

DERİN ZEMİN KARIŞTIRMA KOLONLARININ YOL DOLGUSU ALTINDAKİ DÜŞEY DEPLASMAN DEĞERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DEEP SOIL MIXING COLUMNS ON THE SETTLEMENT VALUES UNDER A ROAD EMBANKMENT

Esmâ ALAN¹, Müge BALKAYA²

ÖZET

Derin zemin karıştırma (DZK) yönteminde zayıf dayanımlı zeminler bağlayıcı özellik gösteren malzemeler ile mekanik olarak karıştırılarak mühendislik özellikleri (dayanım, geçirgenlik, sıkışabilirlik vs.) iyileştirilir. Bu çalışma kapsamında yumuşak kil zemin üzerine inşa edilecek yol dolgusunun düşey deplasman değeri incelenmiştir. Analizler PLAXIS 3D sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır. Başlangıç olarak zeminde herhangi bir iyileştirme yapmadan sistem analiz edilmiş ve yol dolgusu altında oluşan düşey deplasman değeri hesaplanmıştır. İlk aşamada iyileştirme alan oranı belirli değerde sabit tutularak, DZK kolon çapı ve kolonların merkezden merkeze mesafeleri değiştirilerek farklı tasarımlar yapılmıştır. Bu durumda yol dolgusu temel zemini içinde iyileşme derecesi sabit tutularak kolon çapının düşey deplasman değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada kolon çapı sabit tutularak kolonların merkezden merkeze mesafeleri değiştirilmiştir. Bu durumda farklı iyileştirme alan oranlarına göre tasarımlar yapılmıştır. Bu tasarımın amacı kolon çapı sabit iken kolon mesafesinin düşey deplasman değeri üzerindeki etkisini incelemektir. Analizi yapılan her bir durum için yol dolgusu tabanının merkezindeki deplasman değeri incelenmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde iyileştirme alan oranı sabit iken çap değişiminin yumuşak kil zemindeki iyileşmeyi etkilediği ve genellikle çapın artması ile oturma değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca kolon çapı sabit iken kolon aralığının değişimine bağlı olarak, iyileştirme alan oranı arttıkça yumuşak kilin iyileşme derecesi artmış ve düşey deplasman değeri azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: zemin iyileştirme, yol dolgusu, oturma, derin zemin karıştırma, Plaxis 3D

ABSTRACT

In deep soil mixing (DSM) method, low strength soils are mechanically mixed with binder materials to improve their engineering properties (strength, permeability, compressibility, etc.). In this study, the vertical displacement of a road embankment to be constructed on soft clay soil was analyzed. The analyses were performed with PLAXIS 3D finite element program. Initially, the system was analyzed without any improvement in the soil and the vertical displacement values under the road embankment was calculated. At first, different designs were made by keeping the improvement area ratio constant at a certain value, and changing the diameter of the DSM columns and the center-to-center distances of the columns. In this case, the effect of the column diameter on the vertical displacement value was analyzed by keeping the degree of improvement in the road embankment foundation soil constant. In the second stage, the column diameter was kept constant and the center-to-center distances of the columns were changed. In this case, designs were made according to different improvement area ratios. The purpose of this design is to examine the effect of column distance on the vertical displacement values while the column diameter is constant. For each case

¹ Yük. Müh., İstanbul Teknik Üniversitesi, esmabayindir12@gmail.com

² Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, balkayamu@itu.edu.tr

analyzed, the displacement value at the center of the road embankment base was examined. As a result of the findings, it was observed that the change in diameter affected the improvement of the soft clay while the improvement area ratio was constant, and the settlement value generally decreased with the increase in diameter. In addition, when the column diameter was constant, the degree of improvement of the soft clay increased, and the vertical displacement value decreased as the improvement area ratio increased due to the change in the column spacing.

Keywords: soil improvement, road embankment, settlement, deep soil mixing, Plaxis 3D

1. GİRİŞ

Yapı temel zemininde, belirli saha veya çevresel koşullara göre derin temel sisteminden daha ekonomik bir yöntem olarak, temel zemini içerisindeki birimler iyileştirilebilir (Murty, 2002). Derin zemin karıştırma (DZK) yöntemi, yapı temel zemini olarak kullanılacak doğal zayıf zeminin veya dolgunun çimento ya da çimento gibi bağlayıcı özellik gösteren malzemeler ile harmanlanarak arazide iyileştirilmesidir. DZK yöntemi ile iyileştirilmiş zeminin bazı mühendislik özellikleri (dayanım, geçirgenlik, sıkışabilirlik vs.) doğal zemine kıyasla daha ideal yapıdadır. DZK yöntemi bağlayıcı malzeme türüne (çimento, kireç, uçucu kül gibi) veya karıştırma yöntemine (kuru/ıslak, döner/jet tabanlı, burğu tabanlı veya bıçak tabanlı) göre sınıflandırılır (UNI EN 14679, 2005). Çok sert veya sıkı olmayan ve içinde kaya parçaları gibi engellerin olmadığı her türlü zemine uygulanabilirler (Bruce vd., 2013).

Chai vd. (2015) DZK kolonları ile ıslah edilmiş yumuşak kil üzerine inşa edilen dolgunun davranışını incelemek için sistemi hem 3 boyutlu (3D) hem de iki boyutlu (2D) sonlu elemanlar yöntemi ile modellemiş ve arasındaki farkı kütlenin düşey deformasyonu, yumuşak kil zeminde oluşan aşırı boşluk suyu basıncı, kolonun eğilme momenti ve yanal deplasman değerleri açısından karşılaştırmışlardır. Chai vd. (2017) DZK yöntemi ile oluşturulan kolonların yük altında eğilme mekanizmasını incelemiştir. Dolgu yükü altındaki yumuşak kil zeminde imal edilmiş kolonlar Plaxis 3D sonlu elemanlar programı ile modellenmiştir. Daha sonra dolgu yüksekliği, yumuşak kil birim kalınlığı, iyileştirme alan oranı, kolon çapı, yumuşak kil tabakasının drenajsız kayma mukavemeti (s_u) ve rijitlik indeksi (I_r) değerleri değiştirilerek dolgu altındaki kolonların eğilme moment değerleri incelenmiştir. Phutthananon vd. (2020) yaptıkları çalışmada dolgu tabakası altındaki yumuşak kil zeminde farklı çap, alan oranı ve kolon boyu kullanarak tasarımlar yapmış ve sistemde oluşan düşey deplasman değerini incelemişlerdir. Jamsawang vd. (2016) otoyol dolgusu altındaki yumuşak kil zeminde DZK kolon çapını, alan oranını ve kolon boyunu değiştirerek analizler yapmış ve oturma değeri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çınar vd. (2018) yaptıkları çalışmada dolgu tabakası altındaki yumuşak kil zeminde, 80cm çapındaki kolonlar için farklı alan oranlarına göre tasarladıkları sistem analizlerinde oluşan düşey deplasman ve kolonlara gelen yükler açısından değerlendirme yapmıştır. Bu çalışmanın amacı yol dolgusu altında DZK kolon tasarımlarında düşey deformasyon üzerinde alan oranı sabit tutularak kolon çapının değişimi ve kolon çapı sabit tutularak alan oranının değişiminin etkisini incelemektir.

Bu çalışma kapsamında, DZK kolonları olmadan yumuşak kil zemin üzerine yapılan yol dolgusu altında oluşan düşey deplasman değeri sayısal analizler ile hesaplanmıştır. Daha sonra iyileştirme alan oranı (a_r) %40'ta sabit tutulurken $D=60\text{cm}$ için $s=0.84\text{m}$, $D=80\text{cm}$ için $s=1.12\text{m}$, $D=100\text{cm}$ için $s=1.40\text{m}$ ve $D=120\text{cm}$ için $s=1.68\text{m}$ durumlarına göre analizler yapılmış ve düşey deplasman değeri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci durumda $D=80\text{cm}$ değerinde sabit tutularak $a_r=\%15$, $a_r=\%30$, $a_r=\%40$, $a_r=\%45$ ve $a_r=\%78.5$ değerleri için analizler yapılmış ve oturma değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

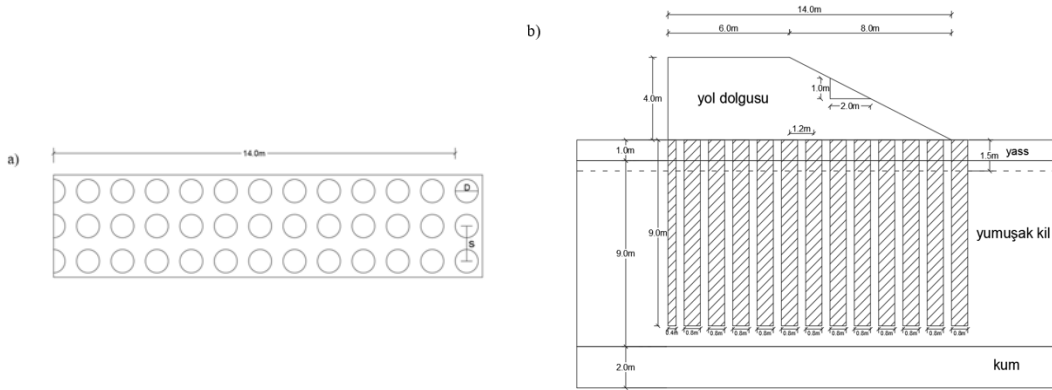
2. METERYAL VE YÖNTEM

PLAXIS dünya çapında geoteknik mühendisliği tasarımlarında kullanılan bir sonlu elemanlar programıdır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan DZK kolonlarının birbirleriyle ve kolonlar arasındaki zeminle etkileşimini ve sonuçlar üzerindeki etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için 3 boyutlu (3D) PLAXIS Sonlu Elemanlar programı kullanılmıştır. Çalışmada kum tabakası, dolgu tabakası ve DZK kolonları Mohr-Coulomb (MC) malzeme modeli ile modellenmiştir. Mohr-Coulomb (MC) modeli iyi bilinen lineer elastik mükemmel plastik bir modeldir. MC malzeme modeli 5 ana girdi parametresi gerektirir: Young modülü (E), poisson oranı (ν), kohezyon (c), kayma mukavemeti açısı (ϕ) ve genleşme açısı (ψ) (Plaxis, 2021). Yüzey tabakası ve yumuşak kil birim ise Modified Cam Clay (MCC) Malzeme Modeli ile modellenmiştir. MCC model zemini logaritmik sıkışma ile sürtünmeli olarak dikkate alır (Atkinson, 2007). MCC malzeme modelinde 6 temel girdi parametresi şu şekildedir: CC

şişme indeksi (κ), CC sıkışma indeksi (λ), kritik durum çizgisinin eğimi (M), başlangıç boşluk oranı (e_{init}), yanal toprak basıncı katsayısını (K_{0nc}), Poisson oranı (ν_{ur}).

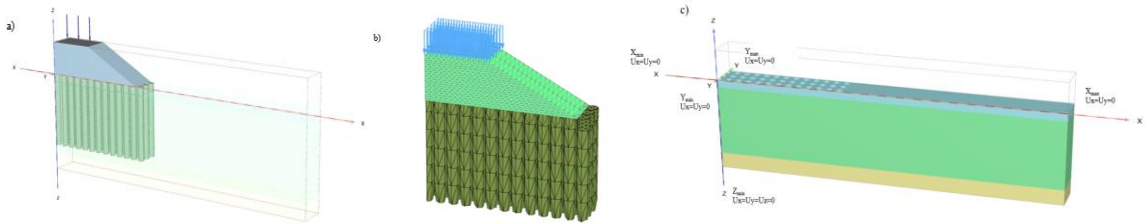
2.1. Sayısal analiz modelinin tanıtılması

Zemin üzerine yapılacak yol dolgusunun geometrisi Karayolu Tasarım El Kitabı (KTEK, 2005)'nda verildiği gibi belirlenmiştir. Bu durumda iki şeritli yol için şerit genişliği 3.5m ve banket genişliği 2.5m olarak alındığında toplam yol genişliği 12.0m'dir. Dolgu yüksekliği 4.0m ve şev eğimi 1 Düşey 2 Yatay (1D/2Y) olarak belirlenmiştir. Dolgu tabakasının her bir inşaat kademesi KGM (2013)'de verildiği gibi 20.0cm olarak belirlenmiştir. Sistemin simetrik olmasından dolayı analiz süresini kısaltmak için dolgu tabakasının yarısı modellenmiştir. Çalışmada kullanılan FE modeli Şekil 2'de verilmiştir. Dolgu tabakası ve DZK kolonları MC malzeme modeli ile, yumuşak kil tabakası ise MCC malzeme modeli ile modellenmiş olup malzeme parametreleri Tablo 1'de verilmektedir. Çalışmada yapı kademeleri başlangıç aşaması (K_0 prosedürü), DZK kolonlarının yapımı, dolgu tabakasının yapılması ve yol yükünün tanımlanması aşamalarından oluşmaktadır. Zayıf zeminlerde stabilizeyi korumak ve deplasmanı azaltmak için dolgu tabakası kademeli olarak yapılmıştır. Her kademe iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada dolgu inşa edilir. İkinci aşamada ise oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının bir miktar sönmülmesi beklenir. RDSO (2020) tarafından yumuşak zeminlerde dolgunun aşamalı inşasına ilişkin kılavuz ilkeler uyarınca, her aşamada en az aşırı boşluk suyu basıncının (PWP) %30 dağılımına izin verilmelidir. Bu durumda bekleme süresi bir önceki aşamada oluşan aşırı boşluk suyu basıncının minimum %30 azalmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Dolgu tabakasının inşası tamamlandıktan sonra trafik yükü 12kPa olarak uygulanmıştır. FE modeli daha sonra %90 konsolidasyon elde edilene kadar analiz edilmiştir.



Şekil 1. Sayısal analiz hesap modeli a) DZK kolonları yerleşim planı b) en kesit görünümü.

Oluşturulan 3D Plaxis hesap modeli Şekil 2 a'da, DZK kolonları için sonlu elemanlar ağı Şekil 2 b'de ve sonlu elemanlar analiz modeli sınır koşulları Şekil 2 c'de verilmiştir.



Şekil 2. D=80cm, s=1.2m için Plaxis 3D modeli a) hesap modeli b) DZK kolonları sonlu elemanlar ağı c) analiz sınır koşulları.

Tablo 1. Malzeme özellikleri (Fulambarkar vd., 2021).

DERİN ZEMİN KARIŞTIRMA KOLONLARININ YOL
DOLGUSU ALTINDAKİ DÜŞEY DEPLASMAN ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Derinlik (m)	Zemin türü	Model	E (MPa)	ν (-)	κ (-)	λ (-)
0-1.0	Yüzey tabakası	MCC	-	0.3	0.04	0.2
1.0-10.0	Yumuşak kil	MCC	-	0.3	0.048	0.24
10.0-12.0	Sıkı kum	MC	50	0.33	-	-
Dolgu tabakası	-	MC	20	0.3	-	-
DZK kolonu	-	MC	100	0.3	-	-

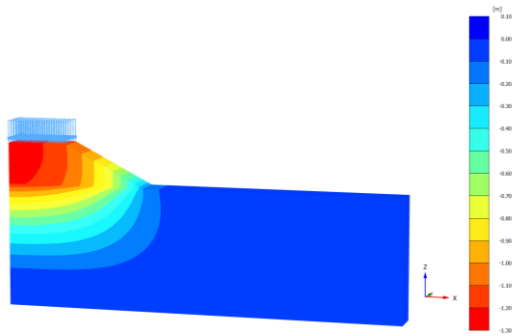
Tablo 1. (Devam) Malzeme özellikleri (Fulambarkar vd., 2021).

Derinlik (m)	Zemin türü	ϕ (°)	c' (kN/m ²)	M (-)	e_0 (-)	γ (kN/m ³)	k (m/s)
0-1.0	Yüzey tabakası	25	1	0.98	1.7	17.0	10^{-10}
1.0-10.0	Yumuşak kil	25	1	0.98	2.0	15.5	10^{-10}
10.0-12.0	Sıkı kum	35	5	-	0.7	19.0	10^{-3}
Dolgu tabakası	-	35	5	-	0.7	19.0	10^{-3}
DZK kolonu	-	-	500	0	1.5	17.0	10^{-10}

E=Young modülü; ν =poisson oranı; κ =CC şişme indeksi; λ =CC sıkışma indeksi; ϕ =kayma mukavemeti açısı; c' =efektif kohezyon; M=kritik durum çizgisi eğimi; e_0 =başlangıç boşluk oranı; γ =birim hacim ağırlık; k=permeabilite

3. BULGULAR

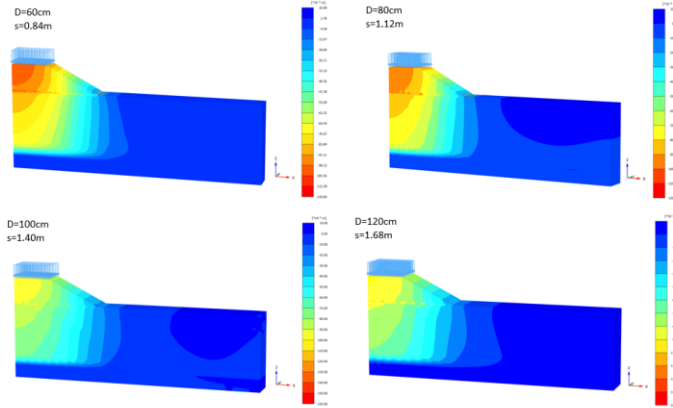
DZK kolonları ile ıslah yapılmadan analizler yapıldığında %90 konsolidasyon sonrası sistemde oluşan düşey deplasman dağılımı Şekil 3'te verilmiştir. Sistemde dolgu tabanının ortasında meydana gelen düşey deplasman değeri yaklaşık 1035mm mertebelerindedir.



Şekil 3. İslahsız durumda meydana gelen düşey deplasman dağılımı

Kolon çapı etkisi

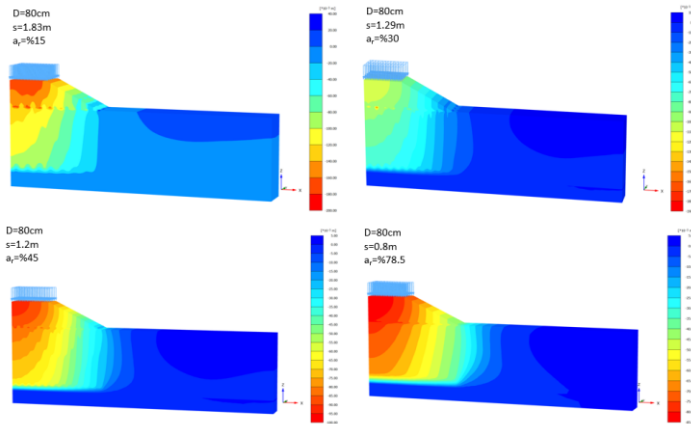
İyileştirme alan oranı %40 değerinde sabit tutularak D=60cm ve s=0.84m, D=80cm ve s=1.12m, D=100cm ve s=1.40m, D=120cm ve s=1.68m aralıklı DZK kolonları ile zemin ıslahı yapıldığında sistemde oluşan düşey deplasman dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. Sistemde dolgu tabanının ortasında meydana gelen düşey deplasman değeri sırasıyla yaklaşık 75mm, 73mm, 71mm, 70mm mertebelerindedir.



Şekil 4. Kolon çapına göre sistemde meydana gelen düşey deplasman dağılımı.

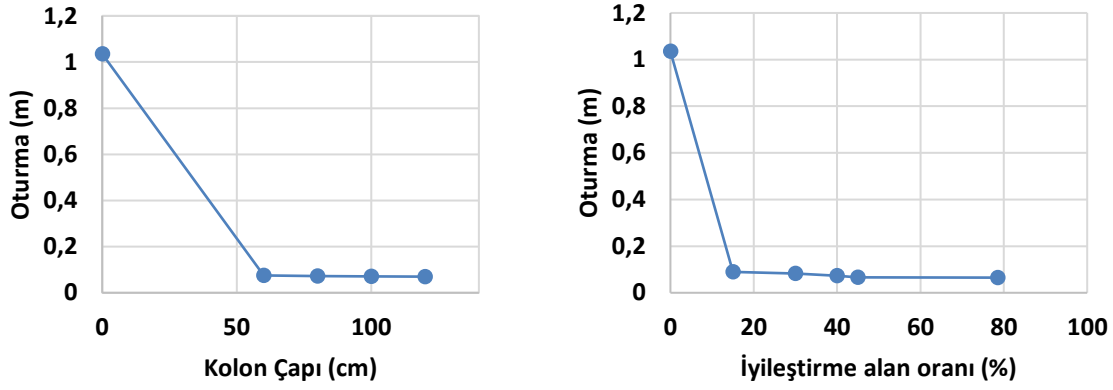
Alan oranı etkisi

80cm çapındaki DZK kolonları %15 iyileştirme alan oranına göre $s=1.83m$, %30 iyileştirme alan oranına göre $s=1.29m$, %45 iyileştirme alan oranına göre $s=1.06m$, %78.5 iyileştirme alan oranına göre $s=0.8m$ olacak şekilde tasarlanmıştır. Analiz sonucunda sistemde oluşan düşey deplasman dağılımı Şekil 5'te verilmiştir. Sistemde dolgu tabanının ortasında meydana gelen düşey deplasman değeri sırasıyla yaklaşık 90mm, 83mm, 66mm, 65mm mertebelerindedir.



Şekil 5. Kolon aralığına göre sistemde meydana gelen düşey deplasman dağılımı.

Her iki durum için de yapılan analiz sonuçları toplu olarak Şekil 6 ve Tablo 2'de verilmektedir. İlk durumda DZK kolonları ile iyileştirme yapılmış (D=60cm, 80cm, 100cm, 120cm) durumlara karşılık gelen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, oturma değerindeki maksimum iyileşmenin D=120cm ve $s=1.68m$ durumunda elde edildiği görülmektedir. İkinci durumda, DZK kolonları ile iyileştirme yapılmış (a_r =%15, %30, %40, %45, %78.5) durumlara karşılık gelen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, a_r değeri %15 arttığında oturma değerinin %91.30 azaldığı, a_r değeri %30 arttığında oturma değerinin %91.98 azaldığı, a_r değeri %40 arttığında oturma değeri %92.95 azaldığı, a_r değeri %45 arttığında oturma değeri %93.62 azaldığı ve a_r değeri %78.5 arttığında oturma değeri %93.72 azaldığı görülmüştür.



Şekil 6. Kolon çapı ve iyileştirme alan oranı için oturma değerleri.

Tablo 2. Kolon çapı ve iyileştirme alan oranı için oturma değerleri.

Kolon çapı (cm)	İyileştirme alan oranı (%)	Oturma (mm)	Oturma değerindeki azalma (%)
0	0	1035	-
60	40	75	92.75
80	15	90	91.30
	30	83	91.98
	40	73	92.95
	45	66	93.62
	78.5	65	93.72
100	40	71	93.14
120	40	70	93.24

4. SONUÇLAR

Analiz sonuçları incelendiğinde, yumuşak kil zeminde iyileştirme alan oranı (a_r) %40'ta sabit tutulurken $D=60\text{cm}$ için $s=0.84\text{m}$, $D=80\text{cm}$ için $s=1.12\text{m}$, $D=100\text{cm}$ için $s=1.40\text{m}$ ve $D=120\text{cm}$ için $s=1.68\text{m}$ durumlarına göre oturma değerindeki azalma değerleri sırasıyla %92.75, %92.95, %93.14 ve %93.24'tür. Görüldüğü üzere kolon çapı artarken düşey deplasman değeri azalmaktadır. Bu çalışmada, maksimum iyileşme düşey deplasman değerindeki azalmanın %93.24 değeri ile $D=120\text{cm}$ kolon kullanılması durumunda meydana gelmesine rağmen $D=80\text{cm}$ kolon çapından sonra çapın artması düşey deplasman üzerinde kayda değer bir etki göstermemiştir. Phutthananon vd. (2020) ve Jamsawang vd. (2016) de yaptıkları çalışmada kolon çapının artmasıyla oturma değerinin azaldığını belirtmişlerdir. İkinci durumda ise $D=80\text{cm}$ 'de sabit tutularak $a_r=\%15$, $a_r=\%30$, $a_r=\%40$, $a_r=\%45$ ve kolonların birbirine teğet olduğu durumda alan oranı yaklaşık %78.5 değeri için analizler yapılmış, a_r değeri %15 artarken oturma değeri %91.30 azalmış, a_r değeri %30 artarken oturma değeri %91.98 azalmış, a_r değeri %40 artarken oturma değeri %92.95 azalmış, a_r değeri %45 artarken oturma değeri %93.62 azalmış ve a_r değeri %78.5 artarken oturma değeri %93.72 azalmıştır. %40 iyileştirme alan oranından sonra kolonların merkezden merkeze mesafeleri her ne kadar azalsa da oturma değeri üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Fulambarkar vd. (2021) ve Jamsawang vd. (2016) de yaptıkları çalışmada iyileştirme alan oranının değişimine bağlı olarak oturma değerinin azaldığını belirtmişlerdir. Tüm analiz sonuçları göz önüne alındığında iyileştirme alan oranı sabit tutulduğunda kolon çapı artarken düşey deplasman değeri azalmaktadır. Maksimum iyileşme her ne kadar $D=120\text{cm}$ çapı için gerçekleşse de $D=80\text{cm}$ kolon çapından sonra çapın artması düşey deplasman üzerinde kayda değer bir etki göstermemiştir. İkinci durumda ise kolon çapı sabit iken alan iyileştirme oranı arttıkça oturma değeri azalmıştır. %40 iyileştirme alan oranından sonra kolonların merkezden merkeze mesafeleri her ne kadar azalsa da oturma değeri üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Bu analizler sabit zemin parametreleri ile yapılmıştır. Zemin parametreleri, çalışma alanı koşulları dikkate alındığında yumuşak kil birim için farklı sonuçlar elde edilebileceği unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

- Atkinson, J. (2007). *The Mechanics of Soils and Foundations*, Second Edition. Abingdon: Taylor&Francis Group.
- Bruce, M. C., Berg, R. R., Collin, J. G., Filz, G. M., Terashi, M., & Yang, D. S. (2013). *Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support*. (No. FHWA-HRT-13-046).
- Chai, J. C., Shrestha, S., Hino, T., Ding, W. Q., Kamo, Y., & Carter, J. (2015). 2D and 3D Analyses of an Embankment on Clay Improved by Soil-Cement Columns. *Computers and Geotechnics* 68, 28-37.
- Chai, J.-c., Shrestha, S., Hino, T., & Uchikoshi, T. (2017). Predicting Bending Failure of CDM Columns Under Embankment Loading. *Computers and Geotechnics* 91, 169-178.
- Çınar, F. T., Bozbey, İ., & Keleşoğlu, M. K. (2018). A Numerical Study to Evaluate the Performance of Deep Mixed Columns. *XVI Danube - European Conference on Geotechnical Engineering* (s. 609-614). Skopje: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin.
- Fulambarkar, S., Bangari, G., Manna, B., & Shahu, J. T. (2021). Numerical Analysis of Embankment Built on Indian Marine Clay Improved with DM Column. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7:95.
- Jamsawang, P., Yoobanpot, N., Thanasisathit, N., Voottipruex, P., & Jongpradist, P. (2016). Three-Dimensional Numerical Analysis of a DCM Column-Supported Highway Embankment. *Computers and Geotechnics* 72, 42-56.
- KGM. (2013). *Karayolları Teknik Şartnamesi*. Ankara.
- KTEK. (2005). *Karayolu Tasarım El Kitabı*. Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Murty, V. N. (2002). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Taylor & Francis Inc.
- Phutthananon, C., Jongpradist, P., Jongpradist, P., Dias, D., & Baroth, J. (2020). Parametric Analysis and Optimization of T-shaped and Conventional Deep Cement Mixing Column-Supported Embankments. *Computers and Geotechnics* 122.
- Plaxis. (2021). *Material Models Manual*. Bentley.
- RDSO. (2020). *Comprehensive Guidelines and Specifications for Railway Formation*. Indian Railways.
- UNI EN 14679. (2005). *Execution of Special Geotechnical Works - Deep Mixing*. European Standard.