

TABAKALI ZEMİNLERDE KAZIKLI RADYE TEMELLERİN OPTİMUM TASARIMI

(OPTIMUM DESIGN OF PILED RAFT FOUNDATIONS ON LAYERED
SOILS)

Ozan ALVER¹, Gürkan ÖZDEN²

ÖZ

Kazıklı radye kavramı, üstyapı yükünün radye temel ile kazık grubu arasında paylaşılması esasına dayanmaktadır. Yük paylaşımı kazık gereksinimi önemli oranda azalttığı için ekonomik tasarımlar elde edilebilir. Ancak, kazıklar arasındaki etkileşim kazık grubunun rijitliğinde azalmaya sebep olduğu için oturmalar artabilir. Bu çalışmada, kazık sayısının ve kazık uzunluğunun bir kazıklı radyenin oturma davranışı üzerine etkileri araştırılmıştır. Optimum çözümün kazıkların sayısının artırılması yerine kazık uzunluğunun artırılmasıyla elde edilebileceği gösterilmiştir. Basitleştirilmiş Randolph Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi oturma hesabı için kullanılmıştır ve bu iki yöntemin analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Kazık-zemin-kazık etkileşimi Randolph yöntemi ile hesaplanmıştır. Ayrıca Caputo ve Viggiani yaklaşımı ile doğrusal olmayan davranış hesaba katılmıştır. Belirli bir kazık sayısından sonra, kazıklı radye temel oturmasının, kazıklar arasındaki etkileşim sebebiyle, kazık sayısından bağımsız olduğu gösterilmiştir. Optimum tasarım oturmanın daha fazla azalmadığı kazık sayısı olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kazıklı radye, Optimum tasarım, Sonlu elemanlar, Oturma esaslı tasarım, Kazık sayısı, Kazık uzunluğu

ABSTRACT

Piled raft concept base on the principal of load sharing between the raft and pile group. Load sharing may provide economical designs, since it reduces required number of piles significantly. However, settlements may increase, since the interaction among piles cause a reduction in the stiffness of pile group. In this study, effects of pile number and length on the settlement behavior of a piled raft is investigated. It is shown that the optimum solution may be obtained by increasing the pile length rather than number of piles. Simplified method of Randolph and finite element method are used for settlement calculation and analysis results for two methods are compared. Pile-soil-pile interaction is calculated using equation the method of Randolph. Besides, non-linear behavior is taken into account using Caputo and Viggiani approach. It is shown that the settlement of piled rafts is independent from the number of piles beyond a certain number due to the interaction among piles. Optimum design is given as the number of piles that the settlement does not reduce anymore.

Keywords: Piled raft, Optimum design, Finite element, Settlement based design, Number of piles, Pile length

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İZMİR, ozan.alver@deu.edu.tr (sorumlu yazar)

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İZMİR, gurkan.ozden@deu.edu.tr

1. GİRİŞ

Son yıllarda yüksek yapılara artan talep, kazıklı temel uygulamasını zorunlu kılmıştır. Kazıkları radye temele bağlamak ise yaygın bir uygulamadır. Radye temelin kazık grubuna bağlanmasıyla üstyapı yükü, kazık grubu ve radye temel arasında paylaşılır. Kazıklı temellerin konvansiyonel tasarımında üstyapıdan gelen yükün tamamının kazık grubu tarafından taşındığı kabul edilirdi. Kazıklı radye yaklaşımında ise, radyenin yükün bir kısmını karşıladığı kabul edilmektedir. Yük paylaşımı kabulü kazıklı radye kavramının temel özelliğidir ve kazık grubu ile radyenin rijitlikleri ayrı ayrı kullanılarak hesaplanabilir [1].

Bir kazık grubunun tasarımı başlıca üç aşamadan oluşur: Limit durum analizi, deformasyon analizi ve yapısal analiz [2]. Ancak kazık gruplarının tasarımındaki esas amaç oturmaları sınırlandırmaktır [3]. Kazık grubunun oturması ise etkileşim faktörü tanımlanarak hesaplanabilir. Etkileşim faktörü, α bir kazığın diğer bir kazığın oturmasına etki oranı olarak tanımlanmaktadır [4]. Etkileşim faktörü başlıca kazık uzunluğuna ve iki kazık arasındaki mesafeye bağlıdır. Kazık sayısı arttıkça, bir kazık üzerine gelen yük azaldığı için oturmaların azalması beklenir. Fakat kazıkların oturmayı azaltıcı etkisi belirli bir noktadan sonra ortadan kalkmaktadır [5]. Kazık sayısı artsa da, oturmalar belirgin bir azalma göstermeyebilir. Bu davranışın ana sebebi kazıklar arasındaki etkileşimdir.

Radye temelin, kazıklı radye temelin taşıma kapasitesine olan katkısının hesaba katılmasıyla kazık sayısı önemli oranda azalmaktadır. Ancak, azalan kazık sayısı oturmaların artmasına sebep olabilir. Bir kazığın üzerine gelen yükün artması, özellikle doğrusal olmayan davranışın temel davranışında hakim olmasına sebep olmaktadır. Doğrusal olmayan davranışın kazıklı radyelerdeki kullanımı için birçok yöntem önerilmiştir [6-8]. Bu çalışmada, oturma hesaplarında doğrusal olmayan davranış, Caputo ve Viggiani yöntemi kullanılarak hesaba katılmıştır.

Kazıklı radyelerin optimum tasarımı, oturmaların istenilen sınırlarda tutularak maksimum ekonominin sağlanmasını gerektirmektedir. Maksimum ekonomi ise, sabit bir çap için kazık uzunluğu ile kazık sayısının çarpımının minimum tutulması ile sağlanabilir [5]. Bu çalışmada, optimum tasarım iki aşamalı analiz yapılarak ele alınmıştır. Birinci aşamada sabit bir kazık uzunluğu için kazık sayısının etkisi incelenmiştir. Birinci aşamanın amacı, kazık sayısını minimum tutarak ekonominin sağlanmasıdır. İkinci aşamada ise, birinci aşamadan bulunan kazık miktarını sabit tutarak, kazık uzunluğunun etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada kazık uzunluğu ve kazık sayısı değiştirilerek (toplam miktarı sabit tutarak), temel davranışının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

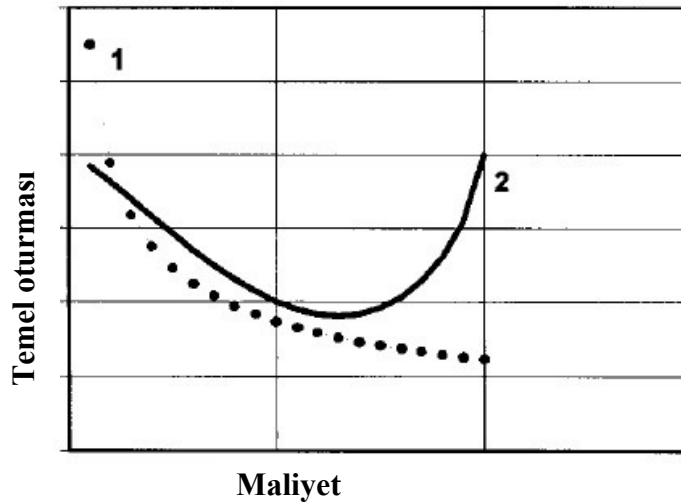
Kazıklı radye temellerin tasarımı için üç aşama tanımlanmıştır. Birinci aşama, kazıklı radye temelin uygulanabilirliğinin araştırılmasından ve gereken kazık sayısının belirlenmesinden oluşmaktadır. Kazıklı radye temel sisteminin uygulanabilmesi bakımından, sert killerin ve/veya sıkı kumların yüzeye yakın olduğu zemin profilleri en uygun koşullardır [4]. Bu sebeple, yumuşak killerin ve/veya gevşek kumların bulunduğu profillerde zemin iyileştirme yapılması zorunlu olmaktadır. İkinci aşama kazık özelliklerinin ve yerleşiminin belirlenmesinden ibarettir [4]. Bu iki aşamada basit el hesapları ve yaklaşık yöntemler kullanılabilir. Ancak son aşama olan üçüncü aşamada, bilgisayar programları kullanılmalıdır. Bu aşamada kazık sayısı ve yerleşimi kesin olarak sonuçlandırılarak temel sisteminin yapısal tasarımı yapılmaktadır.

Bu çalışmada bir kazıklı radye temelin aksel yük altındaki oturması Eşdeğer Radye Yöntemi, Randolph Yöntemi ve Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Oturma değerlerinin kazık sayısına ve kazık uzunluğuna bağlı değişimi gösterilmiştir. Bu çalışmanın esas amacı bir kazıklı radye temelin oturma esaslı tasarım ilkeleri ile optimizasyonudur. Optimizasyon ile kastedilen, temel sisteminin davranışını izin verilebilir sınırlarda tutarak maksimum ekonomi sağlamaktır.

2. YÖNTEM

Kazıklı radyelerin oturma hesabı için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler üç ana başlıkta toplanabilir: Basitleştirilmiş yöntemler, yaklaşık yöntemler ve bilgisayar esaslı kesin yöntemler. Bu çalışmada basitleştirilmiş yöntemlerden Randolph Yöntemi ile kesin yöntemlerden olan Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Randolph Yöntemi için Matlab programında bir kod yazılmıştır. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan Eşdeğer Radye Yöntemi de bu çalışmanın kapsamında yer almaktadır.

Optimum tasarımın amacı kazıklı temel sisteminin davranışını izin verilebilir limitlerde tutarak maksimum ekonominin sağlanması olarak tanımlanabilir. De Sanctis vd. Şekil 1'de maliyet-davranış ilişkisini göstermiştir. Burada maliyet, sabit bir kazık uzunluğu ve kazık çapı için kazık sayısı olarak düşünülebilir. Birçok durumda kazık sayısı arttıkça temel davranışının iyileştiği düşünülür. Ancak temel kazıkları sürekli bir ortamda bulunduğu için bir kazığın oturması, etki alanında bulunan diğer kazıkların beklenenden daha fazla oturmasına sebep olabilir. Buna kazık-zemin-kazık etkileşimi denir. Bu sebeple kazık grubunun rijitliği, bir kazığın rijitliğinin toplam kazık sayısı ile çarpımından daha küçük olacaktır. Şekil 1'deki davranışın esas sebebi kazıklar arasındaki bu etkileşimdir. Kazık sayısının artması ile kazık grubunun rijitliğinin nasıl değiştiği Randolph Yöntemi kullanılarak sayısal olarak bulunabilir.



Şekil 1. Oturma ve maliyet ilişkisi [5]

Clancy ve Randolph, kazık grubu ile radye temel arasındaki yük paylaşımı için basit bir denklem önermişlerdir [1]. Radye temelin taşıdığı yükün kazık grubunun taşıdığı yüke oranı, P_r/P_p , Denklem (1) ile hesaplanabilir. Denklemdeki K rijitliği, r ve p indisleri sırasıyla radyeyi ve kazık grubunu temsil etmektedir. Önerilen denklem radyenin tamamen rijit olduğu

kabulüne dayanmaktadır. Bu kabulün sonucu, kazık grubunun oturması ile radyenin oturmasının eşit olmasıdır. Gerçek davranışta ise radyenin fleksibilitesi kazıklara aktarılan yükün, bu denklem ile hesaplanandan daha fazla olmasını gerektirir.

$$\frac{P_r}{P_p} = \frac{0.2}{1 - 0.8(K_r/K_p)} \frac{K_r}{K_p} \quad (1)$$

Randolph ve Wroth tekil bir kazığın rijitliğini kazığın elastik sıkışmasını da dikkate alan bir formül ile ifade etmiştir [9]. Bir kazığın rijitliği Denklem (4) ile hesaplanabilir.

$$\frac{P_t}{G_l r_0 w_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi \tanh \mu l}{\zeta} \frac{l}{\mu l} \frac{1}{r_0}}{1 + \frac{1}{\pi \lambda} \frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} \frac{\tanh \mu l}{\mu l} \frac{l}{r_0}} \quad (2)$$

Burada P_t ve w_t sırasıyla kazığa gelen yük ve kazığın oturmasıdır. L_p ve r_0 kazığın uzunluğu ve yarıçapıdır. G_l kazık ucundaki zeminin kayma modülüdür. Diğer parametreler aşağıda verilmiştir:

$$\eta = r_b/r_0, \xi = G_l/G_b, \rho = G_{avg}/G_l, \lambda = E_p/G_l, \zeta = \ln(r_m/r_0), r_m = \{0.25 + \xi[2.5\rho(1-\nu) - 0.25]\} L_p, \mu l = \left(\frac{1}{r_0}\right) \sqrt{\frac{2}{\zeta \lambda}}$$

Burada G_{avg} zeminin ortalama kayma modülünü, E_p kazığın yapıldığı malzemenin elastisite modülünü, r_b kazık tabanının yarıçapını ve ν Poisson oranını göstermektedir.

Bir kazık grubunun rijitliği, kazıklar arasındaki etkileşim sebebiyle, bir kazığın rijitliğinin toplam kazık sayısı ile çarpımına eşit olamaz. Kazık grubunun rijitlik hesabı için bir faktör uygulanmalıdır. Bu faktör verimlilik katsayısı olarak adlandırılır. Verimlilik katsayısı, η Denklem (3) ile hesaplanabilir.

$$\eta = 1 / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \quad (3)$$

Verimlilik katsayısı kullanılarak kazık grubunun rijitliği Denklem (4) ile hesaplanabilir.

$$K_p = n \cdot K_1 \cdot \eta \quad (4)$$

burada n kazık sayısını, K_1 bir kazığın rijitliğini ve K_p kazık grubunun rijitliğini gösterir.

Bu çalışmada, kazık grubunun rijitlik hesabında kazık-zemin-kazık etkileşimi ve doğrusal olmayan davranış dikkate alınmıştır. Her bir kazığın diğer kazıklar üzerindeki etkisi Randolph tarafından Denklem (5) ile ifade edilmiştir.

$$\alpha_{ij} = \frac{\ln\left(\frac{r_m}{S}\right)}{\ln\left(\frac{2r_m}{D_0}\right)} F_\alpha \quad (5)$$

Burada D_0 kazık çapını ve S kazıklar arasındaki mesafeyi gösterir. Burada r_m etki yarıçapıdır ve Denklem (6) ile hesaplanabilir.

$$r_m = \{0.25 + \xi[2.5\rho(1 - \nu) - 0.25]\}L_p \quad (6)$$

Kazıklar arasındaki etkileşim α katsayısı ile ifade edilir. Denklem (5)'de bulunan F_α faktörü Mylonakis ve Gazetas tarafından kazıkların zemini iyileştirici etkisini gözönüne almak amacıyla geliştirilmiştir [10] ve Denklem (7) ile hesaplanabilir.

$$F_\alpha = \frac{2\mu L_p + \sinh(2\mu L_p) + \Omega^2 [\sinh(2\mu L_p) - 2\mu L_p] + 2\Omega [\cosh(2\mu L_p) - 1]}{[2 + 2\Omega^2] \sinh(2\mu L_p) + 4\Omega \cosh(2\mu L_p)} \quad (7)$$

Burada L_p kazık boyunu gösterir. Diğer parametreler Denklem (8) ve Denklem (9) ile tanımlanmıştır.

$$\mu = \sqrt{\frac{2\pi\bar{G}}{\ln\left(\frac{2r_m}{D_0}\right) E_p A_p}} \quad (8)$$

Burada E_p kazığın yapıldığı malzemenin elastisite modülünü, A_p kazığın enkesit alanını, \bar{G} zeminin ortalama kayma modülünü temsil etmektedir.

$$\Omega = \frac{K_{bi}}{E_p A_p \mu} \quad (9)$$

Burada K_{bi} kazığın taban rijitliğini temsil etmektedir ve Denklem (10) ile hesaplanabilir.

$$K_{bi} = \frac{\pi}{2I_s} \left(\frac{D_0 G}{1 - \nu} \right) \quad (10)$$

Burada I_s kazık tabanının enkesitine bağlı olan şekil faktörüdür.

Bir kazığın doğrusal olmayan davranışı, temel sisteminin bir bütün olarak davranışını etkilemektedir. Doğrusal olmayan davranış hesaba katılmaz ise, Denklem (5)'de verilen etkileşim faktörü, $i=j$ durumunda 1'e eşit olmaktadır. Doğrusal olmayan davranış Caputo ve Viggiani yaklaşımı ile [6] Denklem (11) kullanılarak hesaba katılabilir.

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{1 - \frac{Q_i}{Q_{i,limit}}} \quad (11)$$

Burada $Q_{i,limit}$ tekil kazığın taşıma kapasitesidir. Denklemden anlaşılacağı gibi, kazığa gelen yük arttıkça, doğrusal olmayan davranış temel sisteminde daha etkili olacaktır.

Kazıklı radye temel problemleri için en güvenilir sonuçlar üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilir. Üç boyutlu analiz ile sürekli ortamın koşulları tam olarak temsil edilebilir ve elemanlar arası etkileşim gerçeğe uygun olarak yansıtılabilir.

Kazık gruplarının oturma hesabında kullanılan en yaygın yöntem Eşdeğer Radye Yöntemi'dir. Yöntemin esasları ilk olarak Terzaghi ve Peck tarafından ortaya konmuştur [11]. Tomlinson, yöntemi geliştirerek yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Yöntemde kazık grubunun oturması, kazık uzunluğuna ve tarafsız eksenine bağlıdır. Tarafsız eksen, yaklaşık olarak kazık uzunluğunun üçte birinde kabul edilebilir [12]. Eşdeğer radye seviyesi belirlendikten sonra oturma hesabı sığ temellerdeki gibi yapılabilir. Ancak yöntem, kazık sayısına ve aralığına bağlı olmadığı için tarafsız eksenin yerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

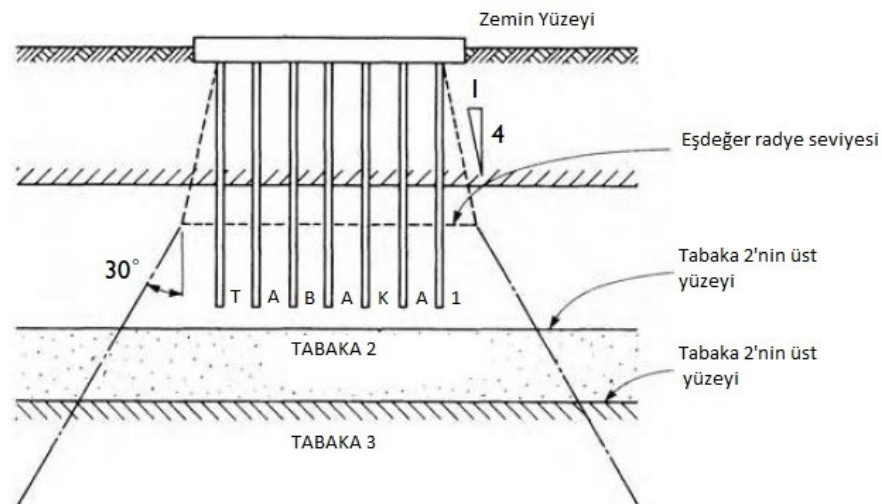
Eşdeğer Radye Yöntemi tabakalı zeminlerin oturma hesabında da kullanılabilir. Oturma hesabında ilk adım, hesap derinliğini bulmaktır. Genel olarak etkili derinlik, gerilme artışının düşey efektif gerilmenin %10'u olduğu derinlik olarak alınabilir. Eşdeğer radye seviyesinden etkili derinliğine kadar bulunan tabakalarda, radye temel tabaka ortasındaymış gibi oturma analizi yapılmaktadır.

Oturma analizleri zeminin tek yönde sıkıştığı kabulü ile yapılmaktadır. Ancak sürekli ortamda üç boyutta deformasyonlar oluşacağı için bulunan oturma değerine Denklem (12) kullanılarak düzeltme faktörü uygulanmalıdır [12]. Ayrıca derinlik düzeltmesi yapılarak oturma analizi Denklem (13) kullanılarak sonlandırılmalıdır.

$$S_i = \frac{\mu_1 \mu_0 q_n B}{E} \quad (12)$$

$$S = S_i \mu_g \mu_d \quad (13)$$

Denklem (12)'deki μ_1 ve μ_0 etki faktörleridir. q_n , B ve E sırasıyla eşdeğer radye seviyesindeki yayılı yük, radye genişliği ve zeminin elastisite modülüdür. Denklem (13)'teki μ_g ve μ_d , sırasıyla üçüncü boyut düzeltmesi ve derinlik düzeltmesidir. Bu düzeltmeler Tomlinson abakları [12] kullanılarak yapılabilir.



Şekil 2. Tabakalı zeminde eşdeğer radye yöntemi için yük dağılımının belirlenmesi [12]

3. BİR KAZIKLI RADYE TEMELİN OTURMA ESASLI TASARIMI

Bir kazıklı radye temel sistemi, yukarıda anlatılan yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir. Radye boyutları belirli bir temel için, değişik uzunluklarda ve sayıda kazıklar kullanılarak temel sistemi, optimum tasarıma ulaşmak amacıyla analiz edilmiştir. Bütün analizlerde kazık çapı 1 m olarak seçilmiştir. Analize esas teşkil edecek yapı özellikleri ve zemin özellikleri sırasıyla sonraki bölümlerde verilmiştir.

3.1. Yapı özellikleri

Mavişehir/İzmir bölgesinde yapılacak olan bir yüksek katlı yapı projesinin geoteknik analizine temel oluşturacak yapı özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Oturma analizleri sabit yükün tamamı ve hareketli yükün yarısı alınarak yapılmıştır.

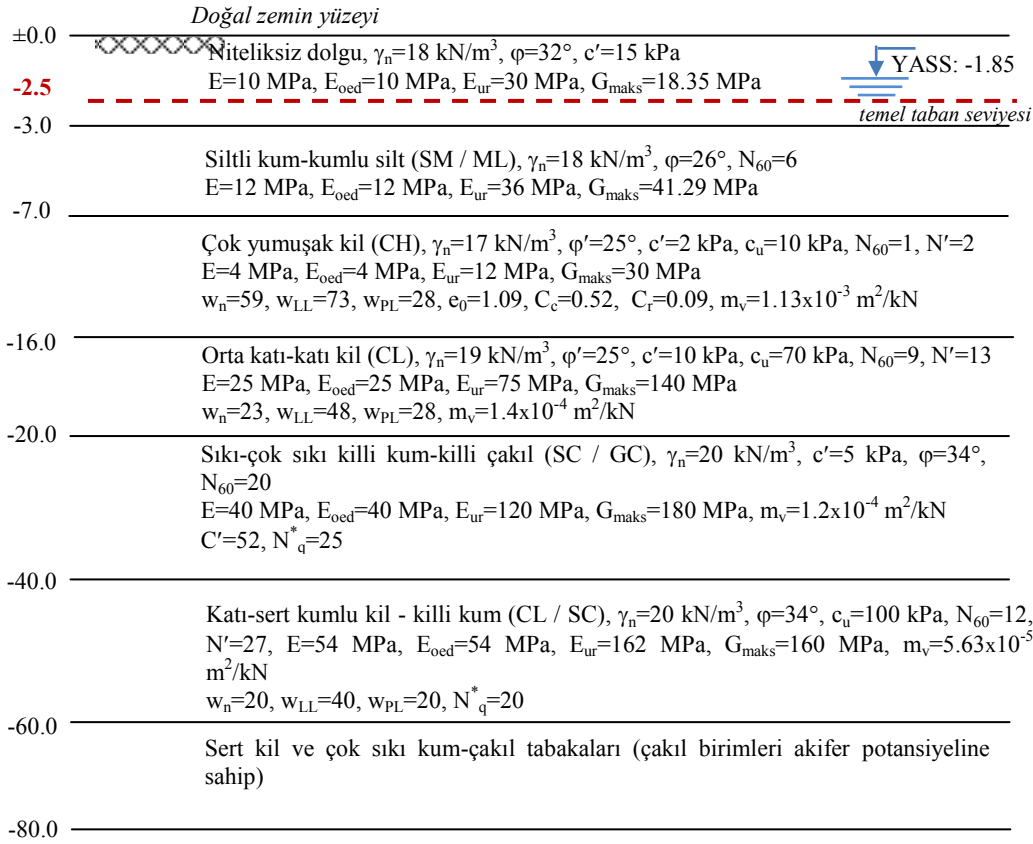
Çizelge 1. Analiz edilen yapının özellikleri

| | |
|--|---------------------------------------|
| Kat sayısı | 17 |
| Yapı yüksekliği | 52,5 m |
| Temel derinliği | 2,5 m |
| Temel alanı | 986.13 m ² (19.77 x 49.88) |
| Temel kalınlığı | 1,2 m |
| Temelin ağırlığı | 29583,9 kN |
| ΣG | 153863,1 kN |
| ΣQ | 44993,7 kN |
| $\Sigma(G+Q)$ | 198856,8 kN |
| $\Sigma(G+0.5Q)$ | 176359,9 kN |
| $\Sigma(G+Q+W_{\text{temel}})$ | 228440,7 kN |
| $\Sigma(G+0.5Q+W_{\text{temel}})$ | 205943,9 kN |
| $q_{(G+Q+W_{\text{temel}})_{\text{ort}}}$ | 232 kPa |
| $q_{(G+0.5Q+W_{\text{temel}})_{\text{ort}}}$ | 208,8 kPa |

3.2. Zemin özellikleri

Zemin profili 80 m derinliğe kadar Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre, yeraltı su seviyesi yüzeyden 1.85 m aşağıdadır. Yüzeyden -3 m derinliğe kadar niteliksiz dolgu bulunmaktadır. -3 m ile -7 m arasında siltli kum tabakası vardır. Zemin profilinde -7 m ile -16 m arasında yüksek plastisiteli, çok yumuşak kil mevcuttur. Bu bölgede, sıvılaşma problemi mevcut olmamasına rağmen, jet-grout ile zemin iyileştirme uygulamasına karar verilmiştir. İyileştirmenin amacı, zemin profilinde bulunan çok yumuşak kil tabakasının negatif çevre sürtünmesine sebep olmasını engellemek ve kazıklı radye temel kavramının uygulanabilmesini sağlamaktır. Kazıklı radye temel kavramının temel özelliği kazık grubu ile radye arasındaki yük paylaşımıdır. Jet-grout uygulaması ile radye temelin rijitliği artırılmıştır

ve radye temele gelen yükün, kazık grubu ile radye temel arasında paylaşılması kolaylaştırılmıştır.



c_u : drenajsız kayma mukavemeti, C' : taşıma kapasitesi indeksi, m_v : hacimsel sıkışabilirlik katsayısı

ϕ' : efektif içsel sürtünme açısı, c' : efektif kohezyon, G_{maks} : maksimum kayma modülü, E : deformasyon modülü

γ_n : doğal birim hacim ağırlık, N_{60} : düzeltilmiş SPT direnci, N' : sadece enerji düzeltmesi uygulanmış SPT direnci

Şekil 3. İdealize zemin profili

4. ANALİZ BULGULARI

Kazıklı radyelerin tasarımı üç aşamada incelenebilir: Kapasite hesabı, oturma hesabı ve yapısal hesap [2]. Bu çalışma kazıklı radyelerin oturma esaslı tasarımı üzerinedir. Oturma hesabı zeminin elastik özellikleriyle ilgilidir. Bu parametreler elastisite modülü (E) veya kayma modülü (G) ve Poisson oranıdır (ν).

Optimum çözümü bulmak amacıyla ilk aşamada kazık sayısının oturmaya etkisini incelemek için sekiz farklı kazık yerleşimi kullanılmıştır. Birinci aşamada Genişletilmiş Randolph Yöntemi, Eşdeğer Radye Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. İkinci aşamada ise kazık sayısı ve uzunluğu değiştirilerek, kazık uzunluğunun etkisi incelenmiştir. Bu aşamada sadece Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır.

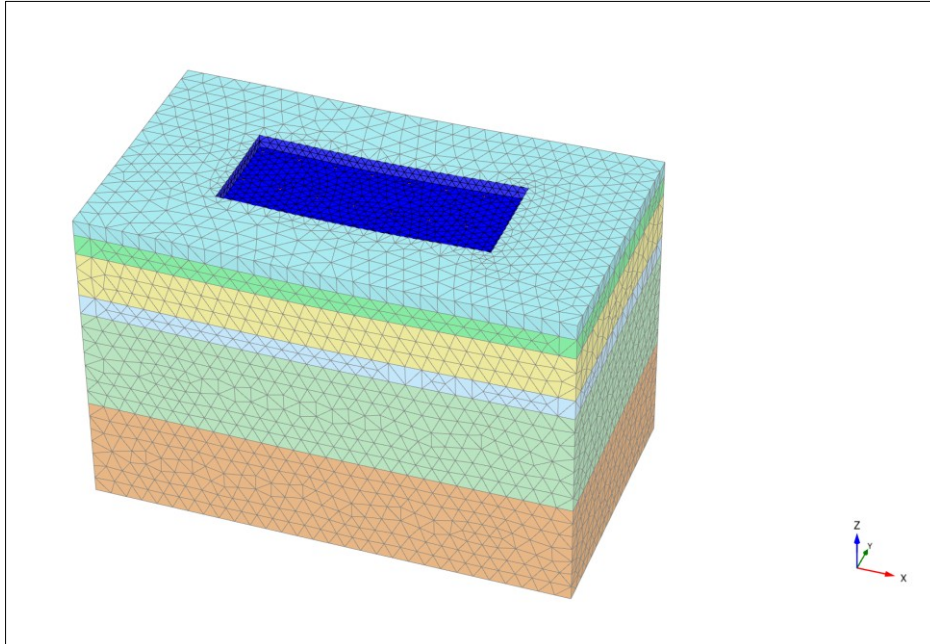
4.1. Genişletilmiş Randolph yöntemi

Kazıklı radyenin oturma hesabı için basitleştirilmiş yöntemlerden olan Randolph Yöntemi kullanılmıştır. Oturma hesabı, etki faktörlerinin hesabı büyük matrislerle çalışmayı gerektirdiği için Matlab programı ile yazılan bir kod aracılığıyla yapılmıştır. Randolph yöntemine ilave olarak Caputo ve Viggiani'nin önerdiği [6] Denklem (11) ile doğrusal olmayan davranış hesaba katılmıştır. Randolph Yöntemi farklı zemin tabakalarını dikkate almadığı için zemin profili tek bir tabakaya indirgenmiştir. Bu tabakanın kayma modülü ağırlıklı ortalama alınarak ve maksimum kayma modülünün %25'i alınarak hesaplanmıştır.

Bölüm 2'de verilen eşitlikler Matlab programı aracılığıyla yazılan bir kod ile değişik kazık sayısı ve uzunluğu için çözülmüştür. Programın esas amacı her bir kazığın rijitliğini kazıklar arasındaki etkileşimi gözönüne alarak hesaplamaktır. Etkileşim faktörü α , matris formda programa yazdırılmıştır ve her bir kazığın oturması, kazıklar üzerine gelen yükün, rijitliklere bölünmesiyle bulunmuştur. Burada radyenin tamamen elastik olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul ile üst yapı yükü kazıklar arasında eşit olarak paylaşılabilir.

4.2. Sonlu elemanlar

Kazıklı radye temellerin analizinde en güvenilir yöntem üç boyutlu nümerik analizdir. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis 3D programı kullanılmıştır. Model boyutları x,y ve z yönleri için sırasıyla 90x50x60 m'dir. Problemin modeli Şekil 4'de görülmektedir. Programda kazıklar gömülü kazık ve radye, plak eleman olarak modellenmiştir. Analiz sonuçlarına göre kazıklarda uca aktarılan yük, sürtünme direncine kıyasla çok küçüktür. Bu sonuç, kazıkların sürtünme kazığı olarak çalıştığını göstermektedir ve gömülü kazık kabulü bu sonuca göre geçerlidir. Modelde radye temelin boyutları x ve y yönü için 50 m ve 20 m olarak alınmıştır. Kazıklar ise kenarlarda 1 m boşluk kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu model 8 farklı kazık sayısı ve 6 farklı kazık uzunluğu için kullanılmıştır.



Şekil 4. Problemin üç boyutlu modeli

4.3. Eşdeğer radye yöntemi

Eşdeğer radye yöntemi sadece birinci aşama analizi için kullanılmıştır. Eşdeğer radye seviyesi kazık boyunun 2/3'ünde kabul edilmiştir [12]. Kazık uzunluğu birinci aşamada 36 m ve kazı derinliği 2.5 m olduğu için oturma hesapları -26.5 m seviyesinden başlamıştır. Radye temele etkileyen ortalama yük 210 kPa'dır ve etkili derinlik yaklaşık olarak -45 m seviyesindedir. Oturma hesabı Denklem (12) ve (13) kullanılarak yapılmıştır. Buna göre, kazıklı radenin oturması 26,4 mm bulunmuştur.

4.4. Bulguların tartışılması

Kazık sayısının ve uzunluğunun oturmalar üzerine etkisi iki aşamalı analiz ile araştırılmıştır. Birinci aşamada kazık sayısının oturmalar üzerine etkisinin incelenmesi için 8 farklı kazık yerleşimi analiz edilmiştir. Buna göre kazık sayısına bağlı olarak kazık aralıkları x ve y yönü için ayrı ayrı Çizelge 2'de verilmiştir. Kazık sayısının oturmaya etkisi Randolph yöntemi ve Plaxis 3D programı kullanılarak incelenmiştir. Bu aşamada kazık uzunluğu sabit ve 36 m tutulmuştur.

İkinci aşamada ise, kazık uzunluğu ve sayısı, toplam kazık miktarı (nL) sabit kalacak şekilde değiştirilmiştir. Bu aşamanın amacı, kazık uzunluğunun oturmalar üzerine etkisini belirlemektir. Bu aşamada sadece Plaxis 3D programı kullanılmıştır.

4.4.1. Kazık sayısının etkisi

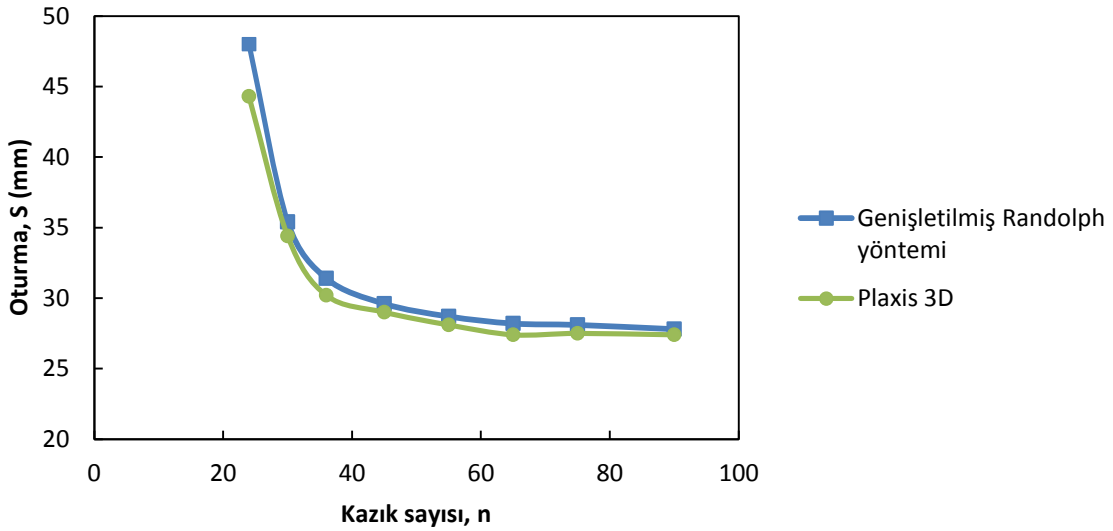
Oturma sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Kazık sayısına bağlı olarak oturmaların değişimi Şekil 5'te görülmektedir. Kazık sayısının artışı, belirli bir noktadan sonra oturmalarda önemli bir azalmaya sebep olmamaktadır. Bu çalışma için bu nokta, kazık sayısının 55 olduğu nokta olarak düşünülebilir. Bu davranışın ana sebebi kazık-zemin-kazık etkileşimidir. Kazık aralığı azaldıkça etkileşim artmaktadır ve kazık sayısındaki artışın faydalı etkisinin bir noktadan sonra kaybolduğu görülmektedir. Bu çalışmanın amacı olan optimizasyon da oturmaların daha fazla azalmadığı kazık sayısının belirlenmesidir.

Çizelge 2. Değişik kazık sayısı için oturma sonuçları

| Kazık sayısı | s_x (m) | s_y (m) | Oturma, S (mm) | |
|--------------|-----------|-----------|----------------|----------------------|
| | | | Randolph | Sonlu Elemanlar (3D) |
| 24 (3x8) | 6,8 | 9,0 | 48,0 | 44,3 |
| 30 (3x10) | 5,3 | 9,0 | 35,4 | 34,4 |
| 36 (4x9) | 6,0 | 6,0 | 31,4 | 30,2 |
| 45 (5x9) | 6,0 | 4,5 | 29,6 | 29,0 |
| 55 (5x11) | 4,8 | 4,5 | 28,7 | 28,1 |
| 65 (5x13) | 4,0 | 4,5 | 28,2 | 27,8 |
| 75 (5x15) | 3,4 | 4,5 | 28,1 | 27,5 |
| 90 (6x15) | 3,4 | 3,6 | 27,8 | 27,4 |

Kazık sayısının artmasına rağmen oturmalarda belirgin bir azalmanın olmayışı eşdeğer radye yaklaşımını doğrulamaktadır. Eğer kazık sayısı yeterince fazla olursa, kazık grubunun eşdeğer bir radye temel davranışı gösterdiği kabul edilebilir. Kazık sayısı arttıkça, Randolph yöntemi ve üç boyutlu analizin sonuçları da eşdeğer radye yaklaşımından bulunan oturma değerine yaklaşmaktadır. Ancak kazık sayısının azalması, kazıkların birbirlerinden bağımsız hareket etmesine sebep olarak eşdeğer bir radye temelin oluşmasına engel olur.

Kazıklı radye temel kavramı, radyenin yük taşıdığı varsayımına dayanarak kazık sayısında azalmaya sebep olmaktadır. Bu bakımdan, kazık sayısının eşdeğer radye yaklaşımının geçerli olduğu bölgede kalıp kalmadığı yaklaşık yöntemler ile tespit edilmelidir.



Şekil 5. Kazık sayısının oturmalar üzerine etkisi (1. aşama analizi)

4.4.2 Kazık uzunluğunun etkisi

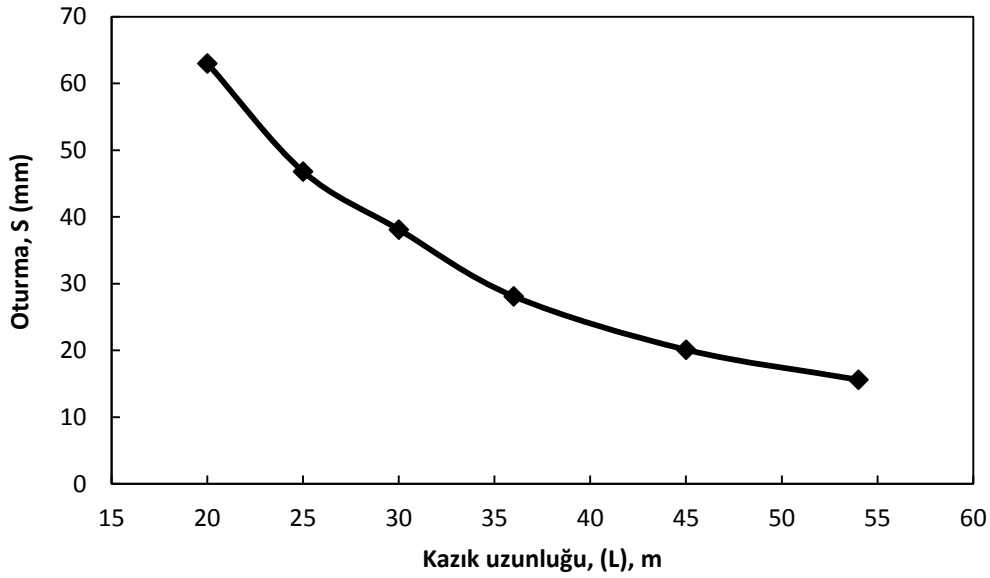
Optimum tasarım için yapılan analizlerde birinci aşama, oturmaların belirgin azalma göstermediği kazık sayısını ve yerleşimini bulmaktır. Birinci aşamada kazık uzunluğu taşıma kapasitesi ilkeleri kullanılarak belirlenebilir. İlk aşamada 36 m kazık uzunluğu için kazık sayısının 55 olmasına karar verilmiştir. İkinci aşamada ise, sabit kazık çapı için, kazık uzunluğu ile sayısının çarpımı olan $36 \times 55 = 1980$ m yaklaşık olarak sabit tutularak, kazık uzunluğu ve sayısı değiştirilmiştir. İkinci aşamada 6 farklı analiz yapılmıştır. Kazık sayısı ve uzunluğu Çizelge 3'te verilen kazık yerleşimine sahip temellerin analizi sadece üç boyutlu nümerik analiz ile yapılmıştır. Bulunan oturmalar yine aynı çizelgede verilmiştir. Kullanılan kazık uzunlukları, toplam kazık miktarı yaklaşık olarak sabit olacak şekilde belirlenmiştir.

İkinci aşama analiz sonuçları Şekil 6'da görülmektedir. Buna göre kazık uzunluğu arttıkça, oturma değeri sürekli olarak azalmaktadır. Bu sonuca göre, kazıklı radye oturması ile kazık uzunluğu arasında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki vardır. Esasında, tek bir kazığın rijitliği doğrudan kazık uzunluğuna bağlıdır ve uzunluk arttıkça rijitlik artmaktadır. Ayrıca, deformasyon analizleri zeminin elastik parametrelerine doğrudan bağlıdır. Zemin özellikleri de genelde derinlik ile iyileşeceği için, oturmaları azaltmanın en etkili yolu kazık uzunluğunu arttırmaktır. Buna göre 54 m uzunluğunda 36 adet kazık kullanıldığında temel oturması minimum (15,6 mm) olmaktadır. Ancak kazıklı radyelerin tasarımı, oturma esaslı tasarıma ilave olarak, taşıma kapasitesi ve yapısal analizin yapılmasını gerektirir. Sonuçta bulunan

kazık sayısı ve kazık uzunluğu, taşıma gücü ilkeleri ve yapısal analiz açısından kontrol edilmelidir.

Çizelge 3. Kazık uzunluğunun etkisi için yapılan analizlerin sonuçları

| Kazık sayısı | Kazık uzunluğu,L (m) | s_x (m) | s_y (m) | Oturma,S (mm) | |
|--------------|----------------------|-----------|-----------|---------------|----------------|
| | | | | Sonlu | elemanlar (3D) |
| 36 (4x9) | 54 | 6,0 | 6,0 | 15,6 | |
| 44 (4x11) | 45 | 4,8 | 6,0 | 20,1 | |
| 55 (5x11) | 36 | 4,8 | 4,5 | 28,1 | |
| 66 (6x11) | 30 | 4,8 | 3,6 | 38,1 | |
| 80 (5x16) | 25 | 3,2 | 4,5 | 46,8 | |
| 102 (6x17) | 20 | 3,0 | 3,6 | 63,0 | |



Şekil 6. Kazık uzunluğunun oturma üzerine etkisi (2. aşama analizi)

5. SONUÇ

Kazıklı radyelerin optimum tasarımı, oturmaları belli bir sınırın altında tutarak maksimum ekonominin sağlanmasını gerektirir. Bu çalışmada, diğerlerinden farklı olarak, optimum tasarım için ekonomik düşünceler de gözönüne alınmıştır. Burada ekonomi ile kastedilen, kazıklı radye temelin oturma davranışını değiştirmeden daha az kazık kullanılmasıdır.

Çalışmada kazık sayısı ve kazık uzunluğu değişken olarak kullanılarak oturmaların değişimi gösterilmiştir. Buna göre kazık sayısı artarken, oturma değeri belirli bir kazık sayısından sonra azalmamaktadır. Oturmanın daha fazla azalmadığı kazık sayısı ilk aşama için optimum çözüm kabul edilmiştir. İkinci aşamada kazık miktarı (nL) sabit tutularak kazık sayısı ve uzunluğu değiştirilmiştir. Bu durumda, kazık uzunluğu arttıkça temel davranışı iyileşmiştir. İki aşamalı analizin sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Kazıklı radyenin oturması, kazıklar arası etkileşimden dolayı belirli bir noktadan sonra kazık sayısından bağımsız hale gelir.
- Optimum tasarım, oturmanın kazık sayısının artışıyla daha fazla azalmadığı noktadır.
- Optimum kazık aralığı (s/d) 4.5 ile 6.0 arasında değişir.
- Kazık grubunun oturması ile kazık uzunluğu arasında doğrusal bir ilişki vardır ve uzunluk arttıkça oturmalar azalır.
- Eşdeğer radye yaklaşımı, görelî olarak az kazık kullanılan kazıklı radyelerde geçerli değildir.
- Kazık sayısı arttıkça kazık-zemin-kazık etkileşimi ve grup etkisi artar ve eşdeğer radye yaklaşımı uygulanabilir hale gelir.

KAYNAKLAR

- [1] Clancy P, Randolph MF. "An approximate analysis procedure for piled raft foundation". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 17 (12), 1993, s.849-869.
- [2] Fellenius BH. "Pile foundations-Analytical", in *Analysis and design of building foundations*, ed. H.Y.Fah, 1976.
- [3] Randolph MF. "Science and empiricism in pile foundation design", *Géotechnique*, 53 (10), 2003, s.847-875.
- [4] Poulos HG. "Piled raft foundations: Design and applications", *Géotechnique*, 51 (2), 2001, s.95-113.
- [5] De Sanctis L, Mandolini A, Russo G, Viggiani C. "Some remarks on the optimum design of piled rafts", in *Deep Foundations 2002: An international perspective on theory, design, construction and performance*, New York: ASCE Publication, 2002, s.405-425.
- [6] Caputo V, Viggiani C. "Pile foundation analysis: a simple approach to nonlinearity effects", *Riv. It. di Geotecnica*, Vol. 18, No.1, 1984, p. 32-51.
- [7] Mandolini A, Viggiani C. "Settlement of piled foundations", *Géotechnique*, 47 (4), 1997, s.791-816.
- [8] Poulos HG. "Significance of interaction and non-linearity in piled raft foundation design", in *Soil-Foundation-Structure Interaction*, London: Taylor & Francis Group, 2010, s.187-192.
- [9] Randolph MF, Wroth CP. "An analysis of the vertical deformation of vertically loaded piles", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104(GT12), 1978, s.1465-1488.
- [10] Mylonakis G, Gazetas G. "Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil", *Géotechnique*, 48 (1), 1998, s.55-72.
- [11] Terzaghi K, Peck RB. *Soil mechanics in engineering practice* (Second Edition). John Wiley and Sons, 1967.
- [12] Tomlinson M, Woodward J. *Pile design and construction practice* (5th ed.). New York: Taylor & Francis, 2008.

ÖZGEÇMİŞ / CV**Ozan ALVER, İnşaat Mühendisi (Civil Engineer)**

Lisans derecesini 2013'de İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden aldı. Dokuz Eylül Üniversitesi Geoteknik Programı'nda Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir. Temel ilgi alanları Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği, Kazıklı Temeller ve Kazık-Zemin-Kazık Etkileşimi üzerinedir.

He got his Bachelor's degree in Civil Engineering Department at Dokuz Eylül University, İzmir/Turkey in 2013. He is pursuing a Master degree in Geotechnical Engineering Programme at Dokuz Eylül University. His major areas of interests are: Soil Mechanics and Foundation Engineering, Piled Foundations and Pile-Soil-Pile Interaction.

Gürkan ÖZDEN, Prof. Dr. (Professor)

Lisans derecesini 1988'de İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden aldı. Yüksek Lisans derecesini 1992'de Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü Kıyı Mühendisliği'nden aldı. Doktora derecesini 1999'da Wayne State University İnşaat Mühendisliği'nden aldı. Hala Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Temel çalışma alanları Kazık Mühendisliği, Geoteknik Deprem Mühendisliği ve Kazık-Zemin-Kazık Etkileşimi üzerinedir.

He got his Bachelor's degree in Civil Engineering Department at İstanbul Technical University in 1988. His master degree is in The Institute of Marine Sciences and Technology Coastal Engineering, İzmir/Turkey in 1992. He got a PhD degree in Civil Engineering Department at Wayne State University in 1999. He is still an academic member of Dokuz Eylül University Civil Engineering Department. His major areas of interests are: Piling Engineering, Geotechnical Earthquake Engineering and Pile-Soil-Pile Interaction.