yüksek gerilmeler göstermiştir (Şekil 4.67).



Şekil 4.69 Pik içsel sürtünme açısı için 28 günlük numunelerde olası gerilme aralıkları

Çizelge 4.3’ de kohezyon ve içsel sürtünme açıları değerleri, 7 ve 28 gün kür süreleri boyunca bekletilen linyosülfonat katkılı ve katkısız numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarına göre elde edilmiştir. 7 günlük kür sürelerinde değerlendirildiğinde en yüksek kohezyon değerini %5 linyosülfonat katkısı içeren numune vermiştir. Katkı içeren numunelerin tümünün kohezyonu katkısız kaolin zeminin kohezyonundan daha yüksektir. Kohezyon değerleri ve içsel sürtünme açıları katkı oranına göre 7 gün kürde bekletilmiş numunelerde artış göstermiştir. Şekil 4.43’ te de en yüksek gerilme grafiğini gösteren numune 7 günlük kür süreleri içinde %5 linyosülfonat katkısı içeren zemin numunesi, en düşük gerilmeler ise %0,5 linyosülfonat katkısı içeren zemin numunesidir. Kür süresi değerlendirildiğinde, artmasıyla birlikte içsel sürtünme açısı değerleri ile numunelerin kohezyonu artmıştır. İçsel sürtünme açıları ise tüm numunelerde artış göstermiş, %5 linyosülfonat katkısında sabit kalmıştır. %1 linyosülfonat içeren 28 gün kürde bekletilmiş KL+1LS-28-KK numunesinin kohezyonu katkısız kaolin numunesinden daha yüksek olmasına rağmen, içsel sürtünme açısı değerinin daha düşük olması nedeniyle Şekil 4.67’de görüleceği üzere, gerilme seviyesi hafif bir

şekilde kaolin kili numunesinin altında kalmıştır. Bu durumda gerilmeleri kohezyondan çok içsel sürtünme açısı değerlerinin kontrol ettiği söylenebilir. Şekil 4.41’de bu durumu doğrulayacak şekilde en yüksek gerilmeleri veren %5 linyosülfonat katkısının, Çizelge 4.3’ te en yüksek içsel sürtünme açısı değerini verdiği görülmektedir. Şekil 4.68’ de görülen KL+2LS-7-KK, KL+1LS-28-KK ve KL+0.5LS-28-KK numunelerinin kaolin numunesi KL0-7 ile benzer gerilmeler göstermesinin nedeni, içsel sürtünme açısı değerlerinin neredeyse aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen bu veriler değerlendirildiğinde, linyosülfonat katkısının kaolin zeminin kesme kutusu parametrelerini etkilediği görülmektedir.

Çizelge 4.3 Kesme kutusu deneyleri sonucu elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı

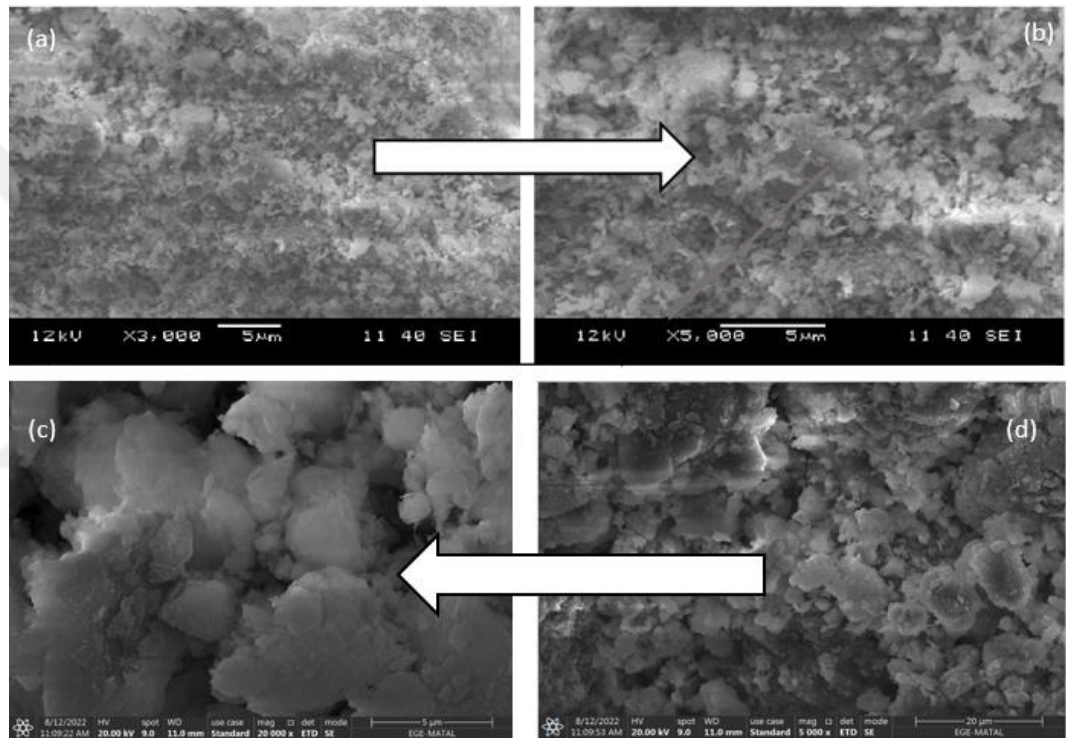
Numune	Katkı Oranı (%)	Kohezyon, c (kPa)	Pik İçsel Sürtünme Açısı, Φ (°)	Kohezyon, c (kPa)		Pik İçsel Sürtünme Açısı, Φ (°)
				7 gün	28 gün	
KL0	0	3.8	29.4	12.0	33.5	
KL+0.5LS	0.5	4.5	31.0	12.5	33.7	
KL+1LS	1.0	6.0	32.1	13.0	33.3	
KL+1.5LS	1.5	7.2	33.0	13.5	34.4	
KL+2LS	2	8.5	34.0	14.0	36.2	
KL+5LS	5	15.09	40.0	17.0	40.0	

4.3.3. SEM ve EDX analizi ile mikroyapısal incelemeler

Bu bölümde, zeminlerde katkı malzemesi olarak yalnız linyosülfonat katkısı kullanımının ve geleneksel katkı malzemesi olan kireç ile birlikte kullanımları ile oluşturulan örneklerin dayanım deneyleri sonrasında kırılma yüzeyleri üzerinden alınan parçaları üzerinde yapılan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-ışığı kırınımı (EDX) analiz sonuçlarından bazıları verilmiştir.

Şekil 4.70 katkısız kaolin kili (KL0) ile %1,5 linyosülfonat katkısı içeren kaolin zemin örneklerinin (KL+1.5LS) mikroyapısal karşılaştırmasını

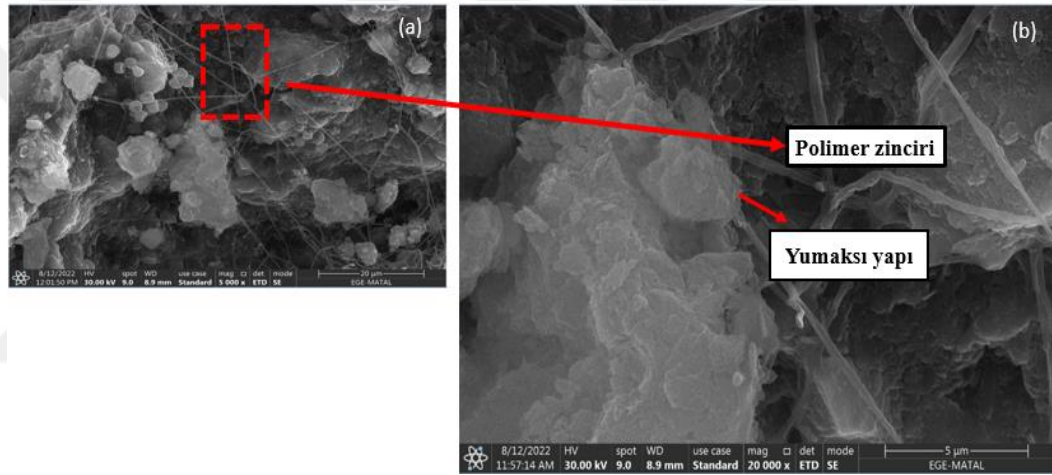
göstermektedir. Şekil 4.70 (b)' de görülen yassı kaolin kili danelerinin, birbirinden ayrı ve bağımsız olarak dağınık bir şekilde yerleştiği görülmektedir. Şekil 4.70 (c), linyosülfonat katkılı zeminin yumaksı bir mikroyapı oluşturduğunu göstermektedir. Şekil 4.70 (d)'de, Şekil 4.70 (b)' ye benzer olarak 5000 kat yakınlaştırılmış %1,5 linyosülfonat içeren kaolin zeminin yapısı görülmektedir. Buna göre, tanecikler birbiriyle yaklaşmış, agregalar şeklinde kümelenme görüntüsü oluşmuş, gözenekler arası boşlukların büyüklüğü artmıştır.



Şekil 4.70 (a), Kaolin kilinin (KL0) 3000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (b) % Kaolin kilinin (KL0) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü (Sezer vd., 2016) (c) % 1.5 linyosülfonat katkısı içeren kaolinin (KL+1.5LS) 20000x yakınlaştırılmış görüntüsü (d) % 1.5 linyosülfonat katkısı içeren kaolinin (KL+1.5LS) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü

Şekil 4.45 linyosülfonat içeren zeminde oluşan mikroyapı değişikliklerini göstermektedir. Literatüre benzer olarak, linyosülfonatin stabilizasyon mekanizması adımlarından biri olan polimer zincirlerinin oluşumu görülmektedir. Tanecikler linyosülfonat ile kaplanmış ve yumaksı bir mikroyapı oluşturmuştur.

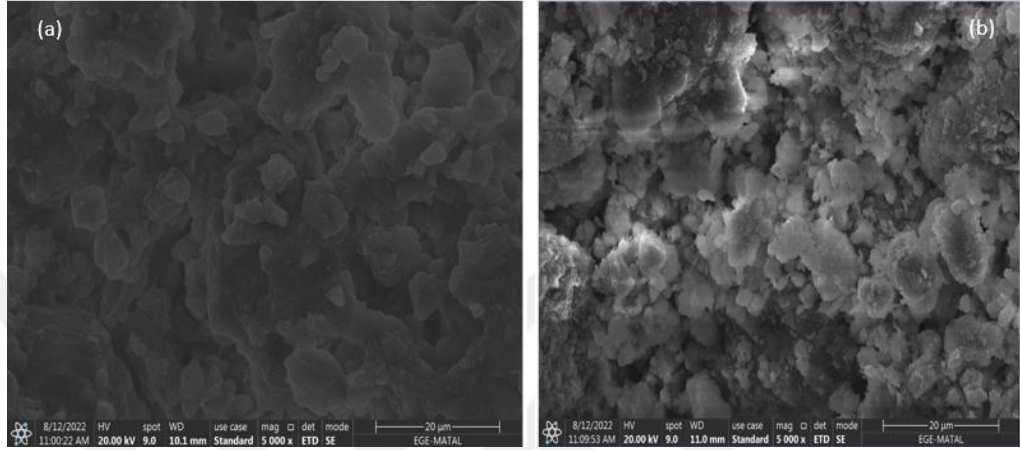
Ayrıca Şekil 4.71’ de daha az linyosülfonat içeren zemin ile Şekil 4.72’ de daha fazla linyosülfonat içeren zemin örnekleri karşılaştırıldığında, kümelenme davranışının daha fazla linyosülfonat içeren zemin örneğinde daha fazla olduğu, gözenekler arası boşluklarının daha az olduğu görülmektedir. Serbest basınç deneyleri sonucunda, %1,5 linyosülfonat içeren zemin örneğinin (KL+1.5LS) dayanımı %1 linyosülfonat içeren zemin örneğinin (KL+1LS) dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumda kümelenme davranışının zeminin dayanımında etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 4.71 (a), %1 linyosülfonat katkısı içeren kaolinin (KL+1LS) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü (b) %1 linyosülfonat katkısı içeren kaolinin (KL+1LS) 20000x yakınlaştırılmış görüntüsü

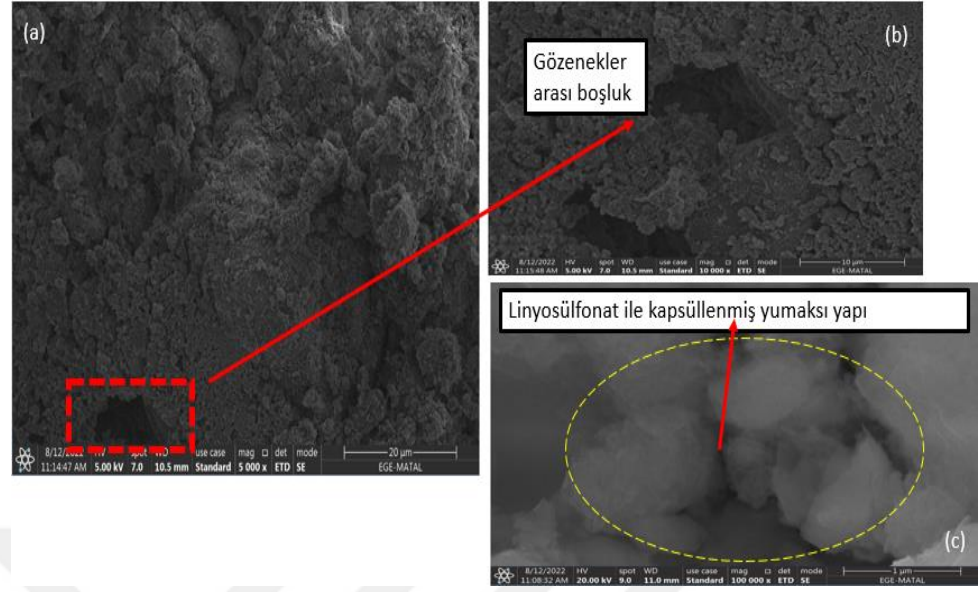
Şekil 4.72’ de %5 linyosülfonat içeren kaolin zemin örneği ile %1,5 linyosülfonat içeren kaolin zemin örneğinin (KL+1.5LS) mikroyapısı gösterilmiştir. Linyosülfonat ile kaolin parçacıklarının bağlandığı bir form olduğu görülmektedir. Daha fazla linyosülfonat içeren Şekil 4.72 (a)’ da görüldüğü üzere, linyosülfonat ile daha fazla bütünleşmiş bir kompozit yapı oluşmuştur. Şekilde görüldüğü üzere, her iki katkı oranını da içeren örneklerde mikroyapı tane bazlı bir formdan agregalar şeklinde kümelenme görüntüsüne ulaşmıştır. %5 linyosülfonat içeren kaolin zemin örneği (KL+5LS), %1,5 linyosülfonat içeren kaolin zemin örneğine (KL+1.5LS) göre, tanecikler birbirine daha fazla yoğunlukta bağlanmış,

kümelenme görüntüsü ve agrega boyutları artmış, gözenekler arası boşluklar da artmıştır. Mikroyapısal analiz sonuçlarıyla uyumlu olarak, serbest basınç deneylerinde de %5 (KL+5LS) linyosülfonat içeren zemin örneklerinin dayanımı %1,5 linyosülfonat içeren zemin örneklerinin (KL+1.5LS) dayanımından daha yüksek sonuç vermiştir.



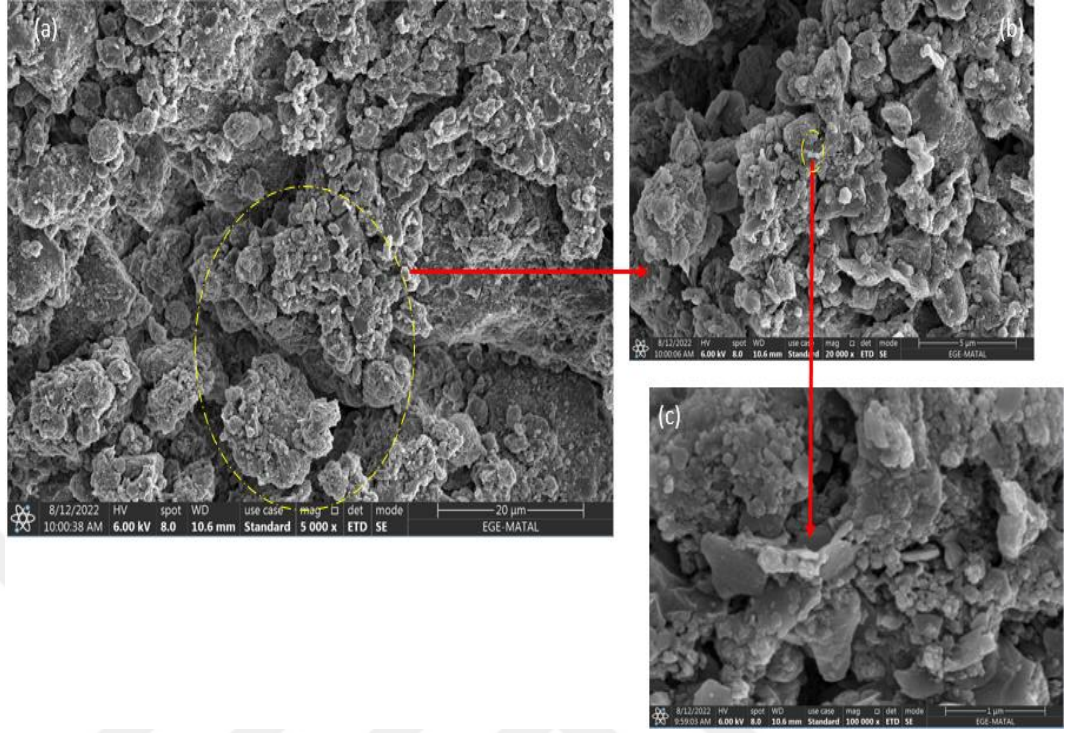
Şekil 4.72 (a), %5 linyosülfonat katkısı içeren zeminin (KL+5LS) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü (b) %1,5 linyosülfonat katkısı içeren zeminin (KL+1.5LS) 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü

Şekil 4.73 linyosülfonat katkılı zeminin farklı çözünürlüklerdeki görüntüsünü içermektedir. Literatürle uyumlu olarak gözenekler arası boşlukların azaldığı ve daha büyük boşluklar olduğu görülmektedir. Dağınık ve birbirinden ayrı tanecik görüntüsünden ziyade linyosülfonat ile kaplanmış formda yumaksı yapı daha büyük çözünürlükte ortaya çıkmıştır.



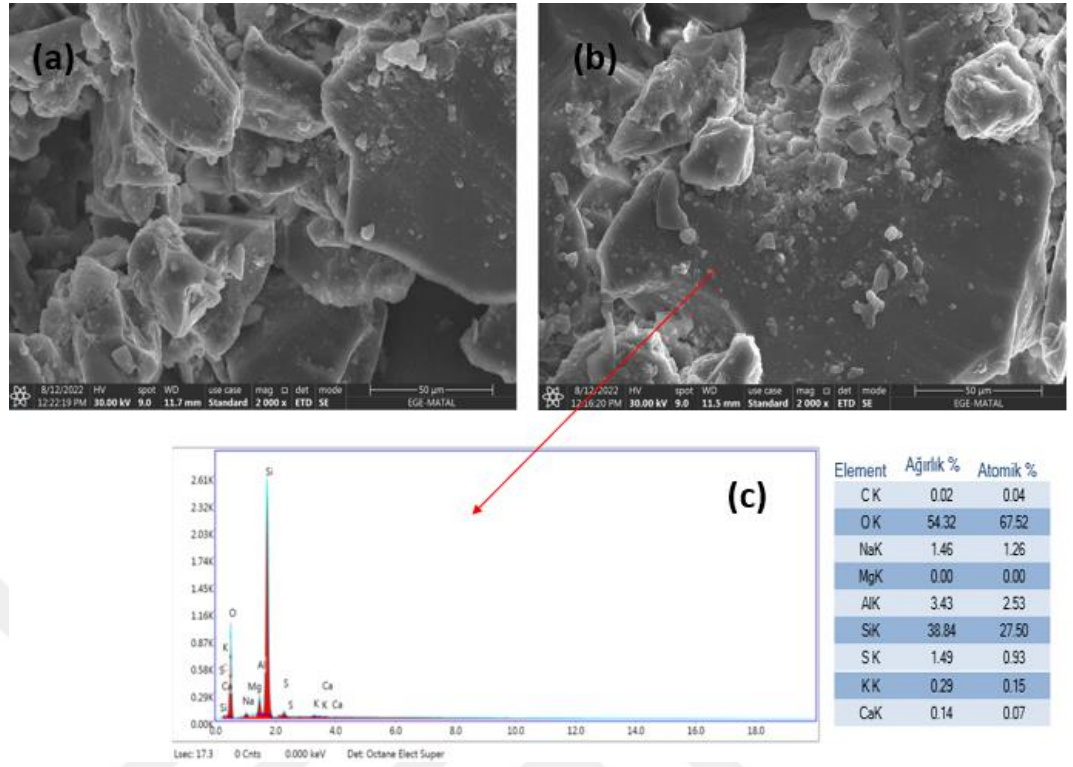
Şekil 4.73 (a), Linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneğinin 5000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (b) Linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneğinin 10000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (c) Linyosülfonat katkılı kaolin zemin örneğinin 100000x yakınlaştırılmış görüntüsü

Şekil 4.74 hem kireç hem linyosülfonat içeren kaolin zeminin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizini göstermektedir. Yalnızca linyosülfonat içeren kaolin zemin örneklerinde görülen yumaksı yapı yerine, tanecikler bir araya gelerek daha pürüzlü görünümde ve topaklanma şeklinde kümelenme görüntüsü oluşturmuştur. Şekil 4.74 (c)' de 100000x yakınlaştırılmış görüntüde, keskin kenarlı lamine parçacıkların linyosülfonat olduğu düşünülmektedir. Bu durumda linyosülfonat parçacıkları bazı noktalarda diğer malzemelerle bağ kuramamış ve kaolin parçacıkları, kireç ile daha çok bağlanmış olabilir. Katkılı zemin örnekleri arasında en yüksek dayanım gösteren %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren örneklerin (KL+4KRC+2LS), elde ettiği dayanımı içeriğinde daha fazla bulunan kireç yüzdesinden aldığı düşünülmektedir.



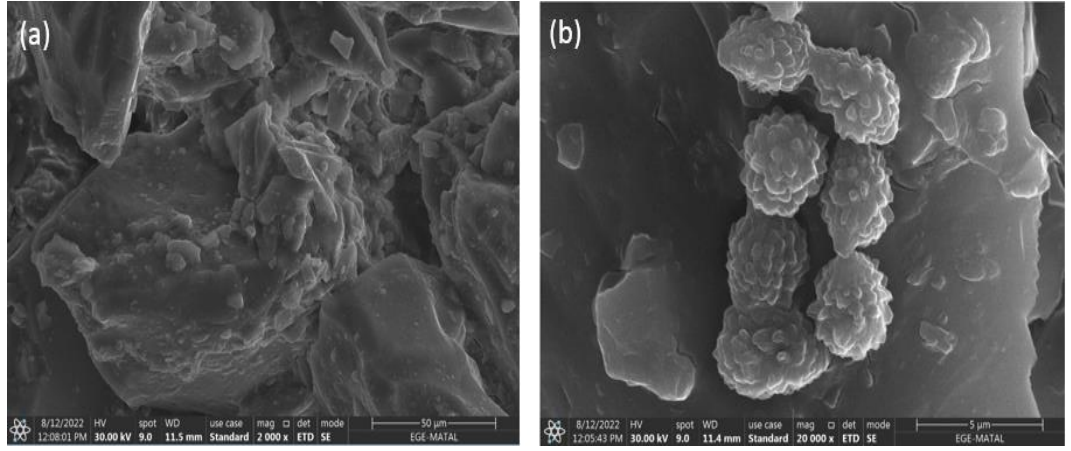
Şekil 4.74 (a), %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren kaolin zeminin (KL+4KRC+2LS) 5000x yakınlaştırmış görüntüsü, (b) 48 (a), %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren kaolin zeminin (KL+4KRC+2LS) 20000x yakınlaştırmış görüntüsü, (c) %4 kireç ve %2 linyosülfonat içeren kaolin zeminin (KL+4KRC+2LS) 100000x yakınlaştırmış görüntüsü

Şekil 4.75' de katkısız silt zemin ile %0,5 (S+0.5LS) linyosülfonat katkılı silt zeminin karşılaştırmalı SEM görüntüsü ve katkılı zeminin EDS analizi gösterilmiştir. Yapısal olarak katkısız zeminde görülen keskin kenarlı parçacıklar, katkılı zeminde de değişiklik göstermeden görülmeye devam etmiştir. Linyosülfonat katkısının partikülleri kaplayarak parçacıkların bağlanması beklentisi karşılanmamıştır. EDS analizinde linyosülfonat ilave edilmiş silt zeminde karbon (C) element açığa çıkmıştır.



Şekil 4.75 (a), Silt zeminin 2000x yakınlaştırmış görüntüsü, (b) %0,5 linyosülfonat ilave edilmiş silt zemini (S+0.5LS) 2000x yakınlaştırmış görüntüsü (c) % 0.5 linyosülfonat ilave edilmiş silt zeminin (S+0.5LS) EDS analizi

Şekil 4.76' da %5(S+5LS) linyosülfonat katkısı ile tez çalışmasındaki en yüksek linyosülfonat katkısı içeren silt zemin örneklerinin görüntü analizi sonuçları verilmiştir. Daha fazla katkı içeren bu örnekte, keskin kenarlı parçacıklar hala görülmekte, buna karşın, Şekil 4.76 (b)' de görüldüğü üzere bazı noktalarda linyosülfonat silt partiküllerinin üzerini kaplayarak, birbirine bağlamış ve kümelenmiş bir form oluşturabilmiştir.



Şekil 4.76 (a), %5 linyosülfonat katkısı içeren silt zeminin (S+5LS) 2000x yakınlaştırılmış görüntüsü, (b) %5 linyosülfonat katkısı içeren zeminin (S+5LS) 20000x yakınlaştırılmış görüntüsü

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında saf zemin özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra, kullanımı ve elde edilmesi sırasında çevre üzerinde olumsuz etkiler bırakmayan ve bulunması kolay olan bir katkı malzemesi ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, çevreye zarar vermeyen ve atık bir madde olan linyosülfonat katkısı zeminlerde kullanılarak, linyosülfonat katkısı içeren ve içermeyen zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları ve bu dayanımlara karşılık gelen birim deformasyonlar, kesme gerilmeleri ve kesme kutusu deneyi parametreleri olan içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri bulunmuştur.

Aynı zamanda geleneksel katkı malzemelerinin yerine alternatif olabileceği düşünülen bu çevre dostu malzemenin, geleneksel katkı malzemelerine kıyasla serbest basınç dayanımları da ölçülerek karşılaştırılmıştır. Geleneksel katkı malzemesi olarak seçilen kireç, linyosülfonat katkısı ile birlikte kullanılarak da bu karışımların da serbest basınç dayanımları ve bu dayanımlara karşılık gelen birim deformasyonlar bulunmuştur.

Yapılan serbest basınç deneylerinde zemin çeşidi, kür koşulları, katkı oranı, kür sıcaklığı ve katkı çeşidi de değiştirilerek bu parametrelerin katkılı zemine etkisi incelenmiştir. Dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneylerinde yalnızca kür süresi ve katkı oranı değiştirilmiştir. Yapılan incelemelerle elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

İlk olarak linyosülfonat katkısı kaolin ve silt zeminler üzerinde yapılan kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre, su içeriğinde ve kuru birim hacim ağırlığında katkı oranı arttıkça azalma gerçekleştirmiştir.

Katkı malzemesi olarak yalnızca linyosülfonat kullanılan örneklerde, kür sıcaklığı $\pm 20^{\circ}\text{C}$ kür koşullarında kür süresinin katkılı zeminlerde etkili olduğu ve linyosülfonat katkısının 1 gün kür süresi haricindeki tüm kür süreleri ve katkı oranlarında katkısız kaolin zeminden daha yüksek serbest basınç dayanımları verdiği görülmüştür. En yüksek dayanım 28 gün kür süresinde %2 oranında

linyosülfonat katkısı kullanımı ile elde edilmiştir. Ancak linyosülfonat katkısı bu kür koşullarında katkısız kaolin zemine göre dayanımda sadece 2,20 kat bir artış sağlamıştır. Geleneksel katkı malzemesi olan kireç ile karşılaştırıldığında, linyosülfonat katkısının tek başına kullanımının normal kür koşullarında geleneksel katkı malzemeleri ile rekabet edemeyeceği görülmüştür. Olumlu olarak zeminlerin sünekliklerinde geleneksel katkı malzemelerine kıyasla değişim yaratmamıştır.

Kür sıcaklığı değiştirildiğinde kür sıcaklığının katkılı ve katkısız örneklerinin serbest basınç dayanımında ciddi miktarda etkili olduğu görülmüştür. Kaolin zeminler için, 1 gün kür süresinde açık havada bekletilen kür koşullarında en yüksek dayanımı %1,5 oranında linyosülfonat katkılı zemin göstermiştir. Ancak bu durumda katkısız zemine göre dayanımı en fazla 1,36 kat arttırabilmiştir. Kür süresi arttıkça dayanımda artış görülmüş, en yüksek dayanımı %5 linyosülfonat içeren zemin numunesi sağlamıştır. Aynı koşullardaki kaolin zemin numunesine göre dayanımı 4,25 kat arttırabilmiştir. Ancak dayanımdaki bu artış zeminlerde ani kırılmaya ve gerilme- deformasyon eğrisinde değişime neden olmuştur. Fakat açık hava koşullarında kürlenene %5 linyosülfonat katkılı kaolin numunesi, normal kür koşullarında kürlenene ve en yüksek dayanımı gösteren 28 gün kür süresindeki %6 oranında kireç içeren numune ile yakın dayanım vermeyi başarmıştır. Bu durumda optimum koşullar, %5 linyosülfonat katkısının 7 gün süreyle açık hava koşullarında kürlenmesi ile elde edilmiştir.

Kaolin zeminler linyosülfonat katkı oranına göre değerlendirildiğinde, katkı oranının zeminler üzerinde düzenli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Yalnızca 28 gün kür süresinde, $\pm 20^{\circ}\text{C}$ kür koşullarında bekletilen numunelerde, katkı oranı arttıkça dayanım artmış, optimum orana ulaşıldığında dayanım düşmüştür.

Katkı çeşidi değiştirildiğinde, yalnızca kireç katkısı kullanımının daha yüksek serbest basınç dayanımları verdiği görülmüştür. Kireç katkısının miktarını düşürmek ve olumsuz etkileri azaltmak amacıyla kireç ile linyosülfonat katkıları birlikte kullanılmıştır. %2 kireç ve %1 linyosülfonat katkısının birlikte kullanımının, zemin dayanımında ciddi bir etkisi olmamıştır. %4 kireç ve %2

linyosülfonat katkısı serbest basınç dayanımında 28 gün kür süresinde 12,5 kat, 90 gün kür süresinde 10,48 kat artış sağlamıştır. Ancak karşılık olarak %6 oranında kireç içeren zemin örnekleri ile rekabet edememiştir.

Silt zeminler üzerinde linyosülfonat katkısının $\pm 20^{\circ}\text{C}$ kür koşullarında, kür sürelerinde ve katkı oranlarında serbest basınç dayanımında bir etkisi görülmemiştir. Kür sıcaklığı değiştirildiğinde, açık hava koşullarındaki linyosülfonat katkılı silt zeminler 1 günlük kür süresinde serbest basınç dayanımında etkili olmamasına rağmen, katkı oranı etkili olmuştur. Optimum dayanım gösteren %0,5 linyosülfonat katkılı silt zemin numunesinden sonra, katkı oranı arttıkça dayanım da düşmüştür. Ancak açık havada 7 gün süreyle bekletilen katkılı zemin numuneleri, silt zemine göre ciddi dayanım artışı göstermiş ve katkı oranı arttıkça dayanım artmıştır. Optimum dayanım gösteren %5 linyosülfonat katkısı ile dayanım 23,66 kat artmıştır. Ancak gerilme- deformasyon eğrisinde görülen değişim, zeminin ani kırılmalar gerçekleştirdiğini, sünek davranıştan uzaklaştığını göstermiştir. Bu tez çalışması kapsamında silt zeminlerde yalnızca kireç katkısı ile deneyler yapılmadığından, linyosülfonat katkısının geleneksel katkı malzemelerine göre silt zeminlerde yeterli olabileceği bilinmemektedir.

Dairesel en kesitli direkt kesme kutusu deneylerinde linyosülfonat içeren kaolin zemin numunelerinin katkı oranları ve kür sürelerine göre kesme gerilmeleri, içsel sürtünme açısı ve kohezyon özellikleri üzerinde değişimlerini incelemek amaçlanmıştır. Köşelerde gerilme yoğunlaşmaması olmaması için dairesel en kesitli direkt kesme kutusu ile deneyler yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri sonucunda yüksek dayanımlar gösteren kür süreleri seçilmiştir. Yapılan incelemelerle elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Farklı normal basınçlar uygulanan katkılı ve katkısız zemin numunelerinde, basınç artışına bağlı olarak gerilmelerde artış görülmüştür. Kür süresi 7 günden 28 güne çıkarılan numunelerde daha yüksek pik gerilmeler elde edilmiştir. Ancak kür süresi daha düşük olan numuneler daha erken deformasyonlarda pik gerilmelere ulaşmıştır. Linyosülfonat katkısının içsel sürtünme açısı ve kohezyon üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Katkı oranlarının artması kohezyon ve içsel sürtünme

açısı değerlerini arttırarak kesme gerilmelerini arttırmıştır. Katkılı zemin numuneleri daha yüksek gerilmeler göstermiştir. Kür süresi 7 günden 28 güne çıkarıldığında içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri artmıştır. En yüksek kesme gerilmeleri, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerini % 5 linyosülfonat içeren kaolin numunesi 28 gün kür süresinde gösterirken, aynı numunenin serbest basınç dayanımı aynı koşullarda %2 linyosülfonat ilave edilmiş kaolin numunesinden azdır. Belirli katkı oranları katkısız kaolin zeminlere göre daha yüksek maksimum kayma gerilmeleri gözlenmiştir.

Kesme kutusu deney sonuçlarına göre en yüksek kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini ve kesme gerilmelerinin elde edildiği 28 gün kür süresinde bekletilen % 5 linyosülfonat katkılı zemin numunesi, aynı kür koşullarında serbest basınç dayanımı deneylerinde optimum sonuçları vermemiştir. Farklı kür sıcaklığı ve süresi koşullarında ise optimum serbest basınç dayanımı gösteren ve kireç katkısının etkisine yakın sonuç veren numunedir.

Bu tez çalışması sonucunda, linyosülfonat katkısının $\pm 20^{\circ}\text{C}$ kür koşullarında, geleneksel katkı malzemeleri ile karşılaştırıldığında karşılaştırılabilir düzeyde bir dayanım sağlamadığı görülmüştür. Katkı oranları da serbest basınç dayanımında sistematik bir artış veya azalış etkisi gösterememiştir. Ancak kür sıcaklığı değiştirildiğinde, kür sıcaklığı olarak açık hava koşulları, kür süresi olarak 7 gün ve katkı oranı olarak %5 linyosülfonat katkısı belirlenirse optimum ve umut verici dayanımlar göstereceği düşünülmektedir.

Mikroyapısal incelemeler, dayanım ve rijitlikteki artışların sebeplerini ortaya koymaktadır. Linyosülfonat ile stabilizasyon polimer zincirlerinin oluşumu ve kümelenme ile birlikte, yüksek olmayan dayanımların ortaya çıkmasını sağlamaktadır. X-ışığı kırınımalarında gözlenen karbon da bunu ispatlamaktadır. Bununla birlikte, kireç ile stabilizasyon kalsiyum esaslı bağlayıcı ürünler oluşturmuştur.

Ayrıca kireç ve linyosülfonat kullanımının belirli oranlarda yalnızca linyosülfonat katkısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Kür süresi olarak

28 gün seçildiğinde ve %4 kireç ve %2 linyosülfonat katkısı birlikte kullanıldığında optimum dayanımı sağlayacaktır. Aynı zamanda kirecin gevrek davranışına göre, daha sünek bir davranış göstermektedir. Kirecin tek başına sağladığı dayanımlara ulaşamasa bile, dayanımda ciddi bir artış gösterirken kireç miktarının azaltılması ile evre problemlerinin etkisinin azalabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alazigha, D. P., Indraratna, B., Vinod, J. S., and Ezeajugh, L. E.,** 2016, The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 169(3): 182–193p.
- Alazigha, D. P., Indraratna, B., Vinod, J. S., and Heitor, A.,** 2018, Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture, *Transportation Geotechnics*, 14:81–92p.
- Alazigha, D. P., Vinod, J. S., Indraratna, B., and Heitor, A.,** 2017, Potential use of lignosulfonate for expansive soil stabilisation, *Environmental Geotechnics*, 6(7): 480–488p.
- Anon,** 1985, Lime Stabilization Construction Manual. Eighth Edition. National Lime Association, Arlington, VA.
- Anon,** 1990, Lime Stabilization Manual. British Aggregate Construction Materials Industry, London.
- Arel, H. Ş., ve Aydin, E.,** 2017, Effects of Ca-, Mg-, K-, and Na-lignosulfonates on the behavior of fresh concrete, *Construction and Building Materials*, 157:1084–1091p.
- Aro, T., and Fatehi, P.,** 2017, Production and Application of Lignosulfonates and Sulfonated Lignin, *ChemSusChem*, 10(9):1861–1877p.
- Atay, S.,** 2011, Maden İşletmelerinde Nakliye Yolları Tasarımı, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 44-45s.
- Athukorala, R. M.,** 2013, Geotechnical Characteristics of an Erodible Soil Stabilised by Lignosulfonate – an Analytical Perspective, Phd. Thesis, University of Wollongong, 229p.
- Bell, F.,** 1996, Lime stabilization of clay minerals and soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(2): 1283–1293p.
- Boz, A.,** 2017, Mechanical Properties Of Fiber Reinforced Lime Stabilized Clay Before And After Freeze-Thaw Effect, MSc Thesis, Ege University Civil Engineering Department, 92p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bozyigit, I., Javadi, A., ve Altun, S.,** 2021, Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5): 1160–1172p.
- Breilly, D., Fadlallah, S., Froidevaux, V., Colas, A., and Allais, F.,** 2021, Origin and industrial applications of lignosulfonates with a focus on their use as superplasticizers in concrete, *Construction and Building Materials*, 301: 124065p.
- Büyükdere, B.,** 2011, *Doğal Atık Materyal Lignininden Yüzey Aktif Madde Eldesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 75s.
- Chavali, R. V. P., and Reshmarani. B.,** 2020, Characterization of expansive soils treated with lignosulfonate. *International Journal of Geo-Engineering*, 11(1): 1–10p.
- Chen, Q., and Indraratna, B.,** 2014, Deformation Behavior of Lignosulfonate-Treated Sandy Silt under Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1): 06014015p.
- Chen, Q., Indraratna, B., Carter, J., and Rujikiatkamjorn, C.,** 2014, A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt. *Computers and Geotechnics*, 61: 316–327p.
- Cho, G.-C., Dodds, J., and Santamarina, J. C.,** 2006, Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5), 591–602p.
- Demuner, Iara F., Colodette, J. L., Demuner, A. J., and Jardim, C. M.,** 2019, Biorefinery review: Wide-reaching products through kraft lignin, *BioResources*, 14(3):7543–7581p.
- Demuner, Iara Fontes, Borges Gomes, F. J., Gomes, J. S., Coura, M. R., Borges, F. P., Macedo Ladeira Carvalho, A. M., and Silva, C. M.,** 2021, Improving kraft pulp mill sustainability by lignosulfonates production from processes residues, *Journal of Cleaner Production*, 317:128286p.
- Fernández, M. T., Orlandi, S., Codevilla, M., Piqué, T. M. and Manzanal, D.,** 2021, Performance of calcium lignosulfonate as a stabiliser of highly expansive clay. *Transportation Geotechnics*, 27: 100469p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Geçkil, T., Sarıcı, T., ve Yıldırım, E. S.,** 2019, Kireç Katkısı ile Kil Bir Zeminin Dayanımının İyileştirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(December): 171–180s.
- Hall, P.,** 2005, Final Contract Report Stabilization Of Soft Clay Subgrades In Virginia : Phase I Laboratory Study, Virginia Polytechnic Institute & State University Project, 79p.
- Hilt G.H.,and Davidson D.T.,** 1960, Lime fixation in clayey soils, *Highway Research Board*, 262: 20–32p.
- Indraratna, B., Mahamud, M.A.A., and Vinod, J.,** 2012, Chemical minerological behaviour of lignosulfonate treated soil, In *GeoCongress 2012*, 1146–1155p.
- Indraratna, B., Athukorala, R., and Vinod, J. S.,** 2015, Shear behaviour of a lignosulfonate treated silty sand, *The Changing Face of the Earth-Geomechanics & Human Influence*, 1–8p.
- Indraratna, B., Muttuvel, T., Khabbaz, H., and Armstrong, R.,** 2008, Predicting the Erosion Rate of Chemically Treated Soil Using a Process Simulation Apparatus for Internal Crack Erosion, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6): 837–844p.
- Ingles, O.G., and Metcalf, J.B.,** 1972, Soil Stabilization: Principles and Practice, Sydney, 165-186p.
- Kalkan, Ş. Ç.,** 2021, Kalsiyum Ligno Sülfonat Kullanılarak Killi Bır Zeminin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi, 81s.
- Kaymakçı, S.,** 2014, Jet Grout Kolona Soketli Fore Kazığın Çalışma Performansının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi, 95s.
- Kim, S., Gopalakrishnan, K., and Ceylan, H.,** 2012, Moisture susceptibility of subgrade soils stabilized by lignin-based renewable energy coproduct, *Journal of Transportation Engineering*, 138(11):1283–1290p.
- Kızılçelik, M.,** 2010, Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç İle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi, 118s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Koohpeyma, H. R., Vakili, A. H., Moayedi, H., Panjsetooni, A., and Nazir, R.**, 2013, Investigating the effect of lignosulfonate on erosion rate of the embankments constructed with clayey sand, *Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal*, 6p
- Li, Y., Zhang, Y., Ceylan, H., and Kim, S.**, 2019, Laboratory Evaluation of Silty Soils Stabilized with Lignosulfonate, In *International Airfield and Highway Pavements Conference 2019*, 531–540p.
- Little, D., Males, E., Prusinski, J., and Stewart, B.**, 2000, Cementitious stabilization, *Transportation in the Millenium*, 1–7p.
- Malkanthi, S. N., Balthazaar, N., and Perera, A. A. D. A. J.**, 2020, Lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt, *Case Studies in Construction Materials*, 12: e00326, 8p.
- McCautland, D.E.J.**, 1925, Lime dirt in roads, *Proceedings of National Lime Association* 7: 12-18p.
- Muttuvel, T.**, 2008, Erosion rate of chemically stabilised soils incorporating tensile stress-deformation behaviour, MsC. Thesis, University of Wollongong, 216p.
- Roshan, K., Choobbasti, A. J., and Kutanaei, S. S.**, 2020, Evaluation of the impact of fiber reinforcement on the durability of lignosulfonate stabilized clayey sand under wet-dry condition, *Transportation Geotechnics*, 23(2020) 100359: 12p.
- Roshan, K., Choobbasti, A. J., Kutanaei, S. S., and Fakhrabadi, A.**, 2022, The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of lignosulfonate stabilised clayey sand, *Cold Regions Science and Technology*, 193 103418:11p.
- Sezer, A., Mardani-Aghabaglou, A., Boz, A., and Tanrinian, N.**, 2016,. An investigation into strength and permittivity of compacted sand-clay mixtures by partial replacement of water with lignosulfonate, In *Acta Physica Polonica A*, 130: 23–27p.
- Sezer, A., Sezer, G.İ., Altun, S., Aghabaglou, A.M., ve Kalıpçılar, İ.**, 2016, Çimento ile Stabilize Edilen Kil Zeminin Sodyum ve Magnezyum Sülfatlı Çözeltiler Etkisinde Davranışı, Tübitak Projesi, 120s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Shulga, G., Betkers, T., and Brovkina, J.,** 2008, Molecular Crystals and Liquid Crystals New Lignin-Based Polymers for Ecological Rehabilitation, 486: 291–305p.
- Singh, S. P., Palsule, P.S. and Anand, G.,** 2021, Strength Properties of Expansive Soil Treated with Sodium Lignosulfonate, In *Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns*, 88: 665–679p.
- Singh, A. K. and Sahoo, J. P.,** 2021, Undrained cyclic loading response of lignosulfonate treated high plastic clay, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150 106943:5p.
- Ta'negonbadi, B. and Noorzad, R.,** 2017. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate, *Transportation Geotechnics*, 12: 45–55p.
- Ta'negonbadi, B., and Noorzad, R.,** 2018, Physical and geotechnical long-term properties of lignosulfonate-stabilized clay: An experimental investigation, *Transportation Geotechnics*, 17: 41–50p.
- Tingle, J. S., and Santoni, R. L.,** 2003, Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives, *Transportation Research Record, II* (1819):72–84p.
- Türköz, M.,** 2006, Şişen Killerin Kireç Katkısı İle Stabilizasyonu Ve Eskişehir-Meşeli Killerine Uygulanması, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi*, c(XIX): 75–88s.
- Uğur, T., ve Güleç, A.,** 2016, Harç, Sıva ve Diğer Kompozit Malzemelerde Kullanılan Bağlayıcılar ve Özellikleri, *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, 77–91s.
- Vakili, A. H., Ghasemi, J., bin Selamat, M. R., Salimi, M., and Farhadi, M. S.,** 2018, Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber, *Construction and Building Materials*, 193:405–415p.
- Vakili, A. H., Kaedi, M., Mokhberi, M., Selamat, M. R. bin, and Salimi, M.,** 2017, Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application, *Applied Clay Science*, 152: 1–8p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vijayan, G., Sasikumar, A., and College, M.,** 2019, Stabilisation of Clayey Soil by using Lignosulfonate, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 06: 1963-1967p.
- Vinod, J. S., Buddhima, I., and Mahamud, M. A. A.,** 2010, Internal erosional behaviour of lignosulfonate treated dispersive clay, *Ground Improvement Technologies and Case Histories*, GI033: 549–554p.
- Vinod J.S. and Indraratna B., M. M.,** 2012, Elastic modules of soils treated with lignosulfonate, *11th Conference on Geomechanics : Ground Engineering in a Changing World*, 487–492p.
- Vinod, Jayan S., Indraratna, B., and Al Mahamud, M. A.,** 2010, Stabilisation of an erodible soil using a chemical admixture, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 163(1): 43–51p.
- Yıldız, M., ve Soğancı, A. S.,** 2012, Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime-stabilized clays, *Scientia Iranica*, 19(4): 1013–1017p.
- Zhou, H., Yang, D., and Zhu, J. Y.,** 2016, Molecular Structure of Sodium Lignosulfonate from Different Sources and their Properties as Dispersant of TiO₂ Slurry, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 37(2): 296–303p.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her türlü desteği ve bilgilerini esirgemedi paylaşan ve akademik olarak yönlendiren çok değerli danışmanım Prof. Dr. Alper SEZER’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalar esnasında yardımcı olan, bilgi ve deneyimlerini paylaşan arkadaşım Gül Ece HIZAL’a teşekkür ederim.

Sabır ve anlayış ile her zaman yanımda olan, çalışmalarımda hem akademik hem manevi olarak yardımcı olan ailem ve sevgili eşime gösterdikleri sonsuz destekleri için teşekkür ederim.

İZMİR

15/09/2022

Adı-Soyadı

Aysel DURMUŞ

ÖZGEÇMİŞ

AYSEL DURMUŞ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2018 yılında mezun olmuştur. 2019 yılında Yüksek lisans eğitimini Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde yapmaya hak kazanmıştır.

