



KİL EŞDEĞERİ BİR MALZEME VE UÇUCU KÜL KATKISININ ZEMİN MUKAVEMETİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Serkan ÖREN^{1*}, Sefa KOCABAŞ²

¹Zonguldak Bülent Ecevit University, Devrek Vocational School, Department of Environmental Protection, 67800, Zonguldak, Türkiye

²Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, 67100, Zonguldak, Türkiye

Özet: Ülkemizde ve Dünya’da endüstriyel üretimler sonucu meydana gelen atık maddelerin depolanarak bertaraf edilmesinden ziyade yan ürün olarak değerlendirilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, Zonguldak’ta faaliyet gösteren Eren Enerji’ye ait ZETES I termik santralinden atık olarak ortaya çıkan uçucu kül (UK) ve Borcam Madencilikte üretim sonucunda meydana gelen silisli kum atığının (SKM) belirli oranlarda hazırlanan karışımlarının mukavemet özellikleri laboratuvar ortamında incelenmiştir. Çalışma kapsamında Silisli kum atığı malzemesi, kütlece %10, %20 ve %30 oranında uçucu kül ile karıştırılarak örnekler hazırlanmış ve bu örneklerle, kıvam limit, kompaksiyon ve serbest (tek eksenli) basınç deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, silisli kum atığı malzemesi için, likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri malzemenin CL düşük plastisiteli kil özellikli olduğu görülmektedir. Silisli kum atığına (SKM) uçucu kül (UK) ilavesi ile elde edilen karışımların ise tüm karışım oranlarında (%10, %20 ve %30) CI orta plastisiteli kil özellikli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca serbest (tek eksenli) basınç dayanımları deneyinde malzemeye uçucu kül ilavesi arttıkça serbest basınç dayanımının zamana bağlı olarak arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kil, Uçucu kül, Serbest basınç, Mukavemet, Silisli kum atığı, Atık, Zemin stabilizasyonu

Investigation of the Effect of a Clay Equivalent Material and Fly Ash Additive on Soil Strength

Abstract: In our country and in the world, researches are carried out on the evaluation of waste materials that occur as a result of industrial production as a by-product rather than being disposed of by storage. In this study, the strength properties of the mixtures prepared in certain proportions of fly ash (UK) generated as waste from Eren Energy’s ZETES I thermal power plant operating in Zonguldak and silica sand residue (SCM) formed as a result of production in Borcam Madencilik were investigated in the laboratory environment. Samples were prepared in the form of siliceous sand waste material, mixtures of 10%, 20% and 30% by mass fly ash. The prepared samples were tested for consistency limit, compaction and free (uniaxial) pressure. According to the results obtained, the liquid limit, plastic limit and plasticity index values for the siliceous sand waste material show that the material has CL low plasticity clay properties. It was concluded that the mixtures obtained by adding fly ash (UK) to siliceous sand waste (SCM) have CI medium plasticity clay properties at all mixing ratios (10%, 20% and 30%). In addition, in the free (uniaxial) compressive strength test, it was concluded that as the addition of fly ash to the material increased, the unconfined compressive strength increased depending on time.

Keywords: Clay, Fly ash, Free pressure, Strength, Siliceous sand waste, Waste, Soil stabilization

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Zonguldak Bülent Ecevit University, Devrek Vocational School, Department of Environmental Protection, 67800, Zonguldak, Türkiye

E mail: serkan.oren@hotmail.com (S. ÖREN)

Serkan ÖREN <https://orcid.org/0000-0001-7699-517X>

Sefa KOCABAŞ <https://orcid.org/0000-0002-8003-8310>

Gönderi: 27 Mart 2023

Kabul: 10 Nisan 2023

Yayınlanma: 01 Temmuz 2023

Received: March 27, 2023

Accepted: April 10, 2023

Published: July 01, 2023

Cite as: Ören S, Kocabaş S. 2023. Investigation of the effect of a clay equivalent material and fly ash additive on soil strength. BSJ Eng Sci, 6(3): 165-172.

1. Giriş

Dünya’da hızlı nüfus artışı ve bu artışın beraberinde getirdiği ısınma ihtiyacı, barınma ihtiyacı ve doğal kaynakların hızla tüketilmesi, çevre sorunları ile birlikte birçok olumsuz koşul oluşumuna neden olmaktadır. Bunların başında enerji ihtiyacını karşılamak için fosil kökenli yakıtlar kullanılarak kömüre dayalı termik santraller kurulması ve bu santrallerden kaynaklanan, hava, su ve toprak kirliliği gibi çevre sorunlarının gün yüzüne çıkması gelmektedir. Termik santrallerden kaynaklanan en büyük çevre sorunu yanma sonucu atık olarak meydana gelen uçucu ve taban külleridir. Bu küllerin bertarafı ve yan ürün olarak kullanılabilirliği için çeşitli çalışmalar yıllardır yapılmaktadır.

Bilici ve ark. (2022) Soma, Tunçbilek ve Çatalağzı termik santrallerinden aldıkları üç farklı uçucu kül örneklerini zemine farklı oranlarda %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında ilave ederek kompaksiyon ve dayanım özelliklerini incelemişler Tunçbilek ve Çatalağzı uçucu küllerinin %10 katkı oranında, Soma uçucu külünün ise %5 katkı oranında en yüksek dayanımlara ulaştığı belirlemişlerdir.

Temiz ve ark. (2021) Afşin-Elbistan termik santralinin uçucu külünün beton katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlar ve hacimsel genleşme, basınç dayanımı, donma-çözülme, priz süresi, gibi deneyler sonucunda Afşin-Elbistan uçucu külünün betonda kullanılabileceği sonucunu ortaya koymuşlardır.



Dehghanian ve ark., (2021) kil içeren toprakların mekanik özelliklerini geliştirmek için uçucu küllerin etkisini araştırmıştır. Kil örneklerine kütlece %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül karışımları hazırlanmış ve standart proktor, kıvam limit ve üç eksenli kesme deneyleri yapılmıştır. Deneylerinin sonucunda kil numunesine kütlece %5 oranında uçucu kül karışımının en iyi karışım olduğu kanaatine varmıştır. Yılmaz (2020) uçucu kül ve mermer tozu katkısının zeminlerin stabilizasyonuna etkisini incelemiş ve çalışmada uçucu kül + mermer tozu katkısının sadece uçucu kül katkısına oranla daha yüksek dayanım sağladığı sonucuna varmıştır.

Totiç ve ark. (2019) Bartın Üniversitesi Kutlubey yerleşkesinin killi zemininden alınan örneklerine Çatalağzı Termik Santrali'nden alınan uçucu külleri kütlece %5 ila %25 arasında değişen oranlarda eklemiştir. Elde edilen bu karışımları, kıvam limit, standart proktor ve serbest basınç deneylerine tabi tutmuşlar ve killi numunelere uçucu kül karışımlarının kilin mekanik özelliklerinde iyileştirme sağladığı kanısına varmışlardır.

Taş ve ark. (2018) düşük plastisite değerine sahip killi bir zemin stabilizasyonu için kullanılan %25 uçucu kül örneğine kütlece, %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında endüstriyel üretim atığı olan Bayburt taşı ilave etmişler ve %10 Bayburt taşı karışımı kullanılarak elde edilen %25'lik uçucu kül örneğinin zemin stabilizasyonunda en yüksek dayanım sağladığı kanısına varmışlardır.

Nüfus artışının oldukça hızlı olması barınma ihtiyacı ve ulaşım ile ilgili sorunların da artmasına neden olmaktadır. Barınma ve ulaşım ihtiyacının giderilmeye çalışılması yol ve inşaat yapılarının artması ve yüksek katlı inşaatların sayısının artmasına da sebep olmaktadır. Bu tarz yapıların sayısının artması özellikle deprem riski göze alındığında inşaat ve yol yapılan zeminlerin davranışlarının önemini ortaya koymaktadır. Zira birçok depremde olduğu üzere 6 Şubat 2023 Hatay ve Kahramanmaraş merkezli depremlerde çok sayıda inşaat yapılarının yıkıldığını ve yolların deformasyona uğraması nedeni ile deprem bölgelerine ulaşım aksaklıkları olduğunu görülmüştür.

Bu yapıların planlandığı alanlardaki zeminlerin istenildiği gibi özelliklere sahip olması her zaman mümkün olmayabilir. Böyle durumlarda zemine ait özelliklerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Dayanımları kötü olan zeminlerin, fiziksel, kimyasal veya mekanik yöntemlerle dayanımlarının artırılması durumuna zemin iyileştirme veya zeminin stabilize edilmesi olarak nitelendirilmektedir. Zemin iyileştirmede pratik ve ekonomik olan uygulamalar olarak zemine katkı maddesi ilave edilmesi gösterilebilir. En çok kullanılan katkı maddelerinin başında ise uçucu kül, çimento, klorit, kireç, vb. diğer kimyasal bileşikler gösterilebilir (Geçkil ve ark., 2019). Zemin iyileştirme ve stabilizasyonunda asıl amaç, zeminin plastisitesini düşürmek ve sıkıştırılabilirliğini en uygun seviyeye getirmek bu şekilde mukavemet değerini en üst değere getirmektir (Geçkil ve ark. 2019).

Akan ve ark. (2017) killi zeminin su içeriği ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi incelemişler ve serbest basınç dayanımı ile likitlik ilişkisinin lineer olmadığını belirtmişlerdir. Optimum su içeriğine gelene kadar serbest basınç dayanımının kısmen arttığı ve sonrasında düşmeye başladığını belirtmişlerdir.

Yılmaz (2016) zemin stabilizasyonu için uçucu kül kullanımını araştırmış ve killi bir zemin örneğine kütlece, %0, %5, %10, %15, %20, % 25 ve %30 oranlarında uçucu kül karışımları ile örneklerin dayanım değerlerini incelemiş ve %25 katkı oranında en yüksek dayanım değerini bulmuştur.

Zumrawi ve ark. (2016) sıkıştırılmış kohezyonlu zeminlerin kayma dayanımını etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda kilin yapısı ve içeriği, plastisite indisi, su içeriği ve kuru yoğunlukların kayma dayanımları üzerinde etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Plastisite indisindeki artışın kayma mukavemetini azalttığını ve aynı şekilde plastisite indisindeki azalmanın kayma mukavemetinde artışa neden olduğunu belirtmişlerdir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışma için belirlenen deneyler Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan cihazlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma için hazırlanan örneklerin kıvam limit, optimum su içeriği analizleri Türk Standardı TS 1900-1'e göre yapılmıştır (TS 1900-1, 2006).

Bu çalışma için kullanılan Silisyumlu kum atığı malzemesi (SKM) Zonguldak Ereğli ilçesindeki Borcam Madencilik San. ve Tic. A.Ş' den getirilmiştir. Malzeme maden sanayisinden çuvallarla yaş halde alınmıştır. Deneylere hazır hale getirilmek için, etüv de kurutulup, deneylerde kullanılacak boyutlarda getirilmek üzere eleklerden geçirilerek istenilen boyuta getirilmiştir. Yapılan işlemler Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Silisli kum atığı malzemesi. Etüv kurutma işlemi.



Şekil 2. Öğütülmüş elenmiş silisli kum artığı.

Serbest basınç dayanımında katkı olacağı düşünülen Uçucu kül atığı (UK) ise Zonguldak Eren Enerji'ye ait 1. Termik Santrali olan ZETES I'den şeffaf poşetler ile alınmıştır. Çalışmada kullanılmak üzere 4 farklı örnek hazırlanmıştır. Bunlardan ilki %100 oranında silisli kum atığı malzemesi, ikincisi kütlece %10 oranında uçucu kül içeren silisli kum atığı malzemesi, üçüncüsü ve 4. s'ü ise kütlece %20 ve %30 oranlarında uçucu kül içeren silisli kum atığı malzemesi şeklinde hazırlanmış ve oranlar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Örnekler ve karışım miktarları

Örnek	ZETES I Uçucu Külü	Silisli Kum Atığı
Örnek 1	-	%100
Örnek 2	%10	%90
Örnek 3	%20	%80
Örnek 4	%30	%70

Hazırlanan örneklerde kıvam limit değerlerini belirlemek üzere Türk Standardı olan TS 1500 Zemin sınıflandırması kullanılmıştır. TS 1500 standardında ince daneli zeminler için, Likit Limit değeri (W_L) sonucuna göre;

- Düşük plastisiteli kil (CL^E),
- Düşük plastisiteli silt (ML^E)
- Orta plastisiteli Kil (CI^E)
- Orta plastisiteli silt (MI^E)
- Yüksek plastisiteli kil (CH^E)
- Yüksek plastisiteli sil (MH^E)

Şeklinde sınıflandırılmaktadır [9].

- Likit limit değeri $W_L < 35$ ise CL^E, ML^E
- Likit limit değeri $35 < W_L < 50$ ise CI^E, MI^E
- Likit limit değeri $W_L > 50$ ise CH^E, MH^E zemin sınıflandırılması yapılmaktadır.

Örnekte likit limit değerinin hesaplamasının ardından plastik limit değeri hesaplamaları yapılmıştır. Plastik limit (W_P), plastiklik özelliğinden yarı plastik gibi davranmaya geçtiği su içeriği olarak tanımlanabilir (Aytekin 2004). Likit limit ve plastik limit değerleri belirlenen örneklerin plastisite indisi (PI) hesaplaması (eşitlik 1) bu iki limit değerinin arasında kalan su içeriğinde zemin plastik özellik gösterdiği için bu

değerlerin birbirinden çıkartılması ile hesaplanmaktadır (Özaydın, 2011). Likit limit ve plastik limit için yapılan işlemler Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmektedir.

$$PI = W_L - W_P \quad (1)$$



Şekil 3. Likit limit deneyi.



Şekil 4. Plastik limit deneyi.

Zemindeki en büyük kuru birim hacim ağırlığını veren su içeriğinin belirlenmesi için örneklere TS 1900-1 Standardı kapsamında Zemin sıkıştırma deneyleri uygulanmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolu Teknik Şartnamesi 2013'e göre Kısım 203 zayıf zeminler tanımı Tablo 2'ye göre;

Örneklere TS 1900-1 kapsamında zeminin sıkıştırılabilmesi adına Şekil 5'te gösterildiği gibi belirli oranlarda nemlendirme işlemi yapılmış ve örnekler Şekil 6'da ki kompaksiyon kabına yerleştirilmiştir. Kompaksiyon silindirinde tokmağın örneği sıkıştırması sağlanmıştır. Sıkıştırma işlemi bitirilen örnekler Şekil 7 ve Şekil 8'deki işlemlerden sonra verileri tablolardaki yerlerine konularak kuru birim hacim ağırlık ve yaş birim hacim ağırlık hesaplamaları yapılmıştır.

Tablo 2. Uygun Nitelikli Kazı Malzemesi

Deney	Şartname Limiti	Deney Standarttı
Likit Limit (LL)	≤ 60	TS 1900-1 AASHTO T 89
Plastisite İndeksi	≤ 35	TS 1900-1 AASHTO T 89
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (Standart Proctor)	$\geq 1,450 \text{ t/m}^3$	TS 1900-1 AASHTO T 89



Şekil 5 Örneklerin nemlendirme işlemi.



Şekil 6 Sıkıştırma işlemi tamamlanmış örnek.

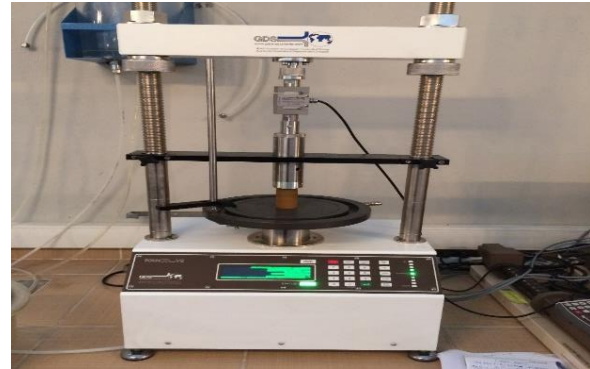


Şekil 7. Örneklerden numune alma.

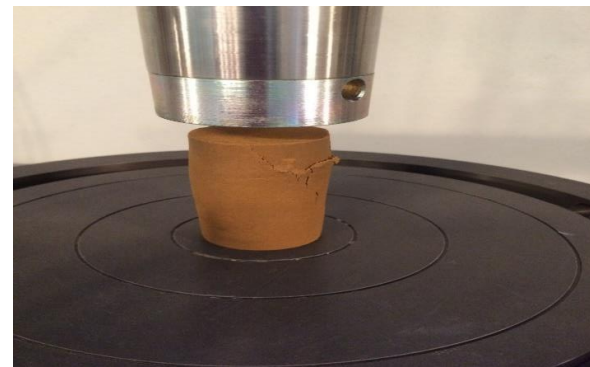


Şekil 8. Alınan numunenin kurutulması işlemi.

Son olarak mukavemet değerlerinin belirlenmesi için örnekler TS 1900-2 kapsamında Serbest (Tek Eksenli) basınç deneyleri uygulanmıştır (TS-1900-2, 2006). Deney görselleri Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu deneyler gerilme kontrollü ya da birim boy kısalması şeklinde yapılabilmektedir. Kolay olduğundan birim boy kısalması deneyi en çok kullanılan yöntemdir. Örneklerde deney süresince su içeriğinde değişimler olabileceğinden deney süresi en çok 10 dk da tamamlanacak şekilde belirlenmiştir. Birim boy kısalma oranı %1 olarak seçilmiş ve veri kaydetme sıklığı da 10 sn olacak şekilde belirlenmiştir. 10 dk sürecek deneylerde yaklaşık 60 veri kullanılmıştır. Bu deney bilgisayar kontrollü gerçekleştirilmiştir. Bulgular kısmındaki serbest basınç grafikleri incelendiğinde sonuçların kPa cinsinden bulunduğu görülmektedir. Karşılaştırma yapılabilmesi adına bulunan değerler kg/cm^2 olarak düzenlenmiştir.



Şekil 9. Serbest basınç deney düzeneği.



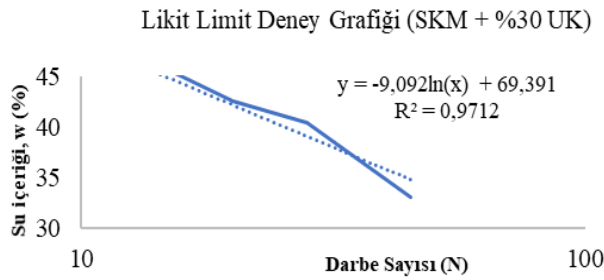
Şekil 10. Sonuç alınmış numune örneği.

3. Bulgular

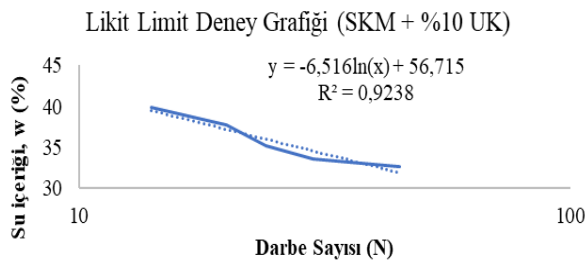
Kıvam limit değerleri hesaplamaları için likit limit değeri belirlemede Cassagrande Plastisite Kartı (TS 1500) A doğrultusu denkleminde çıkan değerler yerine işlenmiş ve Silisli Kum Atığı (SKM)'nin CL düşük plastisiteli kil olduğu belirlenmiştir. Aynı işlemler sonucunda, SKM + %10 Uçucu Kül (UK) örneğinin, SKM + %20 UK örneğinin ve SKM + %30 UK örneğinin CI orta plastisiteli kil özellikli olduğu görülmektedir. Örneklerin hesaplanan kıvam limit değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Likit limit deneylerine ait likit limit eğrisi grafikleri Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te gösterilmiştir.

Tablo 2. Örneklerin kıvam limit değerleri

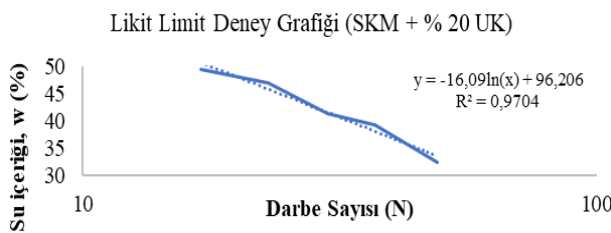
Malzeme	Likit Limit (w_L)	Plastik Limit (w_p)	Plastisite İndisi (PI)
SKM	27	18	9
SKM + %10 UK	36	14	22
SKM + %20 UK	44	15	29
SKM + %30 UK	40	18	22



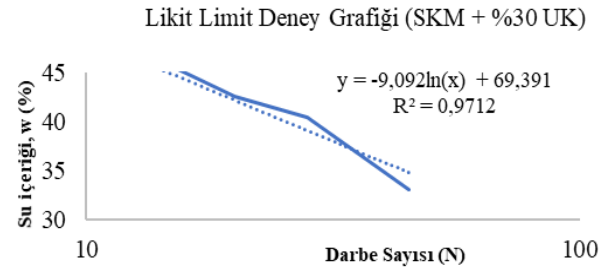
Şekil 11. Silisli kum atığı (SKM) örneği likit limit eğrisi.



Şekil 12. Silisli kum atığı (SKM) + % 10 uçucu kül karışımı likit limit eğrisi.



Şekil 13. Silisli kum atığı (SKM) + % 20 uçucu kül karışımı likit limit eğrisi.

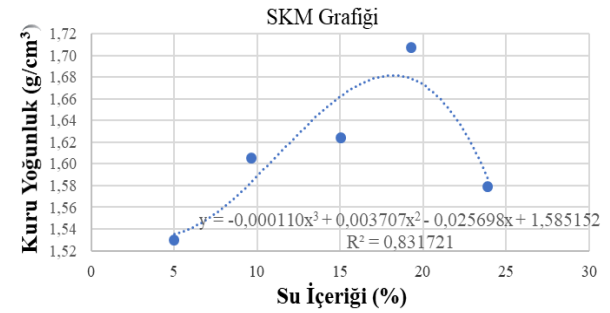


Şekil 14. Silisli kum atığı (SKM) + %30 uçucu kül karışımı likit limit eğrisi.

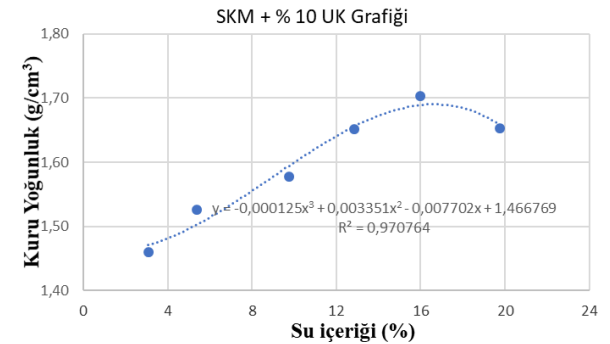
Standart Proktor Deneyinde su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlık arasında 3. dereceden bir fonksiyona uygun grafik eğrisi bulunmaktadır. Bu fonksiyonun türevi alınıp sifıra eşitlendiği zaman bulunan X değeri optimum su muhtevasını göstermektedir. Bu X değerinin türevi alınmamış fonksiyonda yerine konduğu zaman bulunan Y değeri de maksimum kuru birim hacim ağırlığı göstermektedir. Standart Proktor Deneyi kompaksiyon eğrisi grafikleri Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17 ve Şekil 18'de gösterilmiştir. Optimum su içerikleri ve kuru birim hacim ağırlıkları ise Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Örneklerle ait kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su içerikleri

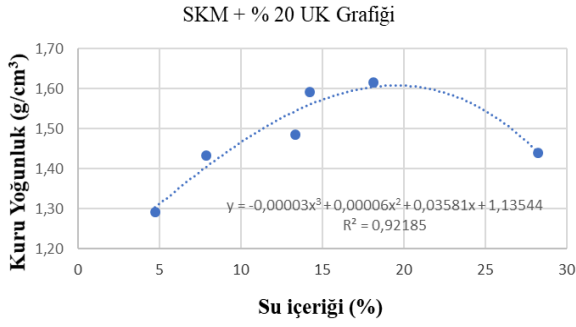
	SKM	SKM + %10 UK	SKM + %20 UK	SKM + %30 UK
W_{opt}	18.18	16.64	20.62	20.23
ρ_{kmax}	1.68	1.69	1.64	1.49



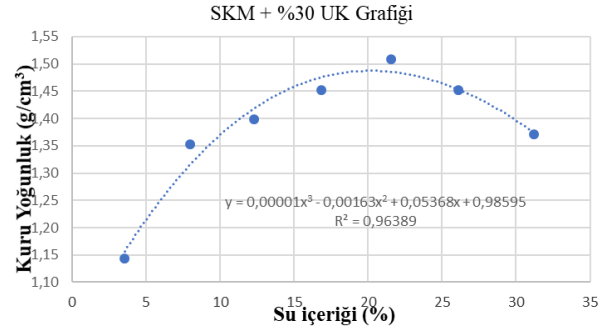
Şekil 15. Silisli kum atığı (SKM) örneği kompaksiyon eğrisi grafiği.



Şekil 16. Silisli kum atığı (SKM) + %10 uçucu kül karışımı kompaksiyon eğrisi grafiği.



Şekil 17. Silisli kum atığı (SKM) + %20 uçucu kül karışımı kompaksiyon eğrisi grafiği



Şekil 18. Silisli kum atığı (SKM) + %30 uçucu kül karışımı kompaksiyon eğrisi grafiği.

Serbest basınç tayininde 1 günlük ve 28 günlük kür süreleri için her bir örnekten 3'er tekrar deney yapılmış ve sonuçlar Tablo 4 ve ortalama serbest basınç değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Sonuçların grafiksel gösterimleri Şekil 19 ve Şekil 20'de verilmiştir.

Tablo 4. Örneklere ait serbest basınç değerleri

Örnekler	1 günlük kürde*	1 günlük kürde**	28 günlük kürde*	28 günlük kürde**
SKM 1	2,63	258,17	2,14	209,64
SKM 2	2,54	248,59	2,99	292,86
SKM 3	1,75	171,31	2,71	265,21
SKM + %10 UK 1	2,92	285,68	7,49	733,63
SKM + %10 UK 2	3,02	296,24	8,46	828,73
SKM + %10 UK 3	4,64	454,46	8,04	788,08
SKM + %20 UK 1	3,36	328,85	8,90	872,35
SKM + %20 UK 2	3,68	360,63	14,75	1445,07
SKM + %20 UK 3	3,74	366,41	10,88	1066,36
SKM + %30 UK 1	4,49	439,77	22,05	2160,74
SKM + %30 UK 2	4,09	401,30	23,68	2320,37
SKM + %30 UK 3	3,32	325,40	23,01	2255,16

*Dayanım (Kg/cm²), ** Dayanım (kN/m²)

Tablo 5. Örneklere ait ortalama serbest basınç değerleri

	1 günlük kürde*	1 günlük kürde**	28 günlük kürde*	28 günlük kürde**
SKM	2,3	226,02	2,61	255,90
SKM + %10 UK	3,52	345,46	7,99	783,46
SKM + %20 UK	3,59	351,96	11,50	1127,93
SKM + %30 UK	3,96	388,82	22,89	2245,42

*Dayanım (Kg/cm²), ** Dayanım (kN/m²)



Şekil 19. 1 günlük kür süresinde örneklerin serbest basınç dayanım değerleri.



Şekil 20. 28 günlük kür süresinde örneklerin serbest basınç dayanım değerleri.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, silisli kum atığı malzemesi ve uçucu küllerin zeminlerin mühendislik özelliklerine katkısını araştırmak üzere yapılmıştır. Numunelerin plastiklik özelliklerini belirlemek adına kıvam limit analizleri ve dayanımlarını belirlemek için serbest basınç (tek eksenli) deneyleri yapılmıştır. Ayrıca standart proctor deneyi ile optimum su içerikleri ve kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde;

1- Silisli kum atığı malzemesinin kıvam limit değerleri hesaplandığında malzemenin CL- düşük plastisiteli kil özellikte olduğu belirlenmiştir. Zemin stabilizasyonu mühendislik özelliklerinde yüksek plastisite değeri istenmemektedir. Silisli kum atığı malzemesine %10, %20 ve %30 uçucu kül ilave edildiğinde kıvam limit hesaplamalarından karışımların CI- orta plastisiteli kil olduğu belirlenmiştir. Silisli kum atığı malzemesi likit limit değerinin 27 olarak hesaplandığı ve uçucu kül ilaveleri ile %10 uçucu külden 36, %20 uçucu külden 44 olduğu ve sonra tekrar %30 uçucu kül ilavesinde değerin 40'a düştüğü görülmektedir. Bu değerler Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolu Teknik Şartnamesi 2013'e göre Kısım 203'deki "Uygun Nitelikli Kazı Malzemesi" tanımına da uyduğu görülmektedir.

2- Daha önceki yapılan araştırmalarda plastisite indisindeki artışa bağlı olarak kayma mukavemetinde azalma olduğu ve plastisite indisindeki azalmayla birlikte de kayma mukavemetinde artma olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada tek başına SKM örneğinde plastisite indisi (PI) 9 olarak belirlenmiştir. Bu örneğin serbest basınç dayanımları ise 1 günlük kür süresinde 2,3 kg/cm² olarak hesaplanmıştır. 28 günlük kür süresinde ise bu değer 2,61 kg/cm² olarak hesaplanmıştır. SKM örneği ve %10 UK karışımında plastisite indisi değerinin 22'ye yükseldiği görülmektedir. Aynı örnekte bakılan serbest basınç dayanımı değerlerinin ise 1 günlük kür süresinde 3,52 kg/cm² ye yükseldiği, 28 günlük kür süresinde ise bu değer 7,99 kg/cm² ye yükseldiği görülmektedir. SKM örneği ve %20 UK karışımında plastisite indisi değerinin 29'a yükseldiği ve ayrıca serbest basınç dayanımı değerlerinin ise 1 günlük kür süresinde 3,59 kg/cm² ye yükseldiği, 28 günlük kür süresinde ise bu değer 11,5 kg/cm² ye yükseldiği görülmüştür. Son olarak ise SKM örneği ve %30 UK karışımında plastisite indisi değerinin gerileyerek tekrar 22'ye düştüğü ve serbest basınç dayanımı değerlerinin ise 1 günlük kür süresinde 3,96 kg/cm² ye, 28 günlük kür süresinde ise bu değer 22,89 kg/cm² ye yükseldiği görülmüştür.

3- SKM örneğinde ve karışımlarda bakılan diğer bir parametre ise optimum su içerikleri ve kuru birim hacim ağırlıkları. Deney sonuçları incelendiğinde, SKM örneğinde %18,18 olan su içeriğinin %10 UK ilavesi ile %16,64'e düştüğü, %20 ve %30 UK ilavelerinde ise su içeriğinin tekrar %20,62 ve %20,23'e yükseldiği görülmüştür. Kuru birim hacim ağırlıkları ise SKM örneğinde 1,68, %10 ve %20 UK ilavesinde 1,69 ve 1,64, %30 UK ilavesinde ise 1,49 olarak belirlenmiştir.

Deneylerden edilen sonuçlar incelendiğinde SKM örneğine UK ilave edildiğinde Likit Limit değerinin ve Plastisite indisinin %10 ve %20 kül ilavelerinde yükseliş eğilimi gösterdiği %30 kül ilavesinde tekrar düşüş eğilimi gösterdiği görülmüştür. Mukavemet değerinin de UK ilavesi ve kür süresinin artması ile birlikte yaklaşık 10 kat arttığı ve bu büyük artışın yeni araştırmalar eşliğinde değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	S.Ö.	S.K.
K	75	25
T	90	10
Y	50	50
VTI	80	20
VAY	70	30
KT	80	20
YZ	100	
KI	40	60
GR	100	
PY	50	50
FA	20	80

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir (2015-7330 8182-01). Projeye desteklerinden dolayı yazarlar Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür eder.

Kaynaklar

- Akan R, Keskin SN, Yazıcı MF. 2017. Killi zeminlerin su muhtevası ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki. Kilis 7 Aralık Üniv Fen Müh Derg, 1(2): 1-9.
- Aytekin M. 2004. Deneysel zemin mekaniği. Teknik Yayın Evi, Ankara, Türkiye, Genişletilmiş 2. Baskı, ss: 276-319.
- Bilici H, Türköz M, Savaş H. 2022. Üç farklı termik santralden alınan uçucu külün ince taneli zeminin kompaksiyon ve dayanım özellikleri üzerindeki performansı. Eskişehir Osmangazi Üniv Müh Mimar Fak Derg, 30(3): 379-388. 10.31796/ogummf.11326.
- Denhghanian K. 2021. Killi zeminlerin özelliklerinin uçucu kül

- kullanarak iyileştirilmesi. ALKÜ Fen Bilim Derg, 3(1): 66-72.
- Geçkil T, Sarıcı T, Yıldırım E S. 2019. Kireç katkısı ile kil bir zeminin dayanımının iyileştirilmesi. Çukurova Üniv Müh-Mimar Fak Derg 34(4): 171-180.
- Özaydın K. 2011. Zemin mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, ss: 16-25.
- Taş M, Fidan D, Yılmaz F. 2018. Uçucu kül ve bayburt taşı ile zemin stabilizasyonu. Bayburt Üniv Fen Bilim Derg. 1(1): 8-14.
- Temiz H. Elbistan K. Paköz B. 2021. Afşin-Elbistan termik santral külünün standarda uygun hale getirilmesi ve beton katkısı olarak değerlendirilmesi. Çukurova Üniv Müh Fak Derg, 36(3): 799-813.
- Totiç E, Göktepe F, Merve Y. 2019. Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi. Dicle Üniv Müh Fak Mühendislik Derg,10(2): 769-778.
- TS 1900-1. 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri. Bölüm-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS 1500. 2000. İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS 1900-2. 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri. Bölüm-2, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Yılmaz F. 2016. Zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanımı. In 3rd international Symposium on Environment and Morality (ISEM2016), Antalya, Türkiye, ss: 63.
- Yılmaz F. 2020). Uçucu kül ve mermer tozu katkılarının zeminin stabilizasyonuna ve donma çözülmesine etkisinin araştırılması. Acad Plat J Engin Sci, 8(1): 56-61.
- Zumrawi MM. 2016. Correlation of placement conditions and soil intrinsic properties with shear strength of cohesive soils. 7th Annual Conference for Postgraduate Studies and Scientific Research Basic Sciences and Engineering Studies-University of Khartoum Sudan 20-23 February, Khartoum, Sudan, pp: 53.