



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.12.2022  
Kabul Tarihi : 26.07.2023

Received Date : 01.12.2022  
Accepted Date : 26.07.2023

### DERİN KARIŞTIRMA KOLONLARI İLE DESTEKLİ YOL DOLGUSUNUN ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLEMESİ: PARAMETRİK ÇALIŞMA

#### THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING OF EMBANKMENT SUPPORTED WITH DEEP MIXING COLUMNS: A PARAMETRIC STUDY

Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-4137-9200)  
İlknur BOZBEY<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-1580-8876)

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN, fatmatugce.cinar@iuc.edu.tr

#### ÖZET

Derin karıştırma yöntemi (DSM), doğal zeminin bağlayıcı malzemeler ile karıştırılarak zeminin yerinde iyileştirilmesi işlemidir. Bu çalışma kapsamında literatürde yer alan, Tayland'da derin karıştırma kolonları ile iyileştirilmiş yumuşak bir zemin üzerine inşa edilen dolgu ile ilgili bir makale verileri kullanılarak üç boyutlu (3D) sayısal bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal model öncelikle makalede yer alan veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra bu model üzerinde parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Bu kapsamda farklı alan değiştirme oranlarına sahip modeller oluşturulmuş ve sayısal analizler yapılmıştır. Ayrıca aynı alan değiştirme oranına sahip farklı çaptaki kolonlar kullanılması durumunda farklı dolgu yükü altında oluşan oturmalar, kolonlara ve zemine gelen gerilmeler incelenmiştir. DSM kolonları için kullanılan elastisite modülündeki değişimin iyileştirme üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için de analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda alan değiştirme oranının artması ile dolguda meydana gelen düşey deplasman değerlerinin azaldığı ve aynı alan değiştirme oranına sahip modellerde meydana gelen düşey deplasmanların birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolgu yükünün artması ile kolonlara gelen düşey gerilmelerin büyük ölçüde arttığı görülmüştür. Derin karıştırma kolonlarına ait elastisite modülü değerlerinin artması ile sistemde daha az deplasman oluştuğu görülmüştür. DSM kolonları için atanan modül değerlerinin oturma değerlerini önemli seviyede etkilemesi nedeniyle, bu konu ile ilgili değerlendirmeler ve öneriler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** zemin iyileştirmesi, derin karıştırma yöntemi, alan değiştirme oranı, elastisite modülü

#### ABSTRACT

Deep mixing method (DSM) is the process of improving the soil in situ by mixing natural soil with binder materials. Within the scope of this study, a three-dimensional (3D) numerical model was created using the data of an article in the literature for an embankment constructed on a soft soil improved with deep mixing columns in Thailand. The numerical model created was first verified using the data in the article. Then, a parametric study was carried out on this model. In this context, models with different area replacement ratios were created and analyses were made. For columns of different diameters with the same area replacement ratio, settlements under different embankment loads and stresses on the columns and the soil were investigated. Analyses were also carried out to evaluate the effect of the different elasticity modulus values for DSM columns. It was seen that the vertical displacement values in the system decreased with the increase in the area replacement ratio and the vertical displacements with the same area replacement ratio gave similar results. Vertical stresses on the columns increased significantly with the increase of the embankment load. It was observed that smaller displacement occurred with the increase in the elasticity modulus values of the deep mixing columns. Since the modulus values assigned for DSM columns affected the settlement values, evaluations and recommendations were made.

**Keywords:** soil improvement, deep mixing method, area replacement ratio, modulus of elasticity

ToCite: ÇINAR ÖZKAN, F. T., & BOZBEY, İ., (2023). DERİN KARIŞTIRMA KOLONLARI İLE DESTEKLİ YOL DOLGUSUNUN ÜÇ BOYUTLU NÜMERİK MODELLEMESİ: PARAMETRİK ÇALIŞMA. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 604-613.

## GİRİŞ

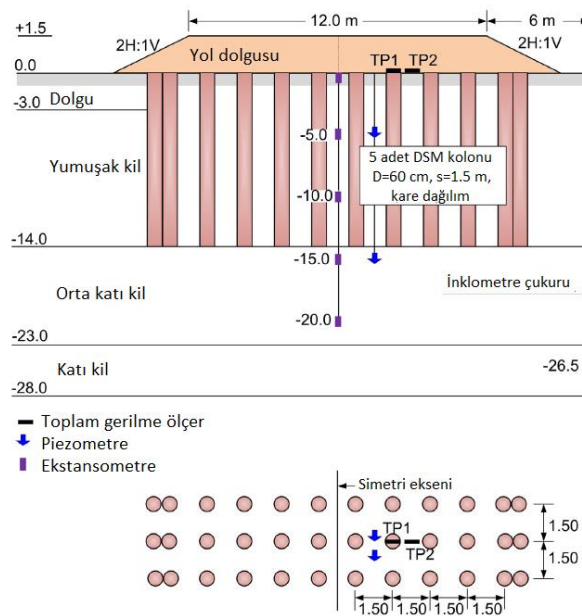
Son yıllarda teknolojinin ilerlemesi ile birçok zemin iyileştirme yöntemi gelişme göstermektedir. Derin karıştırma yöntemi (DSM) de bunlardan biridir. İlk olarak Japonya ve İsveç'te ortaya çıkan bu yöntem, daha sonra Amerika'da ve birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde ülkemizde de derin karıştırma uygulamaları sık olarak kullanılmaktadır. Derin karıştırma yönteminde zemini kazmaya gerek kalmadan çeşitli ekipmanlarla ve bağlayıcılarla zemin yerinde iyileştirilir. Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminler daha yüksek mukavemete, elastisite modülüne ve daha düşük sıkışabilirliğe sahip olmaktadır. Bu özellikler doğal zeminin ve bağlayıcının özelliklerine, kür süresine ve yükleme durumuna bağlı olarak elde edilir (Bruce vd., 2013).

Derin karıştırma kolonları (DSM) yumuşak zeminler üzerinde inşa edilen yapıların deplasman ve stabilite problemlerini bertaraf etmek için kullanılmaktadır. Yumuşak kil zeminlerin hakim olduğu sahalarda inşa edilen mühendislik dolgular nedeniyle oluşacak toplam ve farklı oturmaların azaltılmasında ve taşıma gücünün artırılmasında DSM kolonları sıklıkla kullanılmıştır (Jiang vd., 2014; Chai vd., 2002; Han ve Gabr, 2002; Han vd., 2002). DSM kolonların, Malezya'da demiryolu dolgularında (Arulrajah vd., 2009); Japonya'da karayolu ve demiryolu dolgularında (Pye vd., 2012; Lawson vd., 2005), büyük şehirlerdeki yollarda (Ohdaira vd., 2002); İsveç'te karayolu dolgularında, Polonya'da şehir içi ulaşım yollarında (Topolnicki, 2004) ve ABD'de taşkın setleri veya taşkın duvarlarında (Dahlström, 2013) gibi dünya çapında birçok uygulamada yaygın olarak kullanıldığı vakalar literatürde rapor edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, derin karıştırma kolonlarına ait yapılmış güncel çalışmalardan olan ve çalışmamız kapsamında doğrulama ve ölçüleme analizlerine de örnek teşkil eden ve Jamsawang vd. (2016) tarafından hazırlanmış olan bir makale referans alınmıştır. Bu makale verileri kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemi yazılımı Midas GTS-NX programı ile üç boyutlu (3D) sayısal bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model öncelikle makalede yer alan veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra bu model üzerinde parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Bu kapsamda, kolon çapları ve aralıkları değiştirilerek farklı alan değiştirme oranlarında modeller oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Ayrıca aynı alan değiştirme oranına sahip farklı çaptaki kolonlar kullanılması durumunda farklı dolgu yükü altında oluşan oturmalar, kolonlara ve zemine gelen gerilmeler incelenmiştir. DSM kolonları için kullanılan elastisite modülündeki değişimin iyileştirme üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için de analizler yapılmıştır.

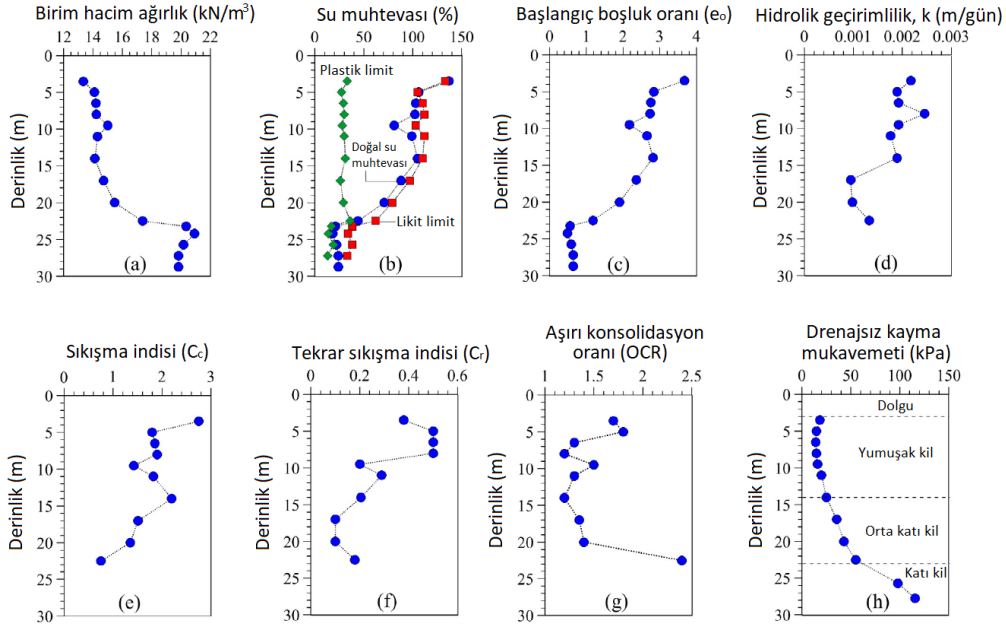
## ÇALIŞILAN MAKALE BİLGİLERİ

Tayland'ın Samutprakan eyaletine bağlı Bangbo-Klongdan karayolu boyunca derin karıştırma kolonları ile iyileştirilmiş yumuşak bir zemin üzerine inşa edilen dolgu Jamsawang vd. (2016) tarafından çalışılmıştır. Çalışmada, DSM ile iyileştirme yapılan kesitlerin aletsel gözlemlemeye bağlı saha ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 1. Dolgu ve DSM Kolonlarının Geometrisi, Saha Ölçümünde Kullanılan Ekipmanlar ve Yerleşimleri (Jamsawang vd., 2016)

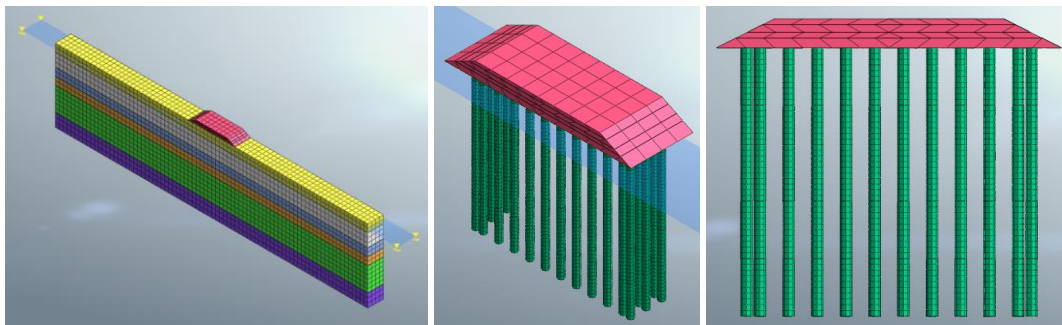
Tekil ve grup kolon davranışını ayrıntılı bir biçimde gözlemleyebilmek için kolonlar arasında yatayda belli aralıklar ile toplam gerilme ölçerler konulmuş; bu sayede dolgudan aktarılan gerilmenin değişimi incelenmiştir. Ayrıca; derinlik boyunca dolgu altındaki düşey deformasyonları izlemek amacıyla 5 m aralıklarla ekstansometreler yerleştirilmiştir. Boşluk suyu basıncı ile dolgudaki yatay deformasyonlar da konulan piezometre ve inklometre ile takip edilmiştir (Şekil 1). Ayrıca, çalışmada kapsamlı bir şekilde geoteknik arazi karakterizasyonu yapılmıştır (Şekil 2). Gerek arazi karakterizasyonunun detaylı olarak yapılmış olması, gerekse üç boyutlu bir model üzerinde çalışılmış olması ve arazide ölçüm yapılmış olması nedeniyle, bu çalışmanın bu makale kapsamında sayısal doğrulama amacıyla kullanılması uygun bulunmuştur.



Şekil 2. Jamsawang vd. (2016) Tarafından Sunulan Saha Karakterizasyonu

### ÜÇ BOYUTLU (3D) NÜMERİK MODEL

Çalışmamız kapsamında ilk olarak Jamsawang vd. (2016) tarafından Şekil 1’de verilen geometri ile sonlu elemanlar yöntemi yazılımı olan Midas GTS-NX programı kullanılarak üç boyutlu (3D) sayısal model oluşturulmuştur. Şekil 3’te oluşturulan sayısal model gösterilmektedir. Yumuşak kil tabakası Şekil 3’te görüldüğü gibi üç tabakaya bölünmüştür. Bu tabakaların parametre seçiminde Jamsawang vd. (2016) tarafından verilen arazi karakterizasyonu göz önüne alınmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan zemin, dolgu ve DSM kolonu için parametre değerleri Tablo 1’de verilmektedir.

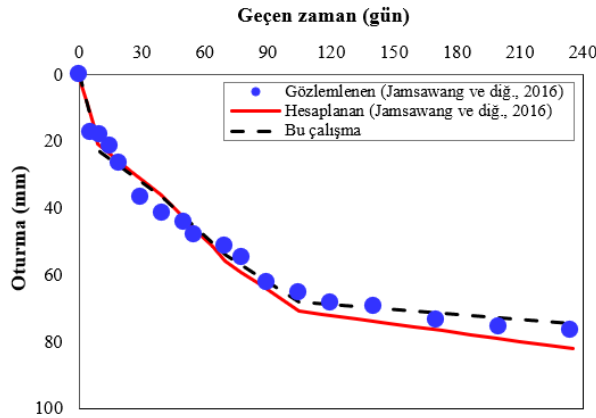


Şekil 3. DSM Kolonlarının Dolgu Yükü Altında Üç Boyutlu (3D) Modellemesi

Oluşturulan model ile öncelikle konsolidasyon analizleri yapılmıştır ve Jamsawang vd. (2016) tarafından arazide ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada 235 güne kadar sürmüş olan dolgu inşaatının yapımı ve bu süreçte meydana gelen deplasmanlar verilmektedir. Yapılan analizler sonucunda Jamsawang vd. (2016) tarafından yapılan çalışma doğrulanmıştır. Şekil 4’te sistemde oluşan oturmanın zamanla değişimi verilmektedir. Görüldüğü gibi oluşan oturmalar, arazi ölçümleri ile ve Jamsawang vd. (2016) tarafından oluşturulan sayısal model ile benzerlik göstermektedir.

**Tablo 1.** Sayısal Modelde Kullanılan Zemin Parametreleri

Parametre	Dolgu	Yumuşak Kil-1	Yumuşak Kil-2	Yumuşak Kil-3	Orta Katı Kil	Katı Kil	Yol dolgusu	DSM Kolon
Bünye modeli	Mohr-Coulomb	Yumuşak Zemin (Soft Soil)	Yumuşak Zemin (Soft Soil)	Yumuşak Zemin (Soft Soil)	Yumuşak Zemin (Soft Soil)	Pekleşen Zemin (Hardening Soil)	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Drenaj durumu	Drenajlı	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajlı	Geçirimsiz
Birim hacim ağırlık, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,0	14,0	15,0	14,2	16,0	20,0	20	15
Elastisite Modül, E (Mpa)	30	-	-	-	-	50	20	80
Poisson oranı, $\nu$	0,33	0,35	0,35	0,35	0,15	0,20	0,33	0,33
Başlangıç boşluk oranı, $e_0$	0,80	2,70	2,20	2,80	1,50	0,58	0,50	0,20
Kohezyon, c (kPa)	1	1	1	1	10	18	1	450
Kayma mukavemeti açısı, $\phi$ (°)	32	23	23	23	25	25	30	0
Permeabilite katsayısı, k (m/gün)	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	-
Modifiye sıkışma indisi, $\lambda^*$	-	0,22	0,20	0,23	0,21	-	-	-
Modifiye şişme indisi, $\kappa^*$	-	0,10	0,06	0,05	0,04	-	-	-
Aşırı konsolidasyon oranı (OCR)	-	1,75	1,50	1,25	2,00	2,50	-	-

**Şekil 4.** Oturmanın Zamanla Değişimi

## PARAMETRİK ÇALIŞMA

Doğrulama analizleri sonrasında, bu model üzerinde parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Bu kapsamda, kolon çapları ve aralıkları değiştirilerek farklı alan değiştirme oranlarında modeller oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Ayrıca aynı alan değiştirme oranına sahip farklı çaptaki kolonlar kullanılması durumunda farklı dolgu yükü altında oluşan oturmalar, kolonlara ve zemine gelen gerilmeler incelenmiştir. DSM kolonları için kullanılan elastisite modülündeki değişimin iyileştirme üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için de analizler yapılmıştır.

### Alan Değiştirme Oranının Etkisinin Değerlendirilmesi

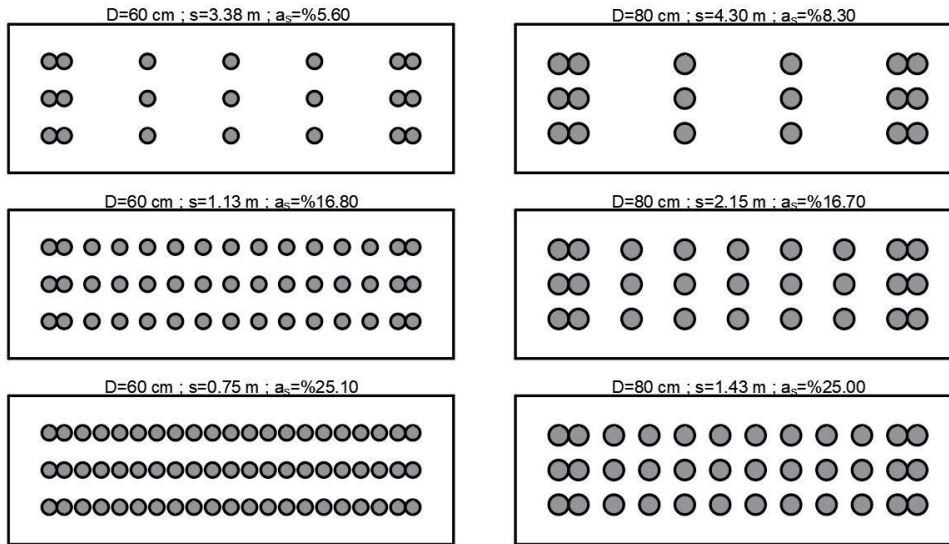
Alan değiştirme oranı, kolon alanının kolonu çevreleyen zemin alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Alan değiştirme oranı,  $a_s = A_c / (A_c + A_s)$  olarak verilmektedir. Burada  $A_c$  ve  $A_s$  sırasıyla kolon ve çevredeki zeminin kesit alanlarıdır (Tan vd., 2008). FHWA (2013) dokümanında, derin karıştırma kolonları ile destekli dolgu uygulamalarında alan değiştirme oranının 0.2 ile 0.4 arasında değişiklik gösterdiği belirtilmektedir (Bruce vd., 2013). Farklı kaynaklarda ise alan değiştirme oranının daha düşük değerlerde olduğu uygulamalarda mevcuttur (Jamsawang vd., 2016; Madhyannapu ve Puppala, 2014).

Bu bölümde kolon aralığına bağlı olarak hesaplanan alan değiştirme oranının düşey deplasmanlar üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Farklı kolon aralıkları ve farklı kolon çapları, yani farklı alan değiştirme oranları kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Kullanılan kolon çapları 60 ve 80 cm'dir. Tablo 2'de oluşturulan modellerde kullanılan kolon

çapları, kolon aralıkları ve alan değiştirme oranları verilmektedir. Oluşturulan kolon yerleşimlerine ait örnekler Şekil 5'te verilmektedir.

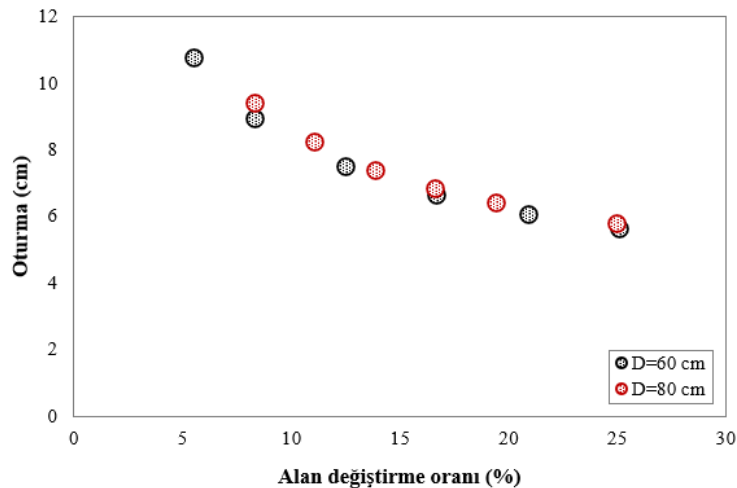
**Tablo 2.** Oluşturulan Modellerde Kullanılan Alan Değiştirme Oranları

Kolon Çapı (cm)	Kolon Aralığı (m)	Alan Değiştirme Oranı (%)
60	3,38	5,60
60	2,25	8,40
60	1,50	12,60
60	1,13	16,80
60	0,90	20,90
60	0,75	25,10
80	4,30	8,30
80	3,23	11,10
80	2,58	13,90
80	2,15	16,70
80	1,84	19,50
80	1,43	25,00



**Şekil 5.** Oluşturulan Kolon Yerleşimlerine ait Örnekler

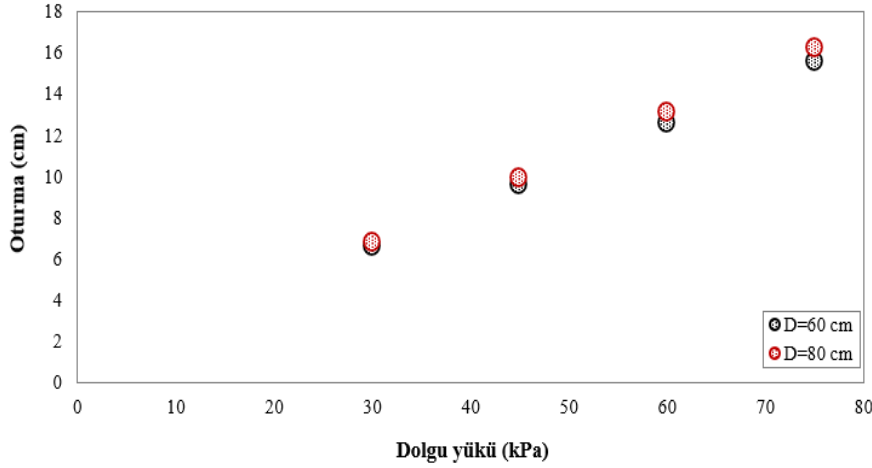
Oluşturulan modellerde “alan değiştirme oranı”nın değişimine bağlı olarak oluşan düşey deplasmanlar Şekil 6’da gösterilmektedir. Kolon aralığının artması ile alan değiştirme oranı azalmakta ve sistemde meydana gelen düşey deplasman değeri beklendiği gibi artmaktadır. Aynı alan değiştirme oranına sahip faklı kolon çaplarında meydana gelen düşey deplasmanların ise birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



**Şekil 6.** Alan Değiştirme Oranı Değişimine Bağlı Oluşan Oturmalar

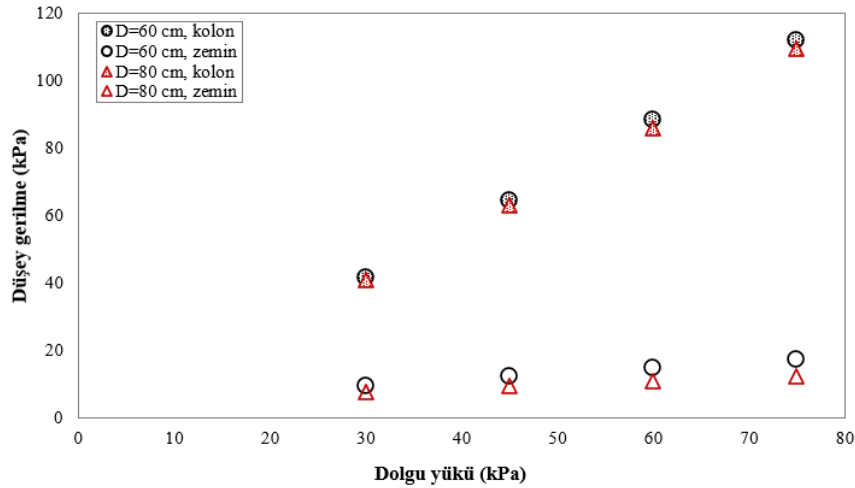
### Dolgu Yüğü Etkisinin Değerlendirilmesi

Parametrik çalışmalar kapsamında dolgu yükünün etkisi üzerinde de çalışılmıştır. Aynı alan değiştirme oranına sahip ( $a_s = \%16$ ) 60 cm ve 80 cm kolon çapları kullanılarak dolgu yükünün artması ile sistemde meydana gelen düşey deplasmanlar, kolonlara ve zemine gelen düşey gerilmeler incelenmiştir. Şekil 7’de dolgu yükünün artışı ile meydana gelen oturmalar gösterilmektedir. Görüldüğü gibi dolgu yükündeki artış ile oluşan oturmalar artmaktadır. Aynı alan değiştirme oranına sahip ( $a_s = \%16$ ) 60 cm ve 80 cm kolon çaplarında oluşan oturmaların birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 7. Dolgu Yüküne Bağlı Olarak Oluşan Oturmalar

Şekil 8’de ise aynı alan değiştirme oranına sahip ( $a_s = \%16$ ) 60 cm ve 80 cm kolon çapı kullanılarak oluşturulan modellerde dolgu yükü artışı nedeniyle dolgu tabanında kolonlarda ve zeminde oluşan maksimum düşey gerilmelerin değerleri verilmektedir. Dolgu yükü artışı ile kolonlara gelen düşey gerilmelerin büyük ölçüde arttığı görülmektedir. Şekil 9’da 30 kPa’lık dolgu yükü altında 60 cm ve 80 cm kolon çaplarının modellendiği analizler için dolgu tabanından alınan kesitlerde kolonlara ve zemine gelen düşey gerilmeler gösterilmektedir. Şekil 10’da ise 75 kPa’lık dolgu yükü altında 60 cm ve 80 cm kolon çaplarının modellendiği analizler için dolgu tabanından alınan kesitlerde kolonlara ve zemine gelen düşey gerilmeler gösterilmektedir. Zemine gelen gerilmelerin çok fazla değişmediği, dolgu yükünün büyük oranda kolonlara aktarıldığı görülmektedir.

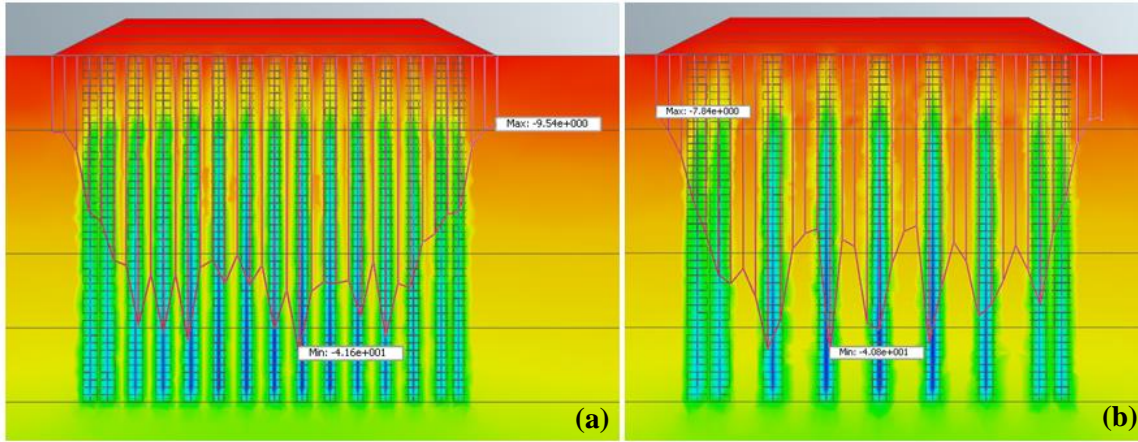


Şekil 8. Dolgu Yüküne Bağlı Olarak Oluşan Maksimum Gerilmeler

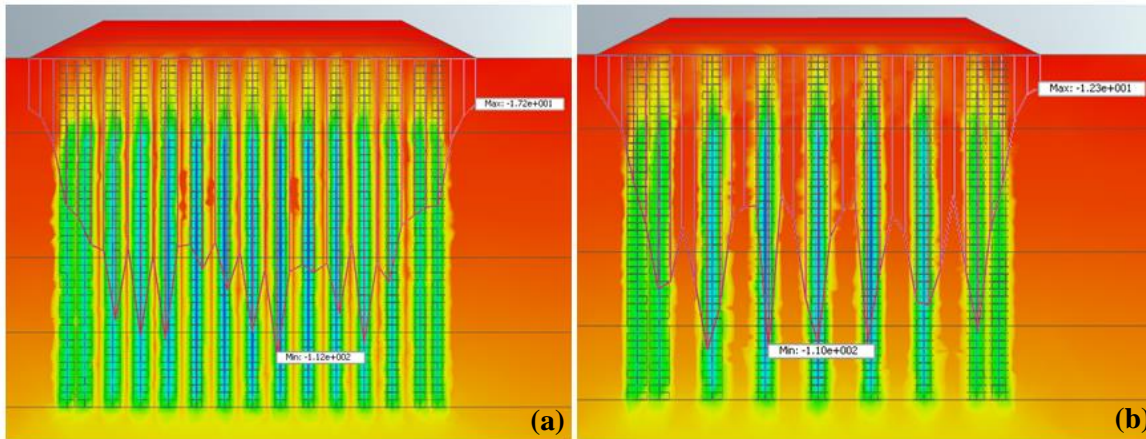
### DSM Kolon Elastisite Modül Etkisinin Değerlendirilmesi

Literatür incelendiğinde, birçok araştırmacı tarafından başlangıç elastisite modülünün %50’si olan sekant modülü değerleri,  $E_{50}$ , derin karıştırılmış zeminlerin serbest basınç mukavemeti,  $q_u$ , ile ilişkilendirilmiştir. FHWA (2013) dokümanında DSM kolonlarının tasarımı için kuru karıştırma yönteminde  $E_{50} = 150q_u$ , ıslak karıştırma yönteminde ise  $E_{50} = 300q_u$  olarak alınabileceği belirtilmektedir (Bruce vd., 2013). Çınar vd. (2017), önceki çalışmalardan

yaralanarak elastisite modülünün serbest basınç dayanımına göre değişimini gösteren değerleri bir araya getirmiştir. Bu değerler Şekil 11’de verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi iyileştirilmiş zeminlerin elastisite modülü çok geniş bir aralıkta dağılım göstermektedir. Diğer taraftan modülün doğru belirlenmesi çok önemlidir, çünkü kolon-yük arasındaki yük dağılımı ve oturma değerleri modül değerine bağlı olarak değişmektedir.



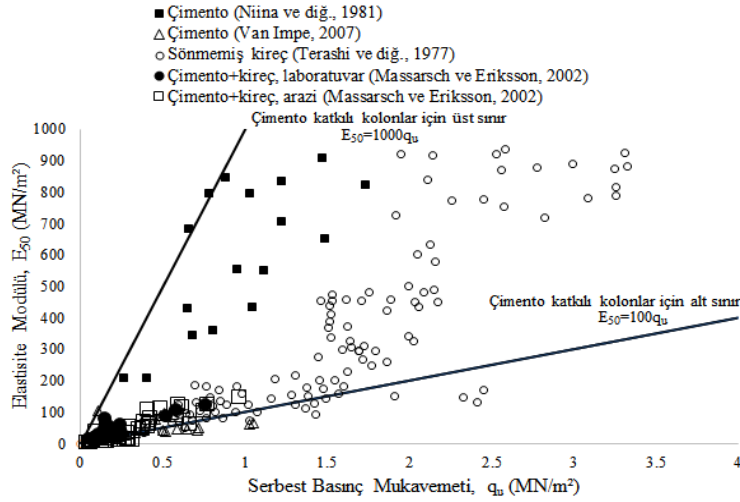
Şekil 9. 30 kPa’lık Dolgu Yüğü Altında Dolgu Tabanında Kolonlarda ve Zeminde Oluşan Düşey Gerilmeler  
a. 60 cm Kolon Çapı, Alan Oranı % 16 b. 80 cm Kolon Çapı, Alan Oranı % 16



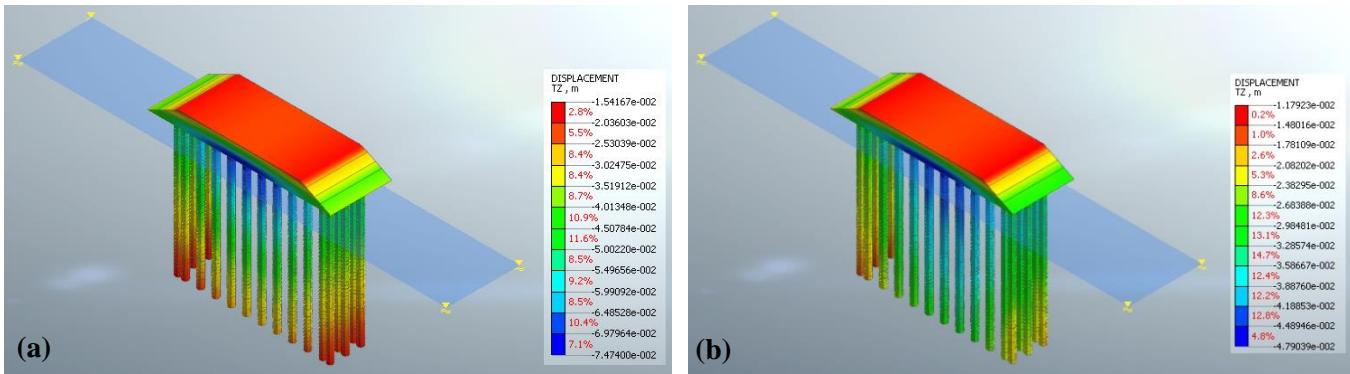
Şekil 10. 75 kPa’lık Dolgu Yüğü Altında Dolgu Tabanında Kolonlarda ve Zeminde Oluşan Düşey Gerilmeler  
a. 60 cm Kolon Çapı, Alan Oranı % 16 b. 80 cm Kolon Çapı, Alan Oranı % 16

DSM kolonların elastisite modülündeki değişimin iyileştirme üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için ilave analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde literatürdeki değerlerle uyumlu olacak şekilde DSM kolonların elastisite modülleri,  $E=150q_u$ ,  $E=200q_u$  ve  $E=300q_u$  olarak üç farklı modül değeri seçilmiştir. Bu üç modül değeri literatürde çimento ile yapılan derin karışırtırmalarda elde edilen modül aralıkları içerisinde kalmaktadır. Yapılan analizlerde sadece yukarıda belirtilen DSM kolonlarının elastisite modülleri değiştirilmiştir, diğer zemin ve kolon parametreleri aynı kalmıştır. Jamsawang vd. (2016) makalesindeki analizlerde DSM kolonları için kullanılan elastisite modülünün kolonların serbest basınç mukavemetinin yaklaşık 90 katı ( $E=90q_u$ ) olarak seçildiği görülmektedir. Bu değerin Şekil 11’de gösterilen alt limit değerin biraz altında olduğu görülmektedir.

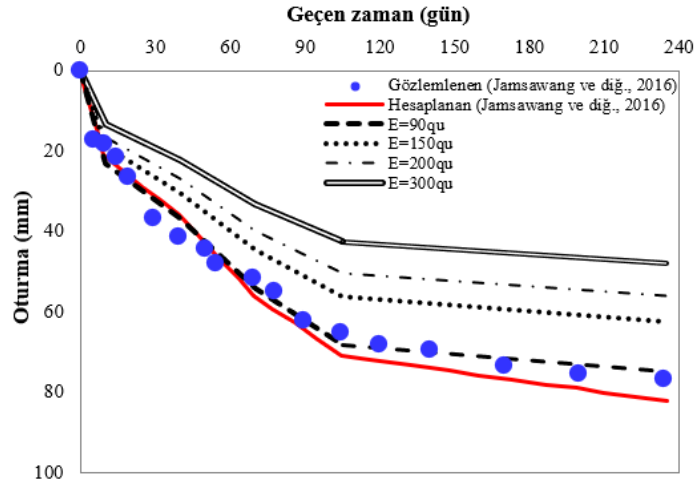
Analizler neticesinde derin karışırtırma kolonlarının elastisite modülü değerlerinin artması ile sistemde daha az deplasman olduğu görülmüştür. Şekil 12’de yapılan analizler sonucu kolonlarda oluşan deplasmanlar gösterilmektedir ( $E=90q_u$ ,  $E=300q_u$ ). Şekil 13’te ise yapılan tüm analizlerin zamana bağlı oturma değerlerinin değişimi Jamsawang vd. (2016) tarafından yapılan çalışma verileri ile karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi DSM kolonları için atanan modül değerleri oturma değerlerini önemli seviyede etkilemektedir. Bu nedenle, bu değerlerin seçiminde zemin tipini dikkate alan değerlerin kullanılmasına özen gösterilmelidir. Ayrıca sadece mukavemetin değil, modülün laboratuvarında ölçümü veya arazide doğru olarak ölçümü de çok önemlidir. Modül ölçümünün kalite kontrol sisteminin bir parçası haline getirilmesi gerekir.



Şekil 11. Serbest Basınç Mukavemeti-Modül Değerleri Korelasyonları (Çınar vd., 2017)



Şekil 12. Kolonlarda Meydana Gelen Deplasmanlar a. E=90qu b. E=300qu



Şekil 13. DSM Kolonların Elastisite Modülünün Zamana Bağlı Oturma Üzerindeki Etkisi

## SONUÇLAR

Literatürde mevcut olan ve DSM kolonları ile destekli yol dolgusu ile ilgili bir çalışma seçilmiş ve üç boyutlu bir sayısal model oluşturularak doğrulama analizleri yapılmıştır. Daha sonra bu model üzerinde parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmalar kapsamında, alan değiştirme oranının etkisi ve DSM kolonların elastisite modülünün iyileştirme üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Analizler sonucunda alan değiştirme oranının artması ile düşey deplasmanların azaldığı ve aynı alan değiştirme oranına sahip modellerde meydana gelen düşey deplasmanların birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolgu yükü artışı ile kolonlara gelen düşey gerilmelerin büyük ölçüde arttığı görülmüştür.

Derin karıştırma kolonlarına ait elastisite modülü değerleri sayısal modeller için önemli bir girdidir. Literatürde elastisite modülünün serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi için birçok korelasyon bulunmaktadır. Farklı DSM kolon elastisite modülü değerleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda, derin karıştırma kolonlarına ait elastisite modülü değerlerinin artması ile sistemde daha az deplasman olduğu görülmüştür. DSM kolonları için atanan modül değerleri oturma değerlerini önemli seviyede etkilemektedir. Bu nedenle, bu değerlerin seçiminde zemin tipini dikkate alan değerlerin kullanılmasına özen gösterilmelidir. Ayrıca sadece mukavemetin değil, modülün laboratuvarında ölçümü veya arazide doğru olarak ölçümü de çok önemlidir ve kalite kontrol sürecinin bir parçası olarak yer almalıdır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma; Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN'ın İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde yaptığı doktora tezi kapsamında, Prof. Dr. İlknur BOZBEY'in Karayolları Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Daire Başkanlığı ile yürüttüğü KGM-ARGE/2019-8 proje numaralı, "Derin Karıştırma Yönteminde Elde Edilen İyileştirilmiş Zemin Özelliklerinin Laboratuvar ve Arazi Şartlarında Tayini ve Derin Karıştırma Şartnamesi Hazırlanması" başlıklı proje kapsamında yapılmıştır. Tüm destekleri için Karayolları Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Daire Başkanlığı'na teşekkür ederiz. Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler Karayolları Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Daire Başkanlığı'nın resmi görüşü değildir.

## KAYNAKLAR

- Arulrajah, A., Abdullah, A., Bo, M. W. & Bouazza, A. (2009). Ground improvement techniques for railway embankments. *Proc Inst Civil Eng.*
- Bruce, M. E. C., Berg, R. R., Collin, J. G., Filz, G. M., Terashi, M. & Yang, D. S. (2013). Federal Highway Adm. design manual: deep mixing for embankment and foundation support. (No. FHWA-HRT-13-046.)
- Chai, J. C., Liu, S. Y. & Du, Y.J. (2002). Field properties and settlement calculation of soil cement improved soft ground – a case study. *Lowland Technol Int*, 4(2), 51–8.
- Çınar, F. T., Keleşoğlu, M. K., Bozbey, İ. & Gökgöz, A. (2017). Derin karıştırma ile iyileştirme seviyesini etkileyen faktörlerin nümerik olarak incelenmesi. 3. International Soil-Structure Interaction Symposium, İzmir, 519-530.
- Dahlström, M. (2013). Dry soil mixing. In: Kirsch K, Bell A, editors, Ground improvement, London, UK: CRC Press Taylor & Francis Group, 482–5.
- FHWA (2013). Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support, FHWA-HRt-13-046.
- Han, J. & Gabr, M. A. (2002). Numerical analysis of geosynthetic reinforced and pile supported earth platforms over soft soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (1), 44–53.
- Han, J., Zhou, H. T. & Ye, F. (2002). State of practice review of deep soil mixing techniques in China. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1808(1), Washington, DC, 49–57.
- 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*, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.006>
- Jiang, Y., Han, J. & Zheng, G. (2014). Numerical analysis of a pile-slab-supported railway embankment. *Acta Geotech*, 9:499–511.
- Lawson, C. H., Spink, T. W., Crawshaw, J. S., & Essler, R. D. (2005). Verification of dry soil mixing at Port of Tilbury, UK. In: Proceedings of the international conference on deep mixing best practice and recent advances, May 23-25, Stockholm, Sweden, 453–462.
- Madhyannapu, R. S. & Puppala, A. J. (2014). Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 10.1061/ (ASCE)GT.1943-5606.0001149, 01-15.

Ohdaira, H., Hashimoto, H., Gotoh, K. & Nozu, M. (2002). Observation results for the embankment on soft ground improved by DJM, *Tsuchi-to-kiso*, 31–3 [in Japanese].

Pye, N., O' Brien, A., Essler, R. D. & Adams, D. (2012). Deep dry soil mixing to stabilize a live railway embankment across Thrandestone Bog. In: Proceedings from the international conference on grouting and deep mixing, February 16–18, New Orleans, Louisiana, United States.

Tan, S. A., Tjahyono, S. & Oo, K. K. (2008). Simplified plane-strain modelling of stone-column reinforced ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134 (2), 185-194.

Topolnicki, M. (2004). In situ soil mixing. In: Moseley MP, Kirsch K, editors. Ground Improvement, New York, USA: Spon Press, 331–423.