

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

79174

KAZIKLI RADYELERİN NÜMERİK ANALİZİ

İnş.Müh.Efkan SOLMAZ

**F.B.E.İnşaat Anabilim Dalı Geoteknik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

79174

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet M. BERİLGİN

Prof. Dr. Kutay ÖZANDIN
Kutay Ozandin

M. Berilgin

Prof. Dr. Metin İNCEGİL
Ufke Incegil

İSTANBUL, 1998

12.08.1996 NIN ANISINA

12.08.1996

12.08.1996



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iii
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜRDE KAZIK ve KAZIK GRUBU TEORİSİ	3
2.1 Analiz ve Tasarım Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	3
2.2 Eksenel Yüklü Kazıkların Analiz Yöntemleri.....	4
2.3 Teorik Gelişmeler.....	9
2.3.1 Zemin profilinin modellenmesi.....	9
2.3.2 Zemin davranışının modellenmesi.....	11
2.3.3 Kazık karakteristikleri.....	13
2.3.4 Kazık grupları.....	13
2.3.5 Yükleme durumları.....	14
2.4 Son Yıllarda Yapılan Çalışmalar.....	15
3. KAZIKLI RADYELERİN NÜMERİK ANALİZİ.....	20
3.1 Nümerik Yöntemler.....	20
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	21
3.2.1 Yöntemin genel tanımlaması.....	22
3.3 LUSAS Programı.....	29
4. TEK KAZIK İÇİN YAPILAN NÜMERİK ÇALIŞMALAR.....	31
4.1 Eleman Tipinin Belirlenmesi.....	31
4.2 Tek Kazık İçin Kullanılan Sonlu Eleman Modelleri.....	32
4.3 Tek Kazık Analiz Sonuçları.....	40
5. KAZIKLI RADYE İÇİN YAPILAN NÜMERİK ÇALIŞMALAR.....	67
5.1 Kullanılan Eleman Tipleri.....	67
5.2 Kullanılan Parametreler.....	67
5.3 Kazıklı Radye İçin Kullanılan Sonlu Eleman Modelleri.....	68
5.4 Kazıklı Radye Analizi Sonuçları.....	68
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	81

SİMGE LİSTESİ

A_p	Kazık kesit alanı
B	Radye genişliği
c_u	Zeminin drenajsız kayma dayanımı
c_v	Konsolidasyon katsayısı
d	Kazık çapı
d_j	j kazık elemanın çapı
D_f	Yüzey dayanımı için çevrimli yükleme faktörü
D_R	Yükleme hız faktörü
E_s	Zemin elastisite modülü
E_r	Radye elastisite modülü
E_{si}	i noktasındaki zeminin elastisite modülü
E_{sj}	j noktasındaki zeminin elastisite modülü
E_{tan}	Zemin için tanjant elastisite modülü
E_t	Zemin için başlangıç tanjant elastisite modülü
E_p	Kazık elastisite modülü
E_b	Kazık ucu bölgesi zemin elastisite modülü
f_s	Kazık çevre direnci
f_b	Kazık uç direnci
f_c	Basınç için kazık-zemin limit gerilmesi
f_t	Çekme için kazık-zemin limit gerilmesi
f_{ti}	i elemanındaki çekme durumu için limit gerilme
f_{ci}	i elemanındaki basınç durumu için limit gerilme
h	Modellenen ortamın derinliği
I_{ij}	j elemanı nedeni ile i elemanı için deplasman faktörü
I_q	Kazık oturma katsayısı
I_G	Grup oturma katsayısı
k_{sij}	j elemanı nedeni ile i elemanı için zemin rijitliği
k_s	Zemin yerel rijitliği
K_r	Eşdeğer radye rijitliği
K_{rs}	Eşdeğer radye rijitliği
K	Relatif kazık rijitliği
L_r	Radye boyu
L_c	Kritik kazık boyu
L	Kazık boyu
m	Kazıktaki eleman sayısı
n	Gruptaki kazık sayısı
N	SPT darbe sayısı
N_q	Taşıma gücü faktörü
P_i	Yük artımından önce varolan kazık-zemin etkileşim gerilmesi
P	Kazık-zemin gerilmesi
P_f	Nihai kazık-zemin gerilmesi
P_u	Nihai kazık yükü
$P_{uç}$	Kazık uç gerilmesi
$P_{ç}$	Kazık çevre gerilmesi

P_r	Radyenin taşıdığı yük
q_c	Koni direnci
R_s	Kazık grupları için grup oturma oranı
R_{ci}	Grup azaltma faktörü
R_f	Hiperbolik eğri yerleştirme sabiti
s	Kazıklar arası mesafe
S_1	Kazığın kendi yükü altındaki oturması
S_i	Ani kazık oturması
S_{TF}	Nihai kazık oturması
S_{elas}	Elastik kazık oturması
S_x, S_y, S_z	Deviyatör gerilme invaryantları
t	Zaman
T_x, T_y, T_z	Yüzey kuvvetleri
T_v	Boyutsuz zaman katsayısı
X, Y, Z	Kütle kuvvetleri

$[B]$	Deformasyon matrisi
$[c]$	Bünye matrisi
$[D_e]$	Elastik bünye matrisi
$[K]$	Sistem rijitlik matrisi
$[k]$	Eleman rijitlik matrisi
$[N]$	Şekil fonksiyonları matrisi
$[Q]$	Yük matrisi
$\{\Delta Q_n\}$	Artan düğüm yükleri vektörü
$\{I\}$	Birim vektör
$\{I_p\}$	Tesir faktörleri vektörü
$\{q\}$	Eleman deplasmanları vektörü
$\{Q_e\}$	Düğüm yükleri vektörü
$\{T\}$	Yüzey kuvvetleri vektörü
$\{u\}$	Yer değiştirme vektörü
$\{X\}$	Bünye kuvvetleri vektörü
$\{\epsilon\}$	Şekil değiştirme vektörü
$\{\rho\}$	Yer değiştirme vektörü
$\{\sigma\}$	Gerilme vektörü

ΔS	Eşdeğer yüklü iki kazıktan birinin diğeri üzerinde yarattığı oturma artımı
ΔP	Eksenel kazık yükü değişimi
ΔS_e	Serbest zemin hareketlerinden oluşan oturma
$\Delta \rho_{si}$	Kazık yükünden dolayı zeminde oluşan deplasman artımı
$\Delta \rho_j$	Kazık-zemin etkileşim gerilmelerindeki artım
$\delta \rho_i$	i elemanındaki artımsal kazık-zemin gerilmesi
λ	Derecelendirme hız parametresi
α	İkili kazık grubunda kazık-kazık etkileşim faktörü
α_{rp}	Radyede kazık grubunun etki faktörü,
α_{pr}	Kazık grubu üzerinde radyenin etki faktörü

ν_r	Radye Poisson oranı
ν_s	Zeminin Poisson oranı
ν'_s	Zeminin drenajlı Poisson oranı
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı
γ'	Efektif zemin birim hacim ağırlığı
π	Lineer elastik ortam için potansiyel enerji
σ_v'	Düşey efektif gerilme
ρ	Kazık oturması



KISALTMA LİSTESİ

BEM	Boundry element method
FEM	Finite element method
LUSAS	London University Structural Analysis System
SPT	Standart penetration test
CPT	Cone penetration test



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Eksenel yüklü tek kazığın temel problemi: (a)geometri ; (b)kazık elemanlarındaki yer alan gerilmeler ; (c)zemin elemanlarında yer alan gerilmeler ; (d)derinlikle serbest zemin hareketlerinin dağılımı ; (f)limit kazık-zemin gerilmelerinin dağılımı (Poulos, 1989).....	7
Şekil 2.2 Temel analizler ve daha gerçekçi modelleme için izin verilen büyümeler (Poulos, 1989).....	11
Şekil 2.3 Kazıklı radyenin nümerik sunumu (Clancy ve Randolph, 1993).....	17
Şekil 2.4 Tek kazıklı radye için hesaplanan değerler, $K_{rs}=10$ (Clancy ve Randolph, 1993).....	18
Şekil 2.5 Kazıklar tarafından taşınan yükün hesaplarına ait çözümlemelerin karşılaştırılması (Poulos, 1994)	19
Şekil 3.1 Nümerik analiz yöntemleri (Desai, 1977).....	21
Şekil 4.1 Model 1' de kullanılan sonlu eleman modeli.....	34
Şekil 4.2 Model 2 ' de kullanılan sonlu eleman modeli.....	35
Şekil 4.3 Model 3 ' te kullanılan sonlu eleman modeli.....	36
Şekil 4.4 Model 1 için yapılmış olan yüklemelerin gösterimi.....	37
Şekil 4.5 Model 1 için kullanılan sınır şartlarının gösterimi.....	38
Şekil 4.6 Model 1' de yükleme sonrası deplasman vektörleri.....	39
Şekil 4.7 Tek kazıktaki derinlikle düşey gerilme dağılımının uç taşıma zemini rijitliği ile olan değişimi.....	40
Şekil 4.8 Kazık boyunca düşey gerilmenin derinlikle değişimi.....	41
Şekil 4.9 Tek kazıkta düşey gerilme dağılımının relatif kazık rijitliği ile olan ilişkisi ($E_b/E_s=10$, $L/d=10$)	42
Şekil 4.10 Tek kazıkta düşey gerilme dağılımının relatif kazık rijitliği ile olan ilişkisi ($E_b / E_s =10$, $L/d=20$).....	43
Şekil 4.11 Tek kazıkta düşey gerilme dağılımının relatif kazık rijitliği ile olan ilişkisi ($E_b / E_s =10$, $L/d=40$)	43
Şekil 4.12 Tek kazıkta uç taşıma gücünün bütün parametrelerin ışığında değerlendirilmesi.....	44
Şekil 4.13 $L/d=10$ için kazık boyunca düşey gerilme değişimi.....	45
Şekil 4.14 $L/d=20$ için kazık boyunca düşey gerilme değişimi.....	46
Şekil 4.15 $L/d=40$ için kazık boyunca düşey gerilme değişimi.....	47
Şekil 4.16 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=10$, $E_b/E_s=1$).....	48
Şekil 4.17 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=10$, $E_b/E_s=10$).....	49
Şekil 4.18 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=10$, $E_b/E_s=100$).....	50
Şekil 4.19 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=20$, $E_b/E_s=1$).....	51
Şekil 4.20 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=20$, $E_b/E_s=10$).....	52

Şekil 4.21	Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=20$, $E_b/E_s=100$).....	53
Şekil 4.22	Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=40$, $E_b/E_s=1$).....	54
Şekil 4.23	23 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=40$, $E_b/E_s=10$).....	55
Şekil 4.24	Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=40$, $E_b/E_s=100$).....	56
Şekil 5.1	Model 1' de kullanılan sonlu eleman modeli.....	61
Şekil 5.2	Model 2' de kullanılan sonlu eleman modeli.....	62
Şekil 5.3	Model 3' de kullanılan sonlu eleman modeli.....	63
Şekil 5.4	Model 1 için yapılmış olan yüklemelerin gösterimi.....	64
Şekil 5.5	Model 1 için kullanılan sınır şartlarının gösterimi.....	65
Şekil 5.6	Model 1' de yükleme sonrası deplasman vektörleri.....	66
Şekil 5.7	Sonlu eleman modelinde kazık detayı.....	67
Şekil 5.8	Kazıklı radyede uç zemini rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki ($L/d=10$)	68
Şekil 5.9	Kazıklı radyede uç zemini rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki ($L/d=20$)	69
Şekil 5.10	Kazıklı radyede uç zemini rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki ($L/d=40$)	69
Şekil 5.11	Kazıklı radyede uç zemini rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki (bütün parametreler için)	70
Şekil 5.12	Eşdeğer radye rijitliği ile kazık radye taşıma gücü arasındaki ilişki... ..	70
Şekil 5.13	Relatif kazık rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki.....	71
Şekil 5.14	Deplasman etki faktörünün kazık ucu zemin rijitliği ile değişimi.....	71

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Analiz/tasarım yöntemlerinin sınıfları (Poulos,1989).....	5
Çizelge 2.2 Eksenel kazık davranışının değerlendirilmesi için metotların sınıflandırılmasına örnekler (Poulos,1989).....	6
Çizelge 3.1 Sonlu elemanlar yönteminin mühendislik uygulaması (Desai, 1972).....	23
Çizelge 4.1 Tek kazık için uygun modelin seçimi.....	31
Çizelge 4.2 Tek kazık için yapılmış olan parametrik çözümlerin listesi.....	33



ÖNSÖZ

Son yıllarda kazıklar üzerinde yapılan gerek teorik gerek deneysel çalışmalar sonucu kazık ve kazıklı radyelerde kazık/zemin/radye etkileşiminde önemli bulgular elde olunmuştur. Bu çalışmada oldukça geniş kullanım alanına sahip olan kazıklı radyeler hakkında bir çok parametrik çözüm yapılarak sistemin yük aktarma mekanizması açıklanmaya çalışılmıştır. Alışagelmiş kazıklı radye hesaplarında gözönüne alınmayan radyenin sistemin toplam taşıma gücüne katkısı bu çalışmada gözönüne alınmış ve toplam taşıma gücünde radye ve kazığın payı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çözümlerlerin sonucunda elde olunan bulgular ışığında kazıklar ve kazıklı radyelerin içinde yer aldığı zemin malzemesinin elastik sınırlar içinde kaldığı durumlardaki davranışı açıklanmıştır.

Bölüm 1'de çalışmanın amacı belirtildikten sonra Bölüm 2'de kazık ve kazık grubu teorisi hakkında bilgiler verilmeye çalışılmıştır. Bu bölümde ayrıca günümüze kadar kazıklı radyelerle ilgili nümerik çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 3'te analizlerde kullanılan sonlu elemanlar yönteminin işleyişi hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 4 ve 5'te tek kazık ve kazıklı radye için yapılan çalışmaların grafikler halinde sonuçları verilmiştir. Bölüm 6'da ise bu çalışmada bulunan sonuçlar verilerek öneriler yapılmıştır.

Yukarıda kısaca anlatılan bu tezin gerçekleşmesinde emeği geçen hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlara, yüksek lisans öğrenimim öncesinde ve sırasında yüksek sabır gösterip maddi ve manevi desteklerini hiç bir zaman esirgemeyen Cahide ve Gürkan SOLMAZ'a, sevgili aileme ve sevgili Fatma TUNÇER'e çok teşekkür ederim.

ÖZET

Bu tezin amacı günümüzde kazıklı radyelerin analizleri sırasında göz ardı edilen zemin radye etkileşimini incelemektir. Zemin radye etkileşimini incelemek üzere nümerik çalışmalar yapılmıştır. Nümerik yöntem olarak son yıllarda en çok kullanıma sahip ve en güçlü olan sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır. Çalışmalarda kazıklı radye analizlerinden önce tek kazık üzerinde bir takım parametrik analizler yapılmıştır. Bunun için lineer elastik ve homojen bir zemin ortamında yer alan tek bir kazık için toplam gerilme analizleri yapılmıştır. Tek kazıkla ilgili çözümlemelerden sonra kazıklı radye için aynı parametreler kullanılarak çözümlemeler tekrarlanmıştır. Yapılan tüm nümerik çözümlemelerde LUSAS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu nümerik çözümlemeler neticesinde tek kazık ve kazıklı radye sistemlerinde kullanılan parametrelere bağlı olarak çeşitli grafikler çizilmiştir. Bu çizilen grafiklerde kazık-zemin-radye arasındaki yük taşıma oranları verilmiştir. Kazıklı radyelerdeki radye zemin etkileşimini açıklamak istediğimiz bu çalışmada belirli relatif kazık boyu, rijitliği ve kazık ucu zemin rijitliklerinde küçümsenmeyecek oranda radye altı zemin basınçları olduğu gözlemlenmiştir.

ABSTRACT

The main goal of this thesis work was to investigate the interaction between the piled raft foundation and underlying soil which is often disregarded in the conventional design procedures. Numerical studies are carried out utilizing the finite element method to investigate the raft/soil interaction. Prior to raft/soil interaction analysis, some parametric studies are carried out on the behaviour of a single pile. Assuming a linearly elastic and homogeneous soil medium, total stress analysis is performed for a single pile. After obtaining the solutions for a single pile, the analysis of the piled raft foundation is performed using the same parameters. All the numerical analysis is carried out using a computer code named LUSAS. The results of numerical analysis for a single and piled raft foundation are presented in graphical form showing the effects of various parameters. In these figures, the load ratios between pile-soil-raft are presented. The results of this investigation have shown that for particular pile length and pile tip rigidities, considerable soil pressures might be created at the soil underneath the raft foundation.



1. GİRİŞ

Üst yapı yüklerini kısmen veya tamamen zemin yüzünden daha derinlerdeki tabakalara aktaran temel sistemleri derin temeller olarak nitelendirilmektedir. Derin temellerden birini de kazıklı temeller oluşturmaktadır. Kazıklı temeller çelik, beton ve/veya ahşaptan imal edilmektedir. Bu imal edilen kazıklar üzerine üst yapı yüklerini aktarmak amacı ile radye denilen betonarme plaklar inşa edilmektedir. Kazıklı radye denilen bu sistemlerde yük aktarma mekanizması oldukça karmaşık olduğundan son yıllarda özellikle bilgisayarların yaygınlaşmasına paralel olarak konunun aydınlığa kavuşması için bir çok deneysel ve teorik çalışma yapılmaktadır.

Bu çalışmada kazıklı radyelerin yük aktarma mekanizmaları yani kazık/zemin radye/zemin etkileşimleri nümerik modeller ile araştırılmıştır. Kazıklı radyedeki etkileşimlerin incelenmesine geçmeden önce tek kazık üzerinde nümerik çözümler yapılmıştır. İki boyutlu elastik homojen zemin ortamındaki eksenel basınca maruz tek kazıkta yük aktarma mekanizmasını incelemek için toplam gerilmeler açısından bir takım parametrik çalışmalar yapılmıştır. Bu çözümler ile tek kazıktaki yük aktarma mekanizması relatif kazık rijitliği, relatif kazık boyu ve kazık ucu zemin rijitliği açısından incelenmiş ve bu parametreler arası değişim grafiklerle verilmiştir. Daha sonra 2x2' lik bir kazıklı radye üzerinde benzer parametrelerle bir grup sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Bu analizler sonucu radye/zemin etkileşimleri ile ilgili veriler relatif kazık rijitliği, relatif kazık boyu, kazık ucu zemin rijitliği ve eşdeğer radye rijitliği açısından grafiklerde gösterilmiştir.

Yukarıda belirtilen çalışmaların yapıldığı tezin yapılanması ise şu şekilde olmaktadır:

Bölüm 2'de kazık ve kazık grubu teori ile ilgili genel bir açıklama yapılmış literatürde yer alan analiz yöntemlerinden, parametre seçiminden, kazık yüklerinden ve kazık hesabında nasıl bir yöntem izleneceğinden bahs olunmuştur. Bununla birlikte bu bölümde literatürde kazıklı radyelerdeki etkileşimlerle ilgili yer alan çalışmaların bir karşılaştırılması yapılmıştır. Bölüm 3'de ise kazıklı radyelerin analizinde kullanılan nümerik yöntemlerden bahs olunmuş ve nümerik bir yöntem olan sonlu elemanlar yönteminin işleyişi ve genel matematiksel ifadesi verilmiştir. Bölüm 4'de tek kazıkla ilgili olarak yapılan parametrik çözümlerin

sonuçları parametrelerin değişik varyasyonları için grafik olarak verilmiştir. Bölüm 5'de ise dört kazıktan oluşan radyenin üç boyutlu analizleri sonucu bulunan parametrelere dayalı grafikler verilmiştir. Son bölüm olan Bölüm 6'da ise yapılan çalışmalardan elde olunan bulgulara dayanarak varılan sonuçlar ve bu konudaki diğer çalışmalara ışık tutması düşünölen öneriler verilmiştir.



2.LİTERATÜRDE KAZIK VE KAZIK GRUBU TEORİSİ

Üst yapı yüklerini kısmen veya tamamen zemin yüzünden daha derinlerdeki tabakalara aktaran temel sistemleri derin temeller olarak adlandırılmaktadır. Bu derin temellerden biri de kazıklardır. Kazıklı temellerin kullanım gayesi üst zemin ortamının yapı yükleri için uygun olmayışı, yapıya gelen yanal etkilerin karşılanması, kabaran ve ani oturma gösteren zemin ortamlarında, su yapılarında kaldırma kuvvetlerine karşı, köprü ayaklarında, zemin hareketlerini kontrol için ve zeminlerin sıkılaştırılması için kullanılmaktadır.

Kazıklı temellerin tasarımı, kazık zemin etkileşimini basitleştiren teorik analizlere veya amprik bağıntılara dayanmaktadır. Geçen 30 sene içerisinde kazık formüllerinde kuramsal yöntemlere dayanan çalışmalarda önemli derecede artışlar oluşmuştur (Poulos, 1989). Kazıklarda kazık/zemin etkileşiminin karmaşık olduğu bunun klasik (analitik) çözüm teknikleri ile mümkün olmadığı anlaşılmaktadır. Kazık ve kazık grubu davranışının çözümü için güçlü nümerik tekniklerden (BEM, Sınır Elemanlar Yöntemi veya FEM, Sonlu Elemanlar Yöntemi) faydalanılmaktadır. Bu yöntemlerin belli durumlar için birbirlerine olan üstünlükleri söz konusu olmakla birlikte halen dünyada en yaygın kullanılan nümerik yöntemin sonlu elemanlar yöntemi olduğu söylenebilir.

2.1. Analiz ve Tasarım Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Analiz ve tasarım yöntemleri karmaşıklık ve hassasiyet derecesine göre üç gruba bölünebilir. Bu yöntemlerin genişletilmiş sınıflandırılması Poulos ve Hull (1989) tarafından sunulmuş ve Çizelge 2.1 'de verilmiştir. Burada Sınıf 1 bütün dünyada en çok kullanılan kazık tasarımı hesabı yöntemlerinden oluşmaktadır. Sınıf 2 ise uygun teorik temellere (yine de basitleştirmeler mevcuttur) sahip ve kazık deplasman hesapları için artan bir şekilde kullanılan yöntemlerden oluşmaktadır. Bu tür yöntemler basit bilgisayar yöntemlerinin kullanımı veya tasarım eğrilerini içermekle birlikte genellikle bilgisayar kullanımını gerektirmez. Sınıf 3 yöntemleri arazi etütlerinden faydalanılarak genellikle BEM veya FEM'in kullanıldığı gelişmiş yöntemlerdir. Çoğu durumlarda, bu tip yöntemler bilgisayar yardımını gerektirmektedir. Sınıf 3 yöntemleri yoğun bir şekilde parametrik çözümlemelerde

ve tasarım eğrilerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Pratik problemler için uygun tasarım sınıfı seçmek için aşağıdaki faktörlerin düşünülmesi gerekmektedir.

1. Problemin derecesi ve önemliliği
2. Temel tasarımı için uygun bütçe
3. Yeterli (uygun) geoteknik data
4. Tasarım yük durumları ve geoteknik profilin karmaşıklığı
5. Tasarım yönteminin seviyesi (fizibilite, önceliklik veya hesaplanacak tasarım)
6. Düşünülen yöntemler için tasarımcının tecrübesi

Sınırlı geoteknik bütçeye sahip küçük projelerde genellikle Sınıf 1 veya 2A yaklaşımından faydalanılmaktadır. Bununla birlikte, yeterli geoteknik verilerin olduğu bir projede Sınıf 3 yaklaşımı uygun olacaktır. Eğer, aynı proje için, sınırlı laboratuvar ve arazi datasına dayanan ön tasarım istenmiş ise Sınıf 2 yaklaşımını büyük dikkatle kullanmak icabeder. Yapıya gelen yüklerin olağandışı olduğu durumlarda veya zemin profilinin sıradan olmayan bazı durumlarında ise Sınıf 3 çözümleri en uygun olmaktadır. Çizelge 2.2’de eksenel yüklü kazık için tipik örnekler verilmiştir.

2.2 Eksenel Yüklü Kazıkların Çözüm Yöntemleri

Geçen yirmi yılda, eksenel yüklü kazıkların analizi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunların çoğu Sınıf 3 içinde yer almaktadır. Bu yöntemlerin çoğu aşağıdaki analitik yöntemlerden birini kullanmaktadır.

1. Zemin ve kazığın yatay bağımsız dilimlere ayırarak modelleyen yöntemler. (Randolph ve Wroth, 1978)
2. Ara yüzey davranışın (Coyle ve Reese, 1966 ; Kraft vd., 1981) veya zemin kütlesinin cevabını, elastik ortam (Butterfield ve Banerjee, 1971 ; Banerjee, 1978 ; Banerjee ve Davies, 1978 ; Poulos ve Davis, 1980) yaklaşımıyla gözönüne alan ve yük transfer fonksiyonları içeren sınır elemanlar yöntemleri.
3. Zeminin non homojenliğinin ve anizotropisinin hesaba katıldığı çok sayıda zemin modellerine sahip sonlu elemanlar yöntemleri (Desai, 1974 ; Valiappan vd., 1975 ; Balaam vd., 1975 ; Ottaviani, 1975 ; Jardine vd., 1986).

Çizelge2.1 Analiz/tasarım yöntemlerinin sınıfları (Poulos,1989)

Sınıf	Alt sınıf	Karakteristikler	Parametre elde yöntemi
1	-	Ampirik-zemin mekaniği prensiplerine dayanmayan	Korelasyonlarla basit arazi veya laboratuvar deneyleri
2	2A	Basitleştirilmiş teori veya eğrilere dayalı, zemin mekaniği prensiplerini kullanan, hafif hesaplamalara sahip. Teori lineer elastik (deformasyon) veya rijit plastik (stabilite).	Sıradan uygun arazi deneyleri-belki bazı korelasyonlar
	2B	2A' da olduğu gibi ama teori non lineer (deformasyon) veya elasto plastik (stabilite).	
3	3A	Araziye özgü analizleri kullanan teoriye dayanan, zemin mekaniği prensipleri kullanılır. Teori lineer elastik (deformasyon) veya rijit plastik (stabilite).	Dikkatli laboratuvar ve/veya arazi deneyleri(uygun gerilme izlerini takip eden).
	3B	3A' daki gibi ama relatif olarak basit olarak non lineerliğe izin verilir.	
	3C	3A' daki gibi ama zemin davranışını iyi temsil eden uygun modellerin kullanıldığı non-lineariteye izin verilir.	

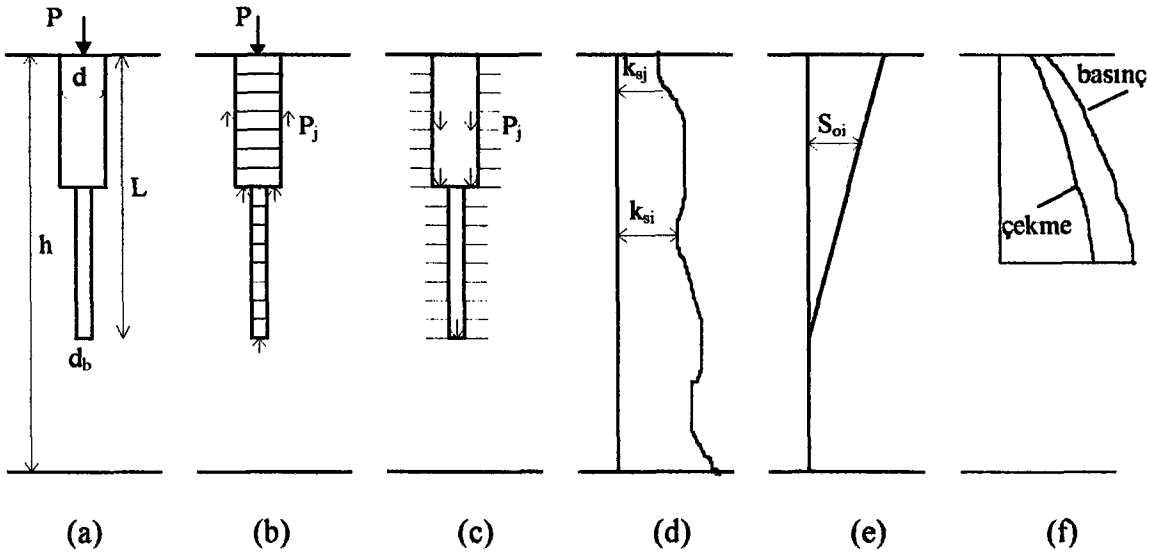
Sadece non lineer zemin davranışının modellenmekle kalmayıp ayrıca kazığın bütün tarihi geçmişinin modellenebildiği (yerleştirme yöntemleri, yerleştirmeyi takiben zeminin konsolidasyonu ve kazığın nihai yükü) FEM en güçlü analitik yaklaşımları gözönüne almaktadır (Nystrom, 1984 ; Withiam ve Kulhawy, 1979). Bu tip yaklaşımlar kazık davranışının ayrıntılarının anlaşılmasında daha uygun olmakla birlikte gerçekçi geoteknik parametrelerin karmaşıklığından dolayı pratik kazık problemleri için kullanımı kolay değildir.

Çizelge 2.2 Eksenel kazık davranışının değerlendirilmesi için metotların sınıflandırılmasına örnekler (Poulos, 1989)

Sınıf	Eksenel kazık kapasitesi	Oturma
1	CPT ile korelasyonlar (Schmertmann, 1975; De Ruiter ve Beringen, 1979). SPT ile korelasyonlar (Thornburn ve McVicar, 1971; Meyerhof, 1956). Toplam gerilme(α) yöntemi (Tomlinson, 1957; Semple ve Rigden, 1984).	Kazık çapı ile ilgili yaklaşık korelasyonlar (Meyerhof, 1959; Frank, 1985) Faktör ile çarpılmış kolon deplasmanı (Focht, 1967).
2A	Efektif gerilme (β) yöntemi (Burland, 1973; Meyerhof, 1976; Stas ve Kulhawy, 1984).	Elastik çözümler (Randolph ve Wroth, 1978; Poulos ve Davis 1980).
2B	Efektif gerilme yöntemi (Fleming vd. 1985)	Kayma için geliştirilmiş elastik çözümler (Poulos ve Davis, 1980)
3A	Uç taşıma kapasitesi için plastisite çözümleri (Giroud vd., 1973; Meyerhof, 1963)	Elastik sonlu eleman analizleri (Valliappan vd., 1974).
3B	Non-lineer yük transfer analizleri (Coyle ve Reese, 1966 ; Kraft vd., 1981). Non-lineer sınır eleman analizleri(BEM) (Poulos ve Davis, 1980). Non-lineer sonlu elman analizleri (Desai, 1974 ; Jardine vd., 1986).	
3C	Kazık yerleştirme simülasyonunu içeren sonlu eleman analizleri (Nystrom, 1984 ; Randolph vd., 1979 ; Withiem ve Kulhawy, 1979).	

Karmaşık problemin boyutlarını küçülterek daha hızlı çözüme ulaşan BEM daha kullanışlı olabilir. Bu nümerik teknikte kazık ve kazık çevresindeki zemin gözönüne alınmakta, kazık ve zemin arayüzeyi için ayrıca arayüzey elemanlar tanımlanmaktadır. Böylece BEM analizde kazık ve zemin elemanların bünye özellikleri yanında kazık relatif hareketlerini içeren arayüzey elemanların bünye özellikleri tanımlanır.

Şekil 2.1 elemanlara bölünmüş tek bir kazıkta çevre zemin hareketleri ile oluşan yük dağılımı ile aşağıda belirtilen dağılımları göstermektedir. Bu şekilde basınç için kazık-zemin limit gerilmesi; f_c , çekme için kazık-zemin limit gerilmesi f_t dir. Bu gerilmeler kazık/zemin ara yüzeyi için olup kazık çevresitaşıma gücü diye adlandırılmıtır. k_s ise zeminin yerel rijitliğidir. Bu modelde ΔP eksenel yük değişimi ile oluşan zemin ve kazık elemanlarının davranışları analiz edilmektedir.



Şekil 2.1 Eksenel yüklü tek kazığın temel problemi: (a)geometri ; (b)kazık elemanlarındaki yer alan gerilmeler ; (c)zemin elemanlarında yer alan gerilmeler ; (d)derinlikle serbest zemin hareketlerinin dağılımı ; (f)limit kazık-zemin gerilmelerinin dağılımı (Poulos, 1989).

Zeminde meydana gelen deplasmanlar iki sebepten dolayı artabilir; kazık-zemin etkileşim gerilmeleri $\{\Delta p\}$ ve serbest zemin hareketleri $\{\Delta S_e\}$. Herhangi bir i elemanında, zemin üç durumdan birinde olacaktır ; göçmemiş, çekme veya basınç göçmesi durumunda.

Göçmemiş durumda herhangi bir elemanda artan deplasman, $\Delta \rho_{si}$, şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\Delta \rho_{si} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{ij}}{k_{sij}} \cdot \Delta p_j + \Delta s_{ei} \quad (2.1)$$

I_{ij} , i elemanı için deplasman etki faktörü (j elemanı nedeni ile) ; j elemanı nedeni ile i elemanı için zemin rijitliği, k_{sij} ; Δp_j , kazık-zemin etkileşim gerilmesinin artımı ; Δs_{ei} , i elemanında dış zemin hareketinin artımı ; m ise kazıktaki eleman sayısıdır.

Basınç göçmesi durumunda, i elemanındaki durumlar şöyle ifade edilebilir.

$$\Delta p_i = f_{ci} - p_i \quad (2.2a)$$

çekme göçmesi için;

$$\Delta p_i = f_{ti} - p_i \quad (2.2 b)$$

δp_i , i elemanındaki kazık-zemin gerilme artımı; p_i , mevcut kazık-zemin gerilmesi artım öncesi; f_{ti} , çekmedeki limit gerilme(i elemanı için); f_{ci} , i elemanında kazık zemin etkileşim limit gerilmesidir.

2.1, 2.2a, 2.2b eşitlikleri zeminin davranışını tanımlamaktadır ve sistemin bütün elemanları için yazılabilir. Kazık ve zemin deplasmanları artışını düşey denge koşullarını sağlayan bir denklem olarak ifade ederek her bir eleman için yük artışına göre kazık deplasmanları elde edilir. Bu şekilde bütün kazık için yük deplasman ilişkisi bulunabilir.

Bu analiz sonucunda kazığın çok kısa olması veya onu saran zemin ortamının rijitliğinin düşmesi durumunda normalden daha düşük değerler elde edildiği Poulos (1989) tarafından ileri sürülmektedir. Diğer yandan kayaya soketli kazık için FEM daha güvenli sonuçlar vermektedir (Pells ve Turner, 1979).

Yük-transfer (genellikle t-z diye adlandırılır) analizi için, denklem 2.1'deki deplasman etki faktörü I_{ij} sıfırdır. Eşitlik 2.2'deki zemin rijitliği hem ampirik olarak (Coyle ve Reese, 1966) veya teorik olarak belirlenebilir (Baguelin ve Frank, 1980 ; Kraft vd., 1981 ; Ha ve O'Neill, 1983 ; Chow, 1986 ; Ooi vd., 1989). Zemin non homojenliği, non lineerliği, gelişmiş uç yumuşama ve arayüzey için genişlemesi veya kısılması birleştirilebilir. Yük-transfer analizleri için en önemli kısıtlama (sadece tek kazık için düşünülen) kazık grupları için kullanılamamasıdır. Grup etkisini göz önüne alan t-z eğrilerinin geliştirilmesi de mümkün olmaktadır (Randolph, 1986) ama bu grup etkilerinin sürekli elastik ortam için değerlendirilmesi zorunludur (Chow, 1986).

Sürekli ortam analizlerinde deplasman etki faktörü bütün elemanlarda sıfırdan farklı ve genellikle elastik ortam teorisinden yararlanılarak bulunur. Bu analizlerde sık sık Mindlin'in (1936) teorisi kullanılır. Diğer basit elastik çözümler olmasına rağmen örneğin Chan vd.

(1974) ve tabakalı yarı uzay için Chin'in (1988) değerlendirdiği çözümler; Mindlin'in teorisi daha yaygın kullanılmaktadır.

Elastik ortam analizinde esas yaklaşım; kazığın yüklenmesi ile zemin kütlesinde çekme gerilmelerinde artış olursa zemin elastik davranışını sürdürmektedir. Aynı durum basınç gerilmelerinin (jeolojik yükler nedeni ile) olduğu durum içinde geçerlidir fakat bütün gerilmeler çekme olursa sorun doğabilmektedir. Bu nokta ile ilgili sıkıntılar elastik sürekli ortam teorisi ile ilgili bazı eleştirilerin doğmasına neden olmuştur (Leonards ve Darrag, 1989) ve bundan dolayı yük-transfer yaklaşımı tercih edilir. Bununla birlikte tek kazık için sürekli ortam çözümleri ve yük-transfer çözümleri genellikle iyi uyumluluk göstermiştir fakat zemin ortamındaki muhtemel çekme kuvvetlerinin herhangi bir etkisi kazık davranışını önemli bir şekilde etkilemeyecektir.

2.3 Teorik Gelişmeler

Poulos (1989) tarafından sürekli ortam çözümleri üzerinde durularak, bir veya iki tabakalı zemin kütleleri ve doğrusal zemin profili içeren idealize edilmiş problemler için oldukça uygun sonuçlar elde edilmiştir. Türetilen uygun sonuçlara sahip problemlerin değişim aralığı FEM kullanılarak deplasman faktörü ile genişletilmiştir. Bununla birlikte pratikteki problemlerin çoğu sürekli ortam teorisi ile cevap bulabilmiştir. Şekil 2.2'de sürekli ortam teorisi kullanılarak yapılabilecek çözümlerin ortak payda başlıkları verilmiştir. Genişletim 6 grup şeklinde düşünülmüş, bunlardan iki tanesi zeminin modellenmesi, iki tanesi kazığın modellenmesi ve son iki tanesi ise kazık yüklerinin modellenmesini içermektedir.

2.3.1 Zemin profilinin modellenmesi

Zemin davranışını modellemek için elastisite teorisinden faydalanmak elverişli olmaktadır. Bu modelin genel basitleştirmesine rağmen kazık davranışını belirlemek için parametrelerin seçilmesi gerekmektedir. Zemin için elastik model kullanmanın önemli avantajı kazık gruplarının analizlerinin ve kazığın ani ve nihai oturmasının elde edilmesidir. Ani oturmaların

elde edilmesinde zeminin drenajsız elastik parametreleri, nihai oturmaların elde edilmesinde ise drenajlı parametreler kullanılmaktadır.

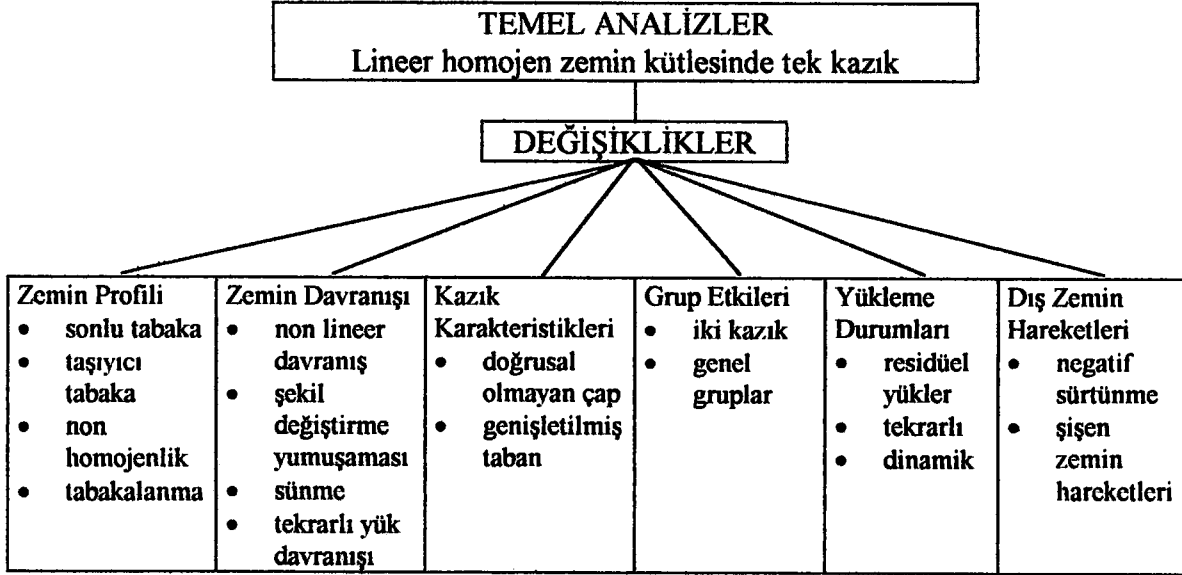
Zemin deplasmanlarını azaltan Steinbrenner yaklaşımından (Steinbrenner, 1934) faydalanarak sonlu kalınlıklı tabakalarda yaklaşık çözümler elde etmek için Mindlin'in eşitliklerinden faydalanılmıştır. Poulos ve Davis'in (1980) tanımladığı ayna görünüm tekniği kullanılarak katı ortamda taşıyıcı olan kazıklar için zemin deplasmanlarındaki azalma yaklaşık olarak analiz edilmiştir. Her iki durumda da zemin deplasman faktörü I_{ij} geliştirilmiştir.

Elastik ortam teorisinde 2.1 eşitliğindeki zemin rijitliği direkt olarak zeminin elastisite modülü ile ilgilidir. Homojen zemin kütlesinde $k_{sij} = E_s/d_j$ dir. Burada E_s , zeminin elastisite modülü ; d_j ise j elemanının çapıdır. Eğer non homojen zemin kütlesinde deplasman etki faktörünü (k_{sij}) elde etmek için Mindlin'in eşitliği kullanılarak Poulos (1979) tarafından ileri sürülen aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$k_{sij} = 0.5 * (E_{si} / E_{sj}) / d_j \quad (2.3)$$

Burada E_{si} ve E_{sj} sırası ile i ve j noktalarındaki zeminin elastisite modülleridir.

2.3 nolu eşitliği zemin elastisite modülleri arasında çok farklılık var ise veya yumuşak tabaka altında çok katı bir tabaka yer alıyorsa doğru olmayan neticeler vermiştir. Yamashita (1987) tarafından 2.3 nolu eşitliğindeki elastisite modülleri için farklı bir yaklaşım ileri sürülmüş ve bu çalışmada zemin elastisite modülü için ortalama değerler alınmıştır.



Şekil 2.2 Temel analizler ve daha gerçekçi modelleme için izin verilen büyümeler (Poulos, 1989).

2.3.2 Zemin davranışının modellenmesi

Kazık zemin davranışını etkileyen en önemli özelliklerinden birisi zemin kazık arasında ortaya çıkan gerilmelerdir. Bu gerilmeler zemin kazık kayma dayanımının belirlenen limit değerini aşamayacağı analiz içinde zaten belirtilmiştir. Kazık zemin arasında ara yüzey davranışının limit gerilmeye ulaşıncaya kadar doğrusal olduğu kabul edilir. Buna göre ara yüzey modeli elasto-plastik davranış göstermiş olacaktır.

Zeminin doğrusal olmayan davranışı yaklaşık olarak gözönüne alınabilir. Bu durum gerilme veya şekil değiştirme seviyesine bağlı olarak elastisite modülünün değişiminin tanımlanması ile mümkün olur. Bu konuda en basit yaklaşım zemin tanjant elastisite modülünün belirlendiği durumda zeminin kesme şekil değiştirmesi ile kesme gerilmeleri arasındaki hiperbolik ilişkinin tanımlandığı yaklaşımdır.

$$E_{tan} = E_t * (1 - p \cdot R_f / p_f)^2 \quad (2.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte E_t , başlangıç tanjant elastisite modülünü ; R_f , hiperbolik eğri yerleştirme sabiti ; p , kazık- zemin gerilmesi ; p_f , nihai kazık-zemin gerilmesini ifade etmektedir.

Doğrusal olmayan davranışı modellemek için alternatif modeller de mevcuttur mesela çoklu doğrusal modeller veya Ramberg-Osgood modeli vs. Doğrusal olmayan modellerde başlangıç yüklemesinde olduğu gibi yük boşaltılması veya tekrar yükleme de çok önemlidir. Boşaltma veya tekrar yüklemeye en basit yaklaşım, elemandaki önceki yüklemeye en büyük gerilme seviyesi oluşuncaya kadar davranışın elastik olduğu kabulü ile doğrusal olmayan davranışın başlangıç gerilmesi önceki adımın nihai gerilmesi seçilmektedir. Bununla birlikte, alternatif yaklaşımlar da mevcuttur Randolph (1986) tarafından tavsiye edilen önceki en büyük gerilme seviyelerinden daha düşük gerilme seviyelerini esas alan doğrusal olmayan davranış yaklaşımıdır. Bu gibi davranışlarda tekrarlı yük uygulanırsa devamlı deplasmanların toplamı artacağından analizlerde ilave parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Tekrarlı yüklemeye maruz kazıkların davranışının analizinde zemin davranışının üç şekli düşünülmelidir;

- (a) Tekrarlanan çevrimli yükler altında kazık-zemin sürtünmesinin derecesi (ve muhtemelen zeminin elastisite modülü)
- (b) Yükleme hızı etkileri
- (c) Kalıcı deplasmanların toplamı

Poulos (1988b) tarafından çevrimli yükleme etkilerini birleştiren bir yaklaşım ileri sürülmüştür. Bu yaklaşımda yüzey dayanımı için çevrim derecelenmesinin etkileri en önemli olmakta ve D_f faktörü ile ifade edilmiştir.

$$D_f = \frac{(\text{çevrimli yüklemeye sonra elemandaki kazık direnci})}{(\text{statik yük için elemandaki kazık direnci})} \quad (2.5)$$

Matlock ve Fos (1980) tarafından tekrarlı yükleme için D_f faktörü değişimi iki parametre ile tanımlanmış olup, D_{lim} , minimum derecelendirme katsayısı ; derecelendirme hız parametresi λ' 'dir.

2.3.3 Kazık karakteristikleri

Analizlerde kazık deplasman eşitliğinde değişen rijitlik veya değişen çaplar gözönüne alınır. Değişen çap durumlarında, ilave dairesel elemanlar çap süreksizliğinde tanımlanır ve bu elemanlardaki kazık-zemin sürtünme limit değerleri hem basınç hem çekme durumu için tanımlanmalıdır.

Kazıkda yükleme sonucu ortaya çıkan eksenel limit gerilme yarımı ile kazık içinde hem basınç hem çekme durumundaki göçme gözönüne alınabilir. Buna ait yöntemlerin genel değerlendirilmesi Poulos ve Davis (1980) tarafından verilmiştir.

2.3.4 Kazık grupları

Sürekliliği esas alan analizler aynı zamanda eksenel yüklü kazık grupları içinde geliştirilebilir. Her bir kazık elemanlara bölünür, zemin ve kazık deplasman eşitlikleri her bir eleman için yazılır, kazık ve zemin elemanlarının uyumluluğu göçme olmayan durum için yüklenir ve düşey denge denklemleri her bir kazık için yazılır. İlave olarak kazık başlığı durumları belirtilmelidir. Genellikle, rijit başlık oluşturulur, bu yüzden bütün kazıklar aynı başlık deplasmanını yaparlar. Kazık-zemin gerilmesi ve deplasmanının artımına ek olarak her bir kazık başlığı için hesaplanan yük artımı yazılır ve bu durumun belirlenmesi ile sonraki eşitliklerin tamamı elde edilir (Hewitt, 1988).

Deplasman etki faktörü I_{ij} 'nin değerlendirilmesinde, gruptaki diğer kazıklar ve kazığın bütün elemanları nedeni ile o elemanın deplasmanını elde etmek için Mindlin (1936) tarafından verilen elastik çözümleri kullanılabilir. Bu değerlendirme için uygun kabul El-Sharnouby ve Novak (1985) tarafından hesaplama zamanını önemli ölçüde azaltan ve Mindlin eşitliğini iki kere entegre eden bir yaklaşımla sunulmuştur. Yukarıdaki analizleri yerine getiren metotların şekillenmeleri aşağıda verilmiştir.

1. Sürekli ortam analizlerinden faydalananak yapılan grubun tam analizi (Banerjee ve Driscoll, 1976; Poulos ve Hewitt, 1986).

2. Kendi yükü altındaki kazığın davranışının elde edildiği yük-transfer analizlerinden faydalanarak ve diğer kazıkların elemanlarının etkisini dikkate alan süreklilik teorisi ile yapılan tam analizler (O'Neill vd., 1977 ve Chow, 1986).

3. İkili kazık grubu çözümlemeleri için diğer kazığın varlığı nedeni ile kazıktaki artımı ifade eden etkileşim faktörlerinin yer aldığı analizler (Poulos, 1968; Randolph ve Wroth, 1979). Etkileşim faktörü olan α ise şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\alpha = \Delta S / S_1 \quad (2.6)$$

burada ΔS eşdeğer yüklü diğer kazık nedeni ile oturmadaki artım ve S_1 kendi yükü altında kazığın oturması. Kazık grupları için, tek bir kazığın oturması ile her bir kazıktaki oturmayı, her bir kazığın başlığındaki yükü ve diğer kazıklara olan etkileri etkileşim faktörlerinin süperpoze edilmesi ile bulunabilir.

4. Tek kazık davranışı ve etkileşim faktörlerini elde etmek için farklı zemin elastisite modüllerinden faydalanılan gelişmiş form ise diğer bir etkileşim faktörü yöntemidir. Daha yüksek değerler kazıklar arasındaki zeminin düşük şekil değiştirmelerini yansıtmak için kullanılır. Bu yöntem gelişmiş etkileşim faktörü yöntemi olarak adlandırılır. Poulos (1988a) tarafından ayrıntıları ile tanımlanmıştır.

2.3.5 Yükleme durumları

Artık gerilme etkileri Özellikle çakma kazıklarda yerleştirme etkilerinden dolayı ortaya çıkan artık gerilmeler çoğu analizlerde ihmal edilir. İdeal olarak, Holloway vd. (1978) tarafından dinamik analizler kullanılarak modellendiği gibi modellenebilir. Bununla birlikte, kazığın göçene kadar basınç altında yüklenip sonra o yüke kadar boşaltılmasının uygulandığı daha basit bir yaklaşım olabilir. Poulos (1987) tarafından bu yöntemin gerçekçi bir şekilde kazıkta kalıcı gerilmeler verdiğini göstermiştir. Leonards ve Darrag (1989) tarafından özellikle kumdaki kazıklar için kazık ucuna komşu zeminin elastisite modülü kazığın alt kısımlarında hesaplanan kalıcı gerilmelere önemli ölçüde etkileyeceğini işaret etmiştir.

Tekrarlı yükleme İki yöntem kazığın tekrarlı yüklenmesini simüle etmek için uygulanabilir.

(a) Tek-adım analizleri, belirli bir N tekrarlı yüklemesi altında kazık davranışını hesap etmek için bulunan tekil iteratif analizler.

(b) Tek tek çevrim analizleri, her bir tekrarın tek tek ele alındığı yöntem.

Bu yöntemlerin ayrıntıları Poulos (1983) tarafından verilmiştir. Adım adım çevrim analizlerinde daha fazla hesaplama zamanı olmasına karşın daha iyi sonuç vermekte ve şekil değiştirme yumuşaması ara yüzey davranışı ve düzensiz tekrarlı yüklemelerin sıklıkları gözönüne alınır.

Dış zemin hareketleri. Dış yükleme veya suyun dışarı çıkması veya genişleyen kil tabakalarının ıslanması nedeni ile oluşan dış zemin hareketlerinin etkileri 2.1 eşitliğinde tanımlandığı gibi serbest zemin hareketleri şeklinde direkt olarak analiz edilebilir. Kil tabakasının tek boyutlu yüklenmesi durumunda bu hareketler Terzaghi'nin tek boyutlu konsolidasyon teorisi yardımı ile hesaplanabilir ve kazık davranışının zamana bağımlılığı ele alınabilir (Poulos ve Davis,1980). Genişleyen zemin tabakalarındaki serbest zemin hareketleri çok kolay hesaplanamamakla birlikte bir çok ampirik ve yarı ampirik yöntem daha kolay hesaplanabilirler (Blight, 1965; Van Der Merwe, 1964; Cameron ve Walsh, 1984).

2.4 Son Yıllarda Yapılan Çalışmalar

Bu kısımda son on beş yılda yapılmış kazıklı radyelerin nümerik çözümlemesine ait nümerik çalışmaların genel bir özeti verilmiştir.

İlk olarak, Muqtadir ve Desai (1986) tarafından yapılan kazık grubu temellerinin üç boyutlu analizi için yapılmış çalışmadan bahsetmek gerekirse; bu çalışmada kazıklı radyenin üç boyutlu nümerik çözümlemesi elastik, non lineer elastik ve elasto plastik pekleşme davranışı göz önüne alınarak kumdaki altı kazıktan oluşan sistem için yapılmıştır. Çözümlemede sistem içerisindeki deplasmanlar, kuvvetler ve gerilmeler incelenmiştir. Yalnız bu çalışmada radye zemin teması söz konusu olmamıştır.

İkinci olarak, Pressley ve Poulos (1986) tarafından kazık gruplarının kare konfigürasyonun non lineer yük-oturma davranışı analiz edilmiştir. Simetriden faydalanılarak aksel yükü kazıkların değişik aralık oranları için çözümlemeler yapılmıştır. Çalışmada birbirine yakın kazıklarda blok göçmesi gözlemlenirken kazık aralığı arttıkça göçmenin sadece tek tek kazıklarda oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Çözümlerin doğruluğu ise mevcut teorilerle karşılaştırılmış.

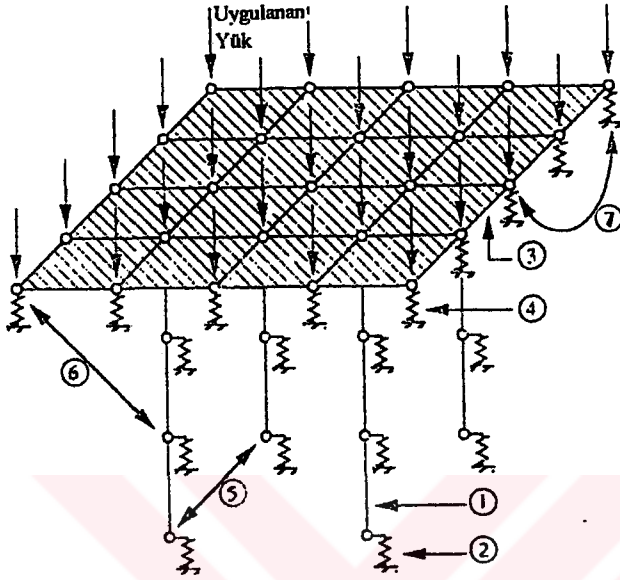
Üçüncü olarak, Chow (1986) tarafından düşey yüklü kazık gruplarının lineer ve non lineer çözümlemelerine ait bir yaklaşım sunulmuştur. Bu makalede tek bir kazığın modellenmesinde yük-transfer eğrileri ve kazık-zemin-kazık etkileşimi yöntemleri Mindlin'in eşitliklerine dayanılarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu kullanılan yaklaşım ile BEM arasındaki çözümlemeler karşılaştırılmış ve iyi bir uyumluluk elde edilmiştir. Bu çalışmada rijit ve sıkışabilir kazıkların bulunduğu çeşitli büyüklükteki kazık grupları için s/d ve L/d oranlarına göre kazıklı radyelerdeki yük-oturma ilişkileri verilmiştir.

Dördüncü olarak, Clancy ve Randolph (1993) tarafından radye taşıma gücü göz önüne alınarak çözümlemeler yapılmıştır. Bu çalışmada melez bir yaklaşım yapılarak her bir kazığın elastik etkileşimi göz önüne alınmış ve de çeşit kazık parametreleri için çözümler yapılmıştır. Bütün temel rijitliğini ele alan bir yaklaşımla kazık grubu ve radyenin yük taşıma oranları ile birlikte farkı oturmalarda hesaplanmıştır.

Şekil 2.3'de bu çalışmada yapılmış nümerik yaklaşımın genel görüntüsü verilmiştir. Görüleceği gibi analiz yöntemi basitleştirmeye dayalı bir yöntem olup bu çalışmada kazıklar, kazıklar arası etkileşimler ve zemin radye etkileşimi yaylar ile modellenmiş bunun yanında radye plak olarak tanımlanmıştır.

Bu makalede α_{rp} ve α_{pr} diye adet yük dağılım oranı ile eşdeğer kazık rijitliği E_p/E_s , relatif kazık boyu L/d, eşdeğer radye rijitliği K_{rs} ve kazık aralığı oranı olan s/d arasındaki ilişkiler bir çok çözümleme yapılarak 1, 4, 9, 16, 25 vb. kazıktan oluşan gruplar için neticeler verilmiştir. Burada α_{rp} ve α_{pr} katsayılarını tanımlamak gerekirse bunlardan birincisi radyedeki kazık grubunun etkileşim faktörü olup ikincisi ise kazık grubunda radyenin

etkileşim faktörünü tanımlamaktadır. Bu çalışmada örneğin değişen relatif kazık rijitliği ile L/d , s/d arası ilişkiler α_{rp} ve α_{pr} katsayıları için Şekil 2.4'de verilmiştir.



1. Tek boyutlu kazık elemanı
2. Non lineer T-Z yayları ile tanımlanmış her bir kazık noktasındaki çevre direnci
3. İki boyutlu plak-eğilme sonlu elemanlar radye ızgarası
4. Eşdeğer yaylarla ifade edilmiş radye noktalarındaki zemin direnci
5. Mindlin'in eşitlikleri kullanılarak bulunan kazık-zemin-kazık etkileşimi
6. Kazık-zemin-radye etkileşimi
7. Radye-zemin-radye etkileşimi

Şekil 2.3 Kazıklı radyenin nümerik sunumu (Clancy ve Randolph, 1993).

Beşinci olarak Poulos (1994) tarafından yapılan çalışmada bir önceki çalışmada belirtilen yaklaşım kullanılmıştır. Çözümlerde radye altı limit basınçları ve kazık yük dağılımı için kabuller yapılmıştır. Mevcut teorilerle (FEM, BEM vb.) yaklaşım çözümleri arasında iyi bir uyumluluk gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada serbest zemin hareketlerinin etkisinde göz önüne alınabilmektedir. Bu çalışmadaki çözümleme yöntemi maddeler halinde şu şekilde verilmiştir.

1. Radye düğüm noktaları ve elemanlarının serisi olarak tanımlanır ve de eşitlikler radyenin düşey deplasmanları için eğilmeyi oluşturan

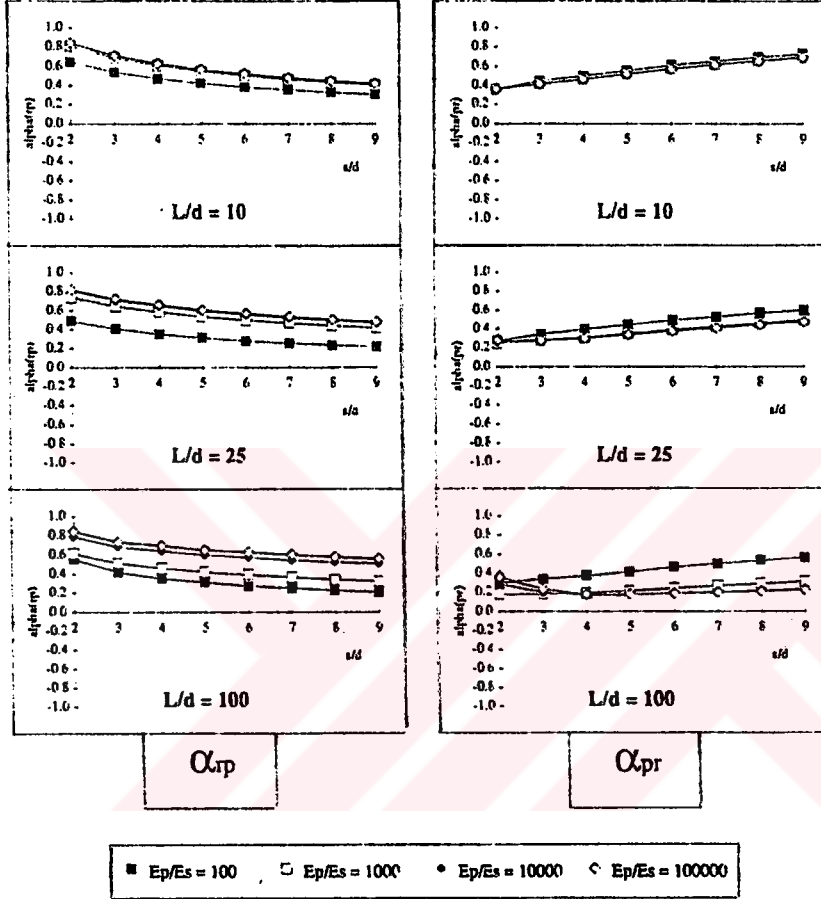
(a) yükler ve momentler

(b) radye ve altındaki zeminde oluşan gelişmiş temas basınçları için çözümlenir.

2. Zeminin düşey deplasmanları için geliştirilen eşitlikler her bir düğüm notasında

(a) radye ve zemin arasındaki gelişmiş temas basınçları

(b) dış ortamda oluşan serbest zemin hareketleri için çözümlenir.



Şekil 2.4 Tek kazıklı radye için hesaplanan değerler, $K_{rs}=10$ (Clancy ve Randolph, 1993)

3. Kazıkların yerleştirildiği elemanlarda, kazık ve kazıklar tarafından taşınan yükler ve kazık altı zeminin düşey deplasmanında kazığın yük-deplasman karakteristiklerinin düşünülmesi.

4. Radye altındaki zeminin düşey deplasmanlarının düşünüldüğü aşağıdaki etkileşimlerin düşünülmesi

(a) radyenin elemanları arasındaki etkileşim

(b) kazıklar arasındaki etkileşim

(c) kazıkların oturmasında radye elemanlarının etkisi

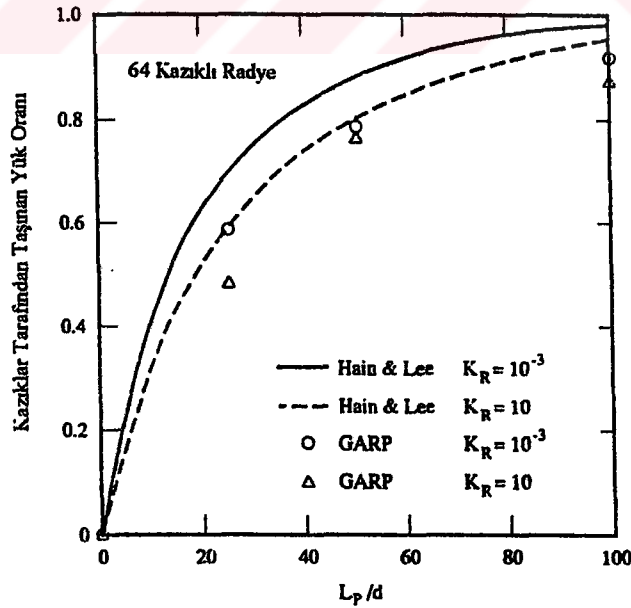
(d) radye elemanlarının oturmasında kazıkların oturması

5. Birebir eşitliklerin radye altı bilinmeyen temas basınçları için çözülür.
6. Hesaplanan temas gerilmeleri belirlenen limit çekme ve basıncı gerilmeleri için kontrol edilir. Aşan değerler limit değerlere eşitlenerek tekrarlı çözümler ile sistem dengesi bulunur.
7. Hesaplanan deplasmanlardan ve temas basınçlarından dönmeler, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri radye ve kazıklar için birlikte çözülür.

Bu çalışmada 64 kazıklı bir radye için yukarıdaki analizi yapmak için geliştirilmiş GARP programı ile Hain ve Lee (1978) tarafından yapılan FEM sonuçları Şekil 2.5'de verilmiştir. Bu şekilde relatif kazık boyu ile kazıkların taşıdığı yük arasındaki ilişki sunulmuş ayrıca K_R diye verilen ise relatif radye rijitliği olup elastisite teorisinden elde edilmiş bir formüldür.

$$K_R = 2 \cdot E_r \cdot t^3 \cdot (1 - \nu_s^2) / 3 \cdot \pi \cdot E_s \cdot L_r^4 \quad (2.7)$$

Son olarak Clancy ve Randolph (1996) tarafından daha önceki çalışmalarına ek olarak bir takım arazi çalışmaları verilmiştir.



Şekil 2.5 Kazıklar tarafından taşınan yükün hesaplarına ait çözümlemelerin karşılaştırılması (Poulos, 1994)

3.KAZIKLI RADYELERİN NÜMERİK ANALİZİ

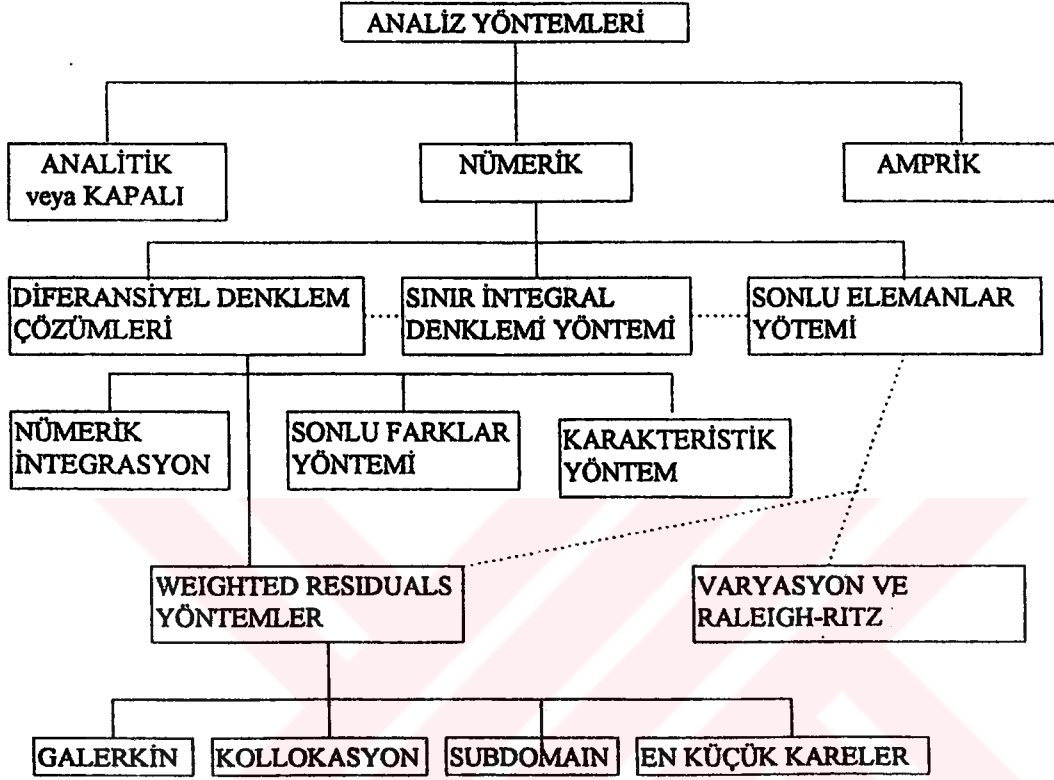
Bu bölümde kazıklı radyelerin analizinde kullanılan nümerik yöntemler hakkında bilgi verildikten sonra özellikle bu çalışmada olan sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili açıklamalar yapılacaktır. Bölüm 2'de genel olarak kazık ve kazık grubu analizlerinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmişti fakat bu bölümde özellikle nümerik yöntemler ve onlardan biri olan sonlu elemanlar yöntemi üzerinde durulacaktır.

3.1 Nümerik Yöntemler

Geçmişte jeolojik ortamların analizinde, ortamın kompleks oluşu ve davranışının çok çeşitli etkenlere bağlı olması nedeni ile bir çok durumda ampirik yöntemlerden faydalanılmakta idi. Oysa günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesi sonucunda bu çözümlemelerde nümerik tekniklerin kullanılması gündeme gelmiştir. Ayrıca ele alınan ampirik bağıntılar çeşitli kabulleri gerektirdiğinden problemin gerçek çözümünden yapılan kabuller oranında uzaklaşmaktadır. Bu yüzden jeolojik ortamların analizlerinde sürekli ortam kabulü yapılarak çeşitli etkileşimler arasındaki davranış için fiziksel temele dayalı teoriler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu teoriler genelde matematiksel olarak diferansiyel denklemlerden ibaret olup kapalı çözümlere ulaşmak için bir takım basit kabuller yapılmaktadır. Bu yaklaşım çoğu pratik durumlar için yeterli çözümü sağlamasına karşın jeolojik ortamların homojen olmayan yapısı, non lineer malzeme davranışı, gelişigüzel geometrisi, içerisindeki süreksizlikler, malzeme özelliklerinin zamanla değişimi vb. karmaşık özellikler nedeni ile problemlerde gerçekçi çözümlere ulaşmak güç olmaktadır. Bu nedenle geomekanik problemlerin analizinde yukarıda sözü geçen bir çok özelliği barındıran nümerik yöntemlerin kullanılmasına başlanmıştır.

Geomekanik problemlerin çözümünde kullanılan nümerik analiz yöntemleri Şekil 3.1'de verilmiştir. İkinci bölümde bahsolunduğu gibi kazıkların üzerinde yapılan bilimsel çalışmaların çoğunda sınır elemanlar yöntemi (BEM) kullanılmıştır. Bunun sebebi ise hesap için göz önüne alınan ortamdaki daha az veri girişi ve çıkışı olmasıdır. Bu durum bilgisayar kullanımında daha az bilgi ve uğraş gerektirmektedir. Ancak sonlu eleman yönteminin

mühendislik dallarında daha yaygın kullanılıyor olması ve bu yöntemle daha çok bilgisayar programı geliştirilmiş olduğundan bu çalışmada FEM tercih edilmiştir.



Şekil 3.1 Nümerik analiz yöntemleri (Desai,1977)

3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Çoğu mühendislik problemi için analitik çözümler elde etmek mümkün değildir. Analitik çözüm bünye içerisindeki herhangi bir noktadaki istenen büyüklüğün değerini vermektedir. Analitik çözümler sadece kesin basitleştirilmiş durumlar için elde edilebilir. Eğer problem kompleks malzeme durumları ve sınır şartları içeriyorsa çözüm kabul edilebilir yaklaşımlar içeren nümerik yöntemlerle mümkün olur. Nümerik yöntemlerin çoğunda, bünye içerisindeki ayrı noktadaki bilinmeyen büyüklüklerin değerlerinin yaklaşık çözümleri verilir. Bünyeyi belli sayıda noktaya ayırma işlemi ayrıştırma olarak adlandırılabilir. Ortam veya yapıyı ayırmanın yollarından biri eşit büyüklükte daha küçük birimler oluşturmaktadır. Bu birimlerin bir araya getirilmesi ile orijinal ortam oluşturulur. Tek operasyon ile bütün bünyeyi

çözmek yerine, her bir öge birimi için formülasyon yapılır ve orijinal yapı için çözüm elde etmek için bu birim çözümlerler birleştirilir. Analiz yöntemi bir bakıma basitleştirilmiş olmasına rağmen verinin büyüklüğü tamamen orijinal yapının bölündüğü küçük birimlerin sayısına bağlıdır.

Nümerik yöntemlerin çoğu bilgisayarların keşfinden önce geliştirilmiş olup şimdi bu makineler sayesinde uygulanmaktadır. Modern bilgisayar teknolojisine adapte olmuş klasik yöntemlerin diğer tipleri en küçük kareler yöntemi, sonlu farklar ve varyasyonel yöntem olarak Ritz yöntemidir.

Yukarıda ifade edilen tekniklere karşı olarak, sonlu elemanlar yöntemi dijital elektronik bilgisayar çağının ürünü olmuştur. Bu yüzden, yaklaşım daha öncekilerin çoğu özelliklerine paylaşmasına rağmen, yüksek hızlı bilgisayar tarafından tercih edilmiş özel niteliklerin avantajına sahip kesin karakteristikleri barındırır. Özellikle, bu yöntem karmaşık sınır şartlarının, doğrusal olmayan gerilme şekil değiştirme davranışının, homojen olmayan malzemelerin mevcut olduğu problemlerin çözümü için programlanabilir.

Sonlu elemanlar yöntemi mühendislik problemlerinin çoğuna uygulanabilmektedir. Sınır değer problemlerinde bağımlı değişkenlerin değer bölgesi tanımlanırken Çizelge 3.1'de yöntemin özel uygulama örnekleri üç ana sınıf altında verilmiştir.

Bu alanda problemler genellikle üç yaklaşımla çözümlenmektedir; deplasman yöntemi, denge yöntemi ve karışık yöntemdir. Deplasman yönteminde esas bilinmeyen olarak deplasman, denge yönteminde gerilmeler esas bilinmeyen olarak kabul edilir ve karışık yöntemde ise gerilme ve deplasmanların bazıları bilinmeyen olarak yer alır.

3.2.1 Yöntemin genel tanımlaması

Sonlu elemanlar yönteminin esası sonlu eleman denilen alt birimlere ayrılarak yapının sunumudur. Düğüm noktaları diye adlandırılan noktalarda bilinmeyenlerin bulunması esasına dayanır. Her bir sonlu eleman için asıl deplasmanların değişimi veya dağılımını elde etmek

için basit fonksiyonlar seçilir. Kabul edilen bu tip fonksiyonlar deplasman fonksiyonları veya deplasman modelleri olarak adlandırılır. Deplasman fonksiyonlarının bilinmeyen büyüklükleri düğüm noktalarındaki deplasmanlardır. Bundan dolayı, nihai çözüm düğüm noktalarındaki yaklaşık deplasmanları verecektir. Deplasman modeli çeşitli basit formlarda ifade edilebilir mesela polinom olarak ve trigonometrik fonksiyon olarak. Polinomlar daha basit matematiksel idare gerektirdiği için sonlu eleman uygulamalarında yer alırlar.

Çizelge 3.1 Sonlu elemanlar yönteminin mühendislik uygulaması (Desai, 1972)

Çalışma alanları	Denge problemleri	Öz değer problemleri	Yayınım problemleri
1.Yapı mühendisliği, yapı mekaniği ve uzay mühendisliği	Çubuk, plak ve kabuk elemanların analizi. Kompleks yapıların gerilme analizleri. Prizmatik kesitlerin analizi	Yapıların stabilitesi. Yapıların titreşim modları ve doğal frekansları. Lineer viskoelastik sönümlenme.	Gerilme dalgalarının yayılımı. Periyodik olmayan yükler altında yapıların dinamik davranışları. Birleşik termal viskoelastisite ve termal elastisite.
2.Zemin mekaniği, temel mühendisliği ve kaya mekaniği.	İki ve üç boyutlu gerilme analizleri. Dolgu ve kazı problemleri. Şev stabilitesi problemleri. Zemin yapı etkileşimi. Tünel ve baraj vb. analizleri. Zemin ve kaya ortamı içerisinde akışkanların sızması.	Doğal frekanslar ve zemin-yapı kombinasyonlarının titreşiminin modları.	Zemin ve kayalarda sızma problemleri. Deformasyon yapabilen geçirgen ortamda konsolidasyon. Zemin ve kaya ortamı içerisinde gerilme dalgalarının yayılması. Dinamik zemin-yapı etkileşimi
3.İsı transferi	Akışkanlarda ve katı cisimlerde ısı yayılması.		Katı cisim ve akışkanlarda ısı transferi.
4.Hidrodinamik, hidroloji mühendisliği ve su kaynakları.	Potansiyel akım ağları için çözümler. Akışkanların viskoz akımları için çözümler. Hidrolik yapıların ve barajların çözümleri.	Limanların ve göllerin su seviye değişimleri. Rijit ve esnek taşıyıcılardaki akışkanların çalkalanması.	Koyların kirlenme ve tuzluluk çalışmaları.
5.Nükleer mühendisliği	Reaktör yapılarının analizi. Reaktör ve reaktör yapılarında sıcaklık dağılımı.		Reaktör yapılarının dinamik analizi. Reaktör yapılarının termo visko elastik çözümleri vb.

Potansiyel enerji kavramını göstermek için, basit bir örnek düşünersek; lineer bir yay sabiti s ve yükü P olsun. Yay P yükü altında u deplasmanı yapmaktadır.

Yay tarafından saklı olan enerji şu şekilde yazılır;

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} (\text{yaydaki kuvvet})(\text{deplasman}) \\ &= \frac{1}{2} (su)(u) \\ &= \frac{1}{2} s \cdot u^2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

dış yükün potansiyel enerjisi ise;

$$\begin{aligned} W_p &= (\text{yük})(0 \text{ potansiyel durumundaki deplasman}) \\ &= -P \cdot u \end{aligned} \quad (3.2)$$

0 potansiyel durumunda $u=0$ dır. Bununla birlikte potansiyel enerji π ise;

$$\pi = U + W_p = \frac{1}{2} \cdot s \cdot u^2 - P \cdot u \quad (3.3)$$

minimum potansiyel enerji yukarıdaki eşitliğin u 'ya göre kısmi türevi ile bulunabilir.

$$(\partial \pi / \partial u) = s \cdot u - P = 0 \quad (3.4)$$

(3.4) nolu eşitlik yüklü yayın yük-deplasman ilişkisini vermektedir.

Bütün yapı için denge denklemleri her birleşme noktası için bu denklemlerin yazılıp birleştirilmesi ile elde edilir. Bu eşitlikler verilen sınır deplasman durumları için geliştirilirler ve bilinmeyen deplasmanları bulmak için çözülürler. problemlerin çoğunda, deplasmanlardan çok sistemdeki şekil değiştirmeler veya gerilmeler istenir. Bu sebeple bazı ilave hesaplamalar zorunlu olmaktadır.

Sonlu elmanlar yöntemi ile analiz iki adımda gerçekleştirilir. İlk adımda her bir eleman üzerinde problemin formüle edilmesi ikinci kısımda ise bütün sistem için bütün elemanların birleştirilmesi.

Aşağıdaki altı adım sonlu elemanlar yöntemi analizinin işleyişini özetlemektedir.

1.Ortamın bölünmesi

Analiz edilecek cisim yani ortam basit geometrik şekillere bölünür. Bölünme basit bir şekilde sistemin küçük parçalara ayrılması şeklinde düşünülebilir. İki boyutlu ortam için sonlu elemanlar üçgenler, üçgen grupları veya dörtgenler olabilir. Üç boyutlu analizler için dikdörtgenler prizması, dört yüzlüler veya altı yüzlüler olabilir.

2.Deplasman modellerinin seçilmesi

Deplasman modeli bilinmeyenlerin ortamdaki dağılımını veren fonksiyonlar olarak tanımlanabilir. Deplasman fonksiyonları genellikle polinom seçilir ve en basit deplasman modeli genellikle lineer polinomdur. Açık ki elemandaki oluşacak deplasmanı yansıtacak deplasman fonksiyonunu her zaman seçme şansı olmayacaktır. Bundan dolayı, sonlu elemanların temel yaklaşımı bu noktada ortaya çıkmaktadır.

Deplasman modelinin seçiminde etkili üç adet faktör vardır. Birincisi, seçilmesi zorunlu olan deplasman modelinin derecesi ve tipidir. İkincisi, modeli tanımlayacak belirli deplasman büyüklüğü seçilmelidir. Bunlar genellikle düğüm noktalarının deplasmanlarıdır ama bazılarında veya bütün düğüm noktalarında deplasmanların türevlerini içerebilir. Üçüncüsü, seçilen model doğru çözüm yaklaşımı nümerik sonuçlarını verecek olan olmalıdır.

3. Varyasyonel ilkeden faydalanılarak eleman rijitlik matrisinin bulunması

Rijitlik matrisi elemanın geometrik ve malzeme özelliklerinden elde edilen denge denklemleri katsayılarını ve minimum potansiyel enerji ilkesinden faydalanılarak elde edilen katsayıları içermektedir. Rijitlik düğüm noktalarındaki yükler deplasmanlarla ilişkilidir. Yayıllı yükler düğüm noktalarına eşit ağırlıklı bir şekilde dağıtılırlar. Rijitlik matrisi $[k]$, yük vektörü $\{Q\}$ ve düğüm deplasman vektörü $\{q\}$ arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir.

$$[k]\{q\}=\{Q\} \quad (3.5)$$

Rijitlik matrisinin elemanları etki katsayılarıdır.

4.Bütün bölünmüş ortam için cebirsel toplama

Bu yöntem sistem rijitlik matrisinin her bir eleman için rijitlik matrislerinin toplanması ve eleman yük vektörlerinden bütün yüklerin toplanmasını sağlamaktadır. En çok kullanılan toplama yöntemi direkt rijitlik yöntemidir. Genellikle, toplama yöntemi için temel olan bütün elemanlardaki karşılıklı düğüm noktaları için aynı deplasmanlara sahip düğümlerin birleştirilmesidir. Sistem rijitlik matrisi $[K]$, toplam yük vektörü $\{R\}$ ve bütün sistem için düğüm noktaları deplasman vektörü $\{r\}$ yine şu şekilde ifade edilir.

$$[K]\{r\}=\{R\} \quad (3.6)$$

Bu eşitlikler uygun eşitlik ilişkilendirilmesi ile geometrik sınır koşulları girilmediği sürece çözülemez.

5.Bilinmeyen deplasmanlar için çözümler

Dört nolu adımda cebirsel toplama yapılmıştır ve bilinmeyen deplasmanlar için bu eşitlikler çözülür. Lineer denge problemlerinde, direkt bir şekilde matris cebir tekniklerinin uygulanması vardır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan analizler için her bir adım için yük vektörleri ve rijitlik matrisleri yeniden oluşturulurlar.

6.Düğüm deplasmanlarından eleman gerilme ve şekil değiştirmelerinin hesaplanması

Sonuçta deplasmanların esas bilinmeyen olarak seçildiği sonlu eleman uygulamaları için problemin genel ifadesi lineer elastik bir ortam için şu şekilde yazılabilir;

$$\pi = \iiint_V dU(u, v, w) - \iiint_V (X_u + Y_v + Z_w) dV - \iint_{S_1} (T_x u + T_y v + T_z w) dS_1 \quad (3.7)$$

Bu eşitlik dış yüklere maruz lineer elastik bir katı cisimdeki iç ve dış kuvvetlerin yaptığı işi gösteren potansiyel enerji ifadesidir. Bu denklemde dU bir fonksiyoneldir ve şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunu göstermektedir. T_x, T_y, T_z terimleri S_1 yüzeyindeki kuvvetleri X, Y, Z ise v hacmindeki cismin kütle kuvvetlerini göstermektedir. Bu denklemdeki dU fonksiyonel matrisi matris formunda şu şekilde yazılabilir.

$$dU = \frac{1}{2} \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (3.8)$$

Bu eşitlikte $\{\epsilon\}^T$ V hacmindeki cismin şekil değiştirme vektörü, $\{\sigma\}$ ise gerilme vektörüdür. Bu eşitlikte gerilme ifadesi şu şekilde yazılabilir;

$$\{\sigma\} = [C] \{\epsilon\} \quad (3.9)$$

Burada $[C]$ bünye matrisidir ve bu ifade hatırlanacağı üzere lineer izotrop ve elastik ortam için gerilme şekil değiştirme ilişkisini açıklayan Hooke yasasıdır. Bu ifade (2.8)'de yerine konursa ve π potansiyel enerji denkleminde tüm ortam için matris formunda ifade edilirse şu şekli alır;

$$\pi = \frac{1}{2} \iiint_V (\{\epsilon\}^T [C] \{\epsilon\} - 2\{u\}^T \{X\}) dV - \iint_{S_1} \{u\} \{T\} dS_1 \quad (3.10)$$

Burada $\{u\}^T$ yüzeydeki yer değiştirme vektörü, $\{X\}$ bünye kuvvetleri vektörü ve $\{T\}$ yüzey kuvvetlerini göstermektedir. $\{\epsilon\}$ ve $\{u\}$ terimleri ise bilinmeyenlerdir. Bunlar sırası ile (3.11a) ve (3.11b) de eleman deplasmanları $\{q\}$ cinsinden ifade edilirse;

$$\{\epsilon\} = [B] \{q\} \quad (3.11a)$$

$$\{u\} = [N] \{q\} \quad (3.11b)$$

Burada [B] matrisi deplasmanları, şekil değiştirmelere dönüştüren deformasyon matrisini, {q} herhangi bir noktada {u} deplasmanlarının düğüm noktasındaki ifadesini ve [N] ise şekil fonksiyonlarını içeren matrisi göstermektedir.

$$\pi = \frac{1}{2} \iiint_V (\{q\}^T [B]^T [C] \{q\} - 2 \{q\}^T [N] \{X\}) dV - \iint_{s_1} \{q\}^T [N] \{T\} dS_1 \quad (3.12)$$

Bu denklemi minimize edecek şekilde varyasyon prensibi uygulanırsa (3.12) denklemi

$$\{\delta q\}^T (\iiint_V [B]^T [C] [B] dV \{q\} - \iiint_V [N]^T \{X\} dV - \iint_{s_1} [N]^T \{T\} dS_1) = 0 \quad (3.13)$$

olarak elde olunur. Düğüm deplasmanlarının {δq} değişimi keyfi olduğundan parantez içindeki ifade sıfıra eşitlenebilir. Bu bir elemanın denge denklemini vermektedir.

$$[k] \{q\} = \{Q_e\} \quad (3.14)$$

Burada [k]'ya eleman rijitlik matrisi denilmektedir ve

$$[k] = \iiint_V [B]^T [C] [B] dV \quad (3.15)$$

şeklindedir. {Q_e} ise düğüm yükleri vektörüdür ve

$$\{Q_e\} = \iiint_V [N]^T X dV + \iint_{s_1} [N]^T \{T\} dS_1 \quad (3.16)$$

şeklindedir. Burada çıkarılan bağıntılar tüm ortam için bir araya getirilirse

$$[K] \{q\} = \{Q\} \quad (3.17)$$

elde olunur. Burada $[K]$ tüm ortamın(sistem) rijitlik matrisi ve $\{Q\}$ tüm sisteme etki eden yük vektörünü göstermektedir. Bunlar;

$$[K] = \sum_{e=1}^n [k] \quad (3.18a)$$

$$\{Q\} = \sum_{e=1}^n \{Q_e\} \quad (3.18b)$$

şeklindedir.

Yukarıdaki sonlu elemanlar yöntemi uygulaması $[N]$ şekil fonksiyonunun eleman koordinatları cinsinden ifadesini esas almaktadır. Bu durum yöntemin sistematik olarak formülasyonunu kolaylaştırmakta, boyutsuz parametrelerle işlem yapılmaktadır. $[N]$ şekil fonksiyonları sonlu eleman tipine göre (çubuk, dörtgen, dört yüzlü vb.) tayin edilmektedir. Bu fonksiyonlar sınır koşullarını sağlayacak şekilde seçilmektedir. Bu fonksiyonlar deplasman fonksiyonu olarak kullanılmakla birlikte sistemin geometrisinin tanımlanması için de kullanılıyorsa o zaman bu yaklaşıma "izoparametrik eleman" yaklaşımı denilmektedir. Bu yöntem hesapları kolaylaştırmakta ve de işlemleri azaltmaktadır.

3.3 LUSAS Programı

Bu çalışmada kazık ve kazıklı radye davranışını analiz etmek için Lusas (London University Structural Analysis System) adında profesyonel maksatlar için geliştirilen bir sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu program grafik bilgi girişine olanak tanıyan ve aynı zamanda analiz sonuçlarını grafik olarak sergileyebilen MYSTRO denilen bir programda içermektedir. Bu programın çözüm yapabildiği konuları listelemek istersek;

- Lineer statik analiz
- Non lineer statik analiz
- Lineer dinamik analiz
- Non lineer dinamik analiz
- Spektral davranış analizi
- Harmonik davranış analizi
- Fourier analizi
- Kararlı durum arazi analizi

- Krip analizi
- Doğal frekans analizi
- Bükülme analizi
- Sızma analizi
- Birleşik termo-mekanik analiz

Ayrıca bu program içerisinde yer alan bünye modelleri;

- Lineer izotrop/ortotrop/anizotrop
- Non lineer beton
- Hasar
- 2D ve 3D arayüzey
- Kompozit/tabakalı
- Elasto-plastik izotrop/anizotrop
- Krip
- İzotropik arazi
- Ortotropik arazi
- Gaz hareketi/radyasyon
- Kullanıcının tanımladığı non lineer, krip, hasar

Ve son olarak ta içerdiği eleman tiplerini de tanımlamak gerekirse;

- Çubuklar
- Kirişler
- 2D ortam
- 3D ortam
- Plak
- Kabuklar
- Membranlar
- Düğüm Noktası
- Arazi

elemanlarıdır.

4.TEK KAZIK İÇİN YAPILAN NÜMERİK ÇALIŞMALAR

Bu bölümde homojen lineer elastik bir zemin ortamında yeralan bir kazığın sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Bu sonlu eleman modeli üzerinde çeşitli parametrik çözümler yapılarak tek kazıktaki kazık zemin arası yük aktarma mekanizması belirlenecektir. Burada tek kazıkla ilgili parametrik çalışmalara geçmeden önce çözümlerlerde kullanılacak en uygun eleman yani en doğru çözümü en kısa zamanda veren eleman tipinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.1 Eleman Tipinin Belirlenmesi

Bunun için çeşitli eleman tiplerinin ele alındığı iki boyutlu (aksisimetrik) ve üç boyutlu çözümler yapılmış ve en uygun model saptanmıştır. Bu ön çalışmaların sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Buradan anlaşılabilecek üzere iki boyutlu aksisimetrik çözümler için kullanılabilecek QAX8 diye adlandırılmış olan 8 düğüm noktalı dörtgen eleman çözümlerlerde en uygun elemandır.

Çizelge 4.1 Tek kazık için uygun modelin seçimi

Eleman sayısı	Nokta sayısı	Eleman tipi	Puç (kN/m ²)	Pçevre (kN/m ²)	Ptoplaml (kN/m ²)	Puygu. (kN/m ²)	Ptop./Puy. (%)
640	861	HX8	71.50	274.44	345.94	414.5	83.46
✓ 640	3193	HX20	8.35	429	437.35	414.5	105.51
✓ 400	1281	QAX8	8.13	420.83	429.00	414.5	103.5
400	2011	HX20	95.00	368.90	463.90	414.5	111.92
400	546	HX8	62.20	234.76	296.96	414.5	71.64

Bölüm 2'de sıkça bahsi geçen parametreler yapılan tek kazık çözümlerinde kullanılmıştır. Kısaca bu parametreleri belirtmek gerekirse,

- L, Kazık boyu
- d, Kazık çapı

- E_p , Kazık elastisite modülü
- E_s , Çevre zeminin elastisite modülü
- $K = E_p / E_s$, Relatif kazık rijitliği
- E_b / E_s , Uç zeminin elastisite modülünün çevre zemini elastisite modülüne oranı
- L/d , Relatif kazık boyudur.

Bu parametreler ışığında bu bölümde yapılan çözümler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

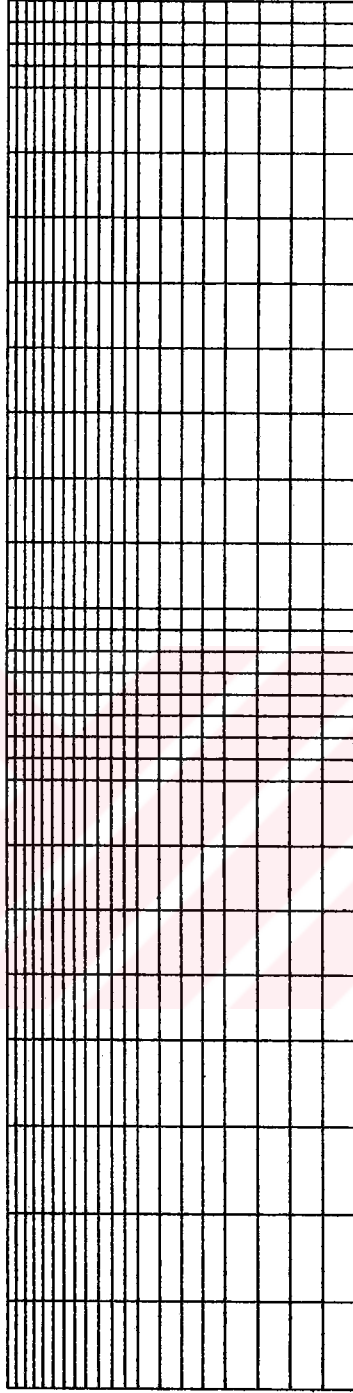
Bu yapılan çözümlerin hepsi aşırı konsolide olmayan kil ortamındaki tek kazığın drenajsız koşullardaki davranışını çözümlmek amacı ile yapılmıştır. Bütün çözümlerlerde lineer elastik bünye davranışı kullanılmıştır. Burada çözümlerde değişmeyen parametre Poisson oranı olup kazık ve zemin için 0.3 alınmıştır.

4.2 Tek Kazık İçin Kullanılan Sonlu Eleman Modelleri

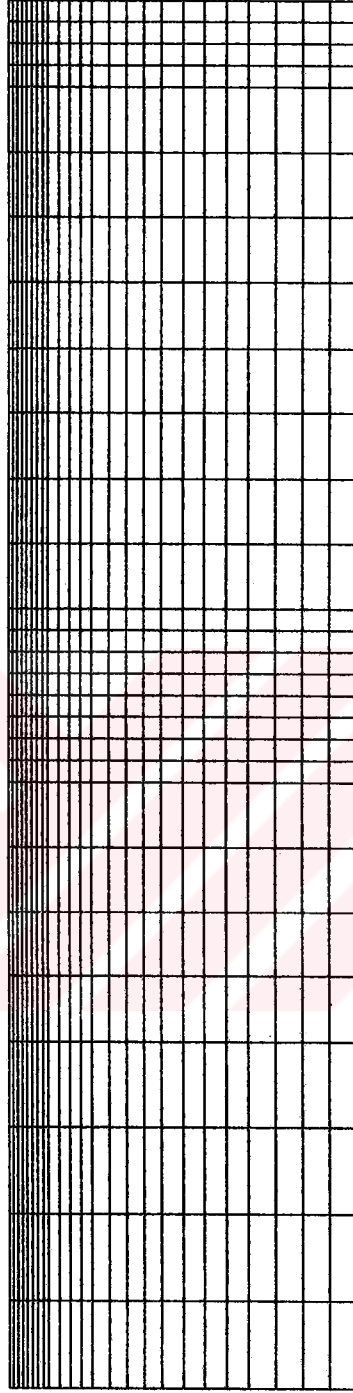
Çizelge 4.2'de görüleceği gibi üç farklı relatif boy seçilmiş olup bunlar için üç ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Bunlar Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.4 ve 4.5'te sırası ile yükleme ve sınır şartları model 1 için gösterilmiştir. Şekil 4.6'da ise model 1 ile yapılmış olan çözümde elde edilen deplasmanların vektörel dağılımı verilmiştir.

Çizelge 4.2 Tek kazık için yapılmış olan parametrik çözümlerin listesi

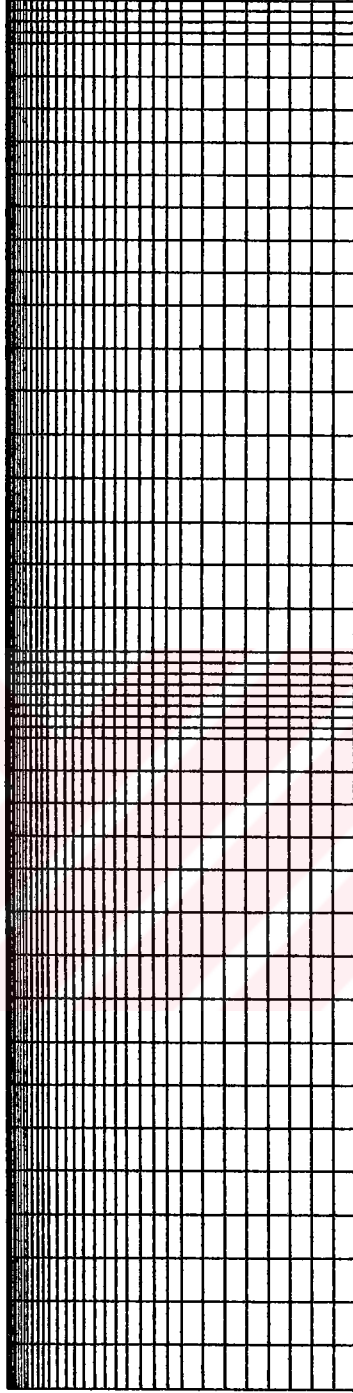
MODEL	d(m)	L(m)	L/d	E_p / E_s	E_b / E_s	Eleman Sayısı	Düğüm N. Sayısı
1	0.8	8	10	10	1	560	1777
1	0.8	8	10	100	1	560	1777
1	0.8	8	10	1000	1	560	1777
1	0.8	8	10	10000	1	560	1777
1	0.8	8	10	10	10	560	1777
1	0.8	8	10	100	10	560	1777
1	0.8	8	10	1000	10	560	1777
1	0.8	8	10	10000	10	560	1777
1	0.8	8	10	10	100	560	1777
1	0.8	8	10	100	100	560	1777
1	0.8	8	10	1000	100	560	1777
1	0.8	8	10	10000	100	560	1777
2	0.8	16	20	10	1	672	2121
2	0.8	16	20	100	1	672	2121
2	0.8	16	20	1000	1	672	2121
2	0.8	16	20	10000	1	672	2121
2	0.8	16	20	10	10	672	2121
2	0.8	16	20	100	10	672	2121
2	0.8	16	20	1000	10	672	2121
2	0.8	16	20	10000	10	672	2121
2	0.8	16	20	10	100	672	2121
2	0.8	16	20	100	100	672	2121
2	0.8	16	20	1000	100	672	2121
2	0.8	16	20	10000	100	672	2121
3	0.8	32	40	10	1	1408	4377
3	0.8	32	40	100	1	1408	4377
3	0.8	32	40	1000	1	1408	4377
3	0.8	32	40	10000	1	1408	4377
3	0.8	32	40	10	10	1408	4377
3	0.8	32	40	100	10	1408	4377
3	0.8	32	40	1000	10	1408	4377
3	0.8	32	40	10000	10	1408	4377
3	0.8	32	40	10	100	1408	4377
3	0.8	32	40	100	100	1408	4377
3	0.8	32	40	1000	100	1408	4377
3	0.8	32	40	10000	100	1408	4377



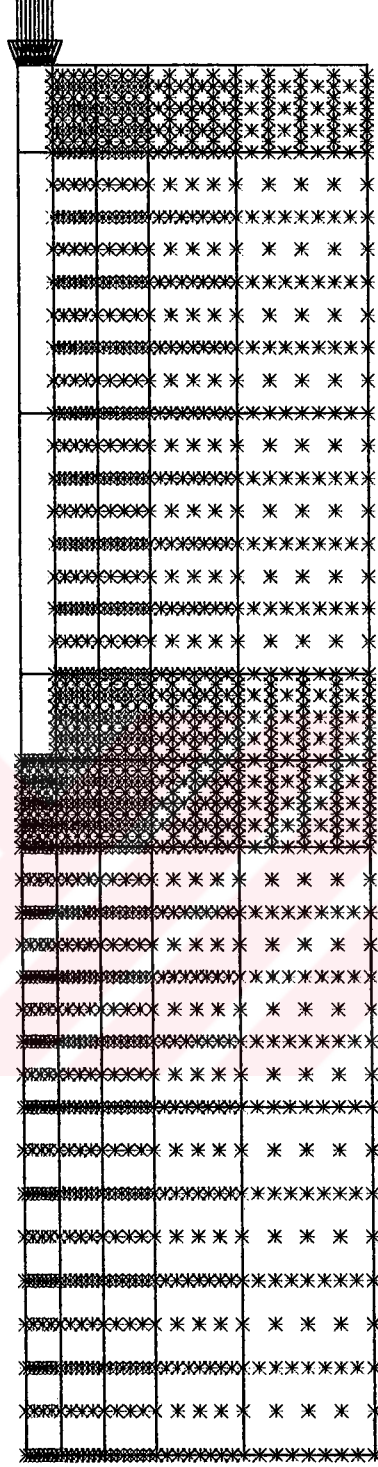
Şekil 4.1 Model 1' de kullanılan sonlu eleman modeli



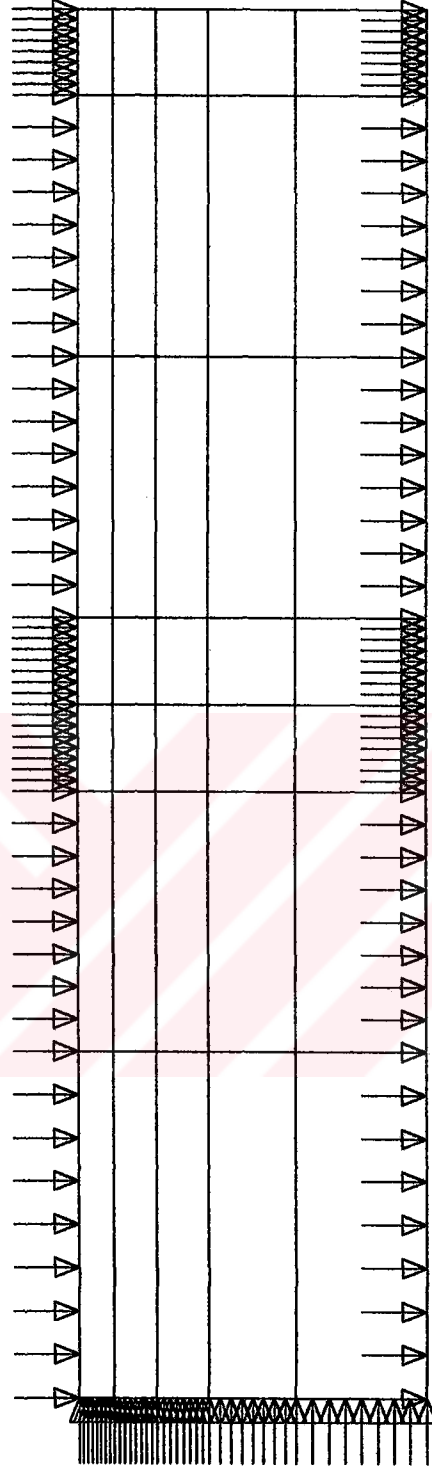
Şekil 4.2 Model 2 ' de kullanılan sonlu eleman modeli



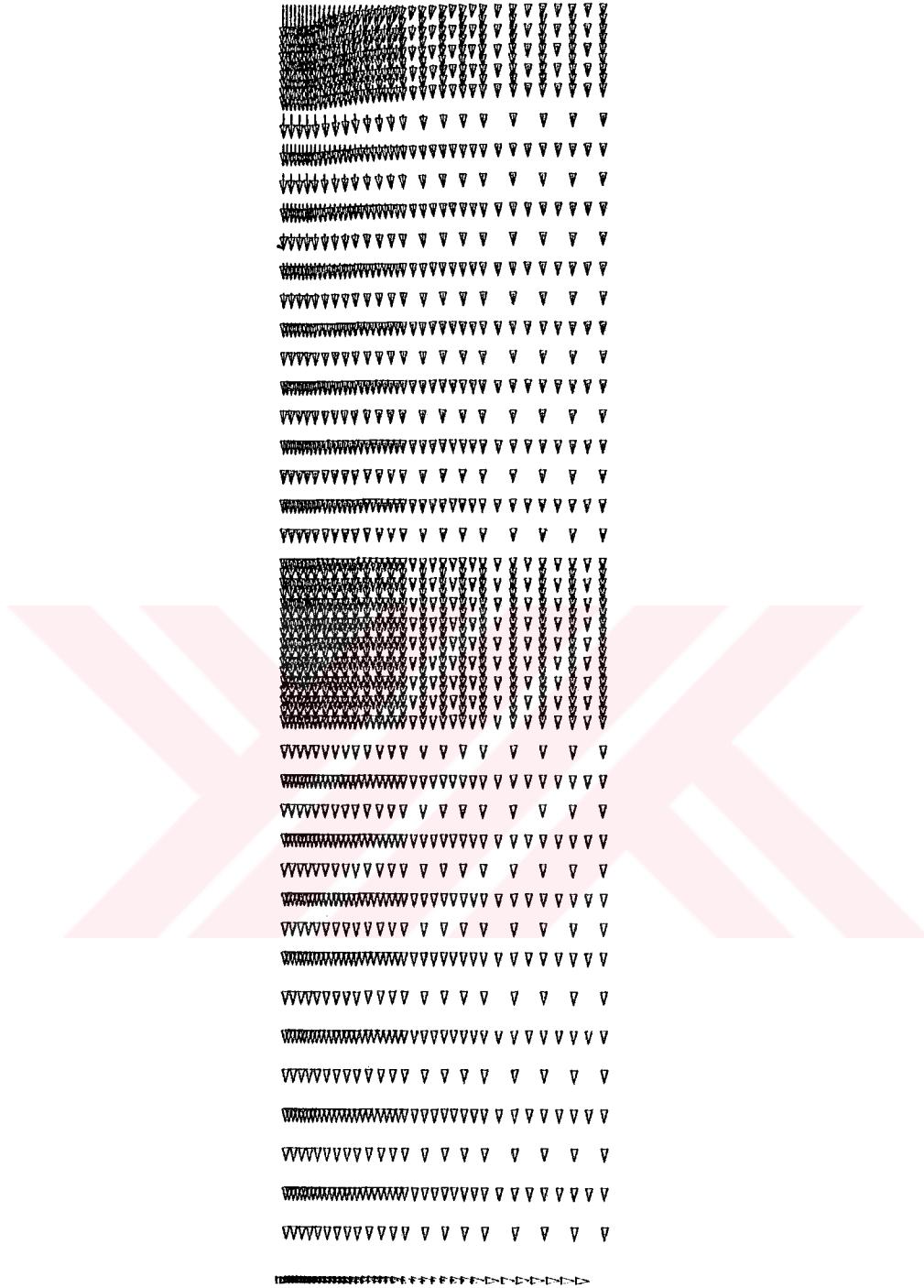
Şekil 4.3 Model 3 ' te kullanılan sonlu eleman modeli



Şekil 4.4 Model 1 için yapılmış olan yüklemelerin gösterimi



Şekil 4.5 Model 1 için kullanılan sınır şartlarının gösterimi

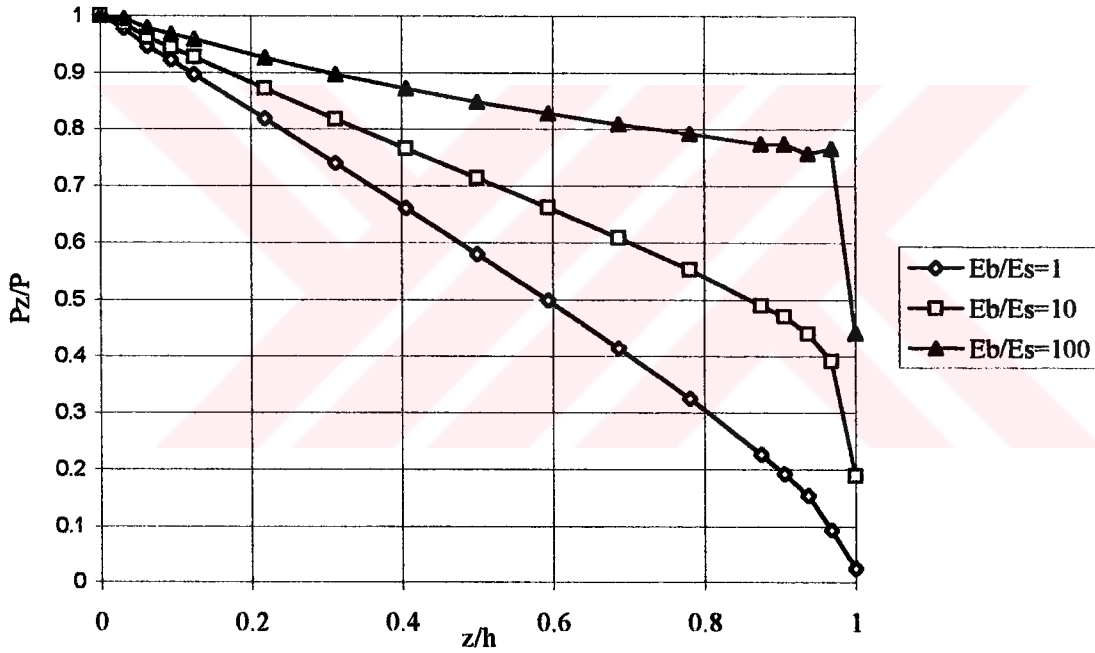


Şekil 4.6 Model 1' de yükleme sonrası deplasman vektörleri

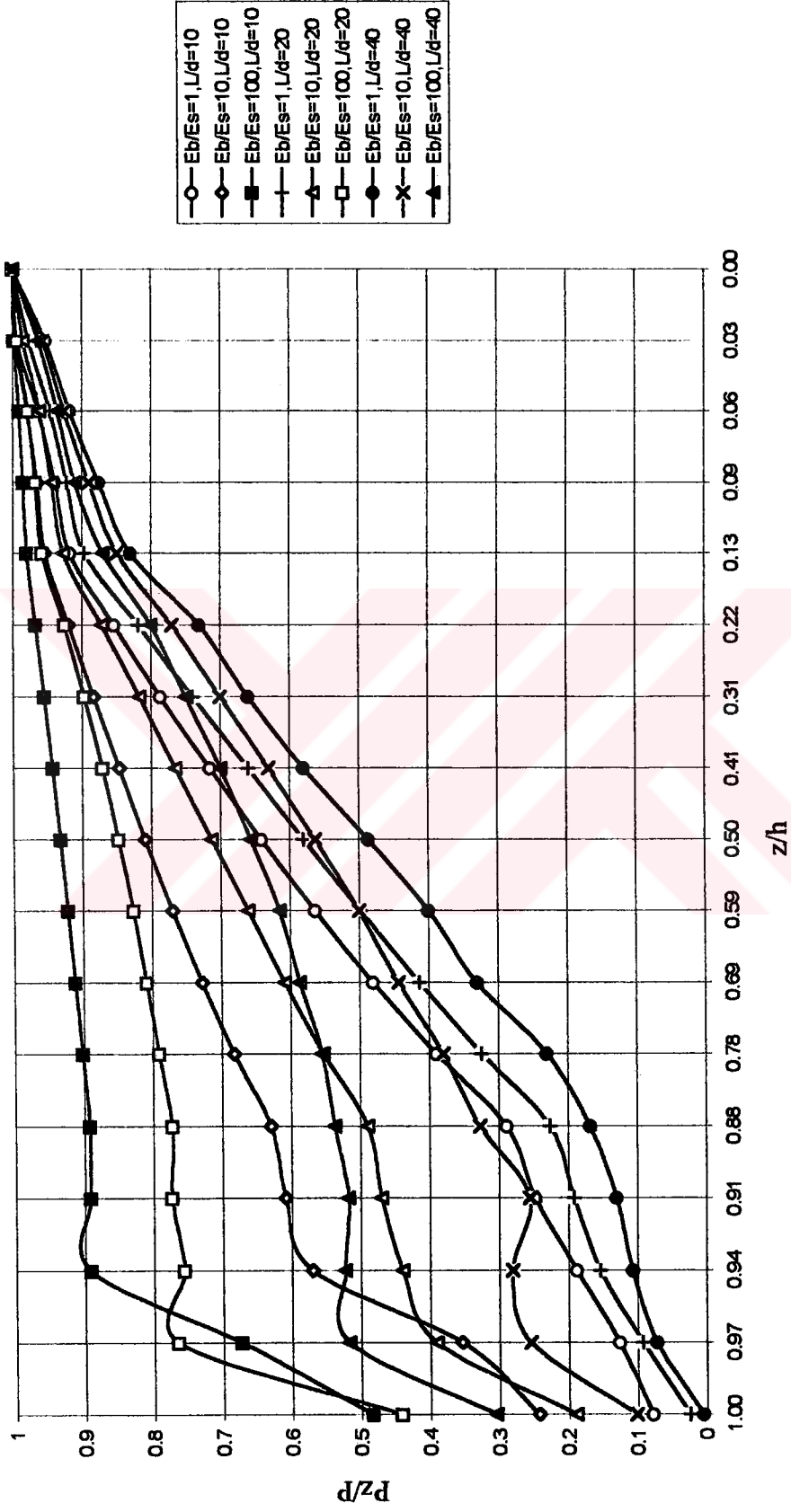
4.3 Tek Kazık Analizi Sonuçları

Tek kazık analizlerinde yukarıda belirtilen parametreler ile elde edilen sonuçlar, tek kazığın yük aktarma mekanizmasını tanımlamak için aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

İlk olarak, Şekil 4.7' de görüleceği gibi pratikte çok karşılaşılan relatif boy ve rijitliğe sahip ($L/d=20$, $E_p / E_s =1000$) kazıkta, değişen uç zemin rijitlikleri için düşey gerilmenin derinlikle değişimi verilmiştir. Şekil 4.8'de ise relatif kazık rijitliğinin 1000 olması durumunda kazık düşey gerilmesinin derinlikle değişimi kazık ucu zemin elastisite modülünün kazık çevre zemini elastisite modülüne oranına ve relatif kazık boyuna göre değişimi verilmiştir.

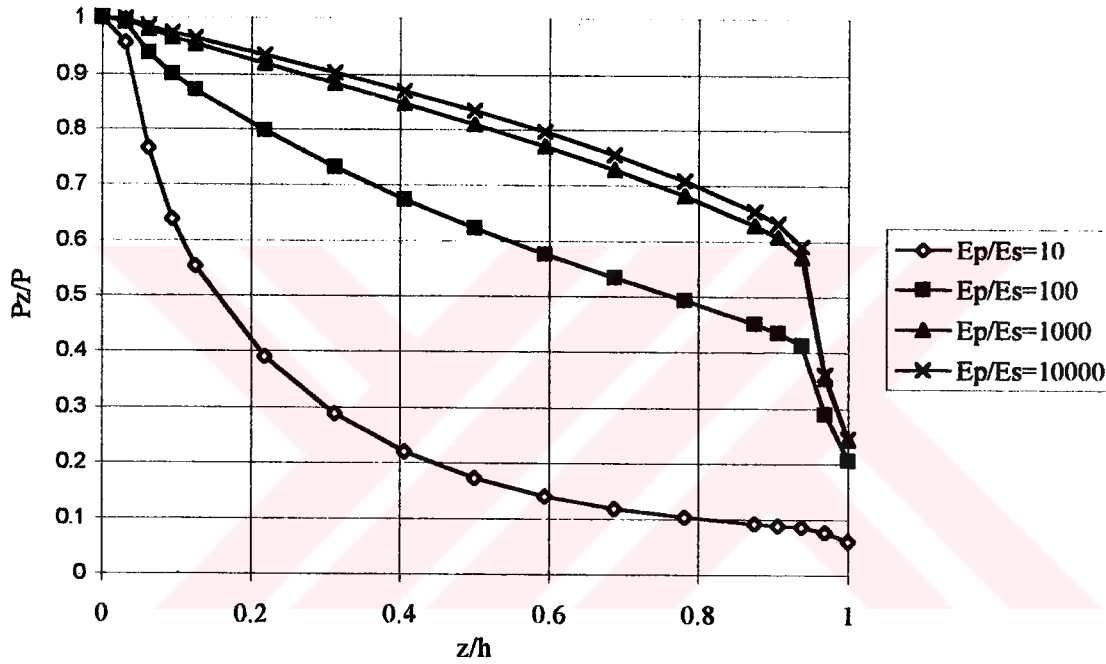


Şekil 4.7 Tek kazıktaki derinlikle düşey gerilme dağılımının uç taşıma zemini rijitliği ile olan değişimi

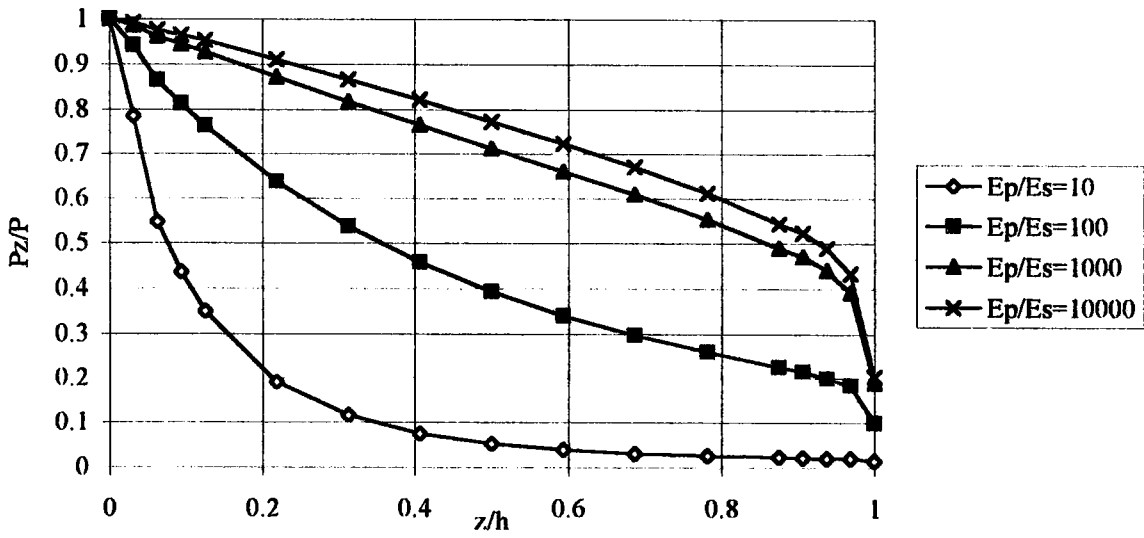


Şekil 4.8 Kazık boyunca düşey gerilmenin derinlikle değişimi ($K=1000$)

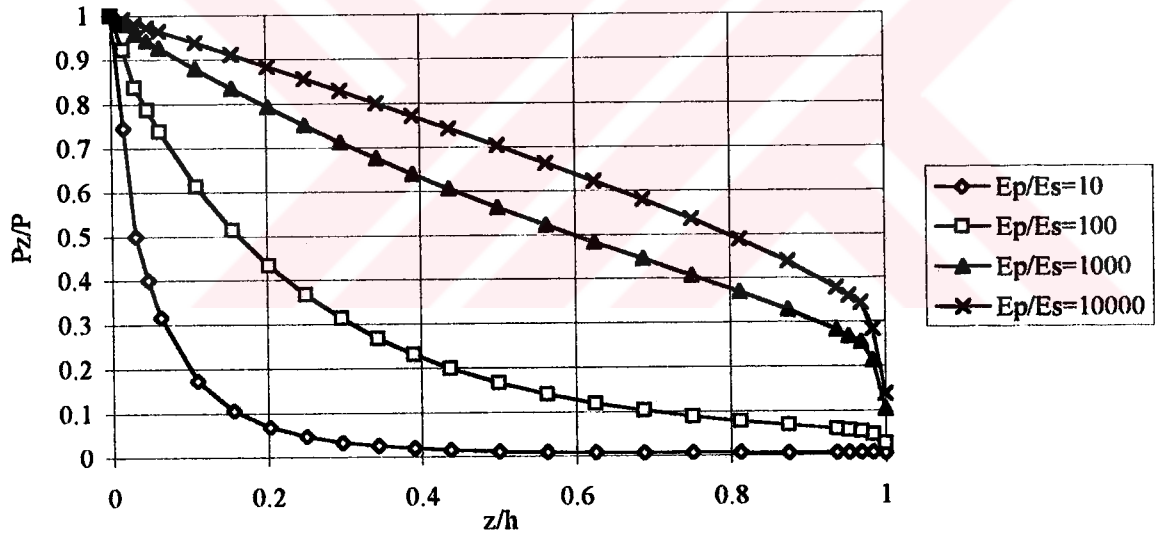
Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11' de kazıktaki düşey gerilmenin derinlikle değişimi değişen relatif kazık boyları için verilmiştir. Şekil 4.12'de bütün parametrelerin gözönünde bulundurulduğu uç taşıma oranının relatif kazık rijitliğine bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.13, 14, 15' te $L/d=10, 20$ ve 40 için kazık boyunca düşey gerilme değişiminin relatif kazık rijitliği ve kazık ucu zemininin çevre zemininin elastisite modülüne oranına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24'te $L/d=10, 20$ ve 40 için kazık çevresi boyunca kayma gerilmesi değişimleri relatif kazık rijitliğine ve kazık ucu zeminin çevre zemininin elastisite modülüne oranına bağlı değişimi verilmiştir.



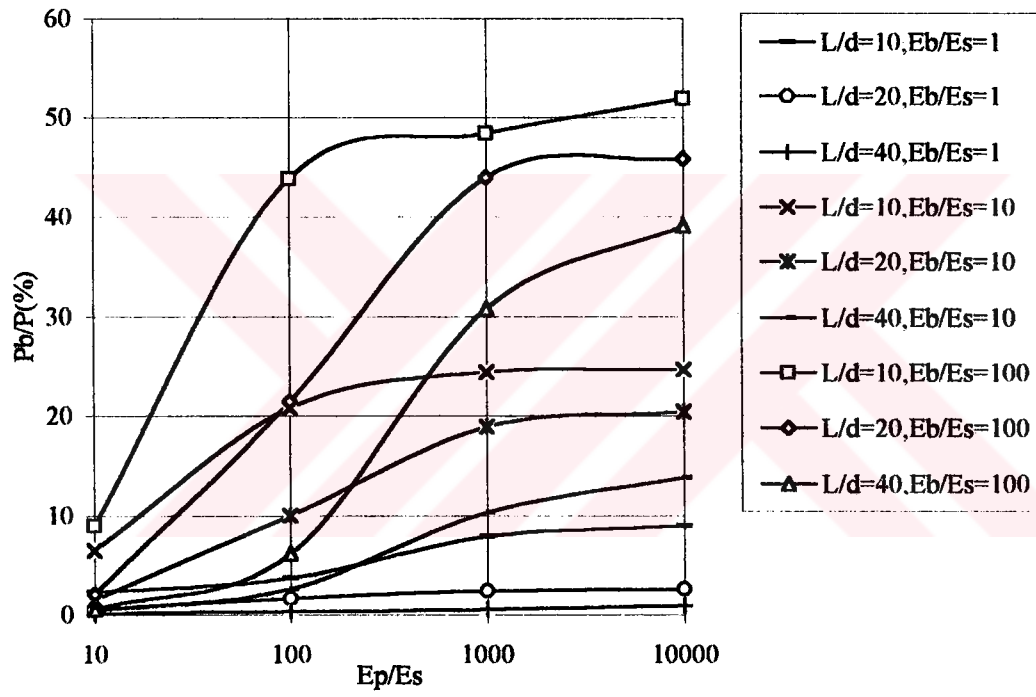
Şekil 4.9 Tek kazıktaki düşey gerilme dağılımının relatif kazık rijitliği ile olan ilişkisi
($E_p/E_s=10, L/d=10$)



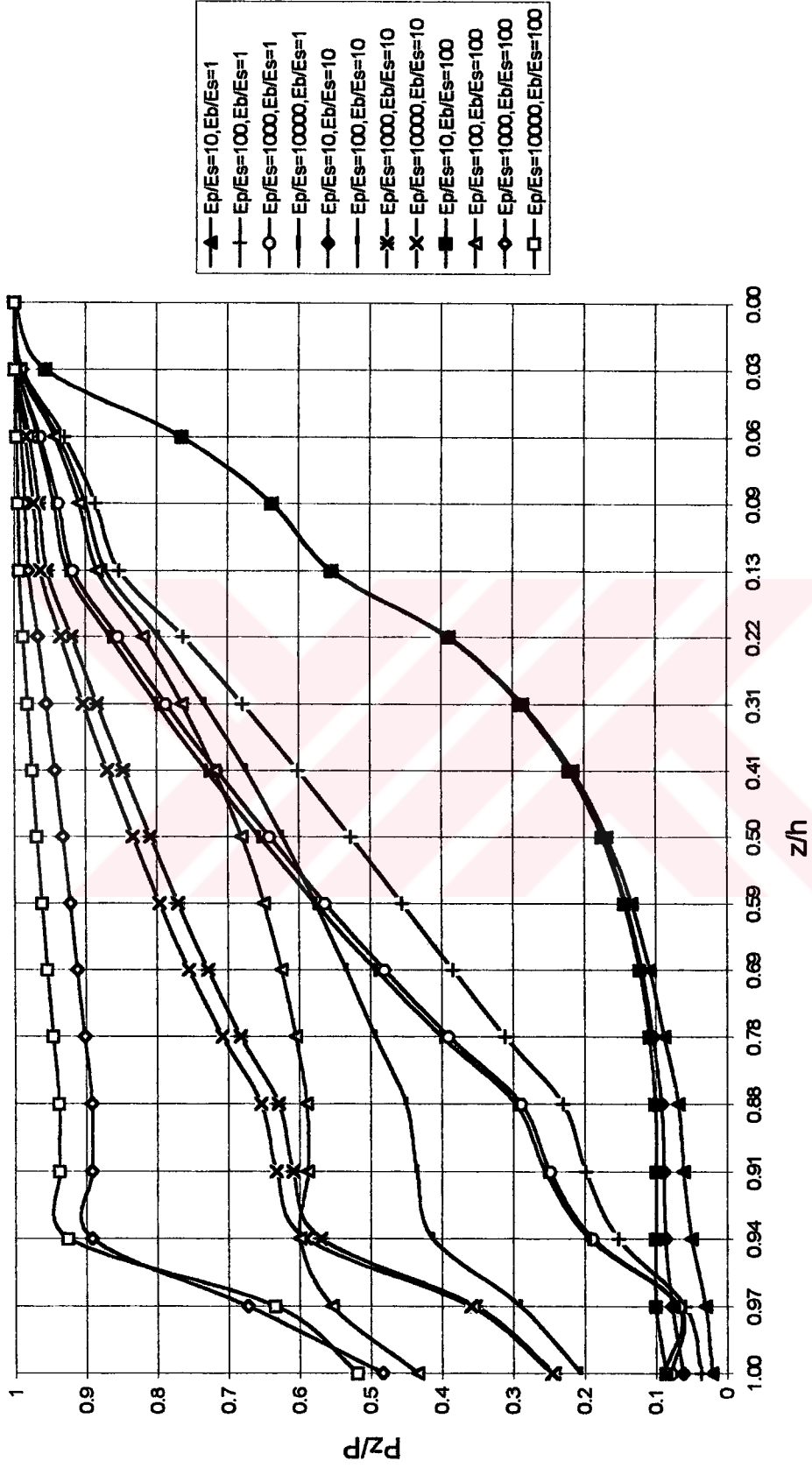
Şekil 4.10 Tek kazıkta düşey gerilme dağılımının relatif kazık rijitliği ile olan ilişkisi ($E_b / E_s = 10$, $L/d=20$)



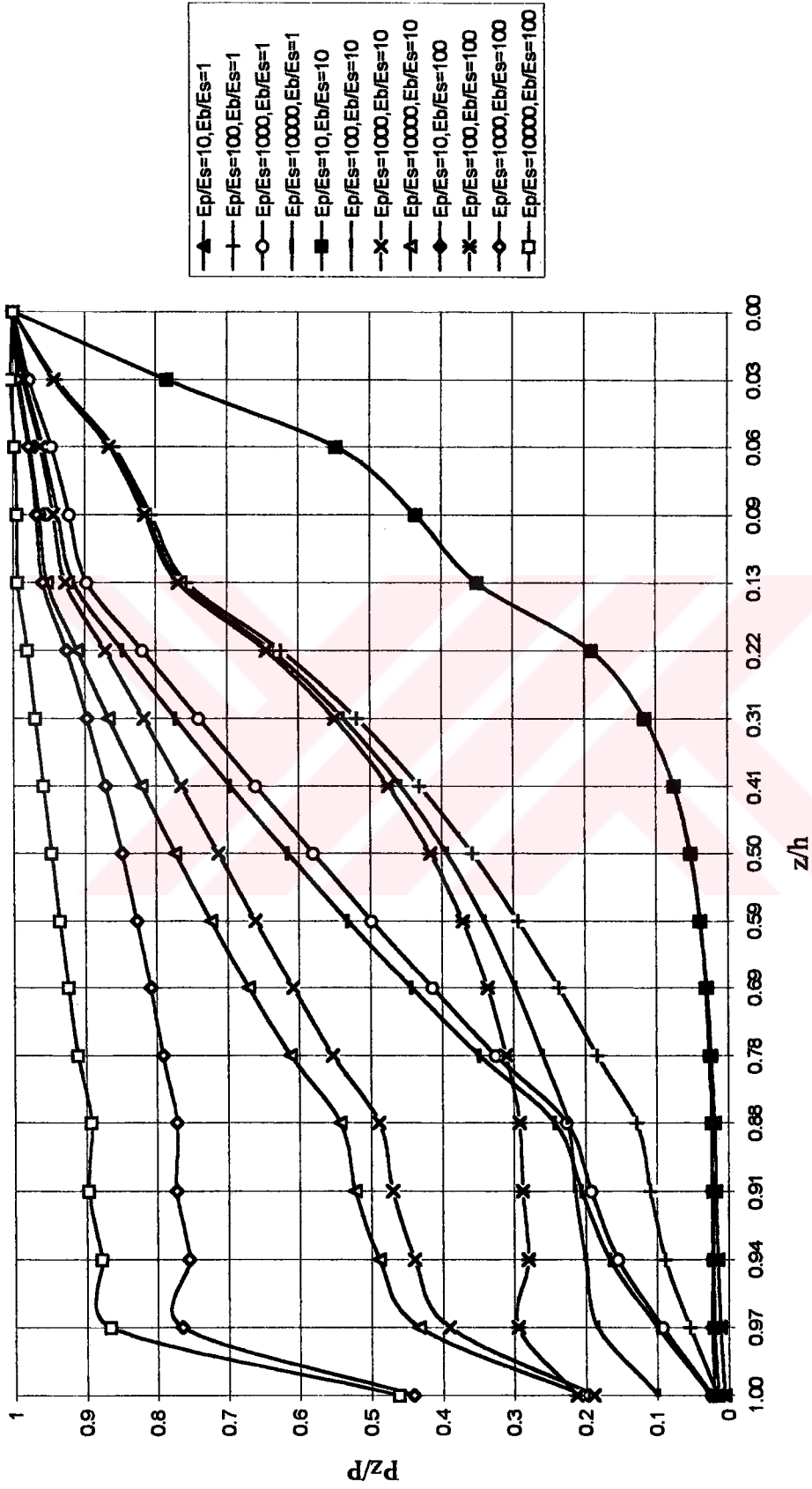
Şekil 4.11 Tek kazıkta düşey gerilme dağılımının relatif kazık rijitliği ile olan ilişkisi ($E_b / E_s = 10$, $L/d=40$)



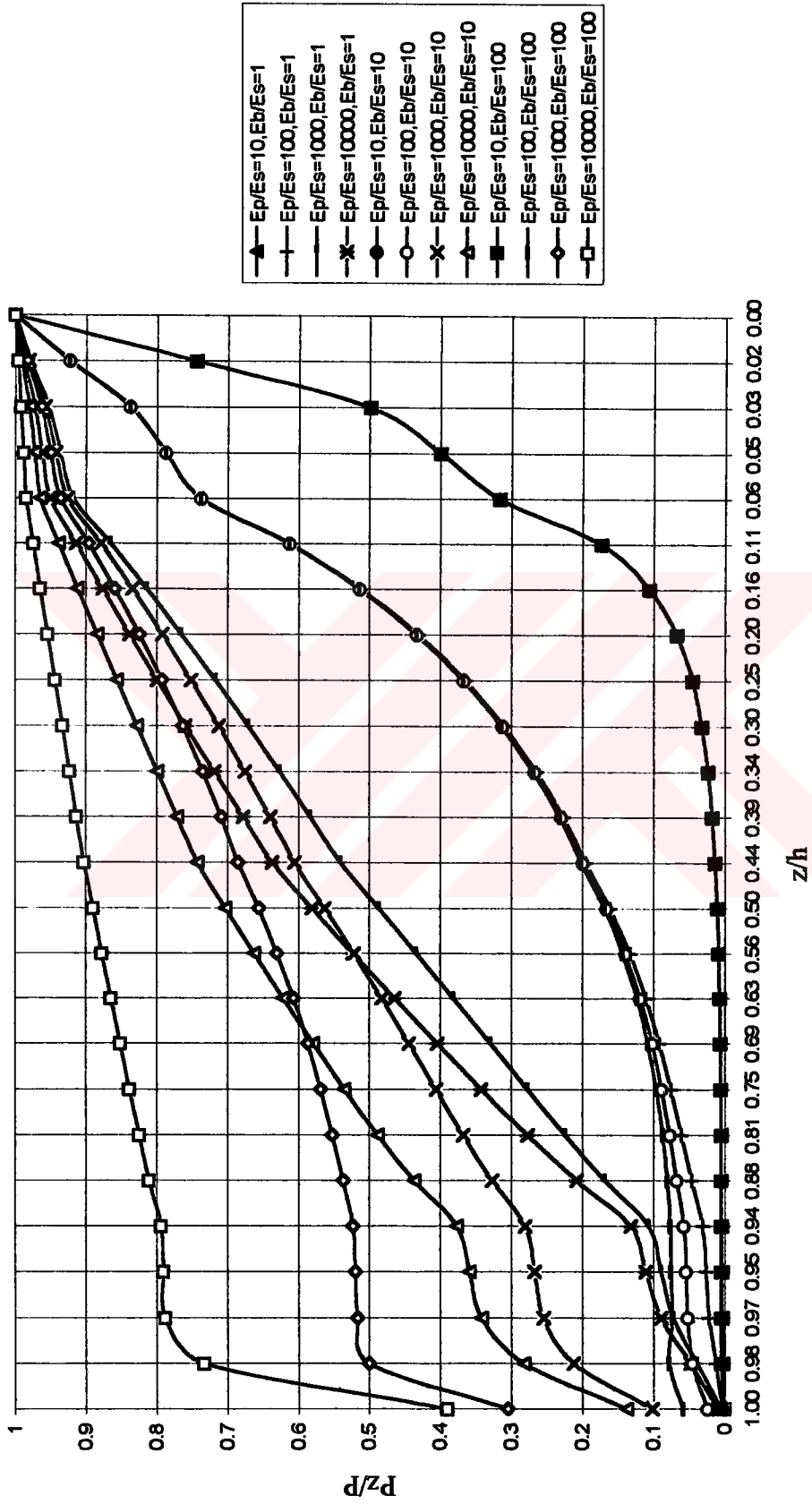
Şekil 4.12 Tek kazıkta uç taşıma gücünün bütün parametrelerin ışığında değerlendirilmesi



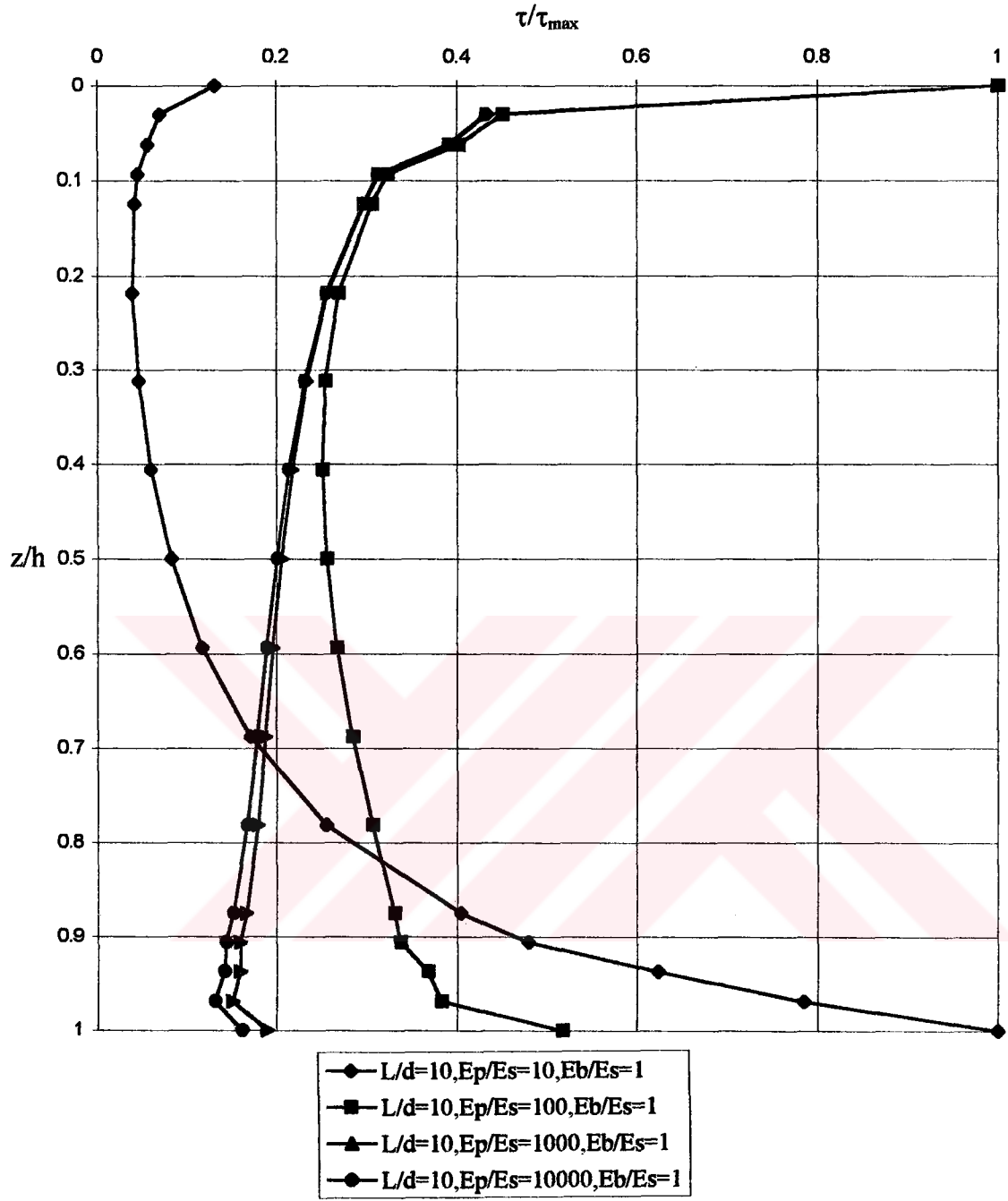
Şekil 4.13 $L/d=10$ için kazık boyunca düşey gerilme değişimi



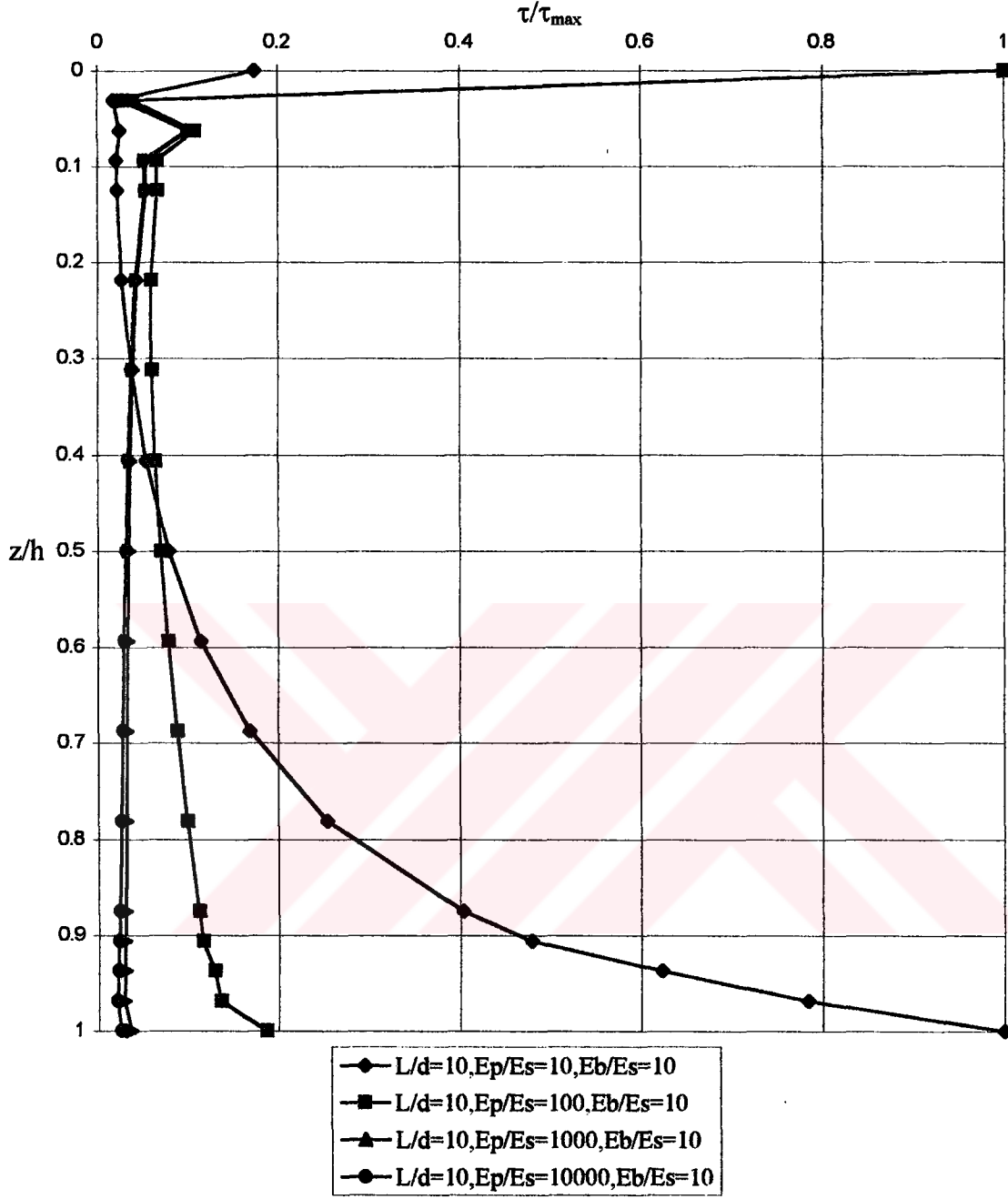
Şekil 4.14 $L/d=20$ için kazık boyunca düşey gerilme değişimi



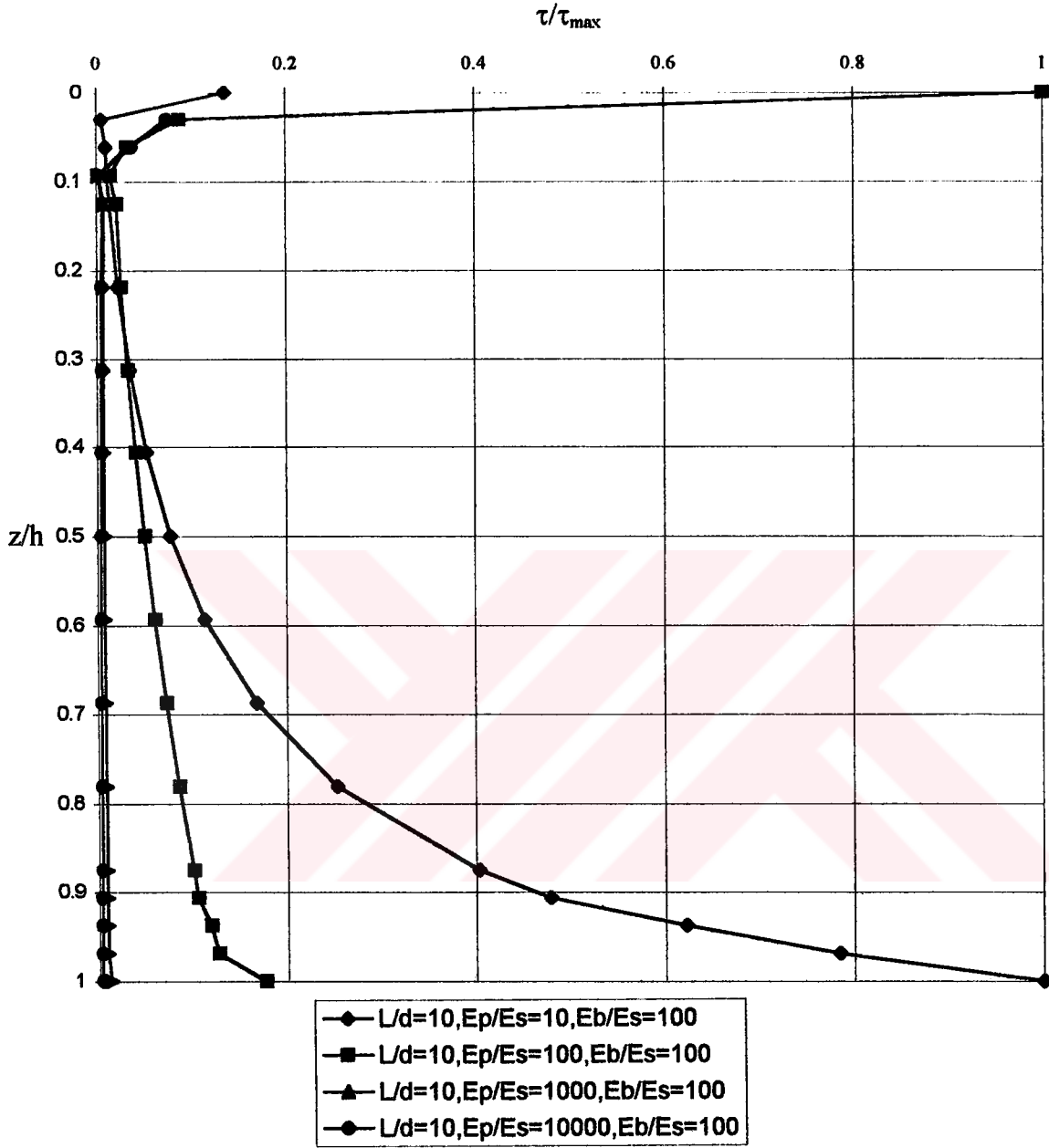
Şekil 4.15 $L/d=40$ için kazık boyunca düşey gerilme değişimi



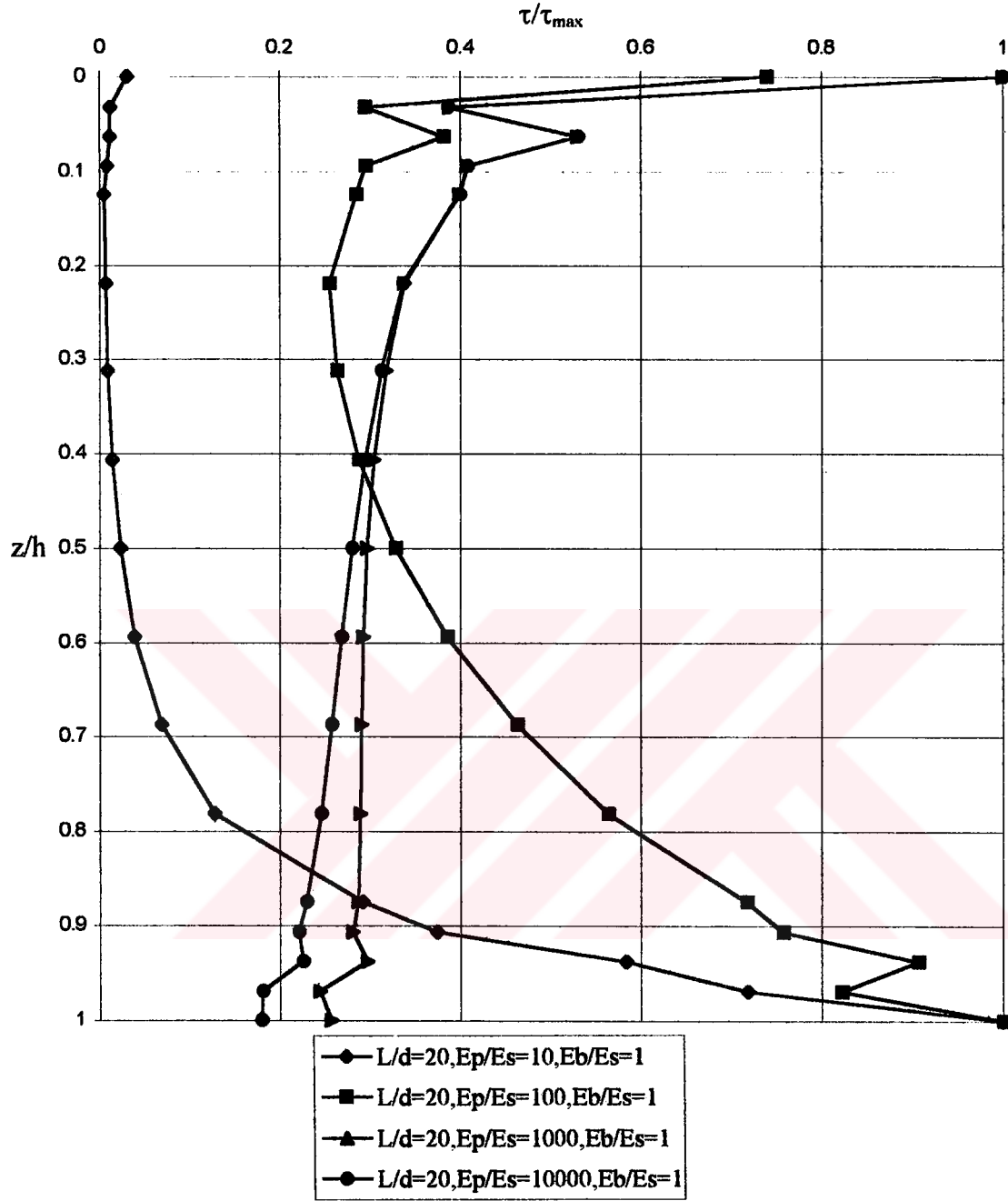
Şekil 4.16 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=10, E_b/E_s=1$)



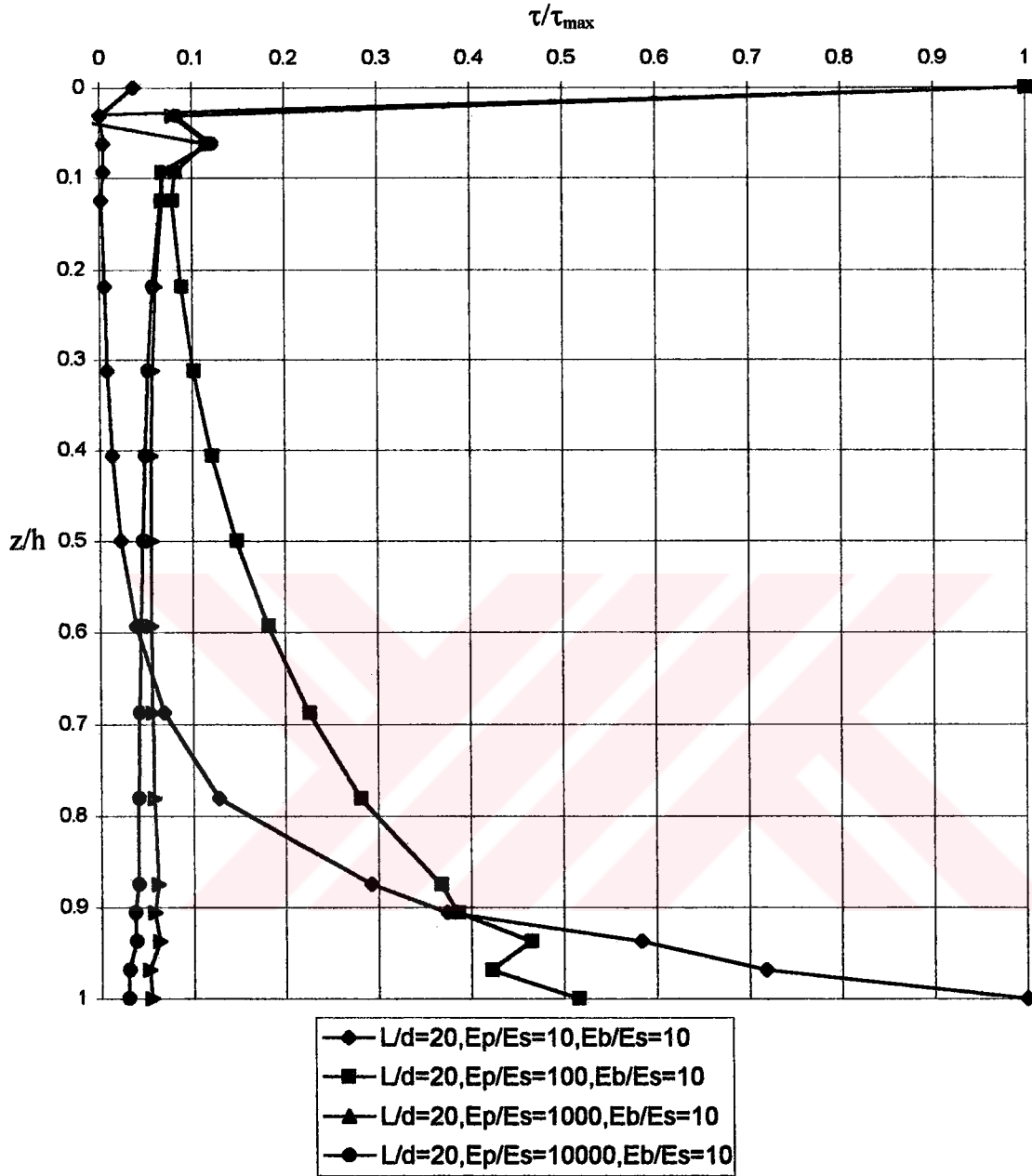
Şekil 4.17 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=10$, $E_b/E_s=10$)



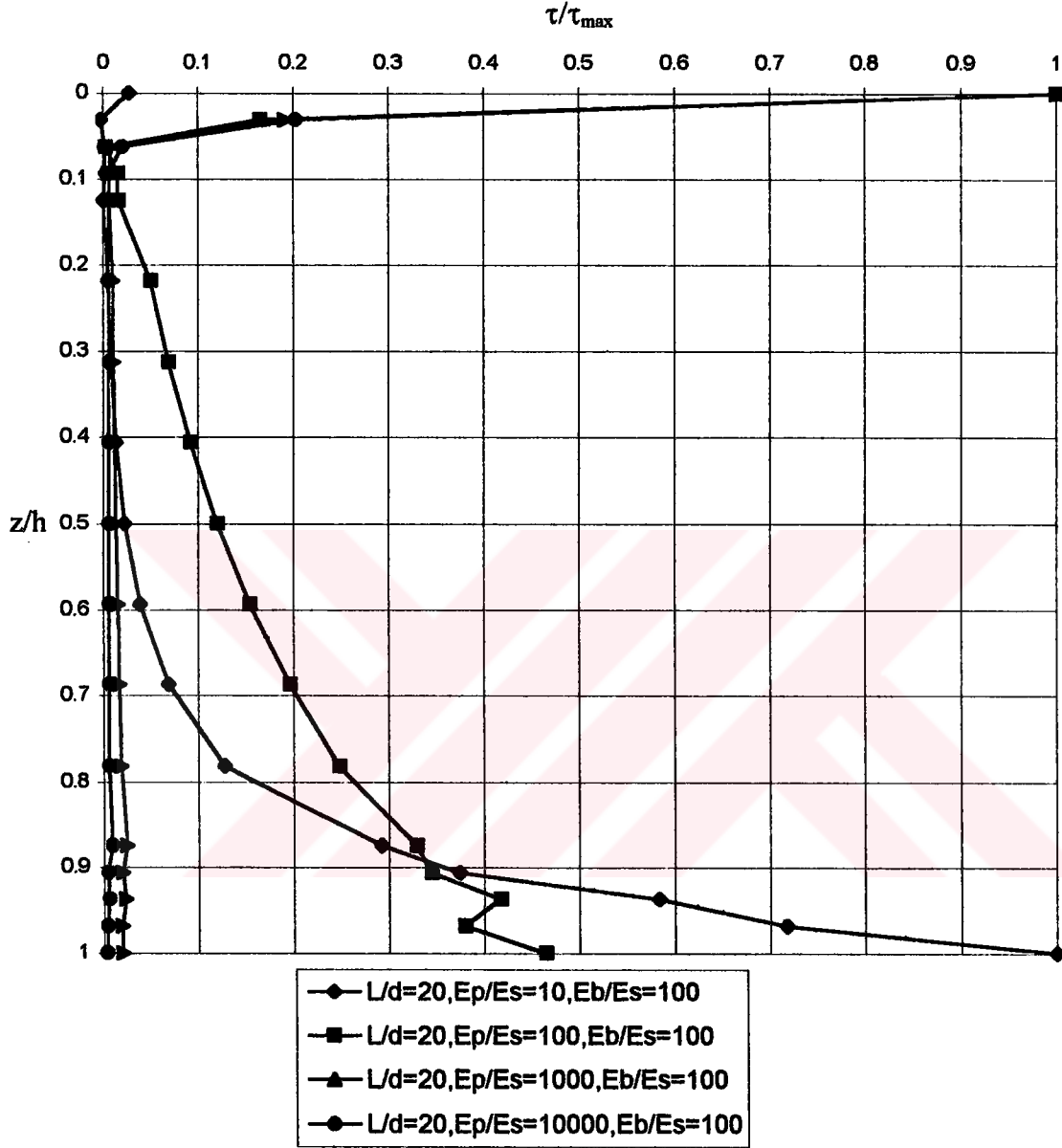
Şekil 4.18 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=10$, $E_b/E_s=100$)



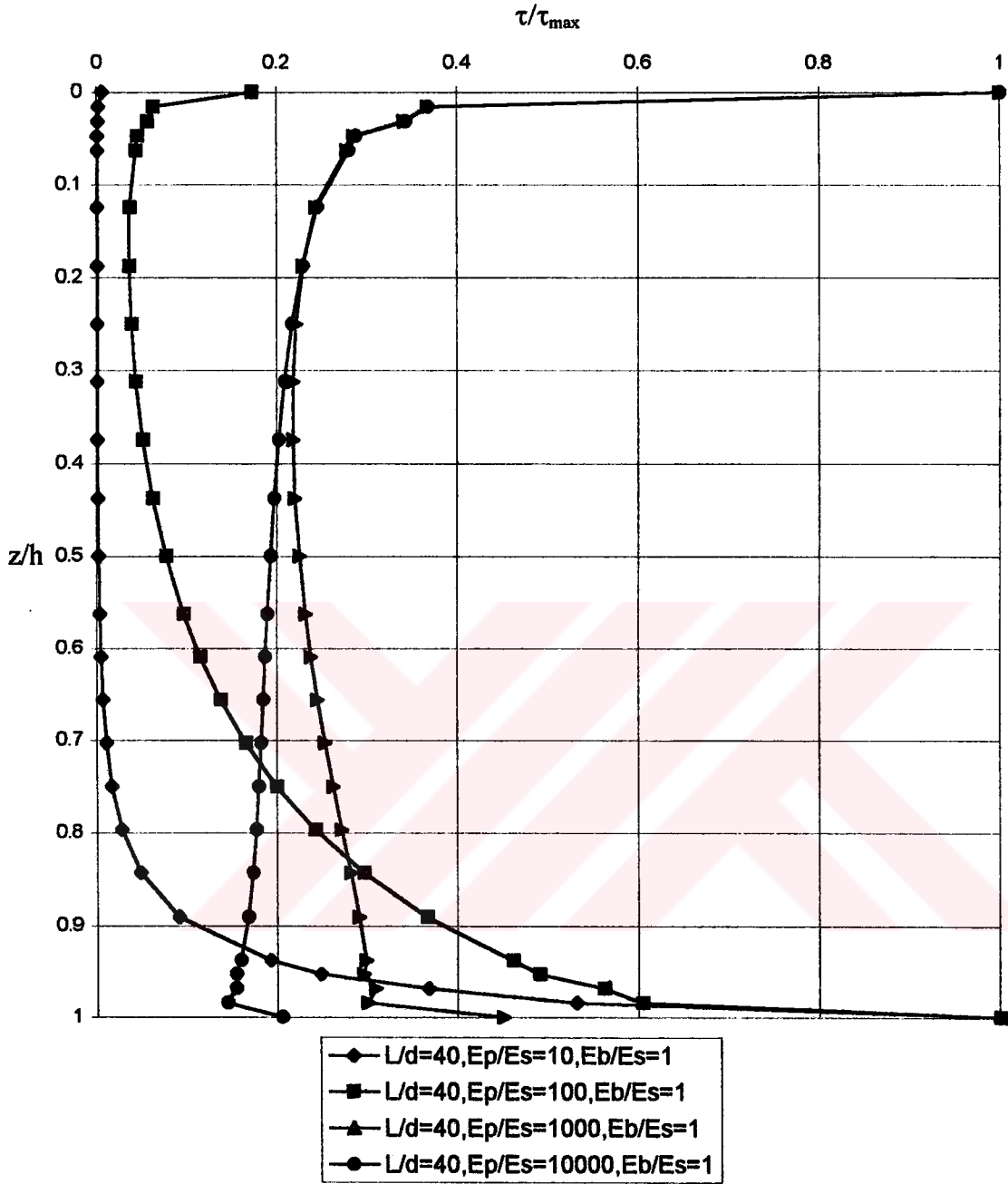
Şekil 4.19 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=20$, $E_b/E_s=1$)



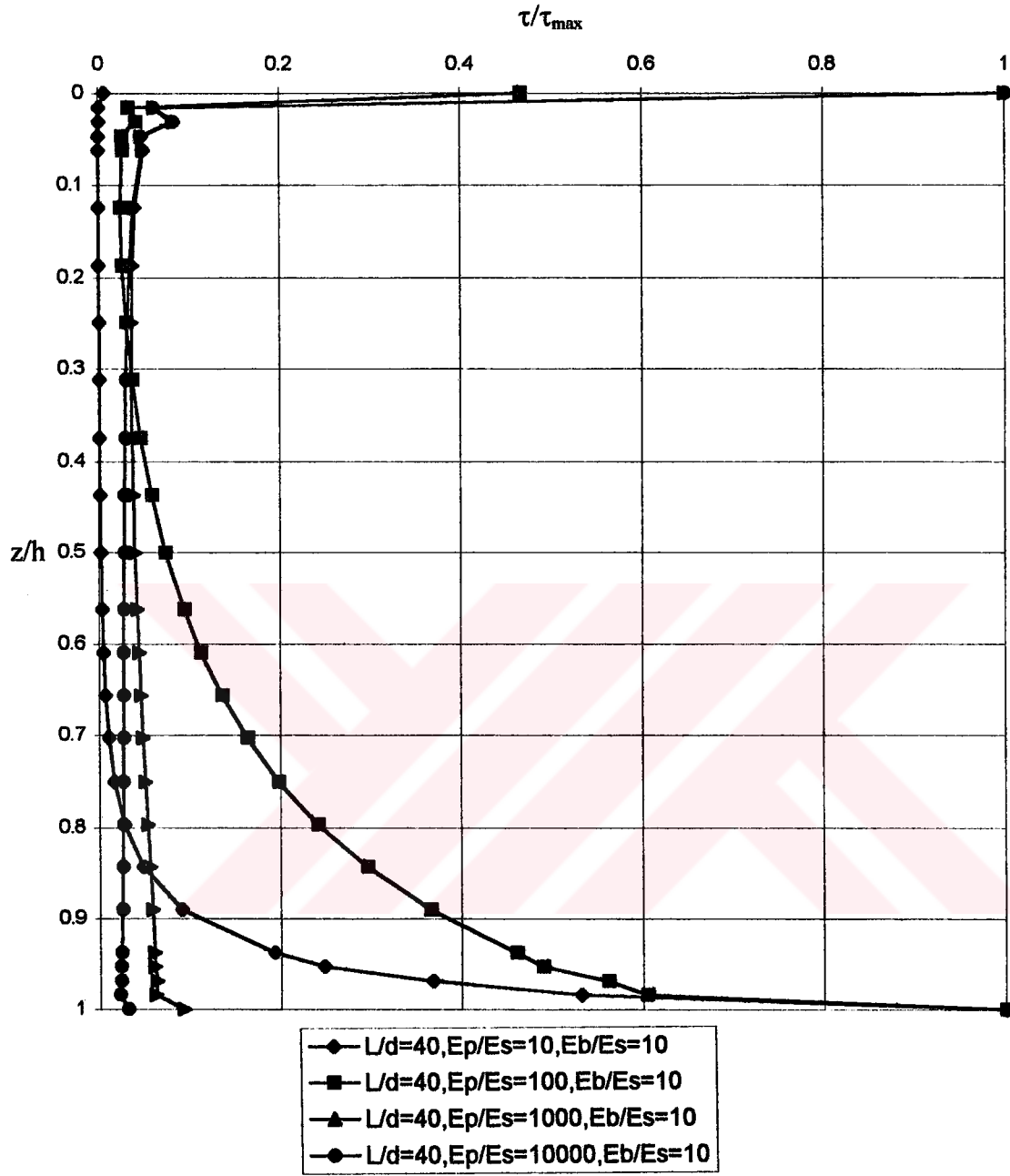
Şekil 4.20 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=20$, $E_b/E_s=10$)



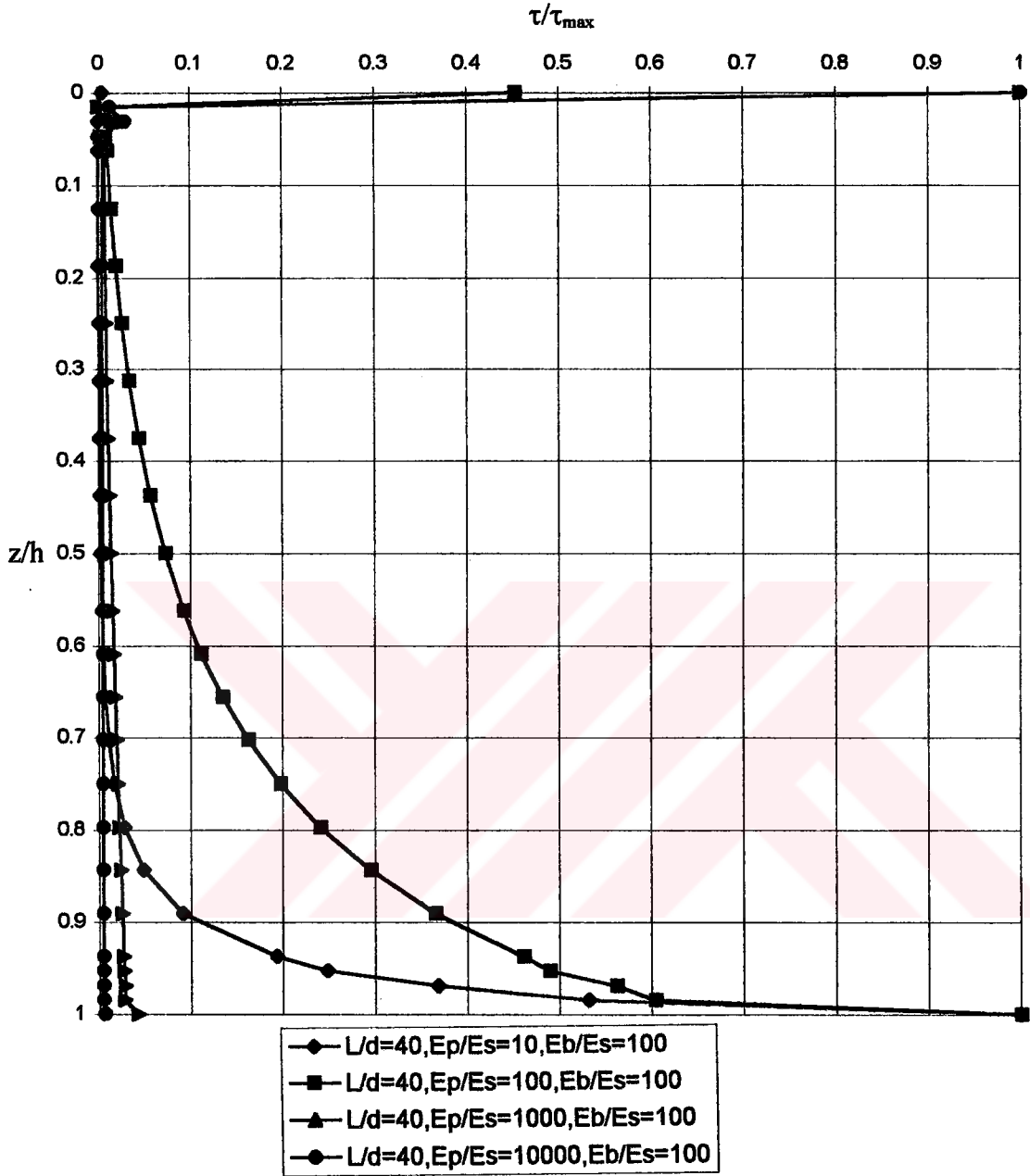
Şekil 4.21 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=20$, $E_b/E_s=100$)



Şekil 4.22 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=40$, $E_b/E_s=1$)



Şekil 4.23 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=40, E_b/E_s=10$)



Şekil 4.24 Kazık çevresinde derinlikle kayma gerilmesi değişimi ($L/d=40, E_b/E_s=100$)

Yukarıda verilen bilgiler ışığında kil zeminde toplam gerilmelere göre yapılan kazık analizlerinin bir değerlendirmesi yapılırsa,

1. Düşük relatif kazık rijitliklerinde relatif kazık boyunun fazla alınmasının kazık uç taşıma gücüne etkisi çok düşük olmuştur. Buna benzer sonuç Poulos (1980, 1994) tarafından da verilmiştir.
2. Relatif kazık rijitliğinin 100, 1000 ve 10000 değerleri için kazık ucu gerilmeleri gerçek değerlerinden uzaklaşmıştır. Poulos (1980) tarafından değişik parametreler için yapılan çalışmada benzer sonuç gözlemlenmektedir.
3. Aynı relatif kazık boyuna sahip kazıkta relatif kazık rijitliğinin 1000 ve 10000 değerleri için kazık boyunca düşey gerilme dağılımı fazla değişmemiştir.
4. Relatif kazık rijitliğinin 1000 ve 10000 değerlerinde aynı relatif kazık boyuna ve E_b / E_s oranına sahip kazıklarda kazık ucu taşıma gücü çok az değişmiştir.
5. Relatif kazık rijitliğinin yüksek olduğu ($E_p/E_s=1000\sim10000$ gibi) değerlerde kazık yüzü boyunca kayma gerilmelerinin uniform olarak dağıldığı gözlemlenmiştir.

5.KAZIKLI RADYE İÇİN YAPILAN NÜMERİK ÇALIŞMALAR

Bu bölümde kazıklı radyelerin tasarımında gözardı edilen radyenin taşıma gücüne katkısı araştırılmıştır. Çalışmada bu konu ile ilgili dört kazıktan oluşan bir radyenin simetriden faydalanılarak çözümlemesi yapılmıştır. Çözümlemelerde yine bölüm 4' te olduğu gibi önce uygun eleman tipi seçilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Uygun eleman seçiminde daha önce bahsolunan parametreler kullanılmış ve bu parametrelerin taşıma gücü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu bölümde kazıklı radye üç boyutlu olarak modellenmiş ve kazık zemin arasındaki relatif hareketi modellemek için izotrop olmayan elastik ara yüzey elemanlar kullanılmıştır.

5.1 Kullanılan Eleman Tipleri

Kazıklı radye sonlu elemanlar modelinde iki tip eleman kullanılmıştır. Bunlarda birincisi altı yüzlü olan ve 20 düğüm noktasına sahip HX20 ikincisi ise kazığın silindirik geometrisini modellemek için seçilmiş olan beş yüzlü 15 düğüm noktalı PN15 elemanıdır. Modelde kullanılan 8×8m' lik radye plağı altına 0.8m çapında 4 kazık yerleştirilmiştir. Radye plağının boyutlarının seçiminde kazık kazık etkileşimi oluşmamasına da dikkat edilmiştir.

5.2 Kullanılan Parametreler

Bu bölümde Bölüm 4' teki parametrelere ilaveten ;

- E_r , Radye elastisite modülü ($E_r=E_p$ alınmıştır.)
- t , Radye plağı yüksekliği ($t=1.5m$ alınmıştır.)
- L , Radye plağı boyu ($L=4m$ alınmıştır.)
- B , Radye plağı genişliği ($B=4m$ alınmıştır.)
- K_r , eşdeğer radye rijitliğidir.

Eşdeğer radye rijitliği olan K_r Mindlin' in elastisite teorisi ile ifade ettiği bir kavram olup aşağıda verilmiştir.

$$K_r = \frac{4.E_r.t^3.(1-\nu_s^2)}{3.\pi.E_s.L^4} \quad (5.1)$$

Bölüm 4' de kazık için verilen Poisson oranı ve elastisite modülü radye içinde aynen kullanılmıştır. Ara yüzey elemanda kullanılan parametreler ise çevre zeminine bağlı düşünülmüş olup kullanılan parametreler (elastisite modülü) hareket yönünde çevre zeminin 1/100' ü seçilmiştir. Bununla birlikte Poisson oranıda 0.01(diğer doğrultuda) alınmıştır.

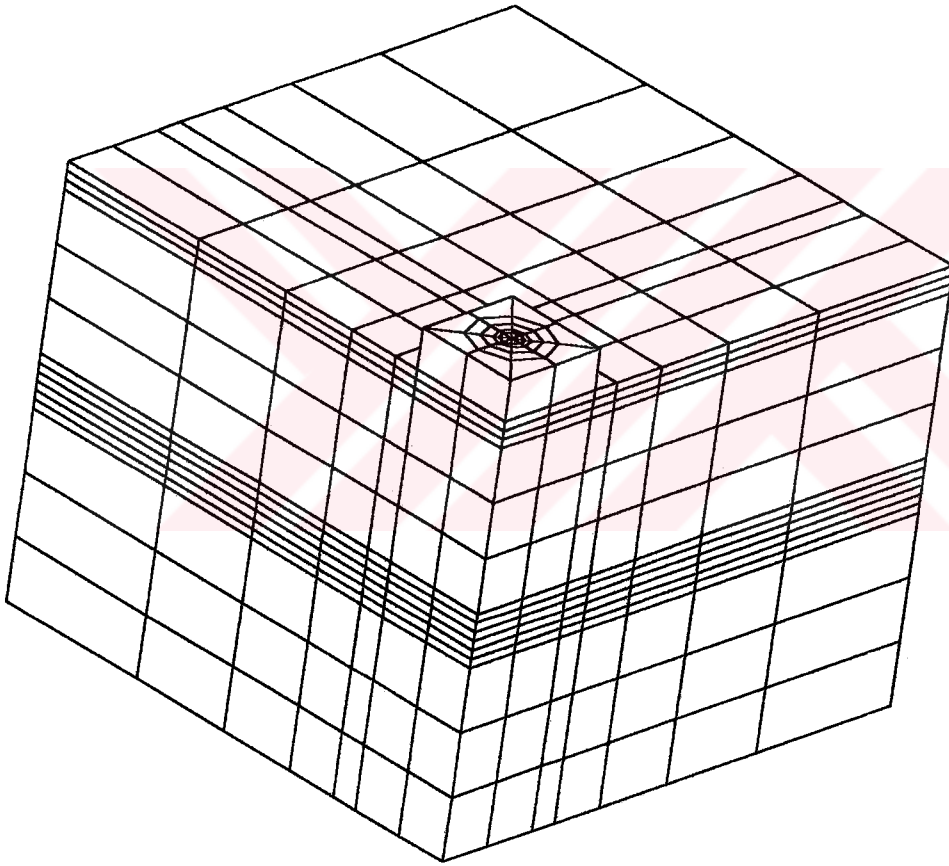
Çizelge 5.1' de görüleceği gibi bir önceki bölümde olduğu gibi üç farklı relatif kazık boyu için çözümleme yapılmıştır. Farklı olarak bu bölümde relatif kazık rijitliği sadece 100, 1000, 10000 alınmıştır.

5.3 Kazıklı Radye İçin Kullanılan Sonlu Eleman Modelleri

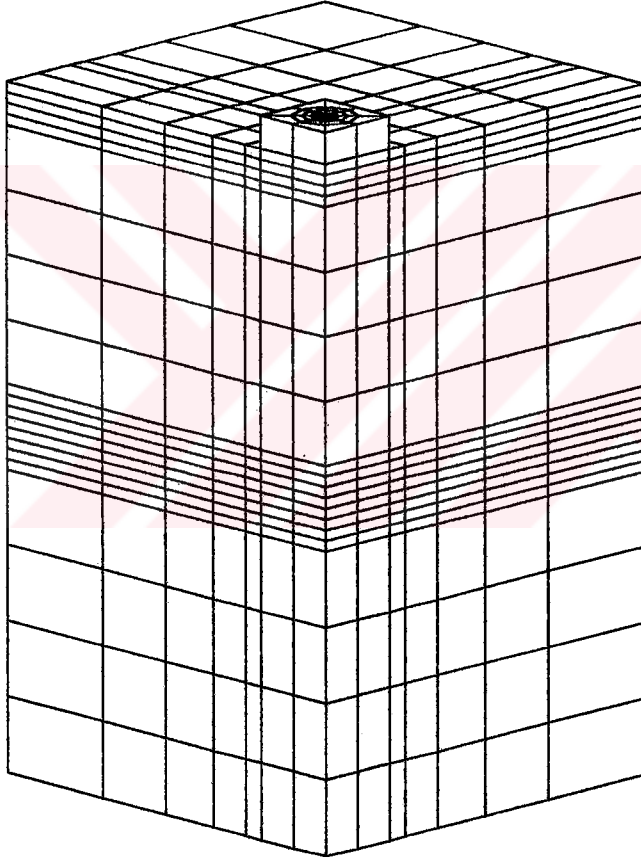
Çizelge 5.1'den de görüleceği gibi yine üç farklı relatif boy seçilmiş olup bunlar için üç ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Bunlar Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'te verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.4 ve 5.5'te sırası ile yükleme ve sınır şartları model 1 için gösterilmiştir. Şekil 5.6'da ise model 1 ile yapılmış olan çözümden elde edilen deplasmanların vektörel dağılımı verilmiştir. Şekil 5.7' de ise kazık detayı verilmiştir.

Çizelge 5.1 Kazıklı radye için yapılmış olan parametrik çözümlerin listesi

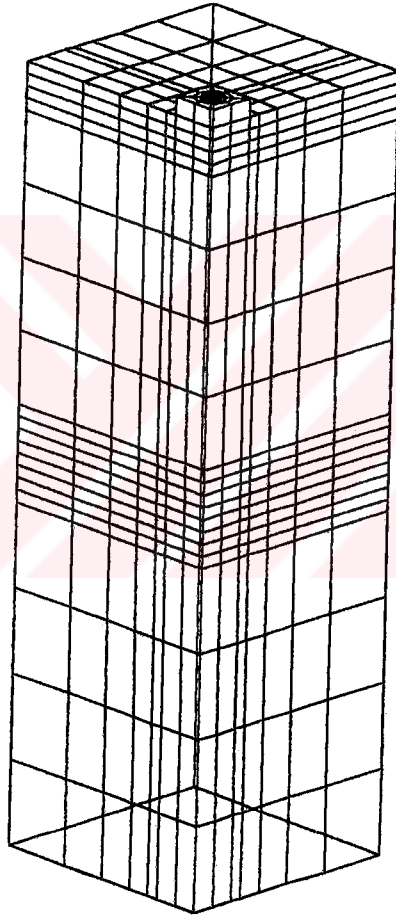
Model	L/d	L _r (m)	B(m)	t(m)	K _r	E _p /E _s	E _b /E _s	Eleman Sayısı	Düğüm No. Sayısı
1	10	4	4	1.5	0.51	100	1	1443	6554
1	10	4	4	1.5	5.09	1000	1	1443	6554
1	10	4	4	1.5	50.90	10000	1	1443	6554
1	10	4	4	1.5	0.51	100	10	1443	6554
1	10	4	4	1.5	5.09	1000	10	1443	6554
1	10	4	4	1.5	50.90	10000	10	1443	6554
1	10	4	4	1.5	0.51	100	100	1443	6554
1	10	4	4	1.5	5.09	1000	100	1443	6554
1	10	4	4	1.5	50.90	10000	100	1443	6554
2	20	4	4	1.5	0.51	100	1	1900	8571
2	20	4	4	1.5	5.09	1000	1	1900	8571
2	20	4	4	1.5	50.90	10000	1	1900	8571
2	20	4	4	1.5	0.51	100	10	1900	8571
2	20	4	4	1.5	5.09	1000	10	1900	8571
2	20	4	4	1.5	50.90	10000	10	1900	8571
2	20	4	4	1.5	0.51	100	100	1900	8571
2	20	4	4	1.5	5.09	1000	100	1900	8571
2	20	4	4	1.5	50.90	10000	100	1900	8571
3	40	4	4	1.5	0.51	100	1	1908	8574
3	40	4	4	1.5	5.09	1000	1	1908	8574
3	40	4	4	1.5	50.90	10000	1	1908	8574
3	40	4	4	1.5	0.51	100	10	1908	8574
3	40	4	4	1.5	5.09	1000	10	1908	8574
3	40	4	4	1.5	50.90	10000	10	1908	8574
3	40	4	4	1.5	0.51	100	100	1908	8574
3	40	4	4	1.5	5.09	1000	100	1908	8574
3	40	4	4	1.5	50.90	10000	100	1908	8574



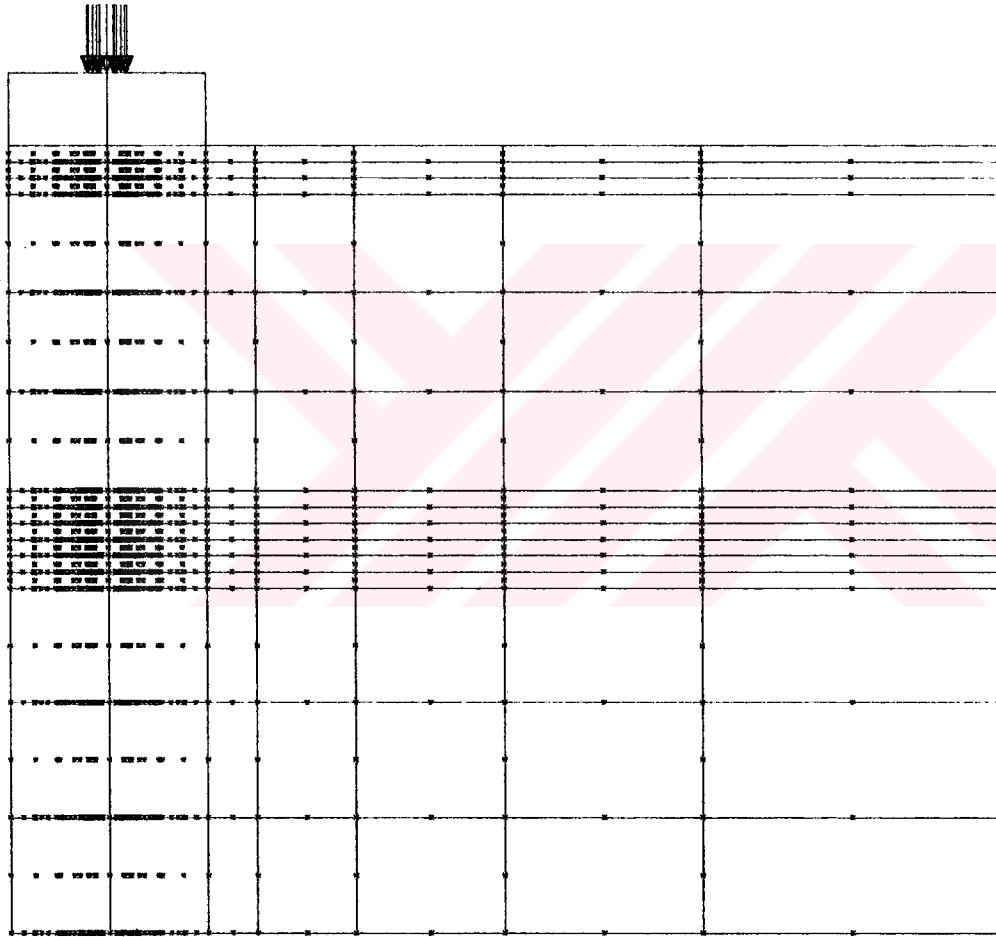
Şekil 5.1 Model 1' de kullanılan sonlu eleman modeli



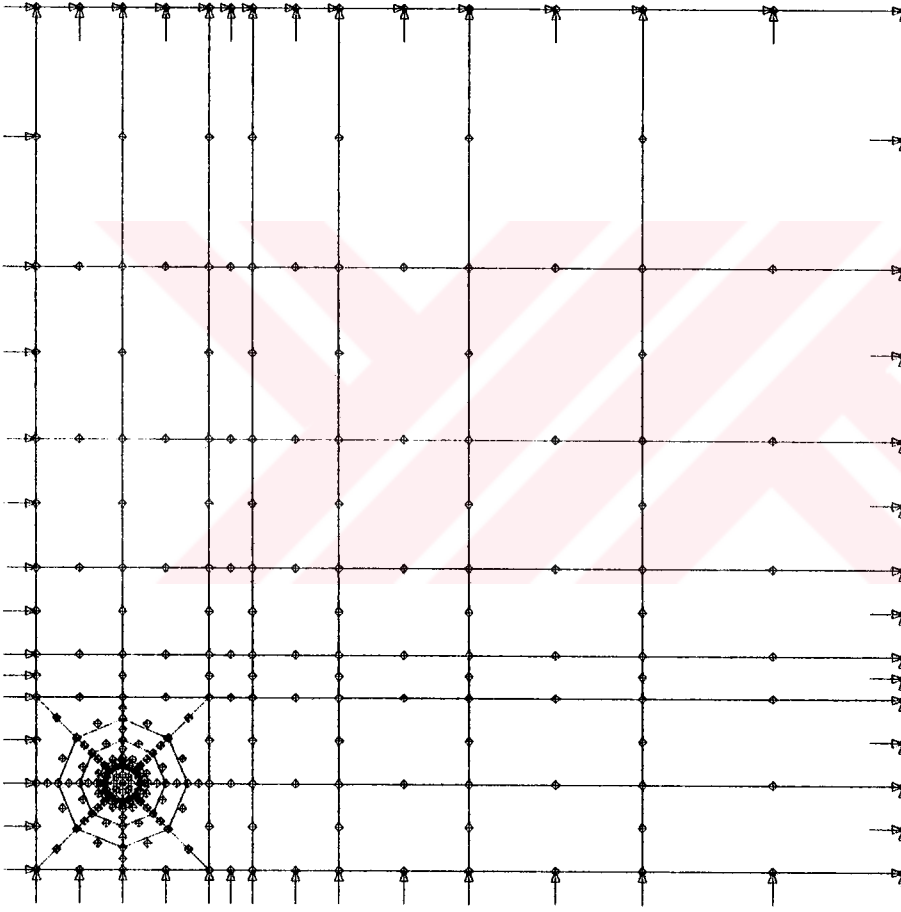
Şekil 5.2 Model 2' de kullanılan sonlu eleman modeli



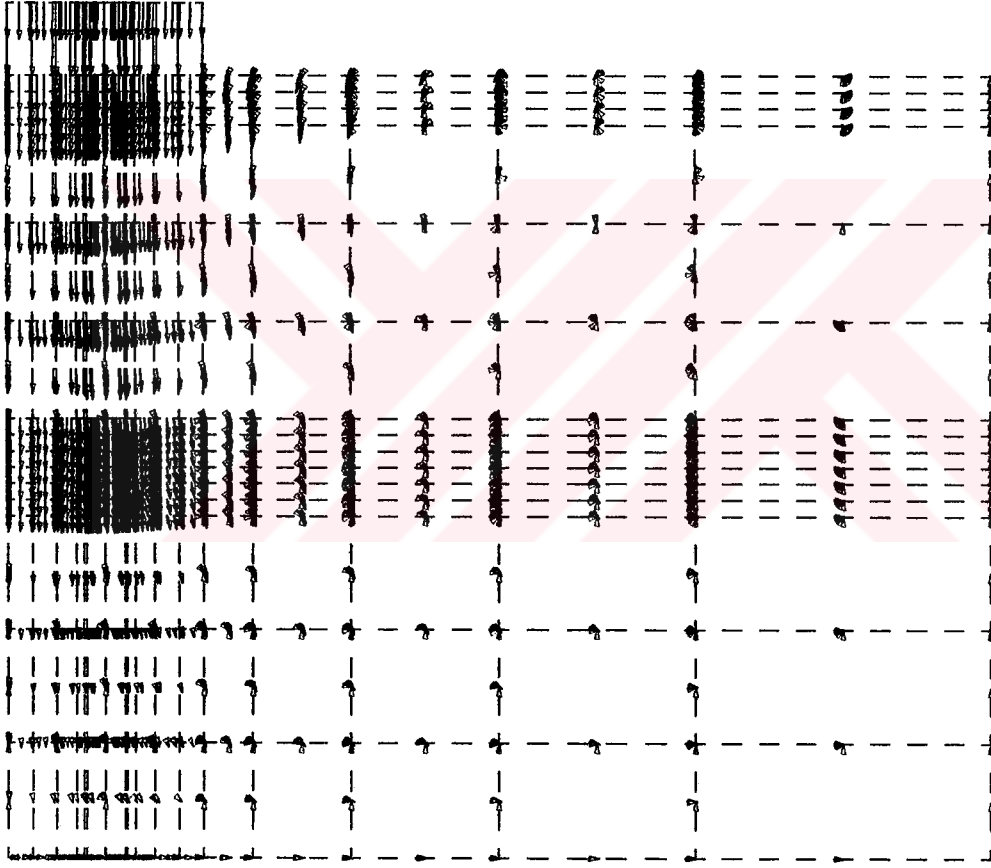
Şekil 5.3 Model 3' de kullanılan sonlu eleman modeli



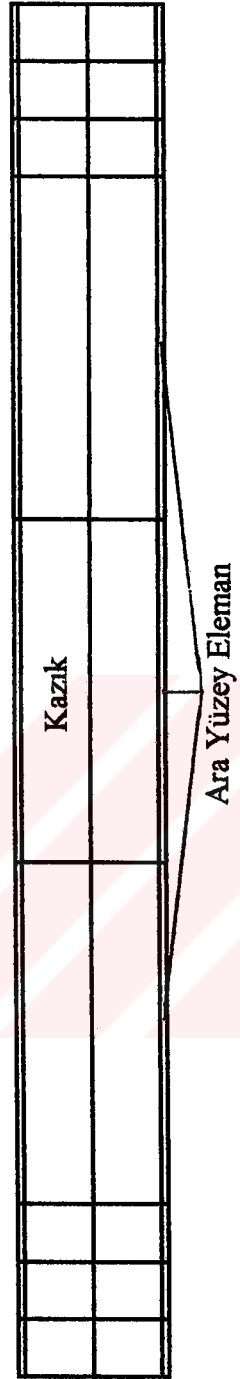
Şekil 5.4 Model 1 için yapılmış olan yüklemelerin gösterimi



Şekil 5.5 Model 1 için kullanılan sınır şartlarının gösterimi



Şekil 5.6 Model 1' de yükleme sonrası deplasman vektörleri

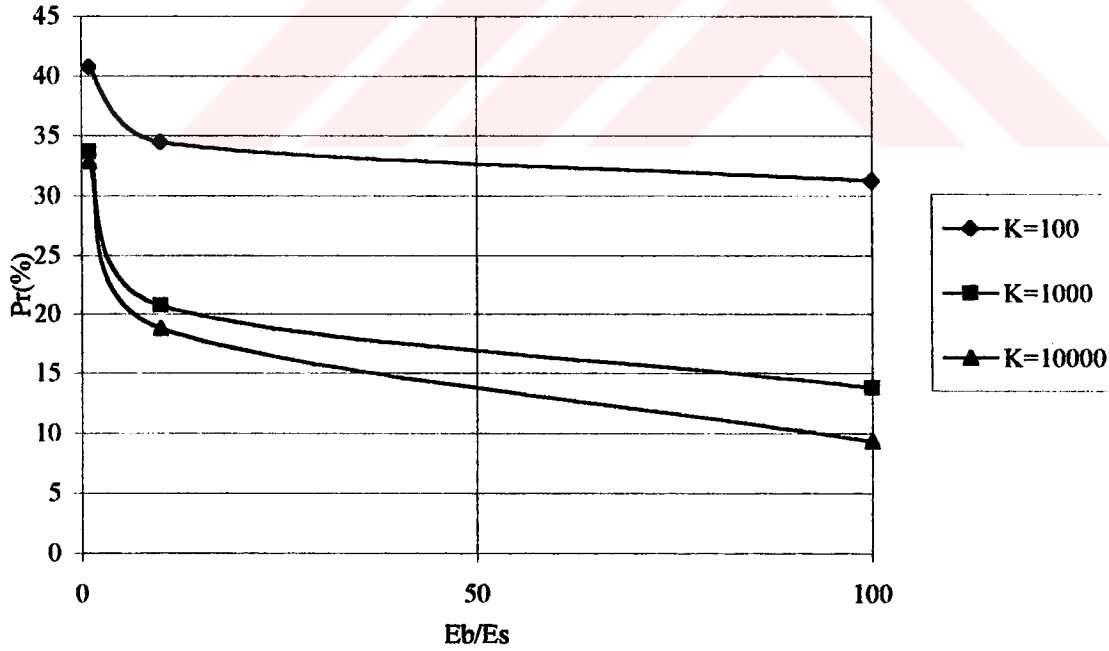


Şekil 5.7 Sonlu eleman modelinde kazık detayı

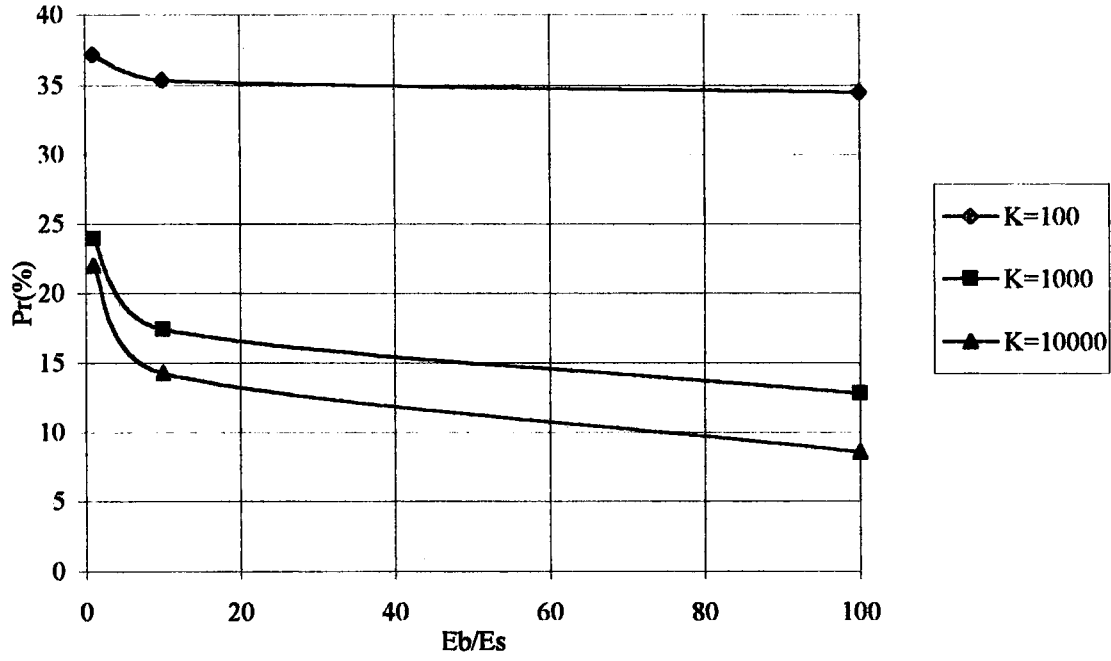
5.4 Kazıklı Radye Analizi Sonuçları

Yapılan analizler sonucunda elde olunan bilgilerin değerlendirilmesi ile aşağıdaki grafikler oluşturulmuştur.

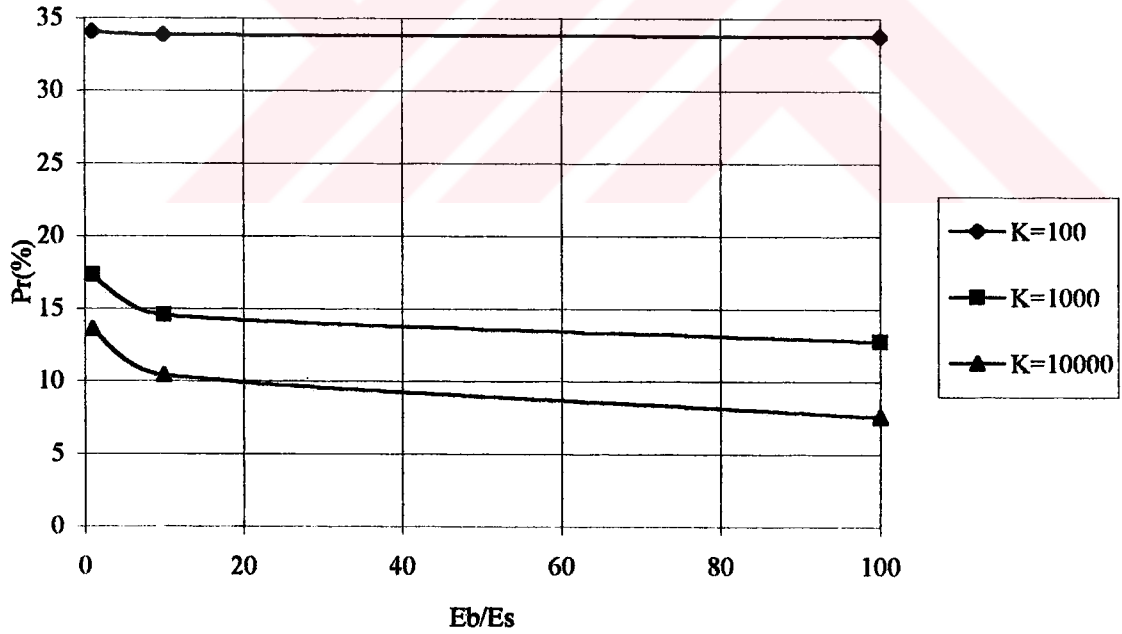
Şekil 5.8, 5.9 ve 5.10' da değişen uç zemin rijitlikleri ile radye taşıma oranı arası ilişkiler verilmiştir. Bu üç şekilde üç ayrı relatif kazık boyu ve rijitliği için sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 5.11' de üç şekil birlikte çizilerek radyenin taşıma oranı yani radye yükünün toplam yüke oranının uç/çevre rijitliğine oranına göre relatif kazık rijitliği ve boyuna bağlı değişimi çizilmiştir. Şekil 5.12'de radye taşıma oranının eşdeğer radye rijitliğine göre L/d ve E_b / E_s ' ye bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.13' te radye taşıma oranının relatif kazık rijitliğine göre E_b / E_s ve L/d ' ye bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 5.14'de ise deplasman etki faktörleri ile kazık ucu zemin rijitliğinin relatif kazık boyu ve rijitliği ile değişimi verilmiştir.



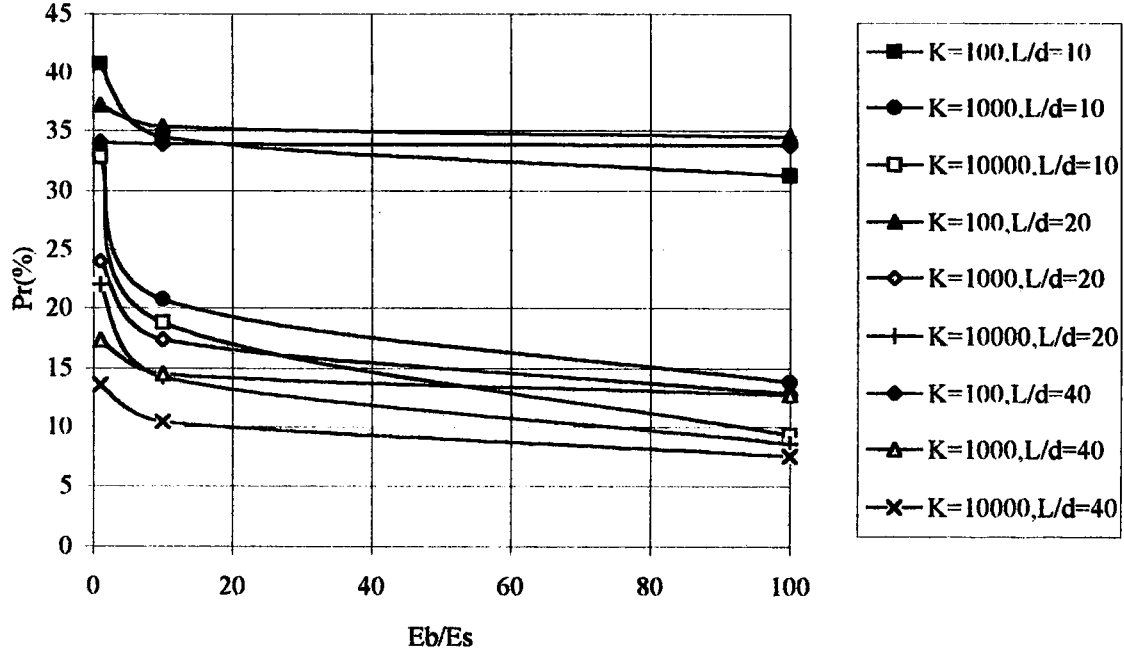
Şekil 5.8 Kazıklı radyede uç zemini rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki ($L/d=10$)



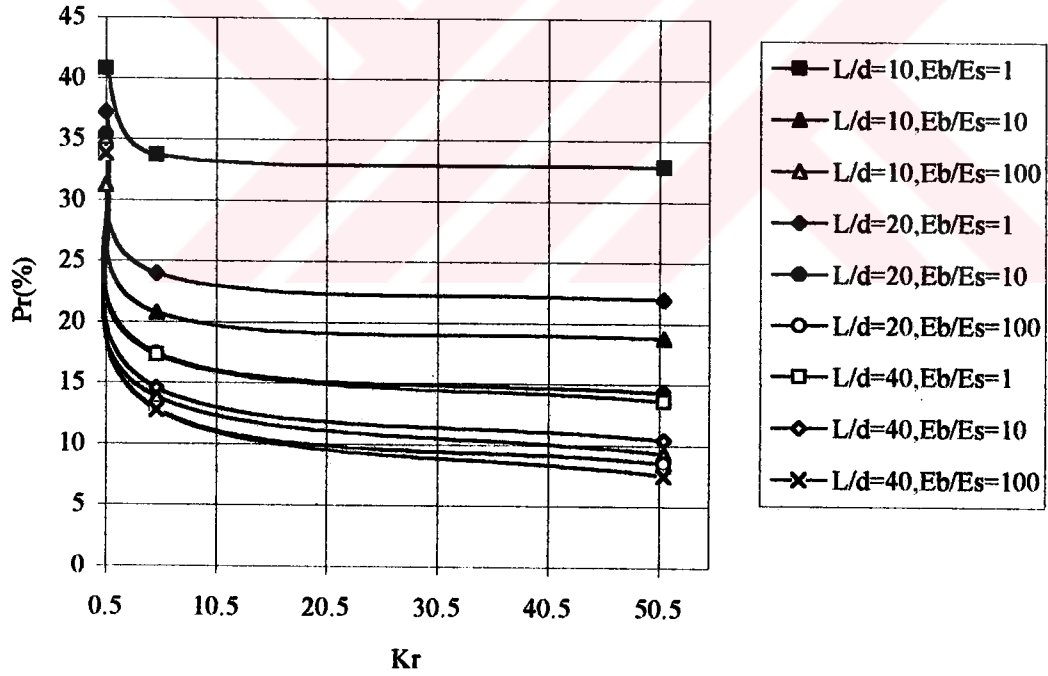
Şekil 5.9 Kazıklı radyede uç zemini rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki ($L/d=20$)



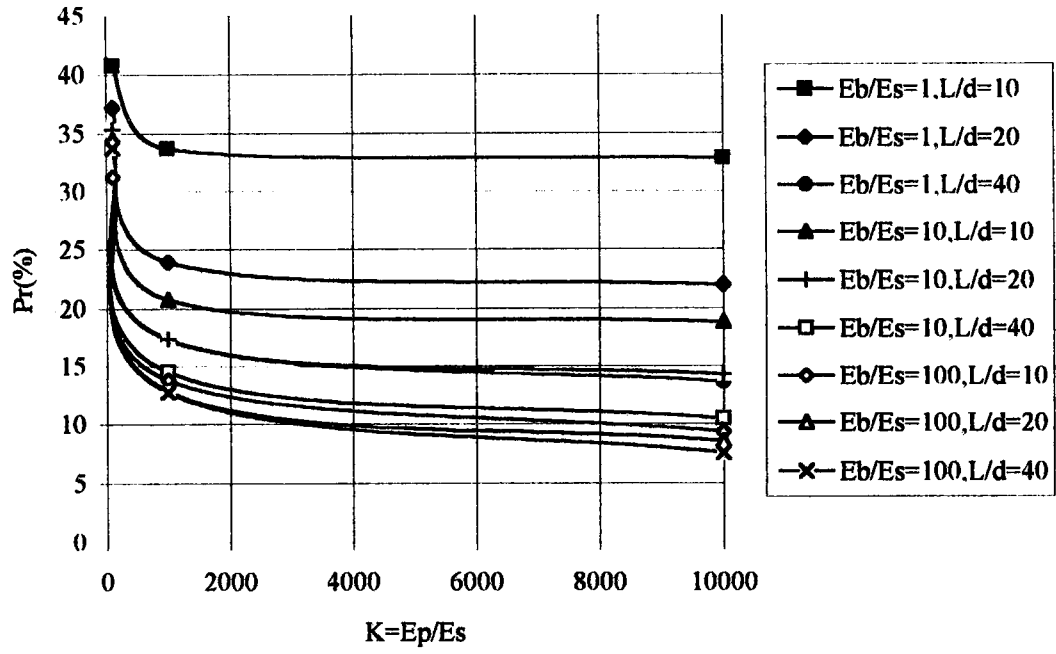
Şekil 5.10 Kazıklı radyede uç zemini rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki ($L/d=40$)



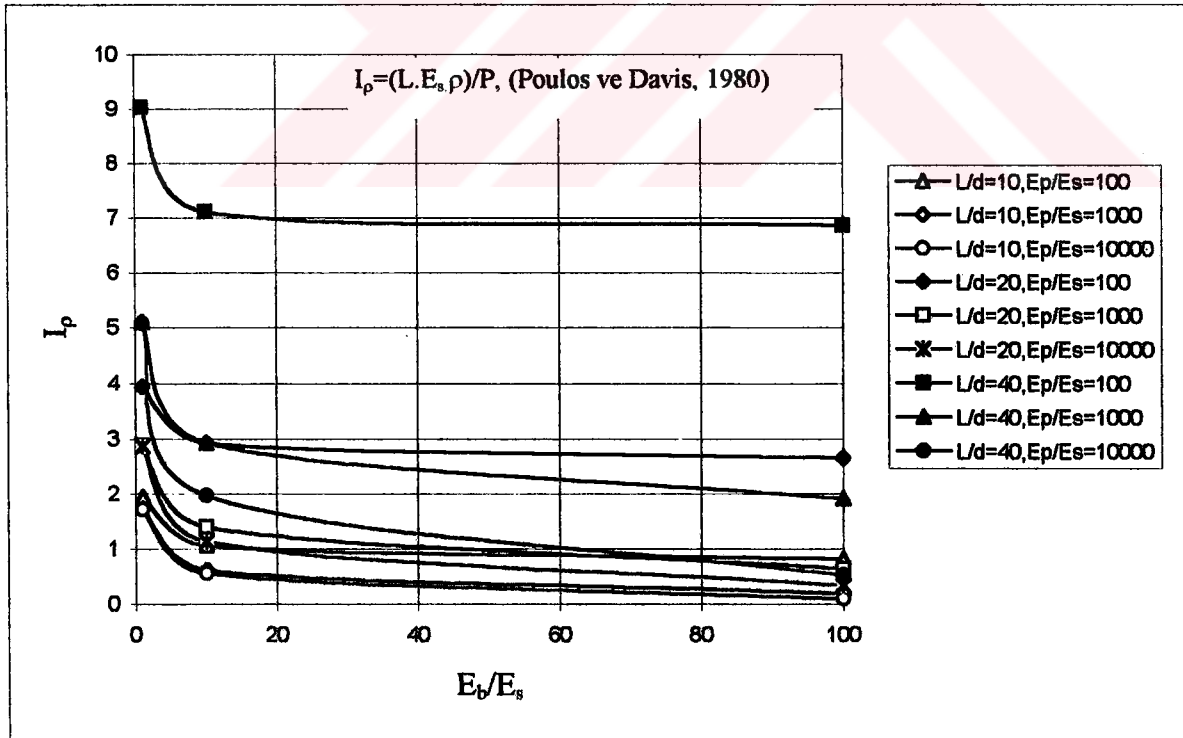
Şekil 5.11 Kazıklı radyede uç zemini rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki (bütün parametreler için)



Şekil 5.12 Eşdeğer radye rijitliği ile kazık radye taşıma gücü arasındaki ilişki



Şekil 5.13 Relatif kazık rijitliği ile radye taşıma gücü arasındaki ilişki



Şekil 5.14 Deplasman etki faktörünün kazık ucu zemin rijitliği ile değişimi

Elde olunan bulguların ışığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

1. Uç zeminin etkisi: Yüzen kazık olması durumunda (yani $E_b / E_s = 1$) radyenin daha fazla yük aldığı gözlemlenmiş ve bu değer relatif kazık rijitliği azaldığında %40' lara kadar çıkmıştır. Fakat uç zeminin rijitlik oranının 10 kat artması sonucu belirgin bir düşüş elde edilmiş, bu değer 100 olması durumunda ise çok fazla olmamıştır. Şekil 5.11' de görüldüğü gibi 100' den sonra çok fazla değişiklik olmayacağı görülmüştür. Bu noktada radyenin aldığı yük ($K=100$ hariç) yaklaşık %10-15 olmuştur. Poulos (1994) ve Clancy ve Randolph (1993) tarafından yapılan çalışmalarda benzer sonuç verilmiştir.
2. Relatif kazık rijitliği: Kazık rijitliğinin düşük değerleri ($E_p/E_s=100\sim1000$) için radyenin daha çok yük aldığı bununla birlikte pratikte karşılaşılan 1000 ve 10000 oranları için radyenin daha az yük aldığı anlaşılmaktadır. Clancy ve Randolph (1993) tarafından verilen çalışmada benzer sonuç elde edilmiştir.
3. Relatif kazık boyu: Relatif kazık boyu arttıkça radye taşıma oranı (Pr) azalmıştır. Şekil 5.11'de görüleceği gibi aynı düşük relatif rijitliğe sahip kazıklarda L/d ' nin çok etkin olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu şekilde $E_b / E_s = 100$ değerinde aynı relatif kazık rijitlikleri için L/d ' nin radye taşıma oranı üzerinde etkisi olmadığı tespit edilmiştir.
4. Eşdeğer radye rijitliği: Eşdeğer radye rijitliğinin (5.1 eşitliği) etkisi de relatif kazık rijitliği ile aynı eğilimi göstermiştir.
5. Deplasman etki faktörü: Şekil 5.14'ten yüksek relatif kazık boyu ($L/d=40$ gibi) olan kazıklardaki elastik kısalmaların, sistem yer değiştirmelerindeki etkisinin gözardı edilemeyecek boyutta olduğu anlaşılmaktadır.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada kazık ve kazıklı radyelerin zemine yük aktarma mekanizması ve kazık ile radyenin toplam taşıma gücündeki yük aktarma oranlarını etkileyen parametreleri belirlemek amaçlanmıştır. Bu maksatla homojen izotrop elastik zemin ortamında yeralan eksenel düşey yüke maruz bir kazık ile kazıklı kare radye üzerinde toplam gerilmelere göre değişik parametreler için nümerik analizler yapılmıştır. Parametreler relatif kazık rijitliği, relatif kazık boyu, kazık ucu ve çevresi zemin ortamının elastisite modülleri ile eşdeğer kazık rijitliği olup bu parametrelere bağlı olarak kazıklar ve radyenin toplam taşıma gücündeki oranın değişimi pratik maksatlar için kullanılmak üzere grafiklerle sunulmuştur.

Kazık ve kazıklı radye üzerinde yapılan parametrik çözümlerden elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Kazığın relatif rijitliğinin düşük bir değere sahip olması ($E_p/E_s=10\sim1000$) durumunda kazık uç taşıma gücünün toplam taşıma gücüne olan etkisi çok düşük olmaktadır. Bu yüzden pratik maksatlar için relatif kazık rijitliğinin düşük değerlerinde yüksek relatif kazık boyu kullanılmaması ($L/d=40$ gibi) uygun olmaktadır.
2. Kazılarda yüksek relatif kazık rijitliğinin söz konusu olduğu durumlarda ($E_p/E_s\geq1000$), kazık boyunca eksenel normal gerilmelerin kazık eksen boyu boyunca değişimi fazla olmamaktadır.
3. Relatif kazık rijitliğinin 1000 ve 10000 değerlerinde aynı relatif kazık boyuna ve E_p/E_s oranına sahip kazıklarda kazık ucu taşıma gücü çok az değişmektedir.
4. Kazıklı radyelerde yapılan çözümlemelerde sistemin yüzen kazık olması durumunda ($E_p/E_s=1$) radyenin daha fazla yük aldığı gözlemlenmekte, relatif kazık rijitliği azaldığında ise %40' lara kadar çıktığı görülmektedir. Ancak uç zeminin rijitlik oranının 10 kat artması sonucu belirgin bir düşüş elde edilmekte, bu değer 100' e çıkması durumunda ise çok fazla değişiklik elde edilmemektedir.

5. Kazıklı radye analizlerinde relatif kazık rijitliğinin (E_p/E_s) düşük değerleri (100~1000) için radyenin daha çok yük aldığı bununla birlikte pratikte karşılaşılan 1000 ve 10000 oranları için ise radyenin kazıklara göre daha az yük aldığı anlaşılmaktadır. Bunun nedeni relatif kazık rijitliğinin düşük olması durumunda kazıkların daha fazla boy değişimine uğramasındandır.
6. Radye altındaki kazıkların relatif boyu arttıkça radye taşıma oranı (P_r) azalmaktadır. Elde olunan bulgulara göre relatif rijitliğin düşük ($E_p/E_s < 1000$) olduğu kazıklarda L/d' nin çok etkin olmadığı gözlemlenmektedir. Ayrıca $E_b/E_s = 100$ değerinde aynı relatif kazık rijitlikleri için L/d' nin radye taşıma oranı üzerinde etkisi pek olmamaktadır.

Bu çalışmada elde olunan bulguların ışığında aşağıdaki hususların daha sonraki çalışmalarda gözönüne alınması önerilir.

1. Sonlu elemanlar ile analiz yapılırken kazık ucu bölgesinin modellenmesin de daha hassas sonlu elemanlar ağı kullanılmalıdır.
2. Analizlerde kazık zemin arası relatif hareketi daha iyi tanımlayabilmek için elasto plastik ara yüzey elemanlar kullanılabilir. Zeminin elasto plastik olarak tanımladığı analizler yapılabilir.
3. Değişik kazık aralığı mesafesi ve sayıları için analizler yapılabilir.
4. Oturmalarla kullanılan parametreler arası ilişkiler incelenebilir.
5. Bu çalışmada yapılan analizler efektif gerilmelere göre tekrarlanabilir.

6. Kazıklı radyenin değişik yükleme durumları (yanal ve dinamik vs.) için davranışını inceleyen analizler yapılması yararlı olacaktır.



KAYNAKLAR

- Baguelin, F. ve Frank, R. (1980), "Theoretical Studies of Piles Using The Finite Element Method", Proc. Int. Conf. on Numer. Methods in Offshore Piling, Instn Civ. Engrs, London, 83-91.
- Balaam, N. P., Poulos, H. G. ve Booker, J. R. (1975), "Finite Element Analysis of The Effects of Installation on Pile Load Settlement Behaviour", Geotech. Engng, 6(No.1): 33-48.
- Banerjee, P. K. ve Driscoll, P. M. (1976), "Three Dimensional Analysis of Raked pile Groups", Proc. Instn Civ. Engrs, 61: 653-671.
- Banerjee, P. K. (1978), In Developments in Soil Mechanics, C. Scott, London.
- Banerjee, P. K. ve Davies, T. G. (1978), "The Behaviour of Axially and Laterally Loaded Single Piles Embedded in Non-homogeneous Soils", Gèotechnique, 28(No.3): 309-326.
- Berilgen, M. M. (1996), Ankrajlı Perdelerde Zemin Yapı Etkileşiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Blight, G. E. (1965), The Time Rate of Heave of Structures on Expansive Clays, Butterworths, Sydney.
- Booker, J. R. ve Poulos, H. G. (1976), "Analysis of Creep Settlement Pile Foundations", J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs., 102(No.GT1): 1-14.
- Burland, J. B. (1973), "Shaft Friction of Piles in Clay-A Simple Fundamental Approach", Ground Engng, 6(No.3): 30-42.
- Butterfield, R. ve Banerjee, P. K. (1971), "The Elastic Analysis of Compressible Piles and Pile Groups", Gèotechnique, 21(No. 1): 43-60.
- Cameron, D. A. ve Walsh, P. F. (1984), "The Prediction of Moisture Induced Foundation Movements Using The Instability Index", Aust. Geomechs News, 8: 5-11.
- Chan, K. S., Karashudi, P. ve Lee, S. L. (1974), "Force at A Point in The Interior of A Layered Elastic Half-Space", Int. J. Solids Struct., 10: 1179-1199.
- Chin, J. T. (1988), Analysis of Piles and Pile Groups Embedded in A Layered Half-Space, ME Thesis, National University of Singapore.
- Chow, Y. K. (1986), "Analysis of Vertically Loaded Pile Groups", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomechs, 10: 59-72.
- Clancy, P. ve Randolph, M. F. (1993), "An Approximate Analysis for Piled Raft Foundations", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomechs, 17: 849-869.

- Clancy, P. ve Randolph, M. F. (1996), "Simple Design Tools for Piled Raft Foundations", *Géotechnique*, 46(No.2): 313-328.
- Coyle, H. M. ve Reese, L. C. (1966), "Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay", *J. Soil Mechs For Engng, Am. Soc. Civ. Engrs*, 92(No. SM2): 1-26.
- De Ruiter, J. ve Beringen, F. L. (1979), "Pile Foundation for Large North Sea Structures", *Marine Geotech.*, 3(No.3): 267-314.
- Desai, C. S. ve Abel, J. F. (1972), *Introduction to The Finite Element method*, Van Nostrand Reinhold, London.
- Desai, C. S. (1974), "Numerical Design-Analysis for Piles in Sands", *J. Soil Mechs For Engng, Am. Soc. Civ. Engrs*, 106(No. GT6): 613-635.
- Desai, C. S. ve Christian, J. T. (1977), *Numerical Methods In Geotechnical Engineering*, McGraw-Hill, New York.
- El Sharnouby, B. ve Novak, M. (1985), "Static and Frequency Response of Pile groups", *Can. Geotech. J.*, 22(No.1): 79-84.
- Fleming, W. G. K., Weltman, A. J. Randolph, M. F. ve Elson, W. K. (1985), *Piling Engineering*, Surrey University Press, New York.
- Focht, J. A. (1967), "Discussion to Paper by Coyle and Reese", *J. Soil Mechs. Fdn. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs.*, 93(No.SM1): 133-138.
- Frank, R. (1985), "Recent Developments in The Prediction of Pile Behaviour from Pressuremetre Results", *Proc. Symp. from Theory to Practice on Deep Foundations*, Porto Alegre, Brazil, 69-99.
- Giroud, J. P., Tran-Vo-Nhiem ve Obin, J. P. (1973), "Tables Pour Le Calcul Des Fondations 3", Paris.
- Ha, H. B. ve O'Neill, M. W. (1983), "Discussion on Theoretical t-z Curves", *J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs*, 109(No.GT10): 1353-1355.
- Hain, S. J. ve Lee, I. K. (1978), "The Analysis of Flexible Raft-Pile Systems", *Géotechnique*, 28(No.1): 65-83.
- Halloway, D. M., Clough, G. W. ve Vesic, A. S. (1978), "The Effects of Residual Driving Stresses on Pile Performance Under Axial Loads", *Proc. 10th OTC*, Houston, 2225-2236.
- Hewitt, C. M. (1988), *Cyclic Response of Offshore Pile Groups*, PhD Thesis, University of Sydney.

- Jardine, R. J., Potts, D. M., Fourie, A. B. ve Burland, J. B. (1986), "Studies of Influence of Non-Linear Stress-Strain Characteristics in Soil-Structure Interaction", *Gèotechnique*, 36(No.3): 377-396.
- Kraft, L. M., Ray, R. P. ve Kagawa, T. (1981), "Theoretical t-z Curves", *J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs*, 107(No. GT11): 1543-1561.
- Leonards, G. A. ve Darrag, A. A. (1989), "Discussion to Analysis of Residual Stress Effects in Piles", *H. G. Poulos, J. Geotech. Engng Am. Soc. Civ. Engrs*, 113(No.6): 589-596.
- Matlock, H. ve Foo, S. C. (1980), "Axial Analysis of Piles Using A Hysteretic and Degrading Soil Model ", *Proc. Conf. Numer. Methods in Offshore Piling, London*, 165-185.
- Meyerhof, G. G. (1956), "Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils", *J. Soil Mechs. Fdn. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs.*, 82(No.SM1): 1-19.
- Meyerhof, G. G. (1963), "Some Recent Research on The Bearing Capacity of Foundations", *Can. Geotech. J.*, 1(No.1): 16-26.
- Meyerhof, G. G. (1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations", *J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs.*, 102(No.GT3): 195-228.
- Mindlin, R. D. (1936), "Force at A Point in The Interior of A Semi-Infinite Solid", *Physics*, 7: 195-202.
- Muqtadir, A. ve Desai, C. S. (1986), "Three Dimensional Analysis of A Pile Group Foundation", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomechs*, 10: 41-58.
- Nystrom, G. A. (1984), "Finite-Strain Axial Analysis of Piles in Clay", *Anal. Design Pile Fdns, Am. Soc. Civ. Engrs*, 1-20.
- O'Neill, M. W., Ghazzaly, O. I. ve Ha, H. B. (1977), "Analysis of Three Dimensional Pile Groups with Non Linear Soil Response and Pile-Soil-Pile Interaction", *Proc. 9th Annual OTC, Houston*, 245-256.
- Ooi, L. H., Boey, C. F. ve Carter, J. P. (1989), "Modified Load Transfer Analysis of Axially Loaded Pile", *Piletalk'89, Kuala Lumpur*, 217-233.
- Ottaviani, M. (1975), "Three Dimensional Finite Element Analysis of Vertically Loaded Pile Groups", *Gèotechnique*, 25(No.2): 159-174.
- Pells, P. J. N. ve Turner, R. (1979), "Elastic Solution for The Design and Analysis of Rock Socketted Piles", *Can. Geotech.J.*, 16: 481-487.
- Poulos, H. G. (1968), "Analysis of The Settlement of Pile Groups", *Gèotechnique*, 18: 449-471.

Poulos, H. G. (1979), "Settlement of Single Piles in Non Homogeneous Soil", J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs., 105(No.GT5): 627-641.

Poulos, H. G. ve Davis, E. H. (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, Wiley, Newyork.

Poulos, H. G. (1983), "Cyclic Axial Pile Response Alternative Analyses", Am. Soc. Civ. Engrs Specialty Conf. on Geotech. Practice in Offshore Engng, Austin, 403-421.

Poulos, H. G. ve Hewitt, C. M. (1986), "Axial Interaction Between Dissimilar Piles in A Group", Proc. 3rd Int. Conf. Numer. Methods in Offshore Piling, Nantes, 253-270.

Poulos, H. G. (1987), "Analysis of Residuel Stress Effects in Piles", J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs., 113(No.3): 216-229.

Poulos, H. G. (1988a), "Modified Calculation of Pile Group Settlement Interaction", J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs., 114(No.6): 697-706.

Poulos, H. G. (1988b), "Cyclic Stability Diagram for Axially Loaded Piles", J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs., 114(No.8): 877-895.

Poulos, H. G. (1989), "Pile Behaviour-Theory and Aplication", Gèotechnique, 39: 365-415.

Poulos, H. G. ve Hull, T. S. (1989), *The Role of Analytical Geomechanics in Foundation Engineering*, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs Foundation Engng Congress, Chicago.

Poulos, H. G. (1994), "An Approximate Numerical Analysis of Pile-Raft Interaction", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomechs, 18: 73-92.

Poulos, H. G. (1994), "Settlement Prediction for Driven Piles and Pile Groups", Vertical and Horizontal deformations of Foundations and Embankments, ASCE, 2: 1629-1649.

Pressley, J. S. ve Poulos, H. G. (1986), "Finite Element Analysis of Mechanisms of Pile Group Behaviour", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomechs, 10: 213-221.

Randolph, M. F. ve Wroth, C. P. (1978), "Analyses of Deformation of Vertically Loaded Piles", J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs, 104(No. GT12): 1465-1488.

Randolph, M. F. ve Wroth, C. P. (1979), "An Analysis of The Vertical Deformation of Pile Groups", Gèotechnique, 29(No.4): 423-439.

Randolph, M. F. (1983), "Design Consideration for Offshore Piles", Am. Soc. Civ. Engrs, Conf. Geotech Practice in Offshore Engng, Austin, 422-439.

Randolph, M. F. (1986), *Ratz-Load Transfer Analysis of Axially Loaded Piles*, Dept. of Civil Engineering, University of Western Australia.

Schmertmann, J. H. (1978), "Measurement of in Situ Shear Strength", Spec. Conf. on In Situ Measurements of Soil Properties, Am. Soc. Civ. Engrs., Raleigh, 57-138.

Semple, R. M. ve Rigden, W. J. (1984), "Shaft Capacity of Driven Piles in Clay", Anal. Design Pile Fdns, Am. Soc. Civ. Engrs., 59-79.

Stas, C. V. ve Kulhawy, F. H. (1984), "Critical Evaluation of Design Methods for Foundations Under Axially Uplift and Compression Loading", Report for EPRI, No. EL3771, Cornell University.

Steinbrenner, W. (1934), Tafeln zur Setzungberechnung, Die Strasse1, 221.

Thorburn, S. ve MacVicar, S. L. (1971), Behaviour of Piles, Institution of Civil Engineers, London.

Tomlinson, M. J. (1957), "The Adhesion of Piles Driven into Clay Soils", Proc. 4th Int. Conf. Soil Mechs Fdn Engng, London, 2: 66-71.

Valiappen, S., Lee, I. K. ve Boonlualohr, P. (1974), "Settlement of Piles in Layered Soils", Proc. 7th Biennial Conf., Adelaide, 144-153.

Von Der Merve, D. H. (1964), "The Prediction of Heave from The Plasticity Index and the Percentage Clay Fraction", Civil Engr in South Africa, 6(No.6): 103.

Withiam, J. L. ve Kulhawy, F. H. (1979), "Analytical Model for Drilled Shaft Foundations", Proc. 3rd Int. Conf. Numer. Methods in Geomechs, Aachen, 1115-1122.

Yamashita, K., Tomono, M. ve Kakurai, M. (1987), "A Method for Estimating Immediate Settlement of Piles and pile Groups", Soils and Fdns, 27(No.1): 61-76.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 22.07.1973

Doğum yeri İzmit

Lise 1987-1990 İzmit Lisesi

Lisans 1990-1994 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

1994-1995 Vinsan A.Ş.

