YÜZEN KAZIK GRUPLARINDA NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİN GRUP İÇİ DAĞILIMI VE KAZIK ARALIĞININ ETKİSİ

DISTRIBUTION OF NEGATIVE SKIN FRICTION WITHIN FLOATING PILE GROUPS AND THE EFFECT OF PILE SPACING

Orhan GÖK[1], Berna UNUTMAZ[2], Zeynep ÇEKİNMEZ BAYRAM[3]

ÖZET

Yumuşak killer üzerinde kazıklı temellerin çevresine uygulanan sürşarj yüklemeleri, kazıklarda negatif çevre sürtünmesine (NÇS) ve sürüklenme yüküne yol açmaktadır. Bu çalışmada, normal konsolide kil içinde yüzen 5×5 düzenindeki kazık gruplarının NÇS davranışı, PLAXIS 3D yazılımı ile üç boyutlu konsolidasyon analizleri kullanılarak incelenmiştir. Kazıklar gömülü kiriş elemanı ile modellenmiş, çevre sürtünmesi kapasitesi efektif gerilme yöntemiyle derinliğe bağlı tanımlanmıştır. İki farklı kazık aralığı (s/D = 4 ve s/D = 2,5), aynı koşullarda koşulan tekil kazık referans analiziyle karşılaştırılmıştır. Öncelikle, sürüklenme yükünün sayısal çıktılardan ayrıştırılmasında kazık öz ağırlığının ve kazık başındaki ek kuvvet aktarımının hesaba katılması gerektiği gösterilmiştir. Sürüklenme yükü grup çevresinden merkeze doğru sistematik olarak azalmakta ve bu azalma kazık aralığı daraldıkça belirginleşmektedir; grup merkezindeki kazık için grup azaltma katsayısı 0,49'dan 0,14'e düşmektedir. Buna karşılık grup içerisindeki kazık başı oturmaları tekil kazığa kıyasla artmaktadır. İki eğilim aynı mekanizmadan kaynaklandığından, incelenen koşullar altında oturmanın sürüklenme yüküne kıyasla daha kritik bir kullanılabilirlik ölçütü olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: negatif çevre sürtünmesi, nötr düzlem, yüzen kazık, kazık grubu, grup azaltma katsayısı, sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

Surcharge loading placed on soft clays induces negative skin friction (NSF) and a drag load on piles. In this study, the NSF behaviour of 5×5 pile groups floating in a normally consolidated clay layer is investigated through three-dimensional consolidation analyses using PLAXIS 3D. Piles are modelled with embedded beam elements and the shaft resistance capacity is defined as depth-dependent using the effective stress method. Two pile spacings (s/D = 4 and s/D = 2.5) are compared against a single pile reference analysis carried out under identical conditions. It is first shown that both pile self-weight and the additional force transfer observed at the pile head must be accounted for when extracting the drag load from numerical output. The drag load decreases systematically from the group perimeter towards the centre, and this reduction becomes more pronounced as the pile spacing narrows; the group reduction factor for the central pile falls from 0.49 to 0.14. In contrast, pile head settlements within the group increase relative to the single pile. Since both trends arise from the same mechanism, it is concluded that, under the conditions considered, settlement is a more critical serviceability criterion than drag load.

Keywords: negative skin friction, neutral plane, floating pile, pile group, group reduction factor, finite element method

[1] İnşaat Mühendisi, Yüksel Proje, ogok@yukselproje.com.tr (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr. İnşaat Yüksek Mühendisi, Hacettepe Üniversitesi, berna.unutmaz@hacettepe.edu.tr
[3] Dr. İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje, zcekinmez@yukselproje.com.tr

1. GİRİŞ

Yumuşak ve normal konsolide killi zeminler üzerine yapılan yüzey yüklemeleri, geniş bir alanda uzun süreli konsolidasyon oturmalarına neden olmaktadır. Bu tür zeminlerde taşıyıcı sistem yükleri çoğunlukla kazıklı temellere aktarılmakta, ancak kazığın çevresindeki zeminin kazığa göre daha fazla oturması durumunda, kazık ile çevre zemin arasındaki göreli düşey hareket nedeniyle ara yüzey sürtünmesinin yönü değişmektedir. Kazığı taşıyan değil, aksine aşağı doğru çeken bu gerilmeler negatif çevre sürtünmesi (NÇS) olarak adlandırılmakta ve kazık üzerinde derinlikle biriken bir eksenel basınç kuvvetine yol açmaktadır.

NÇS'nin kazık boyunca dağılımı, kazık ile çevre zemin arasındaki göreli düşey deplasmanın yönü tarafından belirlenmektedir. Zeminin kazıktan daha hızlı oturduğu üst bölgede sürtünme aşağı yönlü, kazığın zemine göre daha fazla hareket ettiği alt bölgede ise yukarı yönlüdür. Göreli deplasmanın işaret değiştirdiği derinlik nötr düzlem olarak tanımlanmakta olup, kazıktaki maksimum eksenel kuvvet bu düzleme yakın bir kotta ortaya çıkmaktadır (Fellenius, 1972). Nötr düzlemin konumu yalnızca zemin profiline değil, kazığın uç koşuluna, rijitliğine ve üzerindeki yapısal yüke de bağlıdır; bu nedenle NÇS, kuvvet dengesi ile deplasman uyumunun birlikte sağlanmasını gerektiren bağlaşık bir problemdir.

Konunun önemi ilk saha ölçümlerinden bu yana bilinmektedir. Johannessen ve Bjerrum (1965) ile Bjerrum vd. (1969) tarafından yapılan ölçümler, dolgu altındaki kayaya soketli çelik kazıklarda sürüklenme yükünün kazığın yapısal kapasitesini zorlayacak mertebelere ulaşabildiğini göstermiştir. Endo vd. (1969) ve Bozozuk (1972) tarafından gerçekleştirilen uzun süreli ölçümler ise nötr düzlem kavramını deneysel olarak doğrulamıştır.

Sürüklenme yükünün tasarımda nasıl ele alınacağı konusunda uzun süre görüş ayrılıkları yaşanmıştır. Bu kuvvetin dış yüklerle toplanarak taşıma gücü kontrolüne dâhil edilmesi yönündeki geleneksel yaklaşım Fellenius (2004, 2006) tarafından eleştirilmiş; sürüklenme yükünün bir göçme mekanizması oluşturmadığı, çünkü kazığın göçmeye yaklaşması durumunda göreli deplasmanların yön değiştirerek negatif sürtünmeyi ortadan kaldırdığı vurgulanmıştır. Bütünleşik tasarım yaklaşımında sürüklenme yükü bir yapısal kapasite problemi, buna eşlik eden aşağı yönlü hareket ise bir kullanılabilirlik problemi olarak ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Bu ayrım, uç direncinin sınırlı olduğu yüzen kazıklarda belirleyici hâle gelmektedir.

Kazıkların grup hâlinde bulunması NÇS davranışını tekil kazığa göre önemli ölçüde değiştirmektedir. Grup içindeki kazıklar, çevrelerindeki zemin kütlesinin serbest düşey hareketini kısıtlayarak kazık-zemin arasındaki göreli deplasmanı ve buna bağlı olarak mobilize olan negatif çevre sürtünmesini azaltmaktadır. Perdeleme etkisi olarak adlandırılan bu mekanizma nedeniyle grup içindeki kazıklara etkiyen sürüklenme yükü tekil kazığa göre küçülmekte, ayrıca grup içinde konuma bağlı belirgin bir farklılaşma ortaya çıkmaktadır (Kuwabara ve Poulos, 1989; Chow vd., 1990; Lee vd., 2002).

Perdeleme etkisinin büyüklüğü esas olarak kazık aralığının çapa oranı tarafından denetlenmektedir. Aralık büyüdükçe kazıklar birbirinden bağımsız davranmaya yönelmekte ve grup azaltma katsayısı birim değere yaklaşmaktadır. Santrifüj deneyleri ve üç boyutlu sayısal analizler bu eğilimi tutarlı biçimde doğrulamaktadır (Leung vd., 2004; Comodromos ve Bareka, 2005; Jeong vd., 2004). Bununla birlikte mevcut çalışmaların önemli bir kısmı uca oturan veya uç koşulu belirgin biçimde tanımlanmış kazık gruplarına

odaklanmış; yüzen kazık gruplarında grup içi sürüklenme yükü, nötr düzlem ve oturma davranışının birlikte değerlendirildiği çalışmalar daha sınırlı kalmıştır.

Bu çalışmada, yumuşak kil üzerine yapılan çevre sürşarj yüklemesi altında 5×5 düzeninde yerleştirilmiş yüzen kazık gruplarının NÇS davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. İki farklı kazık aralığı (s/D = 4 ve s/D = 2,5) ile aynı zemin profili, aynı sürşarj geometrisi ve aynı kazık başı yükü altında koşulan tekil kazık referans analizi karşılaştırılmıştır. Köşe, kenar ve iç kazıklara etkiyen sürüklenme yükleri, nötr düzlem derinlikleri, kazık başı oturmaları ve yanal zorlanmalar değerlendirilmiş; grup azaltma katsayısının kazık aralığı ile değişimi belirlenmiştir. Ayrıca sürüklenme yükünün sayısal çıktılardan ayrıştırılmasında kontrol edilmesi gereken iki katkı ortaya konulmuştur.

2. SAYISAL MODEL

2.1. Zemin Profili ve Malzeme Parametreleri

Model, yatayda 80 m × 80 m, düşeyde 50 m boyutlarında oluşturulmuştur. Zemin profili üstte 2 m kalınlığında dolgu tabakası, altında 36 m kalınlığında yumuşak kil ve en altta 12 m kalınlığında sıkı tabakadan oluşmaktadır. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 1 m aşağıdadır. Dolgu ve sıkı tabaka drenajlı, yumuşak kil ise drenajsız (A) koşulda tanımlanmıştır. Yanal sınırlar akış bakımından geçirimsiz, model üst ve alt sınırları ise drenajlı olarak tanımlanmıştır. Yumuşak kil tabakası üstte geçirimliliği yüksek dolgu tabakası, altta ise sıkı tabaka ile sınırlı olduğundan çift taraflı drenaj koşulunda çalışmaktadır; alt sınırın drenajlı kabulü, sıkı tabakanın altında geçirimli bir formasyonun bulunduğu varsayımına dayanmaktadır. Geçirgenlik tüm tabakalarda izotrop ($k_x = k_y = k_z$) ve gerilmeden bağımsız sabit değerler olarak tanımlanmıştır. Malzeme parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Zemin tabakalarına ait malzeme modelleri ve parametreler

Parametre	**Dolgu**	**Yumuşak Kil**	**Sıkı Tabaka**
Malzeme modeli	Mohr-Coulomb	Soft Soil	Hardening Soil
Kalınlık (m)	2	36	12
γ_{unsat} / γ_{sat} (kN/m³)	19 / 20	16 / 17	19 / 20
e_0	0,5	1,2	0,5
E^{ref} (kPa)	30 000	—	—
E_{50}^{ref} (kPa)	—	—	50 000
E_{oed}^{ref} (kPa)	—	—	50 000
E_{ur}^{ref} (kPa)	—	—	150 000
λ^* / κ^*	—	0,0791 / 0,0237	—
ν / ν_{ur}	0,30	0,15	0,20
K_0^{NC}	0,47*	0,59	0,47
c'_{ref} (kPa)	1	5	5
φ' (°)	32	24	32
k (m/gün)	1,0	1×10^{-4}	0,1

* Dolgu tabakasında K_0 değeri Jaky bağıntısından türetilmiştir. Hardening Soil modelinde gerilme bağımlılığı üsteli m = 0,5 ve p_{ref} = 100 kPa alınmıştır. Soft Soil modelinde çekme kesme sınırı devre dışı bırakılmıştır. Undrained (A) yaklaşımında drenajsız dayanım, efektif dayanım parametrelerinden ve güncel gerilme durumundan türetildiğinden derinlikle değişmektedir; normal konsolide kil için c_u/σ'_v oranı yaklaşık 0,25–0,29 mertebesindedir.

2.2. Kazıkların Modellenmesi

Kazıklar 1,0 m çapında ve 30 m boyunda olup 5×5 düzeninde yerleştirilmiştir. Kazık uçları yumuşak kil içinde sonlanmakta, sıkı tabakaya ulaşmamaktadır. Bu nedenle kazıklar, uçları taşıyıcı sıkı tabakaya ulaşmayan ve taşıma davranışı ağırlıklı olarak çevre sürtünmesine dayanan yüzen kazıklar olarak değerlendirilmiştir.

Kazıklar, hesaplama maliyeti ve sayısal kararlılık gerekçeleriyle hacim elemanı yerine gömülü kiriş (embedded beam) elemanı ile modellenmiştir. Beton için $E = 30\times10^6$ kPa ve $\gamma_p = 25$ kN/m³ alınmıştır. Birim kazık boyu için çevre sürtünmesi kapasitesi $t_{skin}(z)$, efektif gerilme (β) yöntemi kullanılarak $t_{skin}(z) = \pi\cdot D\cdot\beta\cdot\sigma'_v(z)$ bağıntısından hesaplanmıştır. Yumuşak kil için $\beta = 0{,}25$ alınmış ve σ'_v, konsolidasyon sonrası gerilme durumuna göre değerlendirilmiştir; buna göre kapasite kazık başında 8 kN/m, kazık ucunda 240 kN/m olacak şekilde derinlikle lineer tanımlanmıştır. Toplam çevre kapasitesi, bu lineer dağılımın kazık boyu üzerinden integrasyonuyla $T_{skin} = [(8 + 240)/2]\times30 = 3720$ kN olarak elde edilmektedir. Uç direnci, kazık ucu kotundaki efektif gerilmeden SHANSEP bağıntısı ($c_u/\sigma'_v = 0{,}25$) ile türetilen $c_u \approx 76$ kPa değeri kullanılarak, derin temeller için yaygın kabul edilen $N_c = 9$ katsayısıyla $F_{max} = 9\cdot c_u\cdot A_p$ bağıntısından 540 kN olarak belirlenmiştir. Buna göre kazığın toplam eksenel kapasitesi 4260 kN olup, uç direncinin toplam kapasite içindeki payı %13 mertebesindedir.

2.3. Yükleme, Hesap Aşamaları ve Referans Analizi

Yapısal yük, kazık başlarına doğrudan tekil yük olarak uygulanmıştır. Tüm kazıklarda ve tüm senaryolarda aynı olan bu değer 1104 kN'dir. Kazık başlığı bilinçli olarak modellenmemiştir: zeminle temaslı bir başlık plakası, oturan zeminin plakadan asılı kalması nedeniyle kazıklara ilave yük aktarmakta ve grup azaltma katsayısının yalnızca perdeleme etkisini değil, radye temasının etkisini de içermesine yol açmaktadır. Yükün doğrudan kazık başlarına uygulanmasıyla bu belirsizlik ortadan kaldırılmış ve tüm senaryolarda kazık başına düşen yük eşitlenmiştir.

Sürşarj yüklemesi, 18,4 m × 18,4 m'lik merkezî alanın dışında kalan ve dört yönde 25 m'ye kadar uzanan şeritlere 75 kPa olarak uygulanmıştır. Bu kurgu, yumuşak zemin üzerinde kazıklı temelle inşa edilmiş bir yapının çevresine sonradan saha dolgusu, depolama veya istif yüklemesi yapılması durumunu temsil etmektedir. Sürşarjın konumu ve büyüklüğü tüm senaryolarda değiştirilmemiş, böylece serbest saha oturma alanı sabit tutulmuştur.

Hesap aşamaları sırasıyla şunlardır: (1) başlangıç gerilme ve boşluk suyu basıncı durumunun K_0 yöntemiyle oluşturulması, (2) kazıkların devreye alınması, (3) kazık başı yapısal yükünün uygulanması, (4) sürşarjın uygulanması ve 30 günlük konsolidasyon, (5) nihai konsolidasyon. Yapısal yükün sürşarjdan önce uygulanması, kazıklı temelin inşa edilmesinin ardından çevrede yükleme yapılması durumunu temsil etmektedir; yükleme sırası sürüklenme yükünü etkilediğinden bu tercih bilinçlidir. Son aşama sabit bir süreyle sınırlandırılmamış, modeldeki maksimum artık fazla boşluk suyu basıncı 1 kPa'nın altına ininceye kadar sürdürülmüştür; böylece konsolidasyonun pratik olarak tamamlandığı nihai denge durumu elde edilmiştir. Aynı zemin profili, model sınırları, sürşarj geometrisi, ağ ayarları ve faz kurgusu ile $s/D = 4$ ve $s/D = 2{,}5$ aralıklarına sahip iki grup modeli ve grup merkezine karşılık gelen konumda tek bir kazık içeren referans modeli koşulmuştur. Referans modelde de sürşarj şeritlerinin konumu ve büyüklüğü grup modelleriyle birebir aynı tutulmuş, yalnızca kazık sayısı değiştirilmiştir.

Bu çalışmada nötr düzlem, kazık ile komşu zemin arasındaki göreli düşey deplasmanın sıfırlandığı, bir başka deyişle çevre sürtünmesinin işaret değiştirdiği derinlik olarak tanımlanmıştır. Sayısal sonuçlarda bu kot, eksenel kuvvet profilinin maksimum değerinin bulunduğu derinlikle birlikte kontrol edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Sürüklenme Yükünün Sayısal Çıktılardan Ayrıştırılması

Sayısal analizlerde sürüklenme yükü yaygın olarak $Q_{nsf} = N_{max} - Q_d$ bağıntısıyla, yani kazıktaki maksimum eksenel kuvvet ile kazık başındaki kuvvet arasındaki fark olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada söz konusu bağıntının iki nedenle düzeltilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Birincisi, gömülü kiriş elemanına birim hacim ağırlık tanımlandığında kazığın kendi ağırlığı da eksenel kuvvet profiline derinlikle birikmektedir. İncelenen kazık için bu katkı 19,63 kN/m olup, nötr düzlemin 15 m mertebesinde oluştuğu durumda toplamı 300 kN'yi aşmaktadır.

İkincisi, kazık başı düğümünde okunan eksenel kuvvet, uygulanan yapısal yüke tam olarak eşit çıkmamaktadır. Kazık başı zemin yüzeyi kotunda bulunduğundan, bu düğümde kazık ile çevre zemin arasında ek bir kuvvet aktarımı gerçekleşmektedir. Söz konusu fark tekil kazıkta 377 kN mertebesine ulaşmakta, grup merkezindeki kazıkta ise ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Farkın büyüklüğü ağ sıklığına da duyarlı bulunmuş, bu nedenle tüm analizler aynı ağ ayarlarıyla tekrarlanmıştır. Bu bileşenin sürüklenme yüküyle karışmaması için, kazık başı yükü olarak ölçülen değer yerine bilinen ve tüm senaryolarda aynı olan yapısal yük esas alınmıştır.

Kazık başı düğümünde okunan kuvvet, uygulanan yapısal yük ile zemin-kazık etkileşiminden kaynaklanan ek kuvvet aktarımını birlikte içerdiğinden doğrudan kullanılmamış; ayrıştırmada bilinen yapısal yük Q_{yap} esas alınmış ve kazık öz ağırlığı ayrıca çıkarılmıştır. Buna göre sürüklenme yükü Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

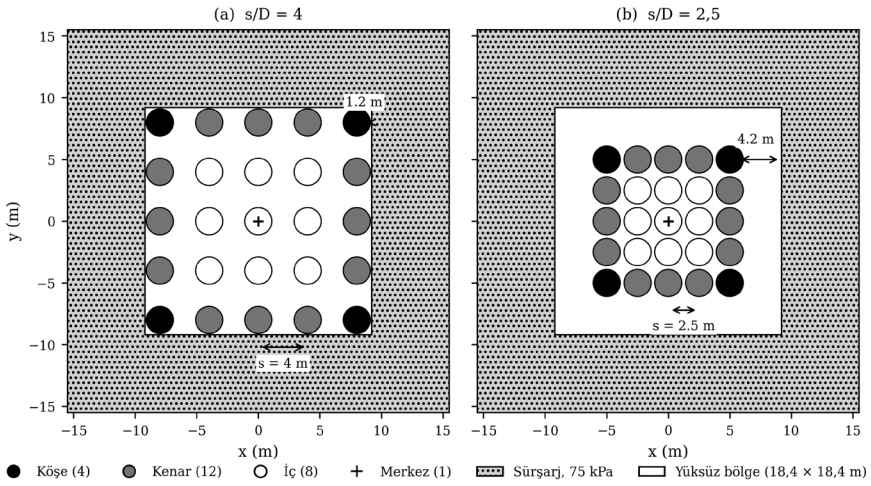
$$Q_{nsf} = N_{max} - Q_{yap} - \gamma_p \cdot A_p \cdot z_n \qquad (1)$$

Burada basınç kuvvetleri pozitif kabul edilmiş, z_n kazık başından aşağı doğru ölçülmüştür. N_{max}, nötr düzlem kotunda elde edilen toplam eksenel basınç kuvveti olup; uygulanan kazık başı yükünü, kazığın bu kota kadar olan öz ağırlığını ve aynı kota kadar mobilize olan negatif çevre sürtünmesini birlikte içermektedir. Bu ayrıştırma, gömülü kiriş elemanlarıyla yapılan konsolidasyon analizlerinde kazık öz ağırlığı ile kazık başı kuvvet aktarımının sürüklenme yüküyle karıştırılmasını önlemektedir. İzleyen tüm değerler bu tanıma göre verilmiştir.

3.2. Sürüklenme Yükünün Konuma ve Kazık Aralığına Göre Değişimi

İzleyen bölümlerde s/D = 4 olan grup seyrek aralıklı, s/D = 2,5 olan grup ise sık aralıklı grup olarak adlandırılmıştır. Kazıklar konumlarına göre köşe (4 adet), kenar (12 adet), merkez dışındaki iç kazıklar (8 adet) ve merkez kazığı (1 adet) olmak üzere dört sınıfa ayrılmıştır. İncelenen iki kazık yerleşimi Şekil 1'de plan görünümünde verilmiştir. Her iki senaryoda da 5×5 düzen, kazık sayısı, kazık başı yükü ve sürşarj geometrisi aynı tutulmuş, yalnızca kazık aralığı değiştirilmiştir. Kazık aralığının küçülmesiyle grubun kapsadığı alan

daralmakta, buna bağlı olarak köşe kazıklarının sürşarj kenarına uzaklığı 1,2 m'den 4,2 m'ye çıkmaktadır.



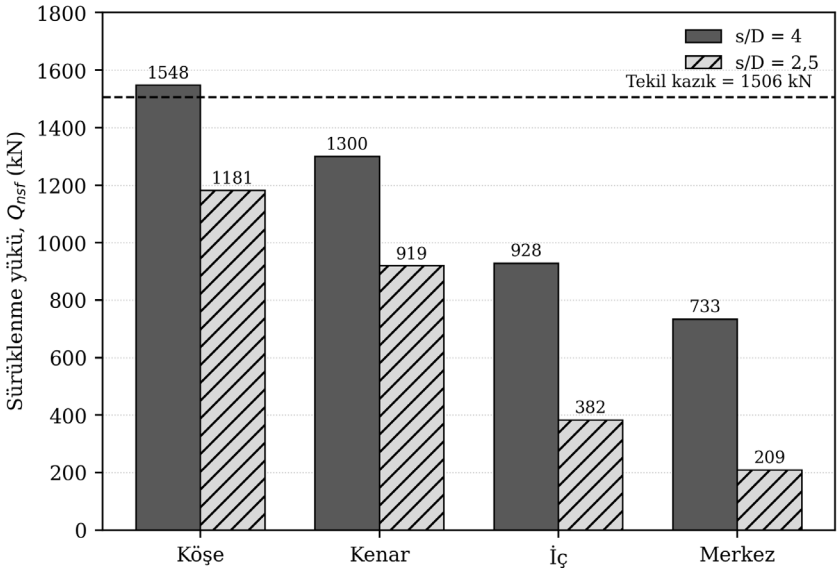
Şekil 1. Kazık yerleşimi ve sürşarj geometrisi: (a) s/D = 4, (b) s/D = 2,5

Konum ve kazık aralığına bağlı sürüklenme yükleri Tablo 2'de, grafiksel karşılaştırma Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sürüklenme yükü ve grup azaltma katsayısının konuma göre değişimi

Konum	**# kazık**	**s/D = 4 Q_{nsf} (kN)**	**η**	**s/D = 2,5 Q_{nsf} (kN)**	**η**
Köşe	4	1548	1,03	1181	0,78
Kenar	12	1300	0,86	919	0,61
İç (merkez hariç)	8	928	0,62	382	0,25
Merkez	1	733	0,49	209	0,14
Tekil kazık (referans)	1	1506	1,00	1506	1,00

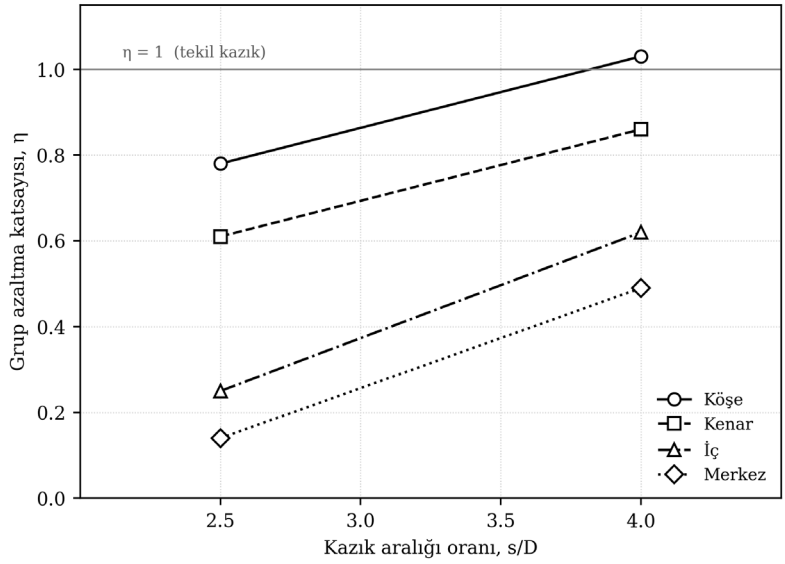
Her iki aralıkta da sürüklenme yükü grup çevresinden merkeze doğru sistematik olarak azalmaktadır. Kazık aralığının 4D'den 2,5D'ye düşürülmesi, iç kazıklarda sürüklenme yükünü yaklaşık 2,4 kat, grup merkezindeki kazıkta ise 3,5 kat azaltmaktadır. Buna karşılık köşe kazıklarında azalma sınırlı kalmaktadır; bu kazıkların dış tarafında perdeleme sağlayacak komşu kazık bulunmaması bu davranışın nedenidir.



Şekil 2. Sürüklenme yükünün konuma ve kazık aralığına göre değişimi

3.3. Grup Azaltma Katsayısı

Grup azaltma katsayısı η, grup içerisindeki bir kazığın sürüklenme yükünün, aynı zemin profili, aynı sürşarj geometrisi ve aynı kazık başı yükü altında koşulan tekil kazığın sürüklenme yüküne oranı olarak tanımlanmıştır: $\eta = Q_{nsf,grup} / Q_{nsf,tekil}$. Grup merkezine karşılık gelen konumda koşulan tekil kazık analizinde sürüklenme yükü 1506 kN, nötr düzlem derinliği 15,7 m ve kazık başı oturması 283 mm olarak elde edilmiştir. Bu değer referans alınarak hesaplanan grup azaltma katsayısının kazık aralığı ile değişimi Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Grup azaltma katsayısının kazık aralığı oranı ile değişimi

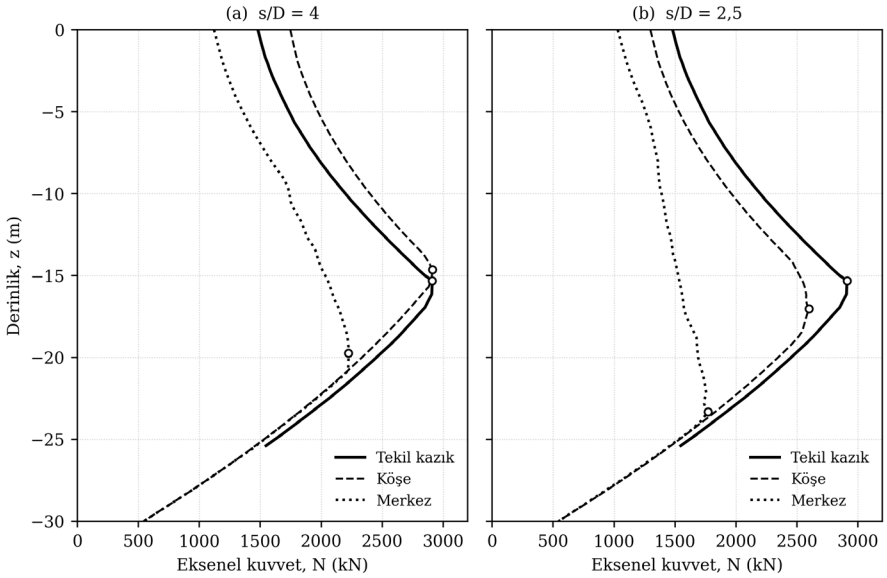
Grup merkezindeki kazık için η, s/D = 4'te 0,49 iken s/D = 2,5'te 0,14'e düşmektedir. Bir başka deyişle sık aralıklı grupta merkezdeki kazık, tekil duruma kıyasla sürüklenme yükünün yaklaşık %86'sından korunmaktadır. Köşe kazıklarında ise grup etkisi sınırlı

kalmakta; s/D = 4 için η değeri 1,03 ile birim değerin hafifçe üzerine çıkmaktadır. Bu değerin birden büyük olması, köşe kazıklarının sürşarj kenarına yalnızca 1,2 m mesafede bulunmasıyla ilişkilendirilmektedir; s/D = 2,5 durumunda bu mesafe 4,2 m'ye çıktığında η 0,78'e inmektedir. Dolayısıyla köşe kazıklarına ilişkin η değerleri, perdeleme etkisi kadar sürşarja yakınlığın da etkisini içermektedir.

Bu sonuç, tasarım açısından doğrudan bir çıkarım sunmaktadır: tekil kazık analizinden elde edilen sürüklenme yükünün grup içindeki tüm kazıklara uygulanması, grup çevresindeki kazıklar için makul, grup çekirdeğindeki kazıklar için ise aşırı muhafazakâr sonuçlar vermektedir. s/D = 2,5 durumunda bu yaklaşım, grup merkezindeki kazığın sürüklenme yükünü yaklaşık 7,2 katına kadar yüksek tahmin edebilmektedir.

3.4. Eksenel Kuvvet Dağılımı ve Nötr Düzlem

Temsilî kazıklara ait eksenel kuvvet profilleri Şekil 4'te verilmiştir. Tekil kazık ile grup köşe kazığının profilleri birbirine yakın seyrederken, grup merkezindeki kazığın profili belirgin biçimde daha düşük kalmaktadır. Aradaki fark s/D = 2,5 durumunda daha da belirginleşmektedir.



Şekil 4. Eksenel kuvvetin derinlikle değişimi: (a) s/D = 4, (b) s/D = 2,5

Nötr düzlem derinliği de aynı eğilimi izlemektedir. Kazık başından aşağı doğru ölçülen nötr düzlem derinliği tekil kazıkta 15,7 m, grup köşe ve kenar kazıklarında 15–16 m mertebesindeyken, grup merkezindeki kazıkta s/D = 4 için 9,7 m'ye, s/D = 2,5 için 5,6 m'ye azalmaktadır. Grup çekirdeğindeki kazıkların çevre zeminle birlikte oturması, göreli deplasmanın sıfırlandığı kotu kazık başına yaklaştırmaktadır. Elde edilen değerler, uca oturan kazık grupları için bazı çalışmalarda bildirilen 0,7–0,8L aralığının altındadır; ancak söz konusu karşılaştırma, kazık uç koşulu ve yükleme senaryosundaki farklılıklar nedeniyle niteliksel olarak değerlendirilmelidir.

3.5. Oturmalar

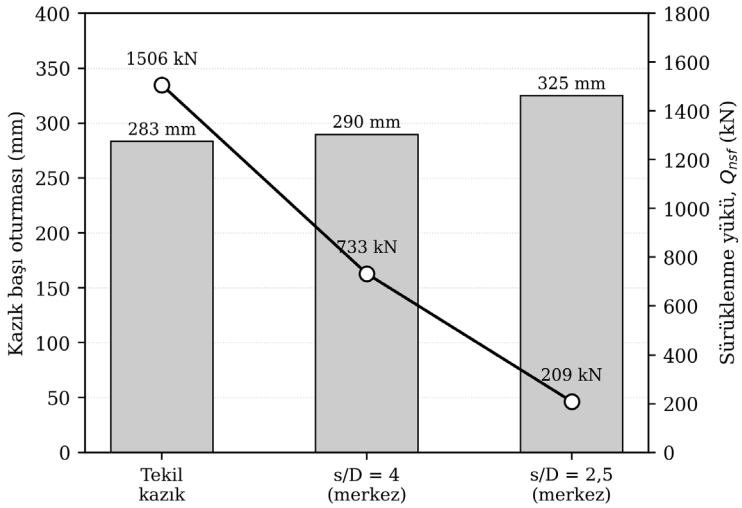
Sürüklenme yükündeki azalmaya oturmadaki artış eşlik etmektedir. Konuma göre hesaplanan kazık başı oturmaları Tablo 3'te verilmiştir. Sık aralıklı grupta konumlar

arasındaki en büyük oturma farkı 2 mm'ye düşmekte, yani grup bir bütün olarak hareket etmektedir; seyrek aralıklı grupta ise bu fark 23 mm'ye çıkmaktadır.

Tablo 3. Kazık başı oturmalarının konuma göre değişimi (mm)

Konum	**Tekil kazık**	**s/D = 4**	**s/D = 2,5**
Köşe	—	311	324
Kenar	—	301	325
İç (merkez hariç)	—	293	325
Merkez	283	290	325

Seyrek aralıklı grupta oturma çevreden merkeze doğru azalırken, sık aralıklı grupta konuma bağlı fark pratik olarak ortadan kalkmaktadır.



Şekil 5. Sürüklenme yükü ile kazık başı oturmasının ters yönlü değişimi

Şekil 5, çalışmanın temel çıkarımını özetlemektedir. Perdeleme etkisi sürüklenme yükünü azaltmakta, ancak bunu kazık grubunun çevre zeminle birlikte oturması yoluyla sağlamaktadır. Sürüklenme yükündeki iyileşme ile oturmadaki kötüleşme aynı mekanizmanın iki yüzüdür ve birbirinden bağımsız değerlendirilemez. İncelenen koşullar altında, yüzen kazık gruplarında yapısal kapasiteye kıyasla kullanılabilirlik, özellikle oturma bakımından, daha kritik görünmektedir.

3.6. Yanal Zorlanma

Sürşarj dört yönden simetrik uygulandığından grubun bileşke yatay ötelenmesi beklenmemektedir; buna karşılık sürşarj kenarına yakın kazıklarda içe doğru yerel yanal deplasmanlar oluşmaktadır. Aşağıdaki değerler, nihai konsolidasyon aşaması sonunda kazık boyu üzerinde elde edilen bileşke yatay yer değiştirmenin maksimum değerini ifade etmektedir. Bu değer grubun dış sıralarındaki kazıklarda s/D = 4 için 58–124 mm, s/D = 2,5 için 34–59 mm mertebesindeyken, iç kazıklarda sırasıyla 1–40 mm ve 2–27 mm aralığında kalmaktadır. En büyük değerler her iki senaryoda da sürşarj kenarına en yakın köşe kazıklarında elde edilmiştir. Buna bağlı olarak hesaplanan en büyük eğilme momentleri çevre kazıklarında sırasıyla 609 ve 766 kNm'ye ulaşmaktadır.

Gömülü kiriş elemanının elastik kabulü nedeniyle bu momentler, çatlama ve buna bağlı eğilme rijitliği azalması dikkate alınmamış bir analiz sonucunu temsil etmektedir; bu nedenle gerçek betonarme davranışla doğrudan eşdeğer kabul edilmemelidir. Bununla birlikte incelenen sürşarj geometrisi ve grup düzeni için, hem sürüklenme yükünün hem yanal zorlanmanın özellikle dış sıra kazıklarında yoğunlaştığı görülmüştür. Bu nedenle dış sıra kazıkları eksenel ve eğilme etkileri bakımından birlikte kontrol edilmelidir.

4. SONUÇLAR

Yumuşak kil içinde yüzen 5×5 kazık gruplarının çevre sürşarj yüklemesi altındaki negatif çevre sürtünmesi davranışının üç boyutlu sayısal analizinden elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Sayısal analizlerde sürüklenme yükü hesaplanırken kazık öz ağırlığının ayrıştırılması ve kazık başı kuvveti yerine bilinen yapısal yükün kullanılması gerekmektedir. Bu düzeltmeler yapılmadığında sürüklenme yükü ve konuma bağlı dağılımı yanlış değerlendirilmektedir.

Sürüklenme yükü grup içinde konuma bağlı olarak belirgin biçimde farklılaşmaktadır. s/D = 2,5 için köşe kazıklarında 1181 kN, kenar kazıklarında 919 kN, merkez dışındaki iç kazıklarda 382 kN, grup merkezinde ise 209 kN hesaplanmıştır.

Grup azaltma katsayısı kazık aralığı ile güçlü biçimde değişmektedir. Grup merkezindeki kazık için η, s/D = 4'te 0,49 iken s/D = 2,5'te 0,14'e düşmektedir. Köşe kazıklarında grup azaltma katsayısı, s/D = 4 için 1,03 ve s/D = 2,5 için 0,78 olarak elde edilmiş; dolayısıyla köşe kazıklarında grup etkisi merkez kazıklarına göre daha sınırlı kalmıştır.

Kazık başından aşağı doğru ölçülen nötr düzlem derinliği, tekil kazıkta 15,7 m iken grup merkezinde 5,6 m'ye kadar azalmaktadır. Grup çekirdeğindeki kazıkların çevre zeminle birlikte oturması, kazık-zemin arasındaki göreli düşey deplasmanın daha sığ bir kotta sıfırlanmasına neden olmaktadır.

Kazık başı oturması tekil kazıkta 283 mm, s/D = 2,5 grubunda 325 mm'dir. İncelenen zemin, yükleme ve grup geometrisi koşulları altında, sürüklenme yükündeki azalmaya rağmen oturmanın daha kritik bir kullanılabilirlik ölçütü olduğu görülmüştür.

Tekil kazık sonuçlarının grup içindeki tüm kazıklara uygulanması, grup çevresi için makul, grup çekirdeği için aşırı muhafazakâr sonuçlar vermektedir.

İncelenen sürşarj geometrisi ve grup düzeni için sürüklenme yükü ile yanal zorlanma özellikle dış sıra kazıklarında yoğunlaşmaktadır; bu kazıklar eksenel ve eğilme etkileri bakımından birlikte kontrol edilmelidir.

Çalışmanın başlıca sınırlamaları şunlardır. Kazıkların gömülü kiriş elemanı ile modellenmesi nedeniyle çevre sürtünmesi kapasitesi kullanıcı tanımlı olup analiz boyunca gerilme durumuyla güncellenmemekte; ayrıca elemanın elastik kabulü nedeniyle çatlama etkileri dikkate alınmamaktadır. Sürşarj alanı tüm senaryolarda sabit tutulduğundan, kazık aralığı değiştiğinde çevre kazıklarının sürşarj kenarına uzaklığı da değişmekte, bu nedenle köşe kazıklarına ilişkin karşılaştırma niteliksel düzeyde değerlendirilmelidir. Çalışmada tek bir kazık çapı, kazık boyu, sürşarj büyüklüğü ve grup düzeni için yalnızca iki kazık aralığı incelenmiş olup, elde edilen η değerleri bu koşullarla sınırlıdır. Zemin parametreleri belirli bir sahaya ait ölçümlerden değil, yumuşak normal konsolide kil için tipik

değerlerden seçilmiştir. Ayrıca ağ duyarlılığı ve yanal sınır etkisine ilişkin sistematik bir doğrulama çalışması sunulmamış; analizlerin tümü aynı ağ ayarları ve aynı model sınırlarıyla koşularak senaryolar arası karşılaştırılabilirlik sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

Bjerrum, L., Johannessen, I. J., Eide, O. (1969), "Reduction of Negative Skin Friction on Steel Piles to Rock", Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Vol. 2, pp. 27–34.

Bozozuk, M. (1972), "Downdrag Measurements on a 160-ft Floating Pipe Test Pile in Marine Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, No. 2, pp. 127–136.

Chow, Y. K., Chin, J. T., Lee, S. L. (1990), "Negative Skin Friction on Pile Groups", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 14, No. 2, pp. 75–91.

Comodromos, E. M., Bareka, S. V. (2005), "Evaluation of Negative Skin Friction Effects in Pile Foundations Using 3D Nonlinear Analysis", Computers and Geotechnics, Vol. 32, No. 3, pp. 210–221.

Endo, M., Minou, A., Kawasaki, T., Shibata, T. (1969), "Negative Skin Friction Acting on Steel Pipe Pile in Clay", Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Vol. 2, pp. 85–92.

Fellenius, B. H. (1972), "Down-drag on Piles in Clay due to Negative Skin Friction", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, No. 4, pp. 323–337.

Fellenius, B. H. (2004), "Unified Design of Piled Foundations with Emphasis on Settlement Analysis", Geotechnical Special Publication No. 125, ASCE, 253-275.

Fellenius, B. H. (2006), "Results from Long-term Measurement in Piles of Drag Load and Downdrag", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 43, No. 4, pp. 409–430.

Jeong, S., Lee, J., Lee, C. J. (2004), "Slip Effect at the Pile-Soil Interface on Dragload", Computers and Geotechnics, Vol. 31, No. 2, pp. 115–126.

Johannessen, I. J., Bjerrum, L. (1965), "Measurement of the Compression of a Steel Pile to Rock due to Settlement of the Surrounding Clay", Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Vol. 2, pp. 261–264.

Kuwabara, F., Poulos, H. G. (1989), "Downdrag Forces in Group of Piles", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 6, pp. 806–818.

Lee, C. J., Bolton, M. D., Al-Tabbaa, A. (2002), "Numerical Modelling of Group Effects on the Distribution of Dragloads in Pile Foundations", Géotechnique, Vol. 52, No. 5, pp. 325–335.

Leung, C. F., Liao, B. K., Chow, Y. K., Shen, R. F., Kog, Y. C. (2004), "Behavior of Pile Subject to Negative Skin Friction and Axial Load", Soils and Foundations, Vol. 44, No. 6, pp. 17–26.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
A_p	Kazık kesit alanı (m²)	s	Kazık aralığı (m)
c_u	Drenajsız kayma dayanımı (kPa)	$t_{skin}(z)$	Birim boy kazık çevre sürtünmesi (kN/m)
D	Kazık çapı (m)	T_{skin}	Toplam kazık çevre sürtünmesi kapasitesi (kN)
e_0	Başlangıç boşluk oranı	z_n	Nötr düzlem derinliği (m)
F_{max}	Uç direnci kapasitesi (kN)	β	Efektif gerilme katsayısı
L	Kazık boyu (m)	γ_p	Kazık birim hacim ağırlığı (kN/m³)
N_{max}	Nötr düzlem kotundaki maksimum eksenel kuvvet (kN)	η	Grup azaltma katsayısı
Q_{yap}	Kazık başı yapısal yükü (kN)	λ^*, κ^*	Soft Soil modeli sıkışabilirlik parametreleri
Q_{nsf}	Sürüklenme yükü (kN)	σ'_v	Düşey efektif gerilme (kPa)