



Araştırma Makalesi/Research Article

Katkı türü ve oranının yüksek plastisiteli kilin kompaksiyon parametrelerine etkisi

*The effect of additive type and ratio on the compaction parameters of high plasticity clay*Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU*¹, Zülfü GÜROCAK²¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, yaslan@firat.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3135-5926>²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, zgurocak@firat.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1049-8346>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Nisan 2022
Revizyon 6 Mayıs 2022
Kabul 18 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Kil, kompaksiyon, pozolan,
stabilizasyon, aglomerasyon

ÖZ

Puzolanik özelliğe sahip katkı malzemeleri kullanılarak killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak tanımlanan stabilizasyon, kolay uygulanabilir, ekonomik ve birçoğunun çevre dostu olması nedeniyle günümüzde çok fazla tercih edilmektedir. Killi zeminlere farklı puzolanlar katılarak başarılı bir stabilizasyon sonrasında oluşan dokusal değişimler sonucunda zeminin kompaksiyon parametreleri olarak adlandırılan optimum su içeriği değeri artarken, maksimum kuru birim ağırlığı ise azalmaktadır.

Bu çalışmada, farklı tür ve oranda kullanılan katkı malzemelerinin yüksek plastisiteli bentonitin kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla katkı malzemesi olarak sönmüş kireç, uçucu kül, asidik ve bazik karakterli tüflerin değişik oranlarda kullanıldığı katkılı örnekler hazırlanmış ve bu örneklerde Standard Proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, sadece bir katkı malzemesinin kullanılması durumunda en iyi sonuçlar %5 asidik tuf katkılı örnekte ve %10 sönmüş kireç katkılı örnekte elde edilmiştir. İki tip katkı malzemesini birlikte kullandığı örneklerde ise en iyi sonuçlar %10 oranında asidik tuf ve sönmüş kirecin birlikte kullanıldığı örnekte ortaya çıkmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, özellikle sönmüş kireç ve asidik tuf katkısının birlikte kullanılması durumunda kompaksiyon parametrelerinde en iyi sonuçların elde edildiğini göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 April 2022
Received in revised form 6 May 2022
Accepted 18 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Clay, compaction, pozzolan,
stabilization, agglomeration

ABSTRACT

Stabilization, which is defined as the improvement of the geotechnical properties of clayey soils by using additives with pozzolanic properties, is highly preferred today because it is easy to apply, economical and many of them are environmentally friendly. As a result of the textural changes that occur after successful stabilization by adding different pozzolans to the clayey soils, the optimum water content value, which is called the compaction parameters of the soil, increases, while the maximum dry unit weight decreases. In this study, the effects of additives used in different types and ratios on the compaction parameters of high plasticity bentonite were investigated. For this purpose, samples with additives using slaked lime, fly ash, acidic and basic tuffs in different proportions were prepared and Standard Proctor tests were carried out on these samples. According to the results obtained from the studies, the best results were obtained in the case of using only one additive material, in the sample with 5% acidic tuff and in the sample with 10% slaked lime. In the examples where two types of additives were used together, the best results were obtained in the example where 10% acidic tuff and slaked lime were used together. The results obtained from this study show that the best results are obtained in compaction parameters, especially when slaked lime and acidic tuff additive are used together.

Doi: 10.24012/dumf.1099931

* Sorumlu yazar

1. Giriş

Stabilizasyon, mühendislik gereksinimlerini karşılamak için killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin değiştirilmesi işlemidir [1] ve killerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu amaçla, farklı özelliklere sahip çok sayıda katkı malzemesi kullanılmaktadır. Kireç, çimento, uçucu kül, silis dumanı, tuf, volkanik cam, volkanik kül, şeyl ve diatomit gibi katkı malzemeleri zemine ait elementlerle kimyasal reaksiyona girerek kilin geoteknik özelliklerini iyileştirirken [2]-[23], jeofiber ve jeogrid gibi diğer katkı malzemeleri ise fiziksel etkileri ile zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmektedir [24],[25]. Zemindeki elementlerle kimyasal reaksiyona giren katkı malzemeleri ilk olarak zeminin su içeriğinin azalmasına ve daha kolay işlenebilir hale gelmesine; uzun sürede ise zeminin dayanım, sıkışabilirlik ve duraylılık özelliklerinde iyileşmelere neden olmaktadır [8],[26],[27],[28]. Stabilizasyonla zemini oluşturan taneler büyük boyutlu kümeler haline gelmekte ve böylece zemin dokusu değişmektedir. Topaklanma olarak tanımlanan bu olay sonucunda zeminin boşluk oranı ve optimum su içeriği artmakta, maksimum kuru yoğunluğu ise azalmaktadır [29].

Stabilizasyonda kullanılacak katkı malzemenin ekonomik ve çevre dostu olması da büyük önem taşımaktadır. Nitekim, kireç, çimento, silis dumanı gibi katkıların kullanımı stabilizasyon maliyetini artırmakta ve bu katkı maddelerinin üretildiği tesisler karbon salınımına ve iklim değişikliğine neden olmaktadır [30]. Bu nedenlerden dolayı, killerin stabilizasyonunda kullanılacak malzemenin, zeminin geoteknik özelliklerini amaca uygun hale getirmesi ile birlikte ekonomik, kolay elde edilebilir ve çevreci olması da önemlidir. Yapılan çalışmalarda [31]-[35] pomza, perlit ve tuf gibi malzemelerin zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar özellikle volkanik kül ve tüflerin zeminlerin stabilizasyonunda oldukça etkili olduğunu ve kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, farklı tip ve oranda kullanılan katkı malzemelerinin bentonitin kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla katkı malzemesi olarak sönmüş kireç, uçucu kül, asidik ve bazik karakterli tüfler seçilmiş ve bu katkı malzemeleri farklı oranlarda bentonite eklenerek hazırlanan örneklerde Standard proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, bentonitin optimum su içeriği (w_{opt}) değerinde en fazla artışa, kuru birim ağırlığında (γ_k) en fazla azalmaya neden olan karışım tip ve oranları belirlenmiştir.

2. Materyal ve metod

2.1. Bentonit ve katkı malzemelerinin özellikleri

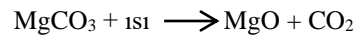
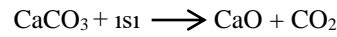
Deneysel çalışmalarda, Tokat-Reşadiye (Turkey) kil ocağında üretilen katkısız bentonit kullanılmıştır (Şekil 1). Bentonitin ilk kez literatüre girişi 1876 yılında sabun kili adıyla olmuştur. Bentonit ismi bulunduğu Rock Creek sahasındaki Ford Benton'dan gelmektedir. Bentonit kili, alüminyum ve magnezyum içeriği bakımından zengin volkanik kül, lav ve tüflerin kimyasal ayrışması ya da bozulması sonucunda meydana gelen montmorillonit

ailesine mensup bir kil mineralidir [36],[37] ve kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmaktadır. Dane boyutu 2 μm (0.002 mm) veya daha küçüktür ve en ayırt edici özelliği su ile etkileşime geçmeleri halinde şişerek hacimlerinde büyük değişimler meydana getirmeleridir. Yoğunluğu 2.6 gr/cm^3 civarında olup, iyonlaşma kapasitesi oldukça yüksek olan bentonitin plastisitesi yüksektir ve koloidal özelliğe sahip bir kil çeşididir [38]. Bentonitte yapılan XRF analiz sonuçlarına göre (Tablo 1) bu çalışmada kullanılan kil Na-bentonittir.



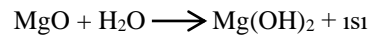
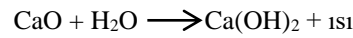
Şekil 1. Çalışmada kullanılan bentonit kili

Kireç, su ile karıştırıldığında, başlangıçta plastik sonra gittikçe sertleşen anorganik bir bileşiktir ve hammaddesi ise kireçtaşı (CaCO_3) ve dolomit ($\text{CaCO}_3+\text{MgCO}_3$)'tir. Kireçtaşının öğütülerek, 900°C'nin üzerinde döner fırınlarda pişirilmesi (kalsinasyon) ile aşağıdaki reaksiyon oluşur;



} Sönmemiş kireç

Bu reaksiyon sonucunda oluşan CaO, sönmemiş kireçtir. CaO su ile karıştırıldığında, büyük ısı (300-400 °C) açığa çıkarır ve aşağıdaki reaksiyon meydana gelir;



} Sönmüş kireç

Bu işleme kirecin söndürülmesi işlemi ve Ca(OH)_2 'e ise sönmüş kireç denir. Fabrikalarda elde edilen sönmüş kireç yalnızca Ca(OH)_2 olup ince toz halindedir ve torbalar halinde satılır buna hidrate kireç de denir.

Killi zemine kireç eklendiği zaman, katyon değişimi ve flokülasyon gibi kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir ve bu reaksiyonların bütününe puzolanik reaksiyonlar adı verilir. Bu reaksiyonlar kısa vadeli ve uzun vadeli iyileşmeler sağlar. Kısa vadeli iyileşmeler, katyon değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon sonucu, uzun vadeli iyileşmeler ise puzolanik reaksiyonlar sonucu olmaktadır [39].

Bu çalışmada Karaca Harput CL 80.S marka sönmüş kireç kullanılmıştır (Şekil 2). Kullanılan sönmüş kirece ait XRF

analizi sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre sönmüş kireç %70 oranında CaO’dan oluşmaktadır. MgO oranının çok düşük (%0.57) olması, bu kirecin üretildiği ana kayanın dolomitik olmadığını göstermektedir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan sönmüş kireç

Tablo 1. Bentonit ve katkı malzemelerinin kimyasal özellikleri [40].

Ana Oksit (%)	Bentonit	Sönmüş Kireç	Uçucu Kül	Asidik Tüf	Bazik Tüf
SiO ₂	62.50	1.55	29.20	69.10	31.40
Al ₂ O ₃	17.60	0.44	11.30	20.70	7.15
Fe ₂ O ₃	3.63	0.14	6.18	0.47	3.49
MgO	2.00	0.57	2.84	0.19	2.11
CaO	2.86	70.10	34.20	0.76	28.70
Na ₂ O	2.58	0.26	2.01	0.39	0.60
K ₂ O	0.92	0.07	0.71	1.43	0.87
TiO ₂	0.32	0.04	0.63	0.29	0.41
MnO	0.10	0.05	0.05	<0.01	0.03
P ₂ O ₅	0.14	0.04	0.42	0.06	0.09
SO ₃	0.076	1.39	9.78	0.90	0.036
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	0.04	<0.01	0.02
Sr	0.073	0.015	0.05	0.024	0.033
Ateşte Kayıp	6.60	26.40	3.60	5.50	24.80

Uçucu küller, toz halinde ya da öğütülmüş, taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan ve baca gazları ile sürüklenen silis ve alümina-silisli toz halindeki bir yanma kalıntısıdır [41]. Oluşan baca gazları ile birlikte taşınan çok hafif uçucu küller bacadan önce bulunan elektro-filtre veya siklon adı verilen toz tutucularda, elektrostatik veya mekanik yöntemlerle tutulurlar. Bu küller daha sonra toz tutucuların alt kısmında bulunan haznelerde biriktirilir ve düzenli olarak santral dışına alınırlar. Genelde küresel bir yapıya sahip ve çapları 1-150 mikron mertebesinde olan uçucu küllerin en büyük önemi, ani soğuma sonucu puzolanik bir özellik kazanmalarıdır [42-43-44]. ASTM C 618’e [45] göre uçucu küller, F ve C olarak iki gruba ayrılırlardır. F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ yüzdesi %70’den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde reaktif kireç (CaO) yüzdesi %10’un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar ve puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarı %50’den fazla olan küllerdir. Aynı

zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO %10’dan fazla olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğın yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül Afşin-Elbistan Termik santralinden temin edilmiş olup (Şekil 3), mineralojik ve kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla XRF analizleri yaptırılmıştır (Tablo 1). XRF analiz sonuçlarına göre, bu çalışmada kullanılan uçucu kül ASTM C 618’e [45] göre C sınıfındadır.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan uçucu kül

Katkı malzemesi olarak kullanılan asidik karakterli tüf Gümüşhane ili ve civarında yüzeyleme veren Kızılıkaya Formasyonun’dan (Şekil 4), bazik karakterli tüfler ise Elazığ ili Ağın bölgesinde yüzleme veren Karabakır Formasyonu’nundan (Şekil 5) derlenmiştir.



Şekil 4. Blok ve öğütülmüş asidik tüf



Şekil 5. Blok ve öğütülmüş bazik tüf

XRF analizi sonuçlarına göre Kızılkaya Formasyonundan derlenen tüflerin SiO₂ miktarı %63'den fazladır ve tuf asidik karakterlidir. Karabakır Formasyonu'na ait tüflerde kimyasal olarak tüflerin SiO₂ miktarı %45'den azdır ve bazik karakterlidir (Tablo 1).

2.2. Laboratuvar çalışmaları

Bu çalışma kapsamındaki laboratuvar çalışmaları, örnek hazırlama, bentonitin kıvam limitlerinin belirlenmesi ve hazırlanan katkılı örneklerde standard proktor deneylerinin yapılması şeklindedir. Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Örnek hazırlama

Asidik ve bazik karakterli tüfler gerçekleştirilen arazi çalışması ile derlenmiş ve laboratuvara getirilen tuf blokları öğütülerek 200 nolu elekten elenmiştir. Ayrıca uçucu kül ve sönmüş kireçte 200 nolu elekten elenerek deneylere hazır hale getirilmiştir. Bentonit kili ilk olarak 24 saat 105 °C'de etüvde kurutulmuş daha sonra önceden belirlenen oranlarda kuru halde tuf katkı malzemeleriyle iyice karıştırılmıştır. Katkılı bentonit karışımlarının üzerine distile su eşit olarak püskürtülmüş ve el ile tekrar karıştırılmıştır. Zemin ve katkı maddelerinin tam olarak karışmasını sağlamak için karıştırma işleminin süresi 5 dakika olarak seçilmiştir.

2.2.2. Kıvam limiti ve Standard Proktor deneyleri

Zeminlerin kıvamı; danecikleri arasındaki adezyon kuvvetini, yük karşısında kayma direncini ve stabilitesini, suyla değişen katılığını ve hangi su içeriğinde hangi katılığa sahip olacağını belirleyen en temel özelliktir. Zeminin kıvamının tanımlanmasında kullanılan en önemli parametre ise Kıvam (Atterberg) Limitleri'dir. Bu limitler, zemin davranışında belirli limitlerdeki veya kritik aşamalarda su içeriklerini ifade etmektedir. Zemin özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir yeri olan Kıvam Limitleri, zeminin sınıflandırılmasında ve zeminin kıvam özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kıvam limitleri; likit limit (LL), plastik limit (PL) ve rötre limit (RL)'den oluşmaktadır [46]-[48]. Laboratuvar çalışmalarının bu aşamasında, bentonit kilinin likit limit ve plastik limit değerlerini belirlemek için ASTM D4318 [49] standardına göre laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kıvam limiti deney sonuçlarına göre bentonitin likit limiti (LL) % 507, plastik limiti (PL) % 41, plastisite indisi (PI) ise % 466 olarak hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında ise bentonite kuru ağırlıkça % 5, % 10, % 20 oranlarında sönmüş kireç, uçucu kül, asidik tuf ve bazik tuf katılarak tek katkılı örnekler ve iki farklı katkı malzemesinin farklı oranlarda bentonite eklendiği örnekler hazırlanmıştır. Bu örneklerde ASTM D 698 [50] standardına göre standard proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Standard proktor deneyinin yapılışı ve sıkıştırılmış bir örnek

Bu deney, 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin üç tabaka halinde kalıp (mold) içerisine sıkıştırılması ile maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilir. Bu çalışma kapsamında tam otomatik proktor aleti kullanılarak yapılan Standard proktor deneylerine ait sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Standard proktor deneylerine ait sonuçlar.

Örnek	w_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)
K	38.50	12.36
K + % 5 KRÇ	40.91	10.49
K + % 10 KRÇ	43.00	10.30
K + % 20 KRÇ	43.50	10.38
K + % 5 BT	40.00	10.98
K + % 10 BT	46.10	10.60
K + % 20 BT	43.00	10.79
K + % 5 AT	48.00	10.77
K + % 10 AT	39.00	10.65
K + % 20 AT	40.00	11.57
K + % 5 UK	41.00	11.40
K + % 10 UK	42.88	11.28
K + % 20 UK	43.03	11.30
K + % 5 AT + % 10 KRÇ	65.00	8.83
K + % 10 AT + % 10 KRÇ	70.00	8.53
K + % 5 BT + % 10 KRÇ	56.00	9.61
K + % 10 BT + % 10 KRÇ	57.00	9.51
K + % 5 AT + % 10 UK	56.00	9.91
K + % 10 AT + % 10 UK	52.50	10.10
K + % 5 BT + % 10 UK	54.00	9.71
K + % 10 BT + % 10 UK	50.00	10.40
K: Kil	AT: Asidik tuf	
KRÇ: Sönmüş kireç	BT: Bazik tuf	
UK: Uçucu kül		

3. Deneysel sonuçların değerlendirilmesi

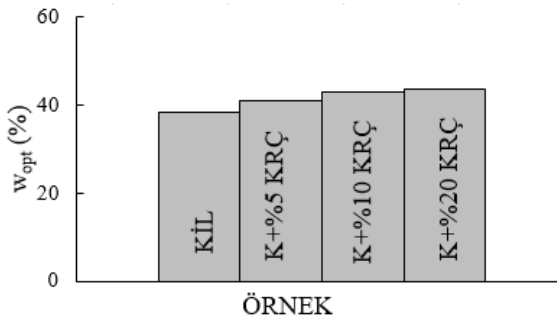
Tablo 2'de verilen deney sonuçlarına göre; katkısız bentonit kilinin ortalama w_{opt} değeri %38.50, ortalama γ_{kmax} değeri ise 12.36 kN/m³ iken katkılı örneklerde w_{opt} değerleri %39-70 arasında, γ_{kmax} değerleri ise 8.53-11.57 kN/m³ arasında değişim göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde katkısız kile sönmüş kireç, uçucu kül, asidik ve bazik tuf katkılı eklendiğinde karışım türüne ve oranına bağlı

olarak tüm karışımlarda w_{opt} değerleri artmakta, γ_{kmax} değerleri ise azalmaktadır (Tablo 2).

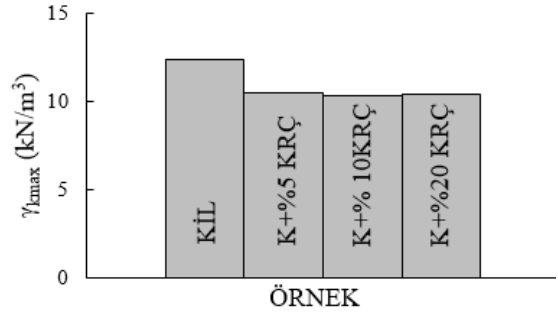
Tablo 3. Tek katkı malzemesi kullanılan örneklerin w_{opt} ve γ_{kmax} değerlerindeki % değişimler.

Örnek Adı	w_{opt} (%)	Değişim (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)	Değişim (%)
K	38.50		12.36	
K + % 5 KRÇ	40.91	6.26	10.49	-15.13
K + % 10 KRÇ	43.00	11.69	10.30	-16.67
K + % 20 KRÇ	43.50	12.99	10.38	-16.02
K + % 5 BT	40.00	3.90	10.98	-11.17
K + % 10 BT	46.10	19.74	10.60	-14.24
K + % 20 BT	43.00	11.69	10.79	-12.70
K + % 5 AT	48.00	24.68	10.77	-12.86
K + % 10 AT	39.00	1.30	10.65	-13.83
K + % 20 AT	40.00	3.90	11.57	-6.39
K + % 5 UK	41.00	6.49	11.40	-7.77
K + % 10 UK	42.88	11.38	11.28	-8.74
K + % 20 UK	43.03	11.77	11.30	-8.58

Bentonite %5, %10, %20 oranlarında sönmüş kireç katkısı eklendiğinde w_{opt} değerindeki en büyük değişim %12.99'luk bir artışla %20 sönmüş kireç katkılı örnekte meydana gelmiştir. Bu örneğin w_{opt} değerinde meydana gelen artış %10 sönmüş kireç katkılı örnekte meydana gelen artışa çok yakındır. Ağırlıkça %10 sönmüş kireç katkısından sonra katkı oranının %20'ye çıkarılmasıyla, w_{opt} değeri sınırlı bir artış göstermiş ve %12.99 olmuştur. Benzer durum örneğin γ_{kmax} değerlerinde meydana gelen azalmada da görülmüştür. Nitekim sönmüş kireç katkılı örneklerde katkı oranının artmasına bağlı olarak belirlenen azalmalar hemen hemen aynıdır. Katkisiz kile göre değerlendirildiğinde, %5 sönmüş kireç katkılı örneğin γ_{kmax} değerinde görülen azalma oranı %15.13 iken katkı oranının %10'a çıkarılması durumunda bu azalma oranı %16.67, katkı oranının %20 olması durumunda ise %16.02 olarak belirlenmiştir. Bu değerler sönmüş kireç katkısının %10'u aşması durumunda w_{opt} değerindeki artış ve γ_{kmax} değerindeki azalmaların çok sınırlı kaldığını göstermektedir (Tablo 3, Şekil 7, 8).

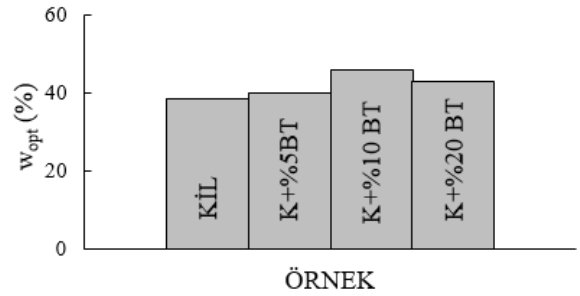


Şekil 7. Sönmüş kireç katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

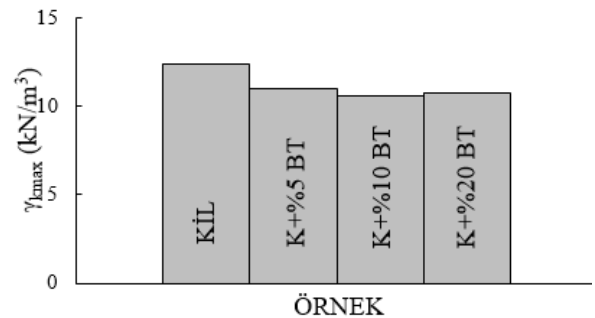


Şekil 8. Sönmüş kireç katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Bazı karakterli tuf katkısının kullanıldığı örneklerin w_{opt} değerlerinde en büyük artış %10 bazık tuf katkılı örnekte meydana gelmiştir. Artış oranı ise %19.74'tür. Ancak katkı oranının %20'ye yükseltilmesiyle birlikte w_{opt} değeri önemli ölçüde azalma göstermektedir. Benzer durum bu gruptaki örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki azalmalar için de geçerlidir. %5 bazık tuf katkılı örneğin γ_{kmax} değerindeki azalma oranı %11.17 iken, bu azalma oranı %10 katkılı örnekte %14.24, %20 katkılı örnekte ise %12.70 olarak belirlenmiştir. Bu değerler bazık tuf katkısının %10'u aşmasıyla birlikte γ_{kmax} değerindeki azalmanın sınırlı kaldığını göstermektedir (Tablo 3, Şekil 9, 10).



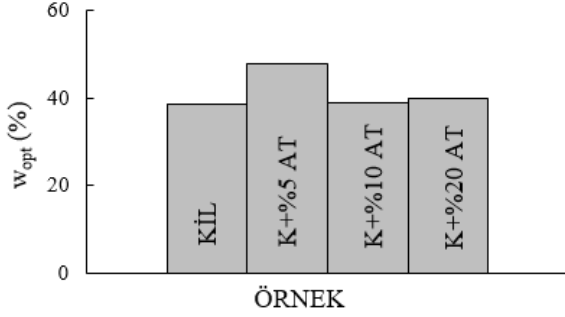
Şekil 9. Bazık tuf katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.



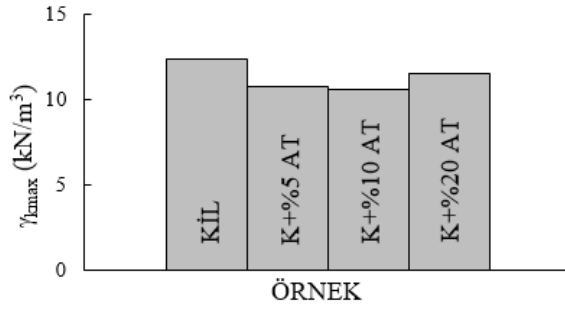
Şekil 10. Bazık tuf katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Katkı malzemesi olarak asidik karakterli tufün bentonite eklenmesiyle elde edilen örneklerin w_{opt} değerlerindeki en büyük artış %5 asidik tuf katkılı örnekte meydana gelmiştir ve bu artış katkisiz kile göre %24.68'dir. Katkı oranının %5'ten daha fazla olması durumunda ise w_{opt} değerleri ciddi şekilde azalmaktadır. Katkı oranının %10 ve %20 olduğu örneklerin w_{opt} değerlerindeki artışlar sırasıyla %1.30 ve

%3.90'dır. Bu örneklerin w_{opt} değerleri katıksız bentonit ile hemen hemen aynıdır. Asidik tüf katkılı örneklerin γ_{kmax} değerleri incelendiğinde, asidik tüf katkısının %5 olmasıyla birlikte γ_{kmax} değerinde meydana gelen azalma %12.86 iken katkı oranının %10'a çıkarılması durumunda γ_{kmax} değerinde meydana gelen azalma oranı sınırlı bir artış göstermiş ve %13.83 olarak belirlenmiştir. Katkı oranının %20 olduğu örnekte ise γ_{kmax} değerindeki azalmalar %6.39'da kalmıştır (Tablo 3, Şekil 11, 12).

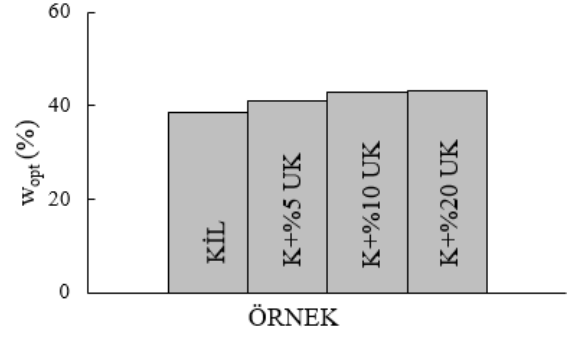


Şekil 11. Asidik tüf katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

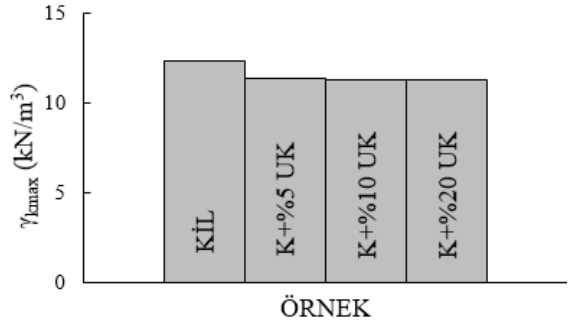


Şekil 12. Asidik tüf katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Uçucu külün katkı malzemesi olarak kullanıldığı örneklerde ait w_{opt} değerlerinde meydana gelen değişimler incelendiğinde; katkı oranının %5 olduğu örneğin w_{opt} değerindeki artış %6.49 iken, %10 katkılı örnekte %11.38, %20 katkılı örnekte ise %11.77 olduğu görülmektedir. Bu artış oranları, optimum katkı oranının %10 olduğunu bu orandan daha fazla oranlarda uçucu kül katkısının w_{opt} değerinde meydana getirdiği artışın sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu gruptaki örneklerin γ_{kmax} değerleri katkı oranının %5 olmasıyla birlikte %11 civarında azalma göstermiş ancak katkı oranının %10 ve %20 yapılması durumunda γ_{kmax} değerlerinde kayda değer bir azalma gözlenmemiştir (Tablo 3, Şekil 13, 14).



Şekil 13. Uçucu kül katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.



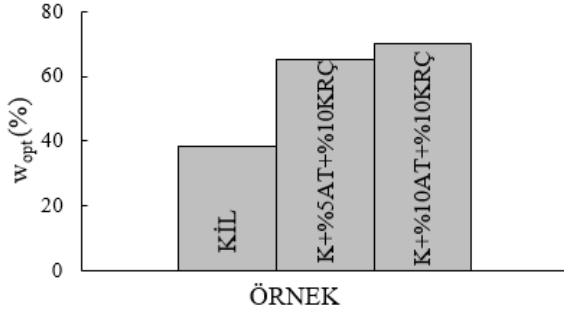
Şekil 14. Uçucu kül katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Yapılan çalışmalarda başarılı bir stabilizasyon sonrasında stabilize edilen killi zeminde meydana gelen topaklanmanın etkisiyle zeminin w_{opt} değerinin arttığını, γ_{kmax} değerinde ise azalma meydana geldiğini belirtmektedir [29]. Bu bilgi dikkate alındığında, sadece bir katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan örneklerden elde edilen sonuçlara göre (Tablo 3), sönmüş kireç ve uçucu kül katkılarının kullanıldığı örneklerde w_{opt} değerlerinde en fazla artışı ve γ_{kmax} değerlerindeki en fazla azalmayı sağlayan optimum katkı oranının %10 olduğu görülmektedir. Bazik ve asidik karakterli tüf katkılı örneklerde ise optimum katkı oranı %5 veya %10'dur. Bu nedenle örneklerdeki katkı oranları sönmüş kireç ve uçucu külde %10, asidik ve bazik karakterli tüflerde ise %5 ve %10 olacak şekilde iki katkılı örnekler hazırlanmıştır. Bu örneklerde gerçekleştirilen standard kompaksiyon deneylerinden elde edilen w_{opt} ve γ_{kmax} değerleri ve bu değerlerdeki değişim yüzdeleri Tablo 4'te verilmiştir.

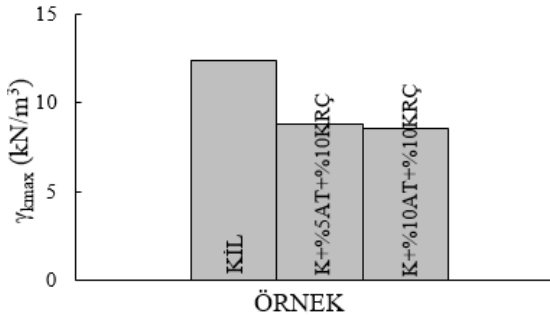
Tablo 4. İki katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerin w_{opt} ve γ_{kmax} değerlerindeki % değişimler.

Örnek Adı	w_{opt} (%)	Değişim (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)	Değişim (%)
K	38.50	-	12.36	-
K + % 5 AT + % 10 KRÇ	65.00	68.83	8.83	-28.56
K + % 10 AT + % 10 KRÇ	70.00	81.82	8.53	-30.99
K + % 5 BT + % 10 KRÇ	56.00	45.45	9.61	-22.25
K + % 10 BT + % 10 KRÇ	57.00	48.05	9.51	-23.06
K + % 5 AT + % 10 UK	56.00	45.45	9.91	-19.82
K + % 10 AT + % 10 UK	52.50	36.36	10.10	-18.28
K + % 5 BT + % 10 UK	54.00	40.26	9.71	-21.44
K + % 10 BT + % 10 UK	50.00	29.87	10.40	-15.86

İkinci aşamada gerçekleştirilen deneylerden elde edilen w_{opt} ve γ_{kmax} değerlerinde meydana gelen değişim yüzdelere göre %10 sönmüş kireç ile %5 ve %10 asidik ve bazik karakterli tüflerin katkı malzemesi olarak kullanıldığı örneklerde en iyi sonuç %10 asidik tuf + %10 sönmüş kirecin kullanıldığı örnekte meydana gelmiştir. %5 asidik tuf katkısının kullanıldığı örneğin w_{opt} değerindeki artış oranı %68.83 iken, asidik tuf katkı oranının %10'a çıkarılması durumunda w_{opt} değeri %70'e, artış oranı ise %81.82'ye ulaşmıştır. Bu gruptaki örneklerde asidik tuf katkısının %5 olması durumunda γ_{kmax} değerindeki azalma %28.56 iken katkı oranının %10 olması durumunda γ_{kmax} değerindeki azalma oranı %30.99 olmuş ve γ_{kmax} değeri 8.53 kN/m^3 'e düşmüştür (Tablo 4, Şekil 15, 16).

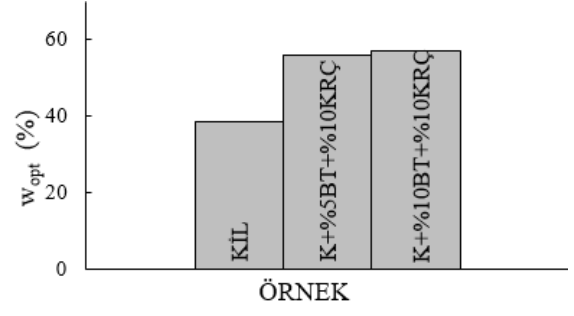


Şekil 15. Asidik tuf ve sönmüş kireç katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

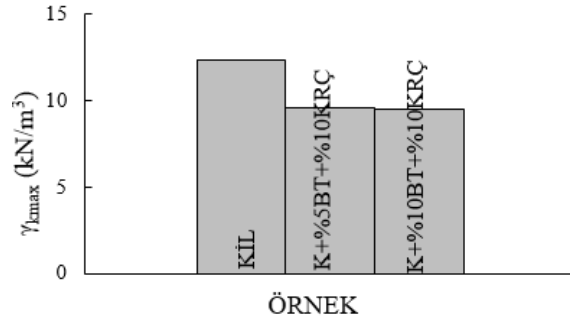


Şekil 16. Asidik tuf ve sönmüş kireç katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Bazik karakterli tuf ile sönmüş kirecin birlikte kullanıldığı örneklerde ise en iyi sonuçlar %10 bazik tuf + %10 sönmüş kireç katkılı örnekte belirlenmiştir. Bazik tuf katkısının %5 olduğu örnekte w_{opt} değerindeki artış oranı %45.45 iken, bazik tuf katkısının %10 olması durumunda bu artış %48.05 olarak gerçekleşmiştir. Benzer şekilde γ_{kmax} değerlerindeki en fazla azalma oranı da %23.06 oranındaki bir azalma ile %10 bazik tuf + %10 sönmüş kireç katkılı örnekte meydana gelmiştir (Tablo 4, Şekil 17, 18).

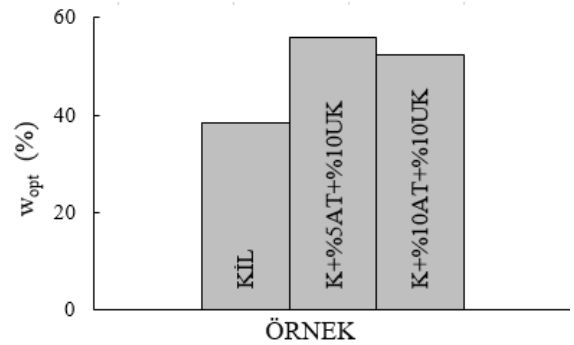


Şekil 17. Bazik tuf ve sönmüş kireç katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

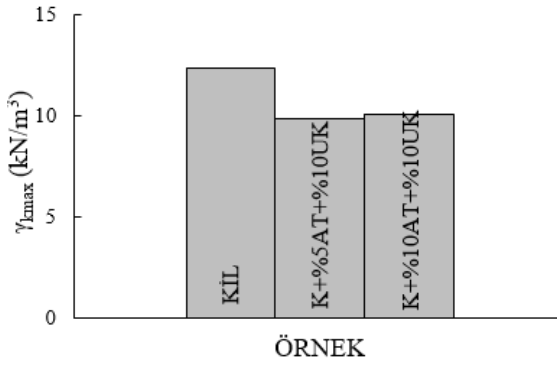


Şekil 18. Bazik tuf ve sönmüş kireç katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Uçucu kül ile asidik tufün birlikte kullanıldığı örneklerde ise en iyi sonuç %5 asidik tuf + %10 uçucu kül katkılı örnekte belirlenmiştir. Bu örneğin w_{opt} değerindeki artış oranı %45.45 iken asidik tuf katkısının oranı %10 olduğunda w_{opt} değerindeki artış oranı %36.36'ya düşmektedir. Bu örneğin γ_{kmax} değerindeki azalma oranı ise %19.82'dir ve bu azalma oranı %10 sönmüş kireç + %10 asidik tuf katkılı örneğe göre daha fazladır (Tablo 4, Şekil 19, 20).

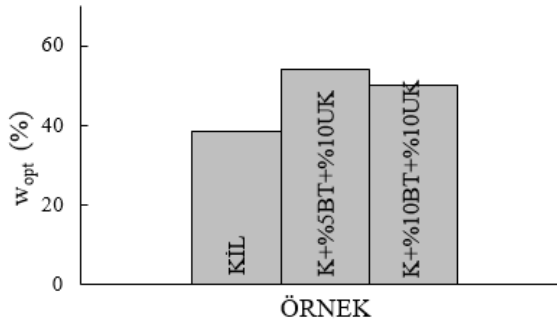


Şekil 19. Asidik tuf ve uçucu kül katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

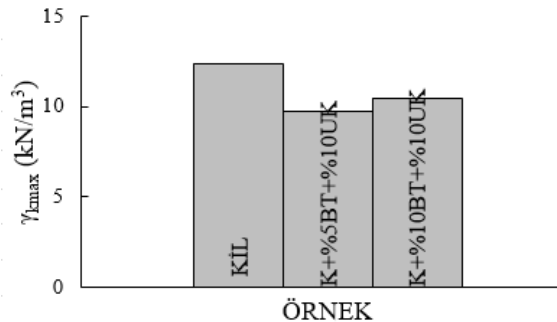


Şekil 20. Asidik tuf ve uçucu kül katkı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Bazik tüfler ile birlikte uçucu külün kullanıldığı örneklerde elde edilen en iyi sonuçlar % 5 bazik tuf + % 10 uçucu kül katkı örnekte belirlenmiştir. Bu örneğin w_{opt} değeri katkısız kile göre %40.26 artarak %54.00'e ulaşmıştır. Bazik tuf katkısının %10 olduğu örnekte ise w_{opt} değerindeki artış oranı %29.87'ye gerilemiştir. γ_{kmax} değerlerindeki azalmalar dikkate alındığında yine en iyi sonuç % 5 bazik tuf + % 10 uçucu kül katkı örneğe aittir. Bu örnekte γ_{kmax} değerindeki azalma oranı %21.44 iken bazik tuf katkısının %10'a artırılması ile γ_{kmax} değerindeki azalma %15.86'da kalmıştır (Tablo 4, Şekil 21, 22).



Şekil 21. Bazik tuf ve uçucu kül katkı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.



Şekil 22. Bazik tuf ve uçucu kül katkı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Yapılan deneysel çalışmalardan ortaya çıkan sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde; katkısız bentonit örneğine göre tek katkı örneklerin w_{opt} değerinde en büyük orandaki artış %24.68 ile %5 asidik tuf katkı örnekte, γ_{kmax} değerlerindeki en fazla azalma ise %16.67 oranı ile %10

sönmüş kireç katkı örnekte meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, %10 oranında sönmüş kireç ve %5 oranındaki asidik tuf katkısının önemli bir puzolanik etkiye sahip olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Çift katkı örneklerde ise hem w_{opt} hem de γ_{kmax} değerlerindeki olumlu değişimler % 10AT + %10 KRÇ katkı örnekte belirlenmiştir. Bu örneğin w_{opt} değeri katkısız bentonit örneğine göre %81.82 oranında artarak %70.00'e ulaşmıştır. Yine diğer katkı örneklerine göre γ_{kmax} değerlerindeki en fazla azalma bu örnekte meydana gelmiştir. Örneğin γ_{kmax} değeri katkısız bentonit örneğine göre %30.99 oranında azalarak 8.53 kN/m³'e inmiştir.

Stabilizasyon konusunda yapılan çalışmalarda stabilize edilen killi zeminlerde danelerin kümeler haline bir araya geldiği (topaklanma) ve zeminin mikro yapısının değiştiği, böylece zeminin boşluk oranı ve optimum su içeriği artarken, maksimum kuru birim hacminin ise azaldığı belirtilmektedir [8],[29],[51]-[53]. Bu değişimlerin meydana gelmesinde en önemli etken killi zemine katılan malzemenin etkisiyle gelişen puzolanik reaksiyonlardır. Puzolan olarak adlandırılan bu malzemeler ASTM C-618 [45] tarafından kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, fakat uygun nem şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli-alüminli maddeler olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımda puzolanik reaksiyonun gelişebilmesinde en önemli faktörlerden birisinin ortamda kirecin bulunması gerekliliği belirtilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar da bu bilgiyi desteklemektedir. Nitekim katkı malzemesi olarak sadece %10 sönmüş kireç veya %5 asidik tuf katkısının kullanıldığı örneklerde nispeten iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, bu iki katkı malzemesinin birlikte kullanılması durumunda elde edilen sonuç gerçekten çok dikkat çekicidir. Katkı olarak %5 asidik tuf ve %10 sönmüş kirecin birlikte kullanılması durumunda hem w_{opt} değerindeki artış, hem de γ_{kmax} değerindeki azalma maksimum düzeye ulaşmıştır. Çünkü puzolanik reaksiyonda CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ oranları önemli bir yere sahiptir. Katkı olarak sadece sönmüş kirecin kullanılması durumunda daha iyi bir puzolanik reaksiyonun gelişebilmesi için ortamda yeterli miktarda SiO₂ ve Al₂O₃, katkı olarak sadece asidik tufün kullanılması durumunda ise CaO miktarı yeterli değildir. Bu iki katkı malzemesinin birlikte kullanılması durumunda, puzolanik reaksiyonun gelişebilmesi için gerekli olan CaO sönmüş kireç, SiO₂ ve Al₂O₃ ise asidik tuf tarafından karşılanmış ve böylece etkili bir puzolanik reaksiyon oluşmuştur. Bu reaksiyonun etkileri %5 asidik tuf ve %10 sönmüş kirecin kullanıldığı örneğe ait hem w_{opt} hem de γ_{kmax} değerlerinde meydana gelen değişimlerde görmek mümkündür.

4. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca verilmiştir.

1. Çalışmada kullanılan kilin zemin sınıfı kıvam limiti deneylerine göre yüksek plastisiteli (CH) kil olarak belirlenmiştir. Kilin LL % 507, PL % 47 ve

- PI değeri ise % 466'dır. Standard proktor deneylerine göre katkısız kilin w_{opt} değeri % 38.5, γ_{kmax} değeri ise 12.36 kN/m³'dür.
- Katkılı örneklerin w_{opt} değerleri %39-70 arasında, γ_{kmax} değerleri ise 8.53-11.57 kN/m³ arasında değişim göstermektedir.
 - Sadece bir katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerde en iyi sonuçlar %10 sönmüş kireç ve %5 asidik tuf katkılı örneklerde meydana gelmiştir. Katkı malzemesi olarak %5 asidik tufün kullanıldığı örnekte w_{opt} değeri katkısız bentonit örneğine göre yaklaşık %24 oranında artmış, %10 sönmüş kirecin kullanıldığı örneğin γ_{kmax} değeri ise yaklaşık %17 azalma göstermiştir.
 - İki farklı katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerden elde edilen sonuçlara göre %10 asidik tuf + %10 sönmüş kireç katkılı örnekte en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Nitekim bu örneğin w_{opt} değeri katkısız bentonit örneğine göre %81.82 oranında artarak %70.00, γ_{kmax} değeri ise katkısız bentonit örneğine göre %30.99 oranında azalarak 8.53 kN/m³ olmuştur.
 - Bu sonuçlar, katkı malzemesi olarak en fazla tercih edilen sönmüş kirecin veya yine önemli bir puzolan olan asidik karakterli tufün tek başına kullanımı sonucunda stabilizasyonda olumlu sonuçlar elde edilmesine karşın, katkı malzemesi olarak %10 oranında sönmüş kireçle birlikte %5 oranında asidik tuf kullanımının elde edilecek sonuçlara çok büyük bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni ise sönmüş kirecin yüksek CaO oranına, asidik tufün ise yüksek SiO₂ ve Al₂O₃ oranlarına sahip olması ve bunun etkisiyle güçlü bir puzolanlık reaksiyon gelişmesidir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır"

Yazar Katkıları

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Zülfü GÜROCAK, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.16.64 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

Kaynaklar

- N.O. Attoh-Okine, "Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited," *Constr. Build. Mater.*, vol. 9 no.5, pp. 283-287, 1995. doi.org/10.1016/0950-0618(95)00030-J.
- J. Hilf, "Compacted fill. in: H. Fang (Ed.). Foundation Engineering Handbook," Van Nostrand Reinhold. NewYork ABD, 1991.
- D. Little, "Stabilization of pavement subgrades base courses with lime," *Lime Association of Texas. ABD*, 1995.
- F. Bell, "Lime stabilization of clay minerals and soils," *Eng. Geol.* vol. 42, no. 4, pp. 223-237, 1996, doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2.
- D.I. et al., "Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes," *Geotechnique*, vol. 51, no. 6, pp. 533-543, 2001, doi.org/10.1680/geot.2001.51.6.533.
- A.J., Puppala et al., "Resilient moduli of treated clays from repeated load triaxial test," *Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board*, pp. 68-74:1821, 2003, doi.org/10.3141/1821-08.
- E. Kalkan and S. Akbulut, "The positive effects of silica fume on the permeability swelling pressure and compressive strength of natural clay liners," *Eng. Geol.*, vol. 73, no. (1-2), pp. 145-156, 2004, doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.001.
- J. Mallela, et al., "Consideration of limestabilized layers in mechanistic-empirical pavement design," *The National Lime Association*. Arlington. Virginia, USA, 2004.
- A.A. Al-Rawas, A.W. Hugo and H. Al-Sami, "Effect of lime, cement and artificial pozzolan on the swelling potential of an expansive soil from Oman," *Building & Environment* 40. Elsevier; pp.267-281, 2005, doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.028.
- H.S. Aksoy, M. Yılmaz, E.E. Akarsu, "Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu". *Doğu Anadolu Bölgeleri Araştırmaları*, 2008.
- O. Cuisinier et al., "Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil," *Eng. Geol.*, vol. 123, no. 3, pp. 187-193, 2011, doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010.
- K, Harichane et al., "Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux" *Proceedings of 29th meeting of AUGC-Tlemcen*, Algeria, 2011.
- K.M.A. Hossain, L.Mol, "Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 8,

- pp. 3495-3501, 2011, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042.
- [14] T. Ramadas, N.D. Kumar and G. Yesuratnam, "Geotechnical characteristics of three expansive soils treated with lime and fly ash," *Int. J. Earth Sci. Eng.*, vol. 4, pp. 46-49, 2011.
- [15] O. Azadegan, S.H. Jafari, J. Li, "Compaction characteristics and mechanical properties of lime/cement treated granular soils," *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 17, pp. 2275-2284, 2012.
- [16] B. Lin et al., "Effect of fly ash on the behavior of expansive soils: microscopic analysis" *Environmental Engineering Geoscience*, vol. 19, no. 1, pp. 85-94, 2013, doi.org/10.2113/gseegeosci.19.1.85.
- [17] A. Mahamedi and M. Khemissa, "Cement stabilization of compacted expansive clay," *Online j. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 33-38, 2013.
- [18] D. Wang et al., "Effect of lime treatment on geotechnical properties of Dunkirk Sediments in France," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, no. 3, pp. 485-503, 2013, doi.org/10.1080/14680629.2012.755935
- [19] P. Voottipruex and P. Jamsawang, "Characteristics of expansive soils improved with cement and fly ash in Northern Thailand," *Geomechanics and Engineering An Int'l Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 437-453, 2014, DOI: 10.12989/gae.2014.6.5.437.
- [20] M.R. Asgari, A.B. Dezfouli and M. Bayat, "Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 8, no. 3, pp. 1439-1452, 2015, doi.org/10.1007/s12517-013-1173-1
- [21] A.R. Goodarzi, S.H. Goodarzi, H.R., "Akbari, Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste," *Iranian Journal of Science And Technology-Transactions of Civil Engineering*, vol. 39, no. C2, pp. 333-350, 2015, doi.org/10.22099/IJSTC.2015.3138.
- [22] M. Gör, H.S. Aksoy, G. Bilgen, "Farklı katkı malzemelerinin kil bir zeminin kıvam limitleri üzerinde zamana bağlı etkisi" *15. Ulusal Kil Sempozyumu*, Niğde, 2012
- [23] A. Kavak, M.M. Kızılcelik and G. Bilgen, "Stabilization of high plasticity clay with quick and hydrated lime", *XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE)*, Vienna, 2014.
- [24] G. Yang et al., "Geogrid-reinforced lime-treated cohesive soil retaining wall: Case study and implications" *Geotext. Geomembranes*, vol 35, pp. 112-118, 2012, doi.org/10.1016/j.geotextmem.2012.09.001.
- [25] S.Y. Chong and K.A. Kassim, "Consolidation characteristics of lime column and geotextile encapsulated lime column (GELC) stabilized pontian marine clay," *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 19A, pp. 129-141, 2014.
- [26] J. Locat, M.A. Berube and M. Choquette, "Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: Shear strength development" *Can. Geotech. J.*, vol. 27, no. 3, pp.294-304, 1990, doi.org/10.1139/t90-040.
- [27] S. Wild et al., "Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates," *Clay Miner.*, vol. 31, no. 3, pp. 423-433, 1996, DOI: 10.1180/claymin.1996.031.3.12.
- [28] C.M. Geiman, "Stabilization of soft clay subgrades in Virginia phase I laboratory study," MS Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [29] J.M. Kinuthia, S. Wild and G.I. Jones, "Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite," *Appl. Clay Sci.*, vol. 14, no. 1-3, pp. 27-45, 1999, doi.org/10.1016/S0169-1317(98)00046-5.
- [30] M. Imbabi, C. Carrigan, S. McKenna, "Trends and developments in green cement and concrete technology," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 1, no. 2, pp. 194-216, 2012, doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001.
- [31] S.N. Keskin and Ö. Çimen, "Killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde pomza kullanımının araştırılması," *I. Isparta Pomza Sempozyumu*, pp. 97-101, 1997.
- [32] A. Okucu, "Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri," Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 1998.
- [33] S. Fındık, "Karayolu esnek üstyapıları alttemel tabakasının stabilizasyonunda hafif agregaların kullanılabilirliği," Yüksek Lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2005.
- [34] Ü. Bulut, "Perlitin Puzolanik Aktivitesi," Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [35] Y. Kavlak, "Isparta Gelincik pomzasının karayolu esnek üstyapıları taban zemini stabilizasyonunda kullanımı," Yüksek Lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2008.
- [36] A. Akbulut, "Bentonit," MTA Eğitim Serisi-32, Ankara, 1996.
- [37] Y. Önem, "Sanayi Madenleri," Kozan Ofset, Ankara, 2000.
- [38] S. Genç, "Şişen Zeminler ve Bentonit-kaolin karışımlarının şişme özellikleri," Yüksek lisans tezi. İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [39] K. Özaydın, "Zemin Mekaniği", Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.

- [40] Y. Aslan Topçuoğlu, “Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi,” Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2020.
- [41] Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 197-1, 2012.
- [42] M. Çakır, “Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu. Yüksek lisans tezi,” İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1999.
- [43] D. Alkaya, “Uçucu kül katkısının dolgu zeminlerin stabilitesine etkisi”, Doktora tezi, Pamukkale Üniversitesi, 2002.
- [44] H. Toros, “Afşin Elbistan Termik santrali uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak kullanılması. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi; İstanbul, 1987.
- [45] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials, ASTM C 618-12, 2012.
- [46] A. Atterberg, “Über die Physikalische bodenuntersuchung, and über die plastizität der tone, internationale mittlungen für bodenkunde”, C.1, pp. 10-43, Berlin, 1911.
- [47] A. Casagrande, “Research on the Atterberg limits of soils,” *Pub. Roads*, C.13, pp. 121-136, 1932.
- [48] I.L. “Whyte Soil plasticity and strength-A new approach for using extrusion,” *Ground Engineering*, no.15, pp. 16-24, 1982.
- [49] Standard Test Methods for Liquid Limit. Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials, ASTM D4318-17e1, 2017.
- [50] Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, American Society for Testing and Materials ASTM D698- 12e2, 2012.
- [51] I.T. Jawad *et al.*, “Soil stabilization using lime: advantages, disadvantages and proposing a potential plternative”, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 8, no. 4, 510–520, 2014, doi.org/10.19026/rjaset.8.1000 .
- [52] A.M. Tabatabai, “Pavement,” University’s Publication Center, Tehran, Iran, 1997.
- [53] M.R. Thompson, “Engineering properties of limesoil mixtures”, *Journal of Materials*, vol. 4, no. 4, pp. 968-969, 1969.