

TEMEL ETRAFINA YERLEŞTİRİLEN MİKRO KAZIKLARIN ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MICROPILES PLACED AROUND THE FOUNDATION ON SOIL IMPROVEMENT

Rahim Khan NASERY¹, Mesut GÖR²
Kübra SERTKAYA³, Ahmet ALTUNBEY⁴

ÖZET

Nüfusun artması ile çevresel ve ekonomik açıdan önemli olan alanlar inşaat amaçlı kullanılmaktadır. Buna alternatif olarak mevcut yapıların üzerine yeni katların yapılması önerilmektedir. Ancak, mevcut yapıların üstüne ek katların yapılması, yapı temellerine etki eden yüklerin artmasına sebep olmaktadır. Bu durumlarda, temel sisteminin ve zemin koşullarının bu ek yükleri taşıyabilmesi için güçlendirilmesi gerekmektedir. Zemin güçlendirme tekniklerinden biri mikro kazıkların kullanımudur. Mikro kazıklar, çoğunlukla çelik malzemesinden imal edildiğinden dolayı kazık sayısı arttıkça proje maliyetleri de artmaktadır. Bu çalışma kapsamında, kazık sayısı ve kazıklar arası mesafenin zeminin taşıma gücü ve oturma değerleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve dolayısıyla daha ekonomik tasarımların yapılması amaçlanmıştır. Çalışmalar kapsamında, deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmış olup elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Düşey yükleme deneyleri, $D_r = \%40$ rölatif zemin sıkılığında kazıksız radye temelini iki karşılıklı kenarına ve dört kenarına 4,50 cm'lik mesafe ile mikro kazıklar yerleştirilerek oluşturulan kazık kombinasyonları üzerinde yapılmıştır. Sonuç olarak, kazıklar arası mesafe azaldıkça, kazık sayısı ve kazık çakılan kenarlarının sayısı arttıkça taşıma gücünün arttığı ve belirli bir yük anı esas alındığında ise oturma değerlerinin azaldığı görülmüştür. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda nümerik ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Mikro kazıklar, sonlu elemanlar, taşıma gücü, kazık aralığı, oturma

¹ Doktora Öğrencisi, Fırat Üniv. Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl. Elazığ/Türkiye, rahim.k.nasery@gmail.com (Sorumlu yazar)

² Doç. Dr., Fırat Üniv. Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl. Elazığ/Türkiye, mgor@firat.edu.tr

³ Yük. İnşaat Müh. Fırat Üniv. Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl. Elazığ/Türkiye, kubrasrtky@gmail.com

⁴ Yüksek Lisans Öğrencisi, Fırat Üniv. Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl. Elazığ/Türkiye, ahmetaltunbey@gmail.com

ABSTRACT

As the population grows, environmentally and economically important areas are used for construction. As an alternative, building of new floors on top of existing structures is proposed. However, additional floors causes an increase in the loads acting on the foundations. In these cases, the foundation system and the ground need to be retrofitted to withstand these additional loads. One of the ground improvement techniques is using of micropiles. Since micropiles are mostly made of steel material, project costs increase as the number of piles increases. This study aims determining the effect of the number and the distance between the piles on the soil bearing capacity and thus making more economical designs. Experimental and numerical studies were carried out and the results were compared. Vertical loading tests were carried out at a relative soil density of $D_r = 40\%$ on one without pile and pile combinations formed by placing micropiles with a distance of 4.50 cm on two opposite sides and four sides of a raft foundation. As a results, it was observed that the bearing capacity increases when the number of piled sides increases and the distance between the piles decreases and the settlement values decreased when a particular load moment was taken as a basis. As a result of the comparisons, numerical and experimental results were found to be consistent with each other.

Keywords: Micropiles, finite elements method, bearing capacity, pile spacing, settlement

1. GİRİŞ

Modernleşme ve büyük kentlere göçlerin hızla artmasıyla birlikte yüksek ve geniş yapıların inşasında belirgin bir artış yaşanmıştır. Yapıların büyümesi ve zemine aktarılan yüklerin artması, temel mühendisliğinde çeşitli gelişmelere neden olmuştur. Yapının inşa edileceği zemin koşulları çeşitlilik göstermekte olup, bu durum en uygun temel sisteminin seçilmesini daha da önemli hale getirmiştir. Yapının inşa edildiği zemin, taşıma gücü, oturma, sıvılaşma gibi problemler meydana gelmeden yapıdan aldığı yükü taşıyabilecek karakteristik özelliklere sahipse yüzeysel temeller tercih edilirken, statik veya dinamik durumda bu problemlerden biriyle karşılaşılabilir bir zemin üzerinde inşa edilen yapılarda ise derin temeller tercih edilmektedir (Korkmaz, 2019). Temellerin ana fonksiyonu mevcut yapı yüklerini güvenli ve ekonomik bir şekilde zemine aktarmaktır. Özellikle zayıf zeminlerde inşa edilmesi gereken yüksek katlı ve bina önem katsayısı yüksek binalarda temel sistemlerinin tasarımı oldukça kritik bir öneme sahiptir (Nguyen vd., 2013). Diğer yandan, nüfus artışı ve uygun zeminlerin her yerde bulunmaması nedeniyle, sel ve heyelan riski taşıyan tehlikeli bölgeler, tarım arazileri gibi çevresel açıdan önemli alanlar da inşaat amaçlı kullanılmaktadır. Bu tür inşaat uygulamalarının hem güvenli olmadığı hem de çevreye zarar verdiği bilinmektedir. Bu durumlara alternatif olarak, mevcut binaların üzerine yeni katlar eklenmesi, yeni binaların inşasının önüne geçilmesi için bazen uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Ancak, mevcut binaların üstüne ek katlar yapılması, bina temellerine etki eden yüklerin artmasına neden olacaktır. Temel sisteminin ve zeminin bu ilave yükleri karşılayabilmesi için güçlendirilmesi gerekmektedir (El Kamash ve Han, 2017). Bu amaçla, etki eden bu yüklerle karşı zeminin taşıma kapasitesinin artırılması için çeşitli malzemeler ve yöntemler kullanılmaktadır. Geçmişten beri kullanılan yöntemlerde, iyileştirilmesi gereken zemin, istenen derinliğe kadar kazılarak güçlendirme elemanları yatay olarak yerleştirilip sonra da kazılan yer tekrar doldurulmaktadır. Ancak, bu yatay güçlendirme yönteminin sahada uygulanması her zaman mümkün olamamaktadır (Mandal ve

Manjunath, 1995). Bu nedenle, saha koşulları ve mevcut temellerin güçlendirilmesinde kullanılabilecek yatay olmayan iyileştirme tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, içi boş çelik borular, PVC borular, bambu kazıklar, çelik kazıklar, galvanizli demir veya alüminyum kazıklar gibi çeşitli malzemelerin güçlendirme malzemesi olarak kullanılması, farklı araştırmacılar tarafından incelenmiş ve önerilmiştir (Moradi ve Mohsen, 2021).). Yatay olmayan iyileştirme tekniklerinden biri de mikro kazıkların kullanımınıdır. Mikro kazıklar, 1952'de İtalya'da uygulanmaya başlanmıştır. Mikro kazıklar zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve oturmaları azaltmak için birçok zemin iyileştirme uygulamasında etkin bir şekilde kullanılmıştır (Bruce vd., 1997). Çapı 150 ila 300 mm arasında olan bu kazıklar, komşu yapılara, zemine ve çevreye rahatsızlık vermeyecek şekilde yerleştirilebilmektedir. Mikro kazık makine ve ekipmanlarının küçük boyutları, fore kazık makinelerinin giremediği kısıtlı alanlarda mikro kazık imalatını kolaylaştırmaktadır (Malik vd., 2021). Bruce vd. (1997) yaptıkları çalışmada mikro kazıkların tarihsel gelişimi, sınıflandırılması, kullanım amaçları ve uygulama alanlarıyla ilgili detaylı bilgiler sunmuştur. Günümüzde farklı kazık malzemelerinin kullanımı giderek artmaktadır. Cam takviyeli plastik (Fiber-Reinforced Plastic-FRP) ve çelik malzemelerden üretilmiş kazık gruplarının statik yükler altındaki davranışları deneysel ve nümerik olarak incelendiğinde, FRP ile üretilmiş kazıkların çelik kazıklardan daha fazla yük taşıdığı ve bu kazık gruplarında oturma değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür (Gör, 2019). Malik vd. (2021), yaptıkları deneysel çalışmalarda, radye temelin çevresine temel kenarından farklı uzaklıklarda mikro kazıklar yerleştirilerek narinlik oranını, optimum uzunluğu ve çapı, mikro kazıkların temelden olan optimum uzaklığını ve mikro kazıkların zeminin oturma değerleri ile yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, mikro kazıkların zeminin oturma ve yük taşıma kapasitesi üzerinde çok etkili olduğunu ve iyileştirmenin %76'ya kadar çıktığını belirtmişlerdir. Zeminin taşıma kapasitesinin, mikro kazıkların çapı ve uzunluğunun artması ve temelin kenarından olan uzaklığının azalmasıyla arttığı görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda, zeminin yük taşıma kapasitesi değerinin maksimuma ulaşmasını sağlayan farklı parametrelerin optimum değerleri; kazık uzunluğunun temel genişliğine oranı ($L/b = 2$), mikro kazığın çapı ($dk = 20$ mm), mikro kazıkların temelden olan optimum uzaklık oranı ($ED/b = 0,30$) ve mikro kazıkların narinlik oranı ($L/dk = 20$) olarak belirlenmiştir (Bhattacharjee vd., 2011; Malik vd., 2021; Sing ve Sing, 2022). Mikro kazıkların zeminin taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yapılan hem deneysel hem de nümerik birçok çalışma bulunmaktadır. Babu vd. (2004), yaptıkları deneysel ve nümerik çalışmada, temel zeminin taşıma kapasitesini artırmak amacıyla 100 mm çapında ve 4 m uzunluğunda mikro kazıkları 70 derecelik bir açıyla bina temel sisteminin etrafına tek tek yerleştirip deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sahada gerçekleştirilen bu çalışmanın verileri, sonlu elemanlar analizi yapan PLAXIS 2D paket programı kullanılarak nümerik olarak analiz edilmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının benzer olduğu görülmüştür. Murthy vd. (2002), yaptıkları nümerik çalışmada, mikro kazıkların eğimi arttığında temelin taşıma kapasitesinin de arttığını göstermişlerdir. Mikro kazıkların ucunun temel seviyesinde sabitlenmesi, taşıma kapasitesinde önemli ölçüde artış sağlayabilmektedir. Ayrıca, mikro kazıklar tarihi binaların güçlendirilmesinde dünya genelinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Mittal ve Babu (2018), Hindistan'da Kalküta Yüksek Mahkemesi binasının güçlendirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yumuşak bir zemin profili üzerine inşa edilmiş olan binada, 2014 yılında temellerin oturması nedeniyle üst yapıda çatlaklar oluşmuş ve bu durum binaya ciddi zararlar vermeye başlamıştır. Bu sorunları çözmek amacıyla, öncelikle sondaj çalışmaları yapılarak zeminin



özellikleri belirlenmiş ve ardından PLAXIS 2D paket programı kullanılarak zemin koşulları ve bina modellenip analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, güçlendirme yapılmadan önce 240 kPa gerilmeye karşı temelde 23,0 cm oturma meydana gelmiş ve zemin göçme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Mikro kazıklarla güçlendirme yapıldıktan sonra ise 400 kPa gerilmeye karşı sadece 3,60 cm oturma meydana gelmiş ve temelin çok daha fazla yük taşıyabileceği görülmüştür.

Bu çalışmada, bir radye temelin iki karşılıklı kenarına ve dört kenarına mikro kazıklar yerleştirilerek mikro kazıkların taşıma gücü ve oturma değerleri üzerindeki etkileri hem deneysel hem de nümerik olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, kazıklar arası mesafenin azaldığı ve kazık sayısının ve kazık çakılan cephelerin sayısının arttığı durumlarda taşıma gücünün arttığı ve belirli bir yük anı esas alındığında oturmaların azaldığı gözlemlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, $D_r = 40\%$ rölatif sıklığı olan kum zeminde kazıksız (sadece radye), temelin iki karşılıklı kenarı ve dört kenarında 3x3 ve 6x6 kazık kombinasyonları oluşturulacak şekilde mikro kazıklar yerleştirilerek düşey olarak yüklenmiş olup taşıma güçleri ve oturma değerleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan nümerik analizlerde PLAXIS 3D v21 paket programı kullanılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylerde kullanılan kum, dikey kovalı elevatöre aktararak esnek bir plastik boru yardımıyla deney tankına 10,0 ila 13,0 cm yükseklikten katmanlar halinde serilmiştir. Kalınlığı 11,0-12,0 cm olan katmanların yüksekliği sıkıştırma işleminden sonra 10,0 cm'ye düşmüştür. Deney tankına yerleştirilen kum zeminin yüksekliği 90,0 cm'dir. Deneylerde $D_r = 40\%$ rölatif sıklık için deney tankına yerleştirilen kumun tüm yüzeyi 1,0 sn boyunca vibrasyon cihazı ile sıkıştırılmıştır. Bu sıklık durumu ve vibrasyon işlemi daha önce yapılan ön deneyler ile doğrulanmıştır. En üstteki kum zemin yüzeyi, bir su terazisi kullanılarak hassas bir şekilde düzleştirilmiştir. Ardından, deney tankının ortasına bir radye plaka yerleştirilmiş ve buna göre teraziye alınmıştır. Temelin etrafına yerleştirilen kazıkların hizalanmasını ve temel kenarından eşit uzaklıkta olmasını sağlamak için ise kılavuzlar kullanılmıştır. Kılavuzda açılan dairesel kazık yerlerinin merkezinden temel kenarına olan mesafe 4,5 cm'dir (Malik et al. 2021). Kazıkların arasındaki mesafenin değişmemesi ve kazıkların zemin yüzeyine dik çakılmasını sağlamak için 10,0 cm yüksekliğinde kılavuz başlıklar ve özel çakma aparatı kullanılmıştır. $D_r = 40\%$ rölatif sıklığa sahip zemin profili üzerinde yapılan bu çalışmada, önce sadece radye (kazıksız) üzerinde deneyler yapılmıştır. Daha sonra farklı kazık sayıları ve kazıklar arası mesafe ($S=3,0\text{cm}$ ve $S=7,5\text{cm}$) değişimi göz önünde bulundurularak, radye temelin karşılıklı iki kenarı ve radye temelin tüm çevresine mikro kazıklar yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. İstenilen kazık kombinasyonları oluşturulduktan sonra, radye plağın karşılıklı diyagonal köşelerine iki adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir. Daha sonra, deney öncesi oturma ve yük değerleri programda sıfırlanarak düşey yükleme başlatılmış ve yük-oturma eğrileri elde edilmiştir. Düşey yükleme deneyleri, radye başlığında 35,0 mm oturma meydana geldiğinde durdurulmuştur. Oluşturulan modeller Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deney sistemi ve deneylerde kullanılan modeller

3.1. Deneysel Bulgular

$D_r = 40\%$ sıklığındaki kum zeminde, mikro kazıksız (sadece radye) ve çelik radye temelin iki karşılıklı kenarı ve dört kenarına 4,5 cm'lik mesafe ile mikro kazıklar yerleştirilerek oluşturulan kazık kombinasyonları üzerinde düşey yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Düşey yükleme deneyleri, radye plaka 35,0mm oturma yapınca sonlandırılmıştır. Düşey yükleme deneyleri sonucunda, farklı kazık sayılarının, kazıklar arasındaki mesafe değişiminin ve farklı kazık kombinasyonlarının zemin güçlendirmesi, temelin taşıma kapasitesi ve oturma değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Düşey yükleme deneyleri neticesinde bulunan taşıma gücü değerleri Tablo 1'de ve belirli bir yük anı esas alındığında oturma değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Deneyler sonucunda, kazıklar arası mesafe azaldıkça, kazık sayısı ve kazık çakılan cephelerin sayısı arttıkça taşıma gücünün arttığı ve belirli bir yük anı esas alındığında ise oturma değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Tablo 1. Farklı kazık kombinasyonları için taşıma gücü değerleri (kN)

Kazık kombinasyonu	Sadece radye	2 Karşılıklı kenar	4 Kenar
Kazıksız	7,10	-	-
3x3	-	8,03	9,82
6x6	-	8,68	12,42

Tablo 2. Belirli yük durumlarındaki oturma değerleri (mm)

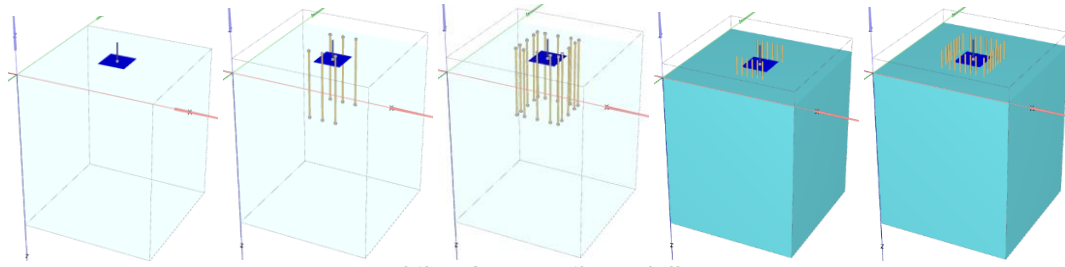
Kazık kombinasyonu	Sadece radye (kazıksız)			2 Karşılıklı kenar			4 Kenar		
	2 kN	4 kN	6 kN	2 kN	4 kN	6 kN	2 kN	4 kN	6 kN
Kazıksız	2,15	5,96	12,00	-	-	-	-	-	-
3x3	-	-	-	1,79	5,24	10,32	1,77	4,93	9,22
6x6	-	-	-	1,84	5,17	9,48	1,48	3,97	7,39

4. NÜMERİK ÇALIŞMALAR

4.1. Geometrik Model

Geometrik model, PLAXIS sonlu elemanlar programında üç boyutlu, düzlem şekil değiştirme koşulları altında ve 15 düğümlü üçgen elemanlarla modellenip oluşturulmuştur. Geometrik modelin genişliği 750 mm ve toplam zemin yüksekliği 900 mm'dir. Analizlerde, farklı mikro kazık kombinasyonları için geometri yeniden oluşturulmuştur. Şekil 2'de, farklı kenarlarda ve kazık sayısı ile oluşturulan modellerin geometrisi görülmektedir.





Şekil 2. Geometrik modeller

4.2. Malzeme Özellikleri

Model Zemin

Analizlerde, kum zeminin drenaj davranışı Mohr-Coulomb (MC) modeli ile modellenmiştir. MC zemin modeli, zemin analizlerinde en yaygın kullanılan malzeme modellerinden biridir (Potts ve Fourie, 1984; Day ve Potts, 1993; Grande vd., 2002; Bilgin ve Erten, 2009; Tan ve Lu, 2009). MC zemin modeli elasto-plastik bir zemin modeli olup bu zemin modelinde farklı zemin türleri, elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) olmak üzere 5 farklı parametre ile modellenmekte ve analiz edilmektedir. Nümerik çalışmalarda kullanılan MC model parametrelerinden elastisite modülü hariç diğer tüm değerler literatürden alınmıştır (Gör, 2019). Model zemin ($D_r = \%40$) için MC parametreleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Model zemin için MC model parametreleri ($D_r = \%40$)

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Kohezyon	c	kN/m^2	0,50
Birim hacim ağırlığı	γ_n	kN/m^3	15,40
Kayma mukavemet açısı	ϕ	(°)	45,40
Dilatasyon açısı	ψ	(°)	15,40
Elastisite modülü	E	kN/m^2	3000
Poisson oranı	ν	-	0,25

Model Temel

Analizlerde kullanılan model temel plakası, plaka (plate) eleman ile modellenmiştir. Plaka elemanın boyutları ($150 \times 150 \times 25 \text{mm}$) olup deneylerde kullanılan temel boyutları ile aynı olacak şekilde seçilmiştir. Analizlerde model temel için çelik malzemenin elastisite modülü, $E = 200 \text{ GPa}$ olarak kullanılmıştır (Gör, 2019). Nümerik çalışmada kullanılan model temel parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Model temel parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Eksenel rijitlik	EA	kN/m	700000
Eğilme rijitliği	EI	kN/m	36,460
Kalınlık	d	m	0,025

Model Kazıklar

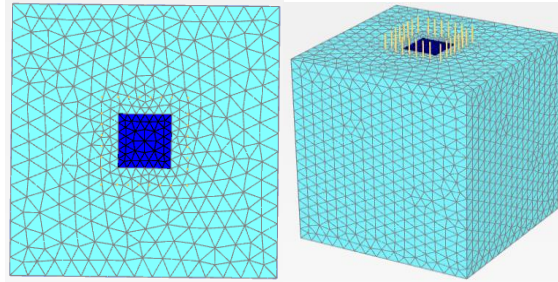
Analizde kullanılan model kazıklar gömülü kiriş elemanı (embedded beam) ile modellenmiş ve özelliği olarak çelik değerleri girilmiştir ($E=200$ GPa). Model kazık elemanlarının çapı 10,0mm olup deneylerde kullanılan model kazığın çapı ile aynı alınmıştır. Analizde çelik malzeme için arayüz elemanı kullanılmış ve PLAXIS tarafından önerilen Rintter= $2/3$ değeri kullanılmıştır. Model kazık parametreleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Model kazık parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Eksenel rijitlik	EA	kN/m	28000
Eğilme rijitliği	EI	kN/m	0,250
Kalınlık	d	m	0,010

Sonlu Elemanlar Ağı

PLAXIS'te oluşturulan modeli sonlu elemanlara bölme işlemi program tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmekte ve istenilen bölgelerin mesh yoğunluğu manuel olarak artırılarak daha hassas ve gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir. Plaxis paket programında, çok kaba, kaba, orta, hassas ve çok hassas olmak üzere 5 farklı sonlu eleman ağ (mesh) yapısı bulunmaktadır (Keskin, 2019). Analizlerde daha doğru sonuçlar veren hassas sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır. Şekil 3'de programda oluşturulan iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar ağı verilmiştir.



Şekil 3. Sonlu elemanlar ağı

4.3. Üç Boyutlu (3D) Nümerik Analizler

Analizde çözüm iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, zemin ağırlığıyla oluşan başlangıç gerilmeler oluşturulmuş olup ikinci adımda ise kazık ve yük etkinleştirilerek plastik çözüm gerçekleştirilmiştir.

PLAXIS Sonlu Elemanlar Programı Analiz Sonuçları

Kum zemin, radye ve model kazıklar yukarıda belirtilen parametreler kullanılarak PLAXIS 3D sonlu elemanlar programı ile modellenmiştir. Modellenen kombinasyonlara düşey yük olarak deneysel yük-oturma grafiklerinden elde edilen toplam taşıma kapasitesi değerleri uygulanmıştır. Yapılan nümerik analizlerden elde edilen toplam taşıma gücü değerleri Tablo 6'da, belirli yüklerdeki oturma değerleri Tablo 7'de ve yerleştirilen kazıkların temelinde toplam taşıma gücüne etkisi Şekil 4'te verilmiştir. Analizlerden elde edilen veriler incelendiğinde, mikro kazık sayısı, mikro kazık yerleştirilen kenarların sayısı arttıkça ve



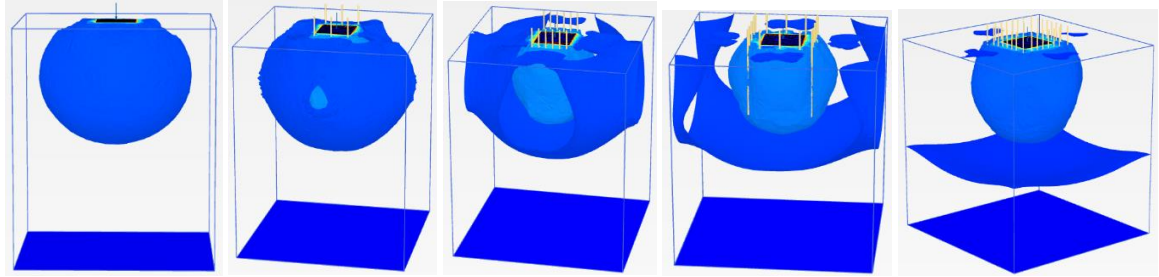
kazıklar arası mesafe azaldıkça taşıma gücünün arttığı ve belirli bir yük anı esas alındığında ise oturma değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Tablo 6. Farklı kazık kombinasyonları için taşıma gücü değerleri (kN) (Plaxis 3D)

Kazık kombinasyonu	Radye	2 Karşılıklı kenar	4 Kenar
Kazıksız	7,05	-	-
3x3	-	8,03	9,80
6x6	-	8,68	12,40

Tablo 7. Belirli yükler altındaki oturma değerleri (mm) (Plaxis 3D)

Kazık kombinasyonu	Sadece radye			2 Karşılıklı kenar			4 Kenar		
	2 kN	4 kN	6 kN	2 kN	4 kN	6 kN	2 kN	4 kN	6 kN
Kazıksız	4,52	9,90	15,95	-	-	-	-	-	-
3x3	-	-	-	4,48	9,83	15,61	4,35	9,81	15,11
6x6	-	-	-	4,22	9,50	14,18	4,18	8,79	13,44



Şekil 4. Toplam deplasman dağılımları ve yüklemeye bağlı olarak etkilenen bölgeler

5. SONUÇLAR

Radye temelin farklı kenarlarına yerleştirilen mikro kazıklar, toplam taşıma gücünü artırmıştır. Dr = %40 zemin sıkılığında yapılan deneylerde, temelin iki karşılıklı kenarına mikro kazık yerleştirildiğinde, 3x3 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında sırasıyla %8,50 ve %9,70 oranında taşıma gücünde artış gözlemlenmiştir. Temelin dört kenarına mikro kazık yerleştirildiğinde ise taşıma gücünde, 3x3 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında sırasıyla %26,80 ve %42,70 oranında artış sağlanmıştır.

Mikro kazık kombinasyonlarının oturma değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, mikro kazık sayısının, mikro kazık yerleştirilen kenarların sayısının artırılması ve kazıklar arasındaki mesafenin azaltılması durumunda oturma değerlerinin azaldığı görülmüştür. 2 kN yük altında kazıksız model ile temelin iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirilen 3x3 kazık modelinin oturma değerleri karşılaştırıldığında, oturma değerlerinde %21,50'e kadar; 6x6 kazık modelinde ise %45'e kadar bir azalma gözlemlenmiştir. 4 kN yük altında kazıksız model ile temelin iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirilen 3x3 kazık modelinin oturma değerleri karşılaştırıldığında, oturma değerlerinde %20,8'e kadar; 6x6 kazık modelinde ise %50,10'e kadar bir azalma gerçekleşmiştir. 6 kN yük altında kazıksız model ile temelin iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirilen 3x3 kazık modelinin oturma değerleri karşılaştırıldığında, oturma değerlerinde %30,15'e kadar; 6x6 kazık modelinde ise %62,37'ye kadar bir azalma görülmüştür.

Nümerik sonuçlarda da deneysel sonuçlara benzer şekilde, mikro kazık sayısının, mikro kazık yerleştirilen kenarların sayısının artması ve kazıklar arası mesafenin azalması durumunda oturma değerlerinin azaldığını göstermektedir. 2 kN yük altında kazıksız model ile temelin iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirilen 3x3 kazık modelinin oturma değerleri karşılaştırıldığında, oturma değerlerinde %7,11'e kadar; 6x6 kazık modelinde ise %8,10'e kadar bir azalma gözlemlenmiştir. 4 kN yük altında kazıksız model ile temelin iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirilen 3x3 kazık modelinin oturma değerleri karşılaştırıldığında, oturma değerlerinde %4,20'ye kadar; 6x6 kazık modelinde ise %12,63'e kadar bir azalma gerçekleşmiştir. 6 kN yük altında kazıksız model ile temelin iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirilen 3x3 kazık modelinin oturma değerleri karşılaştırıldığında, oturma değerlerinde %12,40'e kadar; 6x6 kazık modelinde ise %18,67'ye kadar bir azalma görülmüştür.

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, deneysel sonuçların PLAXIS 3D sonlu elemanlar programı ile elde edilen nümerik sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Düşey yükleme deneyleri sırasında, radye temelin altından farklı kenarlarına kumun hareket etmesinin engellenmesi, zemin taşıma gücünü artırır. Deney sırasında 3x3 ve 6x6 kazık kombinasyonları oluşturularak bu kazıkların düşey yüklemeye dolaylı olarak temel kenarlarında oluşacak kabarmalara etkisi gözlemlendiğinde kazık ve kazık yerleştirilen kenarların sayısı arttıkça kazıkların dış kısmında kalan kum zeminde hareketlenmelerin azaldığı görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Çalışmaya katkılarından dolayı "Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Koordinasyonu Birimine (Altyapı Projesi, Proje No: MF.14.19)" teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Babu, G.L.S., Murthy, B.S., Nataraj, M.S. (2004), "Bearing Capacity Improvement Using Micropiles a Case Study", GeoSupport Conference, Orlando, Florida, United States.
- Bhattacharjee, A., Mittal, S., Krishna, A.M. (2011), "Bearing Capacity Improvement of Square Footing by Micropiles", International Journal of Geotechnical Engineering, 5: 113-118.
- Bilgin, Ö., Erten, M.B. (2009), "Analysis of Anchored Sheet Pile Wall Deformations", In: Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support (GSP 187), International Foundation Congress and Equipment Expo, Florida; p.137-44.
- Bruce, D.A., Dimillio, A.F., Juran, D.I. (1997), "Micropiles: The State of Practice, Part 1: Characteristics, Definitions and Classifications", Ground Improvement, 1, 25-35.
- Day, R.A., Potts, D.M. (1993), "Modelling Sheet Pile Retaining Walls", Comput Geotech, 15(3):125-43.
- El Kamash, W., Han, J. (2017), "Numerical Analysis of Existing Foundations Underpinned by Micropiles", Int Journal Geomech 17(6):1-16.
- Gör, M. (2019), "Kazıklı Radye Temellerin Statik Düşey Yükler Etkisi Altında Modellenmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Grande, L., Soreide, O.K., Tefera, T.H. (2002), "Large Scale Model Testing on the Moment Distribution and Deformation Behaviour of a Sheet Pile Wall", In: 2nd International



- Conference on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering, Zurich, Switzerland, p. 389–94.
- Keskin, M.S. (2009), "Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi", Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Korkmaz, E. (2019), "Çekme Yüğü Altında Çalışan Mikro Kazıklar", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Malik, B.A. Shah, M.Y., Sawant, V.A. (2021), "Influence of Micropile Parameters on Bearing Capacity of Footings", *Environmental Science and Pollution Research*, 28:48274–48283.
- Malik, B. A. Shah, M.Y., Sawant, V.A. (2021), "Plate Load Tests to Analyze the Load-Settlement Response of Shallow Foundations on Sand Beds Reinforced with Micropiles", *Environmental Science and Pollution Research*, 28:67657–67666.
- Mandal, J.N. Manjunath, V.R. (1995), "Bearing Capacity Tests on Strip Footing Resting on Reinforced Sand Subgrades", *Construct Build Mater*, 9:35–38.
- Mittal, S., Babu, S. (2018), "Retrofitting of N–W Corner of Kolkata High Court Heritage Building Through Micropiles and Grouting, *Geotechnics for Natural and Engineered Sustainable Technologies*, pp 329–339.
- Moradi, H. Mohsen, M. (2021), "Experimental Evaluation of the Effects of Structural Parameters, Installation Methods and Soil Density on the Micropile Bearing Capacity", *Int Journal Civil Eng*, 5.
- Murthy, B.R.S., Babu, G.L.S., Srinivas, A. (2002), "Analysis of Bearing Capacity Improvement Using Micropiles", *Ground Improvement* 6, No. 3, 121–128.
- Nguyen, D.D.C., Jo, S.B., Kim, D.S. (2013), "Design Method of Piled-Raft Foundations Under Vertical Load Considering Interaction Effects", *Computers and Geotechnics*, 47, 16–27.
- Potts, D.M., Fourie, A.B. (1984), "The Behavior of a Propped Retaining Wall: Results of a Numerical Experiment", *Geotechnique*, 34(3):383–404.
- Sing, J., Sing, S. (2022), "Upshots of Pin Piles Retrofitting for Existing Structures", *Materials Today: Proceedings*, 48: 1107–1111.
- Tan, Y., Lu, Y. (2009), "Parametric Studies of DDC-Induced Deflections of Sheet Pile Walls in Soft Soils", *Comput Geotech*, 36(5):902–10.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
b	Temel genişliği	C	Kohezyon
d	Kalınlık	d_k	Kazık çapı
E	Elastisite modülü	E_D	Temelden kazık uzaklığı
EA	Eksenel rijitlik	EI	Eğilme rijitliği
S	Kazıklar arası mesafe	ν	Poisson oranı
γ_n	Birim hacim ağırlığı	ϕ	Kayma mukavemet açısı
ψ	Dilatasyon açısı		