



Araştırma Makalesi / Research Article

## Geosentetik Takviyeli Kum Kazıkları ile Güçlendirilen Yumuşak Kil Zeminlerin Düşey Yer Değiştirme Davranışının Değerlendirilmesi

### *Evaluation of Vertical Displacement Behavior of Soft Clay Soils Reinforced with Geosynthetic Reinforced Sand Piles*

Kaveh Dehghanian<sup>1</sup>, Serpil Erden<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [kavehdehghanian@aydin.edu.tr](mailto:kavehdehghanian@aydin.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6372-4984>

<sup>2</sup> İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [serpileerden@gmail.com](mailto:serpileerden@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6796-5363>

#### MAKALE BİLGİLERİ ÖZ

##### Makale Geçmişi:

Geliş 8 Mart 2022  
Revizyon 17 Ekim 2022  
Kabul 17 Ekim 2022  
Online 31 Aralık 2022

##### Anahtar Kelimeler:

Killi zemin, PLAXIS 2D, SoftSoil Model, Mohr-Coulomb Model, Kum kazık.

Bu çalışma, İstanbul ili Bağcılar ve Zeytinburnu ilçelerinde yapılmış zemin etütleri sonrası geoteknik raporlar sonucunda elde edilen verilerle, yüksek-plastisiteli kil zeminlerdeki düşey yer değiştirmenin azaltılması için kum kazıkların performans değerlendirilmesini içerir. İncelemeler Sonlu elemanlar yöntemi olan PLAXIS-2D ile yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında suya doymun ve (yeraltı suyunun olmadığı) kuru olan yüksek-plastisiteli killi zeminin (CH) içerisine çeşitli uzunluk/çap oranlarında (L/D), tekil ve grup (üçlü) kazıklar yerleştirilmiştir. Kum kazıklar çeşitli L/D oranlarında (5,71-8,57-10) ve farklı kazıklar arası mesafelerde (S) modellenmiştir. Kazıklar arasındaki ara mesafe ile grup etkisine bakılmıştır (S:2, S:4). Tüm zemin üzerine 578 kN/m<sup>2</sup> düzgün yayılı yük uygulanmıştır. Bu çalışmada yüksek-plastisiteli kil içerikli zemin, Yumuşayan Zemin (Soft Soil) modeli, dolgu kısım için Pekleşen Zemin modeli (Pekleşen Zemin model) ve kum kazıklar ise Mohr-Coulomb zemin modeli ile modellenmiştir. Daha sonra oturmanın en az olduğu durumda kum kazıklar geotekstil donatı ile kaplanarak PLAXIS-2D ile tekrar analiz edilmiştir. Çıkan sonuçlara göre yeraltı su seviyesinin 1m olduğu durumda (doymun) halde en iyi zemin düşey yer değiştirme L/D oranının 8,57 olduğu ve kazıklar arası mesafenin 4m olduğu durumdur. Zemin kuru iken (yeraltı suyunun olmadığı) en iyi düşey yer değiştirme L/D oranı 8,57 olan ve zemin içerisine yerleştirilen tek kazıklı olduğu durumdur.

#### ARTICLE INFO

#### ABSTRACT

##### Article history:

Received 8 March 2022  
Received in revised form 17 October 2022  
Accepted 17 October 2022  
Available online 31 December 2022

##### Keywords:

Clay soil, PLAXIS 2D, Soft Soil Model, Mohr-Coulomb Model, Sand Pile.

This study includes the performance evaluation of sandpiles in order to reduce the vertical displacement in high-plastic clay soils with the data obtained as a result of geotechnical reports after soil surveys in Bağcılar and Zeytinburnu districts of İstanbul. Investigations were made with the finite element method PLAXIS-2D. In this study, single and group (triple) piles with various length/diameter ratios (L/D) were placed in a high-plastic clay soil (CH), which is saturated with water and dry (without groundwater). Sand piles are modeled at various L/D ratios (5.71-8.57-10) and at different pile spacings (S). The spacing between the piles and the group effect were examined (S:2, S:4). A uniformly-distributed load of 578kN/m<sup>2</sup> was applied over the entire floor. In this study, soil with high-plastic clay content was modeled with Soft Soil model, Hardening-Soil model was used for embankment layer, and sand piles were modelled with Mohr-Coulomb model. Then, the sand piles were covered and reinforced by geotextile and analyzed again with PLAXIS-2D when settlement was minimum. According to the results, when the ground water level is 1m (saturated), the best soil vertical displacement occurs as L/D ratio is 8.57 and the spacing between the piles is 4m. When the soil is dry (no groundwater), the best vertical displacement happens as L/D ratio is 8.57 and it is a single pile placed in the soil.

Doi: 10.24012/dumf.1084638

\* Sorumlu Yazar

## I.Giriş

Kil içerikli zeminler düşük mukavemetinden dolayı, aynı zamanda sıkışa bilirliliğinin yüksek olması nedeniyle ile fazla oturma eğilimindedir. Bu durum stabilite problemlerine sebebiyet verir. Killi zemin içerisine yerleştirilen kum kolonlar yumuşak killi zeminlerde oturmayı azaltmak, taşıma kapasitesini arttırmak ve killi zeminin konsolidasyon sürecini hızlandırmak için uygulanan zemin iyileştirme yöntemlerdendir. Bu çalışma, killi zemin içerisine yerleştirilen kum kazıkların yük altındaki oturma davranışını ve zemin içerisine yerleştirilen kum kazıkların davranışını araştırmak amacı ile yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonlu elemanlar analiz yöntemi olan PLAXIS v 8-2D ile modellenerek yapılmıştır.

Literatürde, kil içerikli zemin içerisine kum kazıklar yerleştirip, analizler, deneysel çalışmalar ve analitik yöntemler ile incelemeler yapılan çalışmalar mevcuttur. Killi zemin içerisine yerleştirilen kum kolonları ile yapılan bir çalışmada; geosentetik ile güçlendirilmiş kum kolonlarının yumuşak zeminlerdeki performansının incelenmesini amaçlanmıştır [1]. Diğer bir çalışmada kolonlar, inşaat kalıntısı, taş ve kum olmak üzere farklı şekilde modellenmiştir. Geogrid kolon içerisine yatay olarak yerleştirilmiş ve kolonların dış yüzeyi ise geotekstil ile kaplanmıştır. Kaplamada üç çeşit geotekstil kullanılmıştır. Modelleme için sonlu elemanlar metodu, büyük ölçekli laboratuvar testleri ve sayısal analizler kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda geosentetik ile kaplanan kum kolonlarının, kolonun performansını arttırdığı ve zeminde kaplamanın rolünün büyük önem taşıdığını göstermektedir. Ayrıca inşaat kalıntısı ve taşın, kum kolonlar ile kıyaslandığında daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen verilere göre sayısal analiz sonuçları ve testlerden elde edilen veriler uyum içerisinde. Başka bir çalışmada, yumuşak killi zeminlerde yük taşıma kapasitesini arttırmak için etkili bir teknik olarak granül kazıklar benimsenmiştir. Granül kazıkları incelemek adına çeşitli araştırma makalelerinde yayınlanan, laboratuvar model testlerini, saha çalışmalarını, sayısal analizleri ve analitik yaklaşımları veri sağlamak amacıyla bir araya getirerek sunulmuştur [2].

Yumuşak kil zemin içerisine yerleştirilen tek bir kolonun performansını incelemek adına yumuşak killi zemin içerisine yerleştirilen kum kolon laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel testler, sayısal analiz sonuçları ve analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [3]. Yapılan başka bir çalışma için bir dizi test uygulanmış sonuçlarda ise, geosentetik kaplama sertliğinin, geosentetik kaplamalı bir kum kolonunun şişkinlik mesafesini büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bu çalışmada, üç boyutlu ve iki boyutlu analizler yapılmıştır. Üç boyutlu analizler dolgu tabakası altında dikdörtgen şerit modellenerek yapılmıştır. İki boyutlu analizler ise birim hücre modeli ve gerini yaklaşımları ile modellenerek yapılmıştır. Çalışmada granül kolonları modellemek için sertlik modülü 95 kN/m ve 1750 kN/m olan geotekstil malzeme kullanılmıştır. Yeraltı su seviyesi ise dolgu

tabakasının altında bulunmaktadır. Simülasyonlar PLAXIS 3D ve PLAXIS 2D ile gerçekleştirilmiştir. Granül kolonların modellenmesi için Mohr-Coulomb Model kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda birim hücre modelinin dolgu tabakasındaki oturmayı tahmin etmek ve ayrıca gerilmeleri belirlemek için uygun olmadığına karar verilmiştir [4]. Diğer bir çalışmada, yumuşak killi zeminlerde yanal çevreleme basıncından dolayı granül kolonların geosentetik ile kaplanması sonucu oluşan performansın değerlendirilmesini amaçlanmıştır. İncelemeleri aşamasında ABAQUS programı kullanılmıştır. ABAQUS programı kullanılarak geosentetik kaplı kolonları ve kaplamasız kolonları simüle etmek için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Kolonlar Mohr-Coulomb Model, killi zemin Modife Cam Clay, geosentetik ise Linear Elastik Model kullanılarak modellenmiştir. Analiz sonuçlarında kolonları geosentetik ile kaplamanın büyük oranda gerilme ve oturma davranışını iyileştirdiği görülmüştür [5]. Khan vd. (2016) yaptığı çalışmada L/D oranları 4-5,5-7 olan kum kolonlarının yumuşak killi zemin içerisindeki performanslarını ve etkilerini değerlendirmek amacı ile teorik ve deneysel araştırmalar yapmıştır [6]. Zemin içerisine granül ve kireç kolonlar yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre düşük kesme dayanımına sahip zeminler için granül kazıkların kireç kazıklara göre dayanımının daha yüksek olduğuna fakat yüksek kesme dayanımına sahip zeminlerde ise kireç kolonların granül kazıklara göre daha fazla dayanım gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. FLAC 3-D yazılımı kullanılarak yapılan yumuşak zeminlerde geosentetik ile kaplamalı ve kaplamasız kum kolonlarının yanal yük taşıma kapasitesinin değerlendirilmesinde 50 mm ve 100 mm çaplarda kolon, üç farklı (tek, üçgen, kare) düzenleme modeli şeklinde tek ve grup etkisini incelemek için modellenmiştir. Sayısal analizler 15, 30, 45, 75 kPa çevre basınçlarında gerçekleştirilen çevre basınçlarında yapılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarına göre normal basınçtaki artış ile birlikte kesme gerilmesinin de büyüklüğünde artış olduğu görülmektedir [7]. Kaplama malzemesi olarak geosentetik kullanılan yumuşak zeminde geosentetik kaplamalı ve kaplamasız kum kolonlarının yanal yük kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Geosentetik kaplamalı ve kaplamasız kum kolonları üzerinde kesme deneyi yapılmıştır. Çalışma 15 kPa ve 75 kPa aralığında farklı basınçlar uygulanarak yapılmıştır. Kolon çapları 100 mm ve 50 mm dir. Üç farklı düzenleme modeli kullanılmıştır. Geosentetik kaplamalı tek kolon, grup etkisinin araştırılması için ise üçgen şeklinde üçlü kolon ve kare şeklinde dört kolon şeklinde modellenerek testler gerçekleştirilmiştir. Kaplama malzemesi olarak geotekstil kullanılmıştır. Deney sonuçlarından sonra kaplamanın etkisinin anlaşılması için kesme mukavemetindeki artış açısından tartışılmıştır. Geotekstil kaplamanın kum kolonlarının yanal yük kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca gesentetik ile kaplı kum kolonları ve kaplamasız kolonlarda görülen kırılmalarda tartışılmıştır [8]. Orekanti ve Dommaraju (2019) çalışmasında yumuşak killi zeminlerin su ile etkileşim halinde iken hacimsel olarak değişmesine karşı çözüm olarak granül kazıkların kullanılmasının uygun olduğunu fakat killi zeminler içerisinde granül kolonların şişme eğiliminden dolayı geosentetik ile kaplanması gerektiğini söylemiştir [9]. Bu çalışmada geotekstil kaplama ve yanal donatı kombinasyonu varlığında granül kazıkların

basma testleri altındaki tepkisi araştırılmıştır. Test sonuçlarına göre geotekstil ile kaplanmış kazıkların yük taşıma kapasitesinin, geotekstil ile kaplanmamış duruma göre 2,44 kat kadar artış olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki başka bir çalışmada da yumuşak killi zemine yerleştirilen granüler kolonların yük- oturma davranışı ve şişkinlik özelliklerini deneysel çalışma sonucunda araştırmaktır. Granüler kolonlar farklı boyutlarda beş çeşit agrega kullanılarak modellenmiştir. Yapılan test sonuçlarına göre agrega boyutları küçüldükçe yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Agrega boyutlarına göre ve sıkıştırılmış veya gevşek olma durumlarına bağlı olarak nihai yük taşıma kapasitesindeki artış %106 ile %210 arasında değiştiği görülmüştür. Çalışmasında bir dizi test uygulayarak yük taşıma kapasitesinde artış olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur [10]. Aynı şekilde yumuşak zeminleri güçlendirmek amacı ile kullanılan kum kazıklarının, zemin içerisinde etkilerine araştırmak için yapılan başka bir çalışmada da küçük ölçekli laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar testleri D: 37 mm çaplı kazıklar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kum kolonlar ile güçlendirilmiş zeminin özellikleri, takviyesiz zemin ile karşılaştırılmış olup ve kazıklar arasındaki mesafe değiştirilerek grup etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak kum kolonlarının killi zeminde, zemini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda kazıklar arası ara mesafenin artması halinde grup verimliliğinin düştüğü gözlemlenmiştir. S/D oranı 2'nin, S/D oranı 3'e göre yük taşıma kapasitesinin yüksek olduğu görülmüştür [11]. Bu çalışmanın amacı, düşük mukavemete sahip, yüksek sıkışabilirlik özelliği olan ve şişme sorunları görülen yumuşak killi zeminlerde oturmayı azaltmak ve zemini iyileştirmek (güçlendirmek) adına uygulanan geosentetik takviyeli kum kazıklarının (kolon) performansının değerlendirilmesidir. Bu çalışmanın sürdürülebilirliği açısından zemin içerisine çeşitli uzunluk/çap oranlarına sahip geosentetik donatı ile güçlendirilen kum kazıkları takviye edilmiş, farklı yükler altındaki, oturma (düşey yer değiştirme) performansları incelenmiştir.

## II. SONLU ELEMANLAR ANALİZ YÖNTEMİ

### A. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislik problemlerinin çözümlenmesi için geliştirilen ve diferansiyel denklemlerle ifade edilen sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemini avantajları;

- Hızlıdır.
- Birçok problem için uygulanabilir.
- Kompleks durumlar için kullanılabilir.
- Şekil değiştirme, gerilme ve konsolidasyonu zamana bağlı olarak değerlendirilmesini sağlar [12].

### B. PLAXIS

Geoteknik projelerinin tasarımı sırasında ihtiyaç duyulan zemin yapı etkileşimi, gerilme şekil değiştirme, konsolidasyon, taşıma gücü, stabilite analizleri, zemin dinamiği gibi konuların incelenmesini ve çözümlenmesini sağlayan programdır [12].

## 1. PLAXIS'te Zemin Modelleme Yöntemleri

### a. Mohr-Coulomb Zemin Modeli

Mohr-Coulomb zemin modeli, mükemmel bir lineer elastik-plastik bir zemin modelidir. Bu model basitliği nedeni ile diğer modellemelere göre daha çok uygulamaya sahiptir. Beş girdi parametresi vardır. Mohr-Coulomb zemin modeli mukavemet parametrelerine (Kohezyon, içsel sürtünme açısı) bağlıdır [13].

### b. Pekleşen zemin Modeli

Pekleşen zemin modeli için üç çeşit sertlik tanımlanır. Bunlar üç eksenli yüklemeye rijitliği, üç eksenli yük-boşaltma rijitli, ödometre yüklemeye rijitliği' dir. Zeminin sertleşmesinden dolayı kaynaklanan yumuşamayı hesaba katmadan analiz yapar [14].

### c. Yumuşak zemin Modeli

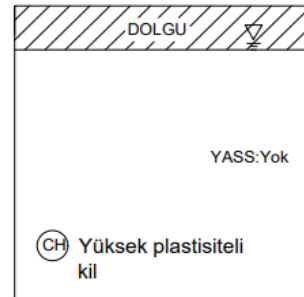
Yumuşak zemin modeli yumuşak zeminlerin davranışını modelleyen bir yöntemdir [14]. Yumuşak zemin modeli, hacimsel gerinim ile hacimsel gerilim arasında logaritmik bir ilişki olduğunu varsayar. Bu zemin modeli killi zeminlerde toprak malzemenin sıkışa bilirliğini tahmin edebilir [15]. Bu model kil zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılan aynı zamanda, elastik zemin davranışını öngören bir modeldir [14].

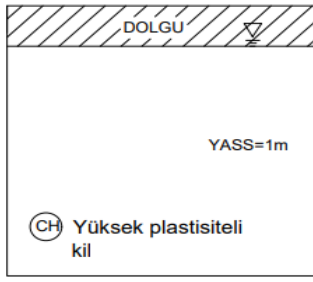
### d. Geogrid Modellemesi

Kumaş veya ızgara tabakasından oluşan ve esnek olan elemanlardır. Veri girişlerindeki en önemli parametre eksenel rijitlik, EA'dır. Eksenel rijitlik ise birim genişliğin eksenel kuvvetin ve eksenel gerinimin oranını ifade eder [14].

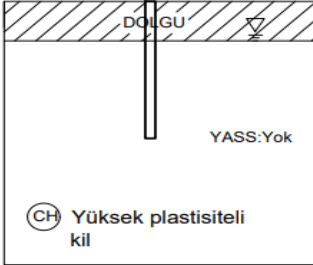
## III. MATERYAL VE YÖNTEM

Zemin dolgu ve yüksek- plastisiteli kil (CH) olan iki tabakadan oluşmuştur. Bu çalışmada kullanılan killi zemin parametreleri İstanbul İli, Zeytinburnu İlçesi'nde zemin etüdü sonuçlarından temin edilen geoteknik raporlardan alınmıştır. Aynı şekilde dolgu tabakası ise İstanbul İli, Bağcılar İlçesinin zemin etüt raporu sonucu geoteknik raporlardan temin edilmiştir. Zemin profilleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu şekilde Yer Altı Su Seviyesi (YASS) her durum için gösterilmiştir.



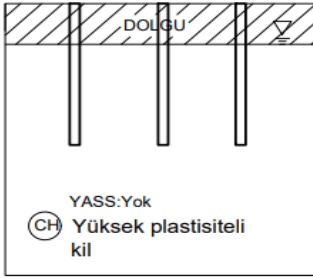


$E_{ur}$ (kN/m <sup>2</sup> )	62400
Poisson Oranı	0,30
Efektif İçsel Sürtünme Açısı	11,95
Kohezyon (kN/m <sup>2</sup> ) C	45
Genleşme Açısı $\psi$	0
$\nu/\nu_{ur}$	0,2
Ref. Gerilme kN/m <sup>2</sup> ( $p^{ref}$ )	100
Sıkışma İndisi	0,080809
Şişme İndisi	0,01616

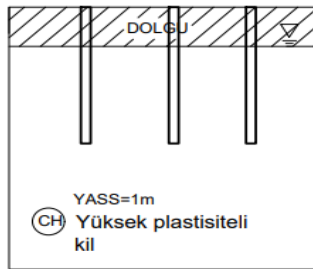


Zeminde dolgu kısım için permabilite değeri 10<sup>-2</sup> cm/sn (86,4 m/gün) olarak alınmıştır [15]. Bu çalışmada kapsamında kullanılan dolgu katman parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Dolgu Parametreleri



Tanım	Dolgu
Zemin Modeli	Pekleşen zeminModel
Drenaj Durumu	Drenajsız
Kuru Birim Hacim Ağırlık(kN/m <sup>3</sup> )	15,00
Doygun Birim Hacim Ağırlık(kN/m <sup>3</sup> )	15,00
Permabilitekx(m/gün)	86,4
ky (m/gün)	86,4
Elastisite Modülü E (kg/cm <sup>2</sup> )	100
$E_{50}$ (kN/m <sup>2</sup> )	9806,65
$E_{oed}$ (kN/m <sup>2</sup> )	9806,65
$E_{ur}$ (kN/m <sup>2</sup> )	29419,95
Poisson Oranı	0,41
Efektif içsel sürtünme açısı	20
Kohezyon (kN/m <sup>2</sup> ) C	4,9
Genleşme açısı $\psi$	0
$\nu/\nu_{ur}$	0,2
Ref. gerilmekN/m <sup>2</sup> ( $p^{ref}$ )	100



Şekil 1: Çalışmada Kullanılan Zemin Modelleri

Killi zemin için modelleme parametreleri Tablo1’te gösterilmiştir.

Tablo1: Killi zemin parametreleri

Malzeme	Yüksek-Plastisiteli Kil (CH)
Zemin Modeli	Cam-Clay Model
Drenaj Durumu	Drenajsız
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	14,65
Doygun Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	18,55
Permabilite kx (m/gün)	19,44x10 <sup>-6</sup>
ky (m/gün)	19,44x10 <sup>-6</sup>
Elastisite Modülü E (kN/m <sup>2</sup> )	-
$E_{50}$ (kN/m <sup>2</sup> )	20800
$E_{oed}$ (kN/m <sup>2</sup> )	20800

Bu çalışmada kullanılan kum SP sınıfı (kötü derecelendirilmiş) dir. Kum için kuru birim hacim ağırlık, 15,5 kN/m<sup>3</sup> [16], elastisite modülü; 80000 kN/m<sup>2</sup> [17], kohezyon; 1,96 kN/m<sup>2</sup> [18], permabilite 8,64 m/gün [19] parametreleri kullanılmıştır. Tablo 3’te kum kazık modelleme için parametreler verilmiştir. Kum kazıklar Mohr-Coulomb model ile drenajlı olarak modellenmiştir. Bu çalışmada modellenen sistemde tek bir kazık ve (üçlü) grup kazık oluşturulmuş, üzerine 578 kN/m<sup>2</sup> düzgün yayılı yük ile yükleme yapılmıştır.

Tablo 3: Kum Kazık Parametreleri

Özellikler	Değer
Zemin Modeli	Mohr - Coulomb
Drenaj Durumu	Drenajlı

Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	15,5
Doymun Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	18,0
Kohezyon C (kN/m <sup>2</sup> )	1,96
Elastisite Modülü (kN/m <sup>2</sup> )	80000
Poisson oranı	0,3
İçsel sürtünme açısı	30
Genleşme açısı $\psi$	1
Permabilitekx (m/gün)	8,64
Permabiliteky (m/gün)	8,64

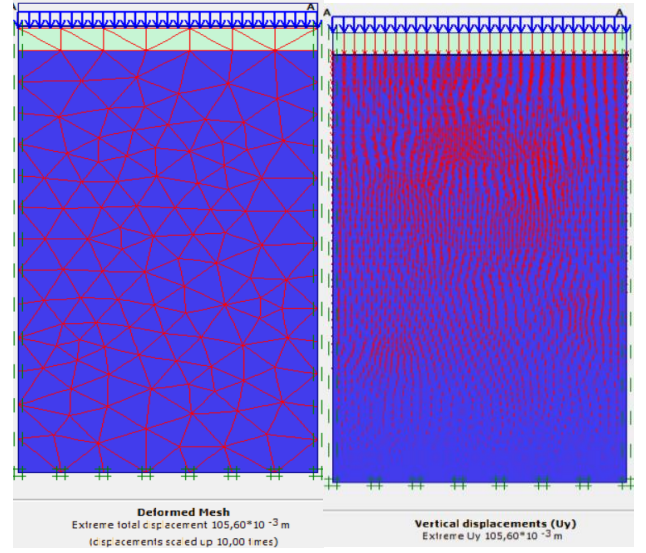
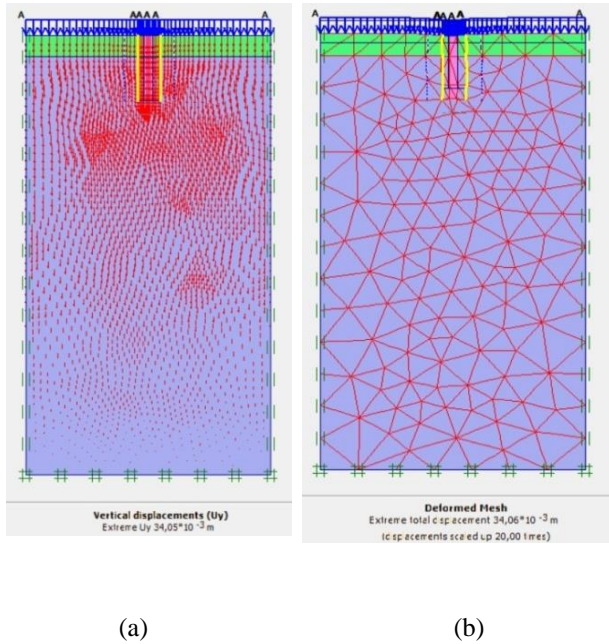
Araştırmada kum kazıklar arasındaki mesafe “S”, ile ifade edilirken, kum kazığının çapı ise “D” ile ifade edilir. Aynı şekilde L/D ise kum kazık için (uzunluk/çap) oranıdır ve oluşturulan modeller Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4: Kum Kazıkların Modellenmesi

Model	Uzunluk (L) (cm)	Çap(D) (cm)	L/D	Aralık (S) (m)
Model1	800	80	10	S <sub>1</sub> =2 S <sub>2</sub> =4
Model 2	300	35	8,57	S <sub>1</sub> =2 S <sub>2</sub> =4
Model 3	400	70	5,71	S <sub>1</sub> =2 S <sub>2</sub> =4

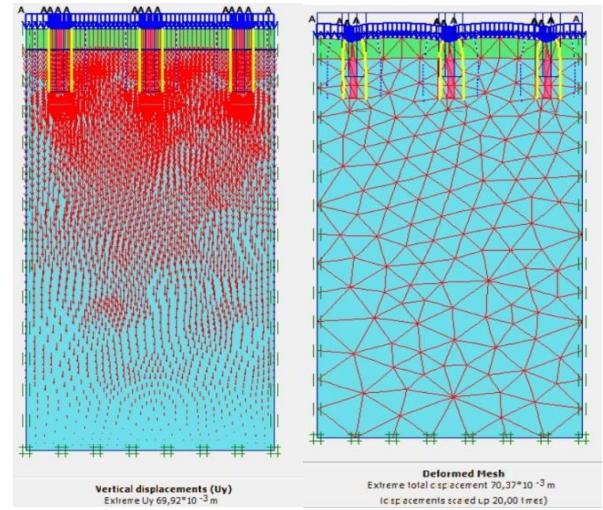
Oturmanın en az olduğu durum için kum kazıklar elastik rijitliği 1200 kN/m [20] olan geotekstil donatı ile tek sıra kaplanarak modellenmiş ve PLAXIS sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri yapılmıştır.

Çalışma kapsamında PLAXIS 2-D ile yapılan analiz çalışmaları aşağıda Şekil 2’de gösterilmiştir.



(c)

(d)



(e)

(f)

Şekil 2: En düşük yer değiştirme verileri; (a-b) L/D aralığı 8,75 olan en iyi durum için tek kazığın düşey

yer değiştirme ve deformasyon analizi, (c-d) suya doymun zeminin kazıksız durumda iken düşey yer değiştirme analizi, (e-f) L/D 8,75, kazık aralığı 4m olan grup kazıkların düşey yer değiştirme ve deformasyon analizi.

#### IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

İstanbul’un farklı ilçelerinde yapılmış olan zemin etüdü raporları sonucu geoteknik raporlardan temin edilen parametreler kullanılarak, zemindeki taşıma kapasitesi ve killi zemin içerisine yerleştirilen kum kazıklarının performans değerlendirmesi sonlu elemanlar yöntemi PLAXIS 2D ile yapılmıştır. Suya doymun killi zemin için en düşük oturma değeri kazıklar arası mesafenin 4 m olduğu L/D oranının 8,57 olduğu 69,92 mm dür. Diğer analiz sonuçları Tablo 5’de verilmiştir. Kuru zemin için en düşük oturma değeri 34,05 mm’dir. Kuru zemin için ise analiz

sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Çıkan sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda gösterilmiştir.

- Yeraltı su seviyesi 1 m'de ve kazıksız halde iken zeminde oturma 105,60 mm'dir. Zemin içerisine tek kazık yerleştirildiği durumda iken zemindeki oturma L/D oranı 10 iken 85,27 mm, L/D oranı 8,57 iken 73,40 mm, L/D oranı 5,71 iken 74,05 mm'dir.
- Yeraltı su seviyesi 1m'de ve kazıklar arası mesafenin 2 m olduğu üçlü kazık (grup kazık) durumda zemindeki oturma L/D oranı 10 iken

91,75mm, L/D oranı 8,57 iken 71,80mm ve L/D oranı 5,71 iken 72,68 mm'dir.

- Yeraltı su seviyesi 1m'de, kazıklar arası mesafenin 4m olduğu üçlü kazık (grup kazık) olduğu durumda zemindeki oturma, L/D oranı 10 iken 90,28mm, L/D oranı 8,57 iken 71,51mm ve L/D oranı 5,71 iken 72,10 mm'dir.
- Bu veriler neticesinde yeraltı su seviyesinin 1m olduğu durumda (doygun) halde en iyi zemin düşey yer değiştirme L/D oranının 8,57, kazıklar arası mesafenin 4m olduğu durumdur.

Tablo5: Suya doygun yüksek plastik kil içerikli zeminin 578 kPa yük altında analiz sonuçları (YASS=1 m)

Durum	TEKİL KAZIK			ÜÇLÜ KAZIK					
	UZUNLUK/ÇAP (L/D)			ARA MESAFE (S:2m)			ARA MESAFE (S:4m)		
	10	8,57	5,71	10	8,57	5,71	10	8,57	5,71
Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	515,81	510,02	512,52	519,42	509,46	513,11	515,04	508,97	512,91
Düşey Yer Değiştirme (m) ×10 <sup>-3</sup>	85,27	73,40	74,05	91,75	71,80	72,68	90,28	69,92	72,10
Kayma Deformasyonu (%)	3,92	4,46	2,63	3,65	4,41	2,28	2,65	4,34	1,9
Toplam Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	944,01	944,56	944,39	943,83	944,37	944,23	943,72	944,37	944,15
Deforme Olmuş Ağ (m) ×10 <sup>-3</sup>	85,64	73,40	74,57	91,16	72,64	73,35	90,70	70,37	71,81

Tablo 6: Kuru yüksek plastik kil içerikli zeminin 578 kPa yük altında analiz sonuçları

Durum	TEKİL KAZIK			ÜÇLÜ KAZIK					
	UZUNLUK/ÇAP (L/D)			ARA MESAFE (S:2m)			ARA MESAFE (S:4m)		
	10	8,57	5,71	10	8,57	5,71	10	8,57	5,71
Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	510,89	508,99	509,26	507,27	509,07	506,8	-507	508,65	507,83
Düşey Yer Değiştirme (m) ×10 <sup>-3</sup>	39,78	34,03	35,99	44,21	34,67	37,41	42,97	33,97	36,94

<b>Kayma Deformasyonu (%)</b>	1040	749,93	720,77	707,03	663,30	597,78	635,89	698,98	594,74
<b>Toplam Gerilme (kN/m<sup>2</sup>)</b>	640,33	603,14	681,16	677,94	630,25	675,7	662,71	610,56	674,05
<b>Deforme Olmuş Ağ (m) ×10<sup>-3</sup></b>	39,78	34,03	35,99	44,21	34,67	37,41	42,97	33,97	36,94

- Bu sonuçlar neticesinde killi zemin içerisine L/D oranı 8,57 olan tek kazık yerleştirildiğinde kazıksız duruma göre zemindeki düşey yer değiştirme %30,49 azalma göstermiştir. Ayrıca L/D oranı 8,57 için kazıklar arası mesafenin 2 m olduğu üç kazık (grup kazık) halinde zemindeki düşey yer değiştirme, kazıksız duruma göre %32 azalma göstermiştir. L/D oranı 8,57 için kazıklar arası mesafenin 4m olduğu üç kazık (grup kazık) durumunda ise kazıksız duruma göre zemindeki düşey yer değiştirme %33 tür.
- Killi zeminin kuru olduğu aynı koşullar altında zemin içerisine tek kazık yerleştirildiği durumda iken zemindeki düşey yer değiştirme L/D oranı 10 iken 39,78 mm, L/D oranı 8,57 iken 34,03 mm, L/D oranı 5,71 iken 35,99 mm'dir.
- Yeraltı su seviyesinin olmadığı ve kazıklar arası mesafenin 2 m olduğu üçlü kazık (grup kazık) durumda zemindeki oturma L/D oranı 10 iken 44,21mm, L/D oranı 8,57 iken 34,67 mm ve L/D oranı 5,71 iken 37,41 mm'dir.
- Yeraltı su seviyesinin olmadığı kuru zemin için, kazıklar arası mesafenin 4m olduğu üçlü kazık (grup kazık) olduğu durumda zemindeki oturma, L/D oranı 10 iken 42,97 mm, L/D oranı 8,57 iken 34,28 mm ve L/D oranı 5,71 iken 36,94 mm' dir.
- Killi zeminin kuru olduğu (yeraltı su seviyesinin olmadığı) durum için zeminde en iyi düşey yer değiştirme L/D oranı 8,57 olan zemin içerisine yerleştirilen tek kazık olduğu durumdur.
- Killi zeminlerde düşey yer değiştirme zemin kuru halde iken, zeminin suya doygun haline göre daha azdır.
- Zemin kuru halde iken tekil kazık, kazıklar arası mesafenin 2m olduğu durum ve kazıklar arası mesafenin 4m olduğu durum için tüm düşey yer değiştirme değerleri birbirine çok yakındır.
- Suyun olmadığı (kuru) killi zemindeki L/D oranı 8,57 olan tek kazık durumu için düşey yer değiştirme, suya doygun killi zemin için L/D oranı 8,57 olan en iyi durumdaki tekil kazıktaki yer değiştirmeye göre %53,63 daha iyidir.
- Suyun olmadığı (kuru) killi zemindeki L/D oranı 8,57 olan üçlü (grup) kazık durumu ve kazıklar arası mesafenin 4m olduğu durum için düşey yer değiştirme, suya doygun killi zemin için L/D oranı 8,57 olan ve kazıklar arası mesafenin 4m olduğu en iyi durumdaki üçlü (grup) kazıktaki yer değiştirmeye göre, yaklaşık %51 daha iyidir.
- Grup kazık etkisi incelendiğinde, kazıklar arası mesafenin S:4m olduğu durumda düşey yer değiştirme kazıklar arası mesafenin S:2m olduğu duruma göre daha azdır. Daha iyi sonuç göstermiştir.

## TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde kullanılan bazı parametreler Tünges Mühendislik firmasından temin edilen geoteknik rapor sonuçlarından elde edilmiştir. İlgili firmaya yardımlarından dolayı teşekkür ederiz.

## V. KAYNAKLAR

- [1] Alkhorshid, N.R, "Analysis of Geosynthetic Encased Columns in Very Soft Soil". Tese de Doutorado, Publicação G.TD-133/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p., 2017
- [2] Hasan, M. "Analytical methods for predicting load-carrying capacity of granular piles—A Review" 7th Indian Young Geotechnical Engineers Conference, 2019.
- [3] Hong, Y. S., Wu, C. S., Kou, C. M., & Chang, C. H. "A numerical analysis of a fully penetrate encased

granular column." Geotextiles and Geomembranes, 45(5), 391-405, 2017.

[4] Hosseinpour, I., Soriano, C., & Almeida, M. S. "A comparative study for the performance of encased granular columns", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(2), 379-388, 2019

[5] Khabbazian, M., Kaliakin, V. N., & Meehan, C. L. "Numerical study of the effect of geosynthetic encasement on the behavior of granular columns". Geosynthetics International, 17(3), 132-143, 2010

[6] Khan, M., Hussain, S., Naseer, S., Jamil, S. M., & Ali, L. A. "Comparative Study of Ground Improvement by Lime and Granular.", In 8 th INTERNATIONAL CIVIL ENGINEERING CONGRESS, (p. 281), 2016

[7] Mohapatra, S. R., Rajagopal, K., & Sharma, J. "3-Dimensional numerical modeling of geosynthetic-encased granular columns", Geotextiles and Geomembranes, 3(45), 131-141, 2017.

- [8] Mohapatra, S. R., Rajagopal, K., & Sharma, J. "Direct shear tests on geosynthetic-encased granular columns". *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 396-405, 2016.
- [9] Orekanti, E. R., & Dommaraju, G. V. "Load-settlement response of geotextile encased laterally reinforced granular piles in expansive soil under compression", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(3), 1-8, 2019
- [10] Sharma, R. S., Kumar, B. P., & Nagendra, G. Compressive load response of granular piles reinforced with geogrids. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(1), 187-192., 2004
- [11] Sohaib, N., Sarfraz Faiz, M., & Sami, M. F. "Experimental Study on Improvement of Soft Clay Using Sand Columns.", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 14, 391-401, 2020.
- [12] Bayram, A. "Hava alanları pist dolgularının geosentetik malzemeler kullanılarak güçlendirilmesi", Yüksek lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ss:44-45, 2006
- [13] Çelik, S. Comparison of Mohr-Coulomb and hardening soil models' numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling. *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(4), 95-102, 2017.
- [14] PLAXIS-2D USER MANUAL, "PLAXIS 2D Version 8 Material Models Manual", 2021
- [15] Kahlström, M. "PLAXIS 2D comparison of Mohr-Coulomb and soft soil material models", Master of Science Program Luleå University of Technology., 2013.
- [16] Naseer, S., Faiz, M. S., Iqbal, S. ve Jamil, S. M. "Laboratory and numerical based analysis of floatings and columns in clayey soil." *International Journal of Geo-Engineering*, 10(1), (ss:8), 2019.
- [17] Çalık, Ö. "Donatılı duvarların (zeminlerin) sayısal analizi" Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ss:46, 2018
- [18] Günaydın, O., Alpyıldız, S., Akkuş, Ç. "SP (Kötü Derecelenmiş Orta-İnce Kum) Zeminlerde Kesme Hızının Kesme Direnci Parametreleri Üzerine Etkisi." *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(1), (ss:7), 2004
- [19] Evirgen, B., Onur, MI, Tuncan, M., & Tuncan, A. Doymuş taneli zeminlerin serbest basınç dayanımı ve geçirgenliği üzerindeki donma etkisinin belirlenmesi. *GEOMATE Dergisi*, 8 (16), 1283-1287, 2015.
- [20] Töremiş, E. İlke. "Geotekstiller Ve Plaxis Sonlu Elemanlar Programı.", Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003, (ss:47)