



# Radye Plak Rijitliğinin Düşey Eksenel Yüklü Kazık Grubu Davranışına Etkisi

## *Role of Slab Rigidity on the Behavior of Axially Loaded Pile Group*

Zehra Nil Kutlu , İsmail Emrah Kılıç\* , Mert Tolon

Maltepe Üniversitesi, Maltepe Eğitim Köyü Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul

### Öz

Kazıklı temellerin yapısal modellenme çeşitliliklerini temel alan bu çalışma kapsamında farklı kazık-zemin etkileşim kriterlerini dikkate alan üç ayrı yaklaşım ele alınmıştır. Bunlar sırasıyla, i. basit model: ankastre mesnet modeli, ii. detaylı yapısal model: eş değer lineer yay kabulü, iii. detaylı yapısal model: non-lineer zemin yayları şeklindedir. İlk iki yaklaşım kazıkların ön boyutlandırması için kullanılmış ve tek radye kalınlığı için hesaplanmıştır. Son model yaklaşımında ise farklı radye kalınlıkları için model tekrarlı şekilde çözülmüş ve kazıklara aktarılan yük dağılımı, radye gerilme dağılımı ve oturma davranışı irdelenmiştir. Çalışma kapsamında, 26.0m x 50.0m boyutlarında radye temeli olan, yüksek bodrumlu, 7 katlı bir yapı kullanılmıştır. SAP 2000 programı kullanılarak yapılan yapısal modellerde zemin-yapı davranışı, yük-deformasyon ilişkileri şeklinde ilgili yaylar ile ifade edilip radye altında herhangi bir temel altı zemin direnci katkısı dikkate alınmamıştır. Bu şekilde radye ve kazıklar arasındaki gerçek yük-deformasyon ilişkisi non-lineer zemin yay tanımı ile farklı radye kalınlıkları için incelenmiştir. Çalışmada verimli bir tasarım için, derin temel elemanları olan kazıkların deformasyon karakteristiği ve nihayetinde kazıklar arası yük dağılımı çalışılmıştır. Çalışma sonucunda, eksenel yüklü kazıklı radye temellerin geoteknik tasarımında basitleştirilmiş ve detaylı yaklaşımların kullanımının güvenlik ve uygulanabilirlik açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Her iki yaklaşımın uyumlu sonuç verdiği ve basitleştirmenin de eksenel yükler altında tasarım için kabul edilebilir olduğu teyit edilmiştir. Bunun yanısıra ayrıca, üst yapı yüklerinin kazıklara efektif aktarılması için radyenin yeteri derecede rijit olması gerekliliği sonucuna varılmıştır. Çalışmada ele alınan modelde, radye kalınlığının en az 1m olması durumunda radye temel efektif olarak yük aktarmaya başlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin-yapı etkileşimi, Doğrusal olmayan zemin yayları, t-z eğrileri, Kazık-radye etkileşimi

### Abstract

Within the scope of this study, which was based on the structural modelling variations of pile foundations, three different approaches for different pile-soil interaction criteria were discussed. These approaches were respectively, i. simple model: fixed supported model, ii. detailed structural model: equivalent linear spring model and iii. detailed structural model: non-linear spring model. The first two approaches were used for pre-dimensioning and were calculated for single raft thickness. In the third approach, the model was iteratively analyzed for different slab thicknesses and the load distribution transferred to piles, slab stress distribution and settlement behavior were examined. In this study a 26.0m x 50.0 m piled raft foundation of a 7 - story building was examined. In the structural models created using the SAP 2000 program, the soil-structure behavior was expressed with relevant springs, and any soil resistance contribution under the raft was not taken into account. Pile forces were obtained through definition of the actual load-deformation relationships of the raft and the piles via varying raft thickness and non-linear soil links. The deformation characteristics and load distribution among the piles were evaluated for an optimal design. Finally, conservative versus comprehensive approaches for design of a piled raft foundation under axial loading were discussed with respect to safety and feasibility where two approaches gave consistent results. It is also concluded that the raft must be sufficiently rigid to distribute the loads to the piles effectively. In this specific study, the raft functions effectively once the thickness reached 1m and above.

**Keywords:** Soil-structure interaction, Nonlinear soil links, t-z curves, Pile-raft interaction

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: [emrahkilig@maltepe.edu.tr](mailto:emrahkilig@maltepe.edu.tr)

Zehra Nil Kutlu [orcid.org/0000-0003-4813-588X](https://orcid.org/0000-0003-4813-588X)

İsmail Emrah Kılıç [orcid.org/0000-0002-6514-2224](https://orcid.org/0000-0002-6514-2224)

Mert Tolon [orcid.org/0000-0002-0131-2976](https://orcid.org/0000-0002-0131-2976)



Bu eser "Creative Commons Atımlı-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

## 1. Giriş

Zeminler, etkileşimde buldukları yapıya kıyasla, yapısal kuvvet dağılımının son halkası durumunda olduklarından, mühendislik davranışlarının doğru şekilde dikkate alınması, genel yapı tasarımının doğruluğu ve beklenen yapısal davranış sonuçlarının yakınsaklığı açısından kritik öneme sahiptir. Zeminlerin heterojen yapıya sahip olmaları, doğal malzeme olmaları ve kontrol dışı çok sayıda parametreye sahip malzemeler olmalarından dolayı, mekanik davranışları değişkenlik göstermektedir. Bu doğrultuda uygun bir yapısal mühendislik tasarımı ortaya koyabilmek için zeminin geoteknik davranışının titizlikle değerlendirilmesi, yapının genel emniyeti ve ekonomik tasarıma esas optimum çözümlerin elde edilebilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır.

Geoteknik temel mühendisliği tasarımlarında zemin parametrelerinin doğru tayin edilmesi, zemin malzeme modelinin zemin davranışı ve yükleme karakteristikleri nispetinde belirlenmesi, yapı-zemin etkileşimi açısından rijitlik değerlerinin doğru belirlenmesi ve tüm bunların olası değişimleri halinde nihai tasarımdaki etkilerinin bilinmesi gerekmektedir. Söz konusu çözümlerdeki karmaşıklığın ve modelleme zorlukları sebebi ile son yıllarda özellikle geoteknik alanına özel farklı zemin davranış modelleri sunan yazılımlarla, iki ve üç boyutlu doğrusal olmayan sürekli ortam analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, klasik mukavemet kuralları ve temel geoteknik bilgisine dayanarak oluşturulan konvansiyonel basitleştirilmiş yaklaşımların temel sistemlerinin ön boyutlandırmasındaki ve merteye kontrolündeki yeri ve önemi gözardı edilemez. Karşılaştırmalı çözümler üzerinde yapılacak parametrik çalışmaların, farklı metodolojilere sahip yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmesi ve sonuçların sunulması, uygulanabilir, optimum tasarımlara ulaşabilmek bakımından pratik mühendislik çalışmalarında fayda sağlamaktadır.

Kazıklı radye temel sistemlerinde düşey yükler altında yük aktarımı ve oturma davranışı, kazıklar-zemin-radye arasındaki rijitlik-deformasyon bazlı etkileşime bağlıdır. Uygun yük dağılımı, izin verilebilir deformasyon ve yeterli temel kesitlerinin tayini ile en uygun çözüme karar verilmesinde, i. radye kalınlığı, ii. temel zemini yatak katsayısı, ve iii. kazık yük-deformasyon özellikleri gibi model bileşenleri yapının bütününe optimizasyonunda öneme sahiptir.

Temel sistemlerinin analizi için çoğunlukla, basitleştirilmiş analitik hesap yöntemlerinin yanısıra bilgisayar tabanlı nümerik hesap yöntemleri kullanılmaktadır (Poulos 2001). Özellikle sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizler her

ne kadar zemin modellemesi için kullanılıyor olsalar da her temel sistem çözümünde zemin-temel etkileşiminin doğru bir şekilde modellenebilmesi halen bu çözümlerin en zor ve kritik aşamasını oluşturmaktadır. Bu noktada sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan temel sistemi tasarım çözümleri ciddi bilgi işlem gücü, zaman ve uzmanlık gerektirdiğinden, temel tasarımında pratik uygulamalarda tercih edilmeyip, genellikle akademik ve araştırma odaklı kalabilmektedir. Pratik analiz ve tasarım amaçlı olarak, hızlı, kolay ve uygulanabilir zemin-temel model yaklaşımlarının ortaya konması hızlıca oturma ve gerilmelerin belirlenmesini sağlayarak pratik boyutlandırmaya olanak sağlamaktadır.

Randolph (1994) tarafından kazıklı radye temel tasarımıyla ilgili tariflenen tasarım yaklaşımlarından biri olan konvansiyonel yaklaşım kazıkların üst yapıdan gelen yükü büyük ölçüde taşıması esasına dayanmaktadır. Liang vd. (2003) çalışmasında kazıklı radye temel sistemlerinde, tüm yükü taşımalarından ziyade kazıkların oturma kriterinin kontrolü için kullanıldığını belirtilmektedir. Nguyen vd. (2013)'e göre kazıklı radye temel sistemlerinin analizi için kullanılan basitleştirilmiş hesap yönteminde sadece kazıklar ve radye arasındaki etkileşim dikkate alınmakta olup kazıklar için grup kazık etkisi dikkate alınmamaktadır. Tan ve Chow (2004) çalışmalarında bu temel sistemlerinin tasarımında kazık ve radye temelini beraber çalışması durumunu incelemiştir.

Bilgisayar tabanlı hesap yöntemlerinde daha kesin hesap yaklaşımları için sınırlı elemanlar yöntemi (BEM) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) veya bu yöntemlerin kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu yöntemle yapılan çalışmaların önemli bir örneğinde Reul ve Randolph (2003) aşırı konsolide kil bir zemin tabakasındaki kazıklı radye temel sisteminin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ederek zemin-yapı etkileşimi açısından temel sistemini incelemiştir. Sales vd. (2010) sınırlı elemanlar yöntemi ve sonlu elemanlar yönteminin kazıklar arasındaki etkileşimi analiz etme açısından farklılıklarını tespit etmişler, bunun oturmalar üzerindeki etkilerine değinmişlerdir ve temel sisteminin oturma performansının zemin-radye-kazık etkileşiminin toplam bir yansıması olduğu sonucuna varmışlardır.

Kazıklı radye temel sistemlerinin davranışlarını etkileyen faktörlerinin analizi için de literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bunlardan Long (2010) yaptığı büyük ölçekli arazi test modelinde kazık ve radye arasında yük dağılımı değişiminin oturma kriteri üzerindeki etkisini incelemiştir ve toplam yükün kazıklara gelen oranı arttıkça temeldeki oturma miktarının azaldığını gözlemlemiştir. Temel sisteminde kazıklar arasındaki yük dağılımının yük seviyelerine

göre farklılaşması bu dağılımdaki değişimin radye davranışı üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışma Lee vd. (2010) tarafından yapılmıştır. Cunha vd. (2001) kazıklı radye temel tasarım sistemlerini etkileyen faktörler hakkında yaptıkları nümerik çalışmanın bir sonucu da artan radye kalınlığı ile birlikte yük dağılımında radye tarafından alınan yük oranının arttığı ve temel sistemi için hem toplam hem de farklı oturumların azaldığı sonucuna varılmıştır.

Lin ve Feng (2006) radye kalınlığı ile radye boyutlarının temel sisteminin oturma kriteri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Oh vd. (2009) radye altındaki zemin tipinin temel olan etkisini incelemek amacıyla granüler ve kohezyonlu zemin tiplerinin kullanıldığı bir nümerik modelleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışma analiz sonuçlarında kohezyonlu zeminlerde temelin oturma kriteri üzerinde radye kalınlığının etkili olduğu gözlemlenirken granüler zeminler için radye kalınlığının oturma kriteri için kayda değer bir etkisi gözlemlenmemiştir. Leung vd. (2010) çalışmalarında, radye kalınlığının artması ile kazıklı radye sisteminin kompozit bir sistem olarak hem temelin genel rijitliğini artırabileceğini hem de üst yapının bozulmasına ve çatlamasına neden olabilecek farklı oturumları azaltabileceğini gözlemlemişlerdir.

Sinha vd. (2019) çalışmalarında yükleme şiddeti, zemin yatak katsayısı büyüklüğü ( $K_s$ ) ve radye kalınlığı gibi parametrelerin esnek radye temelin taban basıncı ve oturması üzerindeki etkisini sayısal modelleme çalışmaları ile anlamaya çalışmışlardır ve çalışma sonunda zemin yatak katsayısı parametresinin temel taban basıncı üzerindeki en etkin değişken olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Modak ve Singh (2022) makalelerinde, sert kil üzerindeki büyük çaplı kazıklı radyeler için sayısal olarak yürütülen bir parametrik çalışmayı sunmaktadırlar. Kazık sayısı, kazık uzunluğu, kazık aralığı ve radye kalınlığının etkileri, büyük çaplı kazıklı radyelerin farklı ve ortalama oturumları, radyenin eğilme momenti ve yük paylaşımı açısından değerlendirilmiştir (Modak ve Singh, 2022). Çalışmada radye kalınlığı için, radye yapısal rijitliğinin esnekten rijite doğru farklı özellikler gösterileceği şekilde farklı değerler kullanılmıştır. Radye kalınlığı artarak radye daha rijit bir yapı haline geldiğinde hem farklı oturma değerleri hem de ortalama oturma değerleri azalmış fakat kazıklarda daha büyük eğilme momentleri oluşmuştur. Kazıklı radye sistemlerin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bir nümerik analizinde yükleme koşulları, kazık boy ve çapları, zemin parametreleri sabit olarak bırakılmış sadece radye kalınlığı ve kazık aralıkları değişken olarak kullanılmıştır (Kalita vd. 2021). Çalışmada izin ver-

lebilir temel oturma limitlerinin, kazık aralığından bağımsız olarak esnek/yarı-esnek davranış gösterebilen kalınlıklarda sağlandığı sonucuna varılmıştır. Mali (2019) üç boyutlu sonlu elemanlar metodu yardımı ile kazık aralığı ve radye kalınlığı değişkenlerinin, temel yapısına ait oturma, yük dağılımı, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri üzerindeki etkilerini farklı zemin tipleri için incelediği oldukça kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma sonunda tüm zemin tipleri için radye kalınlığının ortalama oturma değerlerini arttırdığını ve farklı oturma değerlerini düşürdüğü sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca düşük radye kalınlığı ve seyrek kazık aralığı durumunun eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerini düşürdüğü sonucuna varmıştır.

Öte yandan, kazıklı temel sistemlerinin modelleme yöntemlerine yönelik yapılan bir diğer değerlendirme çalışmasında (Sheil vd. 2019), kazık-zemin-radye etkileşiminde, toplam kazık grubu oturma değerinin ( $d_{\text{toplam}}$ ) kazık çapı ( $D$ ) ile normalize grup oturma değerine ( $S_{\text{ng}}$ ) bağlı olarak; ( $S_{\text{ng}} = d_{\text{toplam}}/D$ ); radye tarafından oluşması beklenen direnci üç ayrı şekilde değerlendirilmiştir. Buna göre, eğer,  $0\% < S_{\text{ng}} < 1.5\%$  ise, radyenin yük almaya katkısı oldukça düşüktür ve bu nedenle genellikle radye etkisi ihmal edilir ve tüm direnç kazıklar tarafından alınacak şekilde tasarım yapılır. Eğer,  $1.5\% < S_{\text{ng}} < 4\%$  ise, kazıklar nihai kapasitelerinin %90'ına kadar yük alırlar ve eğer,  $S_{\text{ng}} > 4\%$  ise, ancak bu durumda kazıklı radyede ek direnç esas olarak radyeden sağlanmaya başlanır.

Mandolini ve Viggiani (1997) ve Kumar vd. (2016) çalışmalarında, kazıklı radye sistemi olarak tasarlanan radye temel maksimum katkısının izole bir radye direncine göre oldukça düşük olduğunu; ve ayrıca kazıkların sağladığı maksimum direncin, radyenin varlığından bağımsız olduğunu da raporlamışlardır (Comodromos ve Bareka, 2009). Bu nedenle, kazıkların etrafındaki zemin direncini tarif eden yay elemanları, radye altındaki dirençten bağımsız olarak düşünülerek ifade edilmelidir (Sheil vd. 2019). Saeed (2022) çalışmasında zeminin nonlineer davranışının radye temeller üzerindeki etkisini sonlu elemanlar metodu kullanarak incelemiştir. Bu çalışmada radye temelin rijitlik değerinin temel aştı basıncı kuvvetleri, zımbalama kuvvetleri ve eğilme momentleri üzerindeki değişimi olmuştur. Çalışmada Winkler yay modelindeki süreksizlik dezavantajına rağmen nonlineer davranışı temsil edebilme kabiliyeti bu metodun halen verimli bir yöntem olduğunu göstermiştir. Düşük rijitliğe sahip (esnek) radye sistemlerde zemin basıncı değerinin zemin taşıma gücünü geçebildiği ve anlamsız sonuçlar ortaya çıkabildiği de gözlemlenmiştir. Temel yapısının rijitlik değerini etkileyen

değişkenler radye kalınlığı, kolon aralıkları, beton elastisite modülü ve zemin yatak katsayısı olarak belirlenmiştir (Manjunath vd. 2018).

Literatürdeki araştırmalardan da görüldüğü gibi, kazıklı radye temellerde sistemin davranışı birçok faktöre göre şekillenmektedir. Tasarım ve davranışta etkili olan bu faktörler; kazık konfigürasyonu (kazık sayısı, kazıklar arası mesafe, kazıkların yerleşimi, boy dağılımları vs.), kazık özellikleri (kazık çapı, malzemesi, uzunluğu vs.), radye özellikleri (radye kalınlığı, boyutları ve geometrisi) ve zemin özellikleri (temel zemin sınıfı ve mukavemeti) olarak sayılabilir. Bu faktörlerin her biri davranışa etki ettiği gibi bu faktörlerin çeşitli kombinasyonları da davranışı ve sonuçları değiştirebilmektedir.

Bu doğrultuda çalışma kapsamında, diğer tüm faktörler sabit tutularak, radye kalınlığının kazıklara aktarılacak yüklemeye olan etkisi, temel rijitliğine bağlı yük dağılımının ne şekilde değişeceği farklı yaklaşımlarla ele alınarak geniş bir perspektiften değerlendirilmektedir.

## 2. Gereç ve Yöntem

### 2.1. Zemin Karakterizasyonu ve Yükler

Çalışmada, bodrum kat yüksekliği 4.0m, zemin ve diğer 5 adet normal katın yükseklikleri 3.0m olan toplam 7 katlı bir hastane yapısı ve bu yapıya ait temel sistem modeli ele alınmıştır. Kat sayısı ve kat yükseklikleri standart olacak şekilde toplamda 7 kat ile sınırlandırılmıştır. Bunun yanısıra kazıklara gelen yük dağılımının yalnızca radye plak rijitlik etkisi bakımından incelenebilmesi için model geometrisi için her doğrultuda simetrik olan bir aplikasyon planı üzerinden ilerlenmiştir. Model geometrisi ve sınır koşulları, Sistem statik yük sınır koşulları için, zati yük (G) ve hareketli yük (Q) kombinasyonlarının, dikkate alınan zemin profili için elverişsiz durumu yaratması ve temel sisteminin kazıklı temel olacak şekilde sonuçlanması üzerine bir senaryo ile kurulmuştur.

Kutlu ve Kılıç'ın 2019 yılındaki ön çalışma niteliğindeki yayınlarında yer alan ve sunulan mevcut çalışmaya esas teşkil

eden; üst yapı modeli, temele aktarılan yükler ve geoteknik ön tasarımı tamamlanmış olan radye ve kazıklı temel modeli, farklı parametre etkilerinin detaylı irdelenmesi amacıyla bu çalışmada tekrar ele alınmıştır. Referans kaynakta kullanılan ön tasarım parametreleri ve mevcut analizlerle ilgili olan sonuçlara ilerleyen bölümlerde bilgi ve karşılaştırma amaçlı olarak yer verilmiştir.

Sunulan çalışma kapsamında pratik uygulamalara yönelik olarak, inşaat mühendisliği yapısal çözümlemesinde yaygın olarak kullanılan SAP2000 programı kullanılarak, kazık-zemin-radye etkileşiminde radyenin yalnızca kazık başlığı olarak çalıştığı kabulü ile radye kalınlığının tek başına değişiminin üst yapıdan aktarılan yüklerin dağılımına ve kazıklara aktarılan yüklerin büyüklüğündeki değişime olan etkisi incelenmiştir.

Yapı, farklı kayma mukavemeti parametrelerine sahip üç ayrı kil tabakası ile idealize edilmiş olan zemin profili üzerinde yer almaktadır. Zemin profilinde yer alan üç tabakaya ait zemin parametreleri Çizelge 1'de özetlenmektedir. Tabaka mukavemet değerleri saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen değerlerin birlikte değerlendirilmesi ile idealleştirilmiştir. İnce daneli kil zeminlerin kritik durum mukavemet değerlerini temsil eden drenajsız kayma mukavemeti yanısıra, Çizelgede verilen elastisite modülü değerleri, farklı zemin cinsleri için drenajsız kayma mukavemeti değerlerine uygun olarak belirlenmiştir (Bowles, 1988). Çizelge 1 'de verilen zemin parametreleri, SAP 2000 programında zemin-yapı etkileşimini dolaylı olarak tarif etmek için kullanılacaktır. Elastisite modülü ve drenajsız kayma mukavemeti değerleri analizin ilerleyen aşamalarında lineer yay modeli için düşey, yatay yatak katsayısı ve sonrasında düşey, yatay yay sabitlerinin belirlenmesinde kullanılacaktır. Non-lineer t-z, q-z ve p-y eğrilerinin tariflenmesi için ise drenajsız kayma mukavemeti değerlerinden faydalanılmıştır.

Yüzeysel temel durumunda yapıdan kaynaklı zemin gerilmeleri nedeniyle kil tabakalarında meydana gelecek olan oturmaların yapı için izin verilebilir deformasyon sınırla-

**Çizelge 1.** İdeal zemin profili zemin mühendislik özellikleri.

Tabaka	Derinlik (m)	Doğal birim hacim ağırlık, $\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Elastisite modülü, E (MPa) (Bowles, 1988)	Poisson oranı, $\nu$ (Bowles, 1988)	Drenajsız kayma mukavemeti, $c_u$ (kPa)
Yumuşak siltli kil	0.0-6.0	19/20	20	0.2	45
Orta katı siltli kil	6.0-12.0	19/20	40	0.2	60
Katı killi silt	12.0-60.0	20/21	80	0.3	120-160

rının ötesinde olduğundan yapı temeli derin temel olarak tasarlanmıştır. Ön boyutlandırmada derin temel sistemini oluşturan kazıkların her biri 1m çapa ve 31.0m boya sahip olacak şekilde toplam 67 adet kazık ile temel sistemi analizi tamamlanmıştır (Kutlu ve Kılıç, 2019). Kazık yerleşim planı Şekil 1'de verilmektedir. Tekil kazık taşıma gücü dayanımları grup kazıklı sistemlerde azalma gösterebilmektedir. Grup kazıklı sistem tasarımlarında bu nedenle, kazıklar arasında belirli bir aralık belirleyerek bu azalmayı sınırlamak yaygın bir yaklaşımdır. Gerekli mesafe sürtünme kazıkları ve uç kazıkları için farklılık göstermektedir. Çalışma kapsamında ele alınan kazıklar sürtünme kazıkları olmalarından ötürü, BS8004:2015 Temel uygulama standartlarında belirtildiği üzere, genel olarak uygulanan kaide, dairesel kazıklarda, merkezden merkeze mesafenin en az üç kazık çapı değerinde olması gerekliliğidir. Ele alınan modelde, bu etkinin dikkate alınmaması için, kazık aralıkları minimum üç kazık çapı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu şartın sağlanması ile kazıkların eksenel taşıma gücü değerlerinde bir azalma olmayacağı, diğer bir deyişle grup kazık etkisinin devreye girmeyeceği söylenebilmektedir. Bu şekilde eksenel yük dayanımı tekil kazık göçme dayanımı olarak dikkate alınmıştır. Kazık blok davranışı ve göçme mekanizması hesaplanmıştır.

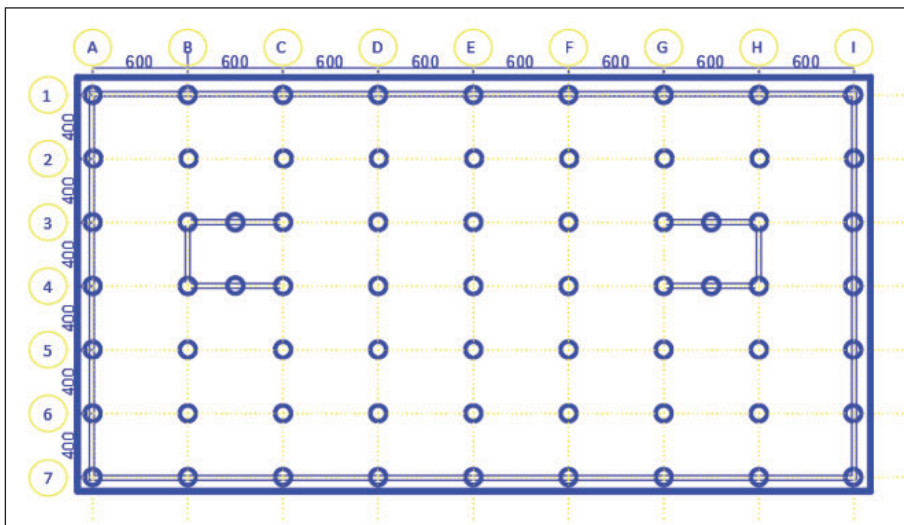
Bunun yanısıra, analizde, daha konservatif olduğu düşünülen, alt temelin deformasyon davranışı ihmal edilerek, radye-zemin etkileşimine esas katkının dikkate alınmadığı şekilde, yalnızca kazık elastik davranışı ve kazık-zemin etkileşiminden doğan düşey deformasyon davranışına dayanmaktadır.

Yapı temeli ön boyutlandırması servis durumu için SAP2000 programında üst yapı özelliklerine bağlı olarak tek bir düşey yük kombinasyonu (G+Q) için gerçekleştirilmiştir. Yapı ve temel ağırlığı bu şekilde radye altında perde, kolon bağlantılarına tanımlanan sabit mesnet reaksiyonlarının toplamı olarak hesaplanmıştır. Bu şekilde radye altındaki kazıklara tamamen rijit bir yük dağılımı sağlanmış olacağından, bu modelden elde edilen en büyük mesnet reaksiyon kuvveti, kazık tasarım yükü olarak kabul edilmiş ve ampirik kazık taşıma gücü bağıntıları kullanılarak kazık çap ve uzunluğu belirlenmiştir.

Çalışmada ilk analize esas alınan üst yapı yapısal eleman boyutları, temel boyutları ve yükleme durumu Çizelge 2'de özetlenmektedir. Tabloda verilen toplam ağırlık, radye kalınlığını 1.0m kabul ederek hesaplanmış ve aynı tabloda görüleceği gibi en büyük mesnet kuvvet değeri referans alınarak tekil kazık çapı 1.0m ve kazık toplam boyu radye plak altından itibaren 31.0m olarak hesaplanmıştır. Şekil 1'de kazık yerleşim planı detaylı şekilde gösterilmektedir.

Çizelge 2. Üst yapı ve temel sistemi boyutları (SAP2000).

Kolon (cm)	Kiriş (cm)	Perde duvar (cm)	Radye temel alanı (m x m)	Radye Plak kalınlığı (m)	Döşeme kalınlığı (cm)	Bina alanı (m x m)	Yükleme	Toplam ağırlık (kN)	Maksimum Mesnet Kuvveti (kN)	Tekil kazık çapı (m)	Tekil kazık toplam boy (m)
40x40	30x60	30.0	26x50	1.0	15.0	24x48	G+Q	122570	2700	1.0	31.0



Şekil 1. Kazık yerleşim planı.

## 2.2. Farklı Radye Kalınlıkları İçin Grup Kazıklı Temel Tasarımı: (SAP2000)

Yeterli rijitliğe sahip radye plak kabulü ile kazık-radye bağlantı noktalarının sabit mesnet olarak tanımlanmasıyla elde edilen kazık yükleri bu kez, kazıkların ve kazık-zemin etkileşiminin şaft boyunca ve uça tarifiyerek modele atanması suretiyle incelemeye tabi tutulmuştur. Kazıklar Ø1000 mm. çapında C30/25 beton sınıfında, lineer-elastik davranış gösteren çubuk eleman olarak SAP2000 programında tanımlanmıştır. Kazık olarak modellenen çubuk kesitler 2 m.'lik segmentler halinde bölünerek ilgili düğüm noktalarına noktasal zemin yayı tanımlaması, link ataması yapılmıştır. Bu şekilde oluşturulan detaylı altyapı modeli üzerinden radye kalınlığı değiştirilerek temel rijitliğine bağlı olarak kazıklara gelen eksenel yüklerin değişimi hesapsal olarak gözlenmiştir. Bu bölümde öncelikle kazık-zemin etkileşimine dair kriterler kısaca tanımlanmakta ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

## 2.3. Kazık Zemin Etkileşim Kriterleri

Eksenel yüklü kazıklarda, yük-deplasman ilişkisi üç farklı mekanizma olarak, kazıktaki eksenel deformasyon, kazık boyunca oluşacak sürtünme direnci ve kazık uç direnci ile kontrol edilmektedir (Tomlinson ve Woodward 2014). Yapısal analiz programı olan SAP 2000, kazıklı yapı modellerinde, kazık eksenel deformasyon mekanizmasını doğrudan hesaba katabilmekte ancak kazık-zemin etkileşiminin analiz yöntemine göre; lineer veya non-lineer olmak üzere, farklı koşullar altında sisteme tanıtılması gerekmektedir.

Zemin uç direnci ve şaft boyunca oluşacak sürtünme direncinin tanımlanması iki şekilde yapılabilmektedir. Bunlar; i. lineer analiz yöntemlerinde, eşdeğer lineer yay sabitlerinin, Winkler yöntemi ile, (düşey yaylar,  $k_v$  ve yatay yaylar,  $k_h$ ) tarif edilmesi (Bowles 1988) ve ii. non-lineer analiz yöntemlerinde, non-lineer zemin yayı (link) modeli ( $t-z$ ,  $Q-z$  ve  $p-y$  eğrileri ile) (API-RP2A-WSD 2000) tariflenmesi şeklindedir.

Yapısal sistemlerde ilişkili ulusal ve uluslararası şartnamelerde daimi veya oluşma sıklığı yüksek olan yüklere göre olan işletme durumu hesap ve tasarımında yapısal kesitlerin ve benzer şekilde kazık-zemin etkileşiminin plastik davranış sergilemesine izin verilmemektedir. Başka bir deyişle yapısal elemanlara elastoplastik davranış özellikleri atansa dahi yük-deformasyon durumunun elastik bölgede kalması veya temin edilmesi gerekmektedir. Bu tip çözümlerde lineer analiz yöntemleri kullanılmakta olup yapı yük ve elastik deformasyon bazlı bir analize tabi tutulmuş olur.

Söz konusu duruma karşın oluşma sıklığı düşük olan ekstrem yükler halinde (deprem durumu vs.) belirli durumlarda belirli plastik davranışa izin verilebilmektedir. Bu tip çözümlerde non-lineer çözüm yöntemleri kullanılmakta olup yapı plastik deformasyon odaklı bir analize tabi tutulmuş olur. Tasarım ise işletme çözümündeki elastik boyutlandırma ve kontrol durumunun aksine plastik şekil değiştirmelerin belirli sınır değerler nispetinde kontrol edilmesi ile tamamlanır.

Yukarıdaki sistem davranış kısıtları dikkate alındığında bu çalışmada daimi yüklere göre yapılan analizler işletme durumuna karşı gelmekte olup yapısal kesitlerde olduğu gibi kazık-zemin etkileşiminde de nonlineer davranış dikkate alınmayacaktır. Bu durumda kazık kesitlerine lineer yay kabulü yapılması yeterli olmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında (değişken radye kalınlığı analizlerinde) daha ileri bir kazık-zemin etkileşim modeli olan nonlineer zemin yayı (link) tanımlaması tercih edilmiştir. Lineer olarak yapılan sistem çözümünde yapısal program, tanımlanmış olan elastoplastik yayların elastik bölgesini dikkate aldığından dolayı bu zemin modelinin lineer analizlerde dikkate alınması uygundur. Kıyaslama ve merteye kontrolü açısından belirli bir radye kalınlığı için lineer yay kabulü ile ayrıca bir analiz de yapılmış ve çalışma sonuçlarına dahil edilmiştir.

### 2.3.1. Lineer yay kabulü

Lineer hesap yönteminde kazık-zemin etkileşimi için kullanılan en yaygın yöntem, kazığın zemin ile etkileşim içerisinde olduğu tüm bölge boyunca lineer zemin yayları tanımlamaktır. Lineer zemin yayları direkt olarak ilgili zemin yatak katsayısı değerinin, (yatay,  $k_h$ , düşey,  $k_v$ ), kazık çapı ( $D$ ) veya yayın temsil ettiği yüzey alanı ile kazık şekil faktörü olarak da anılan sürüklenme kuvveti sabiti'nin çarpımı şeklinde ifade edilmektedir.

Pratik uygulamalarda, eksenel yüklü kazıkların modellenmesine yönelik tercih edilebilecek bu yöntem için, zemin tabakalarına ait uygun elastisite modülü ve zemin yatak katsayılarıyla lineer analiz için lineer yay sabitleri tayin edilmektedir. Çalışmada yer alan idealize zemin profilindeki tabakalara ait zemin yatak katsayısı değerleri ve yay sabitleri Çizelge 3'de verilmektedir. Lineer yay kabulü ile çözümlenen sistemlerde düşey yer değiştirme lineer bir eğri ile tanımlandığı ve sistemde plastikleşme (mafsallaşma) durumları analiz gereği incelenmediği için düşey taşıma gücü kontrolleri yapılmalıdır. (Kutlu, 2011).

**Çizelge 3.** Kazık-zemin etkileşimi lineer yay sabitleri.

Tabaka	Derinlik (m)	Yatak katsayıları		Eşdeğer lineer yay sabitleri		Bölge
		$k_v$ ,düşey (t/m <sup>3</sup> )	$k_h$ ,yatay (t/m <sup>3</sup> )	$k_v'$ ,düşey (t/m <sup>3</sup> )	$k_h'$ ,yatay (t/m <sup>3</sup> )	
Yumuşak siltli kil	0.0-6.0	1335	302	4193	211	şaft
Orta katı siltli kil	6.0-12.0	1844	408	5790	285	şaft
Katı killi silt	12.0-31.0	7124	1072	22372	750	şaft
Katı killi silt	31.0-60.0	8635	1206	27118	845	uç

**Çizelge 4.** Kil zeminler için t-z, Q-z ve p-y eğrilerine esas bağıntılar.

t-z eğrisi		Q-z eğrisi		p-y eğrisi	
$z/D$	$t/t_{max}$	$z/D$	$Q/Q_p$	$p/p_u$	$y/y_c$
0.0016	0.3	0.002	0.25	0.00	0.0
0.0031	0.5	0.013	0.50	0.50	1.0
0.0057	0.75	0.042	0.75	0.72	3.0
0.008	0.90	0.073	0.90	$0.72 X/X_R$	15.0
0.01	1.00	0.100	1.00	$0.72 X/X_R$	$\infty$
0.02	0.7-0.9				
$\infty$	0.7-0.9				

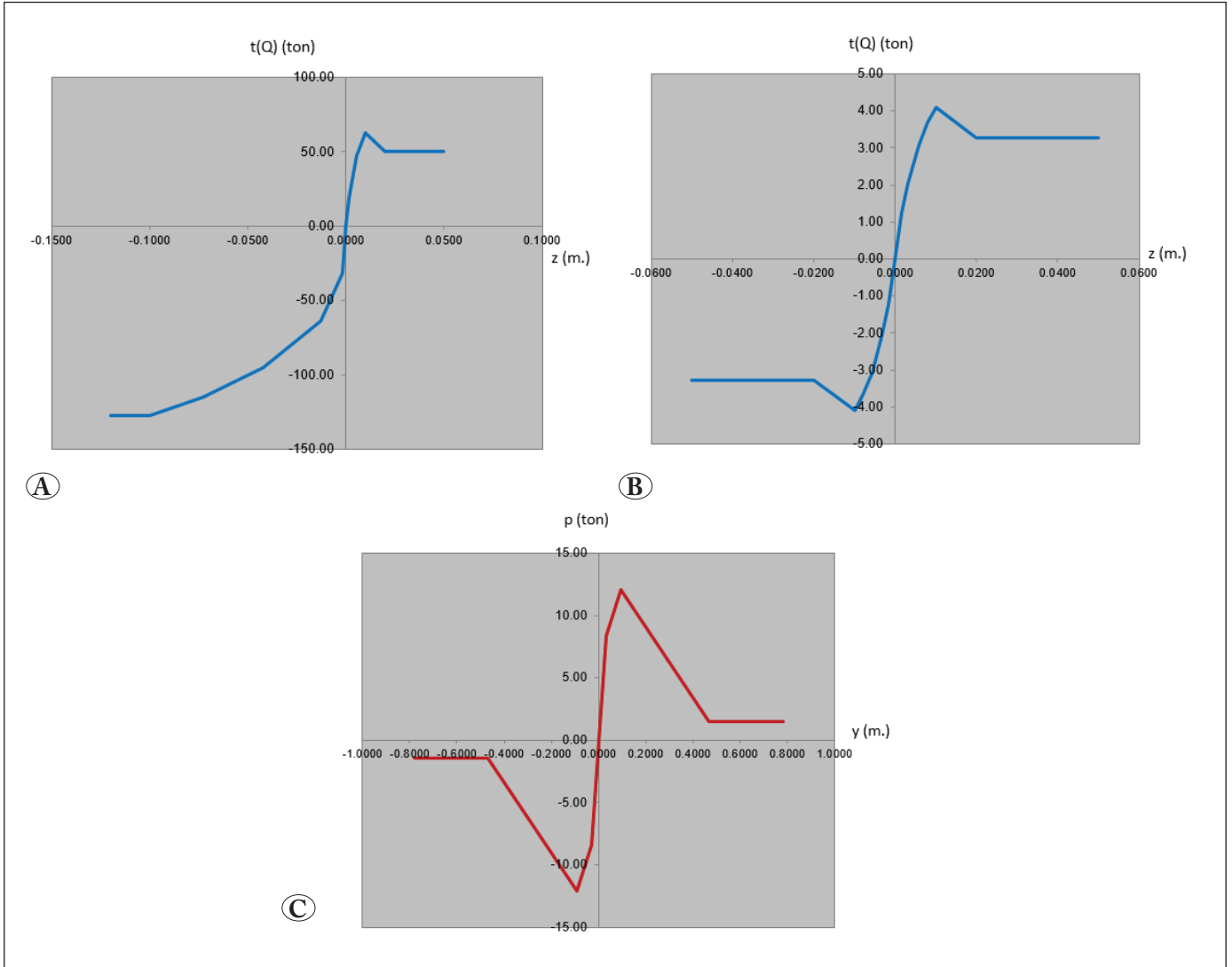
### 2.3.2. Elasto-plastik Zemin Davranışını Temsil Eden Link Kabulü:

Doğadaki malzemelerin gerilme - şekil değiştirme ilişkileri idealden farklılık göstererek karmaşık malzeme modelleri sergilemektedir (visco-elastik, nonlineer elastik, plastik, elastoplastik, gevrek, pekleşen ve yumuşayan vb.). Non-linear analiz çerçevesinde hesabı yapılan temel ve zemin etkileşimi, non-linear davranışa esas zemin yayları ile ele alınır ve böylece plastik bölge davranışı da hesaba katılır. Bu nedenle modellemede ideal elasto-plastik davranış veya pekleşme etkisini dikkate alan ideal olmayan elasto plastik davranış modelleri üzerinden hesap yapılması yaygın olarak kullanılmaktadır.

Günümüzde bilgisayar programları ile yapılan non-linear analizlerde malzemelerin karmaşık gerilme-şekil değiştirme bağıntıları programa tariflenerek analiz yapılabilmektedir. Titizlikle hesaplanmış t-z ve Q-z eğrilerinin sisteme tanıtılmasıyla sistemin başka bölgelerinde oluşabilecek olan mafsallaşmalar ve bunlara bağlı şekil değiştirmelerin izin verilen sınırlar dahilinde kalıp kalmadığının incelenmesi hesap yönteminin dikkat edilmesi gereken bir esastır (Kutlu 2011).

Zemin modelleri için de durum benzerdir. Kazık - zemin ilişkisinin modellenmesinde iki farklı gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ile üç doğrultuda link özellikleri tanımlanmaktadır. Söz konusu gerilme-şekil değiştirme bağıntıları kazığın zemin ile olan düşey ilişkisini temsil eden t-z eğrileri (kazık ucunda Q-z eğrileri) ve yatay ilişkisini temsil eden p-y eğrileri olmaktadır. p-y, t-z ve Q-z eğrilerinin hesap prensipleri, API-RP2A-WSD şartnamesinde detaylı olarak açıklanmaktadır.

Buna göre t-z ve Q-z eksenel yük mekanizması eğrileri, killer için,  $t_{max} = f_s = ac_u$ , Q-z eğrileri için de toplam kazık uç direnci,  $Q_p = 9cuA_p$  şeklinde ifade edilmektedir. Burada,  $t_{max}$ : birim çevre sürtünmesi (maksimum zemin-kazık adezyonu), t: mobilize zemin kazık adezyon değeri (kPa), D: kazık çapı (mm), z: lokal kazık deplasmanı (mm) ve/veya eksenel kazık uç deformasyonu (mm),  $Q_p$ : toplam uç kapasitesi (kN),  $Q$ : mobilize uç taşıma kapasitesi (kN) şeklindedir. p-y yatay yükleme eğrilerinde ise,  $p_u$ : nihai yatay taşıma kapasitesi (kPa), p: mevcut yatay direnç (kPa) ve y: yatay deformasyon (mm) şeklindedir. İlgili eğrilerde gerilme - şekil değiştirme grafiğinde gerilme eksenini yük, şekil değiştirme eksenini ise deplasman olarak ele alınmakta ve bu şekilde ilgili eğriler yük - deplasman eğrileri olarak Çizelge 4'te verildiği şekilde elde edilmektedir.



Şekil 2. A) İlk link için tanımlanan t-z eğrisi, B) kazık ucunda son link için tanımlanan t-z + Q-z eğrisi C) ilk link için p-y eğrisi.

Çalışmada, ön boyutlandırması yapılmış olan kazıklar ve kazık-zemin etkileşimi tüm kazık shaftı boyunca ve kazık ucunda, bahsedilen bu elastoplastik yaylar API-RP2A-WSD (2000)'de verildiği şekilde tariflenmiştir. Şekil 2'de verilen non-linear linklerin bir örneği Çizelge 5'de verilen link parametreleri kullanılarak ve temsili verilen çizime benzer şekilde tariflenerek hesaplanmıştır. Tabloda takip edilebileceği üzere kazık boyunca toplamda 16 adet link tariflenmiştir. İlk link hariç, diğer her bir link, kazığı 2m'lik parçalara bölerek kazık-zemin etkileşim davranışını tarif eder. Radye plak altına herhangi bir şekilde yay tariflenmemiş ve bu şekilde yüklerin doğrudan kazıklara aktarımı sağlanmıştır. Bu sayede, kazık elastik eksenel deformasyonları ( $EA/L$ ), zemin elastik deformasyon davranışı (yay davranışı) ve radye temel eğilme rijitliğinin, kazık yük dağılımına etkisi incelenmiştir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Kazıklı temellerin yapısal modellenme çeşitliliklerini temel alan bu çalışma kapsamında farklı kazık-zemin etkileşim kriterlerini dikkate alan üç ayrı yaklaşım ele alınmıştır. Bunlar sırasıyla, i. basit model: ankastre mesnet modeli, ii. detaylı yapısal model: eş değer lineer yay kabulü, iii. detaylı yapısal model: non-lineer zemin yayları şeklindedir. İlk iki yaklaşım kazıkların ön boyutlandırması için kullanılmış ve tek radye kalınlığı için hesaplanmıştır. Son model yaklaşımında, kazık konfigürasyonu (çap, yerleşim ve boyları) analiz boyunca sabit tutularak farklı radye kalınlıkları için model tekrarlı şekilde çözülmüştür. Bu şekilde, farklı eğilme rijitlikleri için kazıklara aktarılan yük dağılımı, radye gerilme dağılımı ve oturma davranışı irdelenmiştir. Tariflenen yük-deformasyon eğrilerinin kazığın tüm uzunluğu boyunca tarif



edilmesi ile analizler, aynı yük kombinasyonu için sırasıyla, radye kalınlıklarının, 0.5m, 1.0m, 1.5m ve 2.0m değerleri için gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde radye modeli, esnek bir plaktan, rijit bir plağa doğru ele alınmıştır.

**Çizelge 5.** Non-lineer zemin yayı (link) parametreleri (API) ve linklerin temsili lokasyonları.

Link no	Uzunluk (m)	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Q (kN)	$P_u$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	1	12.99	1440	167.5
2	2	17.32		300
3	2	24.49		380
4	2	30.00		460
5	2	48.99		1590
6	2	54.77		
7	2	60.00		
8	2	64.81		
9	2	69.28		
10	2	73.48		
11	2	77.46		
12	2	81.24		
13	2	84.85		
14	2	88.32		
15	2	91.65		
16	2	100		1272

Çizelge 6'da, kazık yerleşim planında verilen kazıklardan en çok yük alanlar, aldıkları yükler ve kazık grubu toplam oturma değerleri verilmiştir. Kazıklara aktarılan yükler ve deplasmanlar kazık üst düğüm noktalarından ve en üst istasyon noktasından okunmuştur. Sunulan analiz sonuçlarına göre, radye rijitleştikçe üst yapıdan gelen yükler radye altında düzgün yayılı yükleme durumuna yakınsayarak nispeten homojen bir yük dağılımı meydana getirmektedir. Yapısal çözüm sonucu en çok yüklenen kazıklar, kazıkların yük aldığı alanların geometrik olarak iç kısımlarda dış kazıklara nispetle daha yüksek değerlerde olması sebebiyle ortadaki kazıklar olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, radye kalınlığı azaldıkça düşük radye rijitliği ve nispeten yüksek deformasyon özelliklerine bağlı olarak asansör perdeleri gibi rijit üst yapı elemanları ve kolonlar altında yüklemeler yoğunlaşmaktadır. Bu durumda Şekil 3'te görüldüğü gibi; radye temel yük dağılımının düzgün yayılı olmayan yükleme davranışı gösterdiği görülmüştür.

**Çizelge 6.** Radye kalınlığına bağlı yük dağılımının en fazla yük alan beş kazık için değerlendirmesi.

Kazık No.	Radye plak kalınlığı (m)	Kazık Yükleri (SAP 2000) (kN)	Deplasman (m)
484	0.5	1951	0.0033
354		1934	
476		1916	
234		1913	
242		1904	
354	1.0	2195	0.0035
346		2161	
394		2118	
314		2122	
362		2148	
354	1.5	2434	0.0040
346		2403	
362		2382	
314		2370	
394		2370	
354	2.0	2659	0.0043
346		2635	
362		2610	
314		2602	
394		2600	

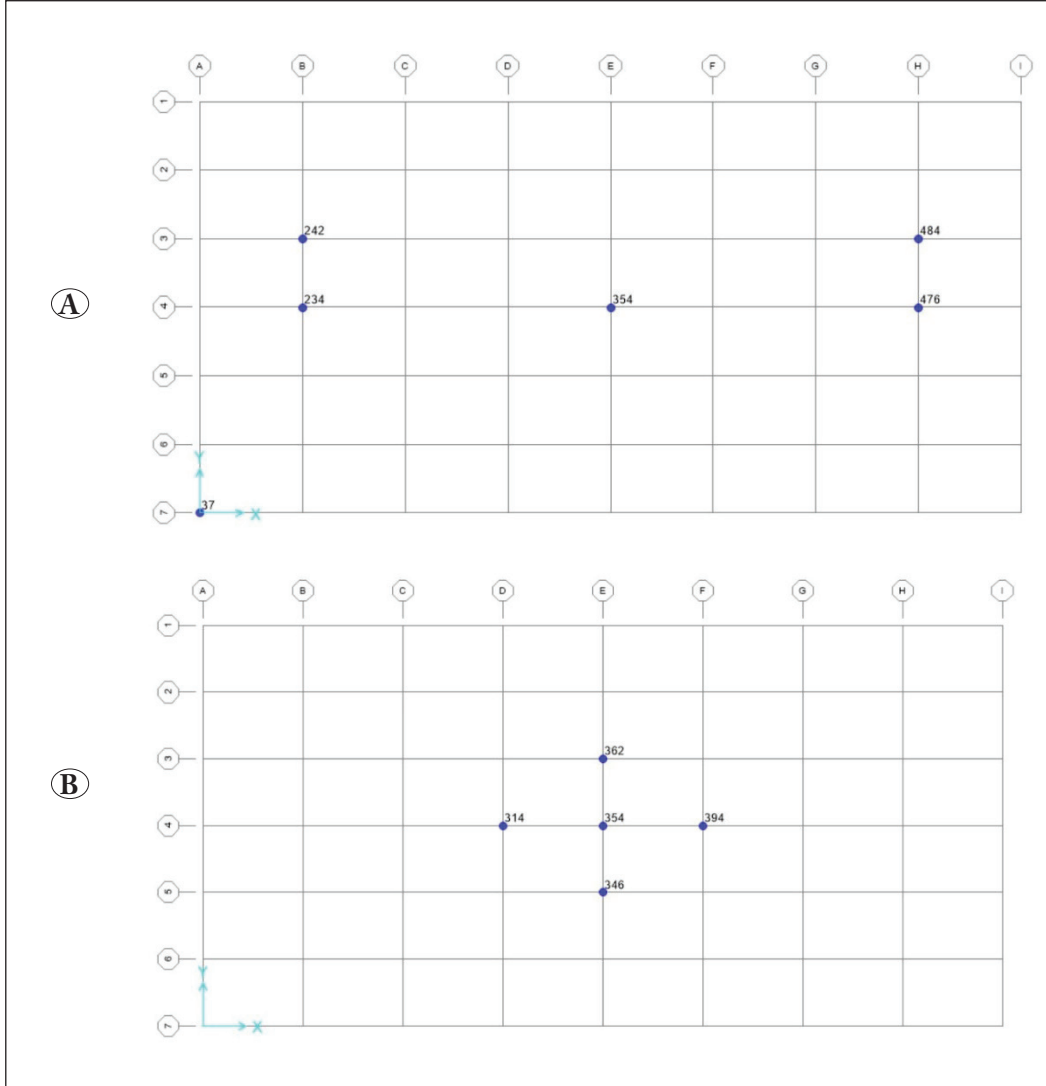
Söz konusu davranış zemin üzerine oturan düzgün yayılı yüklü temel plaklarında beklendiği şekildedir. Şekil 4'te şematik olarak gösterildiği üzere, esnek temelerde üst yapı yüklemesi plağın kesitteki elastik eğrisine orantılı bir oturma ve taban basıncı dağılımı ortaya çıkarırken, temel rijitleştikçe taban basıncı dağılımı üniform hale gelmektedir.

Aynı sistem davranışı modelden elde edilen plak gerilmeleri için de görülebilmektedir. Şekil 5'te gösterildiği gibi, esnek radyede gerilmeler kolon altlarında yoğunlaşırken, radye kalınlığı arttıkça dağılım daha üniform ve yumuşak geçişlere yerini bırakmaktadır.

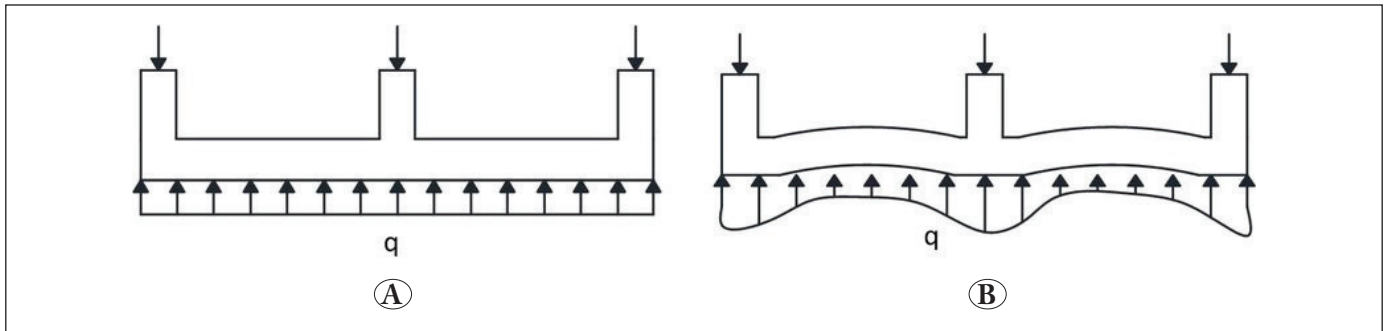
Bu nedenle pratik mühendislik uygulamalarında radyenin etkili şekilde yük dağılımını yapabilmesi için plağın yeterli derecede bir rijitliğe sahip olması gerekmektedir. Sunulan bu çalışmada radye kalınlığının 1m'nin üzerine çıktığı değerlerde radyenin yükü etkili dağıttığı görülmektedir. Ancak

radye temelin zati yük değeri de kalınlık ile orantılı olarak arttığı için belirli bir radye kalınlığının üzerinde yük her ne kadar daha efektif dağılsa dahi, kalınlıktan kaynaklanan ilave düşey yükler sebebiyle kazık yükleri de artacaktır. Dolayısıyla makul bir altyapı tasarımı yapabilmek için radye

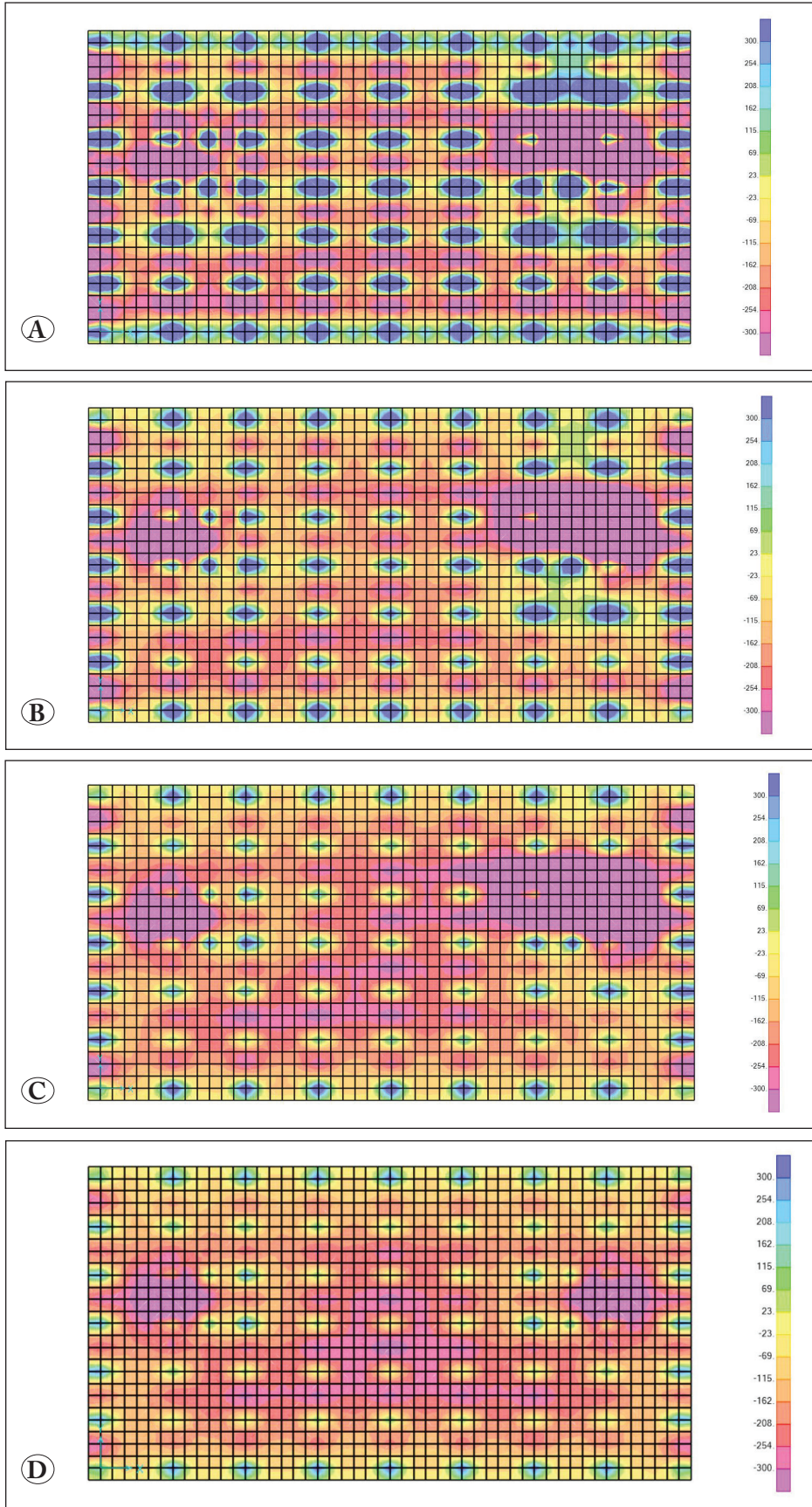
kalınlığı seçiminin proje özelliklerine bağlı bir optimizasyon çalışması olduğu unutulmamalıdır. Sonuçlarda, grup kazık oturma değerlerine bakıldığında, radye kalınlığı artışı ile oturma değerlerinin arttığı görülebilmektedir. Bunun nedeni, beklenen bir sonuç olarak, radye kalınlığının artması ile



**Şekil 3.** Radye rijitliğine bağlı kazıklara aktarılan yük dağılımları ve en çok yük alan beş kazığın gösterimi (A) Radye kalınlığı = 0.5m, (B) Radye kalınlığı = 1.0m, 1.5m, 2.0m



**Şekil 4.** Plak temel taban basıncı dağılımı (A) Rijit temel, (B) Esnek temel.



**Şekil 5.** Radye plağı üzerinde plak kalınlığına bağlı gerilme dağılımı (A) Radye kalınlığı = 0.5m, (B) Radye kalınlığı = 1.0 m, (C) Radye kalınlığı = 1.5 m, (D) Radye kalınlığı = 2.0 m.

Çizelge 7. Analiz toplu sonuçları.

Model #	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
Kazık-Zemin etkileşim kriteri	Basit model	Detaylı yapısal model	Detaylı yapısal model			
	Ankastre mesnet	Eş değer lineer yaylar	Non-linear yaylar (kazık-zemin linkleri)			
Radye kalınlığı (m)	1.0	1.0	0.5	1.0	1.5	2.0
Maksimum yük (kN)	2700	2227	1951	2195	2434	2659

öz ağırlığın artması ile oturmaların artması şeklinde yorumlanmaktadır.

Çizelge 7'de analiz sonuçları toplu olarak sunulmaktadır. Buna göre, sonuçlardan görüldüğü üzere, kazıkların ankastre mesnet olarak kabul edildiği ilk basit modelde en büyük kazık yükü değerleri elde edilmiştir. Radyenin eğilme rijitliğine bağlı olarak deformasyon özellikleri dikkate alındığında kazıklı temelin yaylarla modellenmesi durumunda gerçekte beklenen yapısal davranışa denk gelen daha düşük mertebede kazık kuvvetleri elde edilmiştir.

SAP 2000 ile yapısal modelde zemin-yapı davranışı, yük-deformasyon ilişkileri şeklinde ilgili yaylar ile ifade edilip radye altında herhangi bir temel altı zemin direnci katkısı dikkate alınmamıştır. Bu sayede daha güvenli tarafta kalınmış olup, radye ile zemin arası olası konstrüktif temas zaafına bağlı davranış bilinmezlikleri de değerlendirme dışı bırakılmış olur. Değerlendirme sonucunda, lineer zemin yayı modellenmesi ile literatürden farklı bir parametrik yaklaşımla modellenen kazık-zemin etkileşiminin, daha ileri bir model olan ve daha farklı bir parametrik yaklaşımı olan non-lineer kazık modellenmesi ile uyumlu sonuç verdiği de ayrıca gözlemlenerek mertebenin doğruluğu ve her iki modelleme yaklaşımının da uygunluğu ayrıca teyit edilmiştir. Çizelge 7'de verilen sonuçlar arasında bu karşılaştırma Model 2 ve Model 4 arasında yapılabilmektedir. Sözü edilen model sonuçları arasında %1.5 gibi çok küçük bir fark bulunmaktadır. Bu da statik yükler altında servis durumunda zemin yaylarının lineer yay katsayıları ile tariflenmesinin yine pratik bakımdan kabul göreceğini göstermektedir.

Bu sayede, ileri zemin modellemelerini esas alan zeminlerin sürekli ortam olarak tarif edildiği sonlu eleman yazılım çözümlerinde, zemine ait karakterizasyonun yapılması, kazıklı temel sistemlerindeki gerilme etkileşimleri, radye altındaki zemin katkısı gibi bir çok faktör üzerinde tam kontrol sahibi olmak güçtür. Bunun aksine SAP2000 yapısal analiz çözümünde kullanılan her üç metodolojide de elde edilen

sonuçlara bakıldığında, yapı ve geoteknik mühendisleri için ortak bir model dili sunması, sonucu etkileyecek parametrelerin gerektiği şekilde kontrol edilebilmesi, daha pratik bir çözüm yöntemini ortaya çıkarmaktadır.

## 5. Kaynaklar

- API-RP2A-WSD, American Petroleum Institute, 2000.** Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms- working stress design, 21<sup>st</sup> Edition, API Publishing Services, Washington D.C., USA 223 pp.
- Bowles, J. E., 1988.** Foundation Analysis and Design, 4<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Book Company, UK, 1023 pp.
- Comodromos, E. M., Bareka, S. V. 2009.** Response evaluation of axially loaded fixed-head pile groups in clayey soils. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 33:1839-1865. Doi: 10.1002/nag.787
- Cunha, R. P., Poulos, H. G., Small, J. C. 2001.** Investigation of design alternatives for a piled raft case history. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 127(8): 635-641. Doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:8(635)
- Kalita, M., Nath, U. K., Hazarika, P. J. 2021.** Effect of pile spacing and raft thickness on the behaviour of piled-raft foundation—a parametric study using FEM. *Advances in Structural Technologies*, 111-122. DOI: 10.1007/978-981-15-5235-9\_9
- Kumar, A., Patil, M., Choudhury, D. 2016.** Soil-structure interaction in a combined pile-raft foundation – a case study. *Proceedings of the Institution of Civil Eng.-Geotechnical Eng.*, 170(2): 117-128. Doi: 10.1680/jgeen.16.00075
- Kutlu, Z. N., Kılıç İ. E., 2019.** Pile group foundation behavior analysis of a building under axial loading. *Proceedings of 8<sup>th</sup> International Geotechnical Symposium*, pp. 858-869, Istanbul, Turkey.
- Kutlu, Y. 2011.** Deniz üstü rüzgar türbini temel tasarımı ve Türkiye'de kazıklı bir uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Lee, J., Kim, Y., Jeong, S. 2010.** Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay. *Computers and Geotechnics*, 37(1-2): 103–114. Doi: 10.1016/j.compgeo.2009.07.009
- Leung, Y. F., Klar, A., Soga, K. 2010.** Theoretical study on pile length optimization of pile groups and piled rafts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 136(2): 319-330. Doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000206
- Liang, F., Chena, L., Shib, X. 2003.** Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load. *Computers and Geotechnics*, 30(6): 443–453. Doi: 10.1016/S0266-352X(03)00057-0
- Lin, D., Feng, Z. 2006.** A numerical study of piled raft foundations. *Journal of the Chinese Institute of Eng.*, 29(6): 1091-1097. Doi: 10.1080/02533839.2006.9671208
- Long, P. D. 2010.** Piled raft—a cost-effective foundation method for high-rises. *Geotechnical Eng. Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 41(3): 1-12. ISSN 0046-5828
- Mali, S. M. 2019.** 3D numerical modeling of large piled-raft foundation on clayey soils for different loadings and pile-raft configurations. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 42(1): 1-17. Doi: 10.2478/sgem-2019-0026
- Mandolini, A., Viggiani, C. 1997.** Settlement of piled foundations. *Géotechnique*, 47(4): 791–816. Doi: 10.1680/geot.1997.47.4.791
- Manjunath, N. V., Soundara, B., Ranjitham, M. 2018.** Effect of modulus of subgrade reactions on the static behavior of raft foundation resting on sand. *Int. J. of Pure and Applied Mathematics*, 119(18): 2649–2661. ISSN: 1314-3395.
- Modak, R. Singh B. 2022.** Parametric study of the behavior of large piled raft foundation on stiff clay. *Foundation and Forensic Geotechnical Engineering*, 43-54. DOI: 10.1007/978-981-19-6359-9\_5
- 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. Doi: 10.1016/j.compgeo.2012.06.007
- Oh, E. Y., Lin, D. G., Bui, Q. M., Huang, M. 2009.** Numerical analysis of piled raft foundation in sandy and clayey soils. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 1159-1162, Alexandrina, Egypt.
- Poulos, H. G. 2001.** Piled raft foundations design and applications. *Géotechnique*, 51(2): 95–113. Doi: 10.1680/geot.2001.51.2.95
- Randolph, M. F. 1994.** Design methods for pile groups and piled rafts. Proc. 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 61–82, New Delhi, India.
- Reul, O., Randolph, M. F. 2003.** Piled rafts in overconsolidated clay comparison of in situ measurements and numerical analyses. *Géotechnique*, 53(3): 301–315. Doi: 10.1680/geot.2003.53.3.301
- Saeed, H. H. 2022.** Effect of soil nonlinearity on analysis of raft foundation. *Civil and Environmental Eng.*, 18(1): 292-300. Doi: 10.2478/cee-2022-0027
- Sales, M. M., Small, J. C., Poulos, H. G. 2010.** Compensated Piled Rafts in Clayey Soils- Behaviour, Measurements, and Predictions. *Can. Geotech. J.* 47: 327–345. Doi: 10.1139/T09-106.
- Sheil, B. B., McCabe B. A., Comodromos, E. M., Lehane, B. M. 2019.** Pile groups under axial loading: an appraisal of simplified non-linear prediction models. *Géotechnique*, 69(7): 565–579. Doi: 10.1680/jgeot.17.R.040
- Sinha, P., Wanare, R., Dalal, P., Iyer K.K.R. 2019.** An analytical parametric study on behaviour of flexible raft foundation. Proc.of the Indian Geotechnical Conference, pp. 365-374, India. DOI: 10.1007/978-981-33-6346-5\_32.
- Tan, Y. C., Chow, C. M. 2004.** Design of piled raft foundation on soft ground. GSM-IEM Forum: The roles of engineering geology & geotechnical engineering in construction works, Malaya, Kuala Lumpur.
- Tomlinson, M., Woodward, J. 2014.** Pile Design and Construction Practice, 6<sup>th</sup> Edition, CRC Press Taylor & Francis, Florida, USA, 608 pp.