DÜŞÜK PLASTİSİTELİ BİR KİL ZEMİNDE ALTERNATİF İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF ALTERNATIVE GROUND IMPROVEMENT METHODS IN A LOW-PLASTICITY CLAY SOIL

Jhandra Mishelle REDONDO PİNTO[1], Hashmi El Fez HYMABACCUS[2], Flora Namenya OUNDO[3], Ertan BOL[4], Sedat SERT[5], Saim ÖZDEMİR[6], Eylem ARSLAN[7]

ÖZET

Bu bildiri, şeker pancarı pres filtre keki ve iki farklı (iri ve ince) formda tavuk çiftliği atığı külünün düşük plastisiteli bir kil zeminde sürdürülebilir stabilizatörler olarak potansiyelini karşılaştırmalı olarak analiz etmektedir. Çalışma, iki farklı agro-endüstriyel yan ürünün geoteknik amaçlı yeniden kullanımını ve değerlendirilmesini teşvik eden daha sürdürülebilir mühendislik stratejilerinin uygulanmasını amaçlamakta ve bu atıkların çimento ve kireç gibi geleneksel kimyasal stabilizatörlere çevre dostu bir alternatif olup olamayacağını sorgulamaktadır. Bu bağlamda araştırma, bu atıkların zemin iyileştirme malzemeleri olarak kullanımının temel zeminin belirli geoteknik özelliklerini değiştirme kapasitesini analiz ederek değerlendirmektedir. Metodoloji, doğal zemin ve stabilize edilmiş karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeyi amaçlayan deneysel bir laboratuvar programına dayanmaktadır. Bu amaçla, doğal zemine farklı oranlarda pres filtre keki (%5-%15) ve tavuk atığı külü (%15-%40) eklenerek çeşitli karışımlar hazırlanmıştır. Zemin davranışındaki değişimler, Serbest Basınç Dayanımı (UCS-Unconfined Compressive Strength) deneyi ile değerlendirilmiş ve stabilize edilmiş karışımların dayanımı doğal zemin ile karşılaştırılmıştır. Kür süresi uygulanmamış numunelerde elde edilen sonuçlar, kil zeminin serbest basınç dayanımını pres filtre kekinin %37, iri ve ince tavuk çiftliği atığı külünün ise sırasıyla %44 ile %49 civarında artırdığını göstermektedir. Çalışma, bu malzemelerin zemin stabilizasyonunda sürdürülebilir alternatifler olarak potansiyeli olduğunu göstermektedir. Bunun yanında atık malzemelerin bertarafı ile çevreci bir yaklaşım da ortaya konmaktadır. Ayrıca, zaman içinde zeminin ve katkı maddesinin davranışını belirlemek için uzun vadeli çalışmalar yapılması önerilir.

Anahtar Kelimeler: *Zemin stabilizasyonu, kil zemin, agro-endüstriyel atıklar, pres filtre keki, tavuk çiftliği atığı külü.*

ABSTRACT

This research presents a comparative analysis of the potential of sugar beet press mud and poultry manure ash, in two forms (coarse and fine), as a sustainable stabilizer in a low-plasticity clay soil. The study aims to promote the application of more sustainable engineering strategies that encourage the reuse and valorization of two different agro-industrial by-products for geotechnical purposes, while also questioning whether these wastes can serve as environmentally friendly alternatives to conventional chemical stabilizers such as cement and lime. In this context, the research evaluates the use of these residues as soil improvement materials by analyzing their ability to modify certain geotechnical properties of the base soil. The methodology is based on an

[1] İnş. Müh., Sakarya Üniversitesi, jhandra.pinto@ogr.sakarya.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] İnş. Müh., Sakarya Üniversitesi, hashmi.hymabaccus@ogr.sakarya.edu.tr
[3] İnş. Müh., Sakarya Üniversitesi, namenya.oundo@ogr.sakarya.edu.tr
[4] Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi, ebol@sakarya.edu.tr
[5] Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi, sert@sakarya.edu.tr
[6] Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi, saimo@sakarya.edu.tr
[7] Arş. Gör., Sakarya Üniversitesi, eylemarslan@sakarya.edu.tr

experimental laboratory program designed to determine the physical and mechanical properties of the natural soil and stabilized mixtures. For this purpose, various mixtures were prepared by adding different portions of press filter mud (5%-15%) and poultry manure ash (15%-40%) to the natural soil. Changes in soil behavior are evaluated using the Unconfined Compressive Strength (UCS) test, allowing comparison of the strength of stabilized mixtures with that of the natural soil. The results obtained from uncured samples indicate that the unconfined compressive strength of the clay increased by 37% with press filter mud, and by approximately 44% and 49% with coarse and fine poultry manure ash, respectively. This study demonstrates that these materials have potential as sustainable alternatives in soil stabilization. Moreover, it presents an environmentally friendly approach through the reuse and disposal of waste materials. In addition, it is recommended that long-term tests be conducted to assess the soil's behavior with the additive over time.
Keywords: *Soil stabilization, clay soil, agricultural industry residues, press mud, manure ash.*

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde, zeminin karakterizasyonu ve gerektiğinde iyileştirilmesi, herhangi bir inşaat altyapısının istikrarını ve işlevselliğini garanti altına almak için kritik öneme sahip bir aşamadır. Her şantiye, zemin türü, topografya, yeraltı suyu seviyesi ve sismik şartlar açısından kendine özgü koşullara sahip olduğundan, geoteknik araştırmalar bu değişkenleri nicel mekanik parametrelere dönüştürerek güvenli ve ekonomik temel ve zemin iyileştirme çözümlerinin seçilmesini sağlar (Fannin, 2008; Kerisel, 1985).

Tüm yapılar, üzerinde bulundukları zeminin dayanıklılığına ve stabilitesine doğrudan bağlıdır. Zeminin değişkenliğinin bilinmemesi veya düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerin mevcut olması, aşırı oturma, istikrarsızlık veya yapısal hasarlara yol açabilir (Patil vd., 2016). Bu riskleri azaltmak için geoteknik mühendisliği iki ana yaklaşım sunar: derin temel yöntemleri veya güçlendirme ve stabilizasyon teknikleri yoluyla doğal zeminin özelliklerinin iyileştirilmesi (Saran, 2017).

Zemin güçlendirme, kayma direncini artırmayı, deformasyonları azaltmayı ve temel maliyetlerini düşürmeyi amaçlamaktadır. Fiziksel yöntemler ve geosentetikler, metal şeritler veya lifler gibi sentetik katkı maddeleri ise yanal deformasyonu sınırlamaktadır (Hao vd., 2023; Raut & Verma, 2024). Kimyasal stabilizasyon ise bağlayıcı maddelerin eklenmesi yoluyla zeminin mineralojisini, yapısını ve daneler arası bağ özelliklerini değiştirir (Shukla vd., 2009).

Geleneksel kimyasal stabilizasyon alanında, Portland çimentosu ve sönmüş kirecin kullanımı, çimentolu bağlar oluşturma, plastisiteyi azaltma ve dayanıklılığı artırma konusundaki etkinliği nedeniyle yaygın bir uygulama olmuştur (Khattak & Alrashidi, 2006). Bununla birlikte, bu geleneksel bağlayıcıların üretimi, termal işleme sırasında büyük miktarda karbondioksit (CO_2) salınımı ve yüksek enerji tüketimi nedeniyle ciddi bir çevresel etki yaratmaktadır. Bu olumsuz çevresel etkileri hafifletmek amacıyla, modern geoteknik sürdürülebilir alternatifler olarak endüstriyel ve tarımsal yan ürünlerin değerlendirilmesi ve yeniden kullanımına yönelmiştir (Anburuvel, 2024; Eisa vd., 2022).

Geoteknik uygulamalar için potansiyel taşıyan alternatif malzemeler arasında, uçucu kül ve taban külü gibi endüstriyel yanma sonucu elde edilen küller öne çıkmaktadır. Buna ek olarak, şeker kamışı posası külü, silis dumanı ve çeşitli polimerler gibi yan ürünler, düşük taşıma kapasiteli zeminlerde kohezyonu ve kayma direncini artırmak amacıyla başarıyla kullanılmıştır (Shukla vd., 2009; Wang vd., 2019). Bu malzemelerin kullanımı geniş çapta incelenmiş olsa da tavuk çiftliği atığı külünün ve pres filtre kekinin zemin stabilizatörleri olarak uygulanmasına daha az ilgi gösterilmiştir. Özellikle, düşük plastisiteye sahip killi

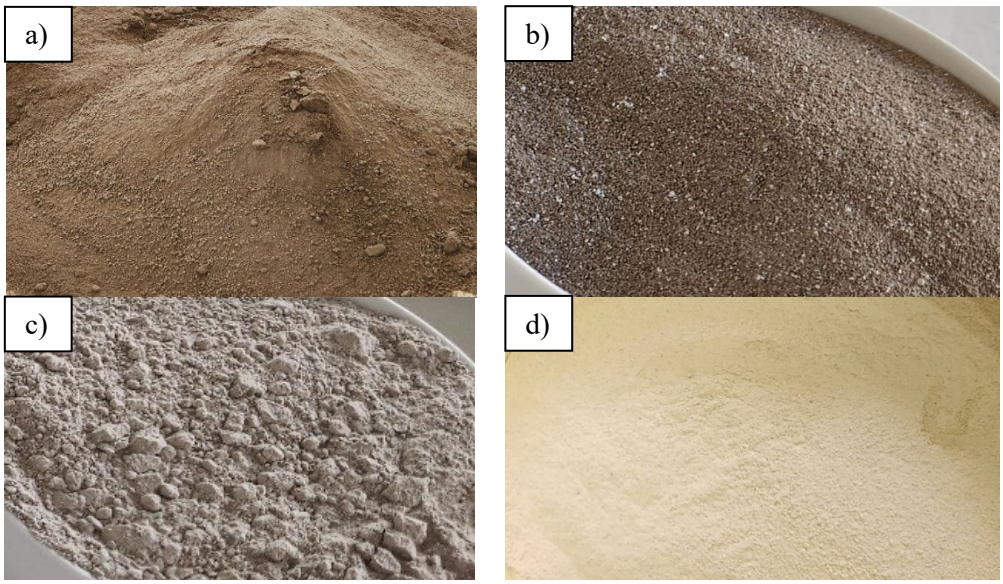
zeminlerde tavuk çiftliği külünün ve pres çamurunun etkisi ve davranışı hakkında sınırlı sayıda deneysel kanıt bulunmaktadır.

Bu nedenle, bu çalışma, düşük plastisiteli bir kilin (CL) stabilizasyonu için alternatif malzemeler olarak tavuk çiftliği atığı külünün (iri ve ince görünümlü) ve şeker pancarı pres filtre kekinin (PKF) potansiyelini deneysel olarak değerlendirmektedir. Malzemelerin verimliliğini karşılaştırmak ve tarımsal endüstri atıklarının geoteknik uygulamalarda değerlendirilmesine katkıda bulunmak amacıyla, farklı dozajların sıkıştırma özellikleri ve serbest basınç dayanımı (UCS) üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca bu çalışma, farklı kaynaklardan gelen iki atık türünü aynı zeminde ve aynı deneysel çerçevede karşılaştırarak her biri için nicel optimum dozaj değerleri sunması bakımından özgün bir katkı sağlamaktadır.

2. MALZEMELER VE YÖNTEM

Bu araştırmanın yürütülmesi sırasında dört farklı malzeme kullanılmıştır: düşük plastisiteye sahip kil (CL) olarak sınıflandırılan ve referans malzeme ile stabilize zemin matrisini oluşturan doğal bir zemin; DEBA Atık Yönetimi ve Elektrik Üretim Sanayi A.Ş.'den temin edilen, iki farklı dane dağılımına (ince daneli ve iri daneli) sahip tavuk atık külü ve Adapazarı Şeker Fabrikası tarafından sağlanan şeker pancarı pres filtre keki (PKF). Bu malzemeler Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tavuk çiftliği atık külleri (Şekil 1b ve Şekil 1c), tavuk gübresi ve diğer tavukçuluk üretim yan ürünlerinin kontrollü yakılması sonucunda elde edilen mineral atıklardır. Bu malzeme esas olarak oksitler ve mineral tuzlardan oluşur; bunların arasında kalsiyum, fosfor ve potasyum öne çıkar ve konsantrasyonları atık türüne ve yanma koşullarına bağlıdır. Öte yandan Pres Filtre Keki (Şekil 1d), şeker arıtma sürecinde pancar suyunu arıtmak için kullanılan bir malzemedir; bu malzeme, arıtma maddelerinin eklenmesiyle oluşur ve organik madde, azot, fosfor ve potasyumun yanı sıra bitkilerin gelişimini kolaylaştıran kalsiyum ve magnezyum karbonatları bakımından zengindir; bu elementlerin miktarı, malzemenin tabi tutulduğu endüstriyel işleme göre değişiklik gösterebilir (Wu vd., 2023).



Şekil 1. Araştırmada kullanılan malzemeler. a) Doğal zemin (CL). b) Tavuk gübresinden elde edilen iri kül. c) Tavuk gübresinden elde edilen ince kül. d) Pres filtre keki (PKF).

Deneysel çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, TS 1900-1 standardında belirtilen prosedürlere uygun olarak kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Hem doğal zeminin hem de stabilizatör malzemelerin fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Bu amaçla, ASTM D4318 standardına uygun olarak Atterberg limitleri deneyleri, elek analizi (ASTM D422) ve hidrometre (ASTM D7928) yöntemleriyle granülometrik analizler yapılmış ve ASTM D854 standardına göre piknometre deneyi yoluyla katı maddelerin özgül ağırlığı belirlenmiştir.

İkinci aşamada, her bir stabilizatör malzemenin karışım oranları belirlenmiş olup, bunlar Tablo 1'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Karışım oranları belirlendikten sonra, her biri için optimum su muhtevası (OMC) ve maksimum kuru birim ağırlığı (MDD) tespit edilmiştir. Doğal zemin, ASTM D698 standardına uygun olarak Standart Proktor deneyi ile değerlendirilmiş; stabilize karışımlar ise malzeme miktarı sınırlı olduğu için minyatür kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırılmıştır. Sonrasında, ASTM D2166 ve TS 1900-2 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen serbest basınç dayanımı (Unconfined Compressive Strength, UCS) deneyleri yoluyla denenen numunelerin mekanik davranışları gözlenmiştir.

Tablo 1. Denenen numuneler için kullanılan kısaltmalar.

N°	Karışım Simgesi	Numune Tanımı	Kil oranı (%)	PKF oranı (%)	İri kül oranı (%)	İnce kül oranı (%)
1	DZ	Doğal zemin	100	-	-	-
2	Z-PKF-2	%98 kil ve %2 PKF	98	2	-	-
3	Z-PKF-5	%95 kil ve %5 PKF	95	5	-	-
4	Z-PKF-65	%93.5 kil ve %6.5 PKF	93.5	6.5	-	-
5	Z-PKF-8	%92 kil ve %8 PKF	92	8	-	-
6	Z-PKF-10	%90 kil ve %10 PKF	90	10	-	-
7	Z-İR-10	%90 kil ve %10 İnce kül	90	-	10	-
8	Z-İR-15	%85 kil ve %15 İnce kül	85	-	15	-
9	Z-İR-25	%75 kil ve %25 İnce kül	75	-	25	-
10	Z-İR-30	%70 kil ve %30 İnce kül	70	-	30	-
11	Z-İR-35	%65 kil ve %35 İnce kül	65	-	35	-
12	Z-İN-10	%90 kil ve %10 İri kül	90	-	-	10
13	Z-İN-15	%85 kil ve %15 İri kül	85	-	-	15
14	Z-İN-30	%70 kil ve %30 İri kül	70	-	-	30
15	Z-İN-335	%66.5 kil ve %33.5 İri kül	66.5	-	-	33.5
16	Z İN-40	%60 kil ve %40 İri kül	60	-	-	40

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Malzemelerin Hazırlanması ve Sınıflandırma Deneyleri

Karışımların hazırlanmasından önce, daha büyük parçacıkları ayırmak ve malzemenin homojenliğini sağlamak amacıyla doğal zemin 4 numaralı elekten (4.75 mm) elenmiştir. Ardından hem zemin hem de tavuk çiftliği atık külleri sabit kütleye ulaşana kadar 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur. Pres filtre keki için ise, yüksek başlangıç su muhtevası nedeniyle, doğal nemi azaltmak ve şeker pancarı arıtma işlemiyle ilişkili kokuları azaltmak amacıyla malzeme öncelikle yaklaşık bir hafta boyunca havada kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Bu ön kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, PKF diğer malzemelere uygulanan prosedürün aynısı izlenerek, sabit kütleye ulaşana kadar 105 ± 5 °C'de etüvde kurutulmuştur. Doğal zemine ve stabilizatör malzemelere yapılan fiziksel karakterizasyon

deneyleri, dane dağılımını, plastisiteyi ve katı maddelerin özgül ağırlığını belirlemeye olanak sağlamıştır. Sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Zemin özellikleri ve katkı maddeleri (%).

Özellik	Kil (CL)	PKF	İri Kül	İnce Kül
			Değer	
Danelerin dağılımı				
(a) Çakıl (%)	1.04	0.01	0.00	0.00
(b) Kum (%)	22.82	1.17	65.66	14.34
(c) Sil + kil (%)	76.14	98.82	34.34	85.66
Kıvam limitleri				
(a) Likit limit (Casagrande) (%)	25.04	60.08	-	25.67
(b) Likit limit (Koni düşürme) (%)	30.56	72.99	36.39	38.64
(c) Plastik limit (%)	18.23	NP	NP	20.87
(d) Plastisite indisi (%)	6.81	NP	NP	4.80
Özgül ağırlık	2.646	2.447	2.61	2.73
Optimum su muhtevası (%)	17.8	-	-	-
Maksimum birim ağırlık (kN/m³)	16.38	-	-	-

3.2 Kompaksiyon Deneyleri

Geoteknik karakterizasyon sürecinin bir parçası olarak, doğal zeminin optimum kompaksiyon koşullarını belirlemek amacıyla ASTM D698 ve TS 1900-1 standartlarına uygun olarak Standart Proctor deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney, araştırmada kullanılan düşük plastisiteye sahip kil için %17.8'lik bir optimum su muhtevası (OMC) ve 16.38 kN/m³'lük bir maksimum kuru yoğunluk (MDD) değerinin belirlenmesini sağlamıştır.

Öte yandan, bağlayıcı malzemelerin miktarının sınırlı olması nedeniyle, karışımların optimum kompaksiyon koşulları minyatür kalıp kompaksiyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem, malzeme miktarının geleneksel Proctor deneyinin yapılmasına izin vermediği durumlarda deneysel araştırmalarda yaygın olarak kullanılan bir alternatiftir; zira önemli ölçüde daha az numune hacmi gerektirmekte ve su muhtevası ile kuru birim ağırlığı arasındaki ilişkiyi güvenilir bir şekilde elde etmeyi sağlamaktadır (Sridharan & Sivapullaiah, 2005). Ayrıca, küçük boyutlu numuneler kullanılarak kompaksiyon eğrisinin belirlenmesi amacıyla, Brezilya DNIT 228/2023 standardı gibi standartlaştırılmış metodolojilere minyatür sıkıştırma prosedürleri dahil edilmiştir. Öte yandan, çeşitli çalışmalar, sıkıştırma enerjisi sabit tutulduğunda ve numune hazırlama prosedürü tekdüze olduğunda, minyatür sıkıştırma yoluyla elde edilen sonuçların geleneksel Proctor deneyleriyle iyi bir korelasyon gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle bu yöntem, zemin stabilizasyonu ve alternatif malzemelerin değerlendirilmesi ile ilgili araştırmalarda yaygın olarak benimsenmiştir (Shivaprakash & Sridharan, 2021).

Karışımlar, çapı 50 mm ve yüksekliği 100 mm olan silindirik bir kalıpta sıkıştırılmış; buna yönelik olarak malzeme, yaklaşık 25 mm kalınlığında dört katman halinde dağıtılmıştır. Her katman, sıkıştırma enerjisinin eşit dağılımını sağlamak amacıyla, 31 cm düşme yüksekliğine sahip 1,51 kg'lık bir tokmakla sıkıştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Her bir dozaja karşılık gelen optimum su muhtevası belirlendikten sonra, zemin ve bağlayıcı malzemenin miktarları kuru ağırlık bazında hesaplanmış ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Ardından, sıkıştırma deneylerinde elde edilen optimum

su muhtevasına ulaşmak için gerekli su miktarı ilave edilerek, numuneler kalıp içine alınmadan önce su muhtevasının eşit dağılımı sağlanmıştır.

Tablo 3. Karışımların optimum su içeriği ve maksimum birim hacim ağırlığı.

Numune	Katkı oranı (%)	Wopt (%)	$\gamma_{d,\,max}$ (kN/m^3)	Wopt artış (%)	$\gamma_{d,\,max}$, azaltma (kN/m^3)
PROKTOR	0	17.8	16.38	-	-
Z -PKF-2	2	18.09	16.81	1.63	2.63
Z -PKF- 5	5	18.51	16.41	3.99	0.18
Z -PKF -65	6.5	19.59	16.29	10.06	0.55
Z -PKF -8	8	20.33	16.26	14.21	0.73
Z -PKF -10	10	21.00	16.20	17.98	1.10
Z -İR-10	10	16.79	16.82	5.67	2.69
Z -İR-15	15	16.99	16.81	4.55	2.63
Z -İR-25	25	21.5	16.87	20.79	2.99
Z -İR-30	30	19.84	16.76	11.46	2.32
Z -İR-35	35	20.32	16.75	14.16	2.26
Z -İN-10	10	20.80	16.5	16.85	0.73
Z -İN-15	15	21.80	15.75	22.47	3.85
Z -İN-30	30	22.96	15.54	28.99	5.13
Z -İN-335	33.5	23.72	15.5	33.26	5.37
Z -İN-40	40	24.48	15.47	37.53	5.56

3.3. Serbest Basınç Deneyi (UCS)

Bu çalışmada, kullanılan zeminin yanal sınırlama olmaksızın eksenel yük altında dayanabileceği maksimum mukavemeti belirlemek için serbest basınç deneyi (Unconfined Compressive Strength, UCS) kullanılmıştır. Basitliği ve güvenilirliği nedeniyle, bu deney, stabilize zeminlerin mekanik davranışını değerlendirmek ve farklı stabilizatör maddelerin sağladığı mukavemet artışını ölçmek için en yaygın kullanılan deneylerden biridir (ASTM D2166, 2013; Das & Sobhan, 2018). Ayrıca UCS, stabilizatör türünün, dozajının ve kürlenme süresinin zeminin mekanik davranışı üzerindeki etkisini analiz etmek ve stabilize karışımların rijitliğini, eksenel deformasyonunu ve bozulma şeklini değerlendirmek için temel bir araçtır (Craig, 2012).

Serbest basınç deneyleri, numunelerde birim boy değişimi kırılma noktasına ulaşana kadar 0,8 mm/s sabit hızda gerçekleştirilmiş ve yükleme süreci boyunca uygulanan yüke bağlı olarak eksenel deformasyondaki değişim kaydedilmiştir. Elde edilen veriler temelinde, numunelerin mekanik davranışı gerilme-deformasyon ilişkisi aracılığıyla değerlendirilmiş; bu sayede stabilizatör malzemenin eklenmesiyle mukavemetteki değişim belirlenebilmiştir. Bu deneyler için elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Serbest basınç deneylerinde elde edilen değerler.

	İRİ KÜL														
	Z -İR-10			Z -İR-15			Z -İR-25			Z -İR-30			Z -İR-35		
Numune	$\sigma_{d,max}$ (kPA)	% Ɛz	Artış oranlar (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPA)	% Ɛz	Artış oranlar (%)	$\sigma_{d,\,max}$ (kPA)	% Ɛz	Artış oranlar (%)	$\sigma_{d,\,max}$ (kPA)	% Ɛz	Artış oranlar (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPA)	% Ɛz	Artış oranlar (%)
1	123.15	5.00	0.13	137.63	2.00	11.90	165.15	2.00	34.28	177.86	2.00	44.61	181.28	3.00	47.40

2	123.15	5.00	0.13	139.74	2.00	13.63	151.94	3.00	23.54	175.57	1.50	42.76	180.23	3.00	46.55
3	128.28	5.00	4.31	138.68	2.00	12.76	170.80	3.00	38.88	184.42	3.00	49.95	181.28	3.00	47.40
Ort.	124.86	5.00	1.52	138.68	2.00	12.76	162.63	2.67	32.24	179.28	2.17	45.78	180.93	3.00	47.11

İNCE KÜL

Numune	**Z -İN-10**			**Z -İN-15**			**Z -İN-30**			**Z -İN-335**			**Z -İN-40**		
	$\sigma_{d,max}$ (kPA)	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**	**$\sigma_{d,max}$ (kPA)**	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**	**$\sigma_{d,max}$ (kPA)**	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**	**$\sigma_{d,max}$ (kPA)**	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**	**$\sigma_{d,max}$ (kPA)**	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**
1	135.51	2.00	10.18	187.28	1.50	52.27	184.08	1.50	49.68	189.40	1.50	54.00	128.34	1.00	4.35
2	126.39	2.50	2.77	175.57	1.50	42.76	174.51	1.50	41.89	190.47	1.50	54.87	159.35	1.00	29.57
3	128.10	2.00	4.16	170.25	1.50	38.43	186.21	1.50	51.41	187.28	1.50	52.27	139.39	1.50	13.34
Ort.	130.00	2.17	5.70	177.70	1.50	44.49	181.60	1.50	47.66	189.05	1.50	53.72	142.36	1.17	15.75

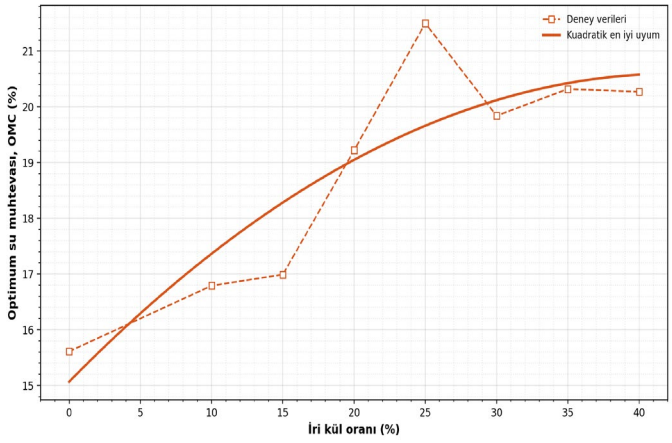
PKF

Numune	**Z -PKF-2**			**Z -PKF- 5**			**Z -PKF -65**			**Z -PKF -8**			**Z -PKF -10**		
	$\sigma_{d,ma}$ (kPA)	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**	**$\sigma_{d,ma}$ (kPA)**	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**	**$\sigma_{d,ma}$ (kPA)**	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**	**$\sigma_{d,ma}$ (kPA)**	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**	**$\sigma_{d,ma}$ (kPA)**	**% Ɛz**	**Artış oranlar (%)**
1	134.29	2.50	9.19	159.04	2.50	29.32	159.10	3.1	29.36	168.52	2.50	37.03	156.68	2.00	29.26
2	133.24	2.50	8.34	167.66	3.00	36.32	161.58	3.50	31.38	162.62	3.50	32.23	147.68	2.00	27.40
3	131.27	2.00	6.74	159.27	3.00	29.51	165.56	3.00	34.62	158.97	3.50	29.26	155.62	2.00	20.08
Ort.	132.93	2.33	8.09	161.99	2.83	31.72	162.08	3.20	31.79	163.37	3.17	32.84	153.33	2.00	25.58

4. AŞTIRMA BULGULARI VE GENEL DEĞERLENDİRME

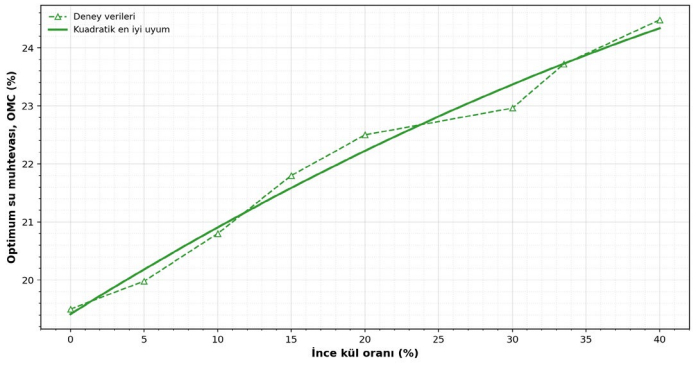
4.1. Kompaksiyon deneyleri

Doğal zeminin OMC ve MDD değerleri sırasıyla %17.8 ve 16.38 kN/m³ iken üç katkı maddesinin eklenmesi, doğal zeminin sıkıştırma koşullarını değiştirmiştir (Şekil 2). Genel olarak, OMC katkı maddesi içeriği arttıkça yükselmiştir; ancak bu artışın büyüklüğü ve eğilimi, malzemenin türüne ve dane dağılımına bağlı olarak değişmiştir. İnce kül, %40 katkı ile %24.48'lik bir OMC değerine ulaşarak en büyük artışı gösterirken, iri kül %25 katkı ile yaklaşık %21.5'e ulaşmış ve ardından hafif bir düşüş göstermiştir. PKF içeren karışımlarda ise OMC, %2 ilave ile %18.09'a, %10 ilave ile %21.0'a yükselmiştir.

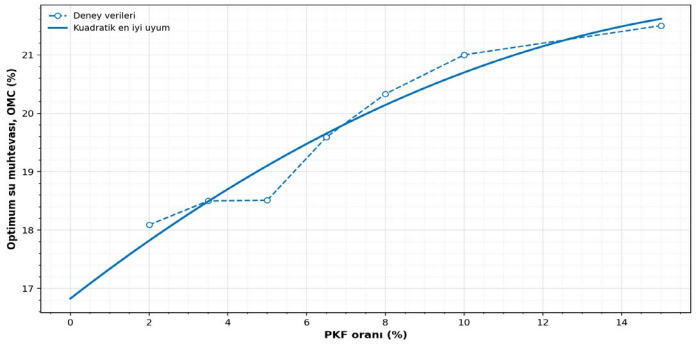


a)

b)



c)



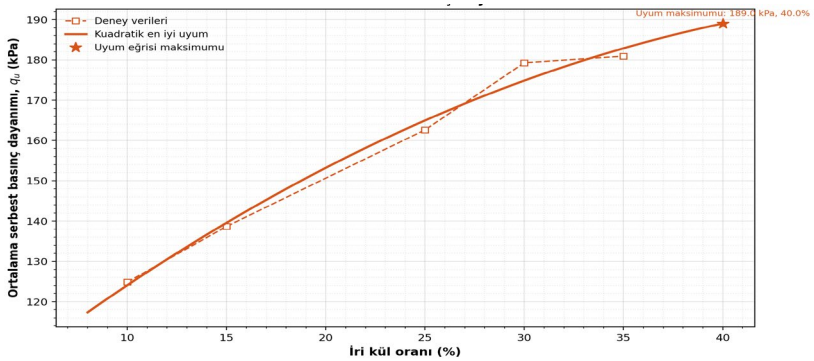
Şekil 2. Katkı Oranının Optimum Su Muhtevasına Etkisi. a) İri kül, b) İnce kül ve c) PKF.

OMC'deki artış, Şekil 2'de gösterildiği gibi, esas olarak kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleriyle ilişkilendirilebilir. Daha ince parçacıklar daha büyük bir özgül yüzeye sahiptir ve dolayısıyla suyla etkileşim ve su tutma kapasiteleri daha yüksektir. Bu etki, OMC'de en büyük artışı gösteren ince kül için daha belirgindir. Buna karşın, iri kül, yüksek içeriklerde sabitlenme eğilimi göstermiştir. Bu durumun, iri külün daha düşük özgül yüzey alanı ile ilişkili olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, OMC'deki artış, yalnızca daha fazla su ihtiyacı olarak değil, karışımın gözenek yapısı ve su-dane etkileşimindeki bir değişiklik olarak yorumlanmalıdır.

MDD açısından, ince kül içeren karışımlar en büyük azalmayı göstermiştir. %40 oranında ince kül ilave edildiğinde doğal zemindeki 16.38 kN/m³ değeri 15.47 kN/m³'e düşmüştür. İri kül daha az değişikliklere neden olurken, PKF ise %10 oranında ilave edildiğinde 16.20 kN/m³'ye kadar kademeli bir azalma göstermiştir. Bu sonuçlar, atıkların ilavesinin hem su ihtiyacını hem de zemin yoğunluğunu aynı anda değiştirdiğini ve bu etkinin her bir stabilizatörün fiziksel özelliklerine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

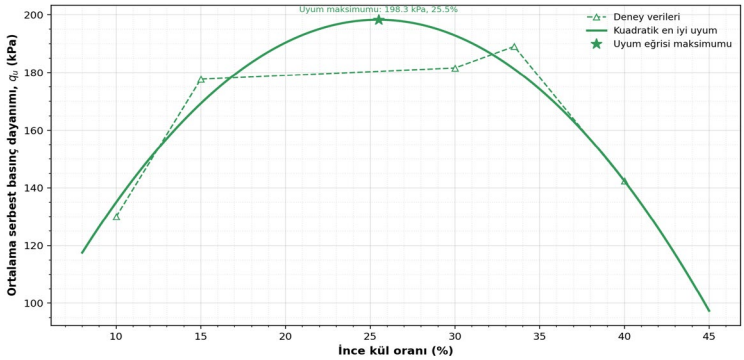
4.2. Serbest Basınç Deneyi (UCS)

Şekil 3, 4 ve 5'te stabilizatör malzeme içeriğinin artırılmasıyla numunelerin mukavemetindeki değişim gözlemlenmekte olup, bu da katkı maddesinin dozajının işlenmiş zeminin mukavemet kapasitesi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. İri kül için elde edilen sonuçlar, stabilize edilmiş malzemenin mukavemetinin %10 ilave oranında 124.86 kPa olduğunu ve %15, %25, %30 ve %35 içerik oranlarında sırasıyla 138.68, 162.63, 179.28 ve 180.93 kPa olduğunu göstermektedir. Bu deneysel artış, Şekil 3'te gözlemlenen yükselen eğilimde yansıtılmaktadır. Tablo 4'te kaydedilen artış yüzdeleri, %35 kül içeriğinde %35'ten yaklaşık %47'ye ulaşmış olup, incelenen aralık içinde mukavemette kademeli bir iyileşme olduğunu doğrulamaktadır. Kuadratik uyum, bu eğilimi temsil etmeye ve yüksek kül içeriklerinde 189 kPa'a yakın bir maksimum değer tahmin etmeye olanak sağlamaktadır.



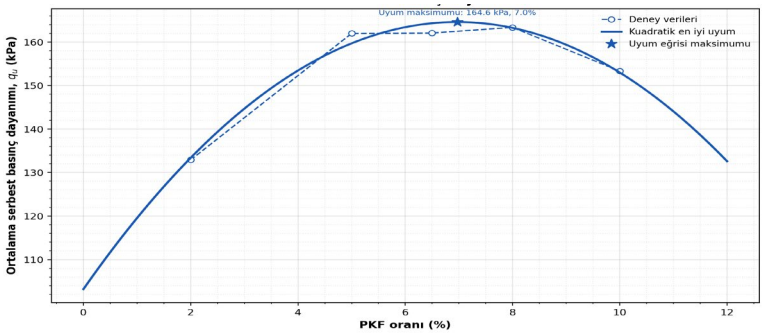
Şekil 3. İri kül oranının serbest basınç dayanımına etkisi.

İnce kül, daha düşük oranlarda daha belirgin bir artış göstermiştir. Tablo 4'e göre, ortalama mukavemet %10 oranında 130.00 kPa'dan %15 oranında 177.70 kPa'a yükselmiş ve sırasıyla %30 ve %33.5 oranlarında 181.60 ve 189.05 kPa'a ulaşmıştır. Ancak, %40 oranında bir azalma gözlemlenerek maksimum değer 142.36 kPa'a düşmüştür. Bu değişim Şekil 4'de de görülmektedir. Burada eğri, daha yüksek oranlarda azalmadan önce bir tepe noktasına ulaşmaktadır. Kuadratik uyum, %25.5 civarındaki bir oran için yaklaşık 198.3 kPa'lık bir maksimum mukavemet değerine ulaşmaktadır. Bu da aşırı ince kül içeriğinin mukavemet davranışını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.



Şekil 4. İnce kül oranının serbest basınç dayanımına etkisi.

PKF durumunda, Tablo 4'te direncin %2 ilave oranında 132.93 kPa'dan %5'te 161.99 kPa'a, %6.5'te 162.08 kPa'a ve %8'de 163.37 kPa'a yükseldiği görülmektedir. Daha sonra, %10 oranında PKF ilavesiyle mukavemet 153.33 kPa'a düşmüştür. Bu eğilim, Şekil 5'da açıkça gözlemlenebilir. Burada mukavemet, PKF miktarının artmasıyla birlikte başlangıçta artmakta, daha sonra ise azalmaktadır. Kuadratik uyum, yaklaşık %7'lik bir dozaj için maksimum dayanımın yaklaşık 164.6 kPa olduğunu tahmin etmektedir. Bu nedenle, küllerin aksine, PKF nispeten düşük ilave miktarlarında bile önemli bir iyileşme göstermiştir.



Şekil 5. PKF oranının serbest basınç dayanımına etkisi.

5. SONUÇLAR

Bu araştırmada, düşük plastisiteye sahip killi bir zeminin (CL) stabilizasyonu için alternatif malzemeler olarak tavuk çiftliği atıklarından elde edilen iri ve ince küllerin ve pres filtre kekinin (PKF) potansiyeli değerlendirilmiştir.

Optimum dozajın varlığı, stabilizatörün yararlı etkileri ile zemin matrisinin kademeli olarak bozulması arasındaki dengeyle açıklanabilir. Düşük ve orta düzeydeki içeriklerde, katkı maddesinin parçacıkları boşlukları doldurabilir, sıkışmayı iyileştirebilir ve daha istikrarlı bir yapının oluşmasını destekleyebilir. Ancak belirli bir içerik düzeyinin aşılmasıyla birlikte, aşırı miktarda stabilizatör orijinal zeminin önemli bir kısmının yerini almaya başlar. Bu durum, parçacık dağılımını bozabilir ve kil parçacıkları arasındaki teması ve bağlanmayı azaltabilir. Bu koşullar altında, matrisin bozulmasına bağlı olumsuz etki, katkı maddesinin sağladığı faydaları aşabilir ve özellikle ince kül ve PKF'de, daha yüksek dozajlarda gözlenen UCS'nin düşmesine neden olabilir.

İnce külün daha iyi performansı, zemin matrisindeki boşlukları daha verimli bir şekilde doldurma kabiliyetiyle ilişkilendirilebilir. İnce daneciklerin sayısının fazla olması, karışım bileşenleri arasında daha homojen bir teması destekler ve daha kompakt bir iç yapıya katkıda bulunabilir. Bu durum, iri kül ile aynı kaynağa sahip olmasına rağmen, ince fraksiyonun neden daha yüksek mukavemet değerlerine ulaştığını ve daha düşük bir optimal dozaj gerektirdiğini açıklamaktadır. Bununla birlikte, bu davranış aynı zamanda inceliğin uygun bir aralıkta tutulması gerektiğini de ortaya koymaktadır; zira aşırı miktarlar su ihtiyacını artırabilir ve zemin yapısını olumsuz yönde etkileyebilir.

Külün aksine, PKF'nin maksimum mukavemeti yaklaşık %8 oranında ilave edildiğinde elde edilmiştir. Bu daha düşük dozaj, PKF'nin daha düşük özgül ağırlığı ve zemin matrisiyle etkileşimiyle ilişkili olabilir; bu sayede nispeten küçük miktarlar bile karışımın özelliklerinde önemli değişikliklere yol açabilir. Bununla birlikte, bileşimi ve organik madde içeriği nedeniyle aşırı ilave edilmesi su tutma kapasitesini artırabilir ve iç yapıyı değiştirebilir, bu da mukavemet gelişimini sınırlayabilir. Bu nedenle, PKF'nin nispeten düşük optimum değeri, gerekli miktar açısından bir avantaj olarak değerlendirilmeli, ancak aynı zamanda etkili uygulama aralığının daha sınırlı olabileceğinin bir göstergesi olarak da görülmelidir.

Mühendislik açısından bakıldığında, bu sonuçlar stabilizatör seçiminde önemli sonuçlar doğurmaktadır. İnce kül mukavemeti artırma konusunda en yüksek potansiyeli sunmakta, ancak önemli ölçüde daha fazla dozaj gerektirmektedir. PKF çok daha az miktarda malzemeyle önemli bir iyileşme sağlayabilir. Bu nedenle, seçim yalnızca maksimum mukavemete değil, aynı zamanda gerekli atık miktarına, sıkıştırma koşullarına, malzemenin yerel olarak bulunabilirliğine ve uzun vadeli stabilitesine de dayanmalıdır. Bu atıkların kullanımı, mukavemette ılımlı bir artışın gerekli olduğu ve tarımsal endüstriyel malzemelerin yerel olarak temin edilebildiği alt zemin iyileştirme, dolgu ve zemin katmanı projelerinde özellikle tercih edilebilir. Bununla birlikte, UCS sonuçları tek başına sahada uygulanmasını garanti etmek için yeterli değildir; dayanıklılık, suya duyarlılık, çevresel döngüler altındaki davranış ve zaman içinde mukavemetteki değişim de değerlendirilmelidir.

Elde edilen bulgular, atık kökenli malzemelerin zemin stabilizasyonunda etkili ancak dozaja bağlı bir davranış sergilediğini gösteren mevcut literatürle örtüşmektedir. Anburuvel (2024) tarafından yapılan kapsamlı derlemede de vurgulandığı gibi, çoğu alternatif stabilizatör belirli bir optimum içerik değerine kadar mukavemet artışı sağlamakta, bu değerin aşılması durumunda ise zemin matrisindeki parçacık-parçacık teması bozulmakta ve mukavemet azalmaktadır. Bu çalışmada gözlemlenen ince kül ve PKF için düşen UCS eğilimi bu genel davranışla tutarlıdır. Benzer şekilde, Eisa vd. (2022) tarafından zayıf zeminlerin farklı katkı maddeleriyle iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmada da atık kökenli ince daneli malzemelerin boşluk soldurma etkisiyle mukavemeti artırdığı, ancak aşırı dozajlarda su ihtiyacının artması nedeniyle bu etkinin tersine döndüğü bildirilmiştir. Bu, çalışmadaki ince kül davranışıyla doğrudan paralellik göstermektedir.

PKF'nin görece düşük optimum dozajda (~%6,5– 8) yüksek etkinlik göstermesi, organik madde ve ince daneli yapısı zeminle etkileşiminin, küllere kıyasla farklı bir mekanizma üzerinden gerçekleştiğini düşündürmektedir. Şeker pancarı pres filtre keki bileşiminde kalsiyum ve magnezyum karbonatların bulunması (Wu vd., 2023), sınırlı düzeyde bir puzolanik etkiye katkıda bulunmuş olabilir. PKF'nin bileşiminde organik madde bulunması nedeniyle, uzun vadeli davranışının daha detaylı incelenmesi tavsiye edilir; aynı şekilde, gelişen dayanıklılığın stabilitesini ve bileşenlerin bozulması veya dönüşümü sonucu ortaya çıkabilecek olası değişiklikleri belirlemek amacıyla, farklı kürlenme sürelerine sahip deneyler yoluyla kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerindeki değişimin değerlendirilmesi önerilir. Ayrıca, bu çalışmaların, PKF ile zemin matrisi arasındaki etkileşimden sorumlu mekanizmaların anlaşılmasını sağlayacak kimyasal ve mikroyapısal analizlerle desteklenmesi ve uzun vadeli geoteknik uygulamasını doğrulamak amacıyla değişken çevresel koşullar altında dayanıklılık testlerinin yapılması önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu araştırmanın yürütülmesi sırasında verdikleri rehberlik, destek ve danışmanlık için Prof. Dr. Sedat SERT ve Prof. Dr. Ertan BOL'a en içten teşekkürlerini sunarlar. Ayrıca, çalışmada kullanılan malzemelerin temin edilmesinde sağladığı değerli katkıları nedeniyle Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR'e de teşekkür ederler. Son olarak, bu araştırmanın gerçekleştirilmesi için gerekli malzemeleri temin ettikleri ve iş birliği yaptıkları için DEBA Atık Yönetimi ve Elektrik Üretim Sanayi A.Ş. ile Adapazarı Şeker Fabrikası şirketlerine teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Anburuvel, A. (2024). The Engineering Behind Soil Stabilization with Additives: A State-of-the-Art Review. *Geotechnical and Geological Engineering*, *42*(1), 1-42. https://doi.org/10.1007/s10706-023-02554-x

ASTM D2166 13 D18 Committee. (2013). *ASTM D2166 13 Standard Test Method for Unconfined*. ASTM International.

Craig, R. F. (2012). *Craig, R. F. (2012). Craig's Soil Mechanics (8th ed.).* (8th bs.). CRC Press.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of geotechnical engineering* (Ninth Edition). Cengage Learning.

Eisa, M. S., Basiouny, M. E., Mohamady, A., & Mira, M. (2022). Improving Weak Subgrade Soil Using Different Additives. *Materials*, *15*(13), 4462. https://doi.org/10.3390/ma15134462

Fannin, J. (2008). Karl Terzaghi: From Theory to Practice in Geotechnical Filter Design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *134*(3), 267-276. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:3(267)

Hao, G., Wang, L., & Liu, X. (2023). Methods for Studying the Effect of Plant Roots on Soil Mechanical Reinforcement: A Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *23*(3), 2893-2912. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01330-3

Hirebelaguly Shivaprakash, S., & Sridharan, A. (2021). Correlation of compaction characteristics of standard and reduced Proctor tests. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, *174*(2), 170-180. https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00060

Kerisel, J. (1985). *The history of geotechnical engineering up until 1700.* 92.

Khattak, M. J., & Alrashidi, M. (2006). Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil–cement mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, *7*(1), 53-62. https://doi.org/10.1080/10298430500489207

Patil, P., Mena, I., Goski, S., & Urs, Y. (2016). *Soil Reinforcement Techniques*. *6*(Issue 8, (Part-2)), 25-31.

Raut, Z. P., & Verma, M. P. (2024). *Comprehensive review of soil stabilization through reinforcement methods in civil engineering*. *12*(2), 520-530.

Saran, S. (2017). *Reinforced soil and its engineering applications* (Third edition). I.K. International Publishing House Pvt. Ltd.

Shukla, S., Sivakugan, N., & Das, B. (2009). Fundamental concepts of soil reinforcement—An overview. *International Journal of Geotechnical Engineering*, *3*(3), 329-342. https://doi.org/10.3328/IJGE.2009.03.03.329-342

Sridharan, A., & Sivapullaiah, P. (2005). Mini Compaction Test Apparatus for Fine-Grained Soils. *Geotechnical Testing Journal*, *28*(3), 240-246. https://doi.org/10.1520/GTJ12542

Wang, Y., Guo, P., Li, X., Lin, H., Liu, Y., & Yuan, H. (2019). Behavior of Fiber-Reinforced and Lime-Stabilized Clayey Soil in Triaxial Tests. *Applied Sciences*, *9*(5), 900. https://doi.org/10.3390/app9050900

Wu, J., Chen, H., Wang, L., Geng, G., Fan, G., Yu, L., & Wang, Y. (2023). Effects of filter mud applications on growth, physiological characteristics, and nutrient transfer pattern of sugar beet seedlings. *Chilean Journal of Agricultural Research*, *83*(2), 217-227. https://doi.org/10.4067/s0718-58392023000200217

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
PKF	Pres filtre keki	**OMC**	Optimum su muhtevası [%]
MDD	Maksimum kuru birim ağırlığı [kN/m³]	**UCS**	Serbest basınç dayanımı
q_u	Serbest (tek eksenli) basınç dayanımı [kPa veya kN/m²]	ε_z	Eksenel birim deformasyon
σ_1	Büyük asal gerilme [kPa]	σ_3	Küçük asal gerilme [kPa]
C	Kohezyon [kPa]	ϕ	Kayma direnci açısı [°]
C_u	Drenajsız kohezyon [kPa]	τ	Kesme gerilme [kPa]