

**KAZIKLI TEMELLERİN STATİK DAVRANIŞININ
P-Y YÖNTEMİ İLE KUM ZEMİNLERDE
MODELLENMESİ**

Abdullah ERDOĞAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAZIKLI TEMELLERİN STATİK DAVRANIŞININ
P-Y YÖNTEMİ İLE KUM ZEMİNLERDE MODELLENMESİ**

Abdullah ERDOĞAN
0000-0003-2337-6361

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Abdullah ERDOĞAN tarafından hazırlanan “KAZIKLI TEMELLERİN STATİK DAVRANIŞININ P-Y YÖNTEMİ İLE KUM ZEMİNLERDE MODELLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER
0000-0003-3735-9554
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
0000-0002-1867-7103
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye : Doç. Dr. Eyübhan AVCI
0000-0001-7206-0158
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
.../.../2020

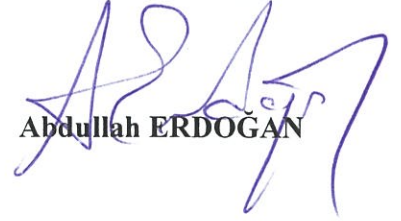


B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

10/06/2020


Abdullah ERDOGAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KAZIKLI TEMELLERİN STATİK DAVRANIŞININ P-Y YÖNTEMİ İLE KUM ZEMİNLERDE MODELLENMESİ

Abdullah ERDOĞAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

Kazıklı temeller, taşıma kapasitesi düşük zeminlerde yapıyı güvenle zemine taşımak için sıklıkla başvurulan temel çeşitlerinden biridir. Bu tip temeller zemin şartlarına ve yapı türüne göre düşey yüklerin yanı sıra yatay yüklere de (deprem, dalga, rüzgâr vs.) maruz kalmaktadırlar. 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY 2018) 'Deprem Etkisi Altında Yapı – Kazık – Zemin Etkileşimi' başlığı altında, yatay yüklü kazıkların zemindeki davranışının incelenmesi için analiz yöntemleri sunulmuş ve bu yöntemlerden en az biri ile kazıklı temellerin analizinin yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Ünsever (2015) laboratuvar ortamında model kuru kum zeminde küçük ölçekli 'kazıklı radye temel, kazık grubu, düşey yüksüz başlıklı tekil kazık ve düşey yüklü başlıklı tekil kazık' model temelleriyle deneysel çalışmalar yapmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın bir bölümünde model kazıklı temellere yatay statik yük uygulayarak temellerin davranışı incelenmiştir. Ünsever'in deneysel çalışması, TBDY'nin (2018) kazıklar için önerdiği gibi; kazığın yatayda zeminle etkileşimini P-Y yaylarıyla, düşeyde sürtünme direncini T-Z yaylarıyla ve kazık ucundaki direnci ise Q-Z yaylarıyla temsil edilmesi yaklaşımı ile SAP2000 analiz programında modellenmiştir.

Deneysel çalışmadaki koşullar, SAP2000 analiz programında modellenmiş ve analiz sonuçlarından kazıklı temellerin yatay sapma miktarı ile kazıklar üzerinde oluşan kesme kuvveti ve dönme momenti sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla mukayese edilmiştir. SAP2000 ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının deneysel sonuçların davranışını tahmin etmekte başarılı olduğu ve güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir.

Anahtar kelime: Kazık analizi, kum zemin, P-Y yöntemi, SAP2000, yapı-zemin etkileşimi

2020, ix + 102 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

MODELLING STATIC BEHAVIOUR OF PILE FOUNDATIONS WITH P-Y CURVE IN SAND SOILS

Abdullah ERDOĞAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yeşim Sema ÜNSEVER

Pile foundations are one of the most frequently used foundations to safely carry the structure to the ground on floors with low bearing capacity. These types of foundations are exposed to horizontal loads (earthquake, wave, wind, etc.) as well as vertical loads according to ground conditions and type of construction. According to Turkish Seismic Code-2018 (TBDY 2018), which was effectuated in 2019, 'Under Seismic Effect Construction - Pile - Soil Interaction' title; analysis methods have been presented to investigate the behavior of horizontally loaded piles in the ground and it has been emphasized that the analysis of pile foundations should be performed with at least one of these methods.

In the study of Ünsever (2015), small scale pile raft, pile group, capped pile without vertical load and capped pile with vertical load were modeled on dry sand ground in a laboratory condition. In the experimental study, the behavior of the foundations was examined by applying horizontal static load to the model pile foundations. Ünsever's experimental study was modeled in the SAP2000 analysis program with the approach of representing the interaction of the pile with the ground horizontally with P-Y springs, the vertical friction resistance with T-Z springs and the resistance at the end of the pile with Q-Z springs as Turkish Seismic Code-2018 (TBDY 2018) suggested for piles.

From the SAP2000 analyses, carried out with the same measurements and the same loads in the experimental study; the results of horizontal displacement of pile foundations, shear forces on the piles and moments on the piles were obtained. These results were compared with the results of the experimental study. It was determined that the results of the analysis performed with SAP2000 were captured well the behavior of the the experimental results and remained on the safe side.

Key words: Analysis of pile, P-Y curve, sandy soil, SAP2000, soil-structure interaction

2020, ix + 102 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi birikimi ile desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema Ünsever'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda yol gösterici fikirleriyle katkı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda SAP2000 programıyla ilgili sorunları çözme konusunda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde varlığıyla bana destek olan aileme ve özellikle bu sıkıntılı süreçte beni motive eden sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Abdullah ERDOĞAN

10/06/2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kazıklı Temeller.....	3
2.1.1. Kazıkların görev ve kullanım amaçları.....	4
2.1.2. Kazıklı temel kullanım alanları.....	6
2.2. Kazıkların Yatay Yük Taşımaları.....	7
2.2.1. Broms yöntemi.....	9
2.2.2. Brinch Hansen yöntemi.....	14
2.2.3. Yatak katsayısı yöntemi.....	15
2.2.4. Elastik süreklilik yöntemi.....	19
2.3. Kazıklı Temellerin Analizi.....	21
2.3.1. Rijit analiz yöntemi.....	21
2.3.2. Sabitlik derinliği analiz yöntemi.....	21
2.3.3. Rijit olmayan zemin-yapı etkileşim analizleri.....	22
2.4. P-Y Yöntemi.....	24
2.4.1. P-Y yönteminin teorik açıklaması.....	26
2.4.2. Kum zeminler için P-Y eğrileri.....	33
2.4.3. Kil zeminler için P-Y eğrileri.....	39
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	51
3.1. Ünsever'in (2015) Model Temeller ile Deneysel Çalışması.....	51
3.1.1. Model kazıklar.....	51
3.1.2. Model zemin ve deney kutusu.....	53
3.1.3. Model temeller.....	56
3.2. SAP2000 ile Model Temellerin Analizi.....	63
3.2.1. Kazıklı Radye Temel Modelinin SAP2000 ile Analizi.....	63
3.2.2. Kazık Grubu Modelinin SAP2000 ile Analizi.....	75
3.2.3. Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazık Modelinin SAP2000 ile Analizi.....	78
3.2.4. Düşey Yüklü Başlıklı Tekil Kazık Modelinin SAP2000 ile Analizi.....	82
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	85
4.1. Kazıklı Radye Modelinin Yatay Yükleme Altında Deney ve SAP2000 Sonuçları.....	85
4.2. Kazık Grubu Modelinin Yatay Yükleme Deney Altında ve SAP2000 Sonuçları.....	89
4.3. Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazık Modelinin Yatay Yükleme Altında Deney ve SAP2000 Sonuçları.....	93
4.4. Düşey Yüklü Başlıklı Tekil Kazık Modelinin Yatay Yükleme Altında Deney ve SAP2000 Sonuçları.....	95
5. SONUÇ.....	97
KAYNAKLAR.....	99
ÖZGEÇMİŞ.....	102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Kesit alanı
A_t	Temsil edilen uzunluğun yüzey alanı
A_q	Kazık ucunu alanı
B	Kazık çapı
c_u	Drenajsız kesme dayanımı
c_a	Ortalama drenajsız kesme dayanımı
C	Deformasyonu tanımlayan parametre
D_r	Bağıl yoğunluk
D_{50}	Medyan dane boyu
e	Yatay yükün zemin yüzeyine uzaklığı
e_{max}	Maksimum boşluk oranı
E_p	Kazığın elastisite modülü
E_s	Zeminin elastisite modülü
E_{py}	Zemin katsayısı
F_p	Yatay bileşenlerin toplamı
I_p	Kazığın atalet momenti
k_h	Derinlikle değişen yatay yatak katsayısı
K_p	Rankine pasif toprak basıncı
K_r	Kazığın rijitlik katsayısı
K_t	Zeminin yatay etkili gerilme katsayısı
k_x	x derinliğindeki yatay yatak katsayısı
L	Gömülü kazık boyu
L_f	Güçlü-rijit zemin derinliği
M	Dönme momenti
n_h	Yatay yatak katsayısı sabiti
n	Zemin türüne göre değişen katsayı ($n \geq 0$)
N_q	Zeminin taşıma kapasitesi faktörü
p	Kazığın birim uzunluğundaki zemin tepkisi
P_x	Kazığa etkiyen eksenel yük
R	Göreceli rijitlik boyu (kohezyonlu)
S	Eğim
T	Göreceli rijitlik boyu (kohezyonsuz)
t	Cidar kalınlığı
t_{max}	Nihai sürtünme gerilmesini
U_c	Homojenlik katsayısı
V	Yatay yük
y	Kazığın sapması
z	Derinlik

z_r	Kritik derinlik
Q	Yatay yük
q	Kazık ucundaki nihai gerilme
x_0	Nihai zemin tepkisi ve kazık eğilme momenti oluştuğu derinlik
x_r	Dönme noktasının zemine uzaklığı
x	Derinlik
w	Kazık merkezleri arası uzunluk
ν	Poisson oranı
δ	Zemin ile kazık yüzeyi arasındaki sürtünme açısı
ρ_{dmax}	Maksimum kuru yoğunluk
ρ_s	Kum taneciklerinin yoğunluğu
ϵ_{50}	Kil zeminin gerinimi
γ_{50}	Yarı nihai zemin tepkisi oluştuğu sapma
β_G	Zemin tepkisi azaltma katsayısı
p_u	Nihai birim zemin gerilmesi
σ_v'	Düşey gerilme (efektif)
σ_0	Derinlik gerilmesi
γ'	Birim hacim ağırlığı (efektif)
γ_d	Kuru birim hacim ağırlığının
γ	Birim hacim ağırlığının
ϕ'	İçsel sürtünme açısı (efektif)
ϕ	İçsel sürtünme açısı

Kısaltmalar Açıklama

APE	Amerikan Petrol Enstitüsü (API, American Petroleum Institute)
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu (FEM, Finite Element Metodu)
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
YSS	Yeraltı Su Seviyesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Temel çeşitleri.....	3
Şekil 2.2. Kazıkların yük taşıma şemaları.....	5
Şekil 2.3. Kazıkların aksenal ve yatay yük aktarması.....	7
Şekil 2.4. Yatay yüklü serbest başlıklı kazığın zemin etkileşimi.....	8
Şekil 2.5. Yatay yüklü serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) kısa kazığın sapma gösterimi.....	11
Şekil 2.6. Serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) kısa kazığın kohezyonlu zeminde, zemin tepki ve kazık eğilme momenti değerleri	11
Şekil 2.7. Serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) kısa kazığın kohezyonsuz zeminde, zemin tepki ve kazık eğilme momenti değerleri	12
Şekil 2.8. Serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) uzun kazığın kohezyonlu zeminde, sapma, zemin tepki ve kazık eğilme momenti değerleri	13
Şekil 2.9. Serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) uzun kazığın kohezyonsuz zeminde, sapma, zemin tepki ve kazık eğilme momenti değerleri	14
Şekil 2.10. Kq ve Kc katsayıları	15
Şekil 2.11. Elastik temeldeki kiriş (a) ve Winkler 'in idealleştirme gösterimi (b)	16
Şekil 2.12. Yatay yüklü kazık zemin tepkisi (a) ve yay ile idealize edilmiş yatay yüklü kazık (b) gösterimi	16
Şekil 2.13. Kazığa etkiyen yükler (a), zeminin kazığa tepki kuvvetleri (b).....	19
Şekil 2.14. Kısmen gömülü kazık	22
Şekil 2.15. Yatay yüklü silindirik kazığın birim uzunluğunda oluşan zemin gerilmesi	25
Şekil 2.16. Tipik P-Y eğrisi (a) ve Zemin katsayısı gösterimi (b)	25
Şekil 2.17. Çeşitli derinlikte P-Y eğrilerinin yerleşimi (a) ve P-Y eğrilerinin grafiksel gösterimi (b).....	26
Şekil 2.18. Kazık üzerindeki bir elemana etkiyen yükler	27
Şekil 2.19. Sapma (y), eğim (S), dönme momenti (M), kesme kuvveti (V) ve zeminin kazığın birim uzunluğuna tepkisi (p) gösterimi	29
Şekil 2.20. Yüzeğe yakın zemin bölgesi için nihai zemin tepkisini (p_u) hesaplama modeli.....	30
Şekil 2.21. Derin zemin bölgesi için nihai zemin tepkisini (p_u) hesaplama modeli (a), kohezyonlu (b) ve kohezyonsuz (c) zeminler için kullanılan diyagramları.....	31
Şekil 2.22. Kumlu zeminler için Reese yaklaşımı P-Y eğrisi	33
Şekil 2.23. Kumlu zeminler için P-Y eğrisi	38
Şekil 2.24. Sıvılaşmış kum zemin için P-Y eğrileri	39
Şekil 2.25. Kil zemin için dayanım- gerinim grafiği	40
Şekil 2.26. Statik yükleme durumunda yumuşak killer için P-Y eğrisi	42
Şekil 2.27. Tekrarlı yükleme durumunda yumuşak killer için P-Y eğrisi	43
Şekil 2.28. Statik yüklü YSS altındaki sert killer için P-Y eğrisi	44
Şekil 2.29. Sert killer için A_s ve A_c değerleri.....	45
Şekil 2.30. Tekrarlı yüklü YSS altındaki sert killer için P-Y eğrisi.....	47
Şekil 2.31. YSS üzerindeki sert killer için statik yükleme durumunda P-Y eğrisi	49
Şekil 2.32. YSS üzerindeki sert killer için tekrarlı yükleme durumunda P-Y eğrisi	50
Şekil 3.1. Düşey ve kesme gerinim ölçü aygıtlarının yerleştirilmesi.....	52
Şekil 3.2. Kazıkların kaplamasında kullanılan özel yapıştırıcı 'hard rock'	52
Şekil 3.3. Kazıkların kaplama öncesi (a) ve sonrası (b) fotoğrafları	53
Şekil 3.4. Kumun elek testi sonuçları.....	54

	Sayfa
Şekil 3.5. Laminer kutu fotoğrafı.....	55
Şekil 3.6. Model kazıklı radye temel	56
Şekil 3.7. Kazıklı radye temel deney kurulumu (a) çizim ve (b) fotoğrafı	58
Şekil 3.8. Kazık grubu deney kurulumu (a) çizim ve (b) fotoğrafı.....	59
Şekil 3.9. Başlıklı tekil kazık modeli	60
Şekil 3.10. Başlıklı tekil kazık deney kurulumu (a) çizim ve (b) fotoğrafı	62
Şekil 3.11. SAP2000’de kazık için malzeme ve kesit tanımlaması.....	63
Şekil 3.12. T-Z eğrisi grafiği.....	65
Şekil 3.13. Q-Z eğrisi grafiği	66
Şekil 3.14. SAP2000’de doğrusal olmayan yayların tanımlanması.....	67
Şekil 3.15. Kazıklar için T-Z eğrileri	68
Şekil 3.16. Kazıklar için Q-Z eğrileri.....	69
Şekil 3.17. Kazıklı radye temel modelindeki (P1) kazığının P-Y eğrileri	70
Şekil 3.18. Kazıklı radye temel modelindeki (P2) kazığının P-Y eğrileri	71
Şekil 3.19. Kazıklı radye temel modelindeki (P3) kazığının P-Y eğrileri	72
Şekil 3.20. Kazıklı radye temel SAP2000’de modellenmiş üç boyutlu analiz	73
Şekil 3.21. Kazıklı radye temel SAP2000’de modellenmiş yayların görüntüsü.....	74
Şekil 3.22. Kazık Grubunun SAP2000’de modellenmiş üç boyutlu analiz	76
Şekil 3.23. Kazık Grubunun SAP2000’de modellenmiş yayların görüntüsü	77
Şekil 3.24. Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazık modelindeki kazığın P-Y eğrileri.....	79
Şekil 3.25. Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazığın SAP2000’de modellenmiş üç boyutlu analiz görüntüsü	80
Şekil 3.26. Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazığın SAP2000’de modellenmiş yayların görüntüsü.....	81
Şekil 3.27. Düşey Yüklü Başlıklı Tekil Kazığın SAP2000’de modellenmiş üç boyutlu analiz görüntüsü	83
Şekil 3.28. Düşey Yüklü Başlıklı Tekil Kazığın SAP2000’de modellenmiş yayların görüntüsü.....	84
Şekil 4.1. Kazıklı radye modelinin yatay yük – sapma oranı deney ve SAP2000 sonuçları.....	85
Şekil 4.2. Kazıklı radye modelinde kazıkların kesme kuvvet (Q) – derinlik (z) deney ve SAP2000 sonuçları.....	87
Şekil 4.3. Kazıklı radye modelinde kazıkların moment (M) – derinlik (z) deney ve SAP2000 sonuçları.....	88
Şekil 4.4. Kazık grubu modelini yatay yük – sapma deney ve SAP2000 sonuçları	89
Şekil 4.5. Kazık grubu modelinin kazıkların kesme kuvvet (Q) deney ve SAP2000 sonuçları.....	91
Şekil 4.6. Kazık grubu modelinin kazıkların dönme momenti (M) deney ve SAP2000 sonuçları (Ünsever ve ark. 2013b)	92
Şekil 4.7. Düşey yüksüz başlıklı tekil kazık modelinin yatay yük – sapma deney ve SAP2000 sonuçları.....	93
Şekil 4.8. Düşey yüksüz başlıklı tekil kazık modelinin kesme kuvvet (Q) ve dönme momenti (M) deney ve SAP2000 sonuçları	94
Şekil 4.9. Düşey yüklü başlıklı tekil kazık modelinin yatay yük – sapma deney ve SAP2000 sonuçları.....	95
Şekil 4.10. Düşey yüklü başlıklı tekil kazık modelinin (a) kesme kuvvet (Q) ve (b) dönme momenti (M) deney ve SAP2000 sonuçları	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Çeşitli sıklıktaki kohezyonsuz zeminler için n_h değerleri.....	18
Çizelge 2.2. Normal konsolide killer için önerilen n_h değerleri.....	18
Çizelge 2.3. Statik ve tekrarlı durumuna göre A_I ve B_I değerleri	35
Çizelge 2.4. SPT ve içsel sürtünme açısı ile kumun sıklık seviyesi	36
Çizelge 2.5. YSS altındaki ve YSS üzerindeki kum zeminler için önerilen k_{py} değeri...	36
Çizelge 2.6. Yumuşak killer için önerilen ϵ_{50} değerleri.....	41
Çizelge 2.7. Sert killer için önerilen k_s ve k_c değerleri.....	44
Çizelge 2.8. Sert killer için önerilmiş ϵ_{50} değerleri.....	45
Çizelge 3.1. Alüminyum borunun mühendislik özellikleri.....	51
Çizelge 3.2. Model zeminin fiziksel	54
Çizelge 3.3. Model zeminin dayanım parametreleri	55
Çizelge 3.4. Kazıklı radye temel ve kazık grubu yatay yüklemeleri	57
Çizelge 3.5. Düşey yüksüz ve düşey yüklü başlıklı tekil kazık yüklemeleri	61
Çizelge 3.6. Kum zemin için T-Z eğrisi eksen değerleri	64
Çizelge 3.7. Kum zemin için δ ve N_q değerleri.....	66

1.GİRİŞ

Günümüz koşullarında büyük şehirlerde artan yapı ihtiyacı, ticaret ve sanayinin gelişmesiyle nitelikli yapılara duyulan ihtiyaç artmıştır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda yapıların tasarlanmasında kazıklı temellerin önemi artmıştır. Özellikle çok katlı yüksek binalar, kıyı yapıları ve yüksek viyadükler için kazıklı temeller kullanılmaktadır. Kazıklı temeller, taşıma kapasitesi düşük zeminlerde yapıyı güvenle zemine taşımak için sıklıkla başvurulan temel çeşitlerinden biridir. Bu tip temeller zemin şartlarına ve yapı türüne göre düşey yüklerin yanı sıra yatay yüklere de (deprem, dalga, rüzgâr vs.) maruz kalmaktadırlar.

Ülkemizin coğrafi olarak deprem kuşağında olmasından ötürü meydana gelen büyük depremlerin etkisiyle yapısal olarak depreme dayanıklı olmayan çoğu yapılar yıkılmakta veya hasar görmektedir. Yaşanılan depremlerin ardından deprem bölgesinde yapılan incelemeler neticesinde, yapıların bu kadar etkilenmesinde yapısal olarak depreme dayanıksız olmalarının yanında zeminin de etkisinin büyük olduğu görülmüştür (Livaoğlu ve Doğangün 2002).

2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin (TBDY 2018) Deprem Etkisi Altında Yapı – Kazık – Zemin Etkileşimi başlığı altında yatay yüklü kazıkların zemindeki davranışının incelenerek kazıklı temellerin tasarlanması incelenen konulardan biridir.

Yapılan tez çalışmasında: Yatay yüklü kazıkların zemindeki davranışını belirlemek için arazi deneyleri veya model deneyler yapılarak gerçek değerler üzerinden temel tasarımı yapılması gerekmektedir. Fakat deneysel çalışmalar yaparken karşılaşılan zorluklar ve ekonomik sebeplerden dolayı, pratik olarak analiz programlarında gerçekçi modellemeler yaparak kazıkların davranışının incelenmesi hedeflenmiştir.

Ünsever 'in (2015) laboratuvar ortamında küçük ölçekli model temeller tasarlayarak model kuru kum zeminde kazıklı radye temel, kazık grubu, düşey yüksüz başlıklı tekil kazık ve düşey yüklü başlıklı tekil kazık model temellerine statik yatay yük uygulayarak

gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışmada model temellerin yatay yüke karşı davranışı incelenmiştir. Ünsever 'in bu çalışması, TBDY'nin (2018) kazıklar için önerdiği kazığın yatayda zeminle etkileşimini P-Y yaylarıyla, düşeyde sürtünme direncini T-Z yaylarıyla ve kazık ucundaki direnci ise Q-Z yaylarıyla temsil etme yaklaşımı ile SAP2000 analiz programında modellenmiştir. Deneysel çalışma ile aynı ölçüler ve aynı yükler altında yapılan SAP2000 analizinden elde edilen kazıklı temelin sapma ve kazık üzerindeki kesme kuvveti ile dönme momenti sonuçları, deneysel çalışmanın sonuçları ile mukayese edilmiştir. SAP2000 ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının deneysel sonuçlara yakın çıktığı ve güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir.

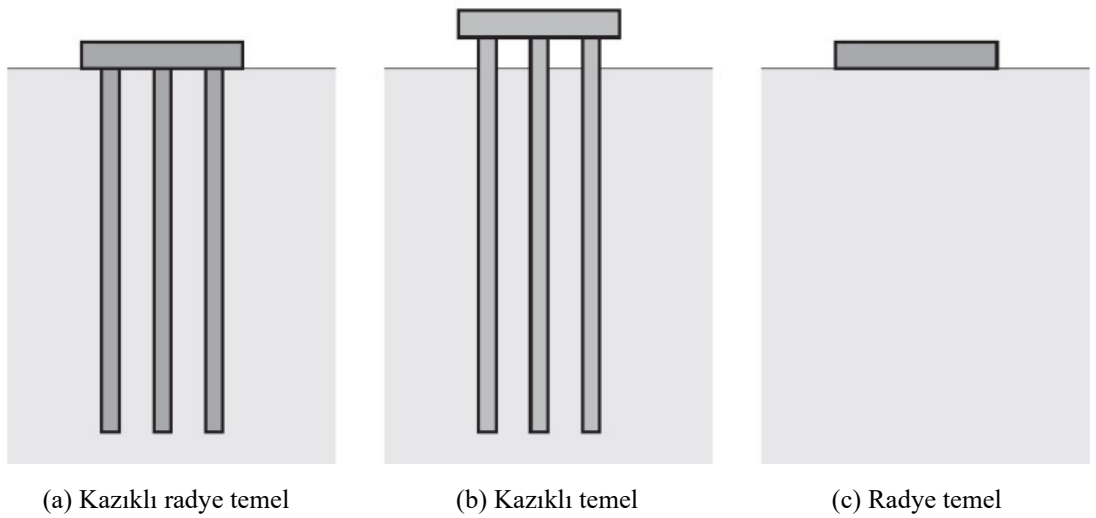
Bölüm 2'de kazıklı temeller, kazıkların görevi ve kazıklar kullanım alanlarına değindikten sonra, kazıkların yatay yük taşımasını hesaplayan yöntemlerin kaynak araştırması özetlenmiştir. Son olarak P-Y yönteminin kuramsal temelleri ve geliştirilen yaklaşımlar ayrıntılı şekilde anlatılmıştır. Bölüm 3'te Ünsever'in (2015) model temellerle yaptığı deneysel çalışmalar ve bu deneysel çalışmaların SAP2000 programıyla modellenmesi anlatılmıştır. Bölüm 4'te Ünsever'in (2015) deneysel çalışmasının sonuçları ile SAP2000 analiz sonuçları karşılaştırılarak tartışması yapılmıştır. Bölüm 5'te ise yapılan çalışmanın sonuçlarına yer verilmiştir.

2.KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kazıklı Temeller

Kazıklı temel (Şekil 2.1.b), üst yapı temelleri tasarlanırken yapılan hesaplamalarda zeminin taşıma kapasitesi aşıldığı tespit edildiğinde, radye temel (Şekil 2.1.c) gibi sığ temellerin güvenli bir şekilde taşıyamadığı yükü yeterli sayıda kazığa taşıtarak tasarlanan temel türüdür. Kazıklı temeller ilk olarak Mexico City’de (Zeevaert 1957) ve daha sonraları Londra’da (Hooper 1973) kullanılmıştır. Davis ve Poulos (1972) tarafından önerilen kazıklı temel tasarım metodu ile temelin oturma miktarı teknik olarak güvenli tarafta kalacak şekilde; analiz programlarını kullanmadan kazık sayısını hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar da radye temelin yük almadığı ve bütün yükü kazıkların taşıdığı kabulüyle tasarım yapılmaktadır. Güvenli tarafta kalmak amacıyla yapılan ön kabul yapı maliyetlerini artırmaktadır.

Kazıklı radye temelde (Şekil 2.1.a) ise kazık ve radye birlikte yük taşımaktadır. Ünsever (2014) yaptığı model deney çalışmasında sürtünme kazıklarıyla tasarlanan kazıklı radye temelin, aynı sayılarda kazık bulunan kazıklı temelin taşıma kapasitesinden %40 daha fazla yük taşıdığı tespit etmiştir. Böylece mühendisliğin temel kriterlerinden olan ekonomik çözüm üretmeye katkı sağlamıştır.



Şekil 2.1. Temel çeşitleri (Uysal 2014)

2.1.1. Kazıkların görev ve kullanım amaçları

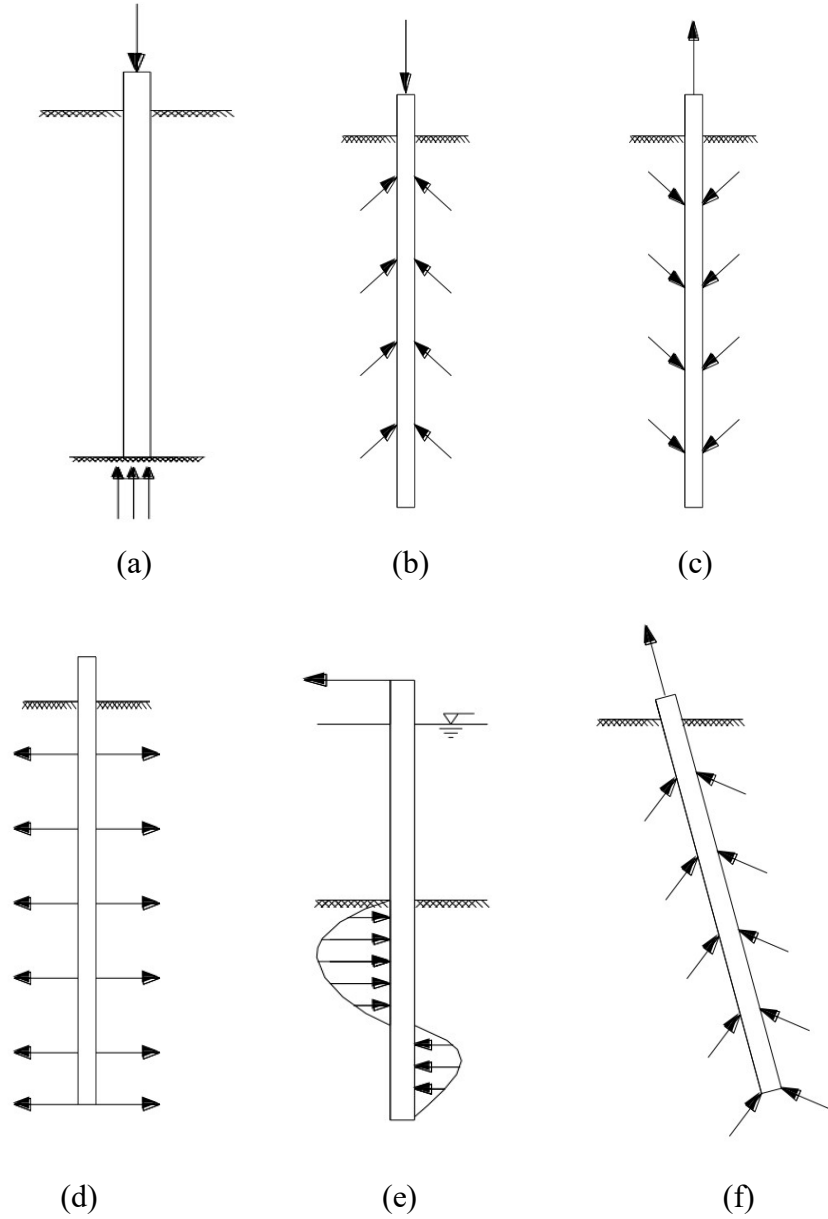
Kazıkların temel görevi yapıdan zemine etkiyen yükleri taşıyamayan zemin katmanından, güvenli bir şekilde yükleri taşıyabilecek daha sağlam katmanlara iletmektir. Fakat kazıklar yüzeye yakın sağlam kayaların bulunduğu zeminlerde, açık deniz platformları gibi deniz yapılarında ve iksa sistemlerinde direkt olarak yük taşırlar. Düşey yük alan kazığın toplam taşıma gücü, kazık ucu direnci ve kazık yanal yüzünü zemin ile temasıyla oluşan sürtünme direncinin toplamıdır (Poulos ve Davis 1980). Zeminin durumuna ve kazığın çeşidine göre kazığın uç direnci ve kazığın sürtünme direncinin kazığın taşıma kapasitesine katkısı değişmektedir.

Kazıklar genellikle fonksiyonlarına göre aşağıdaki gibi adlandırılırlar.

- a) Eğer yapıyı taşıyacak zeminin taşıma kapasitesi çok düşük ve yüksek sıkışabilirliği var ise, kazık daha derinlerde bulunan ve taşıma kapasitesi yüksek olan sağlam tabakaya kadar uzatılıp kazık ucu direnci ile üstyapıdan gelen yükler taşıtılır. Bu tip kazıklara **uç kazığı** denir. (Şekil 2.2.a)
- b) Eğer taşıma kapasitesi yüksek zemin çok derinlerde ise üstyapı yükleri kazık yüzeyi boyunca yumuşak ve gevşek zemin tabakalarında meydana gelecek sürtünme kuvveti aracılığı ile taşıtılır. Bu tip kazıklara **sürtünme kazığı** denir. Sürtünme kazıklarının boyu yeterli sürtünme kuvveti elde edince kadar uzatılır. (Şekil 2.2.b)
- c) Eğer zemin kabaran-büzülen bir yapıya sahip ise veya yapı yüksek devrilme momentine maruz kalacak ise, yapının hidrostatik basınca veya döndürme momentine karşı temelde çekme kazıkları kullanılarak yapının stabilitesini artırılır. Zemine çakılan bu kazıklara **çekme kazığı** denir. (Şekil 2.2.c)
- d) Eğer zemin gevşek ve ayrık taneli ise üstyapıdan gelen yükleri taşıyabileceği yoğunluğu sağlamak amacıyla kazık çakılarak sıkılaştırma yapılır. Bu amaçla kullanılan kazıklara **kompaksiyon kazığı** denir. (Şekil 2.2.d)

e) Kıyı yapılarında ve iksa sistemlerinde kullanılan kazıklar yanal zemin yükü, dalga yükü ve deniz taşıtlarının çarpması gibi yatay yükleri taşımaktadır. Bu amaçla kullanılan kazıklara **yatay yüklü kazık** denir. (Şekil 2.2.e)

f) Açık deniz platformları gibi aşırı yatay yük alan yapıların temellerinde hem yatayda hem düşeyde yük taşıyan **eğik kazıklar** kullanılır. (Şekil 2.2.f)



Şekil 2.2. Kazıkların yük taşıma şemaları (Akbay 2009)

2.1.2. Kazıklı temel kullanım alanları

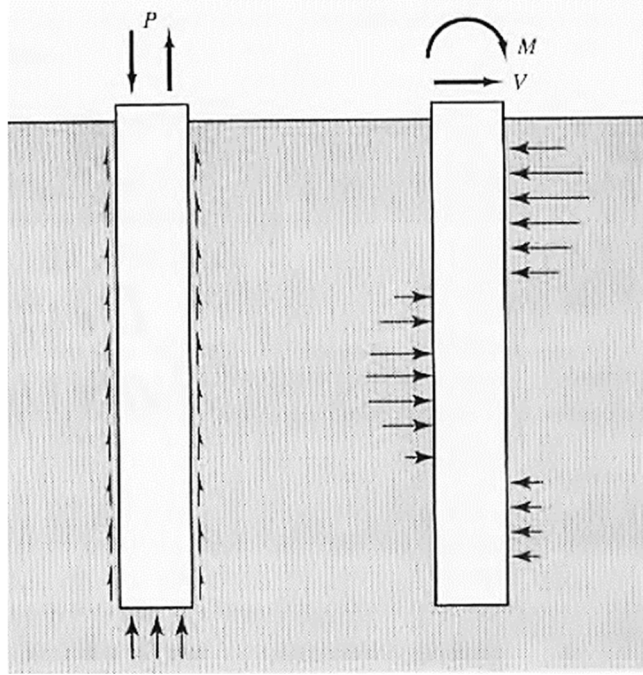
Zemin koşullarına göre kazıklı temel uygulanması zaruri olan durumlar aşağıda belirtilmiştir (Das 1990).

- a) Zeminin yüzeye yakın katmanın üst yapıdan gelen yükleri güvenli bir şekilde taşıma kapasitesi yok ise veya üst yapıdan kaynaklı yüklerle aşırı konsolide oluyor ise; üst yapıdan gelen yükler kazıklı temel yardımıyla daha derinler de taşıma kapasitesi yüksek zemine veya kayaca aktarılması durumu,
- b) Killi zeminlerin su ile teması durumunda şişme durumu oluşur, kum zeminlerde titreşim ile sıvılaşma durumu oluşur, şişme ve sıvılaşma bölgelerine aktif bölge denir. Üst yapıdan gelen yüklerin kazıklı temel yardımıyla bu aktif bölgelerin dışında güvenli zemine aktarılması durumu,
- c) Akarsu, deniz vb. yerlerde su hareketleri sonucu zemin yüzeyleri erozyona maruz kalmakta üzerine yapılacak köprü-köprüyol ayakları, bina vb. yapıların temel altının oyulmasına neden olmaktadır, yapıların yüklerini erozyondan etkilenmeyen derinlikteki tabakaya aktarılması durumu,
- d) Kıyı yapıları, açık deniz sondaj platformları ve rıhtım gibi deniz yapılarının dalga yüküne ve suyun kaldırma kuvvetine karşı yapının istikrarlı kalması kazıklı temeller yardımıyla sağlanması durumu.

2.2. Kazıkların Yatay Yük Taşınması

Kazıklı temeller üst yapıdan gelen düşey yükleri taşımanın yanı sıra, çoğu zaman kesme kuvveti ve/veya dönme momenti taşıma durumunda kalmaktadır. Yatay yük kaynakları aşağıda sıralanmıştır (Coduto 2001).

- Kazıklı iksa sistemlerinde zeminin basıncı,
- Yüksek katlı yapılarda rüzgâr yükü,
- Deprem yükü,
- Kazıklı kıyı yapılarında deniz taşıtlarının yanaşma yükleri,
- Açık deniz yapılarında dalga yükü,
- Elektrik iletim hatlarında kullanılan kulelerin temeline etki eden kablo yükü,
- Üst yapıdan gelen dış merkezli yükler,
- Köprü ayaklarına etki eden kemer ve açıklıklardan kaynaklı yapısal yükler.



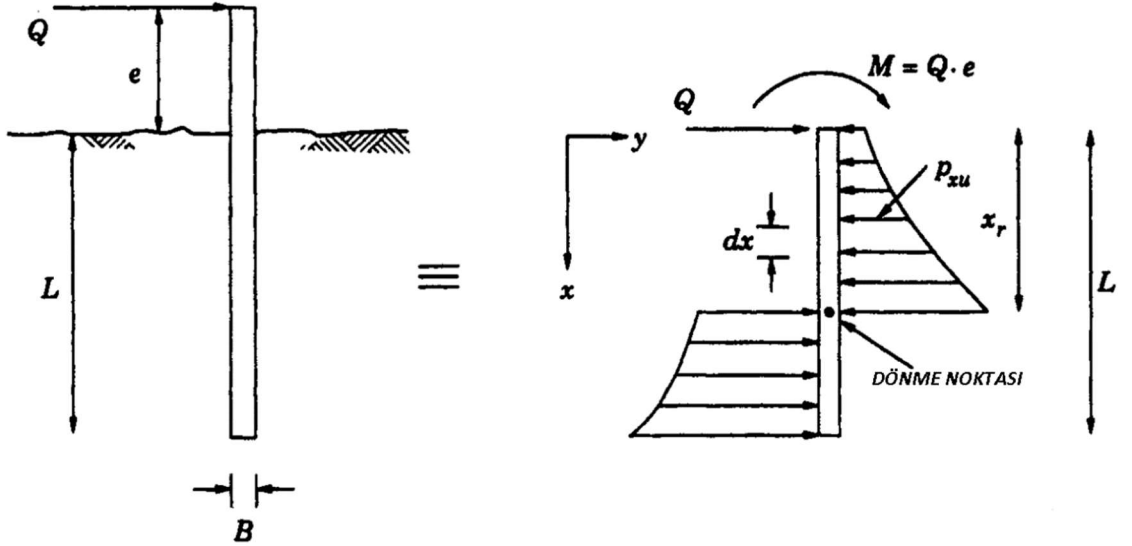
Şekil 2.3. Kazıkların aksenal ve yatay yük aktarması (Coduto 2001)

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi yatay da etki eden kuvvetler kazık-zemin etkileşimini değiştirmekte, dolayısıyla kazığın yapısal tasarımına etki etmektedir. Kazıklı temellerin yatay yük taşıma kapasitelerini belirlemek amaçlı çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Kazıkların yatay yük taşıma hesaplama yöntemi temelde iki kategoriye ayrılabilir.

1. Zeminin nihai yatay yük taşıma kapasitesini belirleme yöntemleri; Broms yöntemi ve Brinch Hansen yöntemi
2. Yatay yük altında kabul edilebilir deplase hesaplama yöntemleri; yatak katsayısı yaklaşımı yöntemi ve elastik yaklaşım yöntemi

Yatay yük (Q) ve moment (M) etkileyen serbest başlıklı kazığın yatay yük etkisiyle zeminde oluşturacağı tepki basıncının ve kazığın davranışının gösterimi Şekil 2.4'deki gibidir.



Şekil 2.4. Yatay yüklü serbest başlıklı kazığın zemin etkileşimi (Prakash ve Sharma 1989)

Bu yaklaşıma göre statik denge koşulları; yatay yüklerin toplamı ve momentlerin toplamı sıfır olmalıdır.

$$\sum F_y = 0 \quad Q - \int_{x=0}^{x=x_r} p_{xu} B dx + \int_{x=x_r}^{x=L} p_{xu} B x = 0 \quad (2.1)$$

$x = 0$ noktasına göre

$$\sum M = 0 \quad Qx - \int_{x=0}^{x=x_r} p_{xu} B x dx + \int_{x=x_r}^{x=L} p_{xu} B x dx = 0 \quad (2.2)$$

Burada;

Q : nihai yatay yük

M : moment

B : kazık çapı

x_r : dönme noktasının zemine uzaklığı

p_{xu} : nihai birim zemin direnci

e : yatay yükün zemin yüzeyine uzaklığıdır.

Nihai zemin direncinin formülü biliniyorsa, (2.1) ve (2.2) denklemleri çözülüp kazığın taşıyabileceği nihai yatay yük ve kazığın dönme noktası kolaylıkla tespit edilir. Brinch Hansen (1961) ve Broms (1964a, 1964b) zeminin nihai yatay yük taşıma kapasitesi belirlemede bu yaklaşımı kullanmışlardır.

2.2.1. Broms yöntemi

Broms (1964a, 1964b) tarafından geliştirilen bu yöntem zeminin nihai taşıma kapasitesine ulaşıncaya kadar tek kazığın taşıyabileceği nihai yatay yük ve/veya moment sınır değerlerini hesaplamayı amaçlamaktadır. Sınır değerler aşılsa kazık üzerinde plastik mafsal oluşur ve kazığın yük taşıma boyu belli olmuş olur. Kazığın veya zeminin göçme anında statik denge denklemleri kullanılmaktadır (Birand 2007).

Broms yöntemi zemini ya tam kohezyonsuz ($c=0$) ya da tam kohezyonlu ($\phi=0$) varsayımı üzerine kuruludur. Yani kumlu kil gibi homojen zeminler veya tabakalı zeminlerde kullanılamaz. Kazığın kısa rijit veya uzun bükülebilir oluşu ile zeminin kohezyonlu veya kohezyonsuz oluşu arasındaki ilişki, kazık boyunun görece rijitlik boyuna (T ve R) oranı ile belirlenmektedir.

$$T = \left(\frac{E_p I_p}{n_h} \right)^{1/5} \quad (2.3)$$

Kazık kohezyonsuz ve normal konsolide killerde $L/T \leq 2$ ise kısa rijit, $L/T \geq 4$ ise uzun bükülebilirdir.

$$R = \left(\frac{E_p I_p}{k_h} \right)^{1/4} \quad (2.4)$$

Kazık kohezyonlu ve normal konsolide killerde $L/R \leq 2$ ise kısa rijit, $L/R \geq 3,5$ ise uzun bükülebilirdir.

Burada;

T ve R : Göreceli rijitlik boyu

E_p : Kazığın elastisite modülü

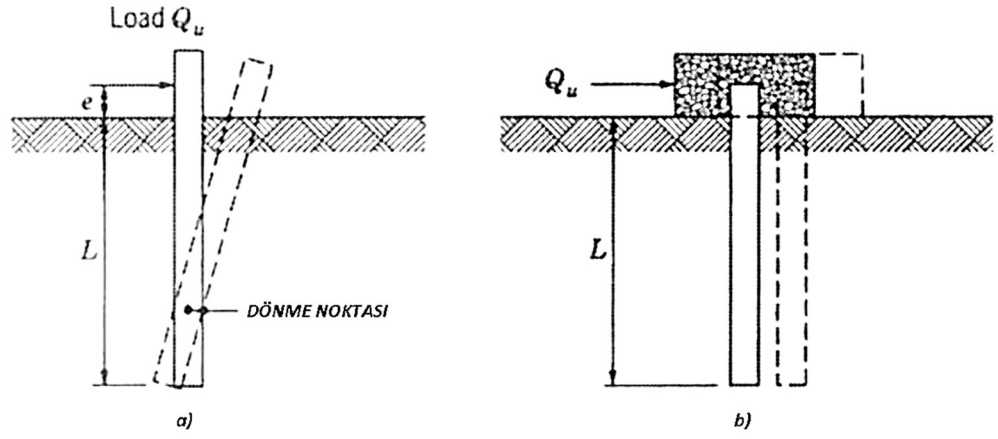
I_p : Kazığın atalet momenti

n_h : Yatay yatak katsayısı sabiti

k_h : Derinlikle değişen yatay yatak katsayısı ($k_h = n_h x$)'dir.

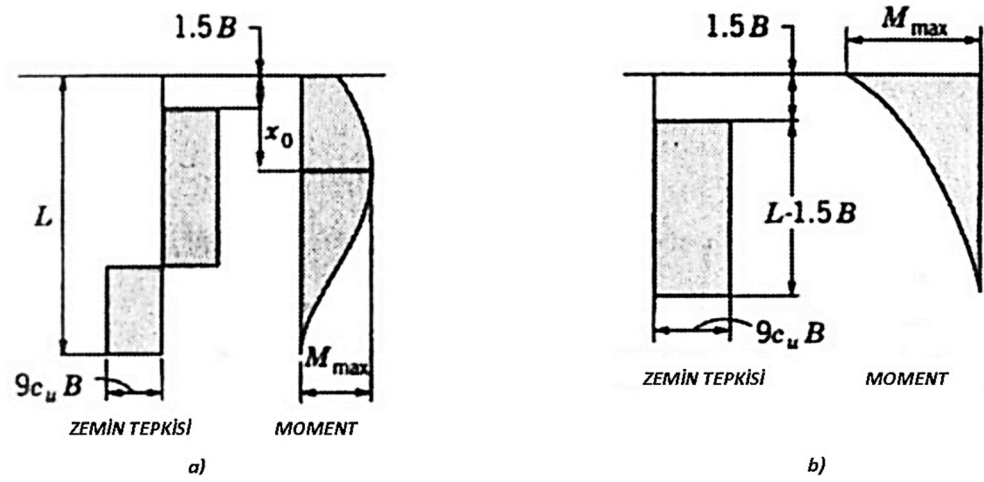
Kısa kazıklar

Şekil 2.5'te kısa kazıkların yatay yüke maruz kaldığında meydana gelecek sapma durumu gösterilmiştir. Şekil 2.5.(a)'da serbest başlıklı kısa kazığın yatay yük yüklendiğinde zemin içinde dönme merkezi oluşturarak sapma yaptığı görülmektedir. Şekil 2.5.(b)'de ise tutulu başlıklı kazığın yatay yük yüklendiğinde aşırı rijit davranarak kazık ve başlık birlikte hareket ettiği ve dönmenin olmadığı görülmektedir.



Şekil 2.5. Yatay yüklü serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) kısa kazığın sapma gösterimi (Broms 1964a, 1964b)

Broms (1964) yaptığı gözlemlere dayanarak kohezyonlu zeminlerin, zemin yüzeyinden $1,5B$ derinliğe kadar zemin tepkisini sıfır kabul etmekte ve zeminin nihai taşıma gücünü $p_u=9c_uB$ (c_u , drenajsız kesme dayanımı) deneysel olarak belirlemiştir. Yük dağılımı serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) kısa kazıklar için Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Akbaý 2009).



Şekil 2.6. Serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) kısa kazığın kohezyonlu zeminde, zemin tepki ve kazık eğilme momenti değerleri (Broms 1964a)

Broms (1964b) kohezyonsuz zeminlerde yatay yüklü kısa kazıkların arkasında kalan aktif zemin basıncı ihmal edilmekte, zemin tepkisini pasif toprak basıncının 3 katı olarak tanımlamaktadır. Yani zemin tepkisi derinliğe bağlı olarak doğrusal olarak artmaktadır. Serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) kısa kazıklar için zemin tepkileri ve momentler Şekil 2.7'de gösterilmektedir.

$$p_u = 3B\sigma'_v K_p = 3B\gamma' LK_p \quad (2.5)$$

Burada;

p_u : birim zemin gerilmesi

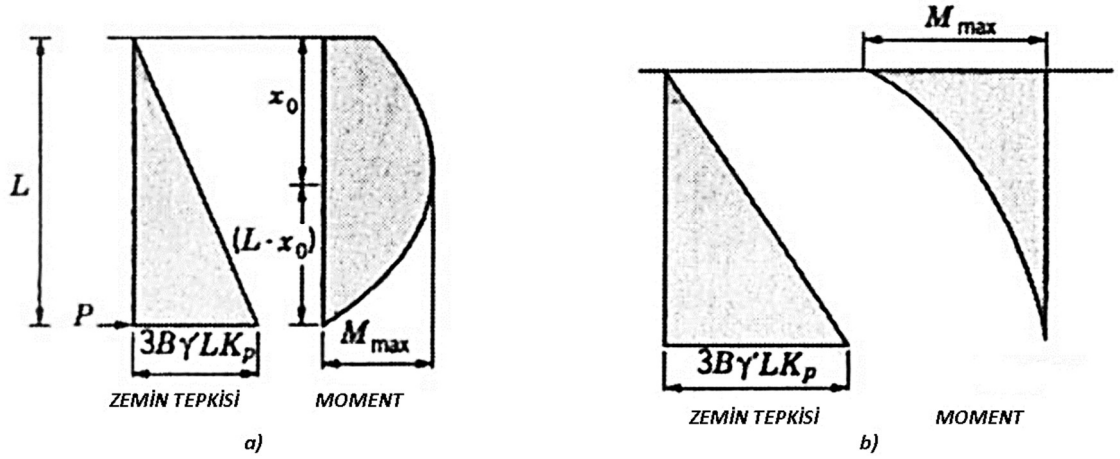
σ'_v : düşey gerilme (efektif)

γ' : zeminin birim ağırlığı (efektif)

K_p : Rankine pasif toprak basıncı $K_p = (1 + \sin \phi')/(1 - \sin \phi')$

ϕ' : içsel sürtünme açısı (efektif)

L : gömülü kazık boyudur.



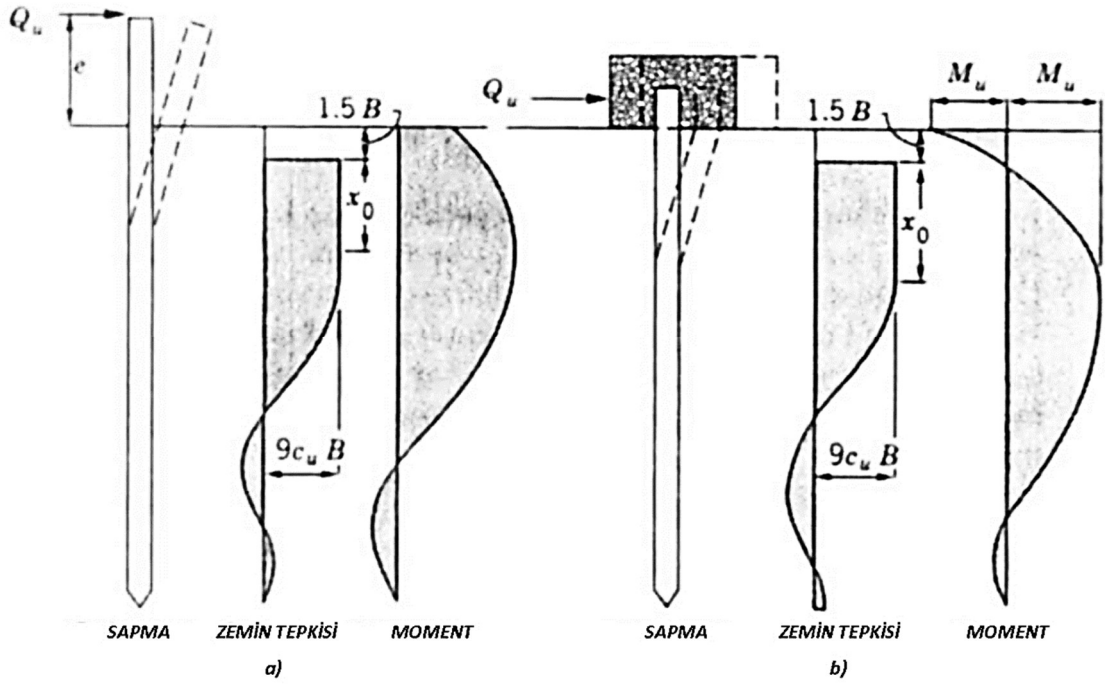
Şekil 2.7. Serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) kısa kazığın kohezyonsuz zeminde, zemin tepki ve kazık eğilme momenti değerleri (Broms 1964b)

Uzun kazıklar

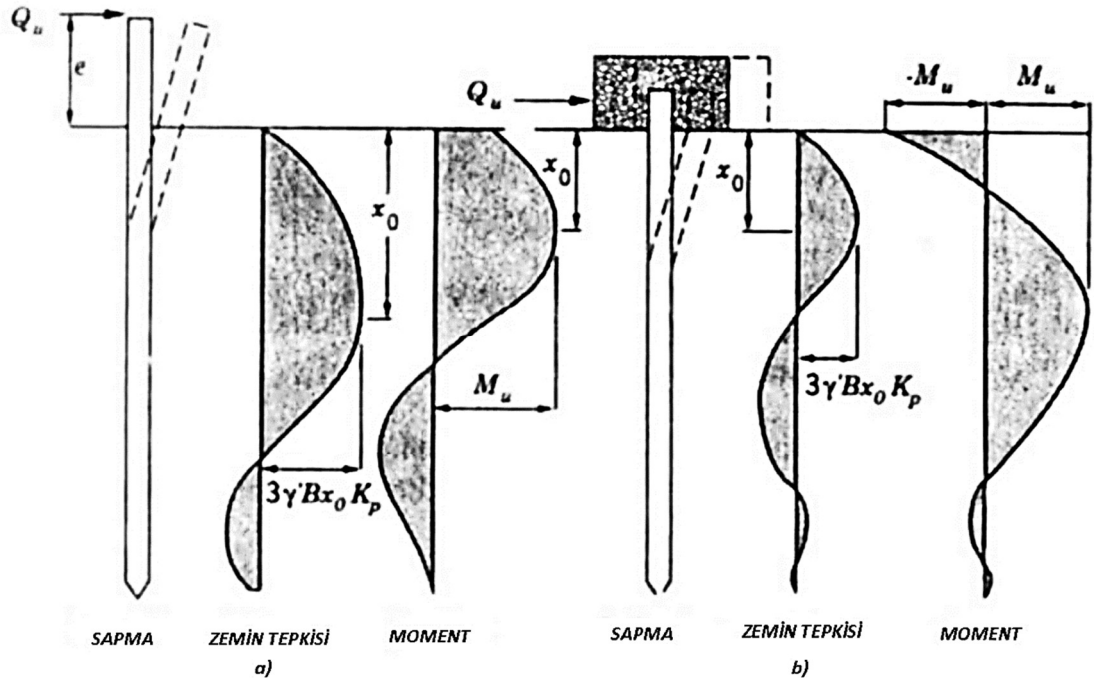
Kohezyonlu zeminlerde serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) uzun kazıklar için sapma, zemin tepkisi ve momentler Şekil 2.8. 'de gösterilmektedir. Bu yöntem de Kohezyonlu zeminde zemin tepkisi plastik mafsalsın olduğu düşünölen noktadan itibaren diğer bir ifadeyle $(1,5B+x_0)$ 'dan itibaren azaldığı kabul edilmektedir.

Kohezyonsuz zeminlerde serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) uzun kazıklar için sapma, zemin tepkisi ve momentler Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Kohezyonsuz zeminde nihai zemin tepkisi hesaplanırken denklem (2.5) kullanılır, fakat denklem de L , gömölü kazık boyu yerine x_0 , nihai zemin tepkisi ve kazık eğilme momenti oluştuğu düşünölen derinlik kullanılır.

$$p_u = 3B\gamma' x_0 K_p \quad (2.6)$$



Şekil 2.8. Serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) uzun kazığın kohezyonlu zeminde, sapma, zemin tepki ve kazık eğilme momenti değerleri (Broms 1964a)



Şekil 2.9. Serbest başlıklı (a) ve tutulu başlıklı (b) uzun kazığın kohezyonsuz zeminde, sapma, zemin tepki ve kazık eğilme momenti değerleri (Broms 1964b)

2.2.2. Brinch Hansen yöntemi

Brinch Hansen (1961) Şekil 2.4'de gösterilen kazık-zemin etkileşim yaklaşımı ile sadece yatay yüklü kısa kazıkların nihai taşıma kapasitesi hesaplama yöntemini geliştirmiştir. Kumlu kil gibi homojen zeminlerde ve tabakalı zeminlerde kullanılabilen bu yöntem toprak basıncı teorisine dayanmaktadır. Sadece kısa kazıklar için uygulanabilir olması ve kazığın dönme noktasını bulmak için deneme-yanılma yapılması yöntemin yaygın kullanımını engelleyen durumlardır.

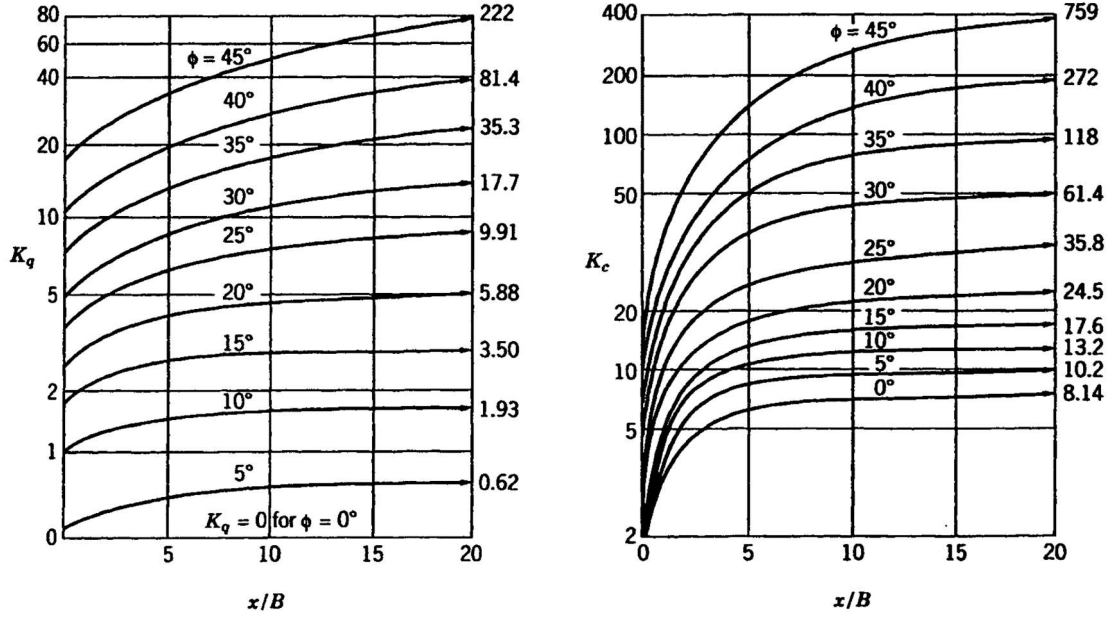
$$P_{xu} = \sigma_v' K_q + K_c \quad (2.7)$$

Burada;

σ_v' : düşey efektif gerilme

K_q ve K_c : ϕ içsel sürtünme açısı ve x/B ye bağlı Şekil 2.10'dan tespit edilen katsayılardır.

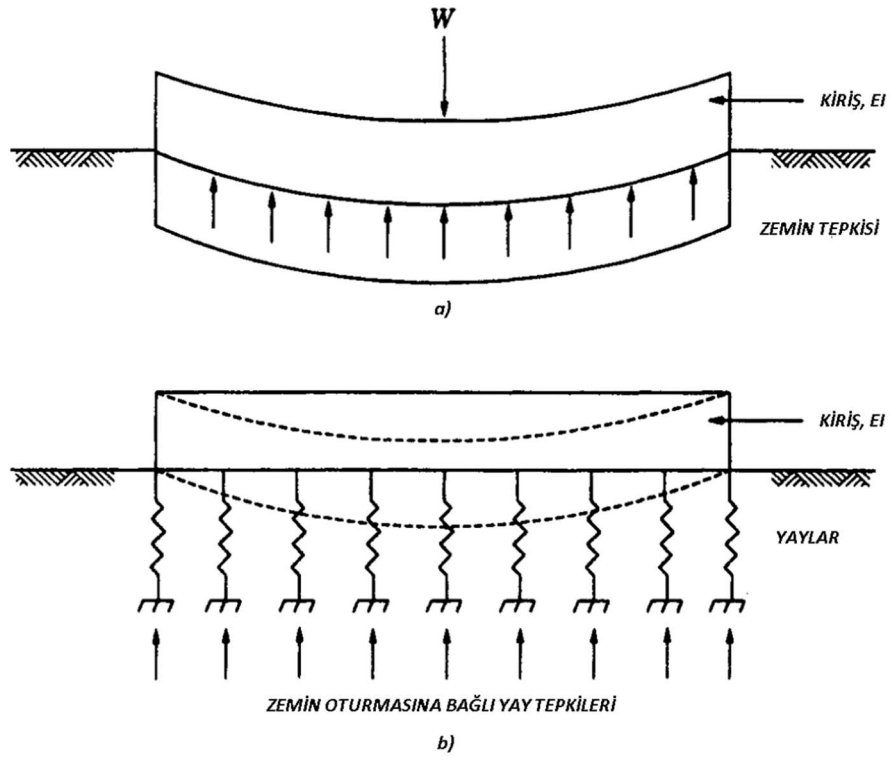
Brinch Hansen (1961), herhangi bir derinlikte nihai taşıma kapasitesini (P_{xu}) bulmak için denklem (2.7)'yi kullanmaktadır. Deprem ve çarpma gibi geçici yükleme hesaplarında drenajsız c_u ve ϕ mukavemet değerleri, yanal toprak basıncı gibi kalıcı yükleme hesaplarında drenajlı c' ve ϕ' mukavemet değerleri kullanılmalıdır.



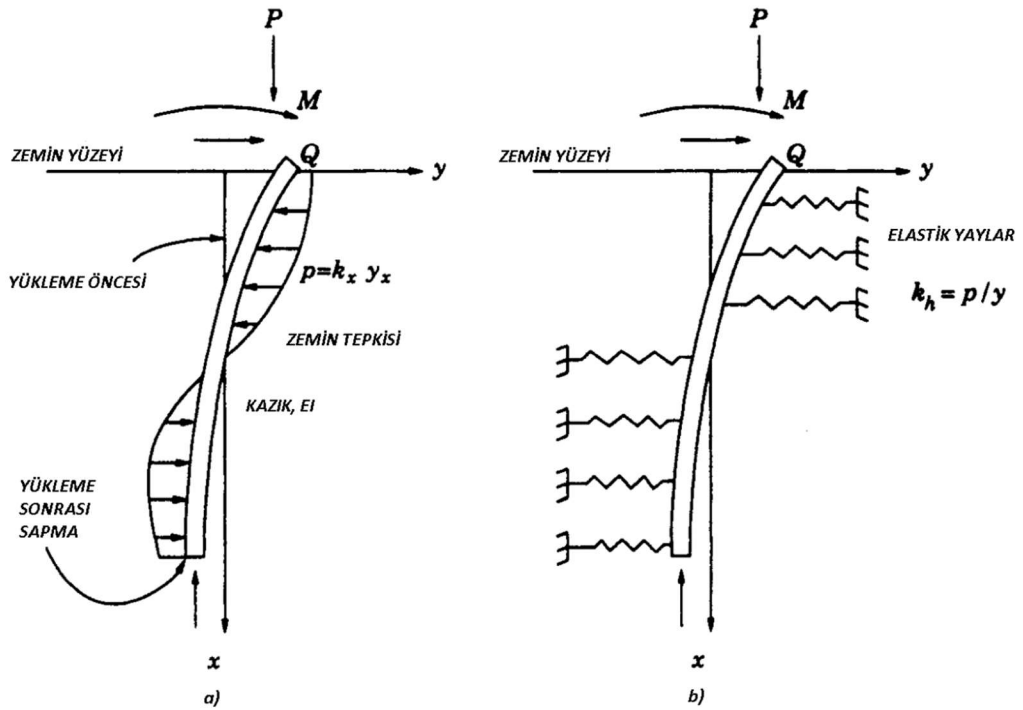
Şekil 2.10. K_q ve K_c katsayıları (Brinch Hansen 1961)

2.2.3. Yatak katsayısı yöntemi

Yatak katsayısı yöntemi, yatay yük altında kabul edilebilir nihai sapma miktarını hesaplama amaçlanmaktadır. Şekil 2.11'de gösterilen Winkler 'in zemin modelinde, zeminin birbirine sonsuz derece yakın ve birbirinden bağımsız elastik yaylar olarak tanımlanır ve bu yaylar elastik temeldeki kirişi destekler. Bu yöntem Şekil 2.12'de gösterilen yatay yüklü kazık, Winkler (1867) zemin modelindeki elastik temeldeki kiriş gibi ele almaktadır. Kazıklara tanımlanan bu yayların rijitlik değeri (k_h) aynı zamanda zeminin yatay yatak katsayısıdır (Prakash ve Sharma 1989).



Şekil 2.11. Elastik temeldeki kiriş (a) ve Winkler 'in idealleştirme gösterimi (b) (Prakash ve Sharma 1989)



Şekil 2.12. Yatay yüklü kazık zemin tepkisi (a) ve yay ile idealize edilmiş yatay yüklü kazık (b) gösterimi (Prakash ve Sharma 1989)

$$k_h = \frac{p}{y} \quad (2.7)$$

Burada;

k_h : yatay yatak katsayısı (elastik yayların rijitliği)

p : kazığın birim uzunluğundaki zemin tepkisi

y : kazığın sapmasıdır.

Yatay yatak katsayısı üzerinde çalışan Palmer ve Thompson (1948) zemin içindeki kazığın herhangi bir derinlikteki yatay yatak katsayısını aşağıdaki gibi tanımlamışlar.

$$k_x = k_h \left(\frac{x}{L}\right)^n \quad (2.8)$$

Burada;

k_x : x derinliğindeki yatay yatak katsayısı

k_h : yatay yatak katsayısı (kazık ucundaki)

n : zemin türüne göre değişen katsayı ($n \geq 0$)'dır.

n katsayısı kumlar ve normal konsolide killer de kalıcı yüklemeler için en yaygın kullanım $n=1$ 'dir. Aşırı konsolide killer için n katsayısı $n=0$ olarak tanımlanmış yani yatay yatak katsayısı sabittir. Davisson ve Prakash (1963) yapmış oldukları çalışmalar ile drenajsız durumlarda en uygun n katsayı değerini kumlar için $n=1,5$ ve killer için $n=0,15$ olarak belirlemişlerdir.

$n=1$ değeri için, k_h katsayısının derinlikle değişimini ifade eden denklem aşağıda belirtilmiştir:

$$k_h = n_h x \quad (2.9)$$

Buradaki n_h , yatak katsayısı sabitidir. Bu yaklaşım ile kohezyonsuz ve normal konsolide killer de derinlikle yatay yüklü kazığa zemin tepkisinin arttığı ifade edilmiştir.

Kohezyonsuz ve normal konsolide killeri için önerilen değerler izelge 2.1. ve izelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çeşitli sıklıktaki kohezyonsuz zeminler için n_h değerleri (Terzaghi 1955)

Kumun sıklılığı	Gevşek	Orta Sıkı	Sıkı
n_h , kuru ve nemli zeminlerde (kN/m^3)	1800 - 2200	5500 - 7000	15000 - 18000
n_h , su altında (kN/m^3)	1000 - 1400	3500 - 4500	9000 - 12000

Çizelge 2.2. Normal konsolide killeri için önerilen n_h değerleri

	n_h , (kN/m^3)	Öneren
Yumuşak Kil	160 - 3500	Reese - Matlock (1956)
	270 - 340	Davisson - Prakash (1963)
Organik Zemin	100 - 815	Davisson (1970)

Yatay yüklü kazığın davranışının analizinde elastik temelde elastik kiriş denkleminin (2.10) kullanılmaktadır.

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + p = 0 \quad (2.10)$$

Burada;

E_p : kazığın elastisite modülü

I_p : kazığın atalet momenti

p : kazığın birim uzunluğuna denk gelen zemin tepkisidir.

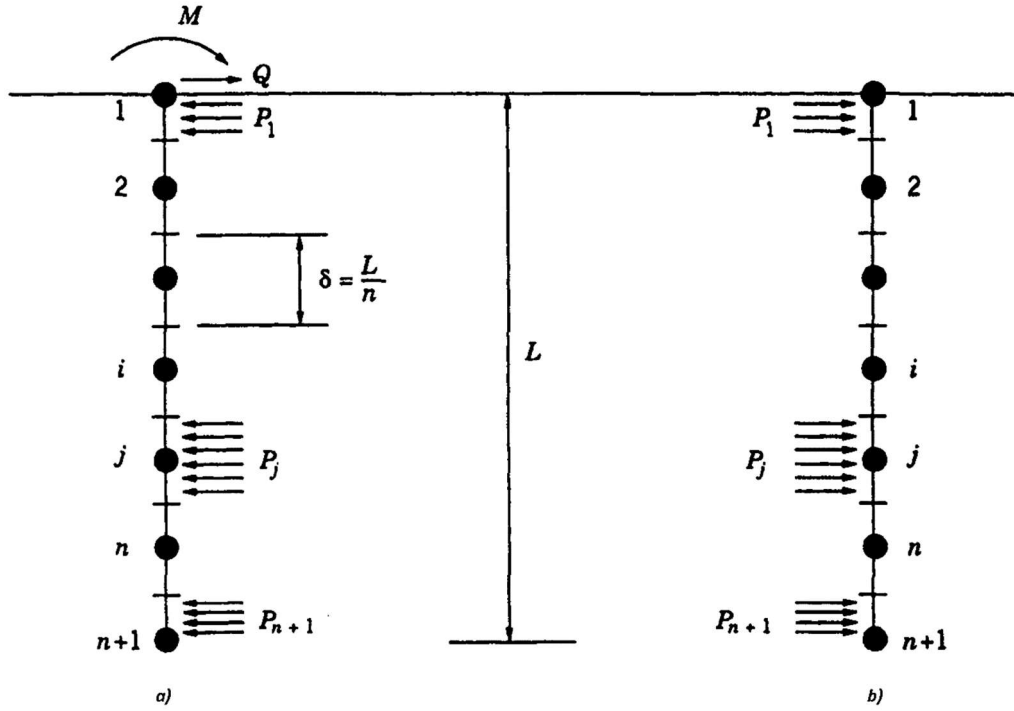
Denklem (2.10)’da p yerine ($k_h y$) yazıldığında, elde edilen denklem (2.11) özlerek kazıktaki sapma miktarı belirlenir.

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{k_h y}{E_p I_p} = 0 \quad (2.11)$$

Yatak katsayısı yönteminin; diğer yöntemlere göre daha basit oluşu, tabakalı zeminlerde uygulanabilir olması ve yatak katsayısının derinlik ile değişiyor olması, yöntemin yaygın olarak kullanılmasına imkân sağlamıştır. Bununla birlikte, yöntemde zeminin sürekliliğinin ihmal edilmesi ve k_h katsayısının sadece zeminin özelliklerine bağlı olmaması aynı zaman da temelin boyutlarına ve kazıdaki sapmaya bağlı olması yöntemin eksik taraflarıdır (Reese ve Matlock 1956, Uysal 2014).

2.2.4. Elastik süreklilik yöntemi

Yatay yük altında kazığın kabul edilebilir nihai sapma miktarını hesaplayan bir diğer yöntem elastik süreklilik yaklaşımıdır. Poulos (1971a ve 1971b) tarafından geliştirilen yöntemde; yatay yüklü kazığın, elastik sürekliliğe sahip olduğu kabul edilen zemindeki davranışı incelenmiştir. Bu yöntem teorik olarak daha gerçekçi olsa da zemin katsayısının (E_s) gerçek değerinin tespit edilmesinin çok zor olması yöntemin uygulamada yaygın kullanımını engellemektedir. Ayrıca, yöntemin hesaplamalarda kullanılabilmesi için arazi deneyi doğrulanması gerekmektedir (Prakash ve Sharma 1989).



Şekil 2.13. Kazığa etkiyen yükler (a), zeminin kazığa tepki kuvvetleri (b) (Poulos 1971a)

Elastik süreklilik yönteminin teorik temelleri aşağıda sıralanmıştır (Poulos 1971a);

1- Şekil 2.13'te görüldüğü gibi kazık ince dikdörtgen genişliği B , uzunluğu L ve esneklik katsayısı $E_P I_P$ olan bir çubuk olarak varsayılmaktadır. Kazık $(n+1)$ parçaya bölünmektedir, kazığın başındaki ve ucundaki parçalar $(\delta/2)$ uzunluğunda arada kalan parçalar ise (δ) uzunluğundadır.

2- Analizi basitleştirmek için kazığın kenarı ile zemin arasında oluşan muhtemel kesme gerilmesi hesaba dahil edilmez.

3- Her parçaya eşit şekilde P yatay kuvveti etki ettiği ve bu kuvvetin kazık genişliği boyunca sabit olduğu varsayılır.

4- Zeminin ideal, homojen, izotropik, yarı sonsuz elastik malzeme ve kazıktan etkilenmeyen Young (elastisite) modülü (E_S) ve Poisson oranı (ν_S) özelliklerine sahip olduğu varsayılmaktadır.

Zeminin tamamen elastik olduğu düşünülen durumda, kazığın orta kısımlarındaki parçaların merkezi referans alınarak kazıkta ve zeminde oluşan yatay sapma kazık boyunca eşitlenir. Uygun denge koşulları kullanılarak eşitlenen denklemleriyle sapma miktarları hesaplanır. Kazığın başındaki ve ucundaki sapma miktarları ayrıca hesaplanır. Kazığın serbest başlıklı veya tutulu başlıklı olması, kazığın başında dönmenin olması ya da olmaması durumunu belirler. Yatay yük etkisindeki kazığın davranışı belirleyen parametreler; kazığın uzunluk-çap oranı (L/d) ve kazığın rijitlik katsayısı (K_R)'dır;

$$K_R = \frac{E_P I_P}{E_S L^4} \quad (2.12)$$

burada;

K_R : kazığın rijitlik katsayısı

$E_P I_P$: kazığın elastisite modülü ve atalet momenti

E_S : zeminin elastisite modülüdür.

K_R , zemin ile kazığın esneklik oranı katsayısıdır, rijit kazıklar için sonsuz ve sonsuz kazıklar için sıfır limit değerleri hesaplanır.

Richardson (1980) tarafından yapılan araştırmalar sonucu, yöntemin sonuçlarının doğruluğu kazığın ayrılan eşit parçaların sayısı ile ilişkili olduğu tespit etmiştir. Parçaların sayısını 6, 11, 21 ve 31 olarak belirleyip hesaplamalar yapmış ve 21 parçaya bölmenin daha doğru sonuç verdiğini belirlemiştir. Douglas ve Davis'in (1964) yatay yüklü rijit kazıklar için yaptıkları hesaplamalar ile elastik süreklilik yönteminin kazık genişliği boyunca eşit gerilme varsayımının hataları görülebilir. Kazık boyu ile çapının oranı $L/d=2$ olunca, kazık sapma ve dönme miktarları gerçek değerlerin %25 – 30 altında sonuç elde edilir. Ama L/d oranı arttıkça gerçek değere daha yakın sonuç elde edilir, $L/d=15$ olunca sonuç gerçek gerçek değerle birebir örtüşmektedir. Bu sebepten ötürü genellikle uygulamalarda sapma ve dönme hesaplamalarında kazık genişliği boyunca eşit gerilme varsayımının kritik hatalı sonuçlar vermediği görülmektedir (Akbaý 2009).

2.3. Kazıklı Temellerin Analizi

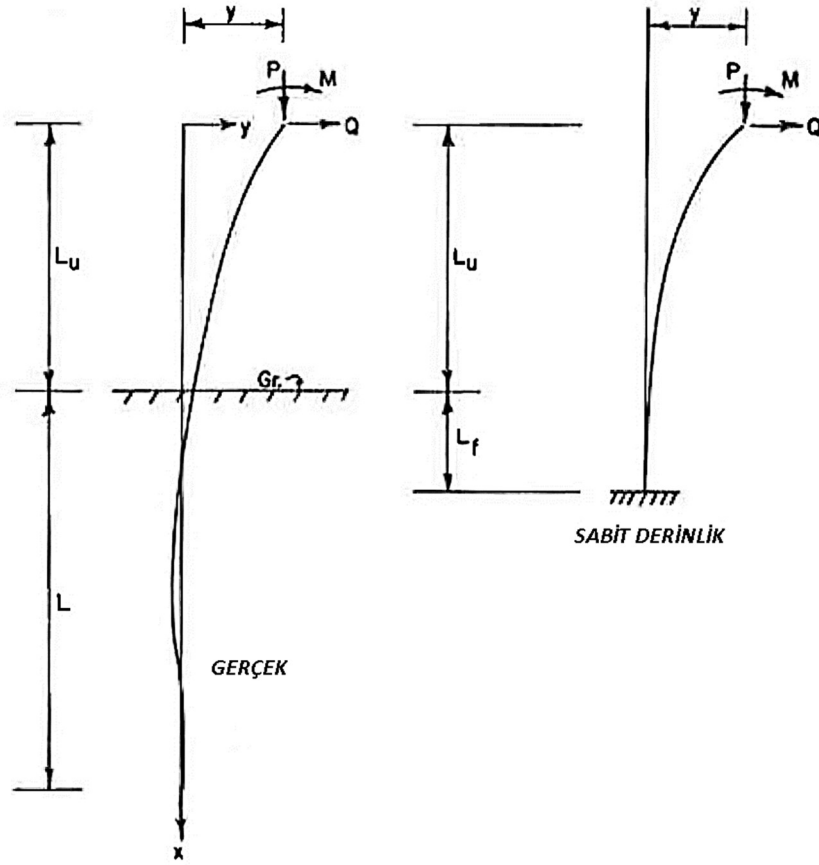
2.3.1. Rijit analiz yöntemi

Kazıklı temellerde yanal yük problemlerini çözmek için kullanılan ilk analiz yöntemi temeli tamamen rijit kabul eden rijit analiz yöntemidir. Bu analiz yöntemi maksimum seviyede moment taşıma kapasitesi ve kazıkları daha az derinliğe inme gerekliliği sunmaktaydı. Fakat bu analiz yönteminde kazıkların eğilerek dönmeleri ihmal edilmekte ve zemin direnci için basit tanımlamalar kullanılmaktaydı. Broms (1964a, 1964b, 1965) yanal yük taşıma kapasitesi belirlemede bu analiz yöntemini kullanmıştır.

2.3.2. Sabitlik derinliği analiz yöntemi

Sabitlik derinliği analiz metodu 1960'lı ve 1970'li yıllar boyunca kullanılmıştır, kazıklı temelin yatay yük ile eğilme meydana geldiği öngördüğünden rijit analizin gelişmiş versiyonudur. Bu analiz yönteminde kazığın başlığı ile kazığın sabitlendiği düşünölen güçlü-rijit zemin derinliği (L_f) arasında kalan bölgedeki zeminin direnci ihmal

edilmektedir. Kazığın sabitlendiği düşünülen nokta, kazıkta oluşan gerilme ve deplaseleri basit bir şekilde hesaplama imkânı sağlamaktadır. Kısmen gömülü olan kazıkların başlıkları ankastre mesnet olarak tasarlanması (Şekil 2.14.), yapının iç kuvvetleri statik olarak belirsiz kılmaktadır. Yapı mühendisliği açısından yapının statik olarak çözülmesi için, kazıkların deplase ve dönme miktarlarının sabitlik derinliği analiz yöntemiyle belirlemek en uygun yapısal çözümdür. (Davisson 1970)



Şekil 2.14. Kısmen gömülü kazık (Davisson 1970)

2.3.3. Rijit olmayan zemin-yapı etkileşim analizleri

Yukarıda açıkladığımız analiz yöntemlerinin eksikliklerinden ötürü daha gerçekçi analizler yapabilmek adına yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak rijit olmayan analiz yöntemleri geliştirmişlerdir. Zeminin yatay yüklere karşı davranışı sonlu elemanlar metodu (SEM) veya P-Y yöntemi yardımıyla analiz edilmektedir (Coduto 2001);

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM):

Sonlu elemanlar metodu (SEM) kazıklı temeli ve zemini küçük elemanlara ayırıp her elemana yapısını tarif eden gerilme ve gerinim gibi mühendislik özelliklerini tanımlamadan ibarettir. Yapılan tanımlamalar ile oluşturulan modele etkiyen düşey yük, yatay yük ve momente karşılık, kazıklı temelde oluşan kesme kuvveti, moment ve deplaselerin analizidir. Analizin sonuçlarının doğruluğu tanımlanan mühendislik özelliklerinin doğruluğu ile orantılıdır. Kazıklı temelerde kullanılan malzemelerin mühendislik özellikleri bilindiği için doğru tanımlamak kolaydır, fakat zeminin mühendislik özellikleri daha karmaşık olduğu için tam olarak doğru bir şekilde tanımlamak zordur. Mesela zeminin gerilme ve gerinim özellikleri doğrusal değildir, bunun için üç boyutlu analizleri daha doğru sonuçlar vermektedir. SEM zeminin mühendislik özellikleri üzerinde detaylı ve hassas çalışmalar yapılan nitelikli projelerde kullanılmaktadır. Fakat genel projelerde kullanılabilmesi için saha yükleme testleri ile geliştirilmesi gerekmektedir.

P-Y Yöntemi:

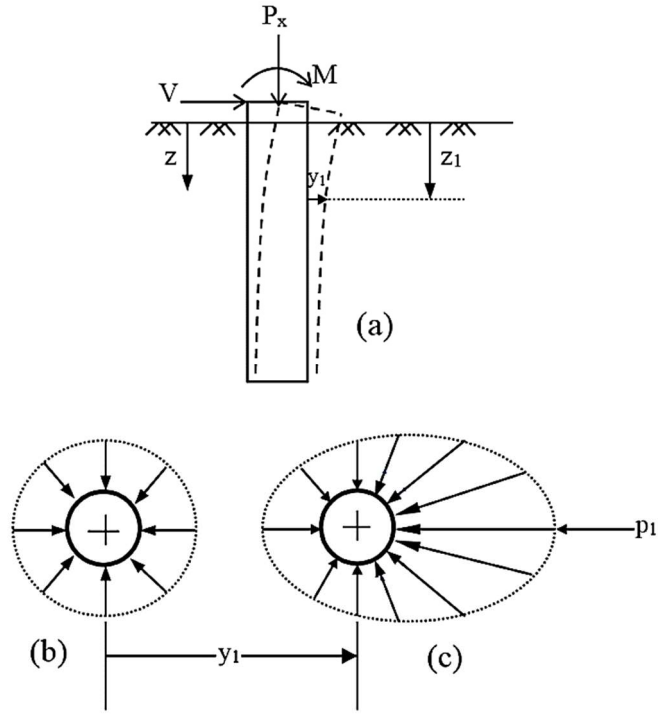
P-Y yöntemi kazıklı temellerin yapı-zemin etkileşimi modellenirken doğrusal olmayan yaylar serisi tanımlamayı önerir. Bu metot, radye temel analizinde kullanılan metoda benzerdir SEM 'den daha basittir. P-Y yöntemi SEM kadar titiz olmamasına rağmen, gerçek ölçüler de yapılan yükleme testleriyle kapsamlı olarak ölçülmüş ve ayarlanmış olması analiz programlarında yaygın kullanım alanı bulmasını sağlamıştır. Bundan ötürü özellikle kazıklı temellerin tasarımında karşılaşılan problemleri çözme noktasında sık kullanılan yöntemdir. Bölüm 2.4'te P-Y yöntemi daha detaylı olarak incelenecektir.

2.4. P-Y Yöntemi

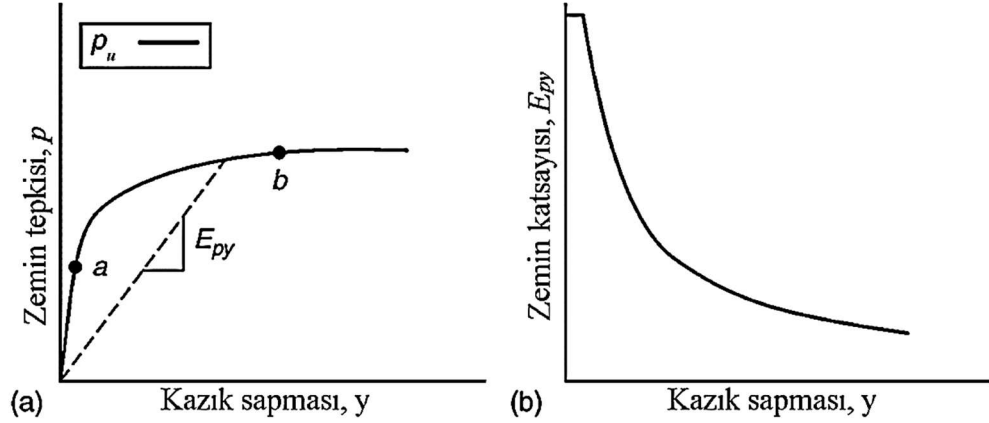
P-Y yöntemi; Kum, kil ve kumlu kil gibi homojen veya tabakalı zeminlerde statik ve tekrarlı yatay yüklü kazıkların zemin ile olan ilişkisinin doğrusal olmayan analizinde en çok güvenilen ve kullanılan yöntemdir (Reese ve Impe 2011). P-Y yöntemi ile ilgili deneysel çalışmalar 1950'li yılların sonlarına doğru başladı, ilk kullananlar McClelland ve Focht (1958), daha sonra Matlock ve Reese (1960). Fakat yöntemin tamamen gelişmesi için yeni analiz yazılımlarına ve gerçek ölçüler de yapılan yükleme testleriyle doğrulanmaya ihtiyaç vardı. Bu çalışmaların çoğu 1960'lı 1970'li yılları boyunca gerçekleştirildi, 1980 yılına gelindiğinde yöntem kurulumunu büyük ölçüde tamamlamıştı. Yapılan çalışmalar ile yatay yüklü kazığın analizinde kullanılabilecek en uygun yöntemin P-Y yöntemi olduğu görülmüştür. Çeşitli zemin ve yüklemede P-Y yönteminden daha gerçekçi sonuçlar alabilmek için çalışmalar hala devam etmektedir (Coduto 2001).

P-Y yöntemiyle yapılan analizlerde kullanılan ana parametreler; kazığa etkiyen eksenel yük (P_x), yatay yük (V), moment (M) ve kazığın zeminin içinde herhangi bir derinlikte (z_I), kazığa etkiyen yükler sonucu oluşan sapma (y_I) ile zeminin kazığın birim uzunluğuna tepkisi (p_I) Şekil 2.15.(a)'da gösterilmiştir. Şekil 2.15.(b)'de silindir şeklindeki kazığa yükleme olmadığı durumda zeminin kazığa uyguladığı gerilme gösterilmiştir. Şekil 2.15.(c)'de ise görüldüğü gibi yatay yük sonucu sapmanın olduğu yönün zıt yönünde kazığa etkiyen zemin gerilmesi artmaktadır.

Tipik P-Y eğrisi Şekil 2.16.(a)'da gösterildiği gibi çeyrek daire görünümündedir, zemin tepkisi (p) kazığın sapması (y) ile grafiğin ilk bölümünde doğrusal artış gösterir, orta bölümde parabolik artış gösterir ve son bölümde zemin tepkisi nihai seviyeye çıkarak (p_u) doğrusal olarak sabit kalır. Yatay yüklü kazıklarda zeminin tanecik özellikleri bağlı bir parametre olan zemin katsayısının (E_{py}), kazık sapması (y) ile değişimi Şekil 2.16.(b)'de gösterilmiştir. P-Y eğrisinin doğrusal olarak arttığı küçük sapmanın (y) olduğu bölümde zemin katsayısı (E_{py}) sabittir, sapma miktarı arttıkça zemin katsayısı (E_{py}) doğrusal olmayan bir gösterimle azalmaktadır (Reese ve Impe 2011).



Şekil 2.15. Yatay yüklü silindirik kazığın birim uzunluğunda oluşan zemin gerilmesinin gösterimi (Reese ve Cox 1969)



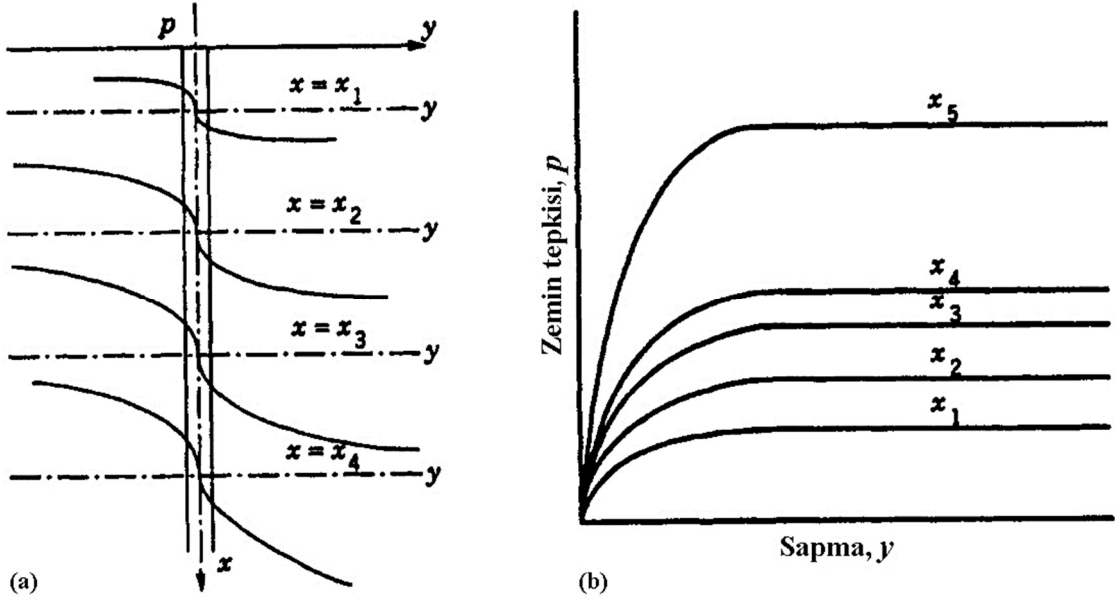
Şekil 2.16. Tipik P-Y eğrisi (a) ve Zemin katsayısı gösterimi (b) (Reese ve Impe 2011)

Şekil 2.17.(a)'da görüldüğü gibi, derinliğe (x) bağlı olarak oluşturulan fonksiyonlarla P-Y eğrileri oluşturulur, derinlik arttıkça nihai zemin tepkisi artmaktadır (Şekil 2.17.b). Zeminin türüne ve yatay yükleme çeşidine göre P-Y eğrilerinin grafiği farklılıklar göstermektedir. P-Y eğrileri oluşturulurken aşağıdaki karakteristik özelliklere sahip olduğu varsayılmaktadır (Prakash ve Sharma 1989):

1- Her derinlikte kazıkta oluşan sapma (y) sonucu kazığın birim uzunluğuna ayrı etki eden zemin tepki kuvveti (p) doğrusal olmayan şekli ile ifade edildiği,

2- P-Y eğrileri kazığın şeklinden ve rijitliğinden bağımsızdır ve kazığın birim uzunluğuna etkiyen aksel yüklerden etkilenmediği,

3- Bu varsayım bütünüyle gerçeği yansıtmıyor olmasına rağmen, deneysel çalışmalara dayanarak pratik olmasından dolayı yatay yüklü kazıkta oluşan sapmanın sadece zeminin gösterdiği tepki ile bağlantılı olduğunu varsayılmaktadır.

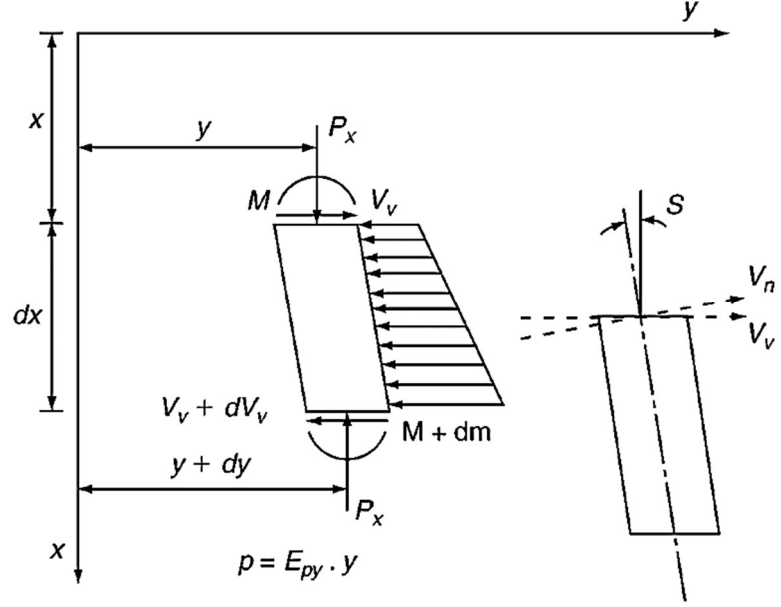


Şekil 2.17. Çeşitli derinlikte P-Y eğrilerinin yerleşimi (a) ve P-Y eğrilerinin grafiksel gösterimi (b) (Prakash ve Sharma 1989)

2.4.1. P-Y yönteminin teorik açıklaması

P-Y yönteminin uygulamadaki çözümü Hetenyi (1946) tarafından türetilen elastik zemine oturan kiriş teorisi yardımıyla türetilen denklemlerle hesaplanmaktadır. Yatay yüklü kazığa etkiyen yükler, kazık üzerindeki birim eleman yardımıyla Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Kazığın eksenine doğrultusunda ve ağırlık merkezinden geçen kazığı sıkıştıran aksel kuvvet çifti (P_x)'in dönme momenti üzerindeki etkisi çok küçüktür

olduğundan çoğu çalışmalarda ihmal edilir, fakat kazıktaki burkulma durumunu değerlendirirken dikkate alınması gerekir (Reese ve Impe 2011).



Şekil 2.18. Kazık üzerindeki bir elemana etkiyen yükler (Reese ve Impe 2011)

Kazığın birim dx elemanına etkiyen kuvvetlerle oluşan sapma (y) sonucunda moment denge denklemi (2.13);

$$(M + dM) - M + P_x dy - V_v dx = 0 \quad (2.13)$$

ya da,

$$\frac{dM}{dx} + P_x \frac{dy}{dx} - V_v = 0 \quad (2.14)$$

Denklem (2.14) x 'e göre türevi alınarak denklem (2.15) türetilir.

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{dV_v}{dx} = 0 \quad (2.15)$$

Teorik özdeşlikler denklem (2.16) ve denklem (2.17):

$$\frac{d^2M}{dx^2} = E_p I_p \frac{d^4y}{dx^4} \quad (2.16)$$

$$\frac{dV_v}{dx} = p \quad (2.17)$$

Yukarıdaki özdeşlikler denklem (2.15)'te yerlerine koyularak denklem (2.18) elde edilir.

$$E_p I_p \frac{d^4y}{dx^4} + P_x \frac{d^2y}{dx^2} - p = 0 \quad (2.18)$$

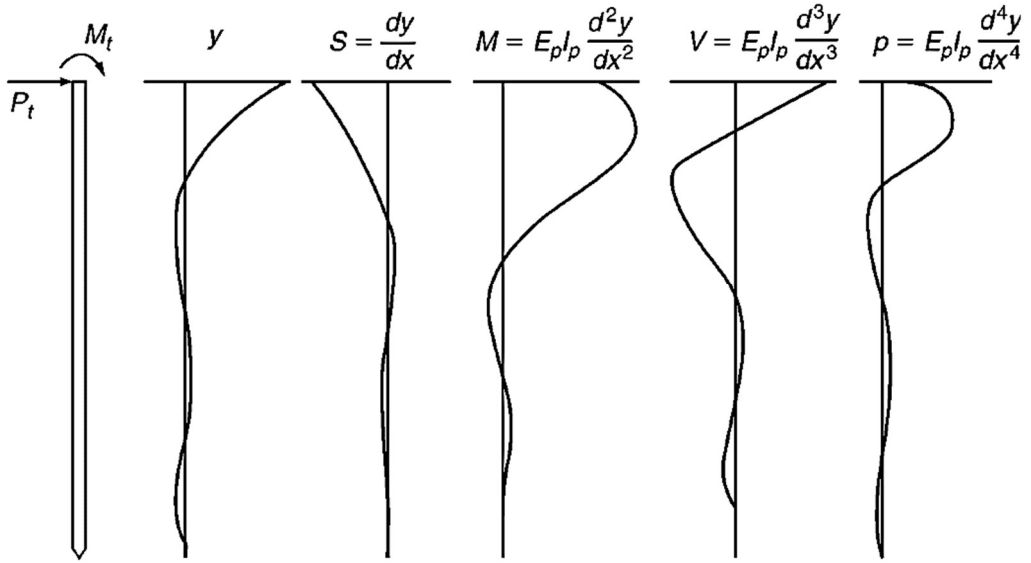
Eksenel kuvvetin (P_x) kazığın yatayda yaptığı sapmaya etkisi çok küçük olduğundan ihmal edilir ve aşağıdaki denklemler türetilerek; eğim (S), dönme momenti (M), kesme kuvveti (V) ve zeminin kazığın birim uzunluğuna tepkisi (p) denklemleri elde edilir. Bu denklemlerin grafiksel gösterimine Şekil 2.19'da yer verilmiştir.

$$E_p I_p \frac{d^4y}{dx^4} = p \quad (2.19)$$

$$E_p I_p \frac{d^3y}{dx^3} = V \quad (2.20)$$

$$E_p I_p \frac{d^2y}{dx^2} = M \quad (2.21)$$

$$\frac{dy}{dx} = S \quad (2.22)$$

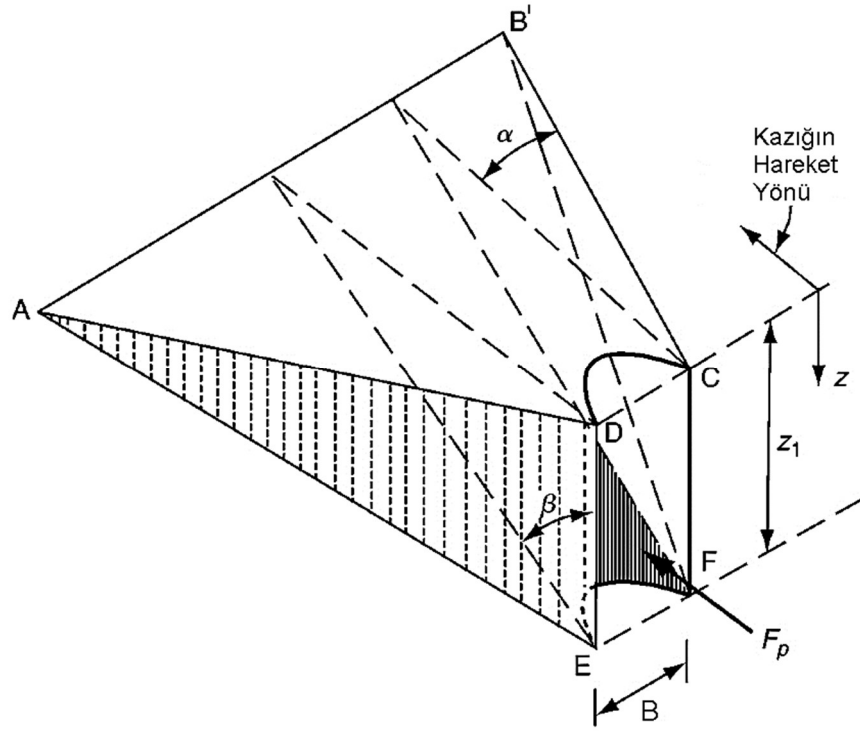


Şekil 2.19. Sapma (y), eğim (S), dönme momenti (M), kesme kuvveti (V) ve zeminin kazığın birim uzunluğuna tepkisi (p) gösterimi (Reese ve Impe 2011)

Nihai zemin direnci (p_u) değerinin hesaplanması:

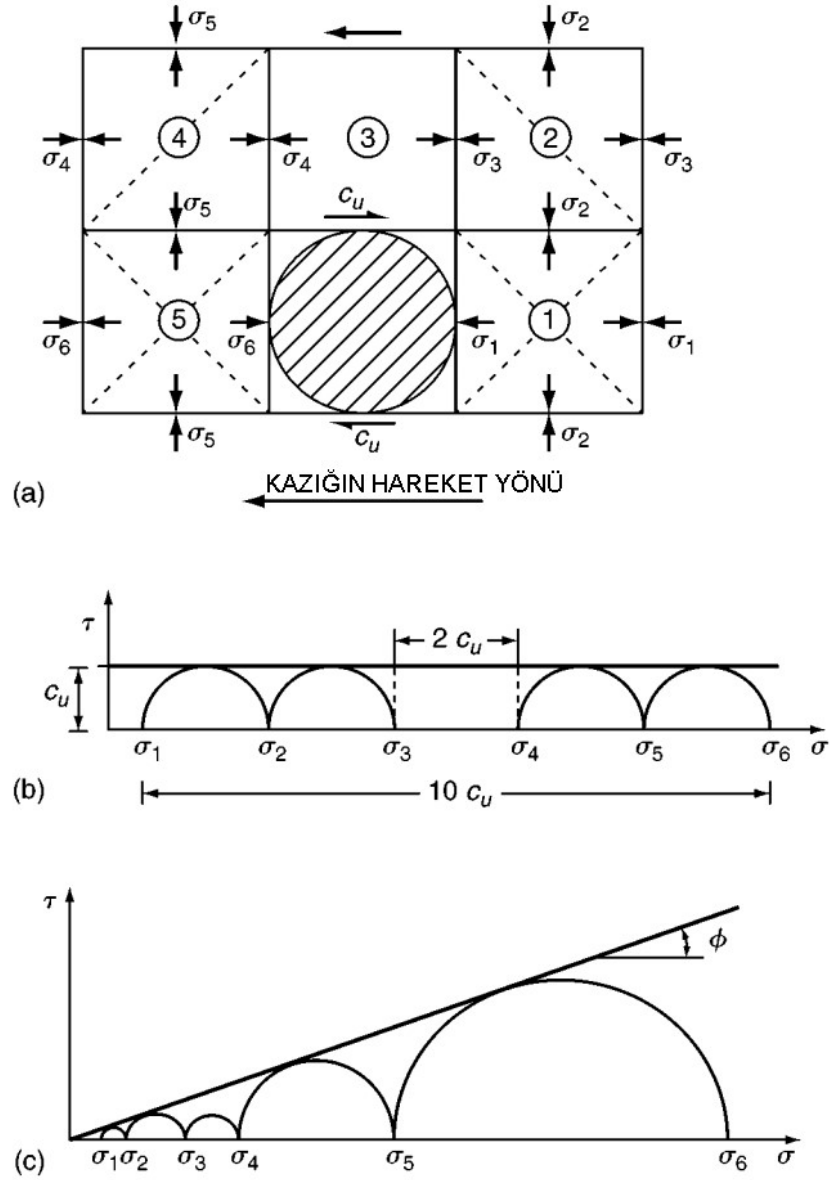
Nihai zemin direnci (p_u), yatay yük uygulanan kazığın birim uzunluğuna zeminin gösterdiği direncin limit denge değeridir. Yatay yük altında, nihai zemin direnci (p_u) değerinin tahmin edilebilmesi zeminin türüne ve hesaplama yapılacak derinliğin yüzeye olan uzaklığına bağlıdır. Zeminin taşıma kapasitesini belirlemek için iki analitik model önerilmiştir. Bu modeller deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır (Reese ve Impe 2011).

Şekil 2.20’de gösterilen takoz şeklindeki birinci model, zemin yüzeyine yakın bölümündeki nihai zemin tepkisini (p_u) tespit etmek için kullanılmaktadır. Model de belirtilen F_p kuvveti; takoz şeklindeki zeminin ağırlığının ve yüzeylerin kayma dirençlerinin yatay bileşenlerinin toplamından oluşmaktadır. F_p ’nin derinliğe (z) göre türevi alınarak nihai zemin tepkisi (p_u) elde edilmektedir.



Şekil 2.20. Yüzeye yakın zemin bölgesi için nihai zemin tepkisini (p_u) hesaplama modeli (Reese ve Impe 2011)

Şekil 2. 21.(a)'da gösterilen silindirik kazık ve beş adet zemin bloğundan oluşan ikinci model, zemin derin bölümündeki nihai zemin tepkisini (p_u) tespit etmek için kullanılmaktadır. Kazığın hareket etmesiyle oluşan kesme gerilmesi 5 numaralı bloğun bozulmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Zemin hareketi sonucu 4 numaralı blok kesme gerilmesiyle bozulmakta ve 3 numaralı blok kayarak etkileşim halindeki 1 ve 2 numaralı bloklarının kesme gerilmesiyle bozulmasına neden olmaktadır. Nihai zemin tepkisi (p_u), σ_6 kesme gerilmesi ile σ_1 kesme gerilmesi farkı ile elde edilmektedir. Şekil 2. 21'de gösterilen Mohr-Coulomb diyagramları modelin kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için denklem geliştirilmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 2.21. Derin zemin bölgesi için nihai zemin tepkisini (p_u) hesaplama modeli (a), kohezyonlu (b) ve kohezyonsuz (c) zeminler için kullanılan Mohr-Coulomb diyagramları (Reese ve Impe 2011)

Kohezyonlu zemin: Zemin için iki varsayım yapılmaktadır, birincisi zeminin suya doymun olduğu, ikincisi ise drenajsız kesme dayanımı akma noktasında olduğudur.

Şekil 2.20'deki birinci model için F_p değeri hesaplanırken ($\alpha=0^\circ$) ve ($\beta=45^\circ$) kabul edilip ortalama drenajsız kesme dayanımı (c_a) kullanılarak derinliğe (z) göre türev alınarak nihai zemin tepkisi belirlemede kullanılacak denklem (2.23) elde edilir.

$$p_{ct} = 2c_u B + \gamma' B z + 2,83c_u z \quad (2.23)$$

Şekil 2.21'deki ikinci model için drenajsız kesme dayanımı (c_u) ile yaklaşık nihai zemin tepkisi belirlemede kullanılacak denklem (2.24) elde edilir.

$$p_{cd} = (\sigma_6 - \sigma_1)B = 11c_u B \quad (2.24)$$

Kohezyonsuz zemin: Zemin için tamamıyla drenajlı varsayımı yapılmaktadır. Şekil 2.20'deki birinci model için F_p değeri hesaplanırken, Bowman'ın (1958) önerdiği kumun sıklık oranıyla bağlantılı olan (α) açısı; gevşek kumlar için $\alpha = \phi/3$, orta sıkı kumlar için $\alpha = \phi/2$ ve sıkı kumlar için $\alpha = \phi$ kullanılmaktadır. (β) açısını yaklaşık olarak belirlerken denklem (2.25) kullanılmaktadır. Terzaghi ve Peck'in (1948) önerdiği normal toprak basıncı (K_0); normal kumlar için ($K_0 = 0,4$) kullanılır, sıkı kumlar için ise ($K_0 = 0,5$) kullanılır ve minimum aktif toprak basıncı (K_a) denklem (2.26) kullanılıp derinliğe (z) göre türev alınarak nihai zemin tepkisi belirlemede kullanılacak denklem (2.27) elde edilmektedir.

$$\beta = 45 + \frac{\phi}{2} \quad (2.25)$$

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.26)$$

$$p_{cr} = \gamma x \left[\frac{K_0 x \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (B + x \tan \beta \tan \alpha) \right. \\ \left. + K_0 x \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_a B \right] \quad (2.27)$$

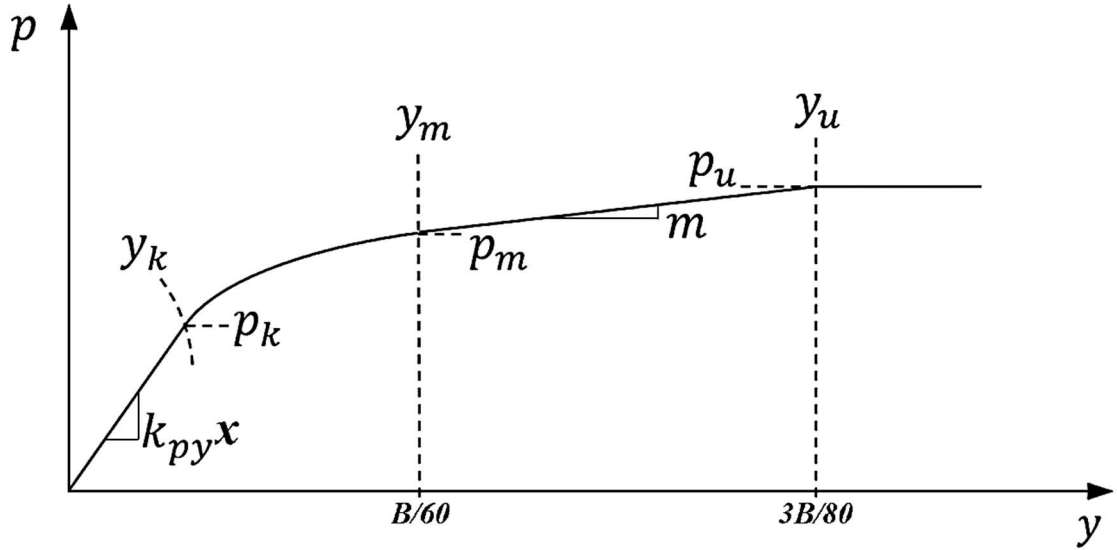
Şekil 2.21'deki ikinci model için yaklaşık nihai zemin tepkisi belirlemede kullanılacak denklem (2.28)'dir.

$$p_{cd} = \gamma x B [K_a (\tan^8 \beta - 1) + K_0 \tan \phi \tan^4 \beta] \quad (2.28)$$

2.4.2. Kum zeminler için P-Y eğrileri

YSS altındaki ve YSS üstündeki kum zeminler için Reese ve ark (1974) yaklaşımı:

Reese ve ark. (1974) yaklaşımı yeraltı su seviyesi (YSS) üzerindeki ve YSS altındaki kumlu zeminlerde kazıya statik ve tekrarlı yükleme durumlarında zemin tepkisini P-Y eğrileri ile tanımlamaktadır. P-Y eğrilerini oluşturulabilmesi için zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) ile birim hacim ağırlığının (γ) bilinmesi gerekmektedir. Şekil 2.22’de görüldüğü gibi P-Y eğrileri üç aşamada çizilmektedir.



Şekil 2.22. Kumlu zeminler için Reese yaklaşımı P-Y eğrisi (Reese ve ark. 1974)

İlk aşama, zemin tepkisini (p) limit değer ile sınırlı tutan nihai zemin tepkisini (p_u) belirlemek için kullanılacak (p_c) parametresi için denklem (2.27) ve denklem (2.28) eşitlenerek kritik derinlik (x_r) hesaplanır. Kritik derinliğin (x_r) üstündeki noktalar için (p_{cr}) denklem (2.27) ve altındaki noktalar için (p_{cd}) denklem (2.28); (p_c) olarak kullanılır.

P-Y eğrisi oluşturulacak derinliğe göre denklem (2.29) ve (2.30) ile (u) noktası, denklem (2.31) ve (2.32) ile (m) noktası belirlenir. (p_u) ve (p_m) hesaplanırken A_l ve B_l değerleri statik yük ve tekrarlı yük durumuna göre Çizelge 2.3'ten alınır. Denklem (2.33) ile (u) noktası ve (m) noktası arasındaki doğrunun eğimi; denklem (2.34) ile (n) ve denklem (2.35) ile (C) katsayıları belirlenir (Reese ve ark. 1974).

$$p_u = A_1 p_c \quad (2.29)$$

$$y_u = 3B/80 \quad (2.30)$$

$$p_m = B_1 p_c \quad (2.31)$$

$$y_m = B/60 \quad (2.32)$$

$$m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \quad (2.33)$$

$$n = \frac{p_m}{m y_m} \quad (2.34)$$

$$C = \frac{p_m}{y_m^{1/n}} \quad (2.35)$$

Çizelge 2.3. Statik ve tekrarlı durumuna göre A_I ve B_I değerleri(Prakash ve Sharma 1989)

x/B	A_I		B_I	
	A_s	A_t	B_s	B_t
0	2,85	0,77	2,18	0,50
0,2	2,72	0,85	2,02	0,60
0,4	2,60	0,93	1,90	0,70
0,6	2,42	0,98	1,80	0,78
0,8	2,20	1,02	1,70	0,80
1,0	2,10	1,08	1,56	0,84
1,2	1,96	1,10	1,46	0,86
1,4	1,85	1,11	1,38	0,86
1,6	1,74	1,08	1,24	0,86
1,8	1,62	1,06	1,15	0,84
2,0	1,50	1,05	1,04	0,83
2,2	1,40	1,02	0,96	0,82
2,4	1,32	1,00	0,88	0,81
2,6	1,22	0,97	0,85	0,80
2,8	1,15	0,96	0,80	0,78
3,0	1,05	0,95	0,75	0,72
3,2	1,00	0,93	0,68	0,68
3,4	0,95	0,92	0,64	0,64
3,6	0,94	0,91	0,61	0,62
3,8	0,91	0,90	0,56	0,60
4,0	0,90	0,90	0,53	0,58
4,2	0,89	0,89	0,52	0,57
4,4 - 4,8	0,89	0,89	0,51	0,56
≥ 5	0,88	0,88	0,50	0,55

P-Y eğrisinin ilk bölümünün eğimini belirlemek için kazık üzerinde belirlenen noktanın YSS durumuna göre uygun k_{py} değeri Çizelge 2.5'ten seçilerek, denklem (2.36) ve denklem (2.37) ile eğrinin (k) noktası belirlenir. Kumun sıklık derecesini arazi veya laboratuvar testleriyle belirlenen içsel sürtünme açısı (ϕ) ile belirlenir (Çizelge 2.4.).

$$y_k = \left(\frac{C}{k_{py}x} \right)^{n/(n-1)} \quad (2.36)$$

$$p_k = y_k k_{py} x \quad (2.37)$$

Çizelge 2.4. SPT ve içsel sürtünme açısı ile kumun sıklık seviyesi (Peck ve ark 1974)

Kum Sıklığı	SPT, N Değeri	İçsel sürtünme açısı ϕ
Çok Gevşek	<4	<29
Gevşek	4 - 10	29 - 30
Orta	10 - 30	30 - 36
Sıkı	30 - 50	36 - 41
Çok Sıkı	>50	>41

Çizelge 2.5. YSS altındaki ve YSS üzerindeki kum zeminler için önerilen k_{py} değerleri (Reese ve ark. 1974)

Kum Sıklığı	Gevşek	Orta Sıkı	Sıkı
YSS altındaki kumlar için k_{py} (MN/m ³)	5,4	16,3	34
YSS üstündeki kumlar için k_{py} (MN/m ³)	6,8	24,4	61

P-Y eğrisinin (k) noktası ve (m) noktası arasındaki parabolü denklemi, denklem (2.38) ile belirlenir. y_k ve y_m değerleri arasında eşit aralıklı olarak y_1, y_2, y_3 ve y_4 noktaları seçilerek parabol oluşturulur.

$$p = Cy^{1/n} \quad (2.38)$$

Bu hesaplamalar kazık boyunca her birim uzunluk için oluşturulan P-Y eğrilerinin tümünde aynı prosedür uygulanarak analize hazır hale getirilir.

O'Neill ve Murchison (1983) yaklaşımı:

O'Neill ve Murchison (1983) tarafından geliştirilen yaklaşım rapor halinde Amerikan Petrol Enstitüsü (APE) 'ne sunulmuş ve APE tarafından onaylanarak kurumsal standartlarına kaynak olarak gösterilmiştir (API RP 2A-WSD 2010).

Bu yaklaşım Reese (1974) yaklaşımının sadeleştirilmiş halidir. Şekil 2.23. 'da görüldüğü gibi P-Y eğrisi tek parçadan meydana gelen eğik çizgi olarak denklem (2.39) ile oluşturulur.

$$p = Ap_u \tanh\left(\frac{kx}{Ap_u} y\right) \quad (2.39)$$

Zemin yatak katsayısı (k) arazi deneyi sonucuyla elde edilir. A katsayısı ise ampirik olup, tekrarlı yükleme durumu için 0.9, statik yükleme durumu için $3-0.8x/B \geq 0.9$ olmak üzere tanımlanmıştır (Anonim 2018).

Denklem (2.38)'deki (p_u) için, sığ derinliklerde (p_{us}) denklem (2.40); daha büyük derinliklerde ise (p_{ud}) denklem (2.41) kullanılır (Bogard ve Matlock 1980).

$$p_{us} = (C_1x + C_2B)\gamma x \quad (2.40)$$

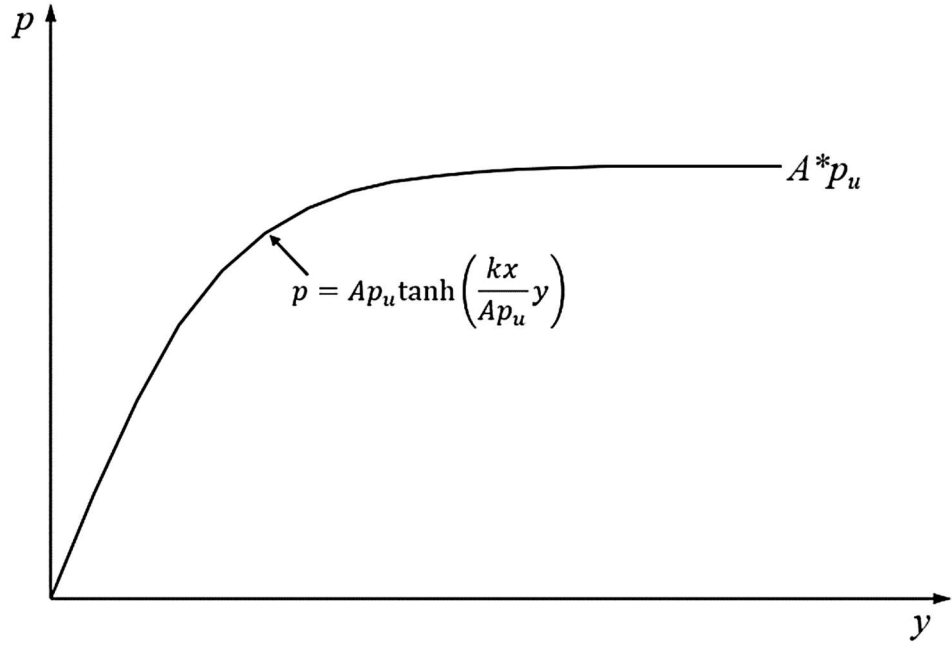
$$p_{ud} = C_3B\gamma x \quad (2.41)$$

Burada, C_1 , C_2 ve C_3 katsayıları sırasıyla (2.42), (2.43) ve (2.44) denklemleri kullanılarak hesaplanır. (K_0), (K_a), (α), (ϕ) ve (β) parametreleri Reese (1974) yaklaşımıyla aynıdır. (K_p) ise $K_p = \tan^2(45 + \phi/2)$ olarak hesaplanır.

$$C_1 = \tan \beta \left[K_p \tan \alpha + K_0 \left(\tan \phi \sin \beta \left(\frac{1}{\cos \alpha} + 1 \right) - \tan \alpha \right) \right] \quad (2.42)$$

$$C_2 = K_p - K_a \quad (2.43)$$

$$C_3 = K_p^2 (K_p + K_0 \tan \phi) - K_a \quad (2.44)$$



Şekil 2.23. Kumlu zeminler için P-Y eğrisi (O'Neill ve Murchison 1983, Anonim 2018)

Sıvılaştırılmış kum zeminler için Rollins (2005a) yaklaşımı

Rollins ve arkadaşları (2005a) tarafından geliştirilen sıvılaştırılmış kum zemin için P-Y eğrisi yönteminde, tüm değerler gerçek boyutlarda yapılan deney sonuçlarına dayanarak oluşturulan formüllere bağlıdır. P-Y eğrileri oluşturulurken zemin parametreleri kullanılmamaktadır. Kazık çapı (B) ve derinlik (z) parametreleri kullanılarak zemin tepkisi ($p \leq 15$) ve sapma ($y=0,15$) değerleri sınırlandırılarak denklem (2.45) ile P-Y eğrileri oluşturulur.

$$p = P_d A_z (B_z y)^{C_z} \quad (2.45)$$

Burada; Kazık çapı düzeltme katsayısı (P_d) denklem (2.46) ve derinlik katsayıları A_z denklem (2.47), B_z denklem (2.48) ve C_z denklem (2.49) yardımıyla elde edilir.

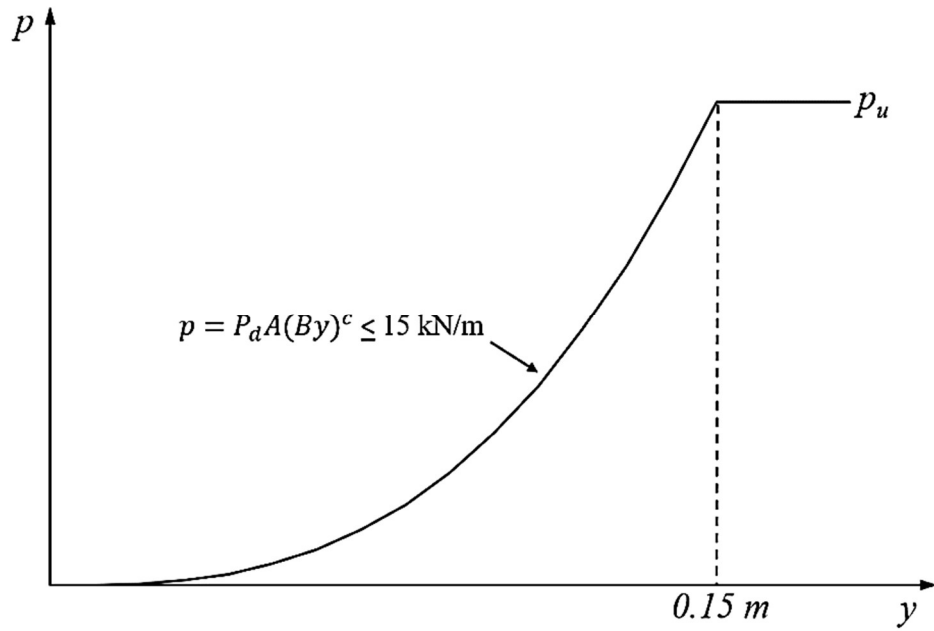
$$P_d = 3,81 \ln|B| + 5,6 \quad (2.46)$$

$$A_z = 3 \times 10^{-7} (z + 1)^{6,05} \quad (2.47)$$

$$B_z = 2,80(z + 1)^{0,11} \quad (2.48)$$

$$C_z = 2,85(z + 1)^{-0,41} \quad (2.49)$$

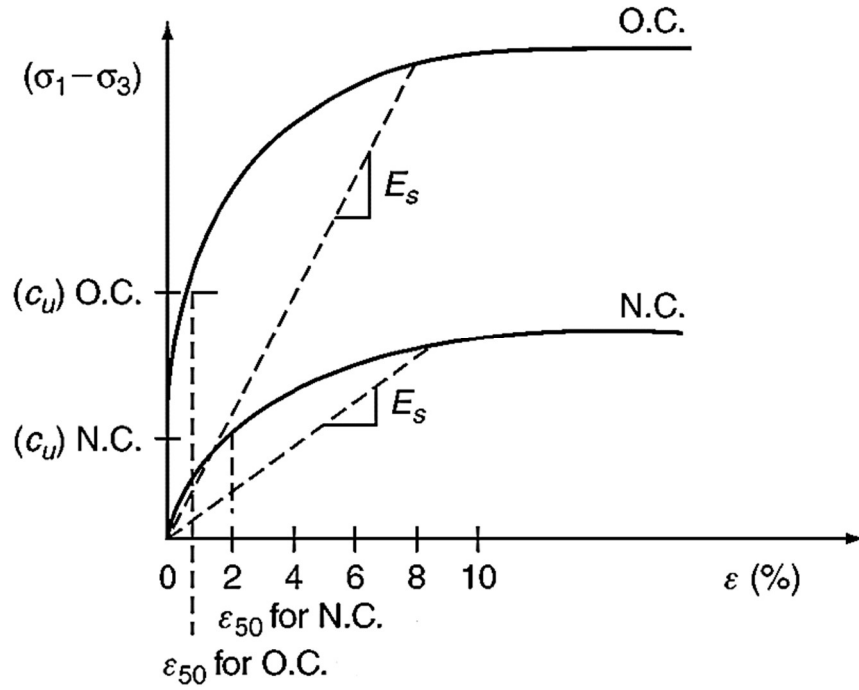
Rollins ve arkadaşları (2005a) tarafından yapılan çalışmalara göre; denklem (2.45), kazık çapı 0,3 m ile 2,6 m arasında olan kazıklar için uygulanabilir. Eğer kazık çapı $B > 2,6$ ise ($B=2,6$) olarak hesaplanır. Sıvılaştırılmış kumlar için P-Y eğrisi Şekil 2.24'te görülmektedir (Anonim 2018).



Şekil 2.24. Sıvılaştırılmış kum zemin için P-Y eğrileri (Rollins ve ark 2005a, Anonim 2018)

2.4.3. Kil zeminler için P-Y eğrileri

Kil zeminler için P-Y eğrileri oluşturulurken ilk olarak yapılması gereken kilin sertlik derecesini belirlemektir. Bunun için nihai basınç dayanımının yarısına (c_u) denk gelen gerinim (\mathcal{E}_{50}) arazi veya laboratuvar deneyi ile hesaplanması gerekmektedir (Şekil 2.25). Deney yoluyla elde edilme imkânı yok ise Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.8'de önerilen drenajsız kesme dayanımına (c_u) denk gelen gerinim (\mathcal{E}_{50}) değeri kullanılmaktadır (Reese ve Impe 2011).



Şekil 2.25. Kil zemin için dayanım- gerinim grafiği (Reese ve Impe 2011)

Yumuşak killer için Matlock (1970) yaklaşımı

Matlock'un (1970) suya doymun normal konsolide yumuşak killer için geliştirdiği yaklaşımda; yatay statik ve tekrarlı yük altında gerçekleştirdiği deneysel çalışmalardan elde ettiği sonuçları kullanarak, birim kazık boyu için zeminin tepkisini (p) ve kazığın sapmasını (y) ifade eden P-Y eğrileri oluşturulmuştur. Birim kazık boyu için oluşturulan P-Y eğrilerinin nihai zemin tepkisi (p_u) aşağıdaki denklem (2.50) ve denklem (2.51) ile hesaplanarak küçük olan değer kullanılır. Matlock (1970) deneysel çalışmaları sonucu yumuşak killer için ($J = 0,5$), orta killer için ($J = 0,25$) önermiştir

$$p_u = \left[3 + \frac{\gamma'}{c_u} z + \frac{J}{B} z \right] c_u B \quad (2.50)$$

$$p_u = 9c_u B \quad (2.51)$$

Burada;

c_u : Kil zemininin drenajsız kesme dayanımı

γ' : Etkili birim hacim ağırlığı

z : Derinlik

Şekil 2.26'da görüldüğü gibi statik yatay yükleme durumu için P-Y eğrileri oluşturulurken denklem (2.52) ile (p/p_u) oranı hesaplanmaktadır. $(0 \leq y/y_{50} \leq 8)$ aralığında eğrinin ilk bölümü için (p/p_u) oranı (0-1) arasında değerler almaktadır, $(y/y_{50}=8)$ 'ten büyük değerleri için $(p/p_u=1)$ sabittir.

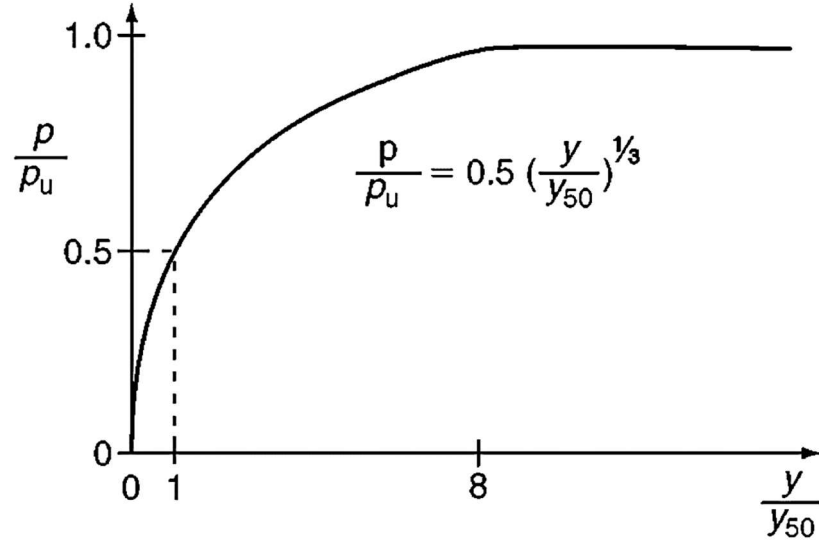
$$\frac{p}{p_u} = 0,5 \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3} \quad (2.52)$$

Çizelge 2.6'dan Matlock (1970) tarafından önerilen zemin yapısına uygun (ϵ_{50}) değeri seçilerek denklem (2.53) ile yarı nihai zemin tepkisi olduğu sapma (y_{50}) hesaplanır.

$$y_{50} = 2,5\epsilon_{50}B \quad (2.53)$$

Çizelge 2.6. Yumuşak killer için önerilen ϵ_{50} değerleri (Matlock 1970)

Kil Kıvamı	Ortalama c_u (kPa) (Peck ve ark 1974)	ϵ_{50}
Yumuşak	<48	0,020
Orta	48-96	0,010
Sert	96-192	0,005



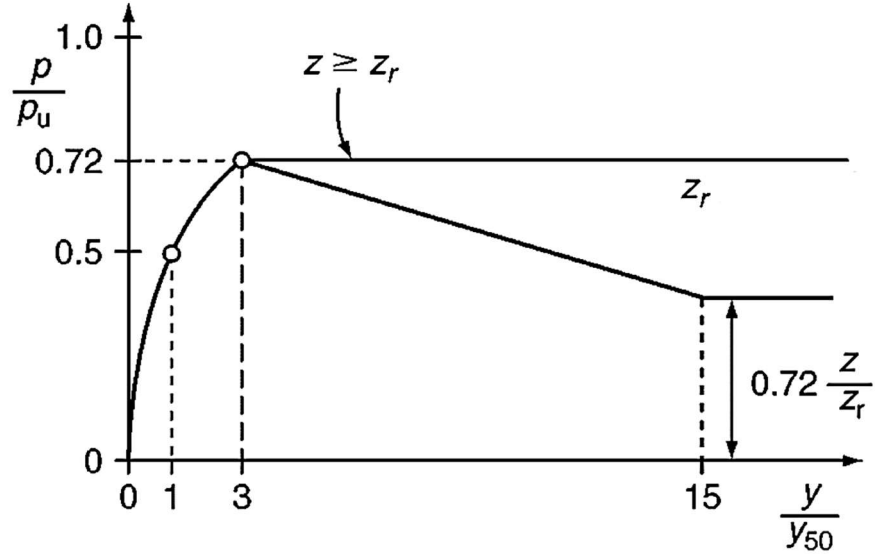
Şekil 2.26. Statik yükleme durumunda yumuşak killler için P-Y eğrisi (Matlock 1970)

Tekrarlı yatay yükleme durumu için P-Y eğrileri oluşturulurken (p/p_u) oranı 0,72 değerine ulaşıncaya kadar statik yükleme ile aynı şekilde hesaplanmaktadır. Bu noktadan sonrası denklem (2.50) ve denklem (2.51) eşitlenerek elde edilen denklem (2.54) ile kritik derinlik (z_r) hesaplanır.

$$z_r = \frac{6c_u B}{Jc_u + \gamma' B} \quad (2.54)$$

P-Y eğrileri oluşturulurken derinliğe bağlı olarak zeminin drenajsız kesme dayanımı (c_u) ve etkili birim hacim ağırlığı (γ') farklılık gösterdiği noktalar da kritik derinlik (z_r) tekrar hesaplanmalıdır (Reese ve Impe 2011). Şekil 2.27'de tekrarlı yükleme durumunda için p-y eğrisi görülmektedir. P-Y eğrisi oluşturulan derinlik (z), kritik derinlikten (z_r) büyük veya eşit olduğu durumda ($y/y_{50}=3$) noktasından sonra (p/p_u) oranı 0,72 değerinde sabit kalmaktadır. P-Y eğrisi oluşturulan derinlik (z), kritik derinlikten (z_r) küçük olduğu durumda ise (p/p_u) oranı 0,72 değerinden, denklem (2.55) kullanılarak, ($y/y_{50}=3$) noktasına kadar doğrusal olarak azalmakta ve bu noktadan sonra (p/p_u) oranı sabit kalmaktadır.

$$\frac{p}{p_u} = 0,72 \left(\frac{z}{z_r} \right) \quad (2.55)$$



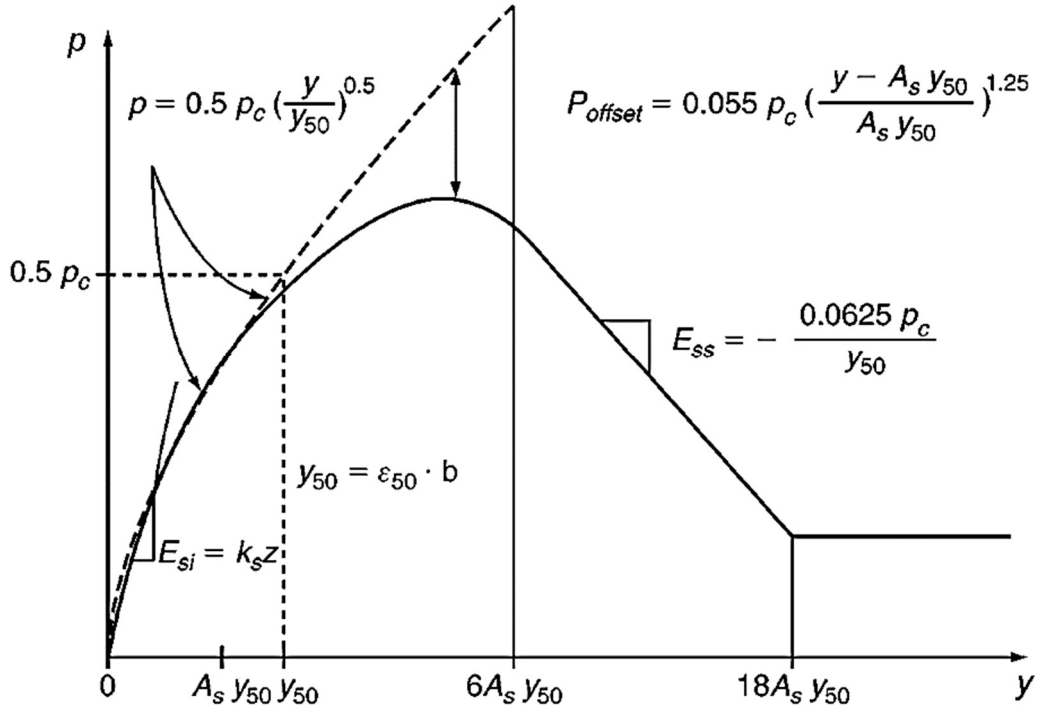
Şekil 2.27. Tekrarlı yükleme durumunda yumuşak killer için P-Y eğrisi (Matlock 1970)

YSS altındaki sert killer için Reese ve ark (1975)'in yaklaşımı

Reese ve ark (1975)'in geliştirdiği YSS altındaki sert killer için P-Y eğrileri yaklaşımı statik yatay yükleme durumunda, ilk olarak drenajsız kesme dayanımı (c_u), etkili birim hacim ağırlığı (γ') ve kazık çapı (B) tespit edilir. P-Y eğrisi oluşturulacak derinliğin (z) üzerindeki zeminin ortalama drenajsız kesme dayanımı (c_a) hesaplandıktan sonra, nihai zemin tepkisi (p_c) denklem (2.23) ve denklem (2.24) kullanılarak hesaplanır, bulunan değerlerden küçük olan kullanılır.

Şekil 2.28'de görüldüğü gibi P-Y eğrisinin doğrusal bölümü denklem (2.56) ile oluşturulur. Zemin katsayısı (k_s) statik yükleme için uygun değer Çizelge 2.7'den alınır.

$$p = (k_s z)y \quad (2.56)$$



Şekil 2.28. Statik yüklü YSS altındaki sert killer için P-Y eğrisi (Reese ve ark 1975)

Çizelge 2.7. Sert killer için önerilen k_s ve k_c değerleri (Reese ve ark 1975)

Ortalama Drenajsız Kesme Dayanımı c_a (kPa)	k_s (MN/m ³) Statik	k_c (MN/m ³) Tekrarlı
50 - 100	135	55
100 - 200	270	110
200 - 300	540	540

Laboratuvar deneyler ile elde edilen (ϵ_{50}) değeri kullanılarak denklem (2.57) yardımıyla (y_{50}) değeri hesaplanır. Laboratuvar da deney yapma imkânı yok ise Çizelge 2.8'den uygun (ϵ_{50}) değeri seçilir.

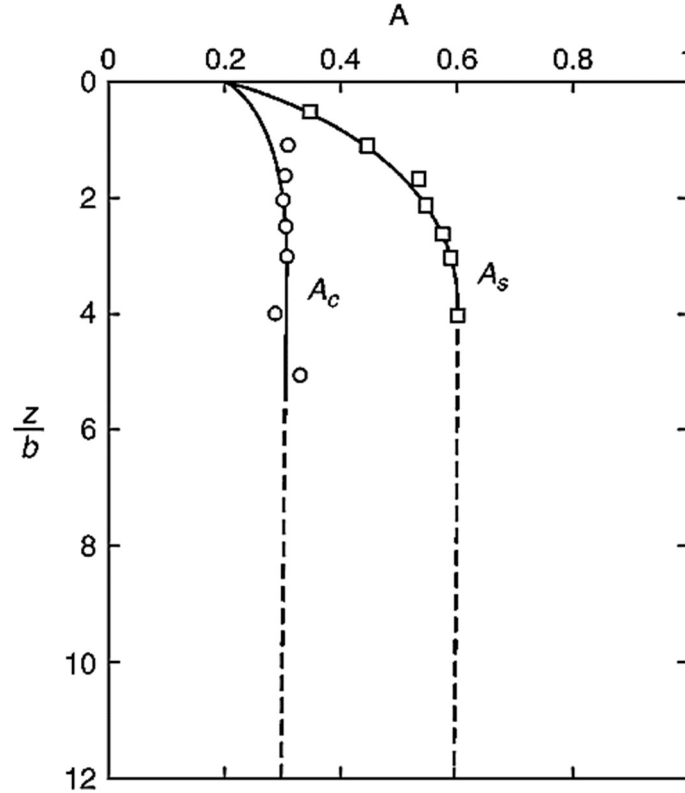
$$y_{50} = \epsilon_{50} B \quad (2.57)$$

Çizelge 2.8. Sert killer için önerilmiş ϵ_{50} değerleri (Reese ve ark 1975)

Ortalama Drenajsız Kesme Dayanımı c_a (kPa)	ϵ_{50}
50 - 100	0,007
100 - 200	0,005
200 - 300	0,004

P-Y eğrisinin, denklem (2.56) ile denklem (2.58) 'ün kesiştiği nokta ve $(y = A_s y_{50})$ noktası arasındaki ilk parabolik bölüm denklem (2.58) ile oluşturulur. Statik yükleme durumu için uygun azaltma katsayısı (A_s) değeri Şekil 2.29'dan tespit edilir.

$$p = 0,5p_c \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{0,5} \quad (2.58)$$



Şekil 2.29. Sert killer için A_s ve A_c değerleri (Reese ve ark 1975)

P-Y eğrisinin ($y = A_s y_{50}$) noktası ile ($y = 6A_s y_{50}$) noktası arasındaki ikinci parabolik bölüm ise denklem (2.59) ile oluşturulur.

$$p = 0,5p_c \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{0,5} - 0,055p_c \left(\frac{y - A_s y_{50}}{A_s y_{50}} \right)^{1,25} \quad (2.59)$$

P-Y eğrisinin ($y = 6A_s y_{50}$) noktası ile ($y = 18A_s y_{50}$) noktası arasındaki doğrusal bölüm ise denklem (2.60) ile oluşturulur.

$$p = 0,5p_c (6A_s)^{0,5} - 0,411p_c - \frac{0,0625p_c (y - 6A_s y_{50})}{y_{50}} \quad (2.60)$$

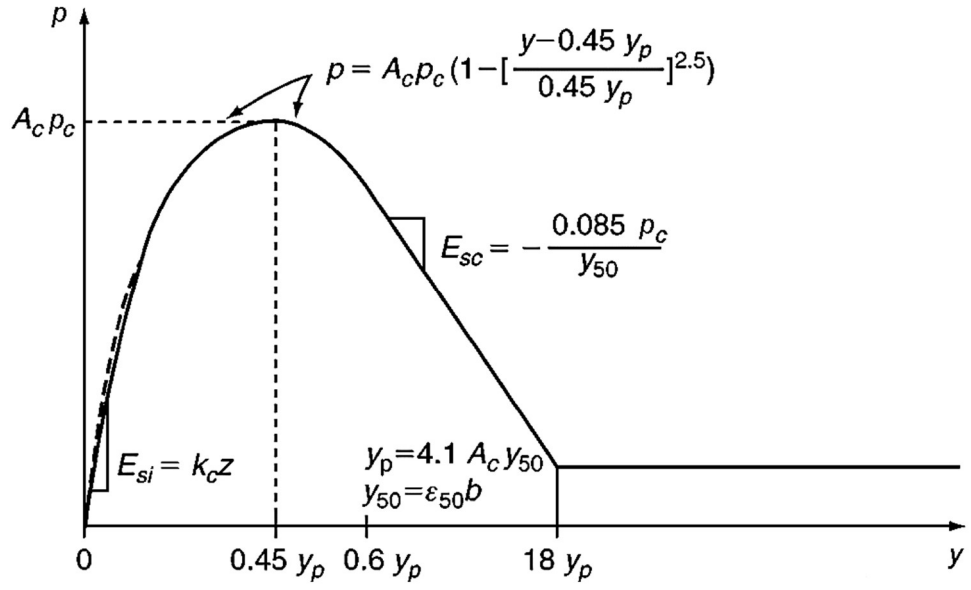
P-Y eğrisinin son kısmı olan ($y = 18A_s y_{50}$) noktasından sonraki doğrusal bölüm ise denklem (2.61) ile sabit değer olarak oluşturulur.

$$p = 0,5p_c (6A_s)^{0,5} - 0,411p_c - 0,75p_c A_s \quad (2.61)$$

Şekil 2.28'deki P-Y eğrisi denklem (2.56) ile denklem (2.58) kesişiyormuş gibi oluşturulmuştur. Fakat denklem (2.56) diğer denklemlerle kesişmiyor olabilir. Bu durumda kesişme sağlanıncaya kadar, uygun denklem değeri bulunmaya çalışılarak P-Y eğrisi tamamlanır (Reese ve Impe 2011).

Tekrarlı yatay yükleme durumu için Şekil 2.30'da görüldüğü gibi; ilk bölüm olan doğrusal kısım ve (y_{50}) değeri statik yatay yükleme durumuyla aynı şekilde hesaplanır. Tekrarlı yükleme durumu için uygun (A_c) değeri Şekil 2.29'dan tespit edilerek denklem (2.62) ile (y_p) değeri hesaplanır.

$$y_p = 4,14A_s y_{50} \quad (2.62)$$



Şekil 2.30. Tekrarlı yüklü YSS altındaki sert killer için P-Y eğrisi (Reese ve ark 1975)

P-Y eğrisinin, denklem (2.56) ile denklem (2.63) 'in kesiştiği nokta ve $(y = 0,6y_p)$ noktası arasındaki parabolik bölüm denklem (2.63) ile oluşturulur.

$$p = A_c p_c \left(1 - \left| \frac{y - 0,45y_p}{0,45y_p} \right|^{0,25} \right) \quad (2.63)$$

P-Y eğrisinin $(y = 0,6y_p)$ noktası ile $(y = 1,8y_p)$ noktası arasındaki doğrusal bölüm ise denklem (2.64) ile oluşturulur.

$$p = 0,936A_c p_c - \frac{0,085p_c(y - 0,6y_p)}{y_{50}} \quad (2.64)$$

P-Y eğrisinin son kısmı olan $(y = 1,8y_p)$ noktasından sonraki doğrusal bölüm ise denklem (2.65) ile sabit değer olarak oluşturulur.

$$p = 0,936A_c p_c - \frac{0,102p_c y_p}{y_{50}} \quad (2.65)$$

Şekil 2.30'daki P-Y eğrisi denklem (2.56) ile denklem (2.63) kesişiyormuş gibi oluşturulmuştur. Fakat denklem (2.56) diğer denklemlerle kesişmiyor olabilir. Bu durumda kesişme için en küçük değer kullanılarak P-Y eğrisi tamamlanır (Reese ve Impe 2011).

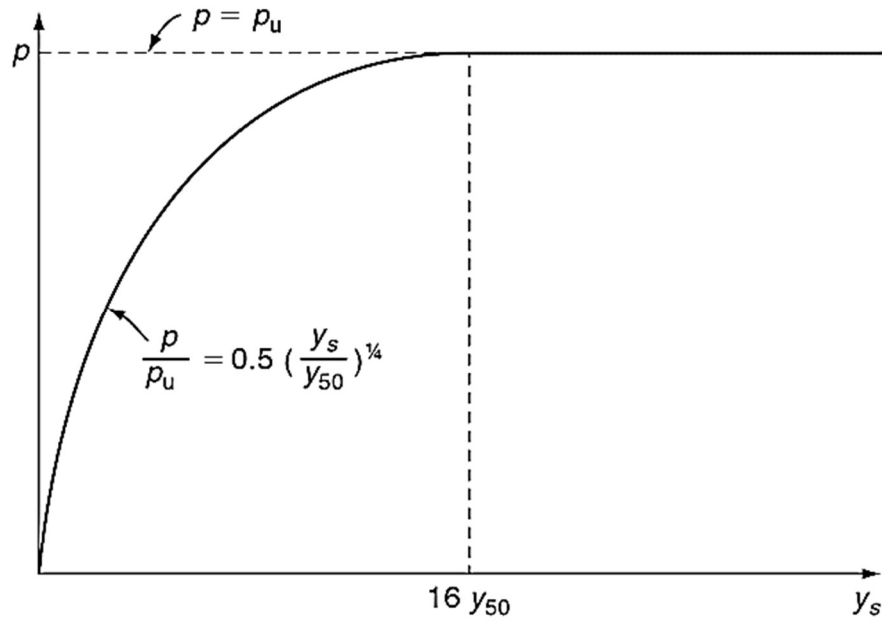
YSS üzerindeki sert killer için Reese ve Welch (1975) yaklaşımı

Reese ve Welch (1975) 'in geliştirdiği YSS üzerindeki sert killer için P-Y eğrileri yaklaşımı statik yatay yükleme durumunda, ilk olarak drenajsız kesme dayanımı (c_u), etkili birim hacim ağırlığı (γ') ve kazık çapı (B) tespit edilir. Laboratuvar deneyler ile elde edilen (ϵ_{50}) değeri kullanılarak Matlock (1970) yaklaşımındaki denklem (2.53) ile (y_{50}) değeri; denklem (2.50) ve denklem (2.51) kullanılarak bulunan değerlerden küçük olan nihai zemin tepkisi (p_u) olarak hesaplanır. Deney yapma imkânı yok ise Çizelge 2.8'den uygun (ϵ_{50}) değeri seçilir. Matlock (1970) yaklaşımındaki (J) katsayısı 0,5 olarak önerilmektedir.

Şekil 2.31'de görüldüğü gibi statik yatay yükleme durumu için P-Y eğrisi oluşturulurken denklem (2.66) ile (p/p_u) oranı hesaplanmaktadır.

$$\frac{p}{p_u} = 0,5 \left(\frac{y_s}{y_{50}} \right)^{0,25} \quad (2.66)$$

($0 \leq y/y_{50} \leq 16y_{50}$) aralığında eğrinin ilk bölümü için (p/p_u) oranı (0-1) arasında değerler almaktadır, ($y/y_{50}=16$) 'dan büyük değerleri için ($p/p_u=1$) sabittir.



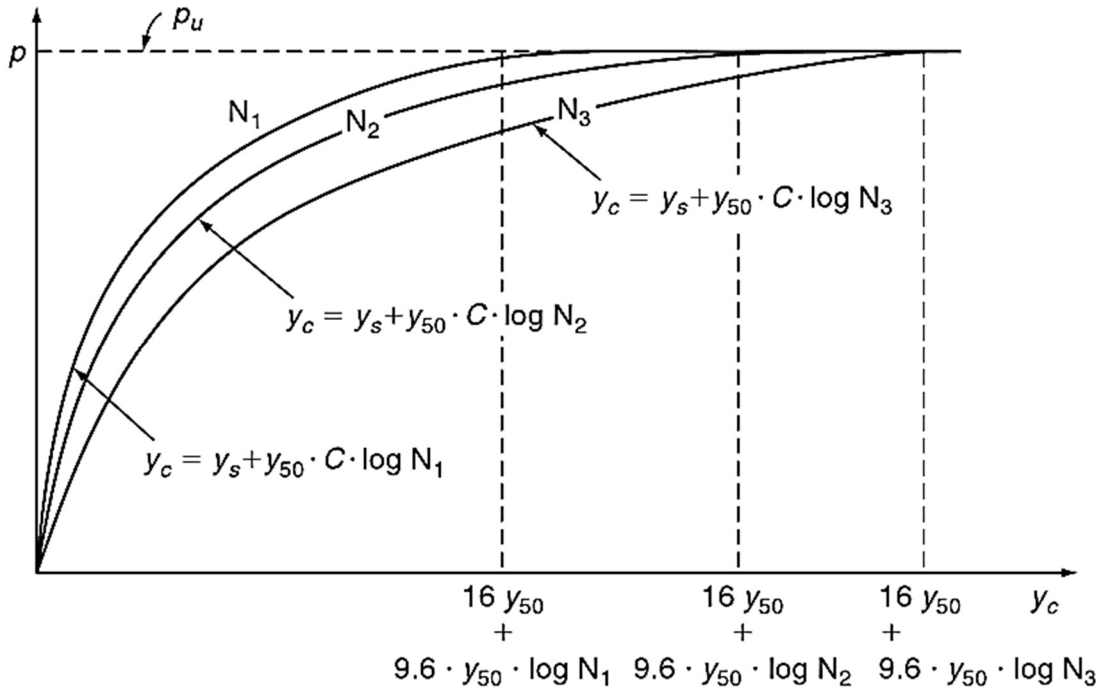
Şekil 2.31. YSS üzerindeki sert killer için statik yükleme durumunda P-Y eğrisi grafiği (Reese ve Welch 1975)

Tekrarlı yük durumunda ilk olarak yukarıda statik yükleme için izlenen yol aynen uygulanır. Daha sonra yatay yükün kaç defa uygulanacağı belirlenir. Statik yükleme ile elde edilen P-Y eğrisi parametresi (p/p_u) oranı kullanılarak, tekrarlı yüklemenin zeminde oluşturacağı deformasyonu tanımlayan parametre (C) denklem (2.67) ile hesaplanır.

$$C = 9,6 \left(\frac{p}{p_u} \right)^4 \quad (2.67)$$

Şekil 2.32'de görüldüğü gibi tekrarlı yükleme için P-Y eğrisi denklem (2.68) ile oluşturulmaktadır. Tekrarlı yükleme ile zeminde oluşan deformasyon (y_c) statik yükün tekrar sayısına (N) ve ilk yüklemde zeminde oluşan deformasyona (y_s) bağlı olarak her yükleme sonunda hesaplanır.

$$y_c = y_s + y_{50} C \log N \quad (2.68)$$



Şekil 2.32. YSS üzerindeki sert killer için tekrarlı yükleme durumunda P-Y eğrisi grafiği (Reese ve Welch 1975)

3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Ünsever'in (2015) Model Temeller ile Deneysel Çalışması

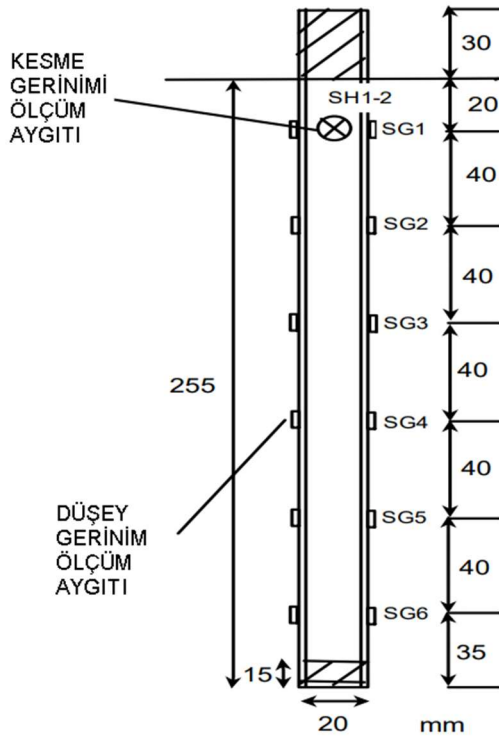
Ünsever'in (2015) model temeller tasarlayarak model kuru kum zeminde gerçekleştirmiş olduğu deneylerde; düşey yüklü başlıklı tekil kazık, düşey yüksüz başlıklı tekil kazık, düşey yüklü kazıklı radye temel ve düşey yüklü kazık grubu model temellerine yatay yük uygulayarak temellerin yatay yüke karşı davranışı incelenmiştir.

3.1.1. Model kazıklar

Ünsever (2015) deneysel çalışmasında model kazık olarak 280 mm uzunluğunda mühendislik özellikleri bilinen (Çizelge 3.1.) alüminyum boru kullanılmıştır. Borunun üzerine Şekil 3.1'de görüldüğü gibi 6 farklı seviyede 12 tane düşey gerinim ölçü aygıtları ve tek seviyede 4 kesme gerinim ölçü aygıtları yerleştirilmiş ve kalibrasyon testleri yapılmıştır.

Çizelge 3.1. Alüminyum borunun mühendislik özellikleri (Ünsever 2015)

Fiziksel Öğeler	Değeri
Kazık çapı, B (mm)	20,00
Cidar kalınlığı, t (mm)	1,10
Kesit alanı, A (mm ²)	65,31
Atalet momenti, I (mm ⁴)	2926,22
Elastisite modülü, E (N/mm ²)	64000,00
Poisson oranı, ν	0,31



Şekil 3.1. Düşey ve kesme gerinim ölçü aygıtlarının yerleştirilmesi (Ünsever 2015)

Boruların ucu 5 mm kalınlığında tıplar ile kapatılarak toplam da 285 mm uzunluğunda kazıklar elde edilmiştir. Kazıklarda yüzey pürüzlüğünü elde etmek ve aygıt kablolarını korumak için, 'hard rock' isimli yapıştırıcı ve kum (Şekil 3.2.) kullanılarak kaplan yapılmıştır. Kaplamadan en az 24 saat sonra yapılan testlerde kazıkların mühendislik özelliklerin de herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür (Kawamori ve ark. 2013).



Şekil 3.2. Kazıkların kaplamasında kullanılan özel yapıştırıcı 'hard rock' (Ünsever 2015)

Şekil 3.3'te kazıklı radye ya da grup kazık modellerin oluşturulmasında kullanılan kazıkların kaplama öncesi ve kaplama sonrası görüntülerine yer verilmiştir.



(a)

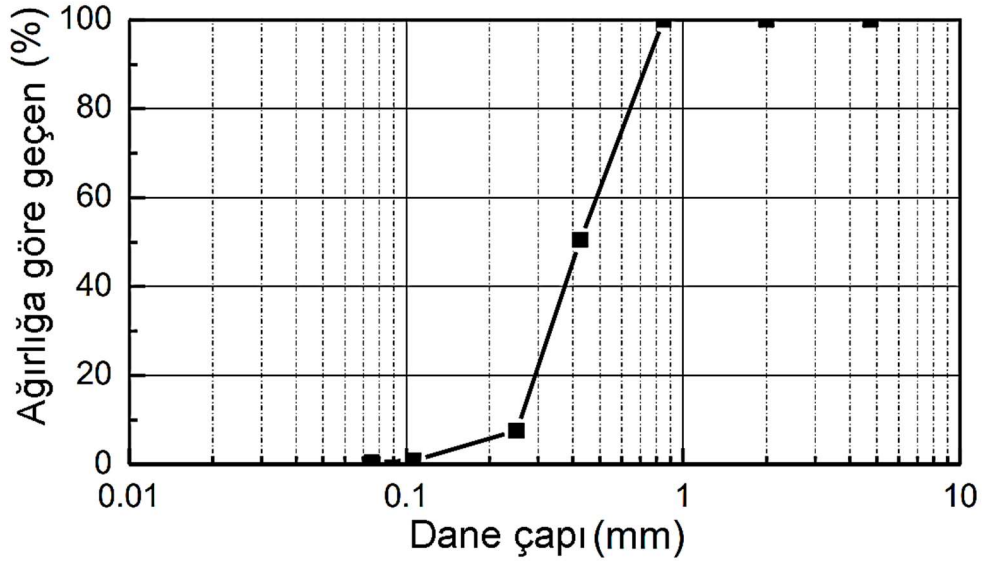


(b)

Şekil 3.3. Kazıkların kaplama öncesi (a) ve sonrası (b) fotoğrafları (Ünsever 2015)

3.1.2. Model zemin ve deney kutusu

Ünsever (2015) deneysel çalışmasında model zemin olarak 6 numara silika kumu kullanılmıştır. Model zeminle yapılan elek testinin dane çapı dağılımı Şekil 3.4'te verilmiştir. Bu test ile model zeminin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılmasına göre 'kötü derecelenmiş kum' sınıfında olduğu tespit edilmiştir (Ünsever ve ark. 2014).



Şekil 3.4. Kumun elek testi sonuçları (Ünsever 2015)

Model zeminin tek boyutlu sıkıştırma testiyle bağıl yoğunluğu (D_r) ve drenajlı konsolide üç eksenli test ile içsel sürtünme açısı (ϕ) hesaplanarak, diğer fiziksel özellikleriyle birlikte Çizelge 3.2’de özetlenmiştir. Model zemin tabakalara ayrılarak her tabakanın dayanım parametreleri hesaplanarak Çizelge 3.3’te listelenmiştir (Ünsever 2015).

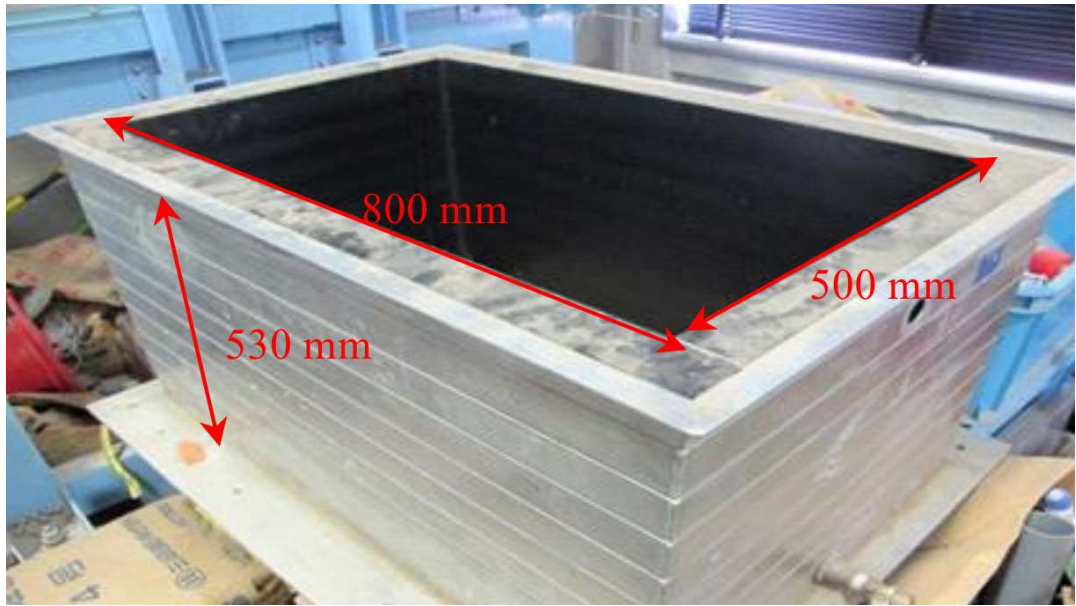
Çizelge 3.2. Model zeminin fiziksel (Ünsever 2015)

Fiziksel Ögeler	Değeri
Kum taneciklerinin yoğunluğu, ρ_s (t/m^3)	2,66
Maksimum kuru yoğunluk, ρ_{dmax} (t/m^3)	1,542
Minimum kuru yoğunluk, ρ_{dmin} (t/m^3)	1,28
Maksimum boşluk oranı, e_{max}	1,079
Minimum boşluk oranı, e_{min}	0,725
Medyan dane boyu, D_{50}	0,423
Homojenlik katsayısı, U_c	1,88
İçsel sürtünme açısı, ϕ ($^\circ$)	43,2

Çizelge 3.3. Model zeminin dayanım parametreleri (Ünsever 2015)

Katman alt ve üst sınırı (mm)	Katman kalınlığı (mm)	Kuru birim hacim ağırlığı γ_d (kN/m ³)	Üst tabakanın efektif basıncı σ'_v (kPa)	Kesme modülü G_{min} (kPa)	Kesme modülü G_{max} (kPa)	Kesme modülü G_{ort} (kPa)
0-100	100	14,239	0,712	1012,47	1591,03	1301,75
100-200	100	14,239	2,136	1753,65	2755,74	2254,70
200-280	80	14,239	3,417	2218,22	3485,77	2851,99
280-380	100	14,239	4,699	2601,09	4087,43	3344,26
380-480	100	14,239	6,123	2969,16	4665,82	3817,49
480-530	50	14,239	7,191	3217,69	5056,37	4137,04

Ünsever (2015) deneysel çalışmasında model zemini (800*500*530 mm) ölçülerin de laminer kutu içerisinde hazırlamıştır. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi laminer kutu 10 adet 50 mm yüksekliğinde çerçeveden oluşmaktadır. Model zeminin yatay doğrultuda kutu içinde hareket edebilmesi için kutunun içi kauçuk kaplama örtü ile kaplanmıştır.



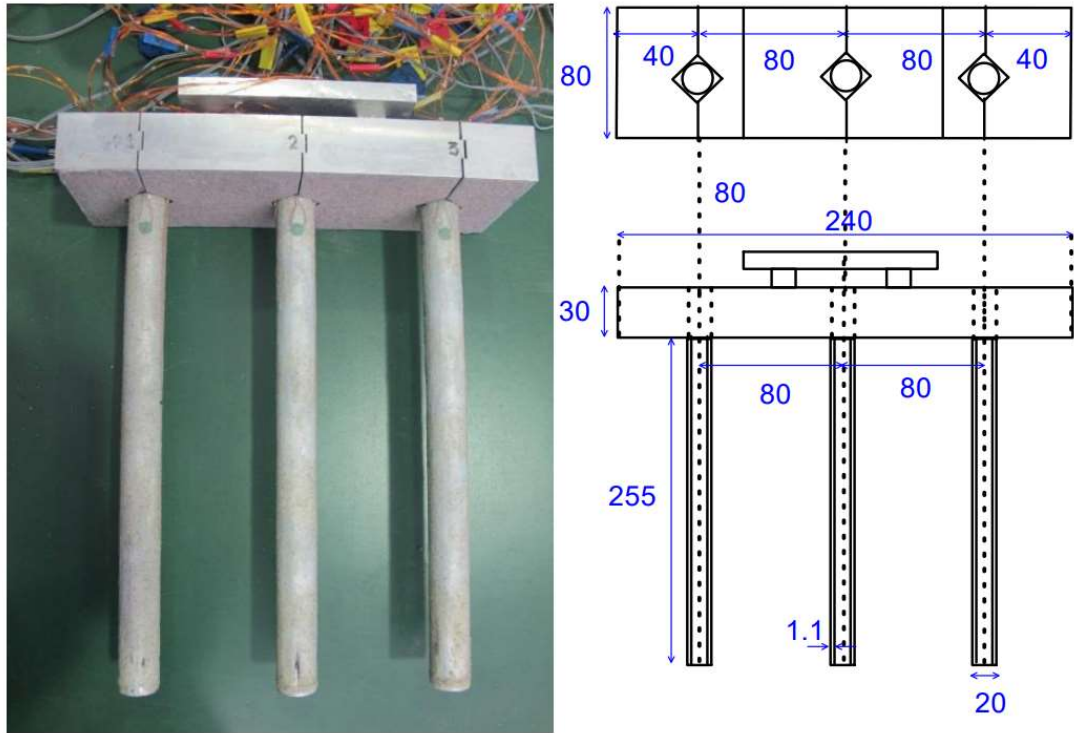
Şekil 3.5. Laminer kutu fotoğrafı (Ünsever 2015)

3.1.3. Model temeller

Kazıklı radye temel ve kazık grubu modeli

Model kazıklı radye temel Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, 4 parça çelikten oluşan sabit bağlantı elemanlarıyla birbirine bağlanmış 240 mm X 80 mm boyutlarında 30 mm kalınlığında rijit radye temel ve 30 mm uzunluğu radye temele gömülmüş toplam 285 mm uzunluğunda 20 mm çapında (B) 3 adet model kazıktan oluşmaktadır. Kazıklı radye temelde radyenin düşey yükün bir kısmını taşıdığı düşünülerek kazık sayısını azaltacak şekilde kazık merkezleri arasında boşluk (w) 80 mm ($w/B = 4$) olarak simetrik tasarım yapılmıştır (Ünsever ve ark. 2013a).

Model kazık grubu ise kazıklı radye temel modeli kullanılarak radye alt kısmının zemin yüzeyinden 20 mm yukarıda kalacak şekilde zemine yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Kazıklı radye temelde zemine gömülü kazık boyu 255 mm, kazık grubunda ise kazık boyu 235 mm olarak tasarlanmıştır (Ünsever 2015).



Şekil 3.6. Model kazıklı radye temel (Ünsever 2015)

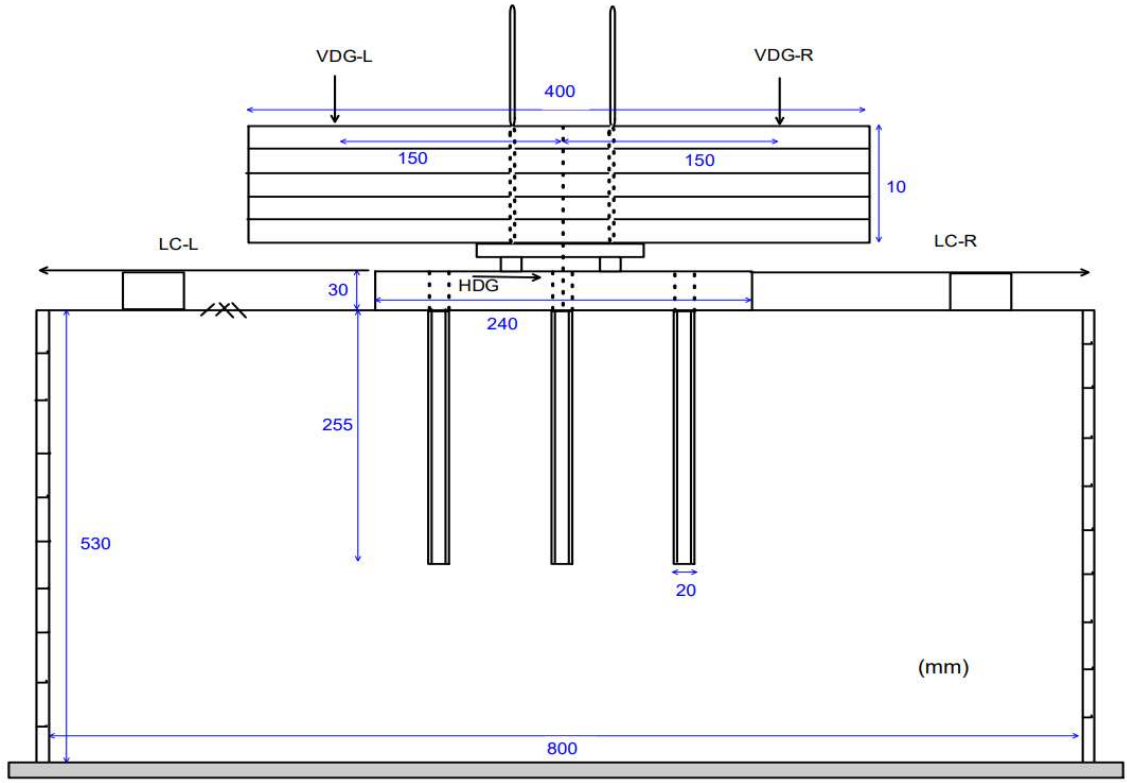
Kazıklı radye temel ve kazık grubu modelleri ile yatay yük deneyleri

Model zemin ve temeller deney kutusuna yerleştirilirken model zeminin bağıl yoğunluğu (D_r) kontrol edilerek tabakalar (10 tabaka 50 mm ve 1 tabaka 30 mm) şeklinde hazırlanmıştır. İlk 6 tabaka (kutunun 280 mm yüksekliğine kadar), her tabaka ayrı ayrı bağıl yoğunluğu (D_r) %70 oluncaya kadar sıkıştırılmıştır. Daha sonra model temel kelepçe ve çubuk yardımıyla deney kutusuna sabitlenerek kalan tabakalar aynı yöntemle tamamlanmıştır. Son olarak ölçüm aygıtları yerleştirilerek model deneye düzeneği hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.7’de kazıklı radye temelin, Şekil 3.8’de ise kazık grubunun deney kurulumu çizim ve fotoğraflarına yer verilmiştir (Ünsever 2015).

Kazıklı radye temel ve kazık grubu modelleri ile yapılan yatay yük deneylerinde; radye temele etkileyen düşey yük, her biri yaklaşık 100 N olan 5 adet ağırlık kütleleri ile toplam 497 N (yaklaşık 50 kg) olacak şekilde tek tek radyenin üzerine yerleştirilmiştir. Radye temele etkileyen yatay yük ise; radye temele ve sabitlenmiş tahta çubuğa bağlanan kablunun, tahta çubuğun kendi ekseninde dönmesi ile oluşturulmuştur. Oluşan yatay kuvvet (F) sonucu model temelde meydana gelen sapma (u) ile kazık çapı (B) oranı (u/B) 0,2 ye ulaşmaya kadar devam ettirilmiştir (Çizelge 3.5.). Yatay yükleme gerçekleştirirken ölçü aygıtlarıyla, yatay kuvvet (F), sapma miktarı (u) ölçülmüştür. Kazık üzerinde oluşan kesme kuvveti (Q) ve moment (M) değerleri hesaplanmıştır (Ünsever 2015).

Çizelge 3.4. Kazıklı radye temel ve kazık grubu yatay yüklemeleri

Kazıklı Radye Temel Yatay Yüklemeleri (N)	Kazık Grubu Yatay Yüklemeleri (N)
30	30
60	60
90	90
120	120
150	150
180	180
210	210
240	240
270	270
300	
330	
360	

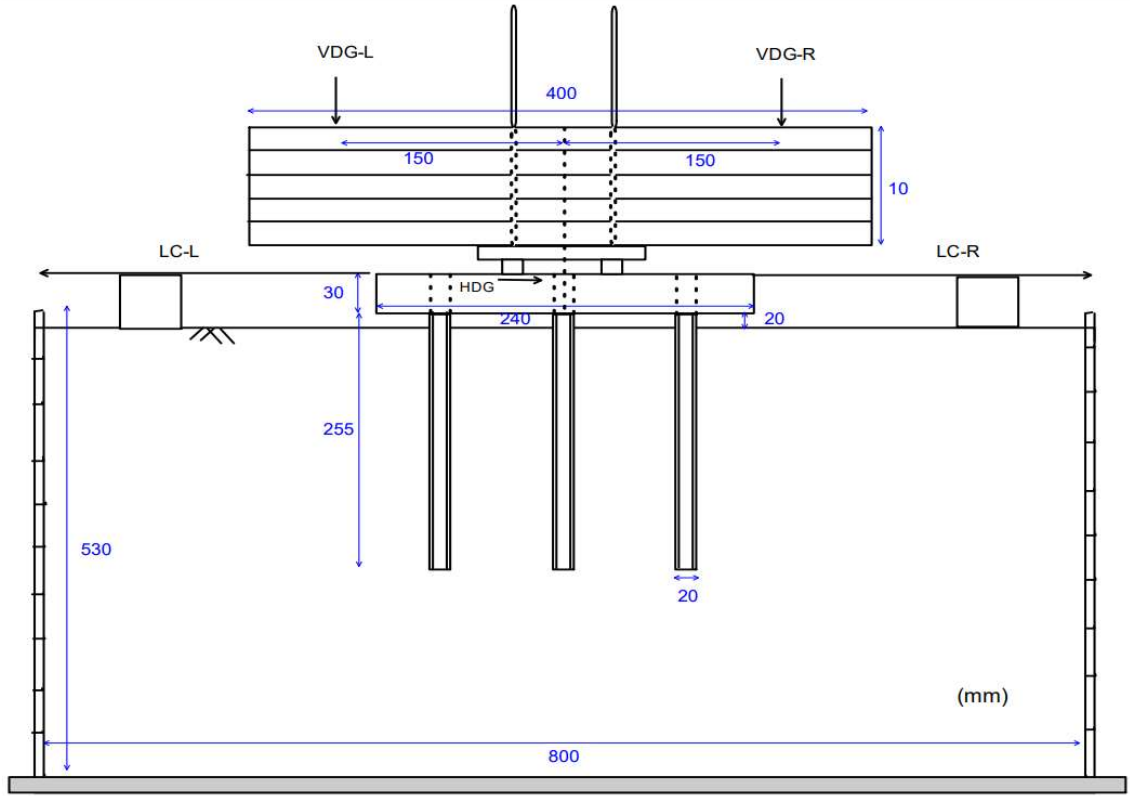


(a)

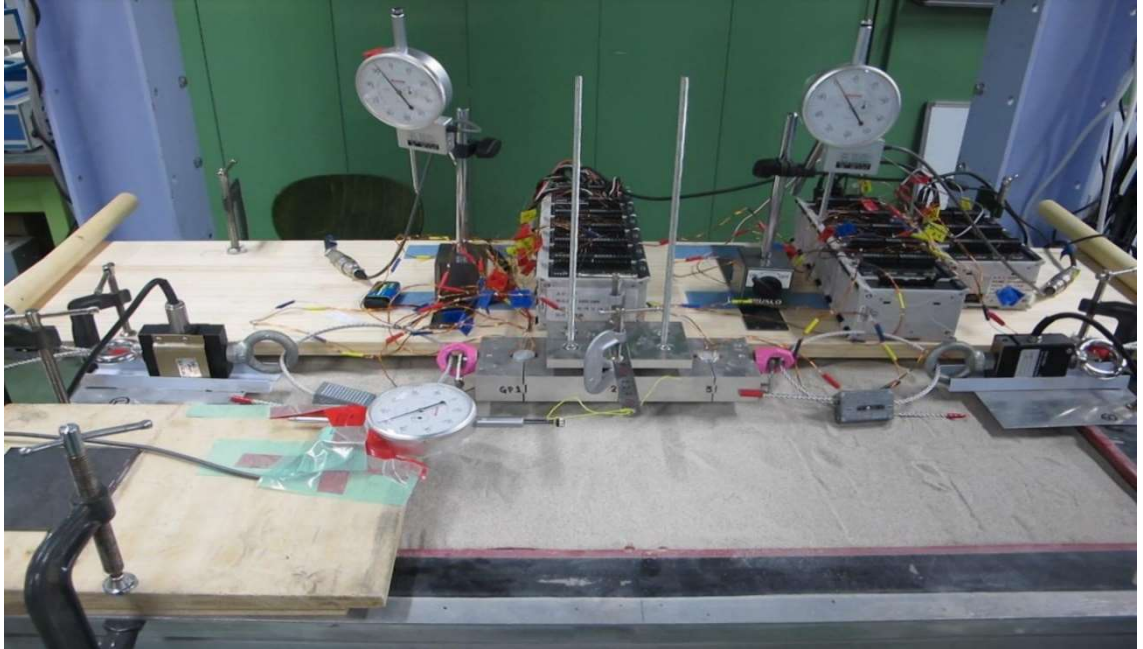


(b)

Şekil 3.7. Kazıklı radye temel deney kurulumu (a) çizim ve (b) fotoğrafı (Ünsever 2015)



(a)

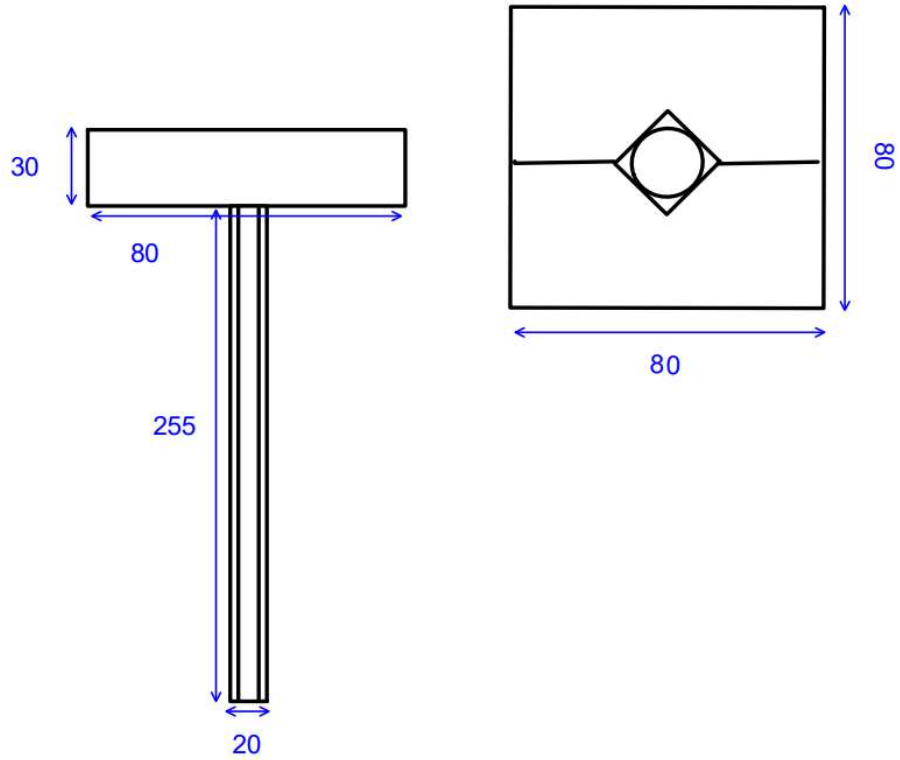


(b)

Şekil 3.8. Kazık grubu deney kurulumu (a) çizim ve (b) fotoğrafı (Ünsever 2015)

Başlıklı tekil kazık modeli

Başlıklı tekil kazık modeli Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, Kazıklı radye temelde kullanılan 2 uçtaki parçaların kullanılması ile oluşan sabit bağlantı elemanlarıyla birbirine bağlanmış 80 mm X 80 mm boyutlarında 30 mm kalınlığında rijit başlık ve 30 mm radye temele gömülmüş uzunluğu 285 mm uzunluğunda 20 mm çapında (*B*) 1 adet model kazıktan oluşmaktadır (Ünsever 2015).



Şekil 3.9. Başlıklı tekil kazık modeli (Ünsever 2015)

Başlıklı tekil kazık modeli ile düşey yüklü ve düşey yüksüz yatay yükleme deneyleri

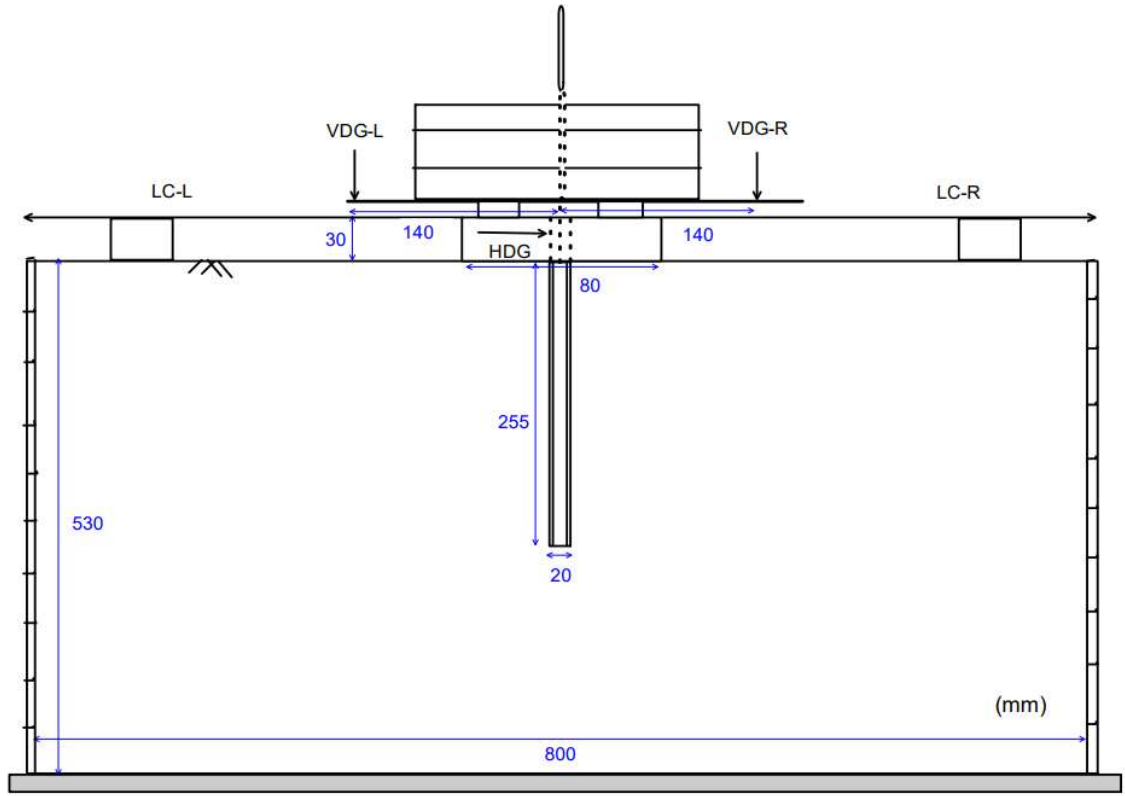
Model zeminin ve başlıklı tekil kazık temelin deney kutusuna yerleştirilmesi, kazıklı radye temel ve kazık grubu deneyinde uygulanan yöntemin aynısı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.10'da başlıklı tekil kazık temelin deney kurulumu çizim ve fotoğraflarına yer verilmiştir (Ünsever 2015).

Başlıklı tekil kazık temel in yatay yük deneyinde iki farklı durumda gerçekleştirilmiştir. İlk durumda başlığa düşey yük uygulamadan yatay yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. İkinci durumda ise başlığa düşey yük olarak, her biri yaklaşık 100 N olan 3 adet ağırlık kütleleri ile toplam 277 N 'lık yük uygulanarak yatay yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Başlığa etkiyen yatay yük ise, radye temel bağlanan kablonun sabitlenmiş tahta çubuğun dönderilmesiyle oluşturulmuştur (Ünsever 2015).

Her iki durumda da oluşan yatay kuvvet (F) sonucu model temelde meydana gelen sapma (u) ile kazık çapı (B) oranı (u/B) 0,2 ye ulaşmaya kadar devam ettirilmiştir (Çizelge 3.5.). Yatay yükleme gerçekleştirirken ölçü aygıtlarıyla, yatay kuvvet (F), sapma miktarı (u) ölçülmüştür. Kazık üzerinde oluşan kesme kuvveti (Q) ve moment (M) değerleri hesaplanmıştır (Ünsever 2015).

Çizelge 3.5. Düşey yüksüz ve düşey yüklü başlıklı tekil kazık yüklemeleri

Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazık Yatay Yüklemeleri (N)	Düşey Yüklü Başlıklı Tekil Kazık Yatay Yüklemeleri (N)
10	10
20	20
30	30
40	40
50	50
60	60
70	70
80	80
90	90
	100
	110
	120
	130
	140
	150



(a)



(b)

Şekil 3.10. Başlıklı tekil kazık deney kurulumu (a) çizim ve (b) fotoğrafı (Ünsever 2015)

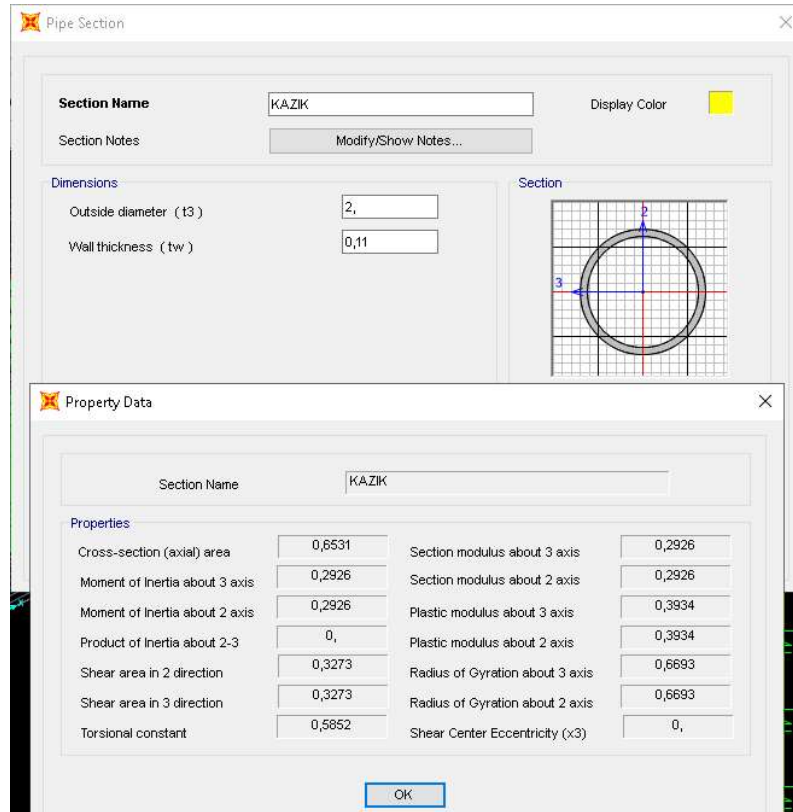
3.2. SAP2000 ile Model Temellerin Analizi

SAP2000, yapıların tasarım ve analizi için hazırlanmış bağımsız sonlu elemanlar temelli bilgisayar programıdır. Pratik ara yüzü ve çok yönlü analitik teknikleri ile en karmaşık projelerin çözümlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (SAP2000 V 20.2 2018).

Ünsever'in (2015) model temeller ile gerçekleştirdiği deneyler, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin (TBDY) yapı – kazık – zemin etkileşimi için önerdiği yöntemler dikkate alınarak SAP2000 ile model temellerin analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Kazıklı Radye Temel Modelinin SAP2000 ile Analizi

Kazıklı radye temel modeli SAP2000'de tasarlanırken ilk olarak deneyde kullanılan kazıkların ve radyenin fiziksel-mühendislik özelliklerine göre malzeme ve kesit tanımlaması yapılmıştır (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. SAP2000'de kazık için malzeme ve kesit tanımlaması

Kazıklı radye temel modelindeki radyenin zemin ile ilişkisini Winkler yaylarıyla tanımlanmıştır. Kazığın yatayda zemin ile etkileşimini; TBDY'nin (2018) kazıklar için önerdiği, YSS altındaki ve YSS üstündeki kum zeminler için Reese ve ark (1974) yaklaşımı ile oluşturulan P-Y eğrilerinin tanımlandığı P-Y yaylarıyla modellenmiştir.

Kum Zemin için T-Z Eğrileri (API RP 2A-WSD 2010)

Kum zemin için API RP 2A-WSD'de (2010) önerilen T-Z eğrileri oluşturulurken, kazık boyunca herhangi bir noktadaki nihai sürtünme gerilmesini (t_{max}) denklem (3.1) ile hesaplanmaktadır.

$$t_{max} = K_t \sigma_0 \tan \delta A_t \quad (3.1)$$

Burada;

K_t : Zeminin yatay etkili gerilme katsayısı (açık uçlu kazıklar için ($K_t = 0,8$), düşey yönde tamamen sapma olan kazıklar için ($K_t = 1$) kullanılır

σ_0 : Derinlik gerilmesi ($\sigma_0 = x\gamma$) (x : derinlik)

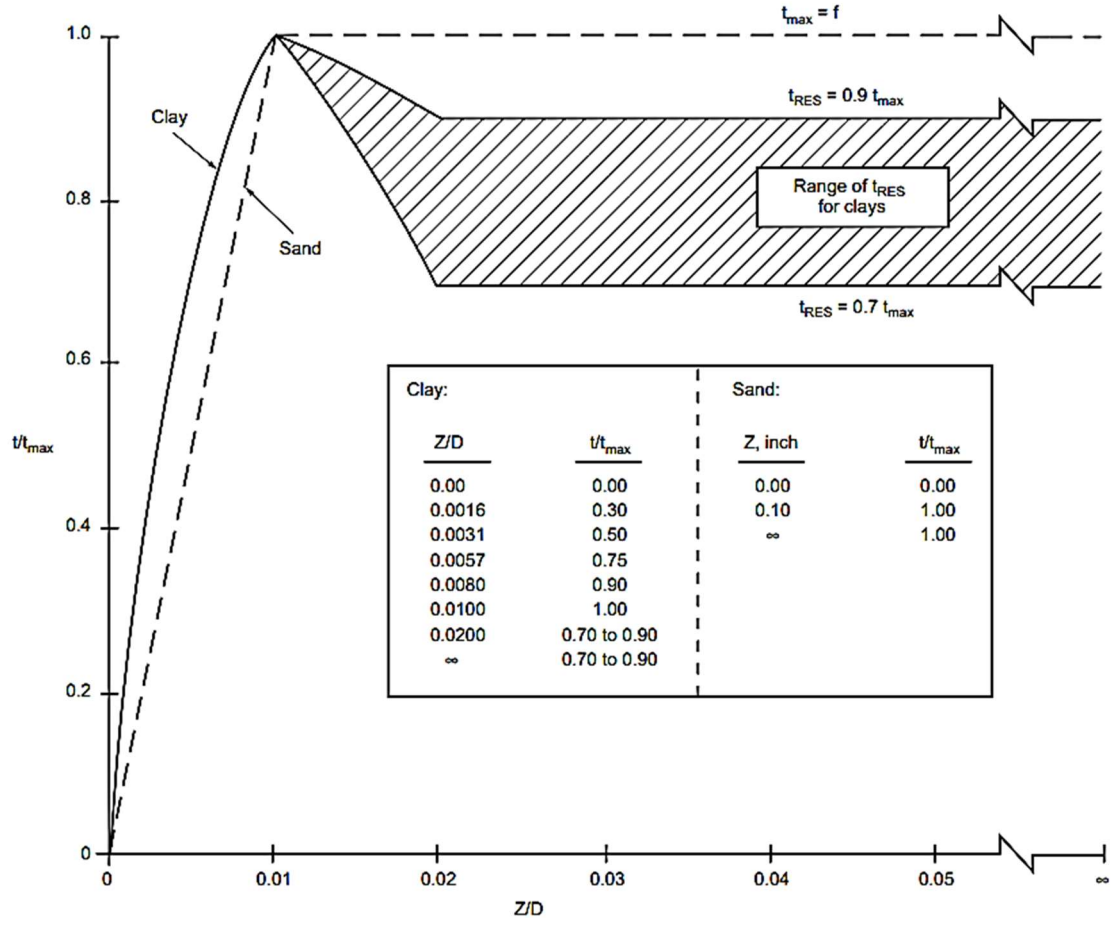
δ : Zemin ile kazık yüzeyi arasındaki sürtünme açısı Çizelge 3.7'den alınır.

A_t : Temsil edilen uzunluğun yüzey alanı

Zemin ile kazık yüzeyi arasındaki nihai sürtünme gerilmesi (t_{max}) ve Çizelge 3.6'daki düşey nihai kazık saptması (z) eksen değerleri kullanılarak T-Z eğrileri Şekil 3.12'deki gibi oluşturulmaktadır.

Çizelge 3.6. Kum zemin için T-Z eğrisi eksen değerleri (API RP 2A-WSD 2010)

z (cm)	t/t_{max}
0,000	0,00
0,254	1,00
∞	1,00



Şekil 3.12. T-Z eğrisi grafiği (API RP 2A-WSD 2010)

Kum Zemin için Q-Z Eğrisi (API RP 2A-WSD 2010)

Kum zemin için API RP 2A-WSD'de (2010) önerilen Q-Z eğrileri oluşturulurken, kazık ucundaki nihai gerilme (q) denklem (3.2) ile hesaplanmaktadır.

$$q = N_q \sigma_0 A_q \quad (3.2)$$

Burada;

N_q : Zeminin taşıma kapasitesi faktörü Çizelge 3.7'den alınır.

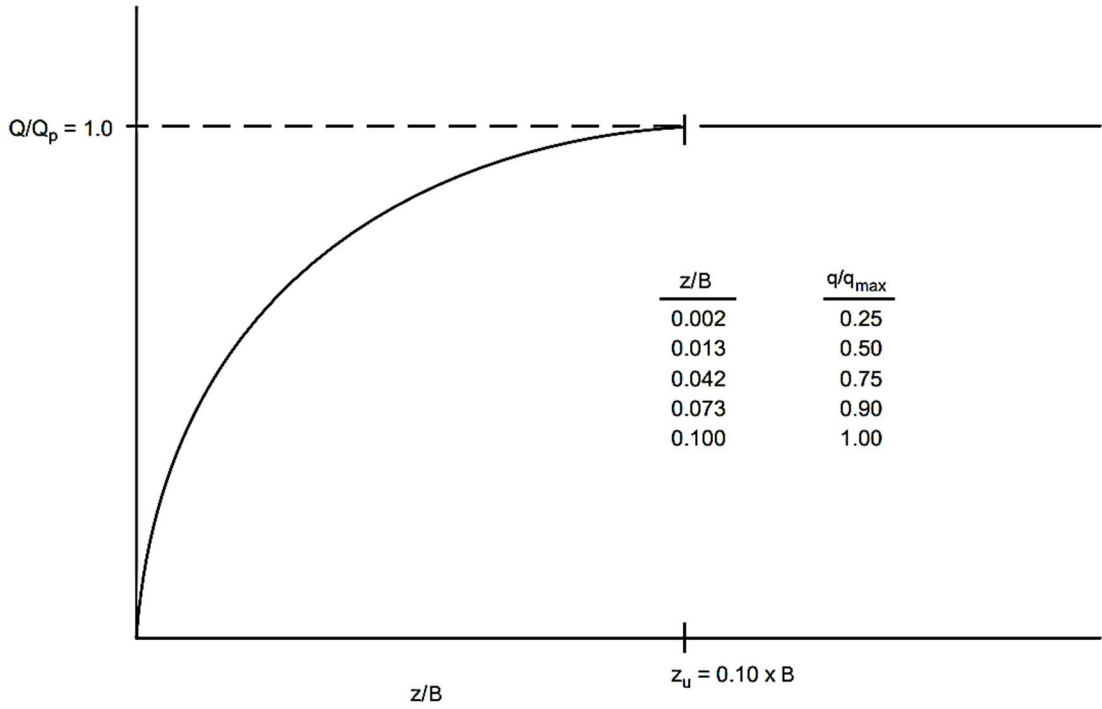
σ_0 : Derinlik gerilmesi ($\sigma_0 = x\gamma$) (x : derinlik)

A_q : Kazık ucunu alanı

Çizelge 3.7. Kum zemin için δ ve N_q değerleri (API RP 2A-WSD 2010)

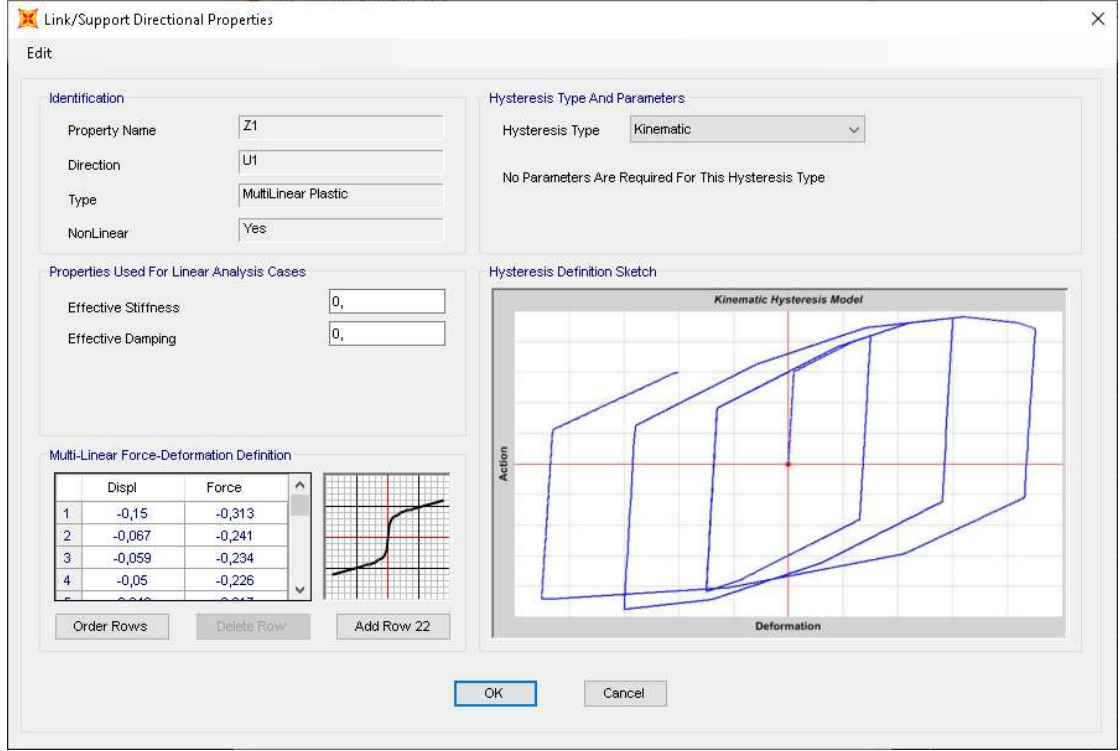
	Çok Gevşek	Gevşek	Orta	Sıkı	Çok Sıkı
Sürtünme açısı, δ	15	20	25	30	35
Kapasite faktörü, N_q	8	12	20	40	50

Şekil 3.13'teki; kazık ucundaki nihai gerilmesi (q) ve düşey kazık sapmasının kazık çapına oranı (z/B) eksen değerleri kullanılarak Q-Z eğrileri oluşturulmaktadır.



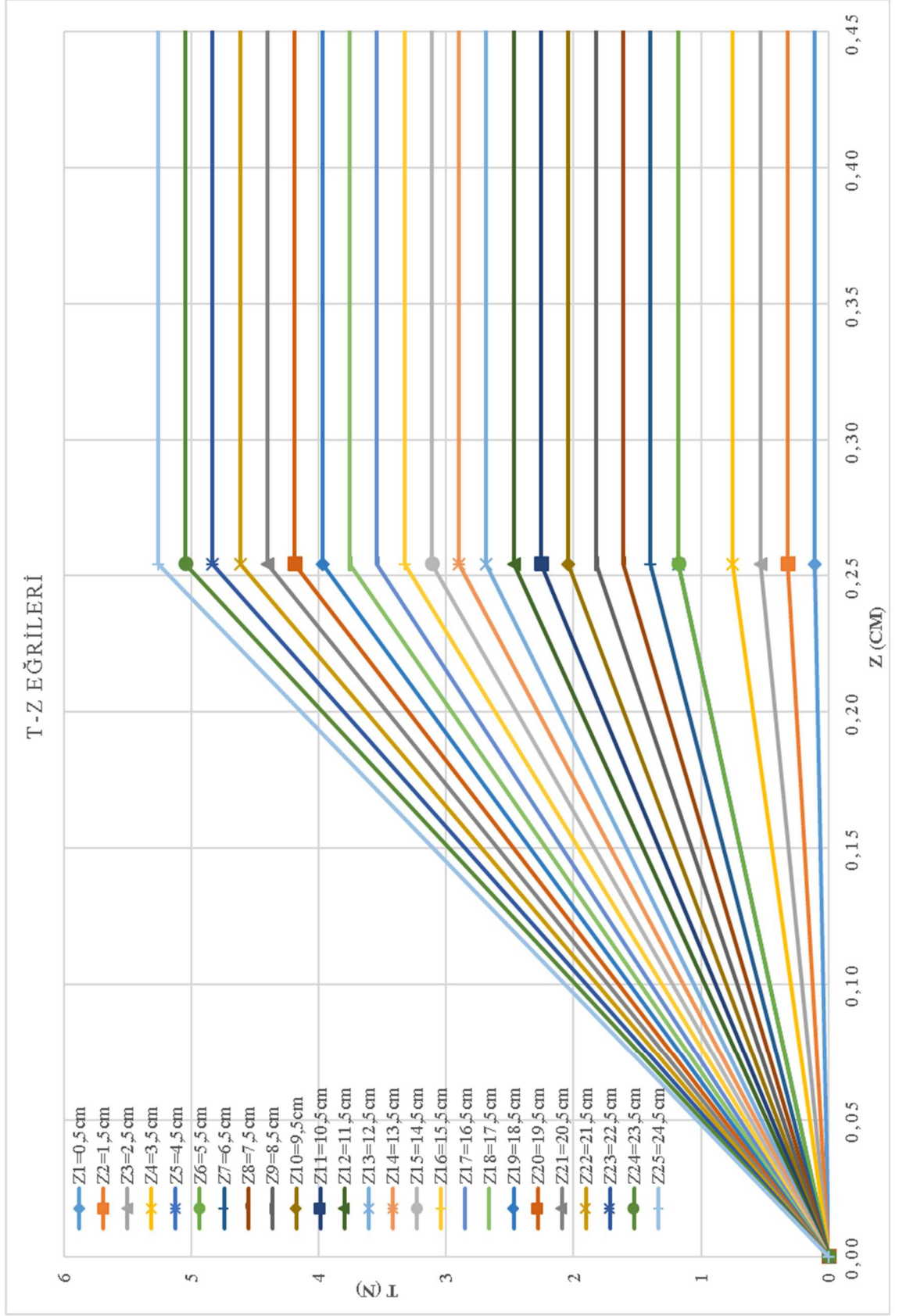
Şekil 3.13. Q-Z eğrisi grafiği (API RP 2A-WSD 2010)

Kazık boyunca, kazığın her birim uzunluğuna (cm) yönetmeliğin önerdiği gibi P-Y yöntemiyle oluşturulmuş doğrusal olmayan P-Y yayları, doğrusal olmayan T-Z ve doğrusal olmayan Q-Z yayları Şekil 3.14'te gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

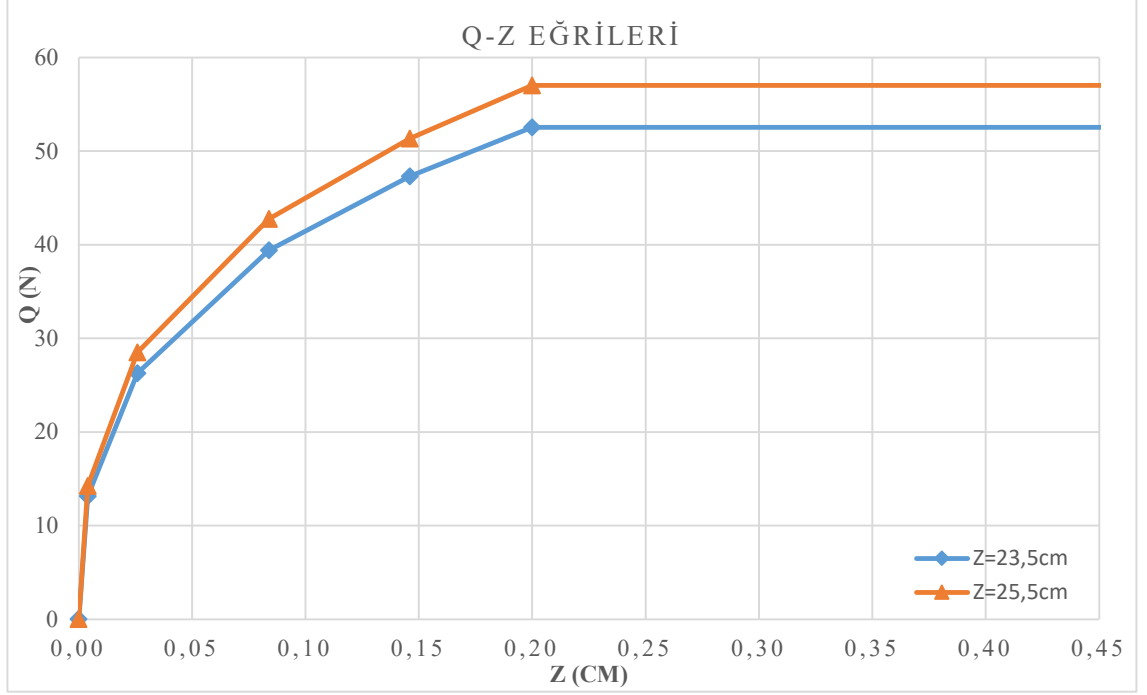


Şekil 3.14. SAP2000’de doğrusal olmayan yayların tanımlanması

TBDY’nin (2018) kazıklar için önerdiği gibi API RP 2A-WSD’deki (2010) yöntemlerle elde edilen; Şekil 3.15’teki doğrusal olmayan T-Z yayları ile düşeyde sürtünme direnci ve Şekil 3.16’daki doğrusal olmayan Q-Z yayı ile kazık ucundaki direnc temsil edilmiştir.



Şekil 3.15. Kazıklar için T-Z eğrileri

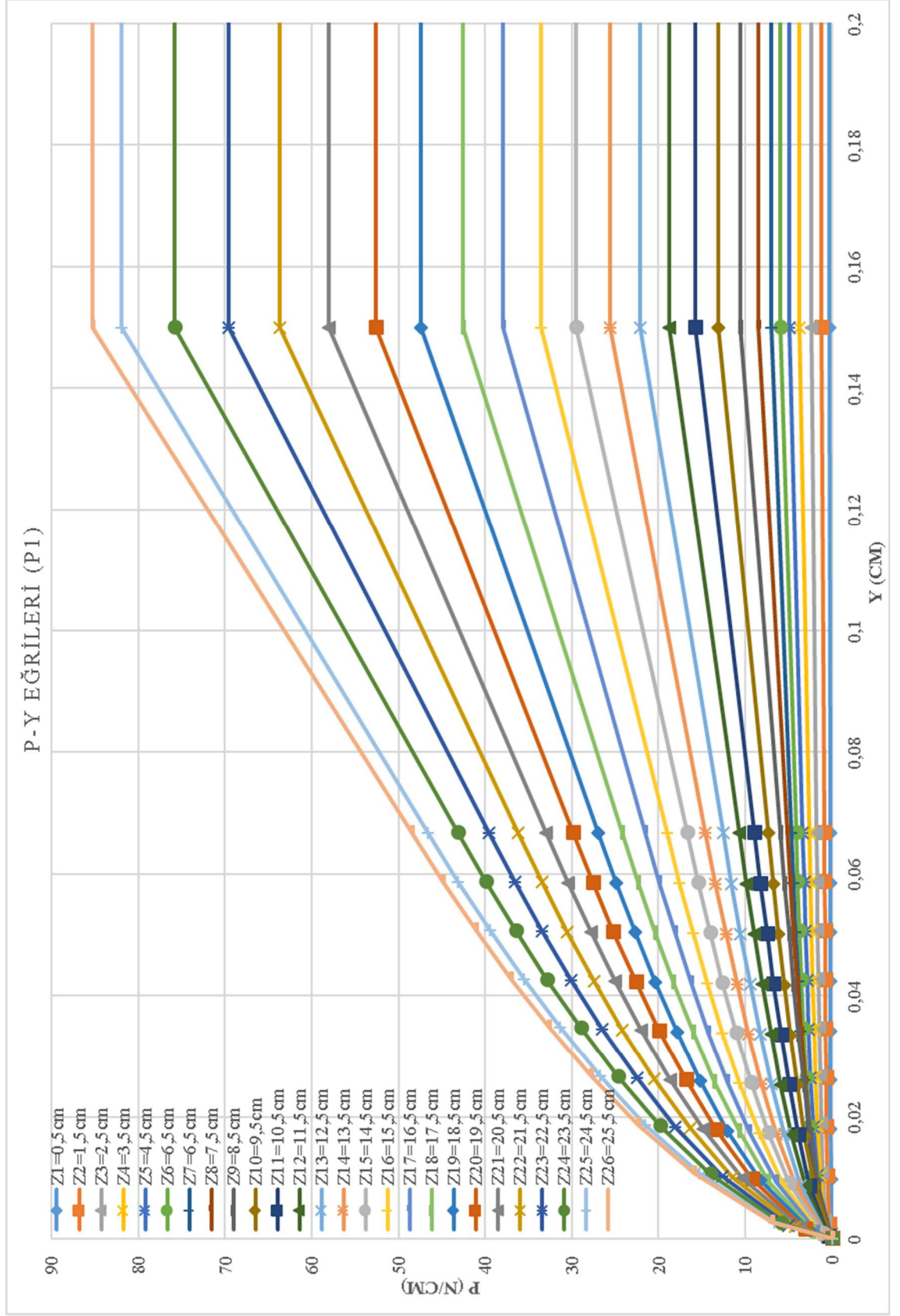


Şekil 3.16. Kazıklar için Q-Z eğrileri

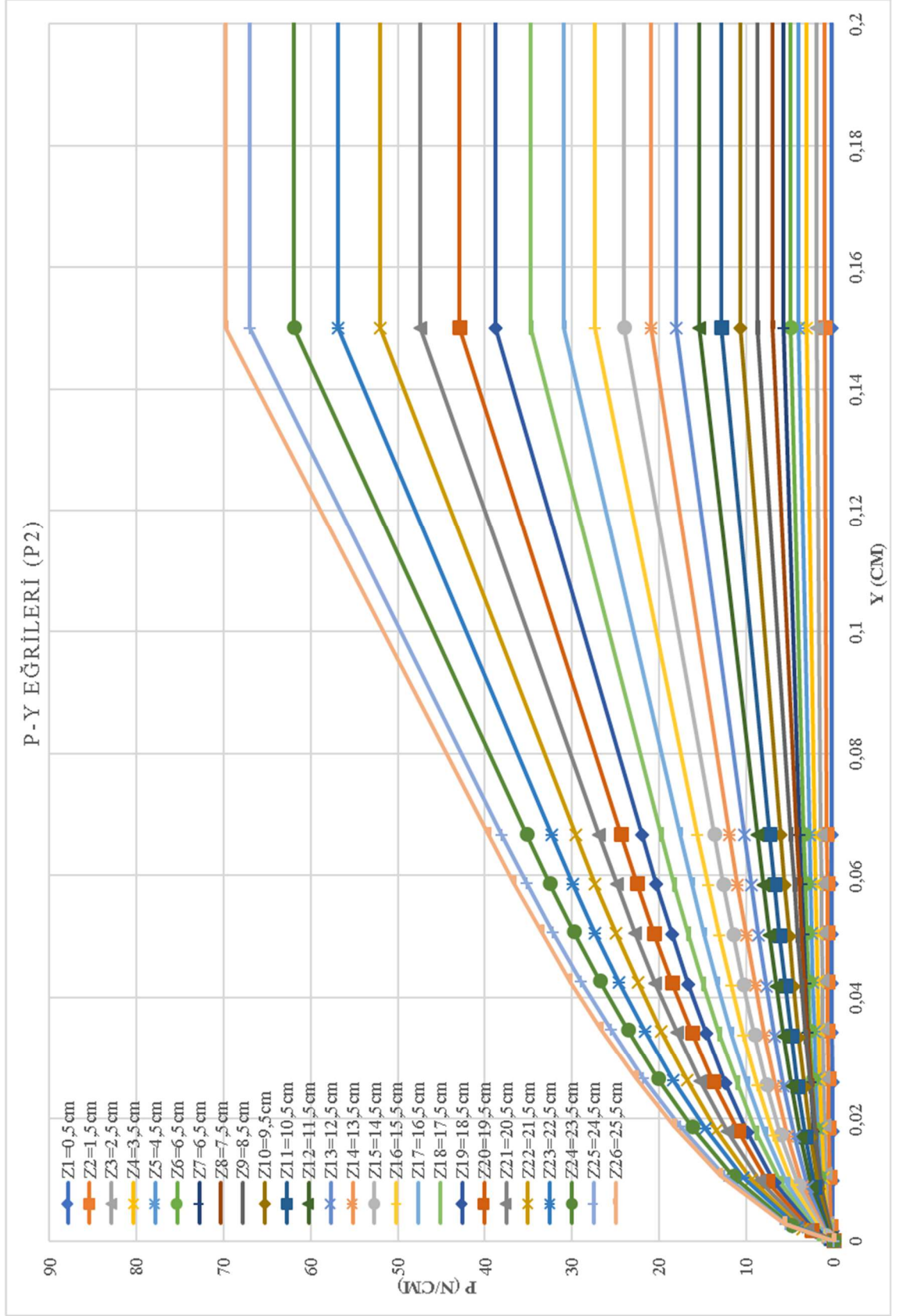
Kazıklı radye temel modelindeki kazıklar için TBDY'nin önerdiği grup etkisini yaklaşık olarak belirleyen denklem (3.3) ampirik bağıntısı ile hesaplanan azaltma katsayıları (β_G), P-Y yayları için tanımlanan P-Y eğrilerinin zemin tepkisi (p) eksenine uygulanarak Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'daki P-Y eğrileri elde edilmiştir.

$$\beta_G = 0,2[(1 - \beta_{G1})s - (1 - 6\beta_{G1})] \quad (3.3)$$

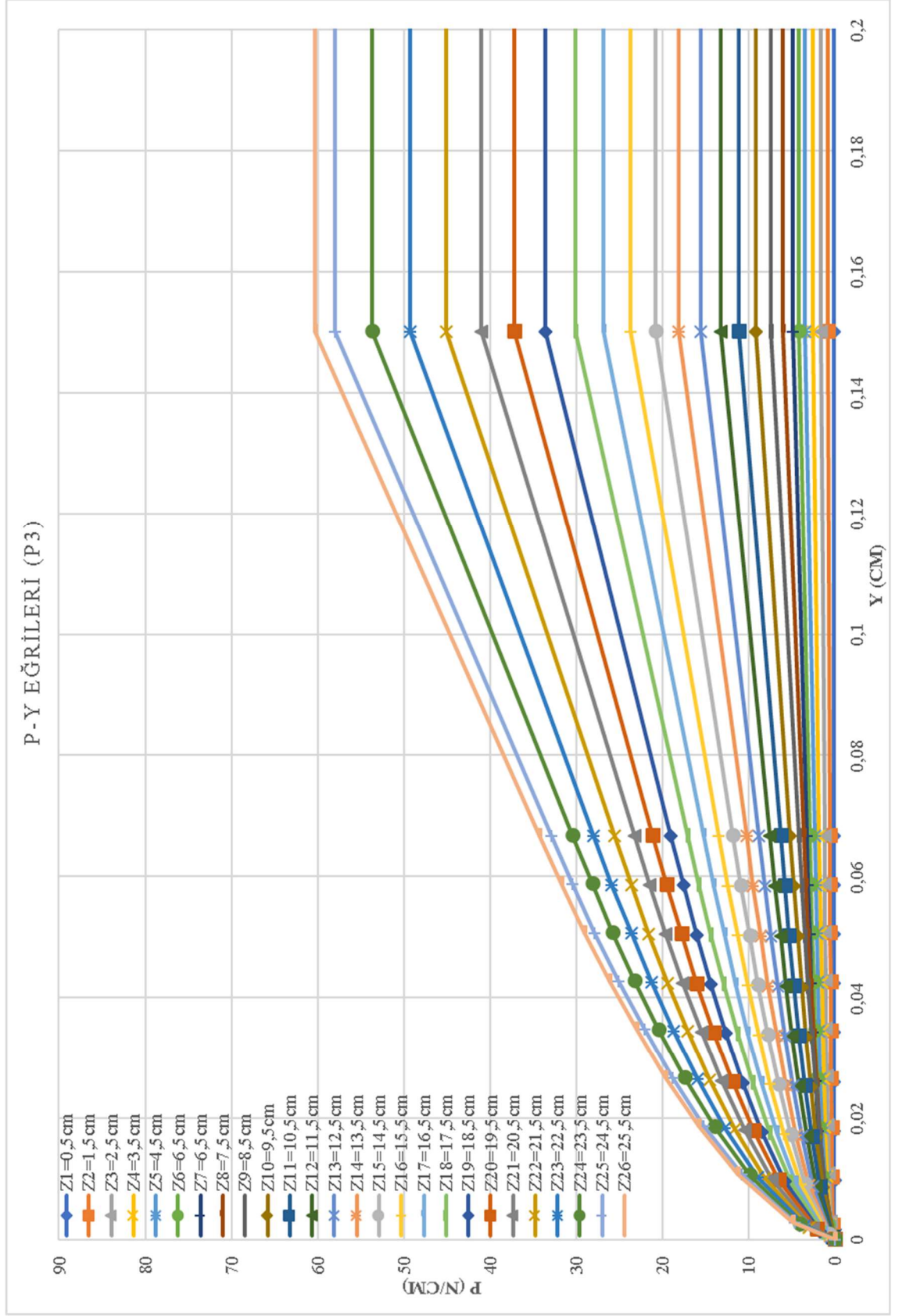
TBDY'de denklem (3.1)'deki (s), kazık ara uzaklığının kazık çapına oranını ($s \leq 6$) ifade etmektedir. (β_{G1}) kazık sırası için uygulanacak katsayıdır, ilk sıra kazıklar için ($\beta_{G1} = 0,7$), arkasındaki ikinci sıra için ($\beta_{G1} = 0,45$), üçüncü sıra için ($\beta_{G1} = 0,3$), dördüncü ve sonraki sıralar için ($\beta_{G1} = 0,2$) önerilmiştir.



Şekil 3.17. Kazıklı radye temel modelindeki (P1) kazığının P-Y eğrileri

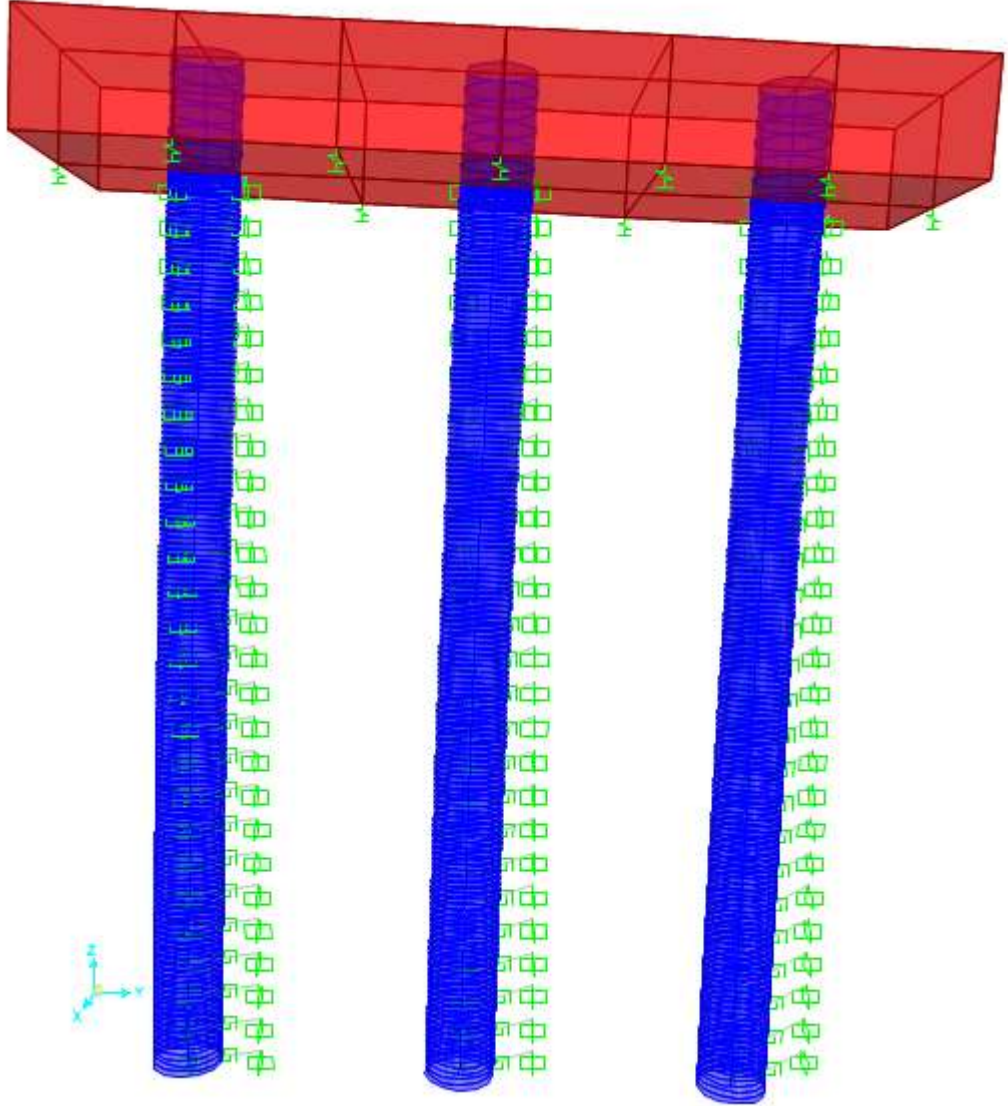


Şekil 3.18. Kazıklı radye temel modelindeki (P2) kazığının P-Y eğrileri

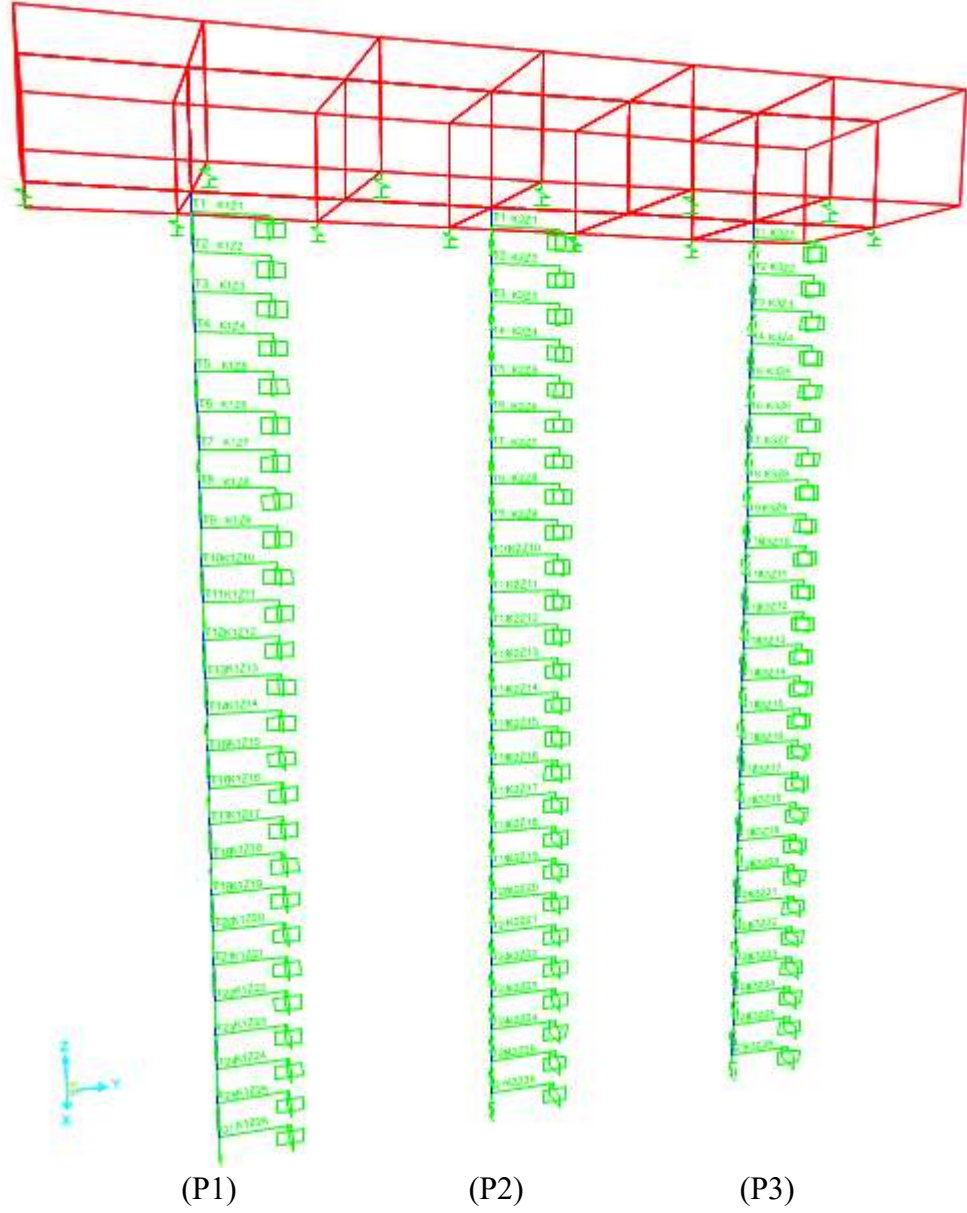


Şekil 3.19. Kazıklı radye temel modelindeki (P3) kazığının P-Y eğrileri

Kazıklı radye temelin deneysel çalışma ile aynı ölçülerde yapılan SAP2000 modellemesinin üç boyut analiz (Şekil 3.20) ve yayların (Şekil 3.21) görüntülerine aşağıda yer verilmiştir.



Şekil 3.20. Kazıklı radye temelin SAP2000’de modellenmiş üç boyutlu analiz görüntüsü



Şekil 3.21. Kazıklı radye temelin SAP2000’de modellenmiş yayların görüntüsü

Kazıklı radye temel deneysel çalışmasındaki (Ünsever 2015) gibi sabit düşey yükle birlikte aynı noktaya (30 N, 60 N, 90 N şeklinde kademeli 30 N artırarak 360 N’a kadar) uygulanan yatay yüklerle SAP2000’de yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçlarıyla; kazıkta oluşan yatay sapma (u) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca 360 N yatay yük altında kazık üzerinde oluşan kesme kuvveti (Q) ve moment (M) değerleri elde edilmiştir.

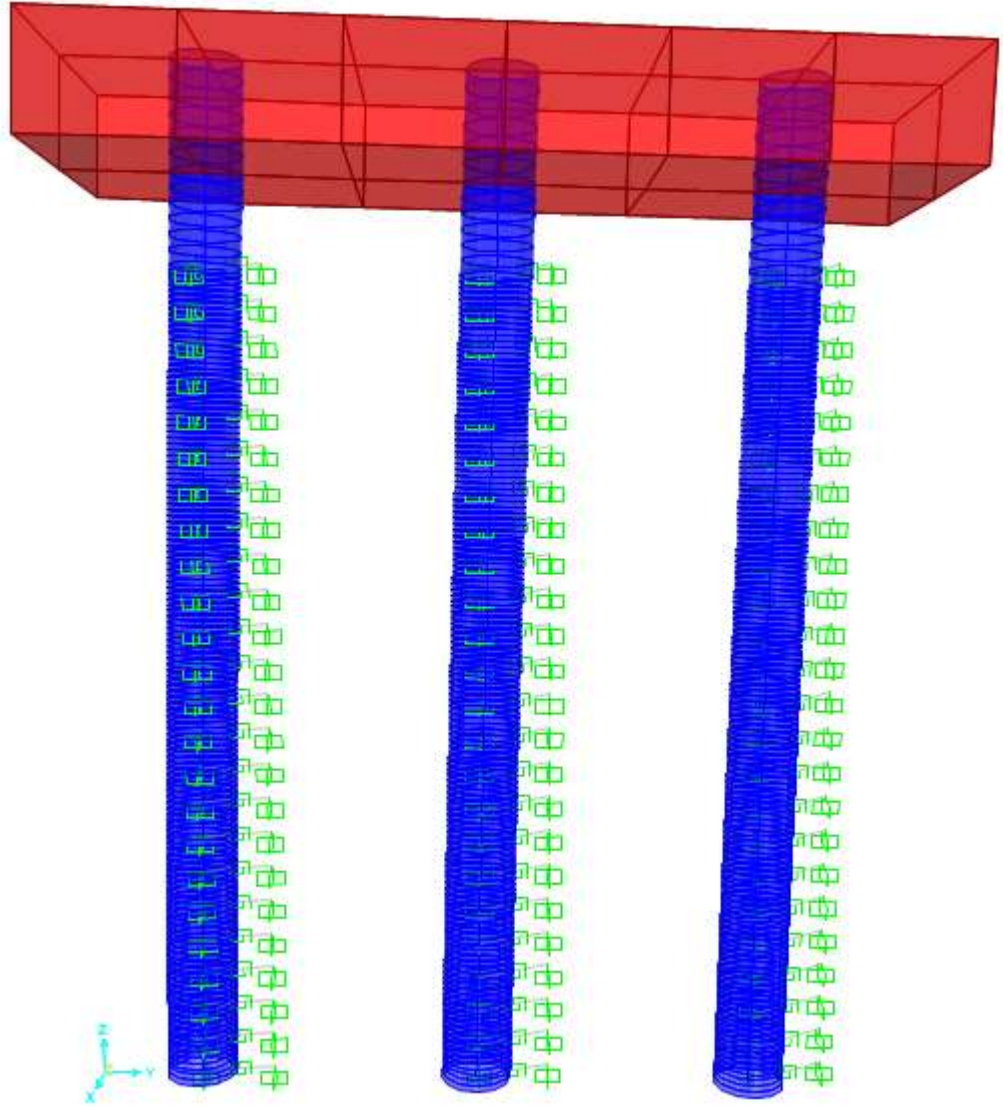
3.2.2. Kazık Grubu Modelinin SAP2000 ile Analizi

Kazık grubu modeli SAP2000’de tasarlanırken, kazıklı radye temelinin tasarımında yapılan fiziksel-mühendislik özelliklerine göre malzeme ve kesit tanımlaması aşamaları aynen uygulanmıştır.

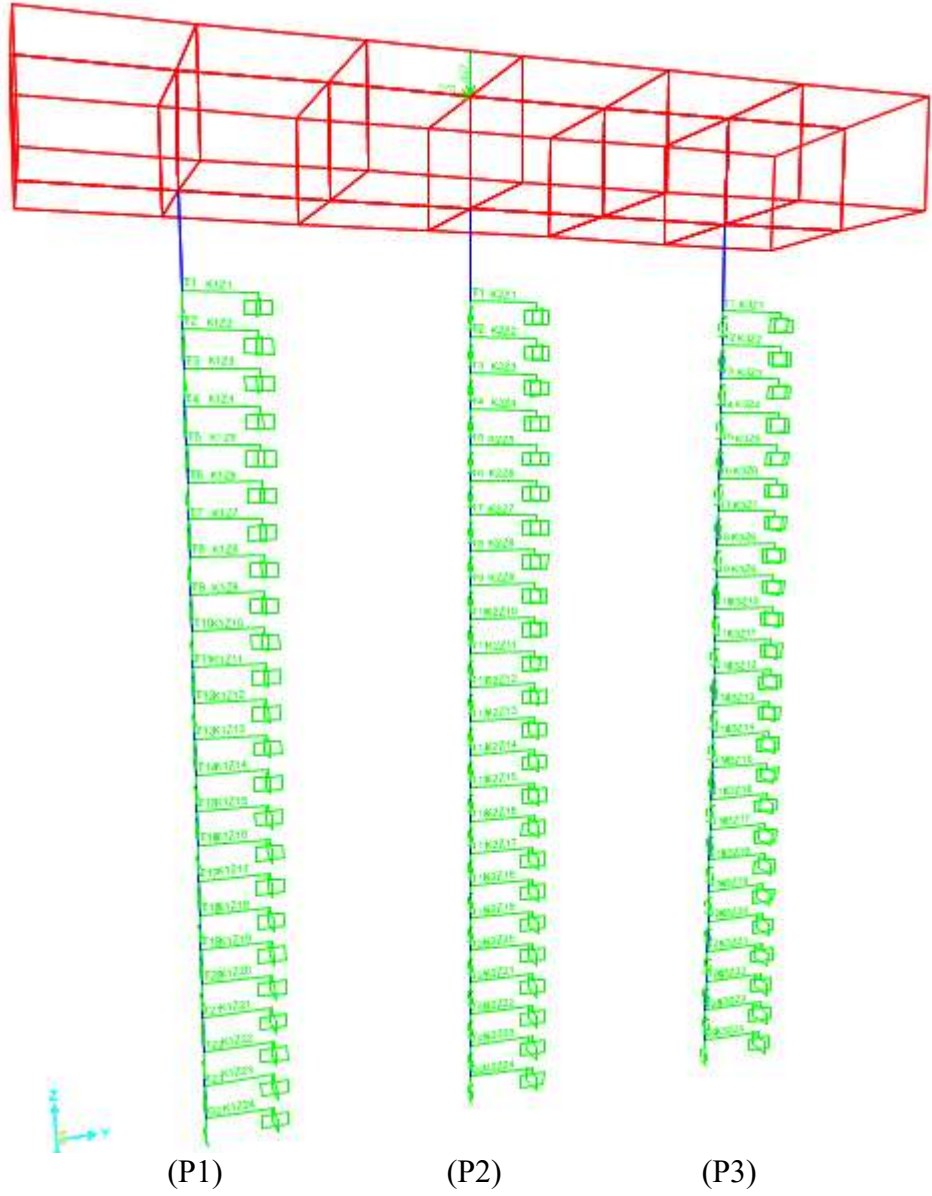
Kazık grubu modelinde radyenin zemin ile ilişkisi olmadığı için Winkler yayları tanımlanmamıştır. Kazığın yatayda zemin ile etkileşimini; TBDY’nin (2018) kazıklar için önerdiği, YSS altındaki ve YSS üstündeki kum zeminler için Reese ve ark (1974) yaklaşımı ile oluşturulan P-Y eğrilerinin tanımlandığı P-Y yaylarıyla modellenmiştir. Düşeyde sürtünme direncini ve kazık ucundaki direnci ise; TBDY’nin (2018) kazıklar için önerdiği API RP 2A-WSD’deki (2010) yöntemlerle elde edilen doğrusal olmayan T-Z yayları (Şekil 3.15.) ve doğrusal olmayan Q-Z yayı (Şekil 3.16.) ile modellenmiştir.

Ünsever’in (2015) deneysel çalışmasında radye zeminden 2 cm yukarıda tutulduğu için kazığın baş kısmında 2 cm boşluk bırakılarak, kazığın geri kalan her birim uzunluğuna (cm) yönetmeliğin önerdiği gibi P-Y yöntemiyle oluşturulmuş Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’daki 24 adet P-Y eğrileri doğrusal olmayan P-Y yayları tanımlamıştır.

Kazık grubunun deneysel çalışma ile aynı ölçülerde yapılan SAP2000 modellemesinin üç boyutlu analiz (Şekil 3.22) ve yayların (Şekil 3.23) görüntülerine aşağıda yer verilmiştir.



Şekil 3.22. Kazık Grubunun SAP2000’de modellenmiş üç boyutlu analiz görüntüsü



Şekil 3.23. Kazık Grubunun SAP2000’de modellenmiş yayların görüntüsü

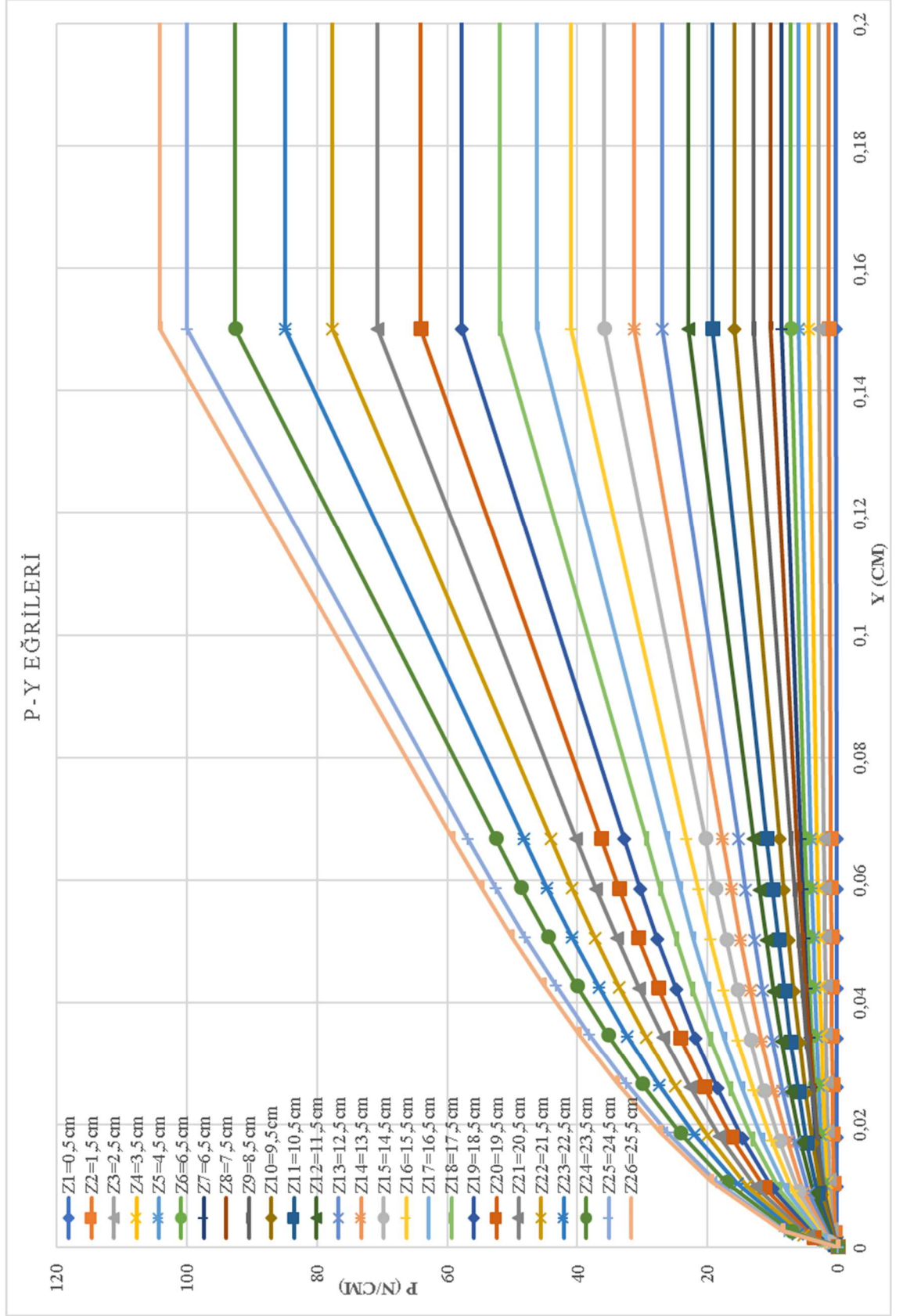
Kazık grubu deneysel çalışmasındaki (Ünsever 2015) gibi sabit düşey yükle birlikte aynı noktaya (30 N, 60 N, 90 N şeklinde kademeli 30N artırarak 270 N’a kadar) uygulanan yatay yüklerle SAP2000’de yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçlarıyla; kazıkta oluşan yatay sapma (u) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca 270 N yatay yük altında kazık üzerinde oluşan kesme kuvveti (Q) ve moment (M) değerleri elde edilmiştir.

3.2.3. Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazık Modelinin SAP2000 ile Analizi

Düşey yüksüz başlıklı tekil kazık modeli SAP2000’de tasarlanırken, kazıklı radye temelinin tasarımında yapılan fiziksel-mühendislik özelliklerine göre malzeme ve kesit tanımlaması aşamaları aynen uygulanmıştır.

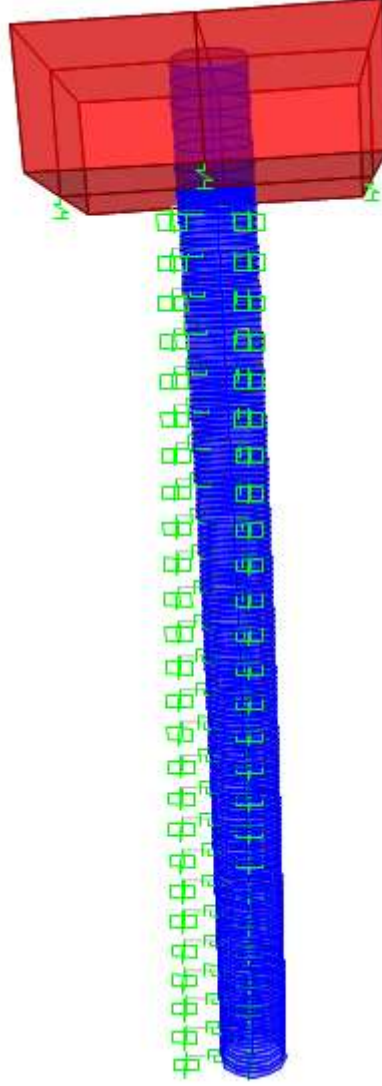
Düşey yüksüz başlıklı tekil kazık modelinde radyenin zemin ile ilişkisi Winkler yayları tanımlanmıştır. Kazığın yatayda zemin ile etkileşimini; TBDY’nin (2018) kazıklar için önerdiği, YSS altındaki ve YSS üstündeki kum zeminler için Reese ve ark (1974) yaklaşımı ile oluşturulan P-Y eğrilerinin tanımlandığı P-Y yaylarıyla modellenmiştir. Düşeyde sürtünme direncini ve kazık ucundaki direnci ise; TBDY’nin (2018) kazıklar için önerdiği API RP 2A-WSD’deki (2010) yöntemlerle elde edilen doğrusal olmayan T-Z yayları (Şekil 3.15.) ve doğrusal olmayan Q-Z yayı (Şekil 3.16.) ile modellenmiştir.

Kazık boyunca, kazığın her birim uzunluğuna (cm) yönetmeliğin önerdiği gibi oluşturulan P-Y yöntemiyle oluşturulmuş Şekil 3.24’deki 26 adet P-Y eğrisi doğrusal olmayan P-Y yaylarına tanımlanmıştır.

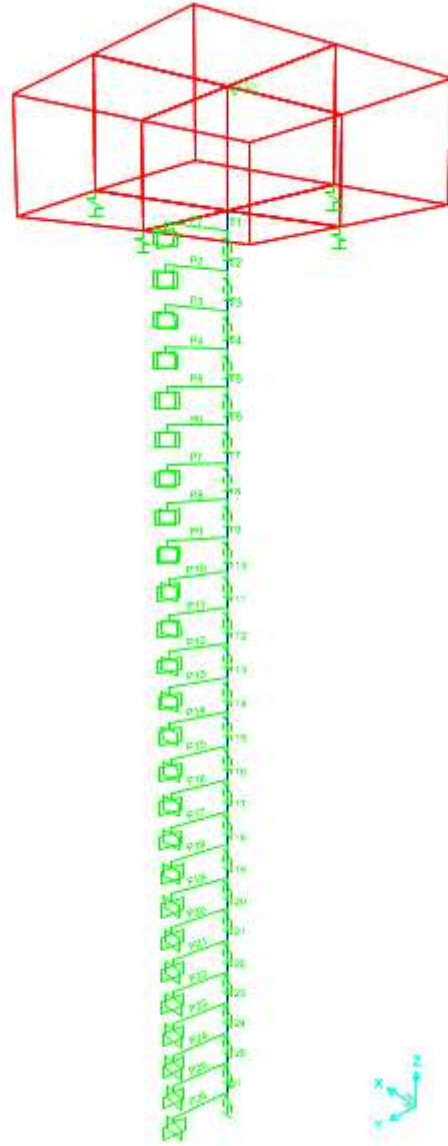


Şekil 3.24. Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazık modelindeki kazığın P-Y eğrileri

DüŖey yüksüz baŖlıklı tekil kazığın deneysel alıŖma ile aynı ölçülerde yapılan SAP2000 modellemesinin üç boyutlu analiz (Ŗekil 3.25) ve yayların (Ŗekil 3.26) görüntülerine aŖađıda yer verilmiŖtir.



Ŗekil 3.25. DüŖey Yüksüz BaŖlıklı Tekil Kazığın SAP2000’de modellenmiŖ üç boyutlu analiz görüntüsü



Şekil 3.26. Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazığın SAP2000’de modellenmiş yayların görüntüsü

Düşey yüksüz başlıklı tekil kazık deneysel çalışmasındaki (Ünsever 2015) gibi sabit düşey yükle birlikte aynı noktaya (10 N, 20 N, 30 N şeklinde kademeli 10 N artırarak 90 N’a kadar) uygulanan yatay yüklerle SAP2000’de yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçlarıyla; kazıkta oluşan yatay sapma (u) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca 90 N yatay yük altında kazık üzerinde oluşan kesme kuvveti (Q) ve moment (M) değerleri elde edilmiştir.

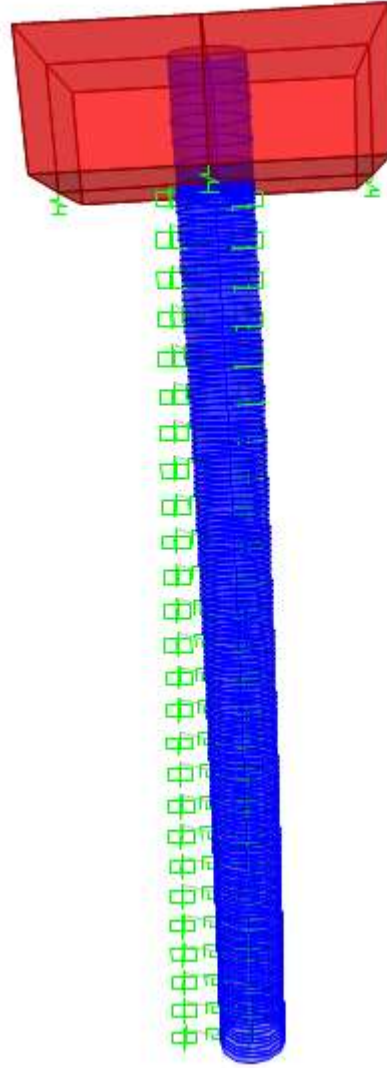
3.2.4. Düşey Yüklü Başlıklı Tekil Kazık Modelinin SAP2000 ile Analizi

Düşey yüklü başlıklı tekil kazık modeli SAP2000’de tasarlanırken, kazıklı radye temelinin tasarımında yapılan fiziksel-mühendislik özelliklerine göre malzeme ve kesit tanımlaması aşamaları aynen uygulanmıştır.

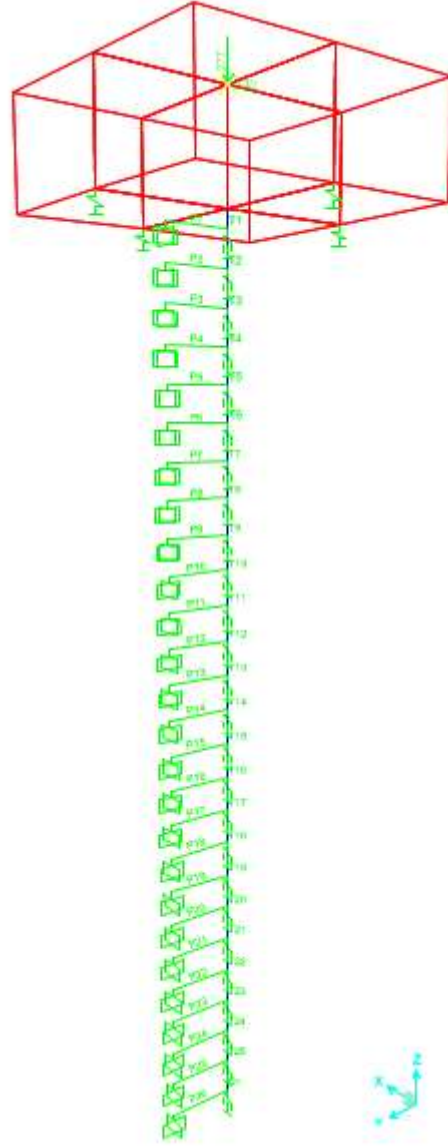
Düşey yüklü başlıklı tekil kazık modelinde radyenin zemin ile ilişkisi Winkler yayları tanımlanmıştır. Kazığın yatayda zemin ile etkileşimini; TBDY’nin (2018) kazıklar için önerdiği, YSS altındaki ve YSS üstündeki kum zeminler için Reese ve ark (1974) yaklaşımı ile oluşturulan P-Y eğrilerinin tanımlandığı P-Y yaylarıyla modellenmiştir. Düşeyde sürtünme direncini ve kazık ucundaki direnci ise; TBDY’nin (2018) kazıklar için önerdiği API RP 2A-WSD’deki (2010) yöntemlerle elde edilen doğrusal olmayan T-Z yayları (Şekil 3.15.) ve doğrusal olmayan Q-Z yayı (Şekil 3.16.) ile modellenmiştir.

Kazık boyunca, kazığın her birim uzunluğuna (cm) yönetmeliğin önerdiği gibi oluşturulan P-Y yöntemiyle oluşturulmuş Şekil 3.24’deki 26 adet P-Y eğrisi doğrusal olmayan P-Y yaylarına tanımlanmıştır.

Düşey yüklü başlıklı tekil kazığın deneysel çalışma ile aynı ölçülerde yapılan SAP2000 modellemesinin üç boyut analiz (Şekil 3.27) ve yayların (Şekil 3.28) görüntülerine aşağıda yer verilmiştir.



Şekil 3.27. Düşey Yüklü Başlıklı Tekil Kazığın SAP2000’de modellenmiş üç boyutlu analiz görüntüsü



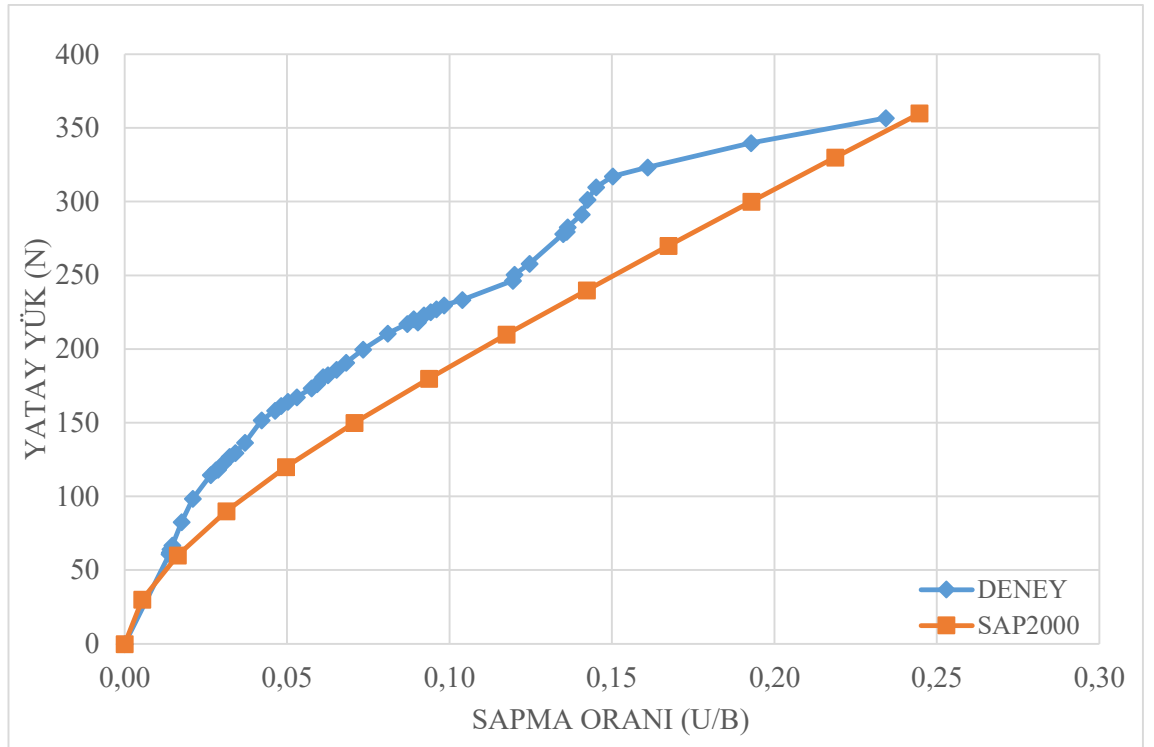
Şekil 3.28. Düşey Yüklü Başlıklı Tekil Kazığın SAP2000’de modellenmiş yayların görüntüsü

Düşey yüklü başlıklı tekil kazık deneysel çalışmasındaki (Ünsever 2015) gibi sabit düşey yüklerle birlikte aynı noktaya (10 N, 20 N, 30 N şeklinde kademeli 10 N artırarak 150 N’a kadar) uygulanan yatay yüklerle SAP2000’de yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçlarıyla; kazıkta oluşan yatay sapma (u) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca 150 N yatay yük altında kazık üzerinde oluşan kesme kuvveti (Q) ve moment (M) değerleri elde edilmiştir.

4.BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Kazıklı Radye Modelinin Yatay Yükleme Altında Deney ve SAP2000 Sonuçları

Kazıklı radye temel deneysel çalışması (Ünsever 2015) sonuçları ve SAP2000’de modellenen kazıklı radye temel analiz sonuçları çeşitli açılardan grafiksel olarak sunulmuştur. Yatay statik yükleme sonucu elde edilen sapma oranları (U/B) Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere deney sonuçları ve SAP2000 analiz sonuçları benzer davranışı göstermektedir ve birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

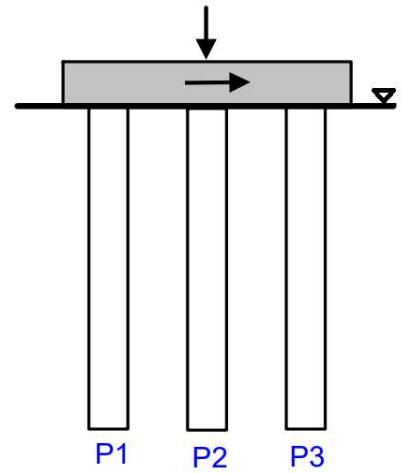
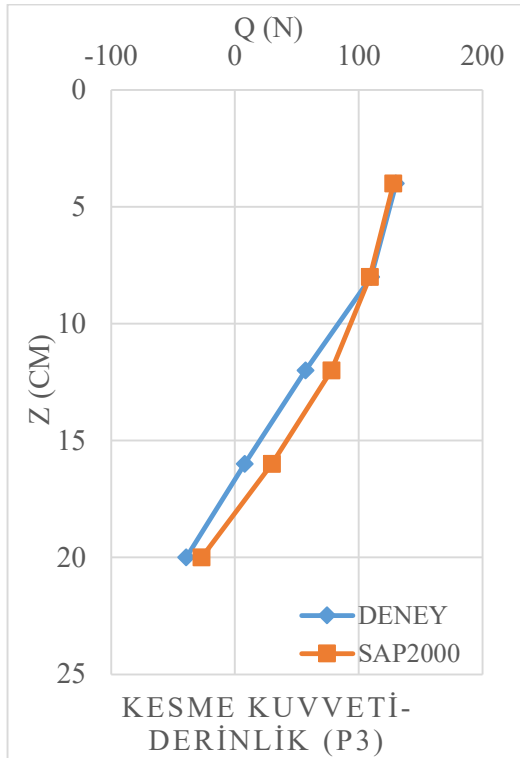
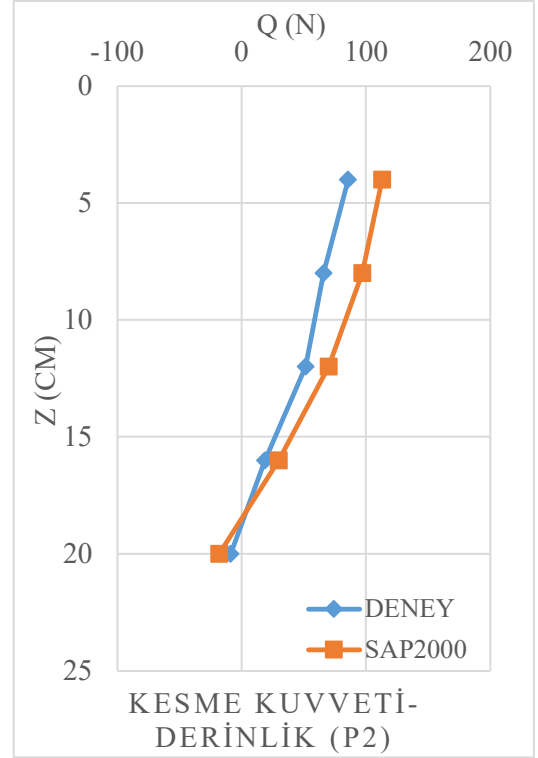
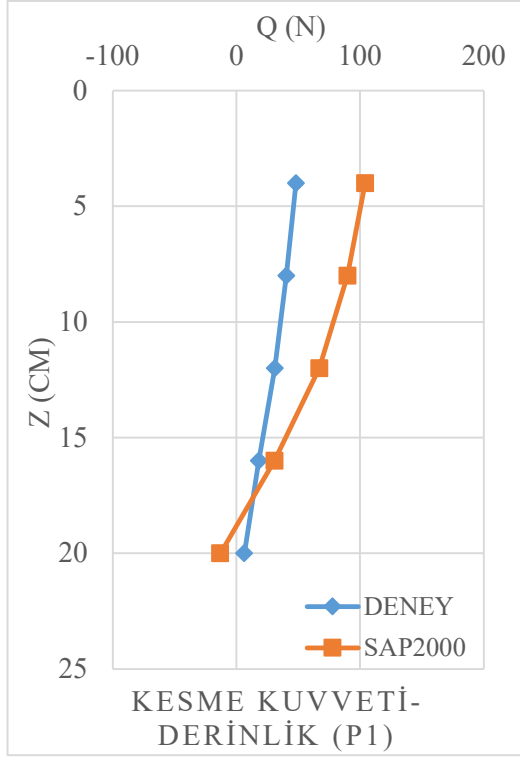


Şekil 4.1. Kazıklı radye modelinin yatay yük – sapma oranı deney ve SAP2000 sonuçları

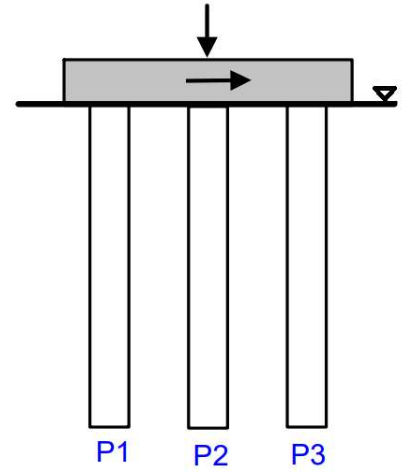
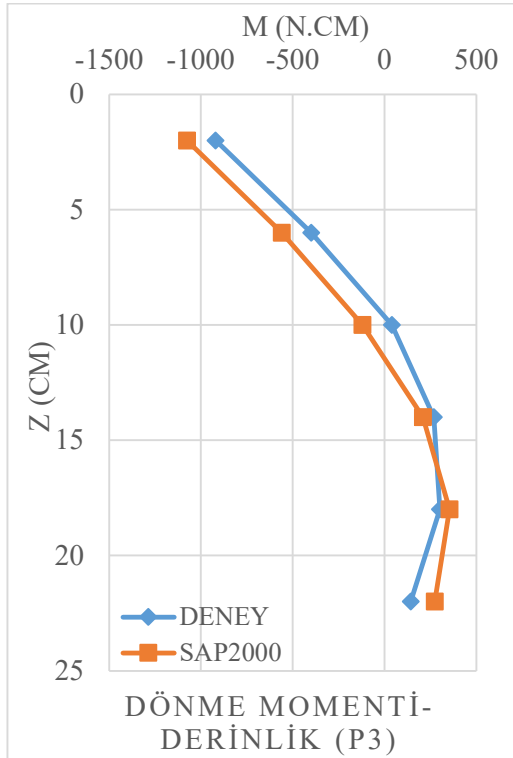
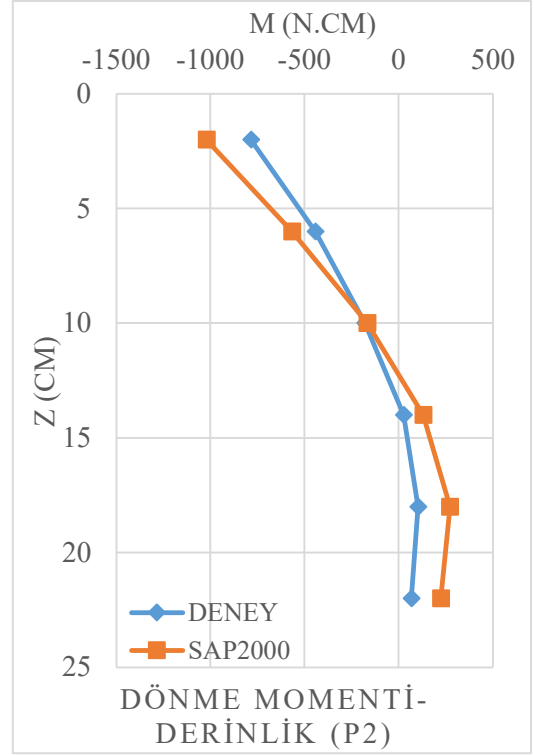
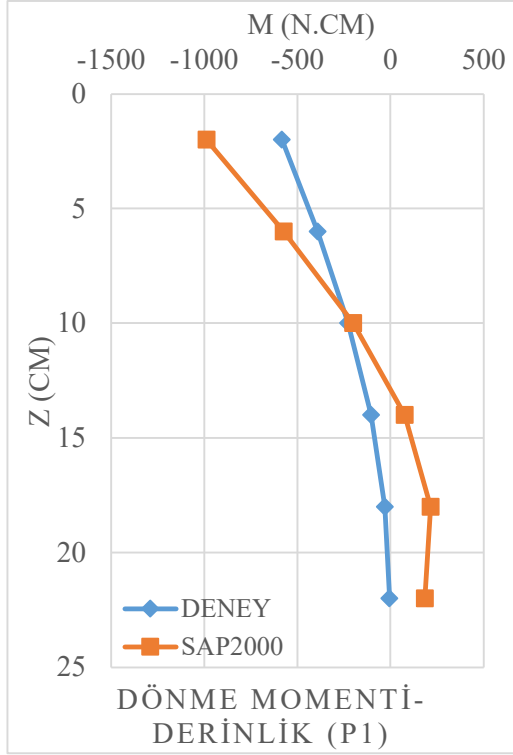
Kazıklı radye modelinin (P1), (P2) ve (P3) kazıkları üzerinde belirli derinlikler oluşan kesme kuvvetlerinin (Q), deneysel ve SAP2000 analiz sonuçları Şekil 4.2’de karşılaştırılmıştır. (P1), (P2) ve (P3) kazıkları üzerinde belirli derinlikler oluşan momentlerin (M) deneysel ve SAP2000 analiz sonuçları Şekil 4.3’te gösterilmiştir.

Kazıklı radyenin TBDY'nin (2018) önerdiği gibi yaylarla modellenen SAP2000 analiz sonuçlarının, deneysel sonuçlara yakın olduğu ve güvenli tarafta kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, grafiklerde görüldüğü üzere en fazla kesme kuvveti P1 kazığına etki etmektedir, P1 kazığına etki eden kuvvetlerde deneysel ve analiz sonuçları arasında bir miktar farklılık olsa da P2 ve P3 kazıklarına etki eden kesme kuvvetleri birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir.

Şekil 4.3'teki grafikler incelendiğinde maksimum momentlerin beklenildiği üzere tüm kazıklar için kazık başlarında olduğu görülmüştür. Bu moment değerleri kazık ucuna doğru sıfıra yaklaşmıştır. Ayrıca, grafikler incelendiğinde analiz sonuçlarının deneysel davranışı modellemekte başarılı olduğu söylenebilir.



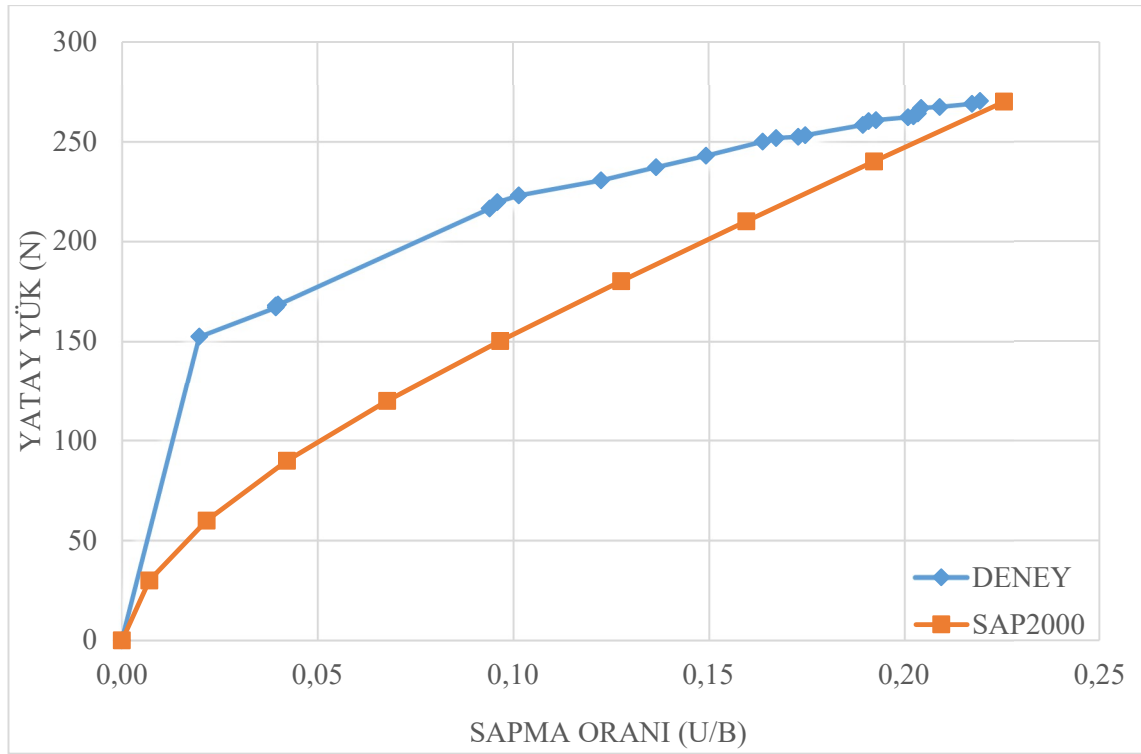
Şekil 4.2. Kazıklı radye modelinde kazıkların kesme kuvvet (Q) – derinlik (z) deney ve SAP2000 sonuçları



Şekil 4.3. Kazıklı radye modelinde kazıkların moment (M) – derinlik (z) deney ve SAP2000 sonuçları

4.2. Kazık Grubu Modelinin Yatay Yükleme Deney Altında ve SAP2000 Sonuçları

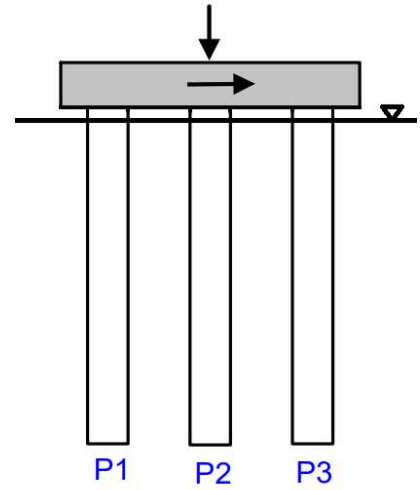
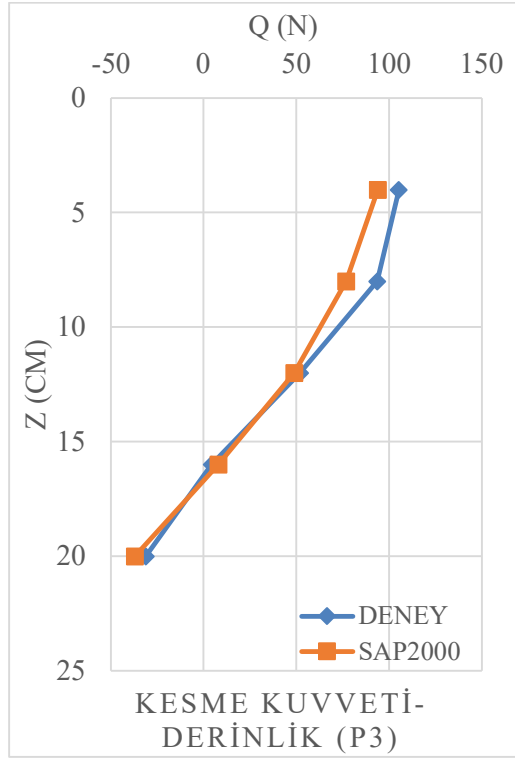
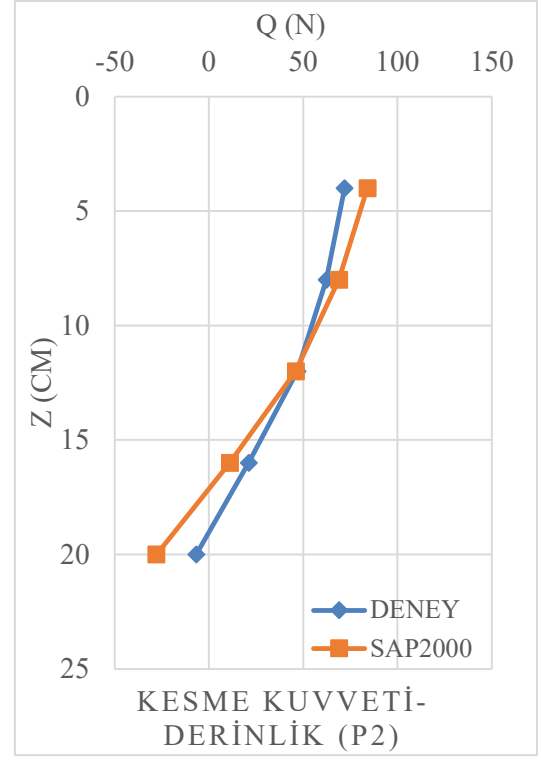
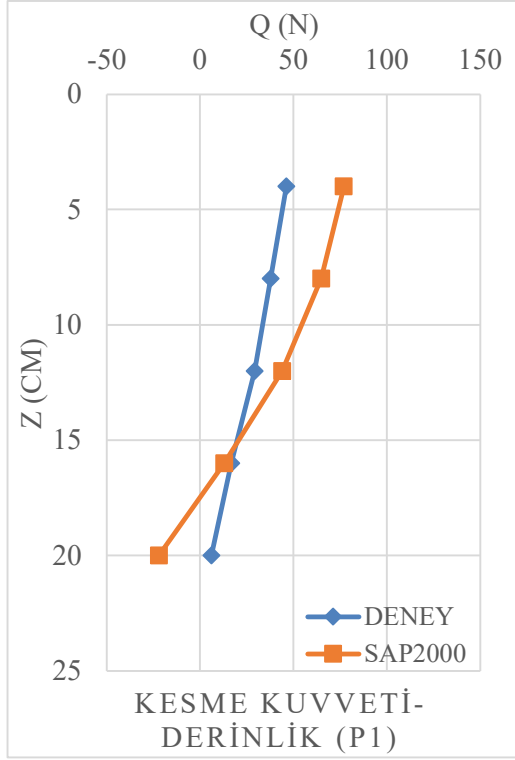
Kazık grubu deneysel çalışması (Ünsever 2015) sonuçları ve SAP2000’de modellenen kazık grubu analiz sonuçları grafik olarak birlikte sunulmuştur. Yatay statik yükleme sonucu elde edilen sapma oranları (U/B) Şekil 4.4’te karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere aynı yük altında kazık grubunun sapma oranı analiz sonuçlarında deneye göre daha büyük tahmin edilmiştir. Bunun nedeni deneyde, radye ile zemin arasındaki boşluğun deney sırasında kapanması ve zemin ile radyenin etkileşimi sebebi ile kazık grubunun olması gerekenden daha az yük taşıması olabilir.



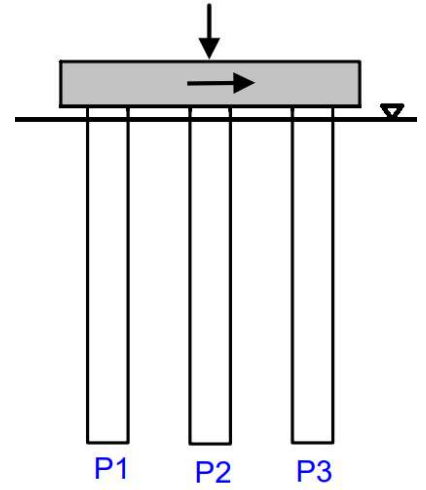
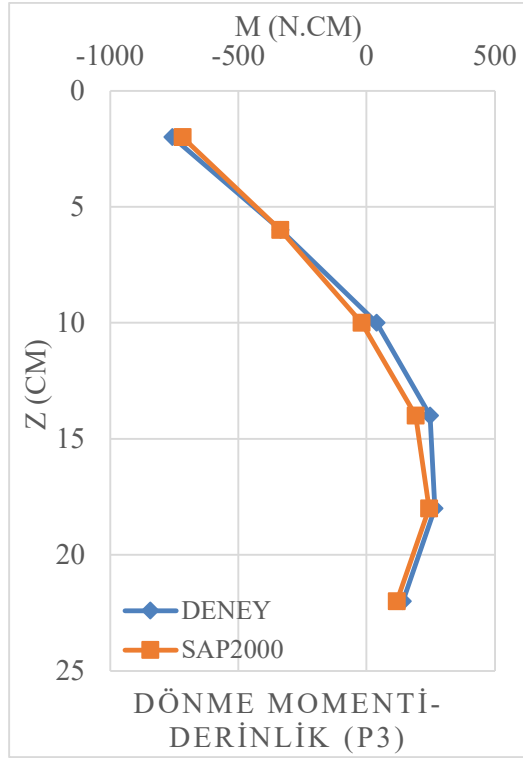
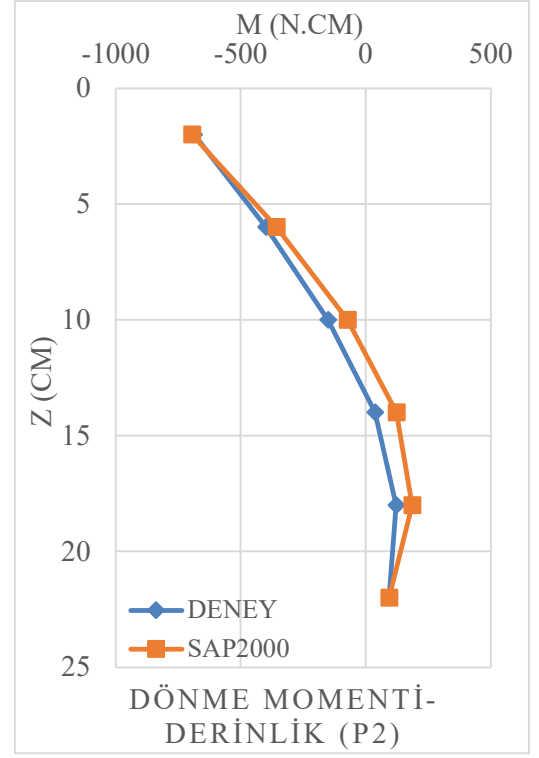
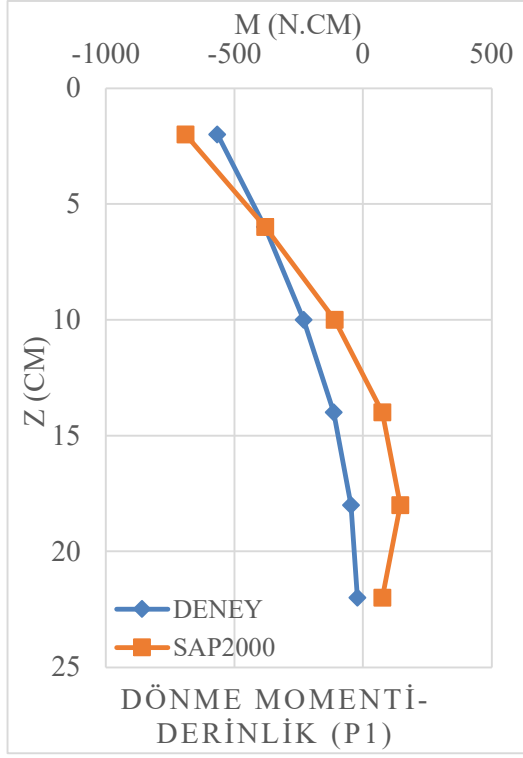
Şekil 4.4. Kazık grubu modelini yatay yük – sapma deney ve SAP2000 sonuçları

Kazık grubu modelinin (P1), (P2) ve (P3) kazıkları üzerinde belirli derinliklerde oluşan kesme kuvvetlerinin (Q), deneysel ve SAP2000 analiz sonuçları Şekil 4.5’te karşılaştırılmıştır. (P1), (P2) ve (P3) kazıkları üzerinde belirli derinlikler oluşan momentlerin (M) deneysel ve SAP2000 analiz sonuçları Şekil 4.6’da karşılaştırılmıştır.

Kazık grubunun TBDY'nin (2018) önerdiği gibi yaylarla modellenen SAP2000 analiz sonuçlarının, deneysel sonuçlara yakın olduğu ve güvenli tarafta kaldığı görülmektedir. Kazıklı radye temel modelinde olduğu gibi, SAP2000 analizi P2 ve P3 kazıklarının kesme kuvvetleri ve moment davranışlarını deneysel sonuçlara oldukça yakın tahmin etmiştir. P1 kazığında ise, analiz sonuçları deneysel davranışı yakalasa da deney sonuçlarından büyük değerler vermiştir. Bunun nedeni daha önce bahsedildiği gibi radye temel ve zemin arasında bırakılan boşluğun deney esnasında kapanması ve radye zemin etkileşimi nedeniyle olabilir. Bu etkileşim, uygulanan yükün bir kısmını radyenin taşımasına ve kazığın öngörülenden daha az yük taşımasına neden olmuş olabilir.



Şekil 4.5. Kazık grubu modelinin kazıkların kesme kuvvet (Q) deney ve SAP2000 sonuçları

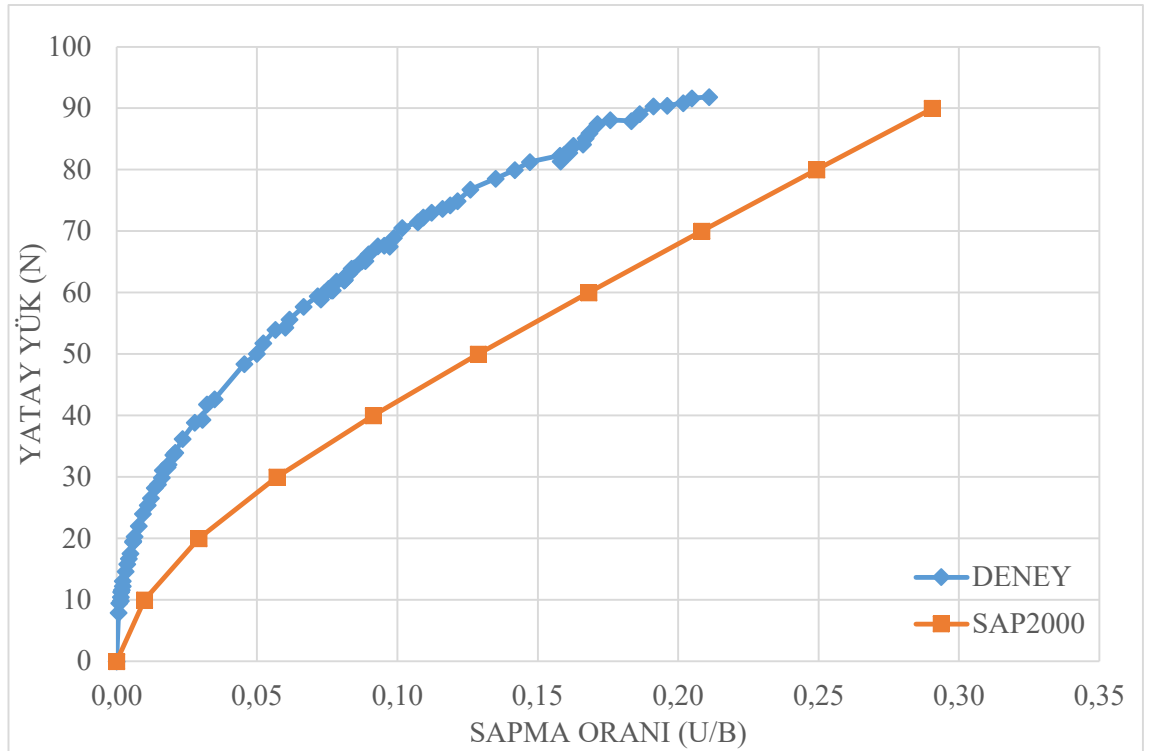


Şekil 4.6. Kazık grubu modelinin kazıkların dönme momenti (M) deney ve SAP2000 sonuçları (Ünsever ve ark. 2013b)

4.3 Düşey Yüksüz Başlıklı Tekil Kazık Modelinin Yatay Yükleme Altında Deney ve SAP2000 Sonuçları

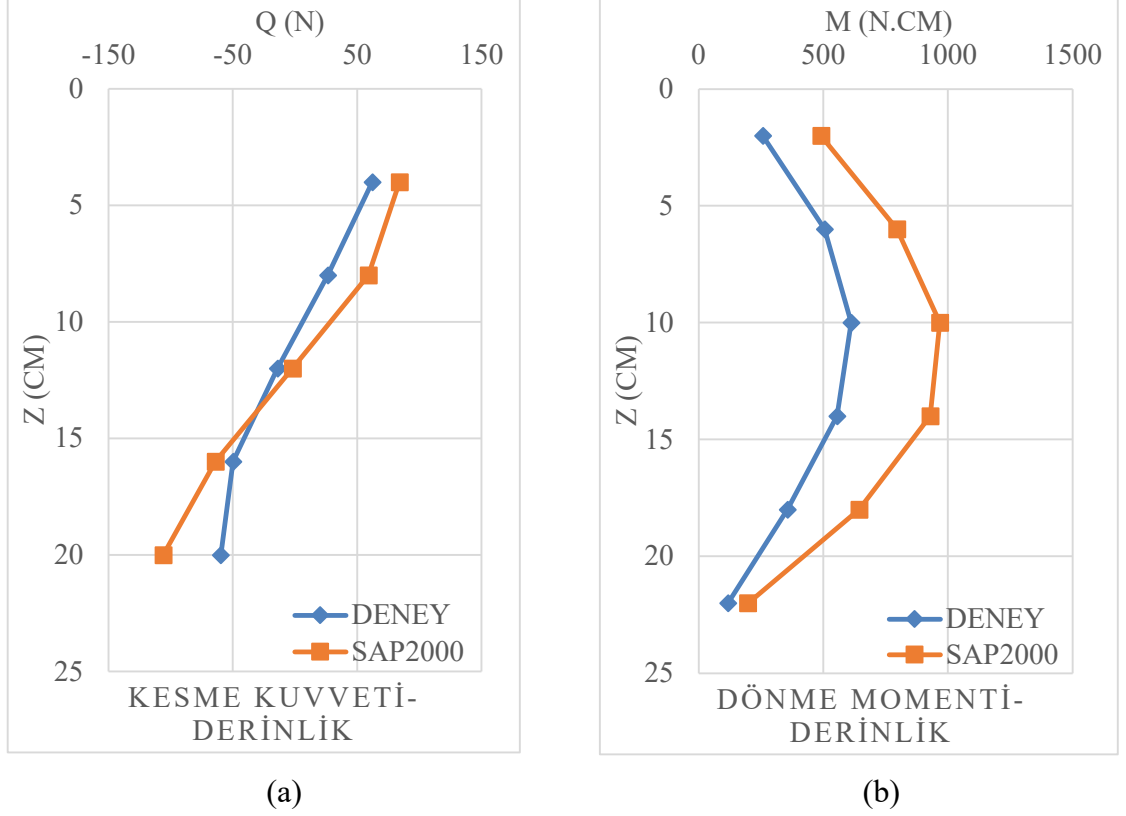
Düşey yüksüz başlıklı tekil kazık deneysel çalışması (Ünsever 2015) sonuçları ve SAP2000’de modellenen düşey yüksüz başlıklı tekil kazık analiz sonuçları birlikte Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de sunulmuştur. Yatay statik yükleme sonucu elde edilen sapma oranları (U/B) Şekil 4.7’de karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.7’ de başlıklı tekil kazığın düşey yüksüz yatay yükleme SAP2000 analiz sonuçlarında, sapma oranının (U/B) deneysel sonuçlardan yaklaşık %37 fazla çıkmasının nedeninin başlığın zemin ile etkileşiminin temsil edilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Düşey yüksüz başlıklı tekil kazık modelinin yatay yük – sapma deney ve SAP2000 sonuçları

Kazık üzerinde belirli derinliklerde oluşan kesme kuvveti (Q), deneysel ve SAP2000 analiz sonuçları Şekil 4.8(a)'da karşılaştırılmıştır. Kazık üzerinde belirli derinliklerde oluşan moment (M) deneysel ve SAP2000 analiz sonuçları Şekil 4.8(b)'de karşılaştırılmıştır.

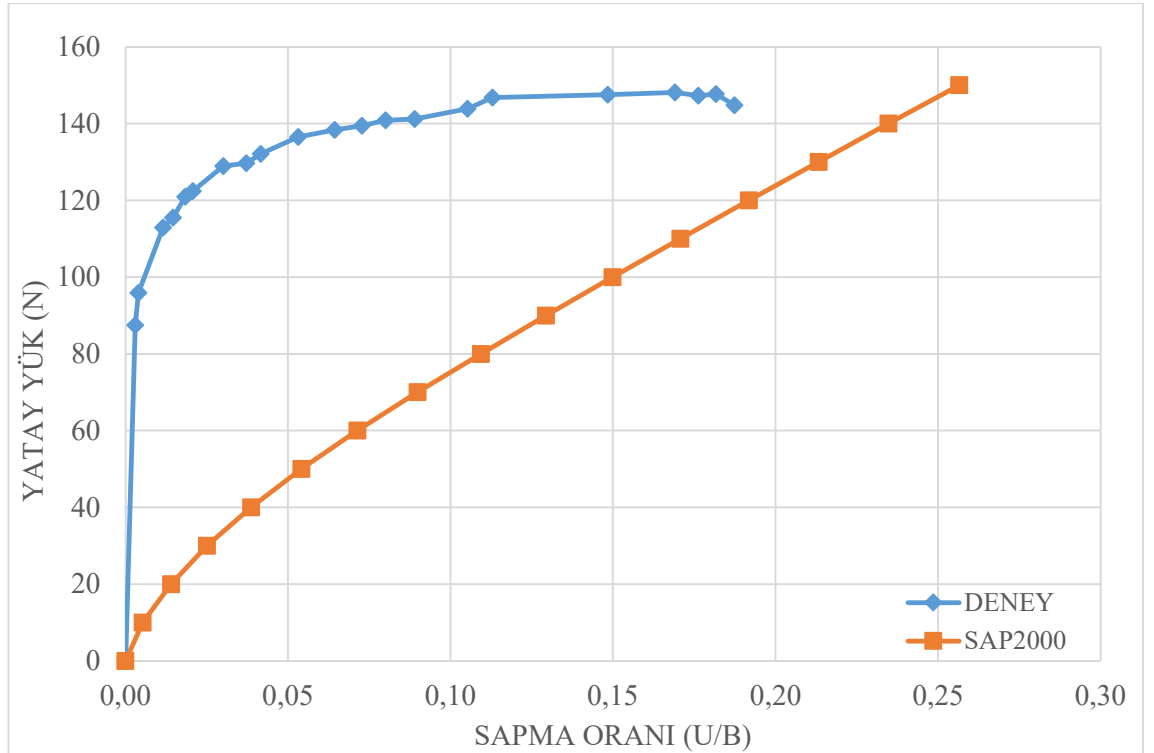


Şekil 4.8. Düşey yüksüz başlıklı tekil kazık modelinin kesme kuvvet (Q) ve dönme momenti (M) deney ve SAP2000 sonuçları

Düşey yüksüz başlıklı tekil kazığının TBDY'nin (2018) önerdiği gibi yaylarla modellenen SAP2000 analiz sonuçlarının, deneysel sonuçlara yakın olduğu ve güvenli tarafta kaldığı görülmektedir. Analiz sonuçları, yatay yüke maruz kalan kazığa etki eden kesme kuvvetlerini ölçüm sonuçlarına oldukça yakın tahmin etmiştir. Kazığa etki eden momentler ise analizlerde olduğundan daha büyük tahmin edilmiştir, bunun nedeninin radye-zemin etkileşimi olduğu düşünülmektedir.

4.4. Düşey Yüklü Başlıklı Tekil Kazık Modelinin Yatay Yükleme Altında Deney ve SAP2000 Sonuçları

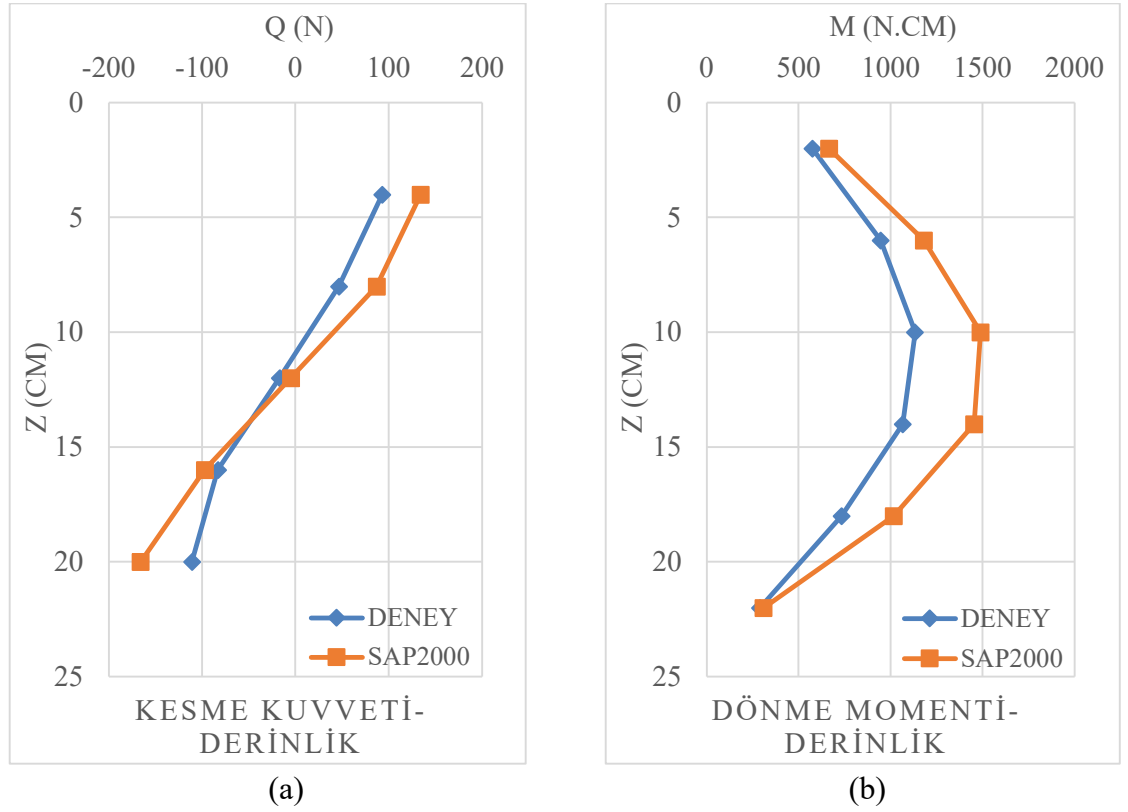
Düşey yüksüz başlıklı tekil kazık deneysel çalışması (Ünsever 2015) sonuçları ve SAP2000’de modellenen düşey yüklü başlıklı tekil kazık analiz sonuçları birlikte Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da sunulmuştur. Yatay statik yükleme sonucu elde edilen sapma oranları (U/B) Şekil 4.9’da karşılaştırılmıştır. Şekil 4.9’da deney sonuçlarında, yaklaşık 100 N yatay yüke kadar herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir, bu seviyeden sonra kazıkta sapma gözlemlenmiş ve yaklaşık 140 N yükten sonra ise kazıkta oluşan sapma artmış taşınan yük ise neredeyse sabit kalmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında, deneysel sonuçların tersine yatay yük-sapma arasında neredeyse lineer bir davranış gözlemlenmiştir. Ayrıca düşey yükün etkisinin görmek için Şekil 4.7 ve Şekil 4.9 karşılaştırıldığında, uygulanan düşey yükün etkisi ile kazığın yatay yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür.



Şekil 4.9. Düşey yüklü başlıklı tekil kazık modelinin yatay yük – sapma deney ve SAP2000 sonuçları

Şekil 4.9' da başlıklı tekil kazığın düşey yüklü yatay yükleme SAP2000 analiz sonuçlarında sapma oranının (U/B), düşey yüksüz tekil kazıkta olduğu gibi deneysel sonuçlardan yaklaşık %38 fazla çıkmasının nedeninin başlığın zemin ile etkileşiminin temsil edilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kazık üzerinde belirli derinliklerde oluşan kesme kuvveti (Q), deneysel ve SAP2000 analiz sonuçları Şekil 4.10(a)'da karşılaştırılmıştır. Kazık üzerinde belirli derinliklerde oluşan moment (M), deneysel ve SAP2000 analiz sonuçları Şekil 4.10(b)'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.10. Düşey yüklü başlıklı tekil kazık modelinin (a) kesme kuvvet (Q) ve (b) dönme momenti (M) deney ve SAP2000 sonuçları

Düşey yüklü başlıklı tekil kazığının TBDY'nin (2018) önerdiği gibi yaylarla modellenen SAP2000 analiz sonuçlarının, deneysel sonuçlara yakın olduğu ve güvenli tarafta kaldığı görülmektedir. Başlıklı tekil kazığa uygulanan düşey yükün etkisiyle taşıma kapasitesi artmış, kazığa etki eden kesme kuvvetleri ve momentlerde de artış görülmüştür. Deney sonuçlarında gözlenen bu artışı, analiz sonuçları başarılı şekilde tahmin edebilmiştir.

5.SONUÇ

Bu çalışmada; kazıklara etkiyen yatay yüklere, yatay yük altındaki kazıkların davranışına ve yatay yüklü kazıkların analiz yöntemlerine etraflıca yer verilmiştir. Yapılan araştırma neticesinde, yatay yüklü kazıkların analiz yöntemleri arasında P-Y yönteminin; kum, kil ve kumlu kil gibi homojen veya tabakalı zeminlerde kullanımına yönelik çeşitli yaklaşımların olduğu görülmüştür. Bununla birlikte P-Y yönteminin; statik ve tekrarlı yatay yük altında kazık-zemin ilişkisinin doğrusal olmayan analizinin daha gerçekçi bir yaklaşım olduğu, bu yöntemin deneysel çalışmalarla doğrulandığı ve birçok ülkenin yönetmeliğinde yer aldığı görülmüştür.

Tez çalışmasında; Ünsever'in (2015) model temeller tasarlayarak model kuru kum zeminde gerçekleştirmiş olduğu yatay yüklü kazıklı temeller deneyler serisi, TBDY'nin (2018) kazıklar için önerdiği; kazığın yatayda zemin ile etkileşimini P-Y yaylarıyla, düşeyde sürtünme direncini T-Z yaylarıyla ve kazık ucundaki direnci ise Q-Z yaylarıyla SAP2000 analiz programında modellenmiştir. Deneysel çalışma ile aynı ölçüler ve aynı yükler altında yapılan analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar mukayese edilmiştir. Yapılan incelemeler sonucu aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır.

Ünsever (2015), kazıklı radye temel ve kazık grubu modelleri ile sabit 497 N'luk düşey yük uygulayarak yatay yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Kazık grubu modelinin düzeneği oluşturulurken, radye etkisini ortadan kaldırmak için zemin yüzeyi ile radye arasına 2 cm boşluk bırakılmıştır. Kazıklı radye temel ve kazık grubu modelleri ile yapılan deney sonuçlarına göre, radyenin yatay yük taşıma kapasitesini yaklaşık %33 arttırdığı tespit edilmiştir, aynı yükler altında analiz yapıldığı için analiz sonuçlarında da aynı davranış gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarında, yatay yüklü kazıklı temellerin ön sıra kazıklarının; moment ve kesme kuvvetine daha fazla maruz kaldığı tespit edilmiştir. Aynı şartlarda SAP2000 ile yapılan analizdeki sonuçlar için de bu yorumların geçerli olduğu ortaya çıkmıştır.

Ünsever (2015), başlıklı tekil kazık temel modeline düşey yüklü ve düşey yüksüz yatay yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmada; yüzeye en yakın noktada yapılan ölçümlerden elde edilen kesme kuvveti değerlerine göre başlıklı tekil kazık temel modelinde, düşey yük olsun ya da olmasın yatay yükün yaklaşık %65'i kazık tarafından taşındığı belirlenmiştir. Fakat SAP2000 modellemesinde başlığın yatay da zemin ile etkileşimi temsil edilemediğinden, aynı noktadaki analiz sonuçlarına göre kazığın yatay yük taşıma oranı yaklaşık %85 olarak hesaplanmıştır. Başlığın zemin ile sürtünme etkileşiminin yatay yük taşıma kapasitesi üzerindeki payının azımsanmayacak kadar etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Düşey yüklü ve düşey yüksüz yatay yükleme deneylerinde belirli noktalarda ölçülen kazık üzerindeki moment, kesme kuvveti ve zemin tepkisi her iki durumda da benzer davranış sergilediği görülmüştür. Düşey yüklü olarak gerçekleştirilen başlıklı tekil kazık modelinde yatay yük taşıma kapasitesinin düşey yüksüz gerçekleştirilen deneye göre %60 daha fazla olduğu görülmüştür. Aynı şartlarda SAP2000 ile yapılan analizdeki sonuçlar için bu yorumların geçerli olduğu ortaya çıkmıştır.

Kum zeminlerde, kazığın yatayda zemin ile etkileşimini P-Y yöntemi ile elde edilen doğrusal olmayan P-Y yaylarıyla temsil edilerek kazığın davranışı SAP2000 programı kullanılarak analiz edilmiştir. SAP2000 analiz sonuçları ile Ünsever 'in (2015) deneysel sonuçları karşılaştırıldığında P-Y yaylarıyla temsil edilerek gerçekleştirilen SAP2000 analiz sonucunun başarılı olduğu görülmüştür. Kum zeminlerde yatay yüklü kazıklı temellerin sapma ve kazık üzerindeki momenti ile kesme kuvveti hesabı için P-Y yöntemi kullanılabilir olduğu ve yatay yüklü kazıklı temellerin sapma ve kazık üzerindeki momenti ile kesme kuvveti hesabı için SAP2000 ile başarılı analizler yapılabilir olduğu ortaya çıkmıştır.

Kuru kum zemin kullanılarak yapılan deneysel çalışma kapsamın kalınarak SAP2000 analizi gerçekleştirilmiştir. Suya doymun kum zemin, kil zemin, killi-kumlu zemin ve tabakalı zemin üzerin yapılan deneysel çalışmaların sonuçları; aynı şartlar altında P-Y yöntemi kullanılarak SAP2000'de modellenip analiz sonuçları kıyaslanmalıdır. Böylece P-Y yöntemi ve SAP2000 programının kullanılabilirliği hakkında fikir geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Akbay, Z. 2009.** Yatay yüklü grup kazıkların analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Anonim, 2018.** Laterally loaded piles.
https://www.rocscience.com/help/rspile/pdf_files/theory/RSPile_Laterally_Loaded_Pile_Theory.pdf - (Erişim tarihi: 12.01.2020).
- API RP 2A-WSD, 2010.** Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms – working stress design. American Petroleum Institute, 21st Edition, Errata and Supplement.
- Birand, A. 2007.** Kazıklı temeller. ODTÜ Yayınları, Ankara, 540 s.
- Bowman, E.R. 1958.** Investigation of the lateral resistance to movement of a plate in cohesionless soil. Thesis, University of Texas, Austin.
- Brinch Hansen, J. 1961.** The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces. Danish Geotechnical Institute (Geoteknisk Institut), (12): 5-9.
- Broms, B. 1964a.** The lateral resistance of piles in cohesive soils. *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 90, (SM2): 27-63.
- Broms, B. 1964b.** The lateral resistance of piles in cohesionless soils. *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 90, (SM3): 123-156.
- Broms, Bengt B. 1965.** Design of laterally loaded piles. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 91, (SM3): 79-99
- Coduto, D.P. 2001.** Foundation design: principles and practices, second edition. Prentice Hall, Upper Saddle River NJ, 885 pp
- Das, B.M. 1990.** Principles of foundation engineering. PWS-Kent Series in Engineering, Boston, 815 pp.
- Davis, E.H. ve Poulos, H.G. 1972.** The analysis of piled raft systems. *Aust. Geomechs. J.*, G2: 21-27.
- Davisson, M. T. 1970.** Lateral load capacity of piles. Highway Research Record. Washington, DC: 104-112.
- Davisson, M. T. ve Prakash, S. 1963.** A review of soil pile behavior. Highway Research Record, No. 39: 25-48.
- Douglas, D.J. ve Davis, E.H. 1964.** The movement of buried footings due to moment and horizontal load and the movement of anchor plates. *Geotechnique*, 14, (2): 115-132.
- Heteyni, M. 1946.** Beams on elastic foundation. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan
- Hooper, J.A. 1973.** Observations on the Behaviour of a piled-raft foundation on London clay. *Proc. Inst. Civ. Engrs.*, 55(2): 855-877
- Kawamori, M., Unsever, Y.S., Matsumoto, T., Kobayashi, S., Shimono, S. 2013.** Cyclic horizontal load experiments on model pile foundations in dry sand part1: experiment description. 48th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Toyama, Japan.
- Livaoglu, R. ve Doğangün, A. 2002.** Deprem yönetmeliklerinde verilen zemin sınıflarına göre yapı davranışlarının karşılaştırılması olarak incelenmesi. ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, ODTÜ, Ankara
- Matlock, H. ve Reese, L. C. 1960.** Generalized solution for laterally loaded piles. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 86, (SM5): 63-91

- Matlock, H. 1970.** Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the II Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, (OTC 1204): 577-594.
- McClelland, B ve FOCHT, J. JR. 1958.** Soil modulus for laterally loaded piles. *Transactions of ASCE*, 123, (2954): 1049-1086
- O'Neill, M.W. ve Murchinson, J.M. 1983.** An evaluation of p-y relationships in sands. Research Rep. No.GT-DF02-83, Dept. Of Civil Engineering, Univ. of Houston, Houston.
- Palmer, D.J., ve Thompson, J.B. 1948.** The earth pressure and deflection along the embedded lengths of piles subjected to lateral thrusts. Proc. 2nd. Int. Conference of Soil Mechanics and Found. Engineering, Rotterdam, 5: 156-161.
- Peck, R. B., Hanson, W., Thornburn, T. 1974.** Foundation engineering, 2nd ed. John Wiley, New York, 530 pp.
- Poulos, H. G. 1971a.** Behavior of Laterally loaded piles: I-single piles. *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 97, (SM5): 711-731.
- Poulos, H. G. 1971b.** Behavior of laterally loaded piles: II-pile groups. *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 97, (SM5): 733-751.
- Poulos, H.G. ve Davis, E.H. 1980.** Pile foundation analysis and design. Wiley, New York, 397 pp.
- Prakash, S., Sharma, H.D. 1989.** Pile foundations in engineering practice. John Wiley&Sons Inc., New York, 784 pp.
- Reese, L.C., ve Matlock, H. 1956.** Non-dimensional solutions for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth. Proceedings 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Austin, Texas: 1-41.
- Reese, L.C., Cox, W.R., Koop, F.D. 1974.** Analysis of laterally loaded piles in sand. Proceeding of the 6th Off-Shore Technology, Copy Paper No. TC208A.
- Reese L. C., Cox W.R. 1969.** Soil behavior from analysis of tests of uninstrumented piles under lateral loading. Proceedings, Seventy-first Annual Meeting, American Society for Testing and Materials, San Francisco, California: 161-176
- Reese, L. C., and Welch, R.C. 1975.** Lateral loading of deep foundations in stiff clay. *Journal of Geotechnical Engineering –ASCE*, 101, (GT7): 633-649.
- Reese, L.C. ve W.F. Van Impe 2011.** Single piles and pile groups under lateral loading. 2nd Edition. Taylor & Francis Group. London, 510 pp.
- Rollins, K.M., Gerber, T.M., Lane, J.D., Ashford, S.A. 2005a.** Lateral resistance of a full-scale pile group in liquefied sand. *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE*. (131): 115-125.
- SAP2000, Ver 20.2, 2018.** Integrated finite element analysis and design of structures. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- TBDY, 2018.** Türkiye bina deprem yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı. Resmî Gazete, Sayı:30364, Ankara
- Terzaghi, K. ve R.B. Peck 1948.** Soil mechanics in engineering practice. Wiley, New York, 468 pp.
- Terzaghi, K. 1955.** Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Geotechnique*. 01.5, (4): 297-326
- Uysal, H. 2014.** Kazıklı radyejeneral temellerin yanal yük altında davranışının belirlenmesi. *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

- Ünsever Y.S., Kawamori M, Matsumoto T, and Shimono S. 2013.** Cyclic horizontal load tests of single pile, pile group and piled raft in model dry sand. Proc. of 18th Southeast Asian Geotechnical & Inaugural AGSSEA Conference, Singapore: 891-896.
- Ünsever, Y.S., Kawamori, M., Matsumoto, T., Kobayashi, S., Shimono, S. 2013** Cyclic horizontal load experiments on model pile foundations in dry sand part 2: experimental results. 48th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Toyama, Japan.
- Ünsever Y.S., Matsumoto T, Shimono S, Özkan M. Y. 2014.** Static cyclic load tests on model foundations in dry sand. *Geotech. Eng. Journal of SEAGS & AGSSEA*, 2014, 45 (2): 40-51.
- Ünsever, Y.S. 2015.** An experimental study on static and dynamic behaviour of model pile foundations. *Doktora Tezi*, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Zeevaert, L. 1957.** Compensated friction-pile foundation to reduce the settlement of buildings on highly compressible volcanic clay of Mexico City. Proc. 4 ICSMFE, London.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdullah ERDOĞAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Diyarbakır – 31/10/1990
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Yeni Diyarbakır Anadolu Lisesi
Lisans : Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : (2014 – halen) Özel Sektör İnşaat Firması

İletişim (e-posta) : abduherdogan034@gmail.com