LC3 İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KİL ZEMİNLERİN SIKIŞTIRMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE 20 SAATLİK SIKIŞTIRMA GECİKMESİNİN ETKİSİ

EFFECT OF 20-HOUR COMPACTION DELAY ON THE COMPACTION CHARACTERISTICS OF CLAY SOILS STABILIZED WITH LC3

Öznur BİRİCİK ALTUN [1], Yeşim Sema ÜNSEVER [2]

ÖZET

Zemin iyileştirmesi çalışmalarında sürdürülebilirliği artırmak için Portland çimentosuna (PC) kıyasla daha düşük CO_2 emisyonu ve üretim maliyetine sahip alternatif malzemelerin kullanımı araştırılmaktadır. Alternatif malzemelerden biri, %53 PC, %2 alçı, %15 kireçtaşı tozu ($CaCO_3$) ve %30 metakaolin içeren kireçtaşı kalsine kil çimentosudur (LC3). Bu çalışmada, PC karışımlarına ek olarak, LC3 karışımları ve $CaCO_3$'ün Nano-$CaCO_3$ ile değiştirilmesiyle elde edilen Nano-LC3 karışımları kullanılmıştır. Bu stabilizatör karışımları, kil numunesiyle %5, %10 ve %15 oranlarında karıştırılmıştır. Sıkıştırma öncesinde beklemenin zemin iyileşmesine etkilerini araştırmak için, iyileştirilmemiş zemin ve bu 9 karışım, 20 saat boyunca plastik kapta bekletilerek ve bekletilmeden Proktor testine tabi tutulmuştur. 20 saat bekletilen numunelerin, hazırlandıktan hemen sonra deney gerçekleştirilen numunelere kıyasla maksimum yoğunluk değerlerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bekleme neticesinde maksimum yoğunluk değeri azalma oranı en fazla PC-%15 karışımında %16,0 olmuştur. 20 saatlik beklemenin etkisinin en az görüldüğü LC3-%5 ve LC3-Nano-%5 karışımları için ise sırasıyla %8,7 ve %8,9 bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: *kil, LC3, nano-$CaCO_3$, proktor, zemin iyileştirmesi*

ABSTRACT

In order to increase sustainability in soil improvement studies, the use of alternative materials with lower CO_2 emissions and production costs compared to PC is being researched. One of the alternative materials is limestone calcined clay cement (LC3), which contains 53% PC, 2% gypsum, 15% limestone powder ($CaCO_3$), and 30% metakaolin. In this study, in addition to PC mixtures, LC3 mixtures, Nano-LC3 mixtures were obtained by replacing $CaCO_3$ with Nano-$CaCO_3$. These stabilizer mixtures were mixed with clay soil samples at ratios of 5%, 10%, and 15%. In order to investigate the effects of waiting before compaction on soil improvement, the untreated soil and these 9 mixtures were subjected to Proctor tests with and without a 20-hour waiting period in plastic containers. It was determined that the maximum dry density values of the samples kept for 20 hours were lower compared to the samples tested immediately without waiting. As a result of the waiting period, the highest reduction rate in maximum dry density value was 16.0% in the PC-15% mixture. In the mixtures where the effect of the 20-hour wait was least observed, this rate was 8.7% and 8.9% for the LC3-5% and the LC3-Nano-5% mixture, respectively.

Keywords: *clay, LC3, nano-$CaCO_3$, proctor, soil improvement*

[1] Araştırma Görevlisi, Bursa Uludağ Üniversitesi, oznurbiricik@uludag.edu.tr (Öznur Biricik Altun)
[2] Doçent Doktor, Bursa Uludağ Üniversitesi, unsever@uludag.edu.tr

1. GİRİŞ

Zemin iyileştirme çalışmaları kapsamında taşıma gücü düşük ve şişme özelliği yüksek olan zayıf alt temel zeminin kimyasal stabilizasyonunun ardından silindirler yardımı ile sıkıştırılarak dayanımı arttırılmakta ve şişme özellikleri azaltılmaktadır (Kampala vd., 2020). İklimsel, çevresel ve lojistik nedenlerle ilgili olabilecek öngörülemeyen durumlar nedeniyle sıkıştırma gecikmesi yaşanabilmektedir. Sıkıştırma işleminin gecikmesi, kimyasal zemin iyileştirilmesinde kullanılan çimento, kireç gibi malzemelerin özelliklerini etkilemektedir.

Çimento ile stabilizasyon üzerine çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, sıkıştırma gecikmesinin çimento ile iyileştirilen zeminin özelliklerine etkisi sınırlı sayıda çalışmada incelenmiştir. Nazari vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 120 dakika gecikme ile sıkıştırılan numuneler, gecikmesiz örneklere kıyasla maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde (%3,46 ila %5,43 arasında) ve serbest basınç dayanımı değerlerinde (%11,31 ila %37,25 arasında) azalma göstermiştir. West (1959), geçen sürenin %10 çimento ile stabilize edilmiş orta kilin yoğunluğu üzerindeki etkisini incelemiştir. 7 saatlik bir zaman gecikmesinin kuru yoğunlukta ~%15'lik bir azalmaya neden olduğu bildirilmiştir. Zaman gecikmesiyle optimum su muhtevasındaki artışın aksine, maksimum yoğunluğun azaldığı Venkatarama Reddy ve Prasanna Kumar (2011) tarafından da bildirilmiştir. 1 saatlik zaman gecikmesi için, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde neredeyse hiç değişiklik (%1-3) olmadığı beyan edilmiştir. 0 ile 10 saat arasındaki zaman gecikmesi için maksimum kuru yoğunluktaki azalma, %10-16 arasında, dayanımdaki azalma %50 (3,3 MPa'dan 1,66 MPa'ya) olarak belirtilmiştir.

Yaygın olarak kabul edilen zemin iyileştirme uygulamalarında, saha sıkıştırma işlemlerinin ilk karıştırmadan sonraki 2 saat içinde tamamlanmasını ve herhangi bir kısmın 30 dakikadan fazla işlenmemiş halde kalmamasını gerektirir (ACI, 2009; PCA, 2006; PCA 2001). AASHTO T134 ve ASTM D558'de belirtilen Proktor test yöntemlerinin çimento ilavesi ile sıkıştırma arasındaki zaman gecikmesinin (sıkıştırma gecikmesi olarak da bilinir) etkilerini karakterize etmek için bir metodoloji veya standartlaştırılmış protokol oluşturmadığını belirtilmiş ve AASHTO T134 için sıkıştırma gecikmesi etkilerini karakterize etmek üzere önerilen yeni test yöntemi protokolleri önerilmiştir (Sullivan ve Howard, 2021).

Sıkıştırma gecikmesinin toprağın sıkıştırılabilirliği üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Bu bağlamda, mevcut araştırma, çimento ile stabilize edilmiş zeminlerde sıkıştırma gecikmesinin maksimum yoğunluk değerlerine etkisine odaklanmıştır. Çalışma kapsamında PÇ, LC3 ve nano-CaCO3 ikame edilmiş LC3 iyileştirici karışımları hazırlanmıştır. Söz konusu iyileştirici karışımlar %90 Kaolin ve %10 Bentonit karıştırılarak hazırlanmış yüksek plastisiteli kil (CH) karışımına %5, %10 ve %15 oranlarında eklenmiştir. Numunelerin bir kısmı kürlenmeden bir kısmı ise 20 saat kürlenmenin ardından proktor deneyine tabi tutulmuştur.

2. MATERYAL VE METHOD

Bu çalışmada, %90 kaolin ve %10 bentonit kullanılarak Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) zemin numunesi oluşturulmuştur. Bu çalışmada, iyileştirici karışımların hazırlanmasında CEM I 42.5 R çimentosu, alçı, metakaolin, kireçtaşı tozu (kalsit) ($CaCO_3$) ve nano kalsit (nano-$CaCO_3$) kullanılmıştır. Malzemelerin özgül ağırlık değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışma kapsamında hazırlanan karışımlarda kullanılan malzemelerin özgül ağırlık değerleri.

Malzeme	Kaolin	Bentonit	Portland Çimentosu	Alçı	Metakaolin	Kalsit ($CaCO_3$)	Nano-$CaCO_3$
Özgül ağırlık	2.65	2.70	3.13	2.40	2.56	2.93	2.93

Tablo 2'de iyileştirici karışımlarda bulunan malzemeler ve oranları verilmiştir. LC3 çimentosu içerisindeki malzemelerin oranları, Gonthier vd. (2021) tarafından yapılan çalışmalarda belirlenen optimal oranlara göre seçilmiştir. Bu çalışma kapsamında iyileştirilmemiş karışım %90 Kaolin+%10 Bentonit, Portland çimentosu ile iyileştirilmiş karışım PC, LC3 çimentosu ile iyileştirilen karışım LC3, nano-$CaCO_3$ içeren LC3 çimentosu ile iyileştirilen karışım LC3-Nano olarak isimlendirilmiştir. Tablo 3'te kaolin ve bentonit karışımına iyileştirici karışımların ikame edilmesi ile elde edilen karışımlar ve karışımların içerdiği malzeme oranları verilmiştir. Karışım isimlerinin sonundaki %5, %10 ve %15 ifadeleri iyileştirici karışımların iyileştirilmemiş karışıma (%90 Kaolin+%10 Bentonit) ikame oranını ifade etmektedir.

Toz karışımlar farklı su içerikleri eklenerek 10 dakika boyunca plastik kapta elle karıştırılarak hazırlanmıştır. Sıkıştırma öncesinde beklemenin zemin iyileşmesine etkilerini araştırmak için, karışımlar 20 saat boyunca plastik kapta bekletilerek ve bekletilmeden Proktor testine tabi tutulmuştur. Proktor deneyleri ASTM D558 (2020)'ye göre yürütülmüştür. 105 mm çapında ve 115 mm yüksekliğinde bir Proktor kalıbı kullanılmıştır. Zemin numunesini farklı nem içeriklerinde sıkıştırmak için 2,5 kg'lık bir tokmak, 3 tabakanın her birine 25 kez serbestçe düşürülmüştür.

Tablo 2. LC3 ve nano-$CaCO_3$ kullanımının etkisini araştırmak amacıyla hazırlanan karışımlar.

Karışım No	İyileştirici Karışımların İsmi	Çimento	Ek Malzeme-I	Ek Malzeme-II	Ek Malzeme-III	Alçı
1	PC	Portland **(%100)**	-	-	-	-
2	LC3	Portland **(%53)**	Metakaolin **(%30)**	Kireçtaşı tozu (Kalsit) **(%15)**	-	Normal alçı **(%2)**
3	LC3-Nano	Portland **(%53)**	Metakaolin **(%30)**	Kireçtaşı tozu (Kalsit) **(%14.25)**	Nano Kireçtaşı tozu (Nano Kalsit) **(%0.75)**	Normal alçı **(%2)**

Tablo 3. Çalışma kapsamında hazırlanan karışımlarda kullanılan malzeme miktarları.

Karışım	Kaolin	Bentonit	Portland Çimentosu	Alçı	Metakaolin	Kalsit ($CaCO_3$)	Nano-$CaCO_3$	Toplam
%90 Kaolin+%10 Bentonit	%90	%10	-	-	-	-	-	%100
PÇ-%5	%85.5	%9.5	%5	-	-	-	-	%100
PÇ-%10	%81.0	%9.0	%10	-	-	-	-	%100
PÇ-%15	%76.5	%8.5	%15	-	-	-	-	%100
LC3-%5	%85.5	%9.5	%2.65	%0.1	%1.5	%7.5	-	%100
LC3-%10	%81.0	%9.0	%5.3	%0.2	%3	%1.5	-	%100

LC3-%15	%76.5	%8.5	%7.95	%0.3	%4.5	%2.25	-	%100
LC3-Nano-%5	%85.5	%9.5	%2.65	%0.1	%1.5	%7.125	%0.0375	%100
LC3-Nano-%10	%81.0	%9.0	%5.3	%0.2	%3	%1.425	%0.0750	%100
LC3-Nano-%15	%76.5	%8.5	%7.95	%0.3	%4.5	%2.138	%0.1125	%100

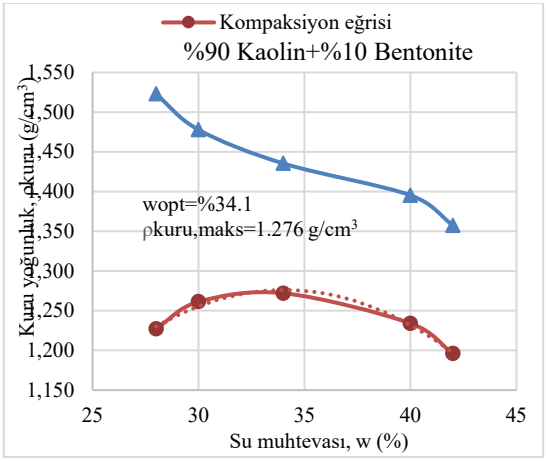
3. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE BULGULAR

Şekil 1- 4, su ile karıştırılmanın ardından bekletilmeden proktor deneyi gerçekleştirilen karışımların sıfır hava boşluğu eğrileri ile proktor testi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5-8, su ile karıştırılarak 20 saat kürlenmenin ardından proktor deneyine tabi tutulan karışımların sıfır hava boşluğu eğrileri ile proktor testi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 9 ve Şekil 10, her bir numune için maksimum yoğunluk ve optimum su içeriğini göstererek Proktor sıkıştırma testi sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Şekil 9'dan da görüldüğü üzere, kürleme olmadığı durumda stabilize edilmemiş zemine (%90 Kaolin+%10 Bentonit) stabilizasyon karışımlarının eklenmesiyle maksimum kuru yoğunluk değerleri hafifçe artmıştır. Bu davranış esas olarak kaolin ve bentonit kilinin doğasından gelen düşük sıkışma ve hidrofilik kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Daha yüksek özgül ağırlığa sahip stabilize edici malzemelerin eklenmesi, daha yüksek maksimum kuru yoğunlukla sonuçlanmıştır (Abdelbaset vd., 2024). PC karışımları tanecikler arası boşlukları diğer karışımlara göre daha etkili bir şekilde doldurmuştur. Benzer bir çalışmada (Marangu vd., 2025), LC3 ve PC stabilizasyon karışımları zemine (zeminin kuru ağırlığına bağlı olarak) %1, %1,5 ve %2 oranlarında ayrı ayrı karıştırılmıştır. Araştırmacılar, farklı çimento dozajları eklendiğinde zeminin maksimum kuru yoğunluğunun arttığını, optimum su içeriğinin ise azaldığını bildirmişlerdir.

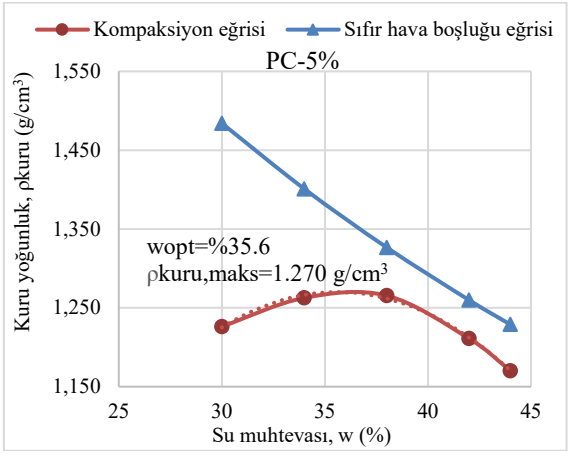
Nano-kalsit içeren karışımlarda, PC ve LC3 içeren karışımlara kıyasla daha düşük bir maksimum kuru yoğunluk değeri gözlemlenmiştir, optimum su içeriği değerleri ise değişkenlik göstermiştir. Nano-kalsit içeren stabilizasyon karışımının su talebinde artışa yol açtığı görülmüştür. Bunun, nanomalzemelerin mükemmel su tutma özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nanomalzemelerin mevcut suyu emmesi sonucunda zemin matrisindeki su miktarı azalmaktadır (Yazıcı ve Unsever, 2024).

Şekil 9'da görüldüğü gibi 20 saat kürlemenin ardından stabilize edilmemiş zemine stabilizasyon karışımlarının eklenmesiyle maksimum kuru yoğunluk değerleri azalmıştır. Hidrasyon, zemin-çimento karışımına su eklendiği anda başlar ve çimentolu bileşikler üretilir. Sıkıştırma geciktiğinde, hidratasyon reaksiyonları ilerleyerek kalsiyum hidroksit açığa çıkarmaya devam eder. Bu süreçte gerçekleşen katyon değişimi, parçacıkların topaklanmasına, kümelenmesine ve dolayısıyla biraz daha iri hale gelmesine neden olur. (Di Sante vd., 2015). Sıkıştırma gecikmesi olduğu durumda, maksimum kuru yoğunluk değerlerindeki azalma, katyon değişiminden ve hidratasyon ürünlerinin oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir (Godarzi vd., 2016). Portland çimentosundaki kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikleri, su varlığında reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat, kalsiyum alüminat hidrat ve fazla kalsiyum hidroksit oluşturur. Hidratasyon ürünlerinin oluşumu, topaklanmış kili yapıştırıcı gibi birbirine yapıştırır ve zemin parçacıkları arasındaki bağ kuvvetini artırarak sıkıştırma çabasına direnç gösterir (Latifi vd., 2018). Sonuç olarak, daha iri parçacıklar ve daha güçlü hidratasyon bağlarının oluşumu,

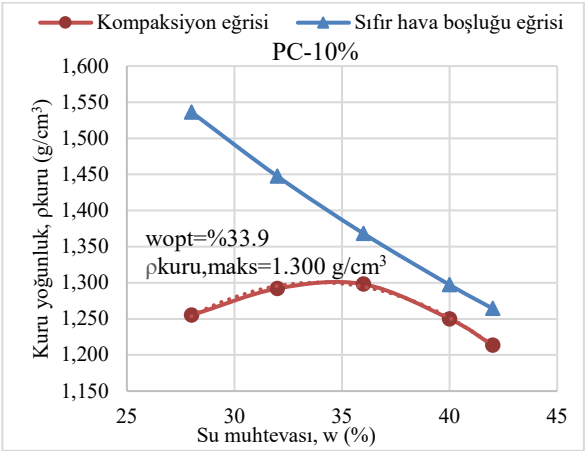
daha fazla sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duyar. Sıkıştırma enerjisinin büyük bir kısmı kil parçacıkları arasındaki bu güçlü bağları kırmak için kullanılır, bu yüzden karışım yeterince sıkışamaz. Bu durum zemin matrisinde daha büyük boşlukların kalmasına ve dolayısıyla daha düşük bir maksimum kuru yoğunluk değerine yol açar (Raja ve Thayagaraj, 2020). İyileştirici karışımların eklenme oranlarının %5'ten %15'e artışı ile proktor değerleri azalmıştır. Bu azaltıcı etkinin, çimento içeriğinin ve geçen sürenin artmasıyla arttığı Nazari vd. (2021) tarafından da beyan edilmiştir.



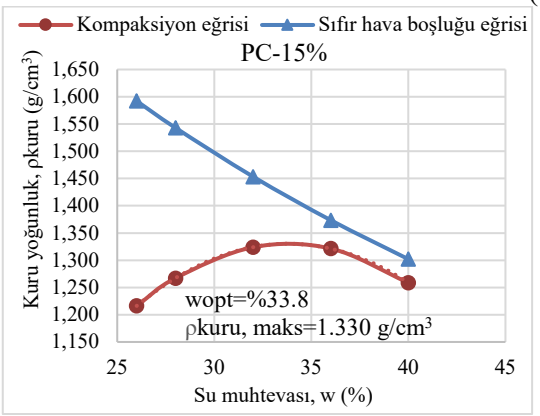
Şekil 1. Kür uygulanmayan %90 Kaolin+%10 Bentonit karışımına ait kompaksiyon ve sıfır hava boşluğu eğrisi.



(a)

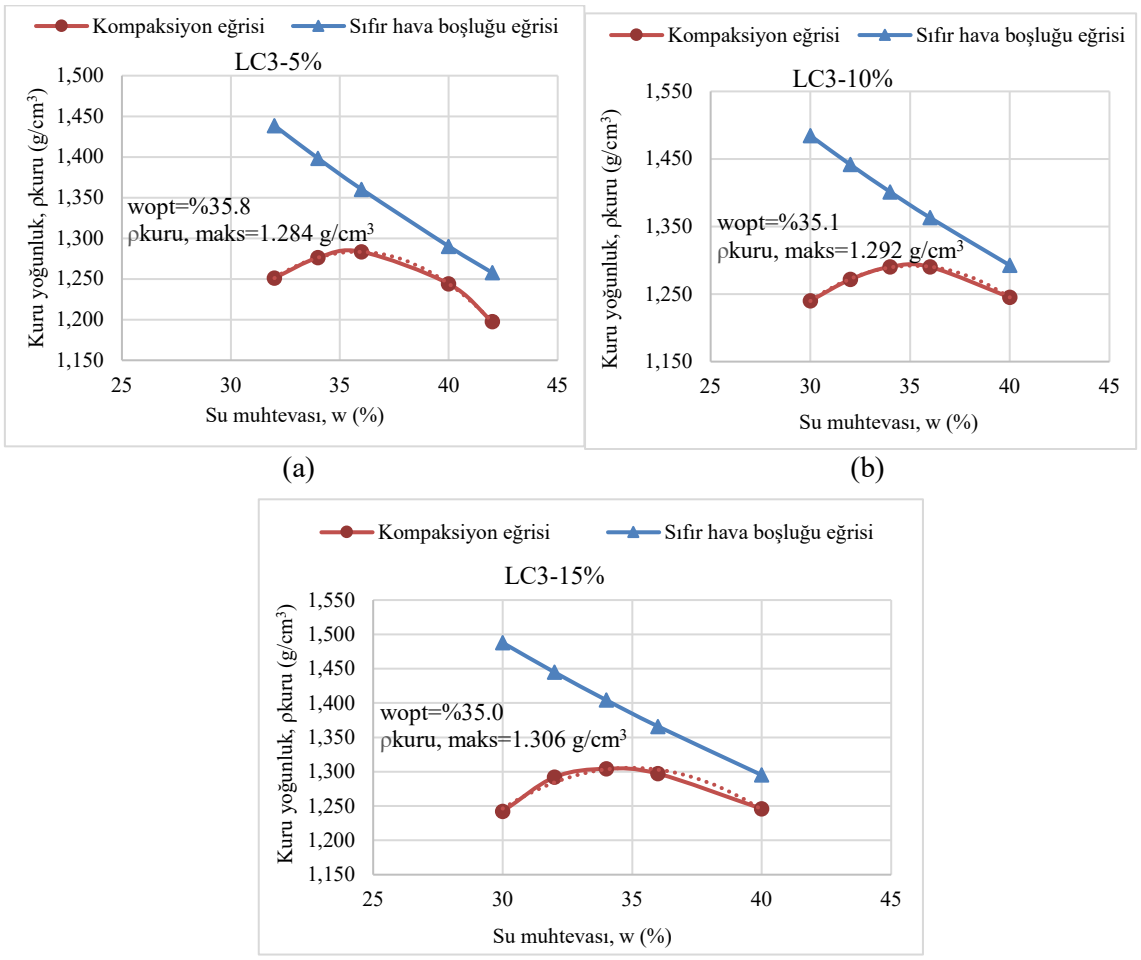


(b)

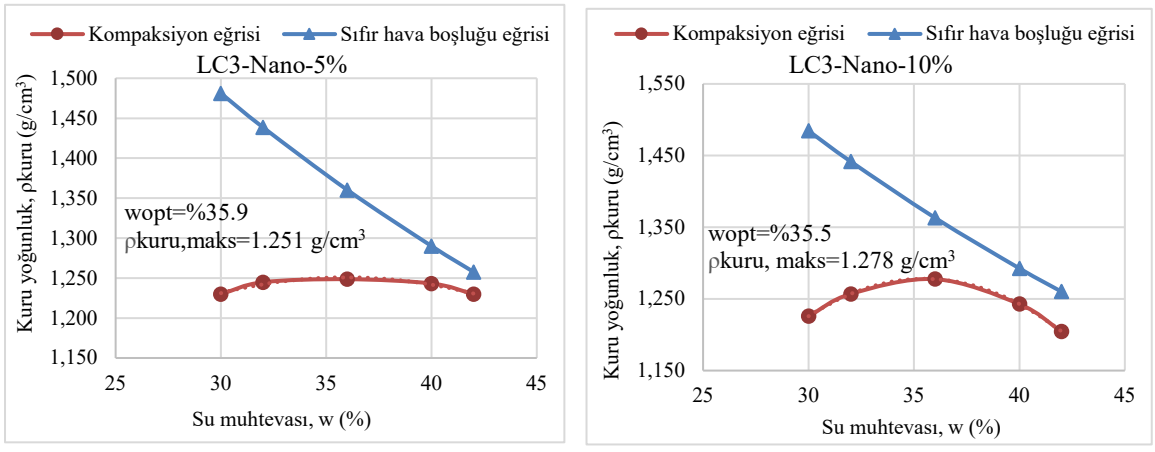


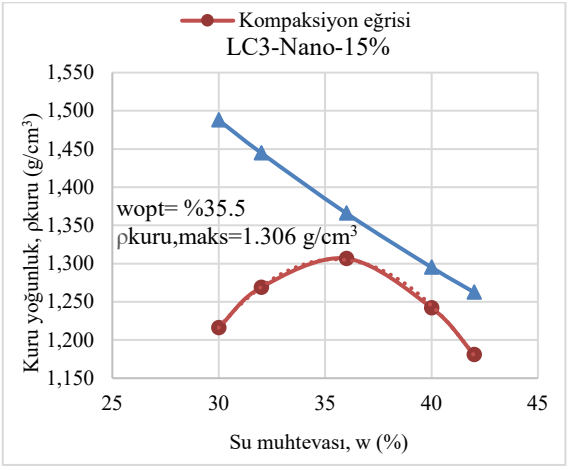
(c)

Şekil 2. a) Kür uygulanmayan PC-5%, b) PC-10%, c) PC-15% karışımlarına ait kompaksiyon ve sıfır hava boşluğu eğrisi



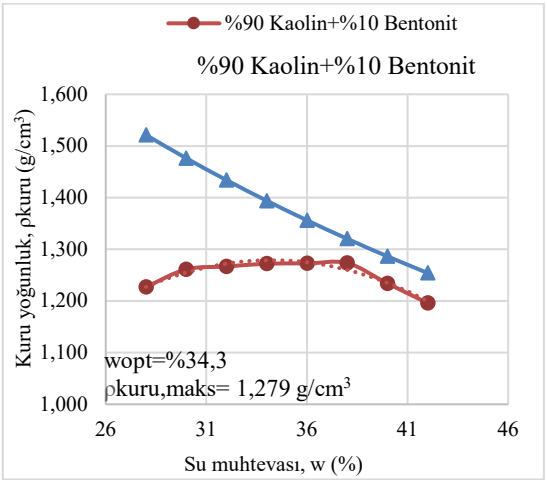
Şekil 3. a) Kür uygulanmayan LC3-5%, b) LC3-10%, c) LC3-15% karışımlarına ait kompaksiyon ve sıfır hava boşluğu eğrisi.



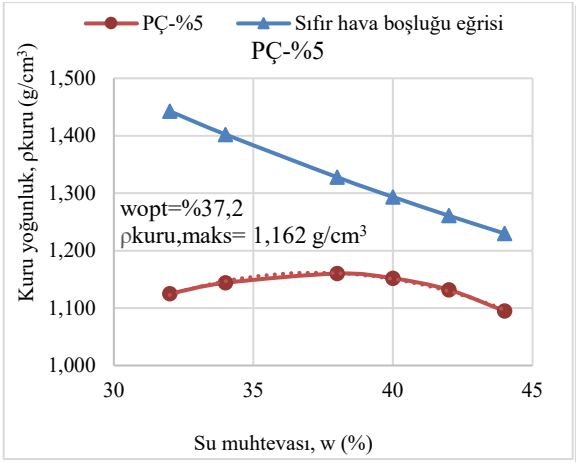


(c)

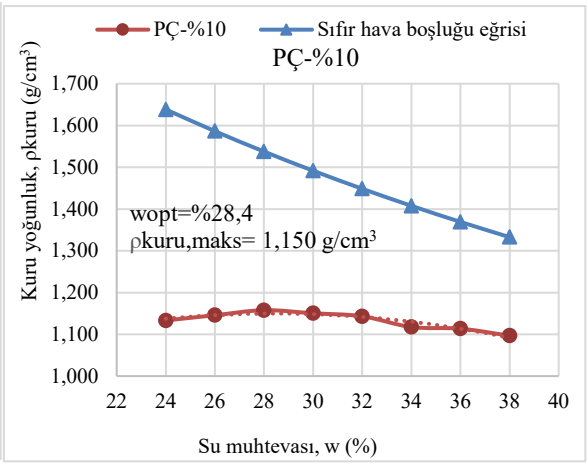
Şekil 4. a) Kür uygulanmayan LC3-Nano-5%, b) LC3-Nano-10%, c) LC3-Nano-15% karışımlarına ait kompaksiyon ve sıfır hava boşluğu eğrisi



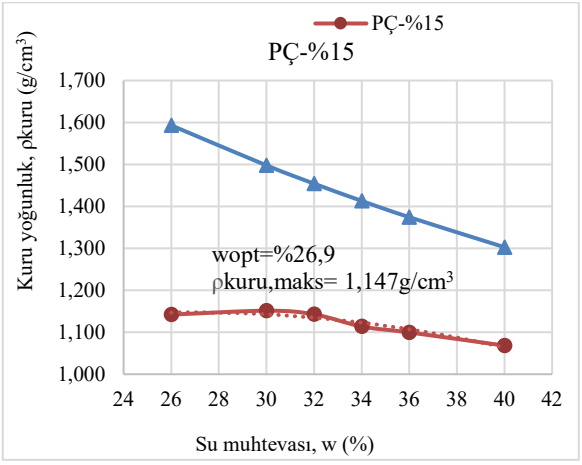
Şekil 5. 20 saat kür süreli %90 Kaolin+%10 Bentonit karışıma ait kompaksiyon ve sıfır hava boşluğu eğrisi.



(a)

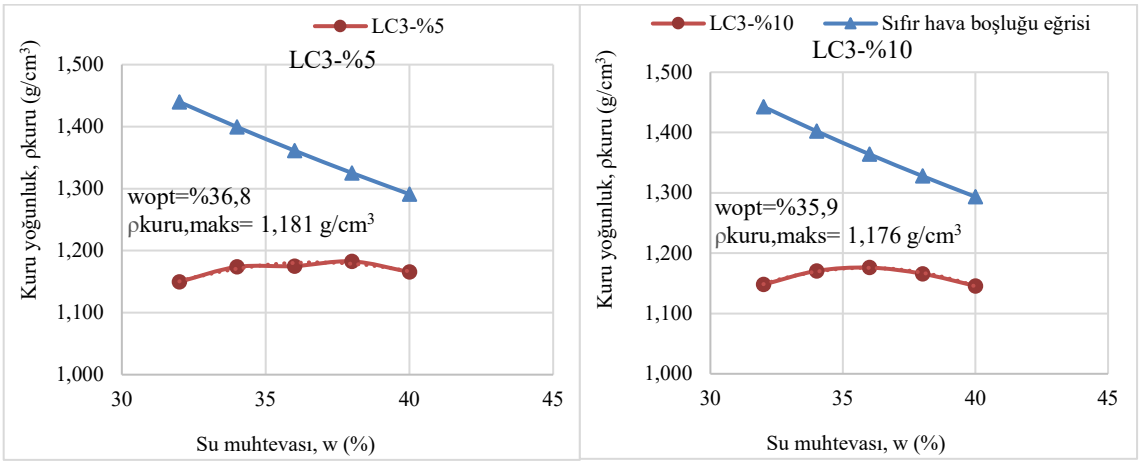


(b)

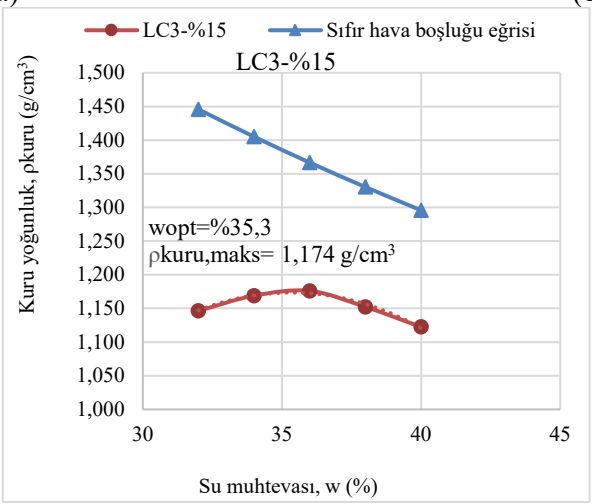


(c)

Şekil 6. a) 20 saat kür süreli PÇ-%5, b)PÇ-%10, c)PÇ-%15 karışımlarına ait kompaksiyon ve sıfır hava boşluğu eğrisi.

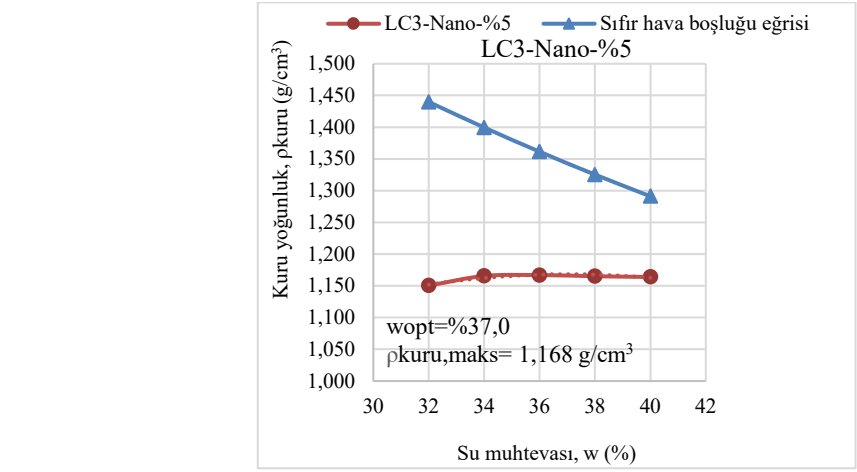


(a) (b)

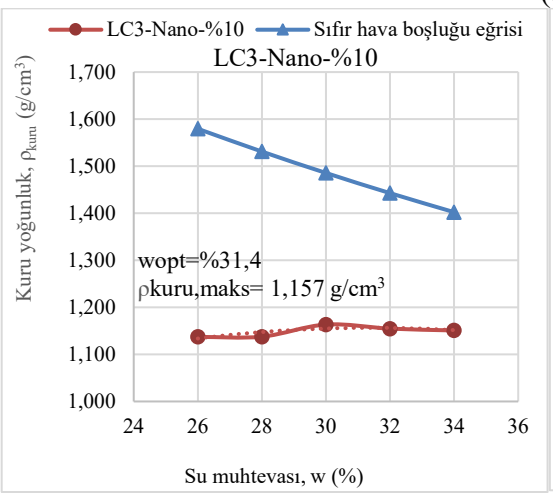


(c)

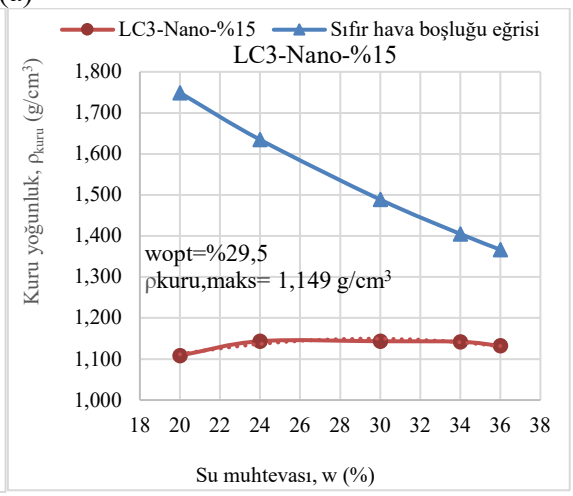
Şekil 7. a) 20 saat kür süreli LC3-%5, b)LC3-%10, c)LC3-%15 karışımlarına ait kompaksiyon ve sıfır hava boşluğu eğrisi.



(a)

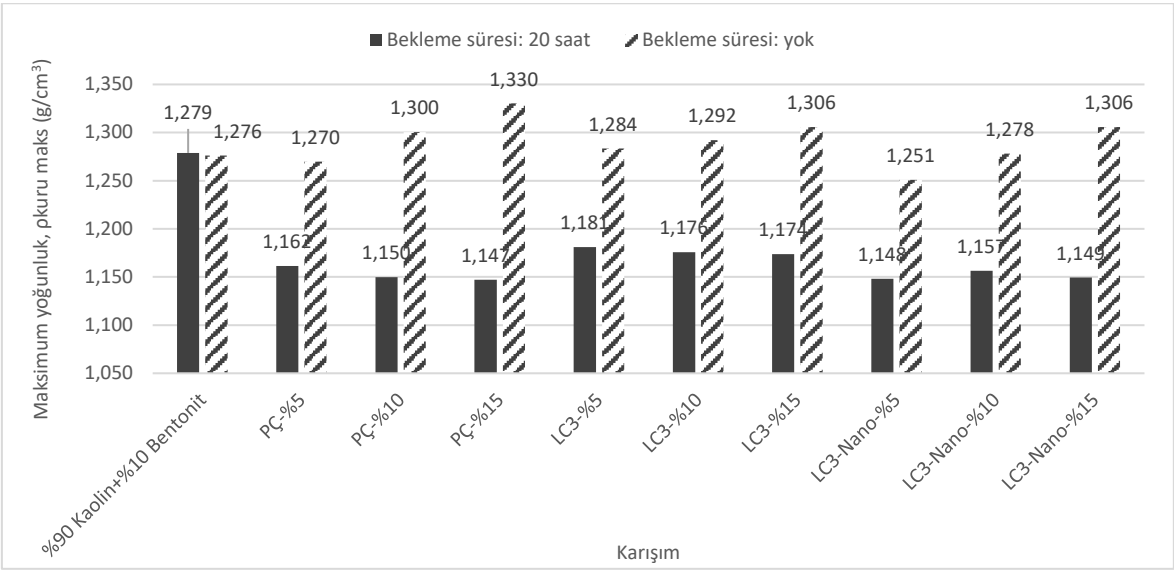


(b)

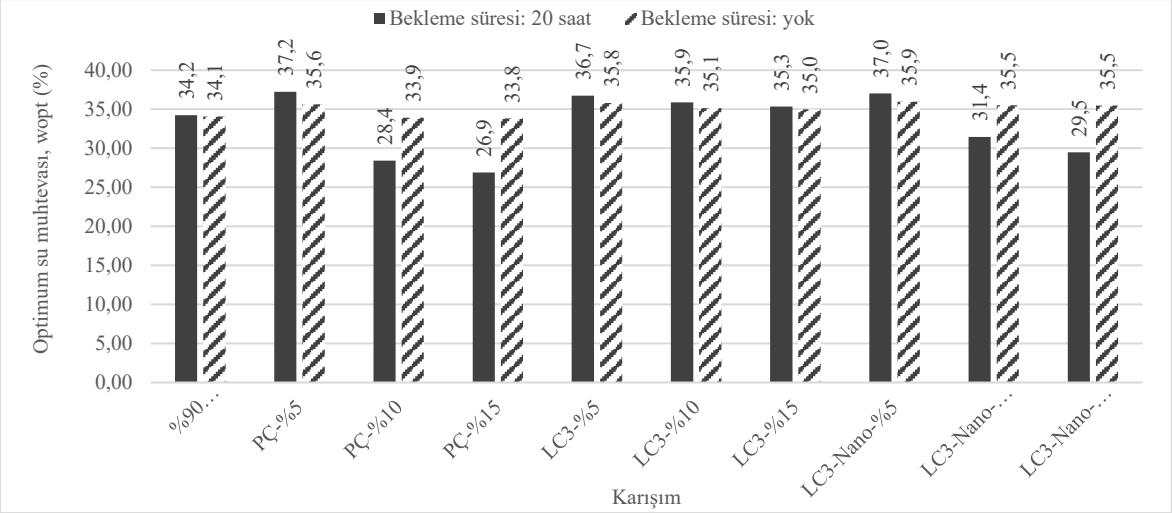


(c)

Şekil 8. a) 20 saat kür süreli LC3-Nano-%5, b) LC3-Nano-%10, c) LC3-Nano-%15 karışımlarına ait kompaksiyon ve sıfır hava boşluğu eğrisi.



Şekil 9. Karışımların maksimum yoğunluk değerleri.



Şekil 10. Karışımların optimum su muhtevası değerleri.

4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, %90 Kaolin+%10 Bentonit kontrol karışımına %5, %10 ve %15 oranlarında PC, LC3 ve nano-$CaCO_3$ içeren LC3 iyileştirici karışımlarının eklenmesi ile hazırlanan numuneler üzerinde kürlemeden ve 20 saat kürlenerek gerçekleştirilen proktor deneyleri aracılığı ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kürleme olmadığı durumda, stabilize edilmemiş zemine stabilizasyon karışımlarının eklenmesi ve eklenme oranının artışı ile maksimum kuru yoğunluk değerleri hafifçe artmıştır.
- Kür süresi 20 saat olduğu durumda, %90 Kaolin+%10 Bentonit karışımına iyileştirici karışımların eklenmesi ve eklenme oranlarının artışı ile maksimum kuru yoğunluk değerleri azalmıştır.
- LC3 içeren iyileştirici karışımlarda (LC3-%5, LC3-%10, LC3-%15) optimum su muhtevası değerleri genellikle kür süresinden etkilenmemiştir. Portland çimentosu (PÇ-%10 ve PÇ-%15) ve Nano-$CaCO_3$ ikameli LC3 içeren iyileştirici (LC3-Nano-%10 ve LC3-Nano-%15) karışımlarında kür süresinin artışıyla optimum su muhtevası değerlerinin belirgin şekilde arttığı tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, FGA-2025-2185 proje kodlu ve Kalsine Kil ve Nano$CaCO_3$ İçeren Çimentolu Sürdürülebilir Bağlayıcının Zemin Stabilizasyonundaki Potansiyeli' başlıklı bu çalışmaya verdikleri desteklerden dolayı Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Abdelbaset, A. M., Katunský, D., Zeleňáková, M. ve El-Feky, M. H. (2024), "Mechanical properties stabilization of low plasticity Kaolin soil using fly ash and hydrated lime", Case Studies in Construction Materials, Vol 21, e03662.

ACI (2009), "Report on Soil Cement", Report No. ACI 230.1R-09, ACI Committee 230, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

American Society for Testing and Materials (AASHTO) (2011), "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", ASTM International.

ASTM International (2019), "Standard test methods for moisture-density (unit weight) relations of soil-cement mixtures (ASTM D558/D558M-19)", ASTM International.

Di Sante, M., Fratalocchi, E., Mazzieri, F. ve Brianzoni, V. (2015), "Influence of delayed compaction on the compressibility and hydraulic conductivity of soil–lime mixtures", Engineering Geology, Vol 185, 131-138.

Goodarzi, A. R., Akbari, H. R. ve Salimi, M. J. A. C. S. (2016), "Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume", Applied Clay Science, Vol 132, 675-684.

Gonthier, J. N., Wilson, W., Georget, F., & Scrivener, K. L. (2021). "Advanced Characterization of Chloride Binding in OPC and LC3 pastes". Delf.

Kampala, A., Jitsangiam, P., Pimraksa, K. ve Chindaprasirt, P. J. R. M. (2021), "An investigation of sulfate effects on compaction characteristics and strength development of cement-treated sulfate bearing clay subgrade", Road Materials and Pavement Design, Vol 22(10), 2396-2409.

Latifi, N., Vahedifard, F., Ghazanfari, E., Horpibulsuk, S., Marto, A. ve Williams, J. (2018), "Sustainable improvement of clays using low-carbon nontraditional additive", International Journal of Geomechanics, Vol 18(3), 04017162.

Marangu, J. M., Mugambi, L. M., Ratumo, J. T. ve Valentini, L. (2025), "Preliminary Assessment of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) in Soil Stabilization for Geotechnical Applications", RILEM Bookseries, Vol 55, 179-188.

Nazari, Z., Tabarsa, A. ve Latifi, N. (2021), "Effect of compaction delay on the strength and consolidation properties of cement-stabilized subgrade soil", Transportation Geotechnics, Vol 27, 100495.

PCA (2006), "Guide to Cement-Treated Base (CTB)", Engineering Bulletin No. EB236, Portland Cement Association, Skokie, IL.

PCA (2001), "Soil-Cement Inspector's Manual", Publication No. PA050.03, Portland Cement Association, Skokie, IL.

Raja, P. S. K. ve Thayagaraj, T. (2020), "Effect of compaction time delay on compaction and strength behavior of lime-treated expansive soil contacted with sulfate", Innovative Infrastructure Solutions, Vol 5(1), 14.

Sullivan, W. G. ve Howard, I. L. (2021), "Time delay effects on compactability of soil-cement materials during proctor testing", Transportation Research Record, Vol 2675(8), 481-493.

Venkatarama Reddy, B. V. ve Prasanna Kumar, P. (2011), "Cement stabilised rammed earth. Part A: compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilised soils", Materials and structures, Vol 44(3), 681-693.

West, G. (1959), "A laboratory investigation into the effect of elapsed time after mixing on the compaction and strength of soil-cement", Geotechnique, Vol 9(1), 22-28.

Yazıcı, B. ve Unsever, Y. S. (2018), Investigation of Cement and Fly Ash on the Improvement of Fine Sand Soil. Applied Sciences 2024, Vol. 14, Page 2908, 14(7), 2908.