



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAZIKLI TEMELLERDE GRUP ETKİSİNİN MODEL DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI

Yavuz YENGİNAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2014
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Yavuz YENGİNAR

26.08.2014

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAZIKLI TEMELLERDE GRUP ETKİSİNİN MODEL DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI

Yavuz YENGİNAR

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Özcan TAN

2014, 263 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Özcan TAN
Doç. Dr. Mustafa YILDIZ
Yrd. Doç. Dr. Atila DEMİRÖZ

Bu tez kapsamında tekil kazıkların, kazık gruplarının ve kazıklı radye sisteminin eksenel yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Deneyler, kumlu zemin (SP, γ_s=27 kN/m^3, D_r=%52.6, c=0, Ø=41°) içerisinde ve yerinde imal edilmiş betonarme kazıklar kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca deneylerde kazıkların çeşitli yerlerine yük hücresi yerleştirilerek hem uç direnci hem de çevre sürtünmesi direnci ayrı ayrı bulunmuştur. Tekil kazık yükleme deneyleri farklı çap ve boydaki 4 adet kazık kullanılarak yapılmıştır. Kazık grubu deneylerinde bu kazıklar kullanılarak 2, 3 ve 4 kazıktan oluşan kazık grupları eksenel olarak yüklenmiştir. Kazık grubu deneylerinde kazıklar arası mesafe 2D, 3D ve 4D olarak seçilmiştir. Kazıklı radye sistemi deneylerinde ise radye temelin altına 2, 3 ve 4 adet kazık yerleştirilerek eksenel yükleme yapılmıştır. Bu deneylerde de kazıklar arası mesafe 2D, 3D ve 4D olarak seçilmiştir.

Bu tez kapsamında bulunan en önemli sonuçlardan biri şudur: Tekil kazıklarda çevre sürtünmesi direnci hesaplanırken teorik hesaplar ile deney sonuçları arasında oldukça büyük farklar çıkmıştır. Bu nedenle çevre sürtünmesi direnci hesaplanırken yanal zemin basıcı katsayısı, K yerine K_0 ile K_p arasında bir değerin kullanılması daha uygun olacaktır.

Bu tez kapsamında bulunan en önemli sonuçlardan bir diğeri de şudur: Kazık grubunun taşıma gücü bulunurken genel yaklaşım kazıklar arasında etkileşim olduğundan grup veriminin 1'den küçük olacağı yönündedir. Fakat bu yaklaşımda zemin cinsi ile kazıklardan çevre zeminine ve diğer kazıklara aktarılan gerilmeler ihmal edilmektedir. Deneysel çalışmaların sonucunda kumlu zeminlerdeki kazık grubunun verimi 1'den büyük bulunmuştur. Ayrıca bu tez kapsamında kumlu zeminlerdeki kazık grubunun davranışı da açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: çevre sürtünmesi direnci, grup etkisi, kazık grubu, kazık yükleme deneyi, kazıklı radye sistemi, kumlu zemin, model deney, tekil kazık, uç direnci, yük hücresi

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF GROUP EFFECT WITH MODEL PILED FOUNDATIONS

Yavuz YENGİNAR

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CİVİL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Özcan TAN
2014, 263 Pages

Jury
Prof. Dr. Özcan TAN
Assoc. Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ

In this thesis, the behavior of the single piles, pile groups and piled raft system are investigated under axial loadings. All of the experiments are performed in sandy soil (SP, γ_s=27 kN/m^3, D_r=%52.6, c=0, Ø=41°) using cast-in-place bored piles. In addition, load ceels are placed into various parts of the pile and pile skin resistance and pile point capacity are measured separately. Loading tests of single piles are performed using 4 piles have different pile length and pile diameter. These piles are used in the pile group loading tests consisting of 2, 3 and 4 piles. Pile spacings are choosen as 2D, 3D and 4D in the each pile group. In the piled raft experiments, 2, 3 and 4 of the piles placed under the mat foundation. Pile spacings are also chosen same with the pile groups.

One of the most important finding of this thesis is that: There is a great difference among the theoretical calculations and experimental results in terms of pile skin resistance of single piles. Thus, instead of the lateral eart pressure coefficient, K using the value between K0 and Kp is recommended while estimating pile skin resistance.

The another most important finding of this thesis is that: The overall approach on the pile group behaviour is pile group efficiency is smaller than 1 because of the group effect. In this approach, however, soil type and the pressures transferred into the soil and to other piles are ignored. As a result of the experimental studies group efficiency is found bigger than 1 for sandy soils. In addition, the behavior of the pile groups in sany soil is clarified in this thesis.

Keywords: group effect, load cell, model test, pile groups, pile load test, pile point capacity, pile skin resistance, piled raft system, sandy soil, single pile

ÖNSÖZ

Öncelikle, bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan danışman hocam Prof. Dr. Özcan TAN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında değerli fikirleriyle tezime katkıda bulunan ve her zaman destek olan saygıdeğer hocalarım Doç. Dr. Mustafa YILDIZ'a, Yrd. Doç. Dr. Atila DEMİRÖZ'e, Yrd. Doç. Dr. Murat OLGUN'a ve Yrd. Doç. Dr. İ. Hakkı ERKAN'a; gerektiğinde yardımlarını esirgemeyen Yüksel ÇİFTÇİ'ye; her türlü sorunumuza çözüm arayan ve bizleri motive eden ÖYP Koordinatörümüz Doç. Dr. Salih GÜNEŞ'e ayrıca teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük emeği olan, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen başta annem ve babam olmak üzere tüm aile fertlerime; hayatım boyunca bana her konuda destek olup beni yalnız bırakmayan sevgili eşim Elif'e ve ailemizin yeni üyesi, canım kızımız Zeynep İnci'ye en içten duygularımla teşekkür ederim.

Yavuz YENGİNAR
KONYA-2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

2. KAZIK GRUPLARI VE KAZIKLI RADYE SİSTEMİ **3**

2.1. Radye Temeller 3

2.1.1. Temellerin taşıma gücü 4
2.1.1.1. Teorik denklemler ile 5
2.1.1.2. Arazi deneyleri ile 8
2.1.1.2.1. SPT sonuçları ile 8
2.1.1.2.2. CPT sonuçları ile 10
2.1.1.2.3. Plaka yükleme deneyi sonuçları ile 11
2.1.1.3. Taşıma gücü tabloları ile 12
2.1.2. Temellerin oturması 12
2.1.2.1. Oturma ölçütleri 16

2.2. Kazıklı Temeller 17

2.2.1. Kazıkların taşıma gücü 18
2.2.1.1. Statik kazık formülleri 20
2.2.1.1.1. Uç direnci 21
2.2.1.1.2. Çevre sürtünmesi direnci 24
2.2.1.2. Arazi deney sonuçları ile kazık taşıma gücünün bulunması 27
2.2.2. Kazık yükleme deneyleri 31
2.2.2.1. Yükleme düzeneği ve deneylerin yapılışı 31
2.2.2.2. Yükleme deney programı 36
2.2.2.3. Kazık yükleme deneylerinin yorumlanması 36
2.2.2.3.1. Terzaghi yöntemi 37
2.2.2.3.2. Boston şartnamesi 37
2.2.2.3.3. Kazık çapının %10'u kuralı 38
2.2.2.3.4. Brinch Hansen %80 yöntemi 38
2.2.2.3.5. Brinch Hansen %90 yöntemi 39
2.2.2.3.6. De Beer Yöntemi 40
2.2.2.3.7. Mazurkiewicz yöntemi 40
2.2.2.3.8. Fuller ve Hoy yöntemi 41
2.2.2.3.9. Butler ve Hoy yöntemi 41
2.2.2.3.10. Davisson yöntemi 42
2.2.2.3.11. Chin yöntemi 43
2.2.2.3.12. Göçmeye ulaşmamış kazıklar 43

2.2.3. Kazık grubunun davranışı 44
2.2.3.1. Kazıklarda negatif çevre sürtünmesi 47
2.2.4. Kazık grubunun oturması 49
2.3. Kazıklı Radye Sistemi 50
2.3.1. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri 55
2.3.2. Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri 58
2.3.3. İleri sayısal analiz yöntemleri 60
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI 62
3.1. Kazık Grubu 62
3.2. Kazıklı Radye Sistemi 64
3.2.1. Deneysel çalışmalar 64
3.2.2. Analitik çalışmalar 70
3.2.3. Vaka analizleri 78
4. MATERYAL VE YÖNTEM 84
4.1. Zeminin Fiziksel Özellikleri 85
4.2. Kazıklı Temellerin ve Radye Temelin İmal Edilmesi 86
4.3. Deney Düzeneğinin Tanıtılması 90
4.3.1. Yükleme sistemi 91
4.3.2. Yük hücresi 92
4.3.3. Veri toplama üniteleri 93
4.4. Deney Kumunun Tanka Yerleştirilmesi 94
4.5. Deney Programı 96
4.5.1. Kazık grubu deneyleri 96
4.5.2. Kazıklı radye sistemi deneyleri 107
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 114
5.1. Kazık Grubu Deney Sonuçları 114
5.1.1. Tekil kazık deney sonuçları 114
5.1.2. 2 Kazıktan oluşan kazık grubu deney sonuçları 122
5.1.2.1. Kazık grubunun verimi 132
5.1.3. 3 Kazıktan oluşan kazık grubu deney sonuçları 134
5.1.3.1. Kazık grubunun verimi 136
5.1.4. 4 Kazıktan oluşan kazık grubu deney sonuçları 137
5.1.4.1. Kazık grubunun verimi 139
5.1.5. Kazık grubu deney sonuçlarının karşılaştırılması 140
5.1.6. Kumlu zeminlerdeki kazık grubunun davranışı 145
5.2. Kazıklı Radye Sistemi Deney Sonuçları 148
5.2.1. Radye temel yükleme sonuçları 149
5.2.2. Radye temel altına 2 kazık uygulaması 151
5.2.3. Radye temel altına 3 kazık uygulaması 153

5.2.4. Radye temel altına 4 kazık uygulaması 156

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 157

6.1. Sonuçlar 157

6.1.1. Tekil kazık yükleme deneylerinin sonuçları 157
6.1.2. Kazık gruplarına ait deneylerin sonuçları 159
6.1.3. Kazıklı radye sistemine ait deneylerin sonuçları 162

6.2. Öneriler 162

KAYNAKLAR 164

EKLER 173

Ek 1. Tekil Kazık Yükleme Deneyi Sonuçları 173

Ek 2. 2 Kazıktan Oluşan Kazık Grubu Yükleme Deneyi Sonuçları 185

Ek 3. 3 Kazıktan Oluşan Kazık Grubu Yükleme Deneyi Sonuçları 221

Ek 4. 4 Kazıktan Oluşan Kazık Grubu Yükleme Deneyi Sonuçları 230

Ek 5. Radye Temel Altına 2 Kazık Uygulaması—Yükleme Deneyi Sonuçları 239

Ek 6. Radye Temel Altına 3 Kazık Uygulaması—Yükleme Deneyi Sonuçları 245

Ek 7. Radye Temel Altına 4 Kazık Uygulaması—Yükleme Deneyi Sonuçları 257

ÖZGEÇMİŞ 263

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_k	Kazık toplam en kesit alanı
$A_{uç}$	Kazık uç kesit alanı
A_{yan}	Kazık yan yüzey alanı
B,B_r	Radye genişliği
β	Açısal distorsiyon
c	Kohezyon
c’	Efektif kohezyon
C_c	Sıkışma indisi
c_a	Zemin-kazık arasında adhezyon etkisi
C_s	Şişme indisi
c_u	Drenajsız kayma mukavemeti
D,d	Kazık çapı
ΔH	Toplam oturma
ΔH_e	Elastik oturma
ΔH_c	Plastik oturma
D_f	Temel derinliği
D_r	Rölatif sıkılık
e	Boşluk oranı
e	Eksantrisite
E_k	Kazık elastik modülü
E_r	Radye elastik modülü
E_s	Zemin elastik modülü
ɤ	Zeminin birim hacim ağırlığı
H	Tabaka kalınlığı
kN	Kilo Newton
k	Yatak katsayısı
k_k	Kazık rijitliği
k_{kr}	Kazık grubu rijitliği
K_o	Toprak basıncı katsayısı
k_r	Radye rijitliği
k_s	Yatay toprak basıncı katsayısı

L	Kazık boyu
L	Temel genişliği
L_k	Kritik kazık boyu
mm	Milimetre
M_x, M_y	Moment
n	Kazık sayısı
N	Kolon yükü
n_g	Kazık gruplarının verimi
N_{spt}	SPT vuruş sayısı
N_c, N_q, N_γ	Taşıma kapasitesi faktörleri
p	Kazık çevre uzunluğu
Ø	Zemin içsel sürtünme açısı
P_k	Kazığa gelen yük
P_{kr}	Kazıklı radyeye gelen yük
Q_{emin}	Emin taşıma gücü
$Q_{kazık}$	Kazık yükü
$Q_{sınır}$	Sınır taşıma gücü
$Q_{uç}$	Kazık ucu ile taşınan yük
Q_{yan}	Kazık çevre sürtünmesi
$q_{uç}$	Birim kazık uç direnci
q_{yan}	Birim çevre sürtünmesi direnci
Q_{toplam}	Toplam yük
r_m	Maksimum etki yarıçapı
s	Kazık aralığı
S_r	Doygunluk derecesi
t_r	Radye kalınlığı
α	Etkileşim faktörü
α_{kr}	Kazıklı radye temel katsayısı
δ	Kazık-zemin sürtünme açısı
δ	Farklı oturma
ξ	Kazık etki yarıçapı oranı
σ^1	Efektif gerilme
σ_c’	Ön konsolidasyon basıncı
σ_v’	Ortalama düşey efektif gerilme

Kısaltmalar

2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
AASHTO	Amerikan devlet karayolu ve taşımacılık idareleri birliği
AKK	Aşırı konsolide olmuş kil
ASTM	Amerikan deney standartları
CPT	Koni penetrasyon deneyi
GS	Güvenlik sayısı
ISSMGE	Uluslararası geoteknik mühendisliği ve zemin mekaniği komitesi
in	İnch
kPa	Kilopaskal
MN	Meganewton
MPa	Megapaskal
N	Newton
NKK	Normal konsolide kil
PLT	Plaka yükleme deneyi
PMT	Presiyometre deneyi
SPT	Standart penetrasyon deneyi
SP	Kötü derecelenmiş kum
TDG	Teknik destek grubu
UCSC	Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi

1. GİRİŞ

Yapı yükleri taşıyıcı sistem aracılığıyla yapı temeline oradan da temel zeminine aktarılırlar. Seçilen temel tipi yapı yüklerini güvenli bir şekilde taşımalıdır. Ayrıca, zemine aktarılan gerilmelerden dolayı temel zemininde oturmalar meydana gelmektedir. Bu oturma miktarlarının da izin verilebilir seviyelerde olması istenilmektedir. Temel zemininin taşıma gücünün yetersiz olduğu veya oturmaların istenilenden fazla olması durumunda veya her iki koşulun birden sağlanmadığı durumlarda doğrudan yüzeysel temel uygulanamaz. Temel zemininin iyileştirilmesi veya derin temellerin uygulanması önemli seçenekler arasındadır. Yaygın olarak kullanılan derin temel çeşidi kazıklı temellerdir.

Kazıklı temeller; eksenel, yanal veya hem eksenel hem de yanal yüklenmiş olabilir. Her durumda kazığın yük altındaki davranışı farklıdır. Ayrıca; tek bir kazığın davranışıyla kazık grubunun davranışı da aynı olmadığı gibi kazıklı radye sisteminin de davranışı aynı değildir. Bütün bunlara ek olarak zemin özellikleri ile kazık ve radyenin tasarım özellikleri de kazık-radye-zemin arasındaki etkileşimde çok önemli bir etkiye sahiptir. Bu özelliklerin başlıcaları; zemin cinsi, tane dağılımı ile tanelerin diziliş şekli, zeminin gerilme-deformasyon özellikleri (E, υ), tabakalanma durumu, yeraltı suyunun durumu, radye temelin boyutları ve kalınlığı (esnek veya rijit olması), kazık sayısı, kazık çapı, kazık boyu, kazıklar arasındaki mesafe, kazık boyunun kazık çapına oranı, kazık boyunun temel genişliğine oranı ve kazıkların temel altındaki yerleşim planıdır. Bu yüzden fore kazıklı temel veya kazıklı radye temel tasarımı yapılırken sistemin nasıl davranacağının bilinmesi oldukça önemlidir.

Kazık gruplarının tasarımında kazıkların birbirini etkilemesinden dolayı verimin düşeceği kabul edilmektedir. Bu yüzden grup verimini hesaplamaya yarayan teorik yaklaşımların hepsinde grup verinin 1'den küçük olacağı kabul edilmektedir. Fakat bu yaklaşımların hiçbirinde zemin cinsi ve özellikleri dikkate alınmamaktadır. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde kazık grubunun davranışının farklı olabileceği göz önüne alınmalıdır. Ayrıca tekil kazıklar ile kazık gruplarının yük-oturma davranışının birbirinden farklı olduğu dikkate alınmalıdır.

Kazıklı radye sisteminin tasarımında, çoğunlukla analitik (sonlu elemanlar yöntemi, sınırlı elemanlar yöntemi, eşdeğer elemanlar yöntemi, yaylar üstündeki plak yöntemi gibi nümerik yöntemler) ve deneysel çalışmaların ışığında bulunan yük

paylaşım oranları ve oturma miktarları sonuçlarından yararlanılmakla birlikte tecrübenin de çok önemli bir kazanım olduğu unutulmamalıdır.

Kazıklı radye sistemini etkileyen faktörlerin değişkenliğinden dolayı kazık ve radye arasındaki yük paylaşım oranları ve kazık grubunun taşıma gücü çok farklı olabilmektedir. Kazıklar arasındaki mesafenin (s/d=3-12), kazık grubunun radye temel altında kapladığı alanın (A_K/A_R=0.45-0.91) ve kazık boyunun (L_K/B=0.38-2.2) farklı değerlerde olduğu 22 tane vaka analizi sonucu incelendiğinde radye temelin toplam yükün % 8-70 'ini aldığı görülmüştür (Santis ve Russo, 2008). Bu fark şüphesiz çok fazladır. Farkın bu kadar çok olmasının nedeni; kazıklı radye sistemi üzerinde birçok faktörün etkin olmasının yanında arazideki uygulama farklılıklarından ve ölçüm tekniklerinden kaynaklanabilmektedir.

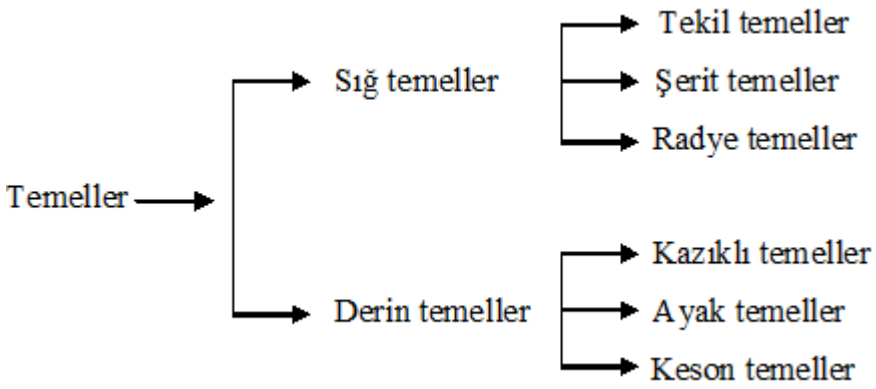
Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaları iki bölüme ayırabiliriz. Birinci bölümde; fore kazıklı temel sisteminde kazık gruplarının eksenel yükler altındaki yük-oturma davranışı incelenerek grup etkisinin taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır. Kazık grubunun davranışını araştırmadan önce ise tekil kazıkların yük-oturma davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak farklı çap ve boydaki tekil kazıklar yükleme deneyine tabi tutulmuş, daha sonra bu kazıklar farklı kazık aralıklarında zemin içerisine yerleştirilerek kazık grubu eksenel olarak yüklenmiştir. İkinci bölümde ise kazıklı radye temel sisteminde kazık sayısının ve kazıklar arası mesafenin taşıma gücü ve oturma davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Kazıklı radye sisteminde kazık-radye-zemin etkileşimi, radye ve kazık grubu arasındaki yük paylaşım oranları, kazıklı radye sisteminin yapacağı oturma miktarları ve kazık grubunun taşıma gücü deneysel olarak araştırılacak ve bu karmaşık sistemin nasıl davrandığı hakkında daha net bilgiler elde edilerek literatüre ve bu tür temellerin tasarımına katkı sağlanılacaktır.

Tekil kazıkların, kazık gruplarının ve kazıklı radye sisteminin davranışı ne kadar iyi anlaşılırsa, daha güvenilir ve ekonomik çözümler üretilebilecektir.

2. KAZIK GRUPLARI VE KAZIKLI RADYE SİSTEMİ

Kazık grupları en az iki kazıktan oluşur ve genellikle kazık grupları bir kazık başlığı ile birbirine bağlanır. Kazık başlığı yani radye temel ile birbirine bağlanmış olan bu sisteme ise kazıklı radye sistemi denir. Radye temel, tekil kazık, kazık grupları ve kazıklı radye sisteminin davranışını anlamaya yarayacak teorik bilgiler ile bu temel elemanlarının hesap ve tasarımında kullanılan ilkeler bu kısımda anlatılacaktır.

Kazık grupları ve kazıklı radye sistemini oluşturan yüzeysel ve derin temellerin sınıflandırılması şu şekildedir:

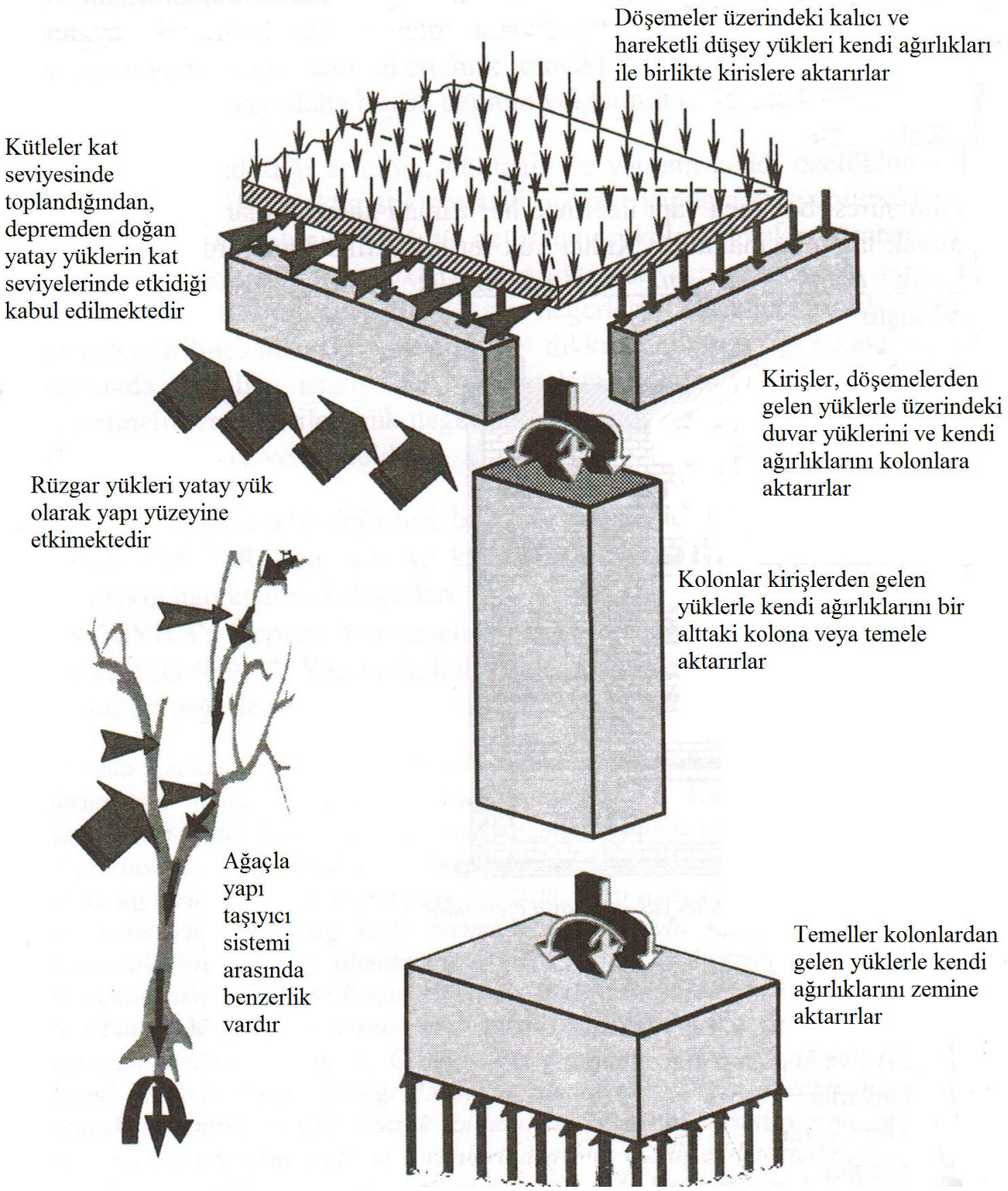


Şekil 2.1. Temellerin sınıflandırılması (Uzuner, 2011)

2.1. Radye Temeller

Bir yapıya etkiyen yüklerin, yapı güvenliği için zemine güvenli bir şekilde aktarılması gerekir. Düşey ve yatay yüklerin yapıya etkimesi ve zemine aktarılması Şekil 2.1.1'de gösterilmiştir. Yapı yüklerini zemine aktaran yapı elemanlarına temel adı verilir. Dolayısıyla, temellerin bu işlevi görecek özelliklerde olması gerekir. Bunun için temeller zemin taşıma gücü aşılmayacak ve yapıda zararlı oturmalar meydana gelmeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Üst yapı ne kadar mükemmel olursa olsun, temel sistemi yetersizse yapının ayakta kalması mümkün değildir.

Temel sistemi tasarlanırken hem temel zemini hem de yapısal eleman olarak temelin bazı koşulları sağlaması gerekir. Temel zemini taşıma gücü ve oturma koşullarını sağlaması gerekirken, temelin yeterli dayanıma ve yeterli sünekliliğe sahip olması gerekir. Ayrıca temel ekonomik olarak boyutlandırılmalıdır.



Şekil 2.1.1. Düşey ve yatay yüklerin yapıya etkimesi ve zemine aktarılması (Doğangün, 2010)

2.1.1. Temellerin taşıma gücü

Temel zemininin, yapı yüklerinden dolayı zemine aktarılan gerilmelere göçmeden karşı koyması ve müsaade edilebilir miktarlarda oturma yapması beklenir. Zemindeki oturmaların fazla olması yapısal hasarlara neden olabilir.

Temel zemininin göçtüğü andaki nihai taşıma gücüne sınır taşıma gücü ($q_{sınır}$) denir. Sınır taşıma gücünün belirli bir güvenlik sayısına bölünmesiyle veya izin verilebilir oturma miktarındaki taşıma gücüne zeminin emniyetli taşıma gücü (q_{emin}) denir. Güvenlik sayısı zemin cinsine ve özelliklerine bağlı olarak 2-5 arasında alınabilir. Temel tabanına gelen gerilmelerin zeminin emniyetli taşıma gücünden küçük veya eşit olması gerekir.

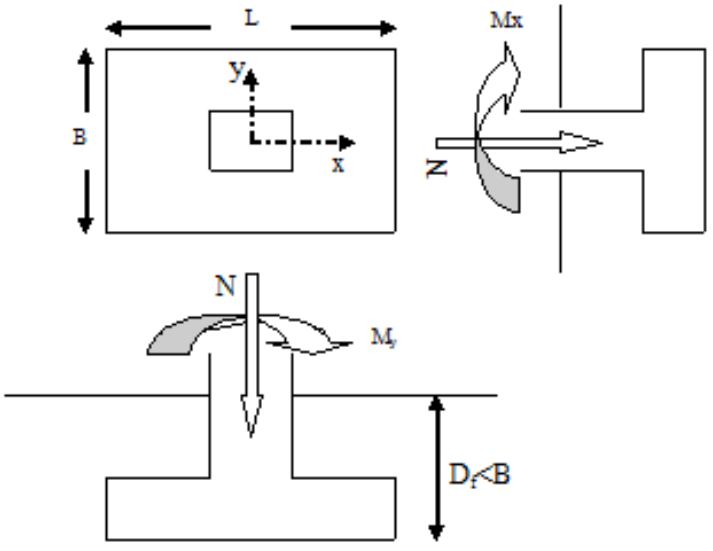
$$q_{emin} = \frac{q_{sınır}}{GS} \tag{1}$$

$$q_{emin} \geq q_{taban} = \sigma_{\max,\min} = \frac{\sum N}{BxL}\left(1 \mp \frac{6e_x}{L} \mp \frac{6e_y}{B}\right) \tag{2}$$

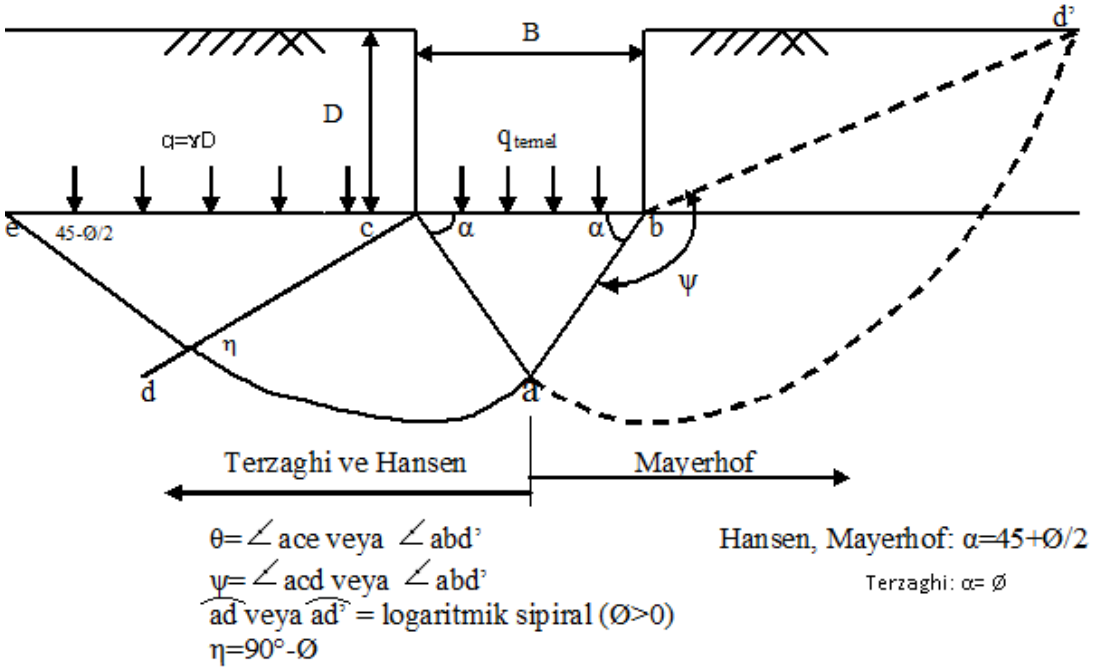
Temel zemininin taşıma gücü teorik yaklaşımlarla (Terzaghi, Mayerhof, Hansen, Vesic…), arazi deneyi sonuçları ile (SPT, CPT, plaka yükleme deneyi…) ve bazı tablo ve grafikler yardımıyla bulunabilir.

2.1.1.1. Teorik denklemler ile

Taşıma gücü denklemlerinin türetildiği ve temel-zemin etkileşimi sonucu oluşan kayma yüzeyleri Şekil 2.1.2'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.1.2: (a) Temel boyutları ve yükleme durumu; (b) Taşıma gücü denklemleri için temel-zemin etkileşimi—sol taraf Terzaghi (1943) ve Hansen (1970), sağ taraf Mayerhof (1951)

Mayerhof geliştirdiği taşıma gücü denklemlerinde zemin yüzeyi ile temel tabanı arasında kalan kayma yüzeylerini de dikkate alırken, Terzaghi ve Hansen bunları ihmal etmiştir. Terzaghi tarafından geliştirilen taşıma gücü denklemleri (Çizelge 2.1.1) yüzeysel temeller için geliştirilmiştir (D_f<B). Hansen, Mayerhof ve Vesic tarafından geliştirilen denklemler ise hem yüzeysel hem de derin temeller için kullanılabilir. Fakat bu denklemlerde kullanılan şekil, derinlik ve eğim faktörleri yüzeysel ve derin temeller için farklıdır.

Birçok araştırmacı tarafından farklı taşıma gücü formülleri geliştirilmiştir. Bu denklemlerden hangisinin zeminin taşıma gücünü en iyi tahmin ettiğini söylemek mümkün değildir. Terzaghi tarafından ileri sürülen taşıma gücü denklemleri daha güvenli sonuçlar vermesi bakımından ve kullanımının kolay olmasından dolayı daha çok tercih edilmektedir. Fakat temel zemini eğimli bir yüzeye oturuyorsa Hansen ve Vesic tarafından geliştirilen denklemlerin kullanılması daha yararlı olur.

Ayrıca, Terzaghi (1943) kendi geliştirdiği formülleri sıkı zeminlerde genel kayma kırılması ve gevşek zeminlerde yerel kayma kırılması durumları için tecrübe etmiştir. Yerel kayma kırılmasının olduğu zeminlerde kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinde azaltmaya gitmiştir:

Çizelge 2.1.1: Bazı araştırmacıların geliştirdiği taşıma gücü denklemleri

Terzaghi (1943)

$$q_{sınır} = cN_c s_c + qN_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma$$

temel şekli:	şerit	daire	kare
s_c=	1.0	1	1.3
s_γ=	1.0	0.6	0.8

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varnothing$$

$$N_q = \frac{a^2}{2\cos^2(45 + \varnothing/2)}$$

$$a = e^{(0.75\pi - \varnothing/2)\tan\varnothing}$$

$$N_\gamma = \frac{\tan\varnothing}{2}\left(\frac{Kpy}{\cos^2\varnothing} - 1\right)$$

N_c, N_q ve N_γ taşıma gücü katsayılarıdır (Çizelge 2.1.2'ye bakınız)

Mayerhof (1951,1963)

Düşey yük: $q_{sınır} = cN_c s_c d_c + qN_q s_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma d_\gamma$

Eğimli yük: $q_{sınır} = cN_c d_c i_c + qN_q d_q i_q + 0.5\gamma BN_\gamma d_\gamma i_\gamma$

$$N_q = e^{\pi\tan\varnothing}\tan^2\left(45 + \frac{\varnothing}{2}\right)$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varnothing$$

$$N_\gamma = (N_q - 1)\tan(1.4\varnothing)$$

s, d, i sırasıyla şekil, derinlik ve eğim faktörleridir

Hansen (1970)

$$q_{sınır} = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + qN_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$

$$N_q = e^{\pi\tan\varnothing}\tan^2\left(45 + \frac{\varnothing}{2}\right)$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varnothing$$

$$N_\gamma = 1.5(N_q - 1)\tan\varnothing$$

s, d, i, g ve b sırasıyla şekil, derinlik, eğim, zemin eğimi ve temel eğimini dikkate alan faktörlerdir.

Vesic (1973, 1974)

$$q_{sınır} = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + qN_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$

$$N_q = e^{\pi\tan\varnothing}\tan^2\left(45 + \frac{\varnothing}{2}\right)$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varnothing$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varnothing$$

s, d, i, g ve b sırasıyla şekil, derinlik, eğim, zemin eğimi ve temel eğimini dikkate alan faktörlerdir.

$$c' = 0.67c \quad (3)$$

$$\varnothing' = \tan^{-1}(0.67\tan\varnothing) \quad (4)$$

Çizelge 2.1.2: Terzaghi, Hansen, Mayerhof ve Vesic için taşıma gücü katsayıları

	Terzaghi			Hansen, Mayerhof, Vesic				
Ø	N_c	N_q	N_γ	N_c	N_q	$N_{\gamma(H)}$	$N_{\gamma(M)}$	$N_{\gamma(V)}$
0	5.7	1.0	0.0	5.14	1.0	0.0	0.0	0.0
5	7.3	1.6	0.5	6.49	1.6	0.1	0.1	0.4
10	9.6	2.7	1.2	8.34	2.5	0.4	0.4	1.2
15	12.9	4.4	2.5	10.97	3.9	1.2	1.1	2.6
20	17.7	7.4	5.0	14.83	6.4	2.9	2.9	5.4
25	25.1	12.7	9.7	20.71	10.7	6.8	6.8	10.9
26	27.52	14.66	11.7	22.25	11.8	7.9	8.0	12.5
28	32.36	18.58	15.7	25.79	14.7	10.9	11.2	16.7
30	37.2	22.5	19.7	30.13	18.4	15.1	15.7	22.4
32	44.9	29.5	27,85	35.47	23.2	20.8	22.0	30.2
34	52.6	36.5	36.0	42.14	29.4	28.7	31.1	41.0
36	66.97	51.43	57.47	50.55	37.7	40.0	44.4	56.2
38	81.34	66.36	78.94	61.31	48.9	56.1	64.0	77.9
40	95.7	81.3	100.4	75.25	64.1	79.4	93.6	109.3
45	172.3	173.3	297.5	133.73	134.7	200.5	262.3	271.3
50	347.5	415.1	1153.2	266.50	318.5	567.4	871.7	761.3

2.1.1.2. Arazi deneyleri ile

2.1.1.2.1. SPT sonuçları ile

Standard penetrasyon deneyi zeminlerin taşıma gücünü tahmin etmek için kullanılan en yaygın deneylerden biridir. Killi zeminlerde özellikle numune alıcının zemine çakılması sırasında ortamda beliren boşluk suyu basınçlarının bilinmemesi ve numune alıcının çevresindeki zemine yapışmasından dolayı SPT-N değeri ile taşıma gücünün belirlenmesi yanıltıcı olacağından önerilmemektedir (Toğrol ve Sivrikaya, 2009). Kohezyonsuz zeminler için ise literatürde çeşitli araştırmacıların önermiş olduğu deneysel ilişkiler mevcuttur.

Mayerhof (1956) maksimum oturmayı 25 mm kabul ederek, müsaade edilebilir taşıma gücünü kPa olarak aşağıdaki ifadelerle vermiştir:

$$q_{emin} = 12N\left(1+0.33\frac{D_f}{B}\right) \qquad B\leq 1.22m \quad (5)$$

$$q_{emin} = 8N\left(\frac{B+0.305}{B}\right)^2\left(1+0.33\frac{D_f}{B}\right) \qquad \text{B>1.22m} \qquad (6)$$

N: temel seviyesinin B/4 üstü ile 1.5B altı arasındaki ortalama N

Bowles (1988) Mayerhof ifadelerinde bazı düzeltmeler yapmıştır:

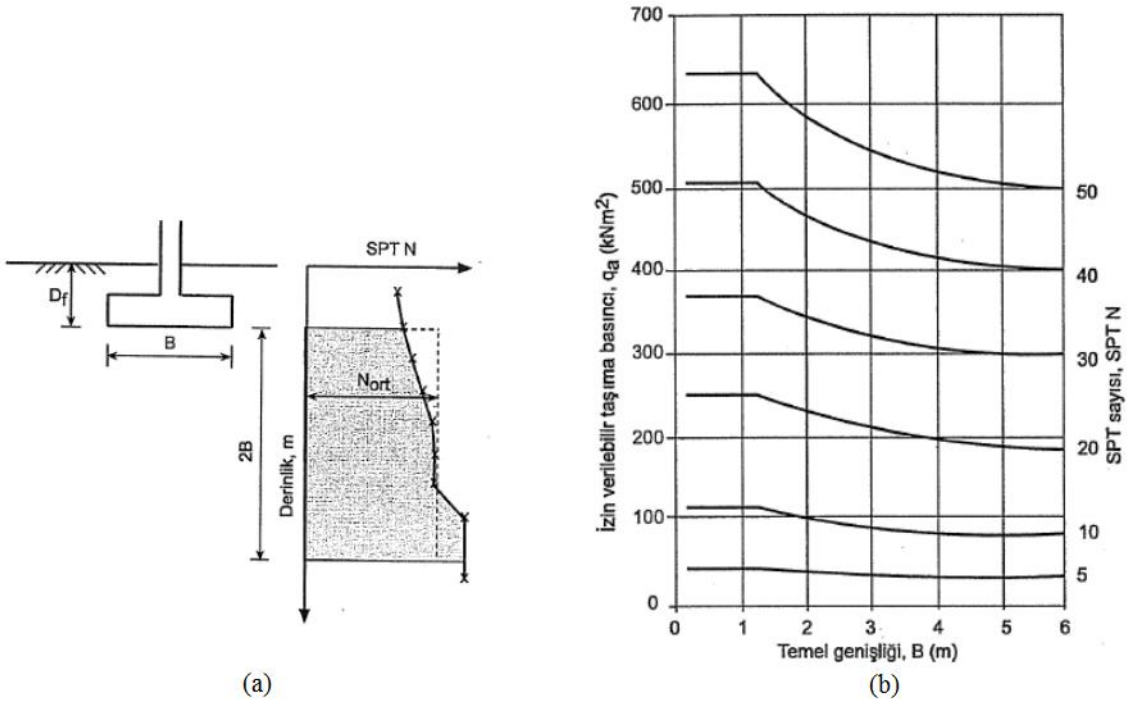
$$q_{emin} = 20N\left(1+0.33\frac{D_f}{B}\right) \qquad \text{B}\leq\text{1.22m} \qquad (7)$$

$$q_{emin} = 12.5N\left(\frac{B+0.305}{B}\right)^2\left(1+0.33\frac{D_f}{B}\right) \qquad \text{B>1.22m} \qquad (8)$$

Parry (1977) aşağıdaki taşıma gücü bağıntısını vermiştir. Burada $q_{sınır}$ sınır taşıma gücü (MPa), N temel altından 0.75B derinlik boyunca ortalama N, B temel genişliği (m) ve D_f temel derinliği (m)'dir.

$$q_{sınır} = 0.24N\left(\frac{D_f+0.73B}{D_f+0.75B}\right) \qquad (9)$$

Terzaghi ve Peck (1967), Şekil 2.1.3-(b)'de yer alan grafiklerinde 25 mm oturmaya karşılık gelen izin verilebilir taşıma gücünü temel genişliği ve SPT-N sayısına bağlı olarak vermişlerdir. Ortalama SPT-N sayısı Şekil 2.1.3-(a)'da gösterilen taralı alanın eşdeğer dikdörtgene çevrilmesiyle bulunur. Terzaghi ve Peck radye temellerde izin verilebilir oturma miktarını 50 mm kabul ettikleri için radye temellerin taşıma gücü grafikten bulunan değerin ikiyle çarpılmasıyla bulunur. Eğer zeminde yeraltı suyu varsa bu değer ikiye bölünür.



Şekil 2.1.3: (a) Ortalama SPT-N sayısının bulunması; (b) Temel genişliği, SPT-N sayısı ve izin verilebilir taşıma gücü arasındaki ilişki (Terzaghi ve Peck, 1967)

2.1.1.2.2. CPT sonuçları ile

Koni penetrasyon deneyi her türlü zeminde uygulanabilir. Özellikle yumuşak ve gevşek zeminlerde uygulanabilir olmasından dolayı, zemin özelliklerinin dolayısıyla taşıma gücünün ölçümü için en uygun deney olarak nitelendirilebilir. Deney kumlu zeminler için geliştirilmişse de killi zeminlerde de uygulanabilir. Kuşkusuz bu deney yapılışı itibariyle kazıkların projelendirilmesi için (çevre sürtünmesi ve uç direnci ölçülüyor) daha uygun bir görünüm arz etmektedir. CPT sonuçları ile temellerin taşıma gücü ve oturmaları tahmin edilebilmektedir (Toğrol ve Sivrikaya, 2009).

Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için farklı temel tipleri dikkate alınarak Bowles (1997) tarafından aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir:

Kohezyonsuz zeminlerde;

Şerit temel için, $q_{sınır}=28-0.0052(300-q_c)^{1.5}$ (kg/cm^2) (10a)

Kare temel için, $q_{sınır}=48-0.009(300-q_c)^{1.5}$ (kg/cm^2) (10b)

Kohezyonlu zeminlerde;

Şerit temel için, $q_{sınır}=2+0.28q_c$ (kg/cm^2) (11a)

Kare temel için, $q_{sınır}=5+0.34q_c$ (kg/cm^2) (11b)

Mayerhof (1956) kumlu zeminlerin güvenle taşıyabileceği yükün denklem 5 ve 6'yı kullanarak bulunabileceğini, bu denklemlerde ise

$$N = \frac{q_c}{4} \tag{12}$$

alınması gerektiğini önermiştir. Burada q_c, kg/cm^2 cinsinden alınmalıdır.

2.1.1.2.3. Plaka yükleme deneyi sonuçları ile

Zeminlerin taşıma gücünü bulmada en güvenilir yöntem yerinde yükleme deneyi yapmaktır. Fakat büyük boyutlarda bir temeli yüklemek işçilik ve maliyet açısından zordur. Bunun yerine 30.48 cm (12 inches) veya 76.2 cm (30 inches) çapında çelik bir plaka kullanılarak yükleme yapılabilir. 25 mm oturma olduğu andaki gerilmenin zeminin sınır taşıma gücü olduğu kabul edilebilir. Fakat plaka temel boyutlarından daha küçük olduğu için, plaka yükleme deneyi ile bulunan taşıma gücünde düzeltme yapılmalıdır.

Killi zeminlerde BN_γ terimi sıfır olduğundan taşıma gücü temel boyutlarından bağımsızdır. Dolayısı ile;

$$q_{sınır,temel} = q_{sınır,plaka} \tag{13}$$

Kohezyonsuz ve genel zemin (c-Ø) durumlarında taşıma gücü denklemlerinde her üç terim de dikkate alınır. Kumlu zeminlerde ise N_q terimi de ihmal edilirse, zeminin sınır taşıma gücü aşağıdaki gibidir:

$$q_{sınır,temel} = q_{sınır,plaka}\left(\frac{B_{temel}}{B_{plaka}}\right) \tag{14}$$

2.1.1.3. Taşıma gücü tabloları ile

Zeminlerin taşıma gücü bazı tablolar yardımıyla da bulunabilir. Bu yöntemde her zemin cinsinin yaklaşık olarak taşıyabileceği güvenli yük miktarı verilmiştir. Fakat bu değerlerin aralığı oldukça geniştir (Çizelge 2.1.3).

Çizelge 2.1.3: Emin taşıma gücü tablosu (Uzuner, 2011)

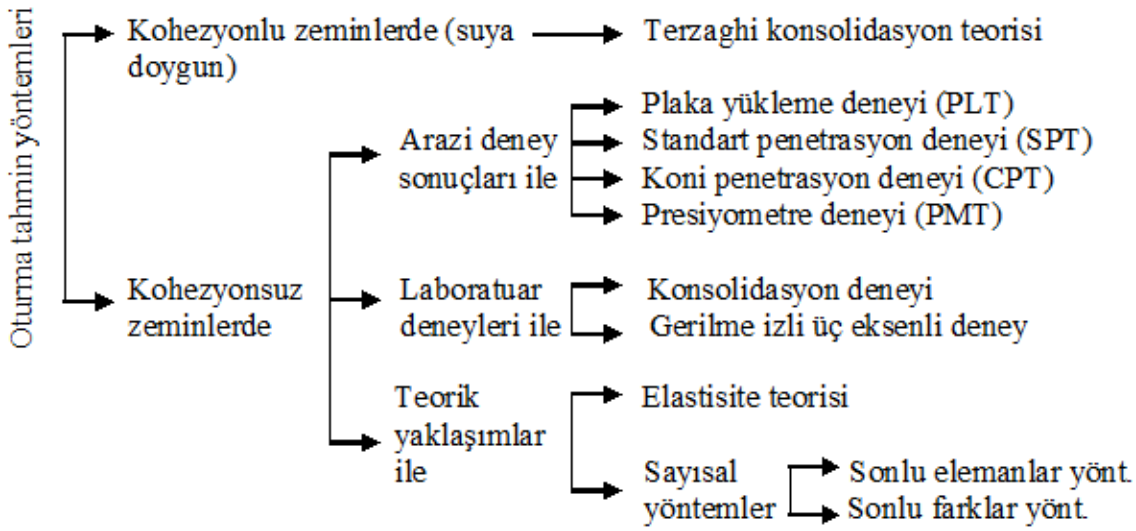
Zemin cinsi	**q_{emin} (kN/m^2)**
Sağlam kayaç	>1000
Sıkı çakıl	400-600
Sıkı çakıl+kum	
Orta sıkı çakıl	200-400
Orta sıkı çakıl+kum	
Sıkı kum	>300
Orta sıkı kum	100-300
Gevşek kum	<100 (sakıncalı)
Çok sert taşlı kil	300-500
Sert kil	150-300
Orta sert kil	75-150
Yumuşak kil	<75 (sakıncalı)

2.1.2. Temellerin oturması

Temel zeminindeki oturmaların yapısal hasar vermeyecek düzeyde olması gerekir. Bunun için de oturmaların olabildiğince hassas hesaplanması gerekir. Fakat oturma analizinde karşılaşılan bir takım problemler bunu zorlaştırmaktadır. Bu problemlerden bir tanesi zemin parametrelerinin (E_s, G', μ, k_s) güvenilir bir şekilde belirlenememesidir. Bunun sebebi ise deney yapılan zemin örneklerinin numune alınırken muhakkak örselenmesinden dolayıdır. En önemli ikinci sorun ise yüklemeden dolayı etki derinliği boyunca zemindeki gerilme durumunun tam manasıyla bilinmemesidir.

Oturmalar iki kısma ayrılabilir. Bunlar; ani veya elastik oturma ile konsolidasyon oturmasıdır. Ani oturma yük uygulanır uygulanmaz veya ilk 7 gün içerisinde olur. Ani oturma, her türlü kohezyonlu (Sr<%90) ve kohezyonsuz zeminlerde olur. Konsolidasyon oturması ise zamana bağlıdır ve aylarca veya yıllarca sürebilir. Uzun süreli oturma analizleri ise suya doygun veya kısmı doygun ince taneli zeminlerde

yapılır. Zeminde meydana gelecek oturmaları tahmin etmek için birçok yöntem vardır. Bunların genel bir sınıflandırması Şekil 2.1.4'de görülüyor.



Şekil 2.1.4: Oturma tahmin yöntemlerinin sınıflandırılması (Uzuner, 2011)

Temel zeminindeki toplam oturma elastik ve konsolidasyon oturmalarının toplamına eşittir:

$$\Delta H = \Delta H_e + \Delta H_c \tag{15}$$

burada;

ΔH = toplam oturma

ΔH_e = elastik oturma

ΔH_c = konsolidasyon oturması

Burada bütün yöntemlere yer verilmeyip sadece birkaç yöntem üzerinde durulacaktır. Yüzeysel temellerin elastik oturması (Şekil 2.1.5), elastisite teorisi kullanılarak aşağıdaki biçimde açıklanabilir:

$$\Delta H_e = \int_0^H \varepsilon_z(dz) = \frac{1}{E_s}\int_0^H (\Delta\sigma_z - \mu_s\Delta\sigma_x - \mu_s\Delta\sigma_y)dz \tag{16}$$

burada;

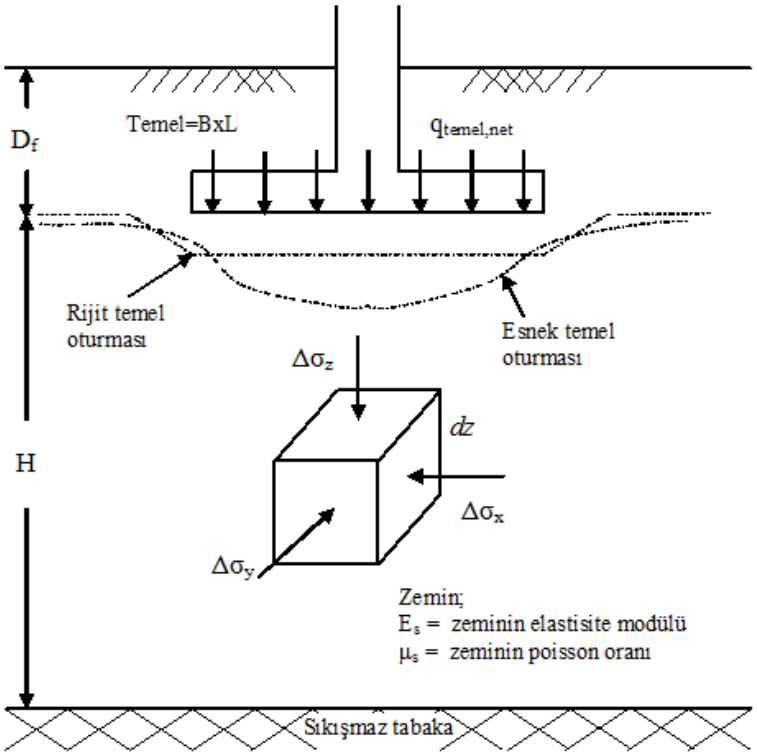
ΔH_e = elastik oturma

H = tabaka kalınlığı veya etki derinliği

E_s = zeminin elastisite modülü

μ_s = zeminin poisson oranı

$\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$, $\Delta\sigma_z$ = sırasıyla x, y ve z eksenlerinde net temel yükünden dolayı oluşan gerilme artışı



Şekil 2.1.5: Rijit ve esnek temellerin elastik oturması

Bowles (1987) teorik olarak tamamen esnek bir temelde oturma hesabı için

$$\Delta H_e = q_0(\alpha B')\frac{1-\mu_s^2}{E_s} I_s I_f \qquad (17)$$

formülünü önermiştir. Burada;

q_0 = temel tabanına etkiyen net gerilme

E_s = zeminin elastisite modülü

μ_s = zeminin ortalama poisson oranı (z=0 ile z=4B arasında)

B'= temel merkezi için B/2, temel köşesi için B

I_s = şekil katsayısı

I_f = derinlik katsayısı

Rijit bir temel için elastik oturma miktarını ise aşağıdaki eşitlikle tanımlamıştır:

$$\Delta H_{e(rijit)} = 0.93 \Delta H_{e(esnek)} \quad (18)$$

Konsolidasyon oturması suya doygun killi zeminlerin yüklenmesi sonucu oluşur. Yüzeysel temellerin konsolidasyon oturması için ise aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir:

$$\Delta H_c = \frac{C_c H_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_{ort}'}{\sigma_0'} \quad \text{(NKK)} \quad (19)$$

$$\Delta H_c = \frac{C_s H_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_{ort}'}{\sigma_0'} \quad (\text{AKK, } \sigma_0' + \Delta\sigma_{ort}' < \sigma_c') \quad (20)$$

$$\Delta H_c = \frac{C_s H_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma_c'}{\sigma_0'} + \frac{C_c H_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_{ort}'}{\sigma_c'} \quad (\text{AKK, } \sigma_0' < \sigma_c' < \sigma_0' + \Delta\sigma_{ort}') \quad (21)$$

burada;

σ_0' =yüklemeden önce kil tabakası ortasındaki ortalama efektif gerilme

$\Delta\sigma_{ort}'$ = yüklemeden sonra efektif gerilmedeki ortalama artış

σ_c' = ön konsolidasyon basıncı

e_0 = kil tabakasının yüklemeden önceki boşluk oranı

C_c = sıkışma indeksi

C_s = şişme indeksi

H_c = kil tabakasının kalınlığı

NKK = normal konsolide kil

AKK = aşırı konsolide olmuş kil

Yüklemeden dolayı zeminde oluşacak gerilmeleri ($\Delta\sigma$) hesaplamak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları şunlardır: Boussinesq yöntemi, Westergaard yöntemi ve yaklaşık yöntem. Zeminin elastisite modülü ise tek eksenli kesme deneyi, üç eksenli kesme deneyi, standart penetrasyon deneyi, koni penetrasyon deneyi, presiyometre deneyi ve plaka yükleme deneyi gibi deneylerle belirlenebilir.

2.1.2.1. Oturma ölçütleri

Çoğu zaman temel zemini homojen bir yapıya sahip değildir ve temelin farklı yerlerinde farklı oturmalar olabilir. Aynı zamanda temelin de yeterli rijitliğe sahip olmamasından dolayı temel tabanında farklı oturmalar olabilir. Temel tabanındaki farklı oturmalar üst yapıya zarar verebilir. Bu yüzden farklı oturmaları belirlememize yarayan bazı parametrelerin belirlenip, bu parametrelerin yapı güvenliğini bozmayan sınır değerlerini bilmemiz gerekir. Bunlar; mutlak (toplam) oturma, farklı oturma ve açısal çarpılmadır. Mutlak oturma (ΔH), bir noktanın düşey yer değiştirmesidir. Farklı oturma (δ) ise iki nokta arasındaki mutlak oturmaların farkıdır. İki nokta arasındaki farklı oturmanın, aradaki uzaklığa oranına ise açısal çarpılma (β) denir.

İzin verilebilir oturmalar birçok etmene bağlıdır. Bunlar; yapının işlevi, yapının taşıyıcı sistem türü, yapının yapıldığı malzeme ve seçilen temel sistemi gibi değerlerdir. Bu açıdan tüm yapılar için tek bir oturma ölçütü verilemez.

MacDonald ve Skempton (1955) çelik, betonarme ve yük taşıyıcı duvarlardan oluşan 98 adet yapıyı inceleyerek, yapıların izin verilebilir oturma değerlerini Çizelge 2.1.4'deki gibi vermiştir.

Çizelge 2.1.4: İzin verilebilir oturma miktarları (MacDonald ve Skempton, 1955)

Ölçüt	**Tekil, Şerit**	**Radye**
Açısal çarpılma, β	1/300	1/300
Maksimum farklı oturma, δ_{max} (mm)		
Kil	76	76-127
Kum	51	51-76
Maksimum mutlak oturma, ΔH_{max} (mm)		
Kil	45	45
Kum	32	32

Bjerrum (1963) çeşitli yapılar için açısal çarpılmanın sınır değerlerini (β_{max}) aşağıdaki şekilde tavsiye etmiştir (Çizelge 2.1.5):

Çizelge 2.1.5: Yapısal hasar çeşidine göre oturma ölçütleri (Bjerrum, 1963)

Yapısal hasar çeşidi	**βmax**
Esnek tuğla duvar için izin verilebilir değer	1/150
Çoğu bina için yapısal hasar veren değer	1/500
Panel ve tuğla duvarlarda çatlama	1/150
Rijitliği yüksek binalarda gözle görülür dönme	1/250
Panel duvarlarda ilk çatlak oluşumu	1/300
Binalarda çatlama oluşturmayacak güvenlik limiti	1/500
Çerçeveler için sınır değer	1/600

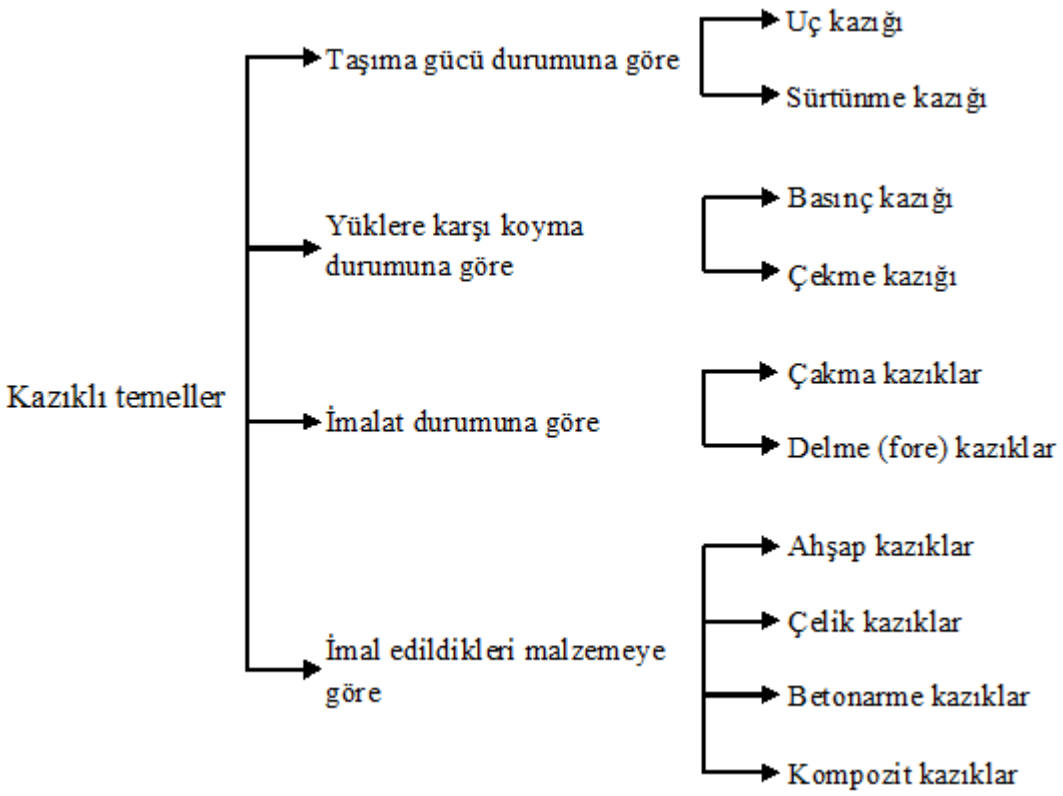
Avrupa standardizasyon komitesi temel sisteminin ve bina özelliklerinin farklı olduğu bazı yapılarda izin verilebilir oturma ve maksimum oturma değerlerini Çizelge 2.1.6'daki gibi vermiştir.

Çizelge 2.1.6: Avrupa standardizasyon komitesi tarafından önerilen farklı oturma parametreleri

	Parametre	**Değer**	**Temel/bina özellikleri**
Güvenli sayılabilecek sınır değer	ΔH	25 mm	Tekil temel
		50 mm	Radye temel
	δ	5 mm	Rijit cephe kaplamalı çerçeve
		10 mm	Esnek cephe kaplamalı çerçeve
		20 mm	Açık çerçeveler
	β	1/500	—
Kabul edilebilir maksimum oturma	ΔH	50 mm	Yüzeysel temeller
	δ	20 mm	Yüzeysel temeller
	β	≈1/500	—

2.2. Kazıklı Temeller

Yüzeysel temellerde taşıma gücü, oturma, sıvılaşma veya stabilite problemlerinden birisi sağlanmaz ise ya zemin iyileştirilir ya da derin temel yapılır. En yaygın kullanılan derin temel çeşidi kazıklı temellerdir. Kazıklar, temel elemanı olarak görev yaptıklarında üstyapı yüklerini zemine aktarırlar. Bunun dışında, yan yana yapılmış sıralı kazıklar, gerektiğinde ankraj elemanları ile güçlendirilerek dayanım yapısı olarak işlev görebilirler. Ayrıca çekme kuvvetlerini ve yanal yükleri de taşımaları gerekebilir. Kazıklı temellerin genel bir sınıflandırılması Şekil 2.2.1'de verilmiştir.

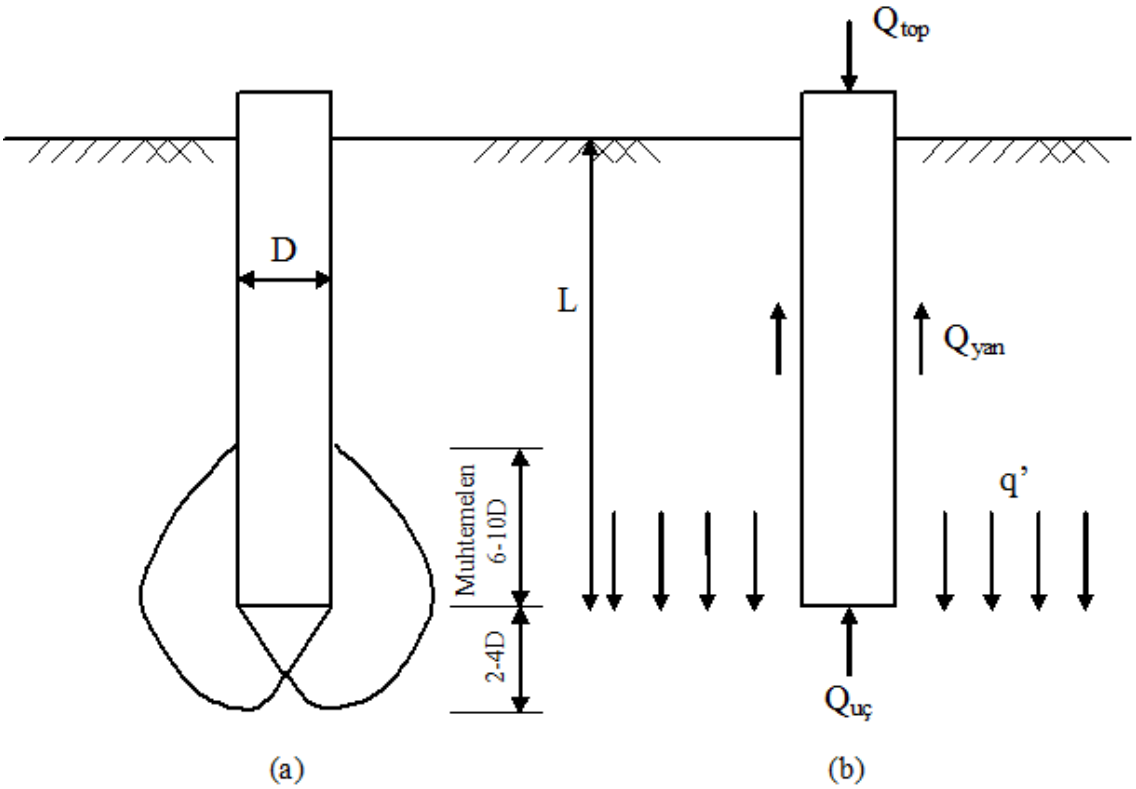


Şekil 2.2.1. Kazıklı temellerin sınıflandırılması

2.2.1. Kazıkların taşıma gücü

Kazıklar genellikle grup halinde tasarlanırlar ve çoğu kez tek bir kazığın davranışı, kazık grubunun davranışından farklıdır. Yine de kazık grubunun taşıma gücü bulunurken tek bir kazığın taşıma gücünü bilmek gerekir. Tek bir kazığın taşıma gücü, kazığa etkiyen negatif sürtünme kuvvetleri ile grup etkisinin dikkate alınmasıyla bulunur.

Zemin içerisindeki bir kazık yüklendiği zaman hem zemin hem de kazık bir miktar oturur. Fakat kazık zemine göre daha fazla oturma yaptığı için kazık ile zemin arasında ve oturma yönüne ters yönde bir sürtünme direnci oluşur. Buna çevre sürtünmesi denir. Bu hareket sırasında kazığın tabanı da kazık ucundaki zemini sıkıştırır. Kazık tabanında ise yüzeysel temellerde olduğu gibi gerilmeler ve kayma yüzeyleri oluşur. Buna da uç direnci denir. Kazık çevresinde oluşan çevre sürtünmesi ile uç direncin toplamı kazığın toplam taşıma gücünü verir (Şekil 2.2.2).



Şekil 2.2.2. (a) Kazık ucunda oluşan kayma yüzeyleri (Bowles, 1988), (b) Kazığın sınır yük taşıma kapasitesi

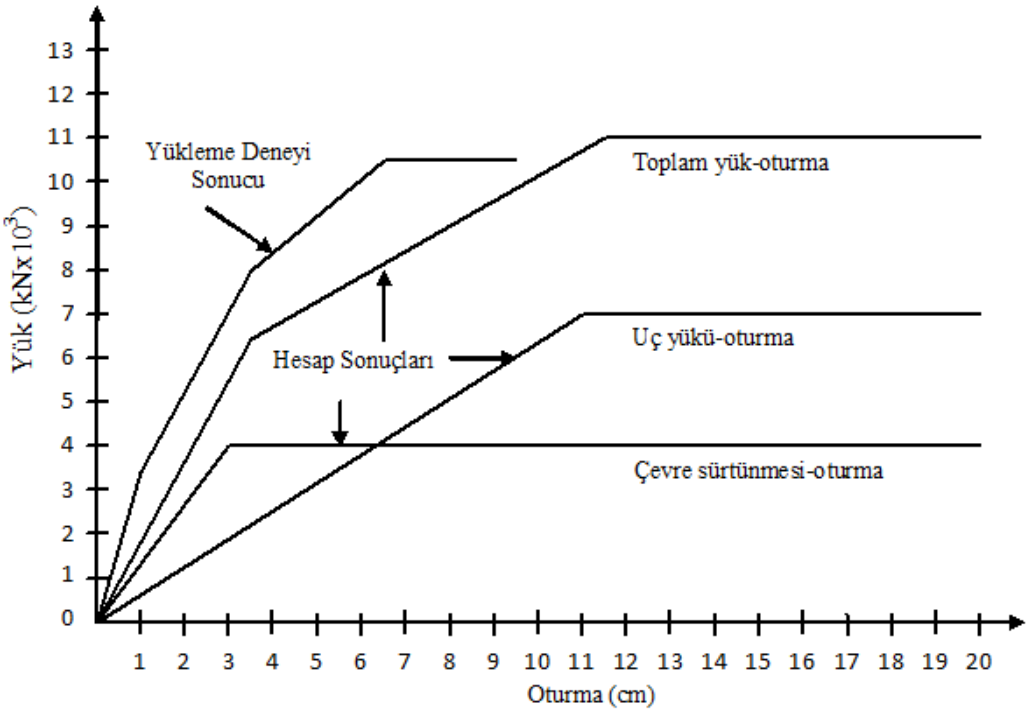
$$Q_{top} = Q_{uç} + Q_{yan} \tag{22}$$

Q_{top} = toplam taşıma gücü

Q_{yan} = çevre sürtünmesi direnci

$Q_{uç}$ = uç direnci

Kazığın oturmaya devam etmesiyle çevre sürtünmesi ve uç direnci artarak kendi sınır değerlerine ulaşırlar. Her iki direncin de sınır değeri farklıdır ve bu değerlere farklı oturma miktarlarında ulaşırlar. Çevre sürtünmesi ve uç direncinin sınır değerleri arasındaki ilişki Şekil 2.2.3'de verilmiştir. Buna benzer bir ilişkiyi Das (2007) da söylemiştir. Das (2007) kazık yüzeyindeki maksimum sürtünme direncinin 5-10 mm oturma değerinde mobilize olduğunu, kazık ucunun %10-25D düşey hareketine kadar ise maksimum uç direncinin mobilize olmadığını ifade etmiştir. Almanya'daki uygulamalarda ise çevre sürtünmesinin kazığın zemine çapın yüzde biri kadar, uç direncinin ise kazığın zemine çapın yüzde onu kadar hareketi sonucunda sınır değere ulaştığı kabul edilmektedir. Fakat bu hareket değerleri yaklaşık olmakla birlikte zeminin cinsine göre değişebilir (Birand, 2007).



Şekil 2.2.3. Kazık davranışı (Birand, 2007)

Bir kazığın taşıma gücünü kazık-zemin etkileşimi yönünden belirleyen başlıca iki etmen, zeminin ve kazığın mekanik özellikleridir. Yükleme sırasında hem zeminin hem de kazığın sağlam kalması gerekir. Tasarım aşamasında öncelikle uygulanan yükün, kazığın yapıldığı malzemenin direncini aşmaması gerekir. Zeminin dayanımı yönünden ise kazıkların taşıma gücü birçok yolla bulunabilir. Bunlar, statik kazık formülleri, dinamik kazık formülleri, arazi deneylerini esas alan denklemler ve kazık yükleme deneyleridir. Aşağıda kazık taşıma gücü formüllerinin bir kısmı verilmiştir. Dinamik kazık formülleri çakma kazıklar için geçerli olduğundan bu tez kapsamında anlatılmayacaktır.

2.2.1.1. Statik kazık formülleri

Statik kazık formülleri kullanılırken kum, çakıl gibi iri taneli zeminler için hesap efektif gerilmelere göre yani drenajlı şartlar için; kil, silt gibi ince taneli zeminlerde ise toplam gerilmelere göre yani drenajsız şartlar için yapılır (Toğrol ve Tan, 2009).

2.2.1.1.1. Uç direnci

Uç kazıklarında uç direnci;

Uç kazıklarının uçları sert bir taşıyıcı zemin içinde yer alır. Bu zemin kaya olabileceği gibi çok sıkı çakıl veya kum (D_r>%85) da olabilir. Taşıyıcı zeminin kaya ise ve taşıma gücü kazığın yapıldığı malzemenin serbest basınç mukavemetinden büyük ise kazık uç direnci için kazığın dayanımı dikkate alınır. Taşıyıcı zemin çok sıkı kum veya çakıl ise bu sefer zeminin göçmesi dikkate alınır. Ayrıca uç kazıklarında kazığın düşey hareketi çok küçük olduğundan veya olmadığından dolayı çevre sürtünmesi dikkate alınmaz.

Sürtünme kazıklarında uç direnci;

Kazık ucunun yüzeysel bir temel gibi düşünülmesiyle, kazık uç direnci Terzaghi (1967) taşıma gücü teorisi kullanılarak daire kesitli bir kazık için aşağıdaki gibidir:

$$Q_{uç} = \frac{\pi d^2}{4}(1.3cN_c + \gamma L(N_q - 1) + 0.3\gamma dN_\gamma) \quad (23)$$

burada;

L = Kazığın zemin içinde kalan boyu

c = Kohezyon

ɤ = zeminin efektif birim hacim ağırlığı

d = Kazık çapı

N_c, N_q, $N_ɤ$ = zeminin içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayıları

N_q katsayısının denklemlerde N_q-1 olarak alınması, kazığın net taşıma gücünü bulmak için alınır. Bunun nedeni ise kazık imal edilirken çıkarılan veya yer değiştiren zemin miktarının taşıma gücünden azaltılmasıdır.

Kohezyonsuz zeminlerde (c=0) kazık uç direnci;

$$Q_{uç} = \frac{\pi d^2}{4}\gamma L(N_q - 1) \quad (24)$$

Kumlu zeminlerde, kohezyon sıfır alınırsa uç direnci;

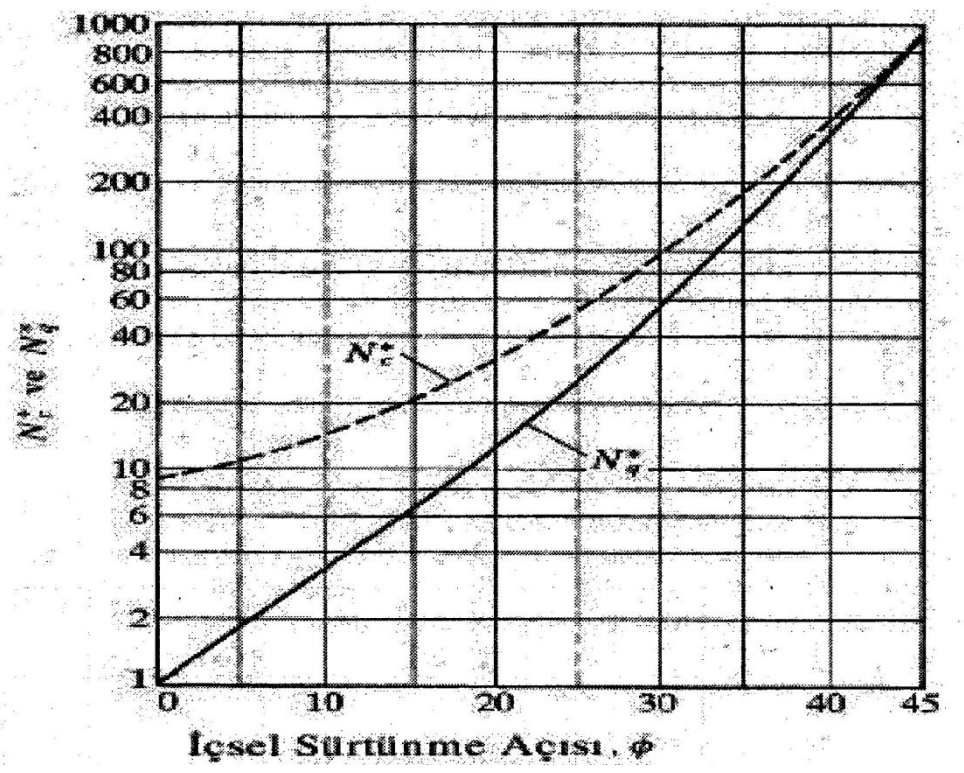
$$Q_{uç} = \frac{\pi d^2}{4}(\gamma L N_q + 0.3\gamma d N_\gamma) \tag{25}$$

Kohezyonlu zeminlerde ise aşağıdaki gibi alınabilir:

$$Q_{uç} = \frac{\pi d^2}{4}(1.3cN_c + \gamma L(D_f - 1)) \tag{26}$$

Granüler-kohezyonlu bir zeminde toplam uç direnci aşağıdaki ifade ile de hesaplanabilir. Bu ifadedeki taşıma gücü katsayıları Şekil 2.2.4'de verilmiştir.

$$Q_{uç} = A_{uç}(cN_c^* + \sigma_v^{'} N_q^*) \tag{27}$$



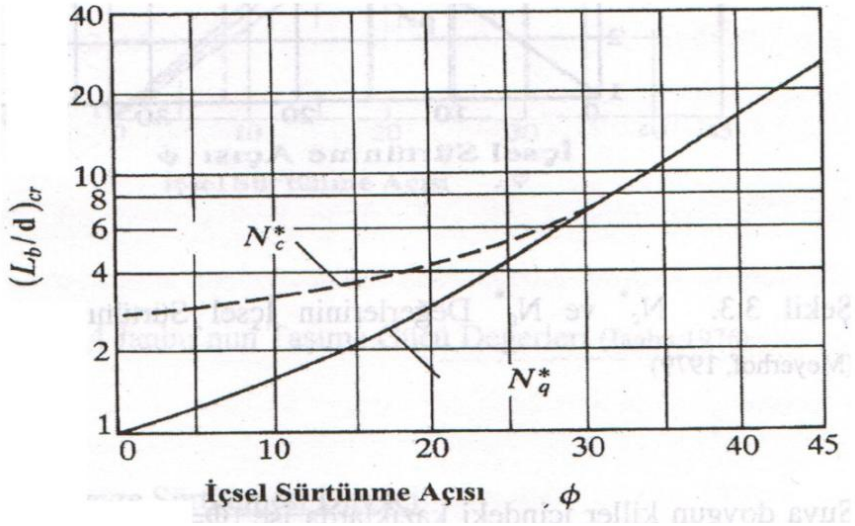
Şekil 2.2.4. Nc* ve Nq* değerlerinin içsel sürtünme açısı ile değişimi (Mayerhof, 1976)

Mayerhof (1976), granüler zeminlerdeki uç direnci için farklı bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, kazık ucu direncinin derinlikle arttığını fakat belirli bir kritik L_b derinliğinden sonra değişmediğini kabul etmektedir. Bu derinlik, kazık çapı (d)

cinsinden "kritik gömülme oranı $(L_b/d)_{cr}$" ile ifade edilir. Bu oran Şekil 2.2.5'de gösterildiği gibi içsel sürtünme açısına bağlı bir fonksiyondur. Bu yöntemle granüler zeminlerde (c=0) kazık uç direnci;

$$Q_{uç} = A_{uç} * \sigma_v^{'} * N_q^* \leq A_{uç}(50N_q^*)\tan\phi \tag{28}$$

Yukarıdaki formülde efektif gerilme hesaplanırken Şekil 2.2.5'deki grafik kullanılarak içsel sürtünmesine bağlı bir "kritik gömülme oranı" hesaplanır. Buradan L_b hesaplanarak bu değere göre efektif gerilme bulunur. Taşıma gücü katsayısı ise Şekil 2.2.4 kullanılarak bulunur.



Şekil 2.2.5. $(L_b/d)_{cr}$ oranının içsel sürtünme açısına göre değişimi (Mayerhof, 1976)

Janbu (1976) kazık uç direnci için aşağıdaki eşitliği önermiştir:

$$Q_{uç} = A_{uç}(cN_c^* + \sigma_v^{'}N_q^*) \tag{29}$$

burada;

$$N_q^* = (\tan\phi + \sqrt{1+\tan^2\phi})^2(e^{2\eta\tan\phi})$$

$$N_c^* = (N_q^* - 1)\cot\phi$$

η = kazık ucundaki göçme yüzeyi açısı, 60 (yumuşak kil) < η < 105 (sıkı kum)

Suya doygun killi zeminlerdeki (Ø=0) uç direnci ise (27) numaralı eşitlik kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Q_{uç} = A_{uç} * N_c * c_u = 9 * c_u * A_{uç} \quad (30)$$

2.2.1.1.2. Çevre sürtünmesi direnci

Kohezyonsuz zeminlerde kazık ile zemin arasında fiziksel sürtünme, kohezyonlu zeminlerde ise adhezyon kuvveti nedeni ile çevre sürtünmesi direnci oluşur. Bu direnç, birim alanda oluşan çevre sürtünmesinin kazığın yüzey alanı ile çarpılmasıyla bulunur.

$$Q_{yan} = \sum \pi . d . \Delta L_i . f_i \quad (31)$$

burada;

Q_{yan} = çevre sürtünmesi direnci

d = kazık çapı

ΔL_i = kazığın değişik zemin tabakaları içindeki uzunluğu

f_i = kazığın her bir zemin tabakası içindeki birim çevre sürtünmesi

Kohezyonsuz zeminlerde birim çevre sürtünmesi (f_i);

Kohezyonsuz zeminler, kazık çevresinde kemerlenme etkisini artırarak çevre yükünün bir kısmını kazığa daha üst seviyelerde aktarırlar. Bundan dolayı, bu tür zeminlerde birim çevre sürtünmesi değeri belirli bir derinliğe kadar doğrusal olarak artar, bu derinlikten sonra ise sabit kalır. Bu derinliğe "kritik kazık boyu (L_k)" denir ve zeminin sıkılığına göre değişir. L_k değeri D kazık çapı olmak üzere aşağıdaki gibi alınabilir:

$L_k = 10D$ (gevşek kum)

$L_k = 15D$ (orta sıkı kum)

$L_k = 20D$ (sıkı kum)

Kritik kazık boyu hesaplandıktan sonra birim çevre sürtünmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$0<z< L_k$ $\qquad f_i = K_i.\sigma'_{vi}.\tan\delta_i$ (32)

$L_k<z<L$ $\qquad f_i = (f_i)_{z=Lk}$ (33)

burada;

K_i = (i) zemin tabakasının efektif yanal toprak basıncı katsayısı (Çizelge 2.2.1 ve Çizelge 2.2.2)

σ_{vi}' = (i) zemin tabakasındaki efektif düşey gerilme

δ_i = (i) zemin tabakasında kazık-zemin arasındaki sürtünme açısı (Çizelge 2.2.3)

Çizelge 2.2.1. Kazık tipine göre K değerleri

Kazık Tipi	K
Fore kazıklar	$\approx K_0$=1-sinØ
Az deplasman yapan çakma kazıklar	$\approx K_0$ ile 1.4K_0
Yüksek deplasman yapan çakma kazıklar	$\approx K_0$ ile 1.8K_0

Çizelge 2.2.2. Sükûnetteki yatay toprak basıncı katsayısına göre K değerleri

Kazık Tipi	K/K_0
Yüksek deplasman yapan çakma kazıklar	1-2
Az deplasman yapan çakma kazıklar	0.75-1.75
Fore kazıklar	0.71-1
Su jeti ile çakılan kazık	0.5-0.7

Çizelge 2.2.3. Kazık-zemin arasındaki sürtünme değerleri

Kazık-zemin temas durumu	Kazık/zemin sürtünme açısı, δ
Pürüzsüz veya kaplanmış çelik-kum	0.5Ø – 0.7Ø
Kaba (ondüleli) çelik-kum	0.7Ø – 0.9Ø
Önceden dökülmüş beton-kum	0.8Ø – 1.0Ø
Yerinde dökülmüş beton-kum	1.0Ø
Ahşap-kum	0.8Ø – 0.9Ø
Zemin içinde boru bırakılan kazıklar	0.7Ø – 0.85Ø

Vesic (1970), zeminin rölatif sıkılığına bağlı olarak birim çevre sürtünmesini aşağıdaki gibi ifade etmiştir:

$f = \chi_v(10)^{1.54D_r{}^4}$ (kPa) (34)

burada;

$\chi_v = 8$ (fazla miktarda zeminin yerini değiştiren kazıklar)

$= 2.5$ (fore kazıklar, açık uçlu boru kazıklar, H kesitli kazıklar)

Kohezyonlu zeminlerde birim çevre sürtünmesi (f_i);

Kohezyonlu zeminlerde çevre sürtünmesi direnci genelde kilin drenajsız direnci, efektif düşey gerilme, kazık kesidinin şekli, kazık uzunluğu ve kazık malzemesi gibi etkenlerin bir fonksiyonudur. Bu tür zeminlerde yüzeysel sürtünme rolü, adhezyon tarafından üstlenilmektedir (Birand, 2007). Kohezyonlu zeminlerde kazık yüzeyinde oluşan birim çevre sürtünmesi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$f_i = \sum \alpha_i . c_{ui} \tag{35}$$

burada;

α_i = kazığın içinden geçtiği zemin tabakasının adhezyon katsayısı

c_{ui} = kazığın içinden geçtiği zemin tabakasının drenajsız kayma direnci

Adhezyon katsayısı aşağıdaki eşitlik veya Çizelge 2.2.4 kullanılarak hesaplanır:

$$\alpha = 1 - 0.00615(c_u - 25) \qquad 25 > c_u > 90 \ (kN/m^2) \tag{36}$$

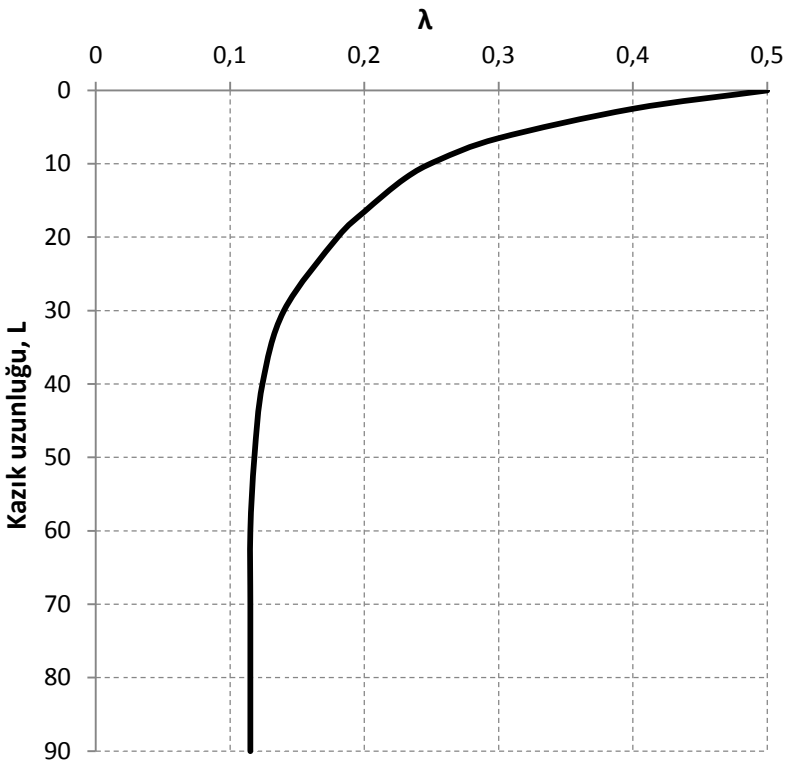
Çizelge 2.2.4. Adhezyon katsayısı

c_u (kN/m^2)	α
90	0.60
100	0.58
150	0.42
200	0.35

Çevre sürtünmesi hesabı için Vijayvergia ve Focht (1972), λ yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yönteme göre birim çevre sürtünmesi;

$$f = \lambda(\sigma_v^{'} + 2c_u) \tag{37}$$

burada; λ değeri Şekil 2.2.6 yardımıyla bulunur.



Şekil 2.2.6. λ değerinin kazık boyunca değişimi (Vijayvergia ve Focht, 1972)

Kazıklarda birim çevre sürtünmesini hesaplamada kullanılan bir başka yöntem Burland (1973) tarafından önerilmiştir. Çevre direncini özellikle efektif gerilmeler cinsinden ele aldığından dayanımın uzun süreli değerlendirilmesinde kullanılır (Birand, 2007):

$$f = \beta.\sigma_v^{'} \tag{38}$$

burada;

β =K tan $Ø_r$

$Ø_r$ = yoğrulmuş kilin efektif (drenajlı) içsel sürtünme açısı

2.2.1.2. Arazi deney sonuçları ile kazık taşıma gücünün bulunması

Mayerhof (1976) kazıklarda net uç direnci ve sürtünme direncini SPT sonuçlarına göre kN/m^2 cinsinden aşağıdaki gibi önermiştir:

$$Q_{uç} = 40N_{1,60}\frac{L}{D} \le 400N_{1,60} \qquad \text{(kumlar ve çakıllar için, L/D}\ge 10) \tag{39}$$

$$Q_{uç} = 40N_{1,60}\frac{L}{D} \le 300N_{1,60} \quad \text{(plastik olmayan siltler için, L/D≥10)} \quad (40)$$

$$Q_{yan} = 2N_{60} \text{ (kohezyonsuz zeminlerde büyük deplasman kazıklar, L/D≥7.5)} \quad (41)$$

$$Q_{yan} = N_{60} \quad \text{(kohezyonsuz zeminlerde büyük deplasman kazıklar, L/D≥7.5)} \quad (42)$$

burada;

L = kazık boyu

D = kazık çapı

$N_{1,60}$ = teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %60'ına ve efektif jeolojik basıncı 100 kPa alarak düzeltilmiş vuruş sayısı

N_{60} = teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı

Briaud ve ark. (1985) da SPT sonuçlarını kullanarak aşağıdaki eşitlikleri önermiştir:

$$Q_{uç} = 1970(N_{60})^{0.36} \quad \text{(kPa)} \quad (43)$$

$$Q_{yan} = 22.4(N_{60})^{0.29} \quad \text{(kPa)} \quad (44)$$

Shioi ve Fukui (1982) bazı zeminlerde kazık cinsini dikkate alarak SPT sonuçlarına göre aşağıdaki ifadeleri geliştirmişlerdir:

$$Q_{uç} = 3p_a \quad \text{kumlu zemin, yerinde dökme kazık} \quad (45)$$

$$Q_{uç} = 0.1p_aN_{60} \quad \text{kumlu zemin, fore kazık} \quad (46)$$

$$Q_{uç} = 0.15p_aN_{60} \quad \text{çakıllı kum, fore kazık} \quad (47)$$

$$Q_{uç} = 0.3p_aN_{60} \quad \text{bütün zeminler, çakma kazık} \quad (48)$$

Kanada Geoteknik Birliği (1985), SPT sonuçlarından kazık taşıma gücünün tahmini için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir:

$$Q_{top} = mNA_{uç} + n\bar{N}DA_{yan} \quad (49)$$

burada;

m = çakma kazıklar için 400, fore kazıklar için 200

n = çakma kazıklar için 2, fore kazıklar için 1

N = kazık uç seviyesindeki SPT sayısı

$\bar{N}$ = kazık boyunca ortalama SPT sayısı

Kanada Geoteknik Birliği (1985), CPT sonuçlarından kazık taşıma gücünün tahmini için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir:

$$Q_{top} = q_c A_{uç} + f_c A_{yan} \tag{50}$$

burada;

q_c= kazık ucu civarındaki ortalama konik uç direnci (D>500mm olan kazıklar için ortalama değer yerine ölçülen en küçük değer alınır)

f_c= CPT deneyinde ortalama çevre sürtünmesi

Nottingham (1975) ve Schmertmann (1978), CPT sonuçları ile kazıkların taşıma gücünü aşağıdaki ifadelerle bulunabileceğini ifade etmişlerdir:

$$Q_{uç} = q_c \leq 15MPa \tag{51}$$

$$Q_{yan} = \lambda_1 f_c \tag{52}$$

burada;

q_c= konik uç direnci (kazık ucu seviyesinde 6-8D üstü ile 0.7-4D altı arasındaki ortalama direnç)

f_c= koni çevre sürtünmesi

λ = 0.8-2 (ayrık daneli zeminlerde)

= 0.2-1.25 (killi zeminlerde)

Mayerhof (1956), CPT sonucunu çevre sürtünmesinin konik uç direncine (kPa) bağlı olarak aşağıdaki gibi alınabileceğini söylemiştir:

$$Q_{yan} = 0.005 q_c \tag{53}$$

Mayerhof (1983), CPT sonuçlarını kullanarak ve konik uç direncinin kazık uç seviyesinin 4D üstü ile 1.0D altı arasındaki değerlerin ortalamasının alınması

gerektiğini önererek kazıkların taşıma gücünü aşağıdaki ifadelerle bulunabileceğini ifade etmişlerdir:

$$Q_{uç} = \lambda_3 \lambda_4 q_c \tag{54}$$

burada;

$$\lambda_3 = \left(\frac{D + 0.5}{2D} \right)^n \qquad \text{D} > 0.5\text{m}$$

n=1, gevşek kumlarada; n=2, orta sıkı kumlarda; n=3, sıkı kumlarda

$$\lambda_3 = 1 \qquad \text{D} < 0.5$$

$$\lambda_4 = \frac{L_{sıkı,\,kum}}{10D} \qquad L_{sıkı,\,kum} < 10D$$

$$\lambda_4 = 1 \qquad L_{sıkı,\,kum} > 10D$$

Eslami ve Fellenius (1995), CPT sonuçlarını kullanarak kazık uç direncini ve çevre sürtünmesini hesaplamak için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde; kazık zayıf tabakadan geçip sağlam tabakaya giriyorsa kazık ucundan 4D altı ile 8D üstü kadar bir kesimde, kazık sağlam tabakadan geçip zayıf tabakaya giriyorsa kazık ucunun 4D aşağısı ile 2D üstü kadar bir kesimde ölçülen efektif koni uç dirençlerinin ortalaması alınır (q_c) ve aşağıdaki eşitliklerde kullanılır. Eslami ve Fellenius (1995), çevre sürtünmesi hesabı için zemin cinsine göre değişen bir C_s katsayısı tanımlamışlardır (Çizelge 2.2.5).

$$q_{uç} = q_c \tag{55}$$

$$Q_{yan} = C_s . q_c \tag{56}$$

Çizelge 2.2.5. C_s katsayısının değerleri

Zemin cinsi	**C_s**
Çok yumuşak kil veya yumuşak hassas zemin	8.0
Yumuşak kil	5.0
Katı kil veya kil silt karışımı	2.5
Silt ve kum karışımı	1.0
Kum veya çakıllı kum	0.4

2.2.2. Kazık yükleme deneyleri

Kazıkların taşıma gücü, teorik denklemler ile arazi deneylerini esas alan ifadeler ile bulunabileceği gibi kazık yükleme deneyi yapılarak da bulunabilir. Kazık yükleme deneyinde, kazık uygun bir düzenekle yüklenir ve kazık başının yer değiştirmesi ölçülür. Kazıkların eksenel yük kapasiteleri (basınç veya çekme) düşey yükleme deneyleri, yanal yük kapasiteleri ise yanal yükleme deneyleri ile belirlenir. Eksenel yüklü kazıklarda, yüklemeye oturmaların hızla artmaya başladığı göçme halinde son verilir. Böylece kazığın sınır taşıma gücü bulunmuş olur. Kazık arazide birebir yüklendiğinden kazığın taşıma gücü-oturma davranışı en doğru şekilde belirlenmiş olur. Tasarımda bu yükün belirli bir yüzdesi veya şartnamelerde belirtilmiş olan oturmaya karşılık gelen yük alınır.

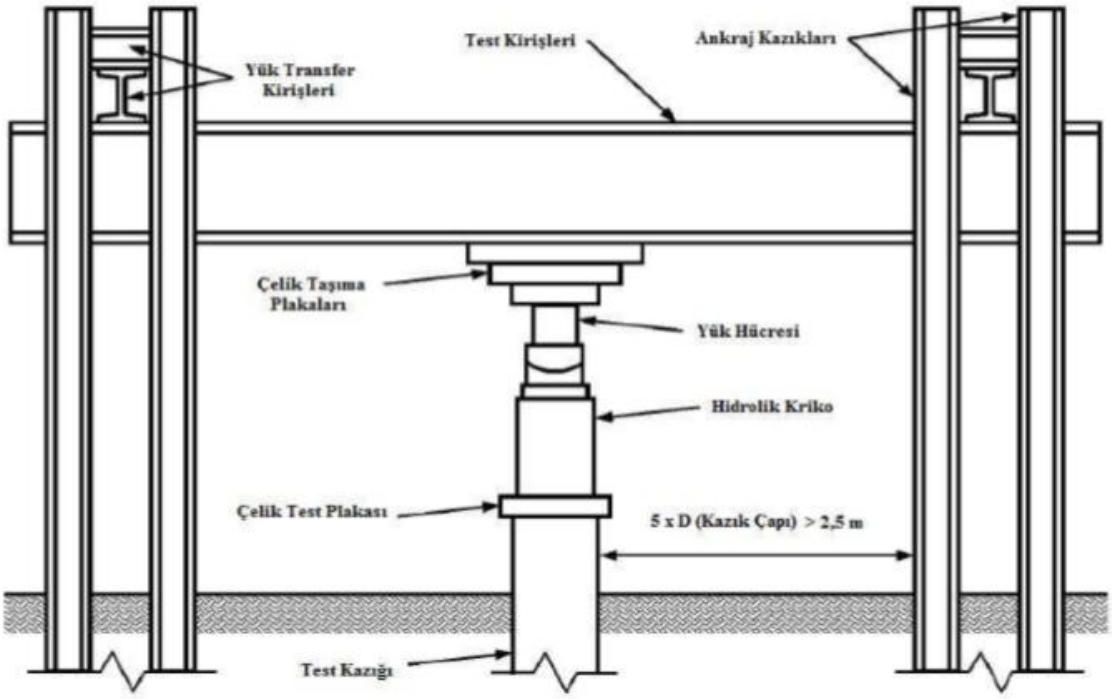
Kazık yükleme deneylerinde asıl amaç kazığın sınır taşıma gücünü belirlemektir. Kazığın oturması bu deneyle bulunamaz. Çünkü uygulanan yük kısa sürede kaldırılmaktadır (Toğrol ve Tan, 2009).

Kazık imal edilirken kazık çevresindeki zeminde örselenmeler olur. Zeminin tiksotropi veya konsolidasyon ile eski özelliklerine dönebilmesi, direncinin artması, yani taşıma gücünün nihai değerine varabilmesi için deneye başlamadan önce bir süre beklenilmelidir. Kohezyonlu zeminlerde imal edilen yerinde dökme betonarme kazıklar için 2 hafta beklenmelidir.

2.2.2.1. Yükleme düzeneği ve deneylerin yapılışı

Kazık yükleme deneylerinde kazıklar deneme kazığı veya kontrol kazığı olarak yapılabilir. Deneme kazığında, projeye başlamadan önce ve sonuçlarından tasarımda faydalanmak üzere yapılır. Bu kazıklar göçme yüküne kadar yüklenir. Kontrol kazığında ise kazıklar imal edildikten sonra tasarım yükünü taşıyıp taşımadığını kontrol etmek için yapılır. Bu kazıklar ise genellikle tasarım yükünün 1.5-2 katına kadar yüklenir.

Yükleme deneyleri yapılırken; deney kazığı üzerine kurulan bir platformdan, mevcut bir yapıdan veya ankraj kazıkları ile oluşturulmuş bir platformdan reaksiyon alınarak sabit bir kiriş vasıtasıyla hidrolik kriko ile yük aktarılır (Şekil 2.2.7).



Şekil 2.2.7: Kazığın hidrolik kriko vasıtası ile ankraj kazılarından reaksiyon alarak yüklenmesi

Kazık yükleme deneylerinde kazık başına 2500 tona kadar yük gelebilir. Bu yüzden, reaksiyon alınan çerçeve büyük eğilme momentlerine maruz kalacağından yeterli rijitlikte olmalıdır. Ayrıca, deney kazıkları ile reaksiyon kazıkları arasında yeterli mesafe olmalıdır. Kazık çapının 3 ile 5 katından daha az mesafe olursa kazıklar arasında etkileşim olur ve oturma miktarları yanlış ölçülür. Bununla beraber reaksiyon kazıklarının da yer değiştirmesi ölçülmelidir (Toğrol ve Tan, 2009).

Kazık yükleme deneyi esnasında yükün uygulanış şekline bağlı olarak dört farklı deney tekniği vardır. Bunlar; yavaş adımlı yükleme deneyi, hızlı adımlı yükleme deneyi, sabit penetrasyonlu yükleme deneyi ve çevrimli yükleme deneyidir.

- Yavaş adımlı yükleme deneyinde (ASTM D – 1143);
  - Yük artırım kademeleri proje yükünün 0.25 katı artırımlarla yapılır.
  - Her adımda oturma hızı 0.25 mm/saat değerine düşünceye kadar beklenir. Eğer bu değere düşmez ise 2 saatten fazla beklenmez ve bir üst kademe yüke geçilir.
  - Tasarım yükünün %200'üne kadar veya kazık göçünceye kadar yük artırılır. %200 yük değerinde 24 saat beklenir.
  - Yük boşaltma işlemi tekrar %25'lik azalan yük adımlarıyla gerçekleştirilir. Her adımda bekleme süresi 1 saattir.

- Boşaltmadan sonra yine yükleme yapılarak tasarım yükünün %50'si artırımlarla tasarım yükünün iki katına ulaşılır. Her adımda bekleme süresi 20 dakikadır.

Bu yöntemin avantajı, uygulama için özel donanım gerektirmez. Ayrıca, toplam ve net oturma kriterlerine göre değerlendirme yapmak kolaydır. Olumsuz yanı ise, bu kazık yükleme deney yönteminin 40 – 70 saat gibi uzun bir süre sürmesidir.

- Hızlı adımlı yükleme deneyi kazıkların performans deneylerinde etkin olarak kullanılabilmektedir. Bu deneylerde;
  - Tasarım yükünün %15'i artırımlarla kademeli olarak yükleme yapılır.
  - Her yükleme adımında 2.5 dakikada bir ölçüm alarak 5 dakika beklenir.
  - 5 dakikalık beklemeden sonra tüm yükün %25'i adımlarla indirilerek 4 kademede boşaltılır. Her kademede 5 dakika beklenir.

Bu yöntemin avantajı, deneyin uygulama süresi kısadır, yaklaşık olarak 2-3 saatte tamamlanabilmektedir ve deneyin yapılışı kolaydır. Bu yöntem esnasında drenajsız yükleme şartları meydana gelmektedir. Bu sebepten ötürü oturma analizi için sonuçlar yorumlanamamaktadır.

- Sabit penetrasyonlu yükleme deneyi genellikle sürtünme kazıklarının nihai taşıma güçlerinin bulunuşunda kullanışlı bir deney yöntemidir. Bu yöntemde;
  - Kazık zemine 1.25 mm/dakika hızla batırılır. Toplam batma 50 – 70 mm oluncaya kadar devam edilir.
  - Deney sonucu elde edilen eğride, çapın %10'una karşılık gelen yük son taşıma gücü olarak alınmaktadır.

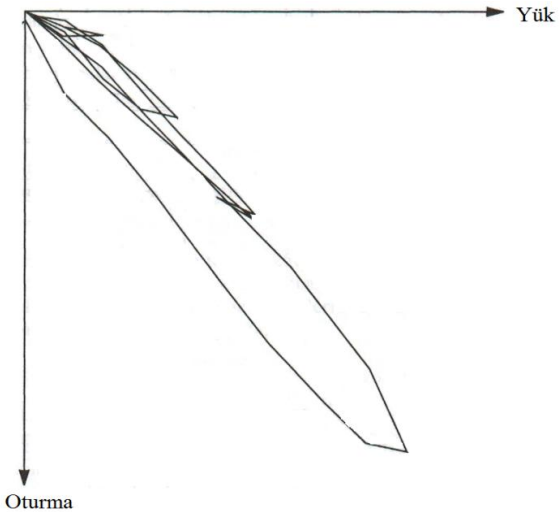
Çok uzun kazıklarda elastik kısalmanın bu değerlere ulaşabileceği, büyük çaplı kazıklarda ise %10 kazık çapı mertebesine ulaşmanın zorluğu dikkate alınmalıdır. Bu gibi durumlarda değerlendirme eğrinin biçimine göre yapılmalıdır. Deneyin uygulama süresi kısadır, yaklaşık olarak 1–3 saatte tamamlanır. Drenajsız yükleme şartları geçerlidir.

- Çevrimli yükleme deneyinde ise;
  - İlk aşamada kazık temel tasarım yükünün 1/3'üne kadar yüklenir.
  - Daha sonra yük, tasarım yükünün 1/6 değerine düşürülür ve yükleme-boşaltma işlemi 20 defa tekrarlanır.

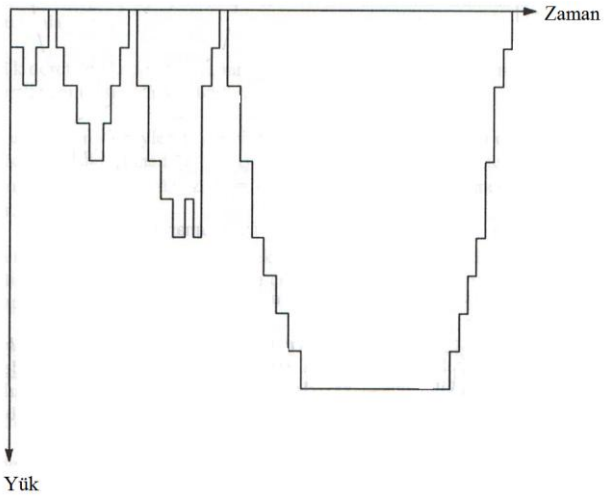
- Bu aşamalar bitince, birinci aşamadaki yükün %50'si daha fazla yüke çıkılır. İkinci aşamadaki gibi tekrar tasarım yükünün 1/6 değerine düşülür ve bu işlem 20 defa tekrarlanır.
- Bu işlem göçme yüküne kadar devam eder. Bu yöntem zaman alıcı olup çevrimler kazık davranışını etkilemektedir.

Eğer sabit hızlı yükleme deneyi yapılıyorsa, kazık killi zeminlerde 0.25-1.25 mm/dk hızla, ayrık daneli zeminlerde ise 0.75-2.5 mm/dk hızla zemine itilir (ISSMFE Subcomittee, 1983).

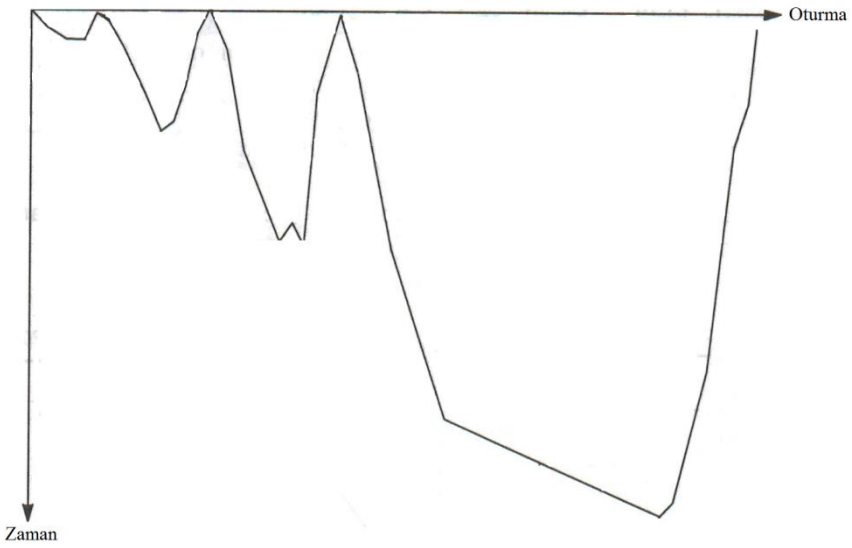
Kazık yükleme deneyi sonucunda yük-oturma (Şekil 2.2.8), yük-zaman (Şekil 2.2.9) ve oturma-zaman (Şekil 2.2.10) grafikleri verilir. Kazığın oturması kalıcı (plastik) veya geri alınabilen (elastik) olabilir (Şekil 2.2.11).



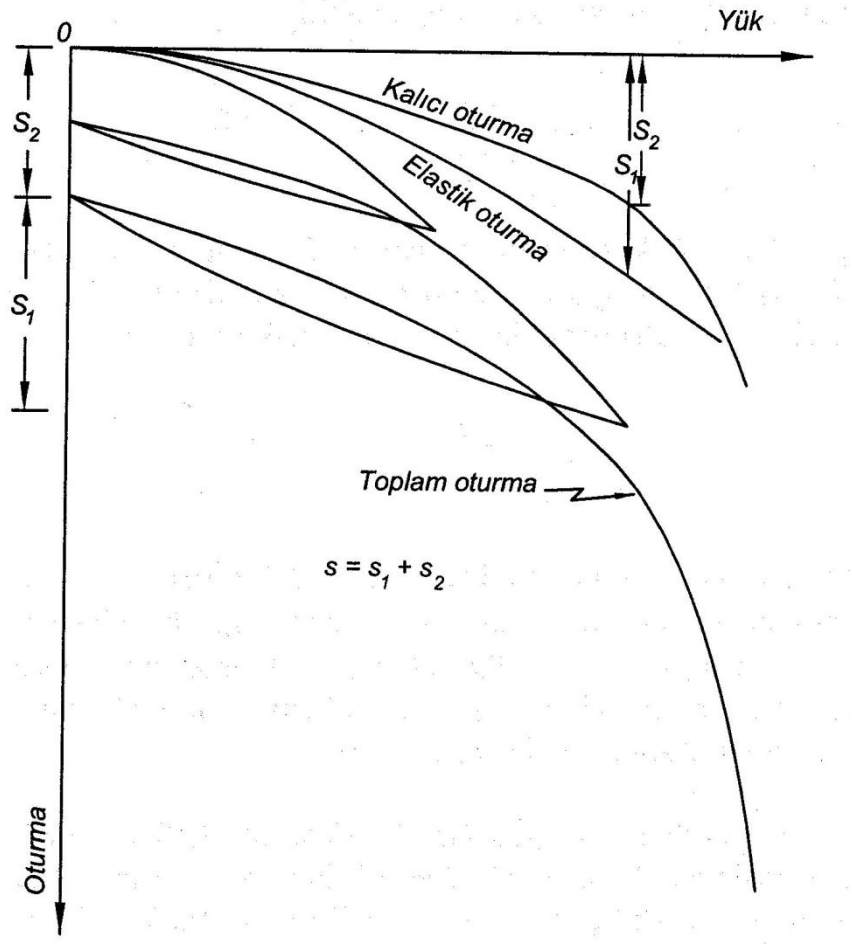
Şekil 2.2.8. Yük-oturma eğrisi



Şekil 2.2.9. Yük-zaman eğrisi



Şekil 2.2.10. Oturma-zaman eğrisi



Şekil 2.2.11. Yük-elastik oturma ve yük-kalıcı oturma eğrileri (Toğrol ve Tan, 2009)

2.2.2.2. Yükleme deney programı

Yukarıda da bahsedildiği gibi kazık yükleme deneyleri ya kademeli olarak yükleme ve boşaltma şeklinde ya da sabit hızla zemine itme şeklinde yapılır. Kademeli yükleme deneyleri uzun sürelidir fakat sınır taşıma gücünün yanında oturmaların da belirlenmek istendiği durumlarda tercih edilebilir. Bu deneylerde yükleme ve boşaltma sırasında uygulanacak yükler ve her kademedeki bekleme süreleri önceden belirlenmelidir. Çizelge 2.2.6'da örnek bir kazık yükleme deney programı gösterilmektedir.

Çizelge 2.2.6. Kazık yükleme deney programı

Servis yükünün yüzdesi olarak deney yükü	Zaman aralığı	Kademeler
25	1 saat	Yükleme kademesi
50	1 saat	
100	1 saat	
75	10 dakika	Boşaltma kademesi
50	10 dakika	
25	10 dakika	
0	1 saat	
100	6 saat	Yükleme kademesi
125	1 saat	
150	6 saat	
125	10 dakika	Boşaltma kademesi
100	10 dakika	
75	10 dakika	
50	10 dakika	
25	10 dakika	
0	1 saat	

Kazık yükleme deneyi yapılacak kazıklar, projede yer alan kazıkları yeterli bir biçimde örnekleyebilmelidir. Malzeme ve kazık imalatı açısından projeyle uyumlu olmalıdır.

2.2.2.3. Kazık yükleme deneylerinin yorumlanması

Kazık yükleme deneylerindeki esas amaç, kazık temelin taşıma kapasitesini ve yer değiştirmesini belirlemektir. Kazık taşıma kapasitesi yani göçme yükü kazık yükleme deneylerinden elde edilen yük–oturma eğrisi değerlendirilerek hesaplanır. Dünyaca kullanılan bazı göçme yükü kıstasları Çizelge 2.2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.2.7. Dünyaca kullanılan göçme yükü kıstasları (Birand, 2007)

Kıstasın tanımı	Kıstas
Toplam oturma sınırlaması	En fazla 25 mm (Hollanda)
Toplam oturma sınırlaması	Kazık çapının %10'u (İngiltere)
Plastik oturma sınırlaması	6.30 mm (AASHTO)
Plastik oturma sınırlaması	8.40 mm (Magnel)
Plastik oturma sınırlaması	12.70 mm (Boston)
(Plastik oturma/Elastik oturma) sınırı	Maksimum 1.5 (Danimarka)
Toplam oturma/yük	6.35 mm/ton (California, Chicago)
Toplam oturma/yük	0.76 mm/ton (Ohio)
Toplam oturma/yük	1.27 mm/ton (Raymond)
Kademede elastik oturma/Kademede plastik oturma	Maksimum değer (Szhecy)
Toplam plastik oturma/yük	0.25 mm/ton (New York)
Toplam plastik oturma/yük	1.5 mm/ton (Raymond)
Kademede plastik oturma/yük	4.5 mm/ton (Raymond)

Yukarıda verilen kıstaslara ilave olarak pek çok araştırmacı göçme yükünün belirlenmesi için uzun deneyimler sonucu çeşitli yöntemler geliştirmiştir. Araştırmacılar, bu yöntemleri geliştirirken elastik oturma, plastik oturma, toplam oturma veya oturmanın yük ile artış hızı gibi ifadeleri temel almışlardır. Aşağıda bu yöntemlerin bir kısmı anlatılmaktadır.

2.2.2.3.1. Terzaghi yöntemi

Terzaghi güvenli yükün tanımını şöyle yapmaktadır:

- Kazık, güvenli yükün iki katını göçme olmadan taşımalıdır.
- Güvenli yükün %50 fazlası uygulandığında kalıcı oturma 0.25 mm/ton değerinden büyük olmamalıdır.

Bu tanımlara göre, önce göçme yükü belirlenir ve belirli bir güvenlik sayısına bölünerek (en az 2) kazığın güvenle taşıyabileceği yük bulunur. Daha sonra, güvenli yük 1.5 ile çarpılır ve yükleme eğrisinde işaretlenir. Bu işaretlenen noktadan boşaltma eğrisine paralel bir doğru çizilir ve oturma ekseninde belirlenen noktanın kalıcı oturma şartını sağlayıp sağlamadığına bakılır.

2.2.2.3.2. Boston şartnamesi

Bu şartname kademeli yükleme deneylerinin yapılmasını öngörür. Bu deney sonuçlarından 24 saatte 5 mm'den daha az oturma yaptıran yük bulunur ve yarısı alınır. Bulunan yük kazığın servis yükü olarak kabul edilir.

2.2.2.3.3. Kazık çapının %10'u kuralı

İngiliz şartnamelerinde görülen bu uygulamada, önce kazığın elastik oturması hesaplanır. Yük-oturma eğrisi üzerine, hesaplanan elastik oturma çıkarılmak şartıyla kazık çapının %10'u kadar bir oturmaya rastlayan yük bulunur ve göçme yükü olarak alınır.

2.2.2.3.4. Brinch Hansen %80 yöntemi

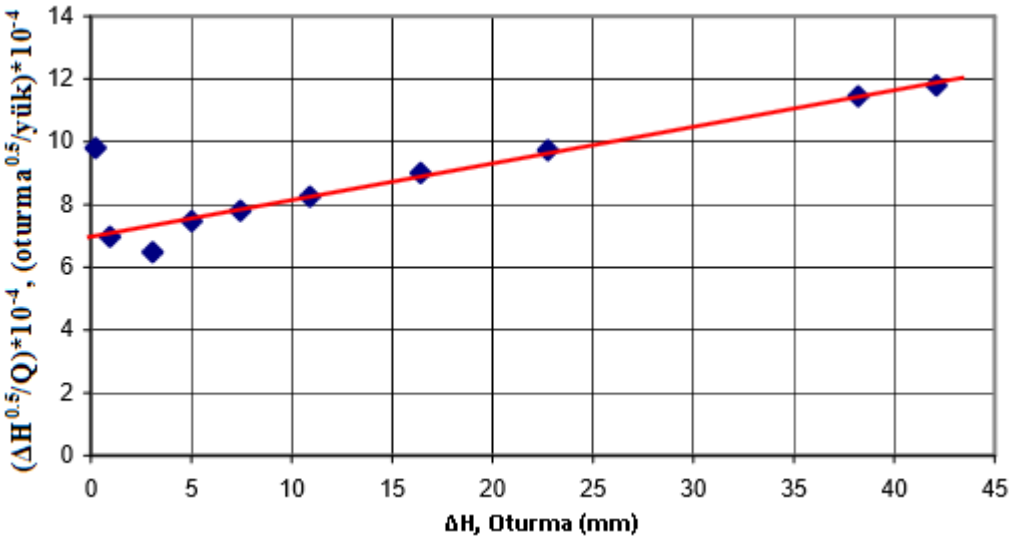
Brinch Hansen (1963) tarafından önerilen yönteme göre; Şekil 2.2.12'de verilen grafikteki gibi $\Delta H^{0.5}/Q$ ile ΔH arasındaki ilişkiyi veren eğri çizilir. Oluşturulan eğride kazığın göçme yükü;

$$Q_{sınır} = \frac{1}{\sqrt{C_1.C_2}} \tag{57}$$

burada;

C_1= doğrunun eğimi

C_2= doğrunun düşey ekseni kestiği değer



Şekil 2.2.12. Brinch Hansen %80 yöntemi

Göçme anında kazık başının hareketi;

$$\Delta H_{max} = \frac{C_2}{C_1} \tag{58}$$

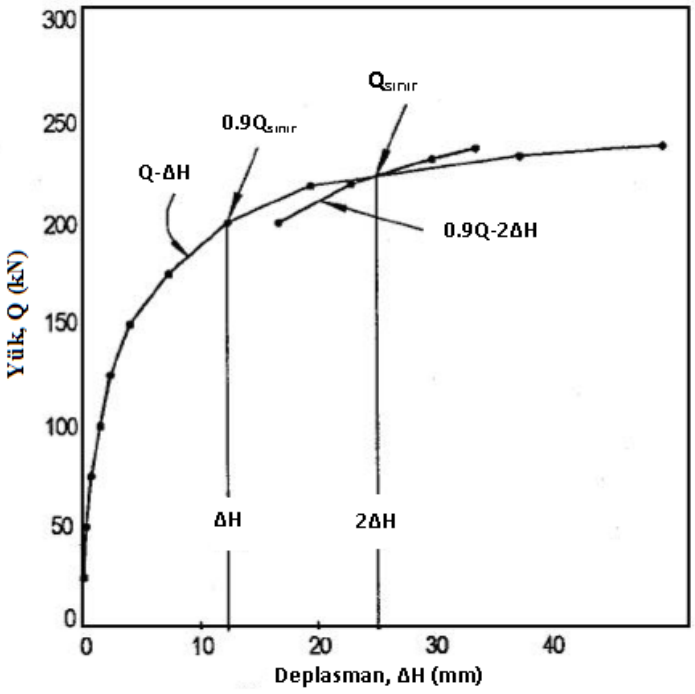
Doğrunun denklemi ise;

$$\frac{\sqrt{\Delta H}}{Q} = C_1 \bullet \Delta H + C_2 \tag{59}$$

2.2.2.3.5. Brinch Hansen %90 yöntemi

Bu yöntemde göçme yükü şu şekilde belirlenir: Göçme yükünün %90'ına eşit bir yükte meydana gelen oturma miktarı, göçme yükü olarak tanımlanan yükteki meydana gelen oturmanın %50'sine eşittir.

İlk başta göçme yükü belli değildir. Bunun için, her yük kademesinde 0,90·Q değeri hesaplanarak yük–oturma grafiğinde bu değerlere karşılık gelen oturma (ΔH) bulunur. Daha sonra 2·ΔH belirlenerek 0,90·Q–2ΔH eğrisi oluşturulur. Q-ΔH eğrisinin 0,90·Q–2·ΔH eğrisini kestiği nokta göçme yükünü vermektedir (Şekil 2.2.13).

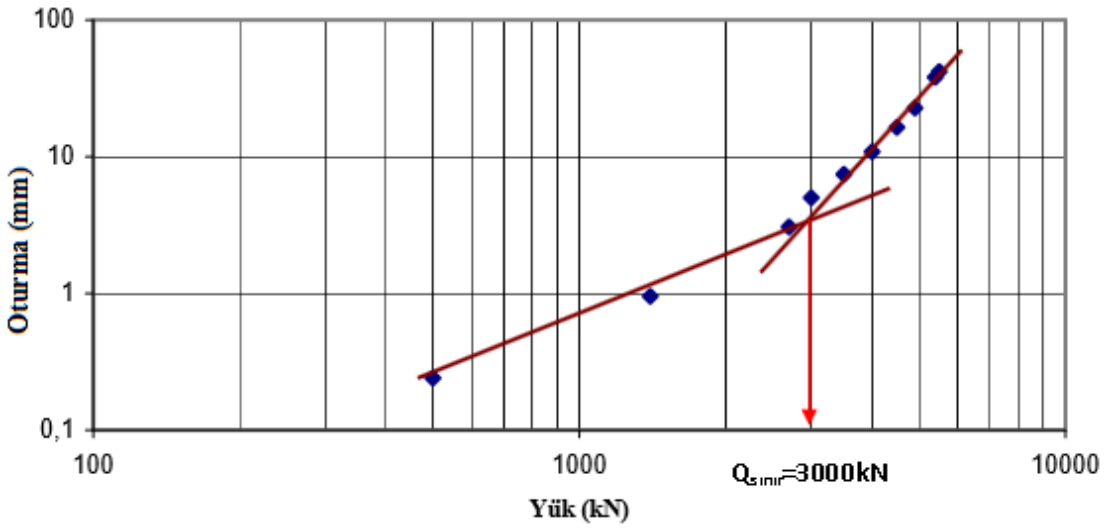


Şekil 2.2.13. Brinch Hansen %90 yöntemi

Bu yöntem sabit penetrasyonlu yükleme deneyi için en uygun deney sonucu yorumlama yöntemidir (Yıldırım, 2004). Bu yöntemde genellikle maksimum deney yükü göçme yükü olarak kabul edilir.

2.2.2.3.6. De Beer Yöntemi

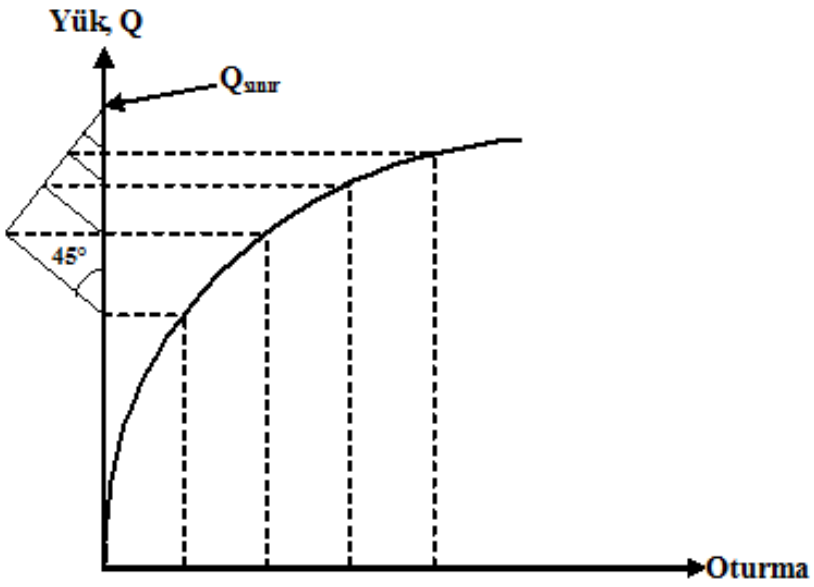
Bu yöntemde yük–oturma eğrisi logaritmik olarak çizilir. Eğrinin başlangıç ve sonuç kesimlerinin uzantılarının kesişim yeri kazık göçme yükü olarak tanımlanır (Şekil 2.2.14).



Şekil 2.2.14. De Beer yöntemi (1967)

2.2.2.3.7. Mazurkiewicz yöntemi

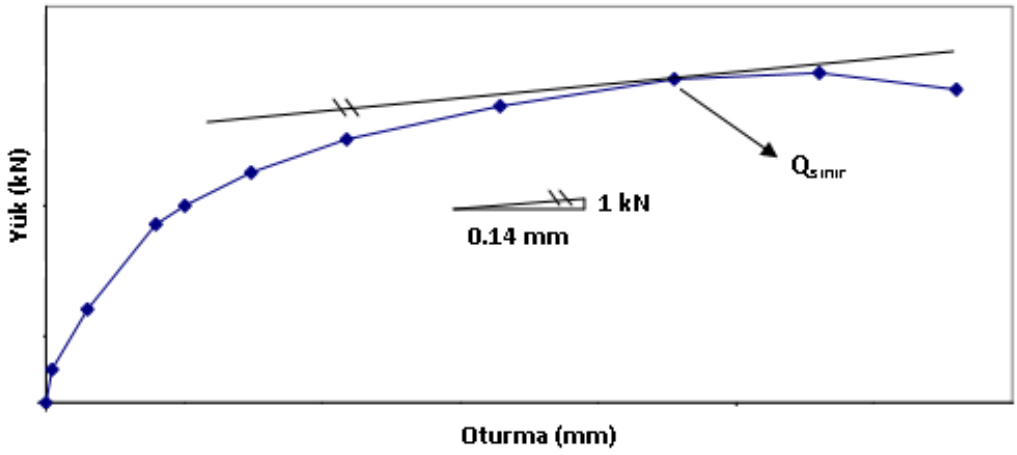
Bu yöntemde, yük-oturma grafiğinin oturma ekseni eşit aralıklara bölünerek işaretlenir. Bu noktalardan önce yük eksenine paralel doğrular çizilir, daha sonra ise bu doğruların grafiği kestiği yerlerden oturma eksenine paralel doğrular çizilir. Bu doğruların yük eksenini kestiği yerlerden, yük ekseni ile 45 derece açı yapan doğrular çizilir. Eğimli doğrular oturma eksenine paralel çizilmiş bir sonraki doğru ile birleştirilir. En sonunda, eğimli doğrunun yük eksenini kestiği nokta göçme yükü olarak kabul edilir (Şekil 2.2.15).



Şekil 2.2.15. Mazurkiewicz yöntemi

2.2.2.3.8. Fuller ve Hoy yöntemi

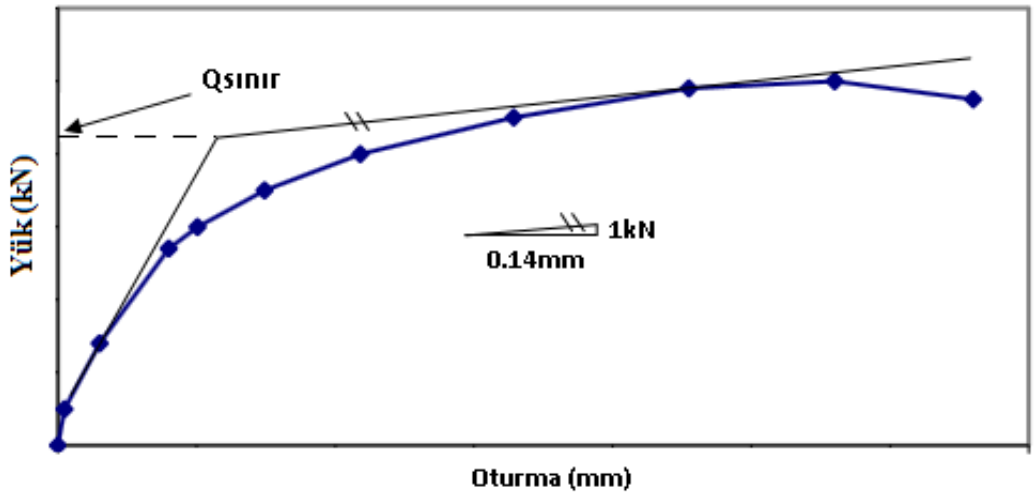
Bu yöntemde, yük-oturma eğrisini kesen ve eğimi 0,14 mm/kN olan doğrunun kesim noktası kazık göçme yükünü vermektedir (Şekil 2.2.16).



Şekil 2.2.16. Fuller ve Hoy yöntemi (1970)

2.2.2.3.9. Butler ve Hoy yöntemi

Başlangıç eğrisinin teğeti ile yük-oturma eğrisini kesen ve eğimi 0,14 mm/kN olan doğrunun kesim noktası kazık göçme yükünü vermektedir (Şekil 2.2.17). Bu yöntem, hızlı adımlı yükleme deneyleri için uygundur.



Şekil 2.2.17. Butler ve Hoy yöntemi (1976)

2.2.2.3.10. Davisson yöntemi

Hızlı adımlı yükleme deneyleri için önerilen bu yöntemde; kazığın göçme yükü olarak, aşağıdaki ifade ile hesaplanan oturmaya karşılık gelen yük kabul edilir.

$$0.012D_r + 0.1\frac{D}{D_r} + \frac{PL}{AE} \tag{60}$$

burada;

D = kazık çapı

D_r = referans genişlik (300 mm)

P = kazığın göçme yükü

A = kazığın kesit alanı

E = kazığın elastik modülü

Yukarıdaki ifadede bilinenler yerine konursa oturma miktarı P'ye baplı bir ifade olarak bulunur. Bu ifade bir doğrunun denklemidir (x+y.P). Kazık yükleme deneyinden elde edilen yük-oturma eğrisinde, başlangıç noktası x (mm) ve eğimi y olan bir doğru çizilip eğri kesilirse, kazığın göçme yükü P(=$Q_{sınır}$) bulunur.

2.2.2.3.11. Chin yöntemi

Chin, yük-oturma grafiğinin hiperbolik olduğu varsayımından yola çıkarak oturma/yük-oturma grafiğinin doğrusal olacağını ifade etmiştir. Bu doğrunun eğimi hesaplanıp tersi alınırsa göçme yükü bulunur.

Bu yöntem; kademeli yükleme ve sabit hızla yükleme deneylerinde, oturma okumalarının eşit zaman aralıklarında alınması halinde kullanılabilmektedir. Bu nedenle, standart yükleme planlarından elde edilen verilere genellikle uygulanmamaktadır.

2.2.2.3.12. Göçmeye ulaşmamış kazıklar

Kazık yükleme deneylerinde hidrolik krikonun yetersiz kalmasından dolayı kazık göçme yüküne kadar yüklenememiş olabilir. Bu tür durumlarda göçme yükünü tahmin edebilmek için Tolosko (1999) aşağıdaki yöntemi geliştirmiştir.

Bu yöntemde ilk önce oturma/yük-oturma (ΔH/Q- ΔH) grafiği çizilir ve oluşan noktalardan bir doğru seçilir. Bu doğrunun denklemi;

$$\frac{\Delta H}{Q} = C_1 \bullet \Delta H + C_2 \qquad (61)$$

burada;

C_1 = doğrunun eğimi

C_2 = doğrunun düşey ekseni kestiği değer

ΔH= kazık başında meydana gelen oturma

Q = oturma değerindeki yük değeri

Davisson kriterine göre kazık başındaki oturma miktarı ΔH;

$$\Delta H = \chi + S\,Q \qquad (62)$$

burada;

χ= 4+D/120

S= L/EA

Q= Davisson kriterine göre kazığın göçme yükü

L= kazık boyu

E = kazığın elastik modülü

A = kazığın kesit alanı

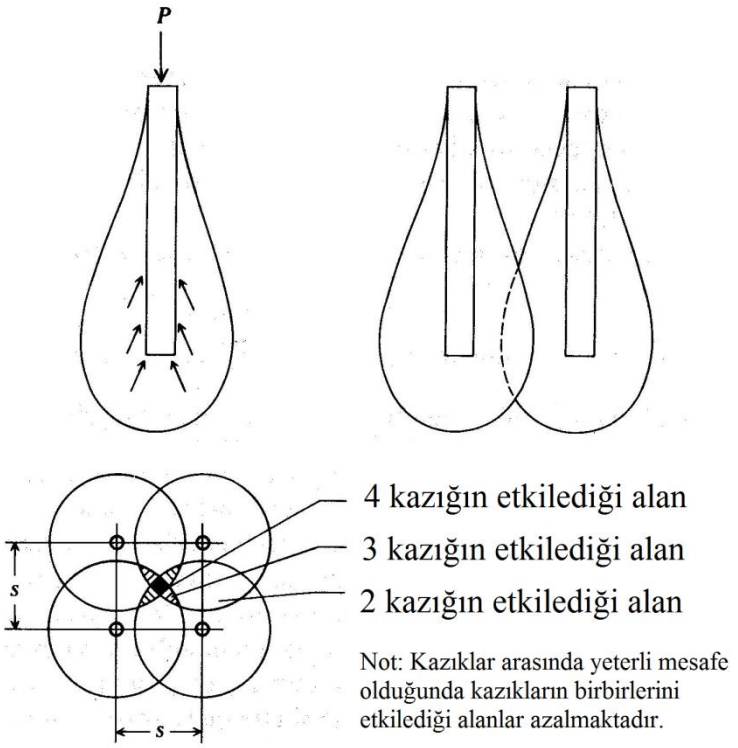
Eşitlik (62), eşitlik (61) ifadesinde ΔH yerine konursa ve ifade düzenlenirse, kazığın göçme yükü aşağıdaki gibi olur:

$$Q_{sınır} = \frac{\left[-(C_1 \chi + C_2 - S) \mp \sqrt{(C_1 \chi + C_2 - S)^2 + 4 C_1 \chi S}\right]}{2 C_1 S} \tag{63}$$

2.2.3. Kazık grubunun davranışı

Kazıklar genellikle tek başlarına kullanılmazlar ve gruplar halinde tasarlanırlar. Bu durumda tek bir kazığın davranışı ile kazık grubunun davranışı birbirinden farklıdır. Çünkü grup içindeki bir kazık ve çevresindeki zemin diğer kazıklardan gelen gerilmelerin etkisi altında kalabilir (Şekil 2.2.18). Bu durumda kazığın taşıma gücü azalır ve kazık grubunun taşıyacağı yük kazıkların tek başlarına taşıyacakları toplam yükten daha az olur. Kazık grubunun taşıma gücü hesaplanırken bu durum göz önüne alınmalıdır. Kazıkların birbirini etkilememesi için kazıklar arasındaki mesafe artırılabilir, fakat bu durumda da kazık başlığındaki (radye temel) eğilme momentleri artar.

Prakash ve Saran (1967) kazıklar arasındaki mesafenin 6D'den daha büyük olduğunda grup etkisinin önemli olmadığını ifade etmiştir. Sönmez ve Ergun (1994) ise kum içinde yaptıkları model deneylerde grup etkisini incelemişler ve kazıklar arasındaki mesafenin 3D'den fazla olduğunda bu etkinin azaldığı, mesafenin 4D'yi geçtiği zaman ise etkileşimin ortadan kalktığı sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.2.18. Sürtünme kazıklarında gerilme dağılışı ve grup etkisi

Birçok araştırmacı kazıklar arasındaki etkileşim sonucu, grup içindeki kazıkların taşıma gücünde meydana gelen azalmayı deneysel olarak araştırmıştır. Geliştirilen yöntemlerde kazık grubunun verimi bulunur ve kazıkların ayrı ayrı toplam taşıma gücü grup verimiyle çarpılır. Bu yöntemlerde genellikle kazık-kazık etkileşimi göz önüne alınmış ve zemin özellikleri ile kazıkların zemine aktardığı gerilmeler dikkate alınmamıştır.

$$Q_{kazık_grubu} \leq \sum Q_{emin} \tag{64}$$

$$Q_{kazık_grubu} = \eta_g \sum Q_{emin} \tag{65}$$

burada;

$Q_{kazık_grubu}$ = kazık grubunun taşıma gücü

Q_{emin} = kazıkların ayrı ayrı toplam taşıma gücü

η_g = grup verimi

Converse-Laberre yönteminde kazık grubunun verimi aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\eta_g = 1 - \theta\left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn}\right] \tag{66}$$

burada;

m = gruptaki kazık sıra sayısı

n = bir sıradaki kazık sayısı

$\theta = \arctan(D/s)$

D = kazık çapı

s = kazık aralığı

1/8 etkileşim kuralına göre dikdörtgen alan üzerindeki m ve n adet kazıktan meydana gelen bir kazık grubunda, grup verimi:

$$\eta_g = 1 - \frac{12 + 10(m-2) + 10(n-2) + 8(m-2)(n-2)}{8mn}(D/s) \tag{67}$$

Feld kuralına göre kazık grubunun taşıma gücü; her bir kazığın taşıma gücü bu kazığın komşu kazık sayısının 1/16'sı kadar azaltılmasıyla bulunur. Bu kurala göre, köşe kazıklar taşıma güçlerinin 3/16'sını, kenardaki kazıklar 5/16'sını, ortadaki kazıklar ise 8/16'sını kaybederler.

Terzaghi ve Peck (1967), kazık grubunun taşıma gücünü veren bir ifade geliştirmiştir. Bu ifade, kazık başının rijit olduğu ve kazık grubunun bir blok halinde göçtüğü kabul edilerek çıkarılmıştır:

$$Q_{blok} = PLs + Aq_f - AL\gamma \tag{68}$$

burada;

P = kazık bloğunun çevresi

L = zemin içinde kalan kazık boyu

s = kazık bloğunu çevreleyen zeminin ortalama kayma mukavemeti

A = blok tabanının alanı

q_f = kazığın oturduğu derinlikteki taşıma gücü

ɣ = zeminin birim hacim ağırlığı

Yukarıda belirtilen ifade ile bulunan kazık grubunun taşıma gücü, kazıkların ayrı ayrı taşıma güçlerinin toplanmasıyla bulunan değerle kıyaslanır ve küçük olan değer alınır.

Sayed ve Bakeer (1992) ise kazık grubunun verimi için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir. Bu formülde kazık uç direnci ve çevre sürtünme direnci dikkate alındığından zemin özellikleri de kısmen dikkate alınmaktadır. Bu yüzden bu bağıntı daha iyi sonuçlar verebilir.

$$n_g = 1-(1-\eta' K)\frac{\sum Q_{yan}}{\sum (Q_{yan}+Q_{uç})} \tag{69}$$

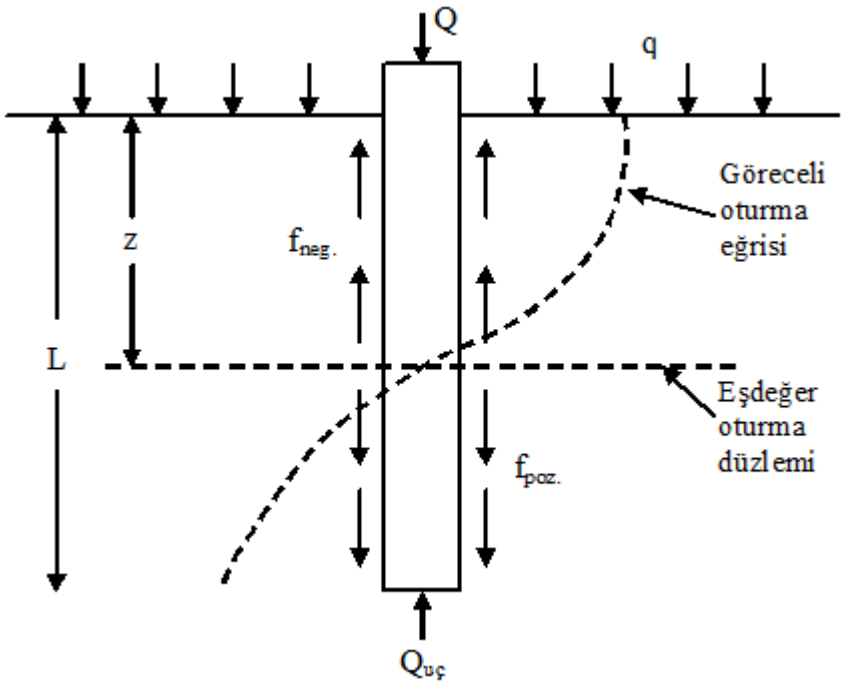
burada;

η = geometrik verim parametresi (Denklem 67 kullanılarak hesaplanabilir ki genellikle 0.6-2.5 aralığında çıkmaktadır)

K = grup etkileşim katsayısı (0.4-0.9)

2.2.3.1. Kazıklarda negatif çevre sürtünmesi

Kazıklarda çevre sürtünmesinin oluşabilmesi için kazığın zemine göre aşağı yönde hareket etmesi lazımdır. Bu durumda kazık, taşıdığı yükün bir kısmını zemine aktarır. Fakat kazıklı temeller tasarlanırken, negatif çevre sürtünmesinin oluşabileceği göz önüne alınmalıdır. Zeminde efektif gerilmenin artmasından dolayı, zemin kazığa göre daha fazla oturma yapıyorsa kazık yüzeyinde negatif çevre sürtünmesi oluşur. Bu durumda, kazığın taşıdığı yük zeminden aktarılan yük kadar artmış olur. Negatif çevre sürtünmesinin değeri yalnız zemin cinsine ve meydana gelen göreceli harekete değil aynı zamanda kazık yüzünün pürüzlülüğüne bağlıdır (Toğrol ve Tan, 2009). Diğer taraftan, derinlik arttıkça kazığa uygulanan yüke ilave olarak artan negatif çevre sürtünmesinden dolayı kazık sıkışarak boyu kısalır ve oturmalar da artarak devam eder. Bundan dolayı; kazık başına yakın olan yerlerde çevre zemini kazığa göre daha fazla otururken, belirli bir derinlikten sonra kazık çevre zeminden fazla oturmaya başlayabilir. Bu durumda kazık-zemin farklı oturması belirli bir derinlikte sıfırlanır. Bu derinliğe "eşdeğer oturma düzlemi" denir (Şekil 2.2.19) (Birand, 2007).



Şekil 2.2.19. Negatif çevre sürtünmesi (Birand, 2007)

Negatif çevre sürtünmesi dikkate alınarak, kazığın taşıma gücü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Q + A_{yan}\int_{0}^{z} f_{neg}\,dz = Q_{uç} + \int_{z}^{L} f_{poz}\,dz \qquad (70)$$

burada;

Q = kazığa uygulanan yük

A_{yan}= kazığın ilgili bölümdeki yanal alanı

f_{neg} = negatif çevre sürtünmesi

f_{poz} = pozitif çevre sürtünmesi

$Q_{uç}$ = uç direnci

L = kazık boyu

Mayerhof (1976), killi zeminlerdeki kazıklara etkiyen negatif çevre sürtünmesi değerini şu şekilde tanımlamıştır:

$$f_{neg} = \beta \sigma_d^{'} \tag{71}$$

burada;

β = zemin cinsine göre 0.20-0.40 arasında değişir

$\sigma_d^{'}$ = düşey efektif gerilme

Vesic (1977), kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için negatif çevre sürtünmesini aşağıdaki gibi ifade etmiştir:

$$f_{neg} = N_0 \sigma_d^{'} \tag{72}$$

burada;

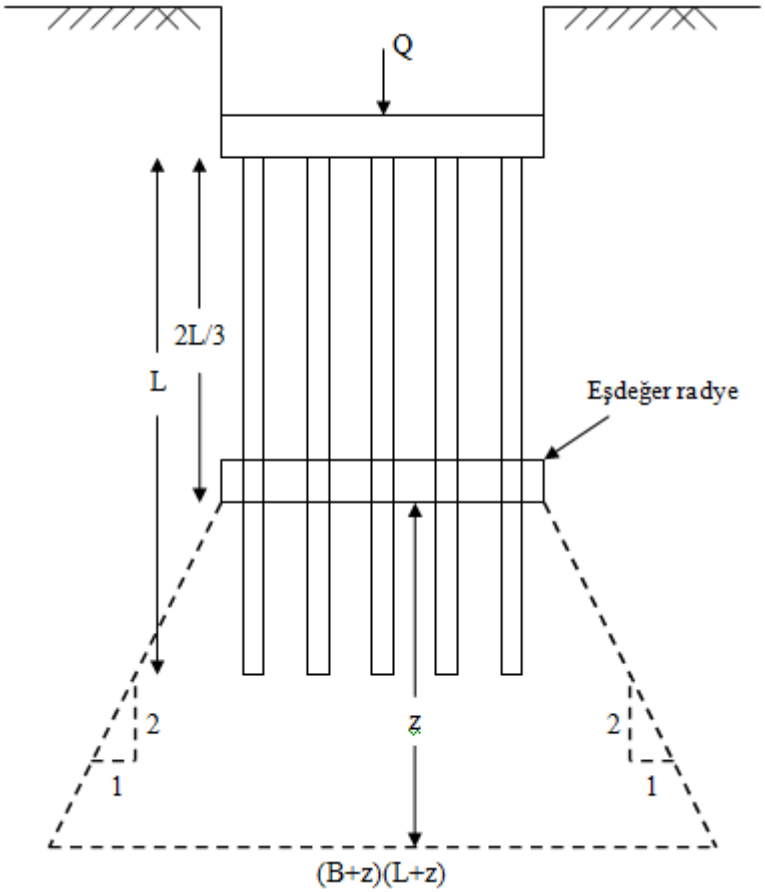
N_0= boyutsuz bir katsayı olup; yüzeyi çıplak kazıklar için, yumuşak kil/silt zeminlerde 0.15-0.3, gevşek kum zeminlerde 0.3-0.8; yüzeyi bitüm veya bentonit kaplı kazıklarda ise 0.01-0.05 arasında değer alır.

2.2.4. Kazık grubunun oturması

Kazıklı temellerin ve aynı zamanda kazık grubunun oturmasını hesaplamak için kazık-zemin ortamı matematiksel olarak modellenmiştir. Bu modellerde kazığı çevreleyen zeminin davranışı için aşağıdaki kabullerden biri kullanılmıştır:

a) Doğrusal elastik davranış gösteren ortam
b) Zemini temsil eden yaylar sistemi
c) Ortamın birim deformasyon enerjisi

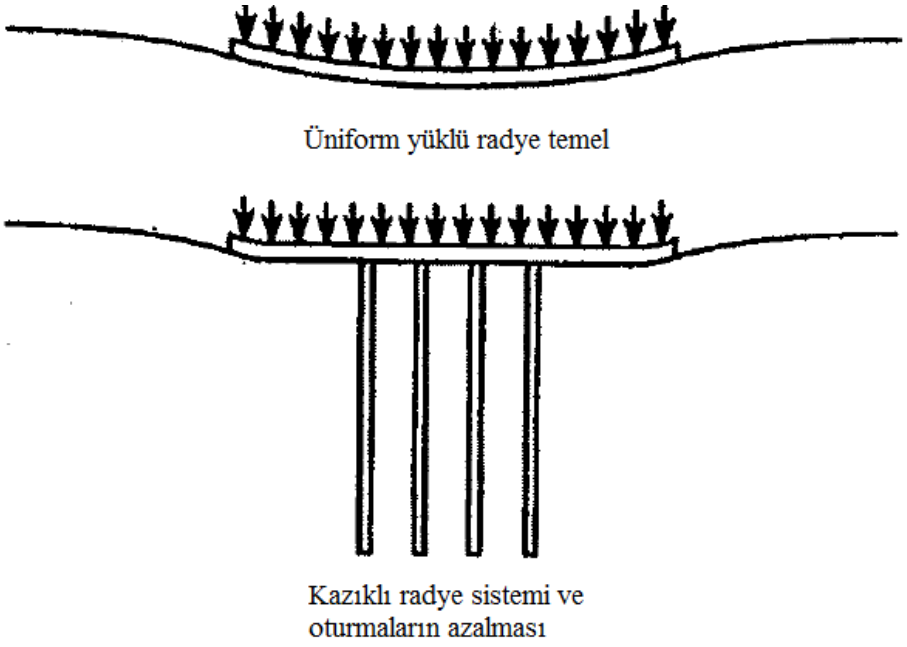
Bu tez kapsamında yukarıda bahsedilen karmaşık teorik yaklaşımlar anlatılmayıp, Terzaghi ve Peck (1967) tarafından geliştirilen basitleştirilmiş bir hesap yöntemi anlatılmakla yetinilecektir. Bu yöntemde kazık grubunun oturması, kazık başlığından 2L/3 derinliğindeki eşdeğer radye temelin oturmasına eşit olarak alınmaktadır. Burada eşdeğer radye temelin oturması, kazık grubu ile aynı yükü taşıyan radyenin, 2L/3 derinliğinde ve gerilmenin 1(yatay)/2(düşey) açı ile genişleyen bir alanda dağıldığı kabulü ile hesaplanmaktadır (Şekil 2.2.20).



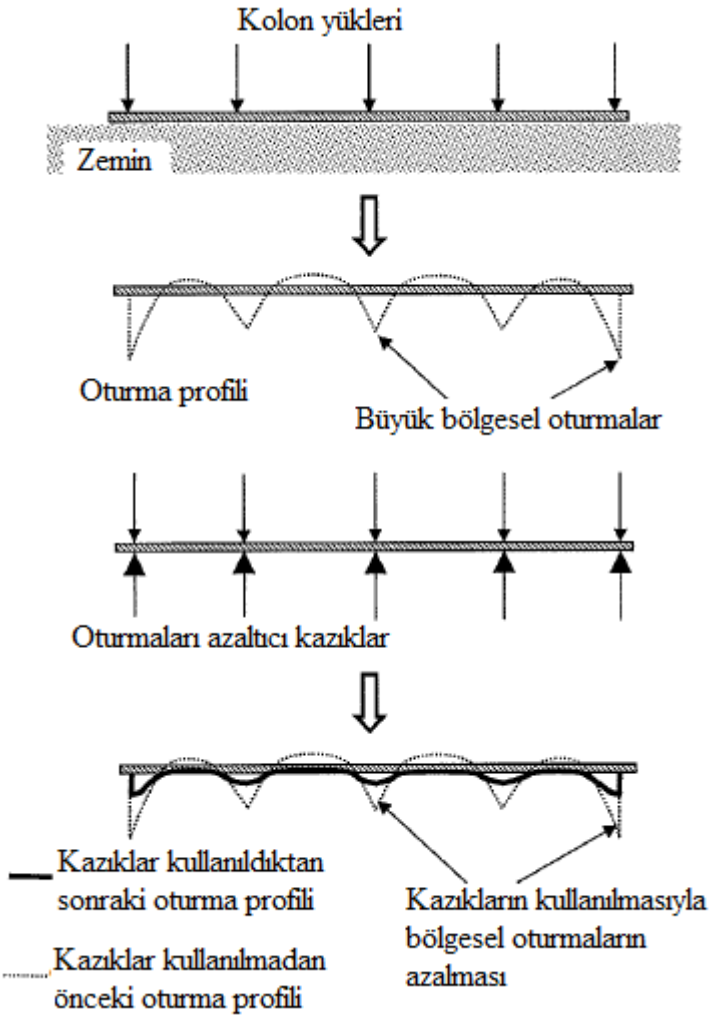
Şekil 2.2.20. Kazık grubunun oturması hesaplanırken kabul edilen gerilme dağılışı (Terzaghi ve Peck, 1967)

2.3. Kazıklı Radye Sistemi

Kazıklı temel tasarımının yapıldığı birçok projede kazık grubu radye temel ile birbirine bağlanır. Klasik yöntemlerde kazıklı temel hesabı yapı yükünün tamamının kazık grubu tarafından taşındığı kabulüne göre yapılır. Bununla beraber, bazen radye temelin altında yumuşak kil veya gevşek kum olması durumlarında radye temel ile zemin arasında temas kaybolabilir. Bu durumda da yapı yükü kazık grubu tarafından taşınır. Fakat kazık başlığının (radye temelin) zemine temas ettiği durumlarda, yapı yükü radye temel ve kazık grubu arasında paylaşılarak zemine aktarılır. Kazık grubu ve radye temelin birleşmesi ile oluşan sisteme kazıklı radye sistemi denir. Kazıklı radye sisteminin temel zemininin taşıma gücünü artırması yanında maksimum ve farklı oturmaları azaltıcı etkisi vardır (Şekil 2.3.1 ve Şekil 2.3.2).



Şekil 2.3.1. Kazıklı radye sisteminde oturmaların azalması



Şekil 2.3.2. Kazıklı radye sisteminde bölgesel oturmaların azalması (Tan ve Chow, 2004)

Kazıklı radye sisteminin zeminle sağlıklı bir etkileşime girebilmesi için imalat aşamasında bazı durumlara dikkat edilmelidir. Bunun için önce yüzeydeki zemin 1-2 m sıyrılır. Daha sonra temizlenmiş yüzeye 0.5-0.7 m arasında kum-çakıl karışımı serilerek sıkıştırılır. Bu aşamadan sonra kazıklar çakılır ve kazık başlarında gerekli filizler bırakılır. Sıkıştırılan tabaka üzerine ise 0.15-0.20 m kalınlığında tesviye betonu dökülür. En sonunda radye temel bu betonun üzerine dökülür. Kazık başlarının üst kotu, radyeye bağlanacağı kot göz önüne alınarak belirlenmesi gerekir (Birand, 2007).

Bazen kazık grubu ve radye temel ayrık olarak da tasarlanabilir. Böyle tasarımlarda kazık grubu ve radye temel arasına dolgu tabakası yerleştirilir ve kazık grubu hem taşıma gücünü artırıcı hem de oturmaları azaltıcı görevini yerine getirebilir. Fakat bu tür bir sistemin yanal kuvvetlere karşı direnci azdır ve deprem sırasında çok etkili davranış gösteremezler.

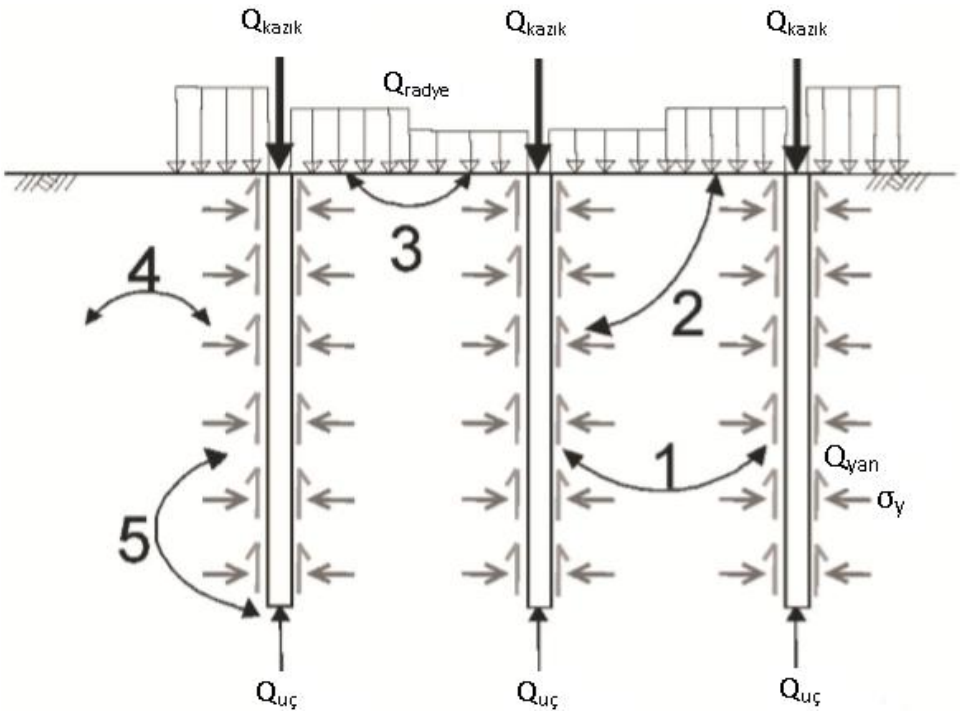
Kazıklı radye sistemi, diğer temel sistemleri için de geçerli olan bazı koşulları sağlaması gerekir. Bu koşullar kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- Radye temelin yük kapasitesi taşıma gücü bakımından düşey, yatay ve moment yüklerine karşı yeterli olmalıdır.
- Maksimum oturma ve farklı oturma koşulunu sağlamalıdır.
- Radye temel eğilme momentleri ve kesme kuvvetlerine güvenli bir şekilde karşı koymalıdır.
- Kazıklar eksenel, yatay ve moment yüklerini güvenli bir şekilde taşımalıdır.

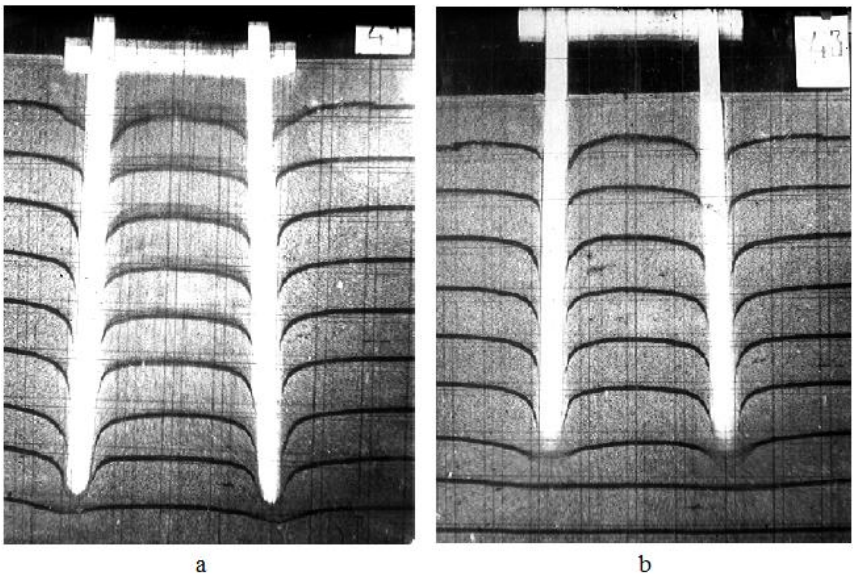
Kazıklı radye sisteminin davranışı, kazık-zemin-radye temel arasındaki etkileşimlerden etkilenir. Sistem elemanlarının birbirini ne kadar etkilediği bu elemanlar arasındaki etkileşim faktörleri ile anlaşılır. Sistemdeki etkileşimler en genel haliyle Şekil 2.3.3'de verilmiştir.

Kazıklı radye sisteminin yük-oturma davranışı ise Şekil 2.3.4 ve Şekil 2.3.5'de gösterildiği gibidir. Kazıklı radye sistemi yüklendiğinde, kazık grubu ve radye temel aynı miktarda oturma yapar ve kazık grubu doğrudan radye tarafından yüklenir. İki sistem arasındaki yük paylaşım mekanizması ise kazık ve zemin arasındaki göreceli rijitliğe bağlıdır. İlk yükleme anında; kazıklar, etrafındaki zemine göre daha rijittir ve yükün büyük bir kısmı kazıklar mobilize olana kadar kazık grubu tarafından taşınır. Bu aşamada uygulanan yükün büyük bir kısmı daha derindeki zemine aktarılarak temeldeki oturmalar azaltılmış olur. Kazıklar sınır taşıma gücüne ulaştığında ise yükün kalan

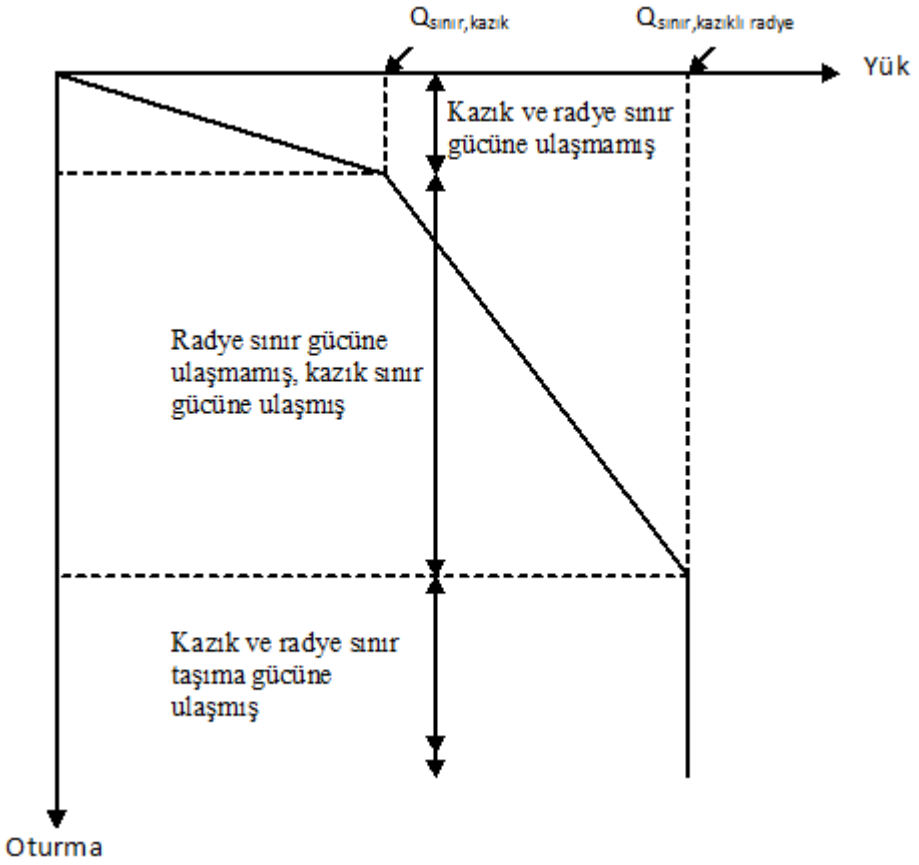
kısmı temel zemini tarafından taşınır. Ayrıca, kazıklı radye sistemi yüklendiğinde radye temel tarafından zemine aktarılan gerilmeler düşey ve yatay efektif gerilmeleri artırarak kazıklara etkiyen çevre sürtünmesi direncinin artmasına neden olur.



Şekil 2.3.3. Kazıklı radye sistemindeki etkileşimler: 1) Kazık-kazık etkileşimi, 2) Kazık-radye etkileşimi, 3) Radye-radye etkileşimi, 4) Kazık-zemin etkileşimi, 5) Kazık uç direnci-çevre sürtünmesi direnci etkileşimi (Katzenbach ve ark., 2005)



Şekil 2.3.4. (a) Kazıklı radye sisteminde ve (b) kazık gruplarında kazık çevresindeki zeminin oturması (Bakholdin, 2003)



Şekil 2.3.5. Kazıklı radye sisteminin yük-oturma davranışı (Poulos, 2001)

Kazıklı radye sisteminde sistemin davranışı radye temelin esnek veya rijit olmasına göre de değişir. Eğer radye temel rijit ise temel zemini ve kazık grubu aynı miktarlarda oturur. Fakat radye temel esnek ise temelde farklı oturmalar görülür. Bundan dolayı kazık grubunda da farklı oturmalar olur ve radye-kazık-zemin etkileşimleri daha da karmaşık bir hal alır. Radye temelin rijit olup olmadığı aşağıda belirtilen radye-zemin rijitlik oranına göre belirlenebilir. Bu oran ne kadar yüksek ise radye temel o kadar rijittir.

$$k_{rs} = 5.57\left(\frac{E_r}{E_s}\right)\left(\frac{1-\upsilon_s^2}{1-\upsilon_r^2}\right)\left(\frac{t_r}{B}\right)^3 \qquad (73)$$

burada;

k_{rs} = radye-zemin rijitlik oranı

E_r, E_s = radye ve zeminin elastisite modülü

υ_r, υ_s = radye ve zeminin Poisson oranı

t_r = radye kalınlığı

B = temel genişliği

Kazıklı radye hesabında kullanılan yöntemleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

1. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri,
2. Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri,
3. İleri sayısal analiz yöntemleri,

2.3.1. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri

Altay Birand (2007)'ın "Kazıklı Temeller" kitabında açıklanan ve doğruluğu tecrübelerle kanıtlanan yaklaşık bir yöntem aşağıda kısaca açıklanmıştır. Bu yöntemde; kazık grubu ve radye temelin taşıdığı yük miktarları, kazıkların ve radye temelin rijitliğine (yay katsayısı, yatak katsayısı) bağlı olarak paylaşıldığı kabul edilir. Yatak katsayısı (yay katsayısı), P yük ve ΔH oturma olmak üzere;

$$k = \frac{P}{\Delta H} \tag{74}$$

şeklinde ifade edilecek olursa; kazıklı temelin oturması kazıklı temel-zemin için bir yay katsayısı (k_k), radye temelin oturması ise radye-zemin için bir yay katsayısı (k_r) kullanılarak yazılabilir. Ayrıca; kazıklı radye sisteminde, kazık çevresindeki gerilme nedeniyle radye temelde bir ek oturma, radye tabanındaki gerilme nedeniyle de kazıkta ilave bir oturma olacaktır. Bu ek oturma miktarları ise sırasıyla bu iki yapı elemanı arasındaki α_{rk} ve α_{kr} etkileşim faktörleri kullanılarak ifade edilebilir. Bu ilişkilerin sonucu olarak, P_k toplam yükten kazığın taşıdığı yük olmak üzere kazığın kendi yükü altındaki oturması P_k/k_k, P_r radyenin taşıdığı yük olmak üzere kazığın radyenin etkisiyle oturması ise $\alpha_{kr}\ P_r/\ k_r$ olarak ifade edilebilir. Bu iki bileşenin toplamı kazığın toplam oturmasını verecektir. Aynı mantık radye temelin oturması için kullanılarak ikinci bir denklem yazılabilir ve kazıklı radye sisteminin etkileşimi bu iki denklemin beraber kullanılmasıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\begin{Bmatrix} \Delta H_k \\ \Delta H_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k_k & \alpha_{kr}/k_r \\ \alpha_{rk}/k_k & 1/k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_k \\ P_r \end{Bmatrix} \tag{75}$$

burada;

ΔH_k = sadece kazıklı temelin oturması

ΔH_r = sadece radye temelin oturması

k_k, k_r = kazıklı temelin ve radyenin yay (rijitlik) katsayıları

α_{rk}, α_{kr} = kazık-radye etkileşim faktörleri

P_k = toplam yükten kazığın aldığı yük

P_r = toplam yükten radyenin aldığı yük

Kazıklı radye sistemi yüklendiğinde yükler bilinmektedir fakat oturma değerleri ile bu oturma miktarlarındaki etkileşim faktörleri bilinmemektedir. Yukarıdaki denklemde ters diagonal üzerindeki ifadelerin eşitliğinden etkileşim faktörleri arasında şu ilişki vardır:

$$\alpha_{kr} = \alpha_{rk} \frac{k_r}{k_k} \tag{76}$$

Etkileşim faktörleri ise kazığın yüklenmesi sonucu, tek bir kazıkta ve kazık etrafındaki zeminde meydana gelen oturmayı veren aşağıdaki bağıntı ile bulunabilir:

$$\Delta H = \Delta H_0 \left(1 - \frac{\ln \frac{r}{D}}{\ln \frac{r_m}{D}}\right) \tag{77}$$

burada;

ΔH = oturma

ΔH_0 = kazık-zemin yüzeyindeki oturma

r = kazık ekseninden olan uzaklık (etkileşim uzaklığı)

D = kazık çapı

r_m = kazığın etkili olabileceği ve eksenden olan maksimum mesafe

Yukarıdaki bağıntı kazıklı radye sistemi için genellenecek olursa; kazık için alınacak olan etkileşim uzaklığı r, her bir kazığa radye alanından isabet eden alanın yarıçapı r_c'dir:

$$r_c = \sqrt{\frac{A}{n\pi}} \tag{78}$$

burada;

A = radye temelin alanı

n = kazık sayısı

Yukarıdaki bağıntılar irdelendiğine etkileşim faktörleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\alpha_{pr} = 1 - \frac{\ln \frac{r_c}{D}}{\ln \frac{r_m}{D}} \tag{79}$$

Kazığın etkili olabileceği maksimum mesafe ise bazı kabuller yapılarak en sade şekilde aşağıdaki ifade ile bulunabilir.

$$\ln \frac{r_m}{D} = \ln \frac{2.5(1-\upsilon_s)L}{D} \tag{80}$$

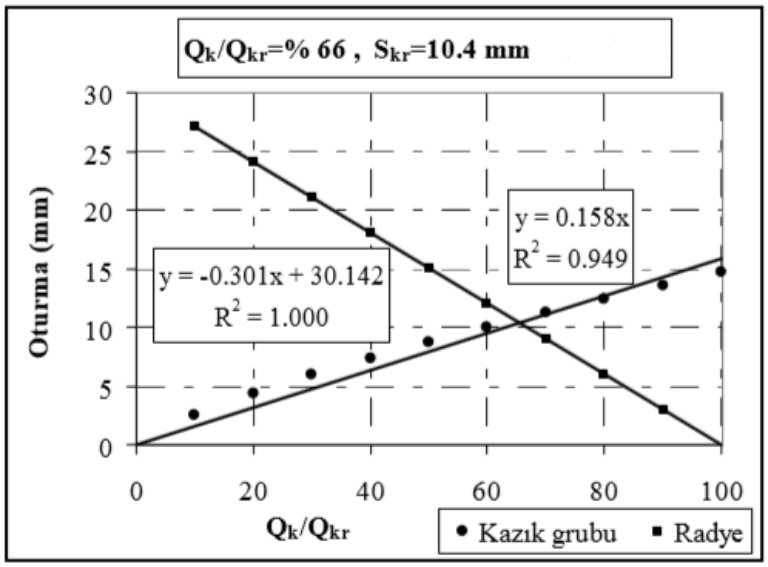
Kazık grubunun ve radye temelin aynı miktarda oturma yapacağı düşüncesiyle ($\Delta H_k = \Delta H_r$) ve (75) numaralı eşitlik (74) numaralı ifadede yerine yazılırsa kazıklı radye sistemi için yay katsayısı k_{kr} ve sistemde kazık grubu ile radye temel arasındaki yük dağılımları aşağıdaki şekillerde ifade edilir:

$$k_{kr} = \frac{k_k + (1-\alpha_{kr})k_r}{1-\alpha_{rk}^2 \frac{k_r}{k_k}} \tag{81}$$

$$\frac{P_r}{P_r + P_k} = \frac{(1-\alpha_{rk})k_r}{k_k + (1-\alpha_{kr})k_r} \tag{82}$$

Gök ve Toğrol (2009) ise basitleştirilmiş radye hesabı için farklı bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde; yapı yükünün radye ve kazık grubu tarafından paylaşılarak taşınacağı kabul edilerek, yük paylaşım oranına göre radyenin ve kazık grubunun oturmaları hesaplanmaktadır. İlk olarak, radye tek başına düşünülür ($Q_{kazık}/Q_{toplam}=0$) ve tasarım yükü altında ne kadar oturacağı hesaplanır. Bundan sonra, yükün tamamının kazıklar tarafından taşındığı kabul edilerek ($Q_{kazık}/Q_{toplam}=1$) kazık grubunun ne kadar

oturacağı hesaplanır. Daha sonra, yükün farklı oranlarda radye temel ve kazık grubu tarafından taşınması hallerinde, radyenin ve kazık grubunun oturması ayrı ayrı hesaplanır. Çeşitli $Q_{kazık}/Q_{toplam}$ oranları için elde edilen oturmalar karşılaştırılarak, radye temelin ve kazık grubunun oturmalarının eşit olduğu paylaşım oranı belirlenir. Bu oturma miktarında her iki sistem beraber çalışacaktır. Kazık grubunun oturma hesabında kısım 1.2.4'de anlatılan eşdeğer radye yöntemi kullanılabilir. Radye temele ve eşdeğer radyeye gelen gerilmeler belirlendikten sonra her iki sistemin oturmaları hesaplanır. Son olarak yük paylaşım oranı-oturma grafiği çizilerek kazıklı radye sisteminde kazık grubu ve radye temelin yük paylaşım oranları belirlenir (Şekil 2.3.6).

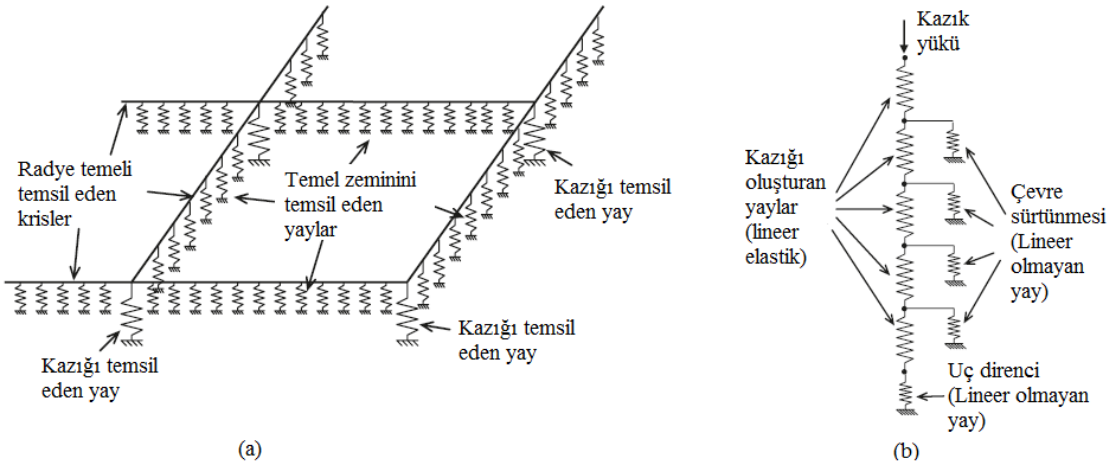


Şekil 2.3.6. Basitleştirilmiş kazıklı radye hesabında yük paylaşım oranları (Gök ve Toğrol, 2009)

2.3.2. Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri

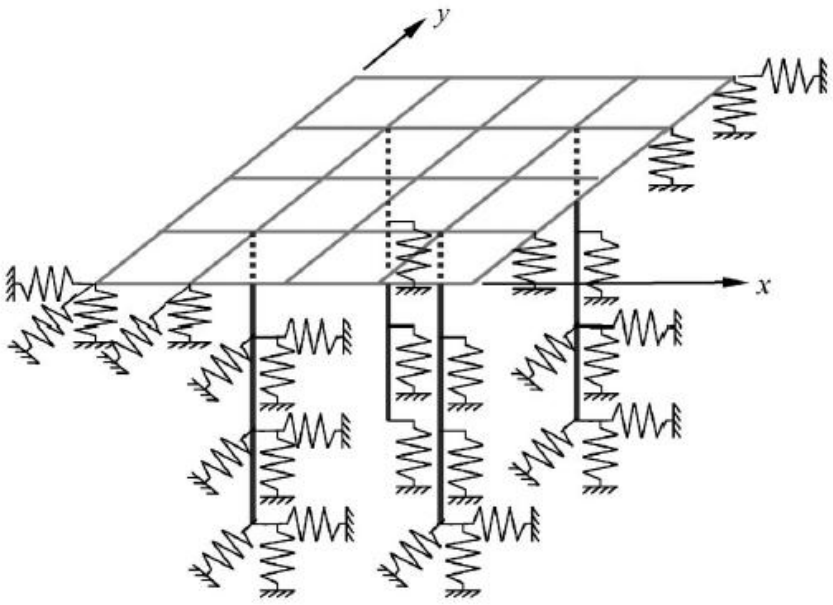
Yaylar üstünde şerit yaklaşımı: Poulos (1994) tarafından geliştirilmiştir ve elastik teoriye dayanmaktadır. Bu yöntem kullanılarak radye temeldeki, kazık grubundaki ve kazıklı radye sistemindeki oturmalar hesaplanabilir. Bu yöntemde; radye temel kriş olarak, temel zemini kirişlere bağlı yaylarla ve kazıklar ise krişlerin birleşim yerlerindeki yaylarla temsil edilir (Şekil 2.3.7-a). Bu yöntemde yaylar arasındaki etkileşim (kazık-kazık etkileşimi) ihmal edilmektedir. Ayrıca, kazıkların yük-oturma davranışını anlayabilmek için kazıklar ve çevresindeki zemin de yaylarla temsil edilir. Kazıklar bir dizi lineer elastik yay ile modellenirken, kazık ucundaki ve çevresindeki zemin lineer olmayan yaylarla tanımlanır (Şekil 2.3.7-b). Poulos, bu yöntemin

kullanılabilmesi için GARP (Geotechnical Analysis of Raft with Piles) yazılımını geliştirmiştir. Bu program; elastik teoriye bağlı olarak zeminle alakalı birçok parametreye ihtiyaç duyduğu için, zeminin gerçekçi bir şekilde modellenmesi kazıklı radye sistemindeki etkileşimleri doğru belirleyebilmek için önemlidir.



Şekil 2.3.7. (a) Kazıklı radye sisteminin kiriş ve yaylarla modellenmesi, (b) Kazıkların ve çevresindeki zeminin yaylarla modellenmesi

Yaylar üstünde plak yaklaşımı: Bu yöntemde ise radye temel plak ile kazıklar yaylar ile temsil edilir (Clancy ve Randolph, 1993; Poulos, 1994; Viggiani, 1998; Anagnastopoulos ve Georgiaids, 1998).



Şekil 2.3.8. Yaylar üstünde plak yaklaşımı

2.3.3. İleri sayısal analiz yöntemleri

Sınır eleman yöntemi: Bu yöntemi kullanarak yapılan analiz ve çalışmalarda hem radye temel hem de kazıklar parçalara bölünmekte, ayrıca tüm zemin–temel ara yüzeyleri de elemanlara ayrılmaktadır. Zemin içindeki hareketlerin çözümü için genellikle Mindlin (1936) fonksiyonu kullanılmaktadır. Temel elemanlarının davranışı ise sonlu eleman veya sonlu farklar gibi yöntemlerle çözülür (Randolph, 1994). Temel ve zemin elemanlarının yer değiştirmelerinin eşitliği ve düşey denge denkleminin yazılmasıyla aranan gerilme ve yer değiştirme değerleri elde edilir. Mindlin fonksiyonu homojen doğrusal elastik ortamlar için geçerli olduğundan, doğrusal olmayan davranış, kazık boyunca yük aktarım fonksiyonları kullanılarak dikkate alınabilir (Griffiths ve ark., 1991).

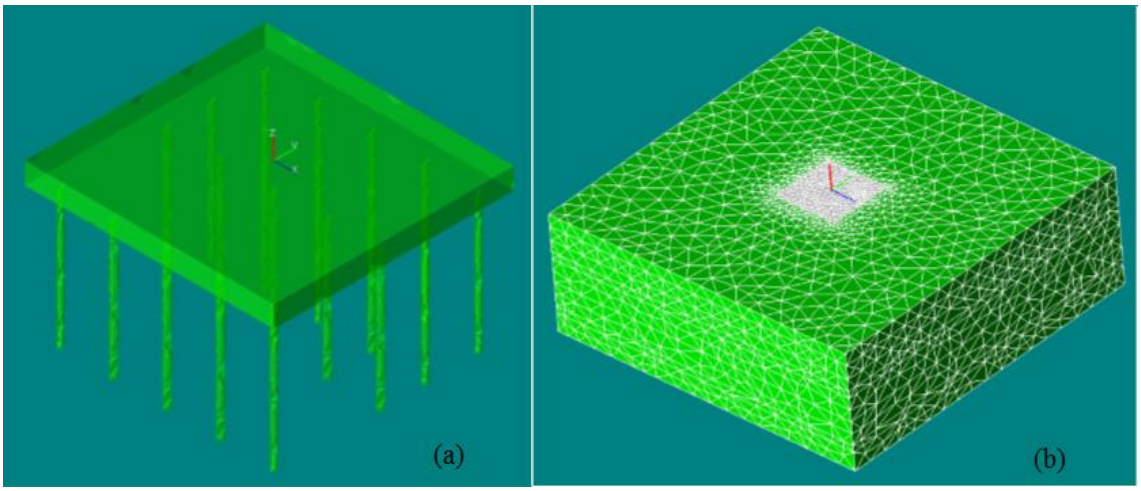
Basitleştirilmiş sonlu eleman yöntemleri: 3 boyutlu sonlu eleman analizlerinin kullanımı bilgisayar kapasitelerinin istenilen düzeyde olmaması ve bunun beraberinde gelen zaman sorunu nedeniyle kısıtlı halde kalmaktadır. Bu nedenle bazı sadeleştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu grupta, kazıklı radyeyi düzlem deformasyon problemi (Desai ve diğ., 1974; Prakoso ve Kulhawy, 2001) veya eksenel simetrik problem (Hooper, 1973; Pressley ve Poulos, 1986) olarak ele alan yöntemler yer alır. Her iki durumda da, temel ve zemin sonlu elemanlarla temsil edildiğinden, doğrusal olmayan davranış dikkate alınabilmektedir. İki fazlı zemin yapısı analize dahil edildiğinden, konsolidasyon sebebiyle kazıklar arası yük dağılımının değişimini ve oturmaları elde etmek mümkündür (Gök, 2007).

Sonlu farklar yöntemi: Bu yöntemde zeminin dış yüzeyleri ve eğimli alanlar modellenememektedir. Zemin elemanları yaylarla veya hiperbolik davranış gösteren elemanlar ile modellenebilir. Bu modelde zemin davranışı Mohr-Coulomb göçme durumuna göre tanımlanmıştır.

Birleşik yöntemler: Sınır eleman yöntemi ve sonlu eleman yönteminin bir arada kullanıldığı yöntemlerdir. Hain ve Lee (1978), etkileşim faktörlerini kullanarak radye temeli ince plak sonlu elemanlarla, kazık-zemin ortamını ise sınır elemanlar yardımıyla modellemişlerdir. Ayrıca Clancy ve Randolp (1993), Franke vd. (1994) ve Ta ve Small (1996) yine bu metotları birleştirerek çalışmalar yapmışlardır.

Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi: Son yıllarda yazılım ve bilgisayar teknolojisinde görülen gelişmelere paralel olarak 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile kazıklı radye temellerin tasarım ve analizleri kullanılmaya başlanılmıştır. Bu yöntemler

genellikle en uygun çözümleri vermesine rağmen, bilgisayar kapasitelerinin sınırlı olması ve zaman sorunu nedeniyle istenilen düzeyde kullanılmamaktadır. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu farklar yönteminin kullanılabildiği PLAXİS 3D, FLAC 3D, ABAQUS yazılımları bu yöntem için geliştirilmiştir.



Şekil 2.3.9. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle (a) kazıklı radye sisteminin ve (b) kazıklı radye ve zeminin modellenmesi

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

3.1. Kazık Grubu

Lee ve Chung (2005) kumlu zemin içerisinde yaptıkları model deneylerde, kazık gruplarında kazık-zemin-kazık arasındaki etkileşimleri belirlemeyi amaçlamışlardır. Bunun için kazıkları hem tekil olarak hem de grup halinde yükleyerek kazıkların yük-oturma davranışını incelemişlerdir. Bununla birlikte kazıklardaki yük transfer mekanizmasını ve kazık başlığının bu mekanizmaya olan etkisini de araştırmışlardır. Deneyler 1m x 1.4m x 2.5m boyutlarındaki tankın içerisine üniform kum (Gs=2.66, D_r=%69-72, Ø=35°) yerleştirilerek 1mm/dk yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. 32 mm çapında ve 600 mm boyundaki alüminyum kazıklar, 3x3 kazık yerleşim planında 2D, 3D, 4D ve 5D kazık aralıklarında yerleştirilerek yükleme deneyleri yapılmıştır. Kazık başlığı olarak ise rijit bir çelik plaka (BxLxt=365mmx365mmx20mm) kullanılmıştır. Araştırmalar sonucunda kazık çapının %10 değerine karşılık gelen oturma miktarındaki yükün kazık grubunun sınır taşıma gücünü verdiği görülmüştür. Ayrıca, kazık grubunun taşıma gücü kazıklar arası mesafe arttıkça artmıştır. Kazık başlığı yapıldığında ise kazıklara etkiyen yanal sürtünme direnci kazıklar arası mesafe 2D ve 3D iken artmış, 4D ve 5D iken azalmıştır.

Ismael (2001) arazide imal edilmiş betonarme kazık grupları üzerinde bazı yükleme deneyleri yaparak kazıklar arasındaki grup etkisini araştırmıştır. Arazide bulunan zemin orta sıkılıktaki az çimentolanmış siltli kumdan (c=20 kPa, Ø=35°) oluşmaktadır. 0.1 m çapında ve 2.25 m boyundaki tekil kazıklar üzerinde yükleme testi, 20 cm çapında ve 2.65 m uzunluğundaki kazıklar üzerinde ise çekme testi yapılmıştır. Ayrıca 10 cm çapında ve 2.25 m boyundaki 5 adet kazık 2D ve 3D kazık aralıklarında yüklenmiştir. Çekme testine maruz kalan tekil kazıklar ortalama 91 kPa çevre sürtünmesi değerinde kadar direnç gösterebilmiştir. Yükleme testinin yapıldığı tekil kazıklarda ise sınır taşıma gücünün %70'i çevre sürtünmesi, %30'u ise uç direnci tarafından taşınmıştır. Kazıklar imal edilirken içerisine belirli aralıklarla yerleştirilen gerinim ölçerler yardımıyla da çekme ve yükleme deneylerinde kazık boyunca eksenel yük dağılımının doğrusal olduğu gözlenmiştir. Kazık grubu deneylerinde ise 2D kazık aralığında grup verimi 1.22, 3D kazık aralığındaki yerleşimde ise 1.93 bulunmuştur. Bu artışın sebebi kazık aralığı arttıkça çevre sürtünmesi direncinin artmasından dolayıdır. Ayrıca yazar, kumlu zeminlerde imal edilen yerinde dökme betonarme kazıklarda grup

veriminin 1'den büyük çıkmasının beklendiğini belirtmiştir. Gevşek kumlu zeminlerde veya yer altı su seviyesinin yüksek olduğu durumlarda ise grup veriminin 1'den küçük çıkabileceğini belirtmiştir.

Al-Mhaıdıb (2006) kumlu zemin içerisine yerleştirilen kazık gruplarının davranışını farklı yükleme hızları altında incelemiştir. 25 mm çapında ve 500 mm boyundaki çelik kazıklar kullanılarak beş farklı kazık yerleşim palanında (2x1, 3x1, 2x2, 2x3, 3x3) ve kazık aralıkları 3D, 6D ve 9D seçilerek deneyler yürütülmüştür. Yükleme hızları ise 1, 0.5, 0.1 ve 0.05 mm/dk olarak seçilmiştir. Deneylerde kullanılan kumun özellikleri şu şekildedir: SP, D_r=%65, Gs=2.68, e_{max}=0.74, e_{min}=0.49, d_{10}=0.26 mm, C_u=2.08, C_c=0.92. Deneyler sonucunda yükleme hızı artırıldığında kazıkların sınır taşıma gücünün arttığı belirlenmiştir.

Li ve ark. (2012) tekil kazıkların ve kazık gruplarının davranışını tekrarlı yükler altında incelemişlerdir. Çünkü açık denizlerde rüzgâr ve dalga kuvvetlerine maruz kalan veya ulaştırma yapılarının altında trafik yüküne maruz kalan kazıklarda, tekrarlı yüklerden dolayı meydana gelen ani oturmalar kazıkların servis yükünü azaltabilir. Deneylerde 12.7 mm çapında ve 200 mm boyunda çelik model kazıklar kullanılmıştır. Kazık grubu deneylerinde ise 2x2 kazık yerleşiminde ve 4D kazık aralığında yerleştirilen kazıklar tekrarlı yüklere maruz bırakılmıştır. Deneylerde %83 sıkılıktaki silika kum kullanılmıştır. Ayrıca tekrarlı yükleme hızı 0.1 mm/sn olarak seçilmiştir.

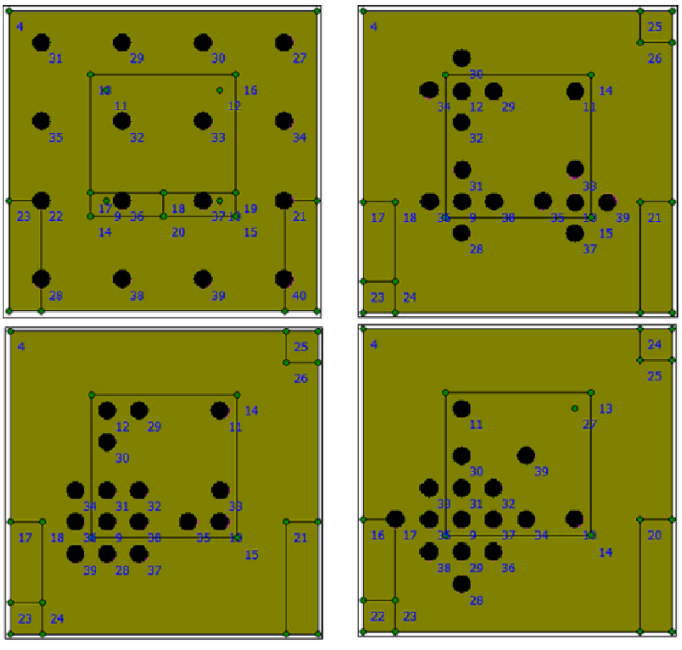
Zhang ve Wong (2007) büyük çapta imal edilmiş fore kazıklardan oluşan kazık gruplarında bazı kusurların bulunması durumunu incelemiştir. Gerçekte 2 m çapında ve 15 m uzunluğunda olan kazıklar santrifuj modelleme ile daha küçük ölçekte kazıklar kullanılarak deneyler yürütülmüştür. Tekil kazıklar ve kazık grubu (2x2) sağlam tabaka (γ=23.5 kN/m^3, q_u=26 MPa) üzerine yerleştirilmiştir. Bu tabaka üzerinde 15 m kalınlığında suya doygun bir zemin (γ_k=23.5 kN/m^3, e=0.53, Ø=38.7°) bulunmaktadır. Kazıkların bir kısmı imal edilirken arazideki kusurları temsil etmesi bakımından daha kısa imal edilmiştir. Ayrıca kazıkların içerisine eksenel yük ve moment değerlerini ölçebilmek için gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Tekil kazıklarda ve kazık gruplarında kısa kazıkların kullanılması kazık taşıma gücünü %15-65 azaltmıştır.

Xu ve Zhang (2007) arazide yapılan ve çakma kazıklardan oluşan kazık grubuna ait 31 adet yükleme deneyinin sonuçlarını paylaşmışlardır. Bu deneyler kumlu zeminlerde yapılmıştır ve kazık grubunun verimi ile kazık grubunun oturma oranı 1'den büyük bulunmuştur.

3.2. Kazıklı Radye Sistemi

3.2.1. Deneysel çalışmalar

Nguyen ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada kolon yüklerinin olduğu bölgelerde kazık sayısını artırarak radye temeldeki maksimum ve farklı oturmaların nasıl değiştiğini incelemişlerdir (Şekil 3.2.1). Bunun için; kazık boyu, kazık çapı, temel kalınlığı ve yükleme koşullarının değişken olduğu parametrik bir çalışmayı hem Plaxis 3D yazılımı ile hem de santrifuj deney ile modellemişlerdir. Santrifuj deneyinde gevşek silika kum kullanılmıştır (D_r=%40, Ø=40°, γ_k=1.37 t/m^3). Bu deneylerde iki farklı model kullanılmıştır: Birincisinde kazık grubu radye temel altına üniform yerleştirilmiştir. İkincisinde ise eksantrisitenin ve kolon yüklerinin olduğu bölgelerde kazıklar sıklaştırılarak yerleştirilmiştir. İkinci modelde oturmalar %30, temeldeki eğilme momentleri ise %50 daha az olmuştur. Plaxis 3D modelinde kullanılan kumun özellikleri ise şöyledir: Ø=40°, υ=0.25, m=0.65 ve ψ=8°. Plaxis 3D analizinde de kolon yüklerinin olduğu bölgelerde kazık sayısının artırılması oturmaları azaltmıştır. Ayrıca radye temelin esnek olması temele etkiyen eğilme momentlerini azaltmaktadır. Bununla birlikte kazık boyunun artması oturma miktarını ve temele etkiyen momentleri azaltmaktadır, fakat kazık boyunun belirli bir değerden sonra artmasının oturma miktarı üzerinde etkisi yoktur.



Şekil 3.2.1. Kazıkların kolon yükleri dikkate alınarak yerleştirilmesi (Nguyen ve ark., 2013)

Nguyen ve ark. (2013) geliştirdikleri modelde kazıklı radye sisteminde kazık-zemin-radye arasındaki etkileşimlerin sistemin oturmasına ve temele etkiyen moment değerlerine olan etkisini incelemişler, buldukları sonuçları santrifüj deney sonuçları ve Plaxis 3D model sonuçları ile kıyaslamışlardır. Kazıklı radye sisteminde iki tür etkileşim vardır. Bunlar: kazık-zemin-kazık etkileşimi ve kazık-zemin-radye etkileşimi. Kazık-zemin-kazık arasındaki etkileşim faktörü kazıklar arasındaki mesafeye, zemin cinsine, zemin sıkılığına, kazık boyuna ve kazık çapına bağlı olarak değişmektedir. Etkileşim faktörlerinin nasıl değiştiğini belirlemek için Plaxis 3D yazılımı ile farklı sıkılıklardaki silika kum zeminde farklı boy ve çaptaki kazıklar kullanılarak birçok analiz yapılmıştır. Ayrıca, yazarlar geliştirdikleri modeli doğrulamak için santrifüj model deneyler yapmışlardır. Deneylerde sistemin yük-oturma davranışı, radye temele etkiyen eğilme momentleri ve kazıklara gelen eksenel yükler incelenmiştir. Yazarların geliştirdiği model Plaxis 3D ve santrifüj deney ile yakın sonuçlar vermiştir.

Nguyen ve ark. (2013) yaptıkları diğer bir çalışmada kazıklı radye sisteminde toplam ve farklı oturmaları azaltmak için kazık grubunun yerleşim planının en uygun olacağı durumu araştırmışlardır. Bunun için üç farklı tasarım hazırlamışlardır. Bunlardan ikisinde radye temeli esnek olarak diğerinde ise rijit olarak modellemişlerdir. Bu sistemlerde kazık grubu hem üniform hem de kolon yüklerinin olduğu bölgelerde sıklaştırılarak yerleştirilmiştir. Tasarımlar hem santrifüj deneyleri ile hem de Plaxis 3D yazılımı ile modellemiştir. Deneylerde silika kum (kötü derecelenmiş, D_{50}=0.22mm, C_u=1.96, D_r=%40, Ø=40°, E_s=8.47x10^3 MPa, υ=0.25) kullanılmıştır. Rijit radyenin kalınlığı 25 mm, esnek radyenin kalınlığı ise 8 mm olarak seçilmiştir (E_r=2.82x10^7 MPa). Model kazıkların ise çapı 12 mm ve uzunluğu 250 mm olarak seçilmiştir. Üniform kazık yerleşimine göre kolon yüklerinin olduğu bölgelerde sıklaştırılarak yerleştirilen kazık grubunda toplam ve farklı oturmalar %30-40 oranında azalmıştır. Ayrıca bu yerleşim planında temele etkiyen eğilme momentleri azalırken, temelde oluşacak maksimum eğilme momenti sınırlandırılmıştır.

M. Sawwaf (2010) kumlu zeminlerde, eksantrik yüklü radye temel ile bağlantılı ve bağlantısız olmak üzere kısa kazıklar kullanarak sistemlerin mekanik davranışını ve göçme mekanizmasını incelemiştir. Deney tankı 0.4mx0.9mx0.5m boyutlarında olup radye temel (BxLxH=200mmx398mmx10mm) çelik plakadan, kazıklar (D=12mm, L=60mm-120mm-180mm, E=0.207x10^6 MPa) ise çelik tüpten imal edilmiştir. Deneylerde yıkanmış orta kaba kum (G_s=2.65, e_{max}=0.59, e_{min}=0.31, d_{10}=0.15mm, C_u=4.07, C_c=0.77) kullanılmıştır. Deney kumu gevşek (D_r=%35), orta sıkı (D_r=%55) ve

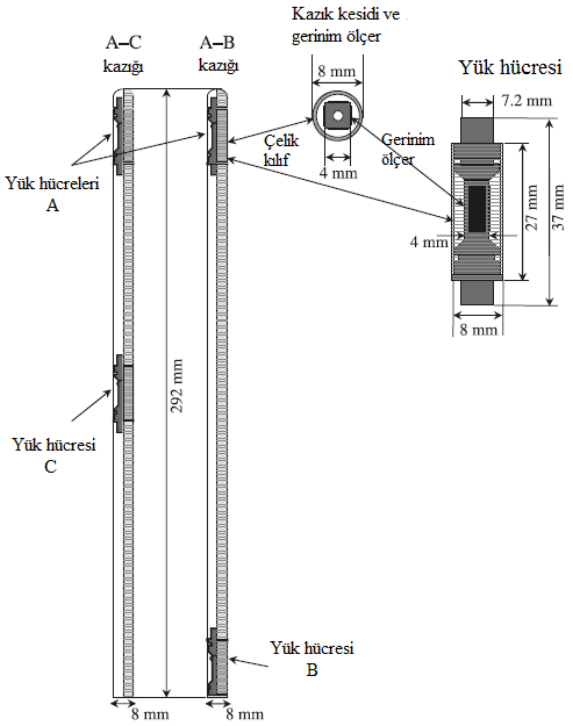
sıkı (D_r=%80) olacak şekilde üç farklı sıkılıkta sıkıştırılmıştır. Her sıkılıktaki zemin için kesme kutusu ve drenajlı üç eksenli deneyler yapılmış bu deneyler sonucunda zeminlerin içsel sürtünme açısı sırasıyla 34°, 37.5°, 43° ve elastisite modülü sırasıyla 15000, 30000, 40000 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Yükleme deneyleri üç farklı sıkılıktaki zemin için e/B=0.05, 0.1, 0.15 olacak şekilde üç farklı eksantre değerinde ve L/D=5, 10, 15 olacak şekilde farklı boylardaki kazıklar kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda, kazıklı radye sisteminin bağlantısız kazıkların kullanıldığı sisteme göre daha fazla yük taşıdığı ve daha az oturma yaptığı görülmüştür. Zemin sıkılığı arttıkça radye temelin performansının arttığı ve zeminin sıkılığı değiştikçe göçme mekanizmasının da değiştiği görülmüştür. Ayrıca, oturmalar az iken radye temel yüksek oranda yük alırken oturmalar arttıkça yükün büyük bir kısmının kazıklar tarafından taşındığı belirlenmiştir.

Matsumoto ve ark. (2010) kuru kumlu bir zeminde modelledikleri kazıklı radye sistemini düşey ve tekrarlı yatay yüklerle yüklemiş, kazık ucunun radye temele bağlanma şeklinin radyenin dönmesine, kazık-zemin-radye arasındaki yük paylaşımına ve radye temelde oluşacak eğilme momentlerine olan etkisi deneysel ve analitik yöntemlerle araştırılmıştır. Bu çalışma özellikle deprem sırasında yanal yüklere maruz kalmış kazıklı radye sisteminin davranışını incelemek için yapılmıştır. Deney kumunun özellikleri: γ_s=26.37 kN/m^3, D_{50}=0.17 mm ve Ø=35°. Radye temel 400mmx400mmx40mm boyutlarında ve çelik levhadan olup, kazıklar ise (D=40mm, L=600mm, s=200mm, E=7x107 kPa, υ=0.3) alüminyum borudan imal edilmiştir. Yükleme esnasında radye temele gelen yanal yük, yatay ve düşey deplasman ile kazıklara gelen eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme momenti ölçüldü. Kazık başlığının rijit veya mafsallı olması düşey yük dağılımında çok fazla etkili olmamıştır. Radye temelin aldığı yük toplam yükün %28-49 arasında olmuştur. Yanal yüklemede ise yanal yük arttıkça radye temelin aldığı yük %80'den %20'ye düşmüştür. Yükleme başladığında yükün çoğunu radye temel alırken yanal yük arttıkça yükün çoğunu kazık grubu taşımaktadır. Kazıklara gelen eksenel yük radye temelden bağımsız kazık grubunda kazık boyunca azalırken, kazıklı radye sisteminde belli bir mesafeye kadar sabit kalmış daha sonra azalmaya başlamıştır.

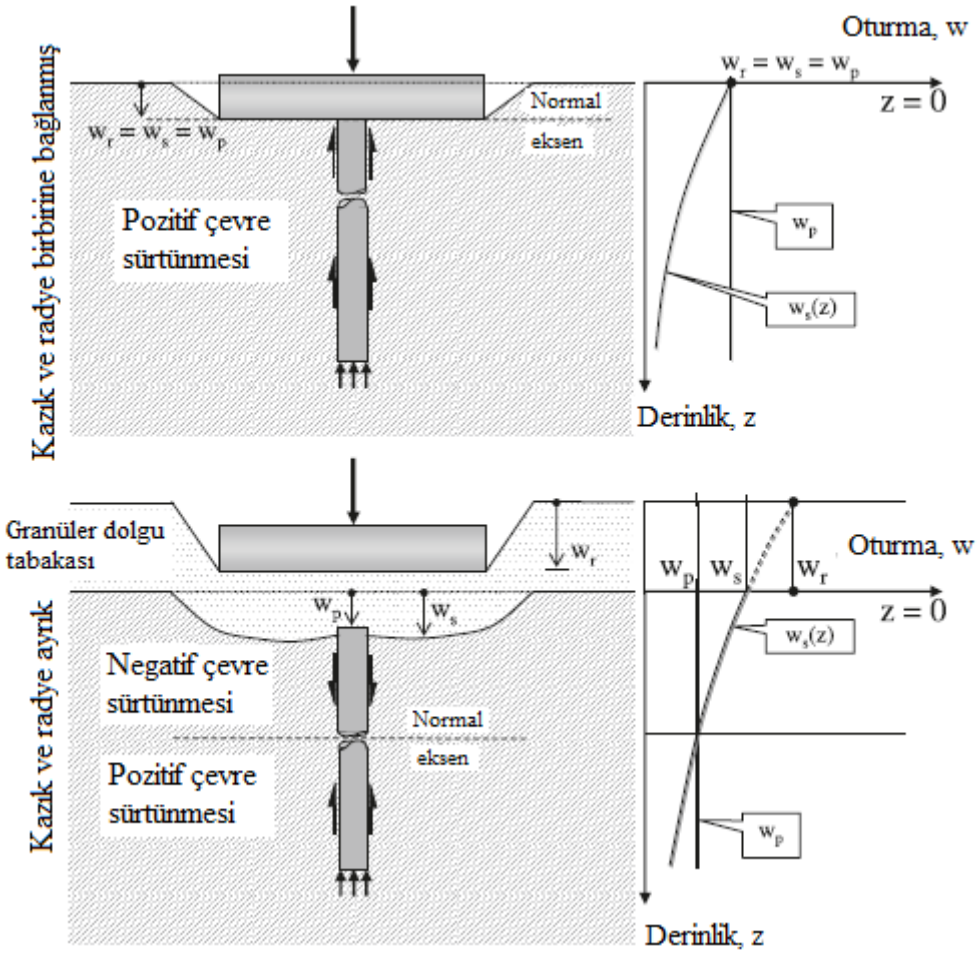
Fioravante ve Giretti (2010) kazık grubu ve radye temel arasına yerleştirilen granüler zemin tabakasının yük-oturma davranışına olan etkisi santrifüj deneyler ile incelenmiştir (Şekil 3.2.2 ve Şekil 3.2.3). Ayrıca, radye-granüler dolgu-zemin-kazık arasındaki etkileşimin taşıma gücüne olan etkisi incelenmiştir. Deneyde kullanılan

kumun özellikleri: $\gamma_{k,min}$=13.08 kN/m^3, $\gamma_{k,max}$=16.5 kN/m^3, D_{50}=0.18mm, C_u=3.33, Ø=35° ve D_r=%60. Granüler dolgu tabakasının özellikleri: $\gamma_{k,min}$=13.65 kN/m^3, $\gamma_{k,max}$=16.67 kN/m^3, D_{50}=0.58mm, C_u=1.78 ve Ø=35°. Radye temel 115mmx115mmx25mm boyutlarında ve E=2.1x10^5 MPa'dır. Kazıkların çapı 8 mm ve boyu 292 mm olup alüminyum tüpten imal edilmiştir. Santrifüj deneyinde zeminin arazi koşullarına en yakın özelliklerde modellenmesi sağlanır. Bu deneyde zemin modeli belli bir ivmeyle sarsılır ve zeminin derinlik boyunca aynı oranda konsolide olması sağlanır. Bunun sonucunda zemin sıkılığı %70 olmuştur. Küçük oturma miktarlarında kazıklı radyede kazık grubu yükün çoğunu almış, kazık taşıma gücü bakımından kapasitesine ulaşınca kalan yük zemin tarafından taşınmıştır. Kazık grubunun radyeden bağımsız olduğu sistemde radye temel kazık grubundan fazla oturma yapmış ve kazık grubundan fazla yük taşımıştır. Kazık grubu toplam yükün %10-30'unu almıştır. Kazıklı radyede yükleme arttıkça kazıkların taşıdığı yük oturma arttıkça artmakta ve belli bir değerde sabit kalmaktadır. Kazık radye bağımsız sistemde ise kazıkların taşıdığı yük sürekli artmaktadır. Kazıklı radye sistemde kazıklara pozitif çevre sürtünmesi etkirken, kazık ve radyenin bağımsız olduğu sistemde oturmanın belli bir değerine kadar (%0.2) negatif çevre sürtünmesi etkimiştir. Kazık ve radyenin bağımsız olduğu sistemde oturma arttıkça kazıklara gelen yük artmış ama sınır taşıma gücü değerine hiçbir zaman ulaşmamıştır. Kazıklı radyede, kazıklara gelen eksenel yük kazık boyunca azalmıştır. Kazık radye ayrık sistemde ise kazıklara gelen eksenel yük kazık ortasına kadar artmış daha sonra azalmaya başlamıştır. Kazıklı radyede kazık ve radye aynı miktarda oturma yapmakta ve kazıklar radye tarafından yüklenmektedir. Yük paylaşımı ise kazık ve zeminin rijitliğine göre değişmektedir.

Fioravante ve ark. (2008) gevşek silika kum zeminlerde kazıklı radye sistemini santrifuj deneyi ile modelleyerek kazıklara gelen yük dağılımı, kazıkların oturmayı azaltıcı etkisi ve kazık-zemin-radye arasındaki yük paylaşımlarını incelemişlerdir. Deneyde kullanılan kumun özellikleri: Ø=33°, G_s=2.61, D_{50}=0.09 mm ve D_r=%30. Deneylerde, radye temel olarak 88 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde çelik plaka kullanılmıştır (E=2.1x10^5 MPa). Kazık elemanlar da alüminyum borudan (d=8 mm, L=160 mm) imal edilmiştir. Yük hücreleri kazık elemanların üst, alt ve orta kısımlarına yerleştirilmiştir. Kazık sayısı 1, 3, 7 ve 13 olarak seçilmiştir. Kazık sayısına bağlı olarak oturma değerleri kazıkların kullanılmadığı radye temele göre %35-95 oranında azalmıştır. 1, 3 ve 7 kazık kullanıldığı durumlarda radye çapının %0.1 değerindeki oturma miktarında radye temelin aldığı yük miktarı toplam yükün sırasıyla %57, %30



Şekil 3.2.2. Ölçüm cihazları bağlanmış model kazık (Fioravante ve Giretti, 2010)



Şekil 3.2.3. Kazık grubu ve radye temelin birbirine bağlanmış ve ayrık olma durumları ile her iki durumdaki kazık, radye ve zemindeki oturmalar (Fioravante ve Giretti, 2010)

ve %12 'si kadar olmuştur. Kazık sayısı arttıkça radyenin aldığı yükün azaldığı görülmüştür. Sonuçlar ayrıca NAPRA programı ile de aynı çıkmıştır.

U. Ergun ve K. Türkmen (2007) kazıklı radye sistemde kazık grubu ve radyenin taşıdıkları yük oranları ile sistemin yaptığı oturma miktarını arazi ve laboratuvar deneyleri ile araştırdılar. Arazide yapılan deneyler sert killi bir zeminde yapılmıştır. Yerinde dökme betonarme kazıklar, deney kazığı (D=32 cm, L=5 m, s=150 cm) ve reaksiyon kazığı (D=32 cm, L=9 m) olarak imal edilmiştir. Yükleme yapılarak kazıkların tek başına taşıdığı yük belirlendikten sonra radye temel imal edilerek sistem yüklenmiş ve sistemin taşıdığı yük ile oturmalar ölçülmüştür. Kazıklı radye sistemi ilk olarak düşey yönde yüklenmiş ve maksimum yüke ulaşılınca yatay yük uygulanmıştır. Bu deneylerde radye temelin yaklaşık olarak toplam yükün %30 'unu aldığı görülmüştür. Ayrıca radye temeldeki düşey deformasyon 1.15 mm ve yatay deformasyon 5 mm olmuştur. Laboratuarda yapılan model deneylerde ise %50 kum ve %50 çakıl karışımından oluşan zemin (γ_n=19 kN/m^3, w=%17) tabakalar halinde sıkıştırılarak deney tankına yerleştirilmiştir. Sıkı, orta sıkı ve yumuşak zemin karışımları hazırlanmıştır. Kazıklar ($D_{dış}$=22 mm, $D_{iç}$=18 mm L=200 mm, s=4D) alüminyumdan üretilmiş ve dış yüzeyleri pürüzlendirilmiştir. Kazıkların iç yüzeyine folyo tipi gerilme ölçerler yerleştirilip su etkilerine karşı koruyucu maddelerle kaplanmıştır. Radye temel (BxLxH=132mmx132mmx132mm) çelik plakadan üretilmiş olup 5 ton kapasiteli yük hücresi ile yükleme yapılmıştır. Oturmalar da deformasyon ölçerlerle ölçülmüştür. Laboratuar deneylerinde ise radye temelin aldığı yük %40 'a kadar çıkmıştır ve bu yük oranındaki oturma değeri radye genişliğinin %2'si kadardır.

Cao ve ark. (2004) 'nın kumlu zeminde yaptıkları çalışmada radye temelin altına temelden bağımsız olarak kazıklar yerleştirilmiş ve bu sistemde kazık ve radye temelin yük paylaşım oranları ile zemindeki oturmalar deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca radye temelin rijitliği, kazık boyu, kazık sayısı ve kazıkların yerleşim planının sonuçlara etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Deneylerde kötü derecelenmiş temiz kum (D_{50}=0.3mm, C_u=1.9, C_c=0.84, G_s=2.61, γ_n=14.2 kN/m^3, D_r=%70) kullanılmıştır. Radye temel (BxL=220mmx440mm, E=207 kN/mm^2) çelik levhadan imal edilmiş ve temel kalınlığı 5, 10 ve 25 mm olarak seçilmiştir. Kazıklar (BxL=9.5mmx9.5mm, E=70 kN/mm^2, s=36.7 mm) ise alüminyum tüpten imal edilmiştir. Sistemin çeşitli yerlerine gerinim ölçer aletler yerleştirilerek kazıklara gelen eksenel gerilmeler, radye altında oluşan gerilmeler ve eğilme momentleri ölçüldü. Sonuç olarak, radye kalınlığı ve kazık uzunluğu arttıkça maksimum oturma %30, farklı oturma ise %70'e kadar azalmıştır.

Farklı oturmaların azalmasıyla radye temele etkiyen eğilme momentleri azalmıştır. Ayrıca, rijit temel yükün %90'ını alırken esnek temel toplam yükün %70'ini almıştır. Kazık sayısı arttıkça radye temelde oluşan maksimum oturma, farklı oturma ve maksimum eğilme momenti azalmıştır.

3.2.2. Analitik çalışmalar

Bourgeois ve ark. (2013) kazıklı radye sisteminin davranışını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çoklu faz modelinde incelemişlerdir. Bu yöntemde kazık ve zemin arasındaki etkileşimi ifade eden ara yüz elemanı kullanılmamış olup, kazık ve zemin arasındaki etkileşim rijitlik ve sürtünmeye bağlı bir parametre olarak ifade edilmiştir. Yazarlar bu yöntemle kazıklı radye sisteminin eğik veya yanal yükler altındaki davranışının incelenebileceğini de ifade etmişlerdir. Yazarlar, zayıf kaya zemin (E=500 MPa ve υ=0.3) üzerinde yer alan bir zeminde (E=45 MPa, υ=0.3 ve c=20 kPa) kazıklı radye sistemi modellemişlerdir. Sistemde kazık sayısının ve kazık uzunluğunun değiştiği birçok analiz yapılmıştır. Kazık sayısı ve uzunluğu arttıkça kazıklı radye sisteminin rijitliği artmıştır. Bundan dolayı kazık grubunun taşıdığı yük oranı artarken oturmalar azalmıştır.

Szerzö (2012) yaptığı çalışmada rüzgâr tribünü temellerinin tasarımını hem radye temel hem de kazıklı radye temel kullanarak yapmıştır. Bu tasarımlarda farklı zemin ve yükleme koşulları için analizler yapılmıştır. Kullanılan dört farklı zemin profili şu şekildedir: katı kil, ince kum, yumuşak kil ve altında sağlam tabaka ve yumuşak kil ve onun altında da katı kil. Farklı boy ve çapta kazıklar kullanılmıştır. Kazıkların bir kısmı uç kazığı bir kısmı da sürtünme kazığı olarak tasarlanmıştır. Tasarımlarda hem düşey hem de yatay yükleme yapılmıştır. Radye temele etkiyen kuvvetler ve oturma değerleri ölçülmüştür. Kazıklı radye temelin oturmaları azalttığı ve temelin stabiletisini sağladığı görülmüştür.

Cho ve ark. (2012) killi zeminlerde kazıklı radye sisteminin oturma davranışını numerik analiz yöntemleriyle incelemişlerdir. Çalışmalar yumuşak kil (E'=5 MPa, c'=3 kPa, Ø'=20°, υ=0,3) ve katı kilden (E'=45 MPa, c'=20 kPa, Ø'=20°, υ=0,3) oluşan iki farklı zemin profilinde gerçekleştirilmiştir. Bu tabakaların altında ise sağlam tabaka (E'=500 MPa, c'=0.1 kPa, Ø'=45°, υ=0,3) bulunmaktadır. 0.5 m çapında ve 8-20 m arasında uzunluklarda değişen kazıklar kullanılmış olup kazıkların bir kısmı uç kazığı bir kısmı ise sürtünme kazığı olarak modellenmiştir. Yapılan analizler Frankurt kili (katı

kil) üzerinde yapılan kazıklı radye sistemiyle deneysel olarak kontrol edilmiştir. Maksimum ve farklı oturma değerlerinin kazıklı radye sistemindeki elemanların geometrisiyle ve yükleme durumuna göre (üniform veya noktasal yük) değişiklik gösterdiği görülmüştür.

Cheng (2011) kazıklı temellerle geçilemeyen ve kalınlığı fazla olan yumuşak zeminlerde kazıklı radye sisteminin davranışını incelemiş ve basitleştirilmiş bir kazık-zemin-radye etkileşim yöntemi önermiştir. Sistem sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek oturmalar belirlenmiştir. Yazar bu tür zeminlerde kazık grubunun altında sıkışmaya müsait bir tabaka bulunmasının tehlikeli bir durum oluşturduğunu belirtmiştir. Yazar geliştirdiği yöntemde kazık grubunun oturmasını kazıkların eksenel boy kısalması ve kazıkların altındaki zeminin oturması toplamı olarak tanımlamıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan bir vaka analizinde maksimum oturma 76.06 mm ve farklı oturma 12.99 mm olarak bulunmuştur. Arazide yapılan ölçümler sonucunda ise maksimum oturma 50 mm ve farklı oturma 7.8 mm olarak ölçülmüştür. Yazar bu farkın zeminin mukavemet özelliklerini belirlerken kilin örselenmiş olmasından kaynaklandığını ifade etmiştir.

Leving ve ark. (2010) kazık grubu tasarımı yapılırken bütün kazıkların genellikle aynı çap, boy ve aralıklarla yerleştirildiğine, bunun da radye temelin verimliliğini tam sağlamadığını belirtmişlerdir. Yazarlar, kazıklı radye performansını etkileyen tüm etkenleri değiştirmeden sadece kazık boyunun optimum kullanılmasıyla radye temelin rijitliği ve farklı oturmalar bakımından en etkili çözümün elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Bunun için bilgisayar yazılımlarını kullanarak killi zeminlerde farklı uzunlukta kazıklar kullanılarak birçok analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda kazıklı radye tasarımında, taban basıncının fazla olduğu bölgelerde daha uzun, diğer bölgelerde ise daha kısa kazıkların kullanılmasıyla en uygun yerleşimin yapıldığını ve böylelikle farklı oturmaların %80 oranında azaldığını ortaya koymuşlardır. Bu yöntem kullanıldığında ortalama oturma, farklı oturma ve kazık-radye yük paylaşım oranı gibi değerlerin daha önce geliştirilen yöntemlerle çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca bu yöntemle kazık imalat maliyeti de azaltılmış olur.

Ziaie-Moayed ve ark. (2010) çalışmalarında kolon yükünün fazla olduğu bölgelerde büyük çaplı kazıklar, diğer bölgelerde ise daha küçük çaptaki kazıklar kullanarak kazıklı radye sistemini incelemişlerdir. Bu etkiyi anlayabilmek için üniform olarak yerleştirilmiş kazık grubundan oluşan kazıklı radye sistemi de analiz edilmiştir. Bunun için üç boyutlu sonlu elemanlar programı ANSYS kullanılmıştır. Zemini

Drucker-Prager elasto-plastik malzeme modeli olarak tanımlamışlardır. Farklı kazık çaplarının kullanıldığı kazıklı radye sisteminde maksimum oturmalar %31.9, farklı oturmalar ise %96.4 azalmıştır. Yazarlar bu çalışmanın her zeminde geçerli olmadığını da vurgulamışlardır. Bu çalışma, kazık ucu seviyesinin altındaki zeminin üstündeki zeminden daha sıkı veya sert olduğu zeminlerde geçerlidir.

Lee ve ark. (2010) yumuşak killi zeminlerin düşük taşıma gücü ve yüksek oranda sıkışabilirlik özelliği olduğunu ve bu tür zeminlerde kazıklı radye davranışının incelenmediğini belirterek, kazık uzunluğu, kazık çapı, kazıkların yerleşim planı, zemin özelikleri ve yükleme türünün değişken olduğu kazıklı radye sistemlerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemişlerdir. Analizlerde yumuşak kil (E'=5 MPa, c'=3 kPa, Ø'=20°, υ=0,3) ve katı kil (E'=45 MPa, c'=20 kPa, Ø'=20°, υ=0,3) Mohr-Coulomb modeli ile modellenmiştir ve drenajlı koşullar dikkate alınmıştır. Bu tabakaların altında ise sağlam tabaka mevcuttur. Yumuşak killi zeminde radye temel toplam yükün %30'unu alırken, katı killi zeminde %20'sini almıştır. Ayrıca radye temelin aldığı yük oranı yük seviyesi veya oturmalar arttıkça azalmıştır. Bu azalma miktarı kazıklar arası mesafe arttıkça daha belirgin olmuştur. Yapılan analizlerde, radye temelin sınır taşıma gücü %10B, kazık grubunun sınır taşıma gücü ise %10d'ye karşılık gelen oturma değerindeki yük miktarları dikkate alınarak bulunmuştur. Yazarlar kazık grubu ve radye temelin taşıdıkları yük oranlarının kazık alt ucunun sağlam tabakaya olan uzaklığına göre de değiştiğini ifade etmişlerdir. Sağlam tabakaya daha uzak olan kazık grubu daha az yük almıştır.

Sales ve ark. (2010) derin kazı ile birlikte yapılan kazıklı radye uygulamasının killi zeminlerdeki davranışını numerik yöntemlerle araştırarak bu tür uygulamalarda kullanılmak üzere yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Yazarlar, özellikle yumuşak killi zeminlerde derin kazı yapıldıktan sonra inşaata başlanmasının zemindeki efektif gerilmeleri azalttığını ve kilin aşırı konsolide duruma geçerek sıkışabilirliğinin azaldığını belirtmişler, bunun da maksimum ve farklı oturmayı oldukça azalttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, bu tür uygulamalarda temel kazısı sırasında, radye temelin yapımı zamanında, yer altı suyundaki değişiklikler olduğunda ve üst yapının inşaatı sırasında zemine gelen ilave gerilmelerden dolayı zemin parametrelerinin değiştiğini ve her bir aşamada hangi parametrelerin kullanılacağını belirtmişlerdir. Bu yöntem iki vaka analizinde uygulanarak uygulamadaki ölçüm değerleri ile kıyaslanmıştır. Geliştirilen yöntemin zemindeki oturmaları ve kazık ve radye temel arasındaki yük paylaşım oranlarını tahmin etmede çok iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Gök ve Toğrol (2009) yaptıkları çalışmada kazık grubunun oturma hesabında "eşdeğer radye yöntemi" kullanılmış ve sonuçlar Plaxis 3D Foundation yazılımı ile kıyaslanmıştır. Çalışmalar kumlu zeminde (ɤ=18 kN/m^3, Ø=35°, E=30 MPa, υ=0,4) ve kenar uzunluğu 8D olan kare radye temel altına 4 adet D çapında kazık kullanılarak yapılmıştır. Kazıklar, aralarındaki mesafe 4D olacak şekilde yerleştirilmiştir. Çalışmada, toplam yükün kazık grubu ve radye tarafından farklı oranlarda taşınması hallerinde, radyenin ve kazık grubunun oturmaları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kazık grubu ve radyenin yaptığı oturmaların aynı olduğu andaki yük paylaşım oranı, sistemin beraber çalıştığı andaki yük paylaşım oranını vermektedir. Farklı iki kazık çapı kullanılarak yapılan yükleme deneylerinde yük paylaşım oranları sırasıyla eşdeğer radye yönteminde %66 ve %72, Plaxis 3D yazılımı ile %74.8 ve %80.1 olarak bulunmuştur. Kazıklı radye sisteminin yaptığı oturma miktarları ise sırasıyla eşdeğer radye yönteminde 10.4 mm ve 9.9 mm, Plaxis 3D yazılımı ile 10.32 mm ve 9.48 mm bulunmuştur.

Rabiei (2009) çalışmasında kazıklı radye sisteminin davranışını etkileyen kazık yerleşim planı, kazık sayısı, kazık uzunluğu ve radye temelin kalınlığı gibi etmenlerin etkilerini parametrik çalışma sonucunda belirlemiştir. Tasarımlar ELPLA isimli bilgisayar yazılımı ile yapılmıştır. Tasarımda kullanılan malzemeler şu şekilde modellenmiştir: Zeminin özellikleri E=20 MPa ve υ=0.3; kazıklı temelin ve radye temelin özellikleri ise E=30000 MPa ve υ=0.2 olarak seçilmiştir. Çalışmada dört farklı kazık yerleşim planı denenmiştir. Bu tasarımlarda kazık çapı 1 m, kazık boyu 5 m, 10 m ve 20 m, kazıklar arası mesafe ise kazık çapının 3, 6 ve 7 katı seçilerek her bir durum için analiz yapılmıştır. Sonuçlar benzer çalışmalarla aynı olmuştur.

Xia ve ark. (2009) çalışmalarında yatayda ve/veya düşeyde farklı kalınlıklarda zemin tabakalarının olduğu koşullarda kazıklı radye tasarımı yapmışlardır. Bu tür zeminlerde, temelin belirli bir bölgesinde oturmalar çok fazla olabilir ve böylelikle temel tabanına çok büyük gerilmeler gelebilir. Bu etkileri azaltmak için gerekli bölgelere kazıklı temel uygulaması yapılabilir. Yazarlar tabaka kalınlıklarının değişken olduğu ve genellikle kum ve siltli kumdan oluşan bir bölgede kazıklı radye uygulaması yaptılar. Analizler SAFE programı kullanılarak yapılmıştır. Sonuç olarak, kritik yükle yüklenmiş bölgelerin altında kazıklı temel uygulaması yapmak maksimum ve farklı oturmaları azaltmıştır. Oturmalar ilk durumda 97.5 mm iken kazıklı radye uygulamasından sonra 25 mm olmuştur.

Chaudhary (2007) zayıf kayadan oluşan zeminde 1072 adet kazıktan oluşan kazıklı radye uygulamasını 2D eksenel simetri ve 3D sonlu elemanlar yöntemleriyle modellemiştir. Sistemin izin verilebilir maksimum oturma miktarı 10 mm olarak seçilmiştir. Eksenel simetrik modelde kazık grubunun taşıdığı yük sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modele göre %10 fazla olmuştur. Kazıklı radye sisteminin yaptığı oturma miktarı radye temelin yaptığı oturma değerinden %50 daha az olmuştur. Her iki modelde de kazıklı radye sisteminin oturmaları arasında %10 fark olmuştur.

Small ve Liu (2007) kazık grubu ve kazıklı radye sistemlerinde oturmaların zamana bağlı olarak değişiminin çok fazla incelenmediğini belirterek, kazıklı radye sisteminde birincil konsolidasyon oturmalarını üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Yazarlar ayrıca, zemindeki oturmaların ve kazık-radye temel arasındaki yük paylaşım oranlarının inşaatın bittiği anda tahmin edildiğini, hâlbuki oturmaların bundan sonra da devam ettiğini belirtmişlerdir. Zamana bağlı oturmalarda en önemli iki etken şudur: boşluk suyu basıncının sönümlenmesinden dolayı meydana gelen birincil oturmalar ve zeminin akması olayıdır. Aşırı konsolide olmuş Londra kili (υ =0.1) olan zeminde kazıklı radye uygulaması yapılmış ve burada ölçülen değerler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Hesaplanan ve ölçülen değerler birbirine çok yakın olmakla beraber, inşa süresi bittikten çok sonra bile oturmaların devam ettiği görülmüştür.

Sanctis ve Mandolini (2006) yumuşak killi zeminlerde kazıklı radye sisteminin davranışını sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Analizlerde zeminin drenajsız şartlardaki özellikleri dikkate alınmıştır (E_u=400c_u, υ=0.49). Kazık çapı ve boyu (L/d=20, L/d=40), kazık sayısı (n=9, 25, 49) ve kazıklar arası mesafenin (s=4d, s08d) değişken olduğu 14 farklı analizde kazıklı radye sisteminin taşıdığı yük kazık grubunun taşıdığı yükün 1.2 ile 5.8 kat fazlası çıkmıştır. Ayrıca yazarlar radye temelin %10B oturma değerinde sınır taşıma gücüne ulaşırken, kazık grubunun %25d oturma değerinde sınır taşıma gücüne ulaştığını belirtmişlerdir. Yazarlar bu çalışmalarında; kazıklı radyenin taşıma gücünü, radye temel ve kazık grubunun taşıma güçlerini ayrı ayrı toplayıp bu değeri göçme durumunu temsil eden bir katsayıyla çarparak elde etmişlerdir.

Reul (2004) aşırı konsolide kil zeminlerde kazıklı radye sisteminin taşıma gücü davranışını üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir. Bu analizlerde zeminin uzun dönem davranışı etkili olduğu için zeminin drenajlı kayma mukavemeti parametreleri kullanılmıştır. Analizlerde 69 m Frankurt kili (c'=20 kPa, Ø=20°, υ=0,15)

ve onun altında da kireçtaşı (c'=1000 kPa, Ø=15°, υ=0,25) olan bir zemin profili kullanılmıştır. Zeminlerin elastisite modülü ise belirli bir derinliğe kadar sabit kalırken bu seviyeden sonra lineer olarak artmaktadır. Bu çalışmada kare temeller (B=14 m,38 m ve 62m, t=2.5 m, 3 m ve 4 m) altına farklı geometriye sahip kazıklar (L=10 m, 20 m, 30 m, 40 m ve 50 m, d=0.5 m, 1 m ve 1.5 m, n=13-441, s=2d-15d) yerleştirilerek parametrik bir çalışma yapılmıştır. Kazıklı radye sisteminin davranışı sistem geometrisinin yanında yükleme koşullarına ve ilgili yüklemedeki oturma miktarına göre değişmektedir. Bu çalışma sonucunda, kazık grubunun taşıdığı yük farklı durumlar için %35 ile %91 arasında değişmektedir. Analizlerde oturma miktarı arttıkça kazık grubunun aldığı yük de artmıştır fakat sınır taşıma gücüne hiçbir zaman ulaşmamıştır.

Reul ve Randolph (2004) çalışmalarında kazık grubunun yerleşimi, kazık çapı, kazık boyu, kazık-zemin rijitlik oranı ve radye temele etkiyen yük dağılımı gibi etmenlerin kazıklı radye davranışına olan etkilerini 259 farklı tasarım yaparak sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Analizler killi zeminde (c'=20 kPa, Ø'=20°, υ=0,15) yapılmıştır. Zeminin elastisite modülü derinlikle değişmektedir. Ayrıca analizlerde üç farklı kazık yerleşim planı ve dört farklı yükleme türü uygulanmıştır. Kazık yerleşim planları üniform, radye temel merkezi civarında ve hem radye temel merkezi hem de radye temelin kenarlarına gelecek şekilde yapılmıştır. Yüklemeler ise üniform yükleme, merkezi yükleme, sadece radye kenarı yüklenmiş ve yükün yarısı temelin merkezine kalan kısmı da kenarlara yüklenmiş olarak yapılmıştır. Yazarlar, kazık ile zeminin rijitliği arttıkça farklı oturmaların azaldığını, radye temele etkiyen eğilme momentlerinin ise arttığını belirtmişlerdir. Üniform yüklemede ve radye temelin hem merkezinin hem de kenarlarının yüklendiği durumda farklı oturmayı en aza indirmek için kazık grubunun temelin ortasına yerleştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Bu çalışmada ayrıca, eşdeğerdeki kazıkların kullanıldığı tasarımlarda ortalama oturmayı azaltmak için kazıkların sayısını artırmak yerine kazıkların uzunluğunu artırmanın daha iyi sonuçlar vereceği görülmüştür.

Liang ve ark. (2003) kompozit kazıklı radye sistemlerinde yastık tabakasını etkisini araştırmışlardır. Kompozit kazıklı radye sisteminde; daha çok esnek malzemeden yapılan kısa kazıklar yüzeye yakın olan zemini iyileştirmek için kullanılırken, uzun kazıklar zemindeki oturmaları azaltmak için kullanılır. Ayrıca bu sistemde radye temel altına yerleştirilen yastık tabakası temel tabanına gelen gerilme dağılışının düzgün olmasını sağlar. Bu sistemde kısa kazıklar jet grout kolonları veya taş kolonlar şeklinde uygulanabilir ve zeminin taşıma gücü iyileştirilir. Uzun kazıklar

ise betonarme kazıklar şeklinde üretilip daha çok oturmaları azaltmaya yönelik kullanılır. Nümerik analizlerde kullanılan zeminin özellikleri E=5 MPa ve υ=0.35 iken yastık tabakasının özellikleri E=10-80 MPa ve υ=0.3 olarak seçilmiştir. Analizlerde kısa kazıkların elastisite modülü arttıkça kazıklı radye sisteminin rijitliğinin arttığı ve oturmaların azaldığı görülmüştür. Ayrıca yastık tabakasını kalınlığının ve elastisite modülünün kazıklı radye sistemi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Kompozit kazıklı radye sistemini etkileyen etmenler incelendikten sonra bu yöntem bir projede uygulanmıştır. Siltli kil zeminde yapılan uygulamada radye temel toplam yükün %30 kadarını almıştır. Maksimum oturma 27 mm ve farklı oturma ise 23 mm olarak ölçülmüştür.

Poulos ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada kazıklı radye sisteminin genel yük kapasitesi ve yük-oturma davranışı ile sistemin bölgesel yük kapasitesi ve bölgesel kolon yükleri altında kazık-radye davranışını incelediler. Ayrıca sistemin yük-oturma davranışının radye temel ile kazığın rijitliğine göre değiştiğini ve yük paylaşım oranının bu elemanların rijitlik oranına göre değiştiğini gösteren yaklaşık bir yöntem geliştirdiler. Yazarlar kazıklı radye sistemindeki farklı oturmaların kazık başlığının rijitliğine bağlı olarak değiştiğini de ifade ettiler. Bu çalışmada esas olarak maksimum kolon yükünün olduğu fakat bu kolonun altında kazığın bulunmadığı bölgelerde radye temelde oluşacak kesit kuvvetleri, temel emininde oluşacak gerilme ve bölgesel oturma formulize edilmiştir. Oturma analizi GAPR programı ile de yapılmış, sonuçlar geliştirilen yaklaşık yöntemle çok yakın çıkmıştır.

Prakoso ve ark. (2001) çalışmalarında kazıklı radye tasarımında ortalama ve farklı oturmaları azaltmak amacıyla zeminin elastik ve elasto-plastik olması koşullarında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak numerik analizler yapmışlardır. Bu analizler için Plaxis 3D yazılımını kullanmışlardır. Zeminin (E=20 MPa, υ=0.495) elastik olduğu kabulüne göre sonlu elemanlar yöntemi ile düzlem deformasyon analizleri yapıldığında diğer yöntemlere kıyasla maksimum oturma %5-25 daha fazla, farklı oturma %30 daha az, radyeye etkiyen moment değerleri ve kazık ucu taşıma gücü hemen hemen aynı çıkmıştır. Bu çalışmada ayrıca, kazıklı radye sistemindeki geometrik elemanların sistemin davranışına etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Bu etkenler; kazık grubunun çapları toplamının radye genişliğine oranı (B_g/B_r), kazık boyu, kazıklar arası mesafe, kazık çapı (d) ve radye temelin kalınlığıdır. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında kazık boyu ve B_g/B_r oranı arttıkça oturmalar %60'a kadar azalmıştır. Ayrıca, kazıklar arası mesafe 20d'den 4d'ye düşünce oturmalar %40 azalmıştır. Aynı

şekilde farklı oturmalar da azalmıştır. Yapılan istatistiksel çalışmalar sonucunda kazıklı radye tasarımına yönelik basitleştirilmiş bir yöntem geliştirilmiştir. Yazarlar, kazıklı radye davranışında en etkili parametrenin B_g/B_r oranı ve kazık boyu olduğunu belirtmiştir. Son olarak $B_g/B_r \approx 1$ ise ortalama oturmaların en az, $B_g/B_r \approx 0.5$ ise farklı oturmaların en az olacağı sonucuna varılmıştır.

Cunha ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada Yamashita ve ark. (1994)'nın incelediği bir vaka analizinde kazıkları kolon yüklerinin altına yerleştirerek tekrar analiz etmiş ve oturma değerleri ile kazıkların taşıdığı yük oranını karşılaştırmışlardır. Kazıklar orta sıkı kum tabakası üzerinde katı kil bulunan zemin içerisinde modellenmiştir. Kazık boyu, kazık çapı, kazıklar arasındaki mesafe ve radye kalınlığı gibi değişkenlerin en uygun değerini bulabilmek için parametrik çalışma yapmışlardır. Radye temelin rijitliği arttıkça kazıklara gelen yük miktarı %70'den %45'e düşmüş, oturmalar ve temel tabanına gelen gerilmeler azalmıştır. Yamashita ve ark. (1994) kendi tasarımlarında maksimum oturmayı 20 mm ve kazık grubunun taşıdığı yükü %50 olarak hesaplamışlardı. Yazarlar, sadece radye kalınlığını artırarak ve fazla sayıda ve uzunlukta kazıklar kullanmadan bu değerlere ulaşılabileceğini göstermişlerdir.

Chow ve ark. (2001) çok değişkenli analiz yöntemini kullanarak kazıklı radye sistemi tasarlamışlardır. Kazıklı radye temel ve kazık grubunun davranışını minimum potansiyel enerji prensibini kullanarak açıklamaya çalışmışlardır. Bu yöntem bir vaka analizinde kullanılarak buldukları sonuçları diğer nümerik yöntemlerle kıyaslamışlardır. Bu yöntemde ilk olarak kazık grubu ve zemin için rijitlik matrisi yazılmış, daha sonra ise bu rijitlik matrisi radye temel analizlerinde kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan zeminin özellikleri E=280 MPa ve υ=0.4 olarak seçilmiştir. Nümerik analizler sonucunda ortalama oturma miktarı 82 mm ve kazık grubunun taşıdığı yük oranı %45 olarak bulunmuştur. Bu yöntem Clancy ve Randolph (1993)'ın yönteminde uygulandığında oturma miktarı 84 mm ve kazık grubunun taşıdığı yük %67 olmuştur. Ayrıca bu yöntem arazideki bir kazıklı radye tasarımında uygulandığında ortalama oturmanın 38 mm ve kazık grubunun toplam yükün %47'sini taşıyacağı hesaplanmıştır. Arazide yapılan ölçümlerde ise ortalama oturma 33 mm ve kazık grubunun taşıyacağı yük %35 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara bakıldığında minimum potansiyel enerji denklemleri ile kazıklı radye tasarımının güvenilir bir şekilde yapılabileceği gösterilmiştir.

Poulos (1993) zeminde meydana gelen aşağı veya yukarı yöndeki hareketlerden dolayı efektif gerilmedeki değişimlerin kazıklı radye sistemindeki kazık-radye temel-

zemin arasındaki etkileşimleri nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Analizler sınırlı elemanlar yöntemi kullanılarak homojen olmayan zemin ortamında (orta katı kil, E=10 MPa, υ=0.3) yapılmıştır. Tasarımlar kazık ve radye temel elemanlarının çekme ve basınç gerilmeleri altında göçtüğü yük miktarında ve zemin hareketleri dikkate alınarak yapılmıştır. Kazık grubundaki çevre sürtünmeleri ve uç dirençleri ile radye temelin taşıma gücü çekme ve basınç gerilmeleri altında ayrı ayrı hesaplanmıştır. Analizlerde negatif çevre sürtünmesini dikkate alan bilgisayar programı (RRAWN) kullanılmıştır. Oturmaların fazla olduğu zeminlerde yükün büyük bir kısmı kazık grubu taşındığından dolayı, bu tür zeminlerde kazık grubu ile radye temelin bağımsız olarak tasarlanabileceği önerilmiştir. Şişen zeminlerde ise kazıklı radye sistemindeki yukarı yönlü hareket kazık ve radye temelin bağımsız olduğu sistemden daha fazla olmuştur.

3.2.3. Vaka analizleri

Russo ve ark. (2013) 828 m yüksekliğindeki dünyanın en yüksek binasının temelini kazıklı radye olarak tasarladı ve oturma değerleri bilgisayar programları yardımı ile bulundu. Radye temel elastik, kazıklar ise lineer olmayan yay şeklinde modellendi. Çalışmada, kazık yükleme deney sonuçlarından kazık ve kazıklı radye sistemlerinin oturma performansını tahmin etmeye ve oturmaya etki eden etkiler tahmin edilmeye çalışılmıştır. 42000 m^2 temel alanı altına 1,5 m çapında ve 47,45 m uzunluğunda 194 tane kazık yerleştirilmiştir. Zemin etütlerinde 90 m derinliğe kadar çeşitli derinlik ve kalınlıklarda gevşek-orta sıkı siltli kum, kil taşı, kum taşı ve çimentolanmış kil tabakalarına rastlandı (ortalama q_u=1-2,5 MPa). Oturma hesabında kullanılan en önemli parametre olan Young's modülü 800-1000 MPa arasında değişmektedir. Çalışmada, kazıkların içerisine farklı derinliklerde gerinim ölçerler yerleştirilerek kazıklara gelen eksenel yük dağılımı ölçüldü. Ayrıca yükleme esnasında kazıkların yaptığı deformasyonlar ölçüldü. Kazık yükleme deneyinde, zeminin Young's modülü reaksiyon kazıkları dikkate alındığında 900 MPa, ihmal edildiğinde ise 1200 MPa olarak ölçülmüştür. Eğer reaksiyon kazıklarının etkisi ihmal edilirse oturma değerleri gerçek değerlerden %21 daha az olmaktadır. Bu çalışmada kazık grubu ile radye temel arasındaki yük paylaşımı ihmal edilmiştir. Kazıklar toplam yükün %94-100'ünü almıştır. Oturma hesaplarında lineer analiz ile lineer olmayan analiz arasında çok büyük fark olmamıştır. Maksimum oturma değeri 52 mm, farklı oturma değeri ise 27 mm olarak hesaplanmıştır. Analizlerde radye temelin etkisi ihmal edildiğinde

maksimum oturmanın (61 mm) %17, maksimum farklı oturmanın ise (38 mm) %40 arttığı görülmüştür. Ayrıca bilgisayar programları ile yapılan analizlerde oturmalar arazideki ölçülen değerlerden büyük çıkmıştır. Maksimum oturmanın 35 mm ve farklı oturmanın 14 mm olduğu gözlenmiştir.

Yamashita ve ark. (2010) 162 m yüksekliğindeki bir binanın kazıklı radye temel sistemini incelemişlerdir. Temel sistemindeki oturmalar, kazıklara gelen eksenel yük, radye ve zemin arasına etkiyen gerilme ve zeminin boşluk suyu basıncındaki değişiklikler yapı inşasının başlangıcından itibaren inşaat süresinin bitiminden 8 ay sonraya kadar gözlemlenmiştir. Zemin genel olarak orta sıkı/sıkı kum ve çakıl tabakalarından oluşmaktadır (N_{spt}=20-60) ve 2,5 m derinliğinden itibaren yer altı suyu vardır. Bina tabanında yalıtım sistemi olduğu için farklı oturmaların en az olması istenmektedir (δ_{max}=30mm, β_{max}=1/1000 radyan). Farklı oturmayı azaltmak için kazıklı radye sistemi yapıldı. Radye temel altına (50mx34m) 50 m uzunluğunda ve 1,5-1,9 m çaplarında değişen kazıklar yerleştirildi. Yapılan analizler sonunda δ_{max}=26 mm, β_{max}=1/1400 radyan olacağı ve kazık grubunun toplam yükün %80-90 kadarını taşıyacağı öngörülmüştür. Kazıkların alt ve üst uçlarına yerleştirilen gerinim ölçerler ve radye altına yerleştirilen zemin basınç ölçerler yardımıyla ölçümler yapılmıştır. Kazık üst seviyesindeki zeminin oturması radye temelin oturmasına eşit olurken (23.4mm), kazık alt ucunda 1-2 mm değerine kadar düşmüştür. Bundan dolayı kazıkların alt seviyesindeki eksenel yük kazıkların üst seviyesindeki eksenel yükün %0,07-0,12 arasında olmaktadır. Ayrıca kazık grubunun toplam yükün %87-93 kadarını taşıdığı gözlenmiştir.

Wang ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada yüksek hızlı demiryolu ağının altında bulunan lös zeminlerde kazıklı radye uygulamasının zeminin oturma davranışına olan etkisini incelemişlerdir. Bu tür zeminlerde zemin kazıktan fazla oturma yaptığı için kazık etrafında negatif çevre sürtünmesi olur ve kazık-zemin arasındaki yük paylaşım oranı düşük olur. Kazıklı radye sistemi ilk olarak deneysel modellenmiştir. Deneyler santrifuj modelleme ile yapılmıştır. Bu modelleme tekniğinde arazi koşulları 1/100 oranında küçültülerek laboratuarda arazi ile bire bir aynı koşullarda zemin ortamı elde edilmiştir. Ayrıca deney tankı belirli bir ivmeyle sarsıldığında arazideki uzun dönem oturmaları kısa sürede ve gerçekçi bir şekilde belirlemek mümkün olmaktadır. Arazi ortamında 15 m lös zemin ve onun altında da kumlu zemin bulunmaktadır. Laboratuarda bu özelliklerdeki zemin ortamı içerisine alüminyum boru kazıklar ($E=7,1x10^4$ MPa, L=16m, d=40cm, s=2D-4D-6D) yerleştirilmiştir. Modelde kazık

grubu kullanılmadığında oturmalar 96-205 cm olurken, kazık grubu kullanıldığında 2,7-7,9 cm arasında olmuştur. Ayrıca kazıklar arası mesafe arttıkça oturmaların daha fazla olduğu görülmüştür.

Poulos (2010) bilgisayar programlarını kullanarak kazıklı radye tasarımında limit denge durumu için gerekli analiz aşamalarını tekrarlamışlardır. Bunlar; toptan göçme analizi ve servis yükleri altındaki analiz aşamalarıdır. Yazarlar çalışmalarında tasarımda dikkat edilecek hususları, tasarım kıstaslarını, yük birleşimlerini farklı durumlar için değerlendirmişlerdir. 430 m uzunluğundaki yüksek katlı bir bina için kazıklı radye uygulaması yapılmıştır ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bilgisayar programları kullanılarak yapılan analizlerde 184 mm oturma ve 1/400 açısal sapma olacağı hesaplanmıştır. Gözlemlenen değerlere bakıldığında ise 230 mm değerinde oturma ve 1/220 oranında açısal sapma olduğu görülmüştür.

Sonoda ve ark. (2009) çalışmalarında kazıklı radye temelin geleneksel yapım mekanizmasına alternatif bir yapım tekniğinin kullanıldığı vaka analizi sonuçlarını vermiştir. Kum ve kumlu siltten oluşan zemin üzerine 9000 m^2 taban alanlı 7 katlı bir ticari bina yapılmıştır. Bu yöntemde temel kazısı yapılmadan fore kazık grubu imal edilmiş ve eşzamanlı olarak çelik yapının çerçeve sistemi kazıkların üstüne gelecek şekilde inşaat devam etmiştir. Üst yapının %70'i tamamlanıncaya kadar (yapı yükünün %70'i kazık grubuna taşıtılmış) inşaat devam etmiş, bu arada ise temel kazısı kademeli olarak yapılmış ve radye temel imal edilmiştir. Bu aşamadan sonra temel sistemi kazıklı radye olarak çalışmaya başlamış ve kalan yük (%30) radye temel tarafından taşınmaya başlamıştır. Bu yöntemle temel tasarımının maliyeti 9.9 milyon $'dan 3.6 milyon $'a düşmüştür ve inşaat süresi 2 ay kısalmıştır. Radye temeldeki maksimum oturma 29 mm ve kazıklı radye sistemindeki maksimum oturma 20 mm olarak ölçülmüştür. Bu yöntemin yaygın kullanılmamasının nedeni ise arazi incelemelerinin yetersiz oluşu ve yöntemin tasarımının oldukça karmaşık olmasıdır.

Sanctis ve Russo (2008) kimyevi maddelerin depolanacağı farklı boy ve çaptaki silindirik çelik tankların altında kazıklı radye sisteminin uygulandığı bir vaka analizinden sonuçları paylaşmışlardır. Sonuçlar hem gözlemsel hem de analitik olarak incelenerek kazık ve radye arasındaki yük paylaşım oranı ile temellerdeki oturmalar araştırılmıştır. Temel zemini 0-25 m arasında az siltli kum (N_{spt}=29, q_c=11,7 MPa) ve 25-30 m arasında siltli kumdan (N_{spt}=12) oluşmaktadır. Yüzeysel temel yapıldığında oturmaların 9-18 cm arasında olduğu görülmüş ve kazıklı radye yapılmaya karar verilmiştir. Kazıklı radye yapıldığında oturmalar yaklaşık olarak 1,4 cm olmuştur.

Kazık grubu ise toplam yükün %45-55 'ini almıştır. Analitik çözüm yapıldığında ise yük paylaşım oranları gözlemlenen değerlerle yakın çıkarken, oturma değerleri gözlemlenen değerlerden %30 fazla çıkmıştır.

Vasquez ve ark. (2006) iki ayrı vaka analizinde kazıklı radye sistemini lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek kazık-zemin-radye arasındaki etkileşimi incelemişlerdir. Birinci vaka analizinde 5 katlı bir binanın altında bulunan katı kil tabakası içinde gevşek kum bantları bulunan bir zeminde tasarım yapılmıştır. Bu sistemde radye temel düşük deformasyon miktarlarında toplam yükün %70'ini alırken, oturmalar arttıkça bu oran %60'a kadar düşmüştür. İkinci vaka analizinde zemin Mohr-Coulomb modeli ile tasarlanmıştır. Bu analiz sonucunda ise radye temel toplam yükün %58'ini almıştır.

Garcia ve ark. (2006) kazıklı radye uygulamasının yapıldığı bir vaka analizinde sistemi ABAQUS programı ile modelleyip sonuçları arazi ölçümleri ile kıyaslamışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yaparken, özellikle killi zeminlerde daha gerçekçi bir modelleme yapabilmek için visko-hipo-plastik model kullanılmıştır. Bu zemin modelinde gerilme durumu ve boşluk oranına göre zemin davranışı farklıdır. Ayrıca, zeminin suya doygun olduğu kabul edilir, aşırı konsolidasyon oranı 2'den küçük olmalıdır ve birincil oturmalar ihmal edilir. Frankurt kilinin olduğu bir zeminde yapılan kazıklı radye uygulamasında hesaplanan oturma miktarı 110 mm, ölçülen oturma miktarı ise 111 mm olmuştur. Hesaplanan farklı oturma değeri 17.4 mm iken ölçülen farklı oturma değerinin 28.9 mm olduğu görülmüştür. Kazık grubunun toplam yükün %47'sini alacağı hesaplanırken bu değerin %41'de kaldığı görülmüştür.

Poulos ve Davids (2005) Dubai'de bulunan Emirates ikiz kulelerinde (52 katlı) uygulanan kazıklı radye sisteminde eksenel ve yatay yük etkisi altında oturmaları numerik analiz yöntemleriyle incelemişlerdir. Zemin incelemesi 80 m derinliğe kadar yapılmıştır. Standard penetrasyon deneyi, permeabilite deneyi, sismik kayma dalgası testi, drenajlı kesme kutusu deneyi ve konsolidasyon deneyleri yapılarak zeminin özellikleri belirlenmiştir. Zemin genel olarak siltli kum ve kireçli kumtaşından (E=127-700 MPa, υ=0.1-0.3) oluşmaktadır. Radye kalınlığı 1.5 m, kazık çapı 1.2 m ve kazık boyu 40-45 m seçilmiştir. Analizler ölü yük, canlı yük ve rüzgar yüklerinin farklı birleşimleri için GAPR programı kullanılarak yapılmıştır. Analizler sonucunda maksimum oturma 185 mm ve açısal distorsiyon 1/256 bulunmuştur. Kazıklı radye sistemi için ayrıca sismik ve dinamik analizler yapılmıştır. Dinamik yüklerin temel

rijitliğine çok fazla etki etmediği görülmüştür. Bu analizlerde sıvılaşma riskinin olmadığı da anlaşılmıştır. Bulunan sonuçlar kazık yükleme deneyi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Kazık yükleme deneyleri ile kazıkların basınç, çekme, tekrarlı çekme ve yatay yükleme durumlarındaki sınır taşıma güçleri belirlenmiştir. Deney sonuçları tahmin edilen değerlerden daha büyük çıkmıştır. Analiz ve deney sonuçlarına ilave olarak, bina inşaatından sonra oturma değerleri gözlemlenerek ölçülmüştür. 185 mm olarak tahmin edilen oturma değeri ölçümler sonunda 58 mm olduğu görülmüştür. Bilgisayar programı ile yapılan analizlerde zeminin geoteknik özelliklerinin gerçek değerlerden farklı bulunmasından dolayı bu kadar fark oluşmuştur. Bu yüzden, yazarlar geoteknik modellemenin doğru bir şekilde yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca kazık grubu toplam yükün %92 kadarını taşımıştır.

Katzenbach ve ark. (2005) Almanya'da inşa edilen yüksek katlı binalarda uygulanan kazıklı radye sistemlerine ait vaka analizleri sonuçlarını paylaşmışlardır. Zemin genellikle aşırı konsolide olmuş kil ve onun altında da kireçtaşı veya kumdan oluşmaktadır. Ayrıca inşa edilen yapıya komşu birçok yapı bulunmaktadır. Birinci vaka analizince 30 katlı bir yapı için yüzeysel teme uygulaması yapılırsa oturmaların 40-50 cm olacağı hesaplanmıştır. Bu yüzden kazıklı radye uygulaması tercih edilerek oturmalar yaklaşık olarak 12 cm ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca kazık grubu toplam yükün %80'ini almıştır. Köşe kazıklar 140 kN/m sürtünme direnciyle mobilize olurken, iç kazıklar 60 kN/m yük ile mobilize olmuştur. İkinci vaka analizinde ise 256 m yüksekliğindeki bir bina için kazıklı radye uygulaması yapılmış ve kazık grubunun toplam yükün %55 kadarını aldığı görülmüştür. Bu uygulamada da oturmaların yüzeysel temele göre %50 azaldığı ortaya çıkmıştır.

Poulos (2005) yumuşak killi zeminlerde temel zeminindeki oturmaları en aza indirmek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Yumuşak killi zeminlerde yükleme yapıldığında veya yer altı su seviyesi indirildiğinde maksimum ve farklı oturmalarda çok fazla artış olmaktadır. Bunun için yumuşak killi zeminlerde uç kazığı kullanmak daha uygundur. Fakat yazarlar buna alternatif olarak, zeminin belirli bir derinliğe kadar kazılarak kazıklı radye sisteminin yapılmasını önermişlerdir. Bu şekilde zemindeki gerilme artışlarının azalacağını ve kilin aşırı konsolide kil gibi davranacağını, bunun da zeminin sıkışabilirliğini azaltacağını söylemişlerdir. Fakat bu yöntemde maksimum kazı yüksekliği ve zeminin aşırı konsolide olmasından dolayı kazığın/radyenin rijitliğine ve sınır taşıma kapasitesine olan etkisi önemlidir. Yazarlar temel kazısının radye temelin ve kazığın rijitliğini etkilediğini fakat sınır yük taşıma kapasitesini etkilemediğini

belirtmişlerdir. Bu tür tasarımlarda radye temelin kazık grubundan fazla yük taşıdığı görülmüştür. Bu yöntem bir vaka analizinde uygulanmıştır. Geleneksel yöntemle kazıklı radye yapıldığında 1.08 m oturma olacağı ve radye temelin toplam yükün %4'ünü alacağı, fakat temel kazısı yapıldığında oturmanın 280 mm olduğu ve radye temelin toplam yükün %40'ını aldığı görülmüştür.

Tan ve Chow (2003) yumuşak killi zeminlerde (c_u<40 kPa) kazıklı radye tasarımına yönelik araştırmalar yapmışlardır. Yazarlar yumuşak killi zeminlerde, temel kazısı yapılması veya önyükleme gibi oturmayı hızlandırıcı yöntemlerin kullanılmasıyla zemin parametrelerinin özellikle de konsolidasyon parametrelerinin önemli ölçüde değiştiğini ve bu etkilerin göz ardı edilmemesini söylemişlerdir. Bu tür zeminler üzerine inşa edilen yapıları yüksekliği az olan (maksimum 3 katlı) ve orta yükseklikteki binalar (3-5 katlı) olarak ikiye ayırmışlardır. Yazarlar yüksekliği az olan binalar için üniform kazıkların, orta yükseklikteki binalar için ise temel ortasında uzun kenarlarda kısa kazıklar kullanılmasının oturmaları azaltacağını ifade etmişlerdir. Kazıklı radye hesabı için Randolph ve Wroth (1979)'ın önerdiği yöntemde kazık grubu için yazılan rjitlik matrisi kazık boyunu sabit alırken, yazarların geliştirdiği yöntemde kazık boyu değişken olabilmektedir. Ayrıca yazarlar bu çalışmalarında kazık grubu, radye temel ve kazıklı radye tasarım ilkelerini kısaca açıklamışlardır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaları kazık grupları ve kazıklı radye sistemi olarak ikiye ayırmak mümkündür.

Deneysel çalışmaların ilk bölümünde kazıklı temellerin ve kazık gruplarının davranışı araştırılmıştır. Kazık gruplarında en önemli etmen grup etkisidir. Daha önce yapılan çalışmalarda kazık aralığına bağlı olarak kazık grubunun taşıma gücünün ne kadar değiştiği tam olarak ifade edilmemiştir. Ortaya atılan bazı yaklaşımlar ise çok genel kalmakta ve her türlü zemin için uygun olmamaktadır. Bu bölümde orta sıkı kumlu zeminlerdeki kazıkların grup etkisi araştırılmıştır. Deneylerde; tek bir kazığın taşıma gücü ile farklı sayıda, çapta ve uzunluktaki kazıklardan oluşan kazık gruplarının taşıma gücü, uç dirençleri ve sürtünme dirençleri ayrı ayrı ölçülerek bulunmuştur.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde ise kazıklı radye sisteminin davranışı incelenmiştir. Daha önceki kısımlarda da bahsedildiği gibi kazıklı radye sisteminde geleneksel yöntemden farklı olarak radye temelin de bir miktar yük taşıdığı bilinmektedir. Fakat radye temel ile kazık gruplarının tasarım yükünü nasıl paylaştıkları hakkında net bilgiler mevcut değildir. Çizelge 4.1'de verilen 22 adet vaka analizi sonucu incelendiğinde radye temel ile kazık grubu arasındaki yük paylaşım oranının çok büyük bir aralıkta olduğu görülecektir. Bu konuda yapılan çalışmalar laboratuarda yapılan model deneylerle, arazi ölçümleriyle veya analitik yollarla yapılmıştır. Literatüre göz gezdirildiğinde, model deneyler çok küçük ölçekte yapılmış ve yerinde dökülmüş betonarme kazıklarla neredeyse hiçbir deney yapılmamıştır. Arazi ölçümlerinde ise inceleme sayısının az olmasından dolayı yeterince araştırma yapılamamıştır. Bütün bu sebeplerden dolayı sayısal analiz yöntemlerinin doğruluğu da tartışmalıdır. Gerek arazide gerekse laboratuarda yapılan çalışmaların artmasıyla kazıklı radye sisteminin davranışı daha net anlaşılacaktır.

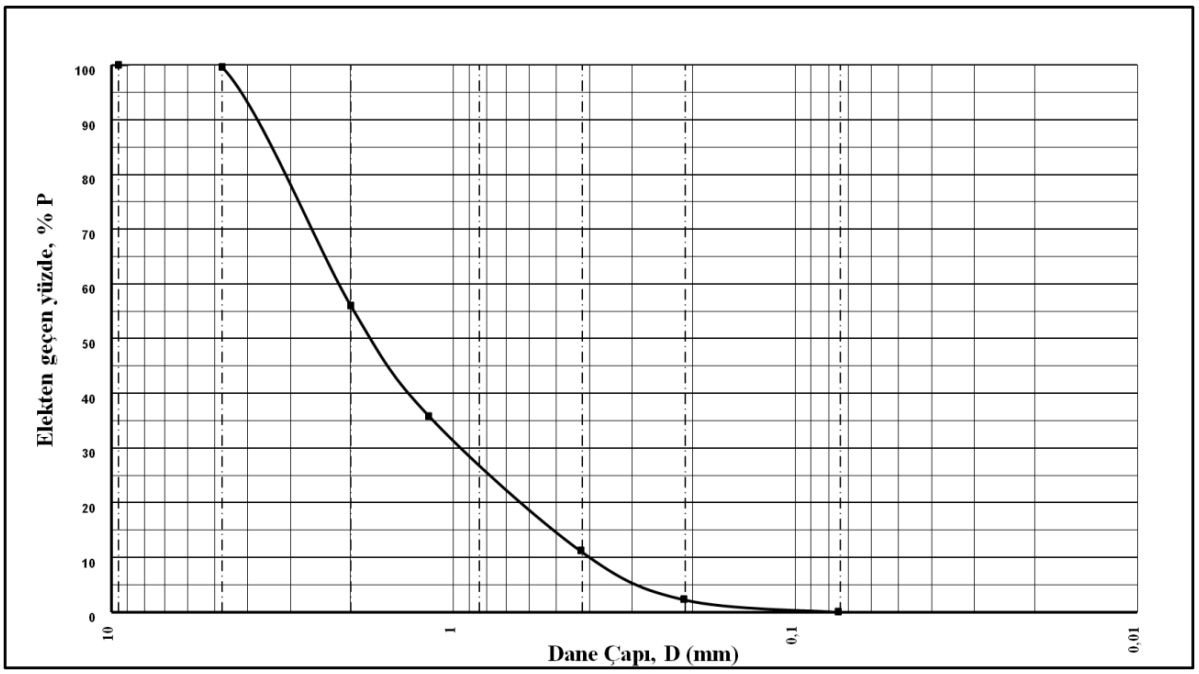
Deneysel çalışmalarımızda laboratuar şartlarında mümkün olabilecek maksimum çap ve boylardaki yerinde dökülmüş betonarme kazıklar kullanılmıştır ve model deneylerde arazi şartları olabildiğince temsil edilmeye çalışılmıştır. Bundan dolayı, kazık gruplarının ve kazıklı radye sisteminin davranışı gerçeğe yakın bir şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Çeşitli vaka analizi gözlem sonuçlarına göre kazık grubu ve radye temel arasındaki yük paylaşım oranları (Santis ve Russo, 2008)

Olay	Proje İsmi	Referans	s/D	L/B	Q_R/Q_T (%)
1	Multispan köprüsü	Van Impe ve De Clerq (1994)	3.8	1.00	27
2	Urawa binası	Yamashita ve ark. (1993)	7.8	0.64	51
3	Stonebridge parkı	Cooke ve ark. (1981)	3.6	0.65	23
4	Messe Turm	Sommer ve ark. (1991)	6.4	0.52	45
5	Çok katlı bina	Joustra ve ark. (1977)	5.2	0.70	22
6	Dashwood evi	Hight ve Green (1976)	3.0	0.50	19
7	Ev 1	Jendeby (1986)	6.5	2.10	8
8	Ev 2	Jendeby (1986)	10.5	2.20	66
9	Uppsala evi	Jendeby (1986)	11.2	2.20	64
10	Garigliano köprüsü	Russo (1996)	3.0	4.50	20
11	Messe Torhaus	Katzenbach ve ark. (2000)	3.5	1.14	20
12	Westend 1-DG bankası	Katzenbach ve ark. (2000)	6.0	0.63	50
13	Japan Centre	Katzenbach ve ark. (2000)	5.5	0.60	60
14	Forum	Katzenbach ve ark. (2000)	6.0	0.70	62
15	Kongre merkezi	Katzenbach ve ark. (2000)	5.8	1.00	60
16	Main Kulesi	Katzenbach ve ark. (2000)	3.3	0.50	15
17	Eurotheum	Katzenbach ve ark. (2000)	5.2	0.80	70
18	Treptowers	Katzenbach ve ark. (2000)	6.5	0.38	52
19	Ulusal Westiminister Bankası	Hooper (1979)	3.8	0.50	29
20	Hide parkı	Hooper (1979)	4.3	0.90	39
21	Serbat 12	Russo ve ark. (2004)	5.8	0.92	48
22	Serbat 14	Russo ve ark. (2004)	5.0	1.10	48

4.1. Zeminin Fiziksel Özellikleri

Kazık grupları ve kazıklı radye sisteminin incelendiği model deneylerde yıkanmış doğal kum kullanılmıştır. Ayrıca laboratuarda tozumayı azaltmak için agrega ocağından getirilen kum 200 numaralı elekten yıkanmıştır. ASTM D 421 ve D 422 standartlarına uygun yapılan elek analizi sonucunda bu zemine ait granülometri eğrisi Şekil 4.1'de verilmiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre zemin sınıfı SP (kötü derecelenmiş kum) olarak belirlenmiştir. ASTM D 854 standartlarına uygun yapılan özgül ağırlık deneyinde ise zeminin özgül yoğunluğu 2.7 olarak bulunmuştur. ASTM D 4253-83 standardına göre zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 18.5 kN/m^3 ve ASTM D 4254-83 standardına göre ise zeminin minimum kuru birim hacim ağırlığı 14.7 kN/m^3 olarak tayin edilmiştir. Deney kumuna ait temel fiziksel özellikler ile zemin sınıfı Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deney kumuna ait granülometri eğrisi

Çizelge 4.2. Deney kumunun fiziksel özellikleri

Çakıl oranı		0
Kum oranı		%100
İnce dane oranı		0
Üniformluk katsayısı	C_u	5,12
Eğrilik katsayısı	C_c	1,03
Zemin sınıfı (USCS)		SP
Birim hacim ağırlık	γ_s (kN/m^3)	27
Maksimum kuru birim hacim ağırlık	$\gamma_{k,max}$ (kN/m^3)	18,5
Minimum kuru birim hacim ağırlık	$\gamma_{k,min}$ (kN/m^3)	14,7
Maksimum boşluk oranı	e_{max}	0,84
Minimum boşluk oranı	e_{min}	0,46

4.2. Kazıklı Temellerin ve Radye Temelin İmal Edilmesi

Model deneylerde kullanılacak kazık ve radye temelin boyutları şu şekilde belirlenmiştir: Kazıklı temellerin çapları 60 mm ve 70 mm, boyları ise 400 mm ve 600 mm olarak seçilmiştir. Radye temelin boyutları ise 320 mm kenar uzunluklarında ve 50 mm kalınlığında seçilmiştir.

Tek kazık veya kazık grubu deneylerinde, kazıkların toplam taşıma gücünün ve yük-oturma ilişkisinin saptanmasının yanında kazık uç direncinin ve çevre sürtünmesinin ayrı ayrı ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle kazıkların uç kısmına yük hücresi (load ceel) yerleştirilmiştir. Ayrıca kazık grubu deneylerinde kazıklar arası mesafeyi ayarlayabilmek ve kazıkların eğri durmasını önlemek amacıyla, kazıkları

birbirine bağlamaya yarayan ve zemin yüzeyinden daha yukarıda bulunan çelik plakalar kullanılmıştır. Bu nedenlerden dolayı; kazıklar imal edilirken kazık ekseninde bulunan, kazık boyunca uzanan ve her iki uçtan dışarı çıkan vidalar yerleştirilmiştir. Bu vidaların alt kısmına yük hücresi, üst kısımlardaki çıkıntılara ise gerekli durumlarda bir plaka yerleştirilmiştir.

Kazıklar imal edilirken, kazık ekseninde bulunan vidaları sabitlemek için kazık ucu seviyesinde bir plaka yerleştirilmiş ve vidalar bu plakadaki deliklere tutturulmuştur (Şekil 4.2). Daha sonra bu plaka 60 cm çapında ve 110 cm yüksekliğindeki tankın içerisine ve istenilen kazık boyu seviyesindeki derinliğe indirilmiştir (Şekil 4.3). Bundan sonra vidaların dışına, istenilen kazık çapını elde etmeye yarayacak ve muhafaza borusu görevi yapan farklı çaptaki borular yerleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra borular arasında kalan boş alan kumlu zeminle doldurulmuştur (Şekil 4.4). Daha sonra boruların içerisine beton dökülmüş, eş zamanlı olarak da bu borular kazık eksenelliğini bozmadan zeminden çekilmiştir. Son olarak vidaların düşeyliğinin bozulmaması için vidalar alttaki plakayla aynı özelliklere sahip plaka ile sabitlenmiştir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6).



Şekil 4.2. Kazık eksenindeki vidaların sabitlenmesi



Şekil 4.3. Vidaların deney tankına yerleştirilmesi



Şekil 4.4. Muhafaza borularının yerleştirilmesi ve etrafının zeminle doldurulması

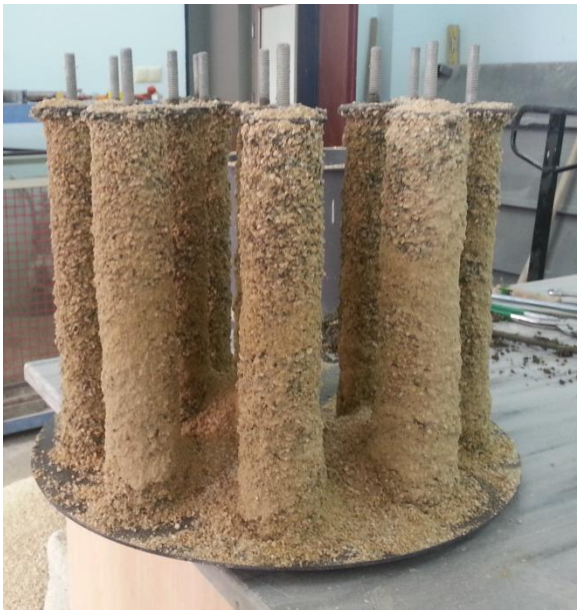


Şekil 4.5. Muhafaza borularının içerisine beton dökülmesi



Şekil 4.6. Muhafaza borularının çekilmesi ve beton dökme işlemi

Yerinde dökme betonarme kazıklar imal edildikten sonra zeminden çıkarılırken kırılmaması ve bir miktar dayanım kazanması için 2 gün zemin içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra zeminden çıkarılan kazıklar suyun içerisine bırakılarak 7 gün süreyle bekletilmiş ve yeterli dayanıma ulaşması sağlanmıştır. Farklı çapta ve boyda üretilen kazıklar Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



(a) İmal edilen kazıkların tankın içerisinden çıkarılması



(b) Soldan sağa doğru: D60 L400 (5 adet), D60 L600 (5 adet), D70 L400 (4 adet) ve D70 L600 (4 adet). Resimde kazıkların alt ucuna yük hücresi, üst tarafına ise plaka monte etmek için yer alan vidalar ile tank içerisine yerleştirilen zemin seviyesini ayarlayabilmek için çizilen kırmızı çizgiler yer almaktadır.

Şekil 4.7. İmal edilen yerinde dökme betonarme kazıklar

Radye temelin kenar uzunlukları temel altına yerleştirilecek kazık grubunun ölçülerine göre belirlenmiştir. Kazıklı radye sistemi deneylerinde 60 mm çapında ve 400 mm uzunluğundaki kazıklar kullanılacağından ve en büyük kazık aralığı 4D olduğundan dolayı, radye temelin kenar uzunlukları 320 mm olarak seçilmiştir. Rijit bir temel elde edebilmek, kayma ve zımbalama gerilmelerine karşı koyabilmek için ise temel kalınlığı 50 mm seçilmiştir. Ayrıca temeldeki eğilme momentlerine karşı koyabilmek için de 8 mm çapında donatılar kullanılmıştır (Şekil 4.8).



a) Kalıbın yağlanması ve alt sıra donatılarının yerleştirilmesi



b) Betonun dökülmesi ve şişlenmesi



c) Üst sıra donatılarının yerleştirilmesi



d) Temel tabanının pürüzlendirilmesi

Şekil 4.8. Radye temelin imal edilmesi

4.3. Deney Düzeneğinin Tanıtılması

Deney düzeneğinde yer alan aletler ve araç gereçler aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

4.3.1. Yükleme sistemi

Model deneylerde kullanılan yükleme sistemi Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu sistemde; 1150 x 600 mm boyutlarında ve 55 mm kalınlığındaki iki rijit plaka, dört köşesinden çelik profillerle sabitlenmiştir. Üst plakanın ortasında ise 10 ton kapasiteli ve hem aşağı hem de yukarı yönde hareket edebilen bir hidrolik baskı ünitesi mevcuttur. Hidrolik baskı ünitesinin altında ise sisteme verilen yükü ölçmeye yarayan 10 ton kapasiteli ve hem basınç hem de çekme yönünde çalışan bir yük hücresi mevcuttur. Bu hidrolik baskı ünitesinin altına 1100 mm yüksekliğinde ve 600 mm çapında bir tank eksenel olarak yerleştirilmiştir. Kazık grubu ve kazıklı radye sistemine ait deneyler bu tankın içerisinde yapılmıştır.

Yükleme sisteminde yükleme hızı kullanıcı tarafından ayarlanabilmektedir. Kazık grubu ve kazıklı radye sistemi deneylerinde standartlara uygun olarak 2.5 mm/dk yükleme hızı seçilmiştir.



Şekil 4.9. Soldan sağa doğru—yükleme sistemi ve deney tankı, veri toplama ünitesi ve verilerin bilgisayar ortamına aktarılması

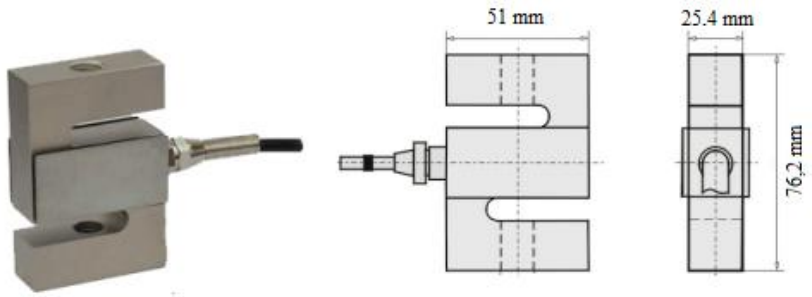
4.3.2. Yük hücresi

Yük hücreleri, hem akademik çalışmalarda ve laboratuarlarda, hem de endüstriyel tesislerde, depolama tanklarında, silolarda ve pistonlarda sıklıkla kullanılan yük ya da kuvvet ölçme sensörüdür. Sadece basma yönünde, basma-çekme yönlerinde ya da farklı konfigürasyon ve geometrilerde (eğilme, kesme vb.) çalışan modelleri vardır. İki yönde çalışanlarına kuvvet sensörü (force transducer) adı da verilebilmektedir.

Temel çalışma prensibi, gerinim pullarına (strain gauge) dayanır. Birim deformasyon ölçebilen bu küçük pullar, çeşitli konfigürasyonlarda özellikleri tanımlı çelikler üzerine yapıştırılır. Gerinim pulları; ölçtükleri yük nedeniyle oluşan elastik bölgedeki fiziksel deformasyonu, elektriksel sinyallere dönüştürerek veri toplama sistemi tarafından algılanmasını sağlarlar. Fiziksel deformasyon verisi, birim deformasyon formatında ölçüldüğünde, çeşitli malzeme özelliklerinden (elastik modül, poisson oranı vb.) yüke ulaşmak mümkündür. Tüm bu parametrelerden ulaşılması gerekli kalibrasyon adımları fabrika aşamasında yapılarak, yük hücreleri kullanıcıya birim yük başına ne kadar elektriksel voltaj çıkışı alabileceğini hesaplayabileceği bir katsayı ile gelir (http://www.teknikdestek.com.tr/loadcell.html).

Farklı boyut ve özelliklerde birçok çeşit yük hücresi mevcuttur. Bunlar; yassı tip, s-tipi, silindir, köprü, simit, tek-noktalı ve köprü tipi yük hücreleridir.

Kazık grubu ve kazıklı radye sistemine ait deneylerde, boyutlarının küçük olmasından dolayı 1 ton kapasiteli s-tipi yük hücreleri kullanılmıştır. S-tipi yük hücreleri görüntüleri itibariyle de S ya da Z şeklinde olan, özellikle düşük yüklerin ölçüleceği uygulamalar için montaj kolaylığı ve yüksek ölçüm hassasiyeti sağlayan kuvvet sensörleridir. S-tipi yük hücresinin özellikleri Şekil 4.10 ve Çizelge 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.10. 1 ton kapasiteli yük hücresi

Çizelge 4.3. S-tipi yük hücresinin teknik özellikleri

Kapasite	50, 100, 150, 200, 250, 300, 500, 750 kg, 1, 1.5, 2, 3, 5 ton
Hassasiyet	3±0.003 mV/V
Çalışma sıcaklığı	-30◦C ~ +70◦C
Maksimum güvenli yük	%120
Sınır taşıma gücü	%150
Gövde malzemesi	Paslanmaz çelik

S-tipi yük hücreleri giderek eski tipteki yükleme halkalarının (Load-Ring) yerlerini almışlardır. Tek/üç eksenli, kesme kutusu, serbest basınç deney makinelerinin ölçümlerinin elektronik hale getirilmesinde ve diğer uygulamalarda sıklıkla kullanılırlar.

4.3.3. Veri toplama üniteleri

Kazık grubu ve kazıklı radye sistemi deneylerinde yüzeysel ve derin temel elemanlarının yükleme altında yaptığı oturmalar ölçülmüştür. Bunun için, temel elemanlarının gerekli yerlerine monte edilmiş yük hücreleri ve deplasman ölçerlerin aktardığı veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Yük hücrelerinin ilettiği sinyalleri dijital veriye dönüştürmek için, 8 kanallı ve saniyede 8 veri aktarabilen "genel amaçlı veri toplama sistemi" kullanılmıştır (Şekil 4.11). Ayrıca, hassas dijital deplasman ölçerlerden gelen verileri bilgisayar ortamına aktarabilmek için de 4 kanallı "sinyal veri toplama sistemi" kullanılmıştır (Şekil 4.12). Veri toplama ünitelerinden gelen verileri bilgisayar ortamına aktarmaya yarayan "TDG Coda" yazılımı sayesinde ise hiçbir veri kaybolmadan ve güvenilir bir şekilde depolanmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.11. Genel amaçlı veri toplama sistemi



Şekil 4. 12. Sinyal veri toplama sistemi



Şekil 4.13. Tekil kazık yükleme deneyinde verilerin bilgisayarda depolanması—deney sırasında 4.84 mm oturma anındaki (D102) kazığın taşıdığı toplam yük (108) ve kazık ucuna aktarılan yük (104)

4.4. Deney Kumunun Tanka Yerleştirilmesi

Yüzeysel veya derin temellerin taşıma gücünü etkileyen en önemli etmenlerden bazıları zemin cinsi, zeminin kıvamı veya sıkılık derecesi ile tanelerin diziliş şeklidir. Kazık grubu ve kazıklı radye sistemi deneylerinde kullanılacak kumlu zeminin özellikleri daha önce verilmişti. Tüm deneylerde zeminin sıkılığını aynı oranda tutmak için kumlu zemin deney tankına sürekli aynı koşullarda yerleştirilmiştir. Bunun için kumlu zemin deney tankına doldurulurken bir huniden akıtılarak kendi ağırlığında akması sağlanmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Deney kumunun huniden akıtılarak tanka yerleştirilmesi

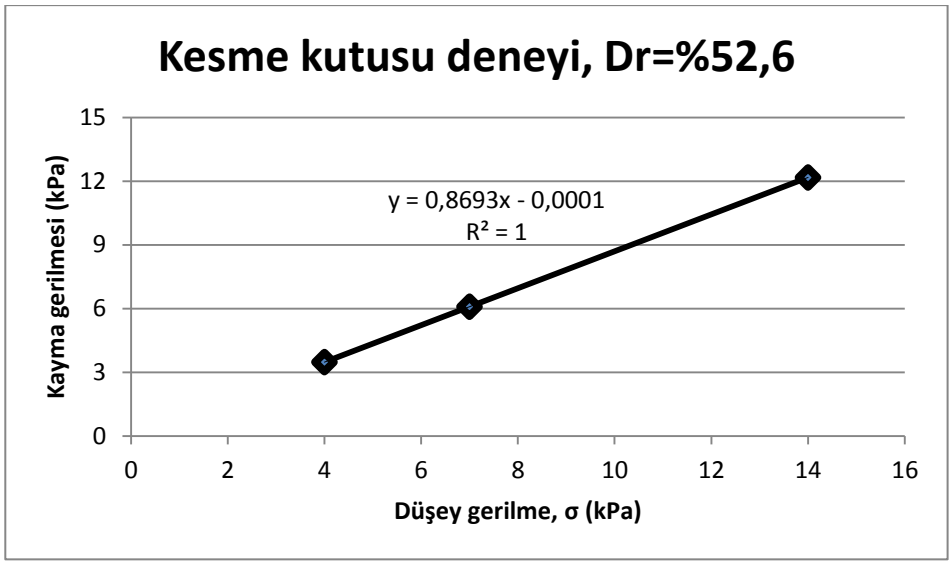
Zeminin maksimum ve minimum boşluk oranları sırasıyla 0.84 ve 0.46, tane birim hacim ağırlığı ise 27 kN/m^3 olarak belirlenmişti. Zeminin deney tankına huniden akıtılarak doldurulması sonucu kuru yoğunluğunun 16.5 kN/m^3 olduğu belirlenmiştir. Zeminin bu durumdaki boşluk oranı ise;

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{1+e} \tag{83}$$

bağıntısı kullanılarak 0.64 bulunmuştur. Deneylerde kullanılan zeminin rölatif sıkılığı ise;

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \tag{84}$$

bağıntısı kullanılarak %52,6 olarak bulunmuştur. Deney kumunun bu sıkılıktaki kayma direnci parametrelerinin (c, Ø) bulunabilmesi için de ASTM D 3080-98 standardına uygun olarak kesme kutusu deneyleri yapılarak kırılma zarfları çizilmiştir (Şekil 4.15). Kesme kutusu deneyleri sonucunda zeminin kohezyonu, c=0 ve içsel sürtünme açısı, Ø=41° olarak belirlenmiştir.



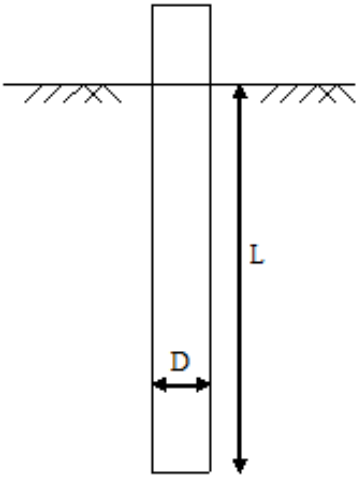
Şekil 4.15. Kesme kutusu deneyinden elde edilen kırılma zarfı

4.5. Deney Programı

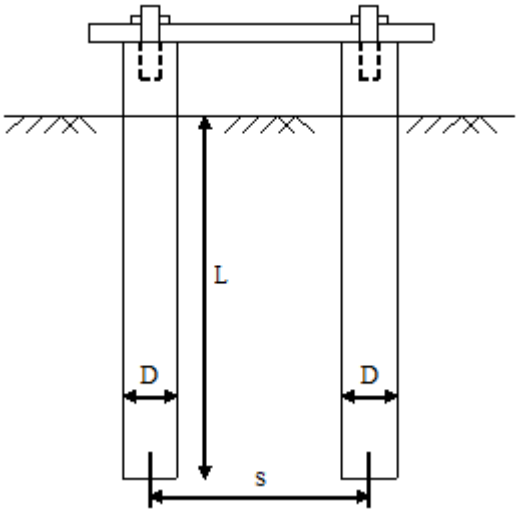
4.5.1. Kazık grubu deneyleri

Kazık grubu deneylerinde kazıkların uç kısmına yük hücresi yerleştirilmiştir ve kazıkların uç direnci ile çevre sürtünme direnci 40-45 mm oturma miktarına kadar ayrı ayrı ölçülmüştür. Fakat yük hücresi dikdörtgen taban alanlı ve kazıklar daire kesitli olduğundan dolayı, yük hücrelerinin altına her kazığın çapında ve 30 mm yüksekliğinde silindirik çelik malzemeler yerleştirilmiştir. Ayrıca, yük hücrelerini dış etkilerden korumak ve yük hücreleri buyunca kazık-zemin pürüzlülüğünü sağlamak amacıyla yük hücrelerinin çevresi zımpara kâğıdıyla kaplanmıştır. Aynı şekilde yük hücrelerinin altına yerleştirilen çelik malzeme ile zemin arasındaki pürüzlülüğü artırmak için de kazık tabanına zımpara kağıdı yapıştırılmıştır.

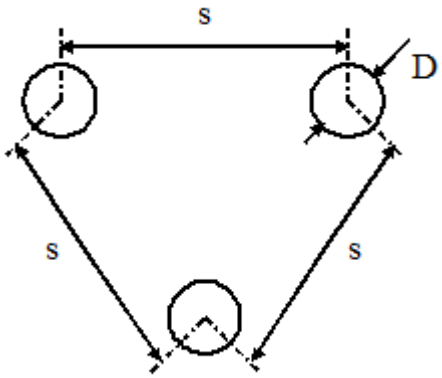
Kazık grubu deneyleri için seçilen parametreler ve deney programı Çizelge 4.3'de verilmiştir. Kazık grubuna ait model deneyler için ilk önce farklı boy ve çaptaki tekil kazıkların yük-oturma ilişkisi incelenmiştir. Daha sonra, Çizelge 4.4'de verilen deney programına göre farklı çap ve boydaki kazıklar 2D, 3D ve 4D aralıklarla zemin içerisine yerleştirilerek yüklenmiştir. Bu gruba ait deneylerde 2,3 ve 4 kazıktan oluşan kazık gruplarının yük taşıma kapasiteleri incelenerek kazıklar arasındaki etkileşimler araştırılmıştır (Şekil 4.16). Ayrıca, deneylerin güvenilirliği için ve deney hatalarını en aza indirmek amacıyla tüm deneyler en az iki kez tekrar edilmiştir.



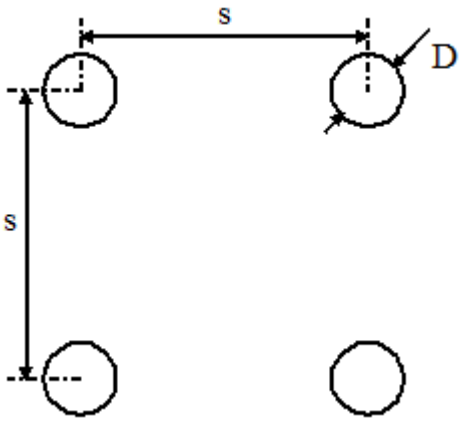
a) Tekil Kazık



b) İki kazıktan oluşan kazık grubu



c) Üç kazıktan oluşan kazık grubu



d) Dört kazıktan oluşan kazık grubu

Şekil 4.16. Kazık yerleşim planları

Çizelge 4.4. Kazık grubuna ait deney programı

Deney Türü	Deney No	Kazık Sayısı	Kazık Çapı, D (mm)	Kazık Uzunluğu, L (mm)	Kazık Aralığı, s	Deney Tekrarı	Şekil
Tekil kazık	1	1	60	400	-	2	Şekil 4.17-4.20
	2	1	60	600	-	2	Şekil 4.17-4.20
	3	1	70	400	-	2	Şekil 4.17-4.20
	4	1	70	600	-	2	Şekil 4.17-4.20
Kazık Grubu	5	2	60	400	2D	2	Şekil 4.21-4.24
	6	2	60	400	3D	2	Şekil 4.21-4.24
	7	2	60	400	4D	2	Şekil 4.21-4.24
	8	2	60	600	2D	2	Şekil 4.21-4.24
	9	2	60	600	3D	2	Şekil 4.21-4.24
	10	2	60	600	4D	2	Şekil 4.21-4.24
	11	2	70	400	2D	2	Şekil 4.21-4.24
	12	2	70	400	3D	2	Şekil 4.21-4.24
	13	2	70	400	4D	2	Şekil 4.21-4.24
	14	2	70	600	2D	2	Şekil 4.21-4.24
	15	2	70	600	3D	2	Şekil 4.21-4.24
	16	2	70	600	4D	2	Şekil 4.21-4.24
	17	3	60	400	2D	2	Şekil 4.25-4.27
	18	3	60	400	3D	2	Şekil 4.25-4.27
	19	3	60	400	4D	2	Şekil 4.25-4.27
	20	4	60	400	2D	2	Şekil 4.28-4.31
	21	4	60	400	3D	2	Şekil 4.28-4.31
	22	4	60	400	4D	2	Şekil 4.28-4.31



Şekil 4.17. Tekil kazık—D60, L400. Yük hücresinin kazık ucuna monte edilmesi



Şekil 4.18. Tekil kazık—D60, L600. Yük hücresinin zımpara kağıdıyla çevrelenmesi



Şekil 4.19. Tekil kazık— D70, L400. Zeminin yerleştirilmesi



Şekil 4.20. Tekil kazık— D70, L600. Yükleme durumu



Şekil 4.21. İki kazıktan oluşan kazık grubu—D60, L600, s=4D. Aynı şekilde yukarıdaki levha kullanılarak farklı çap ve boydaki kazıklar 2D, 3D ve 4D kazık aralığında monte edilmiştir.



Şekil 4.22. İki kazıktan oluşan kazık grubu—D60, L600, s=2D. Kazıkların tankın içerisine yerleştirilmesi ve düşeyliliğinin kontrolü



Şekil 4.23. İki kazıktan oluşan kazık grubu—D60, L400, s=2D. Kazık çevresinin zeminle doldurulması



Şekil 4.24. İki kazıktan oluşan kazık grubu—D70, L400, s=3D. Yükleme durumu



Şekil 4.25. Üç kazıktan oluşan kazık grubu—D60, L400, s=2D. Aynı şekilde bu kazıklar kullanılarak kazıklar 3D ve 4D kazık aralıklarında monte edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.26. Üç kazıktan oluşan kazık grubu—a, b) Kazıkların tankın içerisinde monte edilmesi



Şekil 4.27. Üç kazıktan oluşan kazık grubu—D60, L400, s=3D



Şekil 4.28. Dört kazıktan oluşan kazık grubu—D60, L400, s=4D. Aynı şekilde bu kazıklar kullanılarak kazıklar 2D ve 3D kazık aralıklarında monte edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.29. Dört kazıktan oluşan kazık grubu—a, b) Kazıkların tankın içerisinde monte edilmesi



(a) Kazık grubunun yüklenmesi durumu



(b) Yükleme sırasında yük-oturma verilerin kaydedilmesi—D101 ve D102 kazık grubunun oturmasını, 104, 105, 106 ve 107 kazık uçlarında bulunan yük hücrelerinin ölçtüğü değerleri, 108 ise kazık grubunun taşıdığı toplam yükü göstermektedir.

Şekil 4.30. Dört kazıktan oluşan kazık grubu—yükleme durumu ve verilerin kaydedilmesi



(a) D60 L400 s=2D



(b) D60 L400 s=3D



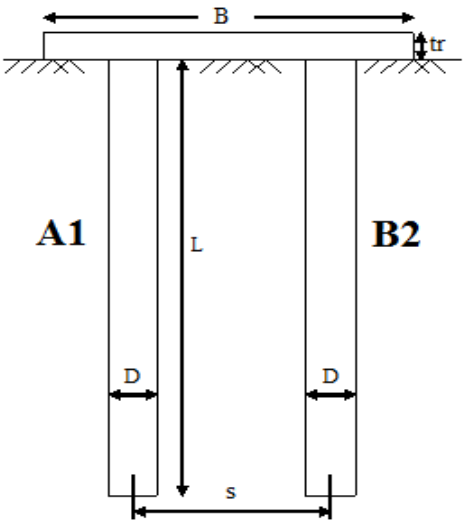
(c) D60 L400 s=4D

Şekil 4.31. Dört kazıktan oluşan kazık grubu—a, b, c) yükleme sonrasında kazık grubunun görünüşü

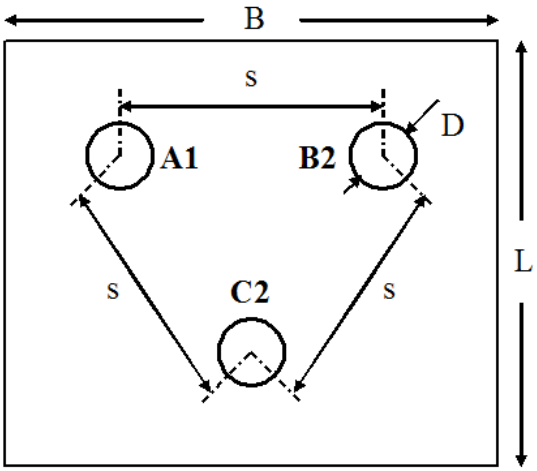
4.5.2. Kazıklı radye sistemi deneyleri

Kazıklı radye sistemi deneylerinde 320 mm kenar uzunluklarına ve 50 mm kalınlığına sahip kare radye temel kullanılmıştır. Bu radye temelin altına 60 mm çapında ve 400 mm uzunluğundaki kazıklar Çizelge 4.5'de verilen deney programına göre yerleştirilmiştir. Kazıklı radye sistemi deneylerinde de kazık grubu deneylerinde olduğu gibi 2, 3 ve 4 kazıktan oluşan kazık grupları 2D, 3D ve 4D kazık aralıklarında yerleştirilmiştir (Şekil 4.32).

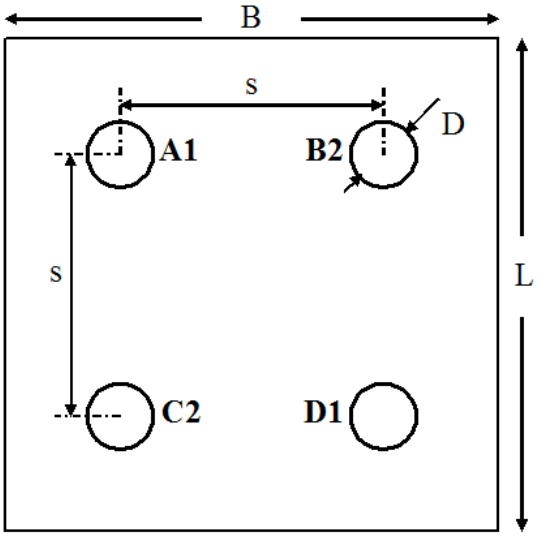
Kazıklı radye sistemi deneylerinde hem radye temele aktarılan net yük hem de kazık grubunun taşıdığı yük belirli bir oturma değerine kadar belirlenmek istenmiştir. Radye temel eksenel ve simetrik olarak yüklendiğinden dolayı her kazığın altına ve üstüne yük hücresi yerleştirilmemiştir. Bunun için kazıkların belirli yerlerine yük hücresi monte edilmiştir. Şekil 4.32'de verilen kazık yerleşim planında A1 ve D1 ile gösterilen kazıkların sadece altına, B2 ve C2 ile gösterilen kazıkların ise hem altına hem de üstüne yük hücresi yerleştirilmiştir. Bu sayede temel zemininin taşıdığı yük ile kazıkların uç ve çevre sürtünme dirençleri ayrı ayrı bulunmuştur.



(a) Radye temelin altına 2 kazık uygulaması



(b) Radye temelin altına 3 kazık uygulaması



c) Radye temelin altına 4 kazık uygulaması

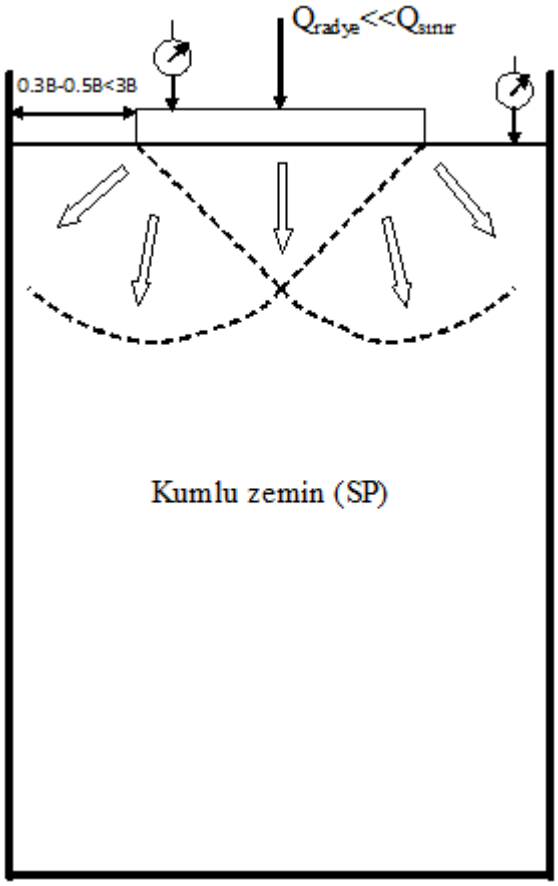
Şekil 4.32. Kazıklı radye sisteminde kazık gruplarının yerleşim planı

Çizelge 4.5. Kazıklı radye sistemine ait deney programı

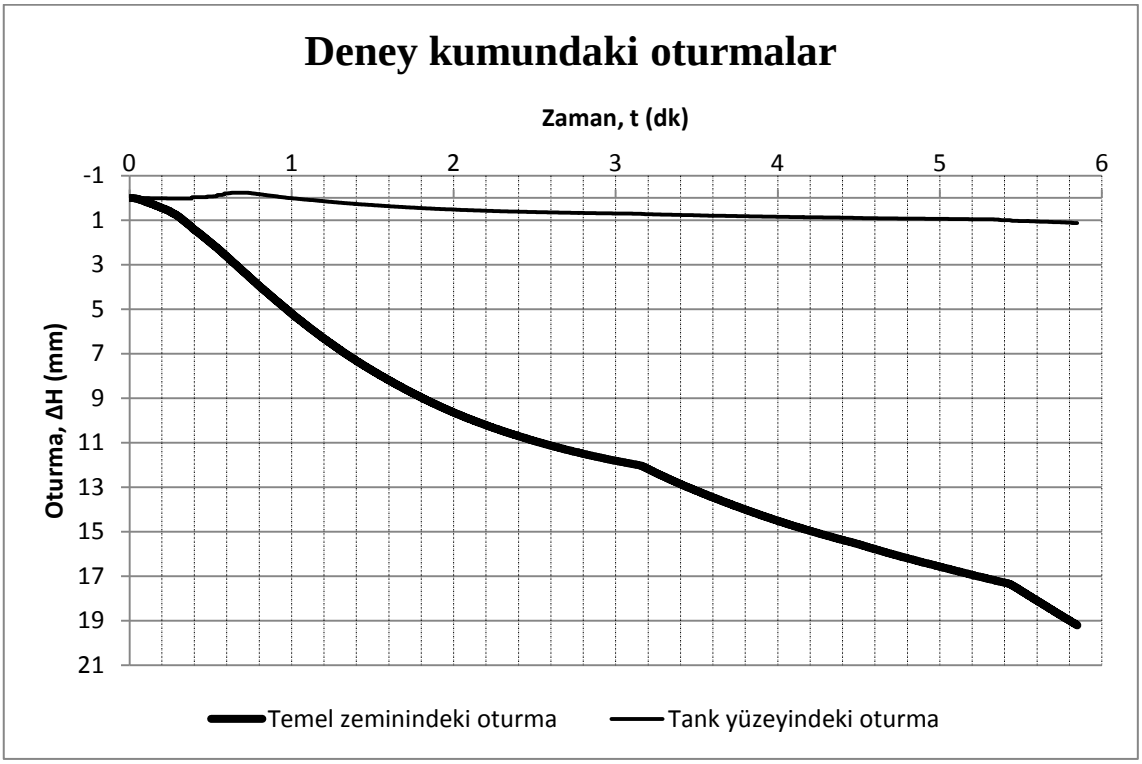
Deney Türü	Deney No	Radye Temel			Kazık Grubu				Deney Tekrarı	Şekil
		B (mm)	L (mm)	t_r (mm)	n	D (mm)	L (mm)	s		
Radye Temel	1	320	320	50	-	60	400	-	2	Şekil 4.35
Kazıklı Radye Sistemi	2	320	320	50	2	60	400	2D	2	Şekil 4.36 - 4.37
	3	320	320	50	2	60	400	3D	2	
	4	320	320	50	2	60	400	4D	2	
	5	320	320	50	3	60	400	2D	2	Şekil 4.38 - 4.39
	6	320	320	50	3	60	400	3D	2	
	7	320	320	50	3	60	400	4D	2	
	8	320	320	50	4	60	400	2D	2	
	9	320	320	50	4	60	400	3D	2	Şekil 4.40
	10	320	320	50	4	60	400	4D	2	

Kazıklı radye sistemi deneyleri de 600 mm çapında ve 1100 mm yüksekliğindeki tankın içerisinde gerçekleştirilmiştir. 320mmx320mm boyutlarındaki radye temelin bu boyutlardaki tankın içerisinde yüklenmesi doğru olmayabilir. Çünkü temel tabanında oluşacak kayma yüzeyleri tankın çeperine ulaşırsa temel zemininde meydana gelecek gerilmeler sağlıklı bir şekilde belirlenemez. Bu nedenden dolayı deneylerin güvenilirliği açısından şöyle bir yaklaşım benimsenmiştir: Radye temelin sınır taşıma gücüne kadar yüklenmesi amaçlanmadığından dolayı kayma yüzeyleri tankın çeperine ulaşmadan deneyler sonuçlandırılmıştır (Şekil 4.33). Bu sebeple tüm deneylerde radye temelin oturmasıyla birlikte tankın çeperine sınır olan zemindeki oturmalar da takip edilmiştir. Tank yüzeyine yakın olan zemindeki oturmaların 0.5-2 mm seviyelerinde kaldığı görülmüştür (Şekil 4.34).

Kazıklı radye sistemi deneyleri en fazla 20 mm oturma değerine kadar yürütülmüştür. Bu yaklaşımla önceki kısımda yapılan kazık grubu deneyleri ile benzer özellikteki kazık gruplarının kullanıldığı kazıklı radye sisteminin kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda radye temelin etkisi, radye temel ile kazık grupları arasındaki yük paylaşım mekanizması ve kazıkların yerleşim planının bu mekanizmaya etkisi daha net bir biçimde anlaşılacaktır.



Şekil 4.33. Kazıklı radye deneylerinde temel zeminindeki ve tank çeperine sınır olan zemindeki oturmaların ölçülmesi. Radye temel sınır taşıma gücünün çok altında yüklendiği için kayma yüzeyleri tank yüzeyine ulaşmamıştır.



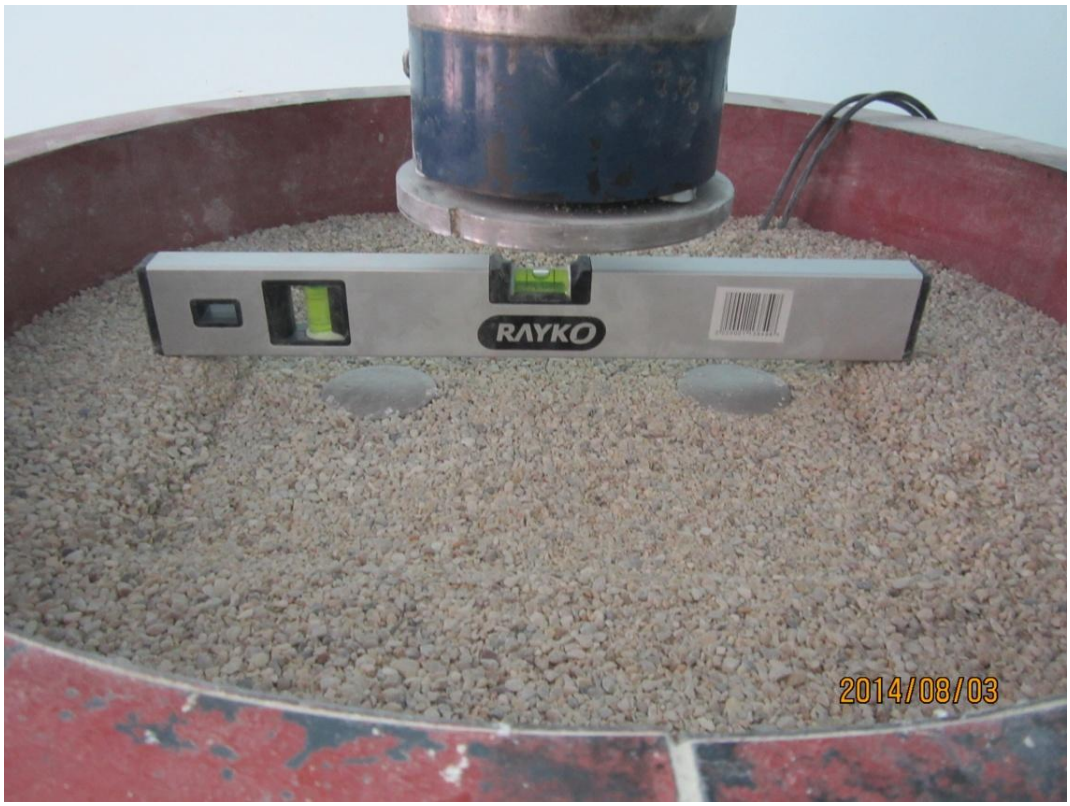
Şekil 4.34. Kazıklı radye deneylerinde kumda meydana gelen oturmaların zamanla değişimi



Şekil 4.35. Radye temelin yüklenmesi ve deney kumundaki oturmaların ölçülmesi



Şekil 4.36. Kazıklı radye sistemi—B320, L320, n=2, D60, L400, s=3D



Şekil 4.37. Kazıklı radye sisteminde üniform oturma—B320, L320, n=2, D60, L400, s=3D.



Şekil 4.38. Kazıklı radye sistemi—B320, L320, n=3, D60, L400, s=3D



Şekil 4.39. Radye temel altına üç kazık uygulamasına ait yük-oturma verilerinin kaydedilmesi



Şekil 4.40. Kazıklı radye sistemi—B320, L320, n=4, D60, L4000, s=3D

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Kazık grubu ve kazıklı radye sistemine ait olan deney sonuçları bu bölümde verilmiştir.

5.1. Kazık Grubu Deney Sonuçları

Kazık grubu deneylerinde; farklı çap, boy ve sayıdaki kazıklar değişik aralıklarla zemin içerisine yerleştirilerek yükleme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde; her bir kazığın taşıdığı uç direnci ile çevre sürtünmesi direnci ayrı ayrı ölçülerek, kazıkların hem tek başlarına hem de grup halinde yük taşıma davranışları incelenmiştir. Bunların sonucunda kazıklarda grup etkisi nedeniyle sınır taşıma gücünde meydana gelen azalmalar da incelenmiştir. 4. bölümde verilen deney programına uygun olarak yapılan deneylerde tekil kazıklara ve kazık gruplarına ait olan yük-oturma grafikleri aşağıda verilmiştir. Ayrıca her bir deney için kazık çapına ve kazık boyuna bağlı olan göreceli derinliklerdeki yük-birim oturma grafikleri de verilmiştir. Kazık çapına bağlı birim oturma miktarı $\frac{\Delta H}{L}\times 100$, kazık boyuna bağlı olan birim oturma miktarı ise $\frac{\Delta H}{D}\times 100$ ifadesi ile belirlenmiştir.

5.1.1. Tekil kazık deney sonuçları

Her bir kazığın tek başına taşıdığı sınır yük kapasitesi belirlendikten sonra, kazıkların grup içerisinde iken sınır yük kapasitelerindeki değişimler daha rahat bir şekilde anlaşılacaktır.

Tekil kazık yükleme deneylerinde kullanılan kazıklar aşağıda verilmiştir ve bu kazıklara ait yük-oturma ile yük-birim oturma grafikleri Ek 1'de verilmiştir.

D=60 mm, L=400 mm
D=60 mm, L=600 mm
D=70 mm, L=400 mm
D=70 mm, L=600 mm

Deneylerde kullanılan tekil kazıkların teorik olarak yük taşıma kapasiteleri Çizelge 5.1.1'de, deney sonuçlarından elde edilen ve kazık çapının %10'una karşılık gelen oturma değerlerindeki yük taşıma kapasiteleri Çizelge 5.1.2'de ve deneylerden elde edilen yük-oturma grafiklerinin yorumlanmasından elde edilen yük taşıma kapasiteleri Çizelge 5.1.3'de verilmiştir. Tüm sonuçlarda kazıkların uç direnci ($Q_{uç}$), çevre sürtünmesi direnci (Q_{yan}) ve toplam yük taşıma kapasiteleri (Q_{top}) ayrı ayrı hesaplanmış veya deneysel olarak gözlenmiştir. Bunun sonucunda taşıma gücü teorileri sınanmıştır.

Deney sonuçlarına ait grafikler incelendiğinde çevre sürtünmesi direncinin belirli bir oturma değerinden sonra artmadığı fakat uç direncinin sürekli arttığı görülmüştür. Yani kazık uç direncine ait eğrinin doğrusala yakın devam ettiği ve eğrinin eğiminde belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni ise şudur: Deneyler orta sıkılıktaki kum içersinde yapılmıştır ve kazık eksenel yükleme sonucu altındaki zemini sıkıştırmaktadır. Yükleme devam ettikçe kazık ucundaki zeminin sıkılığı artmakta, bunun sonucunda da zeminin taşıma gücü artmaktadır. Bunun sonucu olarak uç direnci doğrusala yakın bir şekilde artmaktadır. Bu nedenlerden dolayı deneylerden elde edilen grafikler yorumlanırken şu yöntem izlenmiştir: Çevre sürtünmesi direnci, uç direnci ve toplam taşıma gücüne ait eğrilerde başlangıç eğiminin değişmeye başladığı oturma değerlerindeki yük sınır taşıma gücü kabul edilmiştir. Bunun sonucunda uç direnci ve çevre sürtünmesi direncinin buna bağlı olarak da toplam taşıma gücünün farklı oturma değerlerinde mobilize olmaya başladığı görülmüştür. Bu yorumlamalar sonucunda elde edilen oturma değerlerinin ise Çizelge 2.2.7'de verilen izin verilebilir oturma miktarlarını aşmadığı veya 1-2 mm geçtiği görülmüştür (Çizelge 5.1.3).

Çizelge 5.1.1. Teorik yaklaşımlarla hesaplanan sınır taşıma gücü

	$Q_{uç}$ (kN)	Q_{yan} (kN)	Q_{top} (kN)
D60 L400	1,978	0,075	2,053
D60 L600	2,908	0,168	3,076
D70 L400	2,719	0,087	2,806
D70 L600	3,985	0,196	4,181

Çizelge 5.1.2. Çapın %10'u kıstasına göre bulunan sınır taşıma gücü

	$Q_{uç}$ (kN)	Q_{yan} (kN)	Q_{top} (kN)
D60 L400	0,965	0,656	1,625
D60 L400 (tekrar)	0,494	0,666	1,16
D60 L600	0,879	1,050	1,929
D60 L600 (tekrar)	0,841	1,531	2,372
D70 L400	1,241	0,668	1,909
D70 L400 (tekrar)	1,595	0,759	2,354
D70 L600	1,736	1,765	3,501
D70 L600 (tekrar)	1,602	1,398	3,000

Çizelge 5.1.3. Yük-oturma eğrilerinin yorumlanmasından bulunan sınır taşıma güçleri

	ΔH (mm)	$Q_{uç}$ (kN)	ΔH (mm)	Q_{yan} (kN)	ΔH (mm)	Q_{top} (kN)
D60 L400	10,0	1,588	6,0	0,656	9,35	2,244
D60 L400 (tekrar)	12,0	0,985	6,0	0,666	9,33	1,651
D60 L600	8,0	1,154	6,0	1,050	7,00	2,204
D60 L600 (tekrar)	12,0	1,725	6,0	1,531	8,75	3,256
D70 L400	12,0	2,010	6,0	0,606	10,50	2,616
D70 L400 (tekrar)	9,0	2,062	6,0	0,704	8,50	2,766
D70 L600	10,0	2,368	8,0	1,985	9,10	4,353
D70 L600 (tekrar)	12,0	2,543	7,0	1,398	9,90	3,941

Çizelge 5.1.3' de verilen deney sonuçları incelendiğinde tekrarlı deneyler arasında bir miktar fark olduğu görülecektir. Bunun nedeni, deney sırasında kazığın ve zeminin yerleştirilirken mümkün mertebe aynı koşullarda yapılmasına özen gösterilmesine rağmen bir takım farklılıkların olmasındandır. Tekil kazığın taşıma gücü olarak kazık çapındaki ve boyundaki değişimlerin taşıma gücüne etkisi dikkate alınarak Çizelge 5.1.3'de verilen deney sonuçlarından anlamlı olanlar alınmıştır ve bu sonuçlar Çizelge 5.1.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.1.4. Tekil kazıkların taşıma gücü olarak kabul edilen sonuçlar

	ΔH (mm)	$Q_{uç}$ (kN)	ΔH (mm)	Q_{yan} (kN)	ΔH (mm)	Q_{top} (kN)
D60 L400	10,0	1,588	6,0	0,656	9,35	2,244
D60 L600 (tekrar)	12,0	1,725	6,0	1,531	8,75	3,256
D70 L400 (tekrar)	9,0	2,062	6,0	0,704	8,50	2,766
D70 L600	10,0	2,368	8,0	1,985	9,10	4,353

Tekil kazığa ait teorik ve deneysel sonuçlar incelendiğinde şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Deneysel olarak bulunan sınır taşıma güçleri teorik hesaplamalardan 0.099-0.191 kN kadar daha büyük çıkmıştır. Teori ile deney sonuçları arasındaki toplam taşıma güçleri birbirine yakın olmakla birlikte uç direnci ve çevre sürtünmesi direnci değerlerine bakıldığında oldukça büyük farklar olduğu görülür. Bu fark çevre sürtünmesi direncinde 8-10 kata kadar çıkmıştır.
- Teorik olarak bulunan çevre sürtünmesi direncinin ise yine teorik olarak bulunan uç direnci veya toplam taşıma gücü yanında ihmal edilebilecek düzeylerde olduğu görülmüştür. Fakat sürtünme kazıklarında taşıma gücünün büyük bir kısmının çevre sürtünmesi tarafından taşınması gerekir (Bowles, 1997; Das 2007; Birand 2007; Tan ve Toğrol, 2009; Uzuner, 2011). Deneysel sonuçlarda ise çevre sürtünmesi direnci toplam taşıma gücünün büyük bir kısmını temsil etmektedir. Bu ifadeler dikkate alındığında teorik yaklaşımların sorgulanması gerektiği anlaşılmıştır.
- Deney sonuçlarında uç direnci teorik sonuçlara göre daha küçük bulunmuştur. Bunun nedeni uç direncini veren bağıntının yüzeysel temeller için geliştirilmiş olması ve aynı ifadenin derin temeller için de kullanılmasıdır. Yüzeysel temeller için geçerli olan ve genellikle 25 mm olarak kabul edilen oturma ölçütü derin temellere uymamaktadır. Çünkü kazık uç direnci 10-12 mm (%15-20D) oturma miktarlarında mobilize olmaya başlamaktadır. Bu yüzden derin temeller için geliştirilen taşıma gücü katsayıları kullanılmalıdır veya bu değerde azaltmaya gidilmelidir.
- Teorik olarak hesaplandığında ihmal edilebilecek düzeylerde kalan ama kazık taşıma gücünü etkileyen en önemli etmen ise çevre sürtünmesi direncidir. Bu tez kapsamında varılan en önemli sonuçlardan biri fore kazıklarda çevre sürtünme direncini hesaplamaya yarayan teorik yaklaşımın eksik ve/veya hatalı olmasıdır. Bunun nedenlerine geçmeden önce çevre sürtünmesi direncini veren bağıntı hatırlanacak olursa;

$$Q_{yan} = K \cdot \sigma_v^{'} \cdot \tan\delta \cdot A_{yan} \tag{85}$$

burada;

Q_{yan} = çevre sürtünmesi direnci

K = zemin tabakasının efektif yanal toprak basıncı katsayısı (Çizelge 2.2.1 ve Çizelge 2.2.2)

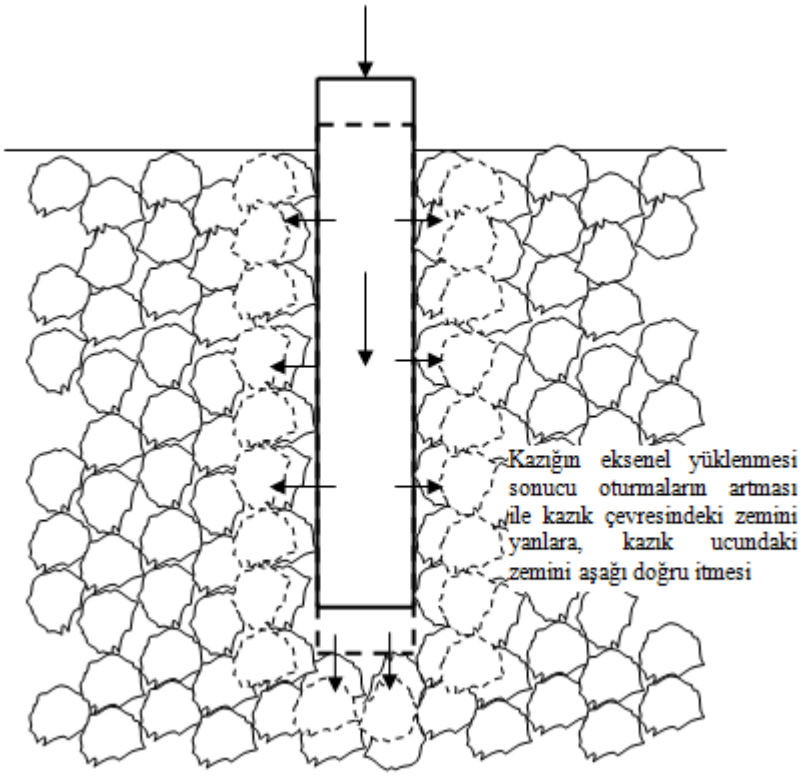
σ_v' = zemin tabakasındaki efektif düşey gerilme

δ = zemin tabakasında kazık-zemin arasındaki sürtünme açısı (Çizelge 2.2.3)

A_{yan} = kazığın yanal alanı

şeklindedir. Bu bağıntıda hatalı olduğu sonucuna varılan en önemli parametre yanal toprak basıncı katsayısı olan K değeridir. Teoride ve pratikte fore kazıkların tasarımında K değeri için genellikle sükûnetteki yanal toprak basıncı katsayısı, K_0 (=1-sin Ø) kullanılmaktadır. K_0 katsayısının kullanılmaması gerektiği ve hatalı olduğu şu şekilde açıklanabilir:

- Kazık eksenel olarak yüklendiğinde çevresindeki zemine bir miktar gerilme aktarır ve zemini sıkıştırmaya çalışır. Fakat bu kazık çevresindeki zemini pasif duruma geçirecek mertebede olmayabilir (Şekil 5.1.1). Kazık gruplarında kazıklar arasındaki mesafe çok az olursa bu durumla karşılaşılabilir.



Şekil 5.1.1. Kazığın yüklenmesi sonucu zemine aktarılan gerilmeler ve zeminin sıkışması

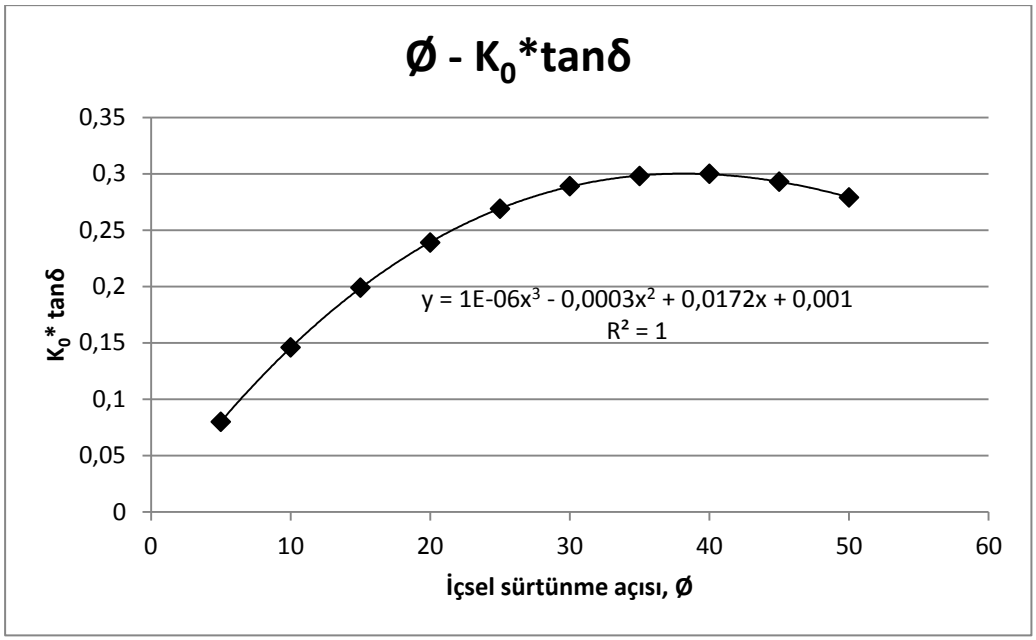
- Bir diğer önemli husus K_0 değerini hesaplamaya yarayan bağıntının tutarsız oluşudur. Bu şu şekilde açıklanabilir: Hareketsiz bir zemin ortamında, zeminin sıkılığı arttıkça zeminde meydana gelen yanal zemin basıncının da artması gerekir. Aynı mantıkla; sıkılığı fazla olan zeminlerde kazıklara etkiyen çevre sürtünmesinin, kendinden gevşek olan bir zemine göre daha büyük olması gerekir. Yani sıkı zeminlerde kazığın düşey yönde deplasman yapması daha zor olacağından ona etkiyen çevre sürtünmesinin de artması gerekir. Bununla birlikte zeminin sıkılığı arttıkça içsel sürtünmesi de artar ve K_0 değerinin de artması gerekir. Hâlbuki içsel sürtünme açısı (Ø) arttıkça sin Ø artarken, K_0 yani (1-sin Ø) azalmaktadır. Kazık ile zemin arasındaki sürtünmeyi ifade eden tan δ ifadesi ise içsel sürtünme açısı arttıkça artmaktadır (Çizelge 5.1.5). Fakat $K \cdot \tan\delta$ birlikte düşünüldüğünde bile çok az bir artış olmaktadır. Bu artış içsel sürtünme açısının 20° ile 45° aralığında 0.24'den 0.29'a kadar olmaktadır (Çizelge 5.1.5 ve Şekil 5.1.2). Deney sonuçlarından bulunan K değerleri ise Çizelge 5.1.6'da verilmiştir. Deney sonuçlarından bulunan K değerlerinin ise K_o ile K_p arasında olduğu görülür.

Çizelge 5.1.5. Farklı içsel sürtünme değerleri için K_0 ve K_p değerleri

Ø	**Sin Ø**	**K_0=1-sin Ø**	**K_0 *tan δ**	**K_p**
5	0,087	0,913	0,080	1,191
10	0,174	0,826	0,146	1,420
15	0,259	0,741	0,199	1,698
20	0,342	0,658	0,239	2,040
25	0,423	0,577	0,269	2,464
30	0,500	0,500	0,289	3,000
35	0,574	0,426	0,298	3,690
40	0,643	0,357	0,300	4,499
45	0,707	0,293	0,293	5,828
50	0,766	0,234	0,279	7,549

Çizelge 5.1.6. Deney sonuçlarından bulunan K değerleri

	K *tan δ	K
D60 L400	2,64	3,04
D60 L600 (tekrar)	2,73	3,14
D70 L400 (tekrar)	2,43	2,80
D70 L600	3,04	3,50

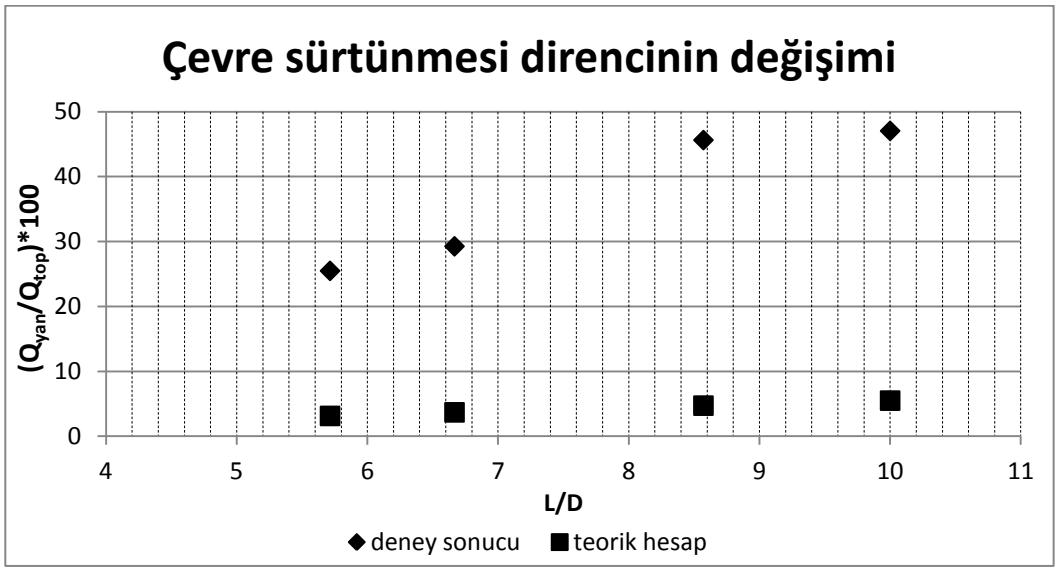


Şekil 5.1.2. İçsel sürtünme açısına bağlı olarak K_0 *tan δ değerinin değişimi

- Uzuner (2011) çevre sürtünmesi direnci hesaplanırken yanal zemin basıncı katsayısı olarak K_0, K_a veya K_p değerlerinden birinin alınabileceğini söylemiştir. Ayrıca K değeri yerine; zemini sıkıştıran kazıklarda pasif toprak basıncı katsayısı K_p, zeminde yanal genişlemeye yol açan sondaj kazıklarında ise aktif toprak basıncı katsayısı K_a'nın kullanılabileceğini fakat bunu belirlemenin kolay olmayacağını ifade etmiştir. Tomlinson ve Woodward (2006) çevre sürtünmesi direncini etkileyen en önemli parametrenin K değeri olduğunu, bunun doğru bir şekilde belirlenmesinin oldukça zor olduğunu ve kazık imalatı sırasında bu değerin değiştiğini ifade etmiştir. Bowles (1997) de K değeri için ne alınacağı konusunda büyük bir belirsizlik olduğunu, çoğu araştırmacının K_0 değerinin kullanılmasına itiraz ettiğini ama kesin bir sonuca varılamadığını belirtmiştir. Uzuner (2011)'in ve diğer araştırmacıların bu görüşleri ve yukarıda sayılan gerekçeler dikkate alındığında K değeri yerine K_o ile K_p arasında bir değerin alınması uygun olacaktır. Ayrıca teorik denklemde K_0 yerine K_p kullanılarak deney sonuçlarıyla kıyaslandığında, çevre sürtünmesi değerinin mobilize olduğu oturma miktarındaki yükün yaklaşık olarak 1.5 katı olduğu görülmüştür. Bu sonuç da K yerine K_0 ile K_p arasındaki bir değerin kullanılması gerektiği görüşünü doğrulamaktadır.
- Ayrıca kazık yükleme deneylerinden Şekil 2.2.3'de verilmiş olan tekil kazığın davranışı birebir gözlenmiştir. Kazık yük almaya başladığında uç ve çevre

sürtünme dirençleri artmaya başlamakta, belirli bir oturma değerine kadar çevre sürtünmesi uç direncinden fazla olmaktadır. Daha sonra çevre sürtünmesi değeri mobilize olurken uç direnci artmaya devam etmektedir. Uç direncinin mobilize olması net bir şekilde gözlenmezken, belirli bir oturma değerinden sonra eğrinin başlangıç eğimi azalmaya başlamıştır. Deneylerde çevre sürtünmesi direnci genellikle 6 mm (%10 D), uç direnci ise 10-12 mm (%15-20 D) oturma değerlerinde mobilize olmuştur. Buna benzer davranışı Das (2007) ve Tomlinson (2006) da belirtmiştir. Das (2007) sürtünme direncinin 5-10 mm oturma değerinde mobilize olduğunu, uç direncinin ise kazığın %10-25D oturma değerine kadar mobilize olmadığını ortaya koymuştur. Tomlinson ve Woodward (2006) ise kumlu zeminlerde uç direncinin kazığın %10-20D oturma değerine kadar lineer arttığını ortaya koymuştur.

- Teorik hesaplar ile deney sonuçları incelendiğinde şu sonuca da ulaşılmıştır: Teorik hesaplarda çevre sürtünmesi direnci toplam taşıma gücünün %3-5'ini temsil ederken, deney sonuçlarında %25-47'sini temsil eder (Şekil 5.1.3). Kazık çapı ve boyu arttıkça çevre sürtünmesi direnci uç direncine göre daha çok artmıştır. Bu nedenle; sürtünme kazıklarında taşıma gücünü etkileyen en önemli etmenin kazık boyu olduğu bir kez daha görülmüştür. Bu sonuç da sürtünme kazıklarında taşıma gücünün çevre sürtünmesi tarafından taşındığı ilkesini doğrular. Kazık boyunun kazık çapına oranı (L/D) arttıkça bu oran daha da artacaktır.



Şekil 5.1.3. L/D oranına bağlı olarak çevre sürtünmesi direncinin değişimi

5.1.2. 2 Kazıktan oluşan kazık grubu deney sonuçları

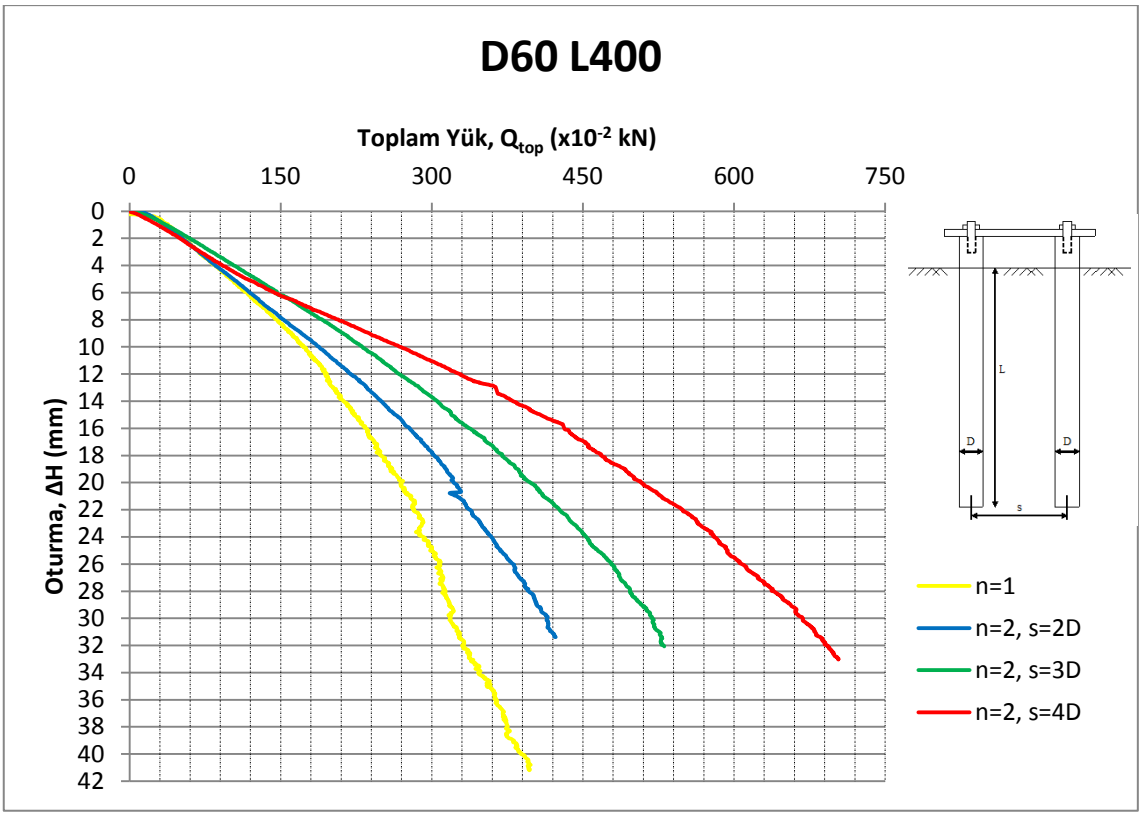
2 kazıktan oluşan kazık grubu deneylerinde tekil kazık deneylerinde kullanılan kazıklar kullanılmıştır ve bu kazıklar 2D, 3D ve 4D aralıklarla zemine yerleştirilmiştir. Bu deney sonuçlarından elde edilen yük-oturma ve yük-birim oturma grafikleri Ek 2'de, bu grafiklerin yorumlanmasından elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1.7'de verilmiştir. Bu grafiklerin yorumlanmasında da başlangıç eğiminin değişmeye başladığı oturma değerleri referans alınmıştır. Çizelge 5.1.7'de tekrar deneyler (T) ile gösterilmiştir ve bu deneyler arasından hangisinin kabul edildiği **kalın** harf/rakam ile belirtilmiştir. Bu çizelgede; kazık grubunun taşıdığı toplam yük Q_{KG}, kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı toplam yük Q_{TK} ve bu kazığa ait uç ve çevre sürtünme dirençleri $Q_{uç}$ ve Q_{yan} ile gösterilmiştir. Ayrıca tekil kazığın taşıma gücüyle kazık grubundaki bir kazığın taşıma gücünün kıyaslanabilmesi için tekil kazığın taşıma gücü de bu çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5.1.7. 2 kazıktan oluşan kazık grubu deney sonuçları

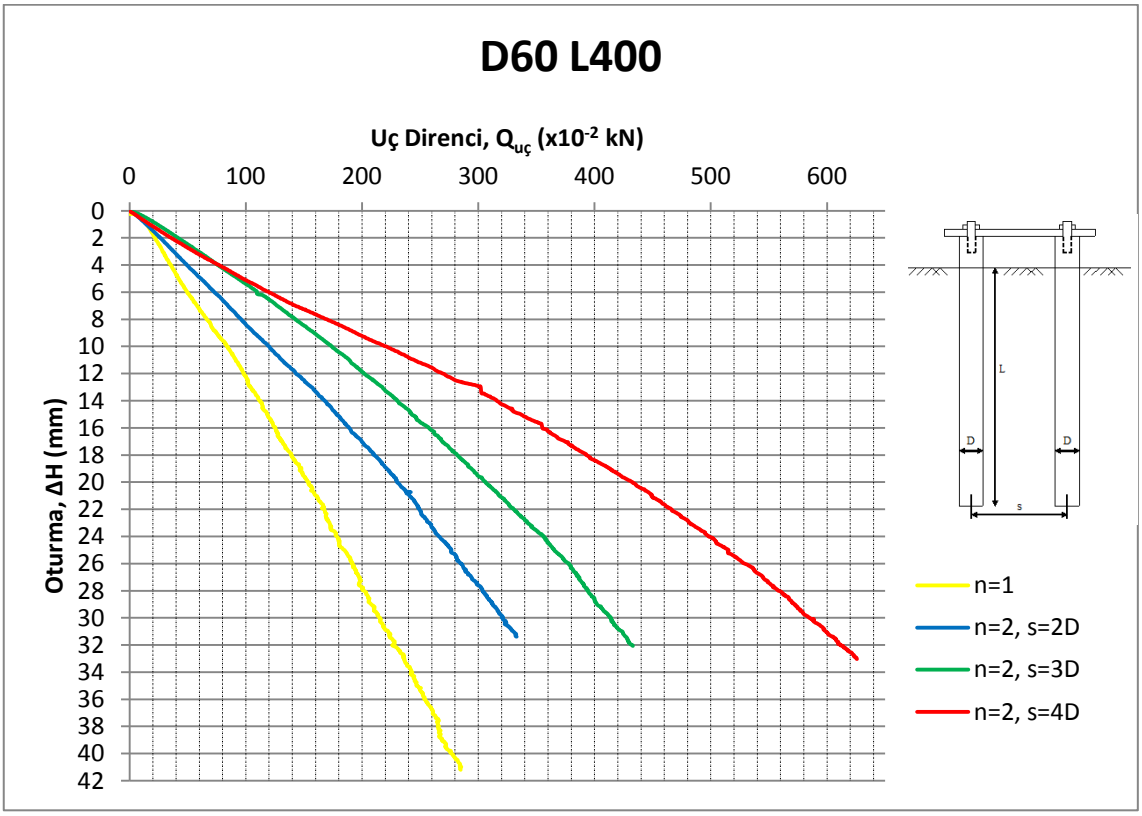
		Kazık Grubu		**Tekil Kazık**					
	s	**ΔH (mm)**	**Q_{KG} (kN)**	**ΔH (mm)**	**Q_{TK} (kN)**	**ΔH (mm)**	**$Q_{uç}$ (kN)**	**ΔH (mm)**	**Q_{yan} (kN)**
D60 L400	-	-	-	9,35	2,244	10,00	1,588	6,00	0,656
	2D	**13,40**	**4,824**	**13,40**	**2,412**	**14,00**	**1,681**	**11**	**0,731**
	2D (T)	14,58	7,483	14,58	3,741	15,00	2,895	13	0,846
	3D	**11,82**	**5,282**	**11,82**	**2,641**	**11,00**	**1,889**	**14,00**	**0,754**
	3D (T)	14,84	6,745	14,84	3,373	16,00	2,523	12,00	0,850
	4D	**16,00**	**8,633**	**16,00**	**4,316**	**16,00**	**3,552**	**16,00**	**0,764**
	4D (T)	20,23	7,194	20,23	3,597	21,00	2,621	16,00	0,971
D70 L400	-	-	-	8,50	2,766	9,00	2,062	6,00	0,704
	2D	10,00	8,633	10,00	4,316	10,50	3,229	9,00	1,087
	2D (T)	**11,00**	**7,225**	**11,00**	**3,613**	**11,50**	**2,975**	**9,00**	**0,641**
	3D	11,00	6,333	11,00	3,166	11,50	2,421	9,00	0,745
	3D (T)	**11,00**	**7,974**	**11,00**	**3,987**	**11,50**	**3,306**	**9,00**	**0,682**
	4D	15,00	7,781	15,00	3,891	16,60	3,129	10,00	0,763
	4D (T)	**13,82**	**11,124**	**13,82**	**5,562**	**14,00**	**4,765**	**13,00**	**0,796**
D60 L600	-	-	-	8,75	3,256	12,00	1,725	6,00	1,531
	2D	**15,00**	**10,414**	**15,00**	**5,207**	**17,10**	**3,030**	**13,00**	**2,174**
	2D (T)	14,00	11,148	14,00	5,574	14,00	2,732	14,00	2,842
	3D	**15,00**	**11,543**	**15,00**	**5,772**	**19,10**	**3,343**	**11,00**	**2,429**
	3D (T)	14,00	13,568	14,00	6,784	15,80	3,623	12,00	3,162
	4D	15,00	12,171	15,00	6,086	16,60	3,078	13,00	3,012
	4D (T)	**15,00**	**12,103**	**15,00**	**6,051**	**15,00**	**3,206**	**15,00**	**2,845**
D70 L600	-	-	-	9,10	4,353	10,0	2,368	8,0	1,985
	2D	10,00	13,544	10,00	6,772	9,26	3,553	11,00	3,223
	2D (T)	**10,85**	**10,462**	**10,85**	**5,231**	**11,50**	**3,178**	**10,00**	**2,053**
	3D	**12,00**	**11,650**	**12,00**	**5,825**	**12,6**	**3,286**	**11,00**	**2,539**
	3D (T)	14,00	11,959	14,00	5,979	14,00	1,999	14,00	3,980
	4D	**15,00**	**13,016**	**15,00**	**6,508**	**15,00**	**3,115**	**15,00**	**3,393**
	4D (T)	16,00	12,449	16,00	6,225	16,00	2,789	16,00	3,436

Kazık grubuna ait deney sonuçlarını daha iyi yorumlayabilmek için kazık gruplarındaki bir kazığın toplam taşıma gücü, uç direnci ve çevre sürtünmesi dirençlerinin kazık aralığına bağlı olarak değişimi tekil kazıklarla kıyaslanmıştır. Her bir kazığın toplam taşıma gücündeki değişimler Şekil 5.1.4-5.1.7-5.1.10-5.1.13'de; uç direncindeki değişimler Şekil 5.1.5-5.1.8-5.1.11-5.1.14'de; çevre sürtünmesi direncindeki değişimler Şekil 5.1.6-5.1.9-5.1.12-5.1.15'de verilmiştir.

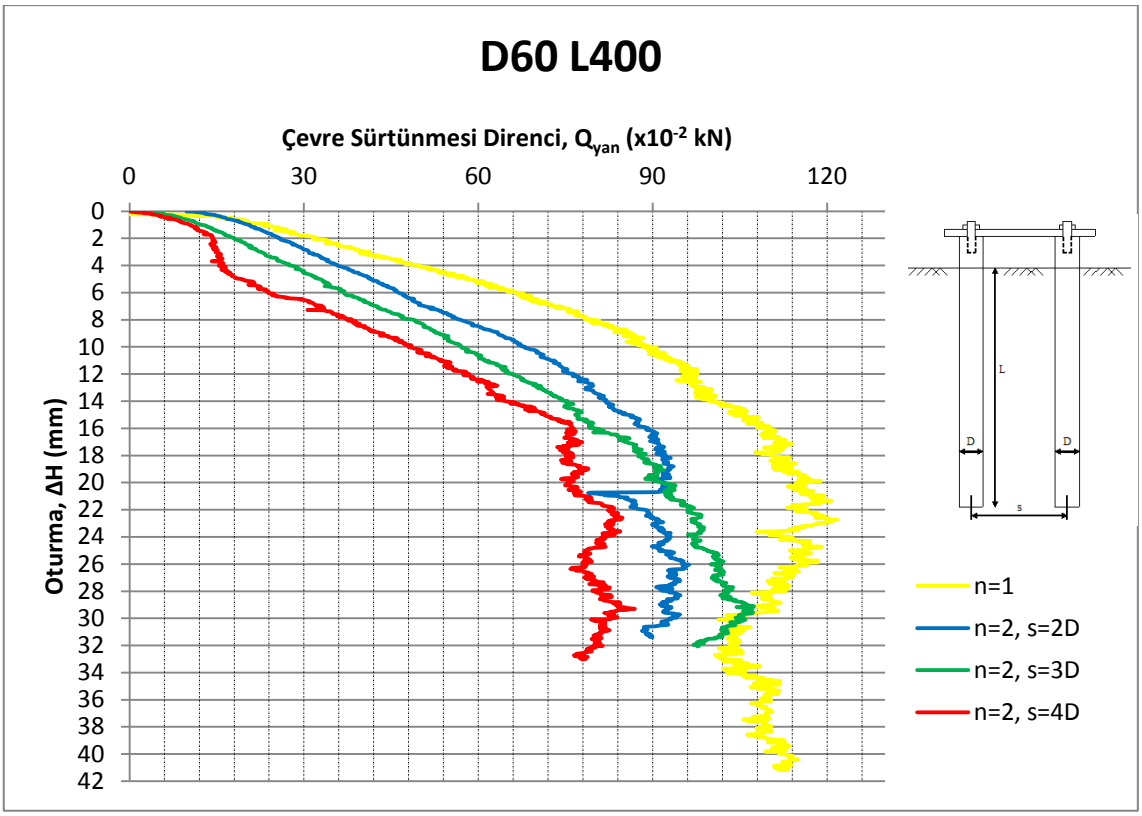
Çizelge 5.1.7'de verilen deney sonuçları ile Şekil 5.1.4-5.1.7-5.1.10-5.1.13'de verilen toplam yük-oturma grafikleri dikkatle incelendiğinde ulaşılan en önemli sonuç kazık gruplarındaki bir kazığın taşıma gücünün tekil kazığın kendi başına taşıdığı yükten daha fazla olmasıdır. Yani kumlu zeminlerde grup verimi 1'den büyük çıkmaktadır. Burada kazık gruplarının taşıma gücü hakkında bilinenin aksi yönde bir sonuç çıkmıştır. Normalde kazık grubunun taşıma gücünün grup etkisinden dolayı kazıkların tek tek taşıma güçlerinin toplamından daha küçük olacağı kabul edilmektedir. Fakat deney sonuçları kumlu zeminlerdeki kazık grubu davranışının bundan farklı olduğunu göstermektedir. Bu sonuca ulaşan birçok araştırmacının olması ise bu tezi doğrulamaktadır. Örneğin, Vesic (1977) killi zeminlerde yaptığı 5 adet kazık grubu yükleme deneylerinde grup verimini 1'e yakın, kumlu zeminlerde yaptığı 6 adet tam ölçekli yükleme deneylerinde ise grup verimini 1'den büyük bulmuştur. Ismael (2001) orta sıkı kumlu zeminden oluşan ve arazide yaptığı yükleme deneyinde (kazıklar 0.1 m çapında ve 2.25 m boyundadır) grup verimini 1'den büyük bulmuştur. Xu ve Zhang (2007) da arazideki kumlu zeminde gerçekleştirdiği ve çakma kazıklara ait 31 adet yükleme deneyinde grup verimini 1'den büyük bulmuştur. Bowles (1977) ise kumlu zeminlerde bu davranışın görüldüğünü kabul etmesine rağmen; bire bir ölçekte yapılan kazık grubu yükleme deneylerinin yetersiz olduğunu, model deneylerde bulunan sonuçların ise boyut etkisinden dolayı güvenilir bulunmadığı eleştirisinde bulunmuştur. Bowles (1977)'in bu görüşü bahsedilen araştırmaların öncesine ait olduğu için dikkate alınmayabilir.



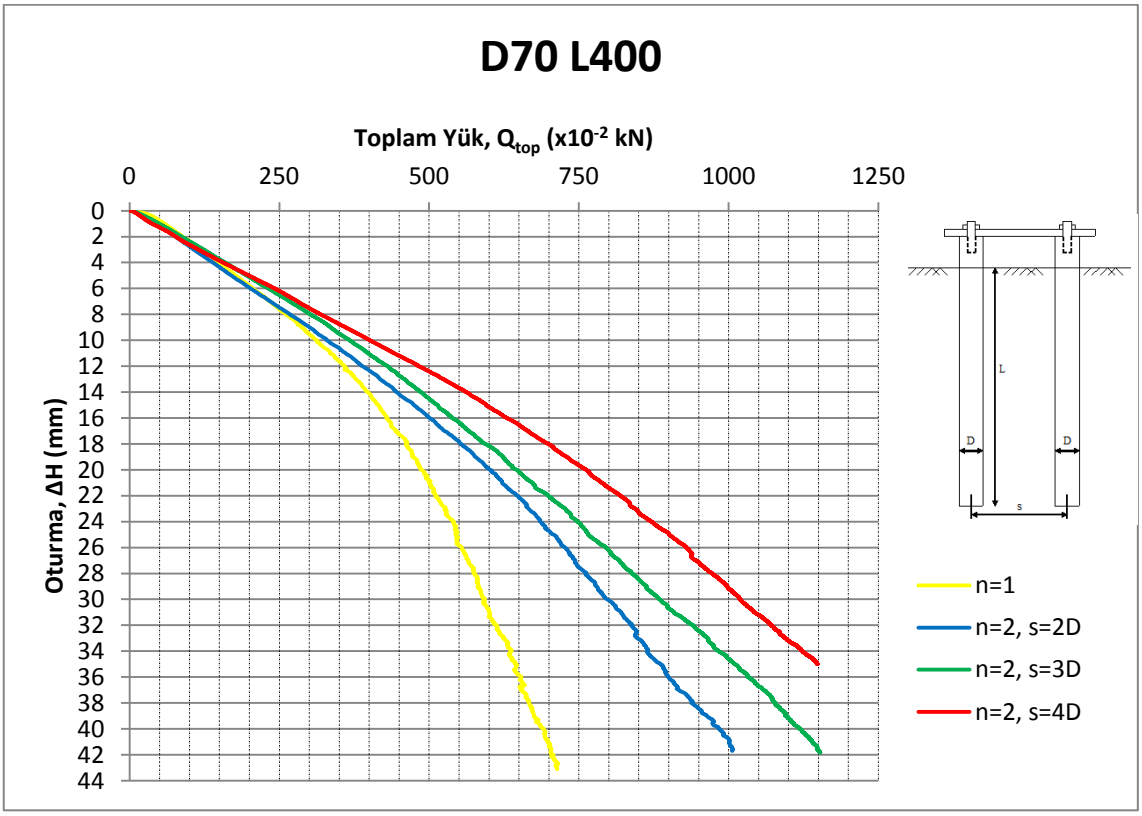
Şekil 5.1.4. D60 L400—kazık aralığına bağlı olarak toplam taşıma gücünün değişimi



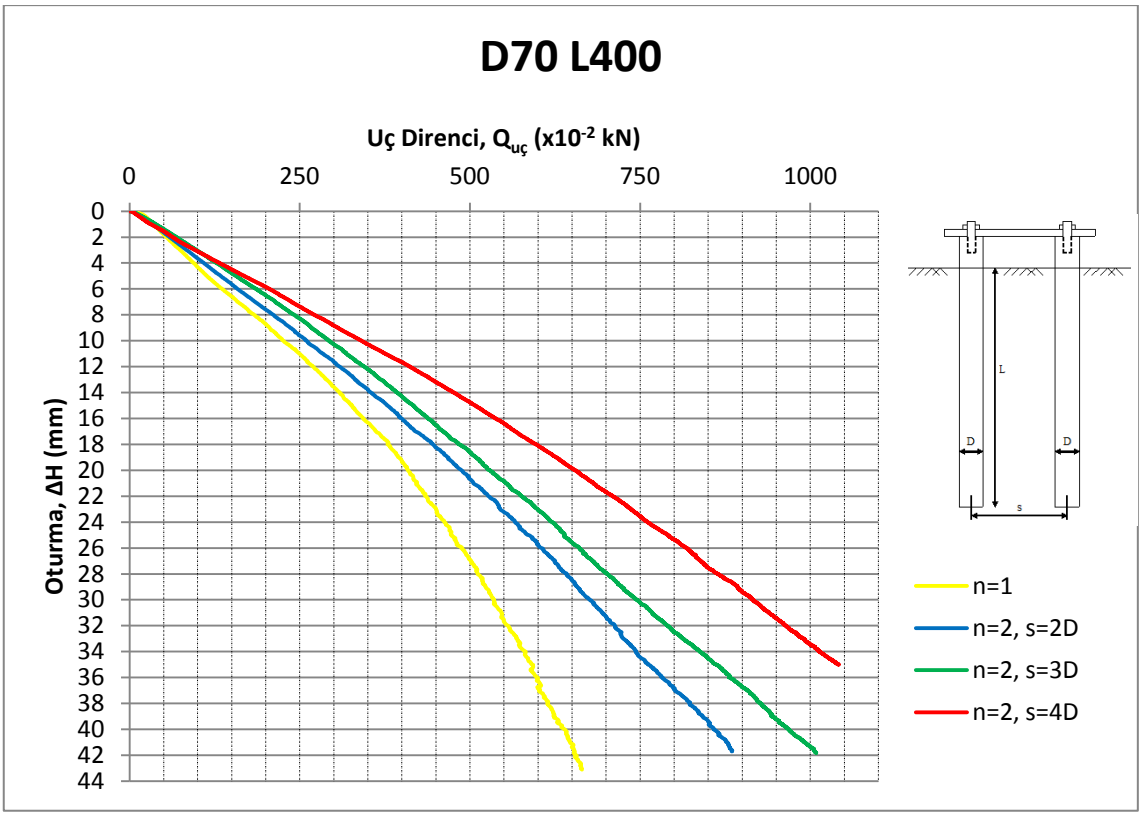
Şekil 5.1.5. D60 L400—kazık aralığına bağlı olarak uç direncinin değişimi



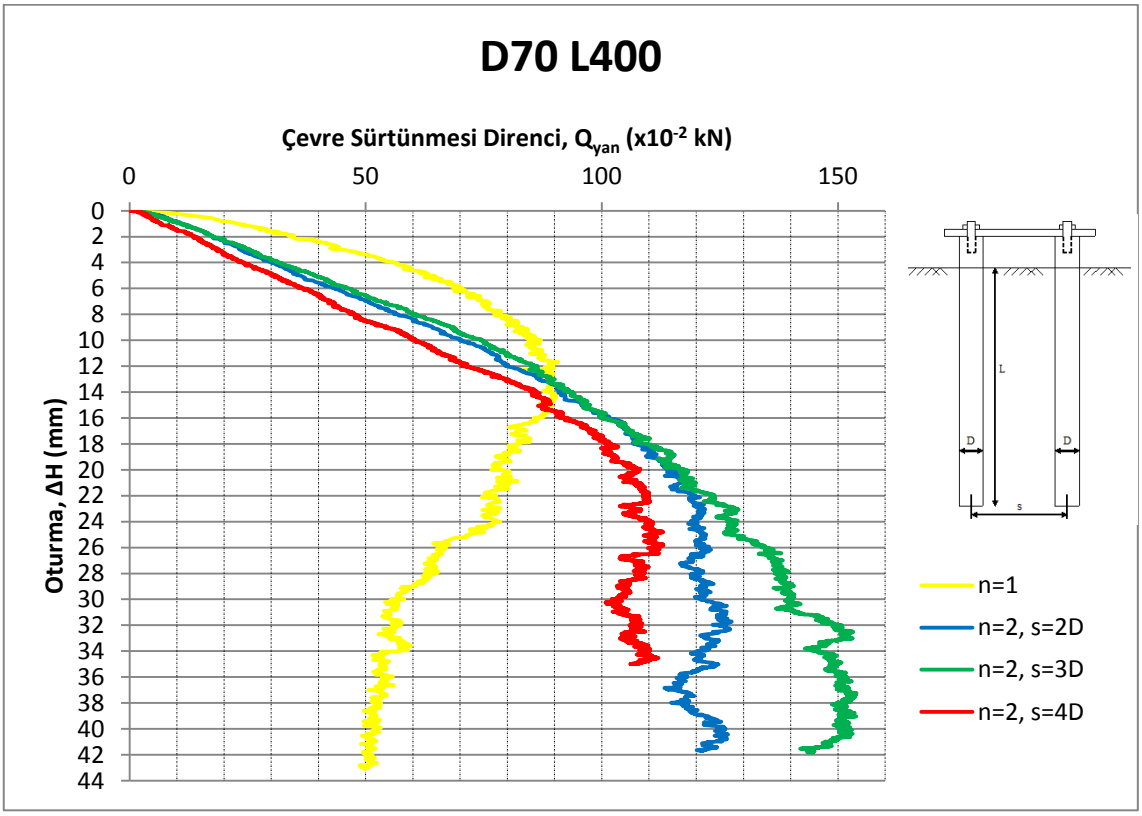
Şekil 5.1.6. D60 L400—kazık aralığına bağlı olarak çevre sürtünmesi direncinin değişimi



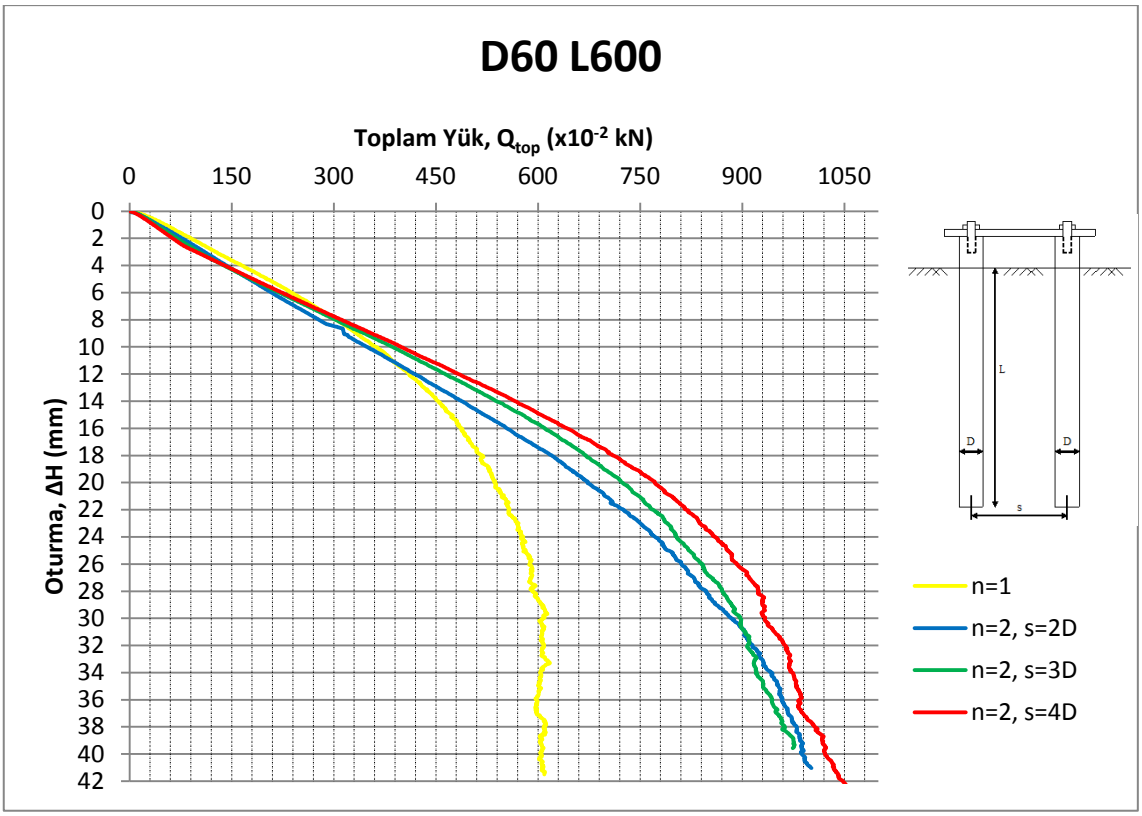
Şekil 5.1.7. D70 L400—kazık aralığına bağlı olarak toplam taşıma gücünün değişimi



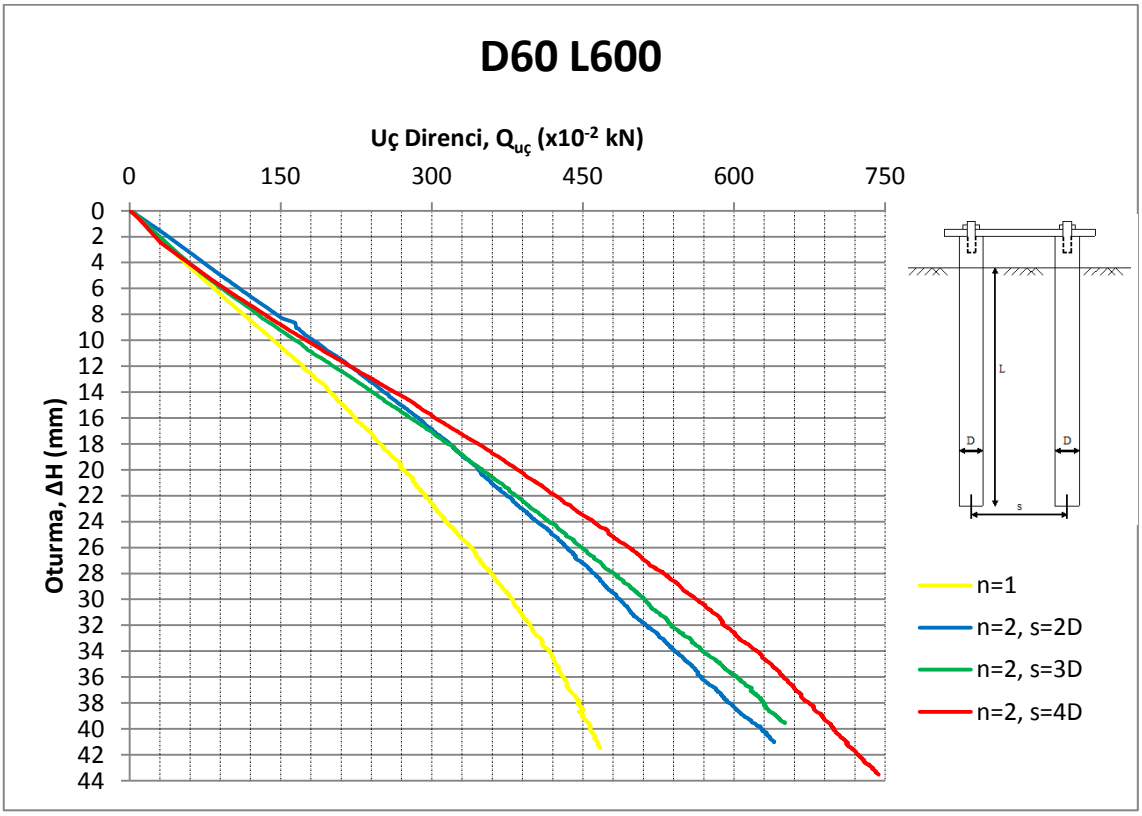
Şekil 5.1.8. D70 L400—kazık aralığına bağlı olarak uç direncinin değişimi



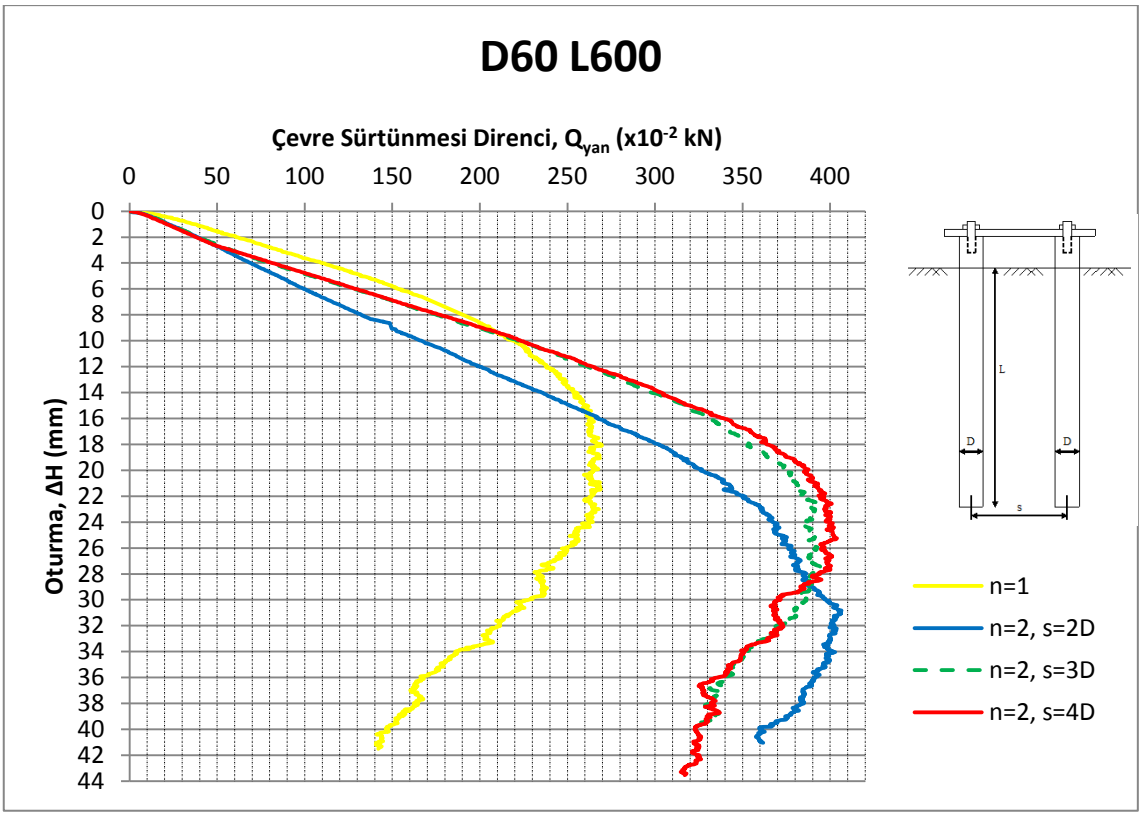
Şekil 5.1.9. D70 L400—kazık aralığına bağlı olarak çevre sürtünmesi direncinin değişimi



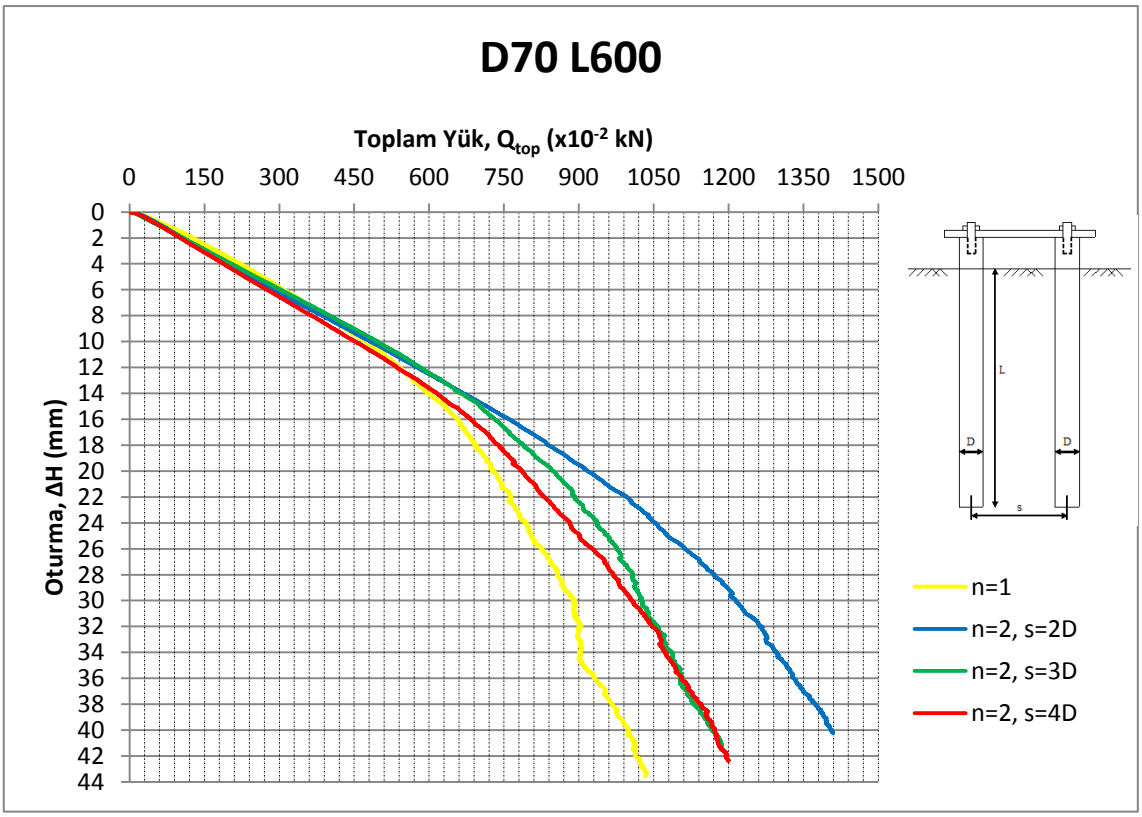
Şekil 5.1.10. D60 L600—kazık aralığına bağlı olarak toplam taşıma gücünün değişimi



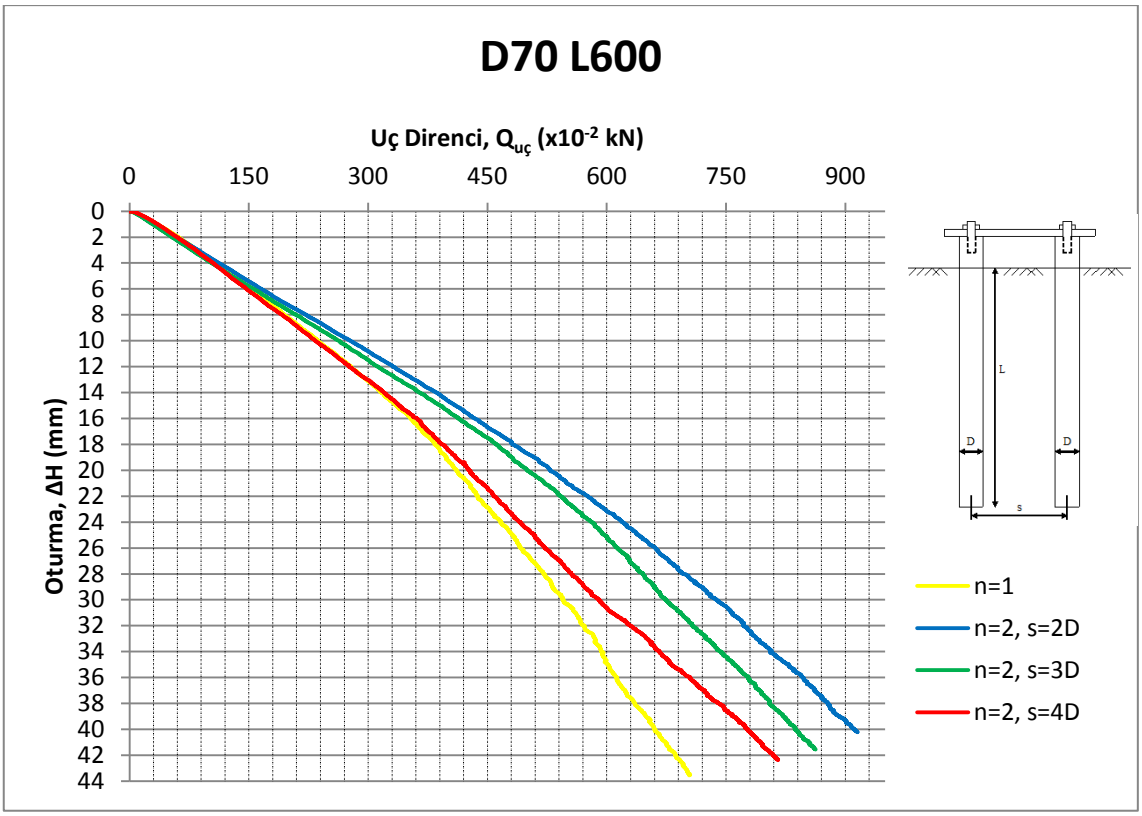
Şekil 5.1.11. D60 L600—kazık aralığına bağlı olarak uç direncinin değişimi



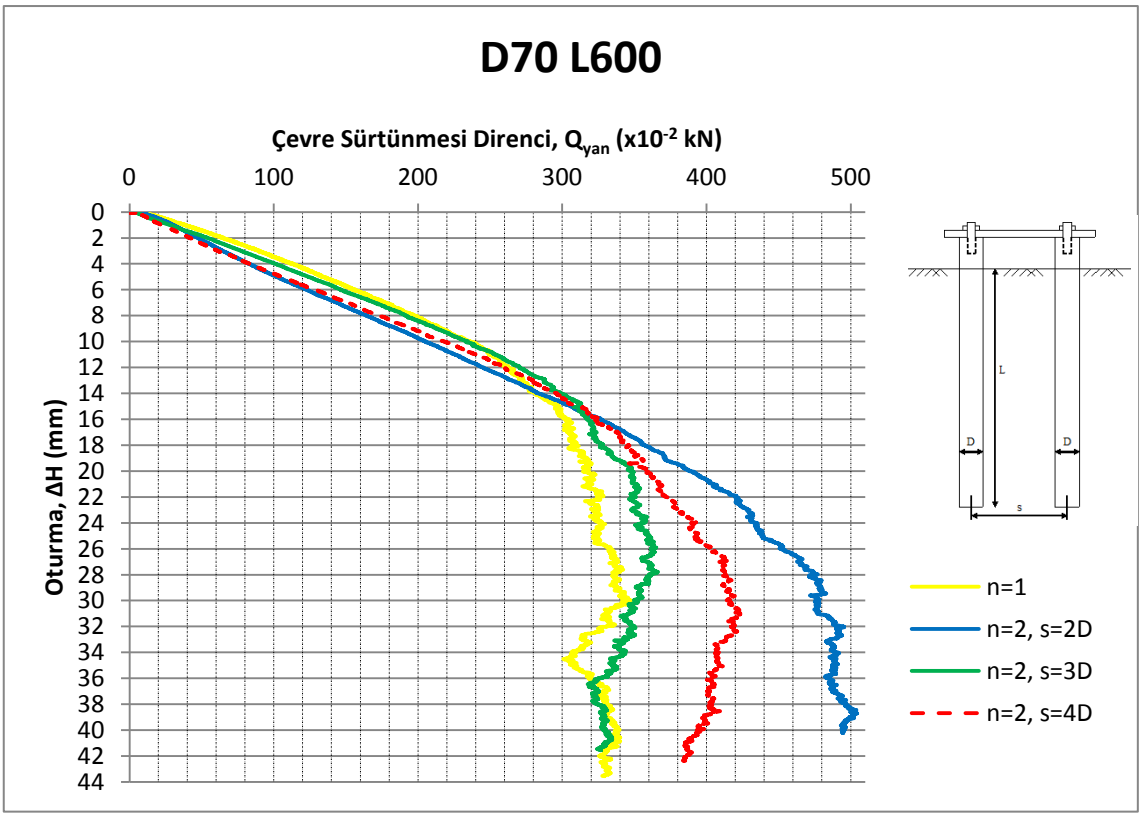
Şekil 5.1.12. D60 L600—kazık aralığına bağlı olarak çevre sürtünmesi direncinin değişimi



Şekil 5.1.13. D70 L600—kazık aralığına bağlı olarak toplam taşıma gücünün değişimi



Şekil 5.1.14. D70 L600—kazık aralığına bağlı olarak uç direncinin değişimi



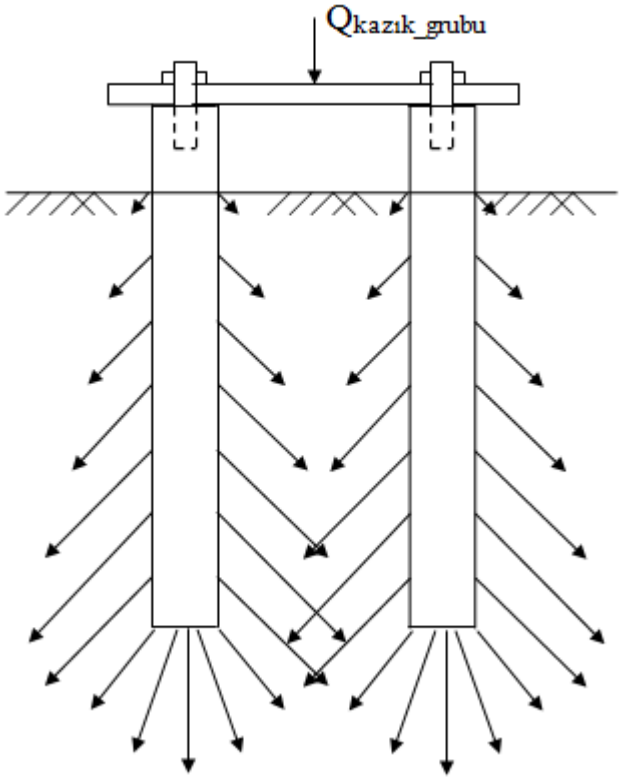
Şekil 5.1.15. D70 L600—kazık aralığına bağlı olarak çevre sürtünmesi direncinin değişimi

Şekil 5.1.4-5.1.15 arasındaki toplam yük-oturma, uç direnci-oturma ve çevre sürtünmesi-oturma grafikleri incelendiğinde kazık grubuna ait tekil kazığın toplam yük, uç direnci ve çevre sürtünmesi bakımından tek başına taşıdığı yükten fazla yük taşıdığı görülmüştür. Toplam yükteki artışın büyük bir kısmına uç direncindeki artış neden olmaktadır. Çevre sürtünmesi direncindeki artış ise uç direncine göre daha sınırlı kalmaktadır. Ayrıca kazık grubundaki kazıkların tekil kazığa göre daha büyük oturma miktarlarında mobilize olmaya başladığı görülmüştür. Taşıma gücündeki artışın en büyük sebeplerinden biri de budur. Tekil kazık ve kazık grubu deney sonuçları incelendiğinde şu sonuca varılır: Tekil kazıklarda çevre sürtünmesi direnci %10D, uç direnci %15-20D ve toplam taşıma gücü %12-16D oturma miktarlarında mobilize olmaktadır. Kazık grubundaki bir kazıkta ise çevre sürtünmesi direnci %15-20D, uç direnci %18-25D, tek bir kazığın ve kazık grubunun taşıma gücü ise %20-25D oturma miktarlarında mobilize olmuştur.

Kazık grubundaki bir kazığın tekil kazığın mobilize olduğu değerden daha büyük oturma miktarlarda mobilize olması yani kazığın göçmeden daha fazla yük taşıyarak oturma yapması şu şekilde açıklanabilir: Kazık grubu eksenel olarak yüklendiğinde oturmaların artmasıyla birlikte kazıklardan komşu kazıklara ve kazık çevresindeki zemine gerilme aktarılmaktadır. Bu gerilme aktarımı hem çevre sürtünmesinden dolayı kazık yan yüzeyine hem de uç direncinden dolayı kazık tabanına doğru olmaktadır. Yani kazığın etrafındaki tüm zemin bu gerilme artışından etkilenmektedir. Bu gerilme artışından dolayı kazık etrafındaki zemin kendini daha fazla tutmaya çalışmakta, zeminin sıkılığı bir miktar artmaktadır. Bundan dolayı zeminin taşıma gücü katsayıları olan N_c, N_q ve N_γ değerleri artmaktadır (Şekil 5.1.16). Özellikle içsel sürtünme açısının 35°'den büyük olduğu durumlarda bu artış çok fazla olmaktadır. Çünkü taşıma gücü katsayıları logaritmik olarak artmaktadır (Şekil 2.2.4). Bu açıklama da uç direncinin çevre sürtünmesine göre neden daha fazla arttığını kanıtlamaktadır.

Ayrıca; kazık grupları kendi içerisinde düşünüldüğünde kazık aralığının taşıma gücüne etkisi de görülmüştür. Kazık aralığı arttıkça kazık grubunun taşıdığı toplam yük, tek bir kazığın toplam taşıma gücü ve bu kazığa ait uç direnci ile çevre sürtünmesi direnci artmaktadır. Bunun sonucunda kazık aralığı arttıkça grup etkisinin azaldığı söylenebilir. Buna ilave olarak kazık aralığı arttıkça kazıkların daha geç mobilize olduğu sonucuna varılmıştır. Yani kazık aralığı s=2D iken kazık daha az oturma miktarında mobilize olurken, s=4D iken daha fazla oturma miktarında mobilize

olmaktadır (Çizelge 5.1.7). Bu davranış şu şekilde açıklanabilir: Kazık aralığı s=2D iken zemine aktarılan gerilmeler o kadar fazladır ki kazığın oturma yapması zorlaşmaktadır. Fakat kazık aralığı s=4D iken zemine aktarılan gerilmeler azalacağından kazık/kazık grubu daha fazla oturma yapabilmektedir. Bu açıklama da kazık aralığı arttıkça kazık grubunun taşıma gücünün arttığını kanıtlamaktadır.



Şekil 5.1.16. Uç ve çevre sürtünmesi dirençlerinin zemine aktarılması

Şekil 5.1.6, Şekil 5.1.9 ve 5.1.15'de çevre sürtünmesi direnci; Şekil 5.1.14'de uç direnci ve Şekil 5.1.13'de toplam taşıma gücü grafiklerine bakıldığında kazık aralığı arttıkça yük değerlerinin azaldığı gibi bir sonuç çıkabilir. Fakat grafikler daha dikkatli incelenirse veya Çizelge 5.1.7'ye bakılırsa s=4D kazık aralığına sahip olan yük-oturma grafiklerinin daha geç mobilize olduğu, s=2D kazık aralığına sahip olan yük-oturma grafiklerinin ise daha erken mobilize olduğu görülür.

Şekil 5.1.4, Şekil 5.1.7, Şekil 5.1.10 ve Şekil 5.1.13 incelendiğine kazığın kendi başına taşıdığı yük ile kazık gruplarında (s=2D, s=3D, s=4D) bir kazığın taşıdığı yük 4-8 mm (%6D-12D) değerine kadar aynı olmaktadır. Yani 4-8 mm oturma miktarına kadar kazıklar arasında etkileşim olmamaktadır. Kazık grubundaki deformasyonların küçük olduğu seviyelerde kazık aralığının taşıma gücüne bir etkisi yoktur. Bu sonuç da

kumlu zeminlerdeki kazık grubu davranışının daha iyi bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

5.1.2.1. Kazık grubunun verimi

2 kazıktan oluşan kazık grubunun verimi aşağıdaki bağıntı ile bulunmuştur ve sonuçlar Çizelge 5.1.8'de verilmiştir. Ayrıca uç direnci ve çevre sürtünme direnci için de grup verimi hesaplanarak sonuçlar Şekil 5.1.17-5.1.18-5.1.19'de verilmiştir.

$$n_g = \frac{Q_{TK(KG)}}{Q_{TK}} \tag{86}$$

burada;

n_g = grup verimi

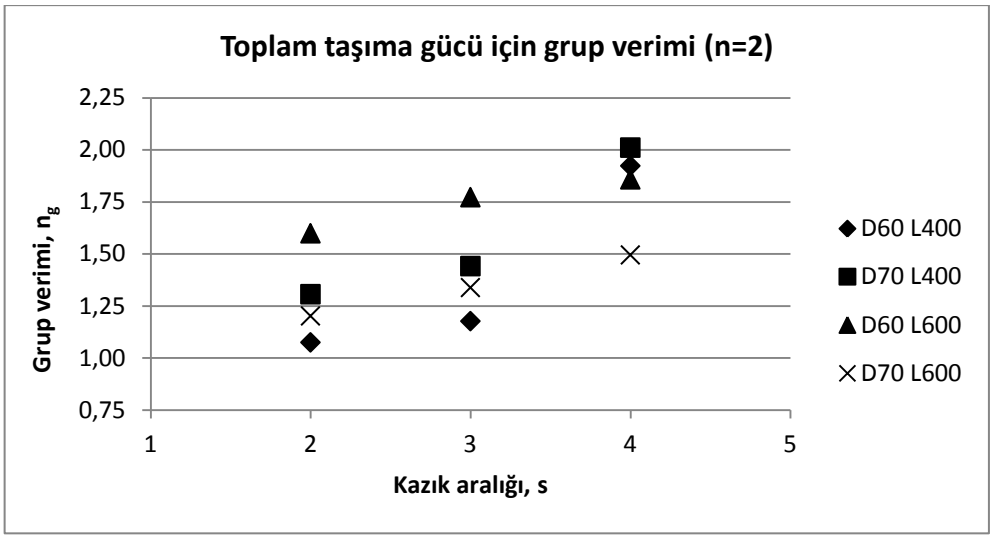
$Q_{TK(KG)}$ = kazık grubundaki bir kazığın taşıma gücü

Q_{TK} = tekil kazığın taşıma gücü

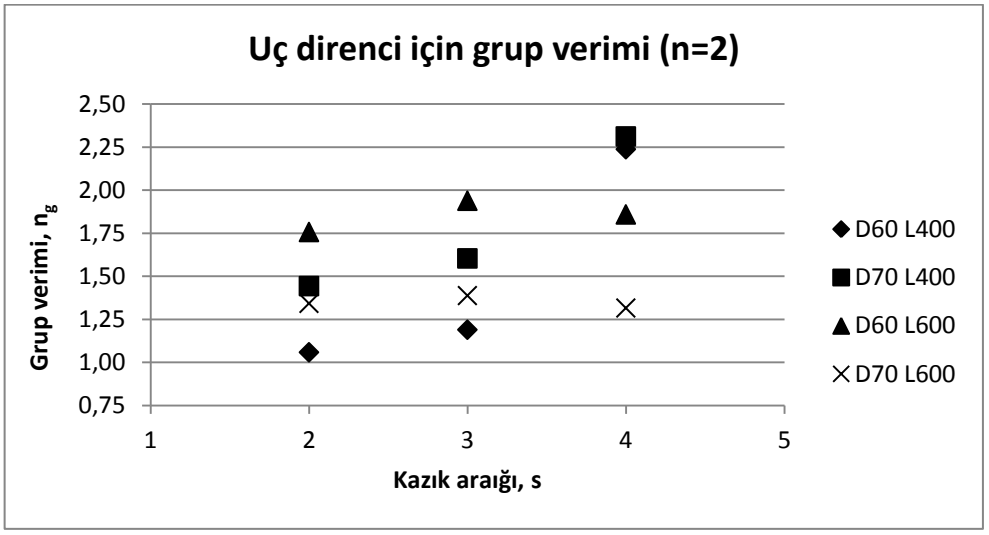
Çizelge 5.1.8. Grup veriminin kazık aralığına göre değişimi

			Grup Verimi		
	n	**s**	**Qtop**	**Quç**	**Qyan**
D60 L400	2	2D	1,075	1,059	1,114
	2	3D	1,177	1,190	1,149
	2	4D	1,923	2,237	1,165
D70 L400	2	2D	1,306	1,443	0,911
	2	3D	1,441	1,603	0,969
	2	4D	2,011	2,311	1,131
D60 L600	2	2D	1,599	1,757	1,420
	2	3D	1,773	1,938	1,587
	2	4D	1,858	1,859	1,858
D70 L600	2	2D	1,202	1,342	1,034
	2	3D	1,338	1,388	1,279
	2	4D	1,495	1,315	1,709

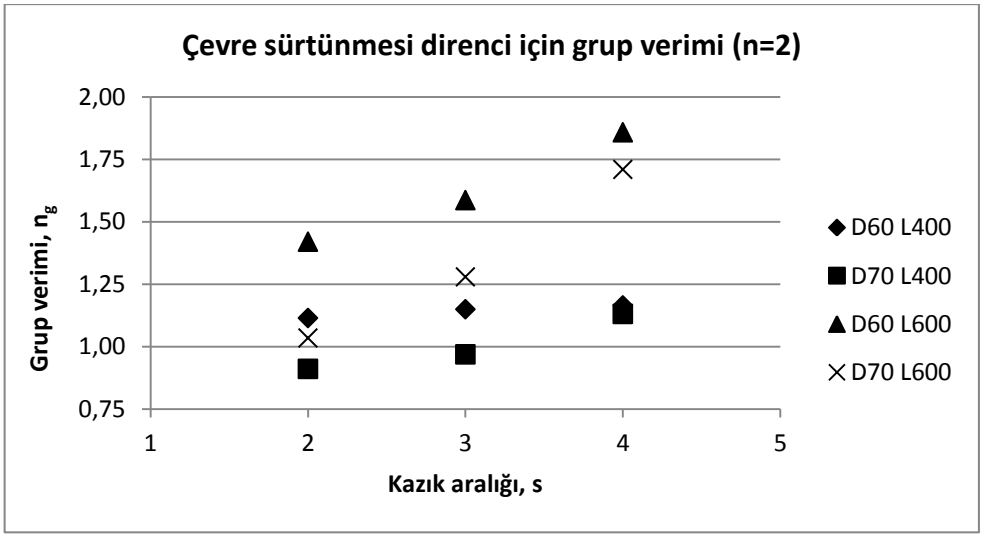
Çizelge 5.1.8, Şekil 5.1.17-5.1.18 ve 5.1.19 incelendiğinde kazıklar arası mesafe arttıkça hem kazığın toplam gücü açısından hem de uç ve çevre sürtünmesi açısından grup verimi artmıştır. Bu sonuç kazık gruplarında kazıklar arasındaki mesafe arttıkça grup etkisinin azaldığını göstermektedir. Tekrar hatırlatılacak olursa kumlu zeminlerdeki grup verimi 1'den büyük olmaktadır.



Şekil 5.1.17. Grup veriminin kazık aralığına bağlı olarak toplam taşıma gücüne etkisi



Şekil 5.1.18. Grup veriminin kazık aralığına bağlı olarak uç direncine etkisi



Şekil 5.1.19. Grup veriminin kazık aralığına bağlı olarak çevre sürtünmesi direncine etkisi

5.1.3. 3 Kazıktan oluşan kazık grubu deney sonuçları

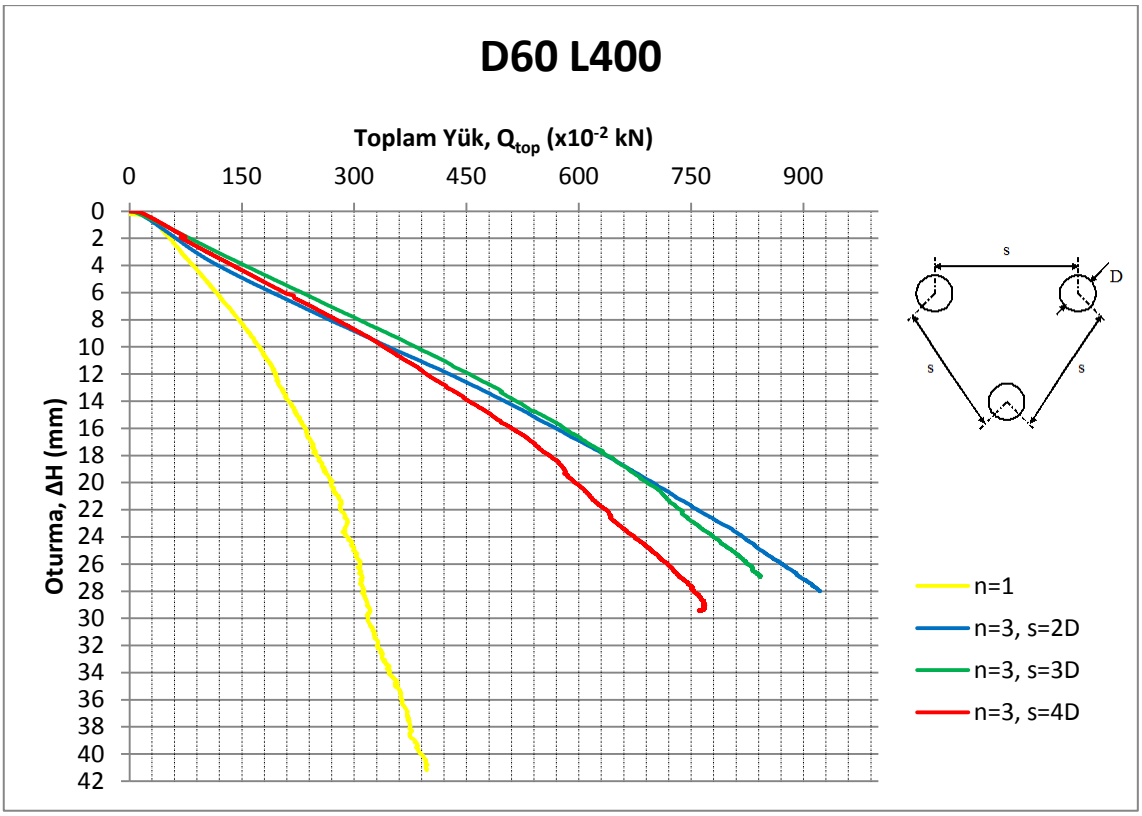
3 kazıktan oluşan kazık grubu deneylerinde çapı 60 mm ve boyu 400 mm olan kazıklar kullanılmıştır. Bu deneylerden elde edilen yük-oturma ile yük-birim oturma grafikleri Ek 3'de verilmiştir. Bu deneylere ait toplam taşıma gücü, uç direnci ve çevre sürtünmesi direnci değerleri Çizelge 5.1.9'da verilmiştir. Tekrarlı deneyler arasından hangi sonuçların kabul edildiği ise yine **kalın** harf/rakam ile gösterilmiştir. Bu kazık grubuna ait toplam yük-oturma, uç direnci-oturma ve çevre sürtünmesi direnci-oturma grafikleri de sırasıyla Şekil 5.1.20-5.1.21-5.1.22'de verilmiştir.

Çizelge 5.1.9. 3 kazıktan oluşan kazık grubu deney sonuçları

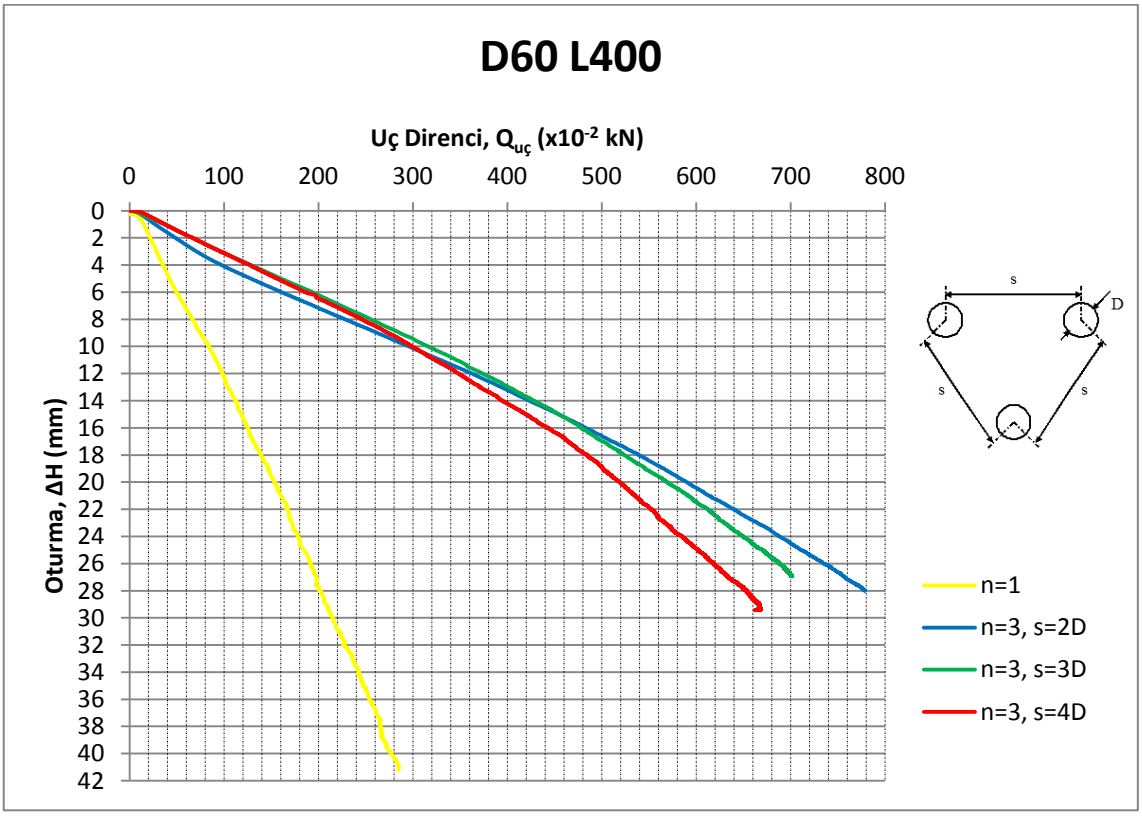
		Kazık Grubu		**Tekil Kazık**					
	s	**ΔH (mm)**	**Q_{KG} (kN)**	**ΔH (mm)**	**Q_{TK} (kN)**	**ΔH (mm)**	**$Q_{uç}$ (kN)**	**ΔH (mm)**	**Q_{yan} (kN)**
D60 L400	-	-	-	9,35	2,244	10,00	1,588	6,00	0,656
	2D	**14,00**	**15,044**	**14,00**	**5,015**	**14,00**	**4,237**	**14,00**	**0,778**
	2D (T)	14,00	15,391	14,00	5,106	14,00	4,374	1400	0,733
	3D	**14,00**	**15,491**	**14,00**	**5,164**	**14,00**	**4,280**	**14,00**	**0,884**
	3D (T)	16,00	18,425	16,00	6,142	16,00	5,255	16,00	0,886
	4D	16,31	14,413	16,31	4,804	16,00	3,924	20,00	0,880
	4D (T)	**20,00**	**17,845**	**20,00**	**5,948**	**20,00**	**4,155**	**20,00**	**0,948**

Deney sonuçları incelendiğinde 2 ve 3 kazıktan oluşan kazık gruplarının aynı davranışı gösterdiği anlaşılmıştır. Bu kazık grubunda da kazık grubundaki bir kazık tek başına taşıdığı yükten fazla yük taşıdığı için grup verimi 1'den büyük olacaktır.

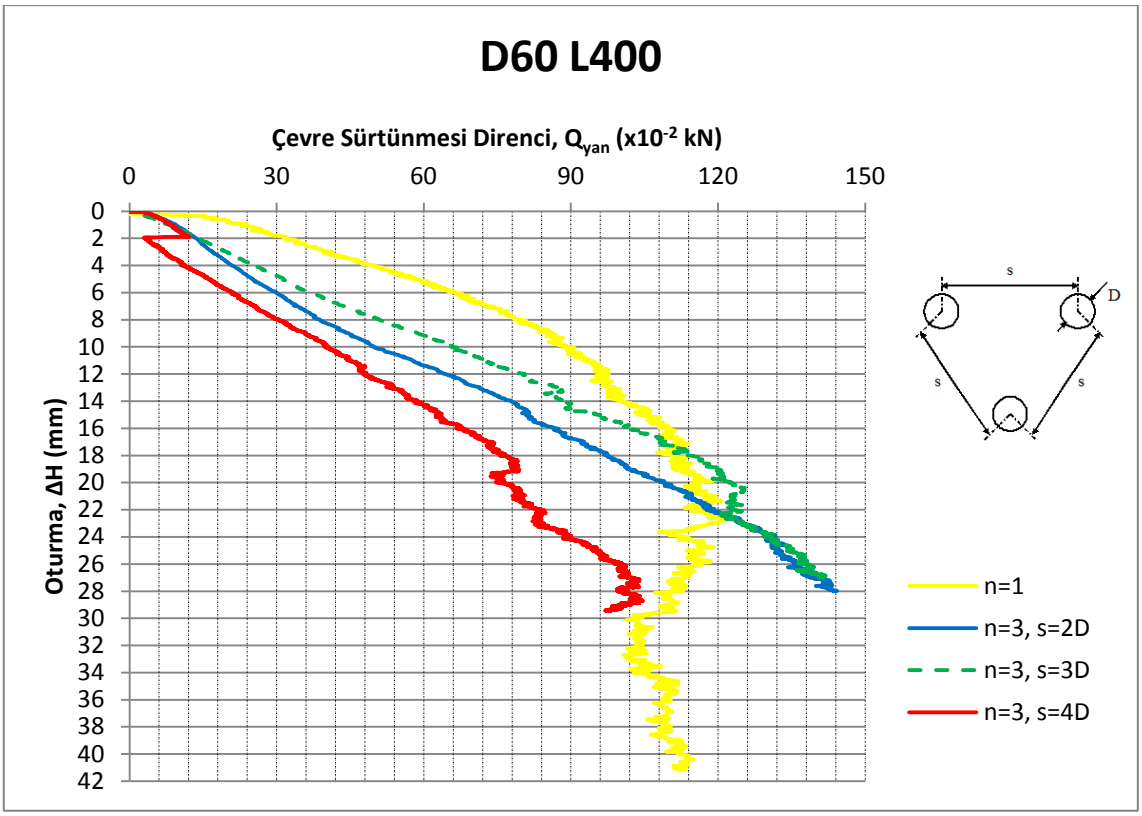
Şekil 5.1.20-5.1.21-5.1.22 incelendiğinde 3 kazıktan oluşan kazık grubunda da kazık aralığı arttıkça kazık grubu daha büyük oturma değerlerinde mobilize olmaya başlamıştır. Bu nedenle kazık aralığı arttıkça kazık grubunun toplam taşıma gücü ile bu kazık grubundaki bir kazığın taşıma gücü artmıştır. Bu sonuç da kazıklar arası mesafe arttıkça grup veriminin arttığını aynı zamanda da grup etkisinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 5.1.20. D60 L400—kazık aralığına bağlı olarak toplam taşıma gücünün değişimi



Şekil 5.1.21. D60 L400—kazık aralığına bağlı olarak uç direncinin değişimi



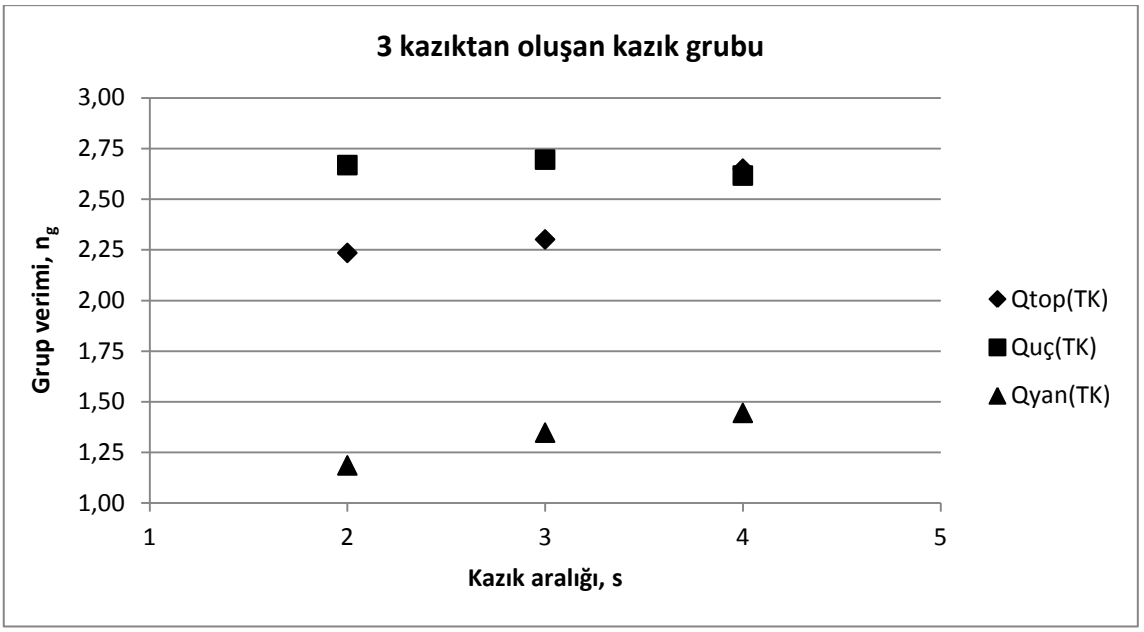
Şekil 5.1.22. D60 L400—kazık aralığına bağlı olarak çevre sürtünmesi direncinin değişimi

5.1.3.1. Kazık grubunun verimi

Grup verimi eşitlik (88) kullanılarak bulunmuş ve sonuçlar Çizelge 5.1.10 ve Şekil 5.1.23'de verilmiştir. 3 kazıktan oluşan kazık grubunda da grup verimi 1'den büyük bulunmuştur.

Çizelge 5.1.10. 3 kazıktan oluşan kazık grubuna ait grup verimleri

		Grup Verimi		
	s	Qtop	Quç	Qyan
D60 L400	2D	2,235	2,668	1,186
	3D	2,301	2,695	1,348
	4D	2,651	2,616	1,445



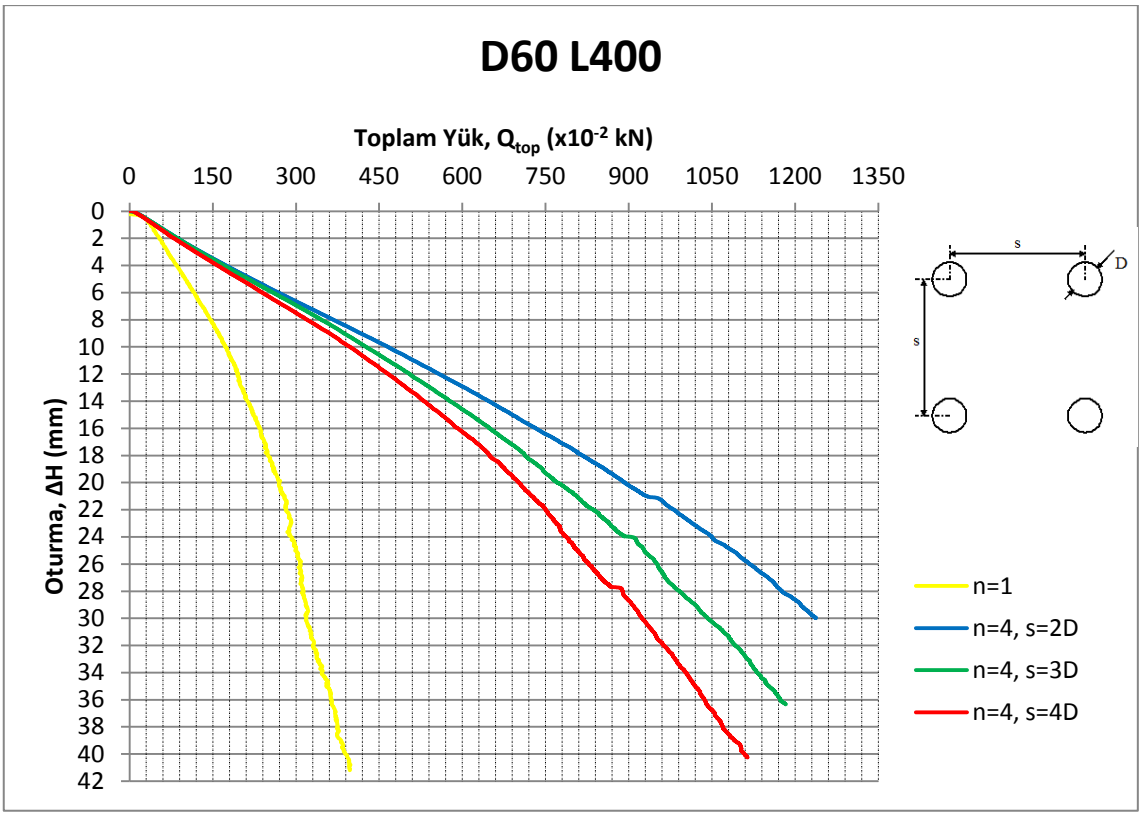
Şekil 5.1.23. 3 kazıktan oluşan kazık grubuna ait grup verimleri

5.1.4. 4 Kazıktan oluşan kazık grubu deney sonuçları

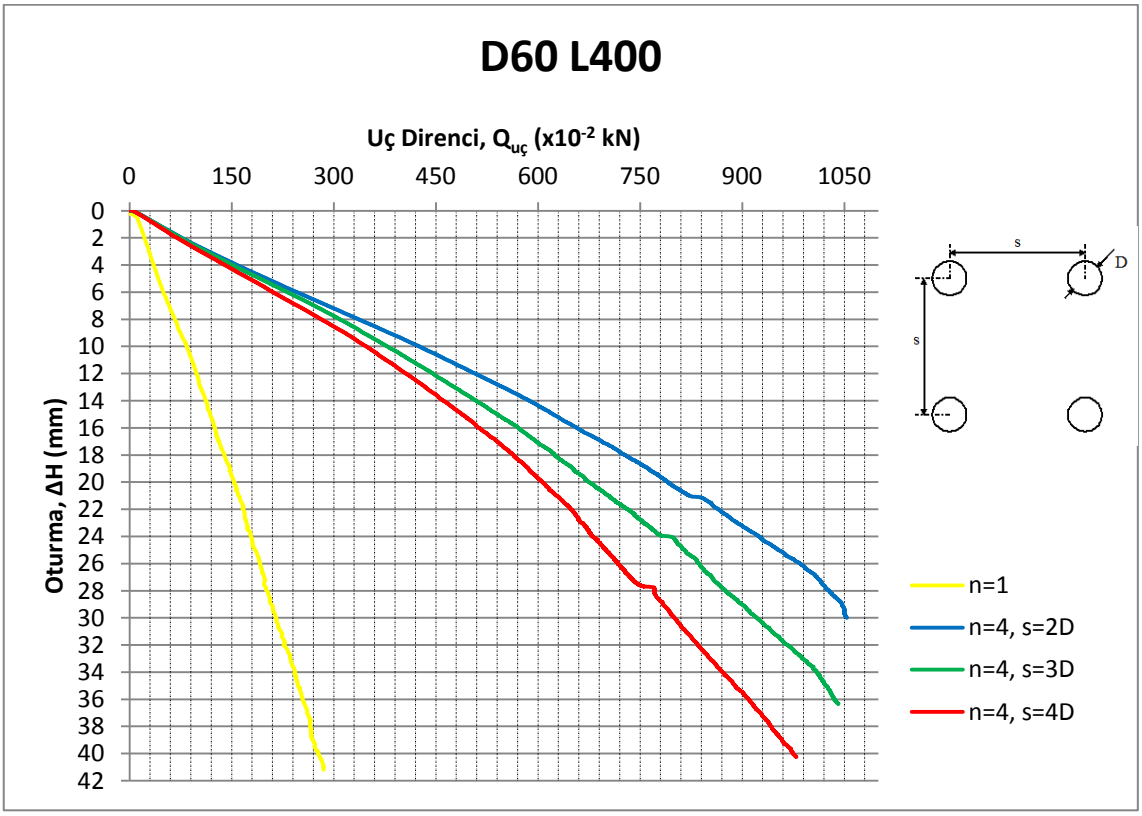
4 kazıktan oluşan kazık grubu deneylerinde çapı 60 mm ve boyu 400 mm olan kazıklar kullanılmıştır. Bu deneylerden elde edilen yük-oturma ile yük-birim oturma grafikleri Ek 4'de verilmiştir. Bu deneylere ait toplam taşıma gücü, uç direnci ve çevre sürtünmesi direnci değerleri Çizelge 5.1.11'de verilmiştir. Tekrarlı deneyler arasından hangi sonuçların kabul edildiği ise yine **kalın** harf/rakam ile gösterilmiştir. Bu kazık grubuna ait toplam yük-oturma, uç direnci-oturma ve çevre sürtünmesi direnci-oturma grafikleri de sırasıyla Şekil 5.1.24-5.1.25-5.1.26'da verilmiştir.

Çizelge 5.1.11. 4 kazıktan oluşan kazık grubu deney sonuçları

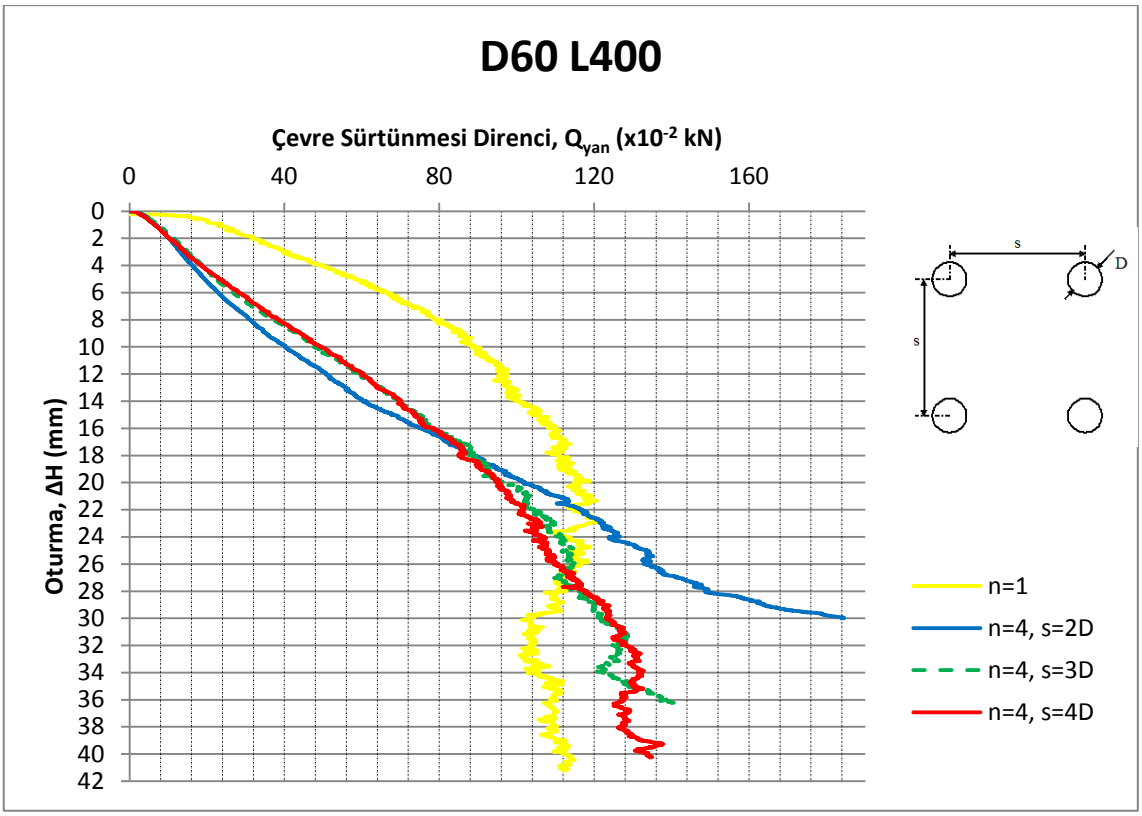
		Kazık Grubu		**Tekil Kazık**					
	s	**ΔH (mm)**	**Q_{KG} (kN)**	**ΔH (mm)**	**Q_{TK} (kN)**	**ΔH (mm)**	**$Q_{uç}$ (kN)**	**ΔH (mm)**	**Q_{yan} (kN)**
D60 L400	-	-	-	9,35	2,244	10,00	1,588	6,00	0,656
	2D	15,00	26,735	15,00	6,684	15,00	6,048	15,00	0,636
	2D (T)	**15,00**	**27,607**	**15,00**	**6,902**	**15,00**	**6,224**	**15,00**	**0,678**
	3D	16,00	26,563	16,00	6,641	16,00	5,838	16,00	0,803
	3D (T)	**17,10**	**27,446**	**17,10**	**6,861**	**17,10**	**6,001**	**17,10**	**0,860**
	4D	21,10	29,811	21,10	7,453	21,10	6,553	21,10	0,900
	4D (T)	**21,10**	**29,182**	**21,10**	**7,296**	**21,10**	**6,317**	**21,10**	**0,978**



Şekil 5.1.24. D60 L400—kazık aralığına bağlı olarak toplam taşıma gücünün değişimi



Şekil 5.1.25. D60 L400—kazık aralığına bağlı olarak uç direncinin değişimi



Şekil 5.1.26. D60 L400—kazık aralığına bağlı olarak çevre sürtünmesi direncinin değişimi

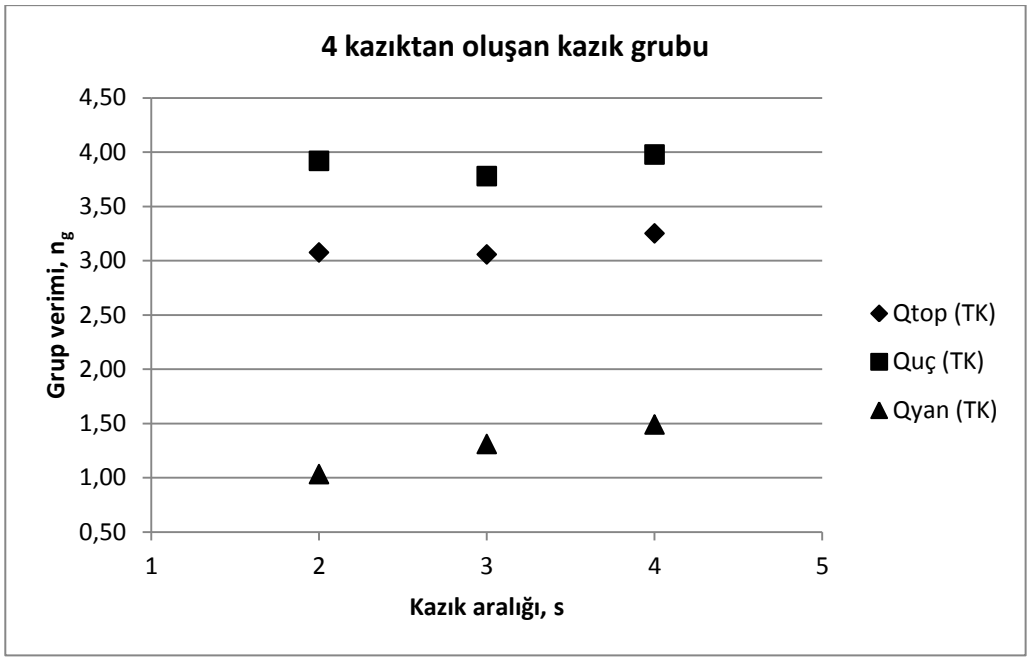
Şekil 5.1.24-5.1.25-5.1.26 incelendiğinde 4 kazıktan oluşan kazık grubu davranışının da 2 ve 3 kazıktan oluşan kazık grubuyla aynı olduğu görülür.

5.1.4.1. Kazık grubunun verimi

Grup verimi eşitlik (88) kullanılarak bulunmuş ve sonuçlar Çizelge 5.1.12 ve Şekil 5.1.27'de verilmiştir. 4 kazıktan oluşan kazık grubunda da grup verimi 1'den büyük bulunmuştur.

Çizelge 5.1.12. 4 kazıktan oluşan kazık grubuna ait grup verimleri

		Grup Verimi		
	s	Qtop	Quç	Qyan
D60 L400	2D	2,235	2,668	1,186
	3D	2,301	2,695	1,348
	4D	2,651	2,616	1,445



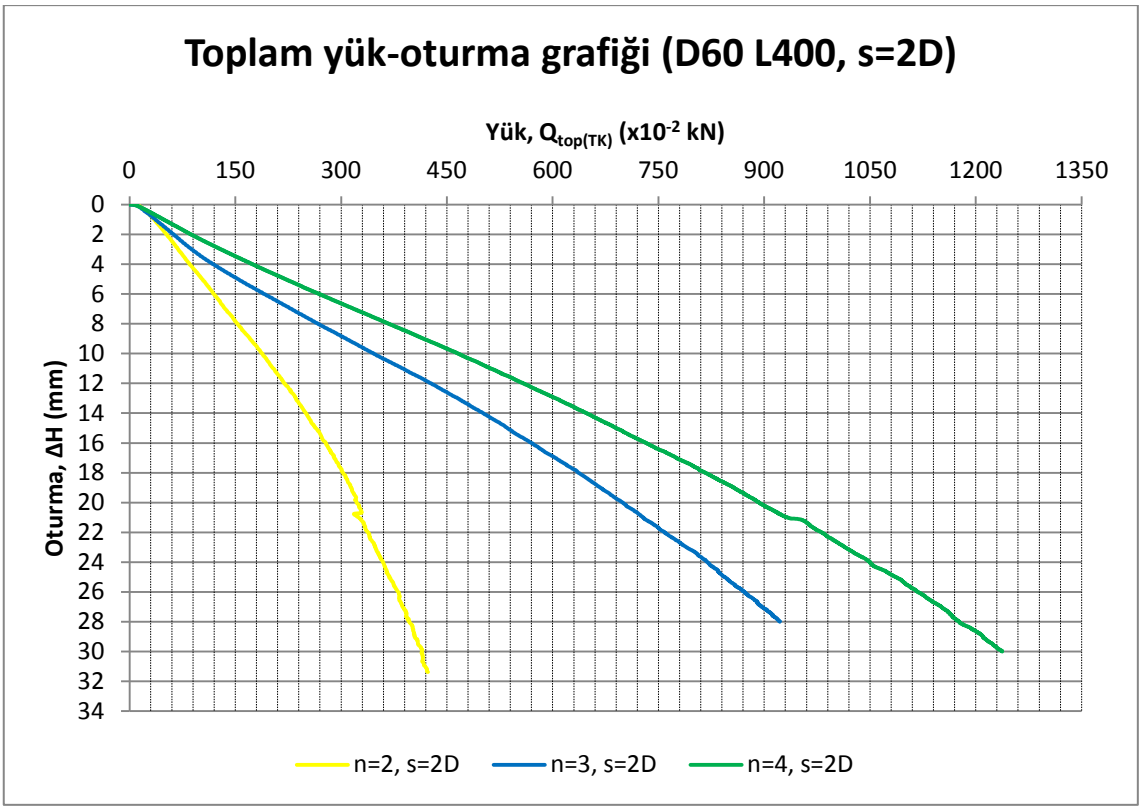
Şekil 5.1.27. 4 kazıktan oluşan kazık grubuna ait grup verimleri

5.1.5. Kazık grubu deney sonuçlarının karşılaştırılması

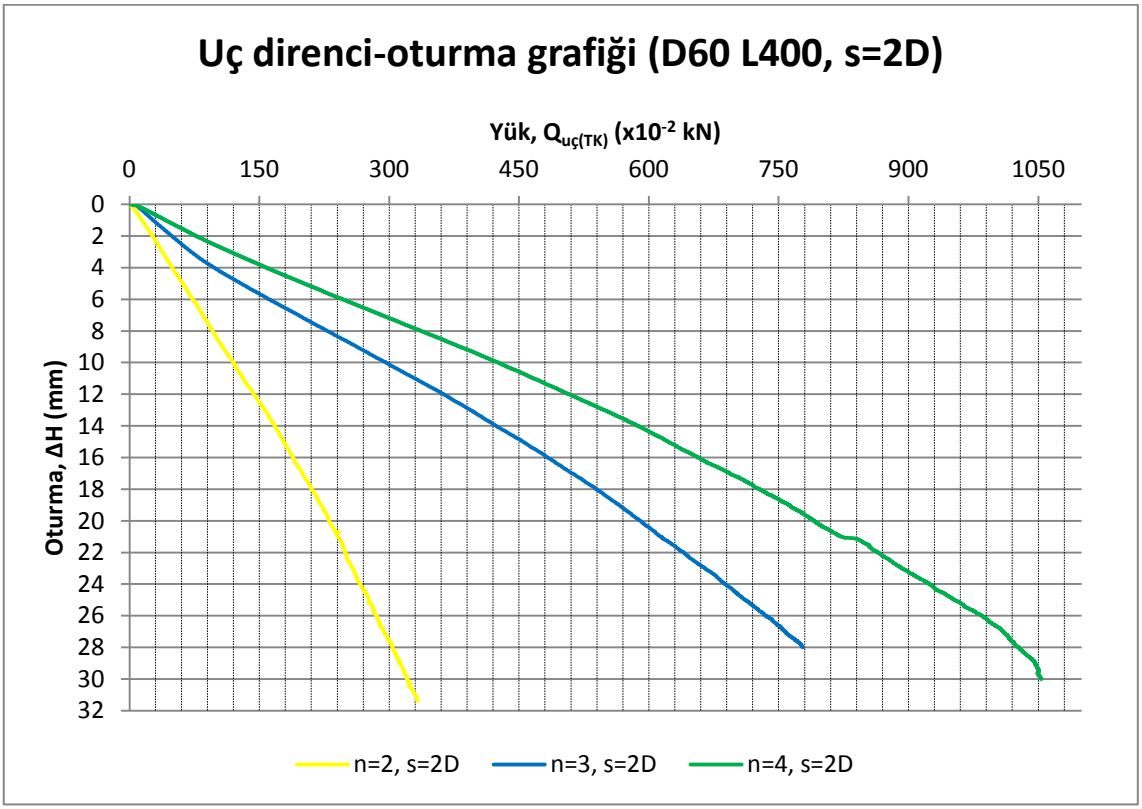
Bu kısımda her bir kazık aralığı için (s=2D, s=3D ve s=4D) kazık gruplarındaki bir kazığın taşıdığı toplam yük, uç direnci ve çevre sürtünmesi dirençlerinin kazık sayısına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Sonuçlar Şekil 5.1.28-5.1.29-5.1.30-5.1.31-5.1.32-5.1.33-5.1.34-5.1.35 ve Şekil 5.1.36'da gösterilmiştir.

Bu kısımda verilen grafiklerin hepsinde kazık grubunu oluşturan kazık sayısı arttıkça bir kazığa etkiyen toplam yük ile uç ve çevre sürtünme dirençleri artmıştır. Buradaki sonuçlar da daha önceki kısımlarda bulunan sonuçlarla aynı çıkmıştır.

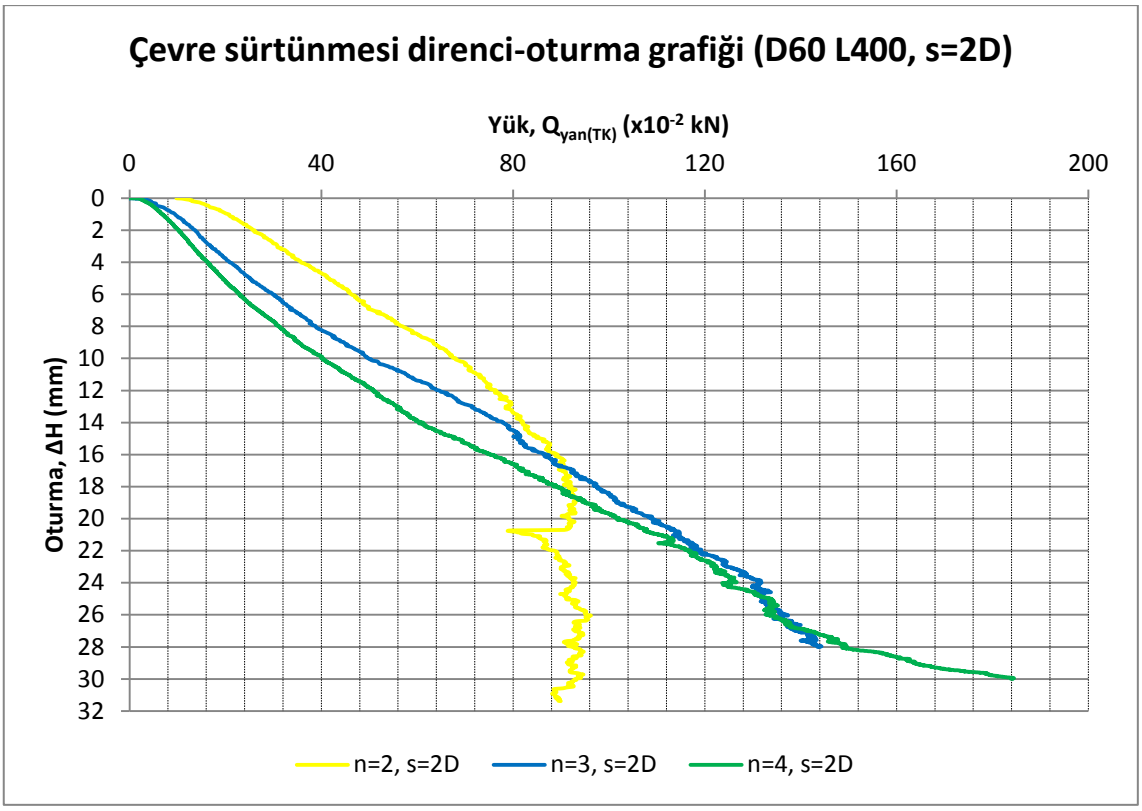
Bu kısımdaki deney sonuçları hakkında ise şunlar söylenebilir: Kazık aralığı aynı iken kazık sayının arttığı kazık gruplarında taşıma gücü de artmıştır. Bu da yine zemine aktarılan gerilmelerin artması sonucu olmuştur. Çünkü 2 kazığın zemine aktardığı gerilme ile 4 kazığın zemine aktardığı gerilme aynı değildir. Zemine aktarılan gerilmeler arttıkça zemin kendini ve kazığı daha çok tutmaya çalışmakta, zeminin taşıma gücü katsayıları artmakta bu nedenle de kazık uç direnci ve çevre sürtünmesi direnci artmaktadır.



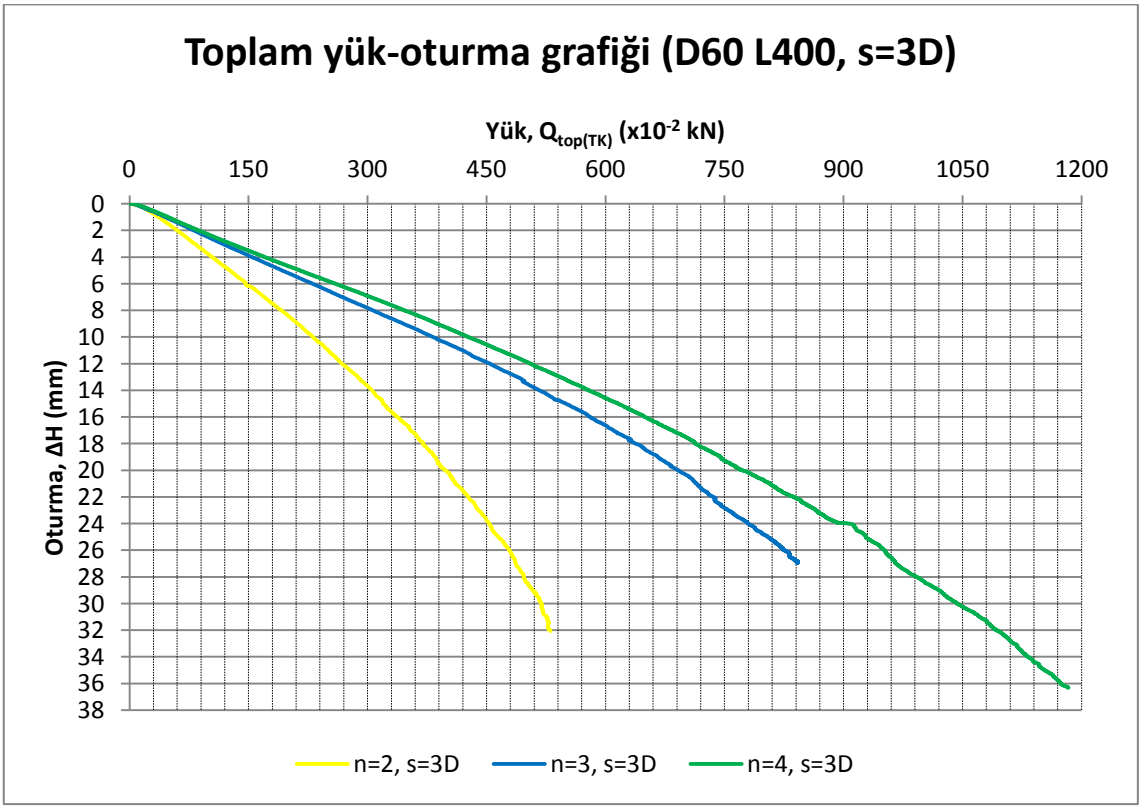
Şekil 5.1.28. Kazık sayısına bağlı olarak kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı toplam yükün değişimi



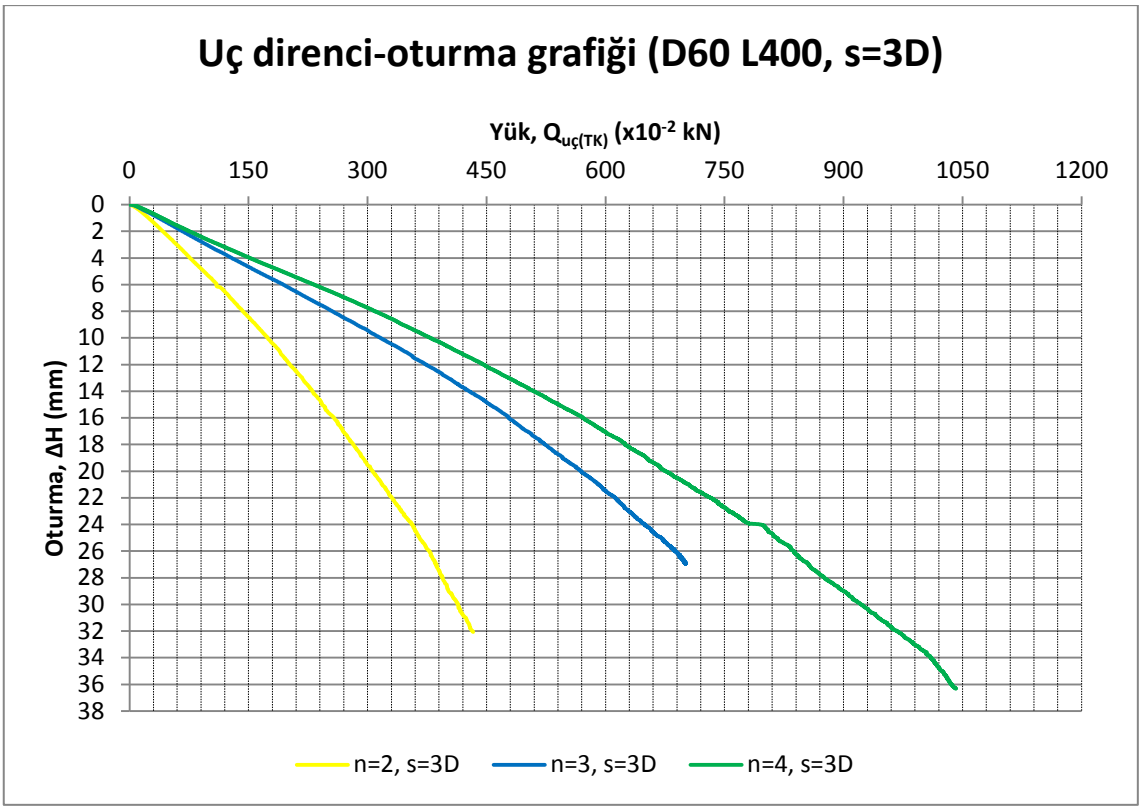
Şekil 5.1.29. Kazık sayısına bağlı olarak kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı uç direnci değişimi



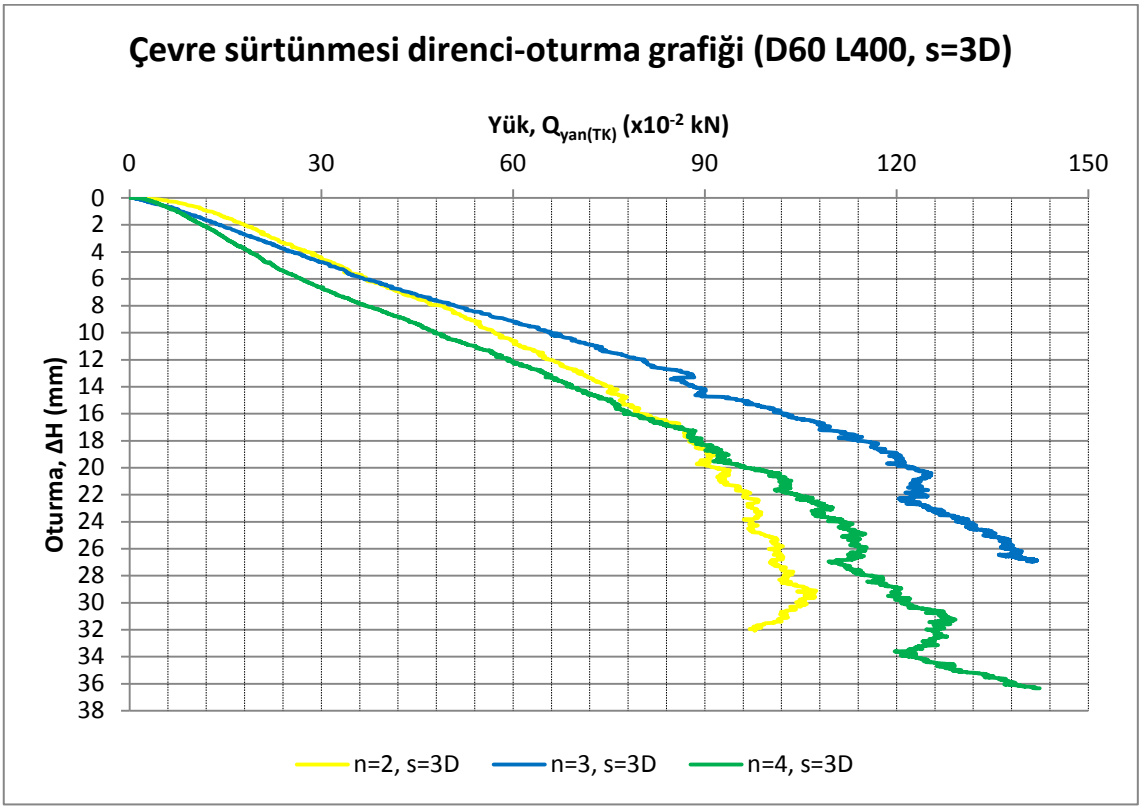
Şekil 5.1.30. Kazık sayısına bağlı olarak kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı çevre sürtünmesi direnci değişimi



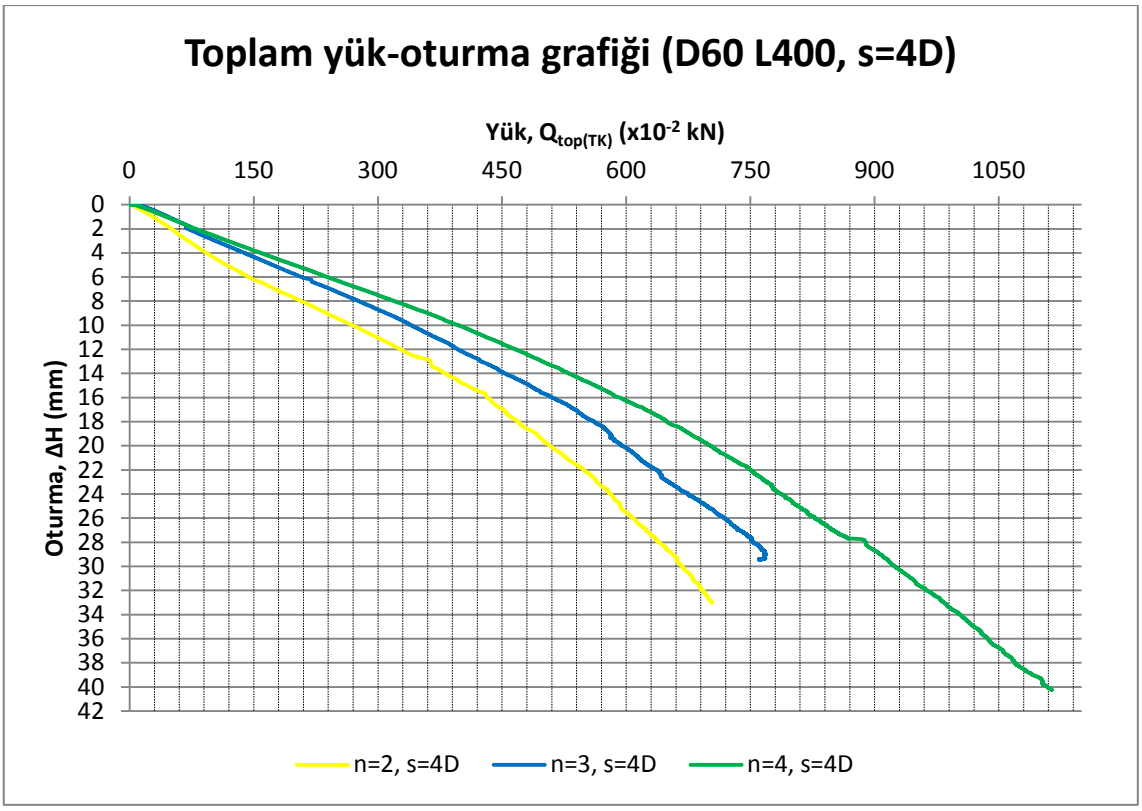
Şekil 5.1.31. Kazık sayısına bağlı olarak kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı toplam yükün değişimi



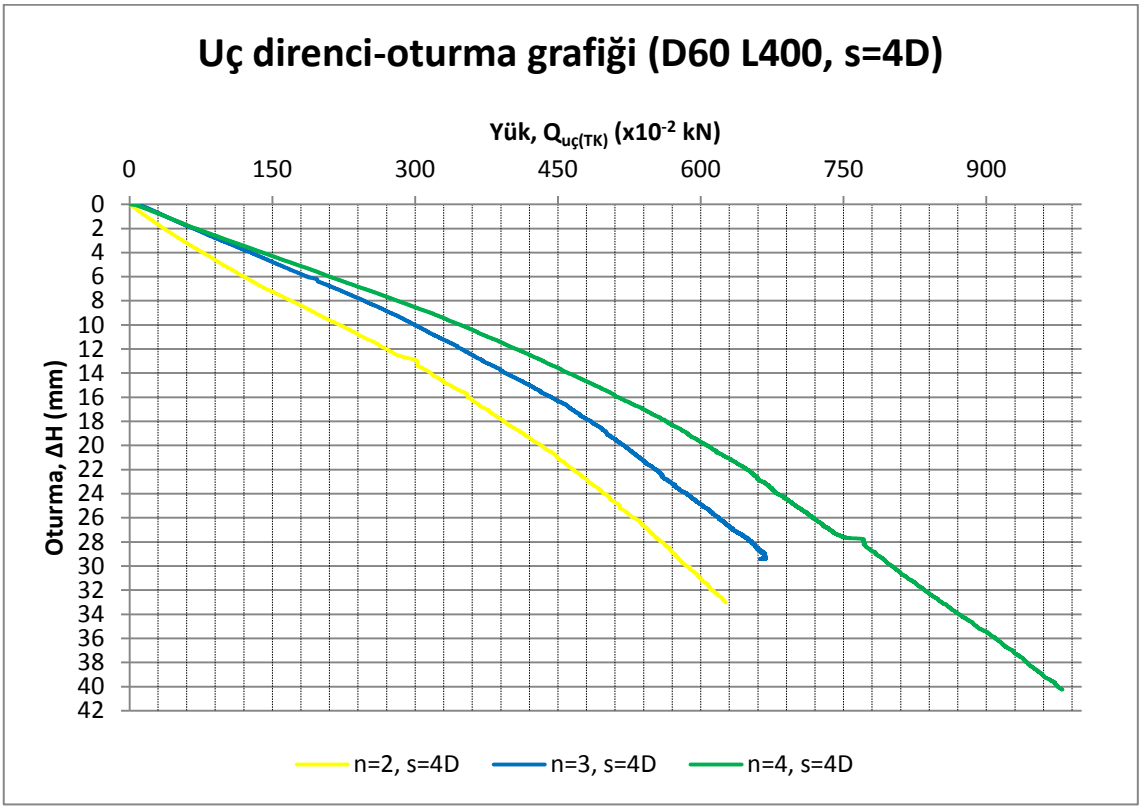
Şekil 5.1.32. Kazık sayısına bağlı olarak kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı uç direnci değişimi



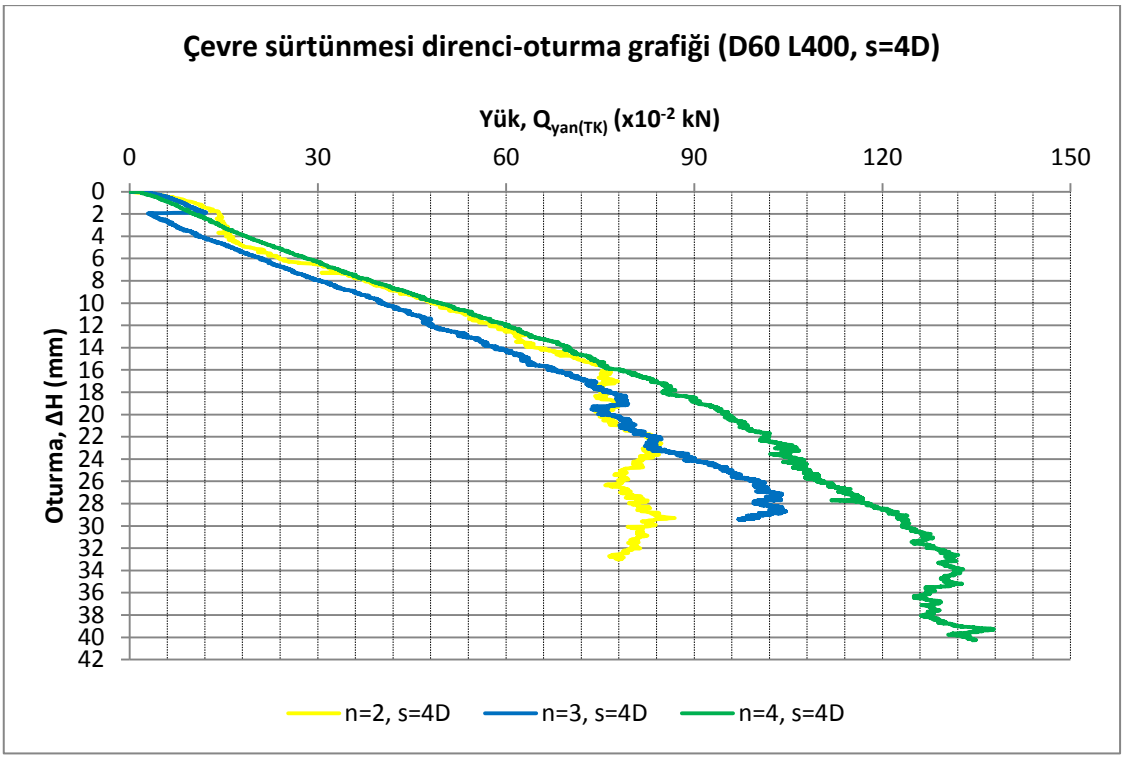
Şekil 5.1.33. Kazık sayısına bağlı olarak kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı çevre sürtünmesi direnci değişimi



Şekil 5.1.34. Kazık sayısına bağlı olarak kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı toplam yükün değişimi



Şekil 5.1.35. Kazık sayısına bağlı olarak kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı uç direnci değişimi



Şekil 5.1.36. Kazık sayısına bağlı olarak kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı çevre sürtünmesi direnci değişimi

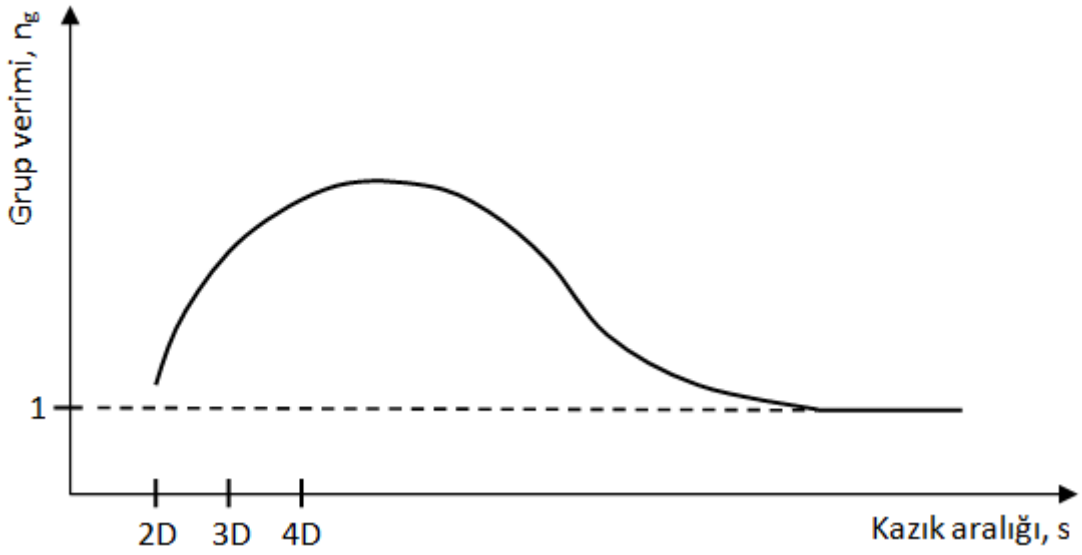
5.1.6. Kumlu zeminlerdeki kazık grubunun davranışı

Tekil kazıklara ait 8 deney ile kazık gruplarına ait 36 deney sonucu birlikte düşünüldüğünde kumlu zeminlerdeki kazık grubunun davranışı hakkında şunlar söylenebilir:

- Kazık grubunun davranışı ile ilgili en çok kabul görmüş yaklaşım kazıkların birbirini etkilemesinden dolayı taşıma gücünün azaldığı ve grup veriminin 1'den küçük olacağı yönündedir. Fakat bu yaklaşımda zemin cinsinin kazık grubu davranışına etkisi ile kazıkların çevre zeminine aktardığı gerilmeler göz ardı edilmektedir.
- Son yıllarda arazide ve laboratuarda yapılan çalışmalar ile bu tez kapsamında yapılan deneyler zemin cinsinin kazık grubu davranışını büyük oranda etkilediğini göstermektedir.
- Kazık grubu eksenel olarak yüklendiğinde kazıkların tabanındaki ve çevresindeki zemini sıkıştırmaktadır. Ayrıca kazıklara ve kazıkların etrafındaki zemine uç ve çevre sürtünmesi dirençleri nedeniyle gerilme aktarılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı kazık çevresindeki ve tabanındaki

zeminin taşıma gücü artmakta, kazık grubundaki bir kazığın taşıdığı yük tekil kazıktan fazla olmaktadır. Sonuç olarak kazık grubunun verimi 1'den büyük olmaktadır.

- Aynı çapta ve boydaki kazıklardan oluşan kazık gruplarında ise kazık aralığı arttıkça kazık grubunun taşıma gücü artmaktadır. Yani hem kazıklar arasındaki etkileşimler hem de kazık çevresindeki zemine aktarılan gerilmeler azalmaktadır. Bu da kazık aralığı arttıkça grup etkisinin azaldığını göstermektedir.
- Deney sonuçlarına bakıldığında kazık aralığının 4D olduğu durumda grup etkisinin azalmasına rağmen grup verimi yine de 1'den büyük olmaktadır (Şekil 5.1.17-5.1.23-5.1.27). Bu da kazık çevresindeki zeminin taşıma gücündeki artışın, grup etkisinden kaynaklanan taşıma gücü kaybından fazla olduğunu gösterir.
- Fakat kazık aralığı arttıkça kazık grubunun taşıma gücünün sürekli artması gerçekçi değildir. Yani Şekil 5.1.17-5.1.23-5.1.27'de verilen grup verimlerinin sürekli artması mümkün değildir. Çünkü kazık aralığı arttıkça bir kazıktan zemine aktarılan gerilmeler diğer kazıktan aktarılan gerilmelerin etki alanı dışında kalacaktır. Kazıklar arasındaki mesafe sonsuz sayılabilecek uzaklıkta olduğunda ise kazık grubundaki bir kazık artık tekil kazık gibi davranacaktır. Bu açıklamaların neticesinde kumlu zeminlerdeki kazık grubunun Şekil 5.1.37'deki gibi bir davranışa sahip olacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 5.1.37. Kumlu zeminlerde grup veriminin kazık aralığına göre değişimi

- Şekil 5.1.37'de verilen grafiği daha ayrıntılı inceleyecek olursak şunları söyleyebiliriz: Kumlu zeminlerdeki kazık grubunun davranışı incelenirken hem kazıkların birbirini etkilemesi sonucu taşıma gücünde azalma olacağı hem de kazıklardan çevre zemine aktarılan gerilmelerden dolayı taşıma gücünün artacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Burada; grup etkisinden dolayı taşıma gücünün ne kadar azalacağı veya zemine aktarılan gerilmelerden dolayı taşıma gücünün ne kadar artacağı kazık aralığına göre değişmektedir. Örneğin kazık aralığı 2D iken kazıkların birbirini etkilediği alan maksimum olmakta ve taşıma gücü oldukça azalmaktadır. Fakat kazıklardan aktarılan gerilmeler de zemindeki gerilmeleri çok fazla artırmakta ve zeminin taşıma gücü artmaktadır. Bu artış grup etkisinden kaynaklanan azalmadan daha fazla olduğu için grup verimi 1'den büyük olmaktadır. Kazık aralığı 4D olduğunda ise kazıkların birbirini etkilediği alan azalmakta bu yüzden de kazıklardan zemine aktarılan gerilmelerin kesiştiği alan azalmaktadır. Bu durumda ise grup etkisinin azalmasından dolayı taşıma gücü artmakta, zemine aktarılan gerilmeler ise s=2D'ye göre daha az olmasına rağmen yine de taşıma gücünü artırmaktadır. s=4D iken grup verimi hem 1'den hem de s=2D'ye göre daha büyük olmaktadır. Bu davranış Şekil 5.1.37'deki eğrinin tepe noktasındaki kazık aralığına kadar bu şekilde olmaktadır. Bu kazık aralığından sonra grup etkisi iyice azalmakta ve taşıma gücü artmaktadır. Bununla birlikte kazıklardan zemine aktarılan gerilmelerin kesişim alanı iyice azalmaktadır ve zeminin özellikleri çok değişmemekte, taşıma gücünde de çok artış olmamaktadır. Bu kazık aralığı yeterince fazla olduğunda ise kazıklardan aktarılan gerilmeler her bir kazığın kendi çevresine aktarılacak ve diğer kazıklar bu gerilme artışından etkilenmeyecektir. Yani kazıklar arası mesafe sonsuz denebilecek uzaklıkta olduğunda artık kazık grubundaki her kazık tekil kazık gibi davranmaya başlayacaktır. Bu kazık aralığında ise grup verimi 1'e eşit olacak ve kazık aralığı artsa bile grup veriminde bir değişiklik olmayacaktır.

5.2. Kazıklı Radye Sistemi Deney Sonuçları

Kazıklı radye sistemi oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve bu sistemin davranışını etkileyen bir çok etken vardır. Şekil 2.3.3'de verilen bu etkileşimler kısaca şu şekildedir: kazık-kazık etkileşimi, kazık-radye etkileşimi, radye-radye etkileşimi, kazık-zemin etkileşimi ve uç direnci-çevre sürtünmesi direncidir. Bu etkileşimlerden dolayı kazıklı radye sisteminin davranışında nasıl bir değişim olduğu tam olarak bilinmemektedir. Ayrıca zemin cinsi ve zeminin özellikleri, yeraltı suyunun durumu, kazık grubu ve radye temelin geometrisi, kazık grubunun radye temel altındaki yerleşim planı, kazıklar arasındaki mesafe gibi daha birçok etmen kazıklı radye sisteminin davranışını etkilemektedir. Belki de tüm bu parametrelerden sadece bir kaçı değişken olarak seçilip diğer parametreler sabit tutularak hangi parametrenin bu davranış üzerinde ne kadar etkili olduğu daha iyi anlaşılabilecektir.

Bu tez kapsamında yapılan ikinci grup deneysel çalışmalarda kazıklı radye sisteminin davranışı hakkında bazı ipuçları elde edilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle yukarıda sayılan birçok parametre sabit tutulmuş, bazıları ise değişken olarak seçilmiştir. Deneylerde kullanılan zeminin özellikleri kazık grubu deneylerinde kullanılan zeminle aynı özelliktedir. Bu deneylerde 60 mm çapında ve 400 mm boyundaki kazıklar 320 mm x 320 mm boyutlarındaki radye temelin altına yerleştirilerek yükleme yapılmıştır. Kazık sayısı 2, 3 ve 4 olarak seçilmiş, her yerleşim planında kazıklar arası mesafe ise 2D, 3D ve 4D olarak seçilmiştir. Böylelikle zemin koşulları ve radye temel ile kazıkların boyutları sabit tutulmuş; sadece kazık sayısı, kazık aralığı ve kazıkların yerleşim planı değiştirilmiştir.

Tasarım aşamasında daha ekonomik çözümler üretebilmek için radye temelin ne kadar yük taşıdığı hep merak edilmiştir. Fakat Çizelge 4.1'de verilen 22 adet vaka analizi sonucu incelendiğinde radye temelin toplam yükün %8-70'ini taşıdığı görülür. Bu fark yukarıda sayılan etkenlerden kaynaklanmaktadır. Yani kazıklı radye sisteminde radye temelin ne kadar yük taşıdığı hakkında belirli bir oran vermek çok doğru değildir. Böyle bir oran verebilmek için zemin-kazık-radye özelliklerinin değişken olduğu birçok deney yapılıp, radye temelin hangi koşullarda ne kadar yük taşıdığı belirtilmelidir. Ayrıca kazıklı radye sisteminin tasarlandığı her projenin kendine özgü olduğu unutulmamalı ve her problem için ayrı çözüm üretilmelidir.

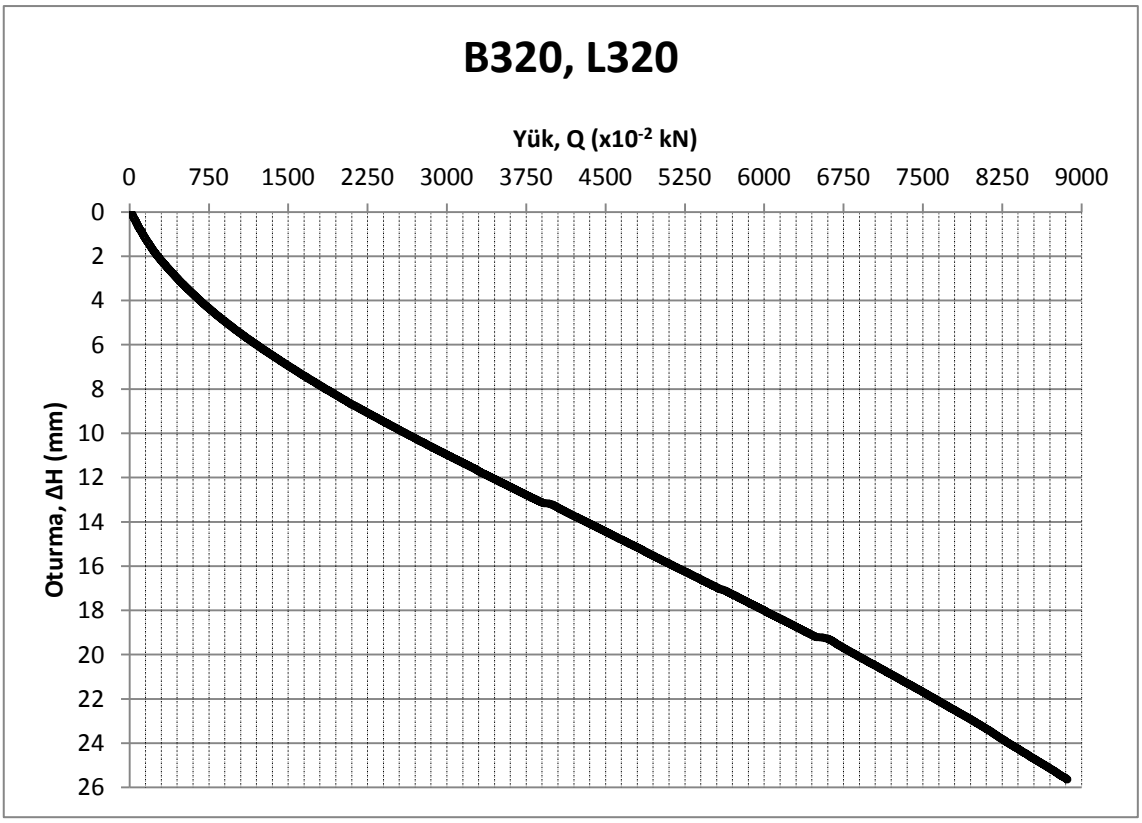
Bu tez kapsamında kazık sayısının, kazıklar arası mesafenin ve kazık yerleşiminin farklı olduğu her deney için kazık grubunun ve radye temelin farklı oturma

değerlerinde ne kadar yük taşıdığı verilecektir. Ayrıca bu oturma miktarlarında kazık grubunu oluşturan bir kazığın taşıdığı yük ile bu kazığa ait uç ve çevre sürtünmesi dirençleri de verilerek kazıklı radye sistemine bu parametrelerin ne derece etki ettiği araştırılacaktır.

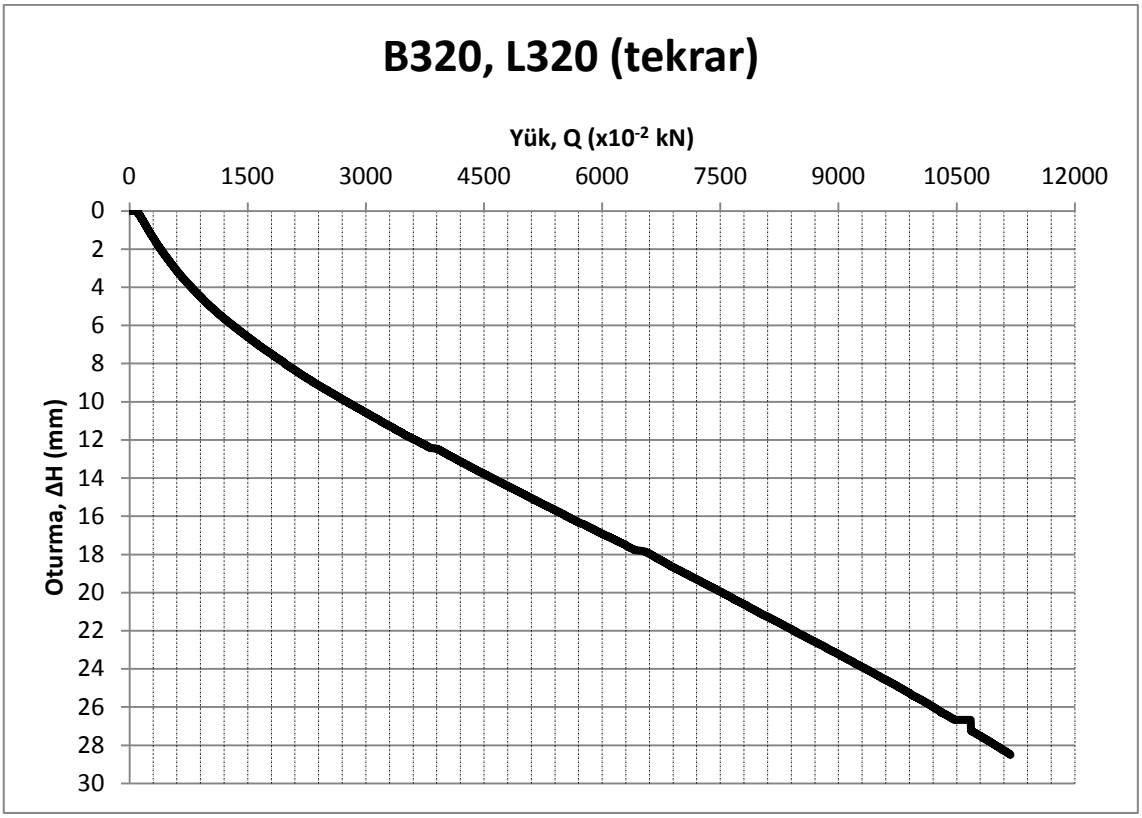
Kazıklı radye sistemi deneylerine ait yük-oturma grafikleri ile yük-birim oturma grafikleri Ek 5-6-7'de verilmiştir. Radye genişliğine bağlı olan birim oturma miktarı; ΔH oturma, B radye genişliği olmak üzere $\frac{\Delta H}{B}\times 100$ ifadesi ile bulunmuştur.

5.2.1. Radye temel yükleme sonuçları

Radye temelin yüklenmesiyle elde edilen yük-oturma grafiği Şekil 5.2.1'de ve temel tabanına gelen gerilmelerin değişimi Şekil 5.2.2'de verilmiştir. Radye temelin teorik olarak taşıma gücü Terzaghi teorisi kullanılarak 295.3 kN/m^2 bulunmuştur. Fakat deneylerden elde edilen sonuçlar bundan fazladır. Bu da deney tankının boyutlarının yetersiz olduğunu ve sınırlayıcı bir etki yaptığını gösterir. Deneylerde radye temel 11 mm oturma değerinde sınır taşıma gücüne ulaşmıştır.

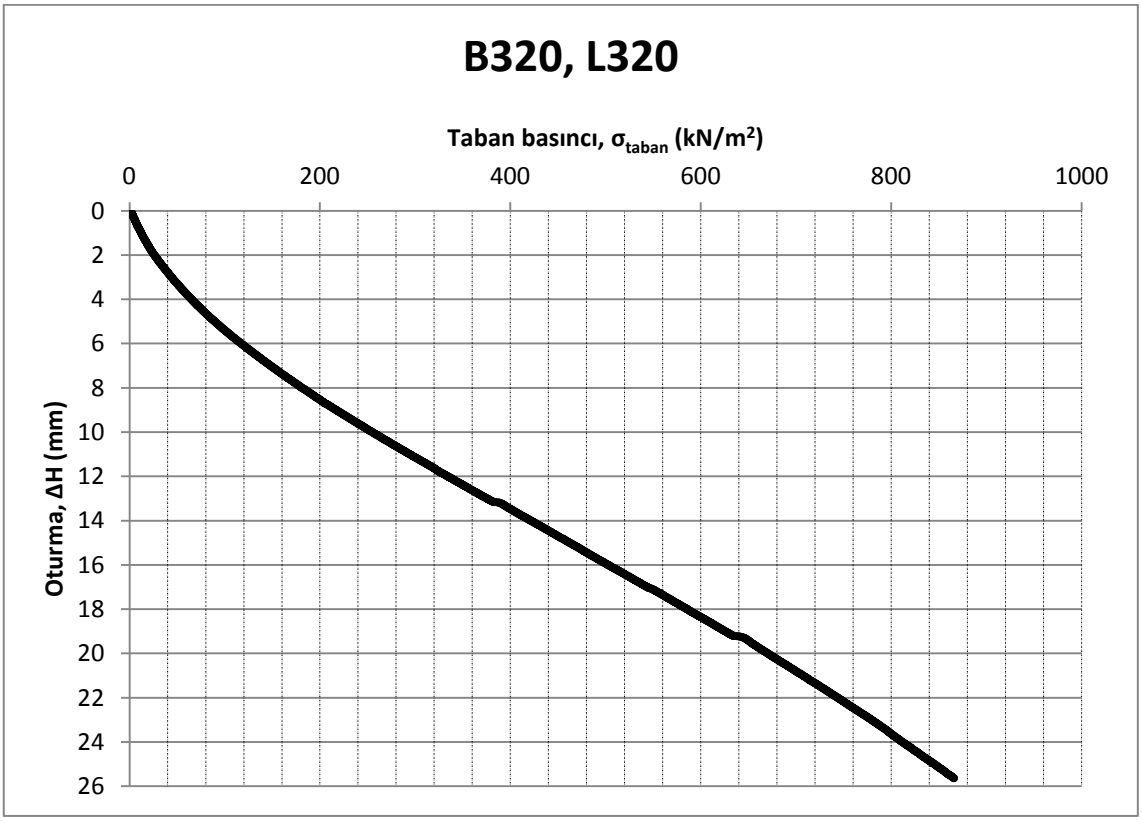


(a)

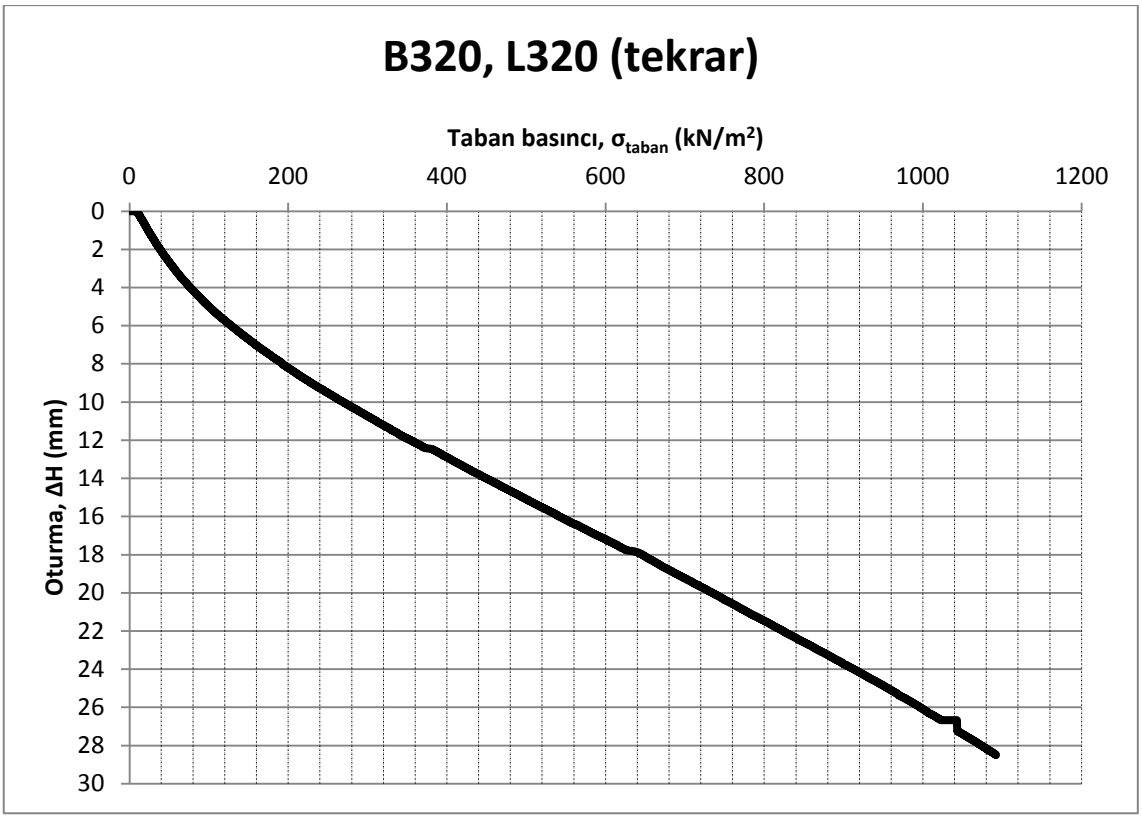


(b)

Şekil 5.2.1. Radye temele ait yük-oturma grafikleri



(a)



(b)

Şekil 5.2.2. Temel tabanına gelen gerilmeler

5.2.2. Radye temel altına 2 kazık uygulaması

Radye temel altına 2 kazığın yerleştirildiği deneylere ait yük-oturma grafikleri Ek 5'de verilmiştir. Kazık grubunun, radye temelin ve kazıklı radye sisteminin kazık aralığına bağlı olarak farklı oturma değerlerinde taşıdığı yükler Çizelge 5.2.1-5.2.2-5.2.3-5.2.4-5.2.5 ve Çizelge 5.2.6'da verilmiştir. Bu çizelgelerde ΔH oturma miktarını, B temel genişliğini, Q_{yan}, $Q_{uç}$ ve Q_{TK} kazık grubundaki bir kazığın taşıma güçlerini, n kazık grubundaki kazık sayısını, Q_{KG} kazık grubunun taşıma gücünü, Q_R radye temelin taşıma gücünü, Q_{KR} kazıklı radye sisteminin taşıma gücünü ve Q_R/Q_{KR} radye temelin toplam yükün ne kadarını taşıdığını göstermektedir.

Çizelge 5.2.1-5.2.2-5.2.3-5.2.4-5.2.5 ve Çizelge 5.2.6 incelendiğinde kazık aralığı arttıkça radye temelin yükü çok artmamış fakat kazık grubunun taşıdığı yük bir miktar artmıştır. Bu nedenle kazıklı radye sisteminin taşıdığı yük de bir miktar artmıştır.

Çizelge 5.2.1. Radye temel altına 2 kazık uygulaması— B320, L320, n=2, D60, L400, s=2D

		B320, L320, n=2, D60, L400, s=2D							
		Kazık Grubu					Radye Temel	Kazıklı Radye	
		Tek Kazık							
ΔH (mm)	ΔH/B*100 (%)	Q_{yan} (kN)	$Q_{uç}$ (kN)	Q_{TK} (kN)	n	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	**0,32**	0,051	0,206	0,257	2	0,514	0,854	1,368	62,4
2	**0,63**	0,085	0,370	0,455	2	0,910	1,625	2,535	64,1
4	**1,25**	0,098	0,777	0,875	2	1,750	3,988	5,738	69,5
6	**1,88**	0,219	1,308	1,527	2	3,054	7,059	10,113	69,8
10	**3,13**	0,980	2,691	3,671	2	7,342	16,083	23,425	68,7
15	**4,69**	2,685	4,701	7,386	2	14,772	30,693	45,465	67,5
19	**5,94**	4,014	5,861	9,875	2	19,750	41,070	60,820	67,5

Çizelge 5.2.2. Radye temel altına 2 kazık uygulaması— B320, L320, n=2, D60, L400, s=2D (tekrar)

		B320, L320, n=2, D60, L400, s=2D (tekrar)							
		Kazık Grubu					Radye Temel	Kazıklı Radye	
		Tek Kazık							
ΔH (mm)	ΔH/B*100 (%)	Q_{yan} (kN)	$Q_{uç}$ (kN)	Q_{TK} (kN)	n	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	**0,32**	0,037	0,159	0,196	2	0,392	0,885	1,277	69,3
2	**0,63**	0,062	0,339	0,401	2	0,802	1,539	2,341	65,7
4	**1,25**	0,170	0,787	0,957	2	1,914	3,464	5,378	64,4
6	**1,88**	0,472	1,384	1,856	2	3,712	6,252	9,964	62,7
10	**3,13**	1,449	2,920	4,369	2	8,738	15,755	24,494	64,3
15	**4,69**	3,489	5,204	8,693	2	17,386	33,077	50,463	65,5
17	**5,31**	4,465	6,193	10,658	2	21,316	40,804	62,120	65,7

Çizelge 5.2.3. Radye temel altına 2 kazık uygulaması— B320, L320, n=2, D60, L400, s=3D

		B320, L320, n=2, D60, L400, s=3D							
		Kazık Grubu					Radye Temel	Kazıklı Radye	
		Tek Kazık							
ΔH (mm)	ΔH/B*100 (%)	Q_{yan} (kN)	$Q_{uç}$ (kN)	Q_{TK} (kN)	n	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	**0,32**	0,063	0,271	0,334	2	0,668	1,199	1,867	64,2
2	**0,63**	0,189	0,422	0,612	2	1,224	2,038	3,262	62,5
4	**1,25**	0,406	0,711	1,117	2	2,234	4,239	6,473	65,5
6	**1,88**	0,673	1,074	1,747	2	3,496	7,251	10,747	67,5
10	**3,13**	1,703	2,034	3,737	2	7,474	15,822	23,296	67,9
15	**4,69**	3,302	3,443	6,745	2	13,490	30,012	43,502	69,0
20	**6,25**	5,029	4,913	9,941	2	19,882	45,660	65,542	69,7

Radye temelin altında 2 kazığın yer aldığı deneylerde kazık aralığı değiştikçe taşıma gücü açısından çok belirgin değişimler olmamıştır. Bu da radye temelden zemine aktarılan gerilmelerin tüm zemini etkilemesinden kaynaklanmakta ve 20 mm oturma değerine kadar gözle görülür farklar oluşmamaktadır.

Çizelge 5.2.4. Radye temel altına 2 kazık uygulaması— B320, L320, n=2, D60, L400, s=3D (tekrar)

		B320, L320, n=2, D60, L400, s=3D (tekrar)							
		Kazık Grubu					Radye Temel	Kazıklı Radye	
		Tek Kazık							
ΔH (mm)	ΔH/B*100 (%)	Q_{yan} (kN)	$Q_{uç}$ (kN)	Q_{TK} (kN)	n	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	**0,32**	0,003	0,182	0,185	2	0,370	1,075	1,445	74,4
2	**0,63**	0,050	0,323	0,373	2	0,747	1,910	2,657	71,9
4	**1,25**	0,216	0,721	0,937	2	1,873	4,728	6,151	76,9
6	**1,88**	0,438	1,246	1,684	2	3,368	7,650	11,018	69,4
10	**3,13**	1,292	2,647	3,939	2	7,877	17,667	25,544	69,1
15	**4,69**	3,056	4,683	7,738	2	15,477	34,712	50,189	69,2
20	**6,25**	5,347	6,664	12,01	2	24,022	52,871	76,893	68,8

Çizelge 5.2.5. Radye temel altına 2 kazık uygulaması— B320, L320, n=2, D60, L400, s=4D

		B320, L320, n=2, D60, L400, s=4D							
		Kazık Grubu					Radye Temel	Kazıklı Radye	
		Tek Kazık							
ΔH (mm)	ΔH/B*100 (%)	Q_{yan} (kN)	$Q_{uç}$ (kN)	Q_{TK} (kN)	n	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	**0,32**	0,126	0,323	0,449	2	0,898	1,261	2,159	58,4
2	**0,63**	0,232	0,488	0,720	2	1,440	2,037	3,477	58,6
4	**1,25**	0,474	0,843	1,317	2	2,634	4,317	6,951	62,1
6	**1,88**	0,862	1,291	2,153	2	4,306	7,519	11,825	63,6
10	**3,13**	1,934	2,431	4,365	2	8,729	17,220	25,949	66,4
15	**4,69**	3,762	4,180	7,942	2	15,883	33,500	49,383	67,8
20	**6,25**	5,864	6,002	11,87	2	23,733	51,224	74,957	68,3

Çizelge 5.2.6. Radye temel altına 2 kazık uygulaması— B320, L320, n=2, D60, L400, s=4D (tekrar)

		B320, L320, n=2, D60, L400, s=4D (tekrar)							
		Kazık Grubu					Radye Temel	Kazıklı Radye	
		Tek Kazık							
ΔH (mm)	ΔH/B*100 (%)	Q_{yan} (kN)	$Q_{uç}$ (kN)	Q_{TK} (kN)	n	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	**0,32**	0,037	0,053	0,090	2	0,180	1,117	1,297	86,1
2	**0,63**	0,059	0,145	0,204	2	0,408	2,094	2,502	83,7
4	**1,25**	0,071	0,452	0,523	2	1,046	4,435	5,482	80,9
6	**1,88**	0,358	0,846	1,204	2	2,406	7,580	9,986	75,9
10	**3,13**	1,242	1,922	3,164	2	6,329	17,191	23,520	73,1
15	**4,69**	3,034	3,650	6,684	2	13,368	33,400	46,768	71,4
20	**6,25**	5,351	5,400	10,75	2	21,503	50,709	72,211	70,2

5.2.3. Radye temel altına 3 kazık uygulaması

Radye temel altına 3 kazığın yerleştirildiği deneylere ait yük-oturma grafikleri Ek 6'da verilmiştir. Kazık grubunun, radye temelin ve kazıklı radye sisteminin kazık aralığına bağlı olarak farklı oturma değerlerinde taşıdığı yükler Çizelge 5.2.7-5.2.8 ve Çizelge 5.2.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.2.7. Radye temel altına 3 kazık uygulaması— B320, L320, n=3, D60, L400, s=2D

ΔH (mm)	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	0,843	0,561	1,404	40,0
2	1,396	1,271	2,667	47,7
4	3,494	2,832	6,326	44,8
6	6,187	5,041	11,228	44,9
10	13,866	11,990	25,856	46,4
15	25,633	24,429	50,061	48,8
19	34,908	35,515	70,423	50,4

Çizelge 5.2.8. Radye temel altına 3 kazık uygulaması— B320, L320, n=3, D60, L400, s=3D

ΔH (mm)	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	1,443	0,486	1,929	25,2
2	2,625	1,113	3,738	29,8
4	4,950	3,538	8,488	41,7
6	7,329	7,300	14,629	50,0
10	13,896	18,492	32,388	57,1
15	25,591	34,111	59,703	57,1
18	11,987	65,116	77,103	84,5

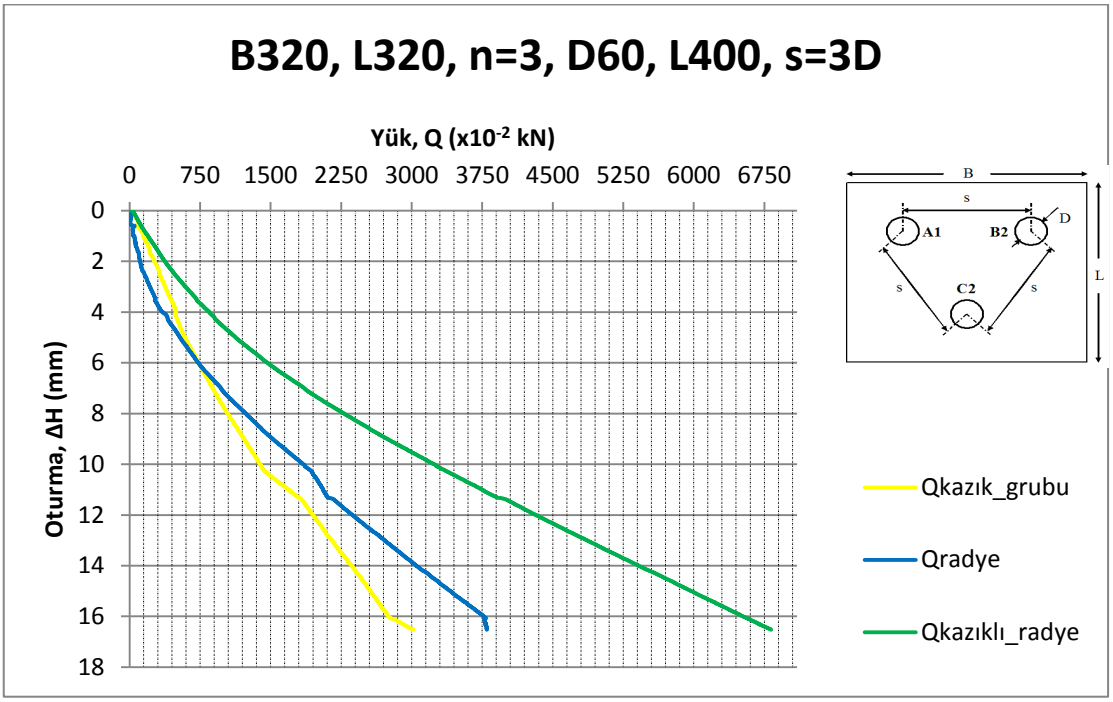
Çizelge 5.2.9. Radye temel altına 3 kazık uygulaması— B320, L320, n=3, D60, L400, s=4D

ΔH (mm)	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	1,172	1,097	2,269	48,3
2	1,864	1,970	3,834	51,4
4	3,838	4,074	7,912	51,5
6	6,333	7,036	13,370	52,6
10	13,170	15,566	28,736	54,2
15	23,930	29,485	53,415	55,2
19	33,131	41,813	74,943	55,8

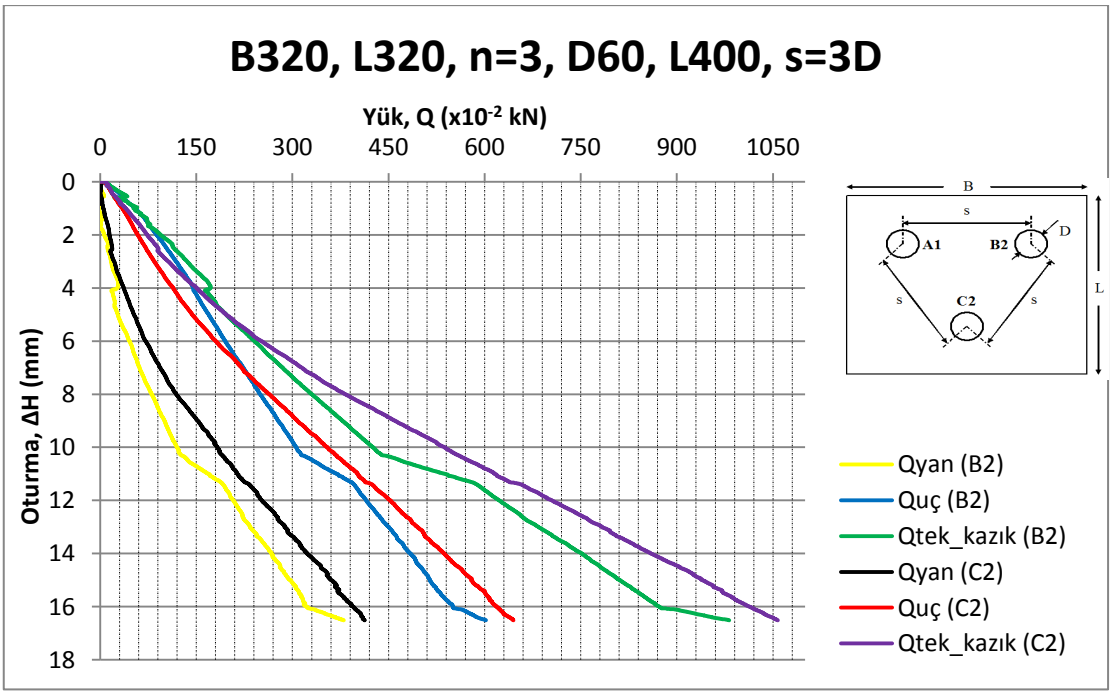
Çizelge 5.2.7-5.2.8 ve Çizelge 5.2.9'da verilen deney sonuçları incelendiğinde her deney için oturmalar arttıkça radye temelin yük taşıma kapasitesinin de arttığı görülür. Ayrıca Ek 6'da verilen yük-oturma grafikleri de incelenirse şu sonuca varılır: Kazıklı radye sistemi eksenel olarak yüklendiğinde ilk başta kazık grubu ve radye temel birlikte yük taşımaktadır. Daha sonra kazık grubu sınır gücüne ulaşmakta ve radye temel yük almaya devam etmektedir. Son olarak oturmalar arttıkça artık radye temel de sınır taşıma gücüne ulaşmaktadır. Bu davranış Şekil 5.2.3'de kolaylıkla görülebilir. Ayrıca kazık aralığı arttıkça kazıklı radye sisteminin taşıma gücü de artmıştır.

Şekil 5.2.4 incelenecek olursa kazıklı radye sisteminde kazıkların yerleşim planının kazıklara gelen yükü etkilediği görülür. Kazıklı radye sistemi eksenel olarak yüklendiğinde ve kazıkların yerleşimi simetrik olduğunda tük kazıklara eşit yük gelmektedir. Fakat Şekil 5.2.4 de A1 ve B2 kazıkları eşit yük taşırken, C2 kazığı daha fazla yük taşımaktadır. Bunun nedenlerinden biri; C2 kazığının daha büyük temel

alanından etkilenmesi ve bu kazığa daha fazla yük aktarılmasından kaynaklanmaktadır. İkinci neden ise C2 kazığının daha fazla yük taşımasına rağmen bununla orantılı olarak daha büyük oturma yapamamasıdır. Çünkü kazıklı radye sisteminde kazıklar ve radye temel eşit miktarda oturma yapmaktadır. C2 kazığı da diğer kazıklarla aynı oturma yapmaya zorlandığı için daha fazla yük taşımaktadır.



Şekil 5.2.3. Radye temel altına 3 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafiği



Şekil 5.2.4. Radye temel altına 3 kazık uygulaması-kazık yerleşim planının önemi

5.2.4. Radye temel altına 4 kazık uygulaması

Radye temel altına 4 kazığın yerleştirildiği deneylere ait yük-oturma grafikleri Ek 7'de verilmiştir. Kazık grubunun, radye temelin ve kazıklı radye sisteminin kazık aralığına bağlı olarak farklı oturma değerlerinde taşıdığı yükler Çizelge 5.2.10-5.2.11 ve Çizelge 5.2.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.2.10. Radye temel altına 4 kazık uygulaması— B320, L320, n=4, D60, L400, s=2D

ΔH (mm)	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	1,881	0,419	2,230	18,8
2	3,151	0,717	3,868	18,5
4	5,888	1,725	7,613	22,7
6	9,172	3,336	12,508	26,7
10	17,603	8,926	26,529	33,6
15	31,201	19,115	50,316	38,0
20	45,236	30,806	76,042	40,5

Çizelge 5.2.11. Radye temel altına 4 kazık uygulaması— B320, L320, n=4, D60, L400, s=3D

ΔH (mm)	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	2,040	0,298	2,337	12,8
2	3,287	0,541	3,827	14,1
4	6,782	1,545	8,327	18,6
6	11,024	3,197	14,221	22,5
10	21,749	8,727	30,476	28,6
15	37,922	19,382	57,304	33,8

Çizelge 5.2.12. Radye temel altına 4 kazık uygulaması— B320, L320, n=4, D60, L400, s=4D

ΔH (mm)	Q_{KG} (kN)	Q_R (kN)	Q_{KR} (kN)	Q_R/Q_{KR} (%)
1	1,691	0,869	2,561	33,9
2	3,083	1,150	4,232	27,2
4	6,264	2,118	8,382	25,3
6	10,221	3,759	13,980	26,9
10	20,736	9,470	30,206	31,4
15	35,520	21,379	56,889	37,6
18	44,099	29,993	74,092	40,5

Radye temelin altına 4 kazığın yerleştirildiği kazıklı radye sistemi deneylerinde kazık grubunun taşıdığı yük radye temelin taşıdığı yükten fazla çıkmıştır. 2 veya 3 kazığın kullanıldığı kazıklı radye deneylerinde ise radye temel kazık grubundan fazla veya kazık grubuna yakın yük taşımıştı. Bu nedenle kazık sayısı arttıkça radye temelin taşıdığı yük oranı azalmaktadır. Bu da kazık sayısı arttıkça kazık grubunun oturmaları azaltıcı bir etki yaptığını ve yükün büyük bir kısmının kazık grubu tarafından taşındığını gösterir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Tekil kazık, kazık grupları ve kazıklı radye sistemine ait deneysel sonuçlar ayrı başlıklar altında verilmiştir.

Tekil kazık, kazık grupları ve kazıklı radye sistemine ait yükleme deneylerinden bulunan sonuçların kumlu zeminler için geçerli olduğu unutulmamalıdır. Deneylerde kullanılan kumun özellikleri için Bölüm 4.1 ve Bölüm 4.4'e bakılabilir. Ayrıca deneyler eksenel ve merkezi yükler altında yapılmıştır.

Deneylerde bulunan sonuçlara benzer sonuçları başka araştırmacıların da bulmuş olması deney sisteminin ve sonuçların doğruluğunu artırmaktadır.

6.1.1. Tekil kazık yükleme deneylerinin sonuçları

- Kazık yükleme deneylerinden tekil kazığın davranışı birebir gözlenmiştir. Kazık yük almaya başladığında uç ve çevre sürtünme dirençleri artmaya başlamakta, belirli bir oturma değerine kadar çevre sürtünmesi uç direncinden fazla olmaktadır. Daha sonra çevre sürtünmesi değeri mobilize olurken uç direnci artmaya devam etmektedir. Uç direncinin mobilize olması net bir şekilde gözlenmezken, belirli bir oturma değerinden sonra eğrinin başlangıç eğimi azalmaya başlamıştır.
- Deney sonuçlarına ait grafikler incelendiğinde çevre sürtünmesi direncinin belirli bir oturma değerinden sonra artmadığı fakat uç direncinin sürekli arttığı görülmüştür. Yani kazık uç direncine ait eğrinin doğrusala yakın devam ettiği ve eğrinin eğiminde belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni ise şudur: Deneyler orta sıkılıktaki kum içersinde yapıldığından ve kazık eksenel yükleme sonucu altındaki zemini sıkıştırdığından dolayı yükleme devam ettikçe kazık ucundaki zeminin sıkılığı artmakta, bunun sonucunda da zeminin taşıma gücü artmaktadır. Bunun sonucu olarak uç direnci doğrusala yakın bir şekilde artmaktadır.
- Deneylerin sonucunda uç direnci ve çevre sürtünmesi direncinin buna bağlı olarak da toplam taşıma gücünün farklı oturma değerlerinde mobilize olmaya başladığı görülmüştür. Deneylerde çevre sürtünmesi direnci genellikle 6 mm

(%10 D), uç direnci ise 10-12 mm (%15-20 D) oturma değerlerinde mobilize olmuştur. Bu yüzden uç ve çevre sürtünme dirençleri için farklı güvenlik sayıları kullanılmalıdır. Çevre sürtünmesi direnci daha erken mobilize olmaya başladığı için çevre sürtünmesi direnci için seçilecek güvenlik sayısının uç direnci için seçilecek güvenlik sayısından büyük olması gerekir.

- Teori ile deney sonuçları arasındaki toplam taşıma güçleri birbirine yakın olmakla birlikte uç direnci ve çevre sürtünmesi direnci değerlerine bakıldığında oldukça büyük farklar olduğu görülmüştür. Bu fark çevre sürtünmesi direncinde 8-10 kata kadar çıkmıştır.
- Teorik olarak hesaplandığında ihmal edilebilecek düzeylerde kalan ama kazık taşıma gücünü etkileyen en önemli etmen ise çevre sürtünmesi direncidir. Bu tez kapsamında varılan en önemli sonuçlardan biri fore kazıklarda çevre sürtünme direncini hesaplamaya yarayan teorik yaklaşımın eksik ve/veya hatalı olmasıdır.
- Çevre sürtünmesi direnci hesaplanırken kullanılan teorik formülün hatalı olduğu sonucuna varılan sebeplerden biri şudur: Sıkılığı fazla olan zeminlerde kazıklara etkiyen çevre sürtünmesinin, kendinden gevşek olan bir zemine göre daha büyük olması gerekir. Yani sıkı zeminlerde kazığın düşey yönde deplasman yapması daha zor olacağından ona etkiyen çevre sürtünmesinin de artması gerekir. Bununla birlikte zeminin sıkılığı arttıkça içsel sürtünmesi de artar ve K_0 değerinin de artması gerekir. Hâlbuki içsel sürtünme açısı (Ø) arttıkça sin Ø artarken, K_0 yani (1-sin Ø) azalmaktadır.
- İkinci sebep olarak şu söylenebilir: Teorik olarak bulunan çevre sürtünmesi direncinin ise yine teorik olarak bulunan uç direnci veya toplam taşıma gücü yanında ihmal edilebilecek düzeylerde olduğu görülmüştür. Fakat sürtünme kazıklarında taşıma gücünün büyük bir kısmının çevre sürtünmesi tarafından taşınması gerekir. Deneysel sonuçlarda ise çevre sürtünmesi direnci toplam taşıma gücünün büyük bir kısmını temsil etmektedir. Teorik hesaplarda çevre sürtünmesi direnci toplam taşıma gücünün %3-5'ini temsil ederken, deney sonuçlarında %25-47'sini temsil eder.
- Tekil kazık yükleme deneylerinde, kazık çapı ve boyu arttıkça çevre sürtünmesi direnci uç direncine göre daha çok artmıştır. Bu nedenle; sürtünme kazıklarında taşıma gücünü etkileyen en önemli etmenin kazık boyu olduğu bir kez daha görülmüştür. Bu sonuç da sürtünme kazıklarında

taşıma gücünün çevre sürtünmesi tarafından taşındığı ilkesini doğrular. Kazık boyunun kazık çapına oranı (L/D) arttıkça bu oran daha da artacaktır.

- Bir diğer sebep ise şudur: Kazık eksenel olarak yüklendiğinde çevresindeki zemine bir miktar gerilme aktarır ve zemini sıkıştırmaya çalışır. Fakat bu kazık çevresindeki zemini pasif duruma geçirecek mertebede olmayabilir.
- Bu ifadelerin sonucunda teorik yaklaşımların sorgulanması gerektiği anlaşılmıştır. Yukarıda sayılan gerekçeler dikkate alındığında fore kazıklar için çevre sürtünmesi direnci hesaplanırken K yerine K_0 kullanılması doğru olmayacaktır. Bu tez kapsamında fore kazıklarda çevre sürtünmesi hesaplanırken K değeri yerine K_o ile K_p arasında bir değerin alınmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

6.1.2. Kazık gruplarına ait deneylerin sonuçları

- Kazık grubunun davranışı ile ilgili en çok kabul görmüş yaklaşım kazıkların birbirini etkilemesinden dolayı taşıma gücünün azaldığı ve grup veriminin 1'den küçük olacağı yönündedir. Fakat bu yaklaşımda zemin cinsinin kazık grubu davranışına etkisi ile kazıkların çevre zeminine aktardığı gerilmeler göz ardı edilmektedir.
- Kumlu zeminlerdeki kazık grubunun davranışı incelenirken hem kazıkların birbirini etkilemesi sonucu taşıma gücünde azalma olacağı hem de kazıklardan çevre zemine aktarılan gerilmelerden dolayı taşıma gücünün artacağı göz önünde bulundurulmalıdır.
- Son yıllarda arazide ve laboratuarda yapılan çalışmalar ile bu tez kapsamında yapılan deneyler zemin cinsinin kazık grubu davranışını büyük oranda etkilediğini göstermektedir.
- Kazık grubu deneylerinden elde edilen en önemli sonuç kazık gruplarındaki bir kazığın taşıma gücünün tekil kazığın kendi başına taşıdığı yükten daha fazla olmasıdır. Yani kumlu zeminlerde grup verimi 1'den büyük çıkmaktadır. Burada kazık gruplarının taşıma gücü hakkında bilinenin aksi yönde bir sonuç çıkmıştır. Normalde kazık grubunun taşıma gücünün grup etkisinden dolayı kazıkların tek tek taşıma güçlerinin toplamından daha küçük olacağı kabul edilmektedir. Fakat deney sonuçları kumlu zeminlerdeki kazık grubu davranışının bundan farklı olduğunu göstermektedir.

- Kazık grubunun taşıdığı toplam yükteki artışın büyük bir kısmına uç direncindeki artış neden olmaktadır. Çevre sürtünmesi direncindeki artış ise uç direncine göre daha sınırlı kalmaktadır.
- Ayrıca kazık grubundaki kazıkların tekil kazığa göre daha büyük oturma miktarlarında mobilize olmaya başladığı görülmüştür. Taşıma gücündeki artışın en büyük sebeplerinden biri de budur.
- Tekil kazık ve kazık grubu deney sonuçları incelendiğinde şu sonuca varılır: Tekil kazıklarda çevre sürtünmesi direnci %10D, uç direnci %15-20D ve toplam taşıma gücü %12-16D oturma miktarlarında mobilize olmaktadır. Kazık grubundaki bir kazıkta ise çevre sürtünmesi direnci %15-20D, uç direnci %18-25D, tek bir kazığın ve kazık grubunun taşıma gücü ise %20-25D oturma miktarlarında mobilize olmuştur.
- Kazık grubundaki bir kazığın tekil kazığın mobilize olduğu değerden daha büyük oturma miktarlarda mobilize olması yani kazığın göçmeden daha fazla yük taşıyarak oturma yapması şu şekilde açıklanabilir: Kazık grubu eksenel olarak yüklendiğinde oturmaların artmasıyla birlikte kazıklardan komşu kazıklara ve kazık çevresindeki zemine gerilme aktarılmaktadır. Bu gerilme aktarımı hem çevre sürtünmesinden dolayı kazık yan yüzeyine hem de uç direncinden dolayı kazık tabanına doğru olmaktadır. Yani kazığın etrafındaki tüm zemin bu gerilme artışından etkilenmektedir. Bu gerilme artışından dolayı kazık etrafındaki zemin kendini daha fazla tutmaya çalışmakta, zeminin sıkılığı bir miktar artmaktadır. Bundan dolayı zeminin taşıma gücü katsayıları olan N_c, N_q ve N_γ değerleri artmaktadır. Özellikle içsel sürtünme açısının 35°'den büyük olduğu durumlarda bu artış çok fazla olmaktadır. Çünkü taşıma gücü katsayıları logaritmik olarak artmaktadır. Bu da uç direncinin çevre sürtünmesine göre neden daha fazla arttığını kanıtlamaktadır.
- Kazık aralığı arttıkça kazık grubunun taşıdığı toplam yük, tek bir kazığın toplam taşıma gücü ve bu kazığa ait uç direnci ile çevre sürtünmesi direnci artmaktadır. Bunun sonucunda kazık aralığı arttıkça grup etkisinin azaldığı söylenebilir. Buna ilave olarak kazık aralığı arttıkça kazıkların daha geç mobilize olduğu sonucuna varılmıştır. Bu davranış şu şekilde açıklanabilir: Kazık aralığı s=2D iken zemine aktarılan gerilmeler o kadar fazladır ki kazığın oturma yapması zorlaşmaktadır. Fakat kazık aralığı s=4D iken

zemine aktarılan gerilmeler azalacağından kazık/kazık grubu daha fazla oturma yapabilmektedir. Bu açıklama da kazık aralığı arttıkça kazık grubunun taşıma gücünün arttığını kanıtlamaktadır.

- Kazık grubu deneylerinden kazığın kendi başına taşıdığı yük ile kazık gruplarında (s=2D, s=3D, s=4D) bir kazığın taşıdığı yük 4-8 mm (%6D-12D) değerine kadar aynı olduğu anlaşılmıştır. Yani 4-8 mm oturma miktarına kadar kazıklar arasında etkileşim olmamaktadır. Kazık grubundaki deformasyonların küçük olduğu seviyelerde kazık aralığının taşıma gücüne bir etkisi yoktur. Bu sonuç da kumlu zeminlerdeki kazık grubu davranışının daha iyi bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olacaktır.
- Kazık aralığı aynı iken kazık sayının arttığı kazık gruplarında taşıma gücü de artmıştır. Bu da yine zemine aktarılan gerilmelerin artması sonucu olmuştur. Çünkü 2 kazığın zemine aktardığı gerilme ile 4 kazığın zemine aktardığı gerilme aynı değildir. Zemine aktarılan gerilmeler arttıkça zemin kendini ve kazığı daha çok tutmaya çalışmakta, zeminin taşıma gücü katsayıları artmakta bu nedenle de kazık uç direnci ve çevre sürtünmesi direnci artmaktadır.
- Aynı çapta ve boydaki kazıklardan oluşan kazık gruplarında ise kazık aralığı arttıkça kazık grubunun taşıma gücü artmaktadır. Yani hem kazıklar arasındaki etkileşimler hem de kazık çevresindeki zemine aktarılan gerilmeler azalmaktadır. Bu da kazık aralığı arttıkça grup etkisinin azaldığını göstermektedir.
- Deney sonuçlarına bakıldığında kazık aralığının 4D olduğu durumda grup etkisinin azalmasına rağmen grup verimi yine de 1'den büyük olmaktadır. Bu da kazık çevresindeki zeminin taşıma gücündeki artışın, grup etkisinden kaynaklanan taşıma gücü kaybından fazla olduğunu gösterir.
- Fakat kazık aralığı arttıkça kazık grubunun taşıma gücünün sürekli artması gerçekçi değildir. Çünkü kazık aralığı arttıkça bir kazıktan zemine aktarılan gerilmeler diğer kazıktan aktarılan gerilmelerin etki alanı dışında kalacaktır. Kazıklar arasındaki mesafe sonsuz sayılabilecek uzaklıkta olduğunda ise kazık grubundaki bir kazık artık tekil kazık gibi davranacaktır.

6.1.3. Kazıklı radye sistemine ait deneylerin sonuçları

- Kazıklı radye sistemi eksenel olarak yüklendiğinde ilk başta kazık grubu ve radye temel birlikte yük taşımaktadır. Daha sonra kazık grubu sınır gücüne ulaşmakta ve radye temel yük almaya devam etmektedir. Son olarak oturmalar arttıkça artık radye temel de sınır taşıma gücüne ulaşmaktadır.
- Kazık aralığı arttıkça kazıklı radye sisteminin taşıma gücü de artmıştır.
- Kazıklı radye sistemi eksenel olarak yüklendiğinde ve kazıkların yerleşimi simetrik olduğunda tük kazıklara eşit yük gelmektedir. Fakat kazıklar simetrik olarak yerleştirilmezse daha büyük temel alanından gelen gerilmelere maruz kalan kazıklar daha fazla yük taşımaktadır.
- Radye temelin altına 4 kazığın yerleştirildiği kazıklı radye sistemi deneylerinde kazık grubunun taşıdığı yük radye temelin taşıdığı yükten fazla çıkmıştır. 2 veya 3 kazığın kullanıldığı kazıklı radye deneylerinde ise radye temel kazık grubundan fazla veya kazık grubuna yakın yük taşımıştı. Bu nedenle kazık sayısı arttıkça radye temelin taşıdığı yük oranı azalmaktadır. Bu da kazık sayısı arttıkça kazık grubunun oturmaları azaltıcı bir etki yaptığını ve yükün büyük bir kısmının kazık grubu tarafından taşındığını gösterir.

6.2. Öneriler

- Tekil kazıkların tasarımına yeni bir bakış açısı getirilmiştir. Bu yeni yaklaşım sayesinde tekil kazık, kazık grupları ve kazıklı radye sisteminin yük-oturma davranışının tekrar ele alınması gerekmektedir. Bununla birlikte kazıklı temellerin taşıma gücünü veren teorik ifadelerin tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir.
- Bu tez kapsamında tekil kazık ve kazık gruplarının davranışı ile ilgili ortaya atılan yaklaşımların daha fazla deneysel çalışma yapılarak sınanması gerekmektedir. Ayrıca bu deneyler araziye uyarlanarak tekrarlanmalı ve laboratuar ile arazi şartları arasında ne gibi farklar olacağı görülmelidir.
- Yapılacak deneylerde farklı cins ve farklı tane dağılımına sahip zeminler kullanılarak; zemin cinsinin tekil kazık, kazık grubu ve kazıklı radye sisteminin davranışına etkisi araştırılmalıdır.

- Bu deneylerde zeminin sıkılık derecesinin, derin ve yüzeysel temel elemanlarının davranışını nasıl etkilediği araştırılmalıdır. Ayrıca yeraltı suyunun olduğu durumlarda bu deneyler tekrarlanmalıdır.
- Tekil kazık deneylerinde çap ve boy özellikleri farklı olan daha çok sayıda kazık, farklı zeminlerde yüklenerek K değeri için standart bir değer elde edilmeye çalışılmalıdır.
- Kazık grubu deneyleri hem farklı özellikteki kumlu zeminlerde hem de killi zeminlerde yapılmalıdır. Grup veriminin zemin cinsine göre değişip değişmeyeceği araştırılmalıdır.
- Kazık grubu deneylerinde kazık aralığı 4D'den daha büyük seçilerek kazık grubunun davranışı incelenmeli ve grup veriminin ne olacağı belirlenmelidir. Bu sayede etkileşimlerin bittiği kazık aralığı da elde edilebilir.
- Kazık grubunun yerleşimi 3x3, 4x4, 3x5 vb. gibi seçilerek köşe, kenar ve iç kazıkların davranışı incelenmeli; bu yerleşimlerde de grup veriminin 1'den büyük olup olmayacağı araştırılmalıdır.
- Kazıklı radye sistemi deneyleri daha büyük bir tankın içerisinde ve zemin, kazık boyu, kazık çapı, kazık sayısı ve kazık aralığının farklı olduğu durumlarda tekrarlanmalıdır.
- Kazık yükleme deneyleri yapılırken, kazıklar mümkünse göçme yüküne kadar yüklenmelidir. Çünkü kazığın veya kazık grubunun davranışı en iyi bu şekilde belirlenebilir.
- Kazık yükleme deneyinde ise yük-oturma eğrisi yorumlanırken eğrinin durumuna göre karar verilmeli ve belirlenen sınır yükünün izin verilen oturma değerlerini aşıp aşmadığı kontrol edilmelidir.

KAYNAKLAR

Al-Mhaıdıb, A. I., 2006, "Experimental investigation of the behavior of pile groups in sand under different loading rates", *Geotechnical and Geological Engineering*, 24:889-902.

Anagnostopoulos. C. and Georgiadis. M.. 1998, "A simple analysis of piles in raft foundations", *Geotechnical Engineering Journal*, 29 (1):71-83.

ASTM D 421-85, 2007, "Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants", *ASTM International*, ASTM West Conshohocken. PA, DOI: 10.1520/D0421-85R07.

ASTM D 422-63, 2007, "Standard test method for particle-size analysis of soils", *ASTM International*, ASTM West Conshohocken. PA, DOI: 10.1520/D0422.

ASTM D 854-10, 2007, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", *ASTM International*, ASTM West Conshohocken. PA, DOI: 10.1520/D0854-10.

ASTM D 1143 \D 1143M, 2007, "Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load", *American Society For Testing And Materials*, United States.

ASTM D 3080-98, 2007, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions", *ASTM International*, ASTM West Conshohocken, PA, DOI:10.1520/D3080-98.

ASTM D 4253-83, 1992, "Maximum Dry Density of Cohesionless Soils by Pluviation", *ASTM International*, ASTM West Conshohocken. PA, DOI: 10.1520/GTJ10239J.

ASTM D 4254-83, 1992, "Minimum Dry Density of Cohesionless Soils by Pluviation", *ASTM International*, ASTM West Conshohocken. PA.

Bai, X., He, W., Jia, J., Han, Y., 2006, "Experimental study on the interaction mechanism of cap-pile group-soil", *Marine Georesources and Geotechnology*, 24:173-182.

Bakholdin, B.V., 2003, "Piled-raft foundations-Design and characteristics of construction procedures", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 40(5): 185-189.

Barvashov, V. A., Boldyrev, G. G., 2009, "Experimental and theoretical research on analytical models of piled-raft foundations", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Baskı 46, No 5, 207-217.

Birand, A. A., 2007, "*Kazıklı temeller*", 2. Baskı, Teknik Yayınevi, Ankara.

Bjerrum, L., 1963, "Allowable Settlements of Structures", Proceedings, *European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wiesbaden, Germany, 3. Baskı, 135-137.

Bowles, J. E., 1987, "Elastic Foundation settlements on Sand Deposits", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 113. Baskı, No:8, 846-860.

————— , 1988, "Fondation Analysis and Design", 4. Baskı, McGraw-Hill Book Company, NY.

————— , 1997, "Fondation Analysis and Design", 5. Baskı, McGraw-Hill Book Company, NY.

Bourgeois, E., Hassen, G., Buhan, P., 2013, "Finite element simulations of the behavior of piled-raft foundations using a multiphase model", *Inter. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,* 37:1122-1139.

Briaud, J. L., Tucker, L., Lytton, R. L., Coyle, H. M., 1985, "Behavior of Piles and Pile Groups in Cohesionless Soils", *Federal Highway Administration*, Rapor No:FHWA/RD-83/038, Washington, DC.

Burland, J. B., 1973, "Shaft Friction Piles in Clay-A Simple Fundamental Approach", *Ground Engineering*, 6. Baskı, No:3, 30-42.

Butler, H. D., Hoy. H. E., 1976, "The Texas Quick Load Method for Foundation Load Testing Users Manual" , *US Department of Transportation Federal Highway Administration*, Office of Development, Report No: FHWA-IP – 77 – 8, Washington D.C.

Cao, X.D., Wong, I.H., Chang, M., 2004, "Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(2):129-138.

Chaudhary, M. T. A., 2007, "FEM modelling of a large piled raft for settlement control in weak rock", *Engineering Structures*, 29, 2901-2907.

Chin, F. K., 1970, "Estimation of the Ultimate Load of Pile Not Carried to Failure", *Proceedings 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, Singapore, 81-90.

Cho, J., Lee, J., Jeong, S., Lee, J., 2012, "The settlement behavior of piled raft in clay soils", *Ocean Engineering*, 53:153-163.

Chow, Y. K., Yong, K. Y., Shen, W. Y., 2001, "Analysis of piled raft foundations using a variational approach", *The International Journal of Geomechanics*, 1(2):129-147.

————— , Thevendran, V., 1987, "Optimisation of pile groups", *Computers and Geotechnics*, 4:43-58.

Clancy, P. ve Randolph, M. F., 1993, "An Approximate Analysis Procedure for Piled Raft Foundations", *Int. Jor. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 17 (12): 849-869.

Cunha, R. P., Poulos, H. G., Small, J. C., 2001, "Investigation of design alternatives for a piled raft case history", *J. of Getech. And Geoenv. Eng*., Baskı 127, No:8, 635-641.

Dai, G., Salgado, R., Gong, W., Zhang, Y., 2012, "Load test on full scale bored pile groups", *Can. Geotech J*., 49:1293-1308.

Das, B. M., 2007, "*Principles of Foundation Engineering*", Thomson Canada Limited, 6. Baskı, Kanada.

Davisson, M.T., 1972, "High Capacity Piles", *Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction*, American Society of Civil Engineers, ASCE, Illinois Section, Chicago, March 22, 81-122.

Desai, C. S., Johnson, L. D. and Hargett, C. M., 1974, "Analysis of Pile Supported Gravity Lock", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 100: GT9: 1009-10029.

Doğangün, A., 2010, "Betonarme yapıların hesap ve tasarımı", Birsen Yayınevi, 6. Baskı

Ergün, M. U., Türkmen, H. K., 2007, "Kazıklı radye temellerin etkin tasarımı", *TÜBİTAK Projesi*, Proje No: 103I007.

Eslami, A. ve Fellenius, B. H., 1995, "Pile Capacity Estimated from CPT Data", *14. ICSMGE*, Hamburg, 1. Baskı, 91-94.

————, Giretti, D., Jamiolkowski, M., 2008, "Physical modeling of raft on settlement reducing piles", *Symposium Honoring Dr. John H. Schmertmann for His Contributions to Civil Engineering at Research to Practice in Geotechnical Engineering Congress 2008*, New Orleans, Louisiana, United State, March 9-12.

Fioravante, V. ve Giretti, D., 2010, "Contact versus noncontact piled raft foundations", *Can. Geotech. J.*, 47:1271–1287.

Franke, E., Lutz, B. and El-Mossallamy, Y., 1994, "Measurements and Numerical Modelling of Highrise Building Foundations on Frankfurt Clay", *Conference on Vertical and Horizontal Deformation of Foundations and Embankments*, Texas, USA, 2: 1325-1336.

Garcia, F., Lizcano, A., Reul, O., 2006, "Viscohypoplastic model applied to the case history of piled raft foundation", *GeoCongress 2006*, Atlanta, Georgia, United States, February 26-March 1.

Gök, S., 2007, "Kazıklı Radye Temellerin Tasarımı", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Gök. S. ve Toğrol. E., 2009, "Basitleştirilmiş kazıklı radye hesabı", *itüdergisi/d mühendislik*, 8(5):149-156.

Griffiths, D. V., Clancy, P. ve Randolph, M. F., 1991, "Piled Raft Foundations Analysis by Finite Elements", *7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 2: 1153-1157.

Hansen, J. B., 1970, "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity", *Danish Geotechnical Institue Bul.*, 28, Copenhagen, 21.

Hooper, J. A., 1973, "Observations on the Behaviour of a Piled Raft Foundation on London Clay", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 55(2): 77-90.

Huang, Y. ve Ni, S., 2012, "Experimental study for the evaluation of stres wave approaches on a group pile foundation", *NDT&E International*, 47:134-143.

ISSMFE Subcommittee on Field and Laboratory Testing, 1983, "Axial Pile Loading Test", *Recommended Procedure*, Ayrı Baskı, 20.

Ismael, N. F., 2001, "Axial load test on bored piles and pile groups in cemented sand", *J. of Geotech. and Geoenv. Eng.*, Baskı 127, No 9, 776-783.

Iulia-Victoria, T., 2012, "Numerical modelling of soft soils reinforced by rigid vertical inclusions under dynamic loads-an overview of recent research", *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, No:4.

Janbu, N., 1976, "Static Bearing Capacity of Friction Piles", *J. of Soil Mech. and Found. Eng. Div.*, ASCE, 95. Baskı, SM1.

Kanada Geoteknik Birliği, 1985, Canadian Foundation Engineering Manual, 2. Baskı, *Canadian Geotechnical Society*, Vancover, Canada, 456.

Katzenbach, R., Bachmann, G., Boled-mekasha, G., Ramm, H., 2005, "Combined pile raft foundations (cprf): an appropriate solution for the foundations of high-rise buildings", *Slovak Journal of Civil Engineering*, 3:19–29.

Lee, S. ve Chung, C., 2005, "An experimental study of the interaction of vertically loaded pile groups in sand", *Can. Geotech. J.*, 42:1485-1493.

Lee, J. H., Kim, Y., Jeong, S., 2010, "Three-dimensional analysis of bearing behaviour of piled raft on soft clay", *Computers and Geotechnics*, 37:103-114.

Li, Z., Bolton, M. D. ve Haigh, S. K., 2012, "Cyclic axial behavior of piles and pile groups in sand", *Can. Geotech. J.*, 49:1074-1087.

Liang, F. Y., Chen, L. Z., Shi, X. G., 2003, "Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load", *Computers and Geotechnics*, 30:443-453.

Leung, Y. D., Klar, A., Soga, K., 2010, "Theoretical study on pile length optimization of pile groups and piled rafts", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(2):319–330.

MacDonald, D. H. ve Skempton, A. W., 1955, "A Survey of Comparisons between Calculated and Observed Settlements of Structures on Clay", *Conference on*

Correlation of Calculated and Observed Stresses and Displacements, Institution of Civil Engineers, London, 318-337.

Matsumoto, T., Nemoto, H., Mikami, H., Yaegashi, K., Arai, T. ve Kitiyodom, P., 2010, "Load Tests of Piled Raft Models with different Pile Head Connection Conditions and Their Analyses", *Soils and Foundations*, 50(1):63-81.

Mayerhof, G. G., 1951, "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", *Geotechnique*, 2. Basım, No:4, 301-331.

———— , 1956, "Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 82. Baskı, 1-19.

———— , 1963, "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", *Canadian Geotech. Journal*, Ottawa, 1. Basım, No:1, 16-26.

———— , 1976, "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 102. Baskı, No: GT3.

———— , 1983, "Scale Effects of Pile Capacity", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 102. Baskı, 1985-228.

McCabe, B. A. ve Lehane, B. M., 2006, "Behavior of axially loaded pile groups driven in clayey silt", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Baskı 132, No 3, 401-410.

Mindlin, R. D., 1936, "Force at a point in the interior of a semi-infinite solid", *Physics*, 7: 195-202.

Nguyen, D. D. C., Kim, D., Jo, S., 2013, "Settlement of piled rafts with different pile arrangement schemes via centrifuge tests", *J. of Geotech. And Geoenv. Eng.*,139:1690-1698.

———— , Kim, D., Jo, S., 2012, "Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effect", *Computers and Geotechnics*, 47:16-27.

———— , Kim, D., Jo, S., 2012, "Parametric study for optimal design of large piled raft foundations in sand", *Computers and Geotechnics*, 55:14-26.

Nottingham, L. C., 1975,"Use of Quasi-static Friction Cone Penetrometer Data to Estimate Capacity of Displacement Piles", *Doktora Tezi, İnşaat mühendisliği Bölümü, Florida Üniversites*i, 553.

Parry, R. H. G., 1977, "Estimating Bearing Capacity of Sand from SPT Values", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 103. Baskı, 1014-1019.

Poulos, H. G., 1993, "Piled rafts in swelling or consolidating soils", *J. Geotech. Eng.*, 119(2):374–380.

———— , 1994, "An Approximate Numerical Analysis of Pile Raft Interaction", *Int. J. Numerical Analysis Method Geomechanics*, 18:73-92.

———— , 2001, "Piled Raft Foundations: Design and Applications", *Geotechnique*, 51(2):95-113.

———— , 2002, "Simplified design procedure for piled raft foundations", *International Deep Foundations Congress 2002*, Orlando, Florida, United States," February 14-16.

———— , 2005, "Foundation design for the Emirates Twin Towers, Dubai", *Can. Geotech. J.*, 42:716-730.

———— , 2005, "Piled raft and compensated piled raft foundations for soft soil sites", *Geo-Frontiers Congress 2005*, Austin, Texas, United States, January 24-26.

———— , 2010, "High-rise building foundations- a limit state design approach", *Art of Foundation Engineering Practice Congress 2010*, West Palm Beach, Florida, United States, February 20-24.

Prakash, S. Ve Saran, D., 1967, "Behavior of Laterally Loaded Piles in Cohessive Soil", *3. Proc. Asian Conference on S:M.*

Prakoso, W. A. ve Kulhawy, F. H., 2001, "Contribution to piled raft foundation design", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127: 17-24.

Pressley, J. S. and Poulos, H. G., 1986, "Finite Element Analysis of Mechanisms of Pile Group Behaviour, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 10 (2): 213-221.

Rabiei, M., 2009, "Parametric study for piled raft foundations", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*., 14.

Randolph, M. F., 1994, "Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts", *13th ICSMFE*, New Delhi, India, 61-82.

Reul, O., 2004, "Numerical study of the bearing behavior of piled rafts", *Int. J. Geomech.*, 4(2):59–68.

Reul, O., Randolph, M. F., 2004, "Design strategies for piled raft subjected to nonuniform vertical loading", *Journal of Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(1):1-13.

Russo, G., Abagnara, V., Poulos, H. G., Small, J. C., 2013, "Re-assessment of foundation settlements fort he Burj Khalifa, Dubai", *Acta Geotechnica*, 8:3-15.

Sales, M. M., Small, J. C., Poulos, H. G., 2010, "Compensated piled rafts in clayey soils: behavior, measurements and predictions", *Canadian Geotechnical Journal*, 47(3):327-345.

Sanctis, L., Mandolini, A., 2006, "Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils", *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 132(12):1600-1610.

_____ , Russo, G., 2008, "Analysis and Performance of piled rafts designed using innovative criteria", *J. of Geotech. And Geoenv. Eng*., Baskı 134, No:8, 1118-1128.

Sawwaf, M., 2010, "Experimental study of eccentrically loaded raft with connected and unconnected short piles", *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Baskı 146, No 10, 1394-1402.

Sayed, S. M. ve Bakeer, R. M., 1992, "Efficiency Formula for pile groups", *JGED, ASCE*, Baskı 118, 278-299.

Schmertmann, J. H.,1978, "Guidelines for Cone Penetration Test: Performance and Design", *Highway Administration*, Dep. of Transportation, Rapor No: FHWA-TS-78-209, 145.

Shen, W. Y., Chow, Y. K., Yong, K. Y., 1997, "A variational approach for vertical deformation of pile groups", *Inter. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Baskı 21, 741-752.

Shioi, Y. ve Fukui, J., 1982, "Application of N-Value to Design of Foundations in Japan", *Proceedings, Second European Symposium on Penetration Testing*, 1. Baskı, 159-164.

Small, J. C., Liu, H. L. S., 2008, "Time-settlement behaviour of piled raft foundations using infinite elements", *Computers and Geotechnics*, 35:187-195.

Sonoda, R., Matsumoto, T., Kitiyodom, P., Moritaka, H., Ono, T., 2009, "Case study of a piled raft foundation constructed using a reverse construction method and its post analysis", *Geotech. J*., 46:142–159.

Sönmez, D. ve Ergun, E., 1994, "Kazık Gruplarının Kohezyonsuz Zeminde Negatif Sürtünmesi Üzerine Bir Model Çalışması", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi*, Cilt 1, 250-259.

Szerzö, A., 2012, "Optimization of foundation solutions for wind turbines", *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, No:4, 215-224.

Ta, L. D. ve Small, J. C., 1996, "Analysis of Piled Raft Systems in Layered Soils", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 20:57–72.

Tan, Y. C., Chow, C. M., 2004, "Design of piled raft foundation on soft ground", Director, Gue&Partners sdn bh, Kuala Lumpur, Malaysia.

Ter-Martirosyan, Z. G., Nam, D. k., Nam, N. Z., 2007, "Interaction between pile foundation and soil", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Baskı 44, No 2, 39-47.

Terzaghi, K., 1943, "*Theoretical Soil Mechanics*", John Willey & Sons, NY, 510.

——— ve Peck, R. B., 1967, "*Soil Mechanics in Engineering Practise*", John Willey & Sons, NY, 729.

Toğrol, E. ve Tan, O., 2009, "Kazıklı temeller", *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
——— ve Sivrikaya, O., 2009, "Arazi Deneyleri ve Geoteknik Tasarımda Kullanımları", *Birsen Yayınevi*, İstanbul.

Tolosko, T.A., 1999, "Extrapolation of Pile Capacity From Non-Failed Load Tests", *Master of Science in Civil Engineering*, University of Massachusetts Lowell.

Tomlinson, M. ve Woodward, J., 2006, "Pile design and construction practice", 5. Baskı, CRC Basımevi, NY.

Uzuner, B. A., 2011, "Temel Mühendisliğine Giriş", 4. Baskı, Derya Kitabevi, Trabzon.

Vásquez, L. G., Wang, S. T., Isenhower, W. M., 2006, "Estimation of the capacity of pile-raft foundations by three-dimensional non-linear finite element analysis", *GeoCongress 2006*.

Vesic, A. S., 1970, "Tests on Instrumented Piles, Ogeechee River Side", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 96. Baskı, 561-584.

——— , 1973, "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 99. Baskı, 45-73.

——— ,1974, "Bearing Capacity of Shallow Foundations", *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Book Co., NY, 751.

——— , 1977, "Design of Pile Foundations", *NCHRP Synthesis of Practise No:42*, Transportation research Board, Washington, DC, 68.

Vijayvergia, V. N. ve Focht, J. A., 1972, "A New Way to Predict Capacity of Piles in Clay", *4. Offshore Technology Conference*, Houston, TX.

Wang, C., Zhou, S., Wang, B., Wang, X., 2010, "Centrifuge Model Tests on Settlement Controlling of Piled Raft Composite Foundation in High Speed Railway", *ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems*, 2942-2953.

Xia, R., Dolezel, V., Rak, L., Qian, H., and Rao, B., 2009, "Geotechnical design of a partially piled raft foundation", *Contemporary Topics in Deep Foundations*, 223-231.

Xu, Y. ve Zhang, L. M., 2007, "Settlement ratio of pile groups in sandy soils from field load tests", *J. of Geotech. And Geoenv. Eng.*, Baskı 133, No 8, 1048-1054.

Yamashita, K., Hamada, J., Soga, Y., 2010, "Settlement and load sharing of piled raft of a 162 m high residential tower", *GeoShanghai 2010 International Conference*, 26-33.

———— , Tomono, M. Ve Kakurai, M., 1987, "A method for estimating immediate settlement of pile and pile groups", *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Baskı 27, No 1, 61-76.

Yıldırım, S., 2004," Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı", *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 2004.

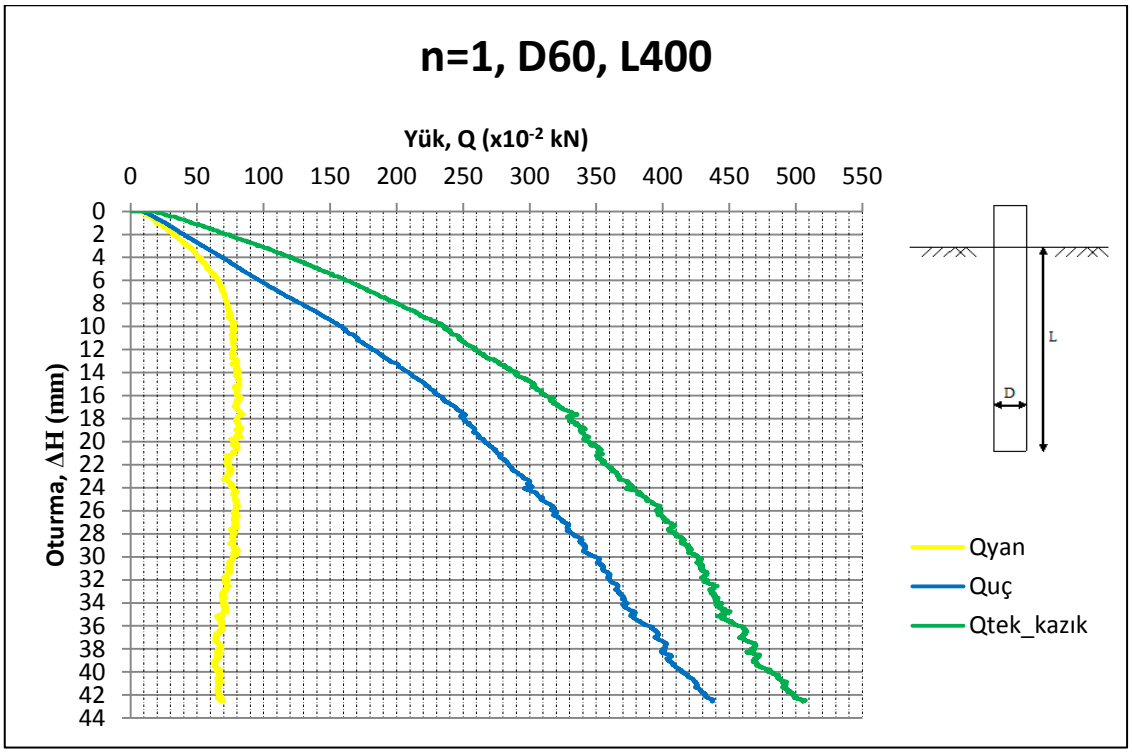
Zehai, C., 2011, "Prediction and measurement of settlement of a piled raft foundation over thick soft ground", *EJGE*, Basım:16, 125-136.

Ziaie-Moayed, R., Kamalzare, M., Safavian, M., 2010, "Evaluation of piled raft foundations behavior with different dimensions of piles", *Journal of Applied Sciences*, 10(13):1320-1325.

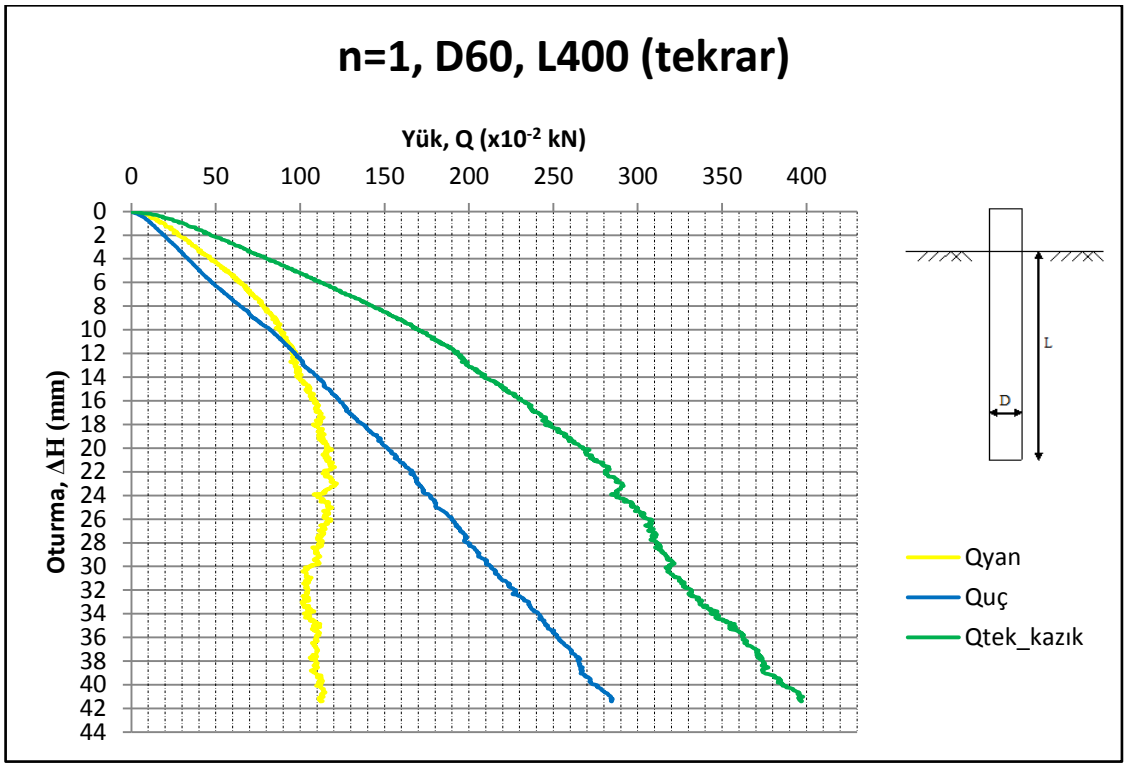
Zhang, L. M. ve Wong, Y. W., 2007, "Centrifuge modeling of large-diameter bored pile groups with defects", *J. of Geotech. And Geoenv. Eng.*, Baskı 133, No 9, 1091-1101.

EKLER

Ek 1. Tekil Kazık Yükleme Deneyi Sonuçları

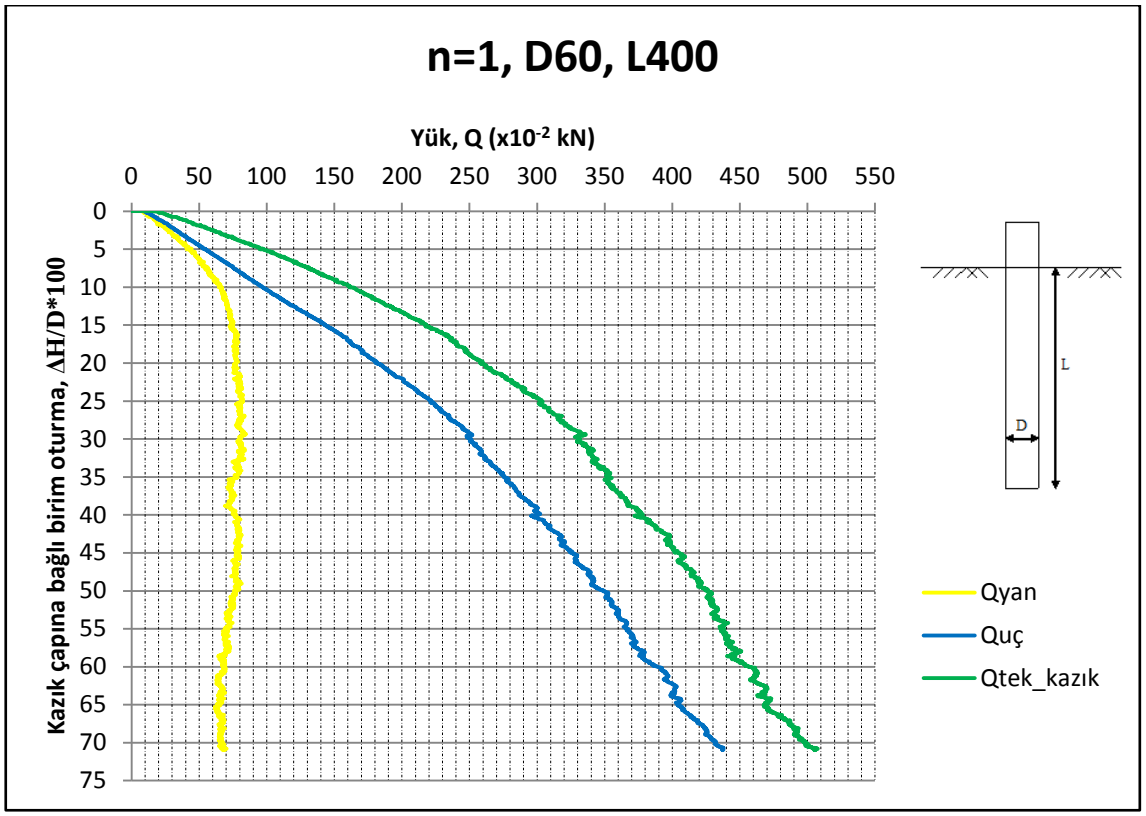


(a)

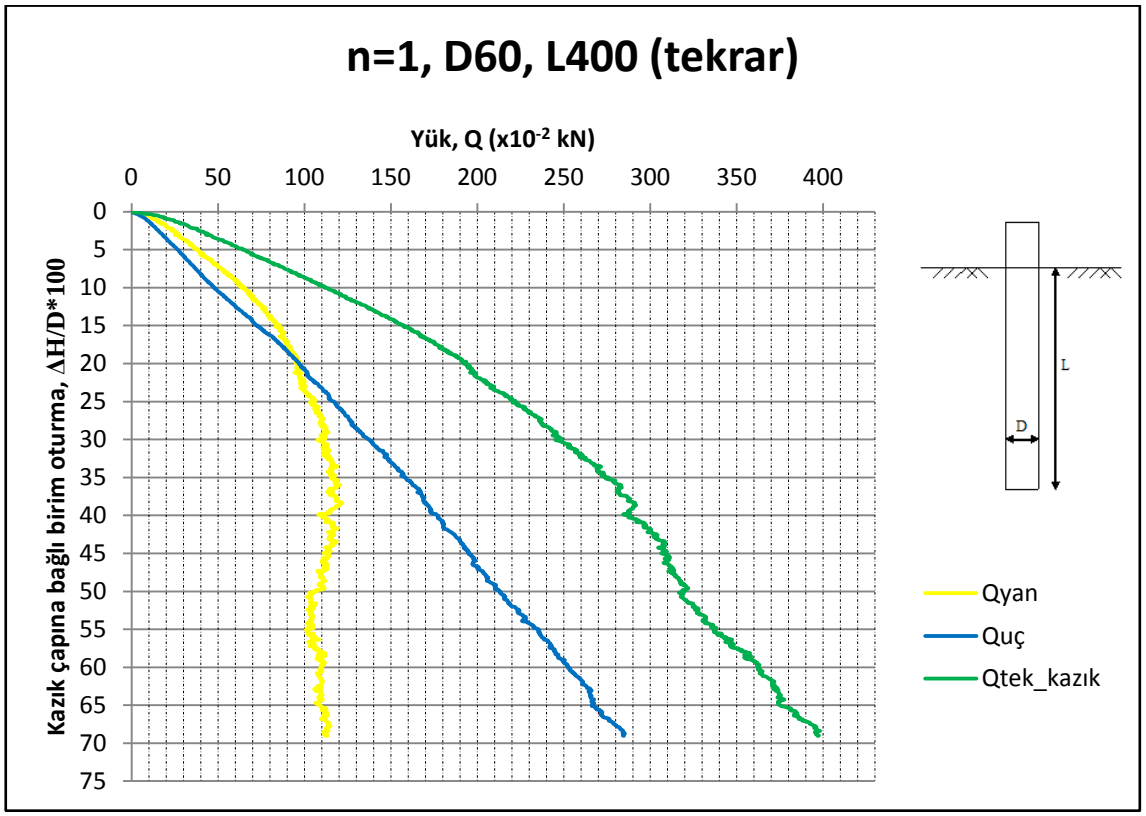


(b)

Şekil Ek 1.1. D=60 mm ve L=400 mm kazığa ait yük-oturma grafikleri

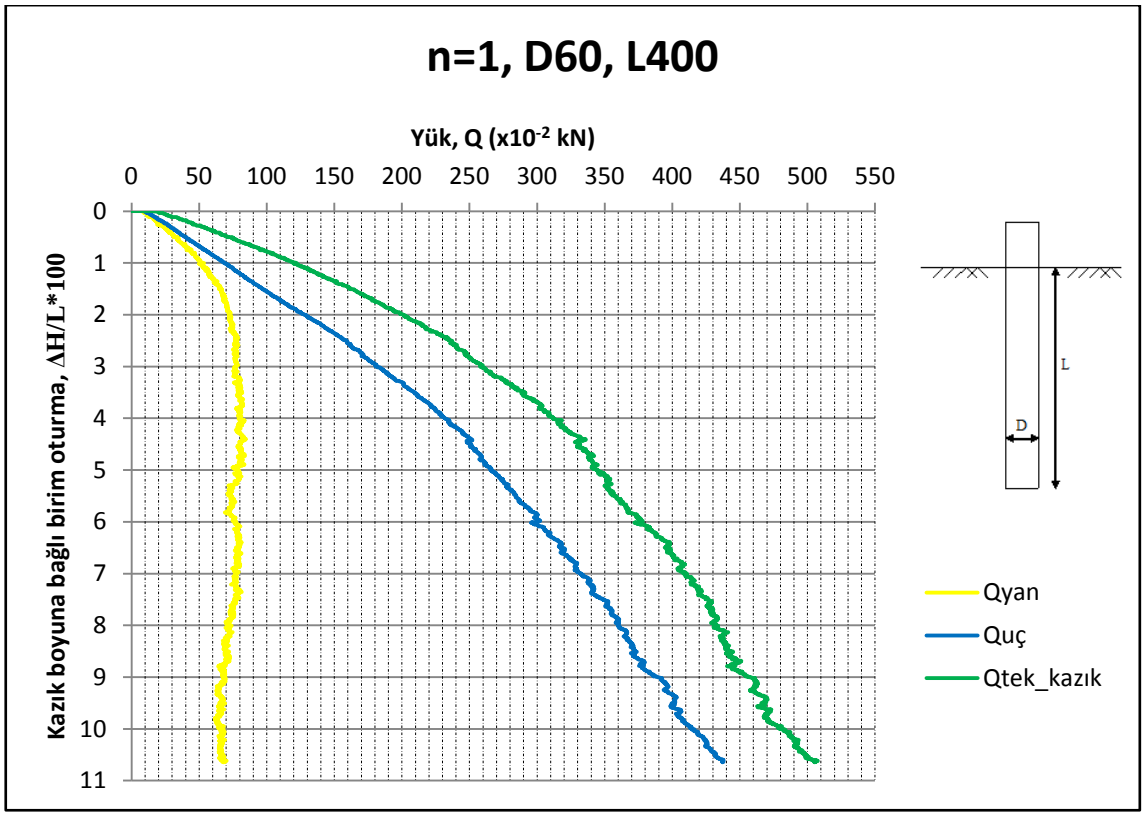


(a)

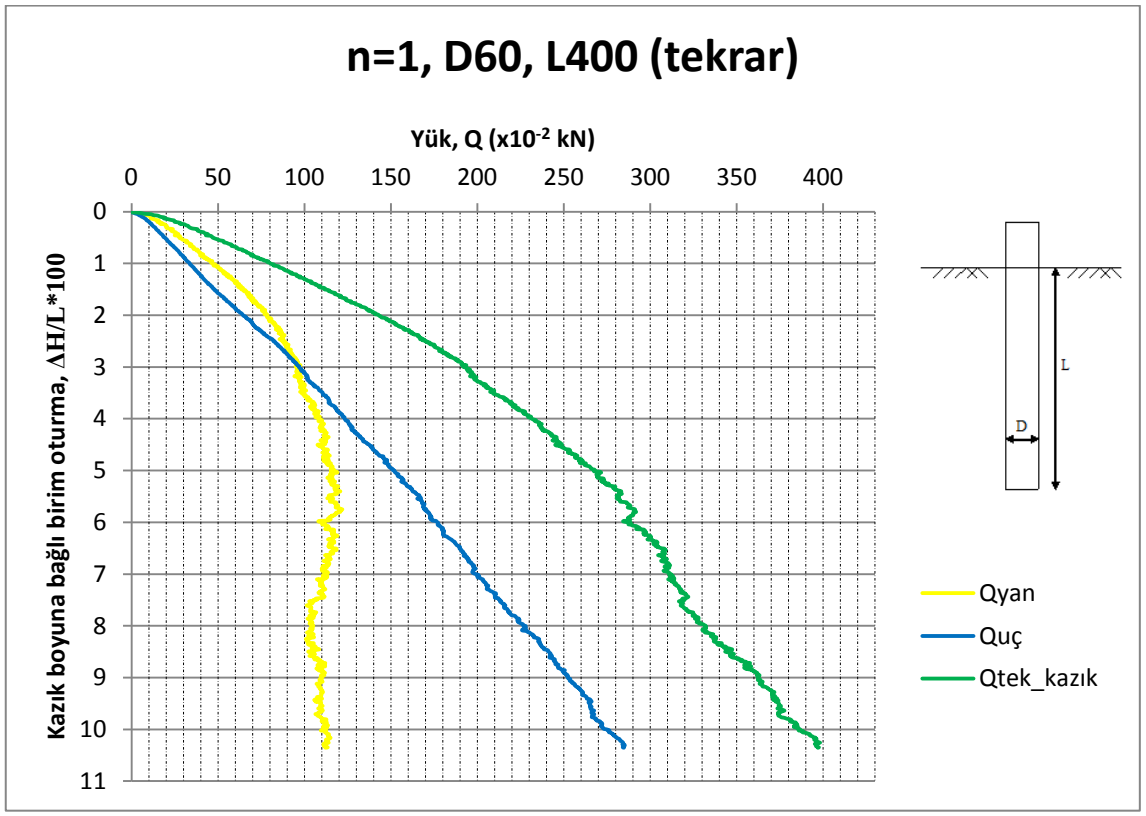


(b)

Şekil Ek 1.2. D=60 mm ve L=400 mm kazığa ait yük-birim oturma grafikleri

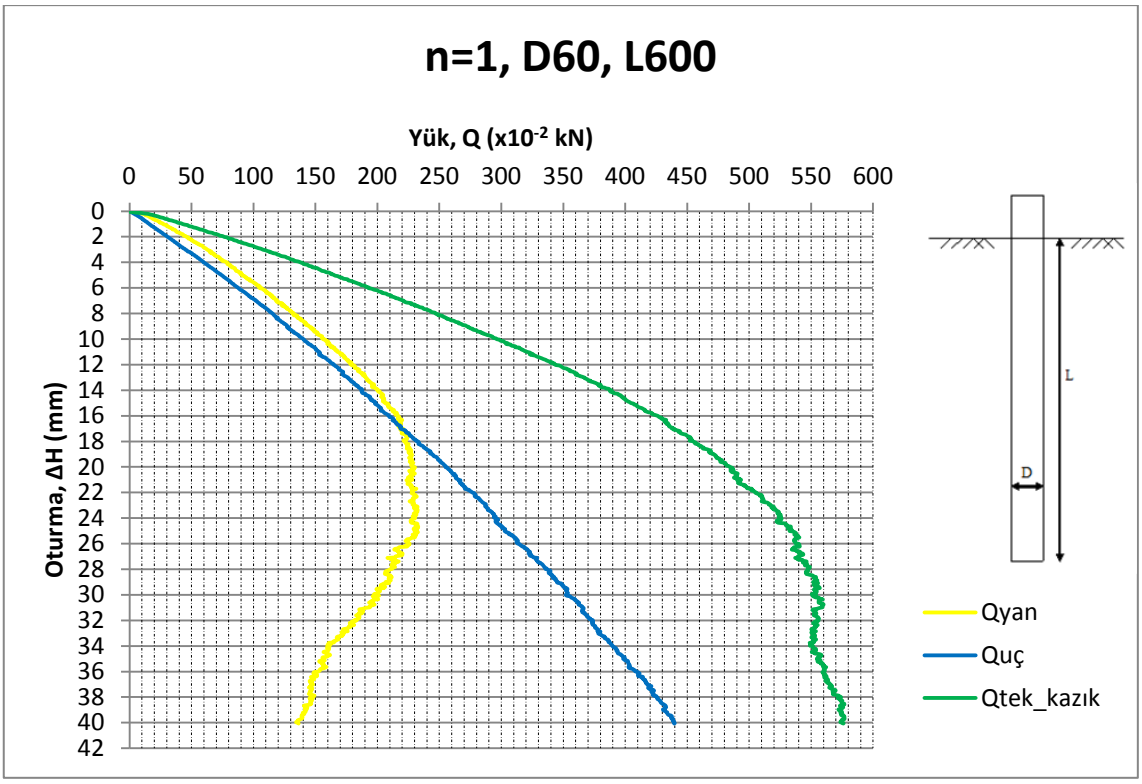


(a)

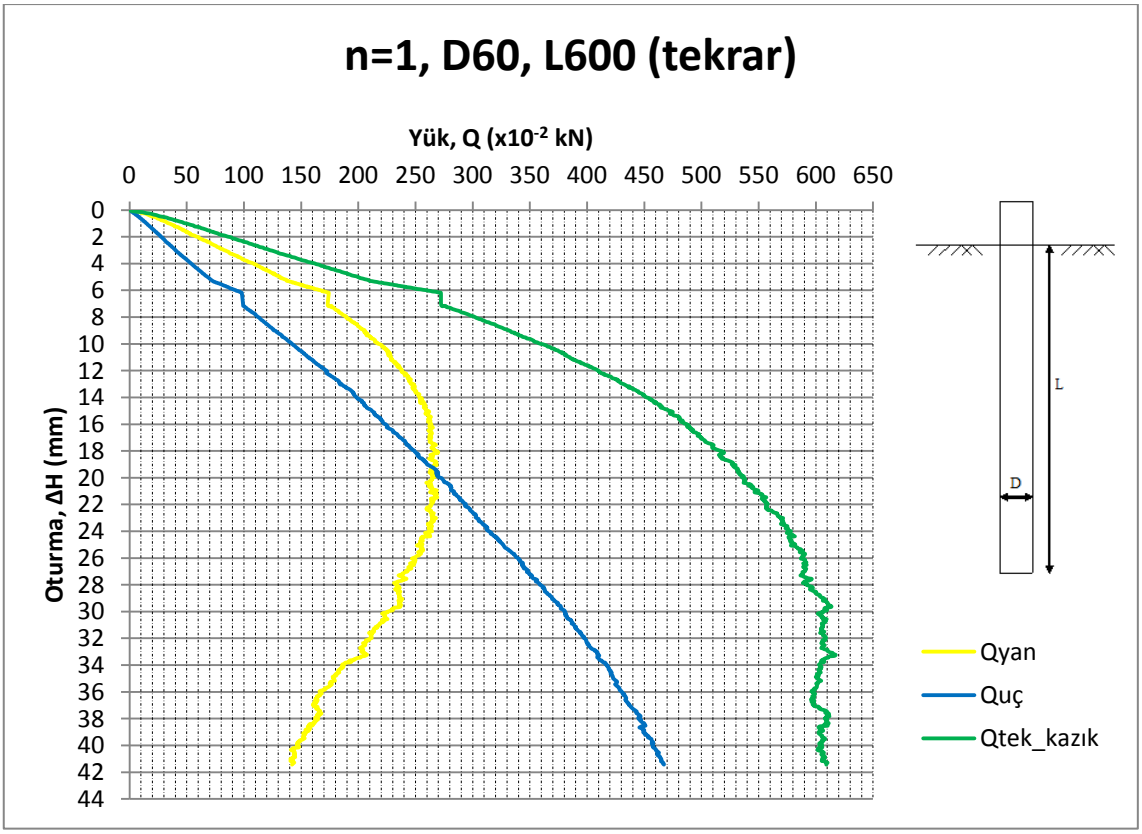


(b)

Şekil Ek 1.3. D=60 mm ve L=400 mm kazığa ait yük-birim oturma grafikleri

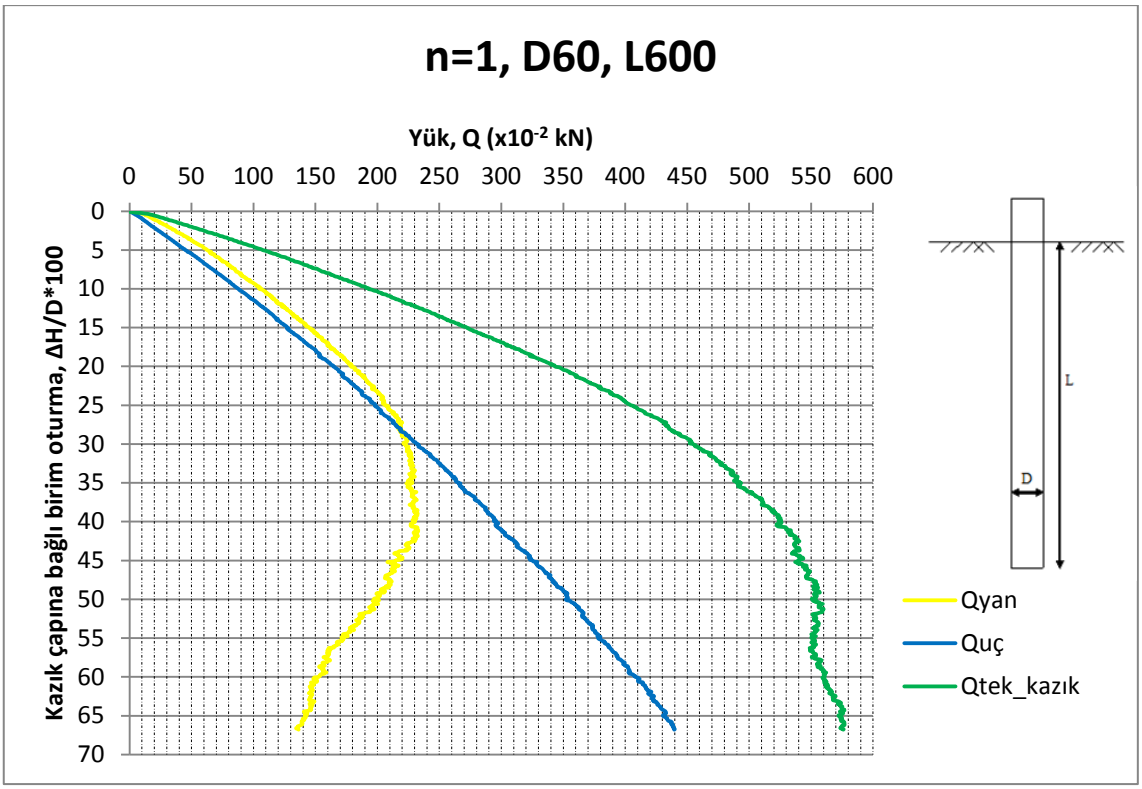


(a)

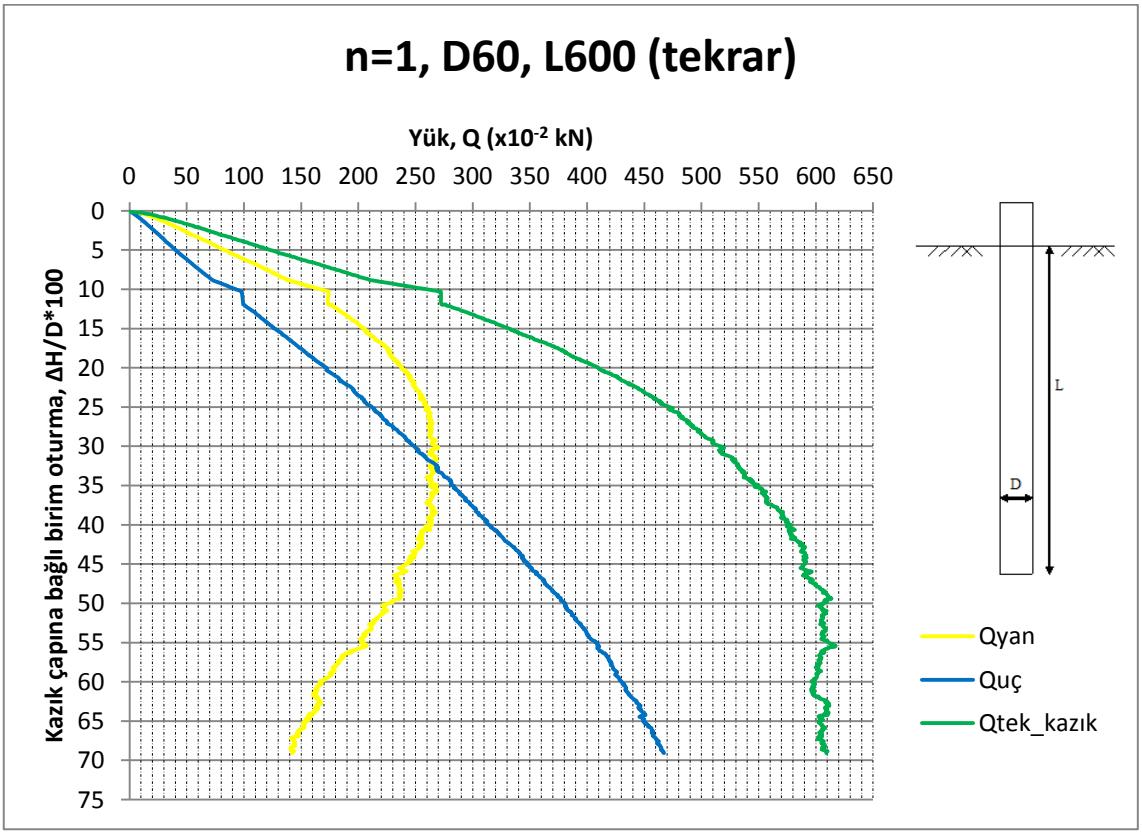


(b)

Şekil Ek 1.4. D=60 mm ve L=600 mm kazığa ait yük-oturma grafikleri

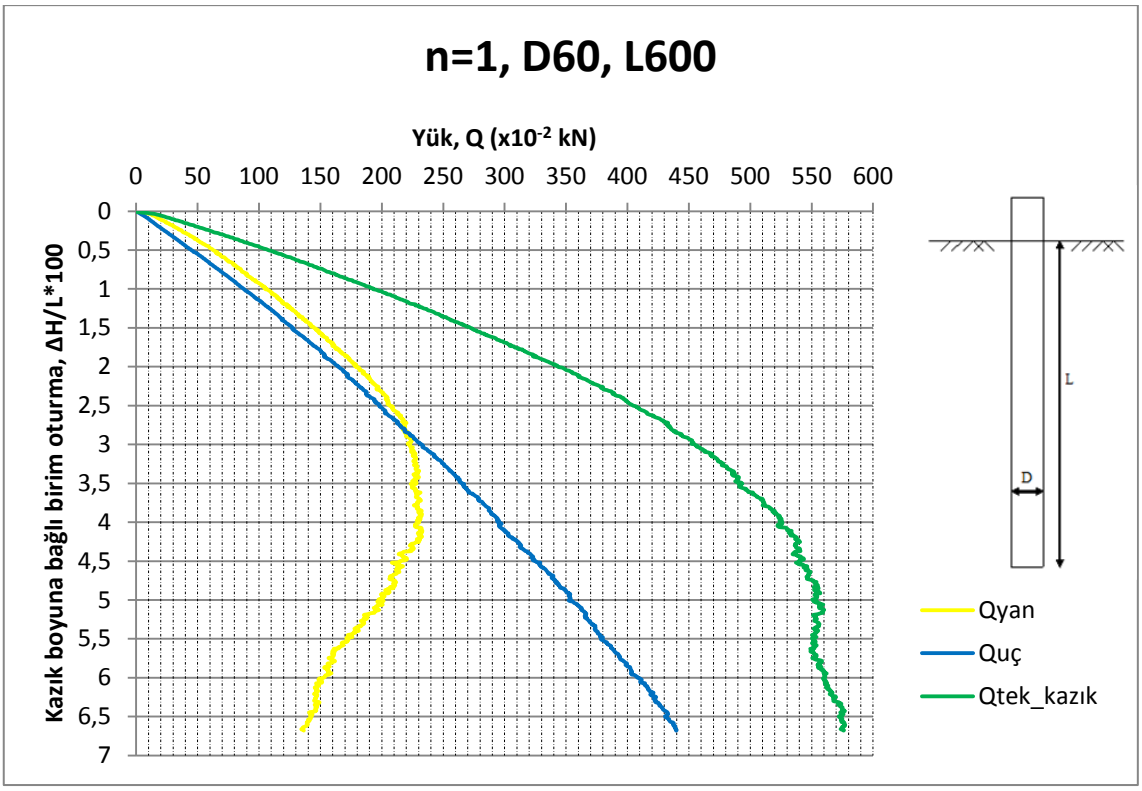


(a)

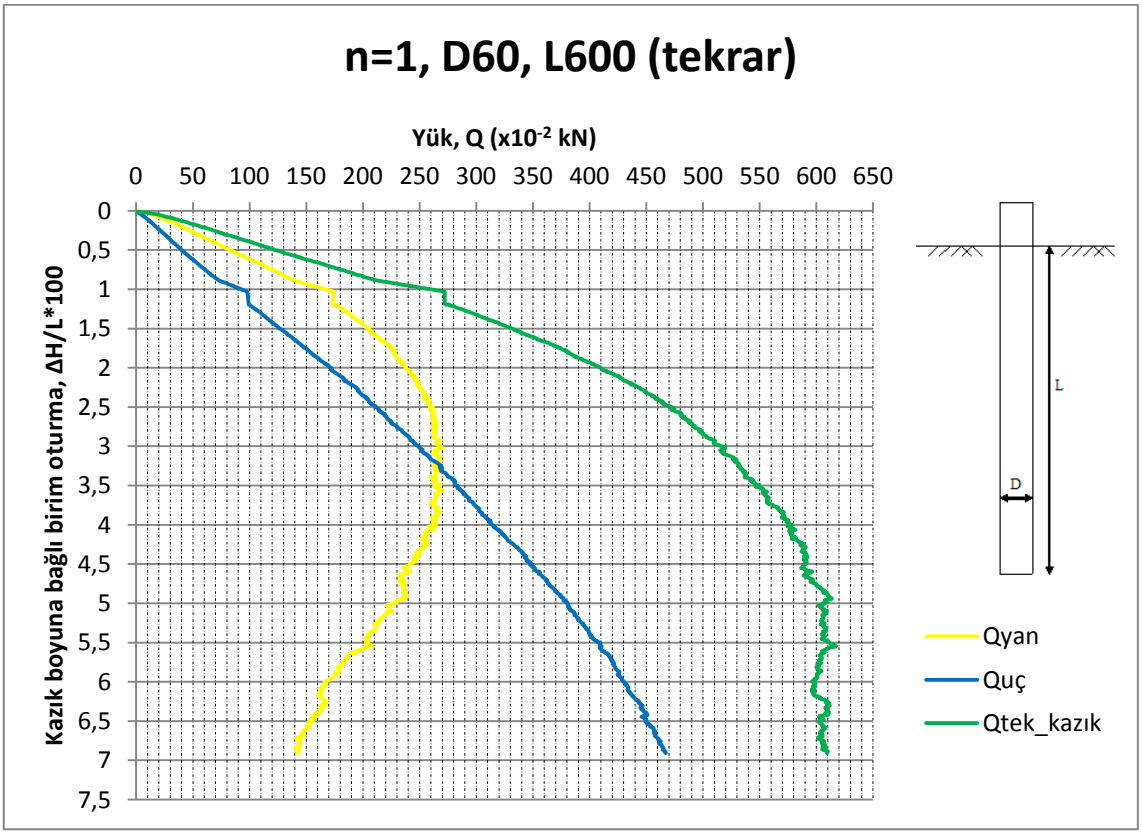


(b)

Şekil Ek 1.5. D=60 mm ve L=600 mm kazığa ait yük-birim oturma grafikleri

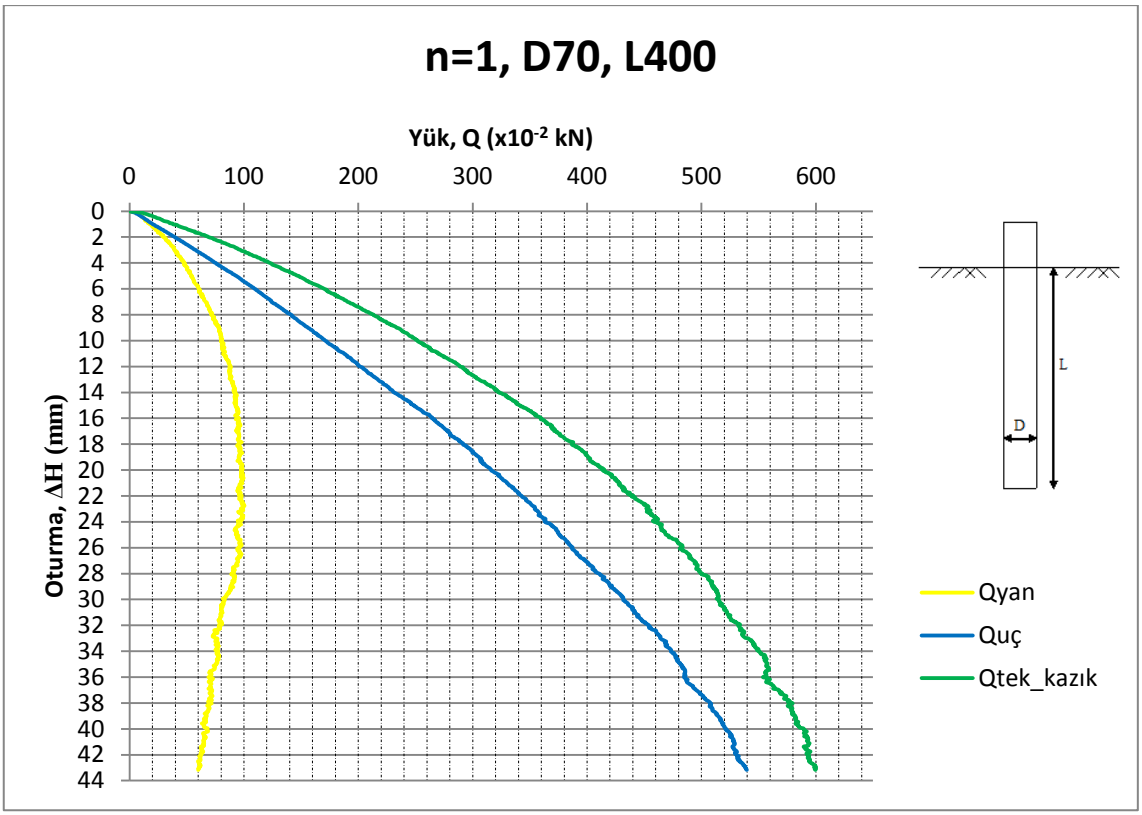


(a)

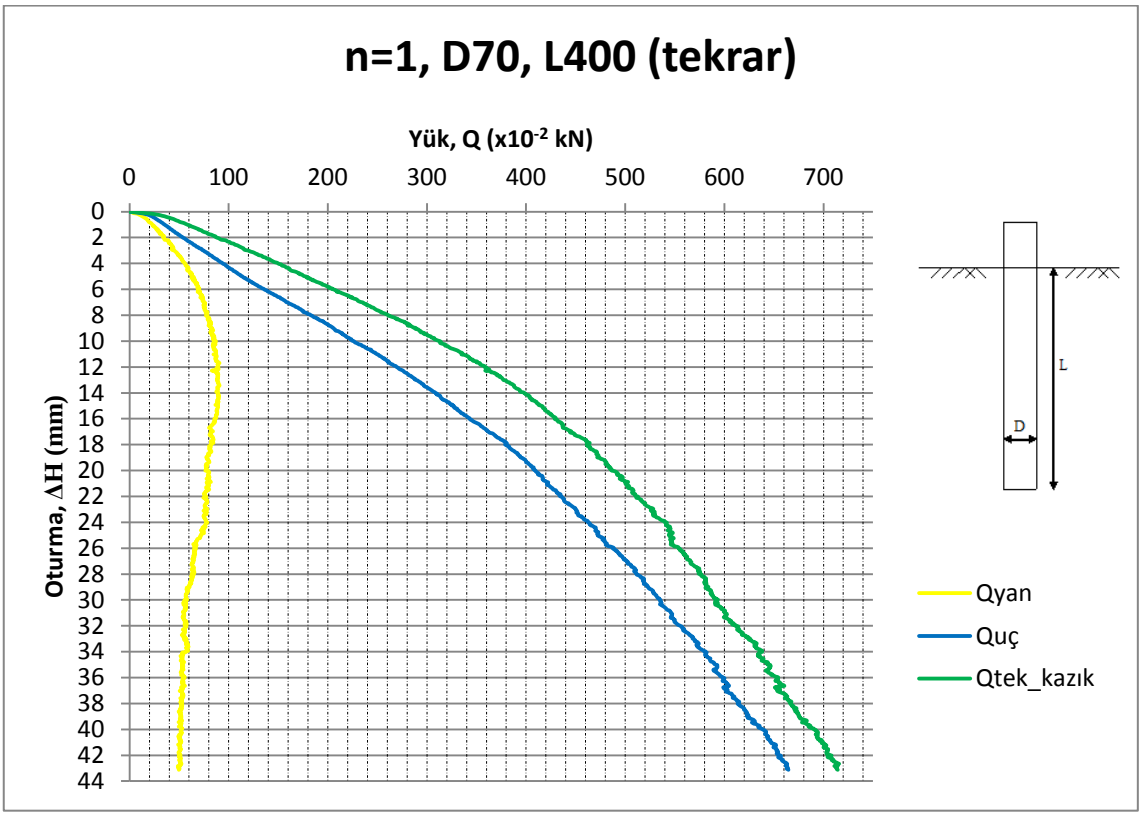


(b)

Şekil Ek 1.6. D=60 mm ve L=600 mm kazığa ait yük-birim oturma grafikleri

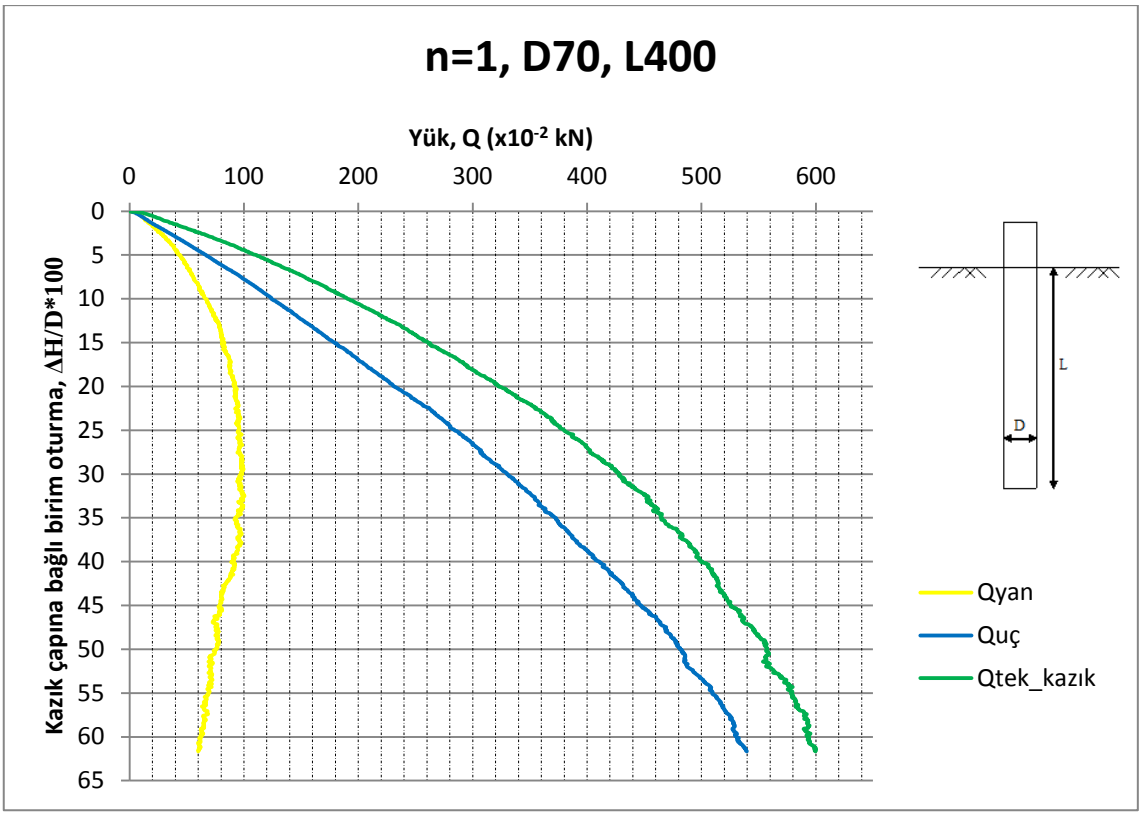


(a)

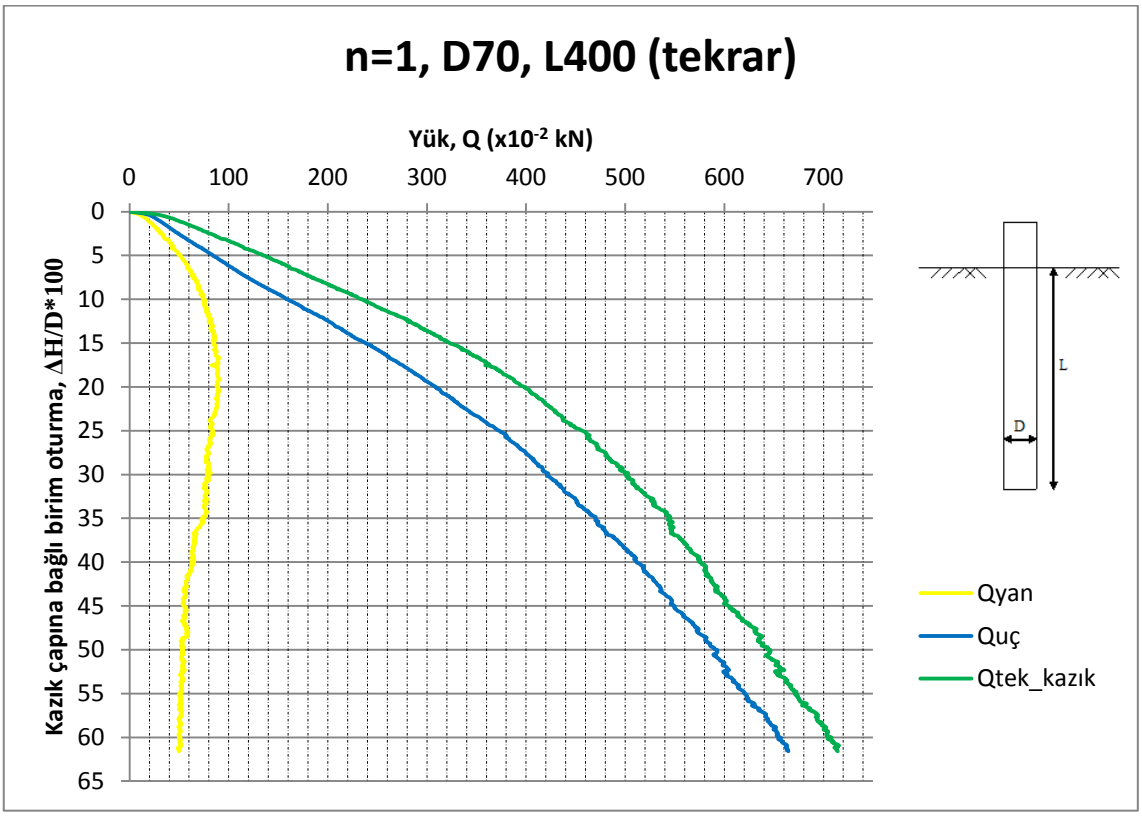


(b)

Şekil Ek 1.7. D=70 mm ve L=400 mm kazığa ait yük-oturma grafikleri

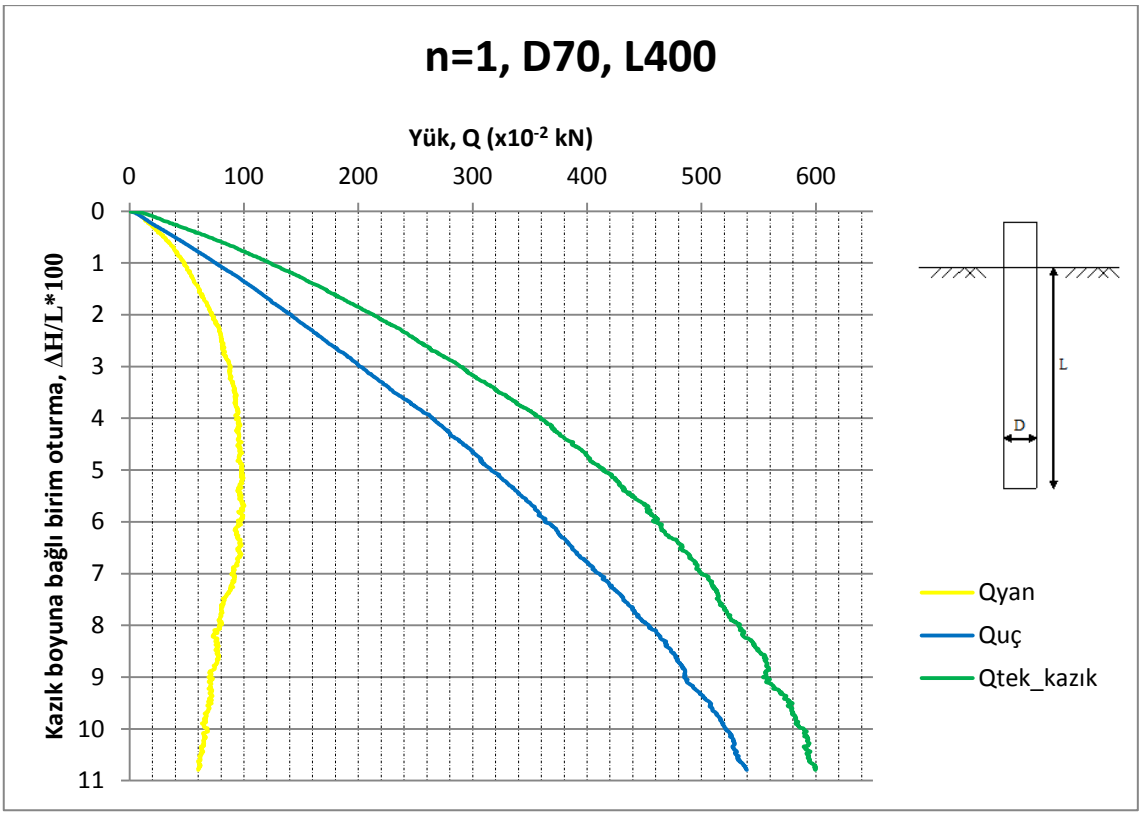


(a)

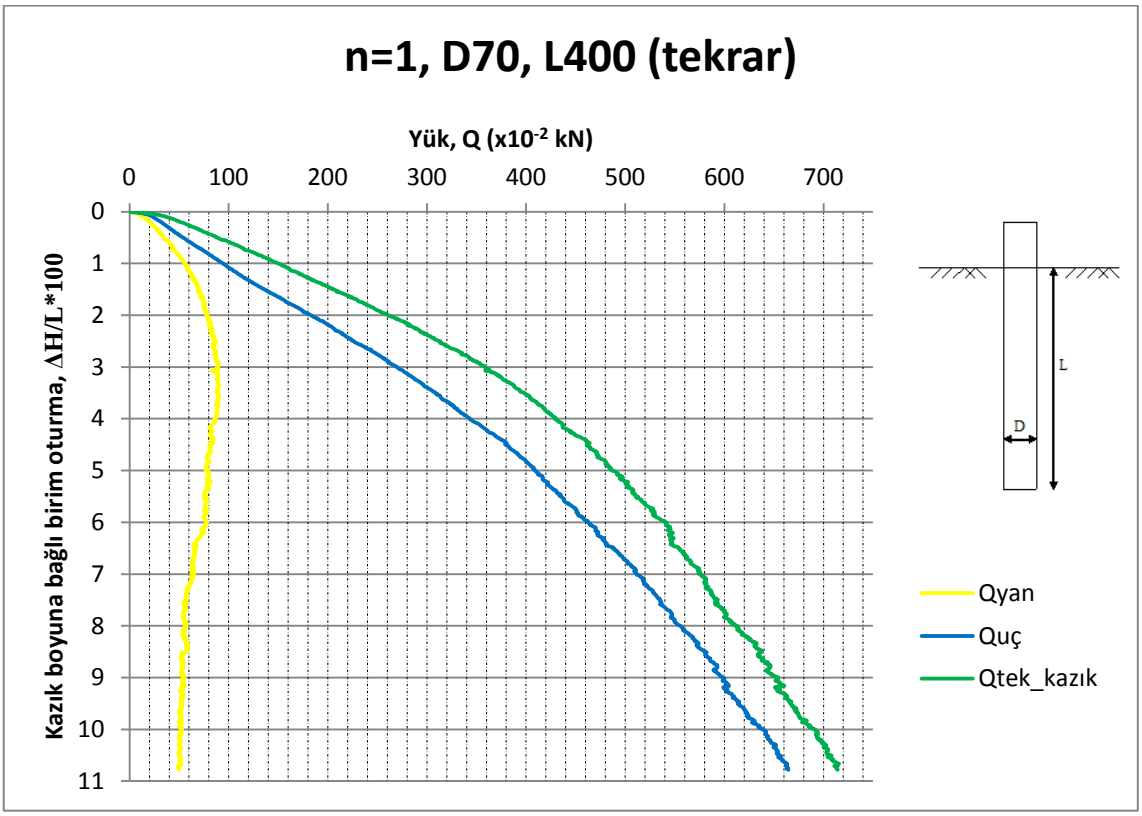


(b)

Şekil Ek 1.8. D=70 mm ve L=400 mm kazığa ait yük-birim oturma grafikleri

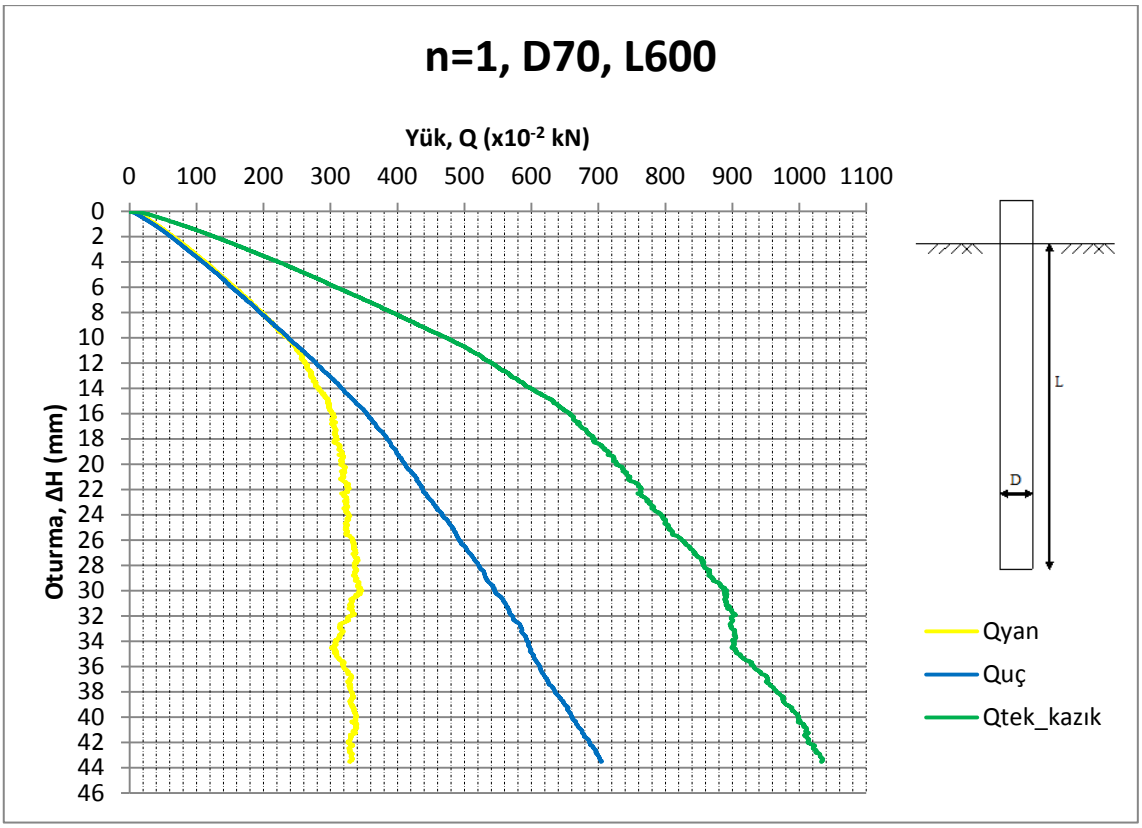


(a)

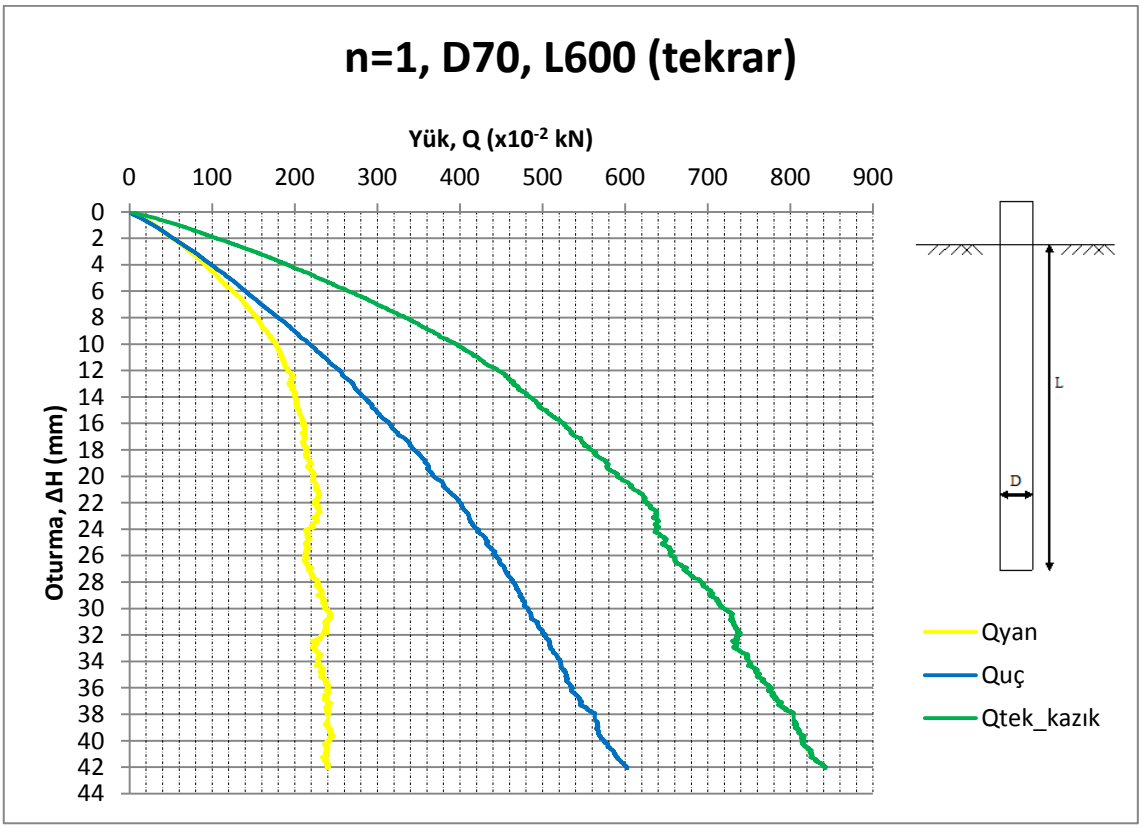


(b)

Şekil Ek 1.9. D=70 mm ve L=400 mm kazığa ait yük-birim oturma grafikleri

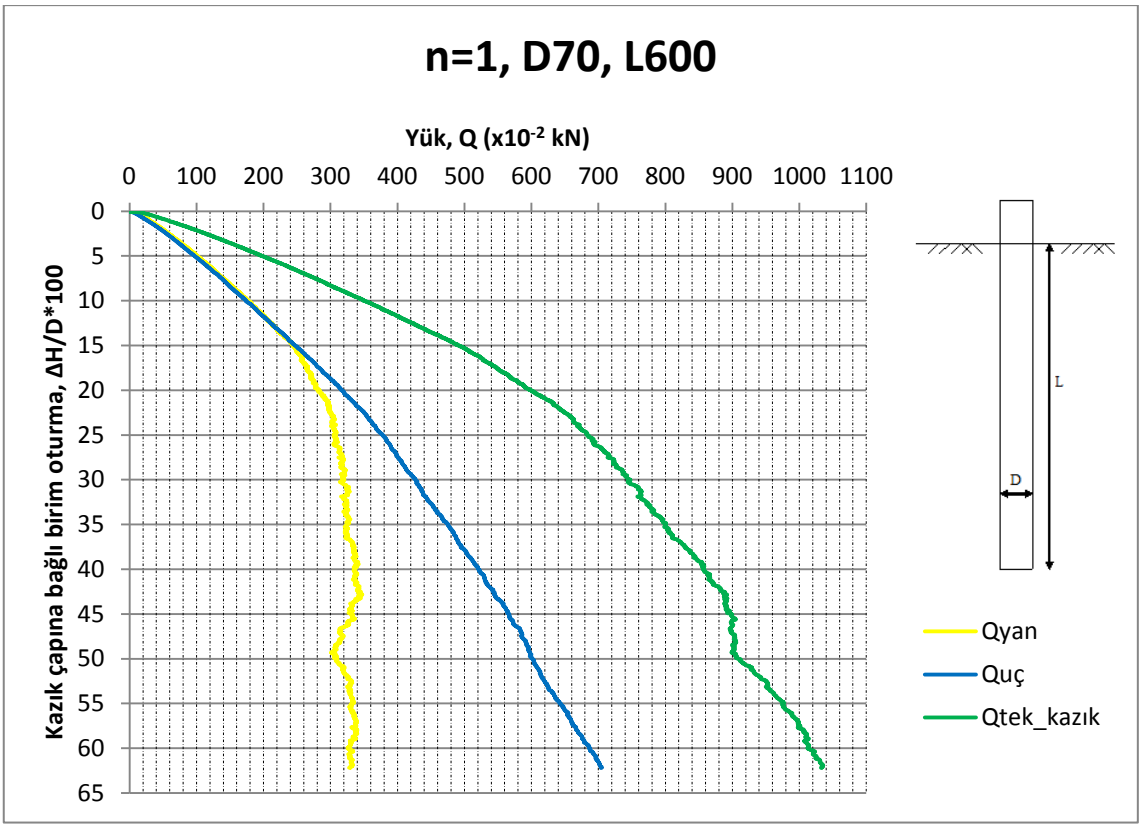


(a)

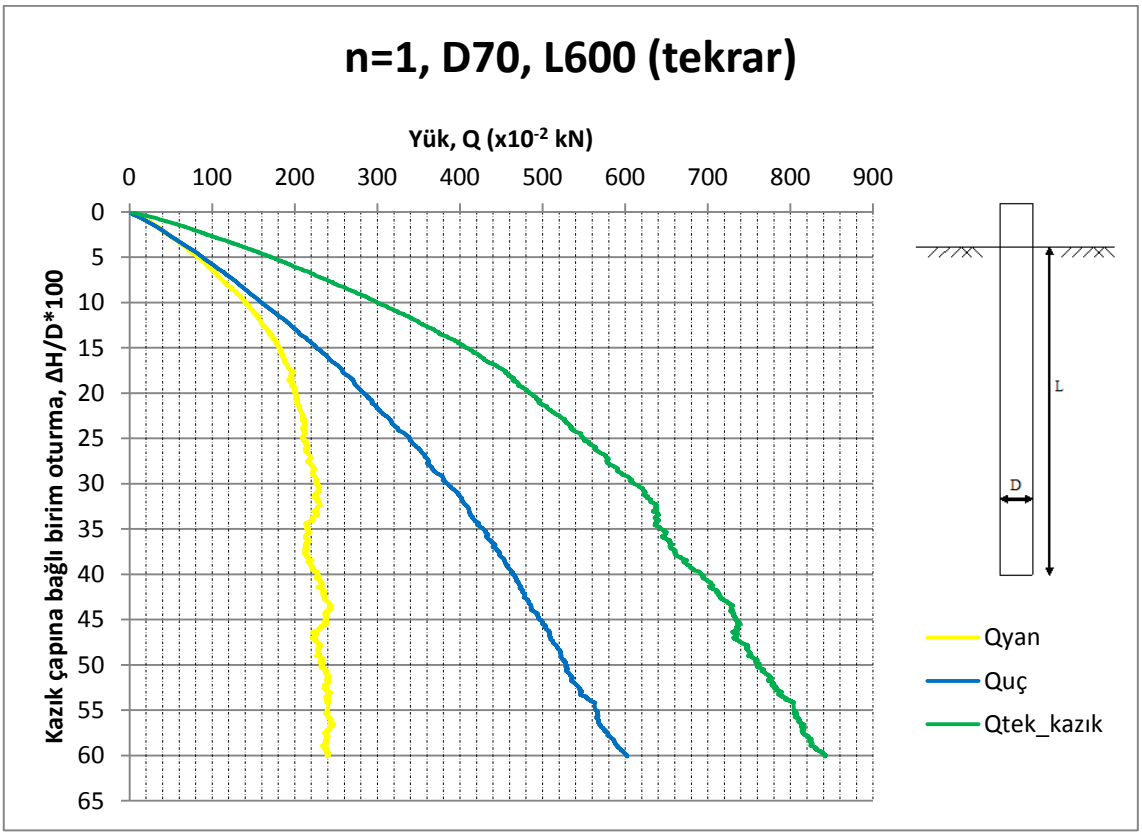


(b)

Şekil Ek 1.10. D=70 mm ve L=600 mm kazığa ait yük-oturma grafikleri

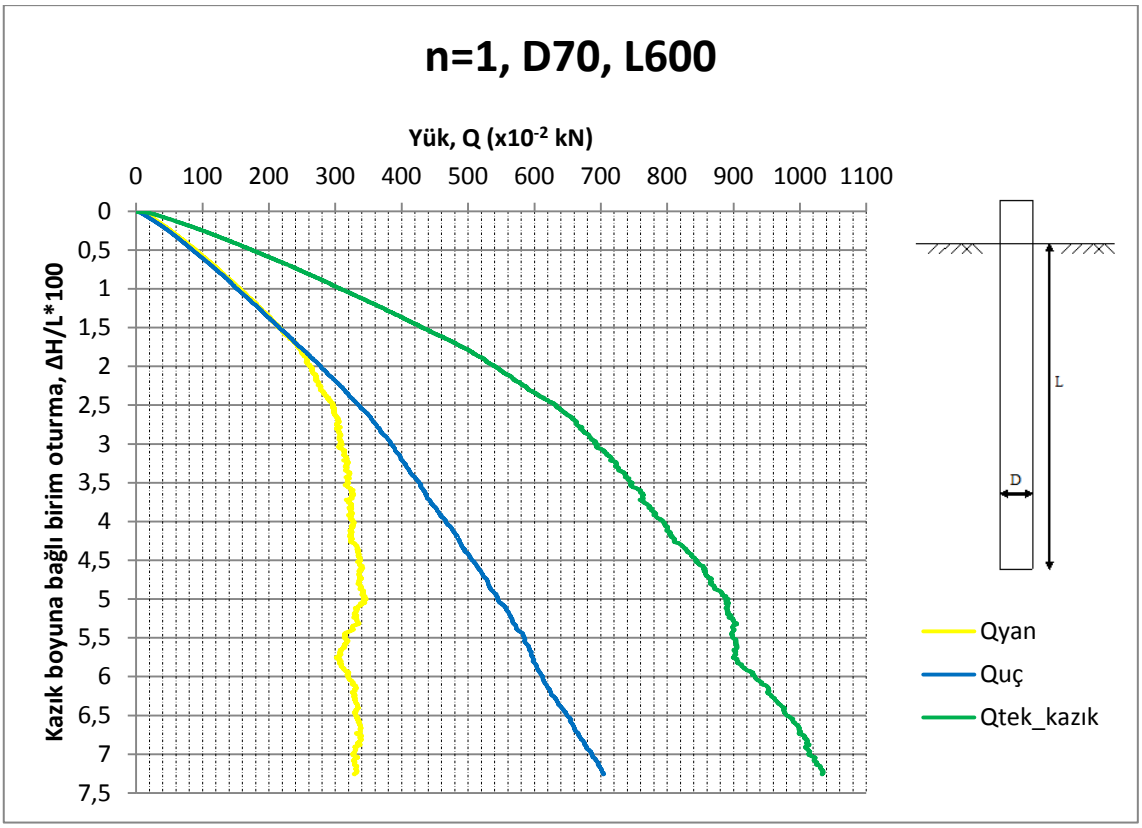


(a)

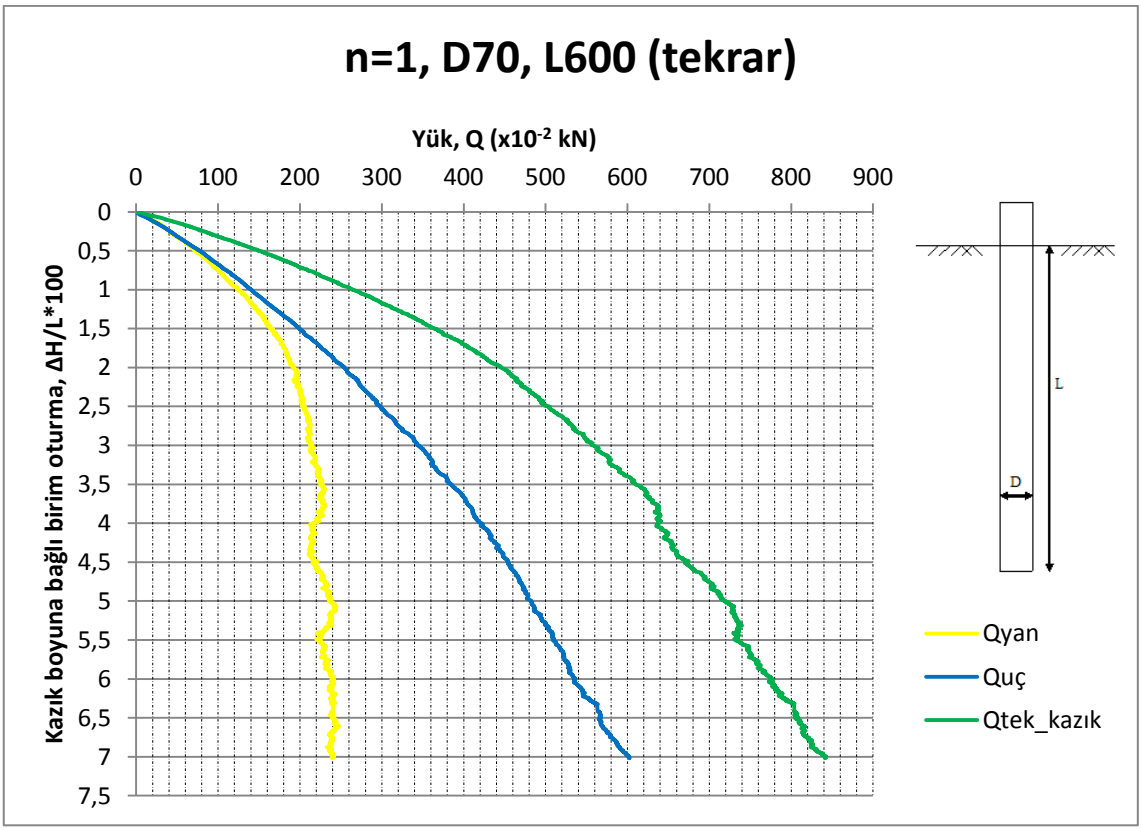


(b)

Şekil Ek 1.11. D=70 mm ve L=600 mm kazığa ait yük-birim oturma grafikleri



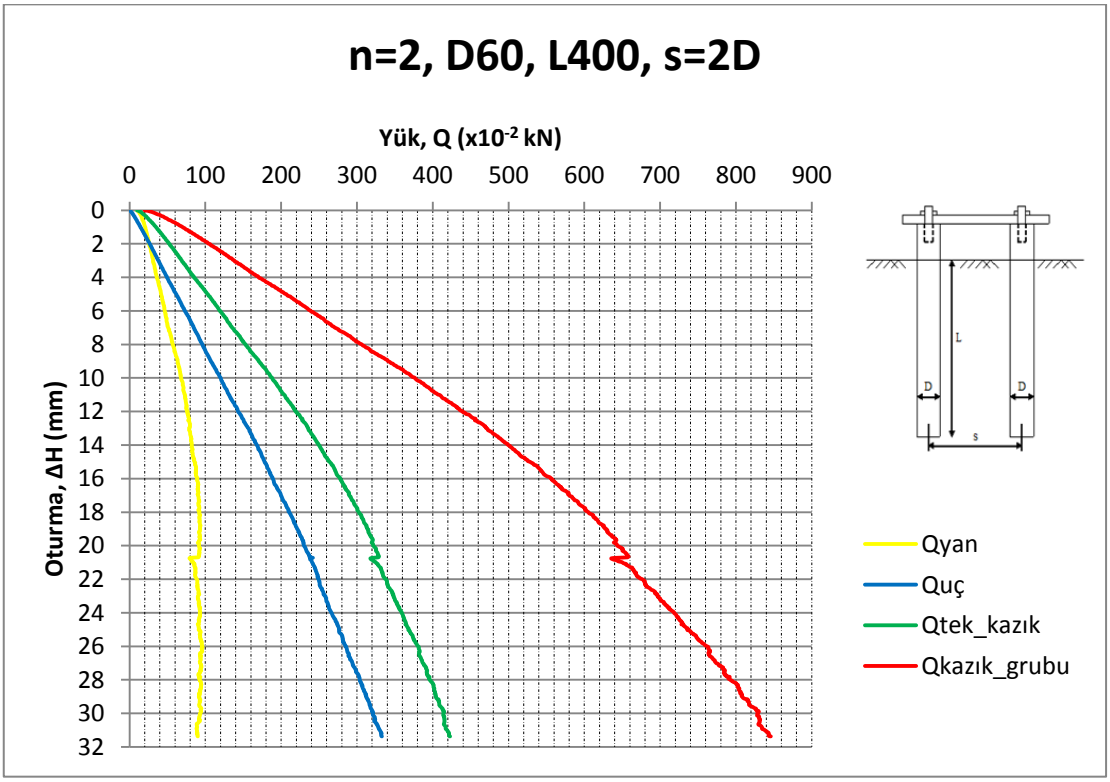
(a)



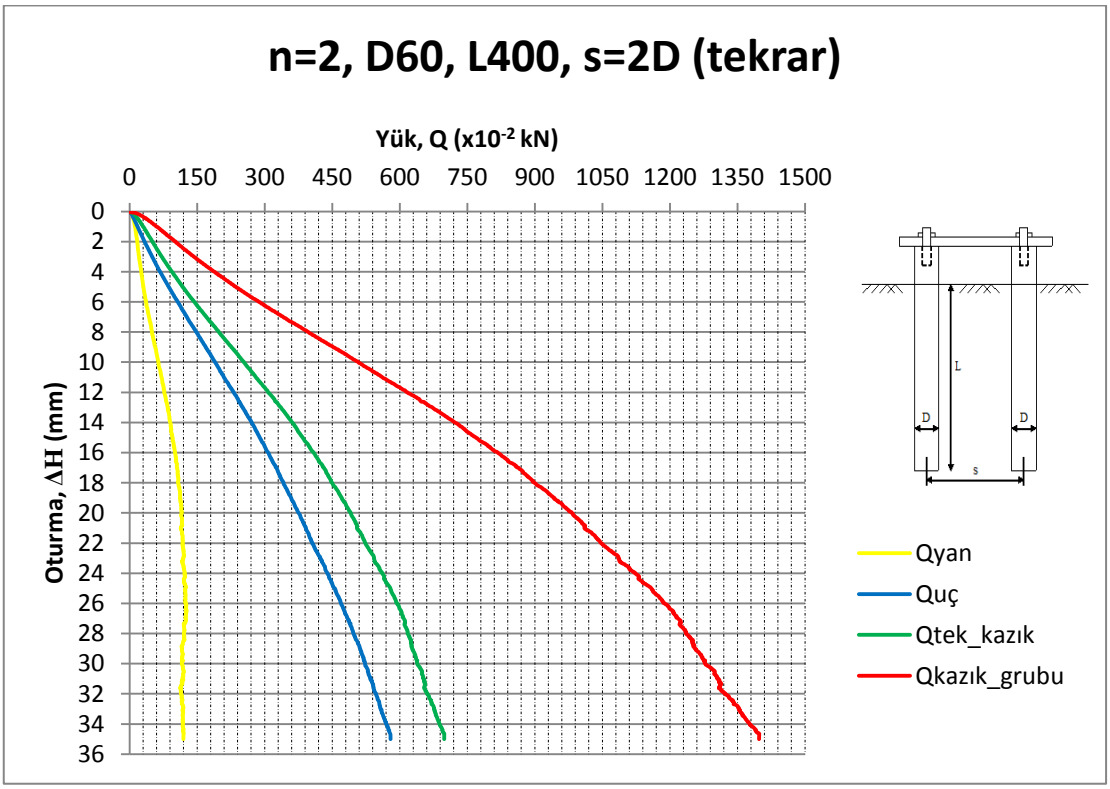
(b)

Şekil Ek 1.12. D=70 mm ve L=600 mm kazığa ait yük-birim oturma grafikleri

Ek 2. 2 Kazıktan Oluşan Kazık Grubu Yükleme Deneyi Sonuçları

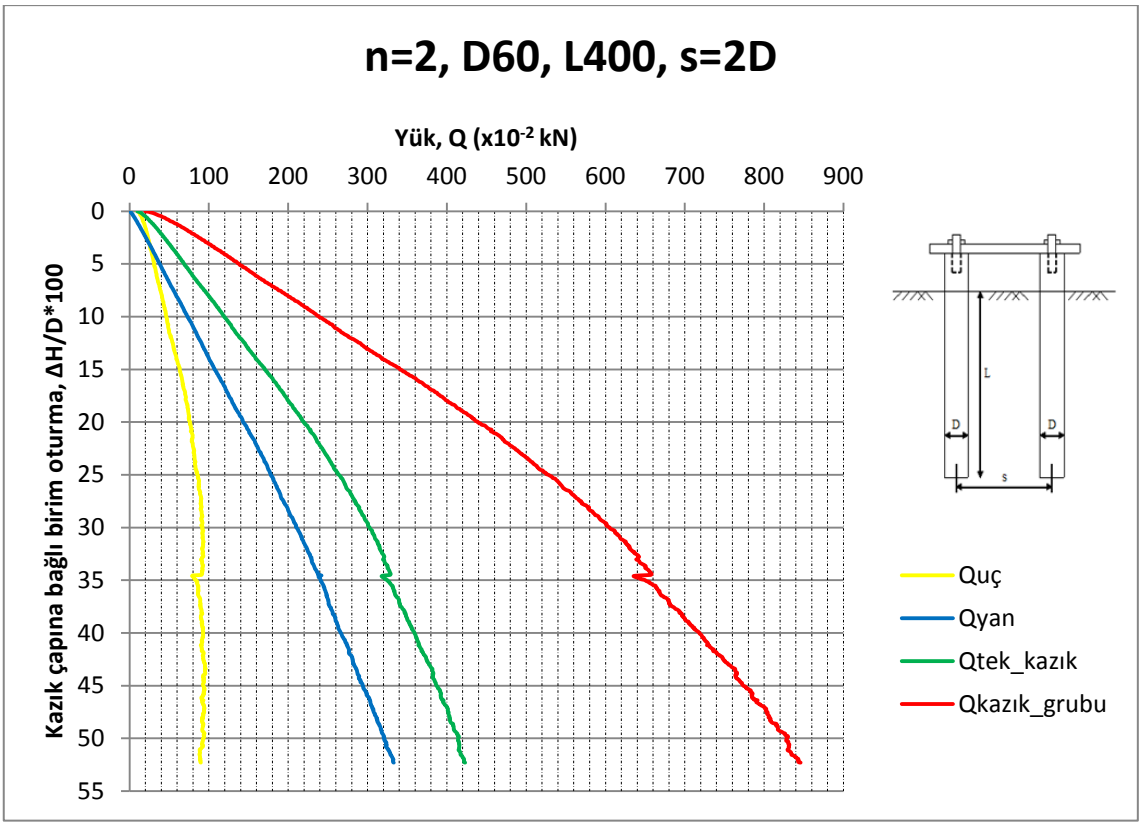


(a)

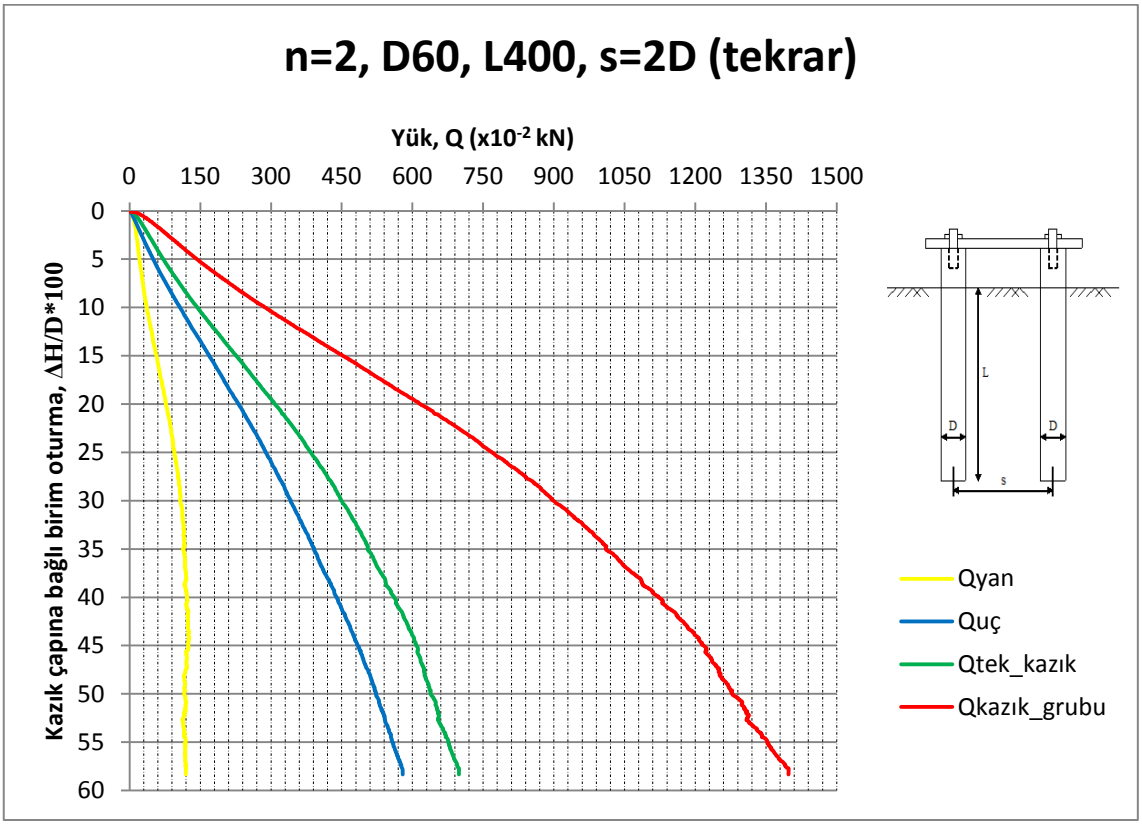


(b)

Şekil Ek 2.1. D=60 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

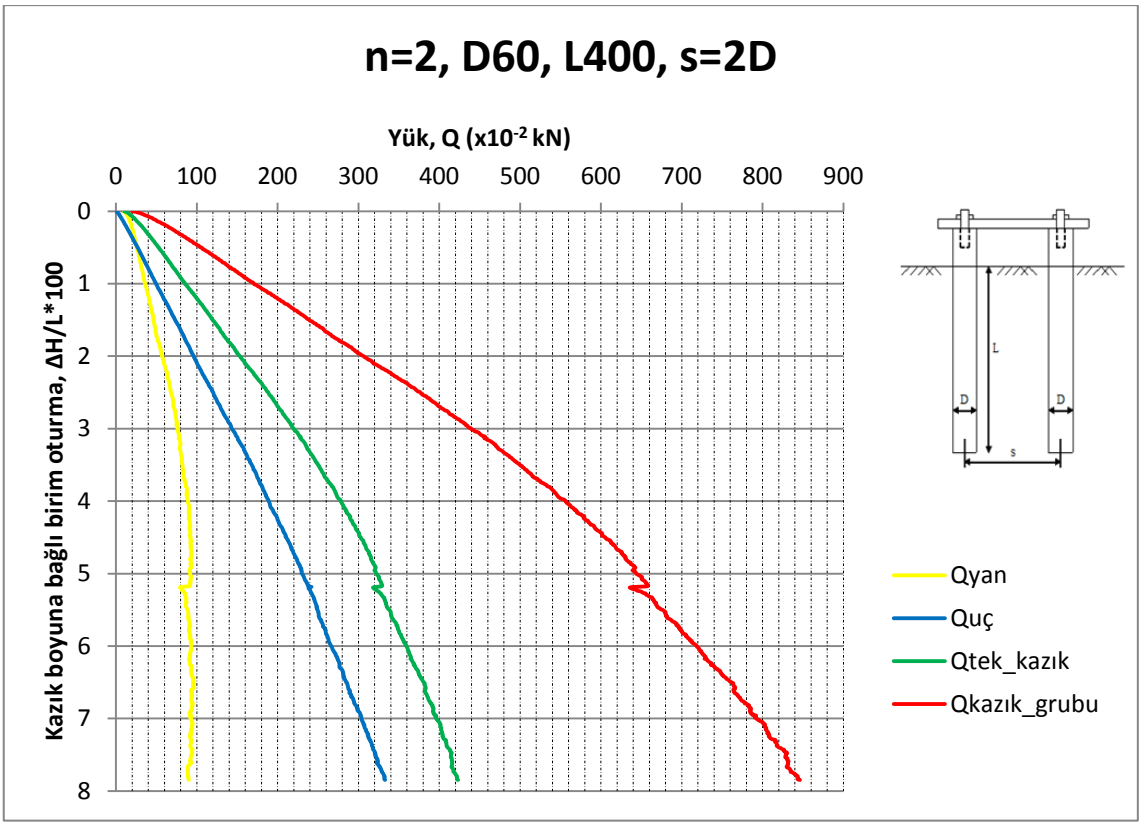


(a)

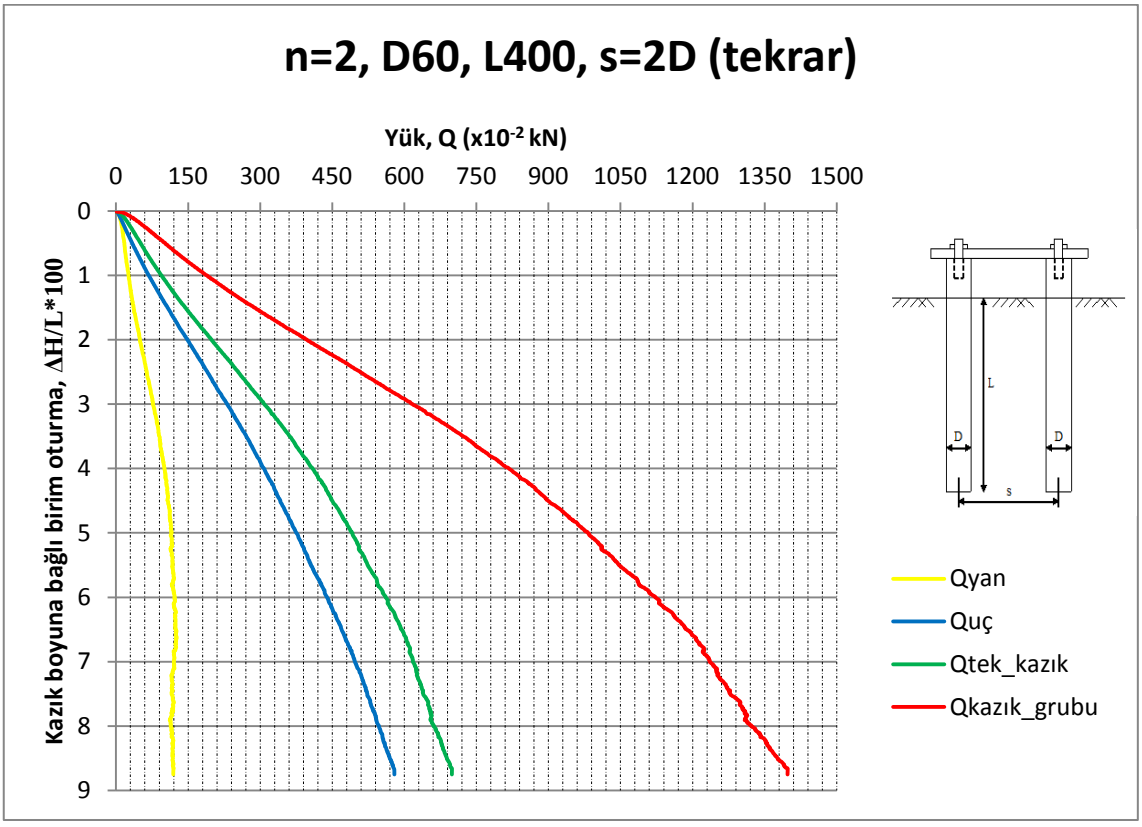


(b)

Şekil Ek 2.2. D=60 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

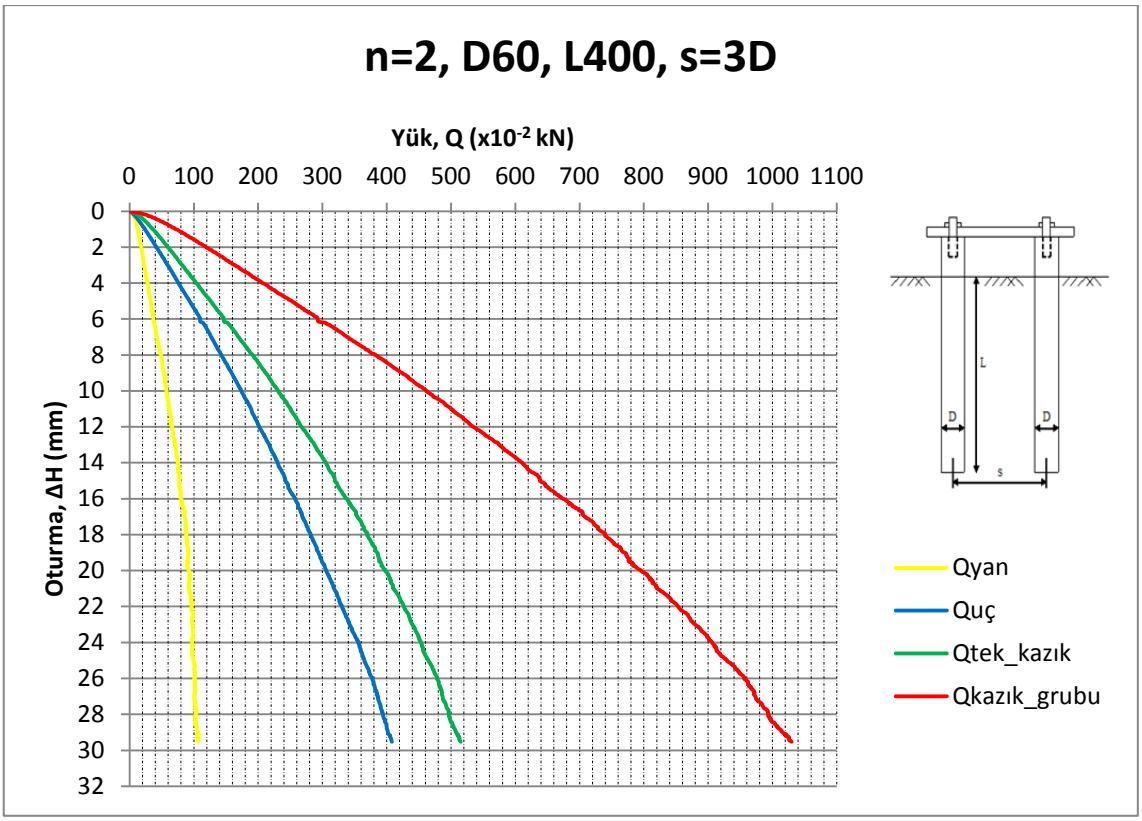


(a)

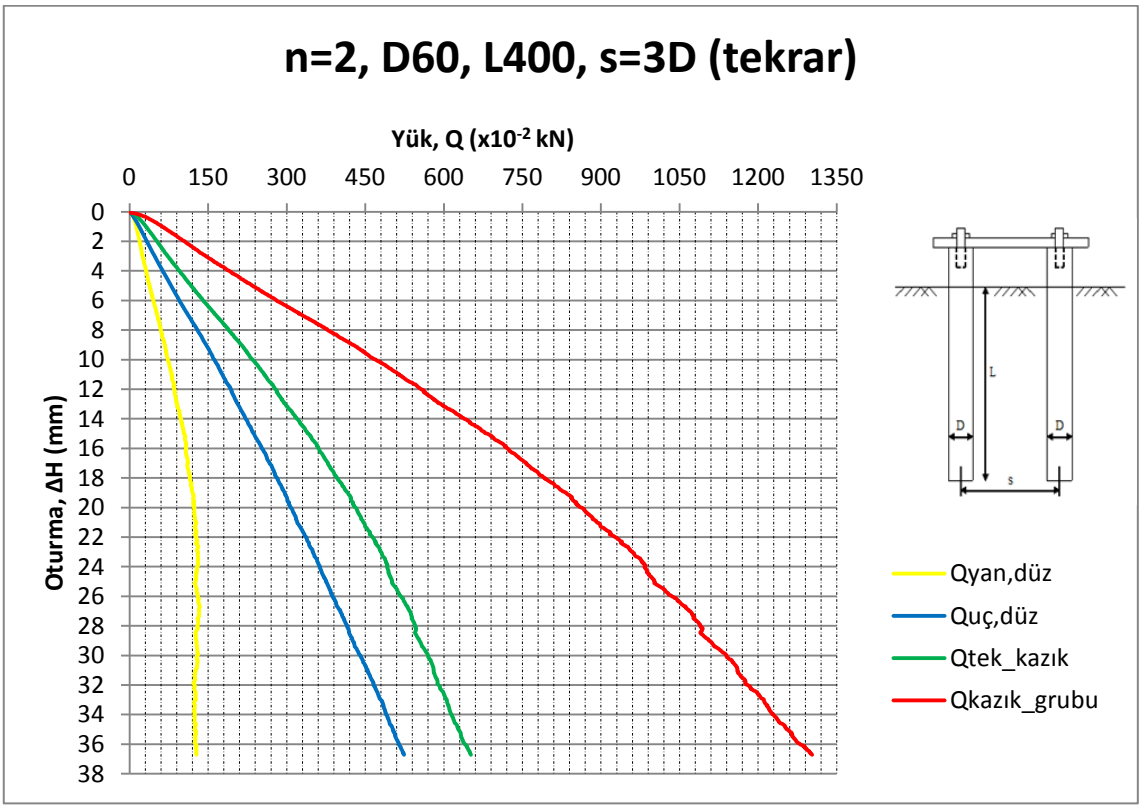


(b)

Şekil Ek 2.3. D=60 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

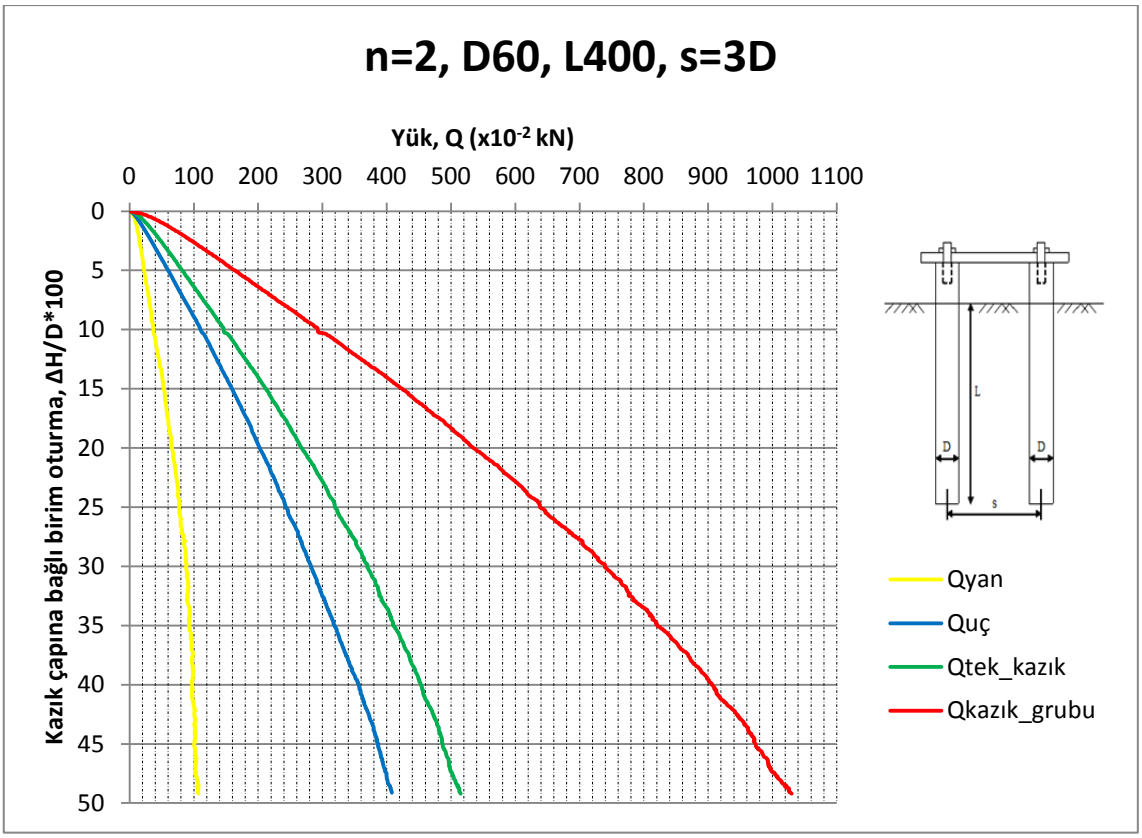


(a)

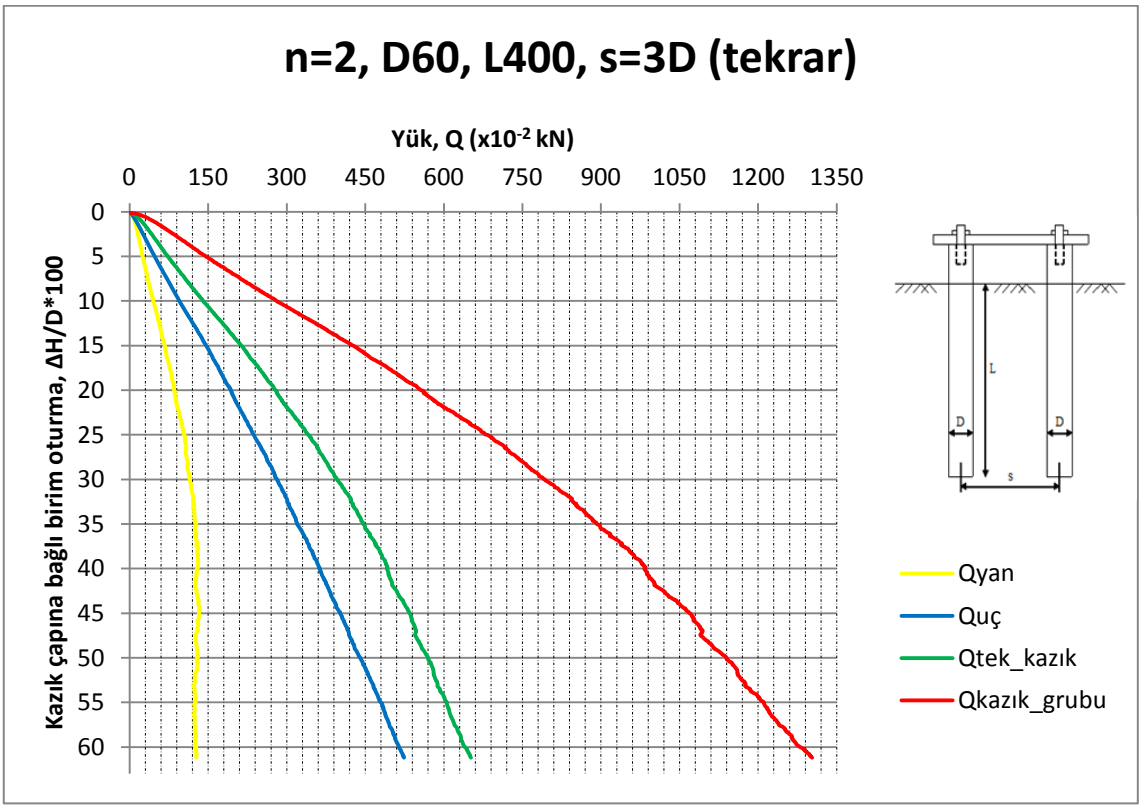


(b)

Şekil Ek 2.4. D=60 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

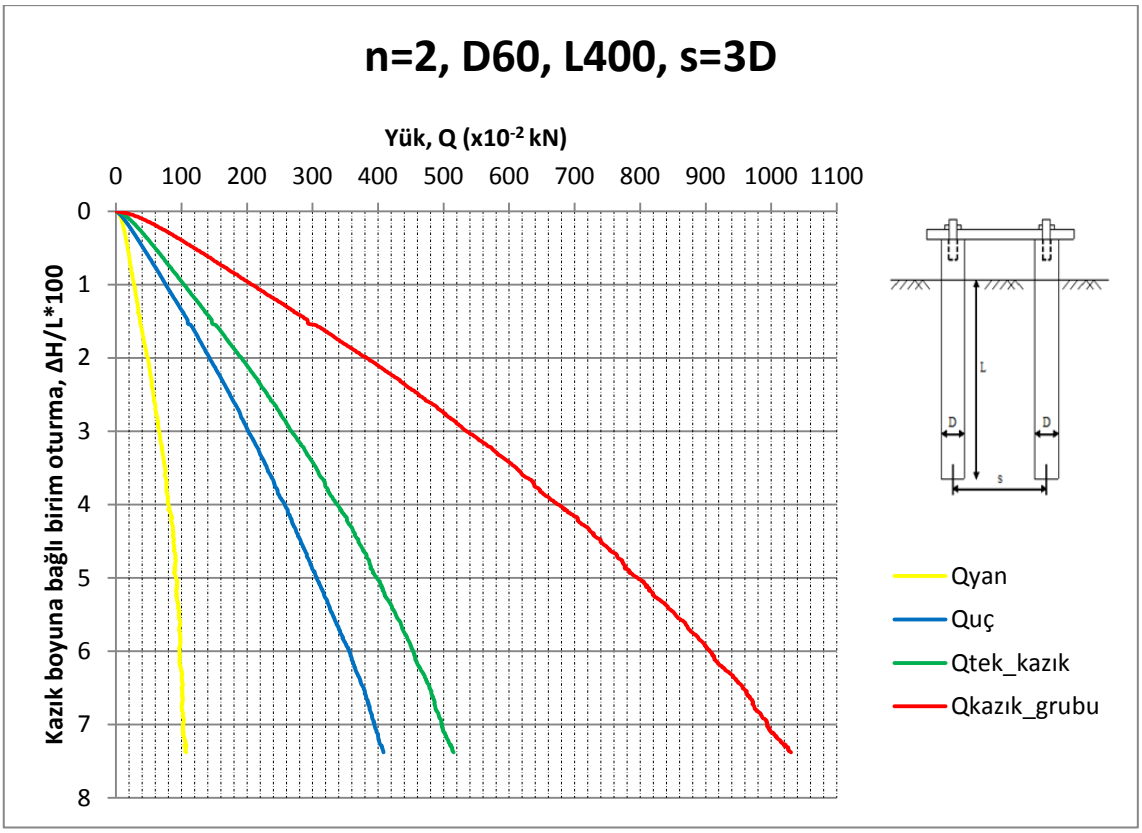


(a)

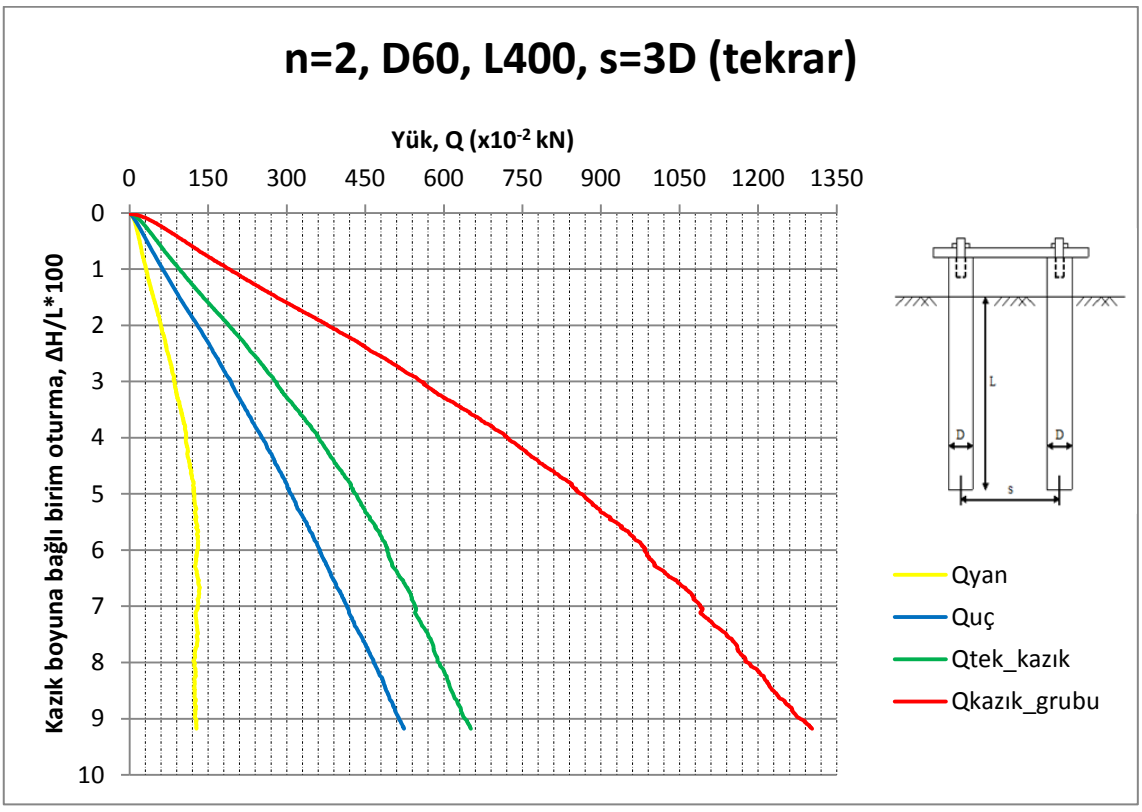


(b)

Şekil Ek 2.5. D=60 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

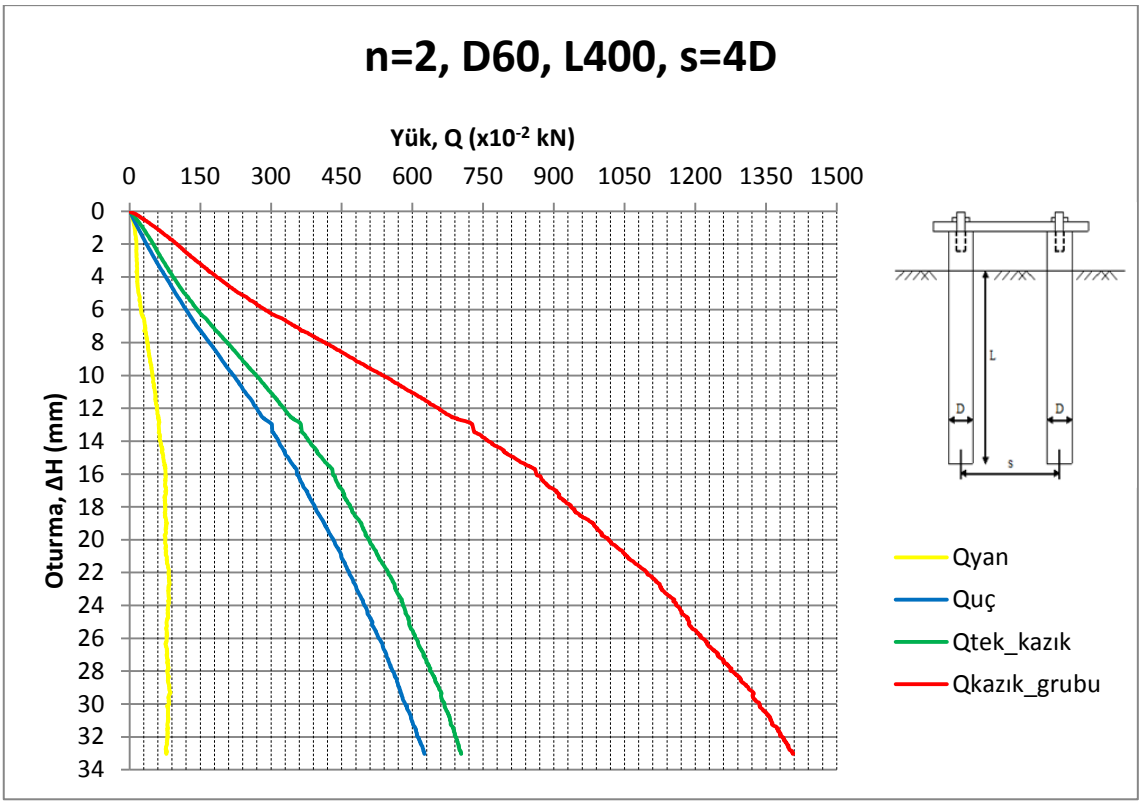


(a)

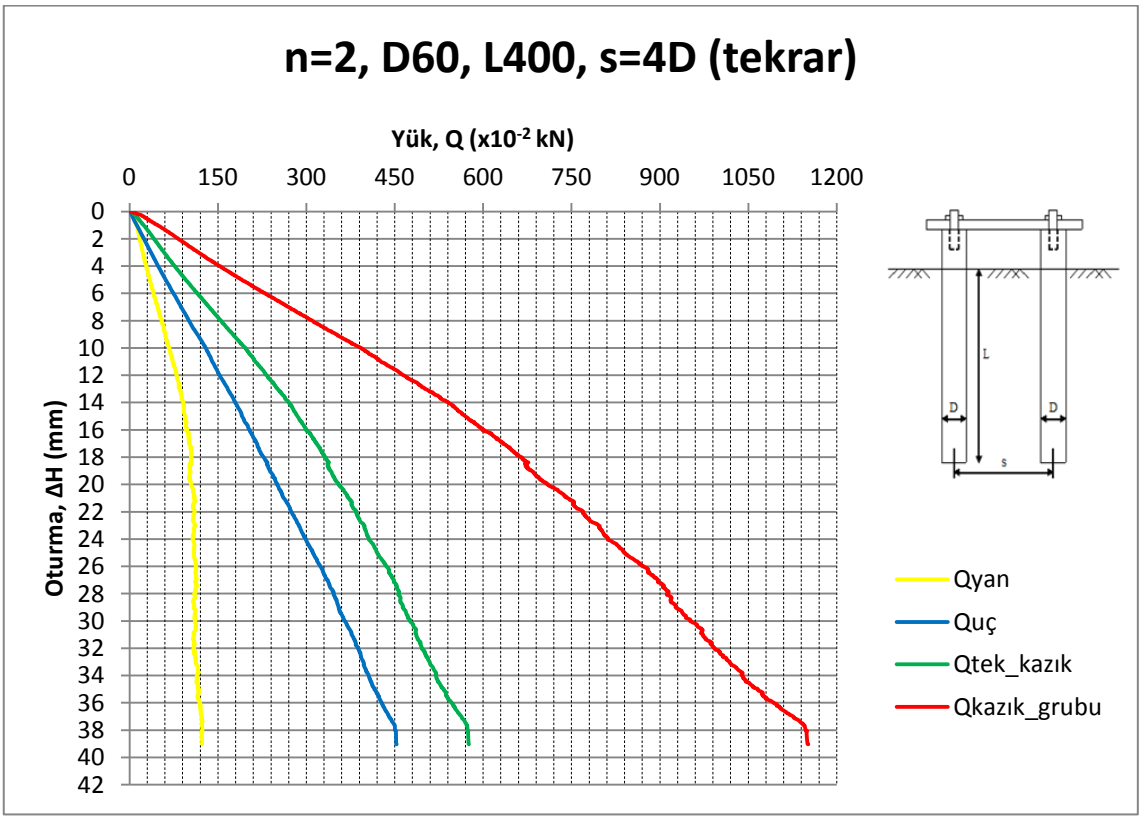


(b)

Şekil Ek 2.6. D=60 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

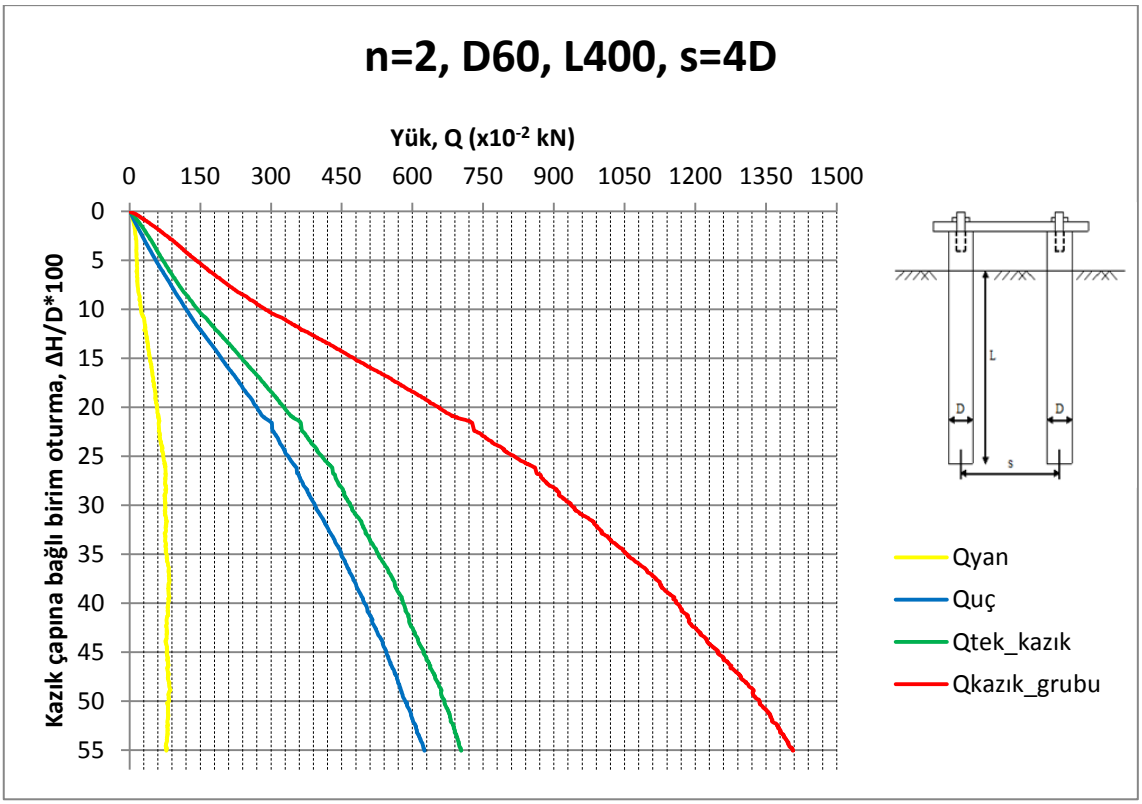


(a)

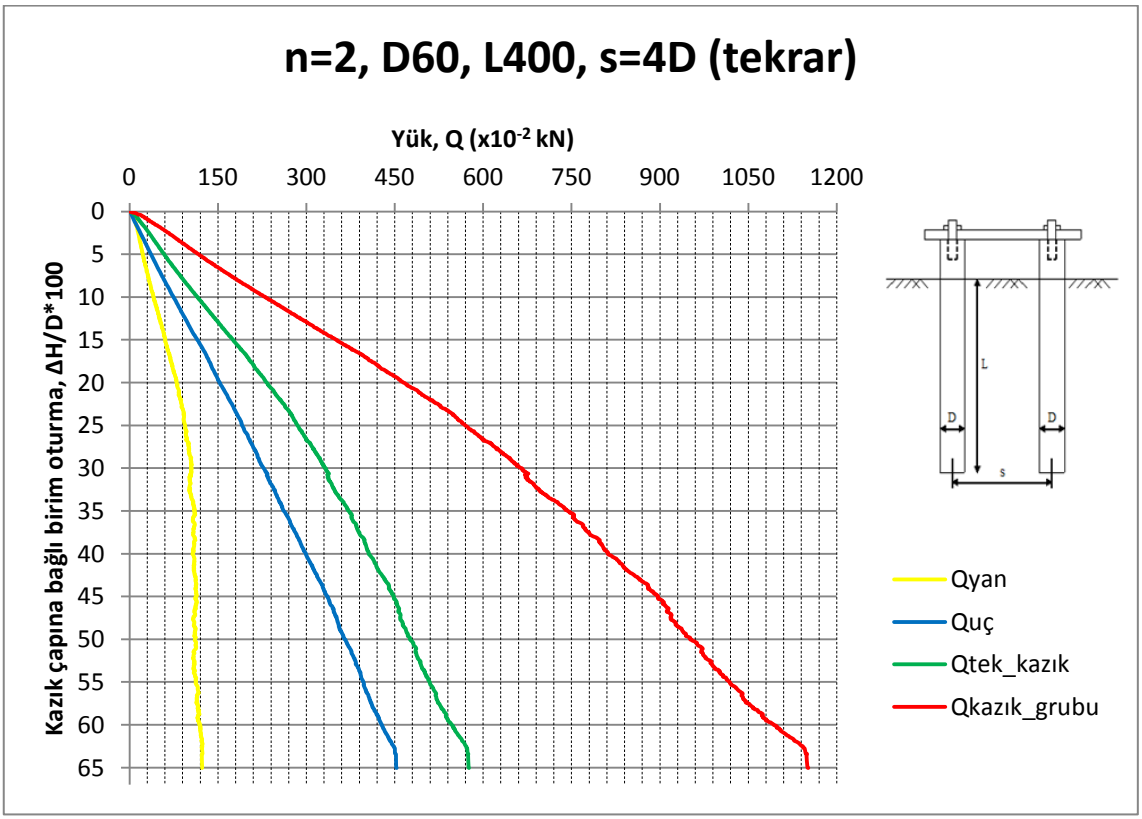


(b)

Şekil Ek 2.7. D=60 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

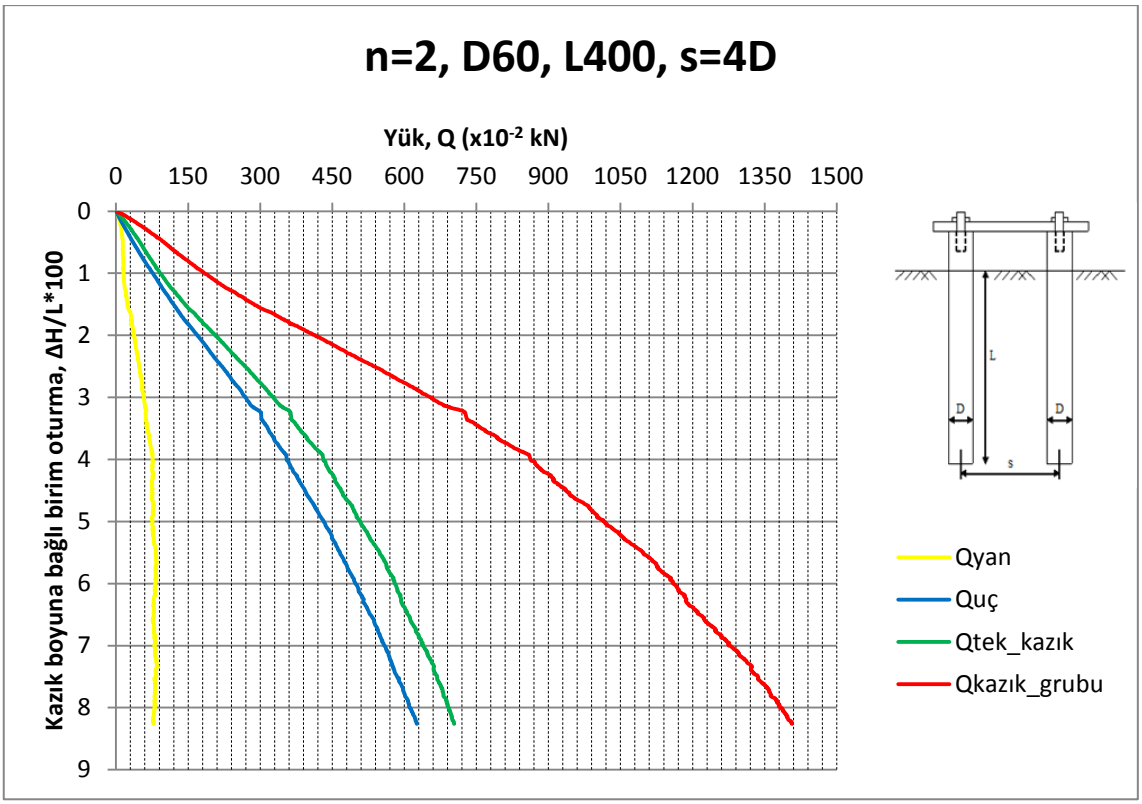


(a)

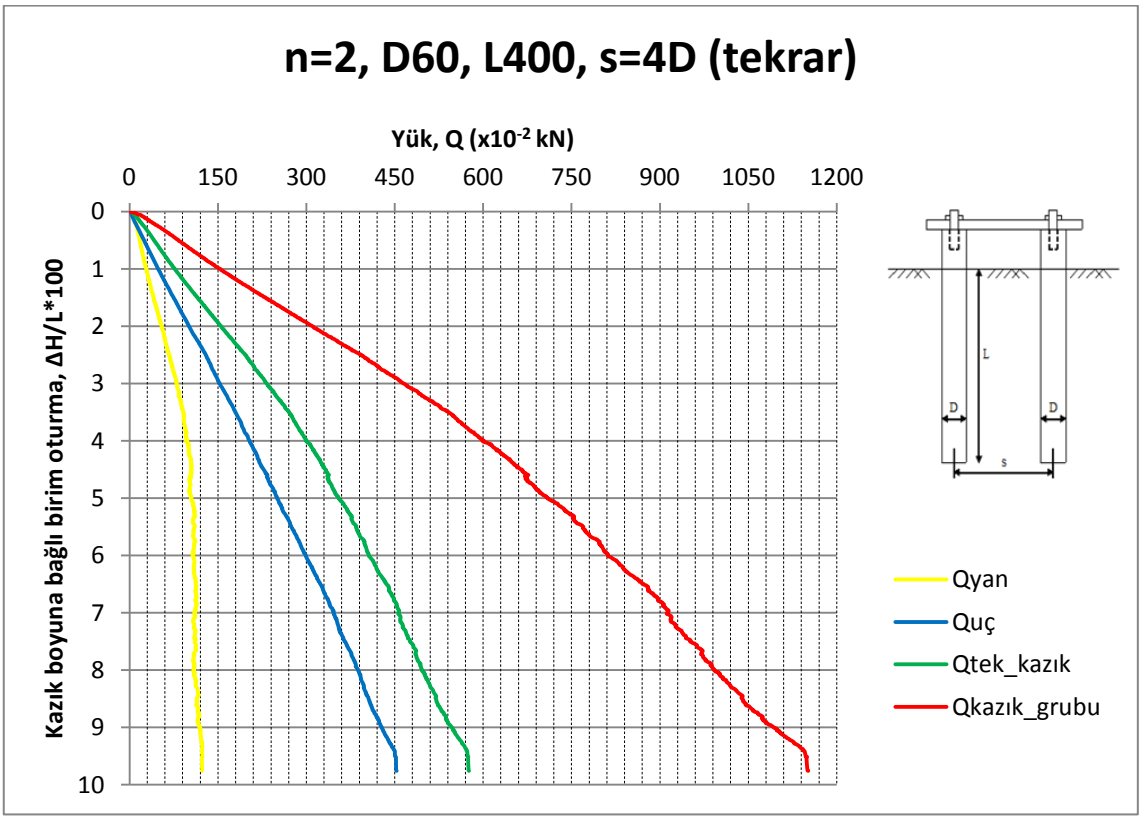


(b)

Şekil Ek 2.8. D=60 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

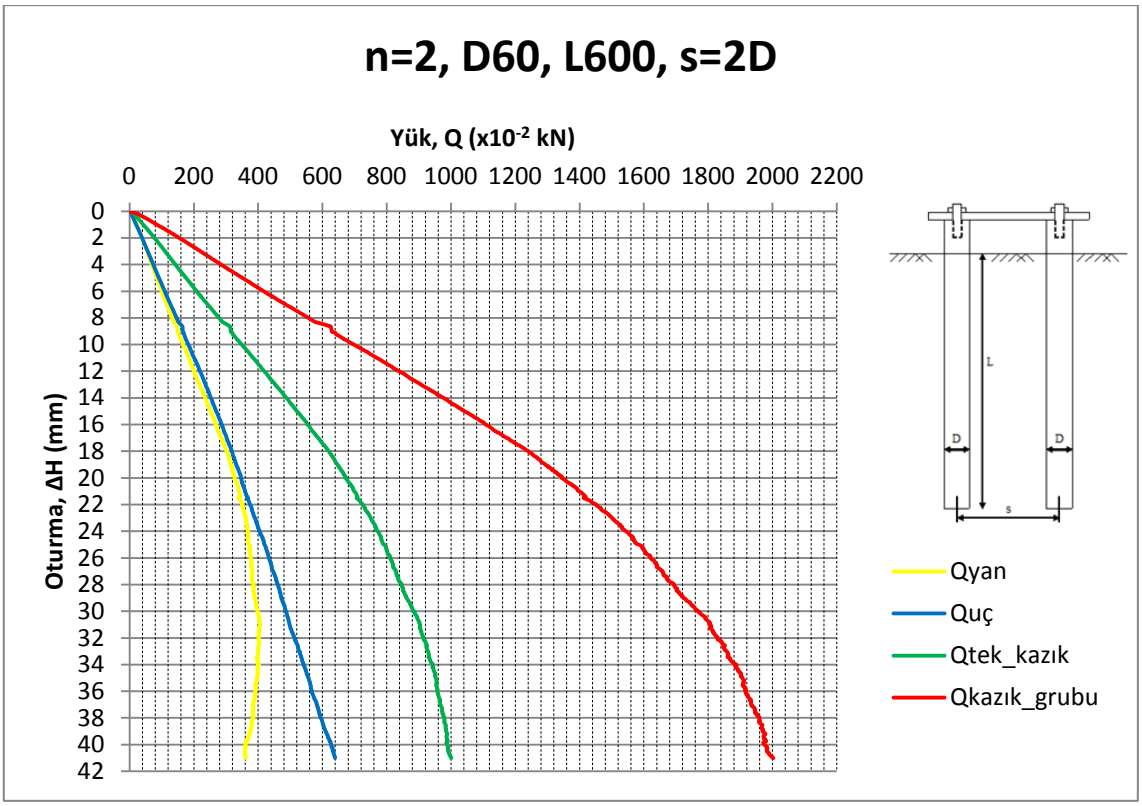


(a)

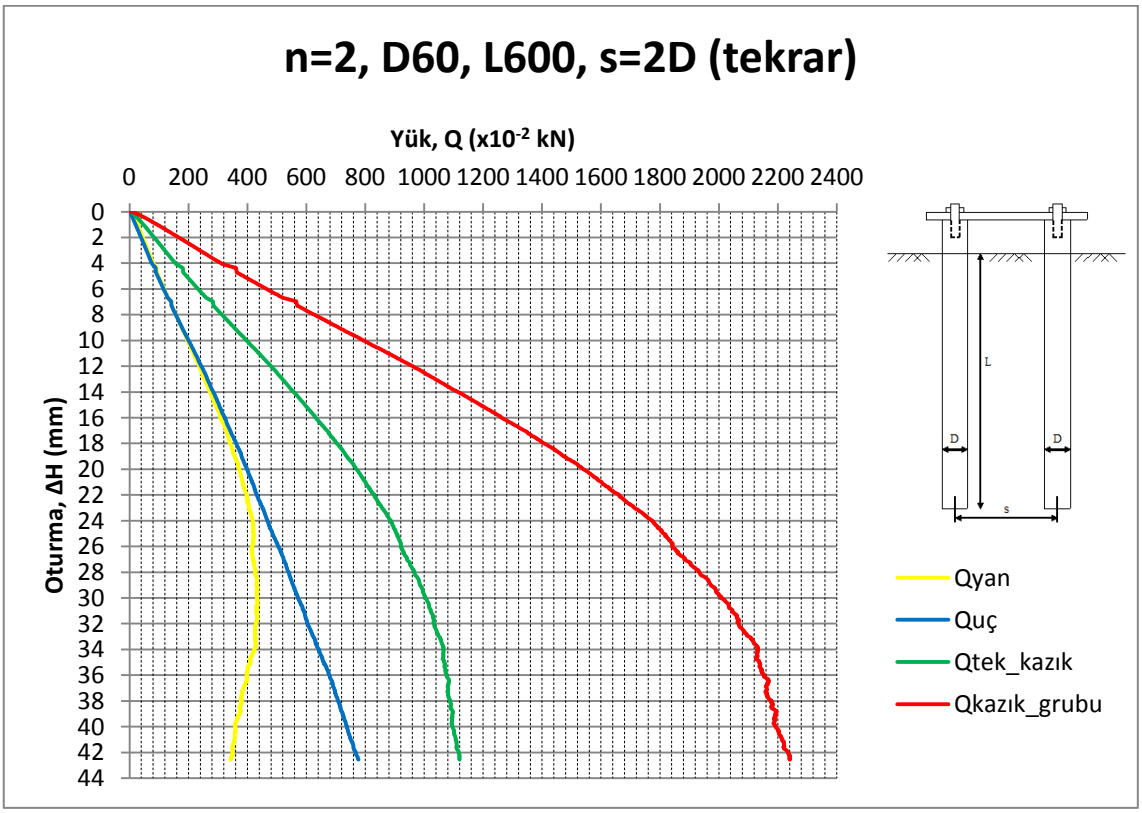


(b)

Şekil Ek 2.9. D=60 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

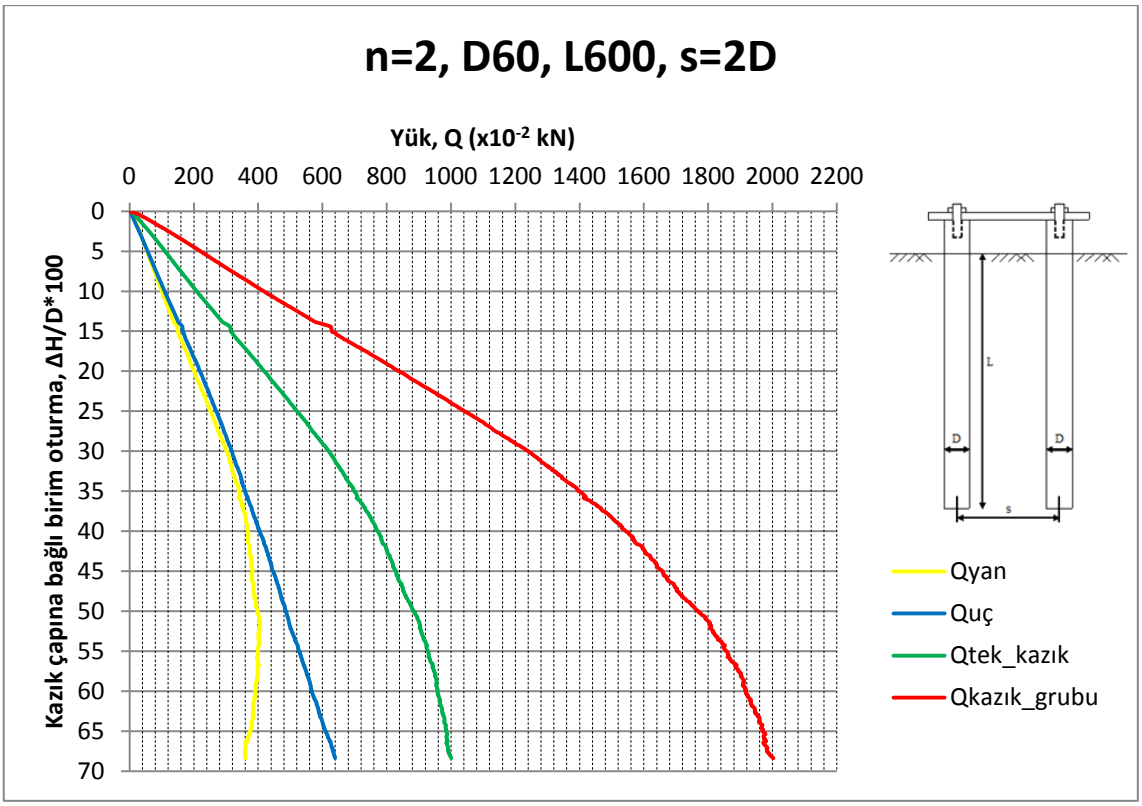


(a)

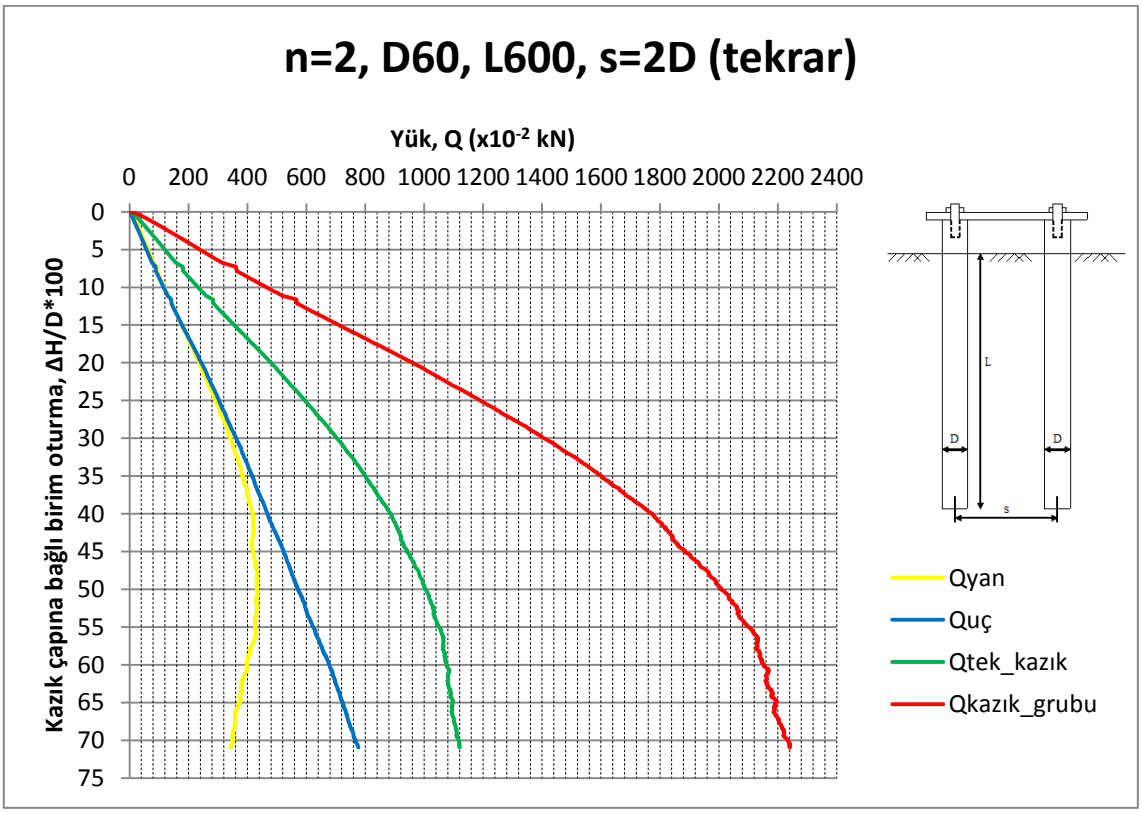


(b)

Şekil Ek 2.10. D=60 mm, L=600 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

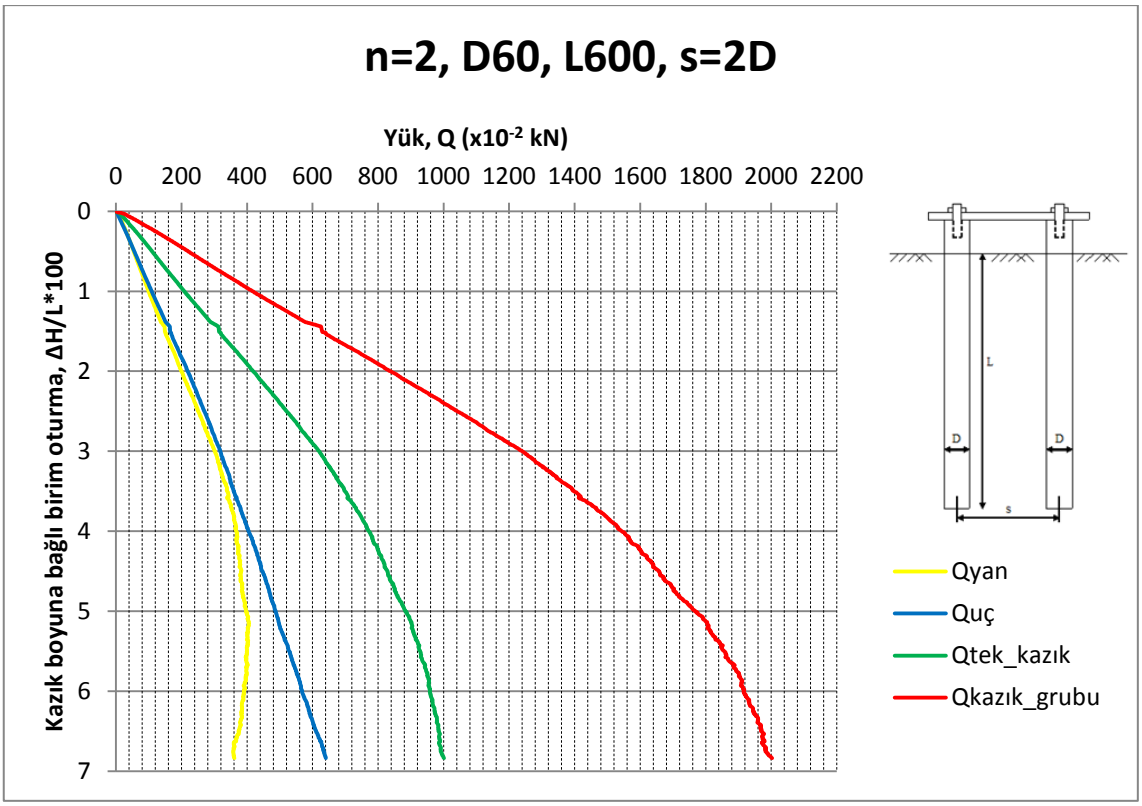


(a)

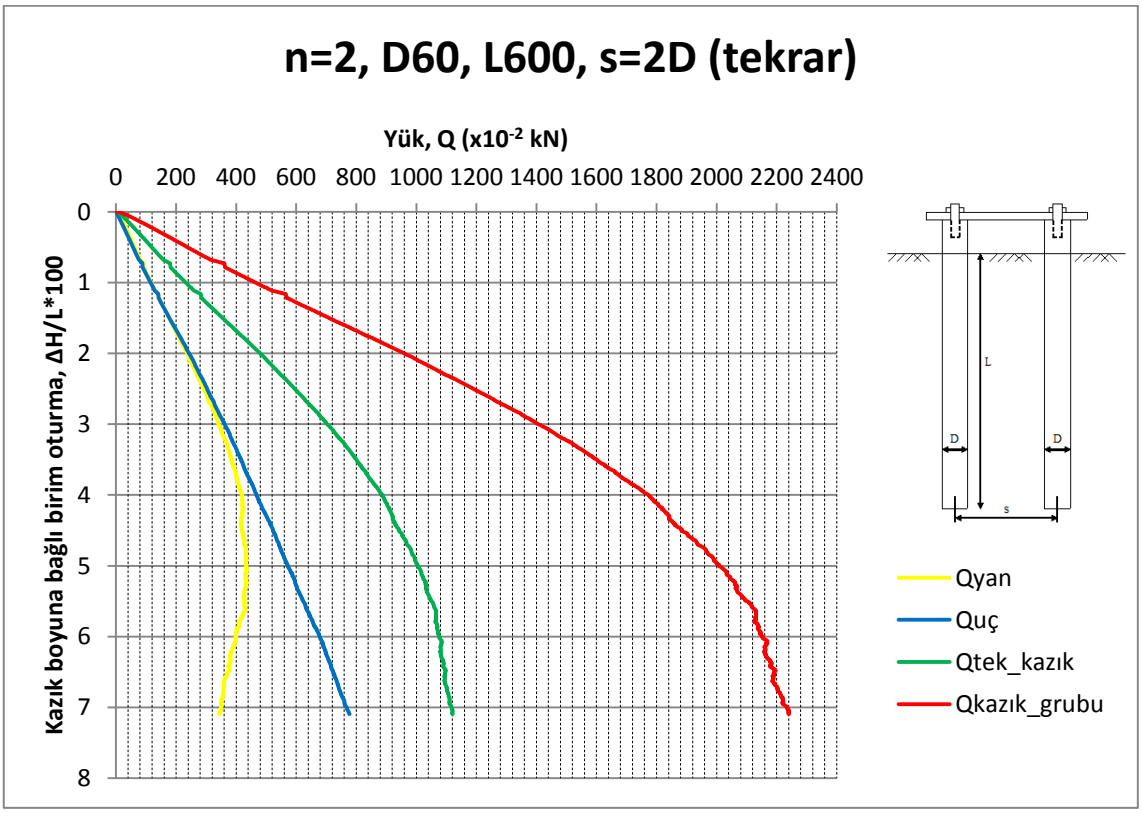


(b)

Şekil Ek 2.11. D=60 mm, L=600 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

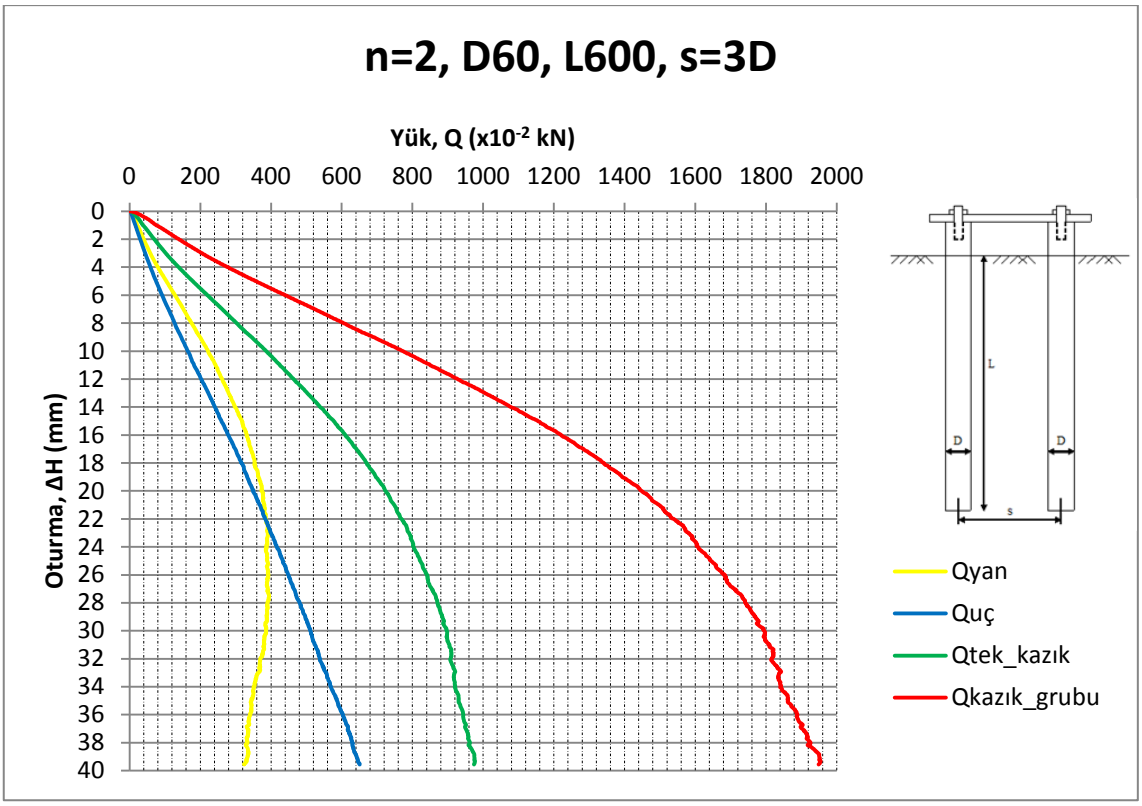


(a)

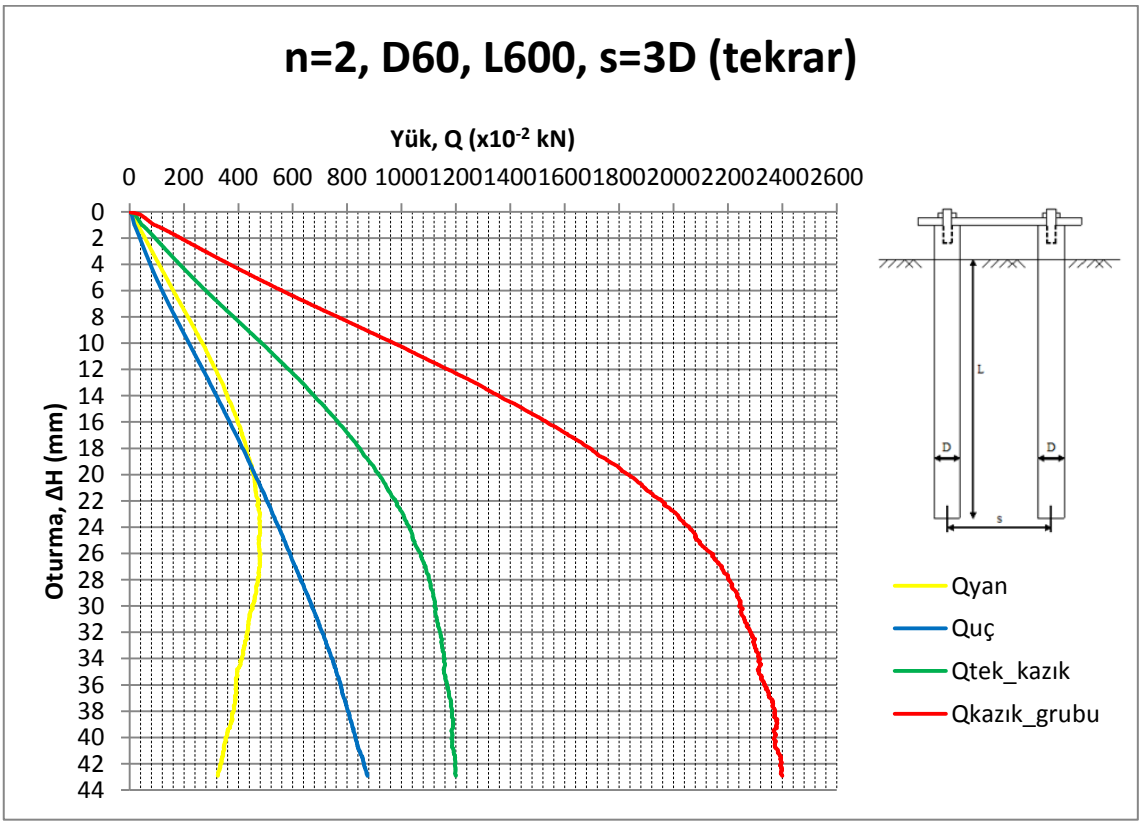


(b)

Şekil Ek 2.12. D=60 mm, L=600 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

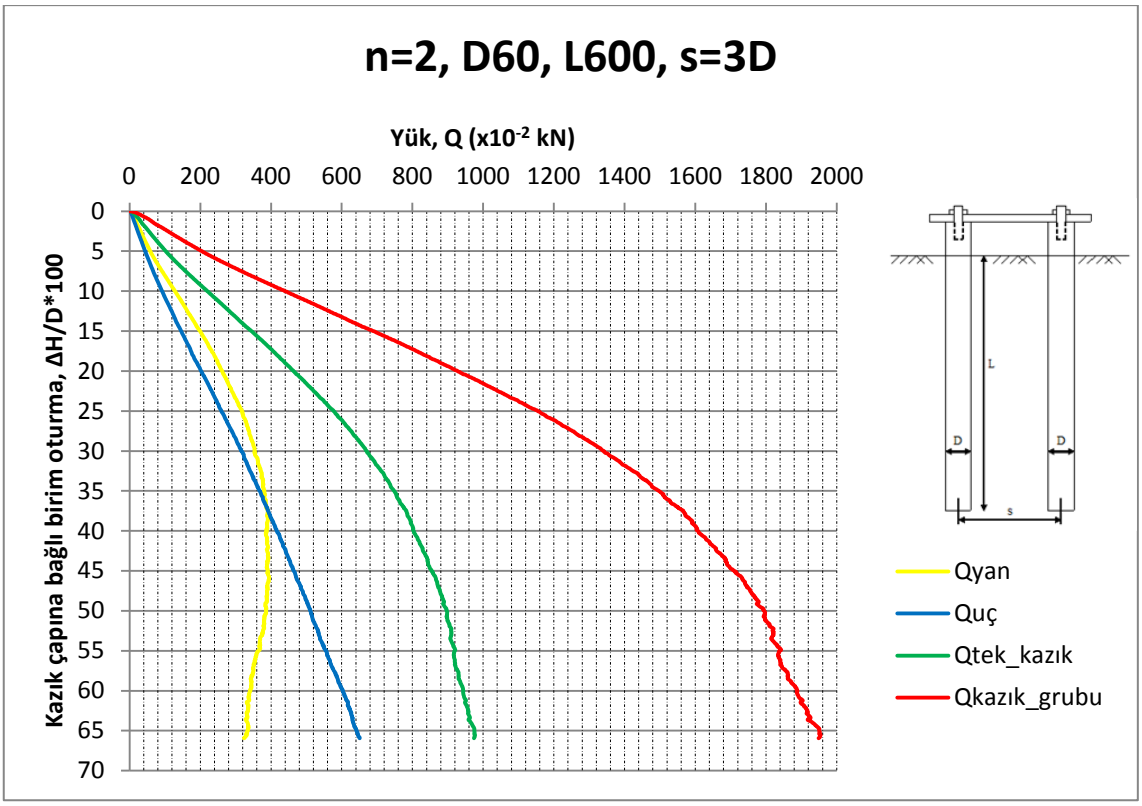


(a)

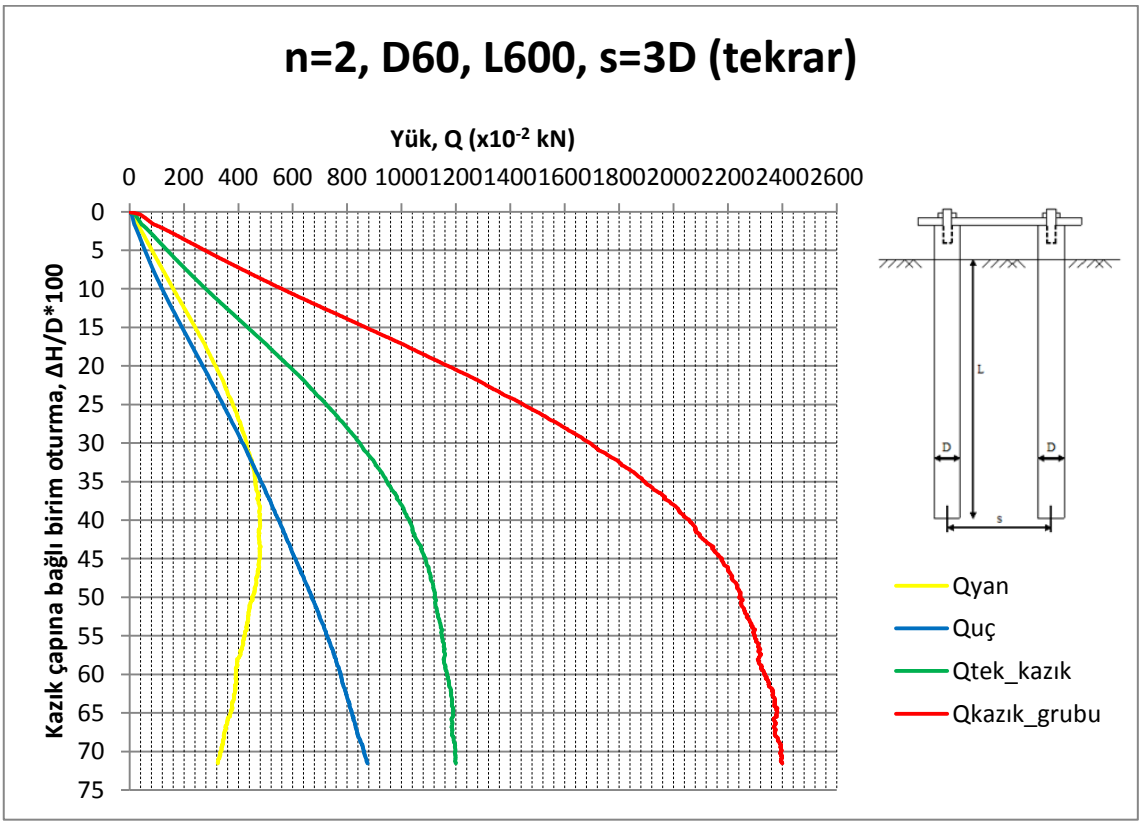


(b)

Şekil Ek 2.13. D=60 mm, L=600 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

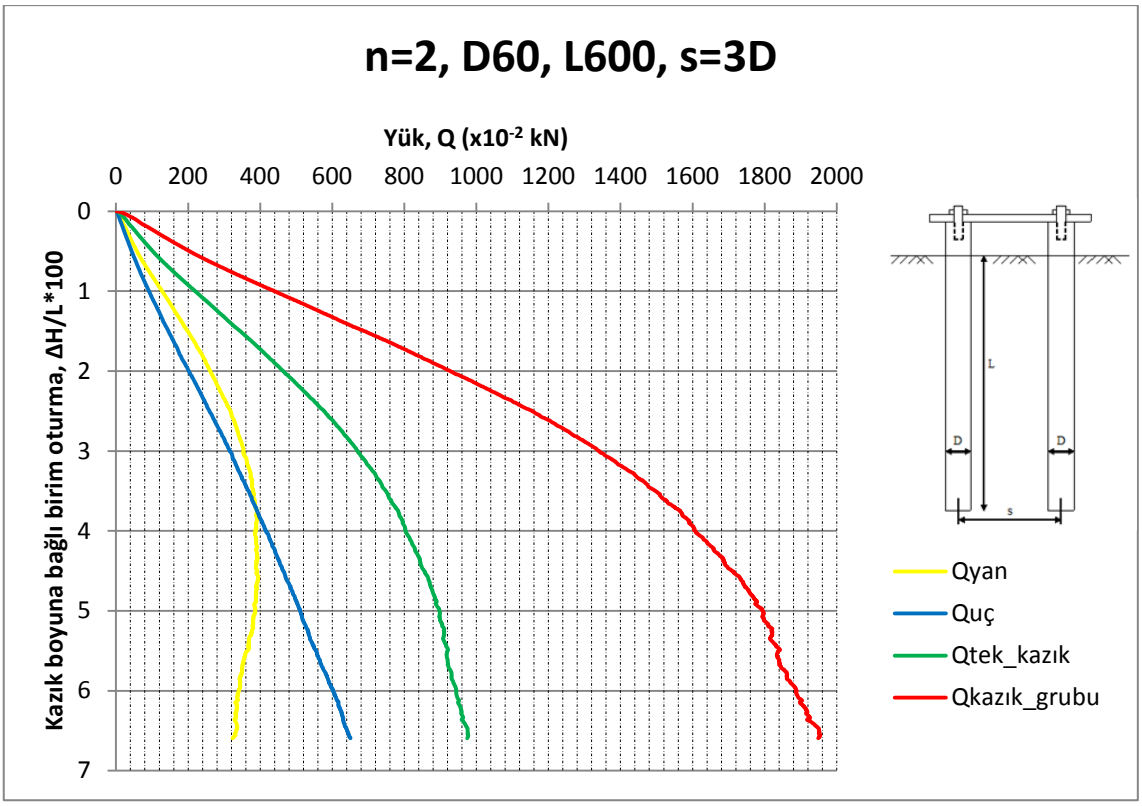


(a)

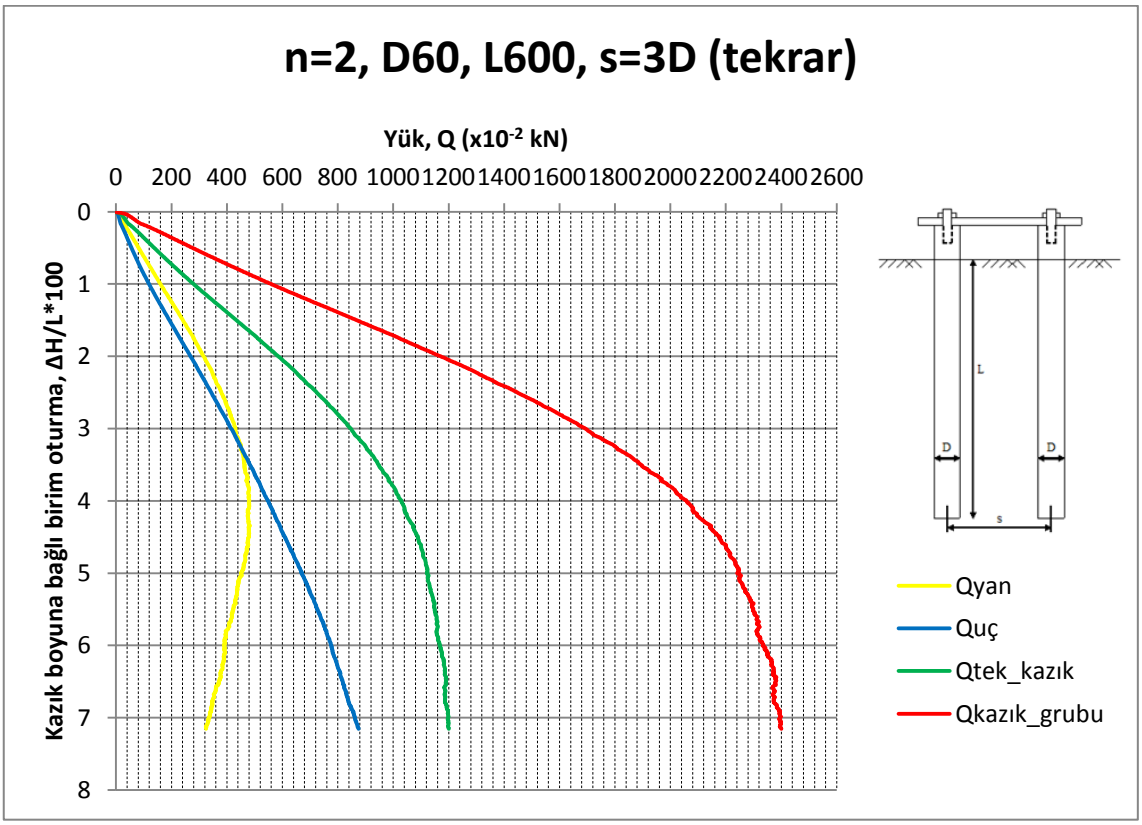


(b)

Şekil Ek 2.14. D=60 mm, L=600 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

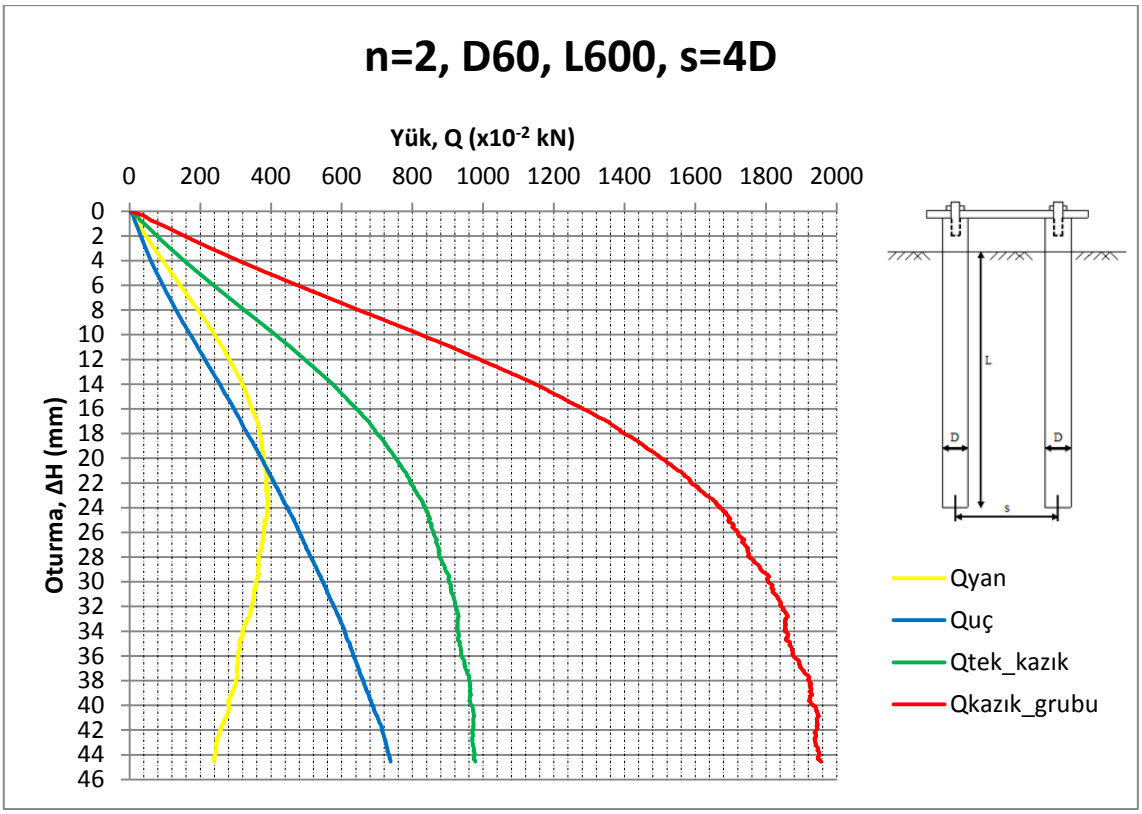


(a)

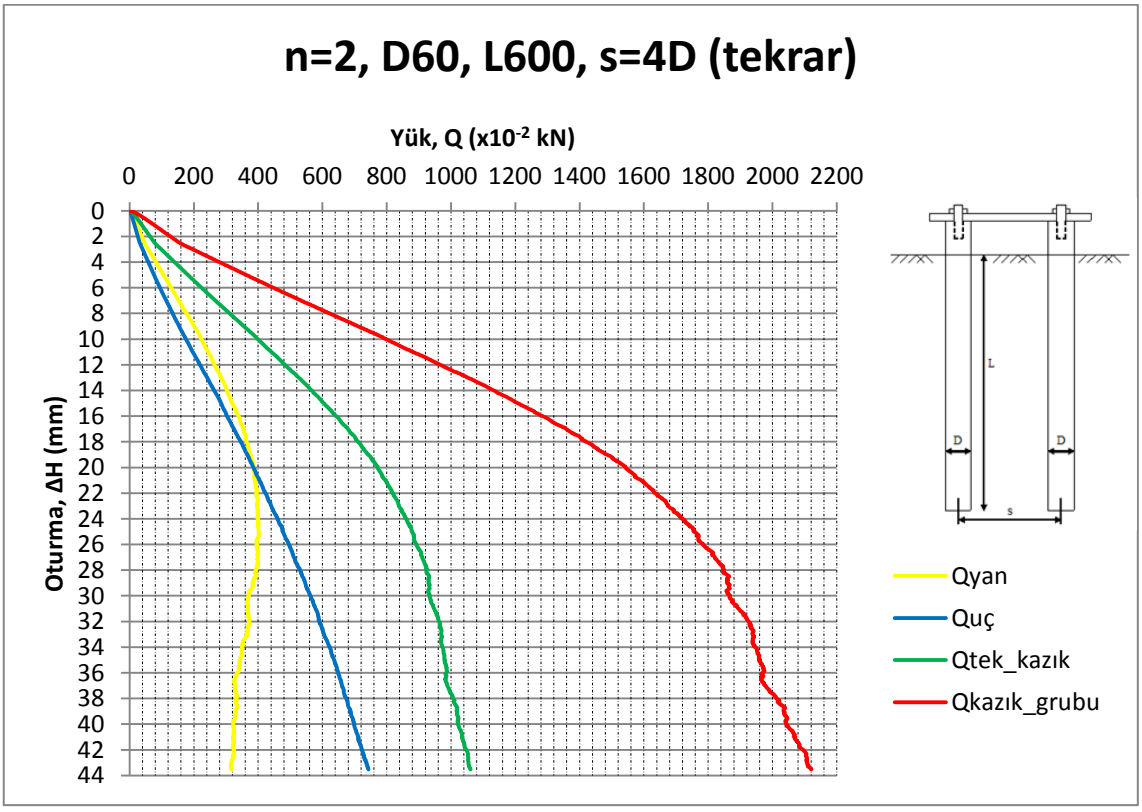


(b)

Şekil Ek 2.15. D=60 mm, L=600 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

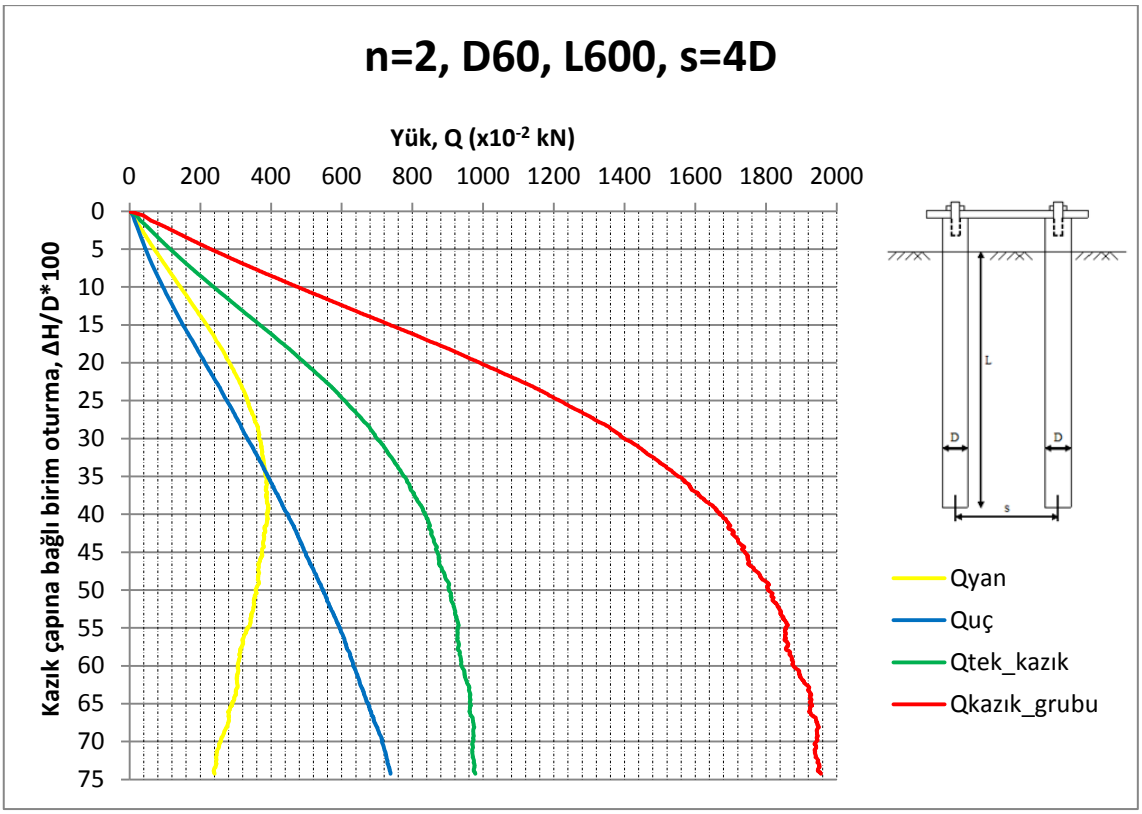


(a)

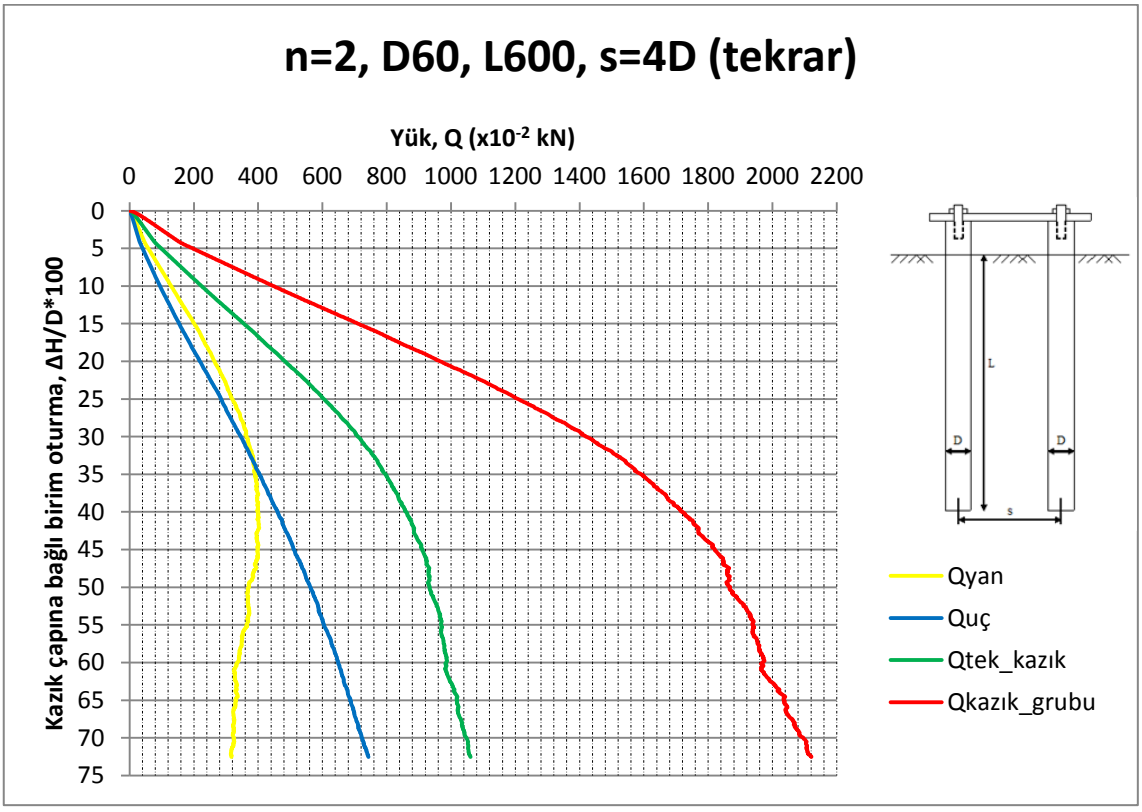


(b)

Şekil Ek 2.16. D=60 mm, L=600 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

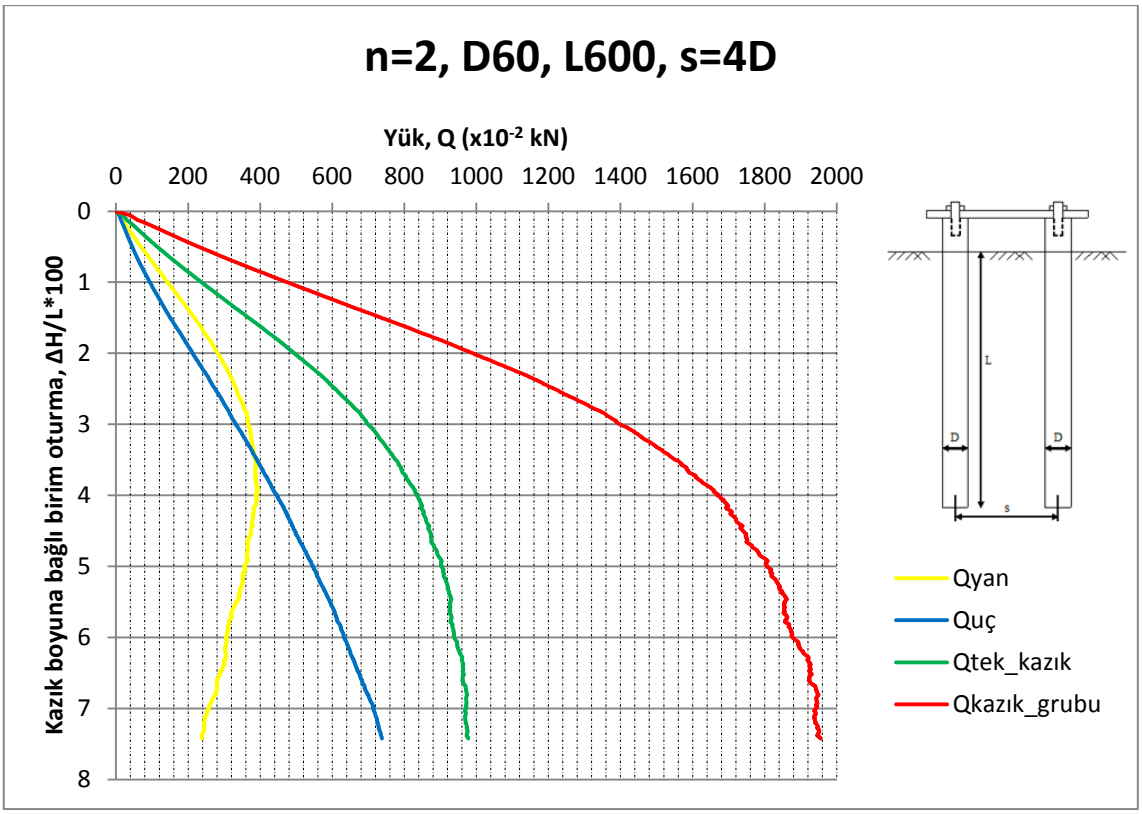


(a)

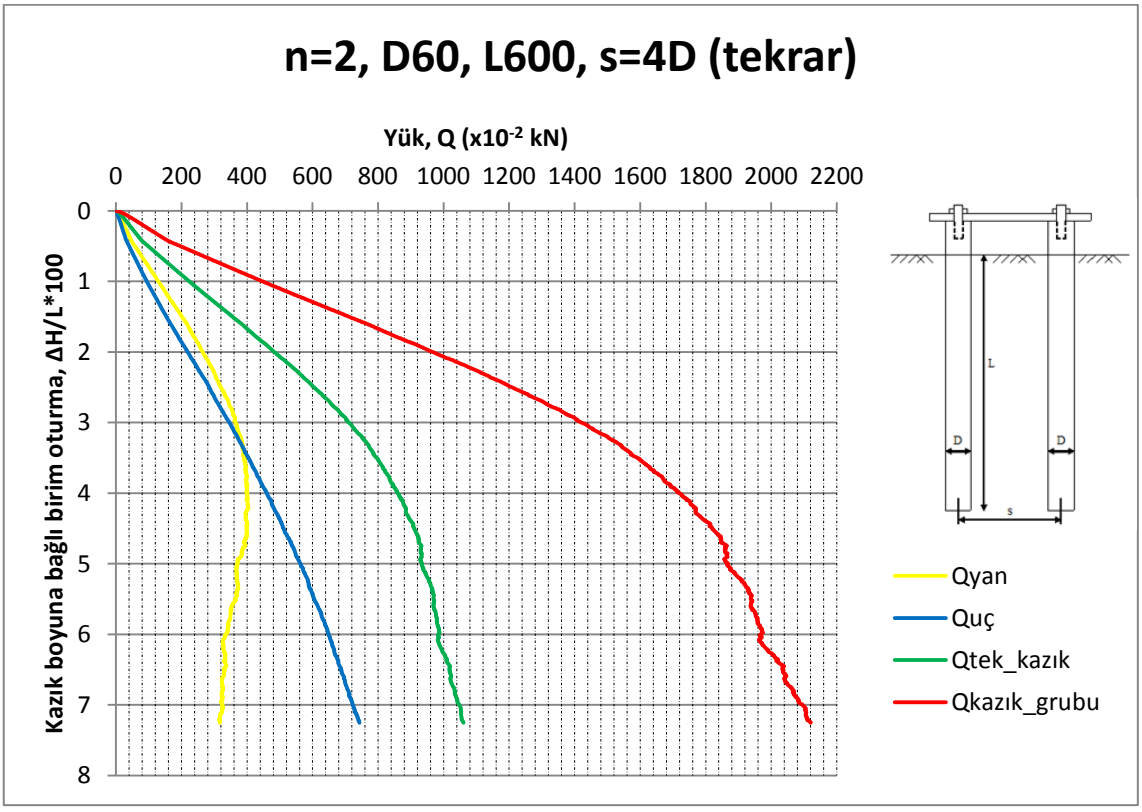


(b)

Şekil Ek 2.17. D=60 mm, L=600 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

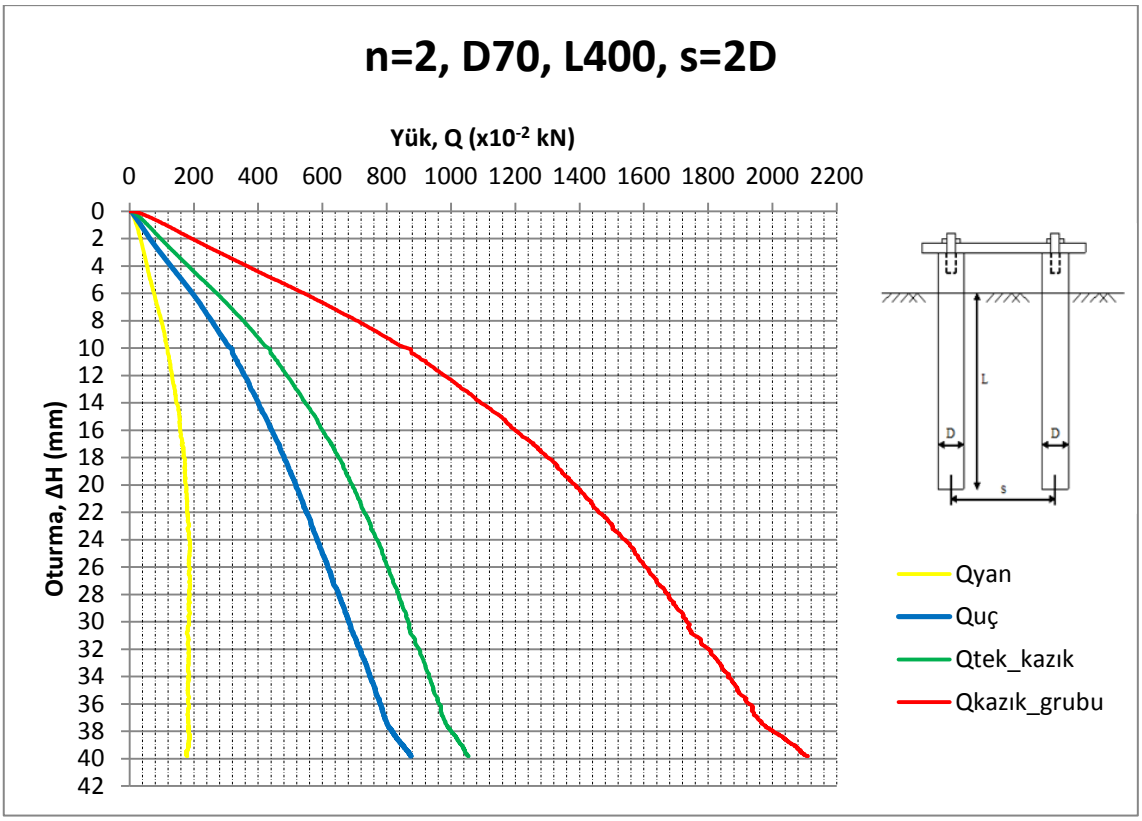


(a)

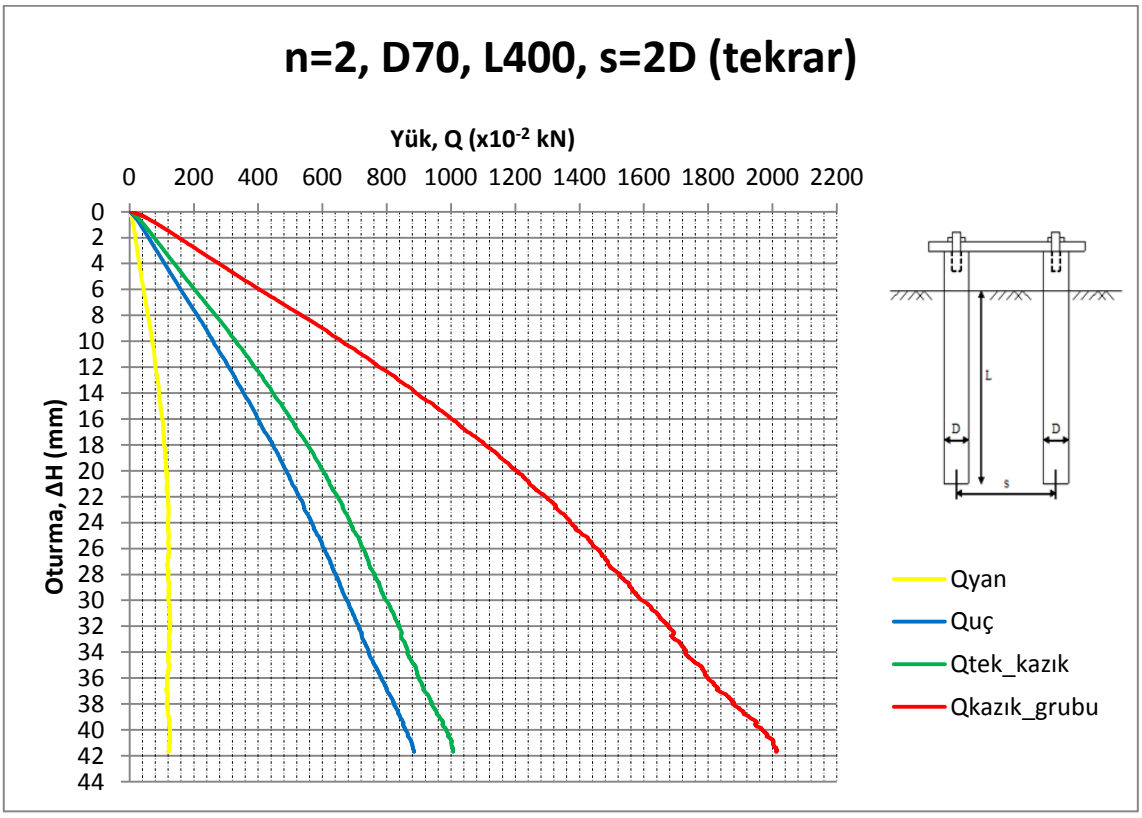


(b)

Şekil Ek 2.18. D=60 mm, L=600 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

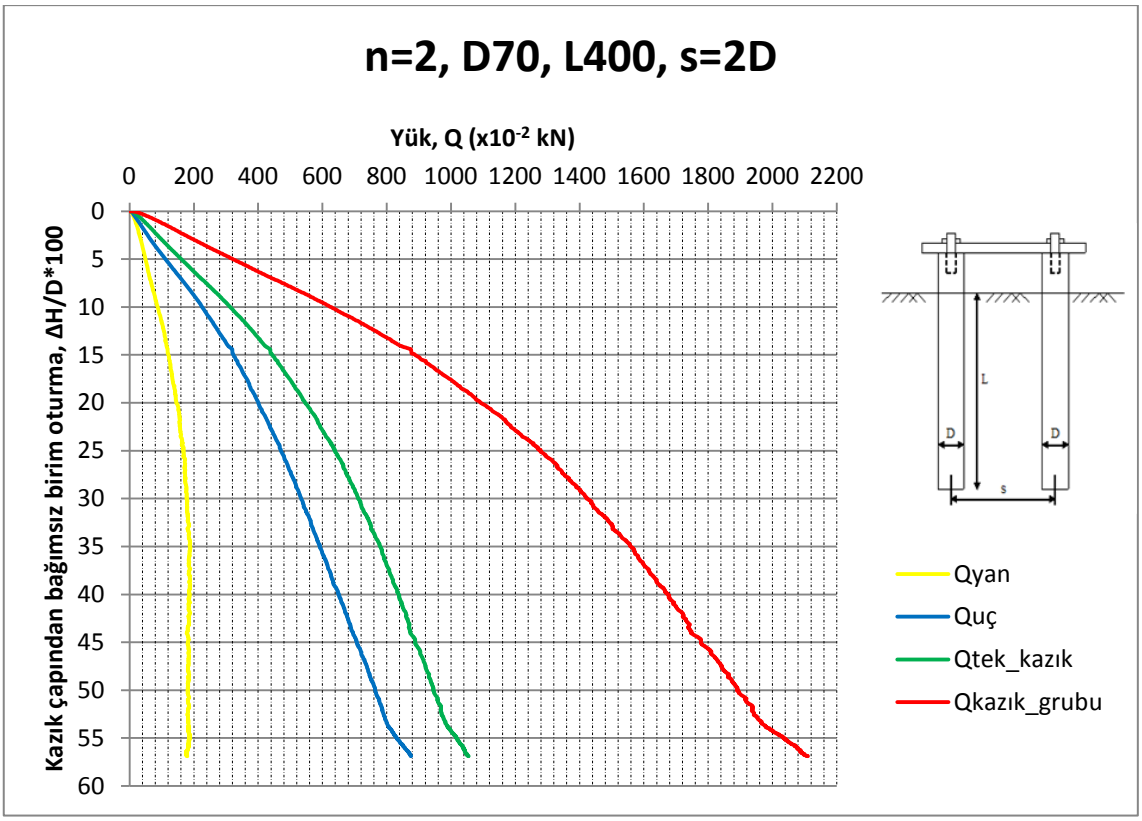


(a)

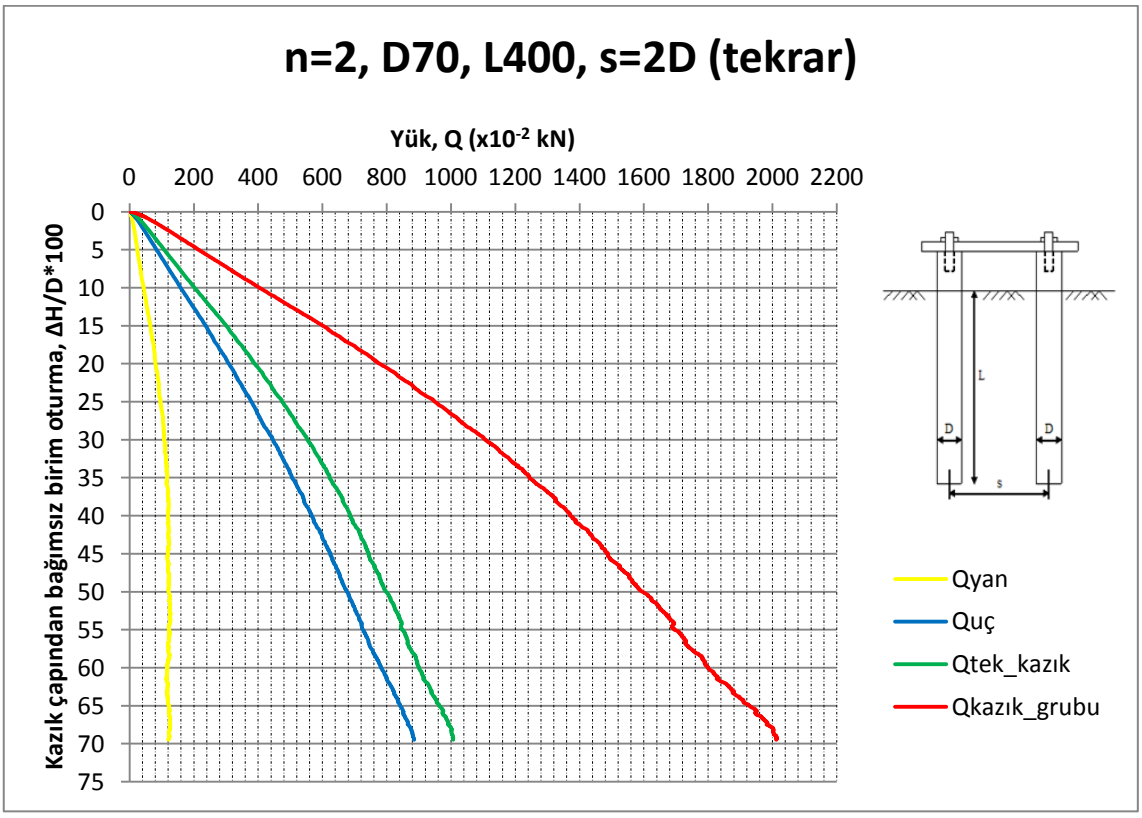


(b)

Şekil Ek 2.19. D=70 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

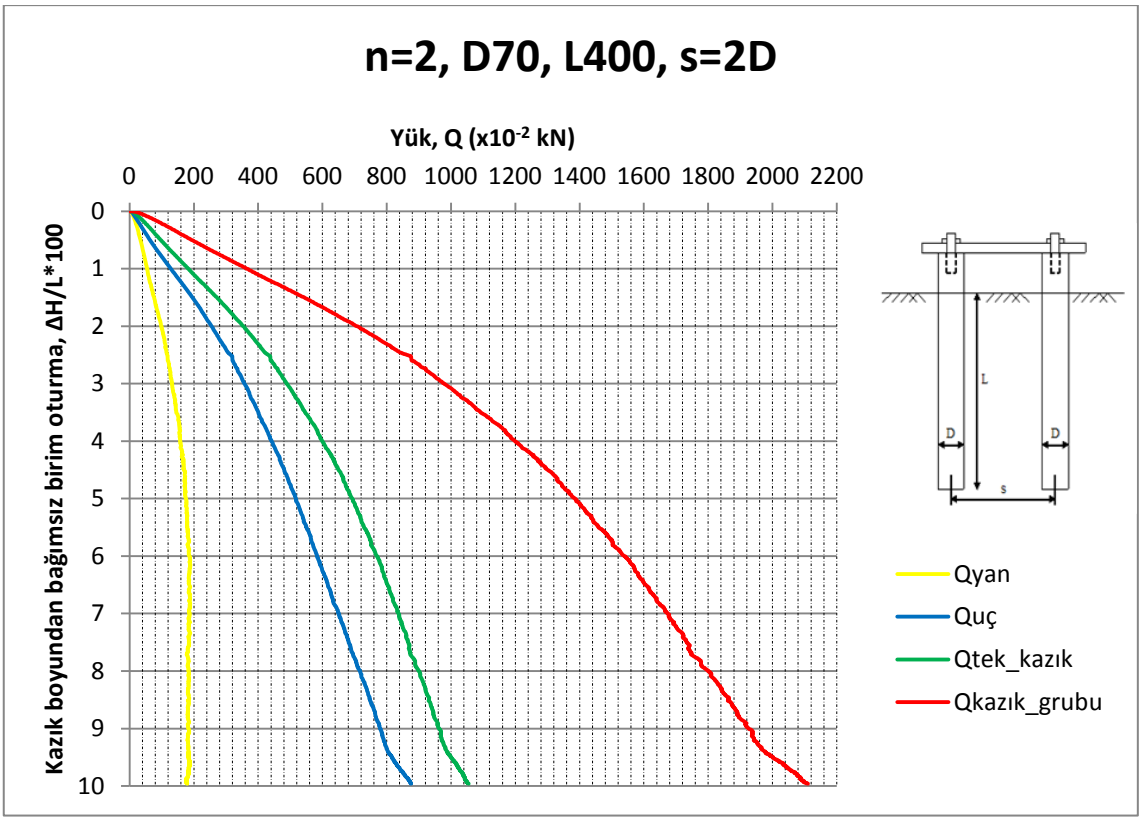


(a)

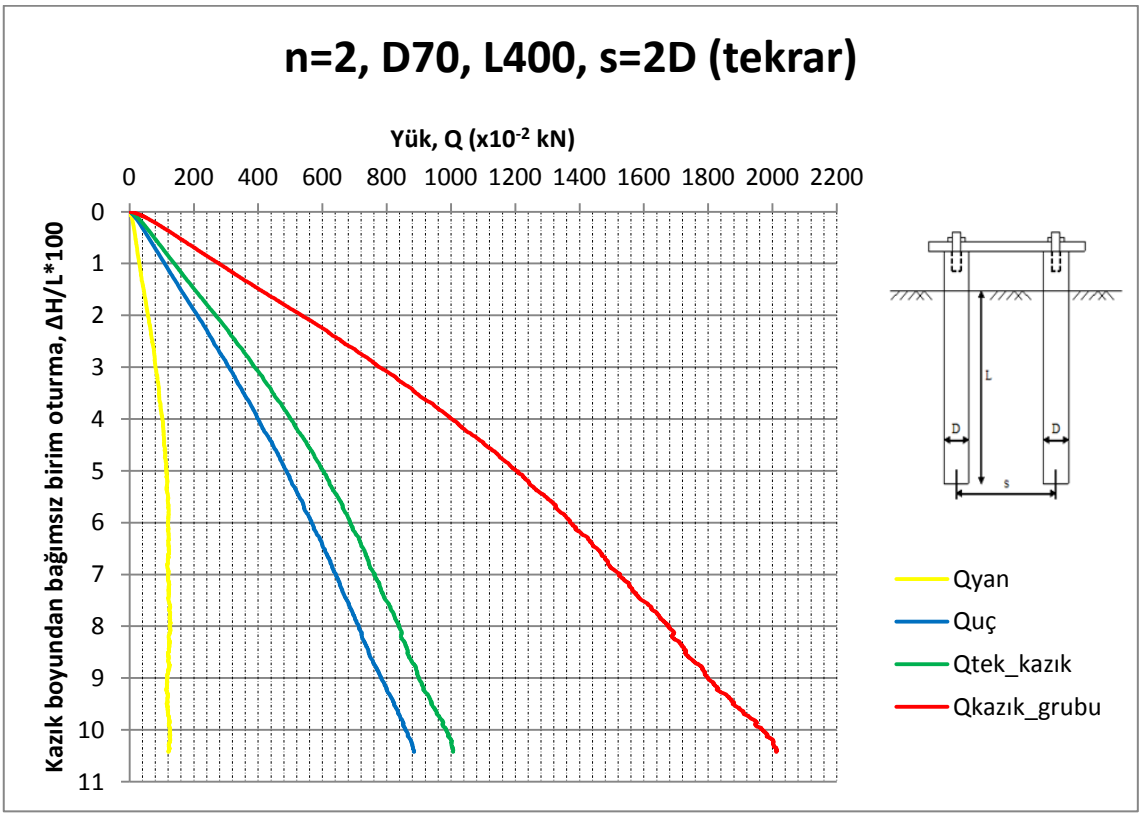


(b)

Şekil Ek 2.20. D=70 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

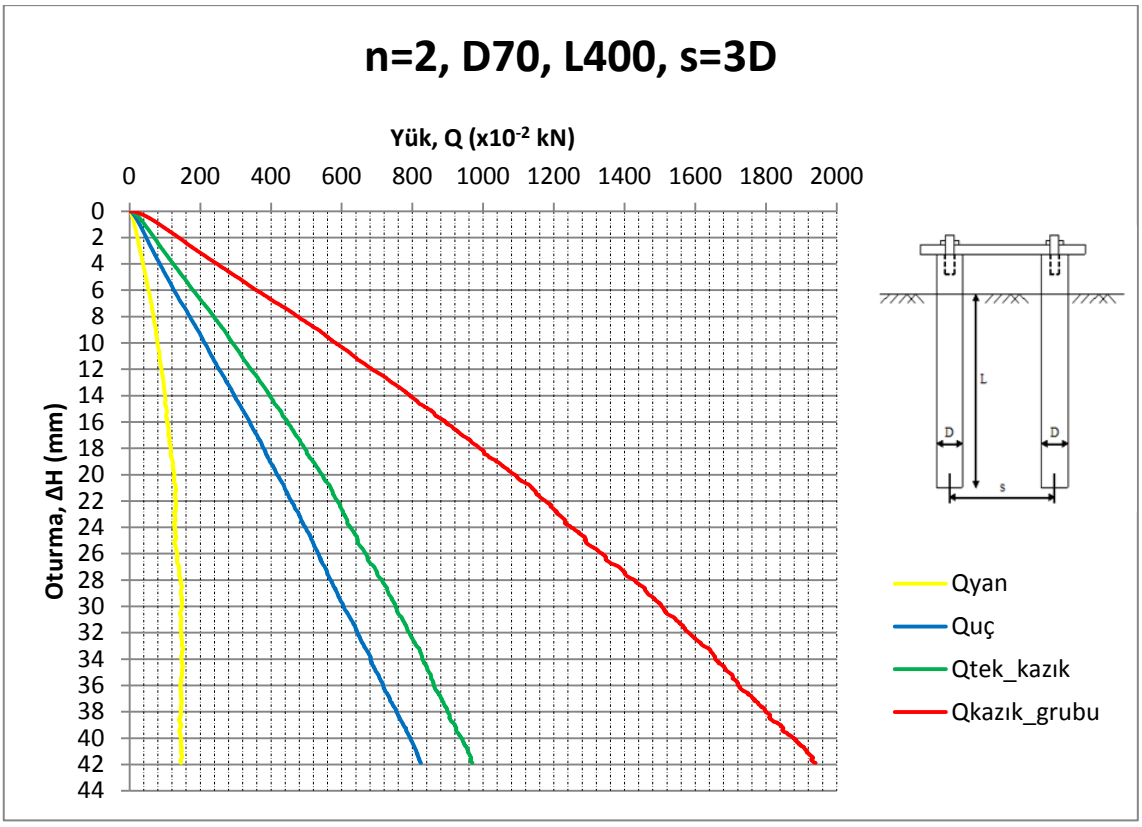


(a)

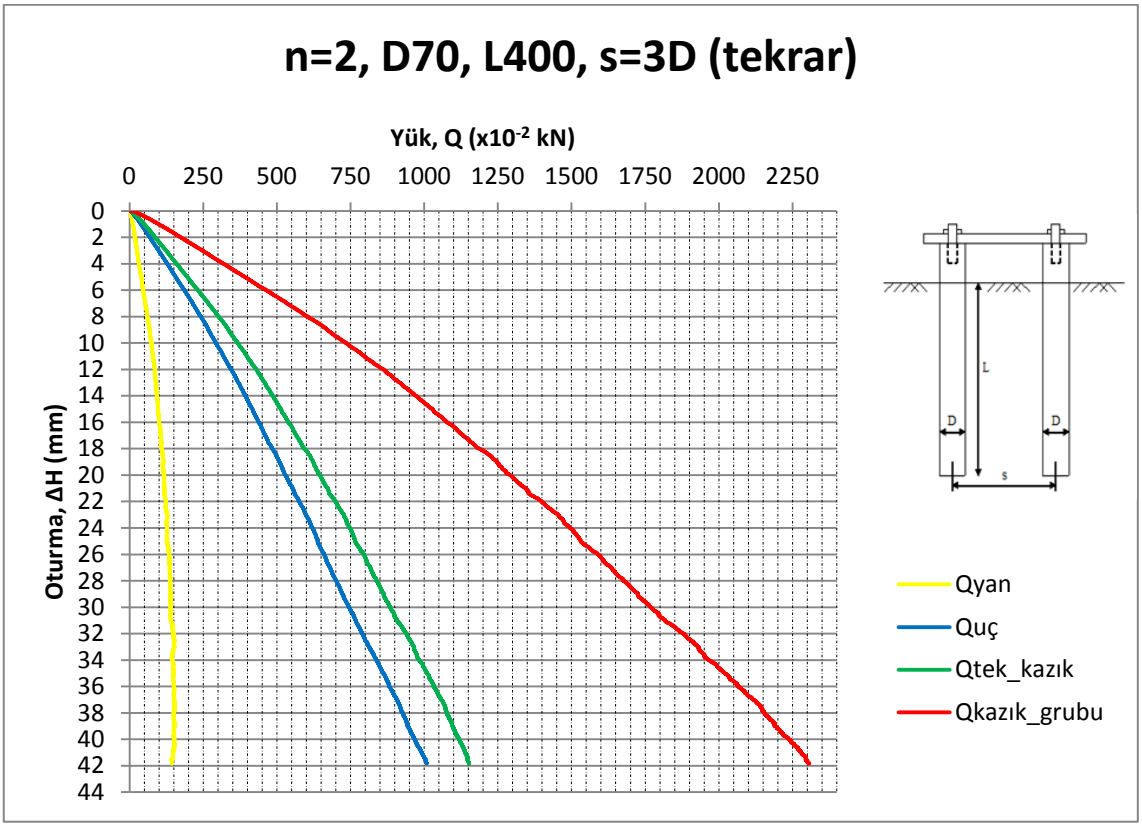


(b)

Şekil Ek 2.21. D=70 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

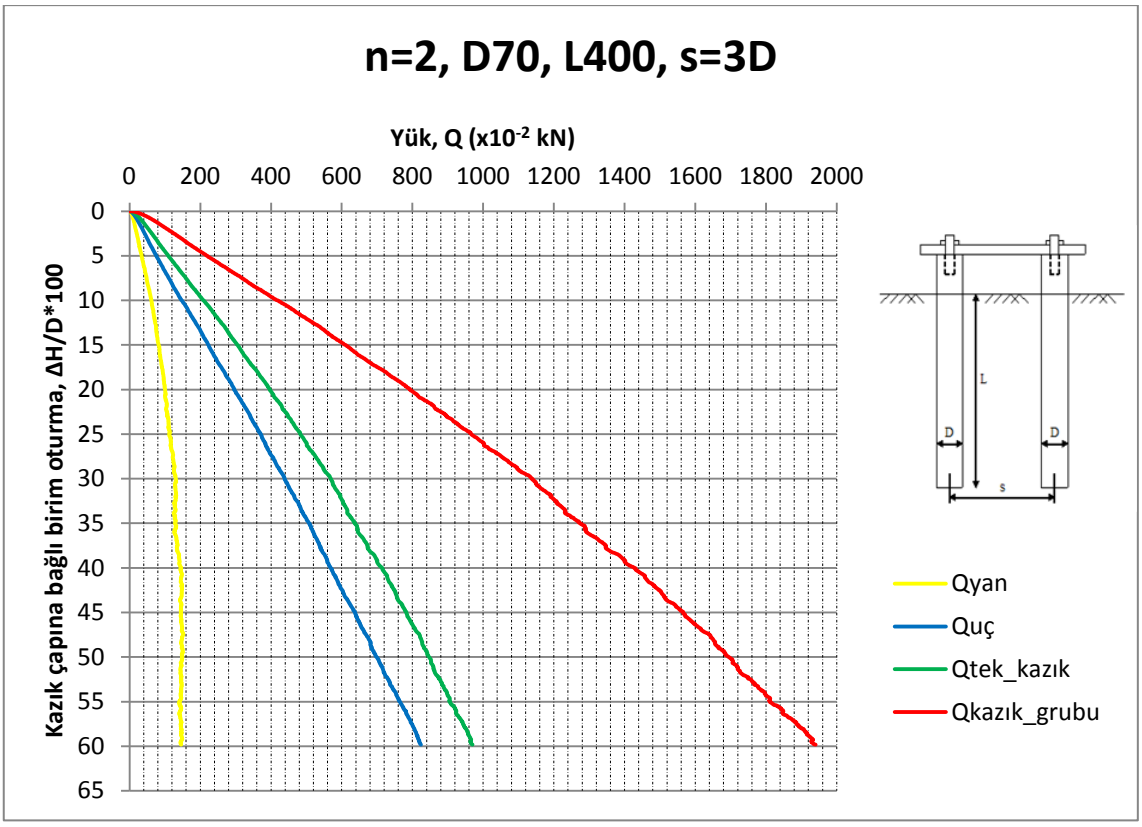


(a)

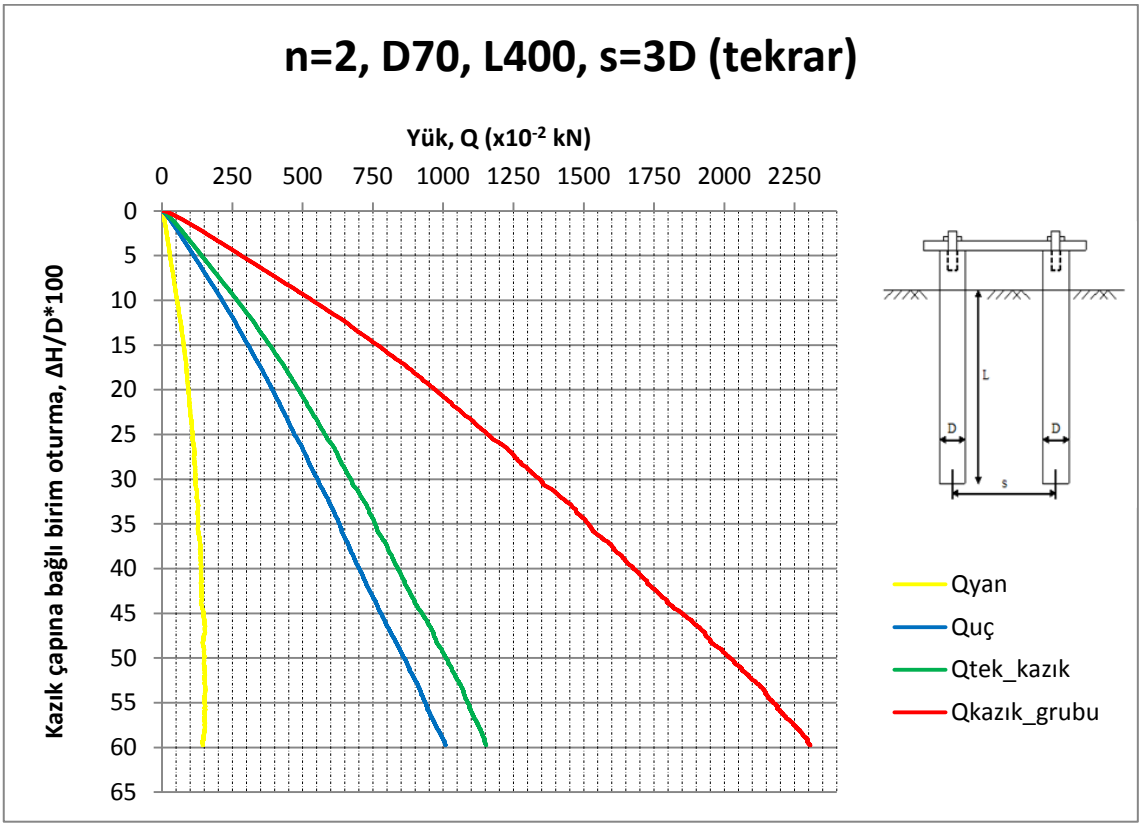


(b)

Şekil Ek 2.22. D=70 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

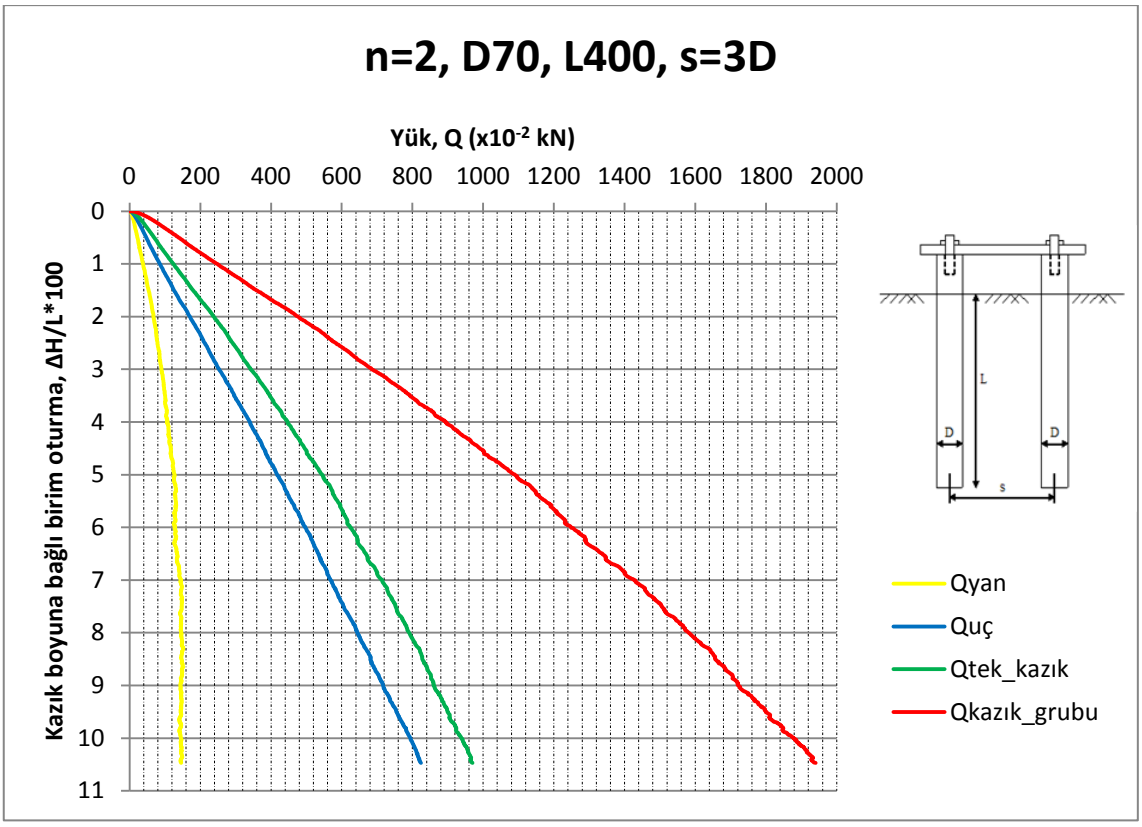


(a)

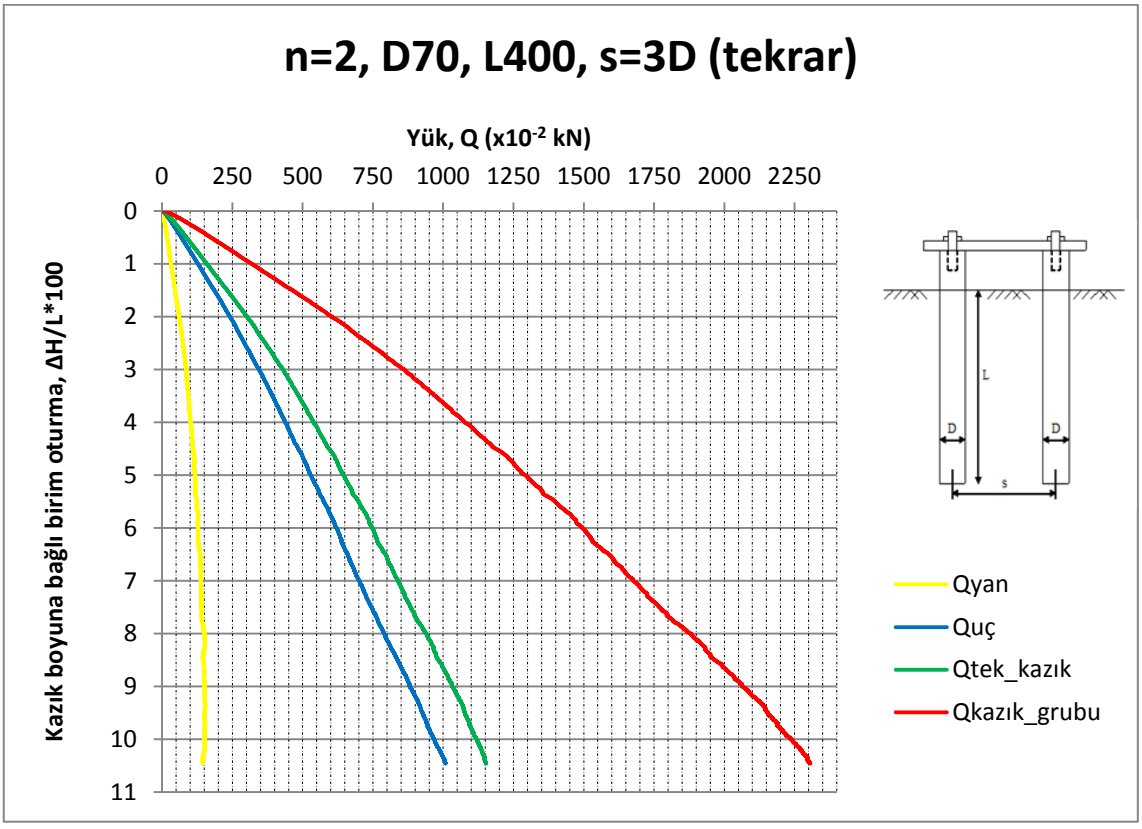


(b)

Şekil Ek 2.23. D=70 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

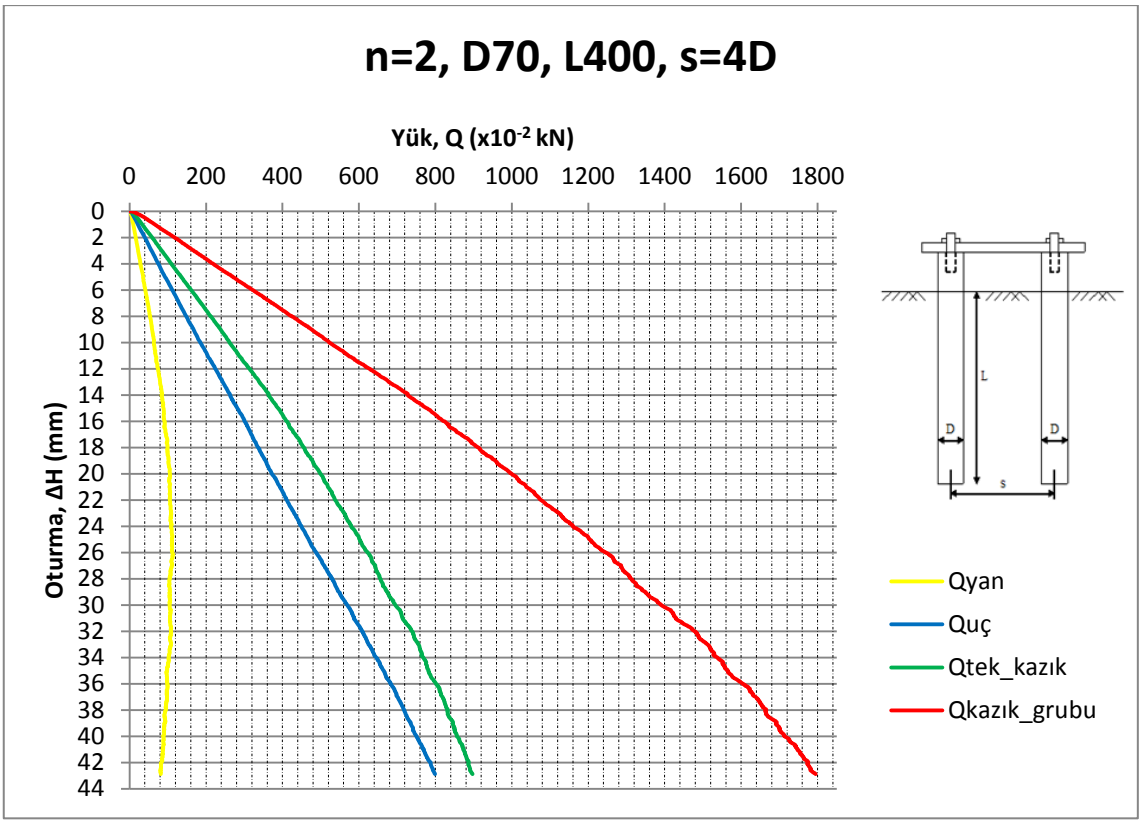


(a)

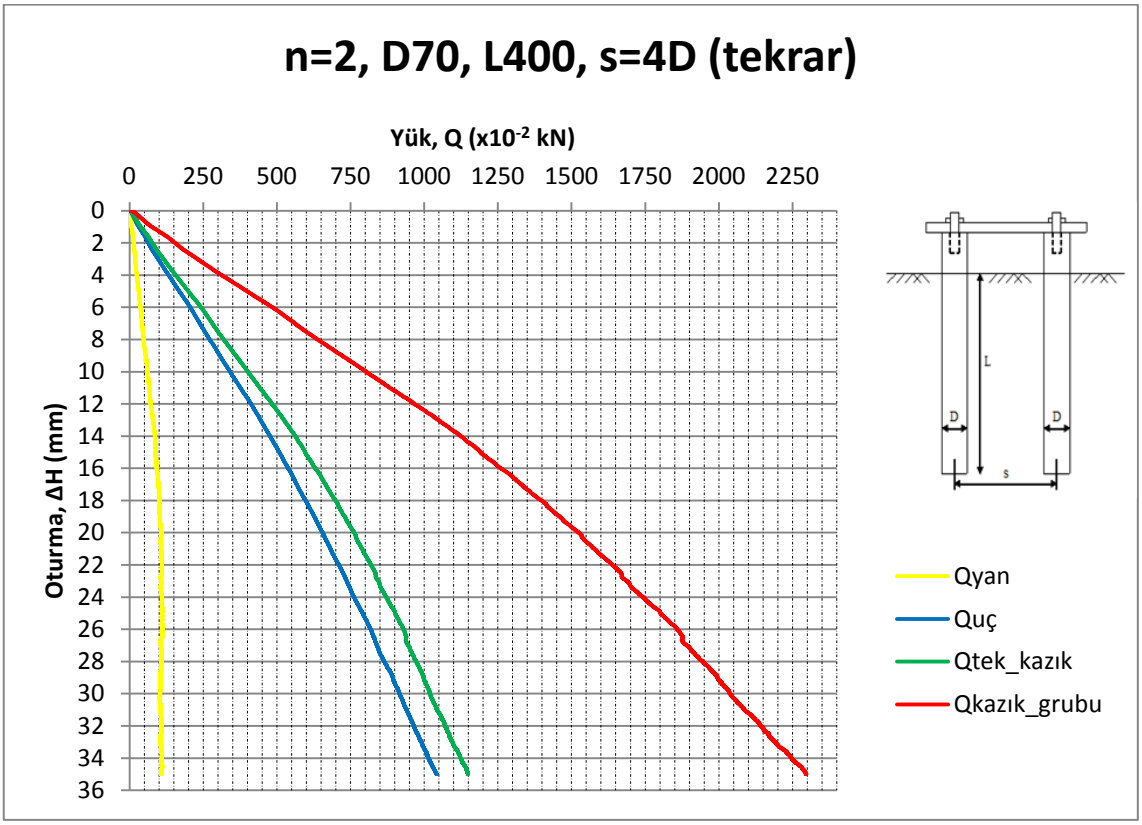


(b)

Şekil Ek 2.24. D=70 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

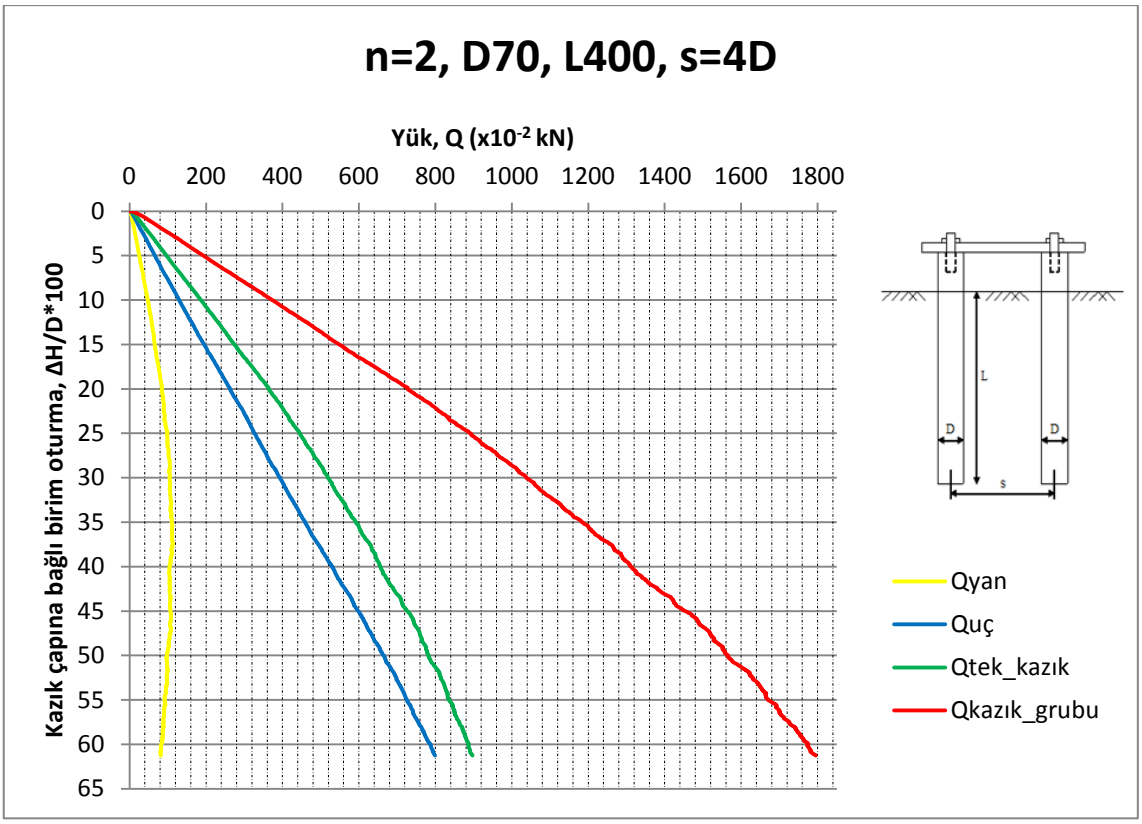


(a)

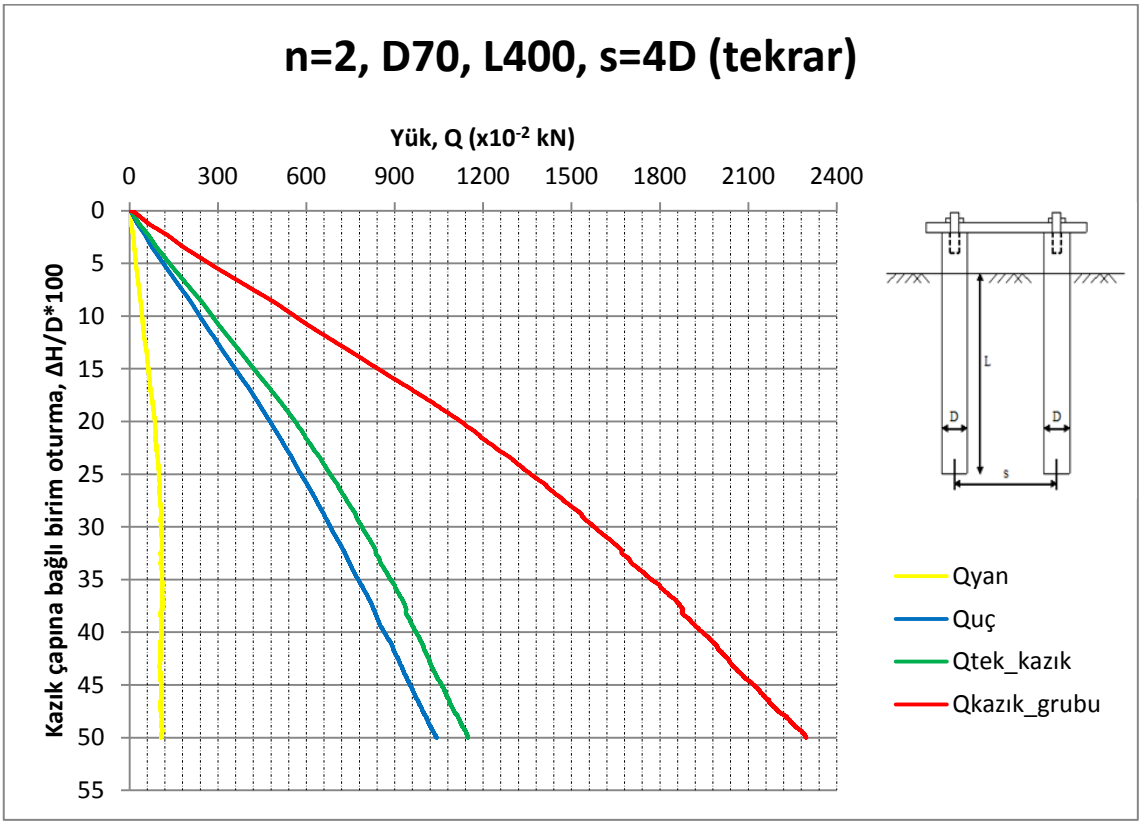


(b)

Şekil Ek 2.25. D=70 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

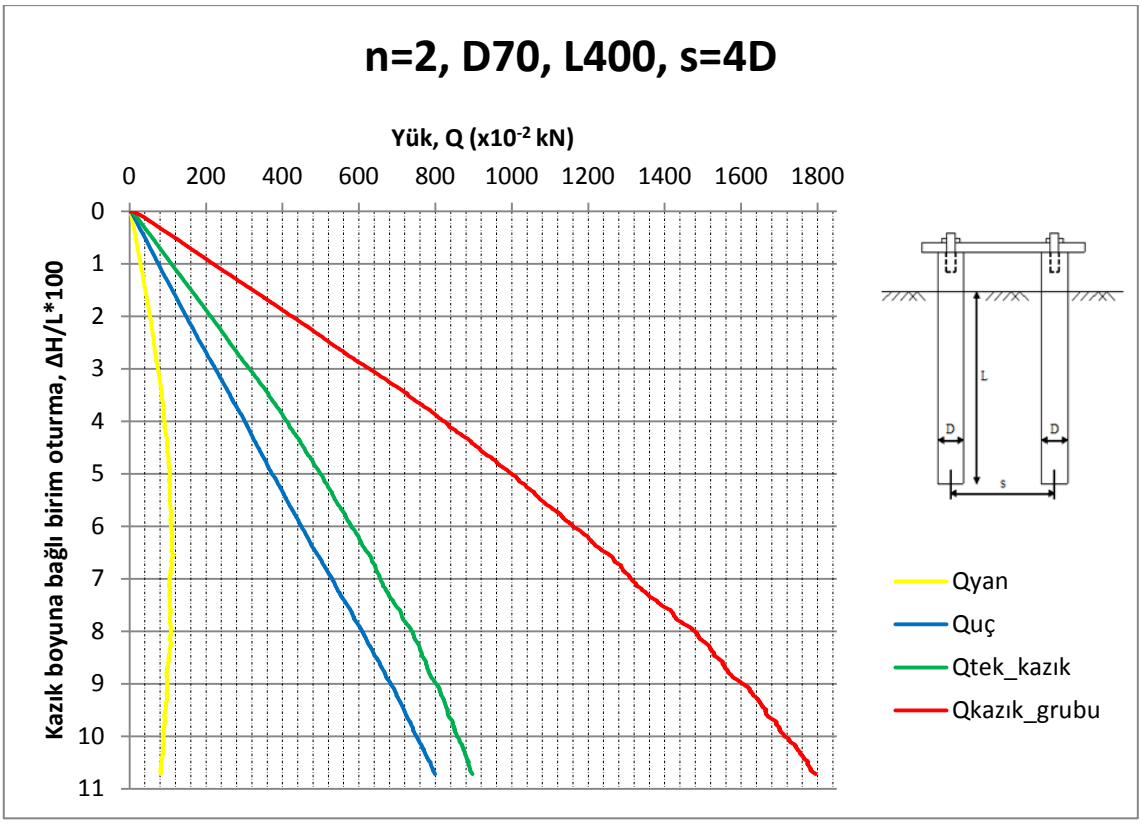


(a)

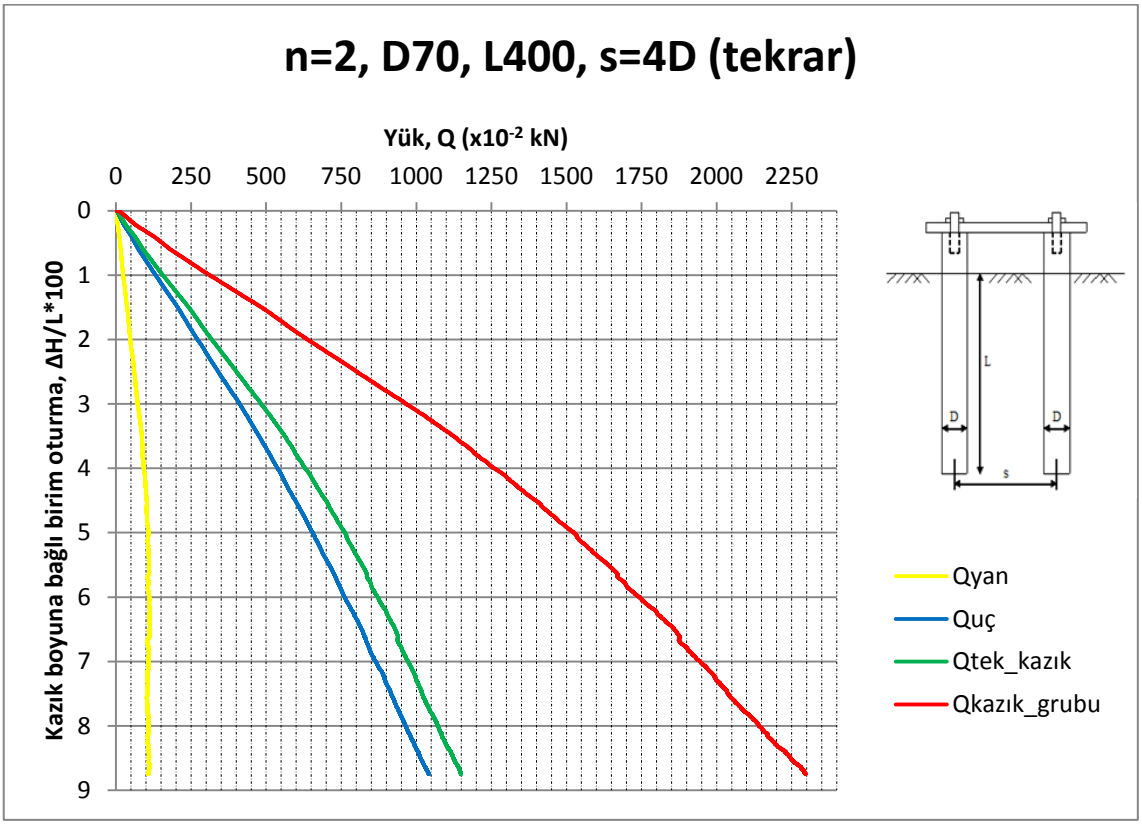


(b)

Şekil Ek 2.26. D=70 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

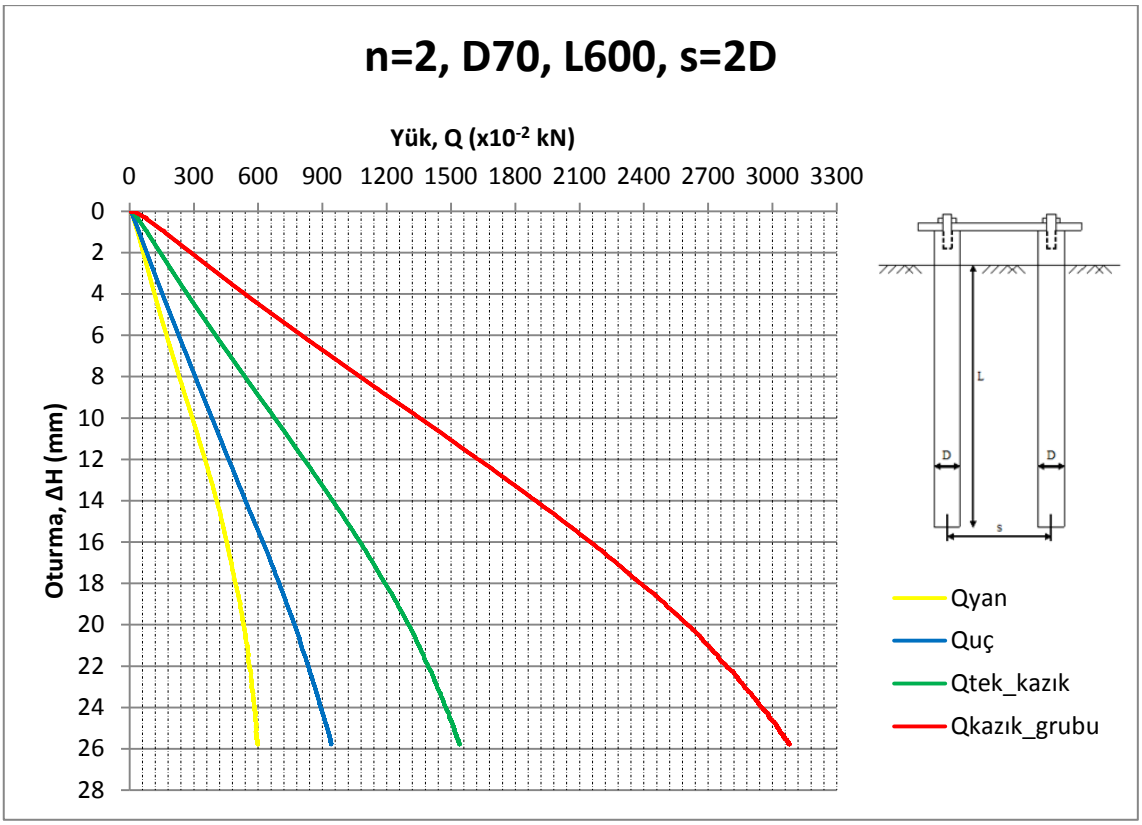


(a)

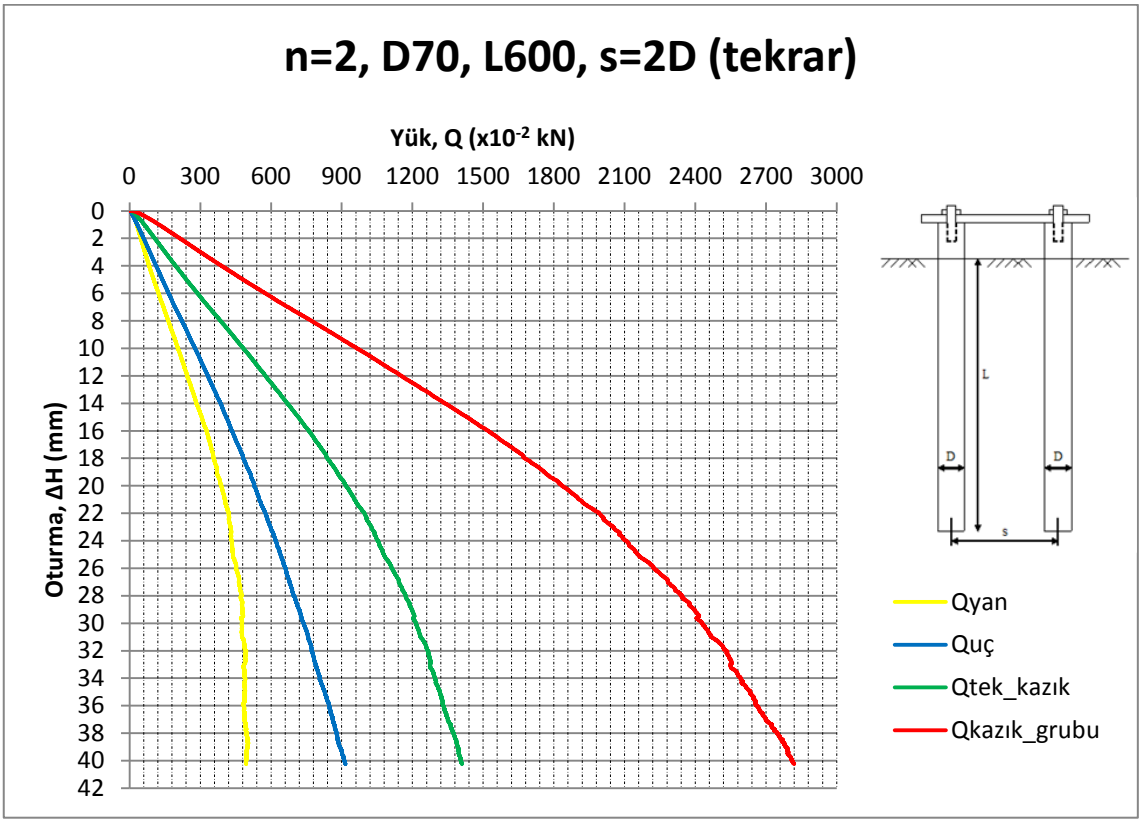


(b)

Şekil Ek 2.27. D=70 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

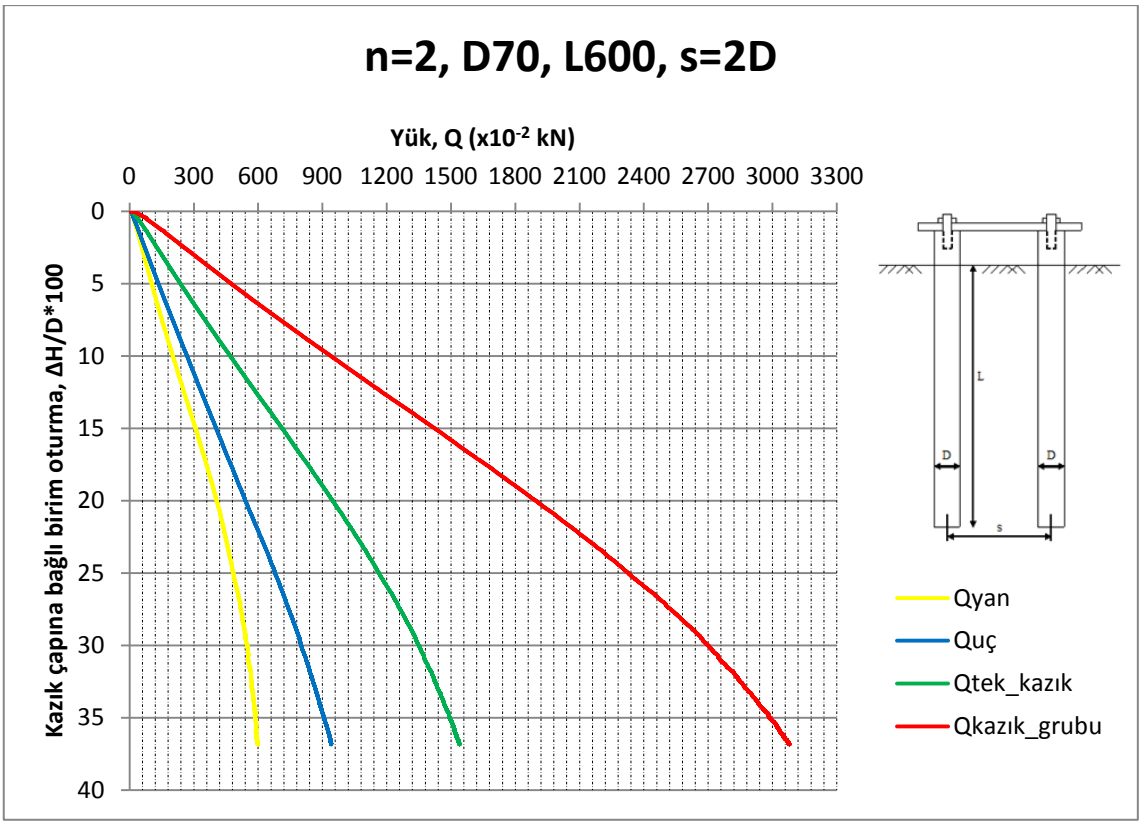


(a)

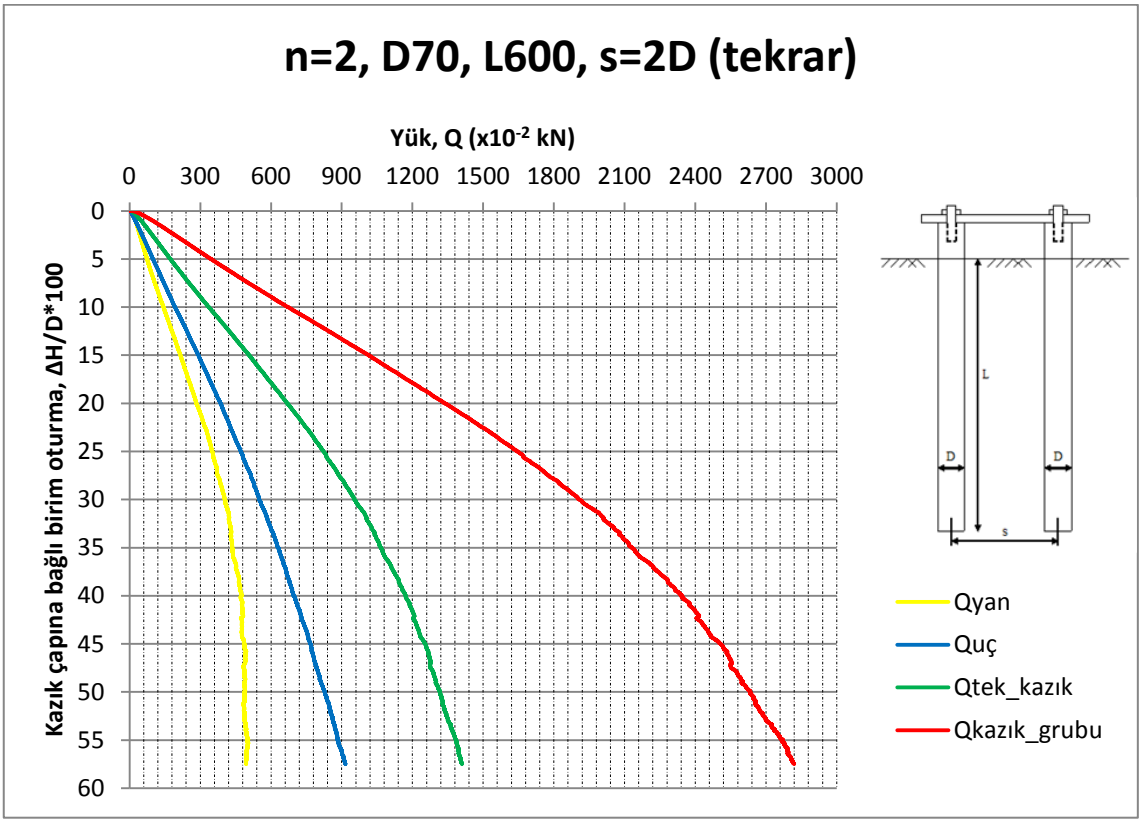


(b)

Şekil Ek 2.28. D=70 mm, L=600 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

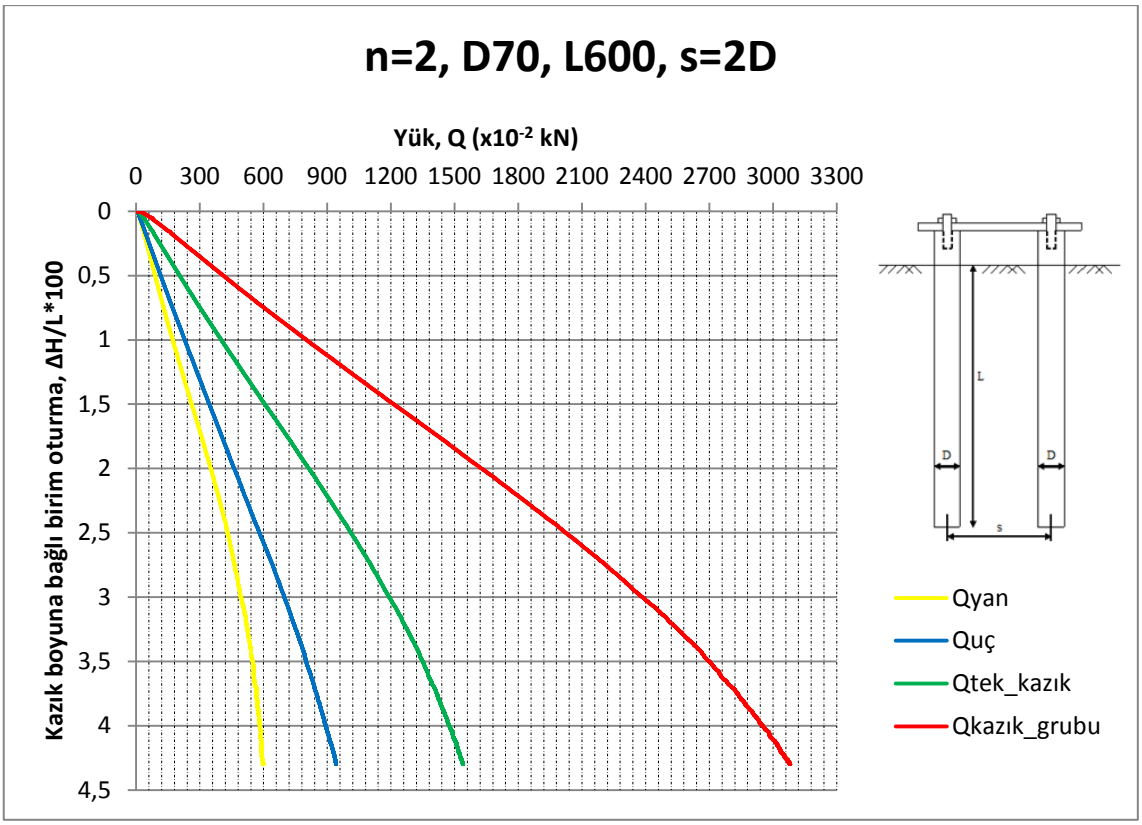


(a)

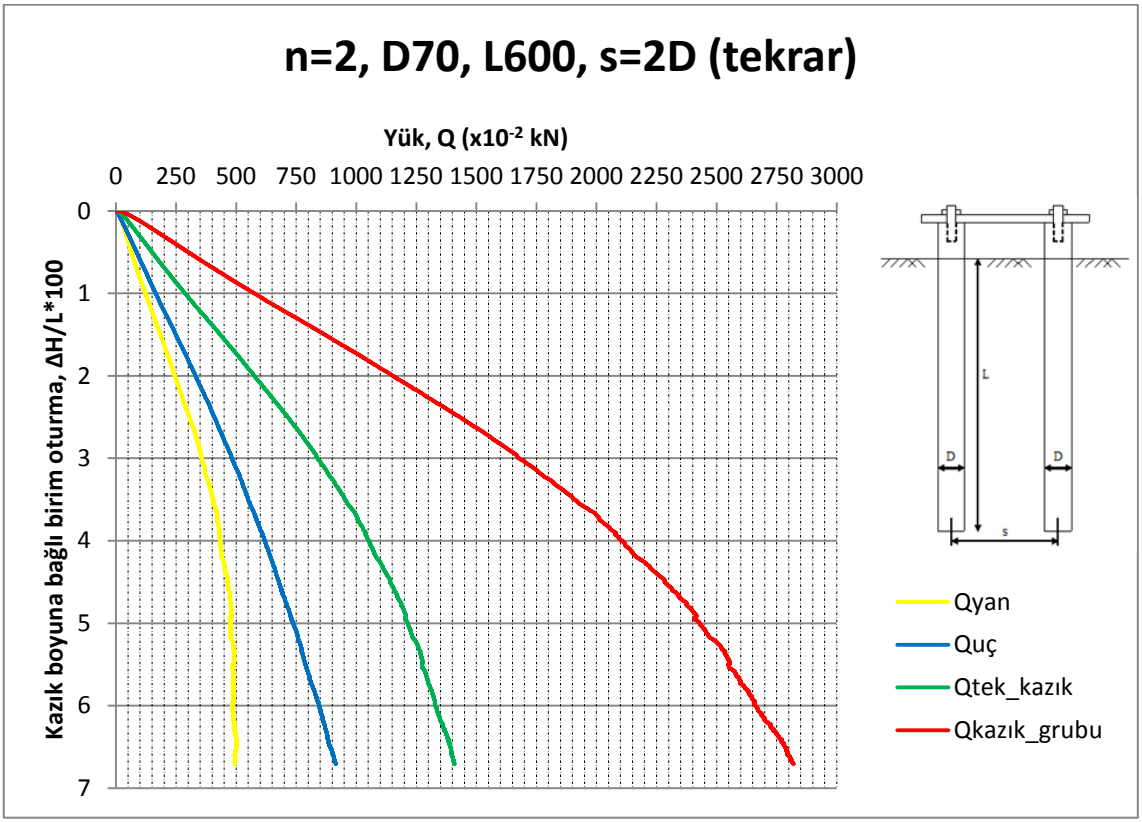


(b)

Şekil Ek 2.29. D=70 mm, L=600 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

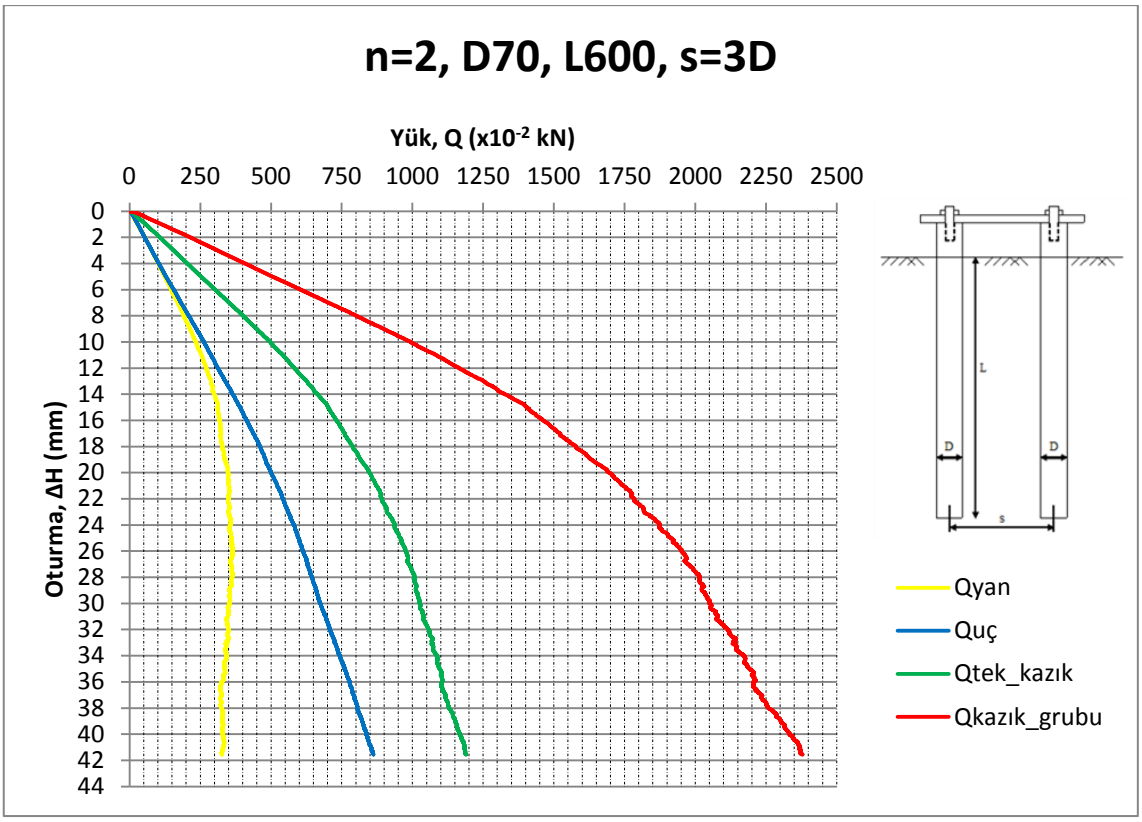


(a)

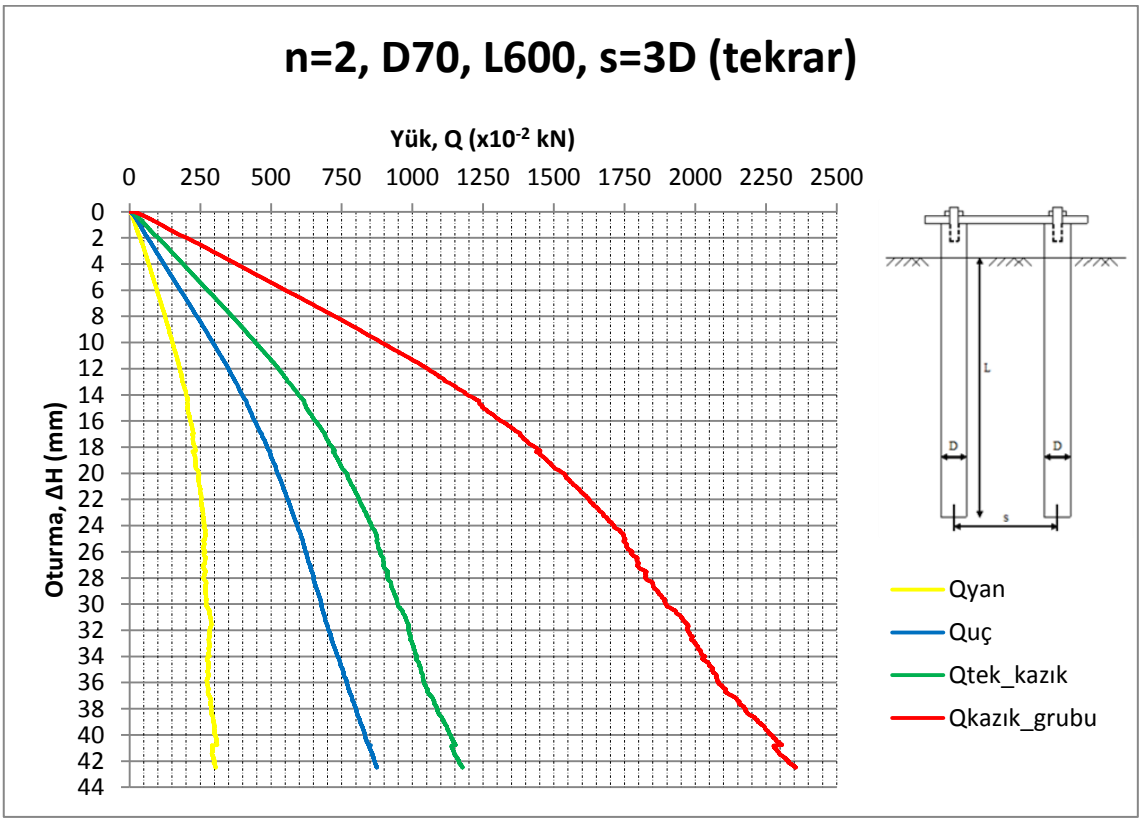


(b)

Şekil Ek 2.30. D=70 mm, L=600 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

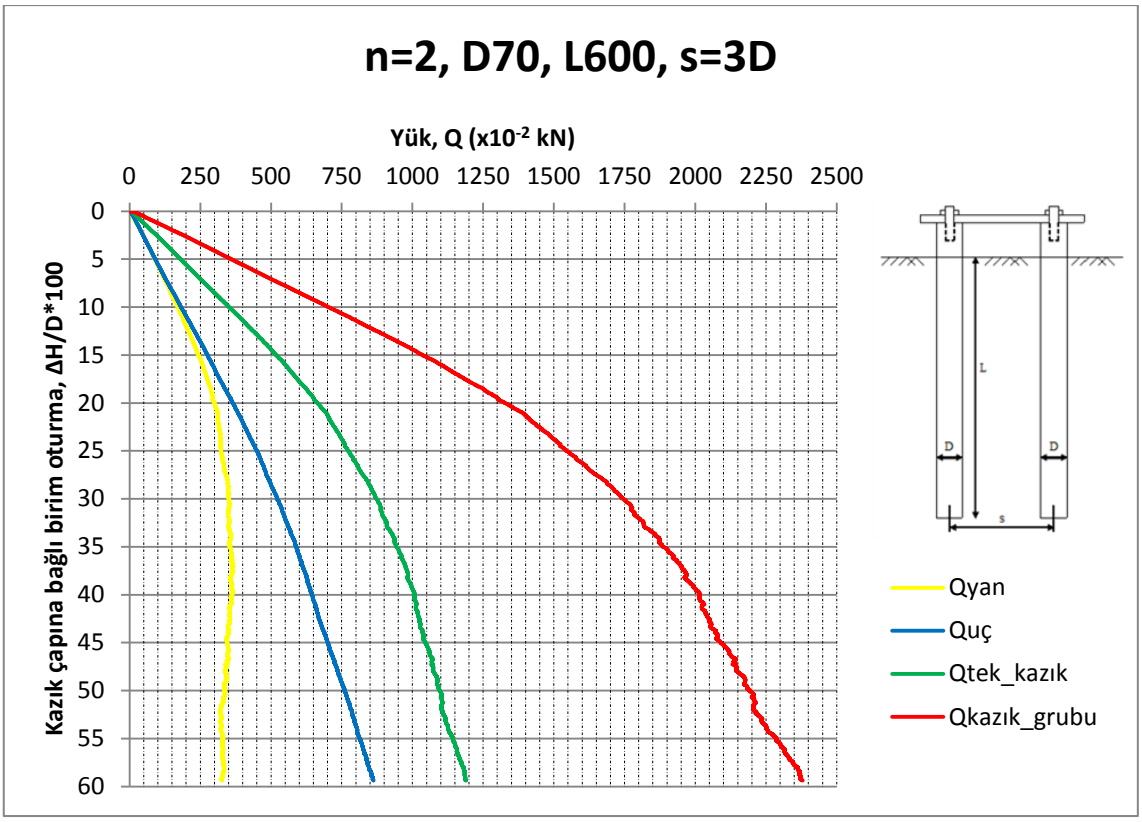


(a)

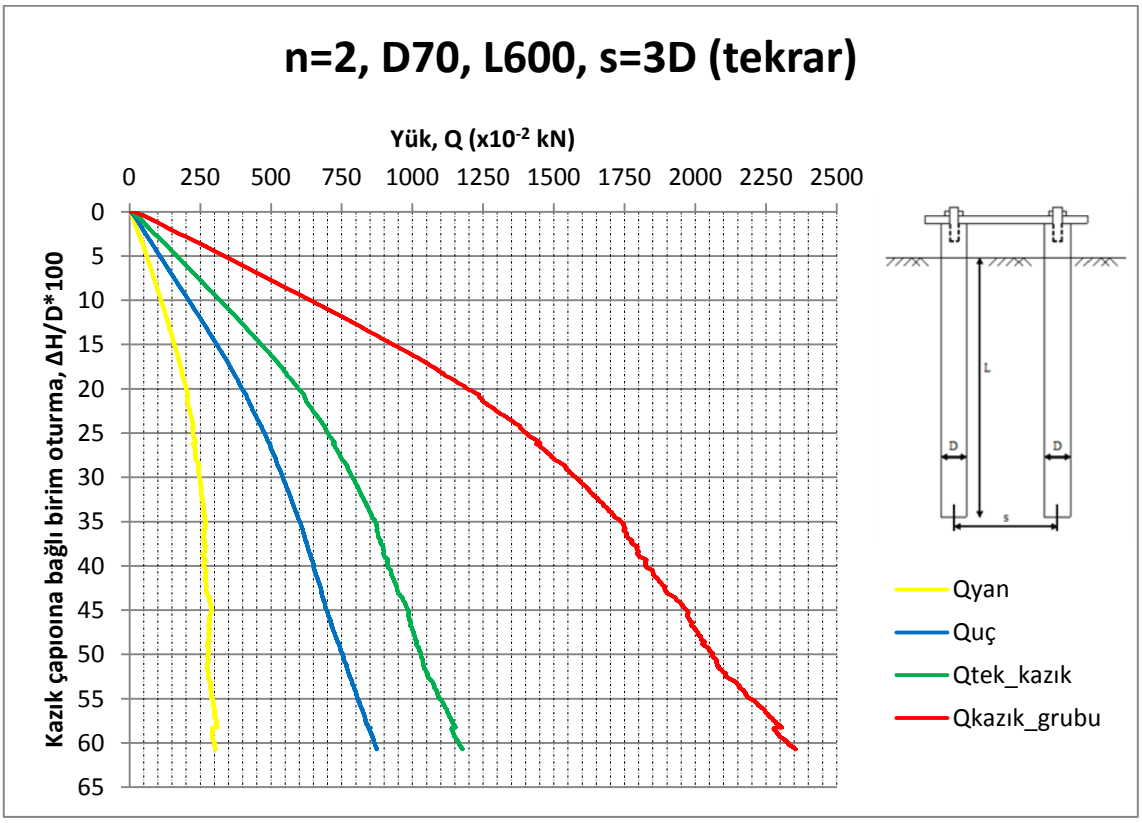


(b)

Şekil Ek 2.31. D=70 mm, L=600 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

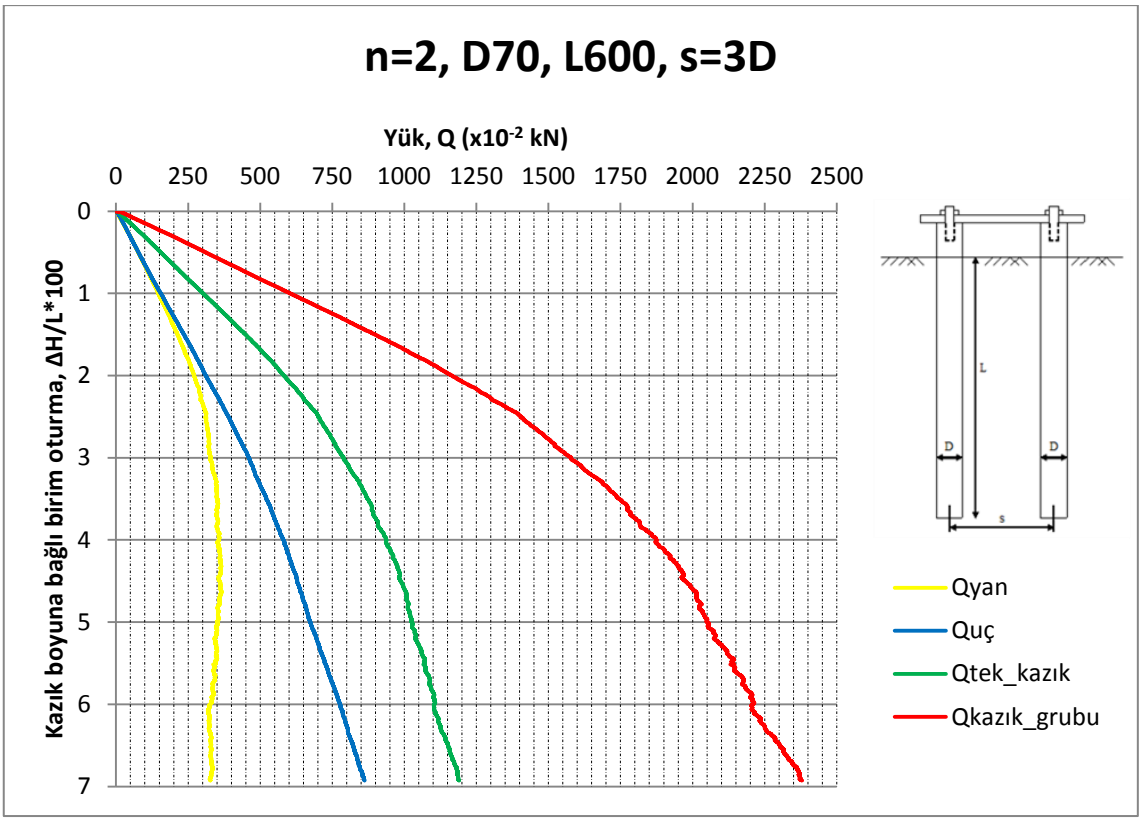


(a)

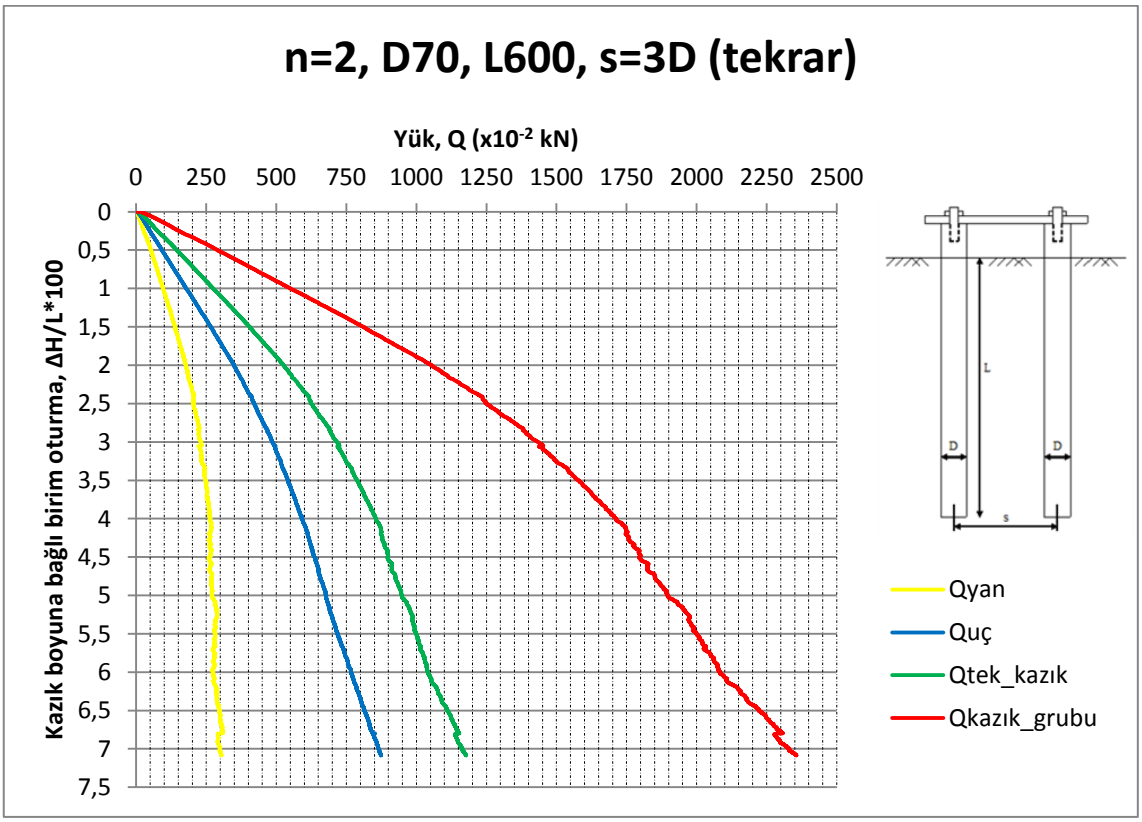


(b)

Şekil Ek 2.32. D=70 mm, L=600 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

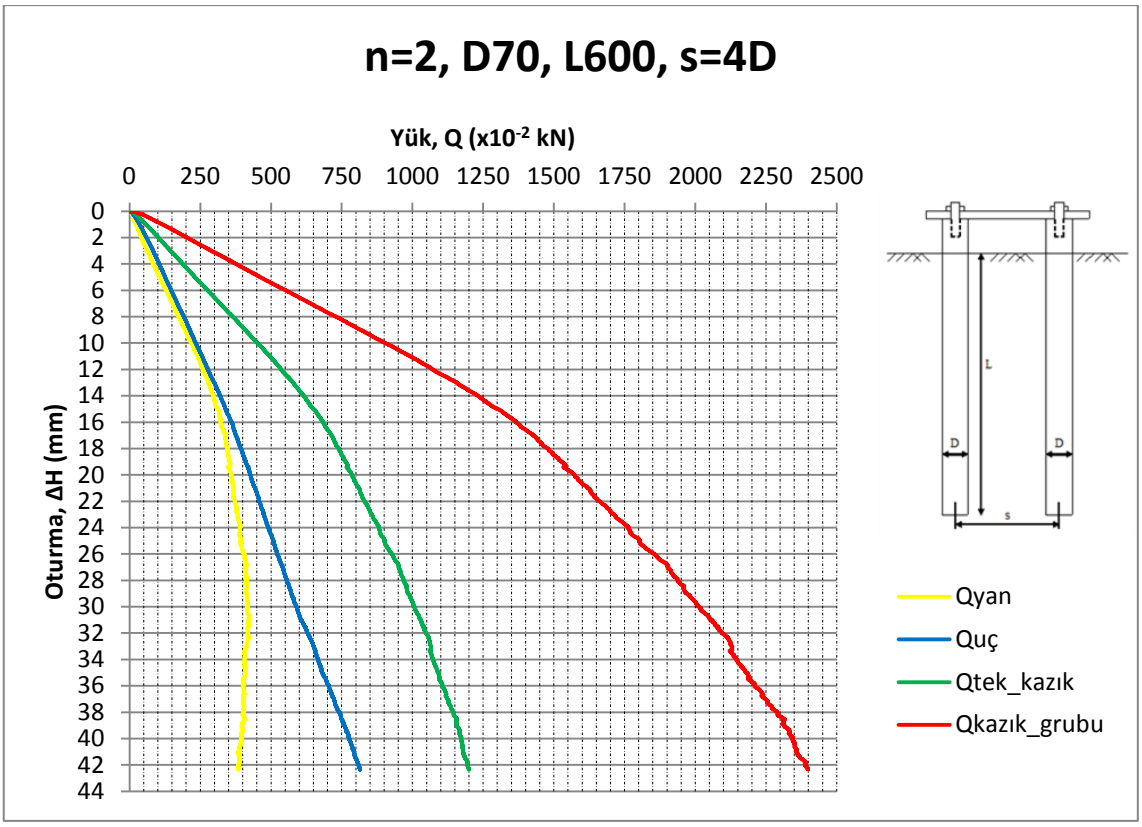


(a)

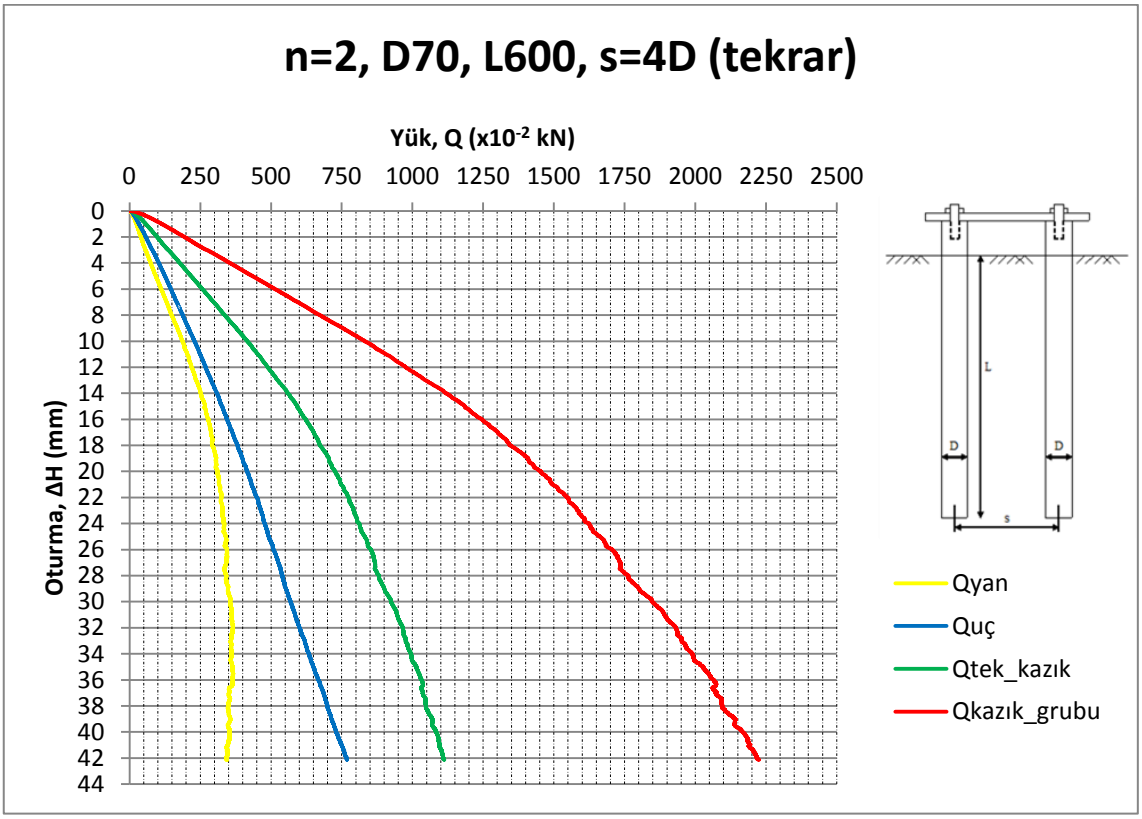


(b)

Şekil Ek 2.33. D=70 mm, L=600 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

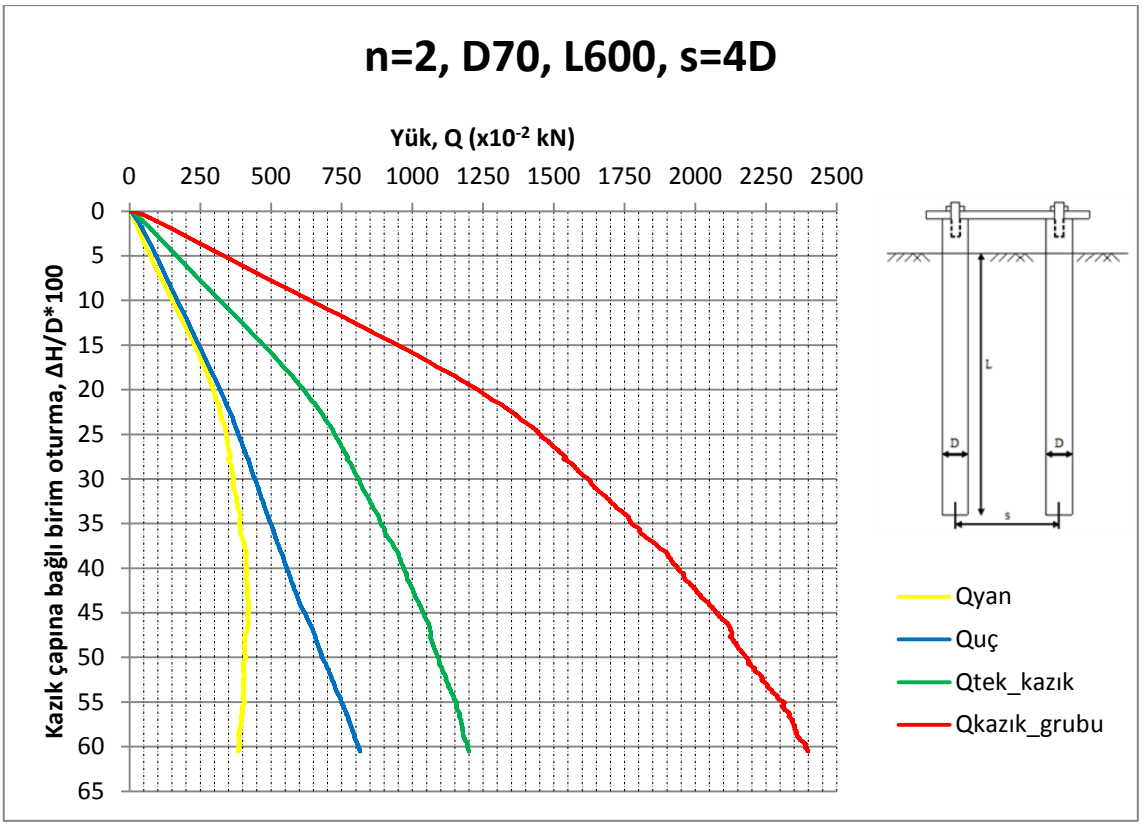


(a)

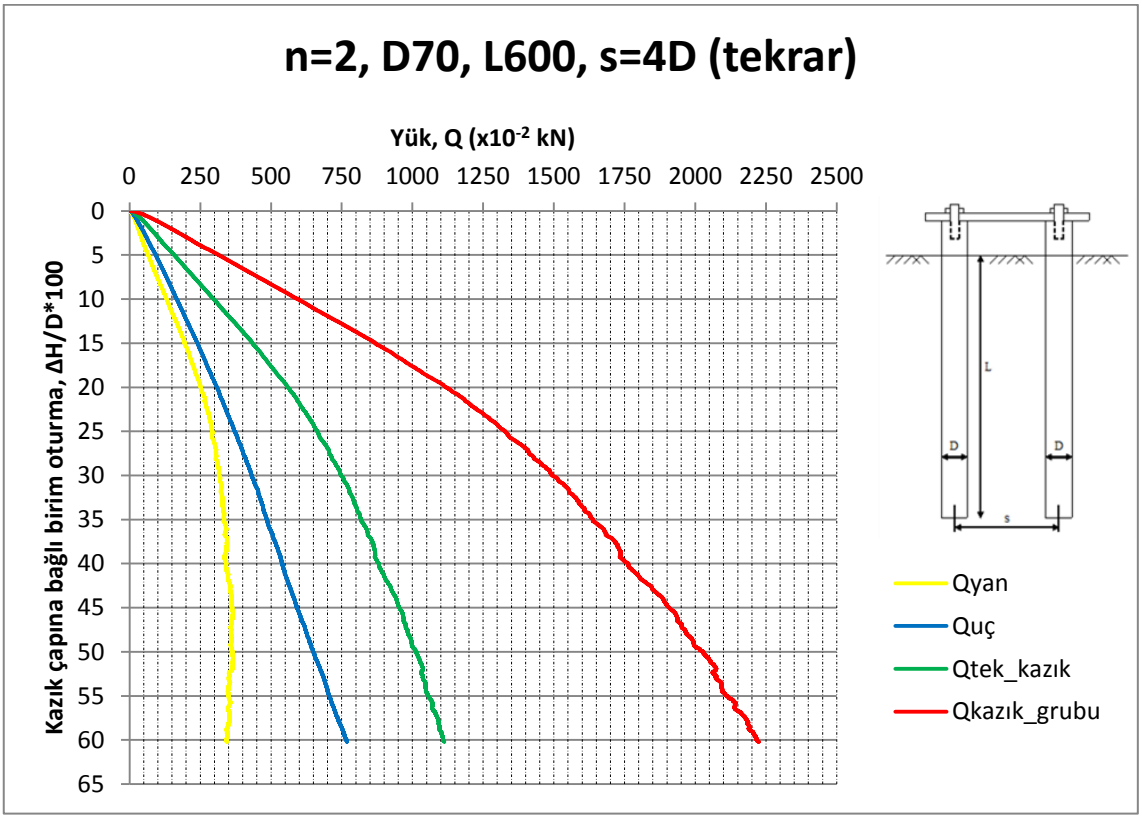


(b)

Şekil Ek 2.34. D=70 mm, L=600 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

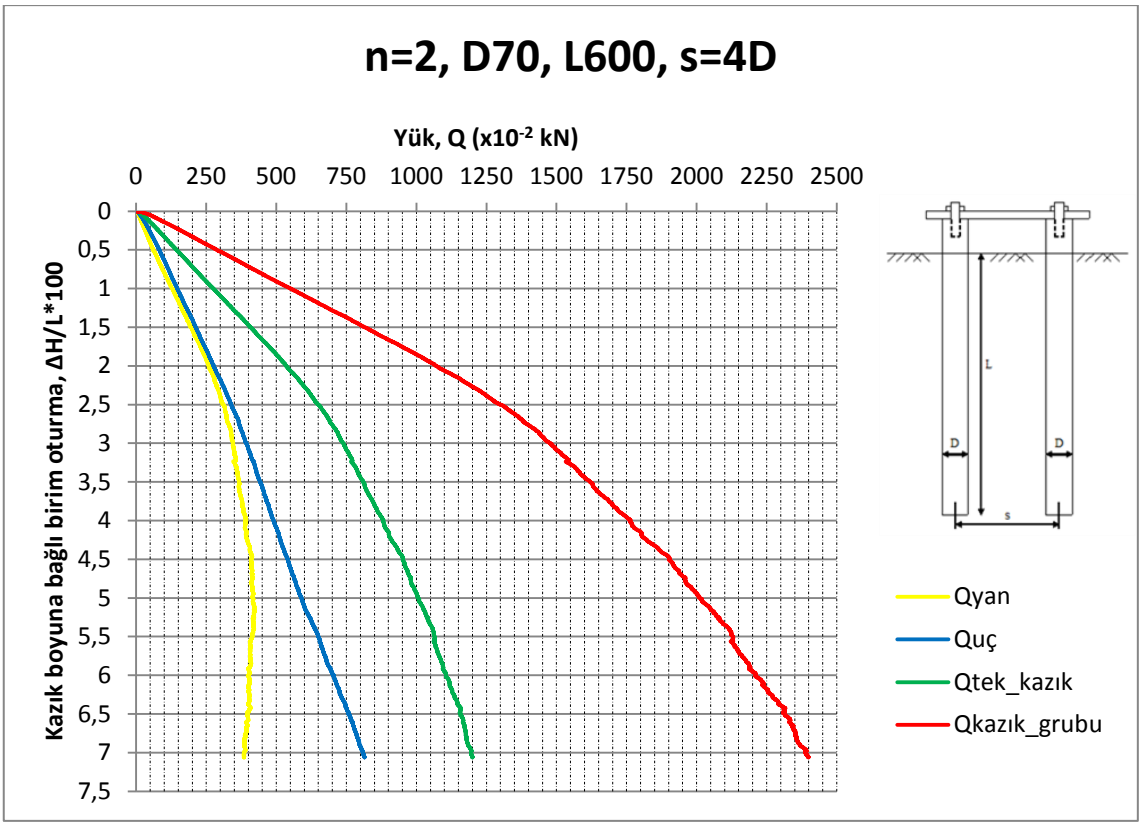


(a)

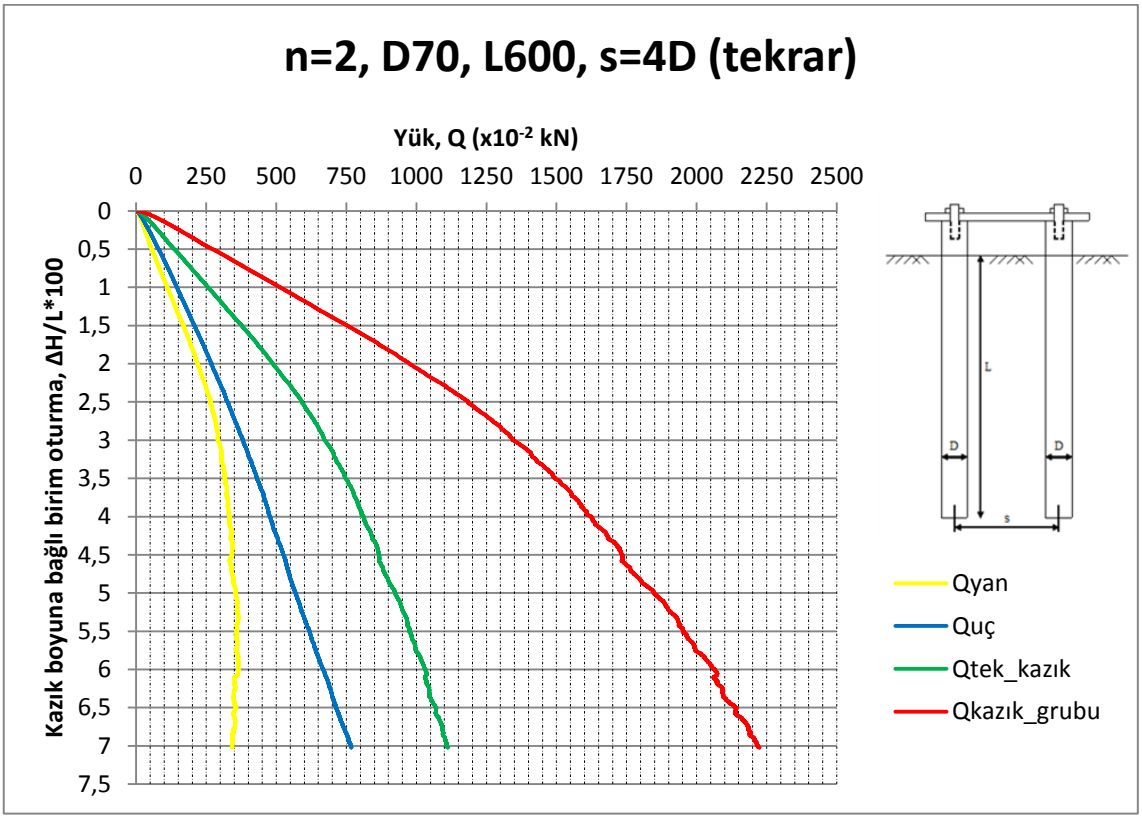


(b)

Şekil Ek 2.35. D=70 mm, L=600 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri



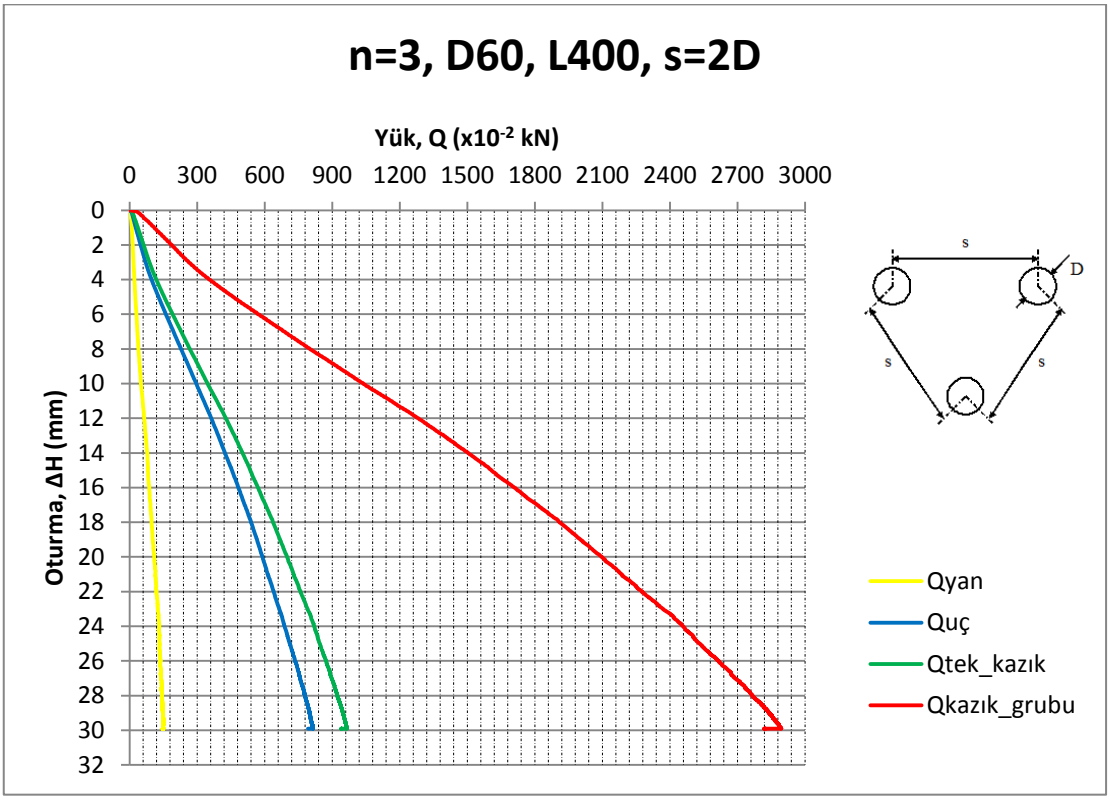
(a)



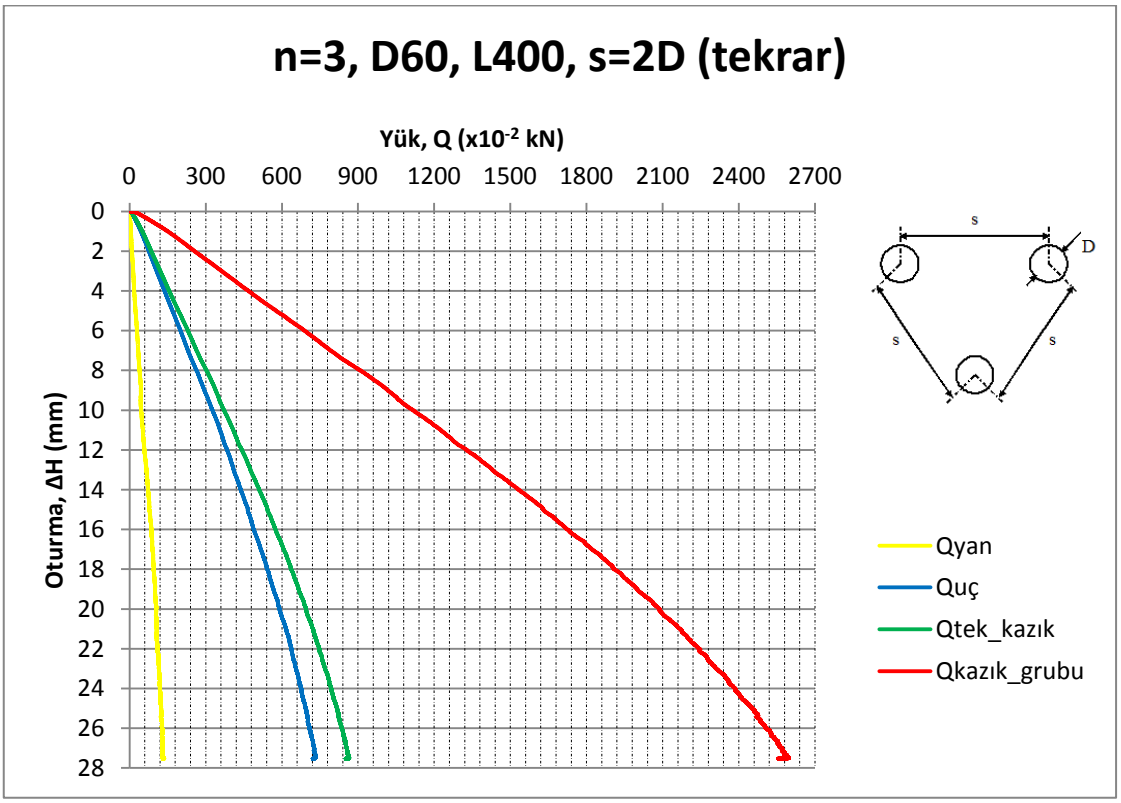
(b)

Şekil Ek 2.36. D=70 mm, L=600 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

Ek 3. 3 Kazıktan Oluşan Kazık Grubu Yükleme Deneyi Sonuçları

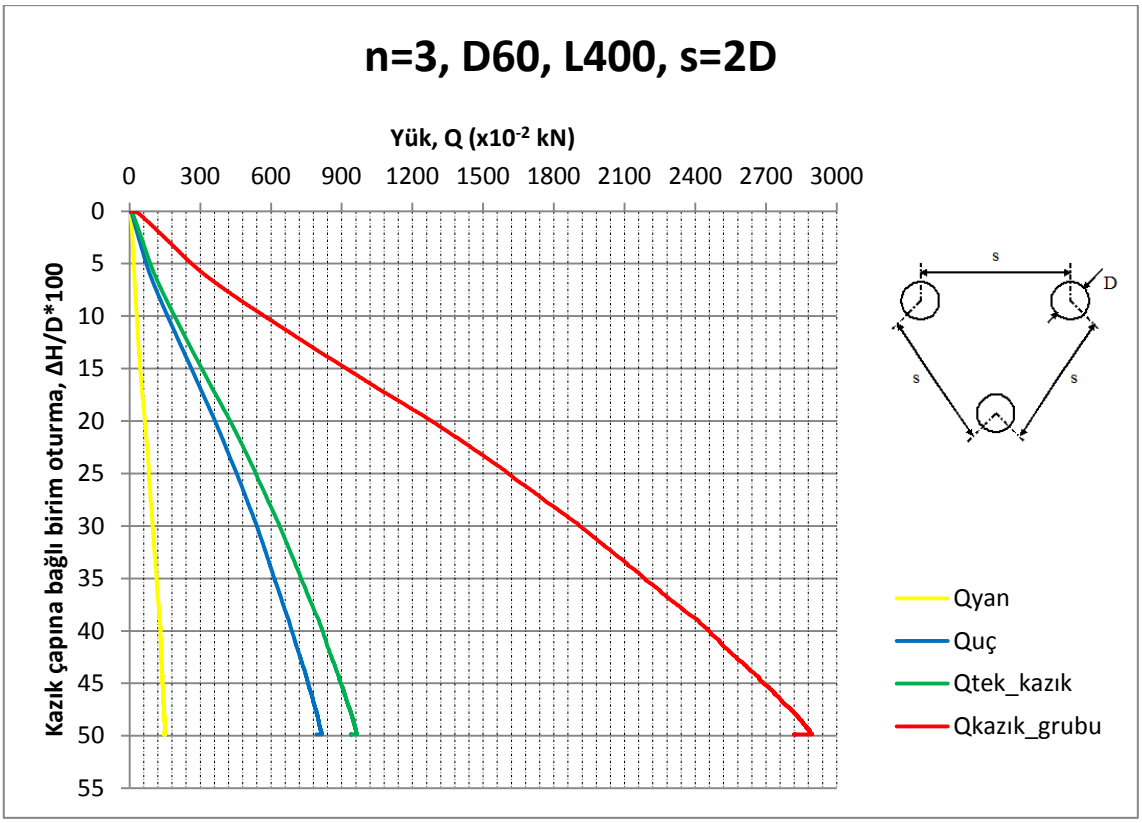


(a)

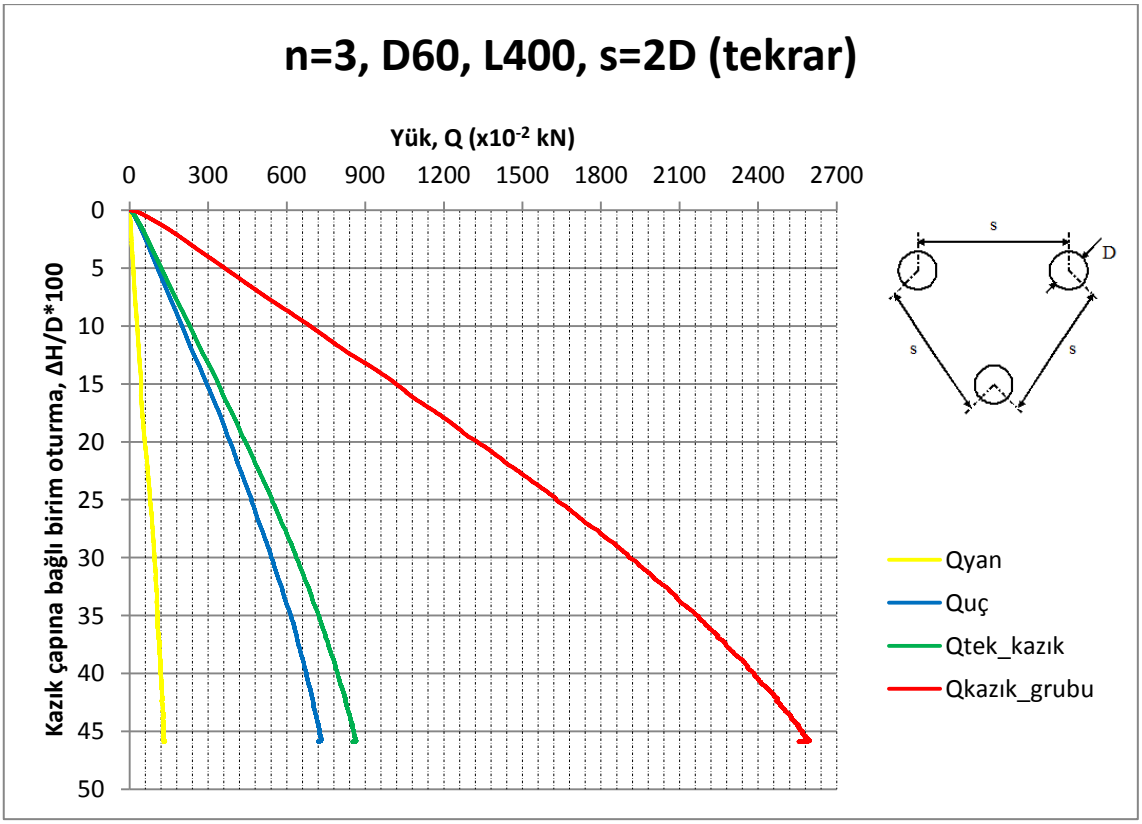


(b)

Şekil Ek 3.1. D=60 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

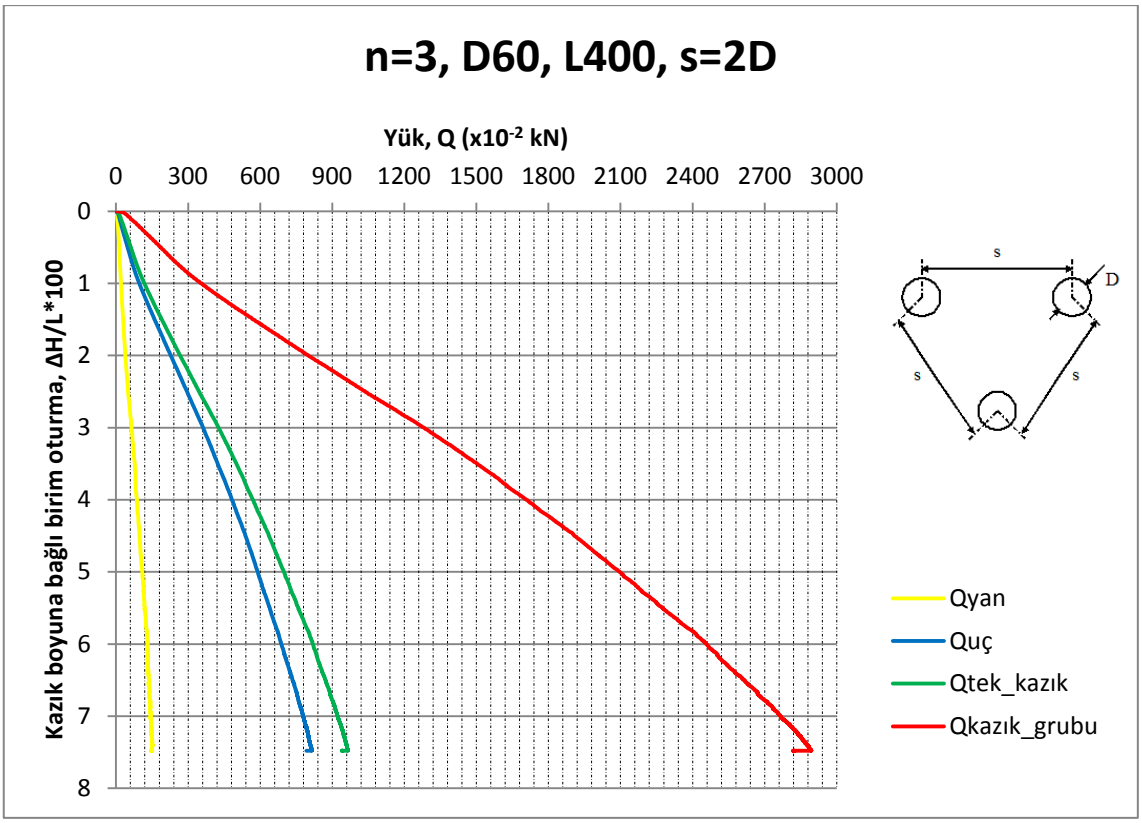


(a)

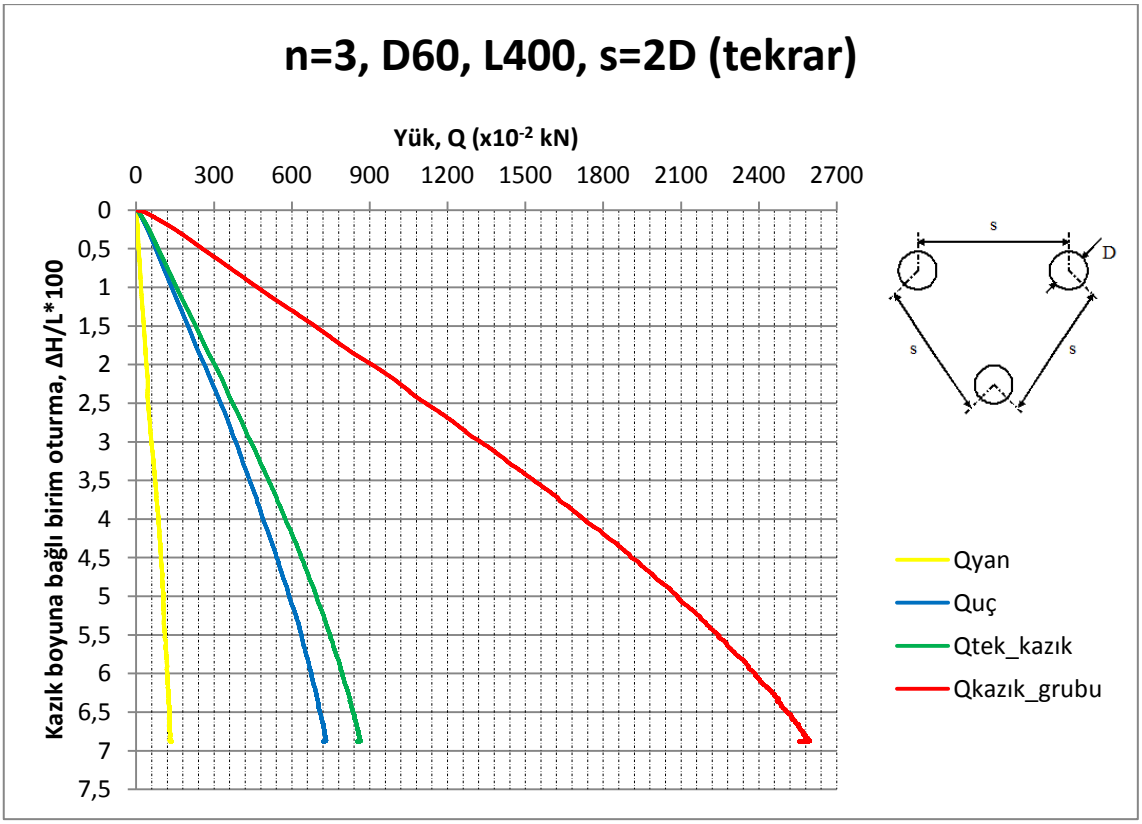


(b)

Şekil Ek 3.2. D=60 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

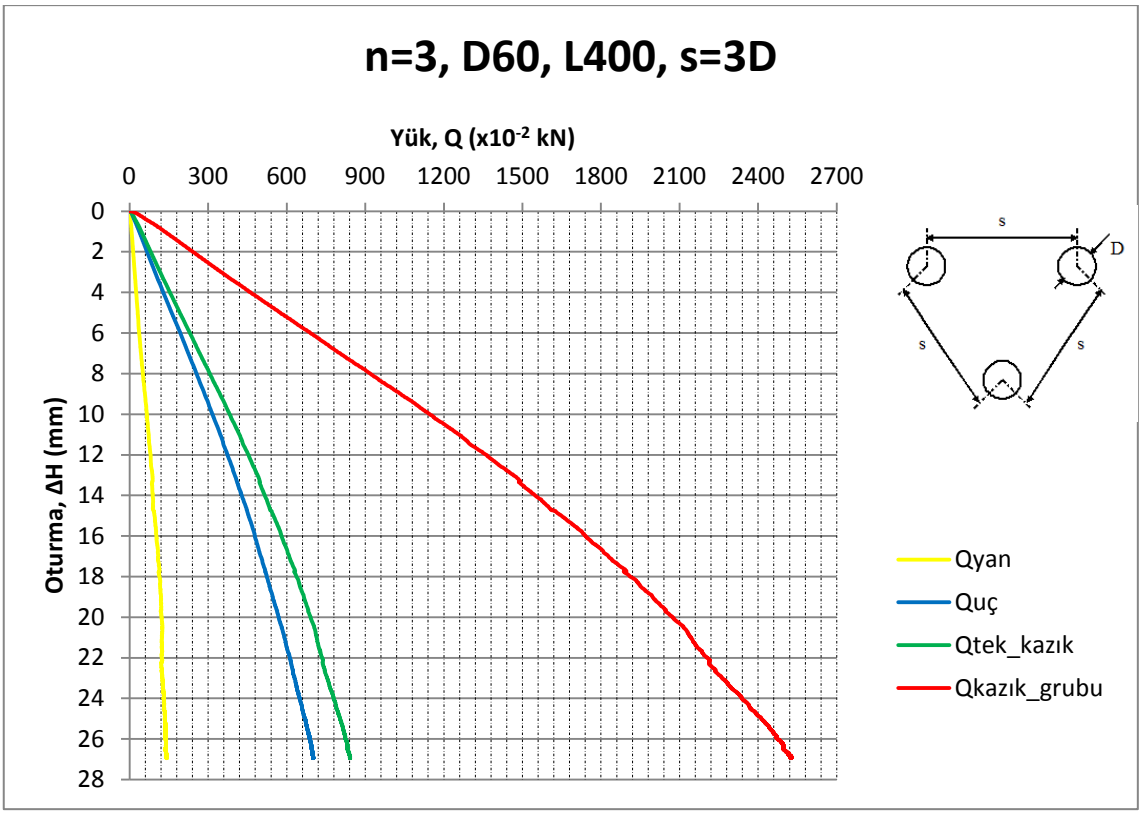


(a)

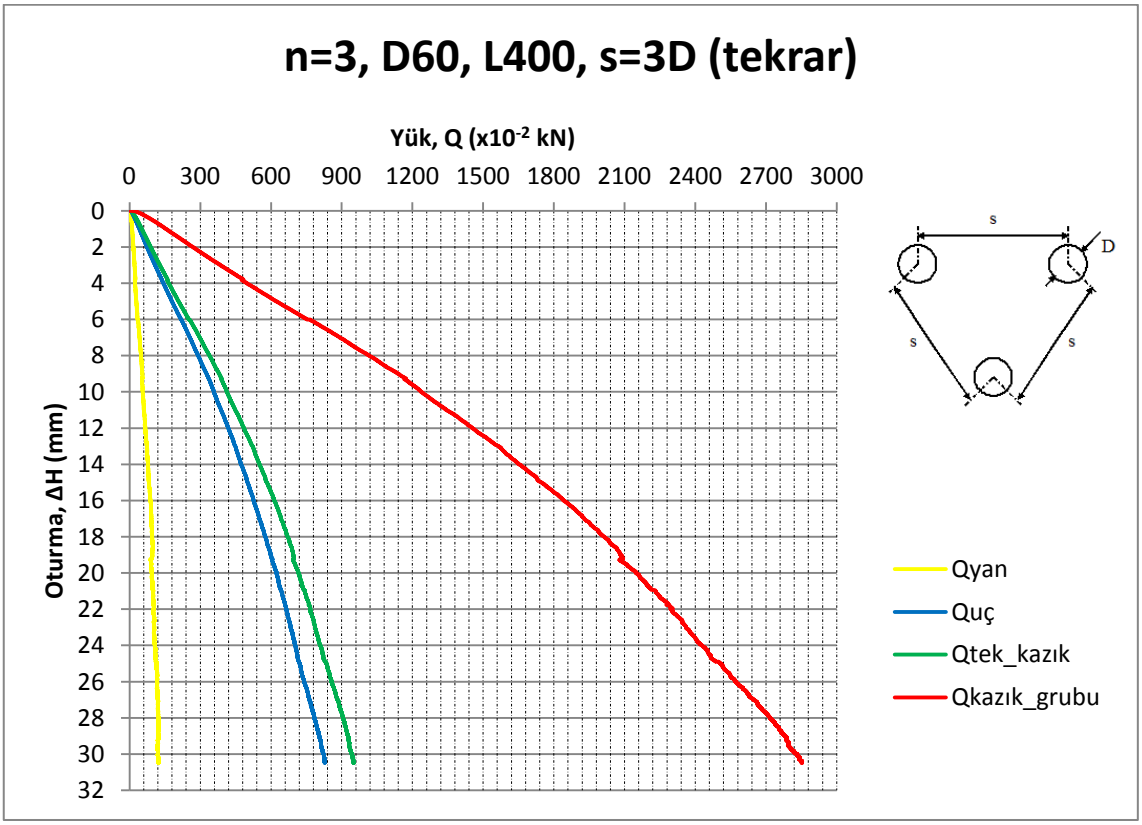


(b)

Şekil Ek 3.3. D=60 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

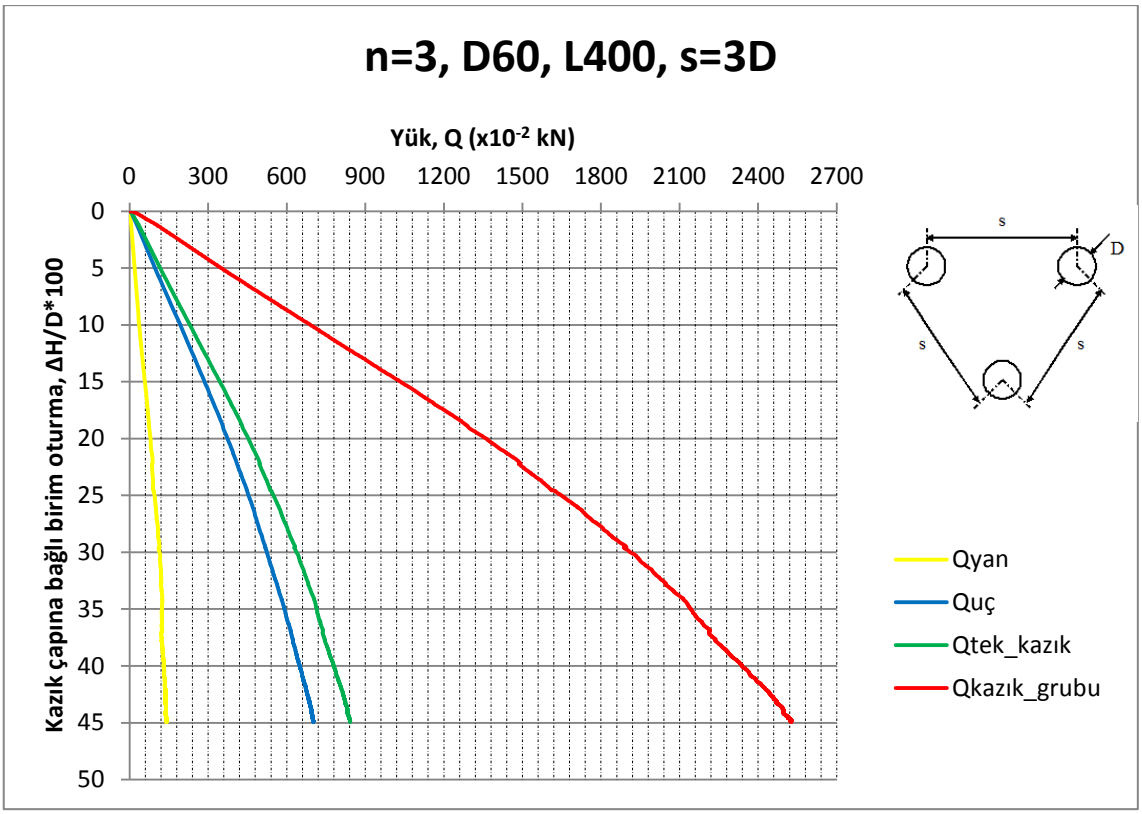


(a)

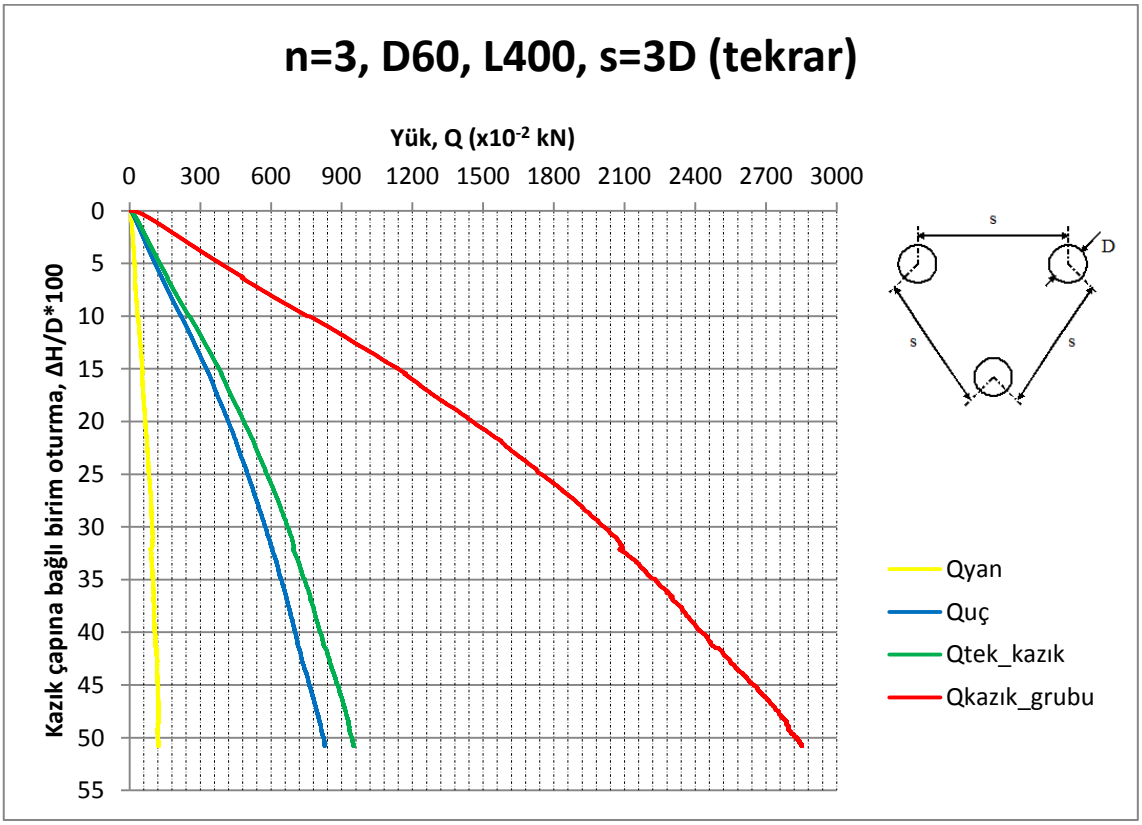


(b)

Şekil Ek 3.4. D=60 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

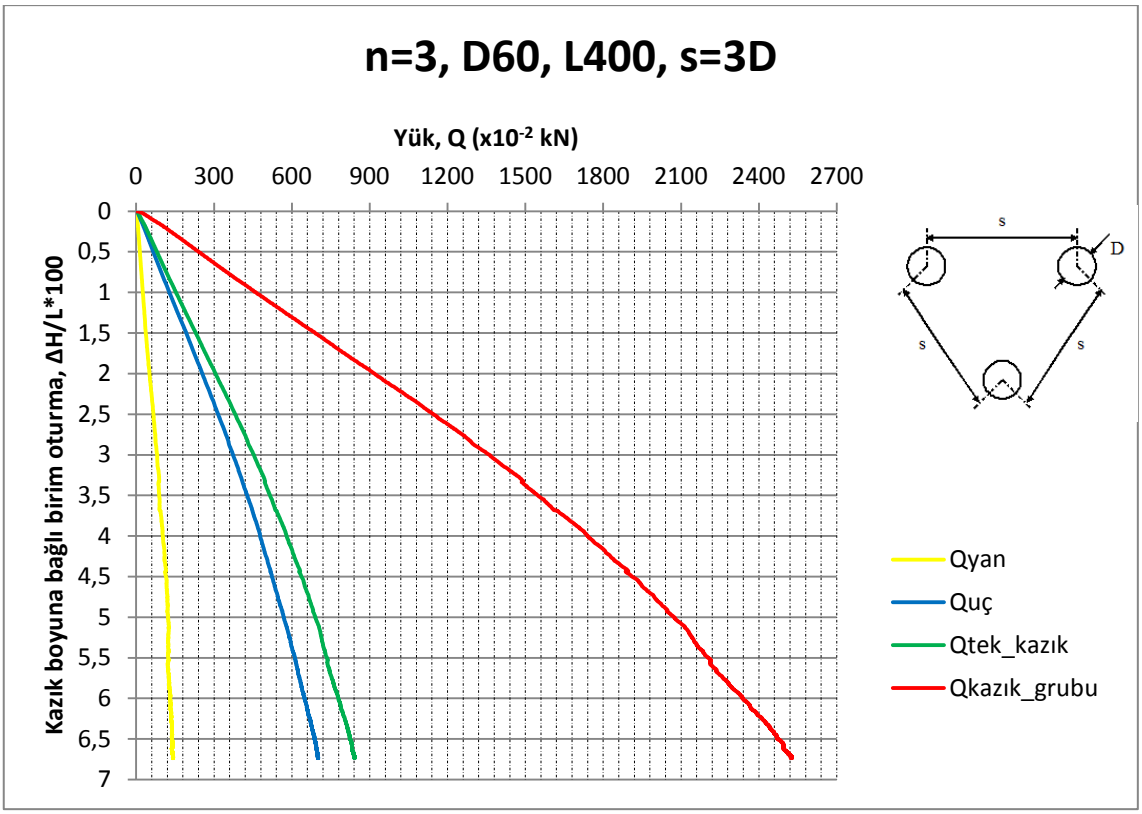


(a)

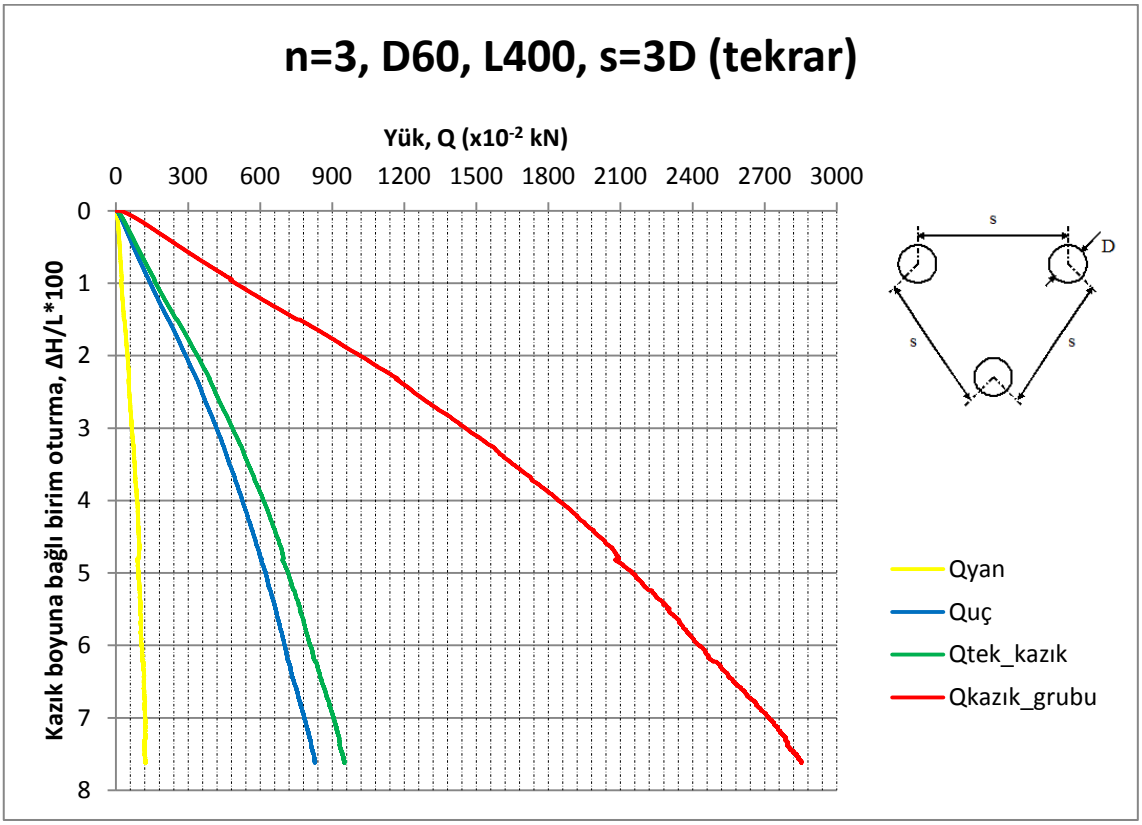


(b)

Şekil Ek 3.5. D=60 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük- birim oturma grafikleri

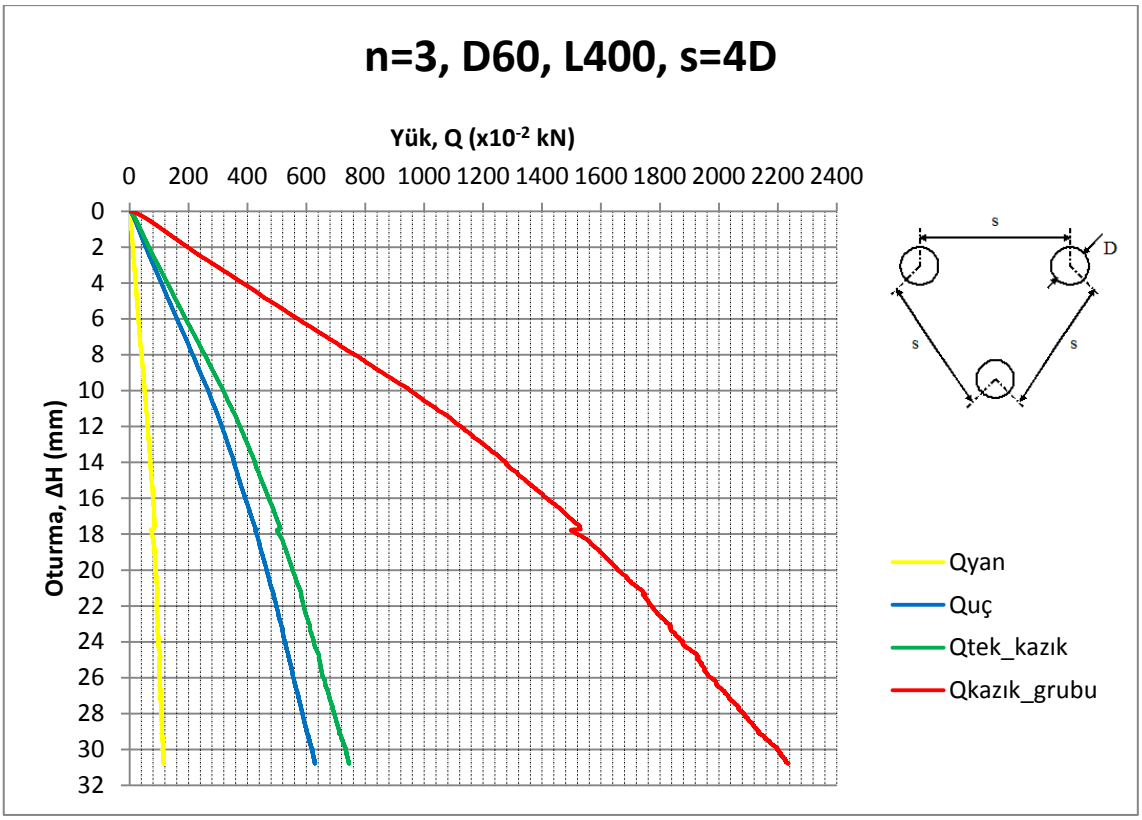


(a)

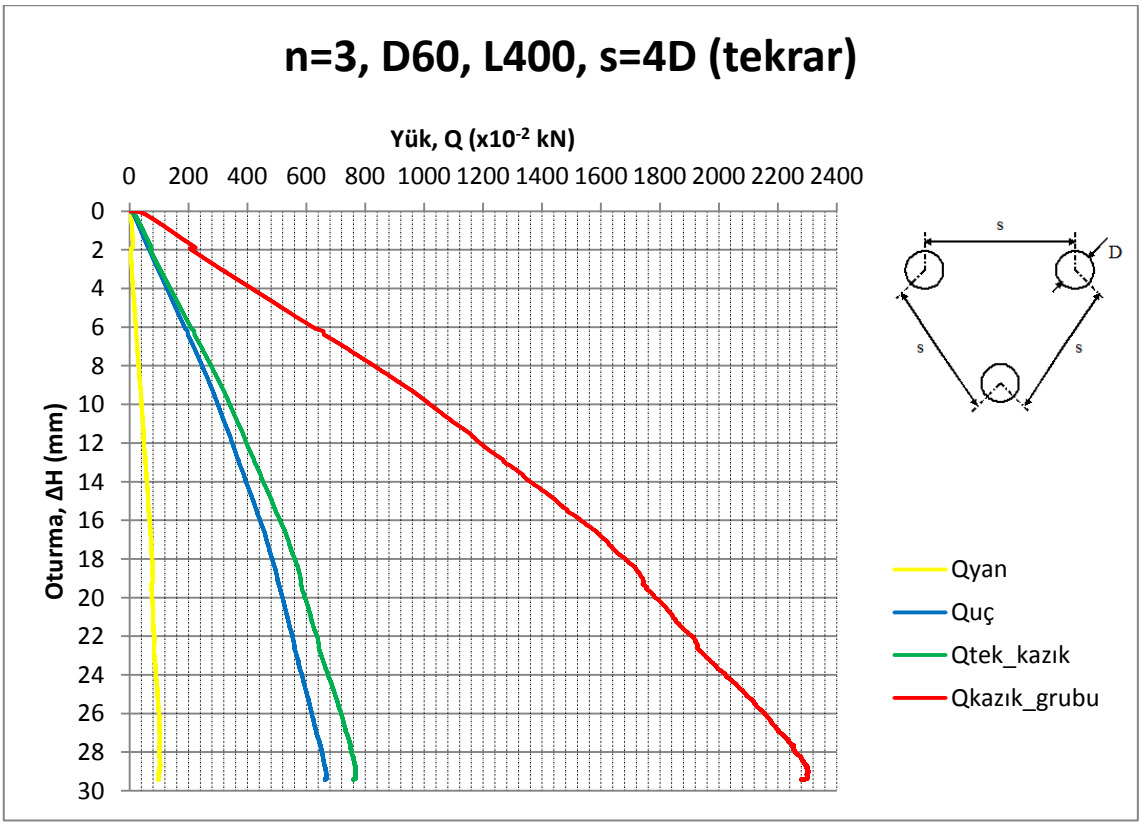


(b)

Şekil Ek 3.6. D=60 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük- birim oturma grafikleri

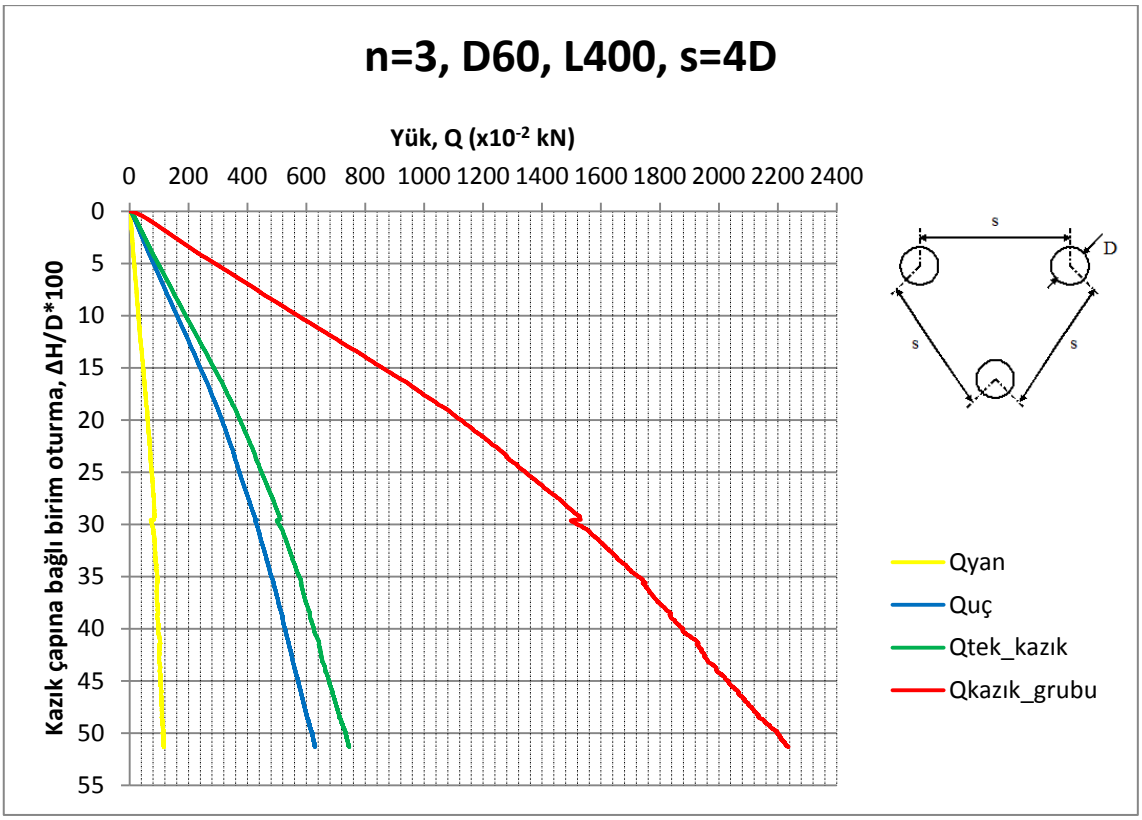


(a)

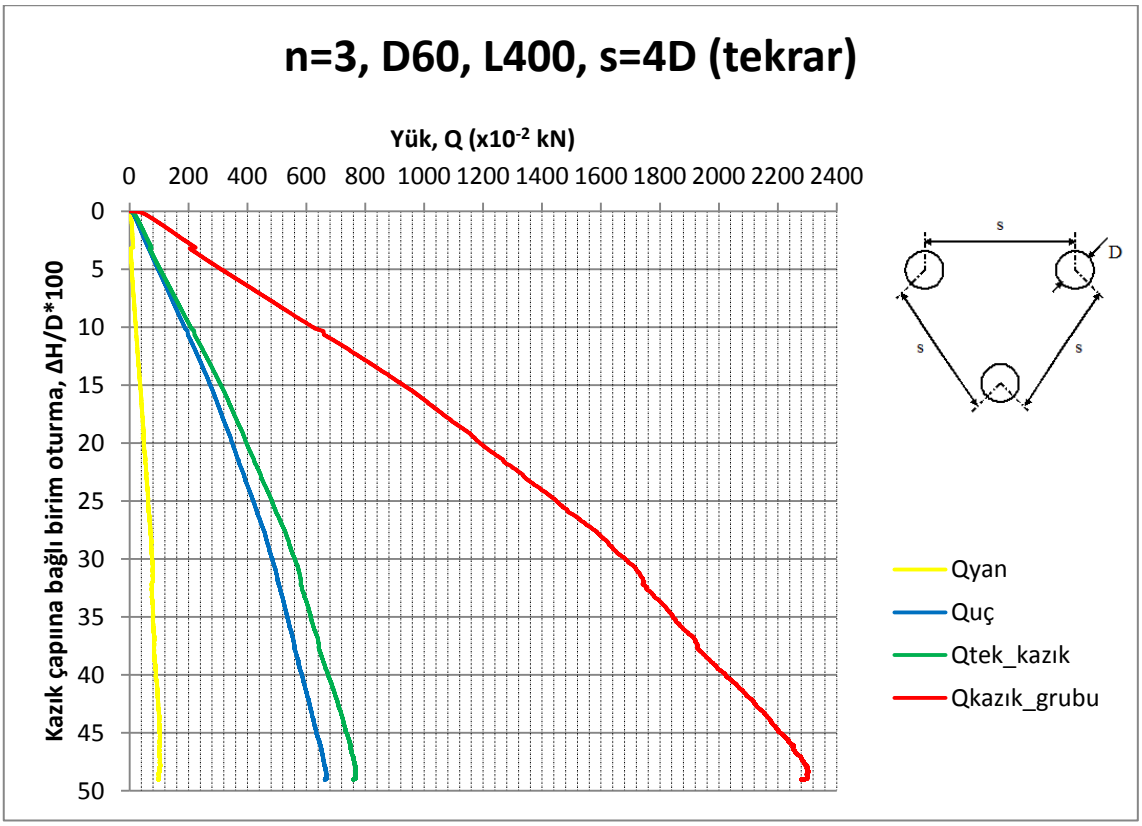


(b)

Şekil Ek 3.7. D=60 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

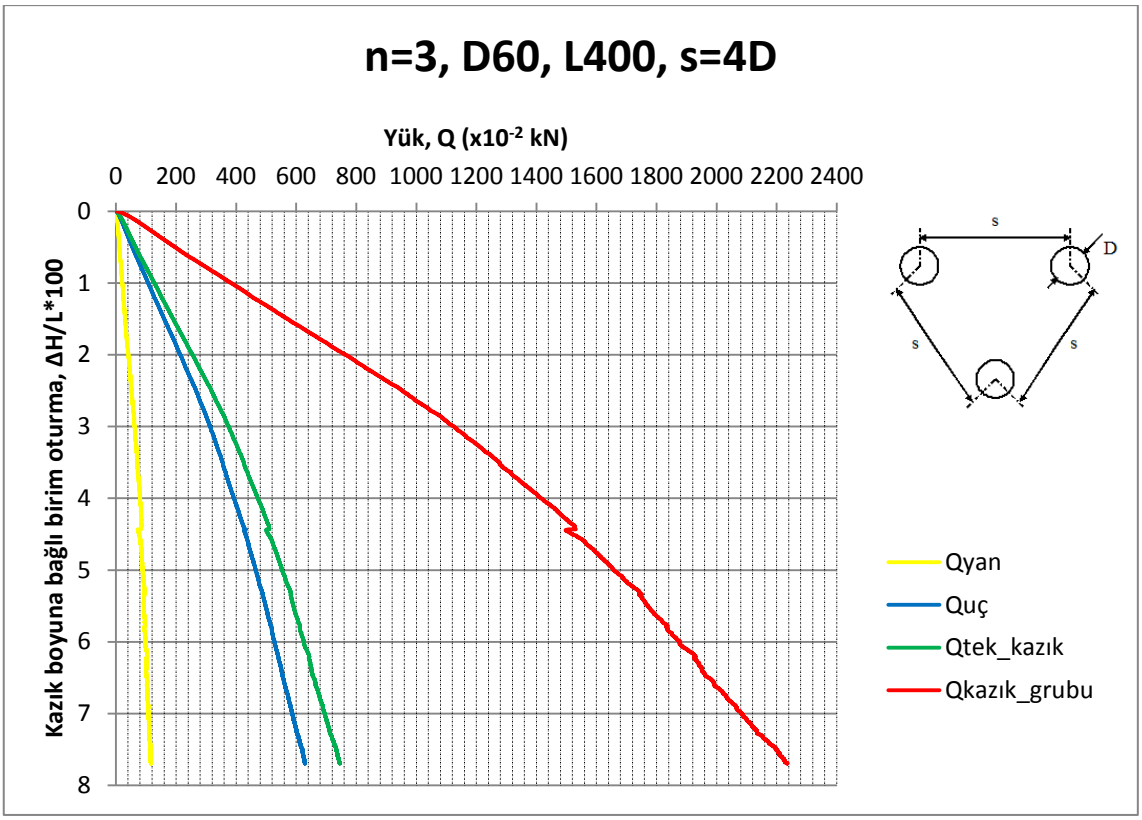


(a)

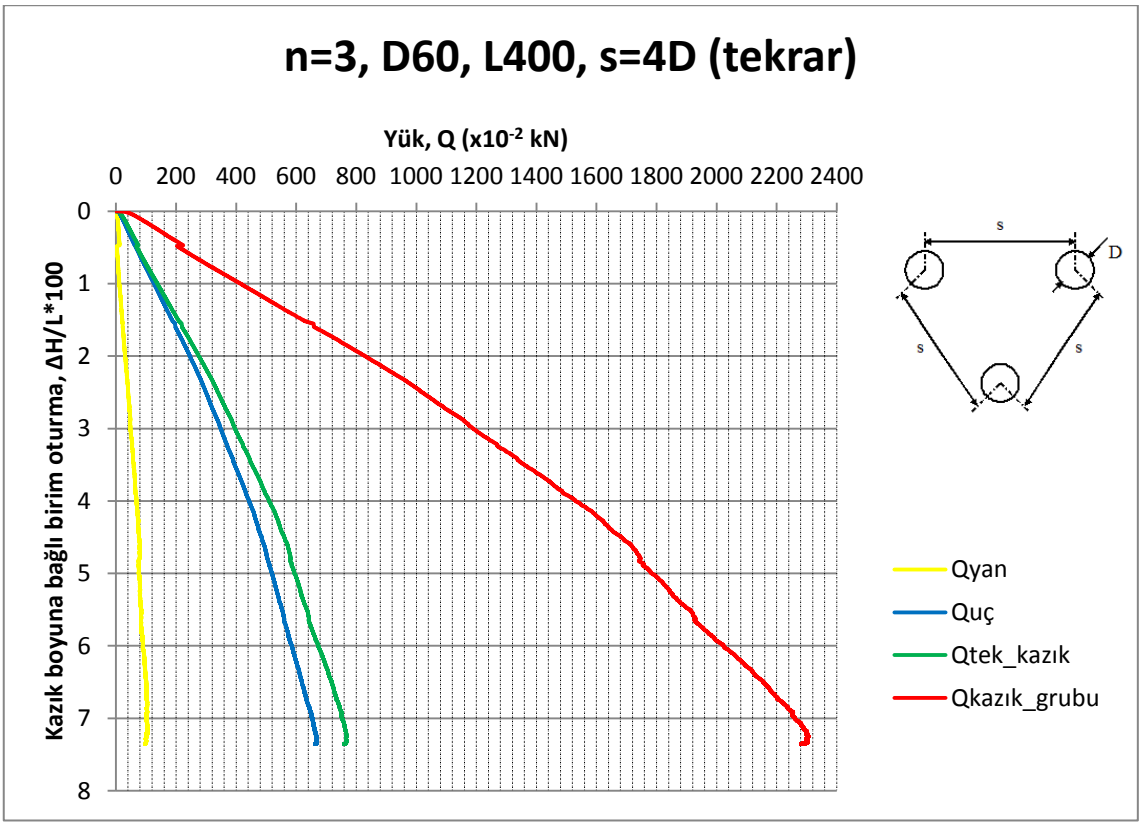


(b)

Şekil Ek 3.8. D=60 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri



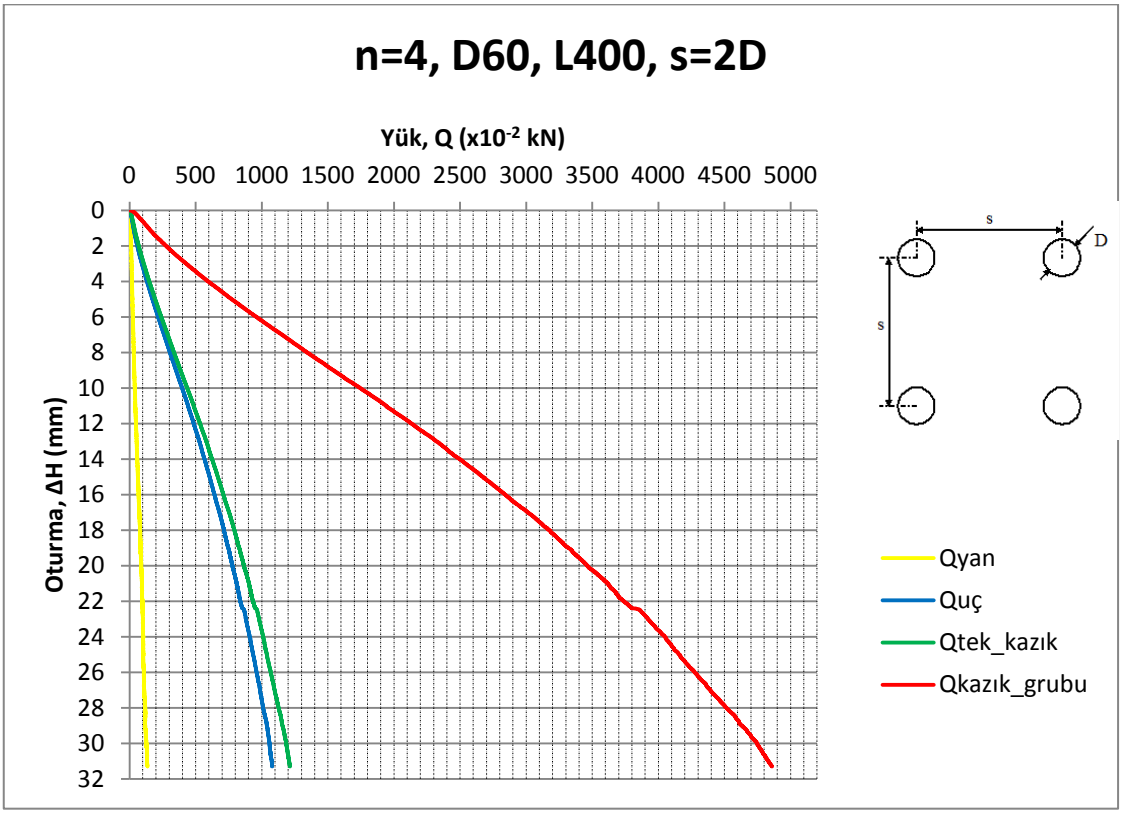
(a)



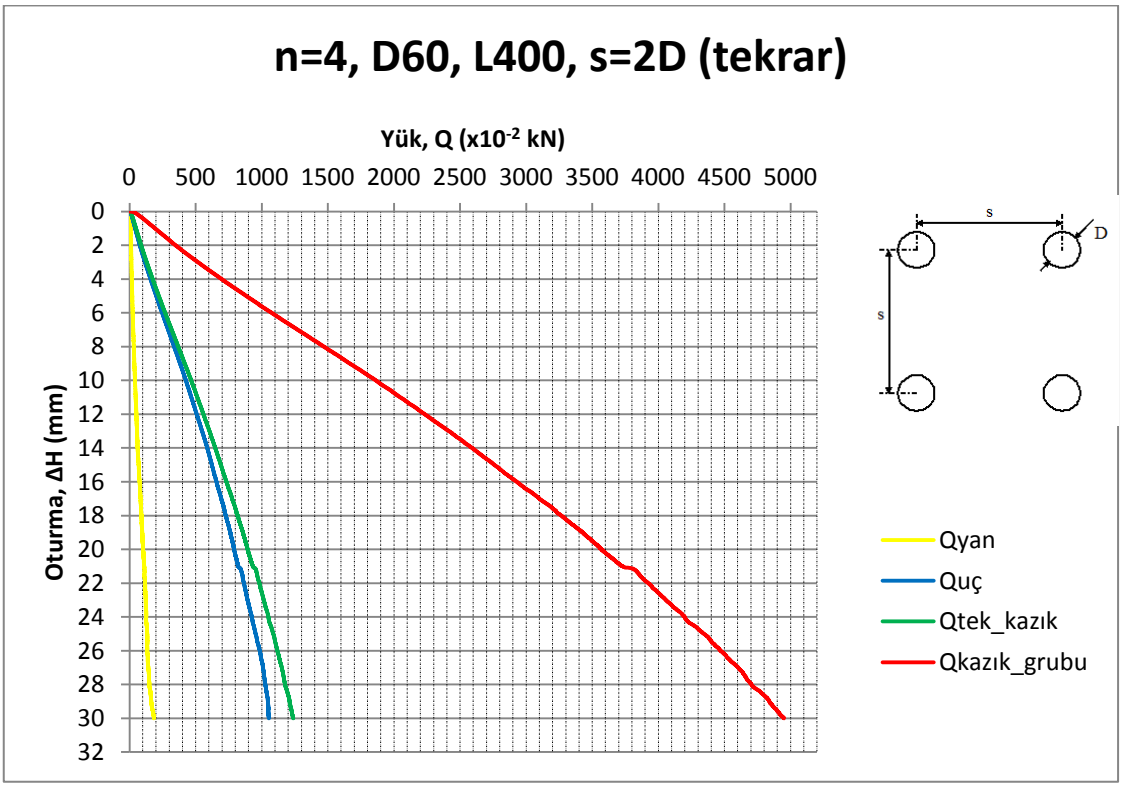
(b)

Şekil Ek 3.9. D=60 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

Ek 4. 4 Kazıktan Oluşan Kazık Grubu Yükleme Deneyi Sonuçları

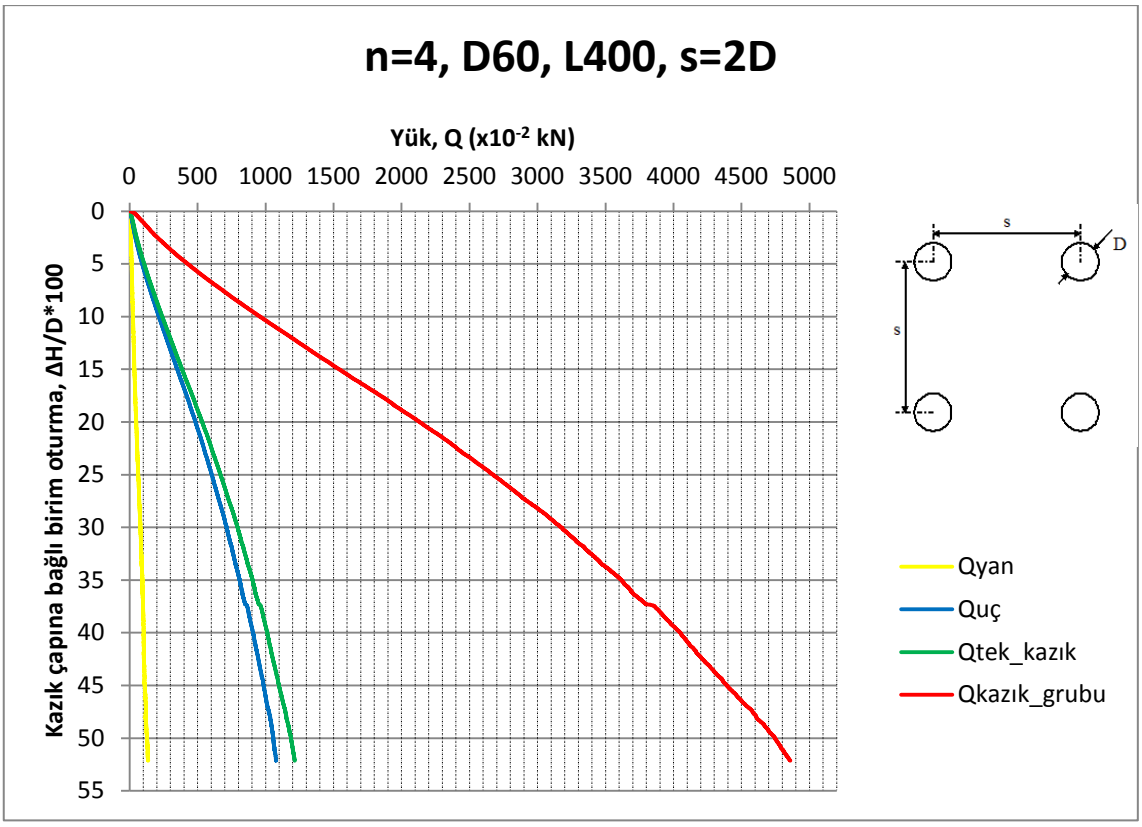


(a)

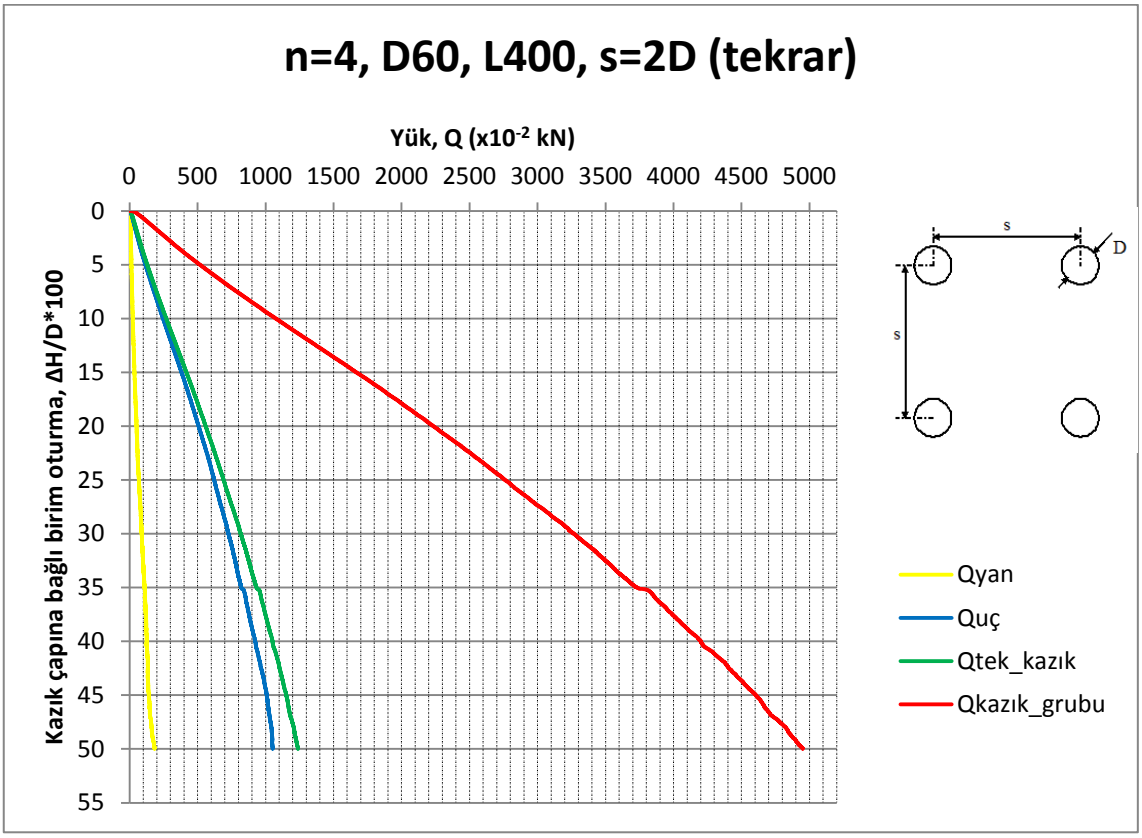


(b)

Şekil Ek 4.1. D=60 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

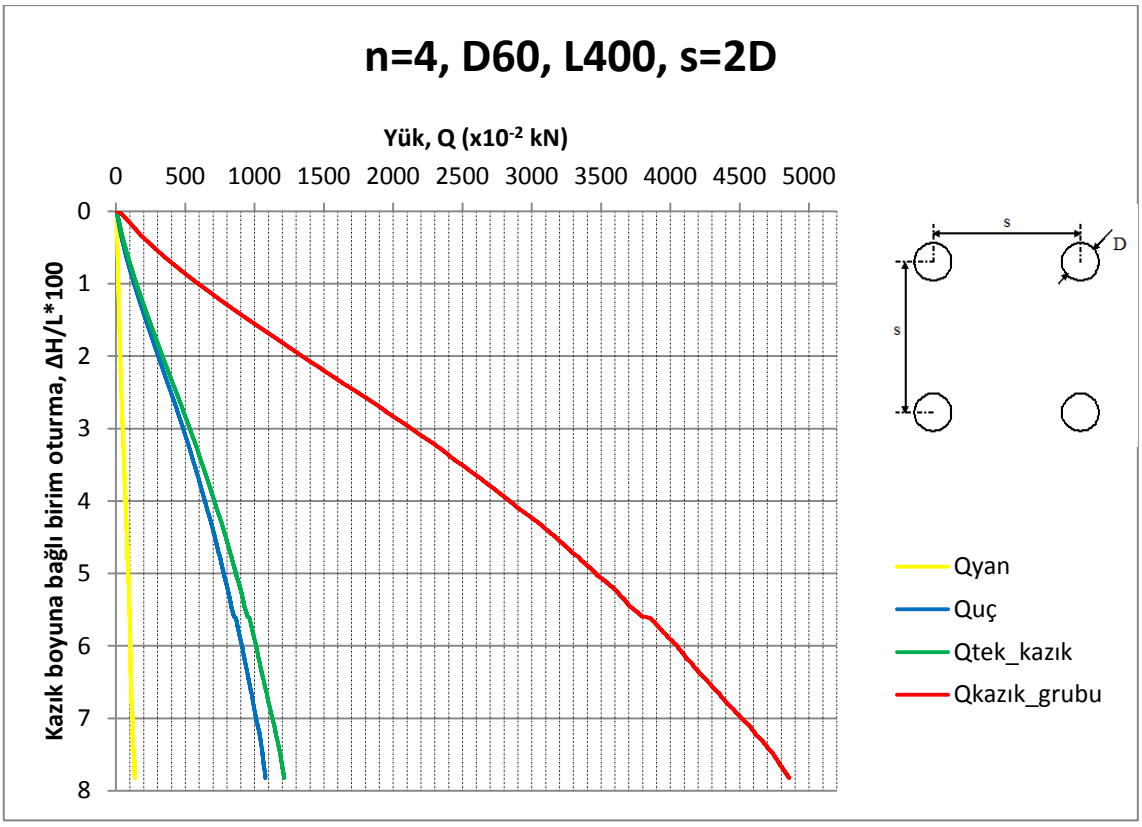


(a)

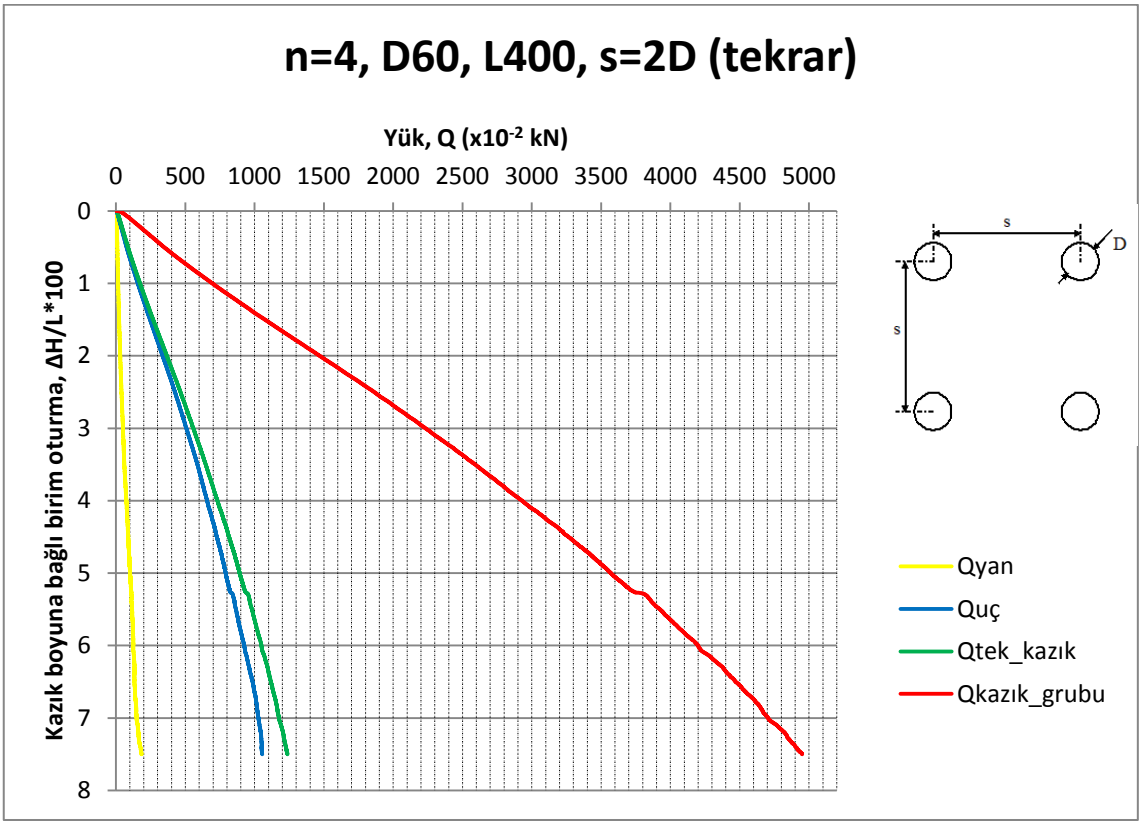


(b)

Şekil Ek 4.2. D=60 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

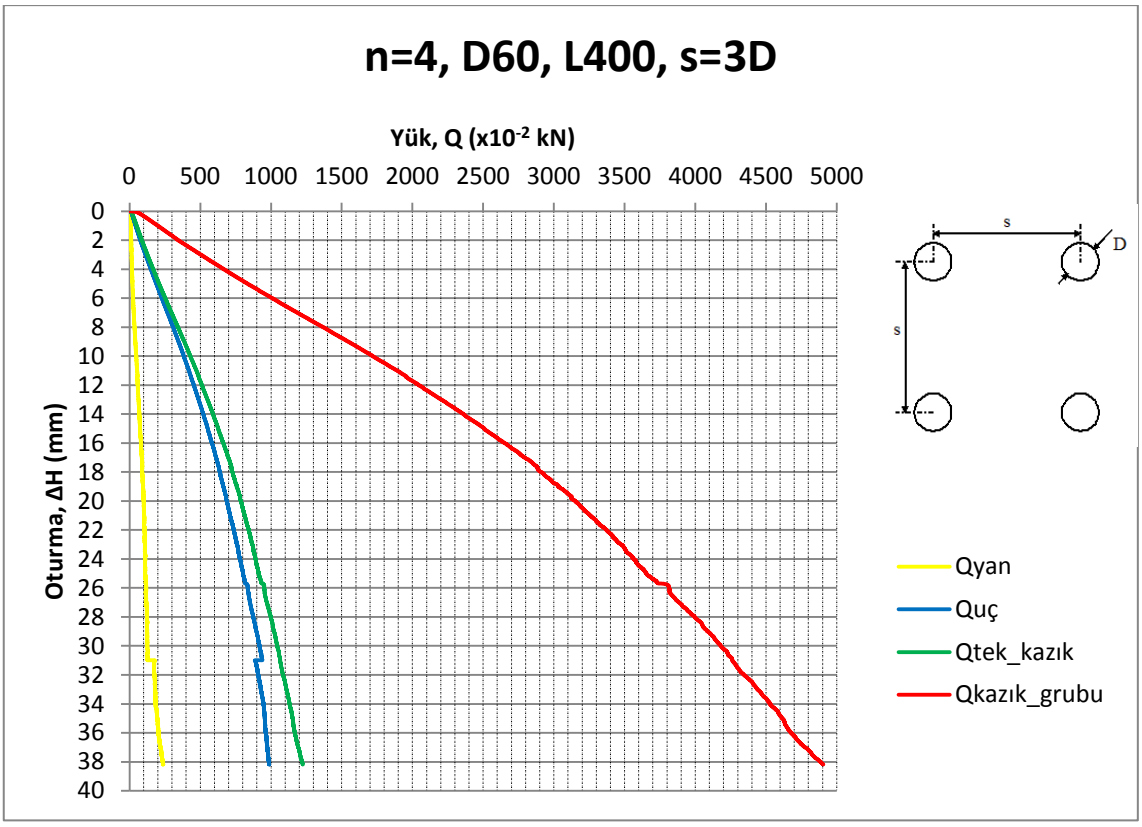


(a)

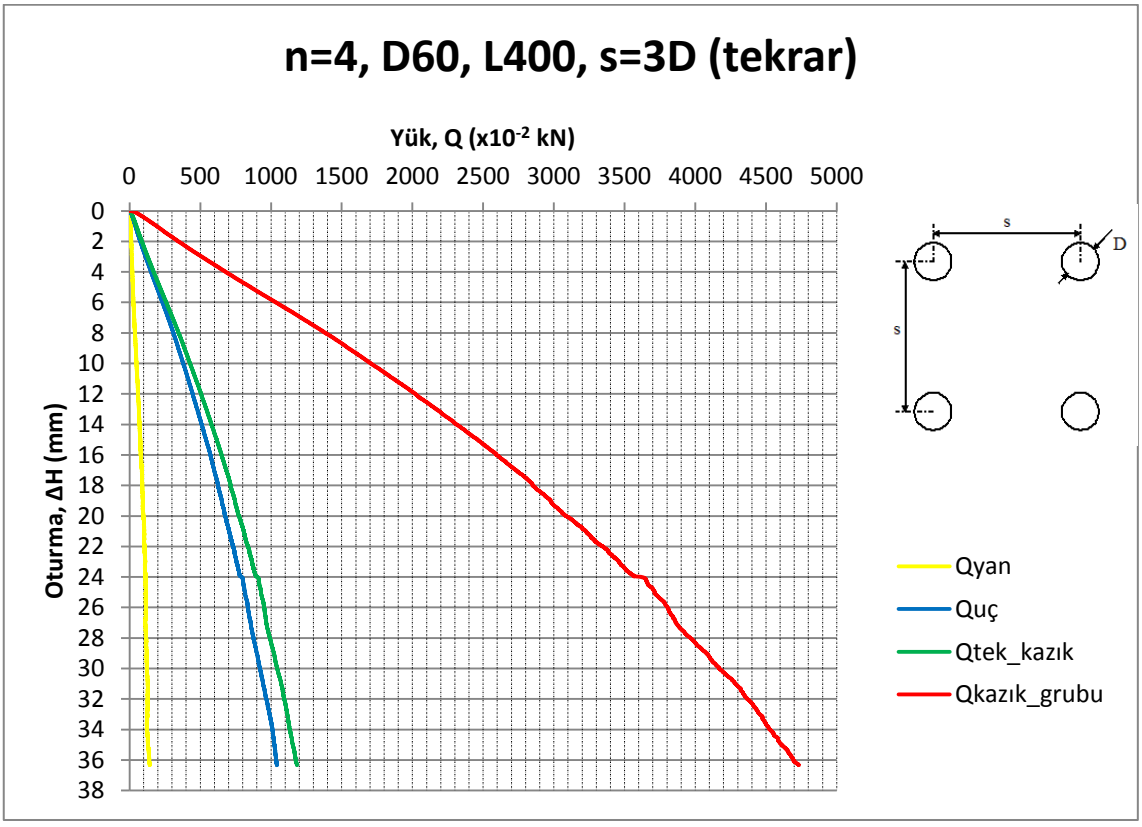


(b)

Şekil Ek 4.3. D=60 mm, L=400 mm ve s=2D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

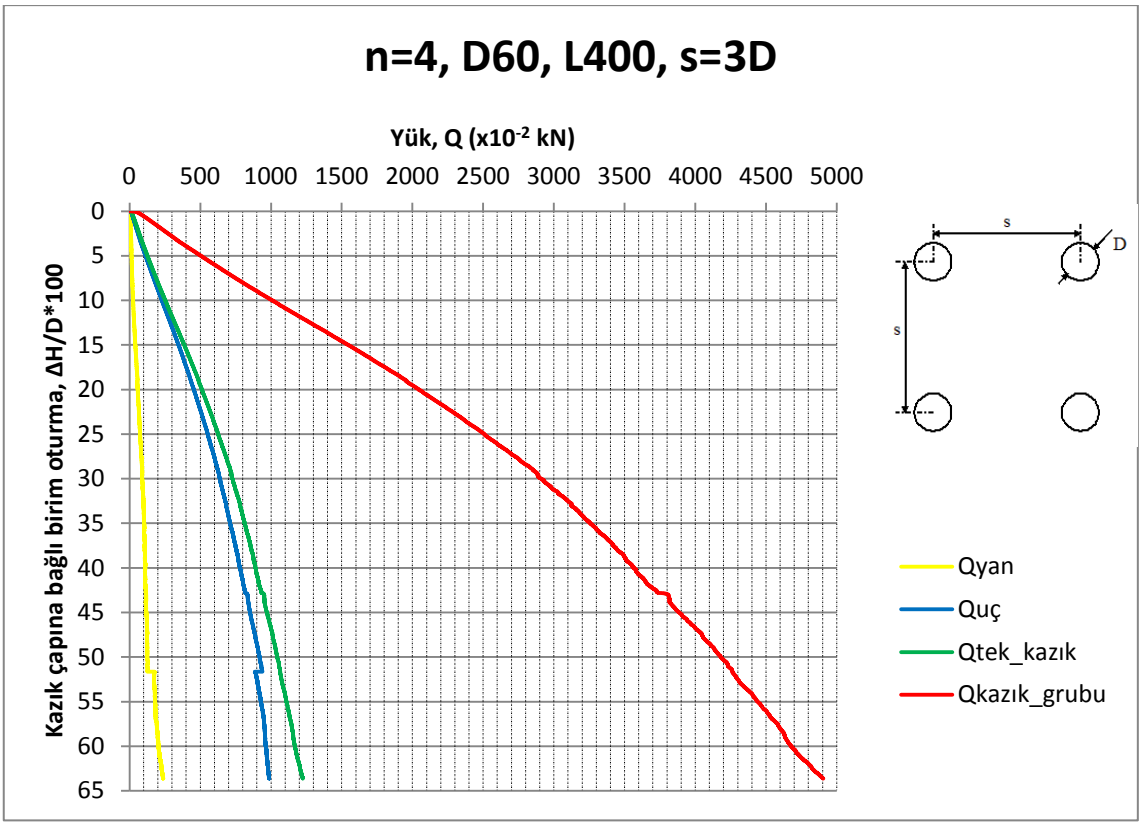


(a)

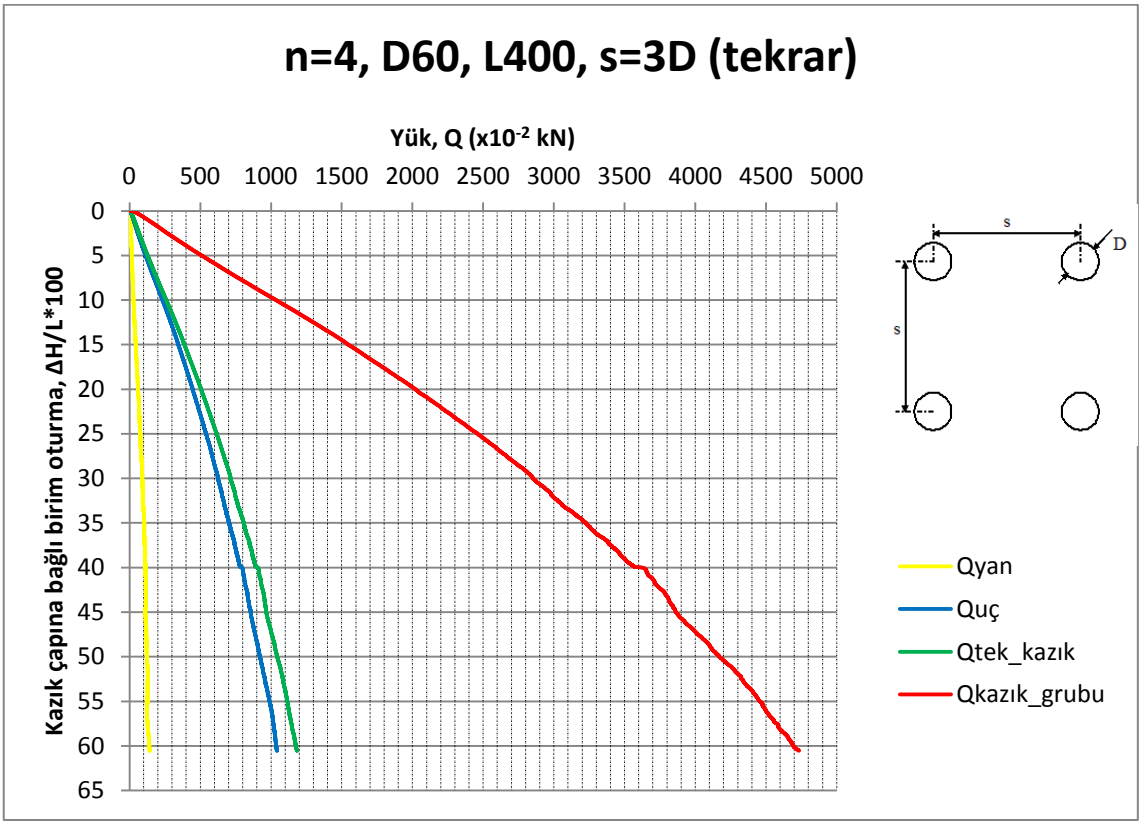


(b)

Şekil Ek 4.4. D=60 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

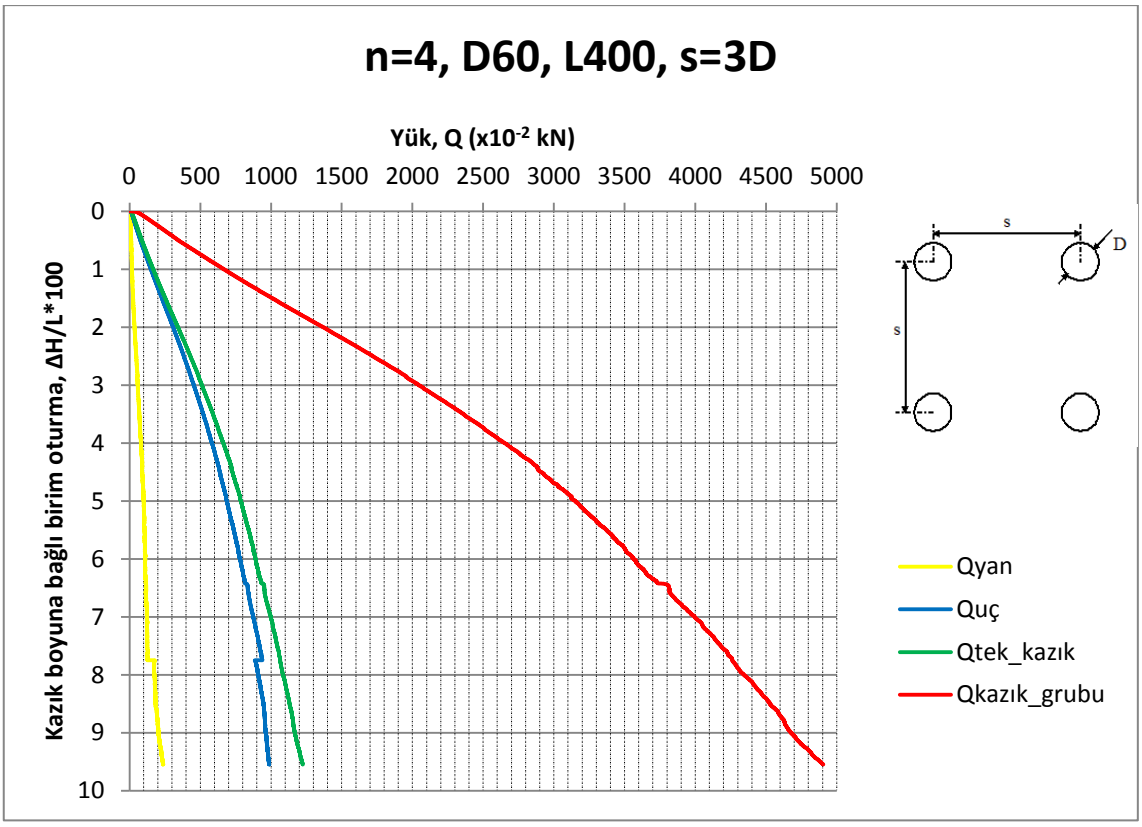


(a)

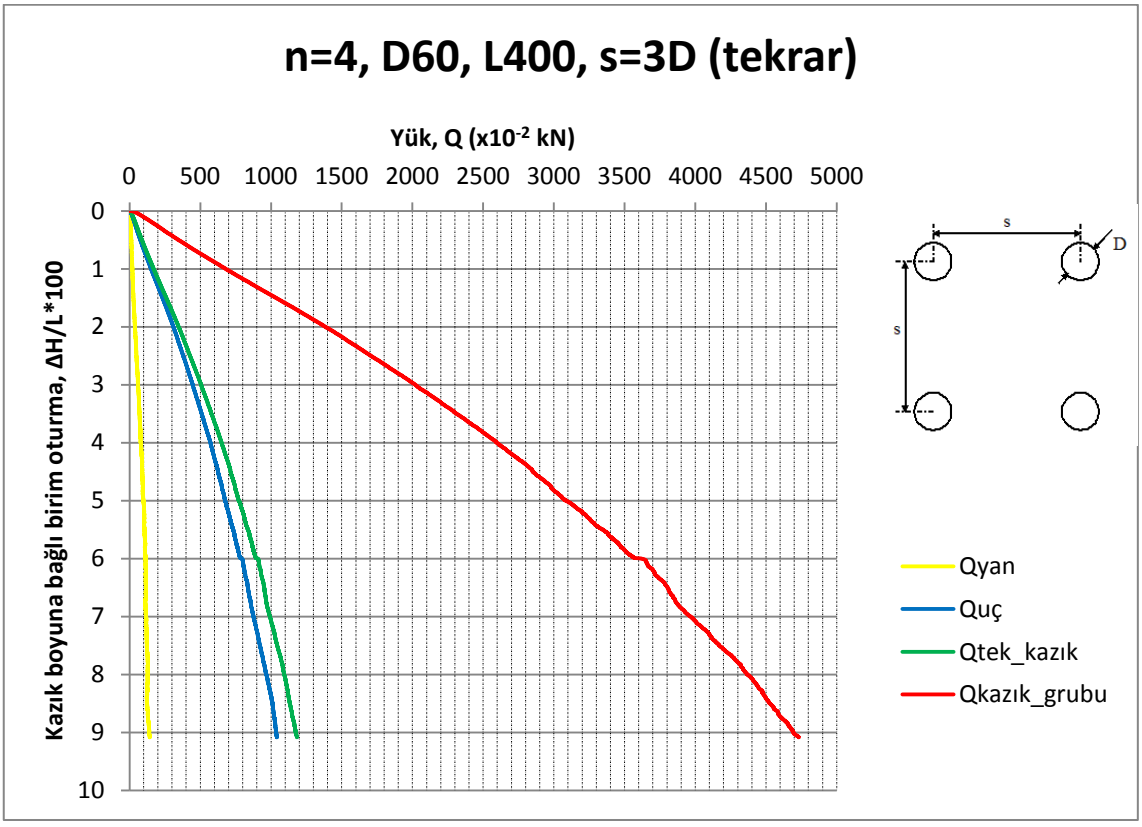


(b)

Şekil Ek 4.5. D=60 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

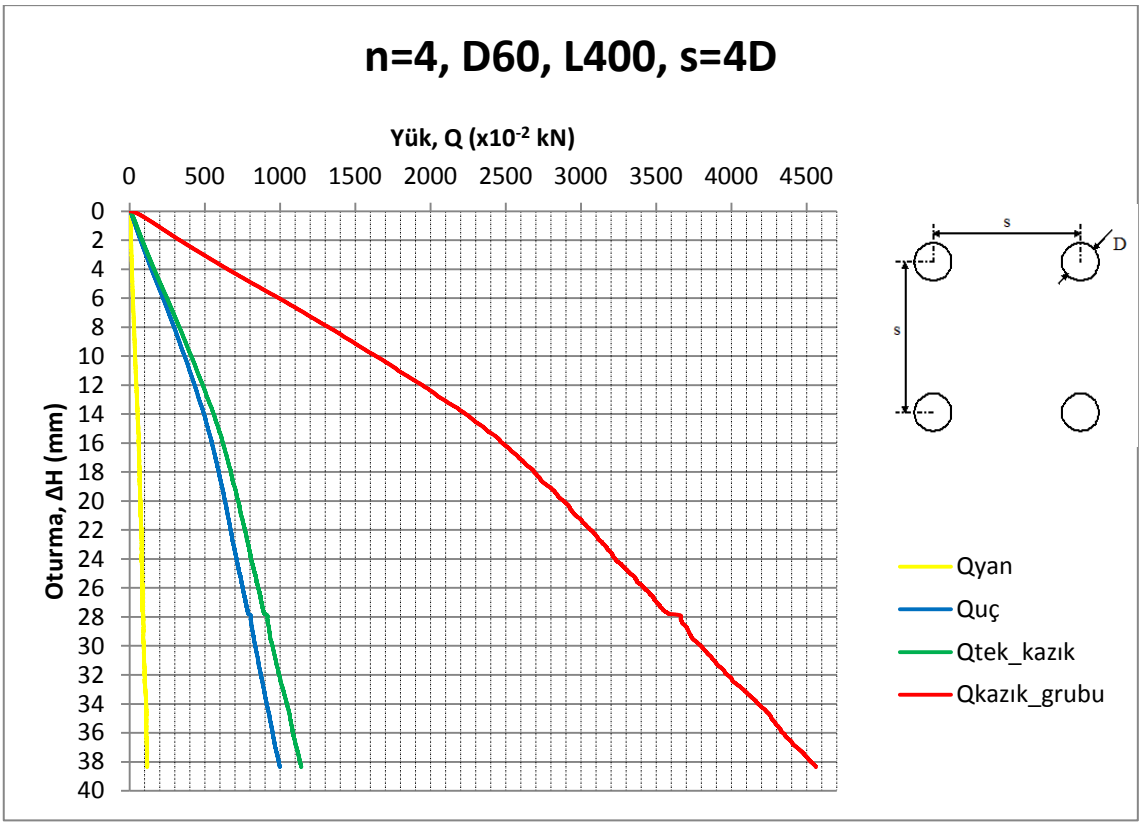


(a)

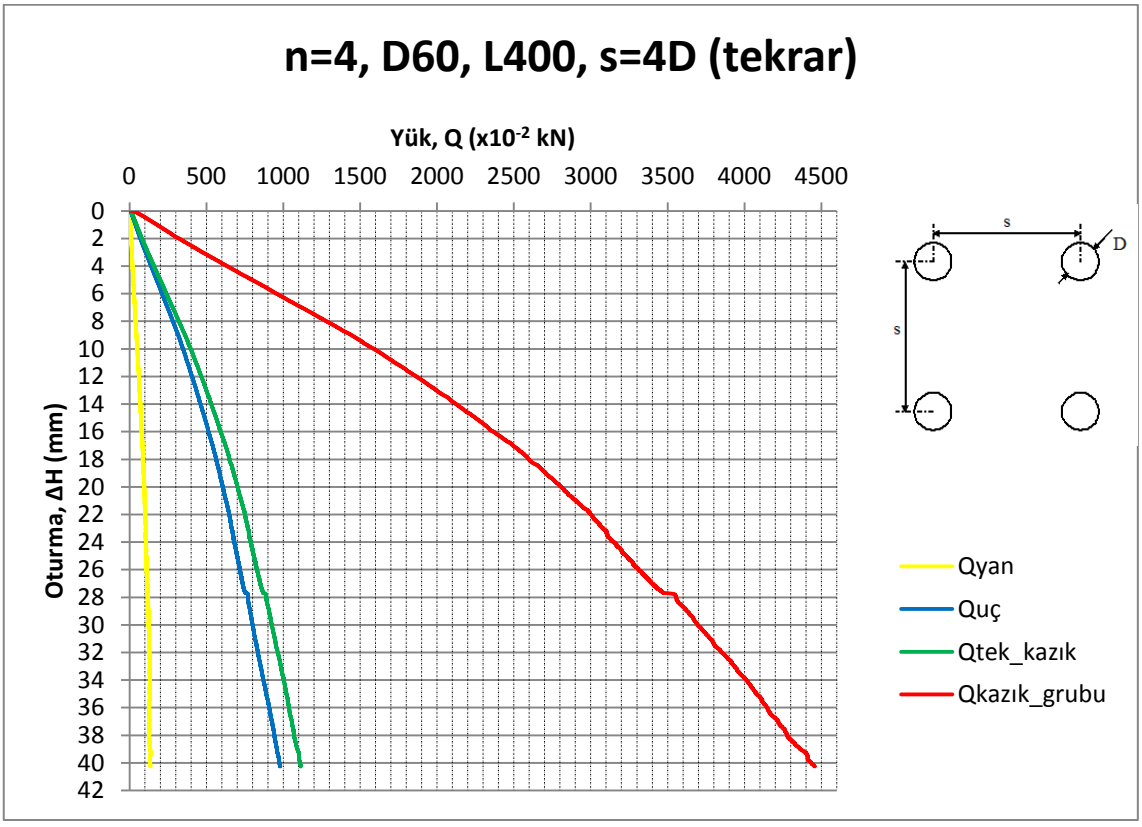


(b)

Şekil Ek 4.6. D=60 mm, L=400 mm ve s=3D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

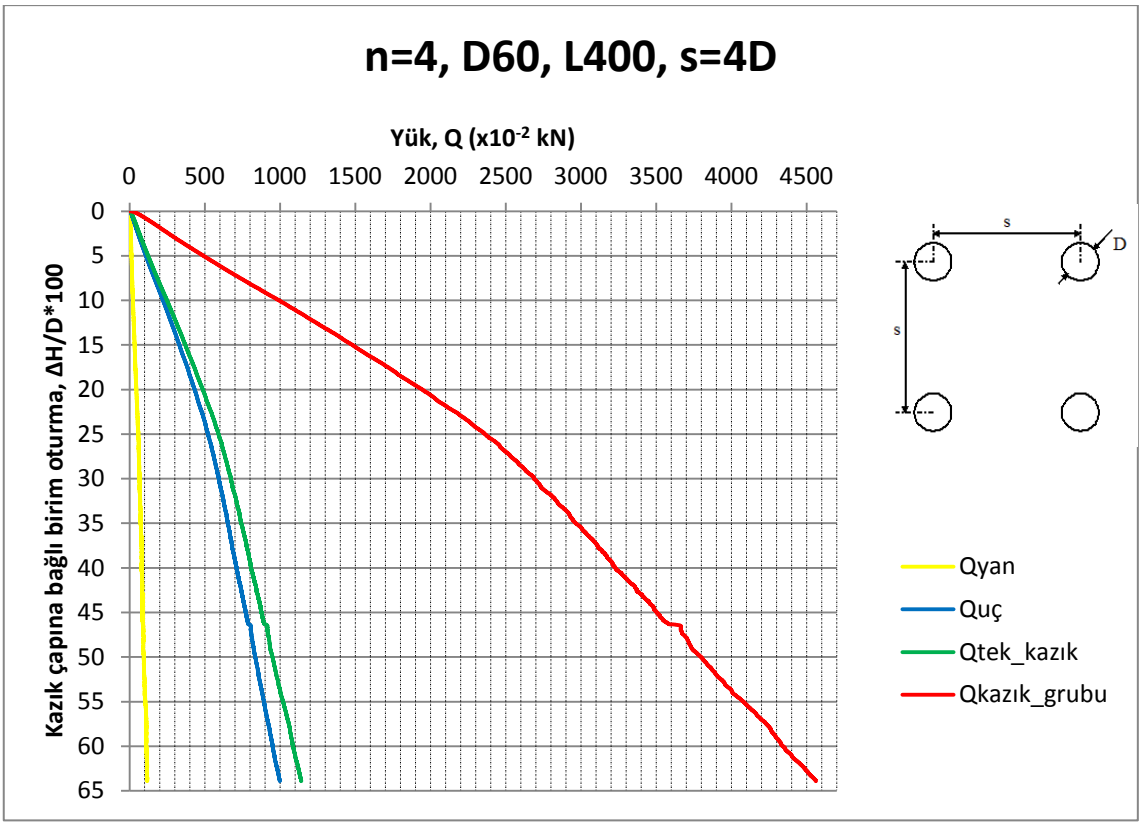


(a)

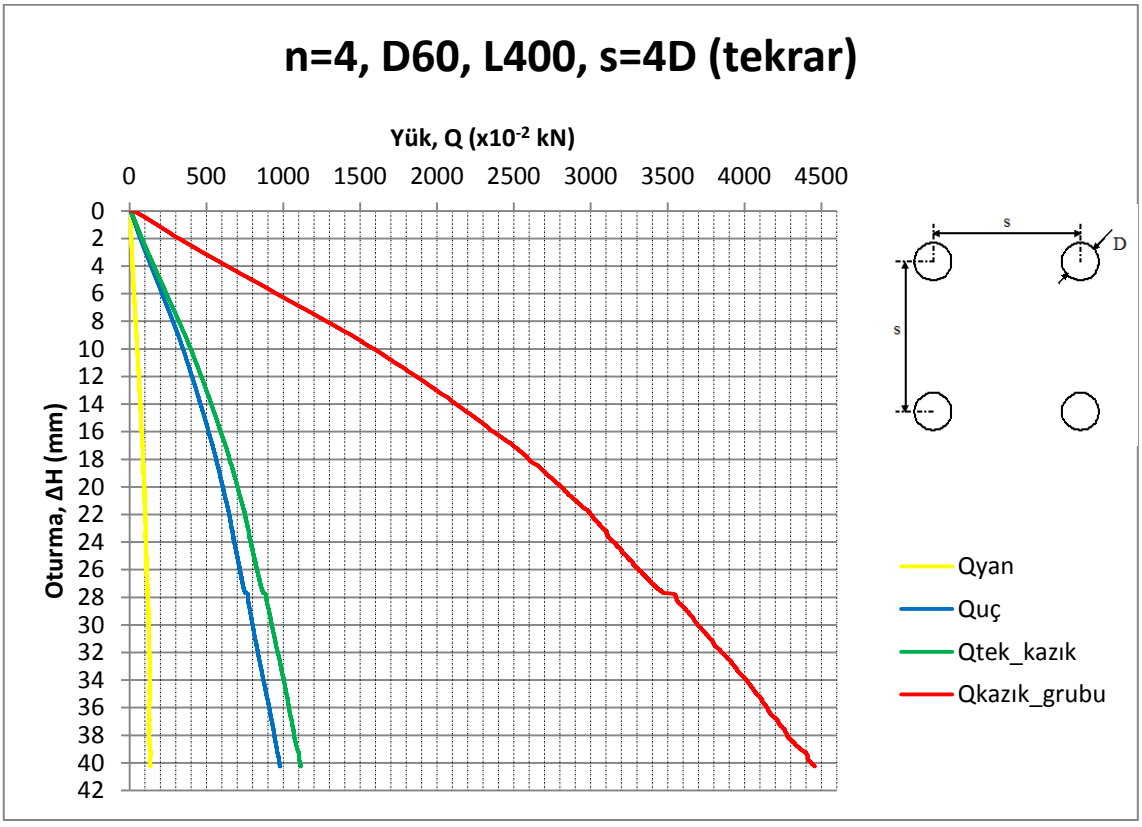


(b)

Şekil Ek 4.7. D=60 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-oturma grafikleri

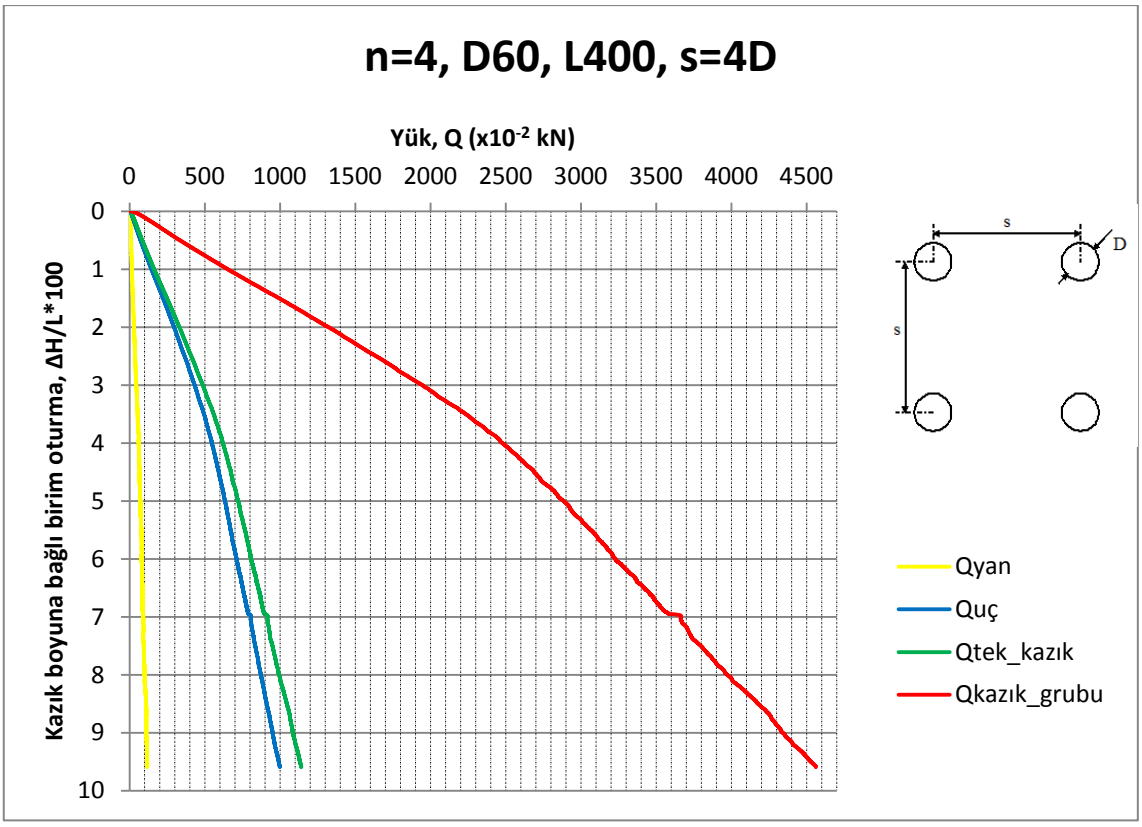


(a)

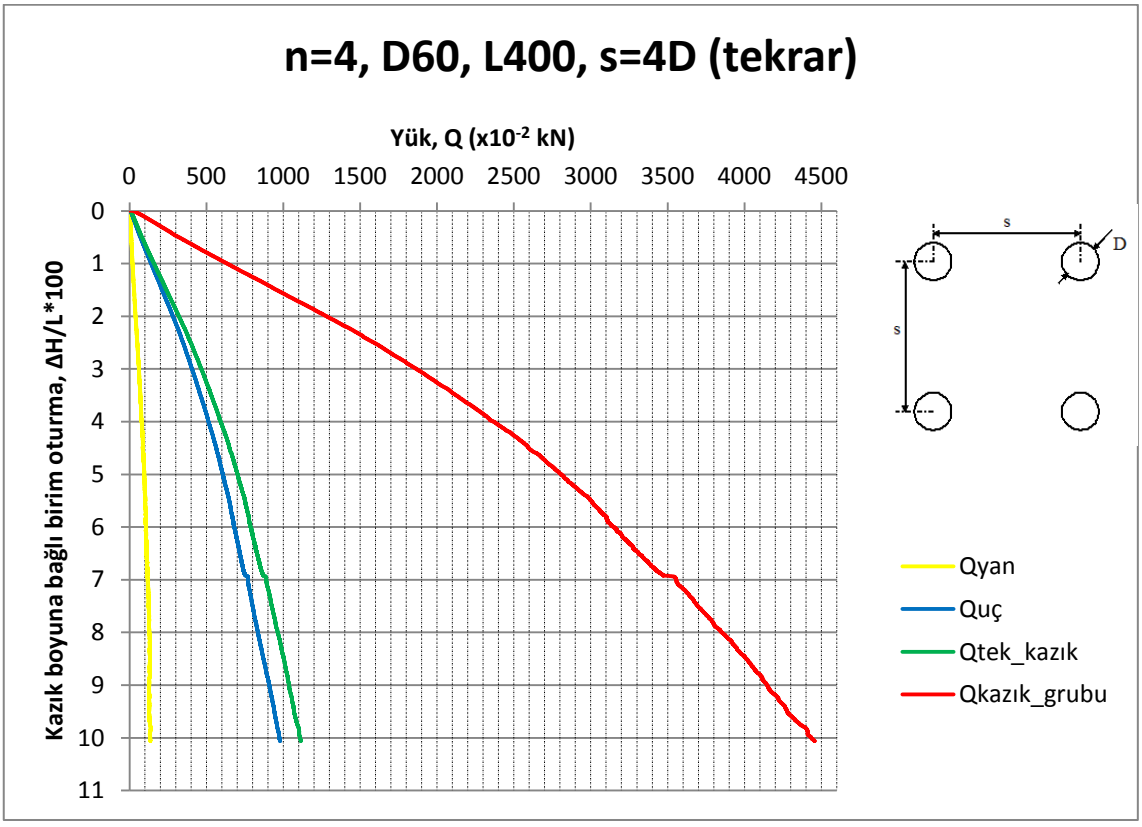


(b)

Şekil Ek 4.8. D=60 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri



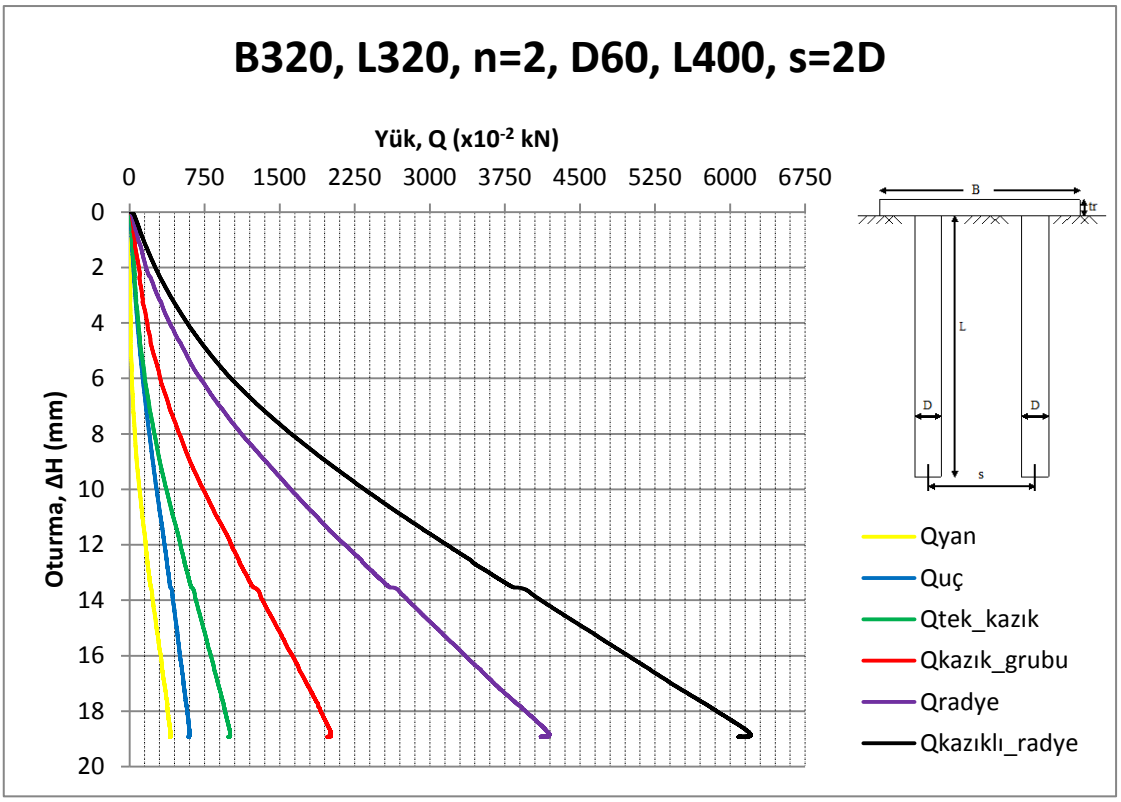
(a)



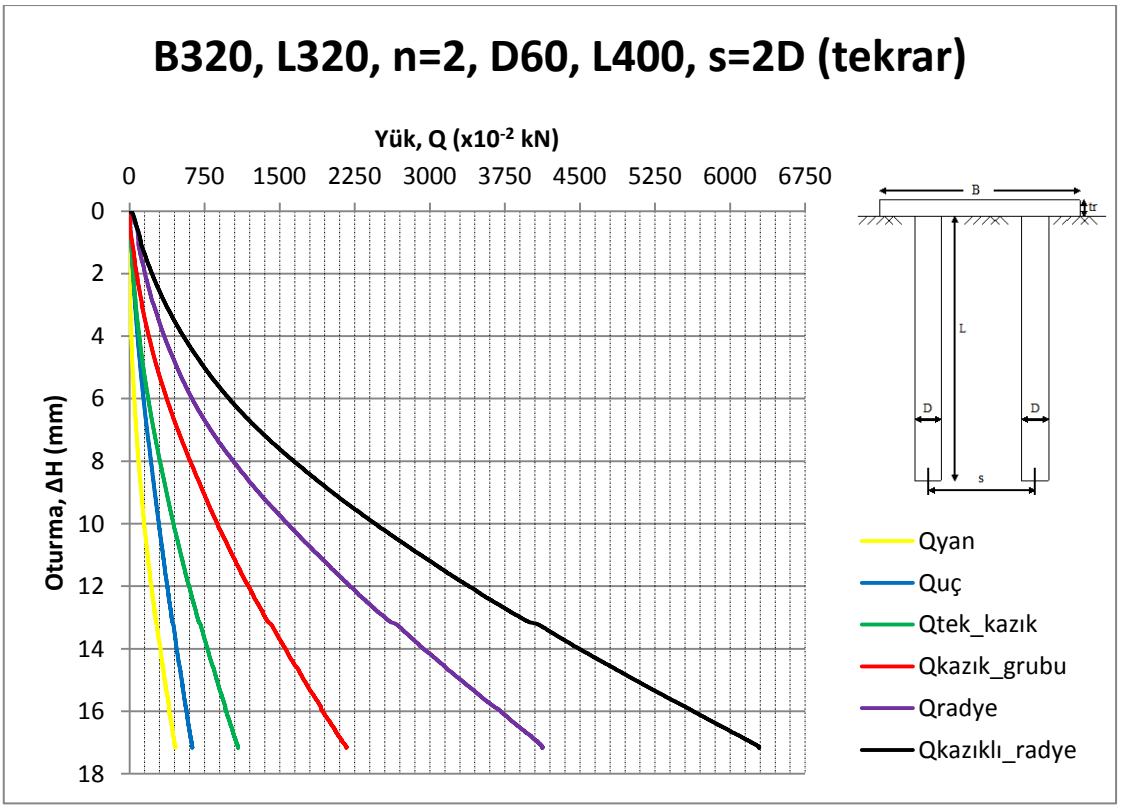
(b)

Şekil Ek 4.9. D=60 mm, L=400 mm ve s=4D kazık grubuna ait yük-birim oturma grafikleri

Ek 5. Radye Temel Altına 2 Kazık Uygulaması—Yükleme Deneyi Sonuçları

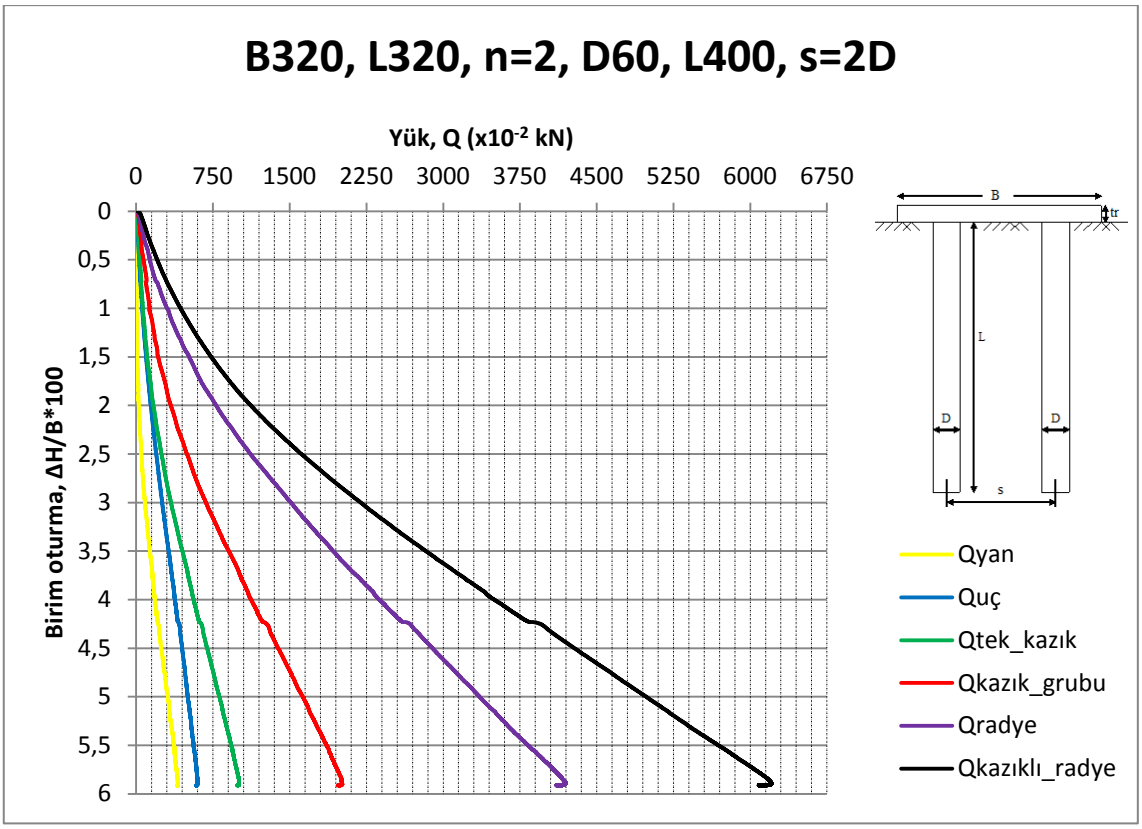


(a)

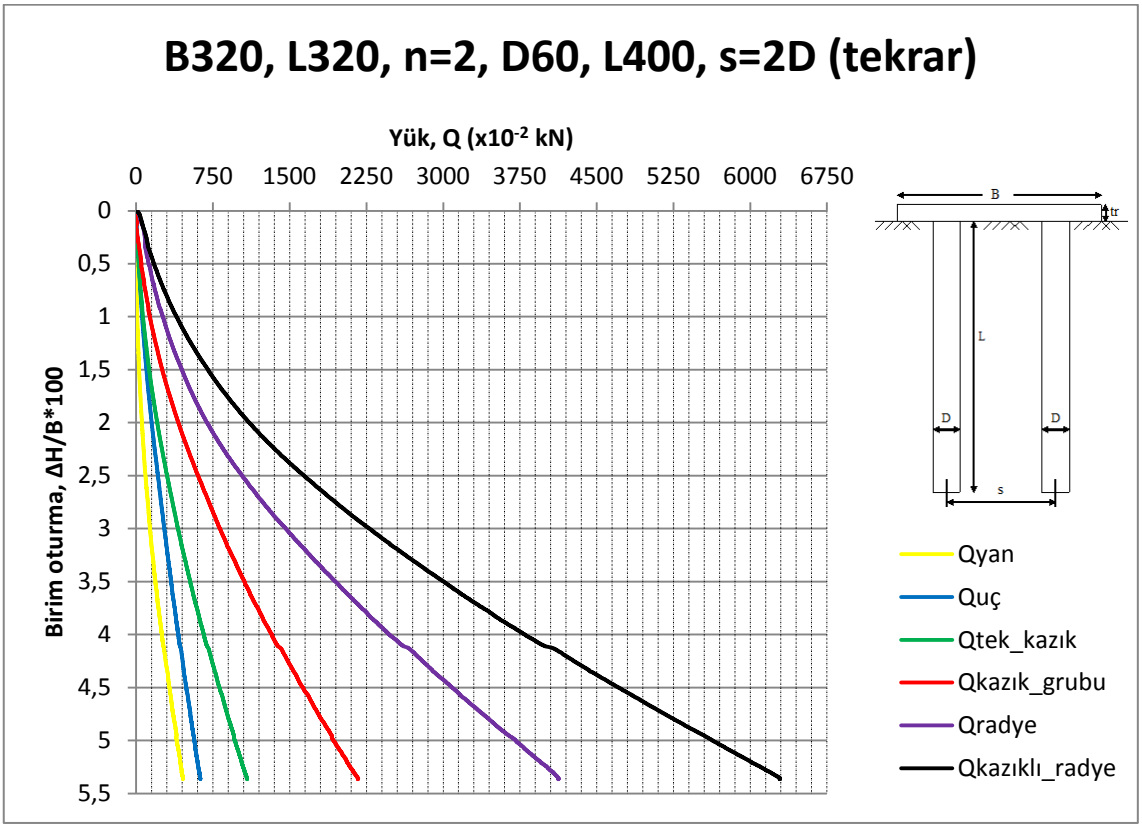


(b)

Şekil Ek 5.1. Radye temel altına 2 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafikleri

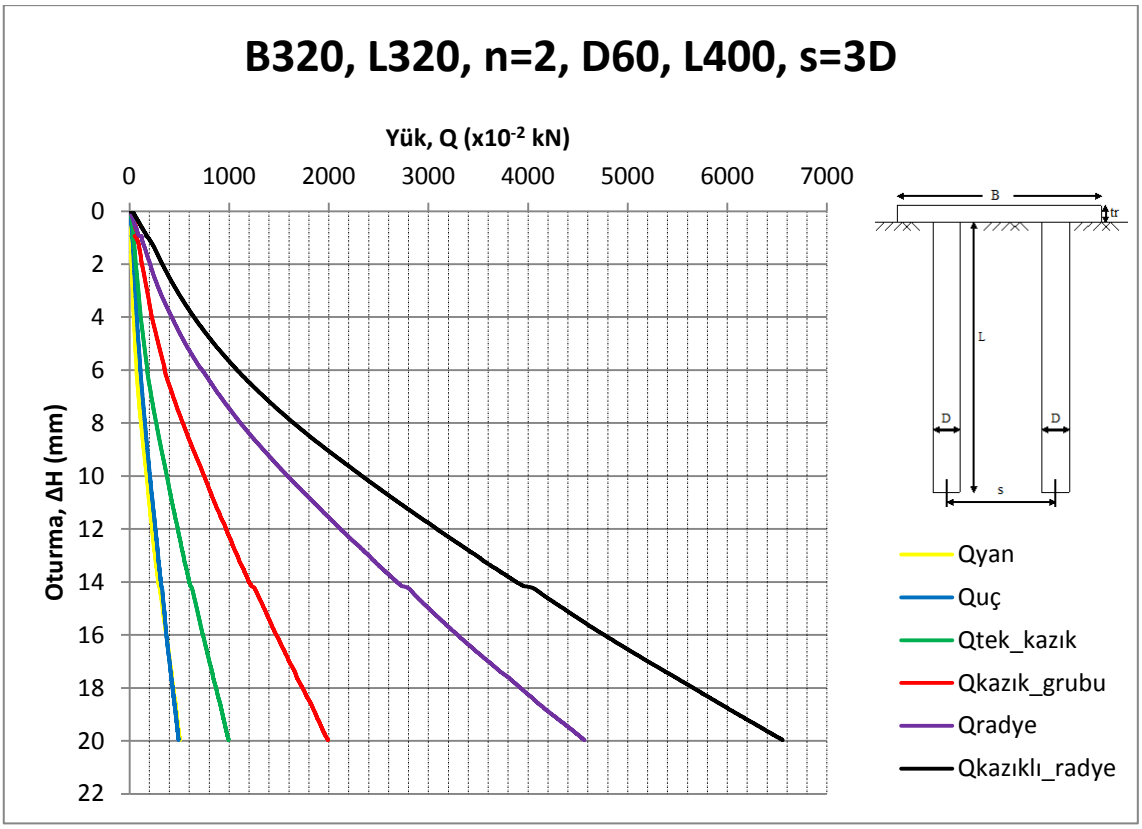


(a)

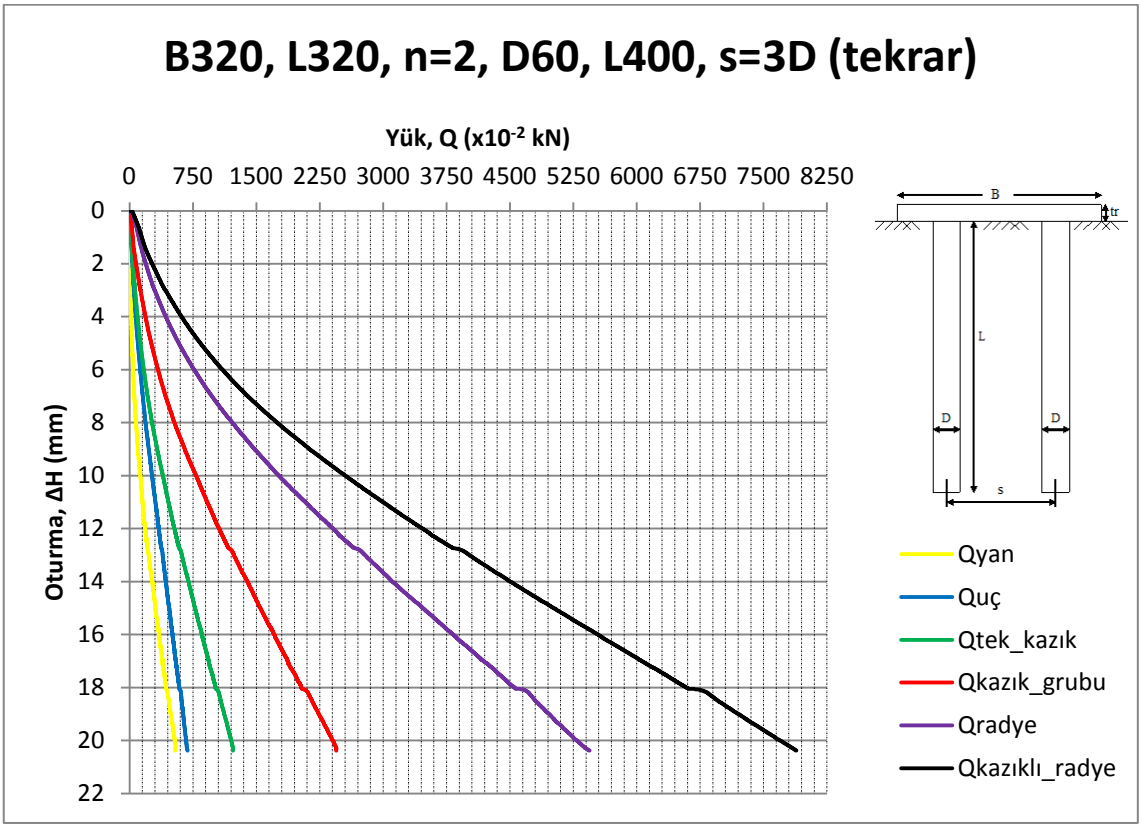


(b)

Şekil Ek 5.2. Radye temel altına 2 kazık uygulamasına ait yük-birim oturma grafikleri

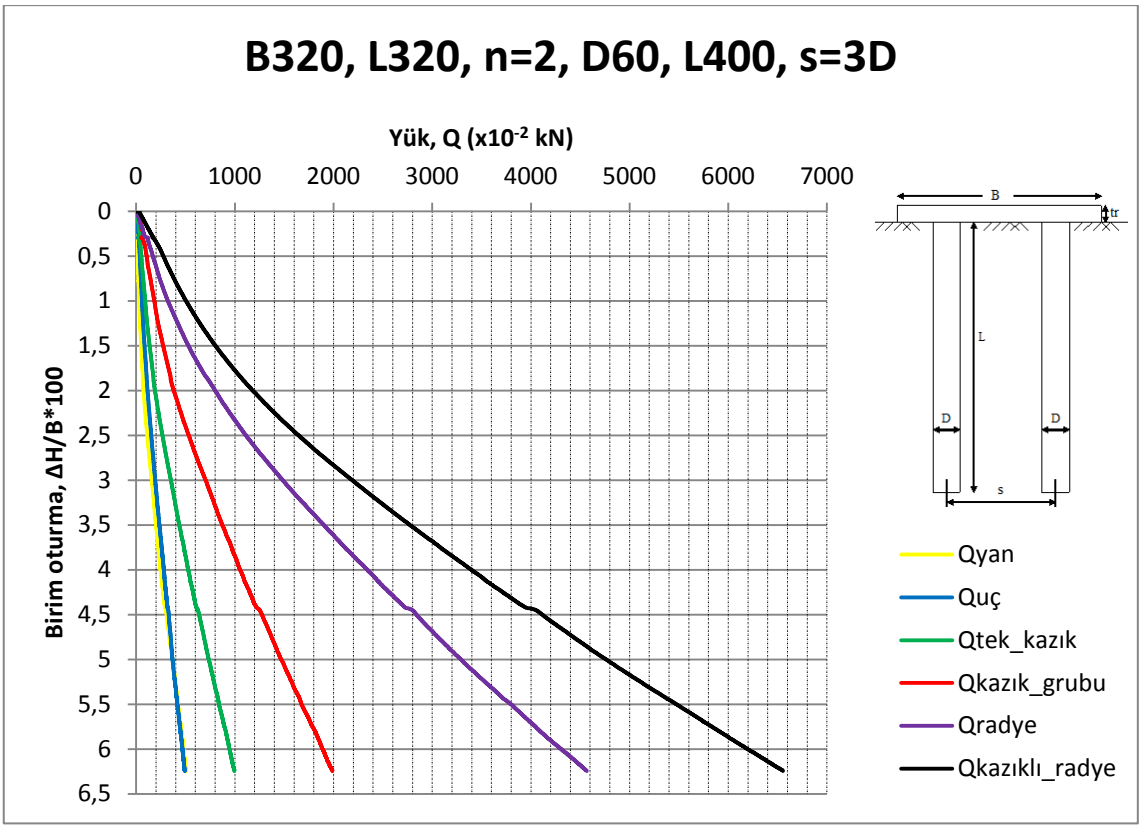


(a)

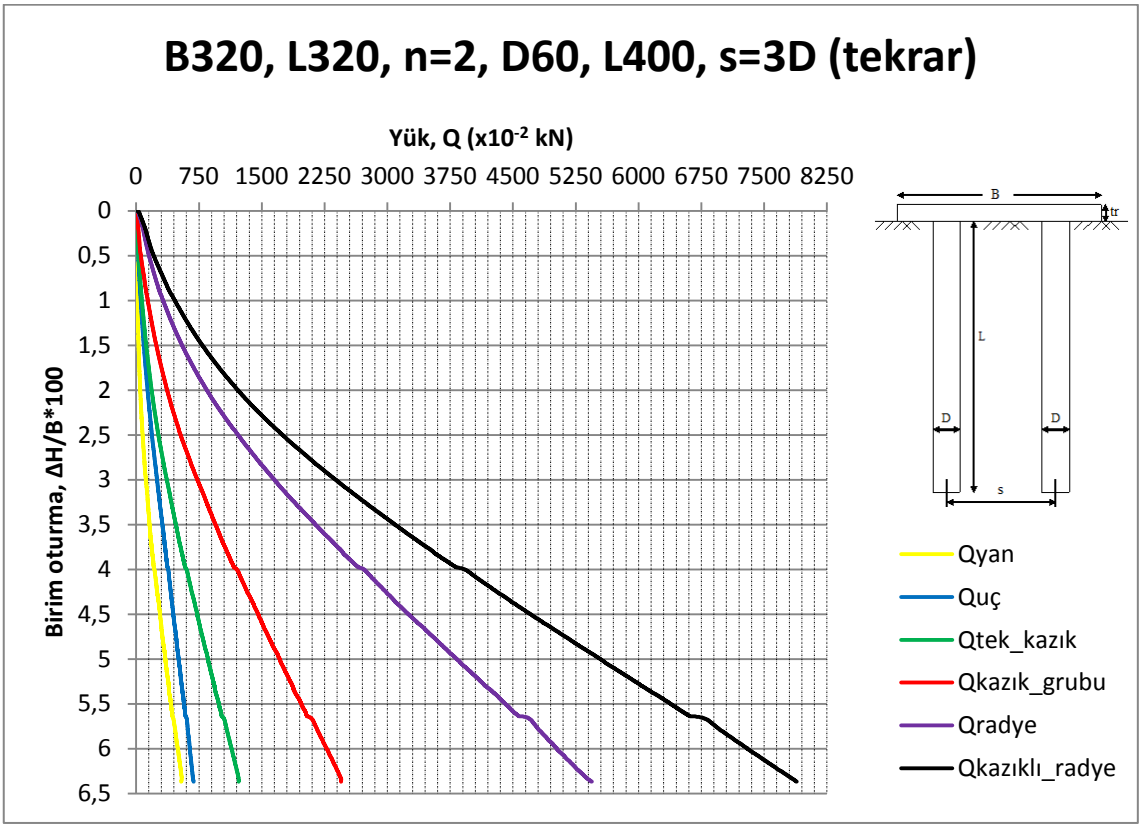


(b)

Şekil Ek 5.3. Radye temel altına 2 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafikleri

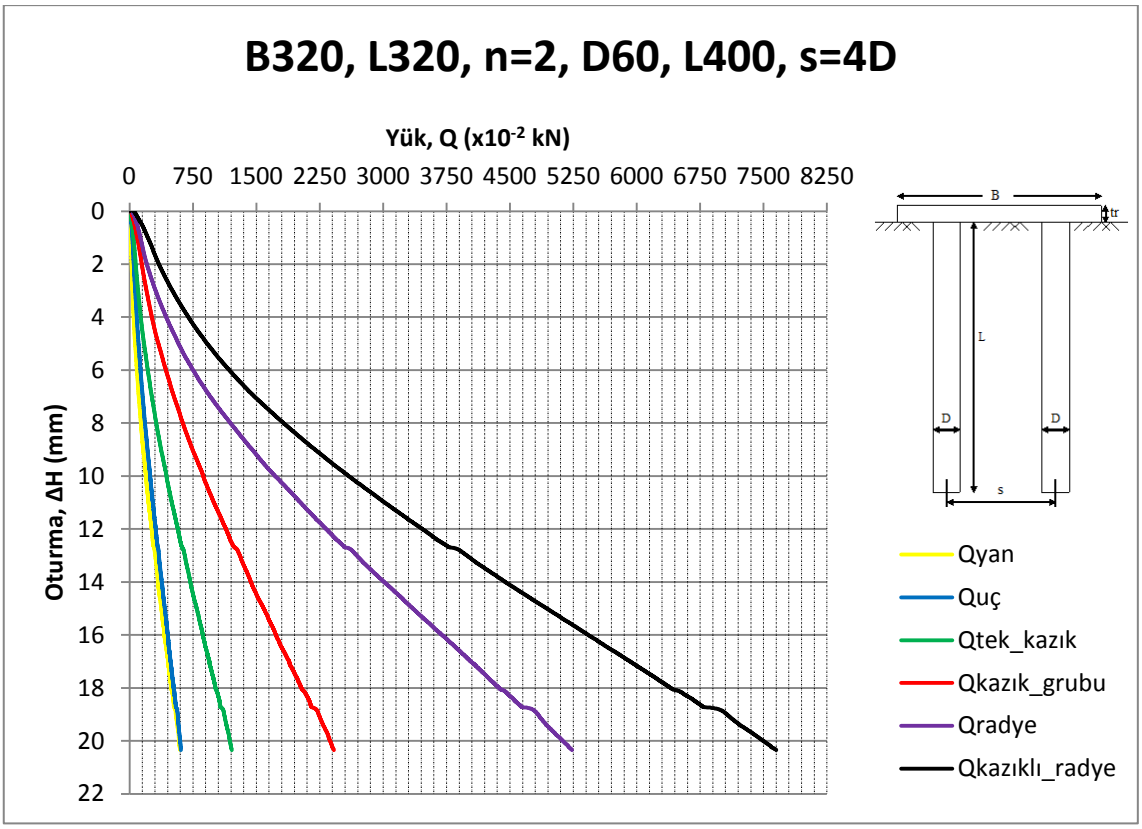


(a)

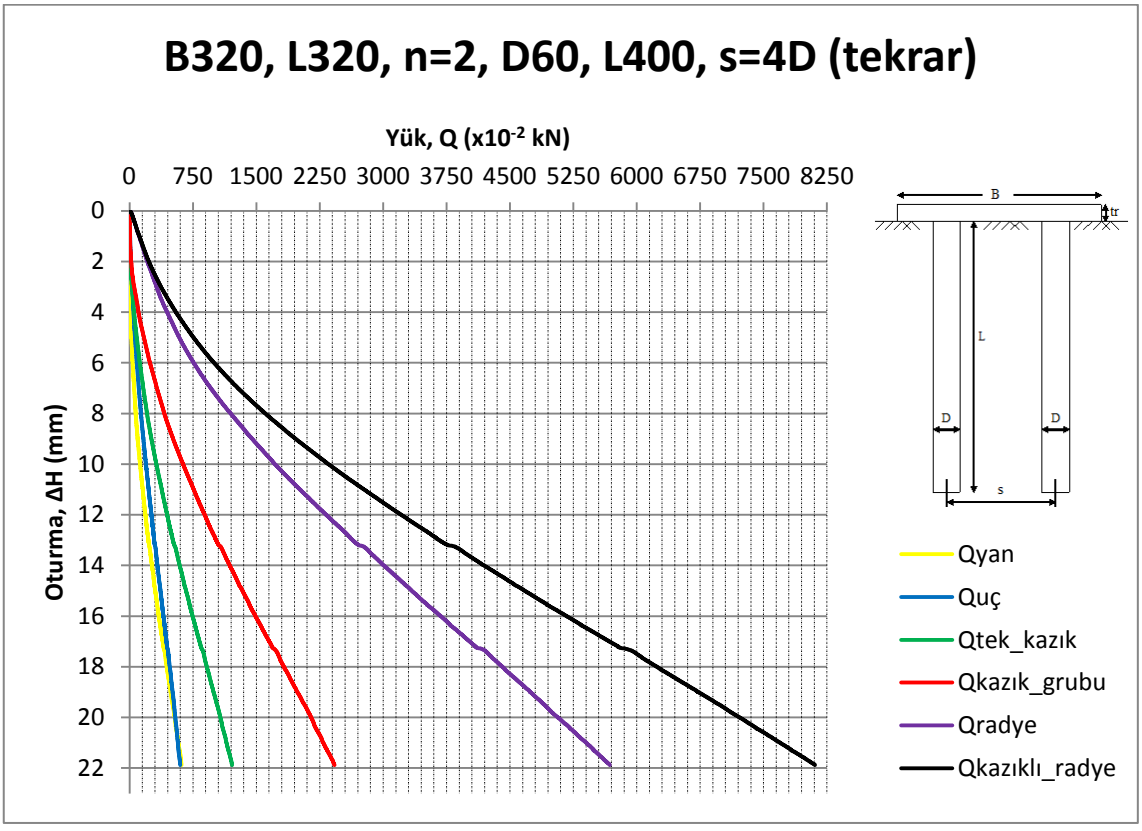


(b)

Şekil Ek 5.4. Radye temel altına 2 kazık uygulamasına ait yük-birim oturma grafikleri

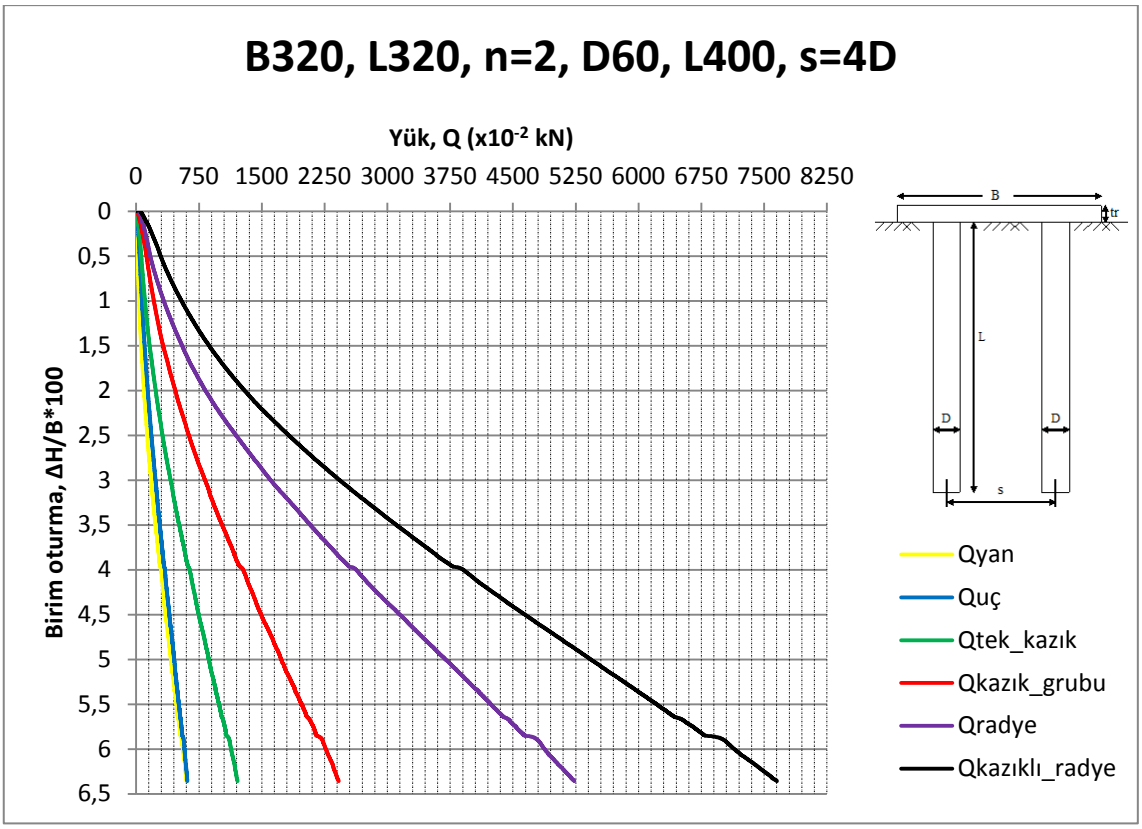


(a)

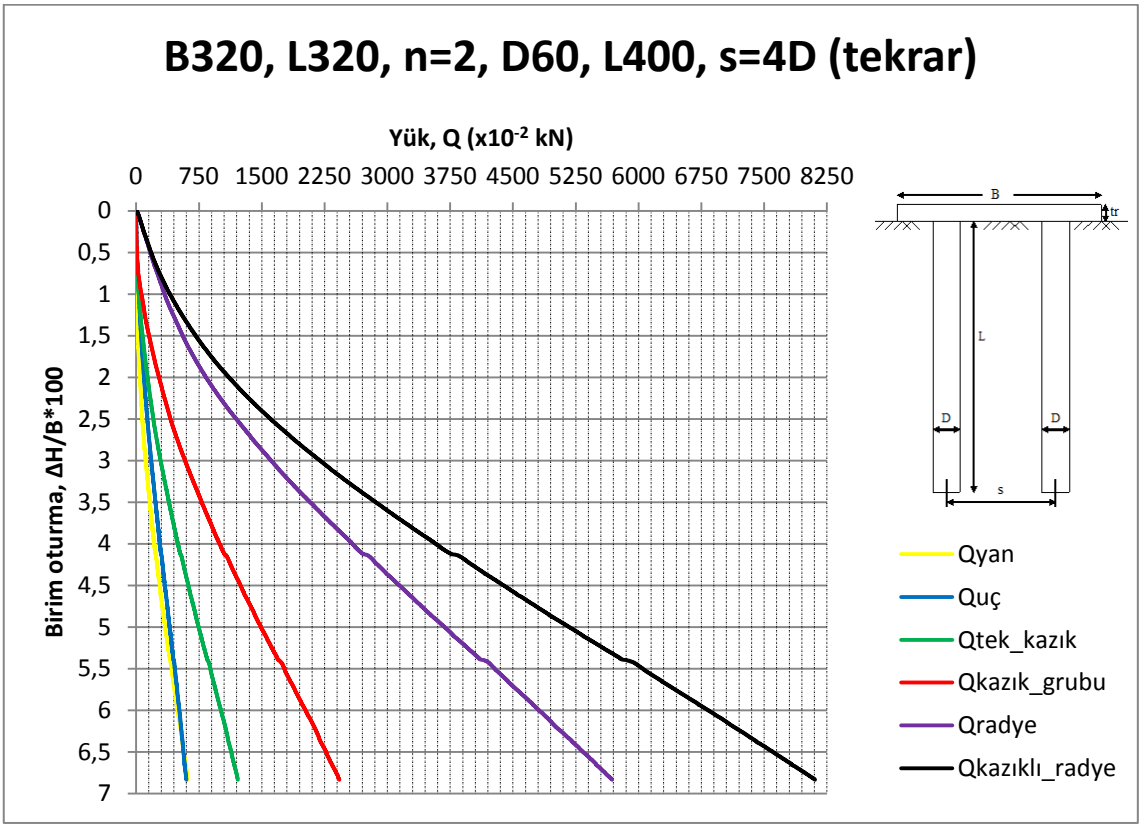


(b)

Şekil Ek 5.5. Radye temel altına 2 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafikleri



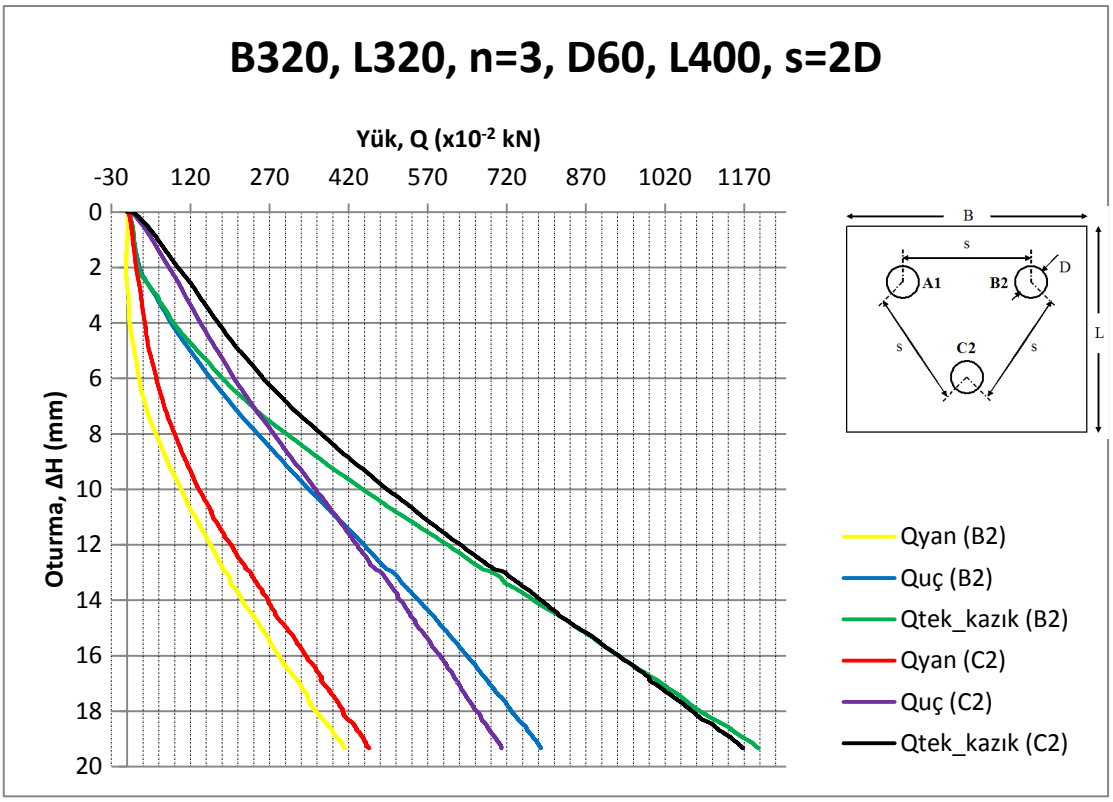
(a)



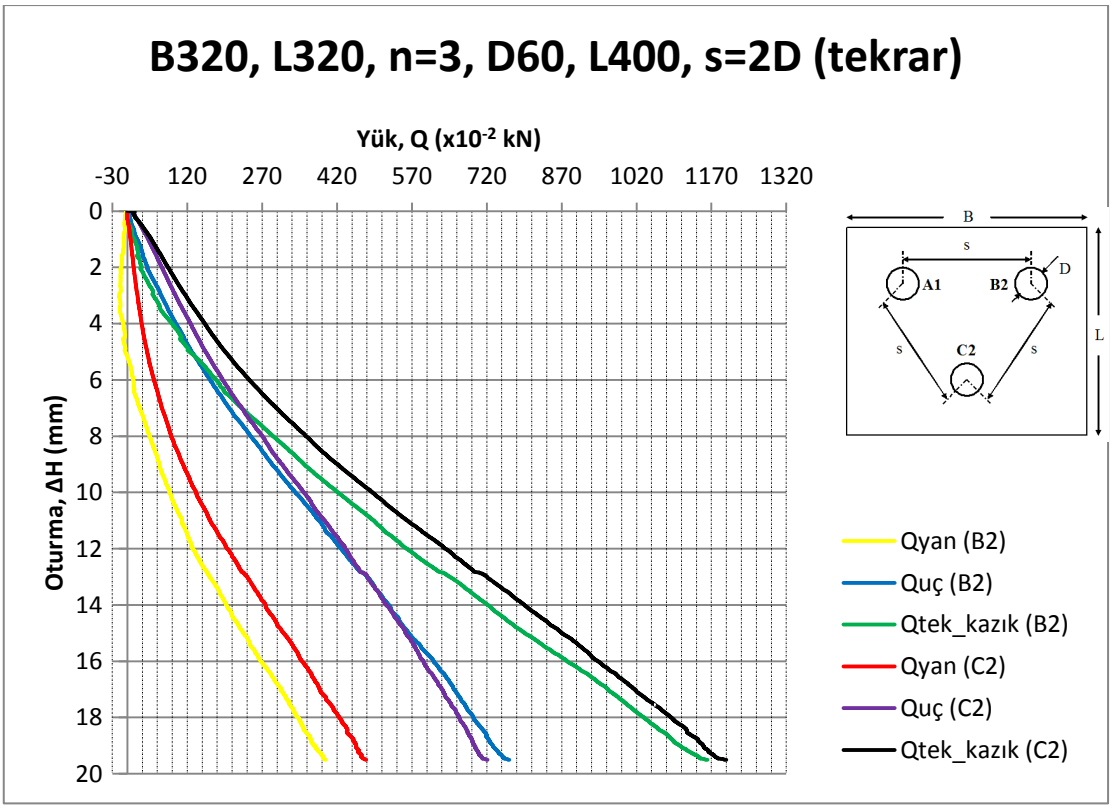
(b)

Şekil Ek 5.6. Radye temel altına 2 kazık uygulamasına ait yük-birim oturma grafikleri

Ek 6. Radye Temel Altına 3 Kazık Uygulaması—Yükleme Deneyi Sonuçları

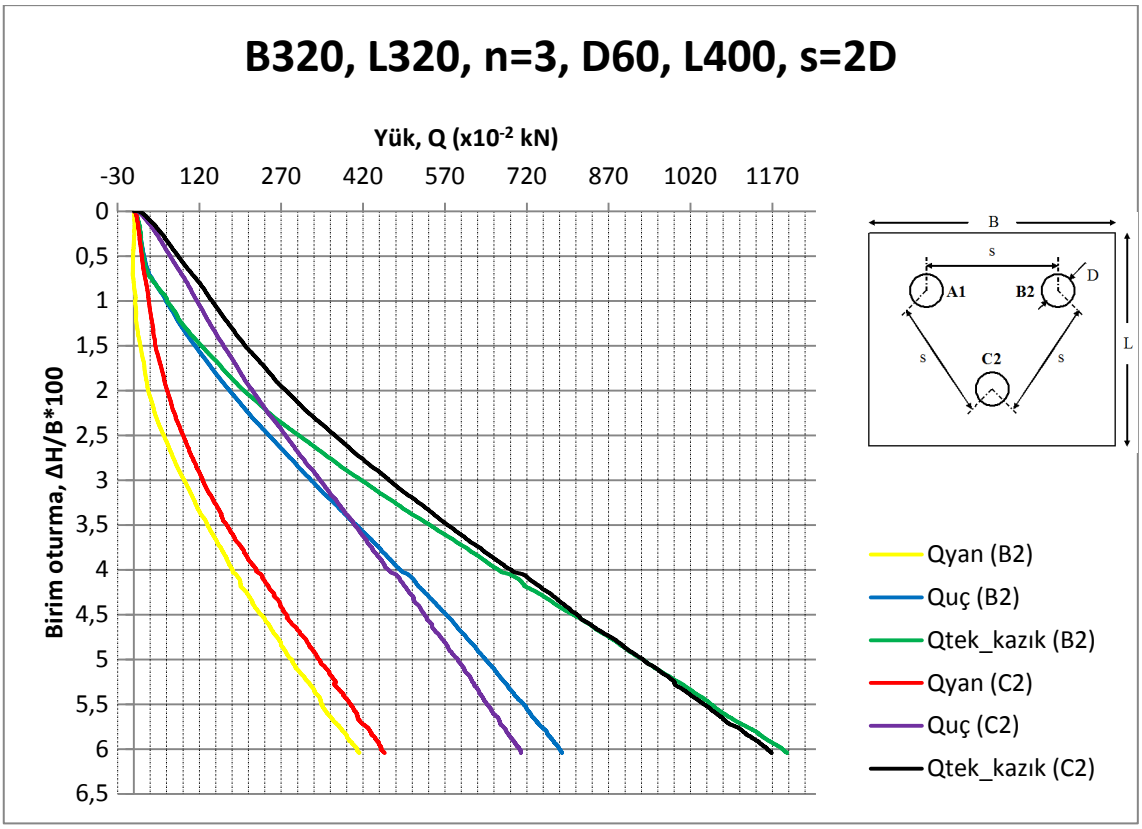


(a)

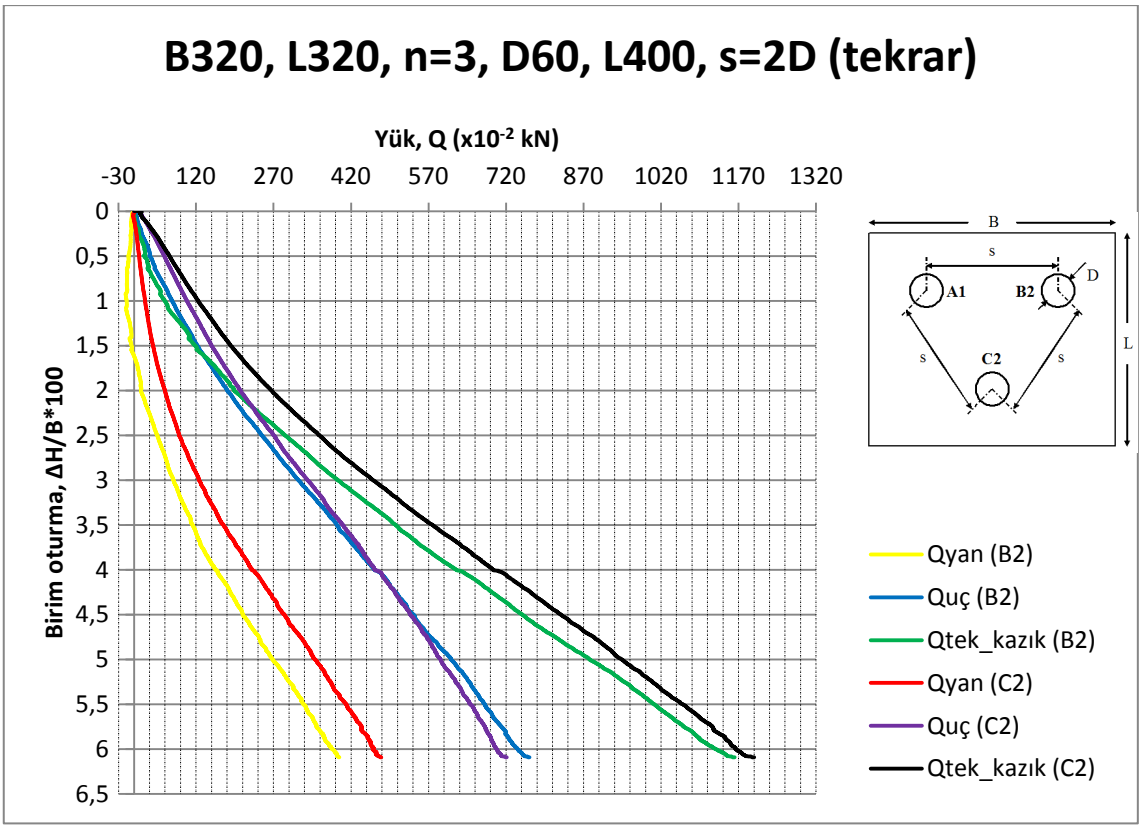


(b)

Şekil Ek 6.1. Radye temel altına 3 kazık uygulaması—B2 ve C2 kazıklarına ait yük-oturma grafikleri

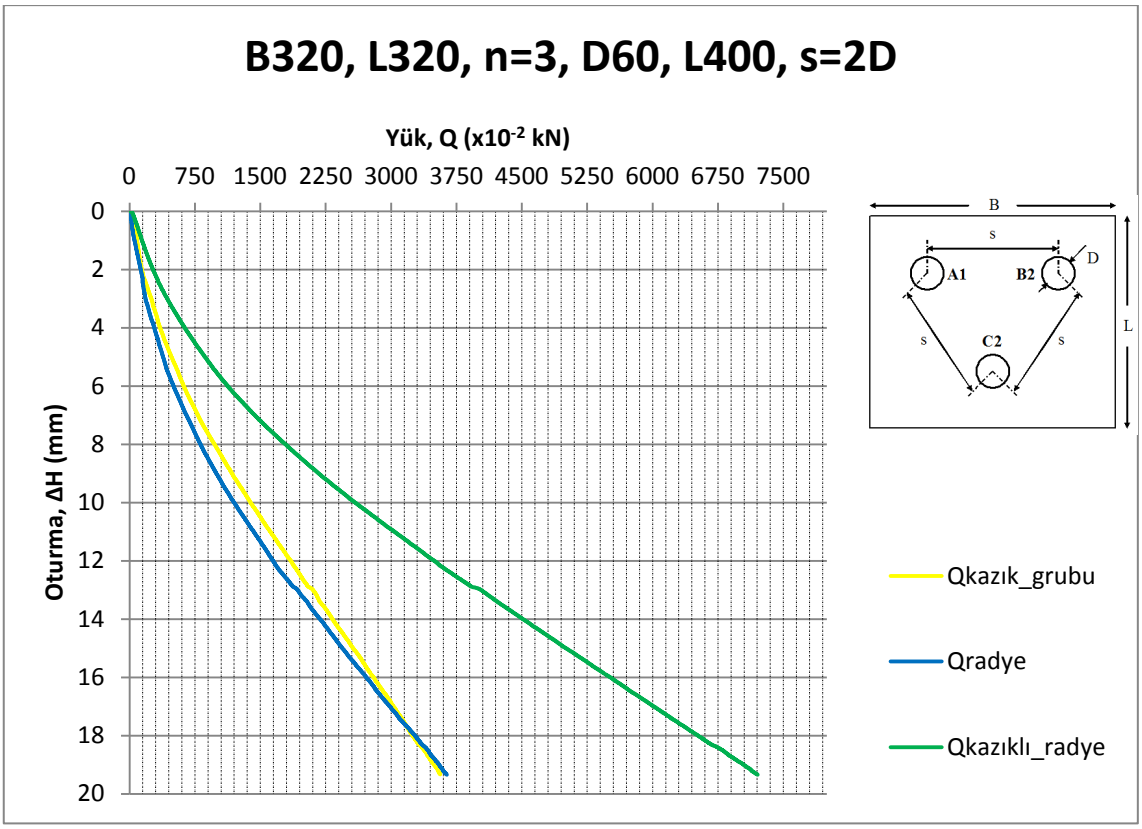


(a)

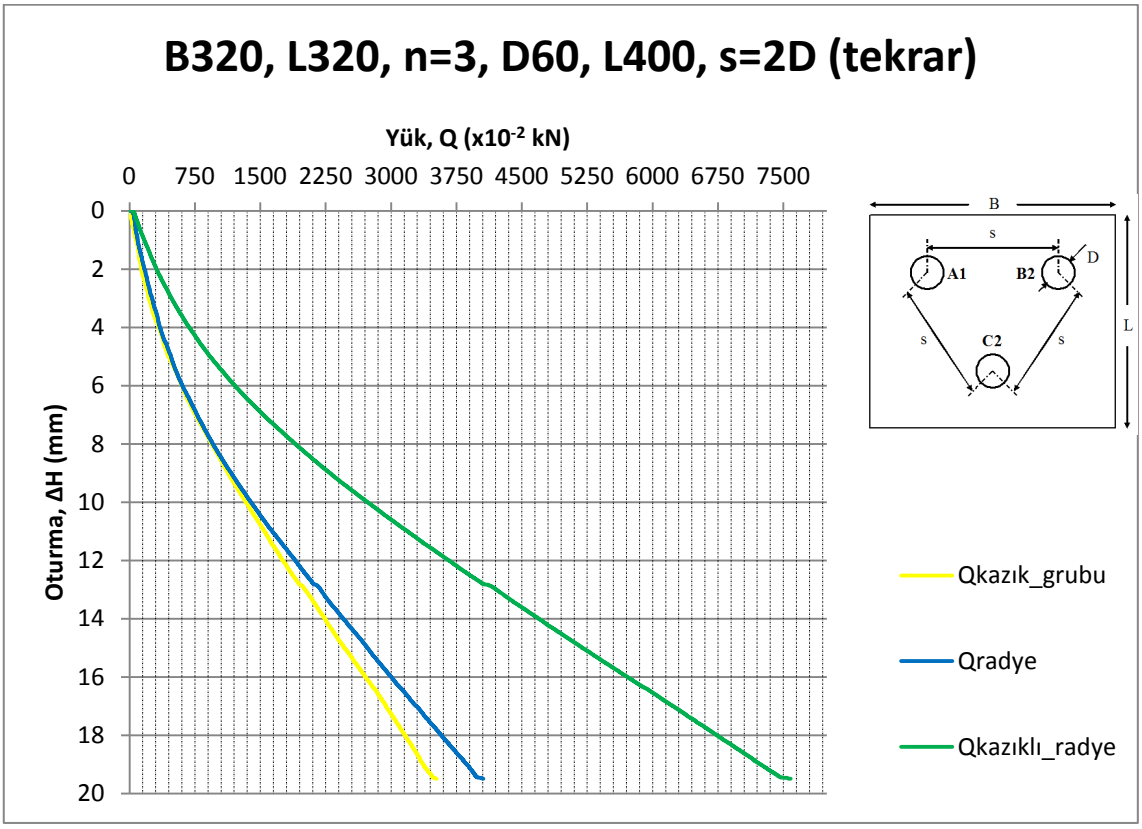


(b)

Şekil Ek 6.2. Radye temel altına 3 kazık uygulaması—B2 ve C2 kazıklarına ait yük-birim oturma grafikleri

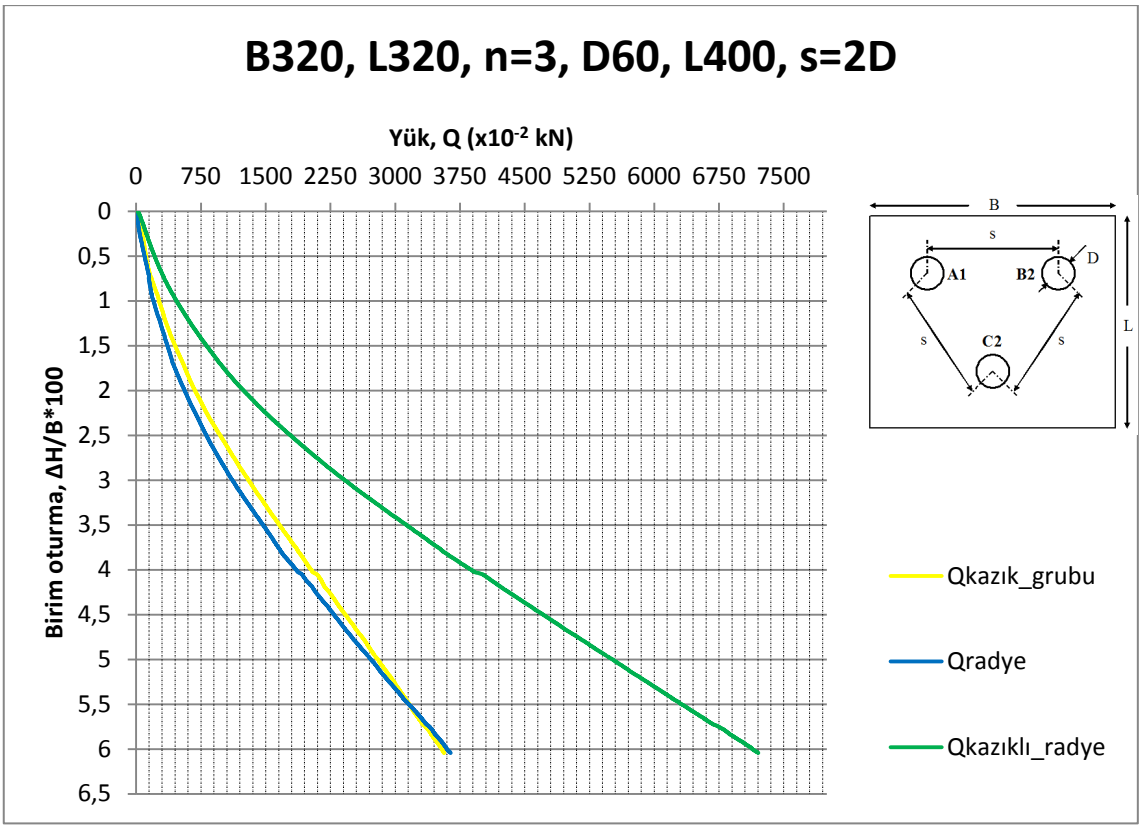


(a)

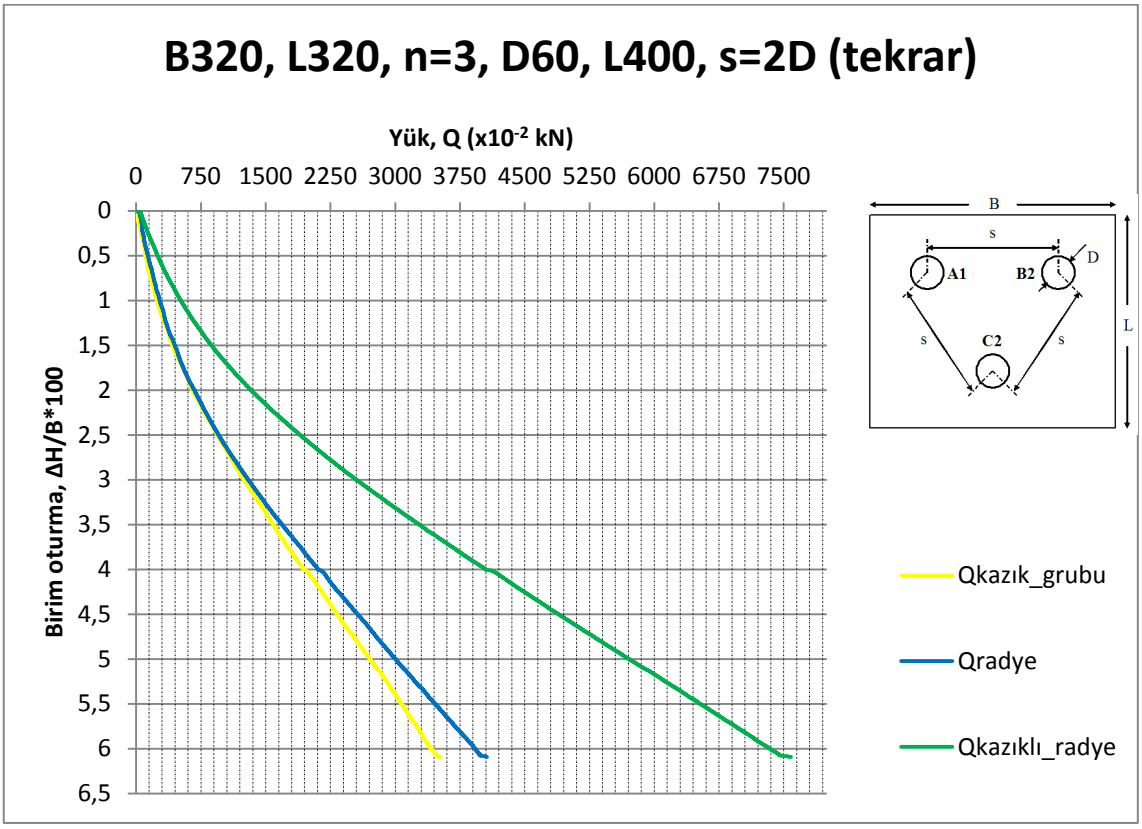


(b)

Şekil Ek 6.3. Radye temel altına 3 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafikleri

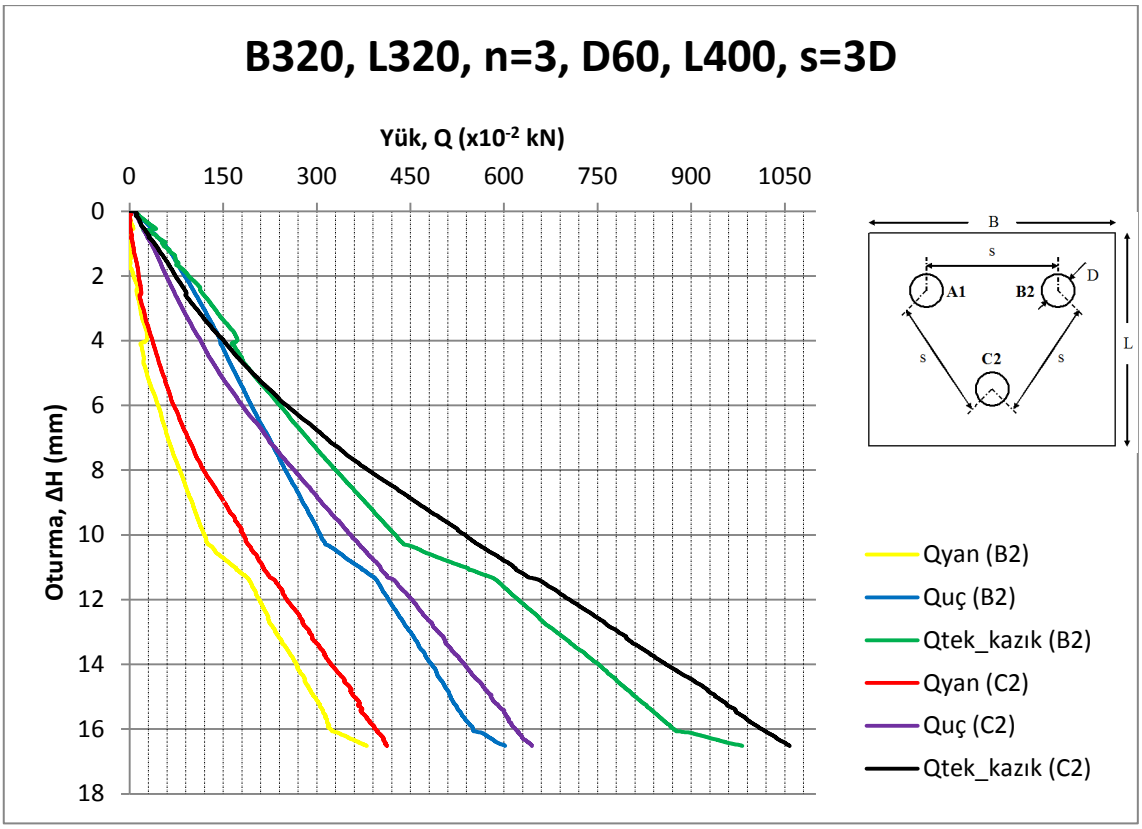


(a)

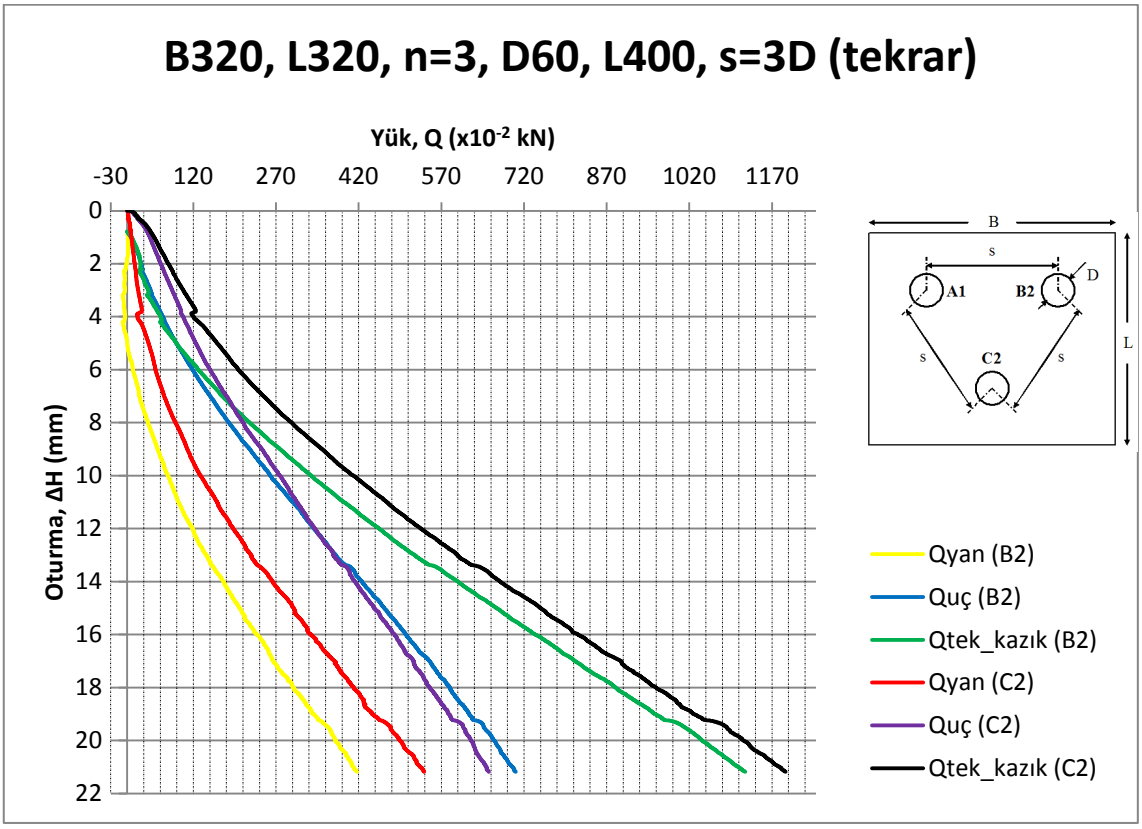


(b)

Şekil Ek 6.4. Radye temel altına 3 kazık uygulamasına ait yük-birim oturma grafikleri

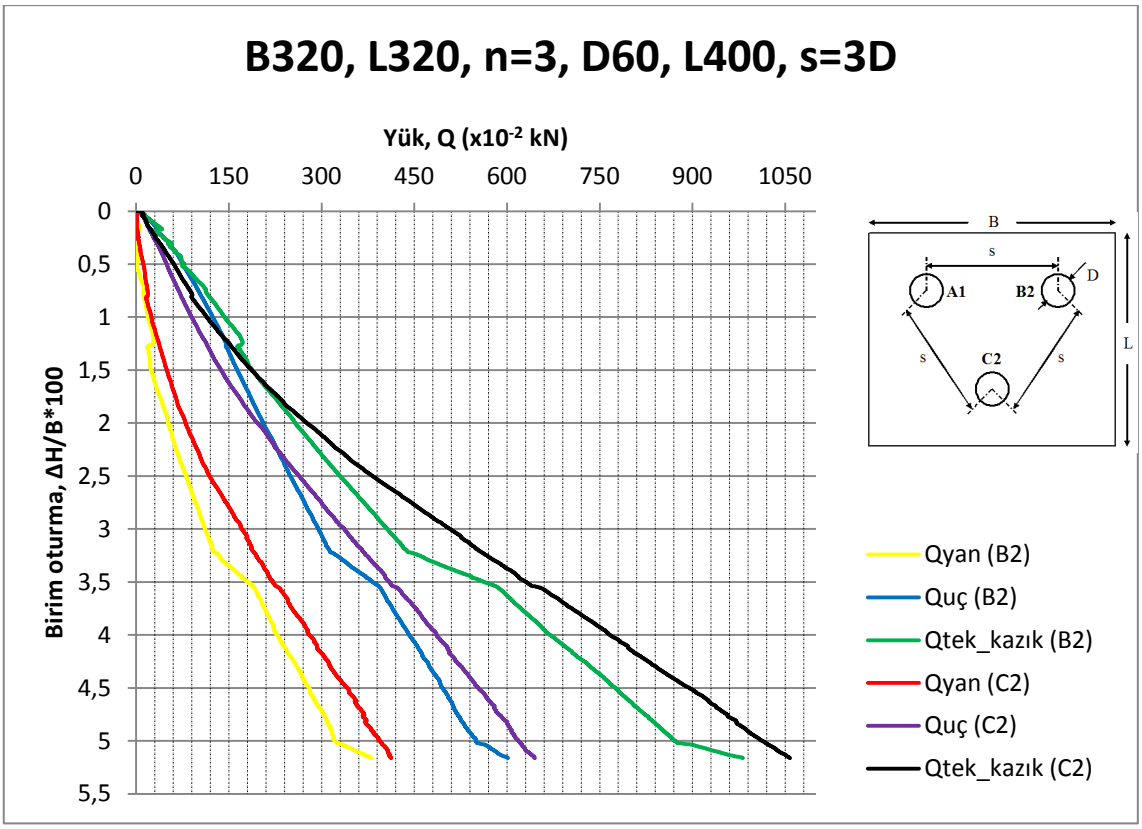


(a)

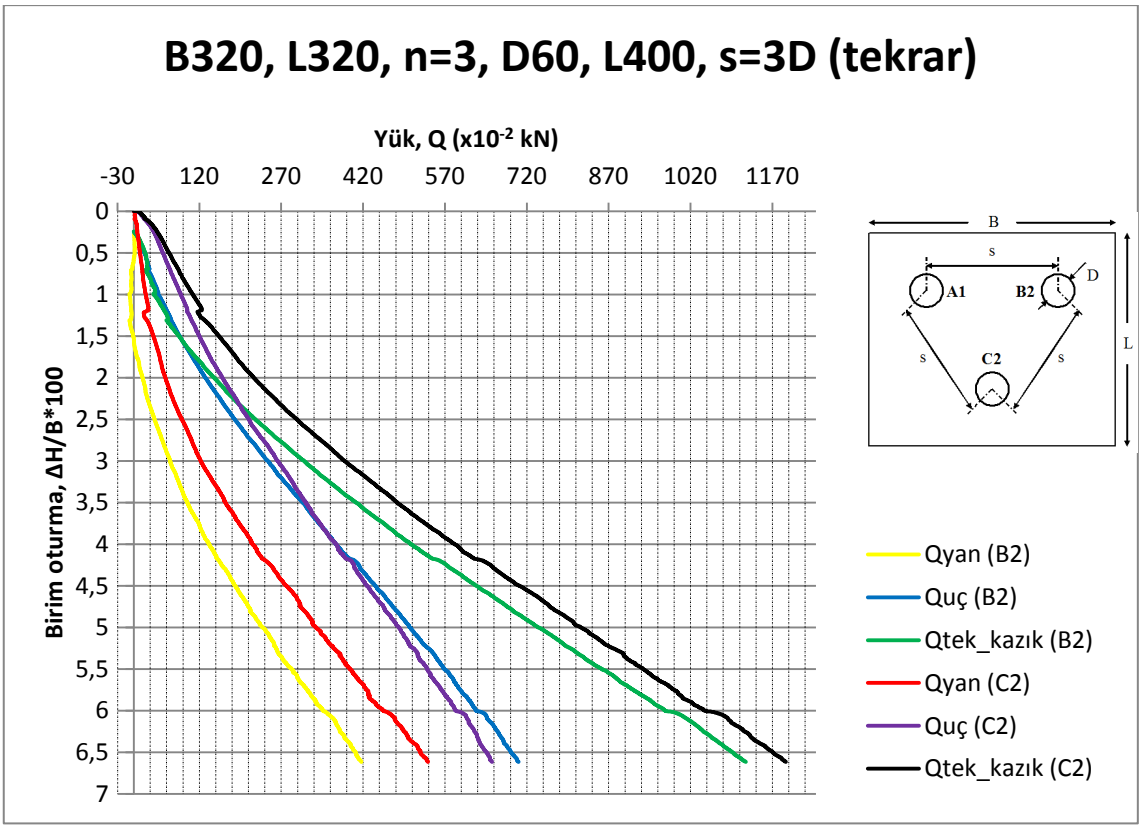


(b)

Şekil Ek 6.5. Radye temel altına 3 kazık uygulaması—B2 ve C2 kazıklarına ait yük-oturma grafikleri

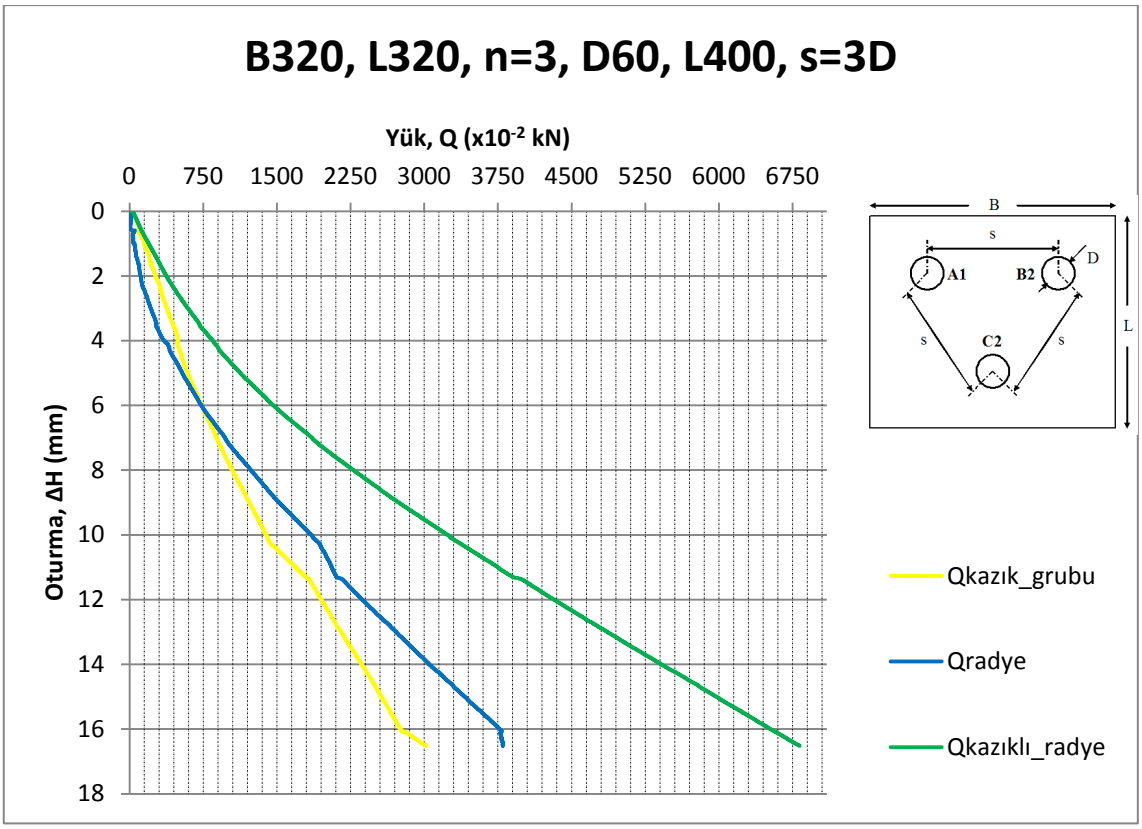


(a)

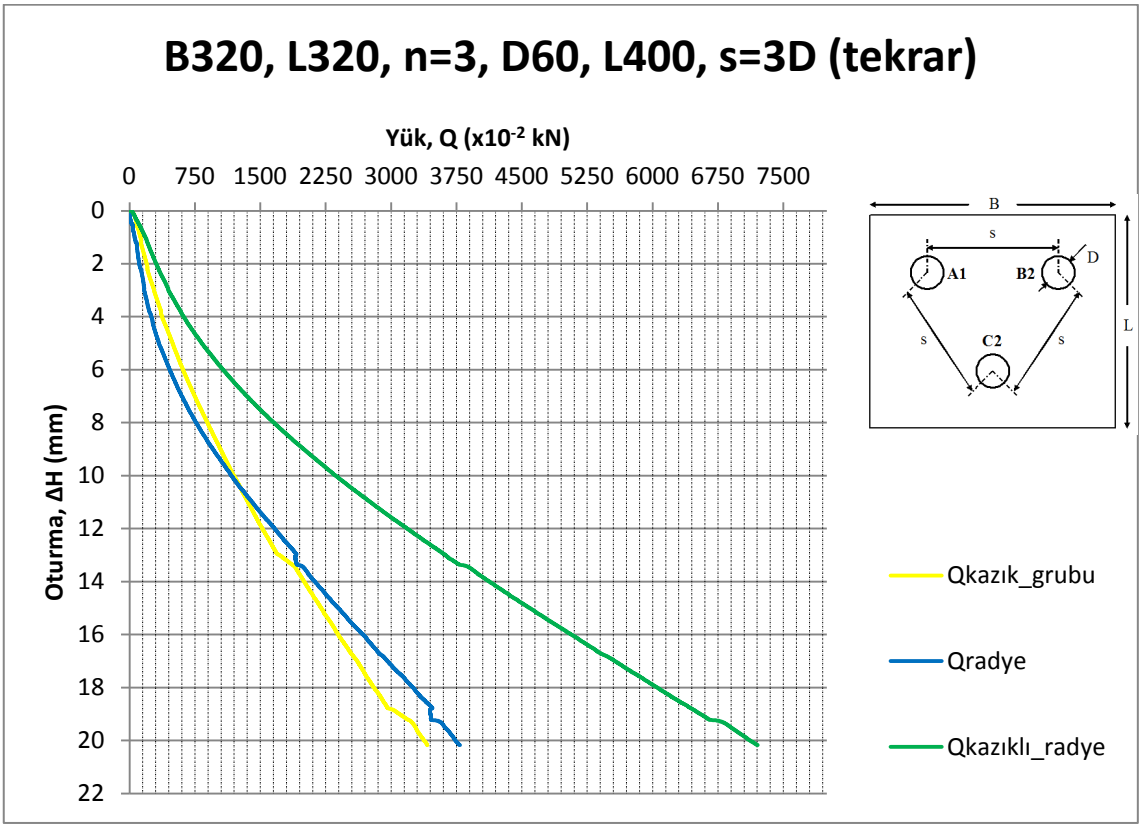


(b)

Şekil Ek 6.6. Radye temel altına 3 kazık uygulaması—B2 ve C2 kazıklarına ait yük-birim oturma grafikleri

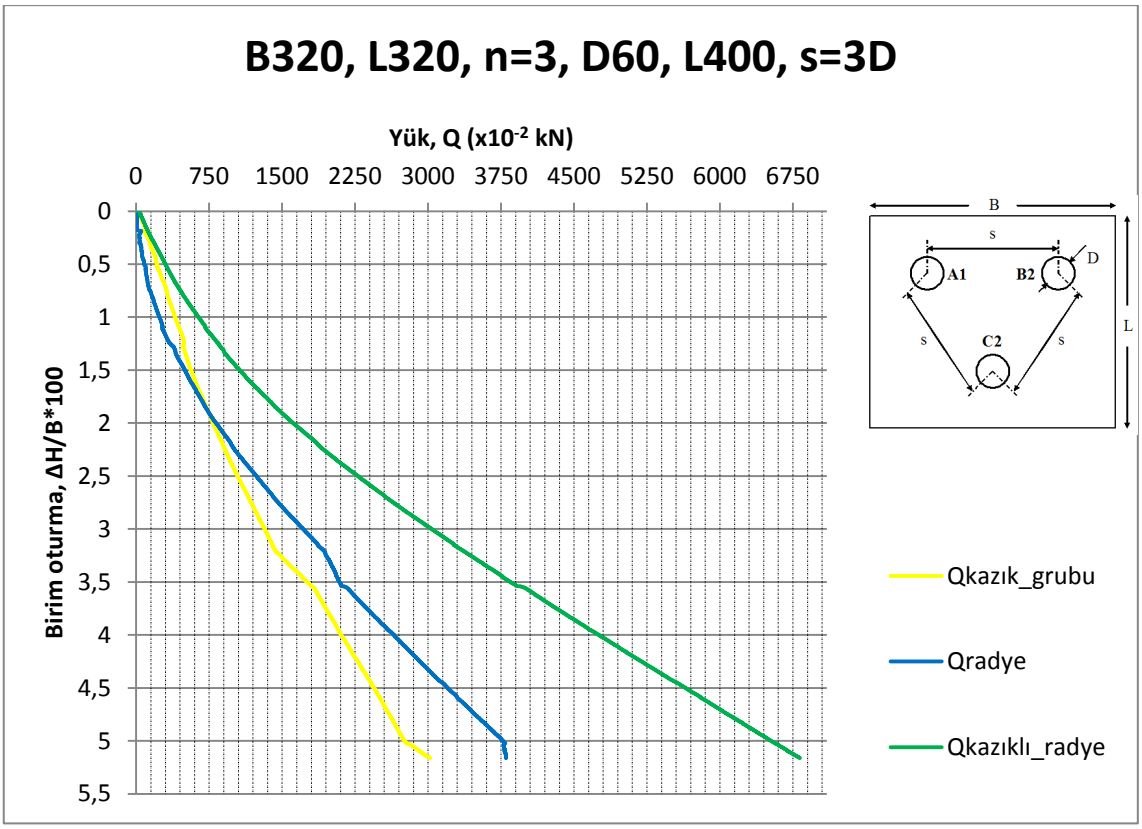


(a)

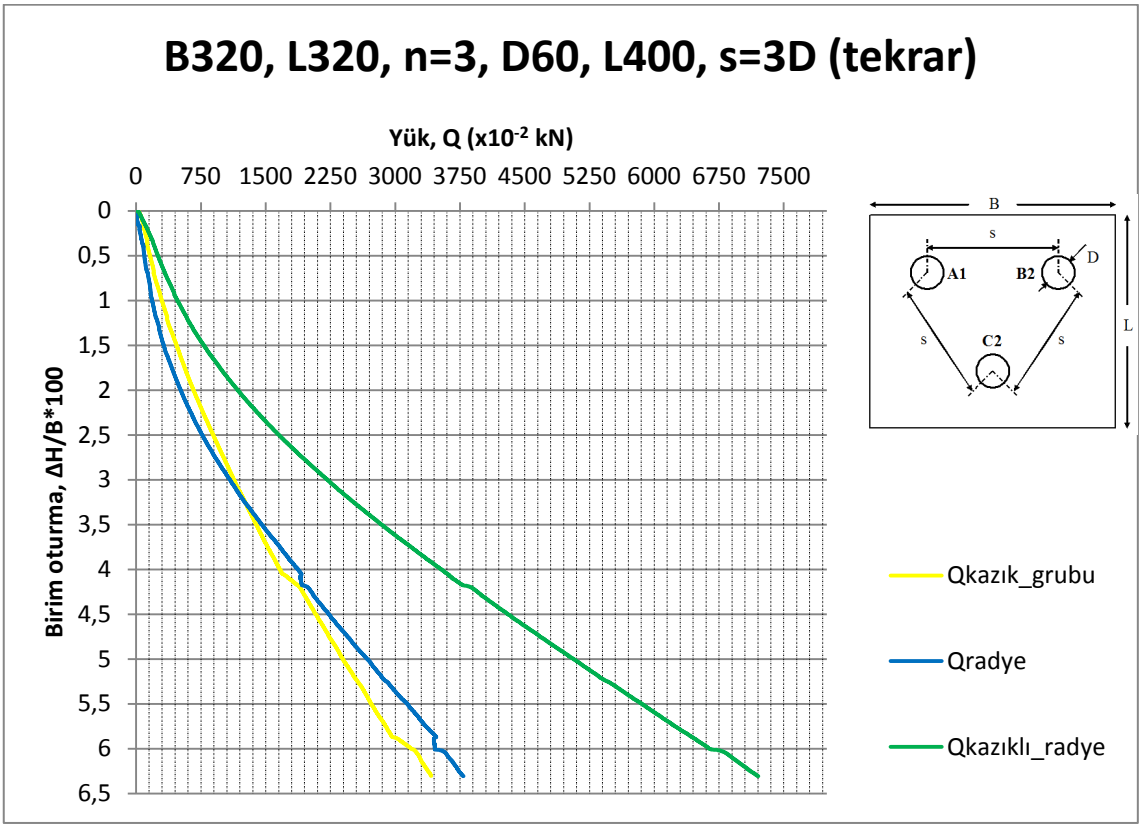


(b)

Şekil Ek 6.7. Radye temel altına 3 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafikleri

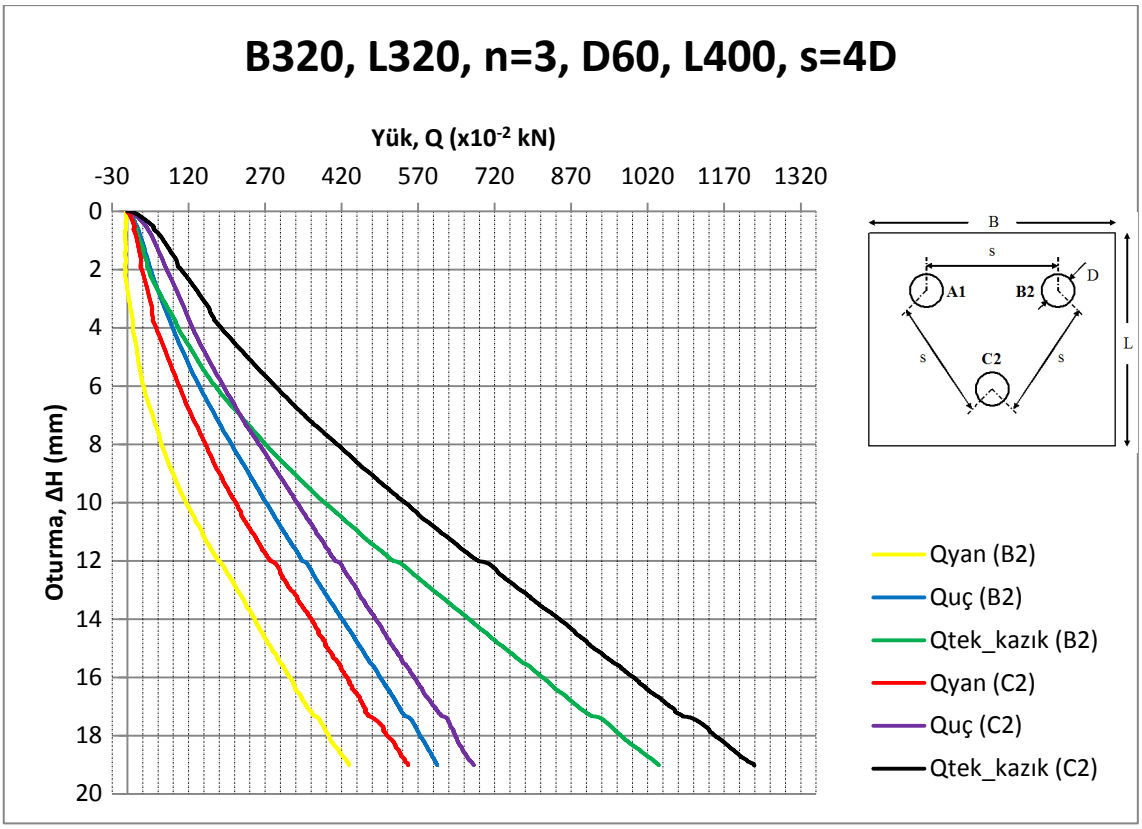


(a)

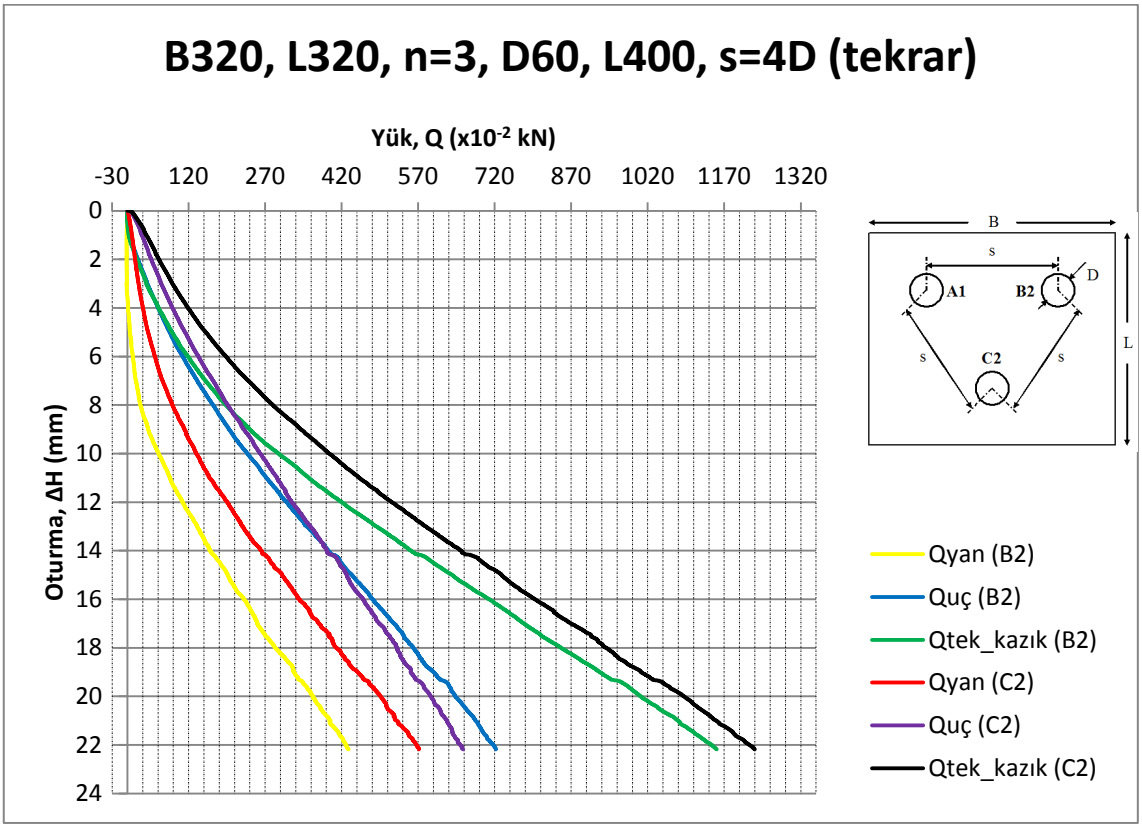


(b)

Şekil Ek 6.8. Radye temel altına 3 kazık uygulamasına ait yük-birim oturma grafikleri

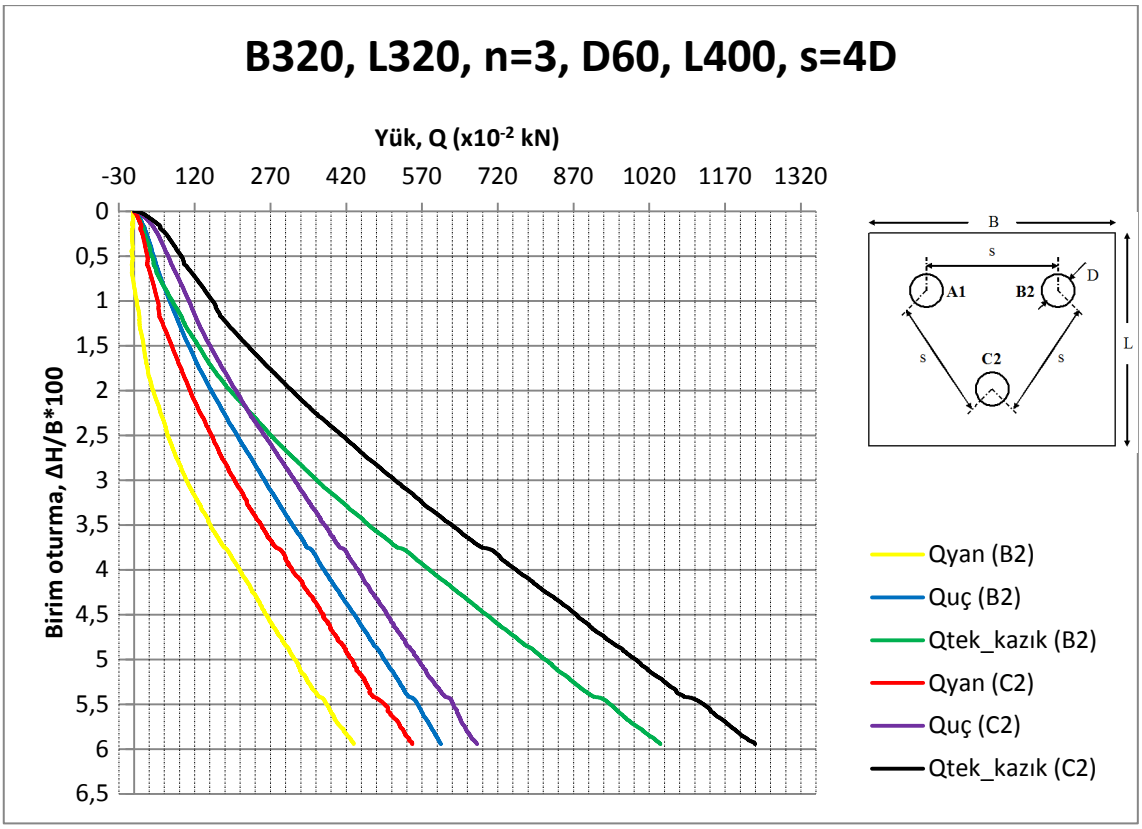


(a)

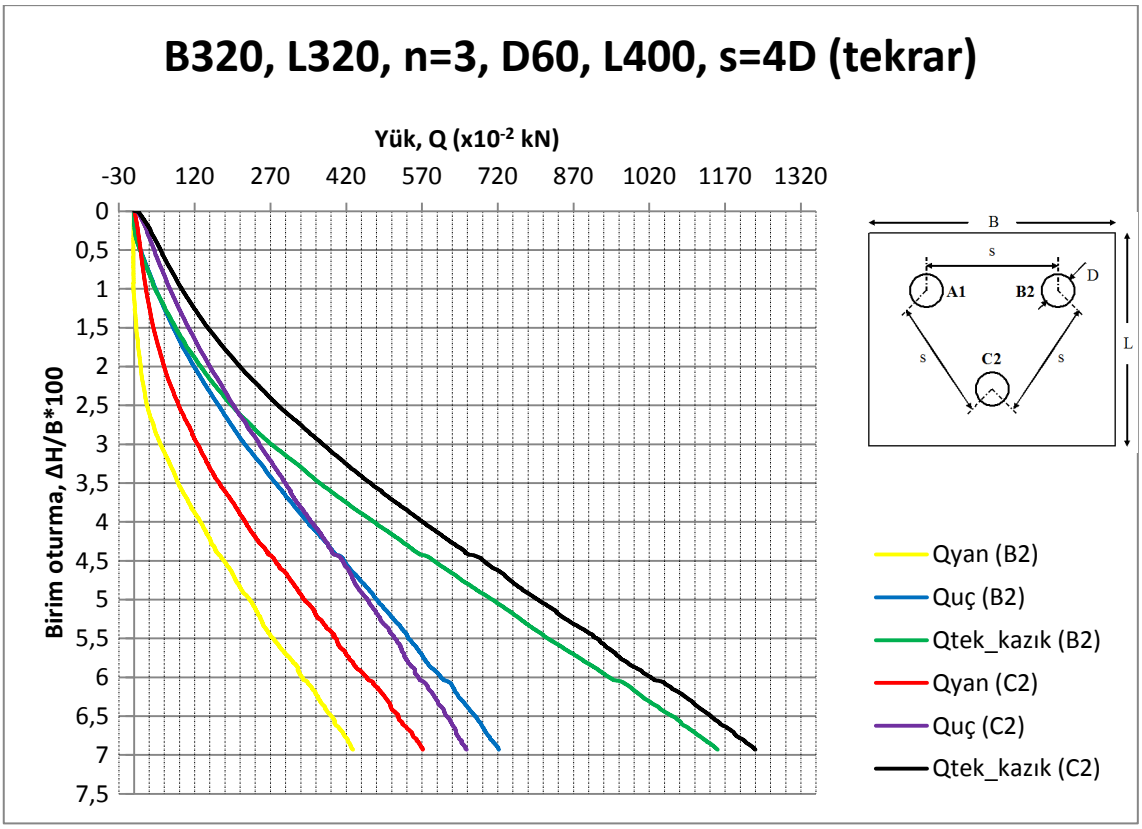


(b)

Şekil Ek 6.9. Radye temel altına 3 kazık uygulaması—B2 ve C2 kazıklarına ait yük-oturma grafikleri

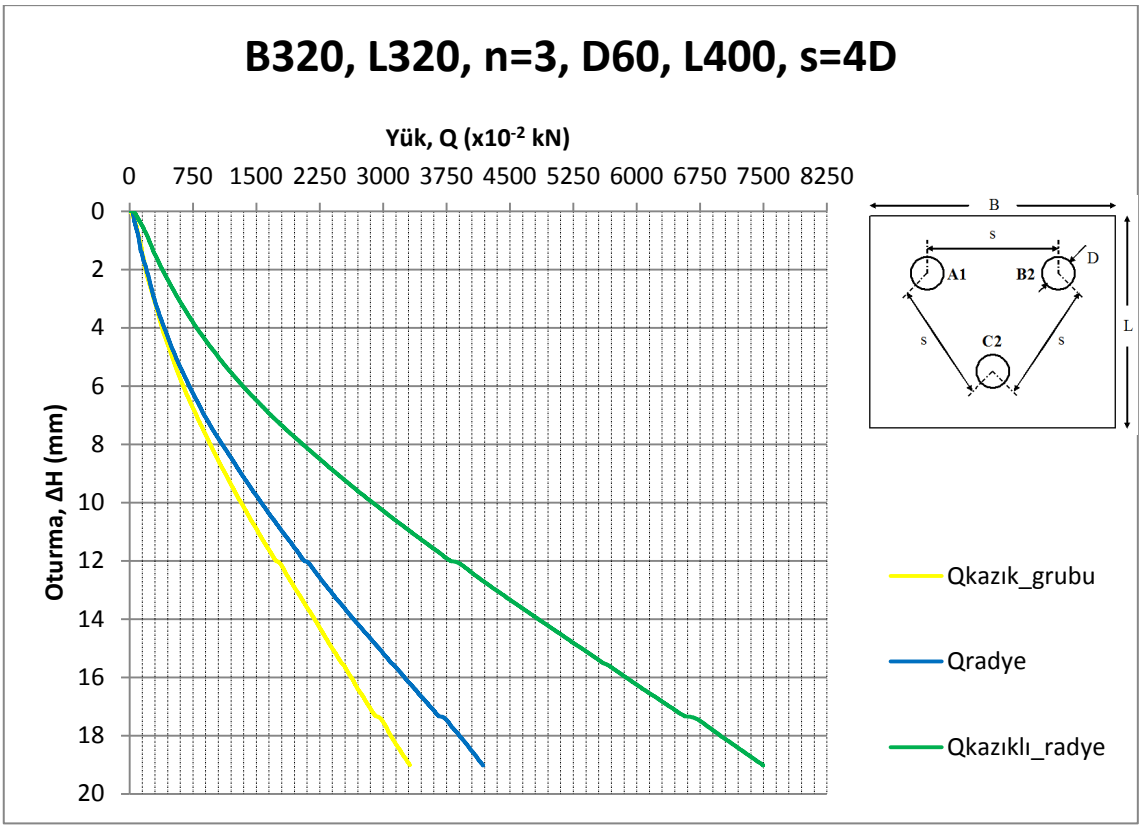


(a)

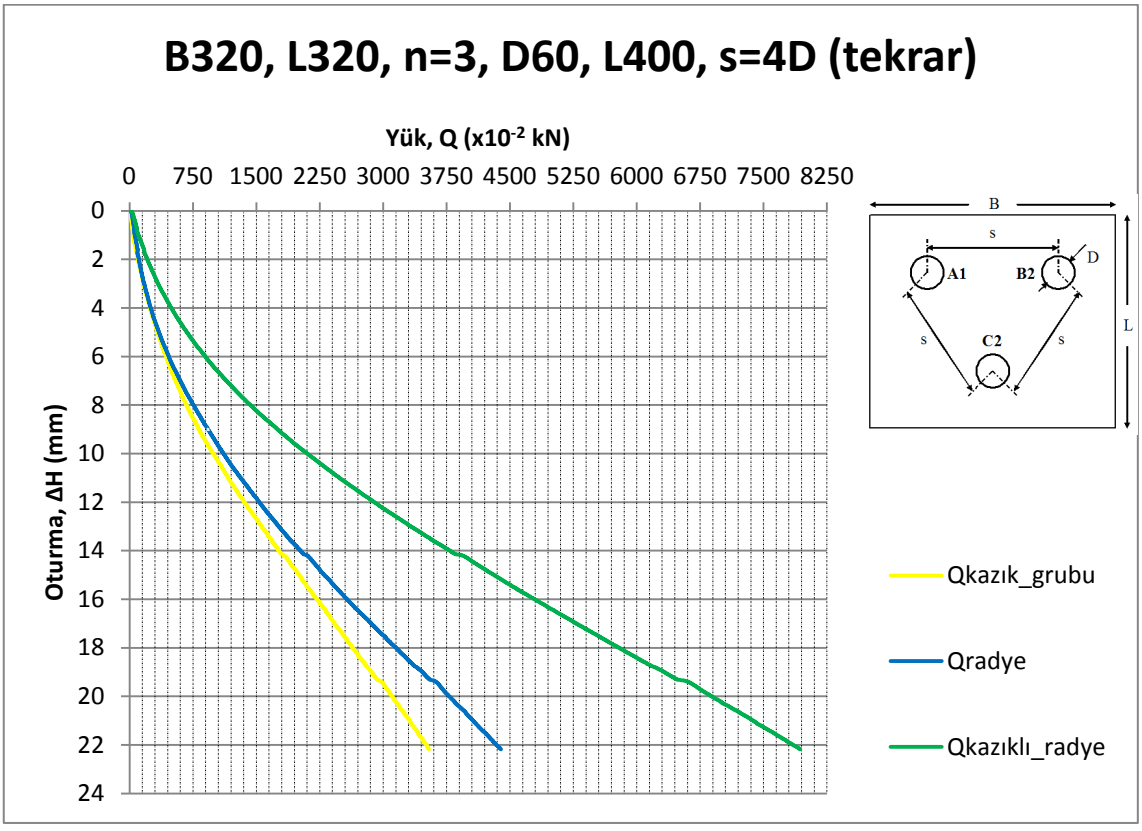


(b)

Şekil Ek 6.10. Radye temel altına 3 kazık uygulaması—B2 ve C2 kazıklarına ait yük-birim oturma grafikleri

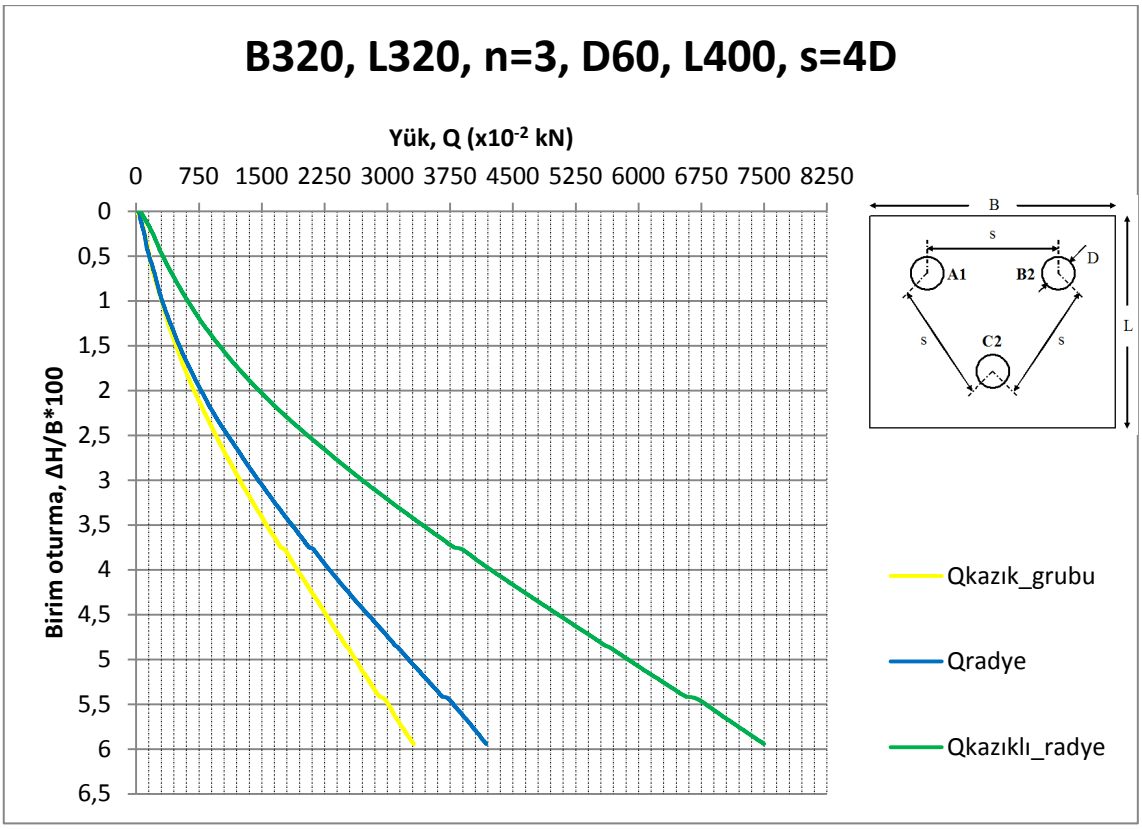


(a)

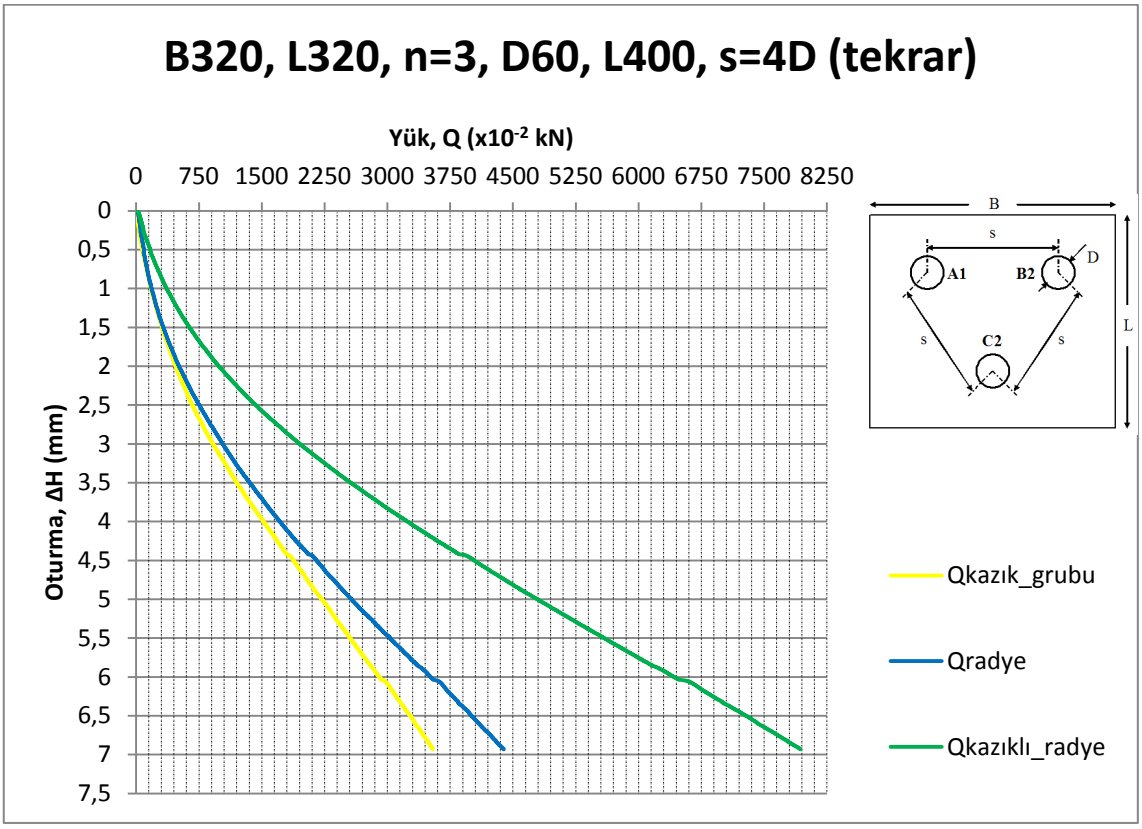


(b)

Şekil Ek 6.11. Radye temel altına 3 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafikleri



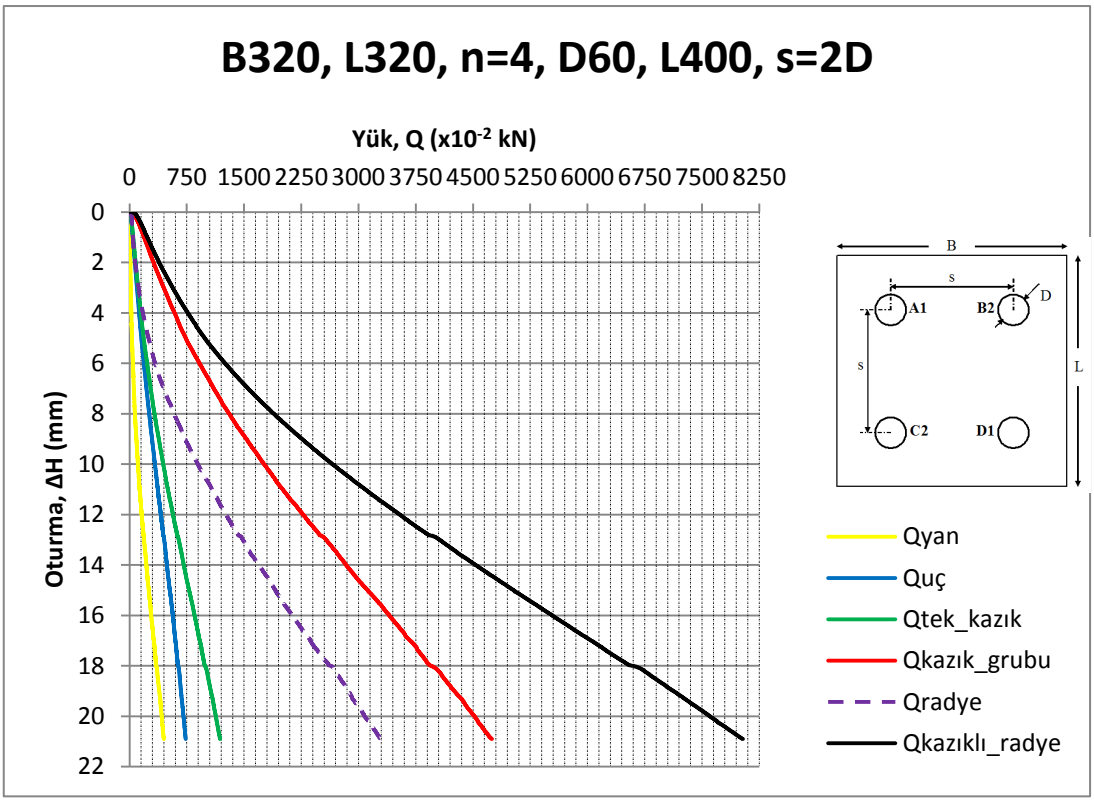
(a)



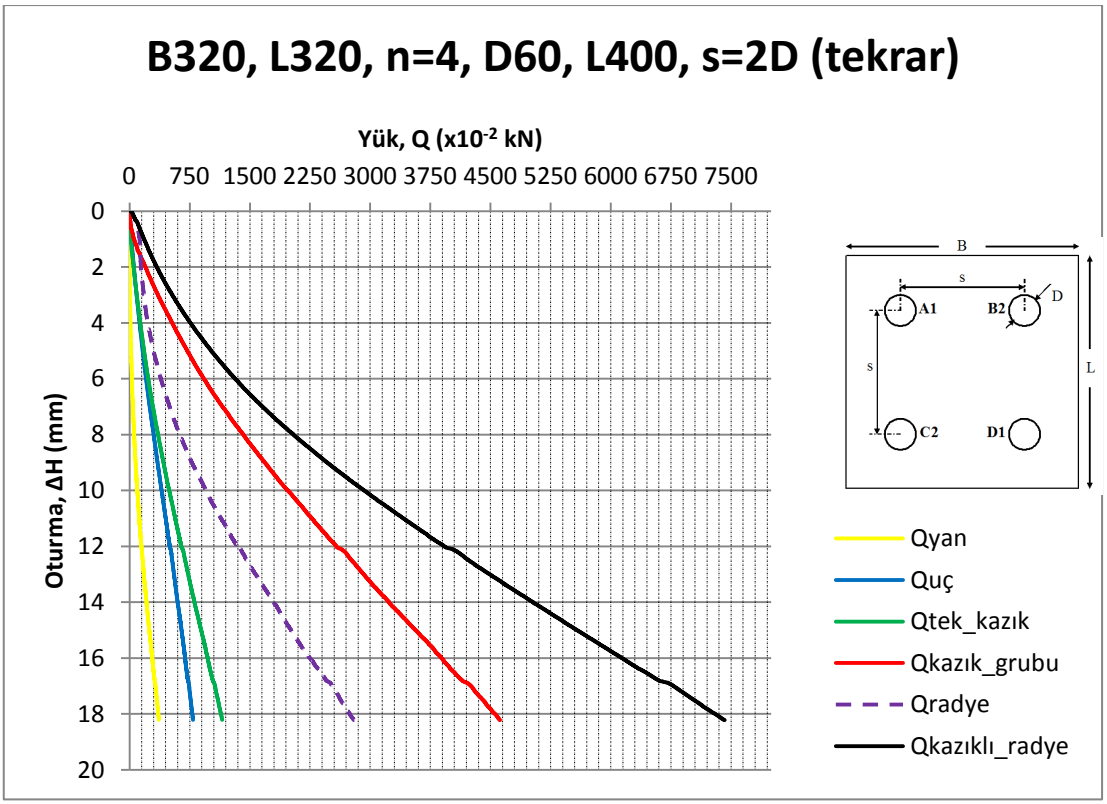
(b)

Şekil Ek 6.12. Radye temel altına 3 kazık uygulamasına ait yük-birim oturma grafikleri

Ek 7. Radye Temel Altına 4 Kazık Uygulaması—Yükleme Deneyi Sonuçları

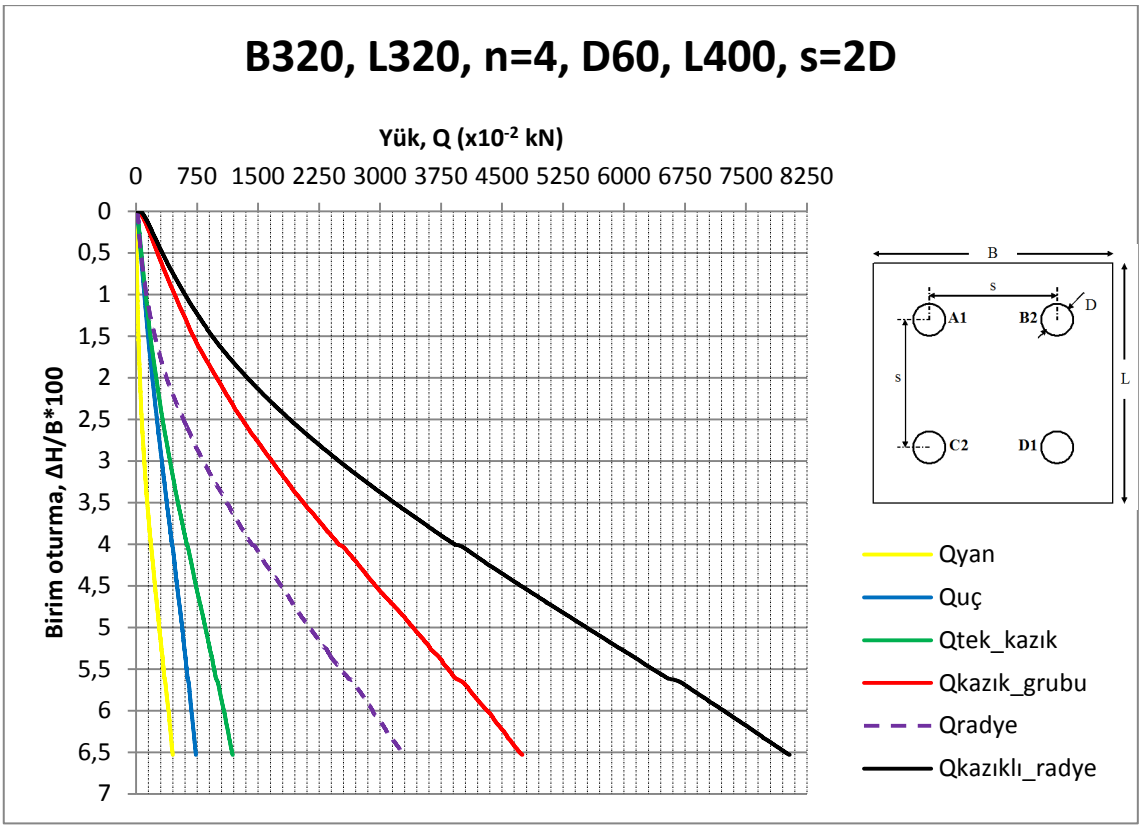


(a)

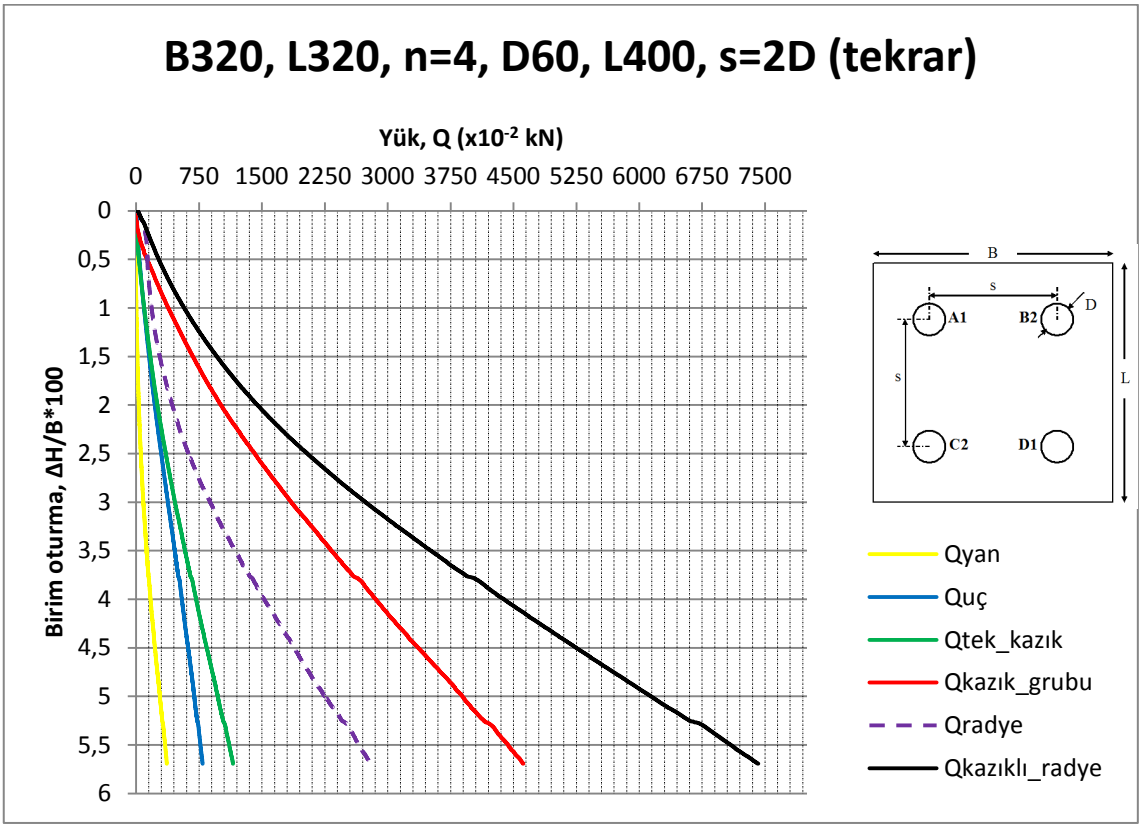


(b)

Şekil Ek 7.1. Radye temel altına 4 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafikleri

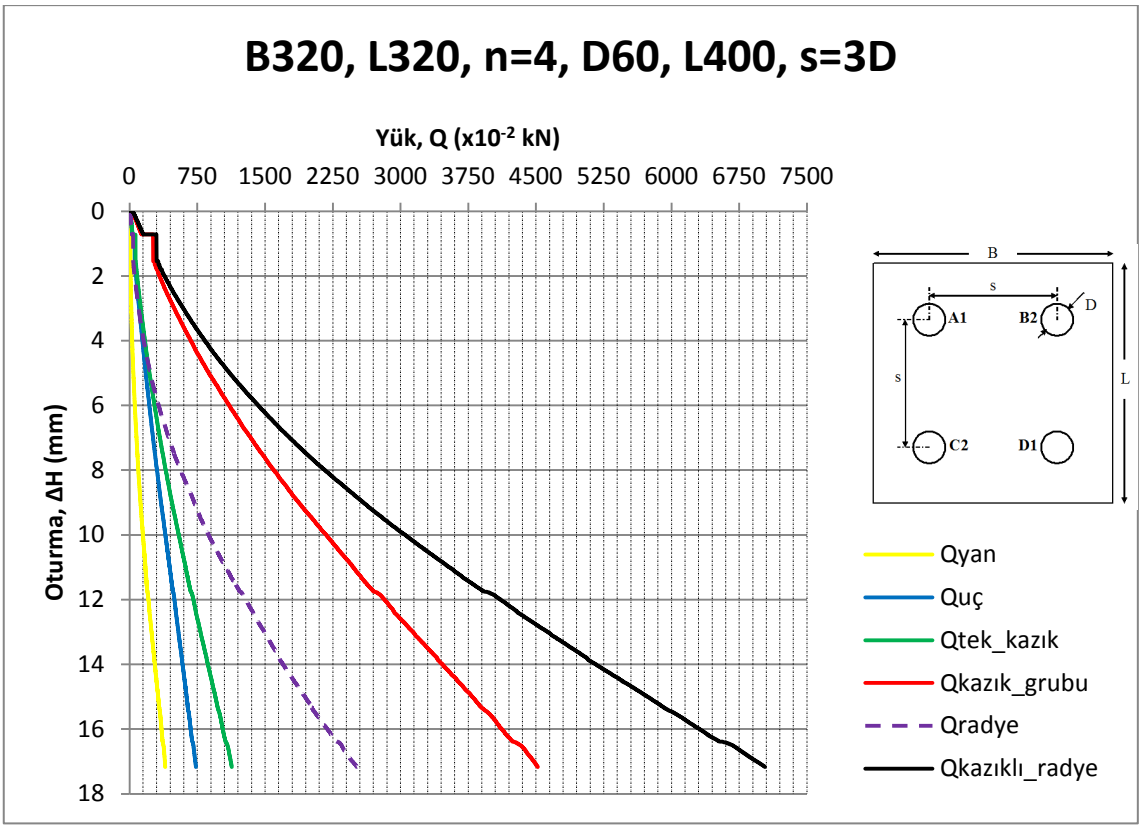


(a)

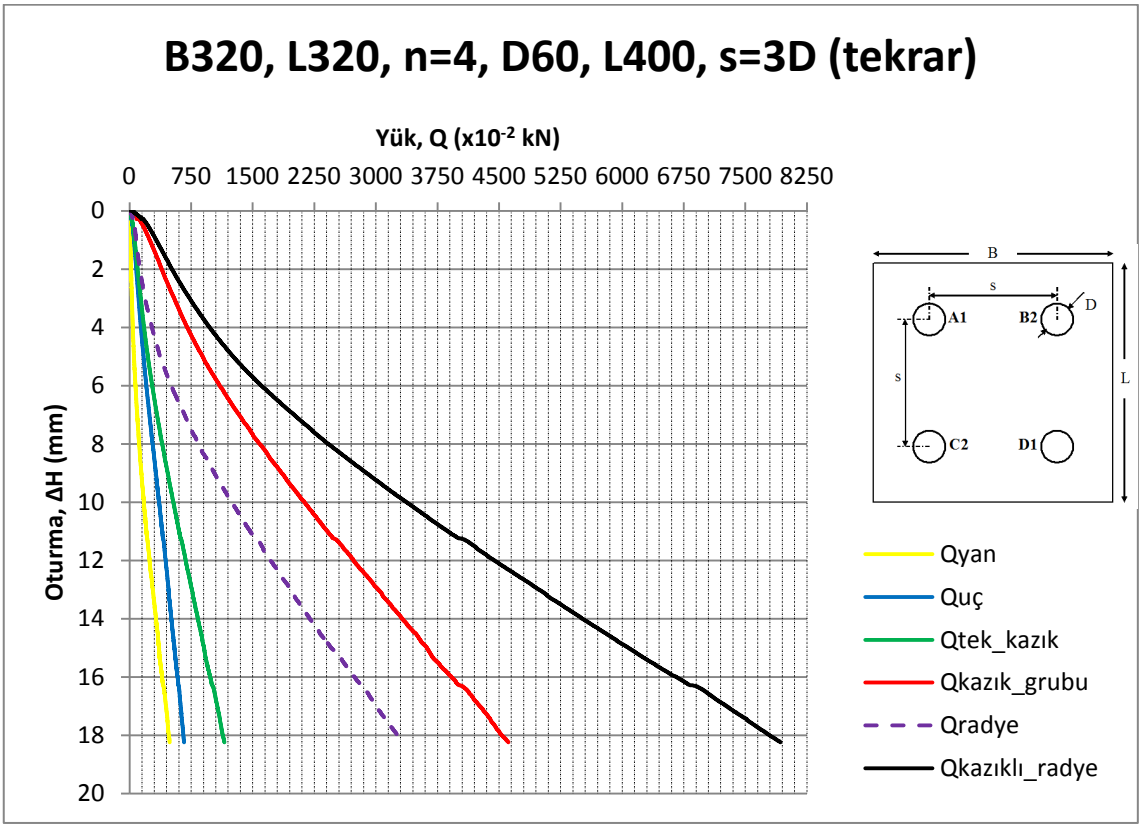


(b)

Şekil Ek 7.2. Radye temel altına 4 kazık uygulamasına ait yük-birim oturma grafikleri

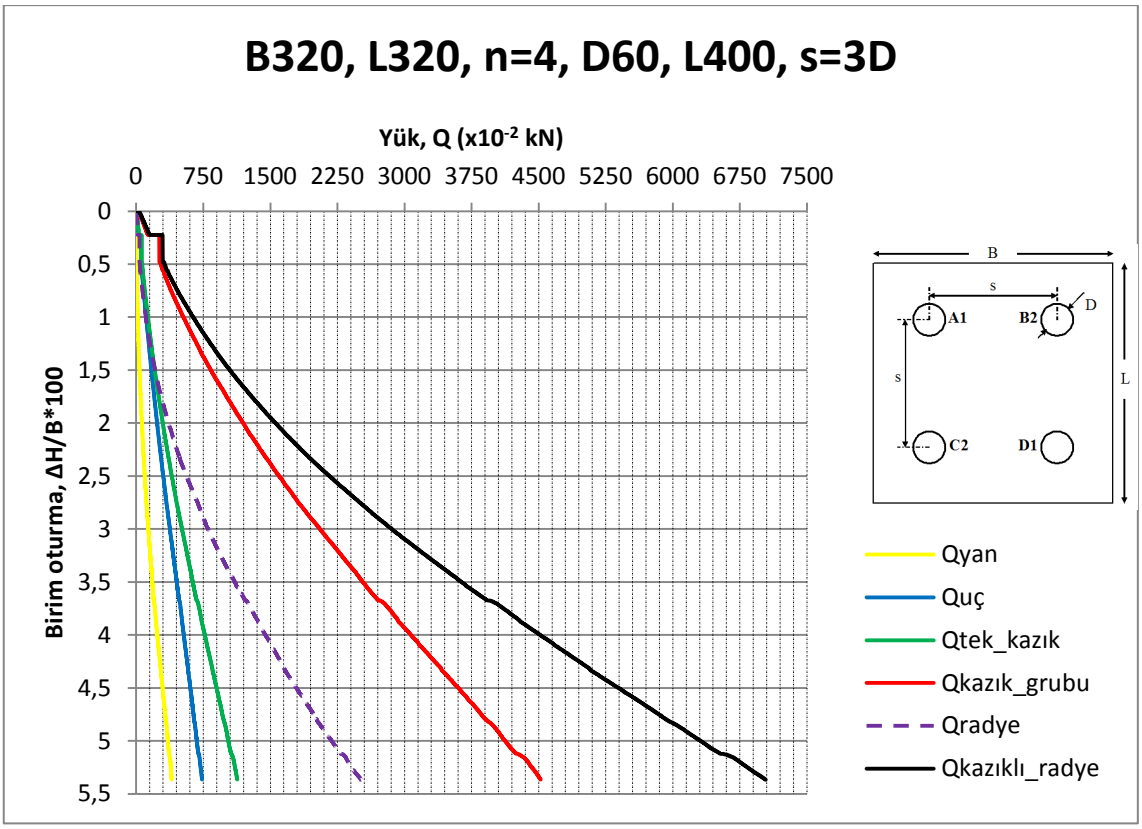


(a)

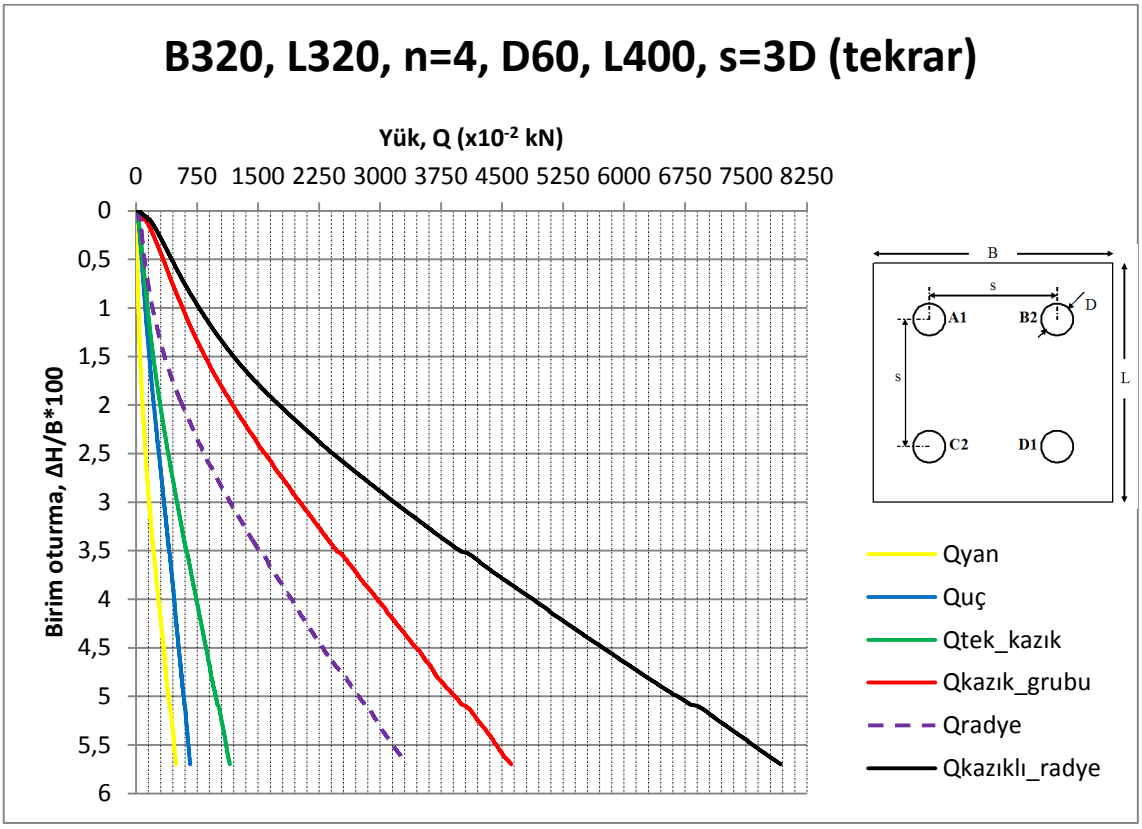


(b)

Şekil Ek 7.3. Radye temel altına 4 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafikleri

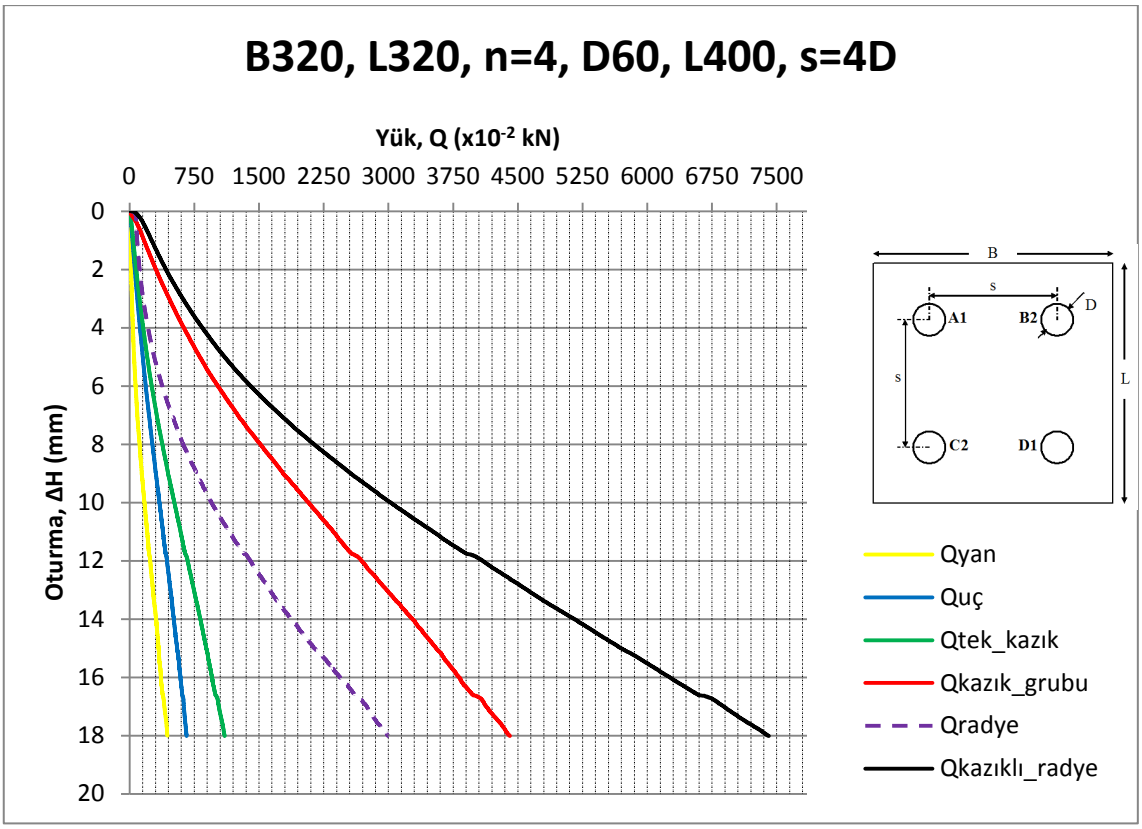


(a)

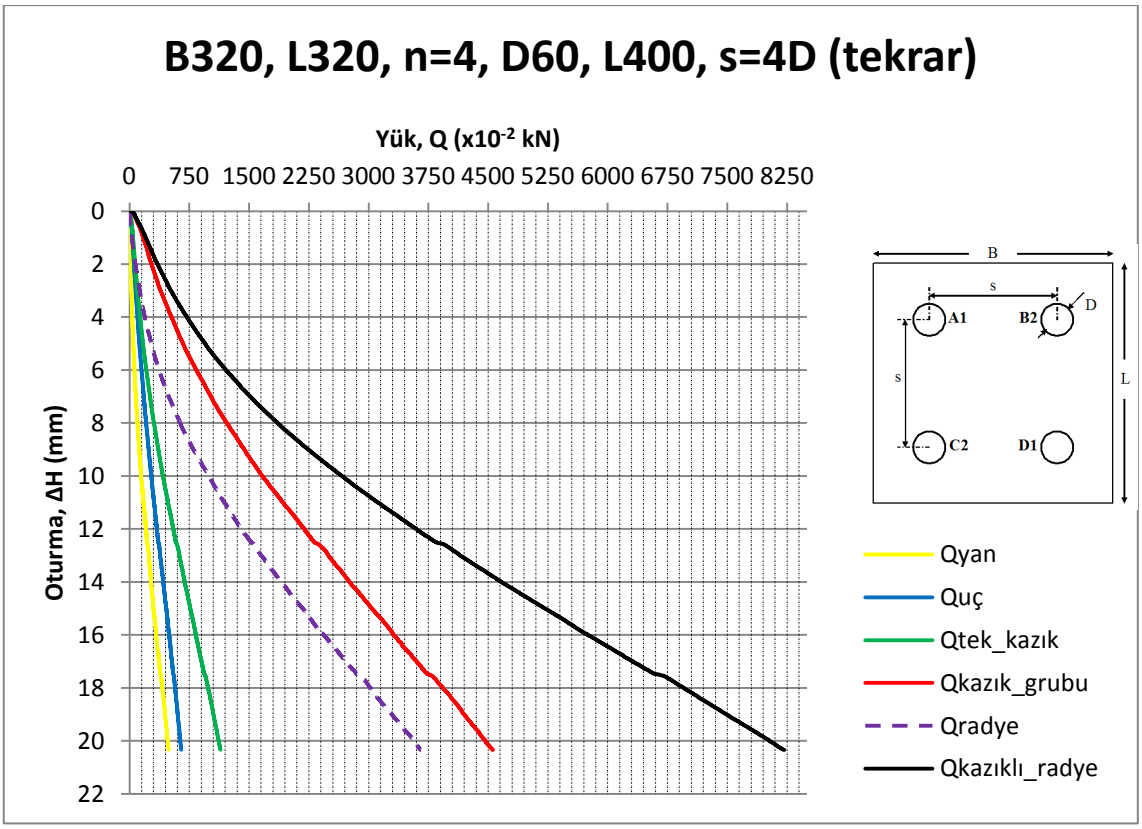


(b)

Şekil Ek 7.4. Radye temel altına 4 kazık uygulamasına ait yük-birim oturma grafikleri

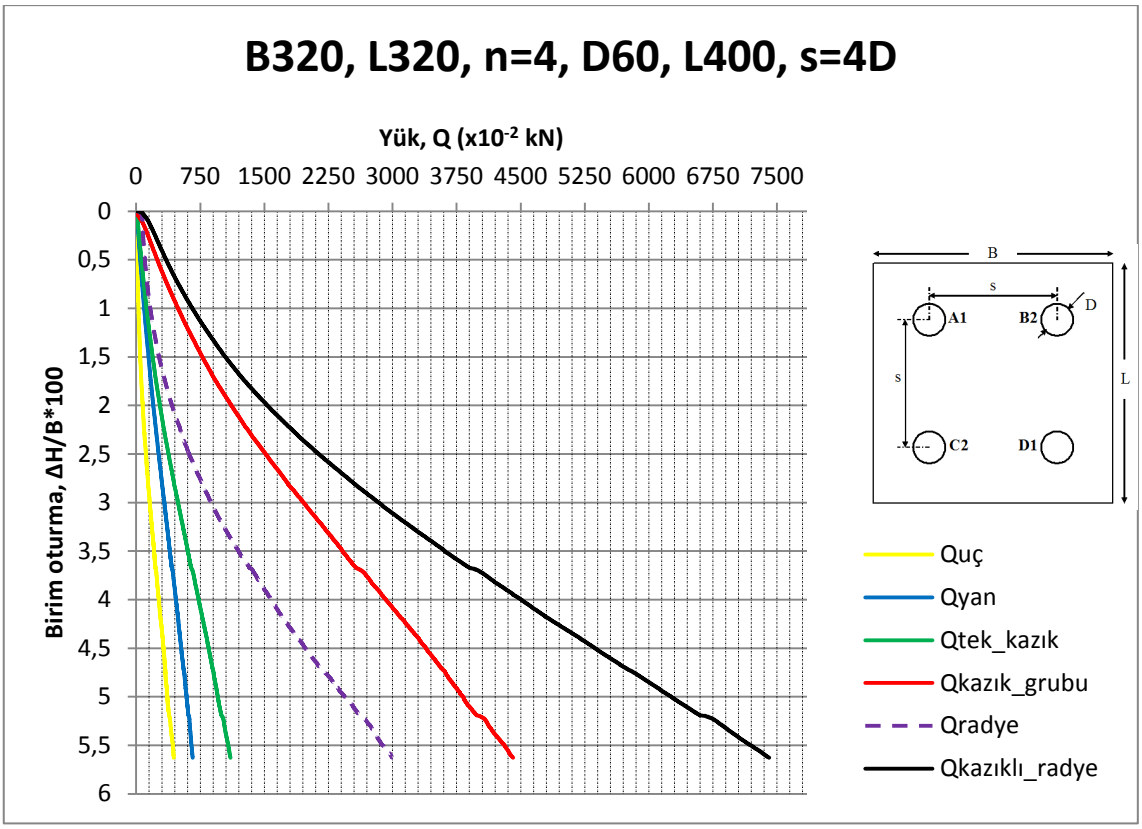


(a)

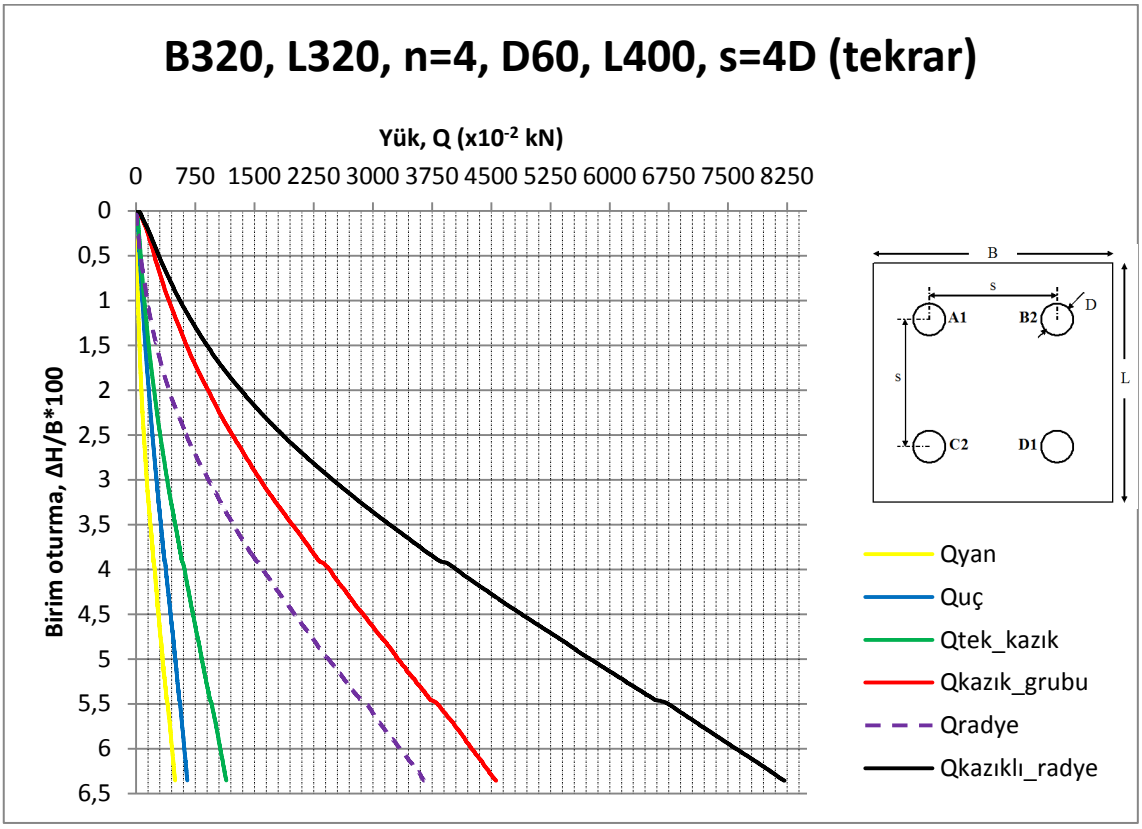


(b)

Şekil Ek 7.5. Radye temel altına 4 kazık uygulamasına ait yük-oturma grafikleri



(a)



(b)

Şekil Ek 7.6. Radye temel altına 4 kazık uygulamasına ait yük-birim oturma grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Yavuz Yenginar
Uyruğu	**:**	Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Konya, 1988
Telefon	**:**	5057249828
Faks	**:**	-
e-mail	**:**	yavuzyenginar@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**Selçuklu Anadolu Lisesi, Selçuklu, Konya**	**2006**
Üniversite	:	**Atılım Üniversitesi, Çankaya, Ankara**	**2011**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya**	**2014**
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2011-2012	Necmettin Erbakan Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012-	Selçuk Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI: Geoteknik Mühendisliği

YABANCI DİLLER: İngilizce (ÜDS:85)

YAYINLAR

Tan, Ö., Erkan, İ.H., Yenginar, Y., 2013, "Homojen Sonlu Şevlerde Kritik Güvenlik Sayısının Pratik Bağıntılarla Tahmin Edilmesi", Taşkın ve Heyelan Sempozyumu, Trabzon, 253-262.

Erkan, İ.H., Yenginar, Y., Akbulut, R.K., Tan, Ö., 2013, "Jet Grout Kolonların Performansının Deneysel Olarak Araştırılması", 5. Geoteknik Sempozyumu, Adana,31.