YÜKSEK ORGANİK İÇERİKLİ YUMUŞAK ZEMİNİN DİYATOMİT VE KİREÇLE STABİLİZASYONU

STABILIZATION OF HIGH ORGANIC CONTENT SOFT SOIL UTILIZING DIATOMITE AND LIME

Mehmet Halil ÇALIM[1], Rümeysa USTA[2], İlknur ERDOĞAN[3], Cem Ali ŞENKAL[4], Sabriye Banu İKİZLER[5], Zekai ANGIN[6]

ÖZET

Bu çalışmada, organik içeriği yüksek ve yüksek plastisiteli bir orman yolu taban zemininin kireç-diyatomit ile stabilizasyonunda erken yaş mekanik davranış incelenmiştir. Doğal zemin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre CH olarak sınıflandırılmış; kayıp yakma deneyiyle organik madde içeriği %14,30, likit limiti %65,50 ve plastisite indisi %37,50 olarak belirlenmiştir. Doğal zemin (NS), %6 hidrat kireçli zemin (NSL6) ve %6 kirece ek olarak %5, %10 ve %20 diyatomit içeren karışımlar 1 ve 7 gün kürlenmiştir. Serbest basınç dayanımı (UCS) ve pik eksenel birim şekil değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Bir günlük ortalama UCS değerleri NS, NSL6, NSD5L6, NSD10L6 ve NSD20L6 için sırasıyla 136,0; 573,8; 336,1; 688,4 ve 584,0 kPa; 7 günlük değerler 152,6; 912,5; 449,0; 987,3 ve 771,9 kPa'dır. NSD10L6 her iki yaşta da en yüksek UCS'yi vermiş ve NSL6'ya göre sırasıyla yaklaşık %20 ve %8 daha yüksek dayanım sağlamıştır. Stabilizasyonla dayanım artarken pik eksenel birim şekil değiştirme azalmış; sonuçlar optimum diyatomit oranının erken yaş performansına göre belirlenmesi gerektiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik zemin, orman yolu, diyatomit, hidrat kireç, serbest basınç dayanımı, erken yaş

ABSTRACT

This paper evaluates the early-age mechanical response of a high-plasticity, organic-rich forest-road subgrade stabilised with hydrated lime and diatomite. The natural soil was classified as CH and had a loss-on-ignition-based organic content of 14.30%, a liquid limit of 65.50%, and a plasticity index of 37.50%. Natural soil (NS), soil with 6% hydrated lime (NSL6), and lime-treated mixtures containing 5%, 10%, and 20% diatomite were cured for 1 and 7 days. Unconfined compressive strength (UCS) and peak axial strain were compared. Mean 1-day UCS values for NS, NSL6, NSD5L6, NSD10L6, and NSD20L6 were 136.0, 573.8, 336.1, 688.4, and 584.0 kPa, respectively; after 7 days they increased to 152.6, 912.5, 449.0, 987.3, and 771.9 kPa. NSD10L6 produced the highest UCS at both ages and exceeded NSL6 by approximately 20% and 8% at 1 and 7 days. Stabilisation increased strength while reducing peak axial strain. The results show that early-age performance depends strongly on diatomite dosage.

Keywords: *Organic-rich soil, forest road, diatomite, hydrated lime, unconfined compressive strength, early age*

1. GİRİŞ

Orman yolları çoğunlukla düşük trafik hacmine sahip, kaplamasız veya sınırlı üstyapı kalınlığıyla inşa edilen ulaşım yapılarıdır ve güzergâhta bulunan yerel zeminin mühendislik özelliklerinden doğrudan etkilenir. İnce daneli orman yolu zeminlerinde yüksek plastisite, suya duyarlılık, düşük taşıma kapasitesi ve trafik altında büyük deformasyonlar görülebilir. Organik maddelerin su tutma kapasitesini artırması ve zemin daneleri arasındaki bağlanmayı zayıflatması; tekerlek izi oluşumu, oturma, erozyon ve

mevsimsel bozulma gibi sorunları daha belirgin hâle getirebilir. Uygun olmayan zeminin kazılarak taşınması ve yerine granüler malzeme serilmesi mümkün olmakla birlikte, bu yaklaşım doğal agrega tüketimini ve taşıma maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle mevcut zeminin yerinde iyileştirilmesi orman yolları için önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Fabiano et al., 2017).

Kireç, yüksek plastisiteli ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir bağlayıcıdır. Su ile temas eden hidrat kireçten açığa çıkan Ca^{2+} ve OH^{-} iyonları kısa sürede katyon değişimi, flokülasyon ve aglomerasyonu teşvik eder, yüksek pH koşulları ise reaktif silis ve alüminanın çözünmesini ve zamanla çimentolu ürünlerin gelişmesini destekler. Bu nedenle kireçli zeminlerde erken yaş davranışın önemli bir kısmı parçacıkların yeniden düzenlenmesi ve flokülasyon-aglomerasyonla, daha ileri yaşlardaki dayanım gelişimi ise puzolanik bağlanmayla ilişkilendirilmektedir (Bell, 1996). Kirecin yüksek plastisiteli orman yolu zeminlerinde kıvam limitlerini, kompaksiyon parametrelerini, serbest basınç dayanımını ve CBR değerini iyileştirebildiği bildirilmiştir (Mousavi et al., 2023).

Silisçe zengin puzolanların kireçle birlikte kullanılması, sisteme ek reaktif silis sağlayarak kireç stabilizasyonunu geliştirebilir. Diyatomit düşük yoğunluğu, yüksek porozitesi, geniş özgül yüzey alanı ve belirgin su emme kapasitesiyle bu amaç için dikkat çekici bir doğal malzemedir (Aksakal et al., 2012). Bununla birlikte aynı özellikler, yüksek diyatomit oranlarında su ihtiyacını artırabilir ve kompaksiyonla elde edilen kuru yoğunluğu azaltabilir. Kireç içermeyen sistemlerde diyatomit çoğunlukla fiziksel bir düzenleyici olarak davranırken, aktif kalsiyum kaynağıyla birlikte kullanılması çimentolu bir yapı gelişimi açısından daha elverişli koşullar oluşturabilir.

Bu çalışmada, yalnızca 1 ve 7 günlük erken yaş sonuçlarına odaklanmaktadır. Değerlendirme doğal zemin (NS), %6 kireçli zemin (NSL6) ve %6 kirece ek olarak %5, %10 ve %20 diyatomit içeren NSD5L6, NSD10L6 ve NSD20L6 karışımlarını içermektedir. Amaç, kireç ve kireç-diyatomit kombinasyonlarının UCS gelişimini ve pik eksenel birim şekil değiştirmesini karşılaştırmak, ayrıca seçilen diyatomit oranlarının kireçli referans NSL6'ya göre sağladığı erken yaş katkıyı nicel olarak ortaya koymaktır.

2. MALZEME VE METOT

2.1. Doğal Zemin

Doğal zemin, Trabzon ili Ortahisar ilçesinde Karadeniz Teknik Üniversitesi kampüsünde bulunan bir orman yolundan alınmıştır. Numune hazırlığında organik içeriği yüksek ince daneli zeminde geri dönüşü olmayan kuruma etkilerini sınırlandırmak amacıyla ana deney malzemesi 60 ± 5 °C'de sabit kütleye kadar kurutulmuş, zemin topakları parçalanmış ve malzeme No. 4 elekten geçirilerek kapalı kaplarda saklanmıştır. Organik madde miktarı ASTM D2974'e göre kayıp yakma yöntemiyle belirlenmiş; 105 ± 5 °C'de kurutulan alt numuneler 440 °C'de 4 saat yakılmış ve kuru kütle kaybından %14,30 LOI esaslı organik madde içeriği hesaplanmıştır. Özgül ağırlık ASTM D854'e, dane boyu dağılımı ise ASTM D6913/D6913M ve ASTM D7928'e göre belirlenmiştir. Doğal zeminin fiziksel ve indeks özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Doğal zeminin fiziksel ve indeks özellikleri.

Özellik	Değer	Standart
Renk	Kahverengi	ASTM D2488
Özgül ağırlık, Gs	2,63	ASTM D854
USCS sınıfı	CH	ASTM D2487
Likit limit, wL (%)	65,50	ASTM D4318
Plastik limit, wP (%)	28,00	ASTM D4318
Plastisite indisi, IP (%)	37,50	ASTM D4318
Maks. kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)	15,30	ASTM D698
Optimum su muhtevası (%)	20,50	ASTM D698
LOI esaslı organik madde (%)	14,30	ASTM D2974
Çakıl > 2,0 mm (%)	1,84	ASTM D6913/D6913M
Kum 0,075–2,0 mm (%)	32,94	ASTM D6913/D6913M
Silt 0,002–0,075 mm (%)	45,68	ASTM D7928
Kil < 0,002 mm (%)	19,54	ASTM D7928

ASTM D2487 ölçütlerine göre zemin CH olarak sınıflandırılmıştır. Ölçülebilir düzeyde organik madde içermesine rağmen kıvam özellikleri organik zemin sınıfı için gerekli ölçütleri sağlamadığından sınıflandırma CH olarak korunmuştur.

2.2. Stabilizörler ve Karışım Oranları

Çalışmada ticari CL 80-S hidrat kireç ve işlenmiş diyatomit kullanılmıştır. Kireç esas olarak $Ca(OH)_2$ içermekte olup tedarikçi verisinde aktif $Ca(OH)_2$ oranı %65, CaO oranı %85,80'dir. Diyatomit yaklaşık 300–400 °C'de ısıl işlem görmüş, öğütülmüş ve iri safsızlıklardan ayrılmıştır; malzemenin tamamı 75 µm'den incedir. Aynı ticari kaynaklara ait daha önce raporlanmış kimyasal bileşimde diyatomitin SiO_2 içeriği %72,16, Al_2O_3 içeriği %9,45 ve CaO içeriği %1,81'dir (Tandogan et al., 2026). Bu kimyasal analizler mevcut deney programında yeniden ölçülmemiştir. Numune isimlendirmesi ve karışım oranları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Numune isimlendirmesi ve karışım oranları

Karışım	Doğal zemin (%)	Diyatomit (%)	Hidrat kireç (%)
NS	100	0	0
NSL6	94	0	6
NSD5L6	89	5	6
NSD10L6	84	10	6
NSD20L6	74	20	6

Diyatomit ve kireç oranları toplam kuru katı kütlesine göre ikame esasına dayanmakta toplam kuru karışım kütlesi %100'de tutulacak biçimde doğal zemin oranı azaltılmaktadır.

2.3. Kıvam Limitleri ve Standart Proktor Testi

Doğal ve stabilize karışımların likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ASTM D4318-17e1'e göre belirlenmiştir. Depolama ve genel deneyler için No. 4 elekten geçirilen malzemenin No. 40 elekten geçen kısmı kıvam limitlerinde kullanılmıştır. Stabilize karışımlarda zemin ve katkılar damıtılmış su ile homojen bir hamur hâline getirilmiş, hava geçirmez plastik torbalarda oda sıcaklığında 24 saat bekletildikten sonra deney yapılmıştır. Likit limit Casagrande kabı ile farklı darbe sayılarından oluşturulan akma eğrisinde 25 darbeye karşılık gelen su muhtevası olarak; plastik limit ise yaklaşık 3,2 mm çapta ufalanmaya başlayan zemin iplikçiğinin su muhtevası olarak belirlenmiştir.

Kompaksiyon özellikleri ASTM D698-12e2'ye uygun Standart Proktor yöntemiyle belirlenmiştir. Kuru zemin, kireç ve diyatomit önce görsel olarak homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmış, daha sonra damıtılmış su kademeli olarak eklenmiştir. Islak karışım tamamlandıktan sonra kompaksiyona hemen başlanmış; ön bekletme, mellowing veya kür süresi uygulanmamıştır. Karışım kompaksiyon aralığının tüm numunelerde aynı tutulmasıyla zaman etkisine bağlı değişkenliğin azaltılması amaçlanmıştır. Her karışım için birden fazla su muhtevasında deney yapılarak su muhtevası kuru birim hacim ağırlık eğrisi oluşturulmuş, eğri tepesinden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık belirlenmiştir. Kireçli zeminlerde kompaksiyon gecikmesinin agregalaşmış topaklar oluşturarak yoğunluğu etkileyebildiği daha önce gösterildiğinden bu prosedürün sabit tutulması önemlidir (Moghal vd., 2021).

2.4. Numune Hazırlama Prosedürü ve Kürleme

UCS numunelerinde kullanılacak zemin, kireç ve diyatomit miktarları her karışımın kendi maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasına göre hesaplanmıştır. Kuru bileşenler görsel olarak homojen dağılım sağlanana kadar karıştırılmış, optimum su muhtevasına karşılık gelen damıtılmış su kademeli biçimde eklenmiş ve ıslak karışım mekanik olarak 10 dakika karıştırılmıştır. Her numunenin gerekli kütlesi hedef kuru yoğunluk ve kalıp hacminden hesaplanmış; malzeme kalıba üç eşit tabaka hâlinde yerleştirilmiştir. Tabakalar arası belirgin ara yüz oluşumunu azaltmak için her tabakanın üst yüzeyi bir sonraki tabaka yerleştirilmeden önce hafifçe çizilmiştir. Böylece 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik numuneler hazırlanmıştır.

Kalıptan çıkarılan numunelerin başlangıç kütlesi kaydedilmiş, nem kaybını azaltmak amacıyla plastik filmle sıkıca sarılmış ve karışım kodu, numune numarası, kür süresi ve deney tarihiyle etiketlenmiştir. Ana deney programında her karışım ve kür süresi için başlangıçta üç tekrar hazırlanmış, ancak hazırlama hasarı, geçersiz göçme biçimi veya kullanılamayan gerilme–şekil değiştirme kaydı bulunan örnekler istatistiksel değerlendirmeye alınmamıştır. Bu bildiri kapsamında yalnızca 1 ve 7 günlük kür sonuçları kullanılmıştır. Numuneler oda sıcaklığında ve bağıl nemin %95'ten yüksek olduğu koşullarda saklanmış; kür boyunca bağıl kütle değişiminin %1'in altında kalması, sarma işleminin nem kaybını etkin biçimde sınırladığını göstermiştir.

2.5. Serbest Basınç Dayanımı ve Pik Eksenel Birim Şekil Değiştirmeler

Kireç içeren karışımların hazırlanması ve kürlenmesi ASTM D5102/D5102M esas alınarak, yükleme prosedürü, gerilme şekil değiştirme hesapları ve göçme ölçütü ise ASTM D2166/D2166M'ye göre yürütülmüştür. Serbest basınç dayanımı, kesit alanı eksenel deformasyona göre sabit hacim varsayımıyla düzeltilmiş numunede elde edilen maksimum eksenel gerilme olarak tanımlanmıştır. Deney sistemi rijit yük çerçevesi, 5000 N kapasiteli yük hücresi, LVDT, kontrol ünitesi ve bilgisayar tabanlı veri toplama sisteminden oluşmaktadır. Eksenel basınç, yanal çevre basıncı olmaksızın 0,5 mm/dak sabit deplasman hızında uygulanmış ve kuvvet ile deformasyon verileri 10 Hz örnekleme frekansında kaydedilmiştir.

Pik eksenel birim şekil değiştirme, maksimum düzeltilmiş eksenel gerilmeye karşılık gelen eksenel şekil değiştirme olarak alınmıştır. Mekanik değerlendirme, ortalama UCS, NS'ye göre normalize UCS, NSL6'ya göre göreli UCS ve pik eksenel birim şekil değiştirme parametreleri üzerinden yapılmıştır.

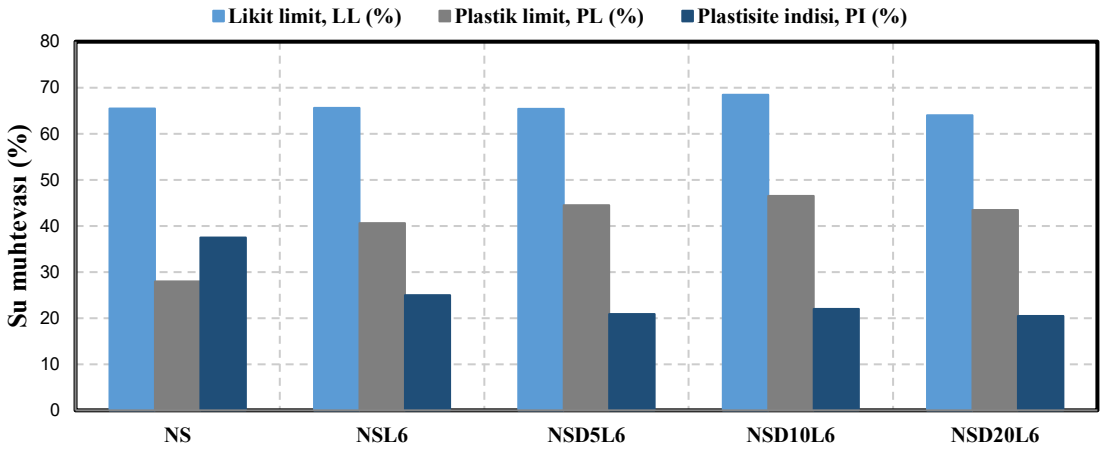
3. SONUÇLAR

3.1. Kıvam ve Kompaksiyon Davranışı

Numunelerin kıvam limitleri ve kompaksiyon parametreleri Tablo 3'te, kıvam limitlerindeki değişim Şekil 1'de ve kompaksiyon parametreleri Şekil 2'de verilmiştir. Doğal zeminin likit limiti %65,50 ve plastisite indisi %37,50'dir. %6 kireç ilavesiyle NSL6'nın likit limiti yaklaşık aynı düzeyde kalırken plastik limit %40,63'e yükselmiş ve plastisite indisi %25,02'ye düşmüştür. Bu değişim, kısa süreli katyon değişimi ile flokülasyon aglomerasyonun kil danelerini yeniden düzenlemesi ve plastik kıvam aralığını daraltmasıyla uyumludur (Bell, 1996; Mousavi vd., 2023).

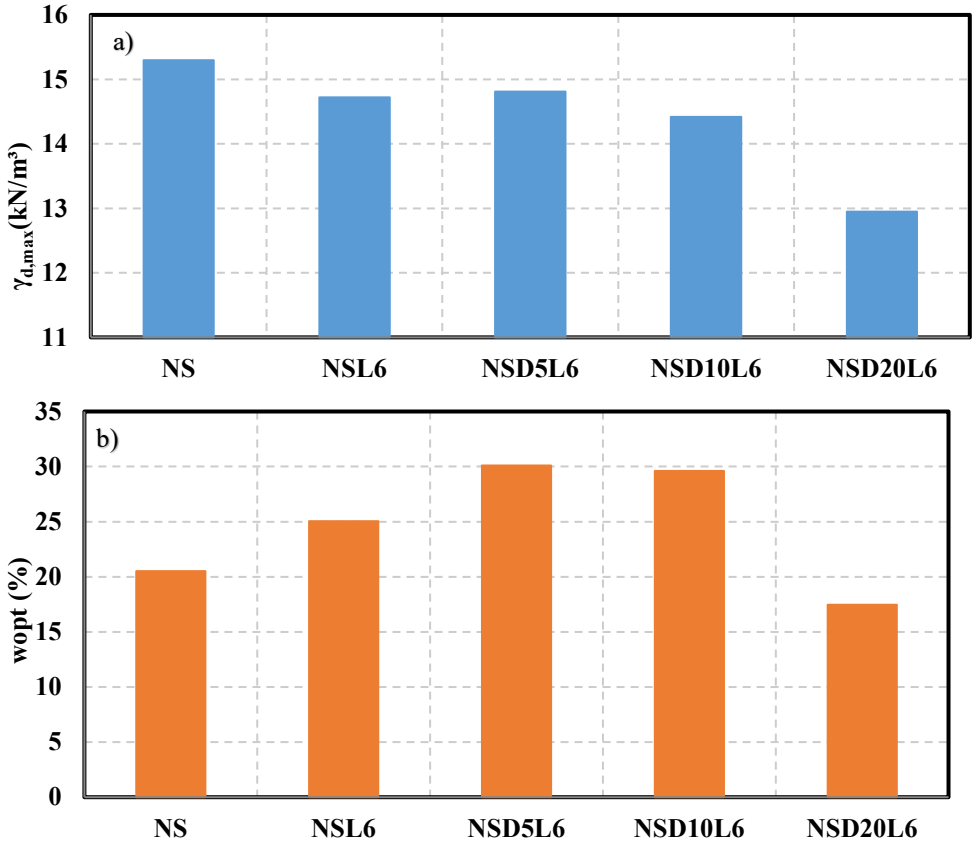
Tablo 3. Reçetelerin kıvam ve Standart Proktor parametreleri.

Karışım	LL (%)	PL (%)	PI (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m³)	w_{opt} (%)
NS	65,50	28,00	37,50	15,30	20,50
NSL6	65,65	40,63	25,02	14,72	25,04
NSD5L6	65,43	44,52	20,91	14,81	30,10
NSD10L6	68,50	46,50	22,00	14,42	29,60
NSD20L6	64,00	43,50	20,50	12,95	17,46



Şekil 1. Seçilen karışımlarda likit limit, plastik limit ve plastisite indisi.

Diyatomitin kireçli sistemde eklenmesi likit limiti dar bir aralıkta tutarken plastik limiti NSL6'ya göre genel olarak artırmış ve PI değerini yaklaşık %20–22 aralığına çekmiştir. NSD5L6 ve NSD20L6'da PI yaklaşık %20,5–20,9'a düşerken NSD10L6'da %22,0 olarak belirlenmiştir. Bu değerler doğal zeminin %37,5'lik PI değerine göre belirgin bir azalmayı temsil etmektedir. Kireçli karışımlarda diyatomit miktarı ile LL veya PL arasında basit doğrusal bir ilişki görülmemesi; diyatomitin su emme kapasitesi ile kirecin kısa süreli flokülasyon etkilerinin birlikte işlemesiyle açıklanmaktadır.



Şekil 2. Reçetelerin a) maksimum kuru birim hacim ağırlık b) optimum su muhtevası değerleri.

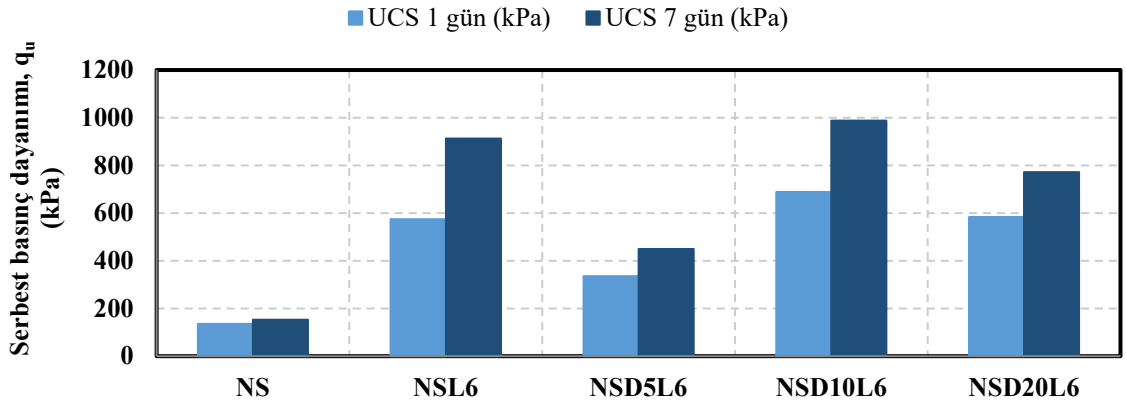
Kompaksiyon sonuçlarında NSL6'nın maksimum kuru birim hacim ağırlığı 15,30'dan 14,72 kN/m³'e gerilemiş, optimum su muhtevası ise %20,50'den %25,04'e yükselmiştir. %5 diyatomit içeren NSD5L6'da kuru birim hacim ağırlık 14,81 kN/m³ ile NSL6'ya çok yakınken, %10 ve %20 diyatomitte sırasıyla 14,42 ve 12,95 kN/m³'e düşmüştür. Bu eğilim, kireçle oluşan daha açık agregalı yapı ile düşük yoğunluklu ve gözenekli diyatomitin birlikte parçacık yerleşimini sınırlandırmasıyla uyumludur. Diyatomitin su tutma kapasitesi düşük ve orta oranlarda su ihtiyacını artırabilmektedir (Aksakal vd., 2012; Qu & Zhao, 2016). Kaynak veride NSD20L6 için raporlanan %17,46'lık optimum su muhtevası, seçilen serideki non-monotonik kompaksiyon davranışının belirgin bir örneğidir; bu nedenle diyatomit oranı ile wopt arasında tek yönlü bir ilişki kurulmamıştır.

3.2. Serbest Basınç Dayanımı

Ortalama UCS değerleri Şekil 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. Doğal zeminin 1 günlük ortalama UCS değeri 135,98 kPa iken %6 kireç ilavesiyle bu değer 573,83 kPa'a yükselmiş, yani NSL6 doğal zeminin yaklaşık 4,22 katına ulaşmıştır. Kireçli sisteme %5 diyatomit eklendiğinde 1 günlük UCS 336,14 kPa ile NSL6'nın altında kalmıştır. Buna karşılık NSD10L6 ve NSD20L6 sırasıyla 688,40 ve 583,99 kPa dayanım göstermiştir. Böylece bir günlük yaşta seçilen karışımlar içinde en yüksek dayanım NSD10L6'da elde edilmiş; NSD20L6 ise NSL6'yı yalnızca sınırlı ölçüde aşmıştır.

Tablo 4. 1 ve 7 günlük UCS ve pik eksenel birim şekil değiştirme değerleri.

Karışım	UCS 1 g (kPa)	UCS 7 g (kPa)	εp 1 g (%)	εp 7 g (%)
NS	136,0	152,6	6,30	4,81
NSL6	573,8	912,5	1,55	0,73
NSD5L6	336,1	449,0	2,19	1,39
NSD10L6	688,4	987,3	2,24	1,86
NSD20L6	584,0	771,9	3,05	2,02



Şekil 3. Seçilen karışımların 1 ve 7 günlük ortalama UCS değerleri.

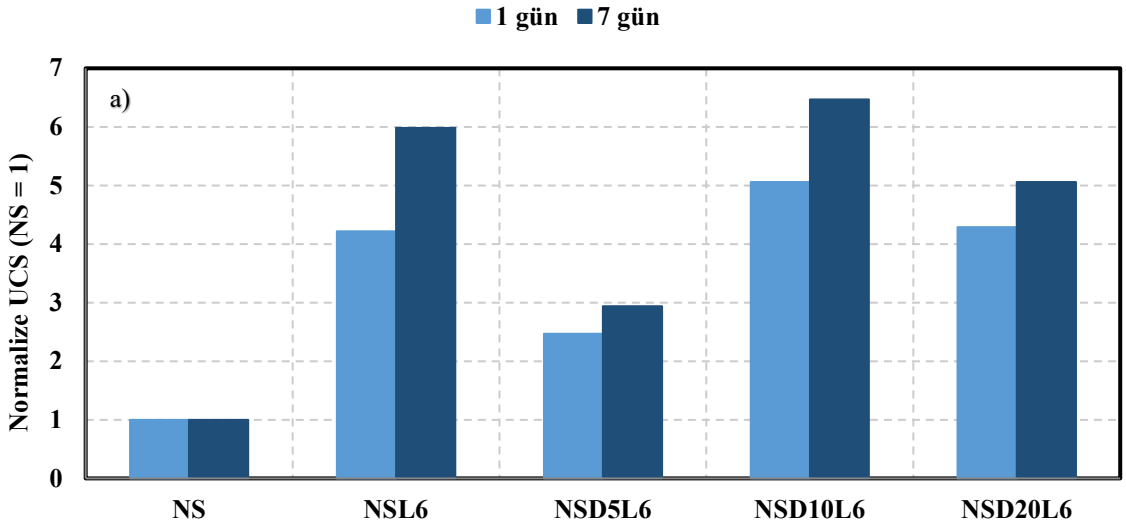
3.3. Normalize ve Kireçli Numunenin Dayanımına Referansla Dayanım Değerleri

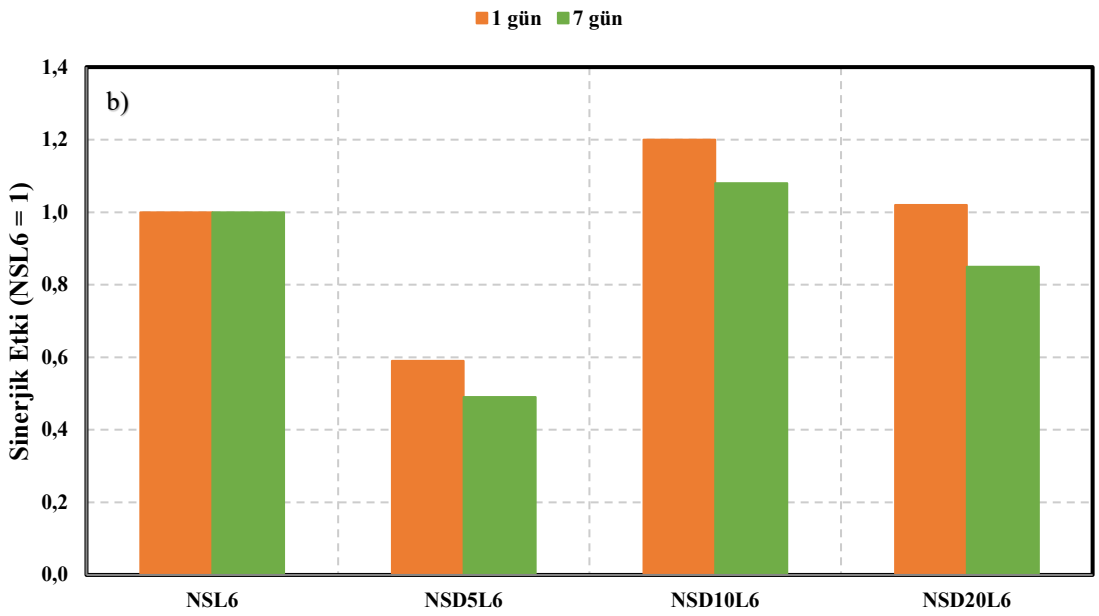
Mutlak UCS değerlerinin yanında iki farklı normalizasyon yapılmıştır. İlk yaklaşımda her karışım aynı yaştaki doğal zemine bölünerek NS = 1 kabul edilmiştir. İkinci yaklaşımda yalnızca kireç-diyatomit karışımları aynı yaştaki NSL6'ya bölünmüş ve böylece diyatomitin %6 kireçli referansın ötesindeki ek etkisi izole edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4'te sunulmuştur.

NS'ye göre normalizasyon, kirecin ve kireç-diyatomit kombinasyonlarının doğal zemine kıyasla oluşturduğu belirgin iyileşmeyi göstermektedir. NSL6 doğal zeminin 1 günde 4,22, 7 günde 5,98 katı dayanım üretmiştir. NSD10L6'da bu oranlar sırasıyla 5,06 ve 6,47'ye ulaşmıştır. NSD20L6 da doğal zemine göre güçlü bir iyileşme sağlamış; 1 ve 7 günde sırasıyla 4,29 ve 5,06 oranları elde edilmiştir. NSD5L6 ise doğal zeminden belirgin biçimde daha güçlü olmakla birlikte diğer kireçli karışımların gerisinde kalmıştır.

NSL6'ya göre normalizasyon daha seçici bir karşılaştırma sunmaktadır. NSD5L6'nın oranı 1 günde 0,59 ve 7 günde 0,49 olduğundan %5 diyatomit erken yaşta kirecin tek başına sağladığı dayanımı azaltmıştır. NSD10L6, 1 günde 1,20 ve 7 günde 1,08 oranlarıyla her iki yaşta da NSL6'nın üzerinde kalan tek seçilmiş diyatomitli karışımdır. NSD20L6'nın 1 günlük oranı 1,02 ile kireçli referansa çok yakınken 7 günlük oranı 0,85'e düşmüştür. Dolayısıyla bu deney serisinde erken yaş UCS bakımından %10 diyatomit, %6 kireçle birlikte en dengeli sonucu vermiştir.

Bu erken yaş sıralaması aynı ticari kaynaklardan alınan diyatomit ve kireçle farklı bir CH zemininde elde edilen bulgudan ayrılmaktadır. Tandogan vd. (2026), %20 diyatomit ve %6 kireç içeren karışımın 1 ve 7 günde sırasıyla 1.252 ve 2.220 kPa ile en yüksek erken yaş dayanımlarını verdiğini bildirmiştir. Mevcut organik içeriği yüksek zeminde ise seçilen dozajlar içinde %10 diyatomit en yüksek UCS'yi üretmiştir. Farklı ana zeminlerde optimum oranların değişmesi, katkı tasarımının yalnızca USCS sınıfına göre belirlenmemesi gerektiğini; ana zeminin organik içeriği, dane yapısı, mineralojisi, su talebi ve kompaksiyon özelliklerinin birlikte dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

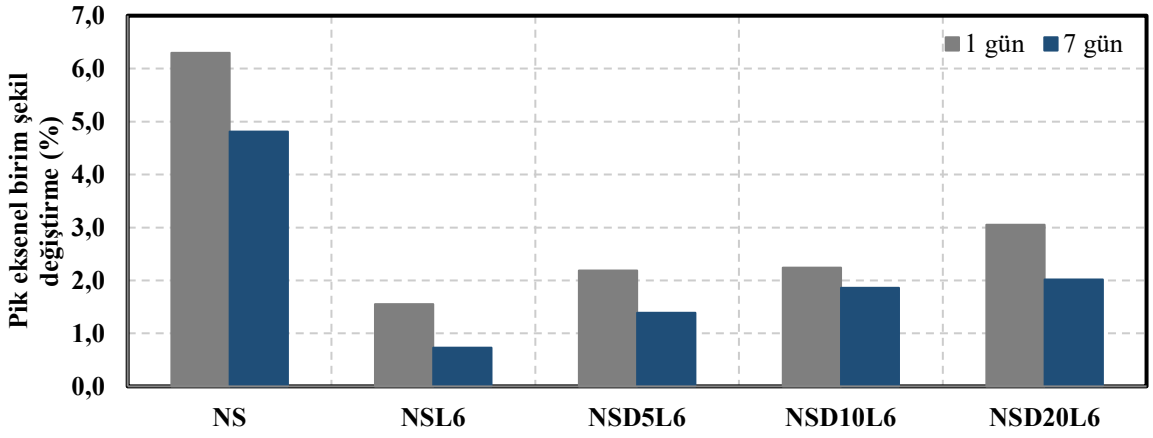




Şekil 4. Reçetelerin a) Normalize UCS b) Sinerji etki değerleri.

3.4. Pik Eksenel Birim Şekil Değiştirme

Şekil 5, dayanım artışının deformasyon kapasitesindeki belirgin azalmayla birlikte gerçekleştiğini göstermektedir. Doğal zemin 1 günlük yaşta pik gerilmeye yaklaşık %6,30 eksenel birim şekil değiştirmede ulaşmış; 7 günde bu değer %4,81'e düşmüştür. Kireçli karışımların tamamı aynı yaşlarda doğal zeminden çok daha düşük pik şekil değiştirme değerleri göstermiştir. NSL6'da εp değeri 1 günde %1,55, 7 günde yalnızca %0,73'tür. NSD5L6, NSD10L6 ve NSD20L6 için bir günlük pik şekil değiştirmeler sırasıyla %2,19, %2,24 ve %3,05; 7 günlük değerler ise %1,39, %1,86 ve %2,02'dir.



Şekil 5. Reçetelerin 1 ve 7 günlük pik eksenel birim şekil değiştirmeleri.

3.5. Genel Değerlendirme

Bu çalışmada organik içeriği %14,30 olan CH sınıfı bir orman yolu zemininin doğal hâli ile %6 kireçli ve %5, %10 veya %20 diyatomit içeren seçili kireç-diyatomit karışımlarının

1 ve 7 günlük davranışı karşılaştırılmıştır. Elde edilen başlıca sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- %6 kireç ilavesi doğal zeminin plastisite indisini %37,50'den yaklaşık %25'e düşürmüş; diyatomitli kireç karışımlarında PI yaklaşık %20,5–22,0 aralığına gerilemiştir. Kireçli sistemde LL dar bir aralıkta kalırken PL belirgin biçimde yükselmiştir.

- Kireç ve diyatomit kompaksiyon davranışını değiştirmiştir. NSL6'nın maksimum kuru birim hacim ağırlığı 14,72 kN/m³, NSD5L6'nın 14,81 kN/m³, NSD10L6'nın 14,42 kN/m³ ve NSD20L6'nın 12,95 kN/m³ olarak raporlanmıştır. Yüksek diyatomit oranında kuru birim hacim ağırlıktaki azalma, diyatomitin düşük yoğunluklu ve gözenekli yapısıyla uyumludur.

- 1 günlük ortalama UCS değerleri NS, NSL6, NSD5L6, NSD10L6 ve NSD20L6 için sırasıyla 136,0; 573,8; 336,1; 688,4 ve 584,0 kPa; 7 günlük değerler ise 152,6; 912,5; 449,0; 987,3 ve 771,9 kPa'dır. Seçilen karışımlar içinde NSD10L6 her iki yaşta da en yüksek UCS'yi vermiştir.

- NSL6'ya göre normalizasyonda NSD10L6'nın dayanım oranı 1 günde 1,20 ve 7 günde 1,08'dir. Böylece %10 diyatomit, seçilen diyatomitli karışımlar arasında her iki erken yaşta da kireçli referansın üzerinde kalan tek oran olmuştur. NSD5L6 iki yaşta da NSL6'nın altında; NSD20L6 ise 1 günde yaklaşık eşit, 7 günde daha düşük dayanım göstermiştir.

- Kireçli karışımlar doğal zemine göre çok daha düşük pik eksenel birim şekil değiştirme göstermiştir. Yedi günlük deformasyon değerleri NS'de %4,81 iken NSL6, NSD5L6, NSD10L6 ve NSD20L6 için sırasıyla %0,73, %1,39, %1,86 ve %2,02'dir. Bu durum erken yaş dayanım artışına daha sınırlı deformasyon kapasitesinin eşlik ettiğini göstermektedir.

- İlk haftadaki UCS gelişimi doğal zeminde %12,2, NSL6'da %59,0, NSD5L6'da %33,6, NSD10L6'da %43,4 ve NSD20L6'da %32,2'dir. Aynı dönemde bütün karışımlarda pik eksenel birim şekil değiştirme azalmıştır. Bu nedenle erken yaş performansı dayanım ve deformasyon parametreleri birlikte değerlendirilmelidir.

- Aynı ticari kireç ve diyatomitin kullanıldığı farklı bir CH zeminde daha yüksek diyatomit oranının erken yaşta üstün sonuç vermiş olması, optimum diyatomit oranının ana zemin özelliklerine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu organik içeriği yüksek zemin için seçilen dozajlar arasında %10 diyatomit, erken yaş pik dayanımı açısından en etkili seçenek olmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Aksakal, E. L., Angin, I., ve Oztas, T. (2012). Effects of diatomite on soil physical properties. CATENA, 88(1), 1–5. https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.08.004

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology, 42(4), 223–237. https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2

Fabiano, E., Reginaldo, S. P., Eder, P. M., Fabricia, C. M. M., Humberto, A., Ailton, T. D. V., Mayara, P. O. M., Mauro, E. N., ve Ildeu, S. M. (2017). Improving geotechnical properties of a sand-clay soil by cement stabilization for base course in forest roads. African Journal of Agricultural Research, 12(30), 2475–2481. https://doi.org/10.5897/AJAR2016.12482

Khajeh, A., Jamshidi Chenari, R., MolaAbasi, H., ve Payan, M. (2022). An experimental investigation on geotechnical properties of a clayey soil stabilised with lime and zeolite in base and subbase courses. Road Materials and Pavement Design, 23(12), 2924–2941. https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1997789

Moghal, A. A. B., Ashfaq, M., Al-Obaid, A. A. K. H., Abbas, M. F., Al-Mahbashi, A. M., ve Shaker, A. A. (2021). Compaction delay and its effect on the geotechnical properties of lime treated semi-arid soils. Road Materials and Pavement Design, 22(11), 2626–2640. https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1784256

Mousavi, F., Abdi, E., ve Borz, S. A. (2023). Forest Road Subgrade Improvement by Lime and Sodium Nanoalginate Used as Stabilizers for Clay Soils. Forests, 14(7), 1332. https://doi.org/10.3390/f14071332

Qu, J.-L., ve Zhao, D.-X. (2016). Comparative research on tillable properties of diatomite-improved soils in the Yangtze River Delta region, China. Science of The Total Environment, 568, 480–488. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.056

Salehi, M., Bayat, M., Saadat, M., ve Nasri, M. (2023). Prediction of unconfined compressive strength and California bearing capacity of cement- or lime-pozzolan-stabilised soil admixed with crushed stone waste. Geomechanics and Geoengineering, 18(4), 272–283. https://doi.org/10.1080/17486025.2022.2040606

Tandogan, M., Ikizler, S. B., ve Calim, M. H. (2026). Diatomite as a Pozzolana Alternative for Soil Stabilization: Investigating Effects in Natural and Lime-Amended Conditions. Journal of Materials in Civil Engineering, 38(6), 04026152. https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-21521evi.

SEMBOL LİSTESİ

Bildiride kullanılan semboller iki sütunlu tablo halinde 10 punto kullanılarak listelenmelidir.

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
G_S	**Özgül Ağırlık**	**wL**	**Likit Limit**
w_P	**Plastik Limit**	**IP**	**Plastiste İndisi**
$g_{d,max}$	**Maks kuru birim hacim ağır.**	**LOI**	**Kızdırma Kaybı**
		PL	**Plastik Limit**
USCS	**Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi**	**UCS**	**Serbest Basınç Dayanımı**
LVDT	**Doğrusal değişken diferansiyel transformatör**		