

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ DOĞRULTUDA YATAY YÜKLÜ KAZIK GRUPLARI İLE İLGİLİ BİR
İNCELEME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sevda Berra GÜRGÜÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ DOĞRULTUDA YATAY YÜKLÜ KAZIK GRUPLARI İLE İLGİLİ BİR
İNCELEME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sevda Berra GÜRGÜÇ
501101313**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101313 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Sevda Berra GÜRGÜÇ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**İKİ DOĞRULTUDA YATAY YÜKLÜ KAZIK GRUPLARI İLE İLGİLİ BİR İNCELEME**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **11 Haziran 2013**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyuncaengin bilgisini ve tecrübesini paylaştığı, her türlü destek ve yardımlarını esirgemediği için değerli hocam Sayın Doç.Dr. M. Tuğrul ÖZKAN'a çok teşekkür ederim.

Analizlerin yapıldığı Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programını öğrenmemde yardımlarını ve zamanını esirgemeyen Yüh.Müh. Müge İNANIR'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam esnasında yardımlarını ve zamanını esirgemeyen Araş.Gör.Dr. Müge BALKAYA'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında desteğini ve yardımlarını eksik etmeyen İnş.Müh. Sercan ÖZKORKMAZ'a teşekkür ederim.

Her türlü desteği için Yük.Müh. Uğur ATEŞ'e teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca bana destek olan ve hayatımı en doğru şekilde yönlendirmemi sağlayan sevgili anneme ve babama teşekkür ederim.

Haziran 2013

Sevda Berra GÜRGÜÇ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
2. KAZIKLI TEMELLER	3
2.1 Giriş.....	3
2.2 Kazıkların Sınıflandırılması	4
2.2.1 Kullanım amaçlarına göre kazıklar	4
2.2.2 Yapımında kullanılan malzemeye göre kazıklar.....	6
2.2.3 Zemin içine yerleştirilme tarzına göre kazıklar	8
2.3 Kazık Tipi Seçimini Etkileyen Faktörler	8
2.4 Yatay Yüklerin Kazıklara Etkisi	9
2.4.1 Yatay yüklü tek kazığın davranışı.....	10
2.4.2 Yatay yüklü kazık grubunun davranışı	12
3. YATAY YÜKLEME ALTINDA TEK KAZIK ANALİZİ	17
3.1 Kazıklara Etkiyen Yatay Yükler	17
3.2 Yatay Yüklü Kazıklarda Kabul Edilebilir Yük ve Deplasman Limitleri	19
3.3 Brinch Hansen (1961) Yöntemi	20
3.4 Broms (1964) Yöntemi.....	22
3.4.1 Kohezyonlu zeminlerde kısa ve uzun kazıkların analizi.....	23
3.4.1.1 Serbest ve tutulu başlı kısa kazıklar	23
Serbest başlı kısa kazıklar	24
Tutulu başlı kısa kazıklar	25
3.4.1.2 Serbest ve Tutulu Başlı Uzun Kazıklar	26
Serbest başlı uzun kazıklar.....	26
Tutulu başlı uzun kazıklar.....	27
3.4.2 Kohezyonsuz zeminlerde kısa ve uzun kazıkların analizi	27
3.4.2.1 Serbest ve Tutulu başlı kısa kazıklar.....	27
Serbest başlı kısa kazıklar	27
Tutulu başlı kısa kazıklar	29
3.4.2.2 Serbest ve Tutulu başlı uzun kazıklar	30
Serbest başlı uzun kazıklar.....	30
Tutulu başlı uzun kazıklar.....	31
3.5 Yatak Katsayısı Yöntemi	32
3.5.1 Yatay Yatak Katsayısının Değişimi	36
3.5.2 Kohezyonsuz Zeminlerde Yatak Katsayısı Yöntemi	40
3.5.2.1 Serbest başlı kazıklar.....	40

3.5.2.2 Tutulu Başlı Kazıklar	45
3.5.3 Kohezyonlu Zeminlerde Yatak Katsayısı Yöntemi	46
3.6 p-y Eğrileri ile Hesap Yöntemi.....	49
3.6.1 Kohezyonsuz zeminlerde p-y eğrileri ile hesap yöntemi	54
3.6.2 Kohezyonlu zeminlerde p-y eğrileri ile hesap yöntemi	56
3.6.2.1 Yumuşak-Orta katı killer.....	57
3.6.2.2 Katı killer.....	59
3.6.2.3 Katı aşırı konsolide killer	61
3.6.3 p-y eğrilerine etki eden faktörler	61
3.6.3.1 Yükleme tipini etkisi	61
Statik yükleme durumu	61
Tekrarlı yükleme durumu.....	62
3.6.3.2 Kazık ve zemin özelliklerinin etkisi.....	63
Kazığın eğilme rijitliği	63
Kazık başlığının durumu	64
Kazık şekli.....	64
3.7 Elastik Ortam Yaklaşımı	64
3.7.1 Kohezyonsuz zeminlerde elastik ortam yaklaşımı	66
3.7.1.1 Serbest başlıklı kazık.....	66
3.7.1.2 Rijit başlıklı kazık	66
3.7.2 Kohezyonlu zeminlerde elastik ortam yaklaşımı	70
3.7.2.1 Serbest başlıklı kazık.....	70
3.7.2.2 Rijit başlıklı kazık	70
3.8 Karakteristik Yük Yöntemi (CLM)	72
4. YATAY YÜKLEME ALTINDAKİ GRUP KAZIKLARIN ANALİZİ	77
4.1 Değiştirilmiş Birim Yük Transferi Yöntemi	78
4.2 Grup Azaltma Faktörü.....	78
4.3 Birleştirme Yöntemi	79
4.4 Grup Büyütme Yöntemi, Ooi ve Duncan (1994)	80
5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PLAXIS	83
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	83
5.2 Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı.....	84
5.3 Yatay Yüklü Kazıkların Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı ile Analiz Edilmesi	88
5.3.1 Model özellikleri	88
5.3.2 Modelin sonlu elemanlar ağ boyutlarının seçimi	91
5.3.3 Başlangıç gerilme durumunun tanımlanması.....	91
5.3.4 Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri.....	93
5.3.5 Hesap aşamaları.....	93
6. ANALİZ SONUÇLARI VE BULGULAR	95
6.1 Kohezyonlu Zeminlerin Analiz Sonuçları.....	95
6.2 Kohezyonsuz Zeminlerin Analiz Sonuçları.....	101
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR.....	113
EKLER.....	117
ÖZGEÇMİŞ.....	137

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Kazıklar için izin verilebilir yatay yükler (McNulty, 1956).	19
Çizelge 3.2 : Kohezyonsuz zeminlerde nh değerleri (Das, 1990).....	34
Çizelge 3.3 : Kohezyonlu zeminler için farklı kaynaklarda önerilen nh değerleri(Yıldırım, 2009).	35
Çizelge 3.4 : Serbest başlı uzun kazıkların elastik çözümü için A katsayıları (Matlock ve Reese, 1961).....	43
Çizelge 3.5 : Serbest başlı uzun kazıkların elastik çözümü için B katsayıları (Matlock ve Reese, 1962).	44
Çizelge 3.6 : Su altındaki kumlar için tahmini nh değerleri (Reese ve diğ., 1974). .	55
Çizelge 3.7 : $A1$ ve $B1$ katsayıları (Reese ve diğ., 1974).....	56
Çizelge 3.8 : CLM yöntemi için minimum uzunluklar (Duncan ve diğ., 1994).....	76
Çizelge 4.1 : Grup Azaltma Faktörü (Yıldırım, 2009).	78
Çizelge 4.2 : Kohezyonsuz zeminler için grup etkinliği (Oteo, 1972).	79
Çizelge 4.3 : Kohezyonlu zeminler için grup etkinliği (Prakash ve Saran, 1967).....	79
Çizelge 5.1 : Analizlerde kullanılan kazık ve zemin malzeme özellikleri	93
Çizelge 6.1 : Kohezyonlu zeminlerdeki iki doğrultulu deplasmanların tüm kazık çapları ve kazık aralıkları için değerleri.....	98
Çizelge 6.2 : Kohezyonlu zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıkları için belirlenen göçme yükleri.	101
Çizelge 6.3 : Kohezyonsuz zeminlerdeki iki doğrultulu deplasmanların tüm kazık çapları ve aralıkları için değerleri.....	104
Çizelge 6.4 : Kohezyonsuz zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıkları için belirlenen göçme yükleri.	107
Çizelge A.1 : Yumuşak kil ve yarı katı kil ortalama zemin özellikleri ve yumuşak kil üst sınır zemin özellikleri.	142

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kazıkların kullanımına göre sınıflandırılması a,b) uç kazığı, c) sürtünme kazığı, d) çekme kazığı, e) bağlama kazığı, f) kompaksiyon kazığı, g) eğik kazık.	5
Şekil 2.2 : Kazığa uygulanan yükler a) zemin direnci, b) kazıkta oluşan deformasyon (Prakash ve Sharma, 1990).....	10
Şekil 2.3 : Yatay yüklü kazığın etrafında varsayılan göçme yüzeyleri a) Zemin yüzeyine yakın bölgeler için, b) Zemin yüzeyinden oldukça derindeki bölgeler (Prakash ve Sharma, 1990).....	11
Şekil 2.4 : Kazıkların grup davranışının zemin üzerindeki etkisi a) Plan, b) Kesit (Prakash ve Sharma, 1990).....	13
Şekil 2.5 : Boussinesq gerilme soğanları ve kazık aralıklarının belirlenmesi (Prakash ve Sharma, 1990).....	14
Şekil 2.6 : Yanal yük etkisi altında kazık grubunun göçmesi (Fleming ve Elson, 2009).....	15
Şekil 3.1 : Yatay yüklere karşı inşa edilen kazıklar, a) dayanma yapıları, b) köprü ayakları, c) iskeleler, d) palplanjlı dayanma yapıları (Tomlinson, 1994)..	18
Şekil 3.2 : Brinch Hansen Yöntemi (Prakash ve Sharma, 1990).....	20
Şekil 3.3 : K_c ve K_q katsayıları (Prakash ve Sharma, 1990).....	21
Şekil 3.4 : Yatay yük etkisindeki kısa kazıklarda deformasyon durumu a) Serbest başlı b) Tutulu başlı (Tomlinson ve Woodward, 2008).....	22
Şekil 3.5 : Yatay yük etkisindeki uzun kazıklarda deformasyon durumu a) Serbest başlı b) Tutulu başlı (Tomlinson ve Woodward, 2008).....	23
Şekil 3.6 : Serbest başlı kısa kazıkta oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964a).....	24
Şekil 3.7 : Tutulu başlı kısa kazıkta oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964a).....	25
Şekil 3.8 : Kohezyonlu zeminlerde kısa kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerinin bulunması (Tomlinson, 1994).....	25
Şekil 3.9 : Serbest başlı uzun kazıkta oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964a).....	26
Şekil 3.10 : Tutulu başlı uzun kazıkta oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964a).....	26
Şekil 3.11 : Kohezyonlu zeminlerde uzun kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerinin bulunması (Tomlinson, 1994).....	27
Şekil 3.12 : Serbest başlı kısa kazıklarda oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964b).....	28
Şekil 3.13 : Tutulu başlı kısa kazıklarda oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964b).....	29
Şekil 3.14 : Kohezyonsuz zeminlerde kısa kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerinin bulunması (Prakash ve Sharma, 1990).....	29

Şekil 3.15 : Serbest başlı uzun kazıklarda oluşan zemin dirençleri ve moment dağılımları (Broms, 1964b).	30
Şekil 3.16 : Tutulu başlı uzun kazıklarda oluşan zemin dirençleri ve moment dağılımları (Broms, 1964b).	31
Şekil 3.17 : Kohezyonsuz zeminlerde uzun kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerinin bulunması (Prakash ve Sharma, 1990).	32
Şekil 3.18 : Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık davranışı a) Elastik zemin üzerindeki kiriş b) Winkler yaklaşımı c) zeminde yatay yüklü olan kazık d) yaylar üzerinde yüklenen yatay yüklü kazık (Prakash ve Sharma, 1990).	33
Şekil 3.19 : Yatay yatak katsayısının derinlikle değişimi a) aşırı konsolide killer, b) normal konsolide killer ve granüler zeminler, c) kurumuş normal konsolide killer, d) yumuşak yüzey tabakası durumu (Davisson, 1963).	36
Şekil 3.20 : Yatay yüklenen bir kazıkta zemin davranışının yaylarla temsil edilmesi.	37
Şekil 3.21 : Tipik bir p-y eğrisi ve yatay yatak katsayısının değişimi (Reese ve Van Impe, 2001).	38
Şekil 3.22 : Üç eksenli basınç deneyi ile elastisite modülünün gösterimi ve deformasyon ile değişimi (Reese ve Van Impe, 2001).	38
Şekil 3.23 : Kazık çapının yatay yükün dağılımına etkisi (Davisson, 1963).	39
Şekil 3.24 : Kazıkta meydana gelen Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisinde kazık davranışı (Reese ve Van Impe, 2001).	40
Şekil 3.25 : Yatay ötelenme ve momentler için A ve B katsayıları (Reese ve Matlock, 1956).	45
Şekil 3.26 : Tutulu başlı kazıklar için C_y ve C_m katsayıları (Prakash ve Sharma, 1990).	46
Şekil 3.27 : Kohezyonlu zeminlerde serbest başlı kazıklarda yerdeğiştirme ve moment için katsayılar (Prakash ve Sharma, 1990).	47
Şekil 3.28 : Aşırı konsolide killi zeminde tutulu başlı kazıkta C_{yc} ve C_{mc} katsayıları (Davisson ve Gill, 1963).	48
Şekil 3.29 : Yatay yük altında kazıkların etrafında oluşan gerilme dağılımı (Reese ve Van Impe, 2001).	50
Şekil 3.30 : Yatay kazık için p-y eğrileri a. Zemin yüzeyin altında çeşitli derinliklerde p-y eğrileri, b. p-y eğrilerinin x-y eksenlerinde gösterimi (Tomlinson ve Woodward, 2008).	51
Şekil 3.31 : x_r kritik derinliğin elde edilmesi, b. p-y eğrilerinin oluşturulması (Prakash ve Sharma, 1990).	57
Şekil 3.32 : Yumuşak ve orta katı killer için p-y eğrisinin oluşturulması (Prakash ve Sharma, 1990).	59
Şekil 3.33 : Gerilme dağılımları; a) Kazıktaki gerilmeler, b) Kazık çevresindeki zemindeki gerilmeler (Prakash ve Sharma, 1990).	65
Şekil 3.34 : Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için $I'pH$ değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).	67
Şekil 3.35 : Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için $I'pM$ değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).	68
Şekil 3.36 : Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için $F'p$ değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).	68
Şekil 3.37 : Rijit başlıklı kazıklarda zemin modülü için $I'pF$ değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).	69

Şekil 3.38 : Rijit başlıklı kazıklarda zemin modülü için $F'pF$ değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).....	69
Şekil 3.39 : Serbest başlıklı kazıklarda sabit zemin modülü için, a. IpH değerleri, b. IpM (Prakash ve Sharma, 1990).....	71
Şekil 3.40 : CLM yönteminde yatay yük nedeniyle ötelenmeler (Duncan ve diğ., 1994).....	73
Şekil 3.41 : Kazık başında moment nedeniyle ötelenmeler (Duncan ve diğ., 1994). 74	
Şekil 3.42 : Yük-Moment eğrileri (Duncan ve diğ., 1994).....	75
Şekil 5.1 : Plaxis 3D Foundation yazılımında kullanılan sonlu elemanlar.....	85
Şekil 5.2 : Sonlu elemanlar ağının oluşturulması.....	86
Şekil 5.3 : Zeminde Mohr-Coulomb gerilme-şekil değiştirme davranışı modeli.....	87
Şekil 5.4 : Çalışma düzlemlerinin temsili gösterimi.....	88
Şekil 5.5 : Analiz edilen modelin plan olarak üstten ve önden görünümü.....	89
Şekil 5.6 : Üç boyutlu model geometrisi.....	90
Şekil 5.7 : Modelin sonlu elemanlar ağı iki boyutlu ve üç boyutlu gösterimi.....	91
Şekil 6.1 : Yumuşak kil zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıklarında deplasman-kazık aralığı eğrileri.....	96
Şekil 6.2 : Yarı katı kil zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıklarında deplasman-kazık aralığı eğrileri.....	96
Şekil 6.3 : Yumuşak kil zeminde 1000mm kazık çapındaki kazık aralıkları değişimi ile oluşan yük-deplasman eğrileri.....	97
Şekil 6.4 : Yarı Katı Kil zeminde 1000mm kazık çapındaki kazık aralıkları değişimi ile oluşan yük-deplasman eğrileri.....	98
Şekil 6.5 : Yumuşak kil zeminde 800 mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yükün farklı kazık aralıklarına göre gösterimi.....	99
Şekil 6.6 : Yarı katı kil zeminde 800 mm çapında kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yükün farklı kazık aralıklarına göre gösterimi.....	100
Şekil 6.7 : Gevşek kum zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıklarında deplasman-kazık aralığı eğrileri.....	102
Şekil 6.8 : Orta sıkı kum zeminlerde, farklı kazık çapları ve aralıklarında deplasman-kazık aralığı eğrileri.....	102
Şekil 6.9 : Gevşek kum zeminde 1000mm kazık çapında farklı kazık aralıklarında meydana gelen yük-deplasman eğrileri.....	103
Şekil 6.10 : Orta sıkı kum zeminde 1000mm kazık çapında farklı kazık aralıklarında meydana gelen yük-deplasman eğrileri.....	104
Şekil 6.11 : Gevşek kum zeminde 800mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yüklerin farklı kazık aralıklarına göre gösterimi.....	105
Şekil 6.12 : Orta sıkı kum zeminde 800mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yüklerin farklı kazık aralıklarına göre gösterimi.....	106
Şekil A.1 : Yumuşak kil zeminlerde $D= 450$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	118
Şekil A.2 : Yarı katı kil zeminlerde $D= 450$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	118
Şekil A.3 : Gevşek kum zeminlerde $D= 450$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	119

Şekil A.4 : Orta sıkı kum zeminlerde $D= 450$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	119
Şekil A.5 : Yumuşak kil zeminlerde $D= 650$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	120
Şekil A.6 : Yarı katı kil zeminlerde $D= 650$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	120
Şekil A.7 : Gevşek kum zeminlerde $D= 650$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	121
Şekil A.8 : Orta sıkı kum zeminlerde $D= 650$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	121
Şekil A.9 : Yumuşak kil zeminlerde $D= 1000$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	122
Şekil A.10 : Yarı katı kil zeminlerde $D= 1000$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	122
Şekil A.11 : Gevşek kum zeminlerde $D= 1000$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	123
Şekil A.12 : Orta sıkı kum zeminlerde $D= 1000$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	123
Şekil A.13 : Yumuşak kil zeminlerde $D= 1200$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	124
Şekil A.14 : Yarı katı kil zeminlerde $D= 1200$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	124
Şekil A.15 : Gevşek kum zeminlerde $D= 1200$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	125
Şekil A.16 : Orta sıkı kum zeminlerde $D= 1200$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.....	125
Şekil A.17 : Yumuşak kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=450$ mm için yük-deplasman grafiği.....	126
Şekil A.18 : Yarı katı kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=450$ mm için yük-deplasman grafiği.....	126
Şekil A.19 : Gevşek kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=450$ mm için yük-deplasman grafiği.....	127
Şekil A.20 : Orta sıkı kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=450$ mm için yük-deplasman grafiği.....	127
Şekil A.21 : Yumuşak kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=650$ mm için yük-deplasman grafiği.....	128
Şekil A.22 : Yarı katı kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=650$ mm için yük-deplasman grafiği.....	128
Şekil A.23 : Gevşek kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=650$ mm için yük-deplasman grafiği.....	129
Şekil A.24 : Orta sıkı kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=650$ mm için yük-deplasman grafiği.....	129
Şekil A.25 : Yumuşak kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=800$ mm için yük-deplasman grafiği.....	130
Şekil A.26 : Yarı katı kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=800$ mm için yük-deplasman grafiği.....	130
Şekil A.27 : Gevşek kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=800$ mm için yük-deplasman grafiği.....	131
Şekil A.28 : Orta sıkı kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde $D=800$ mm için yük-deplasman grafiği.....	131

Şekil A.29 : Yumuşak kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=1200 mm için yük-deplasman grafiği.	132
Şekil A.30 : Yarı katı kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=1200 mm için yük-deplasman grafiği.	132
Şekil A.31 : Gevşek kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=1200 mm için yük-deplasman grafiği.	133
Şekil A.32 : Orta sıkı kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=1200 mm için yük-deplasman grafiği.	133
Şekil A.33 : Yumuşak kil ve yarı katı kil özelliklerinin ortalamaları ile hesaplanan zemindeki 1000mm çapındaki kazıkların taşıdıkları yüklerin grafik gösterimi.	134
Şekil A.34 : Yumuşak kil ve yarı katı kil özelliklerinin ortalamaları ile hesaplanan zemindeki 1200mm çapındaki kazıkların taşıdıkları yüklerin grafik gösterimi.	134
Şekil A.35 : Yumuşak kil özelliklerinin üst sınır değerleri alınarak hesaplanan zemindeki 1000mm çapındaki kazıkların taşıdıkları yüklerin grafik gösterimi.	135
Şekil A.36 : Yumuşak kil özelliklerinin üst sınır değerleri alınarak hesaplanan zemindeki 1200mm çapındaki kazıkların taşıdıkları yüklerin grafik gösterimi.	135

İKİ DOĞRULTUDA YATAY YÜKLÜ KAZIK GRUPLARI İLE İLGİLİ BİR İNCELEME

ÖZET

Bilim ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak, artan nüfus ihtiyaçlarını karşılamak amacı ile çok katlı yüksek yapıların, deniz ve kıyı yapılarının, ağır köprü ve viyadüklerin inşaatlarına gereksinim duyulmaktadır. Bu tip yapılarda çok büyük statik ve dinamik, düşey ve yatay yükler oluşmaktadır. Dolayısı ile üstyapıdan zemine önemli mertebelerde yük aktarımı olmaktadır.

Üst yapıdan aktarılan bu yüklerin taşınabilmesi için, temellerin güvenli ve ekonomik olarak boyutlarının planlanması gerekmektedir. Bu yüklerin, zemin yüzeyine yakın bölgelerde yer alan tabakaların taşıma güçlerinin yetersiz olması durumunda, daha derinlerde yer alan taşıma güçleri daha yüksek olan sağlam tabakalara aktarılması gerekmektedir. Bu durumda kazıklar, üst yapı yüklerinin yüzeysel temeller ile güvenilir biçimde zemine aktarılamadığı durumlarda, yükü zayıf zeminleri geçerek, daha derindeki taşıyıcı tabakalara aktarmak için kullanılırlar. Kazıklar genellikle kazık grubu şeklinde kullanılmaktadırlar. Tekil kazık ve grup kazıkların güvenilir ve ekonomik olarak planlanması için tasarım yöntemleri geliştirilmektedir. Bu yöntemler, deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan parametrik çalışmalar ile gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında kazıklı temellerin kullanım yerleri, kazıkların sınıflandırılması, yatay yüklerin tekil kazığın ve grup kazıkların davranışlarına etkisinden bahsedilmektedir. Yatay yükleme altındaki tekil kazığın ve grup kazıkların davranışlarının çözümü için kullanılan yöntemler anlatılmaktadır. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ve Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programından bahsedilmektedir.

Tez çalışmasında, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde bulunan kazık grubunun iki doğrultuda yatay yük etkisindeki davranışları Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı ile analiz edilmektedir. Analizler ile kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yüklerin, kazıkların grup içerisindeki yerleşimlerine, kazık ara mesafesi, kazık çapı ve zemin özelliklerine göre değişimi incelenmektedir. Farklı zeminlerde yer alan kazık grubunun, deplasman değerleri kazık aralıkları ve kazık çapları değiştirilerek değerlendirilmektedir. Kazık grubunu oluşturan kazıkların çaplarına göre kriter belirlenerek, taşıyacakları maksimum yatay yükler, farklı kazık çapları, kazık aralıkları ve zemin özelliklerine göre incelenmektedir.

Analizler sonucunda, kazık grubunun yaptığı deplasmanların, kazık aralığı ve/veya kazık çapları arttıkça azaldığı görülmektedir. Zemin rijitliği arttıkça da kazık grubunun yaptığı deplasmanlar azalmaktadır.

Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde analiz edilen tüm kazık çapları için, kazık grubunu oluşturan her bir kazığın taşıdığı yüklerin, kazıkların grup içerisindeki yerleşimlerine ve kazıklar arasındaki mesafelere bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

Analizlerden elde edilen yük-deplasman eğrileri sonucu, kazık grubunun maksimum yatay yük taşıma kapasitesinin, kazık çapına, kazık aralıklarına ve zemin özelliklerine bağlı olduğu görülmektedir. Kazık çapının ve kazık aralığının arttırılması, kazık grubunun daha büyük yatay yükler taşıyabilmesi için gereklidir. Zemin sıklılığının artması kazık grubunun taşıyacağı maksimum yatay yükü arttırmaktadır.

A STUDY ABOUT PILE GROUPS Laterally LOADED IN TWO DIRECTIONS

SUMMARY

With the help of improvements in the science and technology, to meet the demands of increasing population, construction of high buildings, offshore structures, heavy bridges and viaducts are needed. In these types of structures, loads like static and dynamic as well as vertical and horizontal loads, occur.

To carry the loads caused by superstructure, the foundation should be planned as safe and economical as possible. If the bearing capacity of the layers close to soil surface is inadequate, these loads should be transferred to more durable layers having adequate bearing capacity to carry the load caused by structure. In these situations in case the loads cannot be transferred to the soil by using shallow foundations, piles are used to transfer the loads to the lower soil layers. Group piles are one particular type of deep foundations most widely used for high structures. In addition to the vertical loads that must be carried by piles, lateral loads may be present and must be considered in design. These lateral loads can be caused by a variety of sources such as earthquakes, high winds, wave action, liquefaction, ship impact and slope failure.

In literature, there are many studies which deal with the laterally loaded pile groups. These studies generally consist of two basic types such as experimental studies and numerical studies. Numerical and experimental studies were carried out to develop safe design methods for single and group piles. Pile and soil behavior were obtained from applications in the field and model tests carried out in the laboratory. These studies generally involve the determination of pile load capacity under vertical and lateral loads for estimation of pile displacement under lateral loads. The results of numerical, experimental and field studies reveal the behavior of laterally loaded pile groups in different soil conditions.

Evaluation of laterally loaded pile groups has also been performed using numerical models. In many studies, the results of the computer analyses that were performed using finite element approach are used. Most of these computer analyses were performed in 3D Finite Element Programs.

In the present thesis, three-dimensional finite element software program “Plaxis 3D Foundation” had been used. PLAXIS 3D Foundation finite element program was developed to be used in solving geotechnical engineering problems in the University of Delft located in the Netherlands. Using this software program, foundations and retaining walls can be analyzed in different soil conditions.

In the present thesis, using areas of pile foundations, classification of piles and the behavior of laterally loaded piles and piles groups are explained. The methods which are used for solutions of the behavior of laterally loaded piles and piles groups are explained. In these analyses of laterally loaded pile groups, finite element method as Plaxis 3D Foundation was used for analyses the laterally loaded pile groups.

When the models had been created, the region that the model has not been affected from boundary conditions was detected and the dimensions of the model were determined.

Mesh was generated automatically as 2D. Then, 3D Mesh was created. Horizontal mesh was selected as fine and vertical mesh was selected as very fine. However, in order to obtain the best results from the analyses, the mesh which had been around the pile groups was made to form a dense mass.

The behavior of laterally loaded pile groups in two directions in cohesive and cohesionless soil were analyzed by the Plaxis 3D Foundation program. In these analyses, 1000 kN laterally loads were applied to the cap of pile groups for determination of pile groups' behavior under laterally loads with changing diameter of piles, distance between piles and soil properties. Diameter of piles were used as 450 mm, 650 mm, 800 mm, 1000 mm and 1200mm and distance between piles were used as 2D, 2.5D, 3D and 4D. The cap thickness of the pile groups were selected by taking into account the diameter of piles. The models are solved using Mohr-Coulomb models. This linear elastic perfectly-plastic model requires five basic input parameters, namely a Young Modulus (E), a Poisson's ratio (ν), a cohesion (c), a friction angle (ϕ) and a dilatancy angle (ψ). These parameters were simple to obtain with laboratory tests.

These analyses are done for laterally loaded pile groups in four different soil types as soft clay, semi-solid clay, loose sand and medium dense sand. Soil types were taken from Spundwand Handbuch Teil 1. Displacement of pile groups in different soil types with changing diameter of piles and distance between piles were analyzed. Load combination for 1000 kN in two directions was found as 1414.2 kN. This load was divided to the total number of piles in the pile groups and the average load for each pile in the pile groups was found as 353.5 kN. Loads carried by each pile of the pile groups were considered with the average pile load carried by each pile of the pile groups. In order to determine the maximum lateral load capacity of the pile groups, 2 percent of the diameter of piles were selected as maximum lateral displacement for the pile groups and the load which do this maximum lateral displacement determined as the maximum lateral load capacity of the pile groups. At the end of the analyses, load-displacement curves were obtained and the maximum lateral load capacity for all pile groups with changing diameter of piles, distance between piles and different soil properties were determined.

All displacements were obtained at the top of the piles. As a results of the analyses, in soft clays, the maximum lateral displacement was obtained. The maximum lateral load was appeared with diameter of piles as 450 mm. For same diameter of piles, the displacement of the pile groups were decreased with increasing distance between piles. In addition, for same distance between piles, the displacement of pile groups were decreased with increasing diameter of piles. The displacement of piles in soft clays were higher than the displacement of piles in semi-solid clays. Similarly, the displacement of piles in loose sand were higher than the displacement of piles in medium dense sand. Decreasing the displacement of pile groups were caused by pile-soil-pile interaction. With increasing the distance between piles, soil-pile-soil interaction was decreased, accordingly the displacement of piles was also decreased.

As a results of the analyses, displacement of pile groups are decreased with increasing the distance between piles and/or diameter of piles.

In soft clays for all diameters of piles, piles nr. 1 and 4 were carried more loads than average pile load between percentage of 4.7% and 14.1%. For pile nr. 2 was carried loads percentage of -13.2% and 14.2%. For diameter of pile as 650 mm and distance between as 3D, with increasing the diameter of piles for pile nr. 2 was carried lower loads than average pile load. For pile nr. 3 was carried lower loads than average pile load between percentage of -34.4% and -4%.

In semi-solid clays for all diameters of piles, piles nr. 1 and 4 were carried more loads than average pile load between percentage of 2.8% and 10.2%. For pile nr. 2 was carried lower loads than average pile load between percentage of -6% and -13.4%. For pile nr. 3 was carried lower loads than average pile load between percentage of -25.8% and -9.2%.

In loose sands for all diameters of piles, piles nr. 1 and 4 were carried more loads than average pile load between percentage of 2.1% and 13.2%. For pile nr. 2 was carried more loads than average pile load between percentage of 6.6% and 38.6%. For pile nr. 3 was carried lower loads than average pile load between percentage of -60.6% and -13.2%.

In medium dense sands for all diameters of piles, piles nr. 1 and 4 were carried more loads than average pile load between percentage of 1.5% and 11.4%. For pile nr. 2 was carried more loads than average pile load between percentage of 12.8% and 40%. For pile nr. 3 was carried lower loads than average pile load between percentage of -59.2% and -15.6%.

In cohesive and cohesionless soils for all diameters of piles, the loads carried by number of piles nr. 1 and 4 were decreased with increasing the distance between piles. The load which lost by piles nr. 1 and 4 was carried by piles nr. 2 and/or 3 with changing diameter of piles and distance between piles. For pile nr. 3 in all soil types were carried lower loads than average pile load.

As a results of the analyses for all pile diameters in cohesive and cohesionless soil, loads which carried by each piles in pile groups were related to distance between piles and location of piles in pile groups.

For soft clays, more soil properties were taken from Spundwand Handbuch Teil 1. The average between properties of soft clays and properties of semi-solid clays was taken to analyzed laterally loaded piles in clays. The upper-limit values of properties of soft clays were used in analyses. The same results with previous analyses were obtained.

The displacement of pile groups in different soil conditions were analyzed with changing distance between piles and diameter of piles.

At the end of the analyses, load-displacement curves were obtained. In these load-displacement curves the maximum load carried capacity is related to diameter of piles, the distance between piles and soil properties. For the higher loads which is wanted to carry by piles, diameter of piles and distance between piles increasing is necessary.

In soft clays, the maximum lateral load capacity for pile groups was lower than semi-solid clays. Similarly, in loose sands, the maximum lateral load capacity for pile groups was lower than medium dense sand. To increase the stiffness of soil is increased the maximum load capacity which carried by piles.

1. GİRİŞ

Günümüzde şehirlerde yapılaşmanın artması sonucu yerleşim alanlarına duyulan gereksinim ve artan nüfus nedeni ile ihtiyaçları karşılamak için, çok katlı yüksek yapılar, ağır köprüler ve viyadükler, kuleler, limanlar gibi yapıların inşaatları her geçen gün artmaktadır. Bu tür yapılarda üst yapıdan zemine çok büyük değerlerde yük aktarımı olmaktadır. Bu yüklerin aktarımının yüzeysel temeller ile yapılması, oturma ve taşıma gücü kriterlerine bakıldığında çoğu zaman yetersiz olmaktadır. Zeminin yüzeye yakın olan bölgelerindeki zemin tabakalarının taşıma gücünün yetersiz olması durumunda, üst yapıdan gelen yüklerin daha derinde olan taşıma gücünün yüksek olduğu sağlam tabakalara aktarılması gerekmektedir. Bu gibi durumlarda, derin temeller tercih edilmektedir. Derin temellerin, ekonomik ve güvenli olarak optimum kriterlerde tasarlanması gerekmektedir.

Derin temellerin en çok kullanılan türü, kazıklı temellerdir. Kazıklar, üst yapıdan gelen düşey yükleri ve üst yapıyı etkileyen deprem ve rüzgar gibi yükler sonucu meydana gelen yatay yükleri, derinde olan taşıma gücü yüksek sağlam tabakalara aktarmayı sağlayan yapı elemanlarıdır.

Günümüzde kazıklar, hem düşey hem de yatay yüklerin taşınmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kazıklı temel sistemlerine ihtiyaç duyulan durumlar aşağıdaki şekildedir:

1. Yeterli taşıma gücüne sahip zemin tabakalarının yüzeysel temeller için ekonomik olmayacak kadar derinde olması,
2. Yüzeysel zemin tabakalarının yetersiz, çok gevşek veya çok eğimli olması,
3. Zemin oturmalarının kabul edilebilir değerden büyük olması veya yapının farklı oturmalara çok hassas olması,
4. Büyük yatay veya eğimli yük aktaran yapılara uygulanır.

Kazıklı temeller tek bir kazıktan oluşabildiği gibi gereksinime uygun olarak birden fazla kazıktan da oluşabilmektedir. Kazıklı temeller sistemindeki kazık sayısı, üst

yapının statik ve dinamik yüklerine, geometrik boyutlarına, kazık çapına ve kazık aralığına bağlıdır.

1.1 Tezin Amacı

Kazıklı temellerin, ekonomik ve güvenli olarak optimum kriterlerde tasarlanması gerekmektedir. Sayısal modellemeler ile yapılan çalışmalar ve deneysel çalışmalar ile kazıklı temellerin farklı kazık çapları ve kazık aralıklarında, değişen zemin ortamlarında davranışları analiz edilerek optimum kriterler bulunmaya çalışılmaktadır.

Bu tez çalışmasında iki doğrultuda 1000 kN yatay yük ile yüklenen 2x2 yerleşimine sahip 4'lü kazık grubunun davranışı, farklı zemin ortamlarında, farklı kazık aralıkları ve kazık çapları ile Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı ile analiz edildi. Belirlenen model ile farklı zemin koşullarında, iki doğrultuda yüklenen kazık grubunun deplasman değerleri ve kazık grubu içerisindeki her bir kazığın taşıdığı yük değerleri değerlendirildi. Farklı çaplarda ve aralıklardaki kazıkların oluşturduğu kazık gruplarının maksimum taşıyacakları yatay yükler, belirlenen kriterlere göre bulundu.

2. KAZIKLI TEMELLER

2.1 Giriş

Bilim ve teknolojinin gelişmesi ile çok katlı yüksek binaların, deniz kıyılarında limanların, yumuşak ve gevşek zeminlerde büyük viyadüklerin, açık denizlerde petrol platformlarının planlanıp projelendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yapılarda çok büyük statik ve dinamik, düşey ve yatay yükler oluşmaktadır.

Temellere gelen bu düşey ve yatay yükler, temellerin güvenli ve ekonomik olarak boyutlandırılmasını gerektirmektedir.

Yapıdan gelen yükler, zeminin taşıma gücünün yetersiz olmasına ilave olarak, çoğu kez oturma şartlarının sağlanamamasından dolayı, derin temel sistemleri kullanılarak zemine aktarılmaktadır. Böylece yüzeydeki zayıf tabakalar geçilerek derindeki taşıyıcı tabakalara ulaşılmaktadır. Bu amaçla kullanılan yapı elemanları kazık olarak nitelendirilmektedir. Temel sistemi de adını kullanılan yapı elemanından alarak kazıklı sistem olarak nitelendirilmektedir (Özkan ve Sağlamer, 1995).

Kazıklı temeller, yüzeysel temellere göre daha pahalı olmalarına karşı, aşağıdaki durumlarda tercih edilmektedirler.

1. Yüzeğe yakın zemin tabakalarının, üst yapıdan gelen yükleri taşıyacak yeterli taşıma gücünün olmaması veya çok sıkışabilir özellikte olması nedeniyle yüklerin daha derindeki sağlam olan zemin tabakalarına aktarılması gerekebilir. Sağlam tabakanın derinde olması durumunda yapıdan gelen yüklerin kazıklar yardımı ile derindeki tabakaya iletilmesi gerekebilir.
2. Dayanma yapıları veya yüksek yapılara ait temellerde zemin, rüzgar ve deprem yükü gibi yanal etkilerin karşılanması,
3. Gevşek granüler zeminleri sıkıştırmak,
4. Makine temelleri altındaki zeminin, titreşimlere ve sistemin doğal frekansına karşı sıkışmasını sağlamak,

5. Yer altı su seviyesi nedeni ile oluşabilecek çökmeleri ve yukarıya doğru meydana gelebilecek hareketleri engellemek, kazıklar yardımı ile kule temellerini desteklemek,
6. Yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminlerde bulunan temel sistemlerinin oturmalarını kontrol altında almak amacı ile,
7. Şev kaymalarını kontrol altına alma sebebiyle,
8. Açık deniz yapılarında rüzgar, gemi çarpması ve dalga yüklerine karşı,
9. Zeminde meydana gelebilecek olan hareketleri kontrol altına almak amacıyla,
10. Su ile etkileşime geçince, kabaran veya ani çökme gösteren zeminlerde üst yapı yüklerini aktif zon dışına aktarmak,
11. Köprü kenar ve orta ayaklarında erozyon sebebi ile oluşabilecek temel altı oyulmalarına karşı güvenlik amacıyla, kazıklı temel sistemlerinin kullanılmalrı gerekmektedir.

2.2 Kazıkların Sınıflandırılması

Kazıklar değişik özelliklerine göre çeşitli şekilde sınıflandırılabilirler. Örneğin; kazık malzemesine göre; ahşap, beton, çelik veya kompozit olarak sınıflandırılabilirler. Yükü zemine iletme biçimlerine göre yükün büyük kısmı kazık ucunda taşıyor ise uç kazığı, kazık çevresinde taşıyor ise sürtünme kazığı olarak isimlendirilirler. Kazıklarda çekme yükünü karşılayanlar çekme kazığı olarak adlandırılmaktadırlar. Zemine yerleştirilme şekline göre de kazıklar sınıflandırılmaktadırlar. Bunlar hazır çakma kazıklar, çakma yerinde dökme kazıklar, delinip yerinde dökme kazıklar, burgulanarak yerleştirilenler, iterek yerleştirilenler ve vibrasyonla yerleştirilenler gibi isimlendirilirler. Kazıklar zemine yerleştirilmesi sırasında meydana getirdikleri yer değiştirmelere göre de sınıflandırılabilirler. Aşağıda kazıklar kullanım amaçlarına göre, yapımında kullanılan malzemeye göre, zemin içine yerleştirilme tarzına göre sınıflandırılmıştır (Birand, 2007).

2.2.1 Kullanım amaçlarına göre kazıklar

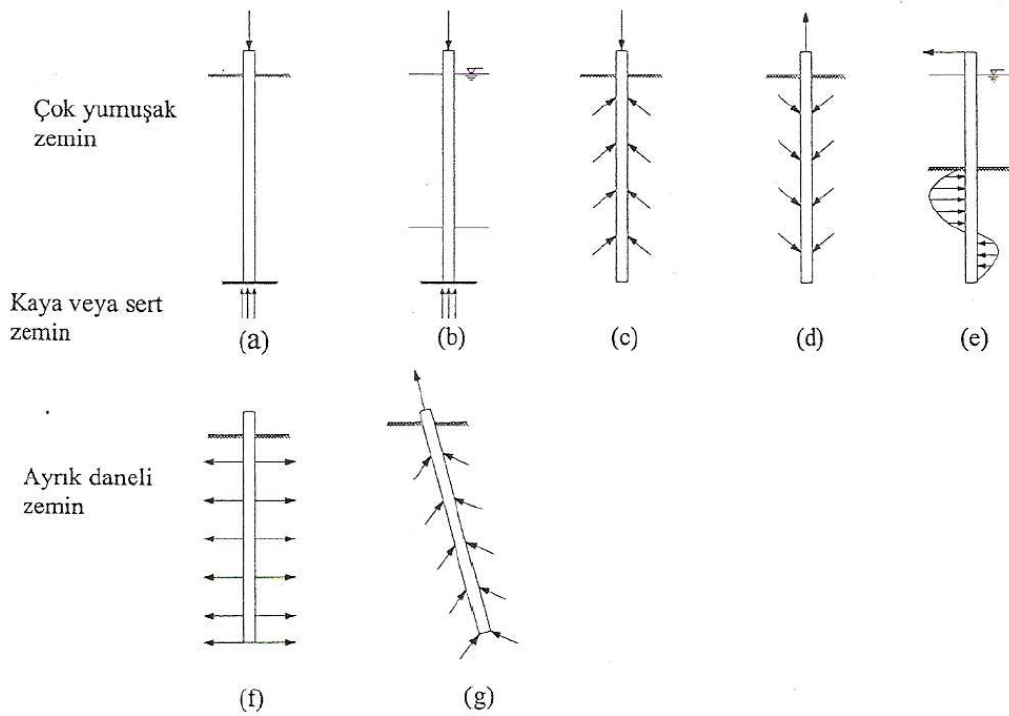
Uç kazıkları, üst yapıdan gelen yükleri su veya taşıma gücü açısından zayıf zemin tabakalarının altındaki sağlam, taşıma gücü yüksek zemin tabakalarına iletmek için kullanılan kazıklardır (Şekil 2.1a,b). Bir kazığın taşıma gücü, kazığın uç direnci ve

sürtünme direnci olarak ayrılmaktadır. Kazıkta meydana gelen pozitif çevre sürtünmesi, yukarı doğru etkiyen sürtünme direncidir. Uç kazıklarda bu tip sürtünme direnci dikkate alınmamaktadır. Buna karşılık zeminden bir kazığı çekip çıkartmak istendiğinde karşılaşılan direnç negatif çevre direncidir. Bu direnç ise mutlaka dikkate alınmalıdır.

Sürtünme kazıkları, üstyapıdan gelen yüklerin kazık çevresinde oluşan zemin sürtünmesi ile bir kısmının veya tamamının taşınması için kullanılırlar (Şekil 2.1c).

Çekme kazıkları, suyun kaldırma kuvveti altında, yapıların veya üst yapıya gelen kuvvetler nedeni ile döndürme momenti etkisinde temel sistemlerinin tespitini sağlayan kazıklardır. Su altında yapılan tesisler veya toprağa gömülü tanklar bu tür kazıkların kullanıldığı yerlerdir (Şekil 2.1d).

Yatay yüklü kazıklar, yatay kuvvetlere karşı kullanılan kazıklardır. Bu tür kazıklar, gemilerin iskeleye çarpmasından, dalga kuvvetlerinden oluşan etkileri karşılamak amacı ile kullanılırlar (Şekil 2.1e).



Şekil 2.1 : Kazıkların kullanımına göre sınıflandırılması a,b) uç kazığı, c) sürtünme kazığı, d) çekme kazığı, e) bağlama kazığı, f) kompaksiyon kazığı, g) eğik kazık.

Kompaksiyon kazıkları ile zemin sıkıştırılarak zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır (Şekil 2.1f).

Eğik kazıklar, aynı anda hem yatay hem de düşey yükleri taşıyabilmek için kullanılırlar (Şekil 2.1g).

2.2.2 Yapımında kullanılan malzemeye göre kazıklar

Ahşap kazıklar, sağladığı taşıma gücüne oranla hafif oluşu ve kolay taşınması, kolaylıkla işlenmesi ve uzun ömürlü olmaları bakımından kullanılırlar. Bu tür kazıklar, özellikle killere iyi adhezyon sağlarlar. Su seviyesi altında uzun ömürlüdürler. Ahşap kazıkları sert zeminlere, sıkı kum-çakıl tabakalara çakmak zordur, aşırı çakma halinde uçları veya gövdeleri çatlayabilir ya da kırılabilir. Yaklaşık olarak 20-25 cm çaplı bir kazığın taşıyacağı yük 200-300 kN civarında olmaktadır (Toğrol ve Tan, 2009).

Betonarme kazıklar, uygulamalarda en çok kullanılan kazık tipidir. Bu tip kazıklar çakma kazıklar ve yerinde dökme kazıklar olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Çakma kazıklar, fabrikada önceden hazırlanırlar ve zemine üzerlerine ağırlık düşürülerek çakılırlar. Bu kazıklar oldukça büyük yükleri yumuşak zemin tabakaları altındaki sağlam tabakalara iletmek için kullanılırlar.

Bu kazık türünün olumlu ve olumsuz yönleri aşağıda verilmektedir.

Olumlu yönleri;

- Yeraltı suyunun varlığı kazık yapım işini etkilememektedir.
- Kazık malzemesinin kalitesi önceden belirlenebilmektedir.
- Uzun boylarda çakılabilmektedirler.
- Deniz yapılarında su derinliğinin geçilmesi daha kolay olmaktadır.

Olumsuz yönleri;

- Kazık boyları kolayca değiştirilememektedir.
- Büyük çaplarda, çakma zorlukları yaşanmaktadır.
- Çakma işlemi sırasında, çevrede kabarma ve zor çakma koşullarında kazıkta hasar olasılığı görülmektedir.

Yerinde dökme kazıklar (fore kazıklar), kaplama borusu veya sondaj deliği içerisinde imal edilirler. Bu kazıklar, delme teknikleri kullanılarak veya boş bir boru çakılarak zeminde oluşturulan deliğin içine beton doldurulması ile imal edilen kazıklardır.

Bu kazık türünün olumlu ve olumsuz yönleri aşağıda verilmektedir.

Olumlu yönleri;

- Zemin kazıldıktan sonra betonlanması ile oluşturulan kazıklar olduğundan, zeminde kabarmaya neden olmaz.
- Değişik zemin koşullarına göre kazık boyutları ayarlanabilir.
- Kazı sırasında zemin verilerinin doğrulanma olanağı vardır.
- Yapımı sırasında çevrede önemli titreşim ve sarsıntı yaratmazlar. Bu özellik, şehir içinde çevre yapıların bu tür etkilere karşı hassas olduğu durumlarda büyük avantajdır.
- Yumuşak kayaç ve killi zeminde son bulan kazık uçları özel aygıtlarla genişletilerek taşıma gücü artırılabilir.

Olumsuz yönleri;

- Beklenmeyen zemin koşulları ile karşılaşılması halinde proje süresinde önemli gecikmeler olabilir. Bu nedenle, fore kazıkların yapılacağı alanda detaylı bir zemin incelemesi yapılmış olmalıdır.
- Yer altı suyunun varlığı halinde beton kalitesi etkilenebilmektedir. Özellikle kazık tabanı zemininde su akışı nedeni ile gevşeme ve kabarma olasılığı vardır.
- Foraj sırasında granüler zeminlerde gevşeme görülebilir (Yıldırım, 2009).

Çelik kazıklar, hafif, nakliyesi kolay ve çok büyük yüklerin aktarılmasını sağlayabildiklerinden dolayı kullanışlıdır. Çelik kazıklar H ve I profil veya dairesel boru şeklinde olabilir. Bu kazıklar taşıyıcı tabakaların derinde olması durumunda yüksek taşıma kapasitesine sahip uç kazıkları olarak kullanılabilirler. Çelik kazıklar açık veya kapalı uçlu olabilirler. Açık uçlu çelik kazıklar çakılmaya karşı daha az direnç gösterirler. Boru kazıkların içleri çakımdan sonra betonla doldurulur ve bu işlem kazığın rijitliğinin artmasını sağlar. Çelik kazıklar, yer altı suyunun zararlı

madde içermesi halinde ve deniz içinde çabuk çürürler. Çürüme oksijenin varlığından kaynaklandığı için bu kazıkların ömrü, kumlu zeminlerde uzun olmamakta, sert ve katı killerde ise daha uzun olmaktadır.

Kompozit kazıklar, birden fazla farklı malzeme kullanılarak yapılan kazıklardır. Genellikle bu tip kazıkların alt kısmı ahşap, üst kısmı da beton veya çelikten oluşur. Ahşap kısmı, çürümeden etkilenmeyeceği derinliğe kadar çakılır, üst kısım beton olarak, şartlara göre, gerektiğinde kaplama borusu yerinde bırakılarak yapılır. Bu tip kazıkların uygulama alanı geniş değildir.

2.2.3 Zemin içine yerleştirilme tarzına göre kazıklar

Kazıklar, zemin içinde neden oldukları sıkışma ve ötelenme yönünden, yer değiştirmeye neden olan kazıklar ve yer değiştirmeye neden olmayan kazıklar olarak sınıflandırılabilirler.

Yer değiştirmeye neden olan kazıklar; zemin içine çakılırken yerini aldıkları zemini yana doğru iterek yer değiştirmeye sebep olurlar. Çakma işlemi esnasında kazığın zemin içine itilmesi nedeni ile yanlara doğru sıkışan zeminde bir hacim değişmesi söz konusu olur. Bu tür kazık grubunda çakma kazıklar, H kesitli çelik kazıklar sayılabilir.

Yer değiştirmeye neden olmayan kazıklar, zeminin önce kazılarak bir boşluk oluşturması ve bu boşluğun betonlanması ile oluşan kazıklardır. Boşluk kenarlarının desteklenip desteklenmemesi, destekleniyorsa kalıcı mı yoksa geçici mi olduğu, geçici ise bir kılıf yardımı ile mi yoksa sondaj çamuru ile mi yapıldığına göre değişik kazık türlerinden söz edilebilir. Burada kazığın içine yerleştirileceği zemin önceden kazıldığı için zeminde ötelenme veya sıkışma meydana gelmez.

2.3 Kazık Tipi Seçimini Etkileyen Faktörler

Kazık tipi seçimini etkileyen faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilirler (Özkan ve Sağlamer, 1995).

1. Ekonomi,
2. Kazık boyu, boyların eşit veya değişken olması, boyların değişken olması durumunda uygulanabilirlik,
3. Mevcut zemin koşullarında, her tipin emniyetle taşıyabileceği yük,

4. Kazıkların, zeminde imalinde kolaylık, imalat hızı veya hazırlanma ve çakılma hızı.
5. Kazık başlıklarının kolay kesilmesi veya uygun olarak emniyetle alınabilmesi,
6. Gerekğinde kazık sayısını arttırabilme kolaylığı,
7. Eski yapıya ilave kazık yapılması durumunda, önceden yapılmış kazıkların tipi,
8. Eğik kazık gerektiğinde, kazığın belirli bir açı ile uygulanabilme kolaylığı,
9. Uygulanacak kazık tipi için yüklenici ve işverenin tecrübeleri.

2.4 Yatay Yüklerin Kazıklara Etkisi

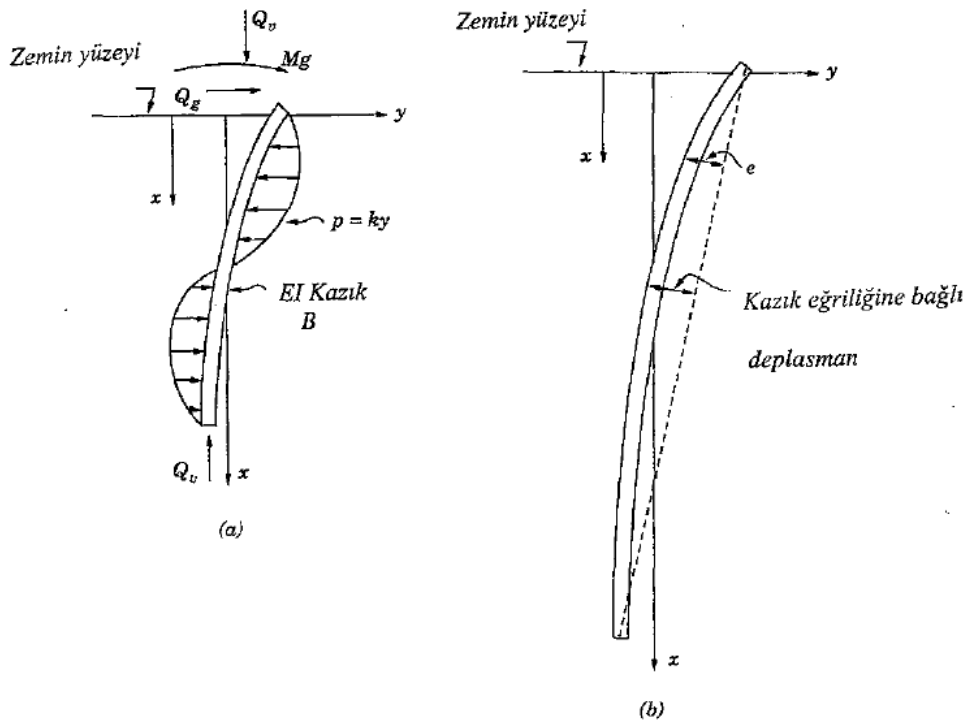
Liman ve kıyı yapılarında gemi çarpması, açık deniz yapılarında rüzgar ve dalga yükleri, dayanma yapıları temelleri, kule temelleri kazıkların yatay yüklenmesine birer örnektir. Bu tür kazıklarda tasarım kriteri son taşıma gücü değil, çoğunlukla kazıkların maksimum deformasyonudur. Son taşıma gücü ve yer değiştirmelerin yanı sıra kazıkta eğilme ile göçme meydana gelme olasılığına karşı güvenlik gözetilmelidir. Genelde son taşıma gücüne aşırı deformasyonlardan sonra ulaşıldığı için belirleyici olan diğer iki koşul olmaktadır (Yıldırım, 2009).

Yatay yüklü kazıklarda doğrusal olmayan davranışa neden olan iki etken vardır. Birincisi, kazık etrafındaki zeminin yük-deplasman davranışının doğrusal olmamasıdır. Yük kazıktan zemine artan bir yüzdeyle iletilirken, deplasman daha büyük bir yüzde ile artmaktadır. Kazığın davranışı doğrusal olmaya devam ederken, kazık-zemin sisteminin davranışı doğrusal değildir. İkincisi ise kazığın üst kısmındaki zeminin dayanımı son değerine ulaştığı zaman ek yükler dayanımın son değerine aynı derece ulaşmadığı daha derinlerdeki zeminlere iletmelidir. Kazık, yükleri daha derinde bulunan zemin tabakalarına transfer etmek için derinlik boyunca daha fazla deplasman yapar ve zemin direnci bu derinlik boyunca artar. Dolayısı ile momentler kazık başından etkiyen yüke göre çok daha hızlı artar. Yapılan analizler, maksimum moment ve zemin direncinin yatay yükün büyük değeri için daha derinlerde oluştuğunu göstermektedir (Duncan ve diğ., 1994).

2.4.1 Yatay yüklü tek kazığın davranışı

Bir kazıklı temelin taşıyabileceği yatay yük, kazık cinsine, zemin durumuna ve kazığın kazık başlığına mesnetlenme şekline bağlıdır.

Yatay yüklü tekil kazığın davranışını belirlemek için M_g moment, Q_g kesme kuvveti ve Q_v eksenel kuvvet etkisindeki elastik dikey kazık incelenmektedir. Kazığın dış kuvvetler etkisi ile deformasyonu Şekil 2.2’de görülmektedir. D çaplı kazık boyunca herhangi bir x noktasındaki zemin direnci p, o noktadaki deformasyon y ile orantılı olarak alınır ve k yatak katsayısı olmak üzere, $p = k \cdot y$ olarak ifade edilir. Kazığa uygulanan kuvvetler zemin reaksiyonu ile statik olarak dengede olmalıdır. Bu nedenle zemin reaksiyonlarının dağılımı, zeminin deformasyon özelliklerine ve zemine uygulanan yüke bağlıdır. Zemine uygulanan tüm yatay kuvvetler, zeminden gelen yatay kuvvetlerle karşılanmalıdır (Prakash ve Sharma, 1990).



Şekil 2.2 : Kazığa uygulanan yükler a) zemin direnci, b) kazıkta oluşan deformasyon (Prakash ve Sharma, 1990).

Şekil 2.2’de kazığın eğilmesinden dolayı oluşan deformasyonlar görülmektedir. Kazıkta oluşan yanıl deformasyonların e, eksantrisitesinin oluşmasına neden olduğu görülmektedir. Bu eksantrisiteden dolayı kazığa M_g ve Q_g ‘den oluşan momente ek olarak $Q_v \cdot e$ momenti de etkimektedir. Bunlara göre, eksenel yük ve eksantrisite ile oluşan

özellikleri ile üzerindeki düşey yüke bağlıdır. Killi zeminlerdeki çakma kazıklarda kazığın yanal direncinin zamanla arttığı görülmektedir. Kumlardaki tekrarlı yüklemelerde yatay yüklü kazığın deplasmanı yükün ilk etkisiyle oluşan deplasmanın iki katı kadar olabilir. Kum gevşek yapıda ise, tekrarlı yükler kumun sıkılığını artırır ve deplasmandaki sonradan meydana gelen artışları düşürür. Yükün büyüklüğündeki değişikliğe benzer bir artış kumun sıkılığında olmaktadır (Prakash ve Sharma, 1990).

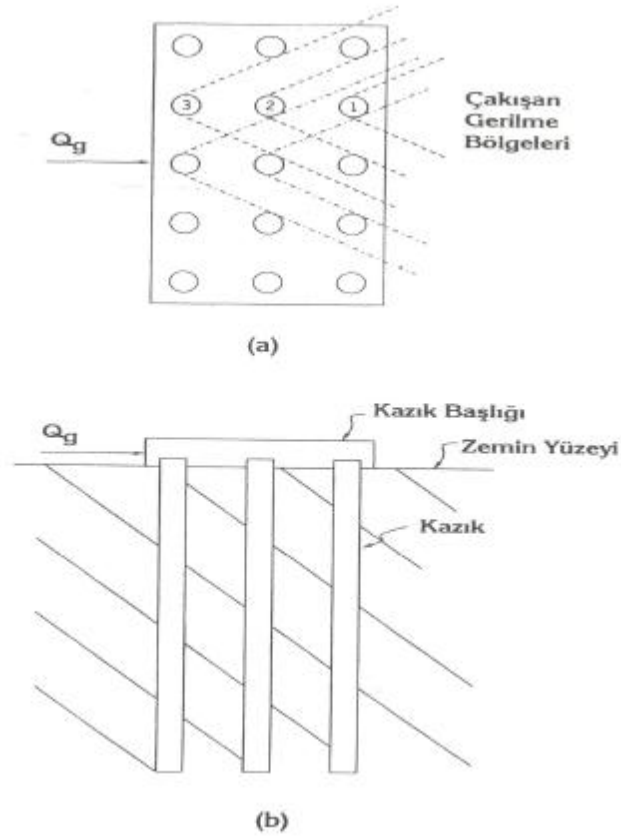
Sadece rijit ve çok kısa kazıklarda, tam bir plastik davranış görülmektedir, bu nedenle normal kazıklarda elastik ve plastik zemin direnci kombinasyonları dikkate alınmalıdır. Kazık zemin arasındaki etkileşimlerde en önemli etkenlerden birisi kazık uzunluğudur. Kazık uzunluğu, kazık deplasman mertebesini, göçme şeklinin dönme, ötelenme veya kırılma şeklinde olmasını etkilemektedir. Uzun ve kısa kazıkların yük altında davranışlarının farklılık göstermesi nedeni ile, kazık uzunluğu önemli bir kriterdir. Ancak belirli bir kazık derinliğinden sonra, kazık boyunun arttırılmasının, kırılmaya sebep olan yüke ihmal edilebilecek bir etkisinin olduğu görülmektedir (Davisson, 1960).

2.4.2 Yatay yüklü kazık grubunun davranışı

Yatay yüklü kazık gruplarında tek kazıkta olduğu gibi kazıkların yapısal göçmesi, grubun aşırı yer değiştirmesi ve kazıklar etrafındaki zeminde son taşıma gücüne ulaşma nedeni ile göçme olasılığı birlikte gözetilmelidir. Kazık gruplarıyla ilgili problemlerde genellikle en çok yük alan kazıkta doğan maksimum eğilme momenti veya yer değiştirmeler daha kritik olmaktadır (Yıldırım, 2009).

Kazık grupları, kazık etki alanlarının, kazık davranışları üzerinde etkili olması sonucu tekil kazıklardan daha farklı davranışlar gösterirler. Bir grup içerisindeki yerleşime göre gruplar geniş ve dar aralıklı diye ikiye ayrılabilir. Geniş aralıklarda bir kazığın yer değiştirmesi diğerini etkilememekte olup, yatay yük kazıklara eşit bölünüp daha sonra tek kazık analizi yapılabilir. Sık aralıklı gruplarda ise bir kazığın davranışı diğerini etkilemektedir. Bu davranışa kazık-zemin-kazık etkileşimi denilmektedir. Bu davranışa etki eden diğer etkenler arasında kazık başlığının zeminle ilişkisi ve kazık başlığının varlığı ile onun sağladığı rijitlik sayılabilir. Diğer yandan kazığın yerleştirme biçimi (çakma veya delme) zeminin içerisindeki gerilmeleri farklı şekilde değiştirdiğinden kazık grubunun davranışında etkili olması beklenir (Yıldırım, 2009).

Şekil 2.4'de Q_g yatay kuvveti ile yüklü bir kazık grubunun plan ve profili görülmektedir (Prakash ve Sharma, 1990). Şekil 2.4a'daki noktali çizgilerle kazıkların komşu kazık üzerindeki etki sahaları görülmektedir. 1 numaralı kazık, kazık grubunun dışındaki bölgeyi etkilerken, 2 ve 3 numaralı kazıklar hemen önlerindeki bölgede etkili olmaktadır. 1 ve 2 numaralı kazıkların deformasyonları nedeni ile örselenen zeminden dolayı 2 ve 3 numaralı kazıkların karşılaşılabilecekleri zemin direnci azalmaktadır.

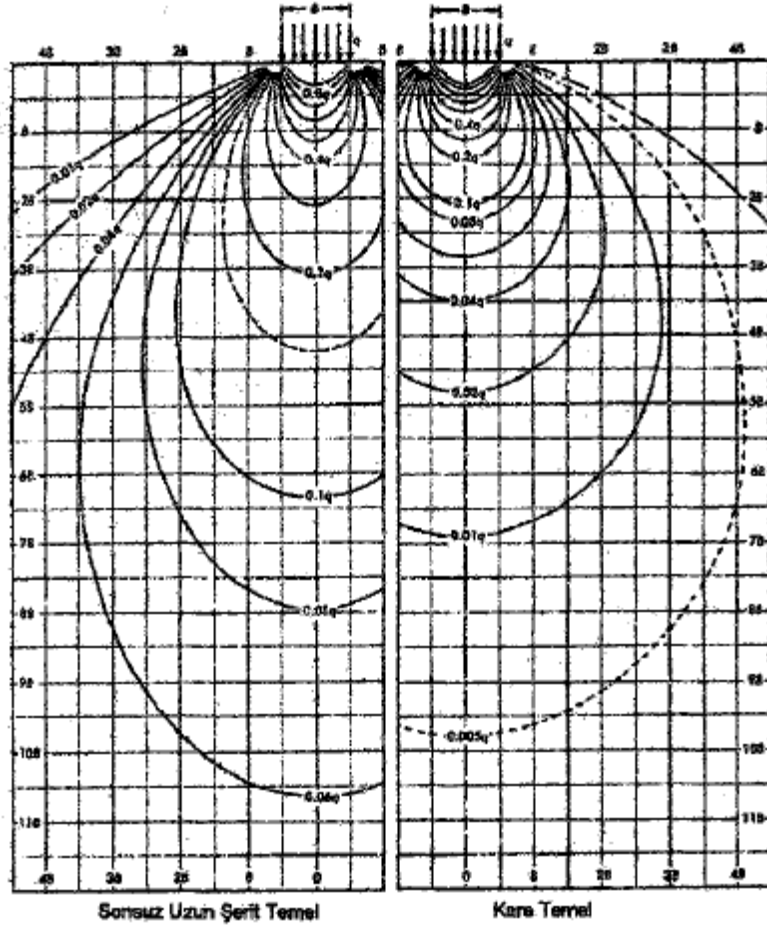


Şekil 2.4 : Kazıkların grup davranışının zemin üzerindeki etkisi a) Plan, b) Kesit (Prakash ve Sharma, 1990).

Şekil 2.5'te yarı sonsuz elastik bir ortamda homojen olarak yüklenmiş B genişliğindeki yüzeyde oluşan gerilme soğanları görülmektedir (Boussinesq soğanları). Kare ve sonsuz uzunluktaki şerit temel için elde edilmiş olan değerlerin yatay yüklü kazıklarda da kullanılması mümkündür. Kaba bir yaklaşımla, düşey kuvvetin zeminin alt tabakalarındaki etkisinin %10 dan daha az olduğu durumdan sonraki etkiler ihmal edilebilir sınırlar içindedir.

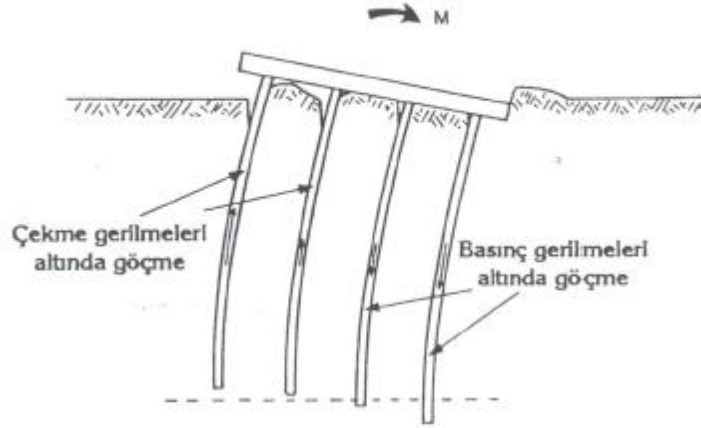
Sonsuz uzunluktaki şerit temelde yaklaşık 6B derinlikte %10 luk değerlere ulaşılmıştır. Bu durumda yatay yüklü kazıkların arasındaki mesafenin de yatay yük

doğrultusunda $6B$ civarında olması halinde kazık etkileşimi az olacaktır. Yüke dik yöndeki kazık mesafesinin $4B$ civarında olması yeterlidir. Yük doğrultusundaki maksimum mesafenin en fazla $12B$ olması gerekmektedir. Grup etkisinin neredeyse oluşmadığı kazık mesafesi yüke dik yönde $8B$ olarak alınmalıdır.



Şekil 2.5 : Boussinesq gerilme soğanları ve kazık aralıklarının belirlenmesi (Prakash ve Sharma, 1990).

Kazık gruplarının göçmesi fazla deformasyon yapmasına ilave olarak, dönmesinden dolayı da oluşabilmektedir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi dönme ekseninin arkasındaki kazıklar çekme gerilmeleri sonucu, önündeki kazıklar ise basınç gerilmeleri nedeni ile göçmektedirler. Bu nedenle kazık grubunun genel stabilitesi için yanal taşıma kapasitesinin yanında düşey taşıma kapasitesi de önem taşımaktadır. Yatay zemin direnci hesaba katılarak, grup kapasitesi ve göçme durumu statik hesaplar ile karar verilebilir (Fleming ve Elson, 2009).



Şekil 2.6 : Yanal yük etkisi altında kazık grubunun göçmesi (Fleming ve Elson, 2009).

Serbest başlı kazıklı bir kolonun Q_h yatay yükü ile yüklenmesi durumunda oluşacak y deformasyonu kazık başında $Q_h \cdot L^3/3EI$ olarak elde edilir. Ancak kazık başının Q_h yatay yükünü iletebilecek şekilde sabitlenmesi durumunda deformasyon $y/4$ olarak oluşacak yani yanıl deformasyonda %75'lik bir azalma oluşacaktır. Kazığın içinde bulunduğu zemin türüne göre bu oranın değişmesi söz konusu olmakla birlikte sabit başlıklı kazıklarda yanıl deformasyon 1/2 ile 1/2,5 arasında azaltılması doğru olacaktır.

3. YATAY YÜKLEME ALTINDA TEK KAZIK ANALİZİ

Kazıklara düşey yüke ilave olarak rüzgar, deprem, toprak basıncı, gemi çarpması, dalga çarpması gibi yatay yüklerde etki etmektedir. Kazıklı bir temelin taşıyabileceği yanal yük, kazık özelliklerine, zeminin özelliklerine ve durumuna, kazık başlığının kazığa bağlanma şekline bağlıdır.

Uygulamada kazık ve kazık başlığının göreceli rijitliğine ve birbirlerine bağlı oluş şekillerine göre serbest başlı ve tutulu başlı kazıklar olarak iki gruba ayrılırlar. Bir kazıklı sistemin güvenle taşıyabileceği yatay kuvvetin bulunmasında iki kriter esas alınır:

1. Zeminde göçme yaratacak yük yeterli bir güvenlik sayısına bölünebilir,
2. İzin verilebilir yatay yer değiştirme yaptıracak büyüklükte yatay kuvvet bulunur.

Kazıkların yatay yüklemeler altındaki analizleri de bunlara paralel olarak ya nihai göçme yükünü hesaplamaya yönelik yöntemler, ya da yer değiştirmenin tahmin edilmesine yönelik yöntemler olarak geliştirilmişlerdir (Yıldırım, 2009).

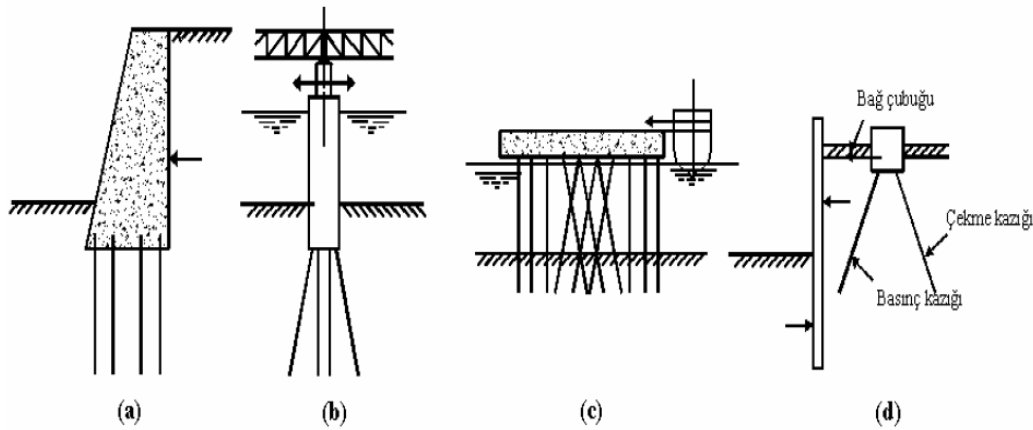
3.1 Kazıklara Etkiyen Yatay Yükler

Kazıklara düşey yüklere ilave olarak yatay yük ve moment kuvvetleri de etki edebilmektedir. Bu nedenle kazıkların sadece düşey yükleri değil, yatay yük ve moment kuvvetlerini de güvenli bir şekilde zemine aktarmaları ve bu yükleri güvenli bir şekilde taşımaları gerekmektedir. Kazıkları etkileyen yatay yükler aşağıdaki nedenler ile oluşmaktadır:

1. Rüzgar yükleri,
2. Deprem yükleri,
3. Toprak basınçları,
4. Gemi çarpma ve bağlama kuvvetleri,
5. Dalga kuvvetleri,

6. Kolonlardaki düşey eksantrik yükler,
7. Akarsu akıntılarının köprü ayaklarında oluşturduğu yatay kuvvetler,
8. Elektrik direklerindeki kablo kuvvetleri,
9. Köprülerde araçların fren ve ilerleme hareketleri.

Kazıklara etkileyen yükler, aktif ve pasif yükler olarak ikiye ayrılmaktadır. Aktif yükler, zamanla değişen ve hareketli yüklerdir. Rüzgar, dalga, trafik, gemi çarpma ve gemi bağlama yükleri aktif yüklerdir. Toprak basıncı ve kemer köprülerdeki ölü yükler ise pasif yükleri oluşturmaktadırlar. Üst yapı yükünün yatay bileşeninin küçük olduğu durumlarda, yatay yükler düşey kazıklar ile güvenle taşınabilmektedirler. Yüksek mertebelerdeki yatay yük bileşenlerine sahip olan rıhtım ve dalgakıranların kazıkları, köprü ayaklarının kazık temelleri ve dayanma yapılarında ise düşey kazıkların gelen yatay yükleri güvenli bir şekilde taşımaları olanaksızdır. Bu durumda, eğik kazıklar inşa edilerek yüksek yatay taşıma gücü sağlanabilmektedir. Şekil 3.1’de yatay yüklü düşey kazıkların kullanıldığı yerler gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Yatay yüklere karşı inşa edilen kazıklar, a) dayanma yapıları, b) köprü ayakları, c) iskeleler, d) palplanjlı dayanma yapıları (Tomlinson, 1994).

Dayanma yapılarında Şekil 3.1a da görüldüğü gibi, toprak basıncı her zaman duvar arkasından duvar yönünde etkir. Duvar altında inşa edilecek düşey kazıklar hem duvarın kendi ağırlığını hem de yatay kuvvetleri karşılayacak şekilde tasarlanır. Ancak yeterli taşıma gücünün sağlanamaması durumunda Şekil 3.1b’de görüldüğü gibi eğik kazıklar inşa edilir. Şekil 3.1b’deki köprü ayağında fren ve araç trafiğinin çekme kuvveti yatay yüke neden olmaktadır. Bu durumda kuvvetler iki yönde etkimektedir. Bu gibi durumlarda önce bu yükler dikkate alınarak tasarlanan düşey kazıklar veya eğik kazıklar Şekil 3.1b’deki gibi tasarlanması uygun olmaktadır.

Köprü ayaklarının derin olduğu durumlarda su akıntısı yönünde ek yükler de oluşabilmektedir. Deniz yapılarında gemi çarpma ve dalga kuvvetleri önemli yatay yükler oluşturmaktadır. Bu yüklerin karşılanması amacı ile yapılabilecek kazık tasarımı da Şekil 3.1c’de gösterilmektedir. Perde dayanma yapısında yatay yükler Şekil 3.1d’de gösterildiği gibi eğik kazıklar ile karşılanmaktadır (Tomlinson, 1994).

3.2 Yatay Yüklü Kazıklarda Kabul Edilebilir Yük ve Deplasman Limitleri

Yumuşak kil veya silt içine düşey olarak inşa edilmiş kazıklarda, zeminin kazığın yanal direncine katkısı azdır. Bu yüzden, böyle zeminlerdeki kazıkların kesit momenti hesaplanarak eğilmeye karşı dirençlerini arttıracak donatı konulmalıdır. Kazığın başlık hizasında kabul edilebilecek yerdeğiştirmesi, yaklaşık olarak, binalarda 6 mm, geniş yapılarda ise 12 mm alınabilir (Toğrol ve Tan, 2009).

İzin verilebilecek yatay yükler, McNulty (1956) tarafından deneylere dayanılarak aşağıdaki Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kazıklar için izin verilebilir yatay yükler (McNulty, 1956).

Kazık Cinsi	Kazık Başlığı	Zemin Cinsi	İzin Verilebilir Yük (t)
Ahşap (D= 30cm)	Serbest Başlı	Kum	0,7
		Orta Kil	0,7
	Rijit Başlı	Kum	2
		Orta Kil	1,8
Beton (D= 40cm)	Serbest Başlı veya Rijit Başlı	Orta Kum	3,2
		İnce Kum	2,5
		Orta Kil	2,3

Kazıkların yanal direnci için killi zeminlerde en çok 50 kN, üstten 2 m kazılıp kum doldurulmuş killi zeminler için en çok 70 kN ve kumlu zeminler için en çok 100 kN değerlerinin Japonya için standart olduğunu bildirmektedirler. Bu yükler için kazık başının yerdeğiştirmesinin 5-10 cm mertebesinde olacağı da belirtilmektedir. Kazık gruplarının direnci ise her kazığın direncinin toplamı olacaktır (Ishii ve diğ., 1960).

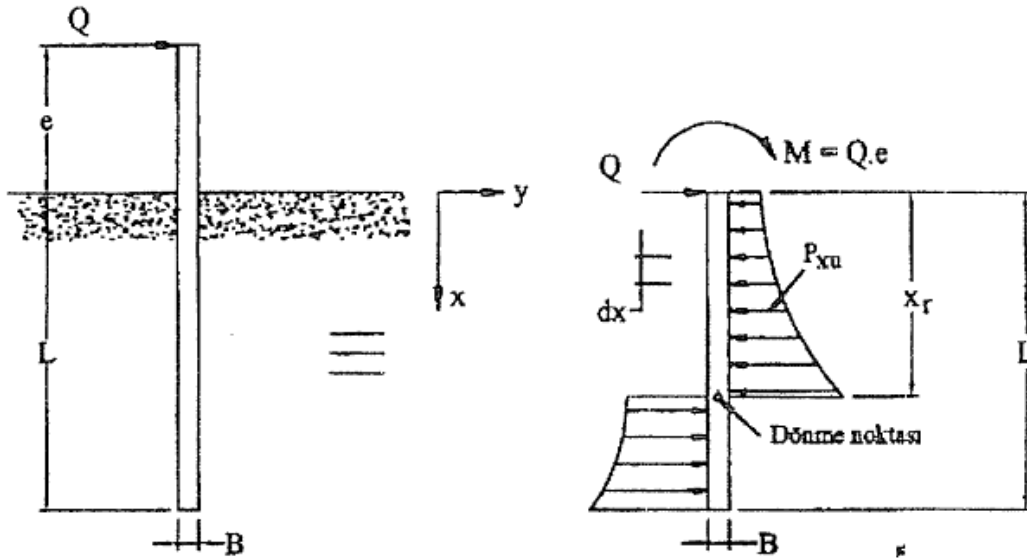
Genellikle, şartnamelerde düşey kazıkların taşıyabilecekleri yatay yükler hakkında ayrıntılı kayıtlar bulunmamaktadır. Almanya’da, kazık grubunu oluşturan kazıklara gelen düşey yükün %3’ü (maksimum %5’i kadar) bir yanal kuvvete izin

verilmektedir. Yanal yük izin verilen değerden fazla ise eğik kazıklar çakılması zorunludur (Toğrol, 1970).

Bazı yapılarda yatay yüklü derin temellerin tasarımı son kazık yatay taşıma gücü açısından yeterli olmaktadır. Bununla birlikte bazı yapılarda yatay zemin gücünün mobilize olması için büyük deplasmanların oluşmasına izin verilmemektedir. Örneğin; bazı köprü ve benzeri yapılarda 6-18 mm'den fazla deplasmana izin verilmemektedir. Bu yüzden izin verilebilir yatay deplasman için belli sınırlar var ise yük-deformasyon analizi yapılarak yatay yüke karşı deplasman değerleri belirlenmelidir (Coduto, 1994).

3.3 Brinch Hansen (1961) Yöntemi

Brinch Hansen (1961) tarafından kısa ve rijit kazıklar için geliştirilen toprak basıncı teorisine dayalı bir yöntemdir. Tabakalı zeminlerde ve c, ϕ zeminlerde kullanılabilir. Ancak sadece kısa rijit kazıklar için uygundur. Dönme noktasının saptanması için deneme yanılma yöntemi kullanılır. Şekil 3.2'de yatay yüklenen bir kazıktaki zemin direnci görülmektedir.

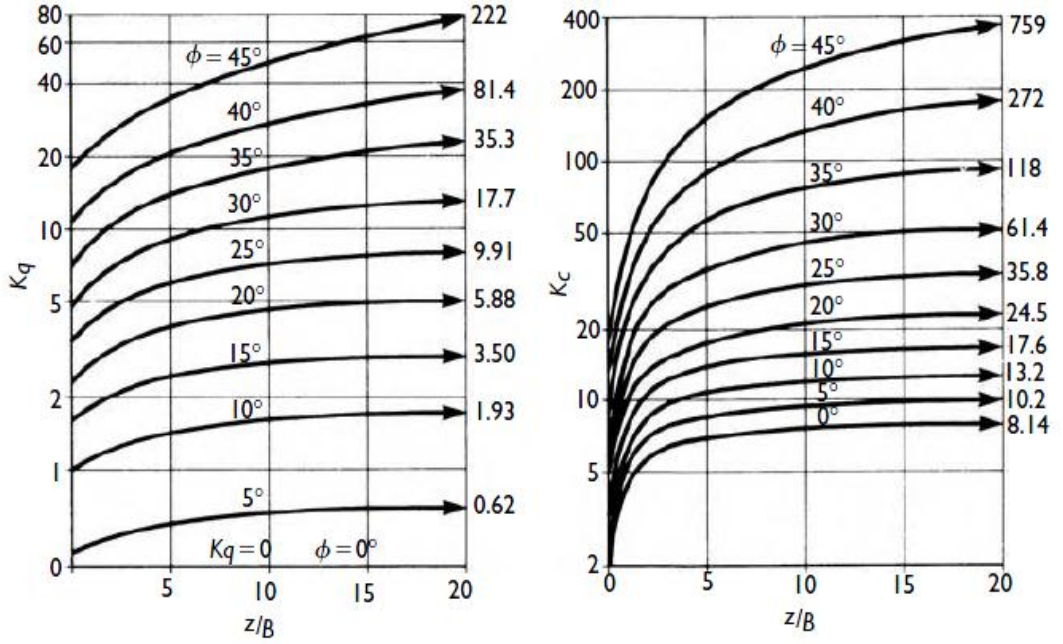


Şekil 3.2 : Brinch Hansen Yöntemi (Prakash ve Sharma, 1990).

Maksimum taşınabilir yatay yük Q_u ve moment M_u , son zemin direncinin herhangi bir x derinliğinde meydana gelen nihai yanal zemin direnci (3.1) denklemi ile bulunabilmektedir.

$$P_{xu} = \sigma_{vx}' \cdot K_q + c \cdot K_c \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda, σ_{vx}' düşey efektif gerilme, c kohezyon, B kazık çapı, K_c ve K_q ise içsel sürtünme açısı ϕ ve x/B oranına bağlı olarak Şekil 3.3'den bulunacak olan katsayılarıdır.



Şekil 3.3 : K_c ve K_q katsayıları (Prakash ve Sharma, 1990).

Bu yöntem uygulanırken zemin tabakalara bölünür ve P_{xu} değerlerinin derinlikle değişimi saptanır. Dönme noktasının yeri x_r için varsayımda bulunulur. Kazık tepesine göre moment alınarak toplam momentlerin sıfır olması koşulu sağlanır. Bu sağlanıyorsa x_r 'nin yeri denge koşulu sağlanıncaya kadar değiştirilir. x_r 'nin doğru yeri saptanıncaya bu kez x_r 'nin yerine göre moment alınarak göçme yükü Q_u bulunur.

Kısa süreli analizlerde, drenajsız mukavemet parametreleri c_u ve $\phi=0$ kullanılabilir. Uzun süreli analizlerde ise drenajlı mukavemet parametreleri c' ve ϕ' kullanılmalıdır.

3.4 Broms (1964) Yöntemi

Kazığın taşıyabileceği maksimum yatay yükü veya momenti hesaplamak için kullanılan, Broms (1964) tarafından geliştirilmiş bir hesap yöntemidir. Bu yöntemin temeli de toprak basıncı teorisine dayanmaktadır. Bu yöntem, kısa ve uzun kazıklar için kullanılabilirler. Ancak zemin tam granüler ($c = 0$) ya da tam kohezyonlu ($\phi_u = 0$) varsayılmalıdır. Tabakalı zeminlerde uygulanamaz. Serbest ve tutulu başlı kazıkların analizleri ayrı ayrı olanaklıdır. Kazıklar bu yöntemde kısa (rijit) kazıklar ve uzun (bükülebilir) kazıklar diye iki grupta değerlendirilmektedir (Yıldırım, 2009).

Bir kazığın kısa veya uzun olduğu göreceli rijitlik boylarına göre aşağıdaki şekilde belirlenmektedir.

Kohezyonsuz zeminler ve normal konsolide killi zeminler için;

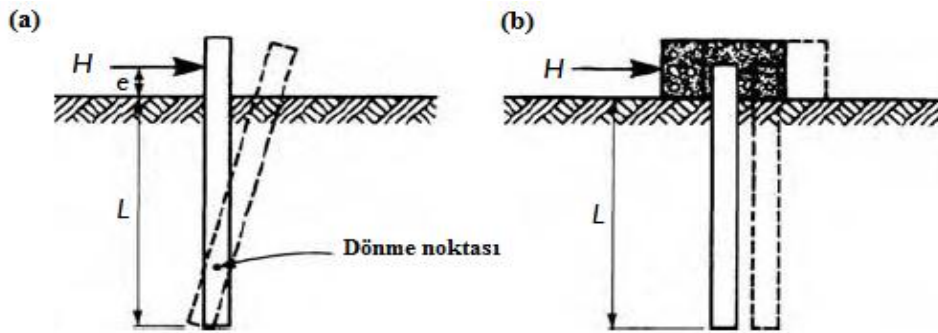
$$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5} \quad (3.2)$$

Kohezyonlu (aşırı konsolide killer) zeminler için;

$$R = \left(\frac{EI}{k_h B} \right)^{1/4} \quad (3.3)$$

Bu denklemlerde, T ve R göreceli rijitlik boyu, E kazığın elastisite modülü, I kazık kesitinin atalet momenti, B kazık çapı, k_h derinlikle artan yatay yatak katsayısı, n_h yatay yatak katsayısı sabitidir.

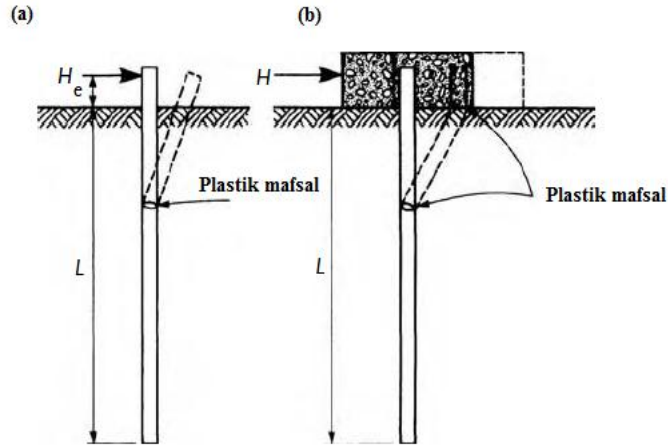
Kısa rijit kazıklarda $L/T \leq 2$ veya $L/R \leq 2$ kriterinin sağlanması gereklidir. Uzun elastik kazıklarda ise $L/T \geq 4$ ve $L/R \geq 3.5$ kriteri sağlanmalıdır.



Şekil 3.4 : Yatay yük etkisindeki kısa kazıklarda deformasyon durumu a) Serbest başlı b) Tutulu başlı (Tomlinson ve Woodward, 2008).

Kısa rijit kazıkların başlıklarının serbest veya tutulu olması durumuna göre deformasyon şekilleri de değişir. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi serbest başlı kısa kazıklar bir nokta etrafında dönme hareketi yaparlar, tutulu başlı kısa kazıklar ise ötelenme hareketi yaparlar (Tomlinson ve Woodward, 2008).

Şekil 3.5’de görüldüğü gibi serbest başlı uzun kazıklarda ise zemin yüzeyinden itibaren derinlikle beraber artan zemin basınçları nedeni ile kazığın tamamı bir dönme noktası etrafında hareket etmez. Bu durumda kazığa etki eden yüke bağlı olarak belirli bir derinlikte kazık kesitinin taşıma gücünün aşılması sonucu kazıkta göçme yani plastik mafsallık meydana gelir. Kazık başının tutulu olduğu uzun kazıklarda ise kazık başı kesitindeki negatif momentin kazığın moment dayanımına ulaşması ile kazıkta aynı serbest başlı kazıkta olduğu gibi belirli bir derinlikte plastik mafsallık oluşur.



Şekil 3.5 : Yatay yük etkisindeki uzun kazıklarda deformasyon durumu a) Serbest başlı b) Tutulu başlı (Tomlinson ve Woodward, 2008).

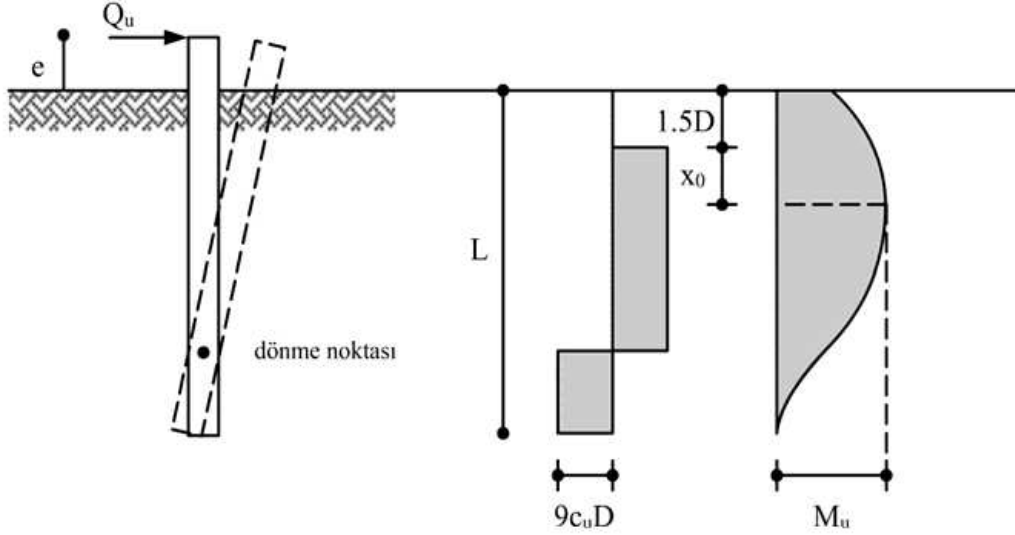
3.4.1 Kohezyonlu zeminlerde kısa ve uzun kazıkların analizi

Broms (1964) yöntemine göre kohezyonlu zeminlerdeki kısa kazıklarda zemin yüzeyindeki direnç, zemin yüzeyinden kazık çapının 1.5 katı derinliğe kadar sıfır olarak kabul edilir. Bu derinlikten itibaren zemin direnci $9c_u B$ olarak kabul edilmektedir.

3.4.1.1 Serbest ve tutulu başlı kısa kazıklar

Kohezyonlu zeminlerdeki kısa kazıklarda kazık başının serbest veya tutulu olması durumuna göre Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de verilen zemin gerilmeleri ve kazık eğilme momentleri oluşmaktadır. Serbest ve tutulu başlı kısa kazıkları gösteren bu

şekillerde, e kazığın zemin yüzeyi üstünde kalan uzunluğunu, L kazığın zemin içindeki kısmının uzunluğunu, D kazık çapını ve Q_u zeminin yatay yönlü son taşıma gücünü göstermektedir.



Şekil 3.6 : Serbest başlı kısa kazıkta oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964a).

Serbest başlı kısa kazıklar

Maksimum momentin oluştuğu noktaya göre moment alınırsa,

$$M_u = Q_u \cdot (e + 1.5 \cdot D + 0.5 \cdot x_0) \quad (3.4)$$

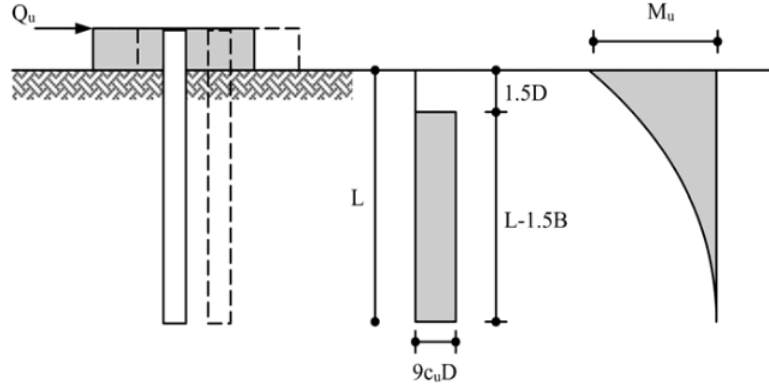
olarak bulunur. x_0 boyu haricindeki kazık boyu $(L - x_0)$ zemin direncine karşı koymaya çalışacağından,

$$M_u = 2.25 \cdot D \cdot c_u \cdot (L - x_0)^2 \quad (3.5)$$

denklemini elde edilir.

x_0 kesme kuvvetinin sıfır olduğu yer (3.6) denklemi ile bulunur.

$$x_0 = Q_u / 9 \cdot c_u \cdot D \quad (3.6)$$



Şekil 3.7 : Tutulu başlı kısa kazıkta oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964a).

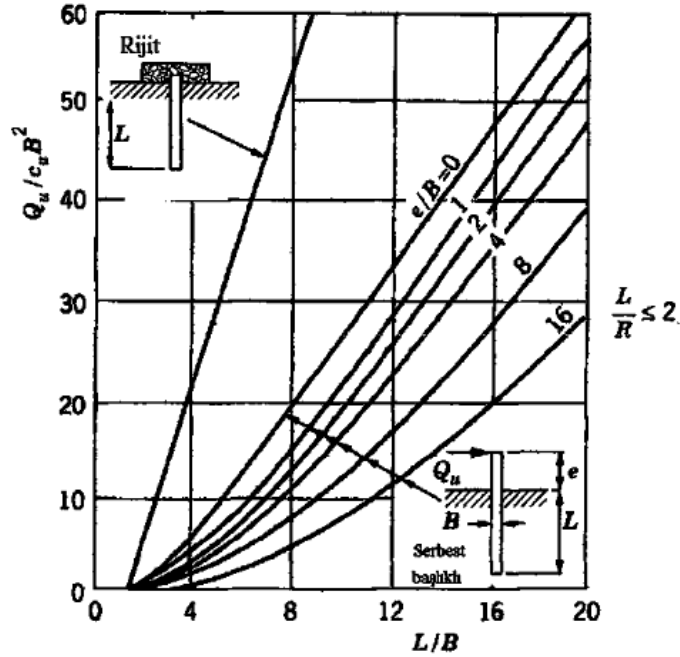
Tutulu başlı kısa kazıklar

$$Q_u = 9 \cdot c_u \cdot D \cdot (L - 1.5 \cdot B) \quad (3.7)$$

Maksimum momenti bulmak için,

$$M_u = 4.5 \cdot c_u \cdot D \cdot (L^2 - 2.25 \cdot B^2) \quad (3.8)$$

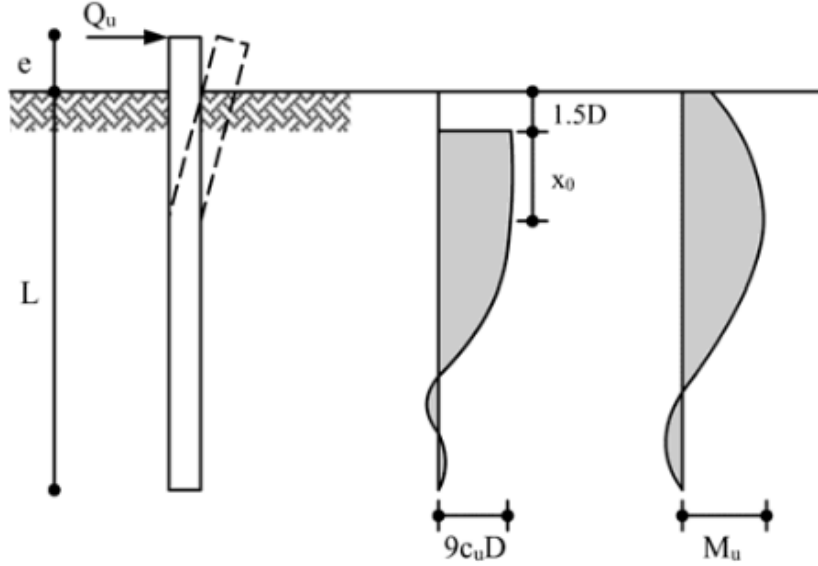
Serbest ve tutulu başlı kısa kazıkların yatay yük taşıma kapasiteleri Şekil 3.8'de gösterilen grafikte bulunabilmektedir.



Şekil 3.8 : Kohezyonlu zeminlerde kısa kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerinin bulunması (Tomlinson, 1994).

3.4.1.2 Serbest ve Tutulu Başlı Uzun Kazıklar

Uzun kazıklarda serbest ve tutulu başlı olma durumlarına göre zemin dirençleri ve moment dağılımları Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da gösterilmektedir.

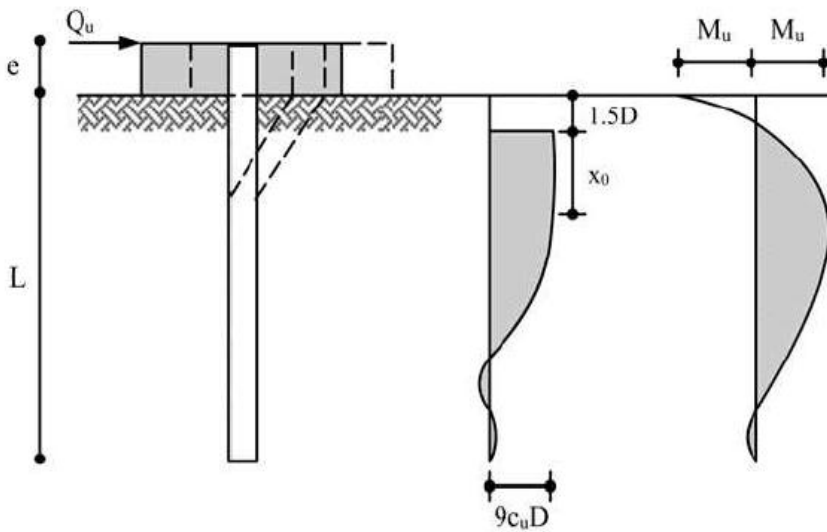


Şekil 3.9 : Serbest başlı uzun kazıkta oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964a).

Serbest başlı uzun kazıklar

$$M_u = Q_u \cdot (e + 1.5 \cdot D + 0.5 \cdot x_0) \quad (3.9)$$

$$x_0 = Q_u / 9 \cdot c_u \cdot D \quad (3.10)$$



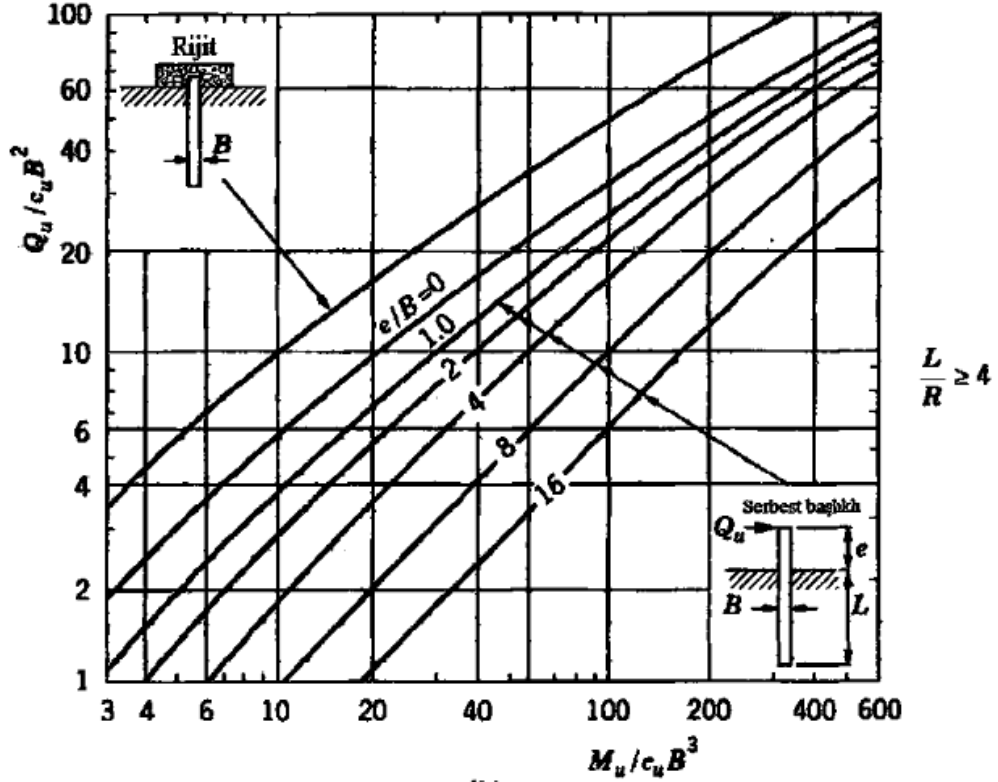
Şekil 3.10 : Tutulu başlı uzun kazıkta oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964a).

Tutulu başlı uzun kazıklar

$$Q_u = \frac{2 \cdot M_u}{(1.5 \cdot D + 0.5 \cdot x_0)} \quad (3.11)$$

$$x_0 = Q_u / 9 \cdot c_u \cdot D \quad (3.12)$$

Kohezyonlu zeminlerde uzun kazıkların yatay yük taşıma kapasiteleri Şekil 3.11'deki grafikten bulunabilmektedir.



Şekil 3.11 : Kohezyonlu zeminlerde uzun kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerinin bulunması (Tomlinson, 1994).

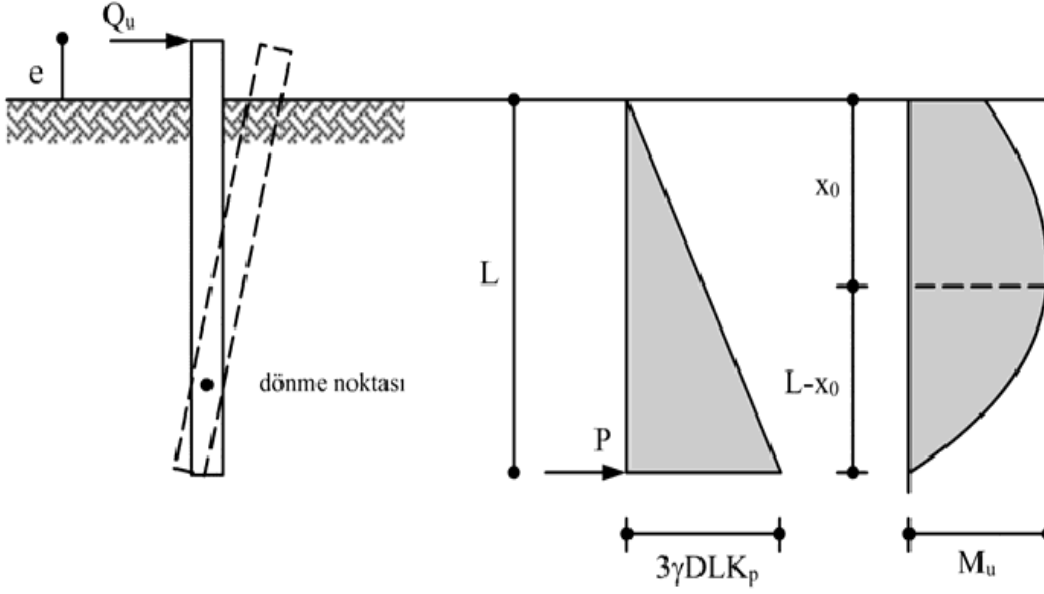
3.4.2 Kohezyonsuz zeminlerde kısa ve uzun kazıkların analizi

Broms (1964) yöntemine göre kısa ve uzun elastik kazıklar ayrı ayrı incelenmekte olup, serbest ve tutulu başlı olmalarına göre farklı çözüm yöntemleri önerilmektedir.

3.4.2.1 Serbest ve Tutulu başlı kısa kazıklar

Serbest başlı kısa kazıklar

Serbest başlı kısa kazıklarda oluşan zemin dirençleri ve moment dağılımları Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12 : Serbest başlı kısa kazıklarda oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964b).

Serbest başlı kısa kazıklarda dönme noktası kazık tabanına yakın bir bölgede olacağından, kazık tabanına yakın olan bölgelerde oluşan büyük toprak basınçları tekil yük olarak gösterilebilir. Bu etkiye noktasına göre moment alınarak, (3.13) denklemi ile maksimum yatay kuvvet hesaplanabilir.

$$Q_u = \frac{0.5 \cdot \gamma' \cdot L^3 \cdot D \cdot K_p}{(e + L)} \quad (3.13)$$

Maksimum moment M_u , x_0 derinliğinde oluşmaktadır. Bu derinlikte kesme kuvveti sıfır olacağından, (3.14) denklemi kullanılarak, x_0 derinliğinin hesaplanmasını sağlayan (3.15) denklemi bulunabilir.

$$Q_u = 1.5 \cdot \gamma' \cdot x_0^2 \cdot D \cdot K_p \quad (3.14)$$

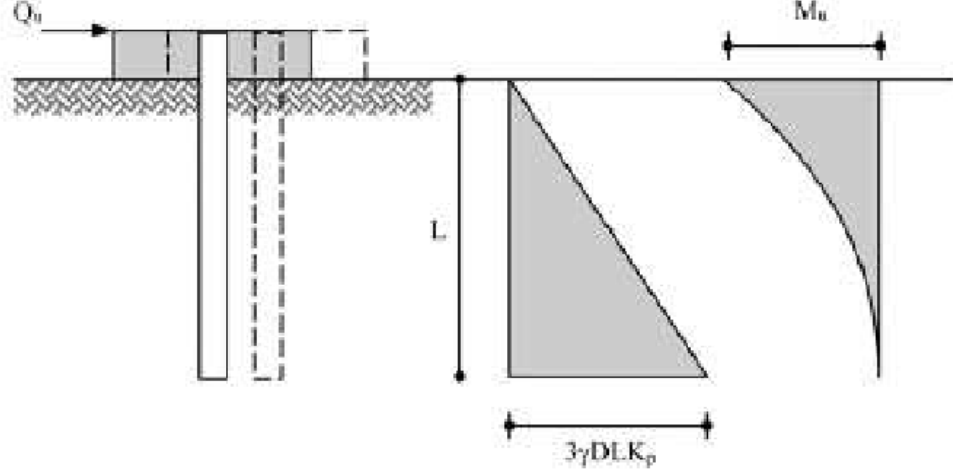
$$x_0 = 0.82 \cdot \left(\frac{Q_u}{\gamma' \cdot D \cdot K_p} \right)^{0.5} \quad (3.15)$$

Maksimum moment, (3.16) bağıntısı ile hesaplanabilir.

$$M_u = Q_u \cdot \left(e + \frac{2}{3} \cdot x_0 \right) \quad (3.16)$$

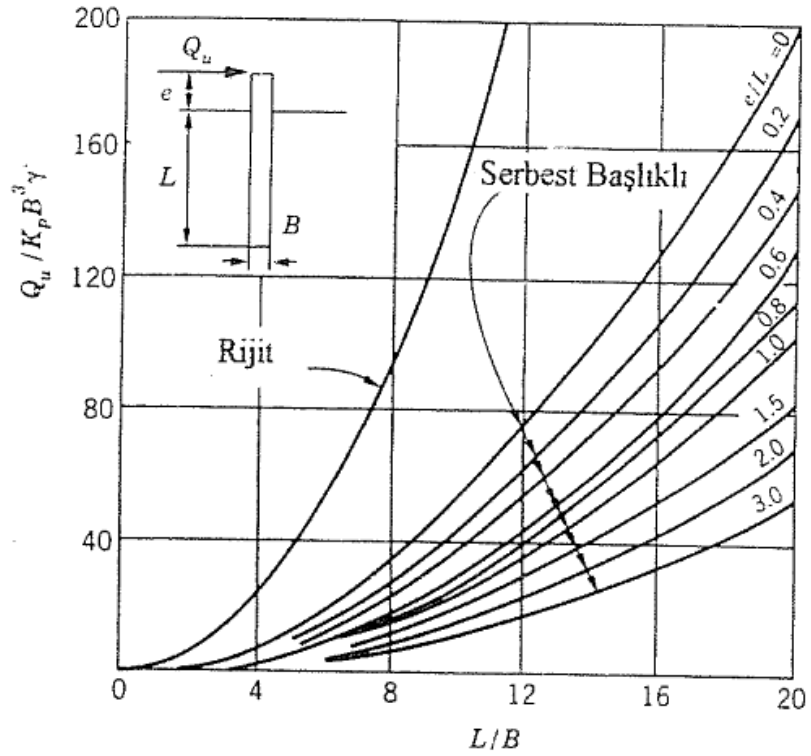
Tutulu başlı kısa kazıklar

Tutulu başlı kısa kazıklarda oluşan zemin direnci ve moment dağılımları Şekil 3.13'de gösterilmektedir.



Şekil 3.13 : Tutulu başlı kısa kazıklarda oluşan zemin direnci ve moment dağılımları (Broms, 1964b).

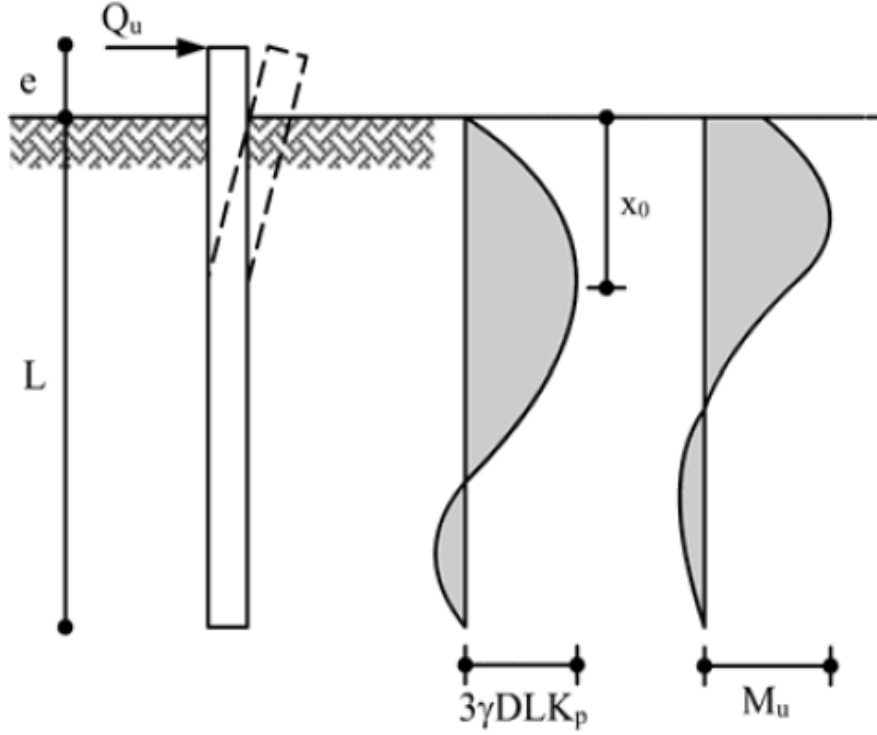
Kohezyonsuz zeminlerde kısa kazıkların yatay yük taşıma kapasiteleri Şekil 3.14'deki grafikten bulunabilmektedir.



Şekil 3.14 : Kohezyonsuz zeminlerde kısa kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerinin bulunması (Prakash ve Sharma, 1990).

3.4.2.2 Serbest ve Tutulu başlı uzun kazıklar

Serbest ve tutulu başlı kazıklarda oluşan zemin dirençleri ve moment dağılımları Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterilmektedir. Serbest başlıklı uzun kazıklar için eğilme momenti, kesme kuvvetinin sıfır olduğu x_0 , derinliğinde meydana geleceğinden kısa kazıklara benzer şekilde (3.17) denkleminde bulunur. Maksimum moment M_u değerini ve maksimum yatay yük taşıma kapasitesi Q_u değeri (3.18) ve (3.19) denklemlerinden hesaplanabilir.



Şekil 3.15 : Serbest başlı uzun kazıklarda oluşan zemin dirençleri ve moment dağılımları (Broms, 1964b).

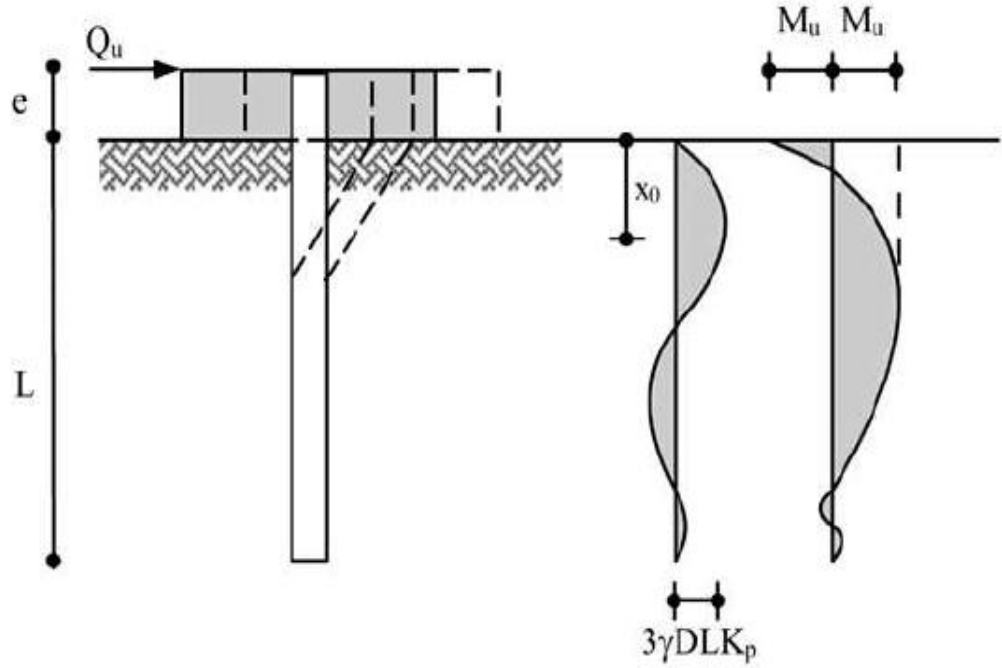
Serbest başlı uzun kazıklar

$$x_0 = \left(\frac{Q_u}{\gamma' \cdot D \cdot K_p} \right)^{0.5} \quad (3.17)$$

$$M_u = Q_u \cdot (e + 0.67 \cdot x_0) \quad (3.18)$$

$$Q_u = \frac{M_u}{e + 0.54 \cdot \left(\frac{Q_u}{\gamma' \cdot D \cdot K_p} \right)} \quad (3.19)$$

Maksimum yatay yük taşıma kapasitesi Q_u ve maksimum moment M_u değerleri (3.20) ve (3.22) denklemlerinden hesaplanabilir.



Şekil 3.16 : Tutulu başlı uzun kazıklarda oluşan zemin dirençleri ve moment dağılımları (Broms, 1964b).

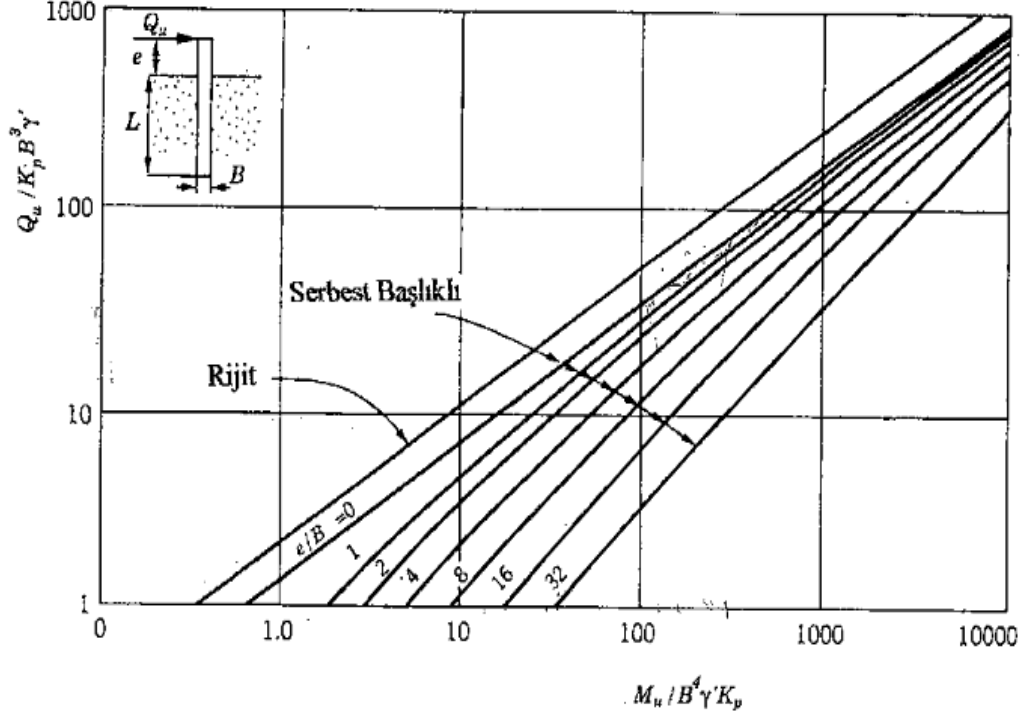
Tutulu başlı uzun kazıklar

$$Q_u = \frac{2 \cdot M_u}{(e + 0.67 \cdot x_0)} \quad (3.20)$$

$$x_0 = 0.82 \cdot \left(\frac{Q_u}{\gamma' \cdot D \cdot K_p} \right)^{0.5} \quad (3.21)$$

$$M_u = Q_u \cdot (e + 0.67 \cdot x_0) \quad (3.22)$$

Kohezyonsuz zeminlerde uzun kazıkların yatay yük taşıma kapasiteleri Şekil 3.17'deki grafikten bulunabilmektedir.



Şekil 3.17 : Kohezyonsuz zeminlerde uzun kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerinin bulunması (Prakash ve Sharma, 1990).

3.5 Yatak Katsayısı Yöntemi

Bu yöntem, zemin içindeki yatay yüklü olan kazığı, elastik zemine oturan kiriş gibi çözümlenmektedir. Kirişin üzerine oturduğu zemin ise Winkler (1867) modelindeki yaylarla temsil edilmektedir. Bu yatak katsayısının modellenmesi Şekil 3.18'de gösterilmektedir. Winkler modeline göre zemin, birbirine çok yakın bağımsız elastik yaylarla oluştuğu kabul edilir.

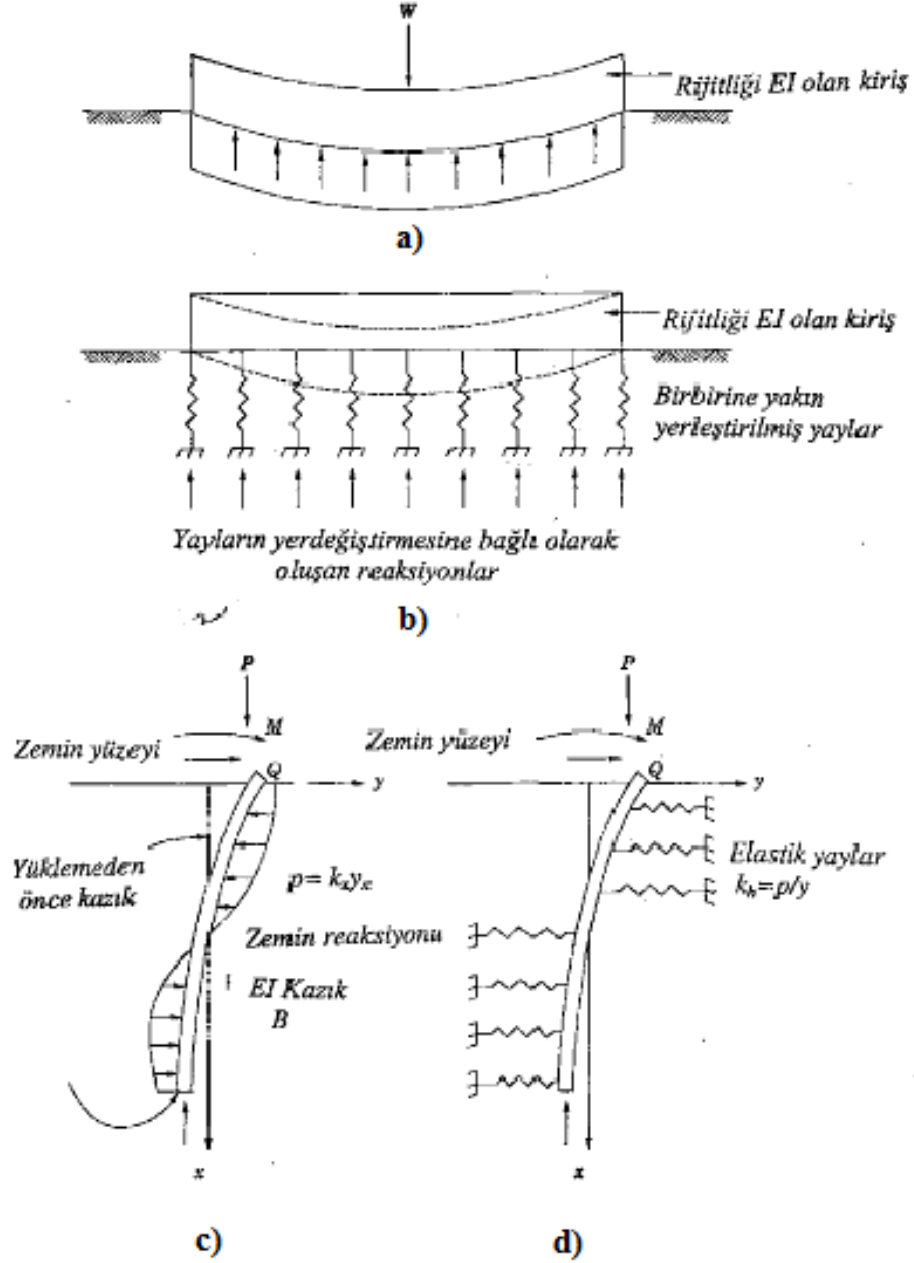
Yayların rijitlikleri yatay yatak katsayısı olarak tanımlanır ve k_h ile gösterilmektedir. Yatak katsayısı k_h , birim kazık boyundaki zemin gerilmesi p ve kazık deplasmanı y 'nin arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımlama, birim kazık boyunda herhangi bir noktadaki kazık deplasmanının, yalnızca o noktadaki gerilme etkisinde meydana geldiği varsayımına dayanmaktadır.

$$k_h = \frac{p}{y} \quad (3.23)$$

Elastik zemin üzerine oturan kiriş hesabı, (3.23) denklemini de kullanılarak (3.24) denkleminde gösterilen dördüncü dereceden diferansiyel denklemin çözümü ile yapılabilmektedir.

$$E_p \cdot I_p \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + p = 0 \quad (3.24)$$

Bu bağıntıda, E_p kazığın elastisite modülü, I_p atalet momentidir.



Şekil 3.18 : Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık davranışı a) Elastik zemin üzerindeki kiriş b) Winkler yaklaşımı c) zeminde yatay yüklü olan kazık d) yaylar üzerinde yüklenen yatay yüklü kazık (Prakash ve Sharma, 1990).

Kohezyonsuz zeminlerde yatay yatak katsayısı k_h , derinlikle doğrusal olarak değişim göstereceğinden dolayı, (3.25) ve (3.26) bağıntıları ile hesaplanabilir (Mohan, 1988).

$$k_h = n_h \cdot x \quad (3.25)$$

$$p = n_h \cdot x \cdot y \quad (3.26)$$

Bu bağıntıda n_h , yatay yatak katsayısı sabiti ve x , zemin yüzeyinden itibaren derinliktir.

Palmer ve Thompson (1948) yatay yatak katsayısını (3.27) bağıntısı ile açıklamaktadırlar.

$$k_x = k_h \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^n \quad (3.27)$$

Burada, k_h , kazık ucunda veya $x=L$ derinliğindeki k_x değeri; x , kazık boyunca herhangi bir noktadaki derinlik; n , sıfırdan büyük veya eşit bir sabittir. Kumlar ve normal konsolide killer için uzun dönem yüklemelerinde n değeri genellikle 1 değerini almaktadır. Aşırı konsolide killer için ise 0 değerini almaktadır.

Davisson ve Prakash (1963) drenajsız koşullarda kumlar için $n=1.5$ ve killer için $n=0.15$ değerlerini önermektedir. $n=1$ değeri için k_h ' in değişimi denklem (3.25)'de gösterildiği gibidir. n_h değerinin kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminlere göre aldığı değerler sırasıyla Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 : Kohezyonsuz zeminlerde n_h değerleri (Das, 1990).

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

Çizelge 3.3 : Kohezyonlu zeminler için farklı kaynaklarda önerilen n_h değerleri(Yıldırım, 2009).

Zemin	n_h (kN/m^3)	Kaynak
Yumuşak Kil	160 - 3500	Reese - Matlock (1956)
	270 - 340	Davisson - Prakash (1963)
Organik Zemin	100 - 270	Peck - Davis (1962)
	100 - 815	Davisson (1970)
Turba	55	Davisson (1970)
	30 - 100	Wilson - Hilfs (1967)

İki tabakalı zemin modellerinde, üstteki tabakanın kazığın davranışına etkisi büyüktür. Bu nedenle zemin incelemelerinde yatay yatak katsayısı hesaplanırken, zemin yüzeyinden itibaren birkaç kazık çapına eşit olacak şekilde hesaplamalar yapılmalıdır (Davisson ve Gill, 1963).

Yatay yatak katsayısı, killi zeminlerde serbest basınç mukavemeti, q_u , ile kabaca orantılıdır. Normal konsolide olmuş kil ve siltlerin serbest basınç mukavemeti derinlikle çizgisel olarak arttığı için, böyle zeminlerde, yatak katsayısının da derinlikle arttığı söylenebilir. Üzerindeki buzulların kalkması vb. gibi nedenlerle aşırı konsolide olmuş killerde yatay yatak katsayısı derinlikle değişmez. Ancak kuruma nedeni ile aşırı konsolide olmuş zeminlerde yatay yatak katsayısı derinlikle azalabilmektedir (Toğrol ve Tan, 2009).

Şekil 3.19'da farklı zemin türleri için yatay yatak katsayısının derinlikle değişiminin gerçek ve kabul edilen değişimleri gösterilmektedir.

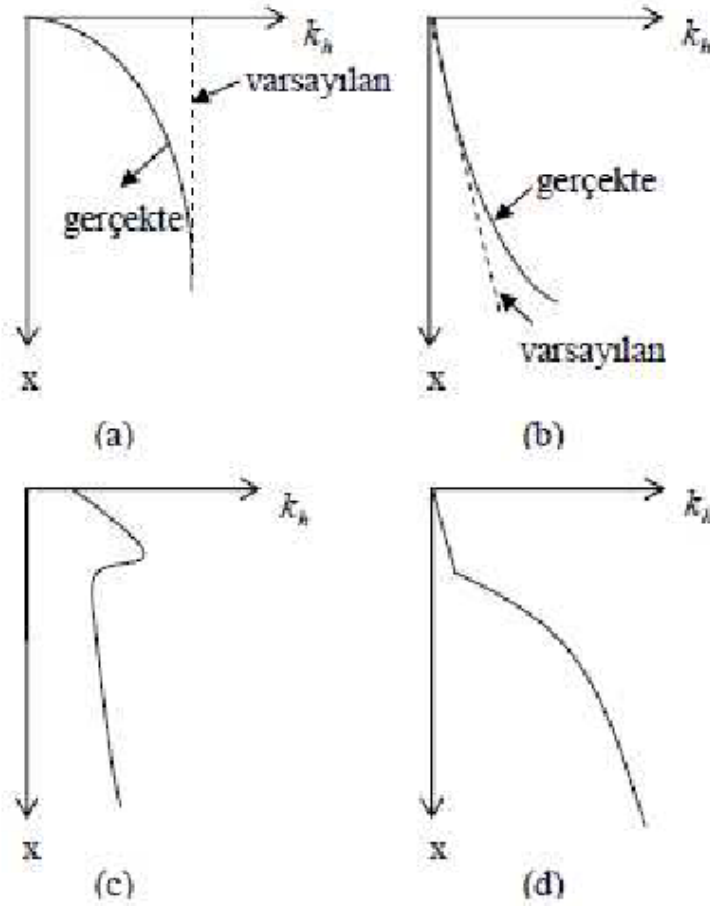
Aşırı konsolide killerin yatay yatak katsayısı için daha gerçekçi bir yaklaşım Şekil 3.19a'da düz çizgi ile gösterilmekte olan davranış biçimidir.

Granüler zeminler için Terzaghi tarafından önerilen yatay yatak katsayısı – derinlik değişimi Şekil 3.19b'de de görüldüğü gibi yatay yatak katsayısı k_h derinlikle orantılı olarak artmaktadır. Bu durum matematiksel olarak (3.28) bağıntısı şeklinde gösterilir.

$$k_h = n_h \cdot \frac{z}{D} \quad (3.28)$$

Bu bağıntıda gösterilen n_h , yatay yatak katsayısı sabitidir ve birimi t/m^3 'tür.

Su muhtevası düşük normal konsolide killer için k_h - derinlik değişimi Şekil 3.19c'de görüldüğü gibidir. Önceden yüklenmiş ve üzerinde yumuşak bir zemin tabakası bulunan kil zemin için k_h - derinlik değişimi ise Şekil 3.19d'de gösterilmektedir.



Şekil 3.19 : Yatay yatak katsayısının derinlikle değişimi a) aşırı konsolide killer, b) normal konsolide killer ve granüler zeminler, c) kurumuş normal konsolide killer, d) yumuşak yüzey tabakası durumu (Davisson, 1963).

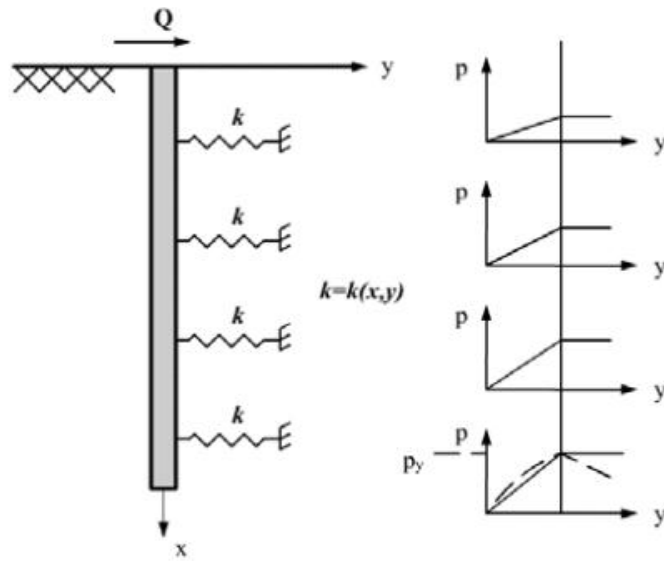
3.5.1 Yatay Yatak Katsayısının Değişimi

Yatak katsayısı yaklaşımında zemin, kazık boyunca belirli aralıklarla yerleştirilmiş ve yüklendiği zaman sıkışarak yükü taşıyan yaylarla temsil edilmektedir.

Birand (2007), yayların rijitliğinin deplasmana ve derinliğe göre değişiminin belirlenmesinin önemli olduğunu belirtmektedir. Buna ilave olarak birçok araştırmada yatay yatak katsayısının zemin türü ve kazık çapına bağlı değişimi de incelenmektedir.

Şekil 3.20’de zemini temsil eden yaylar kazığın deplasmanı sonucunda yüklemeye etkisinde kalacaklar ve p_{ult} ile gösterilen son taşıma gücü değerine kadar yüklenmeye devam edeceklerdir. Diğer taraftan kazık boyunca derine doğru gidildikçe, aynı deplasman miktarına ulaşabilmek için daha fazla yük gerektiği görülmektedir. Şekil 3.20’de görülmekte olan davranış zemini temsil eden yayların deplasmanın ve derinliğin fonksiyonu olduklarını göstermektedir. Bu sonuç matematiksel bir ifade olarak denklem (3.29)’daki gibi gösterilir.

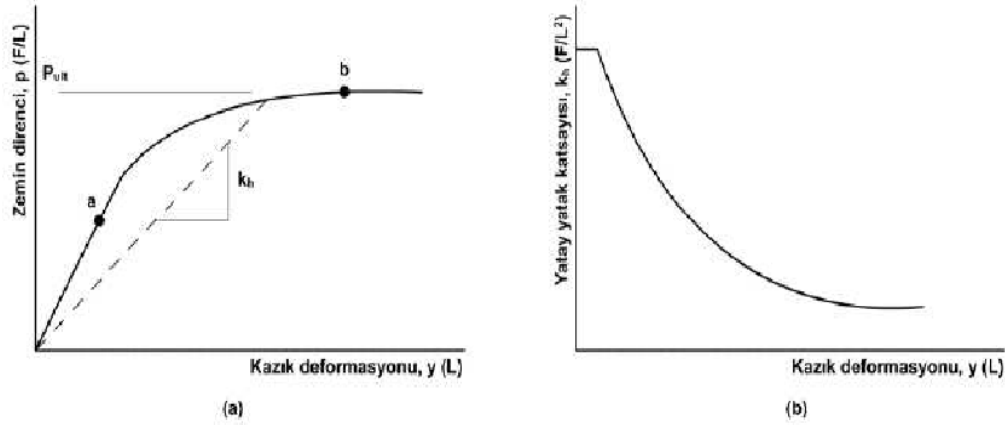
$$p = k(x,y)y \quad (3.29)$$



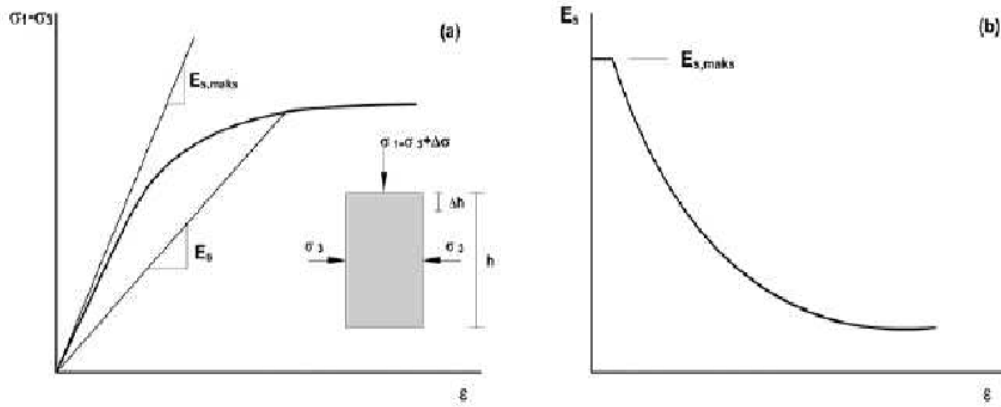
Şekil 3.20 : Yatay yüklenen bir kazıkta zemin davranışının yaylarla temsil edilmesi.

Yatak katsayısının derinlikle ve zemin türüne bağlı olarak değişiminde olduğu gibi deplasmana bağlı olan değişimi de çok önemlidir. Kazık üzerine uygulanan yüke bağlı olarak yanal deplasmanlarla birlikte zemini temsil eden yay rijitliklerinde bir miktar azalma oluşmaktadır. Zemin direnci ve kazık deplasmanı arasındaki yük-deplasman ilişkisini tanımlayan tipik bir $p - y$ eğrisi Şekil 3.21a’da gösterilmektedir.

Şekil 3.21b’de ise yatay yatak katsayısı k_h ’ın kazık deplasmanı ile birlikte değerindeki azalmaya ait değişim verilmektedir. Yatay yükler altındaki bir kazık için yatay yatak katsayısı küçük deplasmanlar için belirli bir değere kadar sabit kalır. Bu elastik davranışın ardından yatay deplasmanlar arttıkça yatay yatak katsayısının değerinin hızla azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.21 : Tipik bir p-y eğrisi ve yatay yatak katsayısının değişimi (Reese ve Van Impe, 2001).



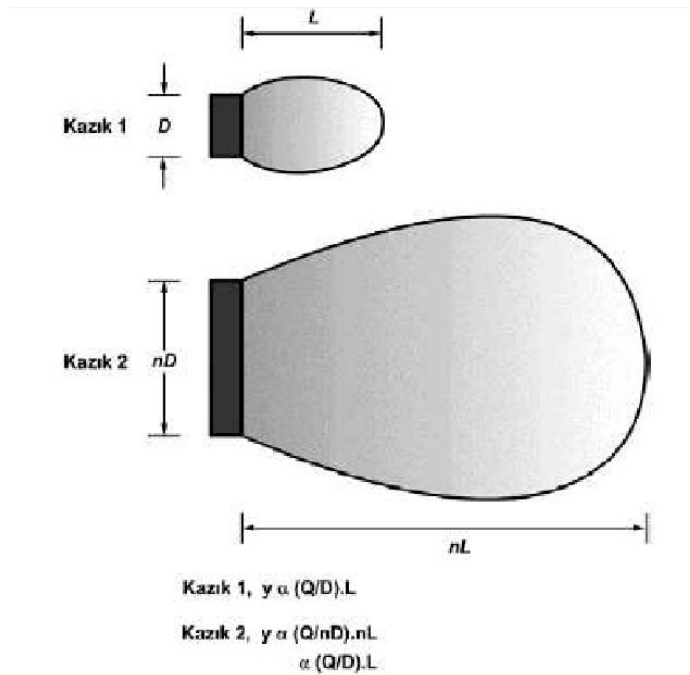
Şekil 3.22 : Üç eksenli basınç deneyi ile elastisite modülünün gösterimi ve deformasyon ile değişimi (Reese ve Van Impe, 2001).

Deplasmanlara bağlı olarak yatak katsayısının değerindeki azalmanın benzerini tipik bir üç eksenli basınç deneyi örneği üzerinde yapılan yükleme sonucunda elde edilen $E_s - \epsilon$ eğrisinde de görmek mümkündür. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de sırasıyla k_h ve E_s için verilmiş olan eğriler gösterilmektedir. Buradan da görüldüğü gibi yatay yatak katsayısı k_h ve E_s elastisite modülü arasında deplasmana bağlı rijitlik azalması açısından bir benzerlik vardır. Her iki durumda da azalmaya neden olan mekanizma zeminde artan deformasyonla birlikte rijitliğin ve dayanımın azalmasına bağlı olarak açıklanabilmektedir.

İki şekilde de açıkça görülmekte olan bu benzerlik özellikle yatay yatak katsayısının belirlenmesinde elastisite modülünden yararlanılmasına neden olmaktadır. Aslında k_h ve E_s parametrelerinin her ikisi de zemine ait sıklılığın veya rijitliğin bir göstergesi olsalar da farklı durumlarda kullanılmaktadırlar. Örneğin; bir zeminin

drenajlı ve drenajsız durumdaki elastisite modülü farklı olabilmektedir. Ayrıca k_h bir zemin özelliği değildir yalnızca hesaplarda kullanılan bir parametredir. Zeminin kazık veya bir temelle birlikte rijitliğini tanımlar. E_s ise zeminin gerilmeye karşı göstermiş olduğu direnci tanımlamak için kullanılan bir parametredir.

Yatay yatak modülünün kazık çapı ile ilişkisi Şekil 3.23’de gösterilmektedir. Şekilde D ve nD çapında iki kazık aynı Q yükü ile yüklenmektedir. D çaplı birinci kazığın zeminde oluşturacağı gerilme (Q/D) ve nD çaplı kazığın zeminde oluşturacağı gerilme (Q/nD) olur. y kazık deformasyonu $(Q/D) \cdot L$ ile doğru orantılıdır. İkinci kazık için aynı orantı yazılırsa $(Q/nD) \cdot n \cdot L = (Q/D) \cdot L$ birinci kazık ile aynı değer elde edilir. Dolayısıyla herhangi bir kazık için k_h elde edildikten sonra, elastik bölgede kalmak şartı ile, kazık çapındaki değişimin yatay yatak modülü değerini değiştirmedigi kabul edilir. Bu kabul 20–90 cm çaplı kazıklar için geçerlidir (Davisson, 1963). Bu hesaplama zeminin doğrusal elastik davrandığı varsayımına dayanmaktadır.



Şekil 3.23 : Kazık çapının yatay yükün dağılımına etkisi (Davisson, 1963).

Yatay yüklü kazıklarda özellikle zemin yüzeyine yakın bölgelerde plastik deformasyonların olması olasıdır. Çünkü bu bölgeler zeminlerin yatay yük taşıma kapasiteleri en düşük olan kısımlarıdır. Eğer çapı D olan bir kazık aynı zeminde $2D$ çapı ile imal edilir ve yüklenirse elastik şartlarda yük-deformasyon davranışında farklılık oluşmaz. Ancak son zemin direnci de kazık çapından doğrudan etkilendiği

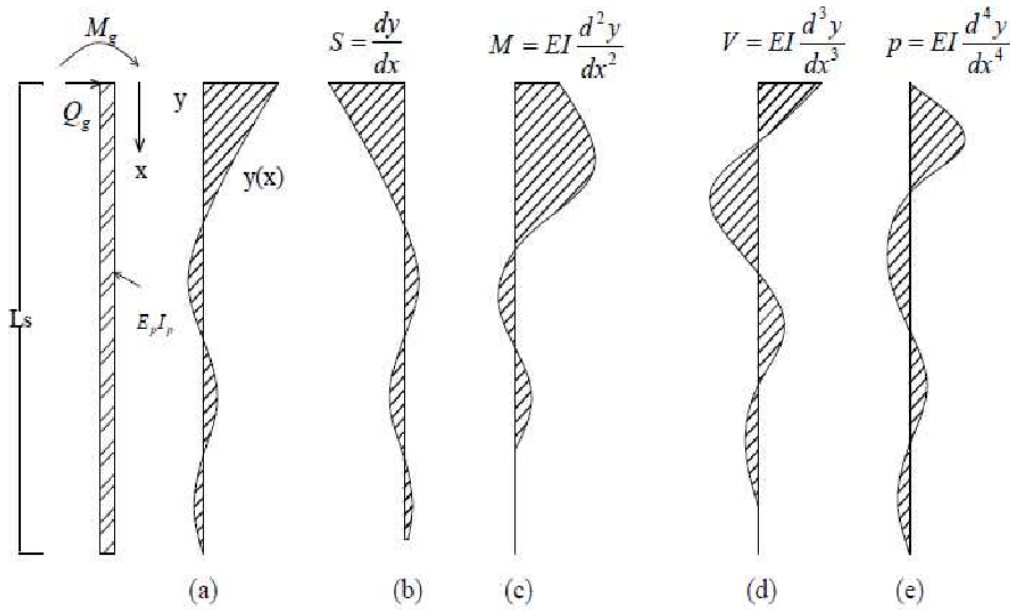
için yaklaşık iki katına çıkacaktır. Bu durumda elastisite modülü de iki katına çıkacaktır. Dolayısı ile oluşan yeni zemin direnci yeni son zemin direncine oranla çok daha küçüktür. Bu durumda deformasyonlarda azalma beklenir. Sonuç olarak plastik deformasyonlar için yatay yatak modülünün kazık çapından etkilendiği söylenebilir.

Sonuç olarak, yatay yatak katsayısının değerini etkileyen etkenler arasında; deplasman, derinlik, kazık çapı, yükleme türü, yükleme hızı ve zeminin kaç kez yüklendiği bulunmaktadır (Prakash ve Sharma, 1990).

3.5.2 Kohezyonsuz Zeminlerde Yatak Katsayısı Yöntemi

3.5.2.1 Serbest başlı kazıklar

Şekil 3.24'de Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisindeki serbest başlı bir kazıkta kazık deplasmanı y , deplasmanların kazık boyunca değişimi $S = dy/dx$, moment M , kesme kuvveti V ve zemin reaksiyonunun kazık boyunca değişimi p gösterilmektedir.



Şekil 3.24 : Kazıkta meydana gelen Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisinde kazık davranışı (Reese ve Van Impe, 2001).

Genel olarak kazık davranışı, (3.30) denklemi ile gösterilebilir.

$$\frac{d^4y}{dx^4} + \frac{k_h y}{EI} = 0 \quad (3.30)$$

Bu denklemin çözümü (3.31)'de gösterildiği şekilde olmaktadır.

$$y = f(x, T, L, k_h, EI, Q_g, M_g) \quad (3.31)$$

Bu bağıntıda, x zemin yüzeyinden derinlik, T fiktif rijitlik boyu, L kazık boyu, k_h $n_h x$ yatay yatak katsayısı, n_h yatak katsayısı sabiti, B kazık çapı, EI kazık rijitliğini, Q_g kazık başına uygulanan yatay yük ve M_g kazık başına uygulanan momenti göstermektedir.

Elastik davranışın kazık boyutlarına göre küçük deplasmanlar için geçerli olduğu varsayılmaktadır ve birleştirme yöntemi geçerlidir. Daha büyük deformasyonlarda $p - y$ eğrileri yöntemi kullanılarak analiz yapılabilir.

Q_g yatay kuvvetinden dolayı x derinliğinde oluşan yerdeğiştirme y_A ve M_g momentinden dolayı aynı derinlikte oluşan yerdeğiştirmeyi y_B ayrı ayrı hesaplanıp süperpoze edildiğinde x derinliğinde oluşan toplam yerdeğiştirme (3.32) denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$y = y_A + y_B \quad (3.32)$$

$$\frac{y_A}{Q_g} = f_1(x, T, L, k_h, EI) \quad (3.33)$$

$$\frac{y_B}{M_g} = f_2(x, T, L, k_h, EI) \quad (3.34)$$

Bağıntı (3.33) ve (3.34)'de görülen f_1 ve f_2 aynı terimlerin farklı iki fonksiyonunu göstermektedir. Her iki eşitlikte altı terim ve iki boyut (kuvvet ve uzunluk) vardır. Bu nedenle dört bağımsız ve boyutsuz terim tanımlanabilir.

$$\frac{y_A EI}{Q_g T^3}, \frac{x}{L}, \frac{L}{T}, \frac{k_h T^4}{EI} \quad (3.35)$$

$$\frac{y_B EI}{M_g T^2}, \frac{x}{L}, \frac{L}{T}, \frac{k_h T^4}{EI} \quad (3.36)$$

Uygun benzerlik durumları için her bir gruptaki benzer modeller eşitlendiğinde, aşağıdaki boyutsuz terimler elde edilir;

Derinlik katsayısı,

$$Z = \frac{x}{T} \quad (3.37)$$

Maksimum derinlik katsayısı,

$$Z_{max} = \frac{x}{T} \quad (3.38)$$

Yatak katsayısı fonksiyonu,

$$\emptyset(x) = \frac{k_h T^4}{EI} \quad (3.39)$$

Yatay yük için yerdeğiştirme katsayısı,

$$A_y = \frac{y_A EI}{Q_g T^3} \quad (3.40)$$

Moment için yatay yerdeğiştirme katsayısı,

$$B_y = \frac{y_B EI}{M_g T^2} \quad (3.41)$$

Sonuç olarak boyutsuz analiz yöntemi ile yatay yüklü bir kazığın y yerdeğiştirmesi, M momenti, V kesme kuvveti, S eğimi ve p zemin reaksiyonu için aşağıdaki ifadeler elde edilmektedir.

$$y_x = y_A + y_B = A_y \cdot \frac{Q_g T^3}{EI} + B_y \cdot \frac{M_g T^2}{EI} \quad (3.42)$$

$$M_x = M_A + M_B = A_M \cdot Q_g \cdot T + B_M \cdot \frac{M_g}{T} \quad (3.43)$$

$$S_x = S_A + S_B = A_S \cdot \frac{Q_g T^2}{EI} + B_S \cdot \frac{M_g T}{EI} \quad (3.44)$$

$$V_x = V_A + V_B = A_v \cdot Q_g + B_v \cdot \frac{M_g}{T} \quad (3.45)$$

$$p_x = p_A + p_B = A_p \cdot \frac{Q_g}{T} + B_p \cdot \frac{M_g}{T^2} \quad (3.46)$$

Temel diferansiyel denklem, (3.47) ve (3.48) bağıntılarındaki gibi yazılır.

$$\frac{d^4 y_A}{dx^4} + \frac{k_h y_A}{EI} = 0 \quad (3.47)$$

$$\frac{d^4 y_B}{dx^4} + \frac{k_h y_B}{EI} = 0 \quad (3.48)$$

Bağıntı (3.37) ve (3.41) arasındaki boyutsuz parametreler (3.47) ve (3.48) bağıntılarında yerlerine konulup sadeleştirme yapıldıktan sonra aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\frac{d^4 A_y}{dZ^4} + f(Z) \cdot A_y = 0 \quad (3.49)$$

$$\frac{d^4 B_y}{dZ^4} + f(Z) \cdot B_y = 0 \quad (3.50)$$

Çizelge 3.4 : Serbest başlı uzun kazıkların elastik çözümü için A katsayıları (Matlock ve Reese, 1961).

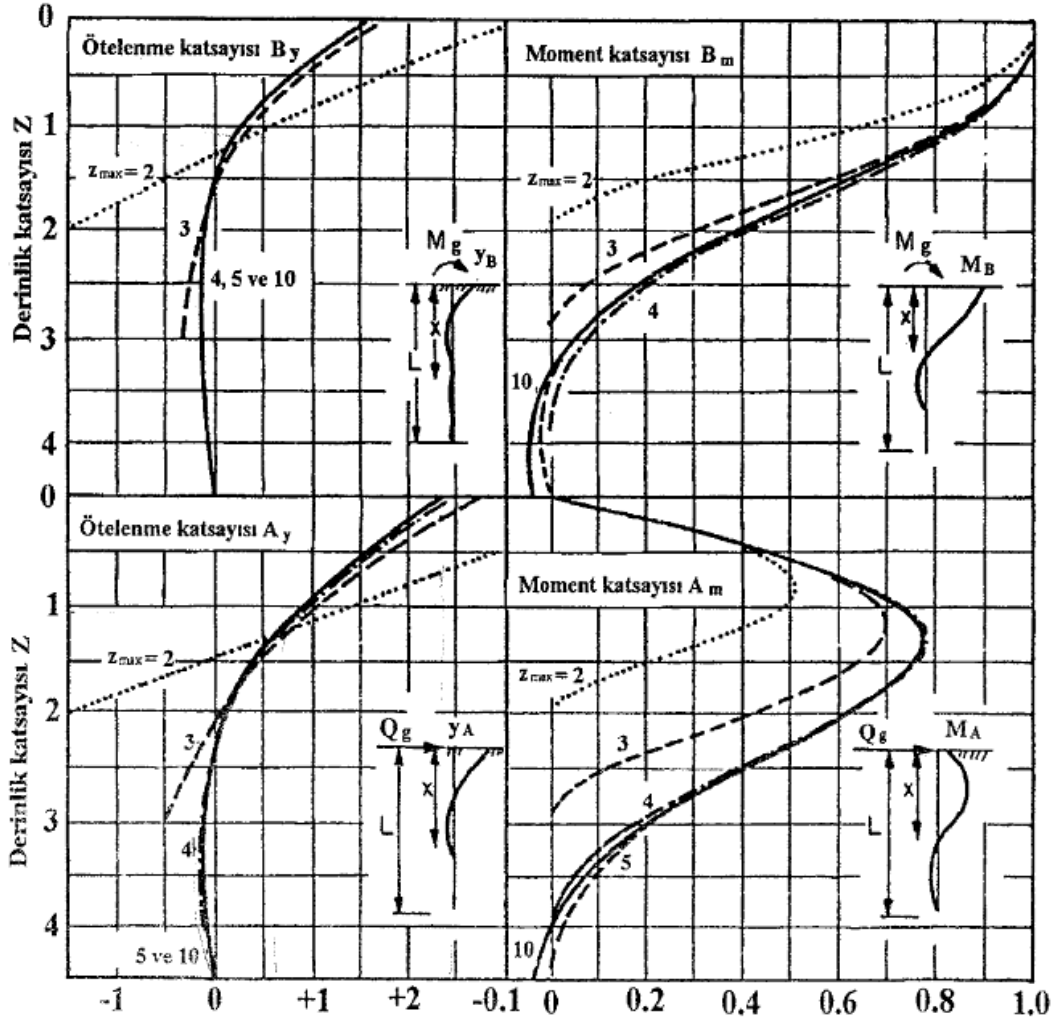
Z	A_y	A_z	A_m	A_v	A_p
0.0	2.435	-1.623	0.000	1.000	-0.000
0.1	2.273	-1.618	0.100	0.989	-0.227
0.2	2.112	-1.603	1.198	0.956	-0.422
0.3	1.952	-1.578	0.291	0.906	-0.586
0.4	1.796	-1.545	0.379	0.840	-0.718
0.5	1.644	-1.503	0.459	0.764	-0.822
0.6	1.496	-1.454	0.532	0.677	-0.897
0.7	1.353	-1.397	0.595	0.585	-0.947
0.8	1.216	-1.335	0.649	0.489	-0.973
0.9	1.086	-1.268	0.693	0.392	-0.977
1.0	0.962	-1.197	0.727	0.295	-0.962
1.2	0.738	-1.047	0.767	0.109	-0.885
1.4	0.544	-0.893	0.772	-0.056	-0.761
1.6	0.381	-0.741	0.746	-0.193	-0.609
1.8	0.247	-0.596	0.696	-0.298	-0.445
2.0	0.142	-0.464	0.628	-0.371	-0.283
3.0	-0.075	0.040	0.225	-0.349	0.226
4.0	-0.050	0.052	0.000	-0.106	0.201
5.0	-0.009	0.025	-0.033	0.013	0.046

Herhangi bir kazık yükleme durumu için A ve B katsayıları (3.49) ve (3.50) denklemleri çözülerek elde edilir. Hesaplanan A ve B katsayıları bağıntılarda yerine koyularak deformasyon, dönme, moment, kesme ve zemin reaksiyonları elde edilir.

Matlock ve Reese (1962)'in boyutsuz analiz sonucu A ve B katsayıları için elde ettiği çözümler Şekil 3.25'teki diyagramda, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te gösterilmektedir. $Z_{max} \leq 2$ için kazıklar rijit bir eleman gibi davranmaktadırlar. Diğer yandan $Z_{max} = 5$ ve 10 için deplasman katsayıları aynı bulunmuştur. Bu nedenle $Z_{max} > 5$ 'ten sonra kazık boyu deplasmanları değiştirmemektedir.

Çizelge 3.5 : Serbest başlı uzun kazıkların elastik çözümü için B katsayıları (Matlock ve Reese, 1962).

Z	B_y	B_z	B_m	B_v	B_p
0.0	1.623	-1.750	1.000	0.000	0.000
0.1	1.453	-1.650	1.000	-0.007	-0.145
0.2	1.293	-1.550	0.999	-0.028	-0.259
0.3	1.143	-1.450	0.994	-0.058	-0.343
0.4	1.003	-1.351	0.987	-0.095	-0.401
0.5	0.873	-1.253	0.976	-0.137	-0.436
0.6	0.752	-1.156	0.960	-0.181	-0.451
0.7	0.642	-1.061	0.939	-0.226	-0.449
0.8	0.540	-0.968	0.914	-0.270	-0.432
0.9	0.448	-0.878	0.885	-0.312	-0.403
1.0	0.364	-0.792	0.852	-0.350	-0.364
1.2	0.223	-0.629	0.775	-0.414	-0.268
1.4	0.112	-0.482	0.688	-0.456	-0.157
1.6	0.029	-0.354	0.594	-0.477	-0.047
1.8	-0.030	-0.245	0.498	-0.476	0.054
2.0	-0.070	-0.155	0.404	-0.456	0.140
3.0	-0.089	0.057	0.059	-0.213	0.268
4.0	-0.028	0.049	-0.042	0.017	0.112
5.0	0.000	0.011	-0.026	0.029	-0.002



Şekil 3.25 : Yatay ötelenme ve momentler için A ve B katsayıları (Reese ve Matlock, 1956).

3.5.2.2 Tutulu Başlı Kazıklar

Tutulu başlı kazıkta zemin yüzünde deformasyon eğrisinin eğimi sıfır olup bağıntı (3.51) şeklinde yazılabilir.

$$S_x = S_A + S_B = A_s \cdot \frac{Q_g T^2}{EI} + B_s \cdot \frac{M_g T}{EI} = 0 \quad (3.51)$$

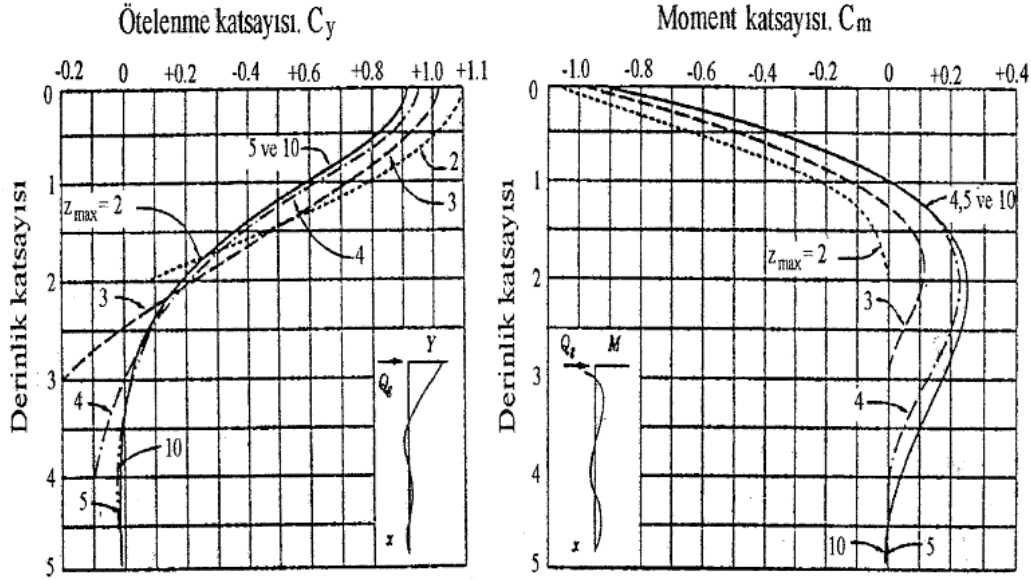
$$\frac{M_g}{Q_g T} = -\frac{A_s}{B_s} = -0.93 \quad (x = 0 \text{ için}) \quad (3.52)$$

$M_g/Q_g T$ Prakash (1962) tarafından boyutsuz tutululuk faktörü olarak tanımlanmıştır.

(3.42) denkleminde $M_g = -0.93 \cdot Q_g \cdot T$ yazılırsa (3.53) denklemi elde edilmektedir.

$$y_x = (A_y - 0.93 \cdot B_y) \cdot \frac{Q_g \cdot T^3}{EI} = C_y \cdot \frac{Q_g \cdot T^3}{EI} \quad (3.53)$$

Benzer şekilde $M = C_m \cdot Q_g \cdot T$ yazılabilir. C_y ve C_m değerleri Şekil 3.26'dan elde edilebilir.



Şekil 3.26 : Tutulu başlı kazıklar için C_y ve C_m katsayıları (Prakash ve Sharma, 1990).

Kazık başlığında tam tutululuk sağlanmamışsa C katsayıları değiştirilerek denklem (3.54) ve (3.55) şeklinde yazılabilir.

$$C_y = (A_y - 0.93 \cdot \lambda \cdot B_y) \quad (3.54)$$

$$C_m = (A_m - 0.93 \cdot \lambda \cdot B_m) \quad (3.55)$$

Burada λ tutululuk derecesini belirtmekte olup tam tutululukta $\lambda = 1.0$, serbest başlı kazık halinde $\lambda = 0$ olmaktadır (Yıldırım, 2009).

3.5.3 Kohezyonlu Zeminlerde Yatak Katsayısı Yöntemi

Normal konsolide killerde yatay yatak katsayısı kohezyonlu zeminlerdeki gibi derinlikle arttığından granüler zeminler için tanımlanan hesap yöntemi bu zemin türü içinde geçerli olmaktadır. Aşırı konsolide killerde yatay yatak katsayısı derinlik boyunca sabittir. Bu tür zeminlerde A_{yc} ve B_{yc} killi zeminler için yerdeğiştirme katsayılarıdır.

Serbest başlı kazıklarda bu katsayılar, denklem (3.56) ve (3.57) şeklinde hesaplanmaktadır.

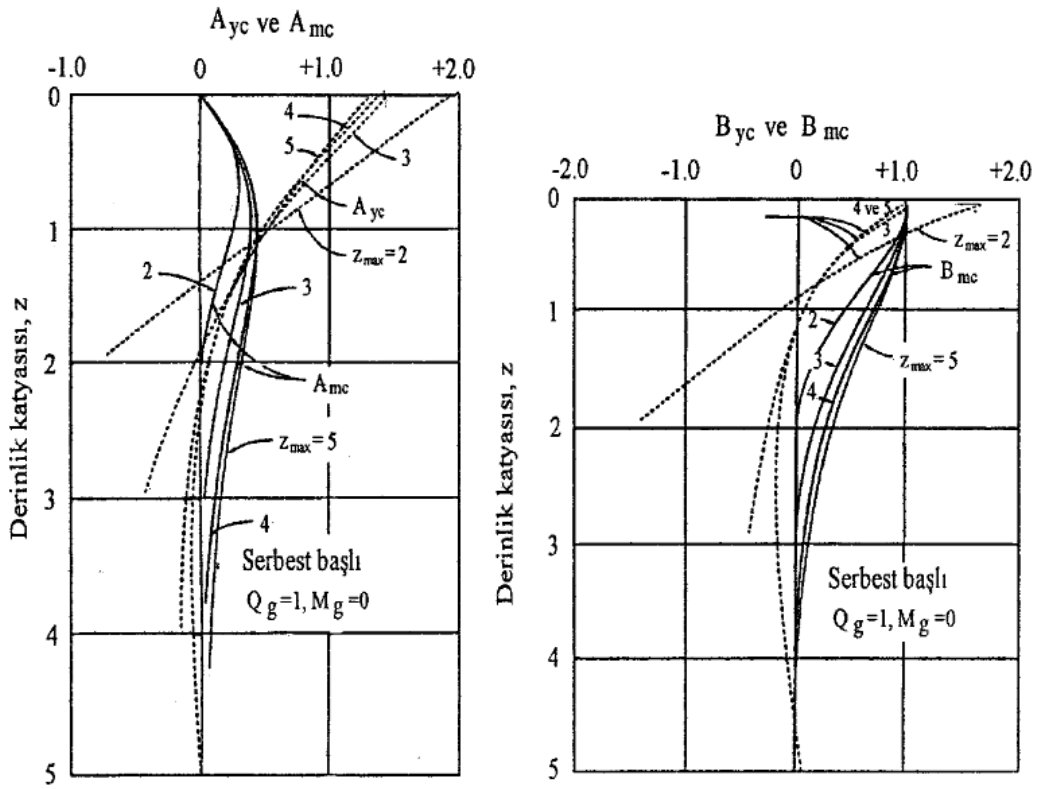
$$A_{yc} = \frac{y_A \cdot EI}{Q_g \cdot R^3} \quad (3.56)$$

$$B_{yc} = \frac{y_B \cdot EI}{M_g \cdot R^2} \quad (3.57)$$

$$y = A_{yc} \cdot \frac{Q_g \cdot R^3}{EI} + B_{yc} \cdot \frac{M_g \cdot R^2}{EI} \quad (3.58)$$

$$M_c = A_{mc} \cdot Q_g \cdot R + B_{mc} \cdot M_g \quad (3.59)$$

$A_{yc}, B_{yc}, A_{mc}, B_{mc}$ katsayıları Şekil 3.27'de verilmektedir.



Şekil 3.27 : Kohezyonlu zeminlerde serbest başlı kazıklarda yerdeğiştirme ve moment için katsayılar (Prakash ve Sharma, 1990).

$Z_{max} = L/R < 2$ için kazıkların tutulu başlı kazık gibi davrandığı görülmektedir.

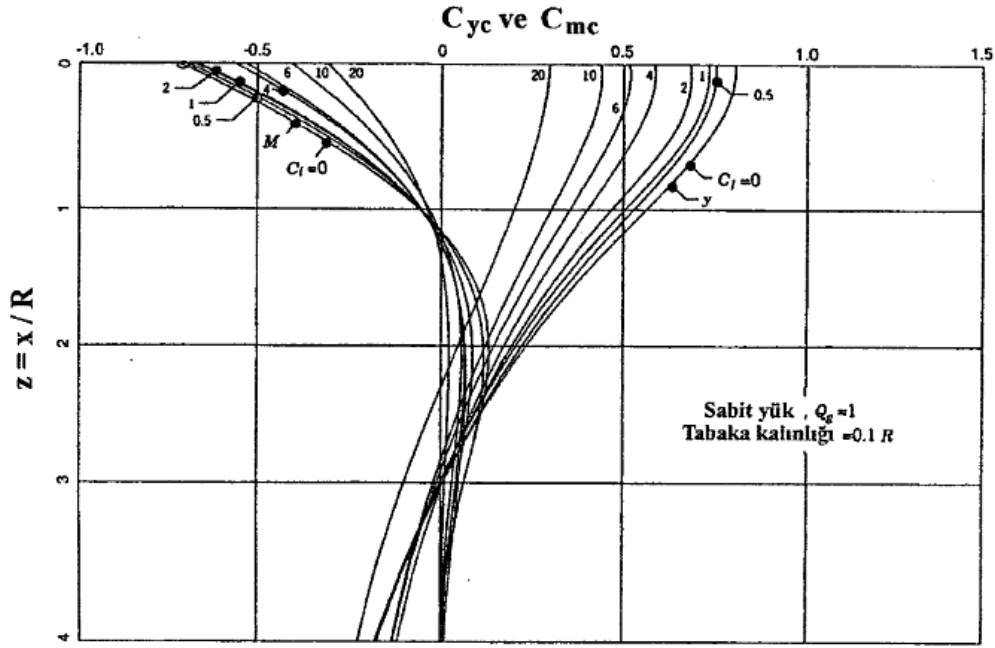
$L/R \geq 4$ değeri için ise kazık sonsuz uzun kazık gibidir.

Yatak katsayısı değişmeyen kohezyonlu zeminlerde kazıkların tutulu başlı olmaları durumunda çözümler bağıntı (3.60) ve (3.61)'deki gibi bulunabilir.

$$y_x = C_{yc} \cdot \frac{Q_g \cdot R^3}{EI} \quad (3.60)$$

$$M_x = C_{mc} \cdot Q_g \cdot R \quad (3.61)$$

Davisson ve Gill (1963) iki tabakalı yapılarda hem serbest hem de tutulu başlı kazıklar için üst tabaka kalınlığının $0.1R$, $0.4R$, $0.8R$ ve yatak katsayıları oranları $C_1 = 0, 0.5, 1, 2, 4, 6, 10, 20$ için $A_{yc}, B_{yc}, A_{mc}, B_{mc}, C_{yc}$ ve C_{mc} eğrileri üretmişlerdir. Tutulu başlı kazıkların üniform kohezyonlu zeminde yer alması durumunda C_{yc} ve C_{mc} sayıları Şekil 3.28'den $C_1 = 1.0$ olanından alınabilir.



Şekil 3.28 : Aşırı konsolide killi zeminde tutulu başlı kazıkta C_{yc} ve C_{mc} katsayıları (Davisson ve Gill, 1963).

Kazıkların yanıl yük etkisinde moment ve deplasmanlarının saptanmasında elastik ortam yaklaşımı için çözümler Poulos ve Davis (1980) tarafından eğrisel formda verilmektedir.

Diğer yandan yanıl yüklenmiş bir kazık için malzemenin doğrusal elastik olması ve kazığın gördüğü direncin sürekli değişken çizgisel yük olduğu varsayılırsa denklem (3.62) şeklinde yazılabilir.

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0 \quad (3.62)$$

Burada P_x kazıkta aksenal yük, p birim boyda $k \cdot y$ alınabilecek zemin tepkisidir.

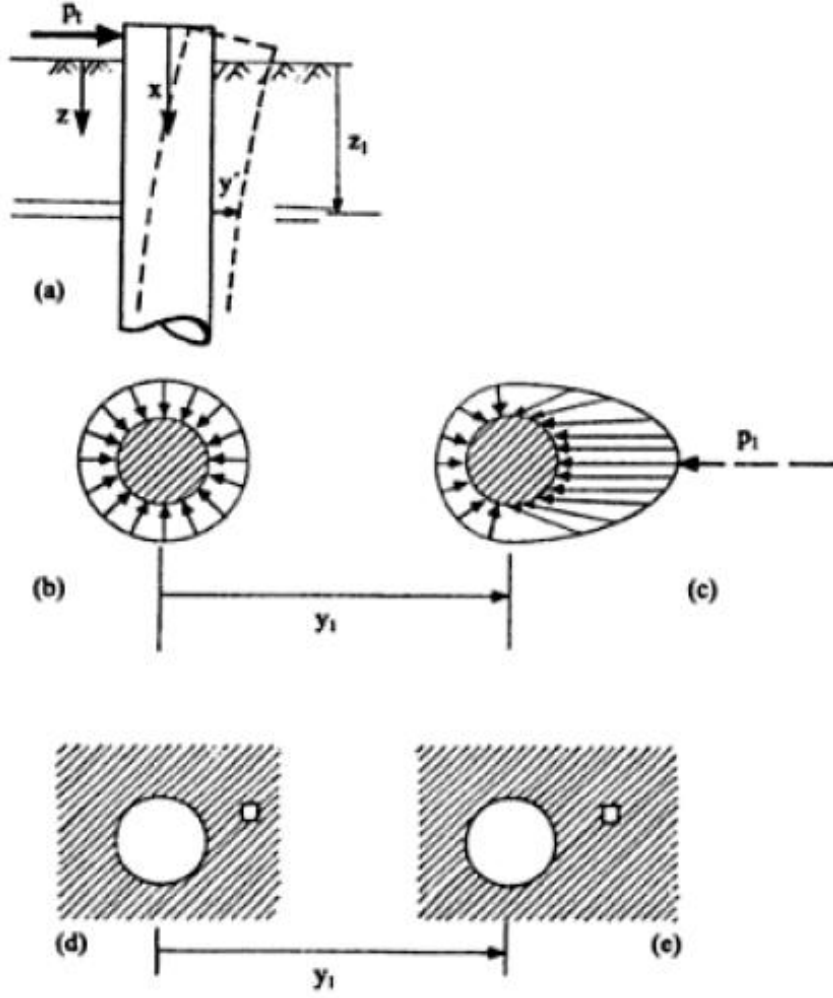
Elastik davranış kazık boyutlarına göre küçük deformasyonlar için geçerli olup birleştirme yöntemi geçerlidir. Daha büyük deformasyonlarda p-y eğrileri kavramı kullanılarak analiz yapılabilir ve eşitliğin çözümü k 'nın x ve y 'nin fonksiyonu olarak tanımlandığı eğri takımı ile yapılabilir. Bu eğriler doğrusal olmayıp derinliğe, zemin türü, yapı, gerilme-gerinim ilişkisi ile yükleme çevrimleri sayısına bağlıdır (Yıldırım, 2009).

3.6 p-y Eğrileri ile Hesap Yöntemi

Yatay yükün hesabı için kullanılan yatak katsayısı yönteminin dezavantajı süreklilikten yoksun olmasıdır. Yatak katsayısı metodunda yapılan kabuller zeminin elasto-plastik davranışını göz önüne almamaktadır. Ayrıca yatak katsayısı metoduyla hesaplanan moment ve yer değiştirme değerlerinin gerçek değerlerden daha büyük olduğu belirlenmiştir (McNulty, 1956).

Kazık davranışının analizinde en uygun metot p-y (zemin reaksiyonu-kazık yer değiştirmesi) eğrileri yöntemidir (Matlock, 1970; Reese ve diğ., 1974). Bu yöntemde, kazık boyunca gerilme-şekil değiştirme bağıntısı için bir kabul yapılmaktadır. Bu amaçla, zemin modülünün derinlikle lineer arttığı veya belirli bir fonksiyona bağlı olarak değiştiği kabul edilmektedir. Eğer zemin reaksiyonu-kazık yer değiştirme bağıntısı lineer değilse problemin çözümünde zeminin elasto-plastik davranışının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu durumda ya bir elastik yöntemin ardışık uygulanmasıyla, zeminin olmayan davranışının simülasyonu yapılmakta veya kazık-zemin sisteminin fiziksel modeli hazırlanarak yatay yüklenmiş kazığın davranışı bu modelle incelenmektedir.

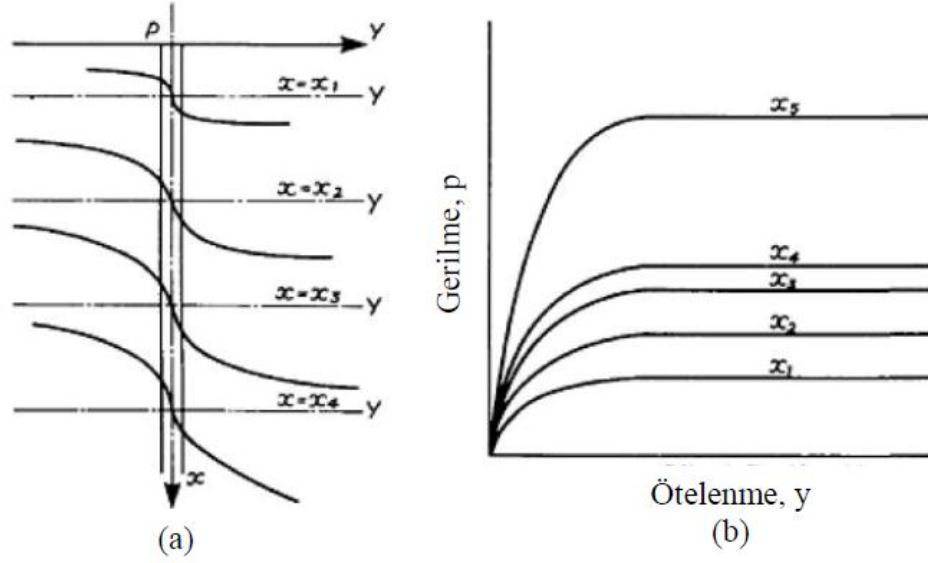
Şekil 3.29'da zemin içerisindeki dairesel kesitli bir kazık gösterilmiştir. Yatay yüklenmeden önce kazık etrafındaki zemin reaksiyonu Şekil 3.29b'de görüldüğü gibidir. Kazığın y yer değiştirmesi yapması durumunda, kazık arkasındaki gerilme azalmakta, ön kısımda gerilme artmaktadır (Şekil 3.29c). Bu durumda kazığın birim uzunluğu için P kuvveti oluşur.



Şekil 3.29 : Yatay yük altında kazıkların etrafında oluşan gerilme dağılımı (Reese ve Van Impe, 2001).

Kazık eksenini boyunca çeşitli derinliklerde p - y eğrileri Şekil 3.30'da gösterilmektedir. Kazık-zemin sistemi için Şekil 3.30'dakine benzer p - y eğrileri elde edilebilirse, (3.62) denklemi ile verilen diferansiyel denklemin, zeminin lineer olmayan davranışını da dikkate alarak çözümlenmesi mümkündür (Matlock ve Reese, 1961). Zemin modülünün sayısal tarifi, zemin reaksiyonu p ile y deplasman eğrilerinin çizilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

p - y eğrileri Şekil 3.30'da gösterildiği gibi lineer olmadıklarından ve derinliğin bir fonksiyonu olduklarından yatay yüklenmiş kazık probleminin çözümünde iterasyon yapılmalıdır.



Şekil 3.30 : Yatay kazık için p-y eğrileri a. Zemin yüzeyin altında çeşitli derinliklerde p-y eğrileri, b. p-y eğrilerinin x-y eksenlerinde gösterimi (Tomlinson ve Woodward, 2008).

Genel olarak takip edilen çözüm yolu aşağıda özetlenmiştir:

1. k'_s zemin modülü için kazık boyunca bir seri değer seçilir. Çoğunlukla ilk yaklaşım olarak zemin modülünün derinlikle lineer arttığı kabul edilir ($k'_s = k_h \cdot z$).
2. Her düğüm noktasına ait derinlik için k'_s değerleri hesaplanır ve (3.62) denklem takımı çözülerek y_n kazık yer değiştirmeleri hesaplanır.
3. Her düğüm noktası için elde edilen y değerleri, bu düğüm noktasının bulunduğu derinliğe ait p-y eğrisinde yerine koyularak, o düğüm noktasındaki p zemin reaksiyonu hesaplanır.
4. Bütün düğüm noktaları için hesaplanan p-y değerleri, $p = -k'_s \cdot y$ eşitliğinde yerine koyularak yeni bir dizi $-k'_s$ değeri elde edilir.
5. Hesaplanan $-k'_s$ değerleri kullanılarak denklem yeniden çözülür.
6. Kazık boyunca hesaplanan $-k'_s$ zemin modülü değerlerinin bir önceki adımda hesaplanan değerlere eşit olması veya aradaki farkın kabul edilebilir sınırlar halinde kalması ile iterasyona son verilir.
7. Son $-k'_s$ değerlerinden yararlanarak eğim, eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu değerleri sonlu farklar açılımından elde edilir.

Birçok araştırmacı tarafından zemin modülünün derinlikle değiştiği kabul edilmektedir:

$$-k'_s = k'_h \cdot Z^n \quad (3.63)$$

Burada, k_h yatay yatak katsayısı, n ise 1-3 arasında değerler alan tamsayıdır. Zemin modülünün eşitliği ile ifade edilmesi ve zemin yüzeyindeki kazık yerdeğiştirmelerinin ölçülmesi halinde problemi iterasyon yapmadan boyutsuz katsayılarla çözmek mümkündür (Alizadeh, 1968).

Zemin modülünün derinlikle lineer arttığı kabulü halinde, yerdeğiştirme, eğim, eğilme momenti, kesme momenti ve zemin reaksiyonu değerlerini veren eşitlikler boyutsuz katsayılar cinsinden ifade edilerek tablolar halinde verilmiştir (Matlock ve Reese, 1961).

p-y eğrilerinin elde edilmesi için geliştirilen yöntemlerin çoğu ampriktir. Bu yöntemler ile arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen çeşitli zemin parametrelerine bağlı olarak p-y eğrileri oluşturulabilir.

Deneylerde p-y eğrilerini saptamanın bir metodu, zemin reaksiyonunun ve kazık yerdeğiştirmesinin doğrudan ölçülmesidir. Matlock, zemin reaksiyonlarını ölçmekte kullanılan basınç hücrelerinin duyarlı alanlarının sınırlı olduğunu, bunun yanında, Şekil değiştirme ölçerle ölçülen yerdeğiştirmelerin ve momentlerin daha hassas olacağını belirtmiştir (Kın, 1995). Bu yöntemde, kazığın çeşitli noktalarına yerleştirilecek Şekil değiştirme ölçerlerin, kazık deneye tabi tutulmadan önce bilinen moment değerlerine göre kalibre edilmesi gerekmektedir. Kazık başındaki yerleştirme değerleri ölçülerek, statik ve tekrarlı yükleme altında bilinen Şartlarında her yükleme kademesi için eğilme momenti değerleri elde edilir. Seçilen derinliklerde p-y eğrileri ise eğilme momenti değerlerinden aşağıdaki denklemlerin sayısal çözüümüyle hesaplanır.

$$y = \iint \frac{M(z)}{EI} dz \quad (3.64)$$

$$p = \frac{d^2}{dz^2} M(z) \quad (3.65)$$

Burada göz önüne alınması gereken en önemli konu, deneysel eğilme momenti deneylerinin strain-gauge okumalarından çok hassas olarak elde edilmesi gerekliliğidir. Eğilme momentindeki ufak hatalar zemin reaksiyonunun sonlu farklar ile belirlenmesinde büyük hatalara sebep olmaktadır (Sağlamer, 1977).

Kazık davranışının analizinde, zemin modülünün derinlikle değişimi hakkında bir kabul yapılmasını gerektirmeyen ve zemin reaksiyonunun sonlu farklar eşitlikleri kullanılmadan belirlenmesini mümkün kılan bir yöntem Aköz ve diğ. (1981) tarafından verilmiştir.

Bu eğriler oluşturulurken şu varsayımlar yapılmaktadır;

1. p-y eğrileri uygulanan yatay yük altında zemin yatay deformasyonlarının, herhangi bir derinlikteki kazık kesiti ile denkliliğini gösterir.
2. Eğriler kazık şekil ve rijitliğinden bağımsız olup, zemin kesit alanının denkleştigi derinliğin altında ve üstünde yüklemekten etkilenmemektedir. Bu varsayım tam olarak doğru değildir ancak, konuyla ilgili tecrübeler göstermiştir ki, pratik amaçlar için, p-y eğrileri esasen sadece söz konusu derinlikteki zemin reaksiyonuna bağlıdır.

p-y analiz yöntemi, yatay yüklü kazığın lineer olmayan davranışını göz önünde bulundurulması nedeni ile oldukça gerçekçi bir analiz yöntemidir. Bununla birlikte gerekli hesapların yapılabilmesi için bilgisayar ortamına gerek vardır ve hesapların yapılması uzun zaman alabilmektedir.

Zemin-kazık sisteminin p-y eğrileri saptandıktan sonra, yatay yüklü kazık sistemi aşağıdaki adımlarla çözülebilir.

1. Daha önceden açıklandığı gibi tahmin edilen ve verilen, n_h ve k değerlerine göre kohezyonsuz zeminler ve normal konsolide killer için, T , aşırı konsolide killer için R hesaplanır.
2. Hesaplanan T ve R değerlerinden, önceden belirtilen yöntemlerle, kazık başına etkiyen kuvvet ve momente göre, kazığın kazık boyunca deformasyonu bulunur.
3. Hesaplanan y deformasyonları kullanılarak yatay basınç p hesaplanır. Zemin modülü k ve rijitlik faktörleri T ve R hesaplanır.

Zemin modülünün derinlikle artması denklem (3.66)'da, zemin modülünün derinlikle sabit olması ise denklem (3.67)'de gösterilmektedir.

$$n_h = k/x \quad T = \left(\frac{EI}{n_h}\right)^{1/5} \quad (3.66)$$

$$k_h = k \quad R = \left(\frac{EI}{k}\right)^{1/4} \quad (3.67)$$

Bulunan R ve T değerleri 1. adımda hesaplanan değerlerle karşılaştırılır. Eğer bu değerler uyumlu değil ise 3. adımda bulunan modül değerine yakın bir değer kabul edilir. R veya T değerleri 2. ve 3. adımlar tekrarlanır. Bulunan son R ve T değerleri ile kazık boyunca deplasmanlar ve momentler bulunabilir.

3.6.1 Kohezyonsuz zeminlerde p-y eğrileri ile hesap yöntemi

Kohezyonsuz zeminlerde yatay yüklü kazıkların p-y eğrileri ile çözümü aşağıdaki adımlarla anlatılmaktadır.

1. İçsel sürtünme açısı ϕ ve dane birim hacim ağırlığı γ , arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilir.
2. $\alpha = 1/2\phi$, $\beta = 45 + \alpha$, $K_0 = 0.4$, $K_A = \tan^2(45 - \phi/2)$ değerleri alınarak, denklem (3.68) yazılır.

$$P_{cr} = \gamma x \left[\frac{K_0 x \cdot \tan\phi \cdot \sin\beta}{\tan(\beta - 45) \cdot \cos\alpha} + \frac{\tan\beta}{\tan(\beta - \phi)} (B + x \tan\beta \cdot \tan\alpha) + K_0 x \tan\beta (\tan\phi \cdot \sin\beta - \tan\alpha) K_A B \right] \quad (3.68)$$

$$P_{cd} = K_A B \gamma x (\tan^8 \beta - 1) + K_0 B \gamma \tan\phi \tan^4 \beta \quad (3.69)$$

P_{cr} yüzeyden kritik derinlik, x_r 'a kadar olan derinliklerde, P_{cd} ise, kritik derinliğin altındaki derinliklerde hesaplanır. Kritik derinlik değeri, P_{cr} ve P_{cd} 'in x ile değişimin çizilmesi ile elde edilen iki eğrinin kesim noktasıdır (Şekil 3.31).

3. p-y eğrisinde çizilecek derinlik x seçilir ve bu derinlik ile kritik derinlik karşılaştırılır. P_{cr} ve P_{cd} 'nin hangisinin uygulanacağına karar verilir.
4. Uygun n_h değeri Çizelge 3.6'dan alınır ve aşağıdaki denklemler hesaplanır.

Çizelge 3.6 : Su altındaki kumlar için tahmini n_h değerleri (Reese ve diğ., 1974).

Relatif sıklık	Gevşek	Orta	Sıkı
$\phi(^{\circ})$	30	34	39
1. Terzaghi (1955)			
n_h değerleri (MN/m ³)	1.26	4.40	10.68
2. Reese ve diğ. (1974)			
Relatif sıklık	Gevşek	Orta	Sıkı
n_h değerleri (MN/m ³)	5.5	16.3	33.9

$$P_m = B_1 p_c \quad (3.70)$$

$$Y_m = B/60 \quad (3.71)$$

$$P_u = A_1 p_c \quad (3.72)$$

$$Y_u = 3B/80 \quad (3.73)$$

$$m = P_u - P_m / y_u - y_m \quad (3.74)$$

$$n = P_m / m y_m \quad (3.75)$$

$$C = P_m / y_m^{1/n} \quad (3.76)$$

$$Y_k = \left(\frac{C}{n_h x} \right)^{n/(n-1)} \quad (3.77)$$

$$p = C y^{1/n} \quad (3.78)$$

B kazık genişliğidir. A_1 ve B_1 değerleri Reese ve diğ. (1974) tarafından önerilen Çizelge 3.7'den alınmalıdır.

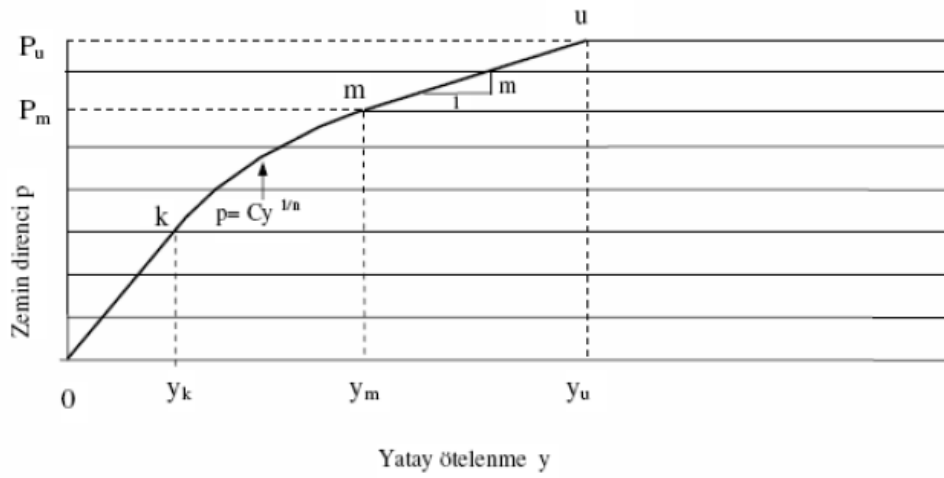
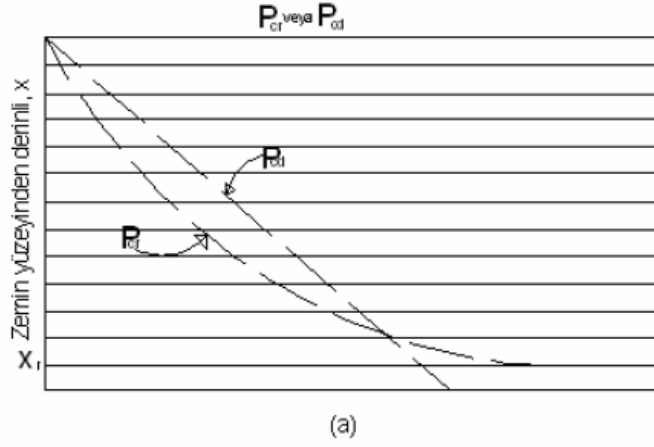
Çizelge 3.7 : A_1 ve B_1 katsayıları (Reese ve diğ., 1974).

x/B	A_1		B_1	
	Statik	Çevrimsel	Statik	Çevrimsel
1	2	3	4	5
0	2.85	0.77	2.18	0.50
0.2	2.72	0.85	2.02	0.60
0.4	2.60	0.93	1.90	0.70
0.6	2.42	0.98	1.80	0.78
0.8	2.20	1.02	1.70	0.80
1.0	2.10	1.08	1.56	0.84
1.2	1.96	1.10	1.46	0.86
1.4	1.85	1.11	1.38	0.86
1.6	1.74	1.08	1.24	0.86
1.8	1.62	1.06	1.15	0.84
2.0	1.50	1.05	1.04	0.83
2.2	1.40	1.02	0.96	0.82
2.4	1.32	1.00	0.88	0.81
2.6	1.22	0.97	0.85	0.80
2.8	1.15	0.96	0.80	0.78
3.0	1.05	0.95	0.75	0.72
3.2	1.00	0.93	0.68	0.68
3.4	0.95	0.92	0.64	0.64
3.6	0.94	0.91	0.61	0.62
3.8	0.91	0.90	0.56	0.60
4.0	0.90	0.90	0.53	0.58
4.2	0.89	0.89	0.52	0.57
4.4 - 4.8	0.89	0.89	0.51	0.56
≥ 5	0.88	0.88	0.50	0.55

5. p-y eğrisini oluşturmak için Şekil 3.31b' de görüldüğü gibi y_k değeri y eksenine işaretlenir. Verilen bağıntılardan y_k için p hesaplanır. Bu iki değer eğrideki kesim noktası k değerini verir, k ile orijin noktası birleştirilerek 0- k doğrusu oluşturulur. y_m ve p_m hesaplanarak m noktası bulunur, m ile k noktası birleştirilerek parabol oluşturulur. y_u ve p_u değerleri hesaplanarak u noktası işaretlenir ve m ile u noktaları birleştirilerek bir doğru oluşturulur.

3.6.2 Kohezyonlu zeminlerde p-y eğrileri ile hesap yöntemi

p-y eğrilerinin oluşturulması için elde edilen amprik bağıntılar, arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilmektedir.



Şekil 3.31 : x_r kritik derinliğin elde edilmesi, b. p-y eğrilerinin oluşturulması (Prakash ve Sharma, 1990).

3.6.2.1 Yumuşak-Orta katı killer

Yumuşak ve orta katı killer için p-y eğrilerinin çizimi Matlock (1970) tarafından aşağıdaki adımlarla tarif edilmiştir.

1. Laboratuvar ve arazi deneylerinden drenajsız kayma mukavemeti c_u ve dane birim hacim ağırlığı γ bulunur.
2. Aşağıda verilen denklemler hesaplanır.

$$x_r = \frac{6B}{\frac{\gamma B}{c_u} + j} \quad (3.79)$$

Burada x_r kritik derinlik, B kazık çapı, γ birim hacim ağırlık, c_u kilin drenajsız kayma mukavemeti, J amprik bir faktördür. Matlock (1970) tarafından yapılan

deneysel çalışmalara göre, yumuşak killer için $J=0.5$ ve katı killer için $J=0.25$ alınabilir. $x < x_r$ ve $x \geq x_r$ durumları için denklemler aşağıda gösterilmektedir.

$$x < x_r \text{ için} \quad N_c = 3 + \frac{\gamma x}{c_u} + \frac{Jx}{B} \quad (3.80)$$

$$x \geq x_r \text{ için} \quad N_c = 9 \quad (3.81)$$

Bu denklemlerde N_c taşıma gücü faktörü, x derinliktir.

3. Eğrinin çizileceği derinlik belirlendikten sonra, bu derinlik kritik derinliğe göre verilen denklemlerle N_c hesaplanır.
4. Kazık boyu için nihai zemin direnci hesaplanır.

$$P_u = c_u \cdot N_c \cdot B \quad (3.82)$$

Drenajsız laboratuvar deneyinde maksimum gerilme için elde edilen ε_c , birim deformasyona göre P_u 'ya karşılık gelen y_c deplasmanı hesaplanır.

$$y_c = 2.5\varepsilon_c \cdot B \quad (3.83)$$

Deney sonuçlarının bulunmadığı durumlarda Matlock (1970), ε_c değerini hassas killer için 0.005, örselenmiş ve konsolide olmamış tabakalar için 0.02, normal konsolide killer için 0.01 alınmasını önermiştir. Şekil 3.32'de görülen p-y eğrisinin değişimi, denklem (3.84) ile elde edilir.

$$p = 0.5p_u \cdot (y/y_c)^{1/3} \quad (3.84)$$

Bu hesap adımları hesap yapılması istenilen her derinlik için tekrarlanarak p-y eğrisi oluşturulur.

Şekil 3.32'de A noktasının üstünde p-y eğrisi, drenajsız üç eksenli deneylerdeki zemin örneğinin gerilme deformasyon eğrilerinden ya da plaka yükleme deneyindeki yükleme oturma eğrilerinden saptanabilir.

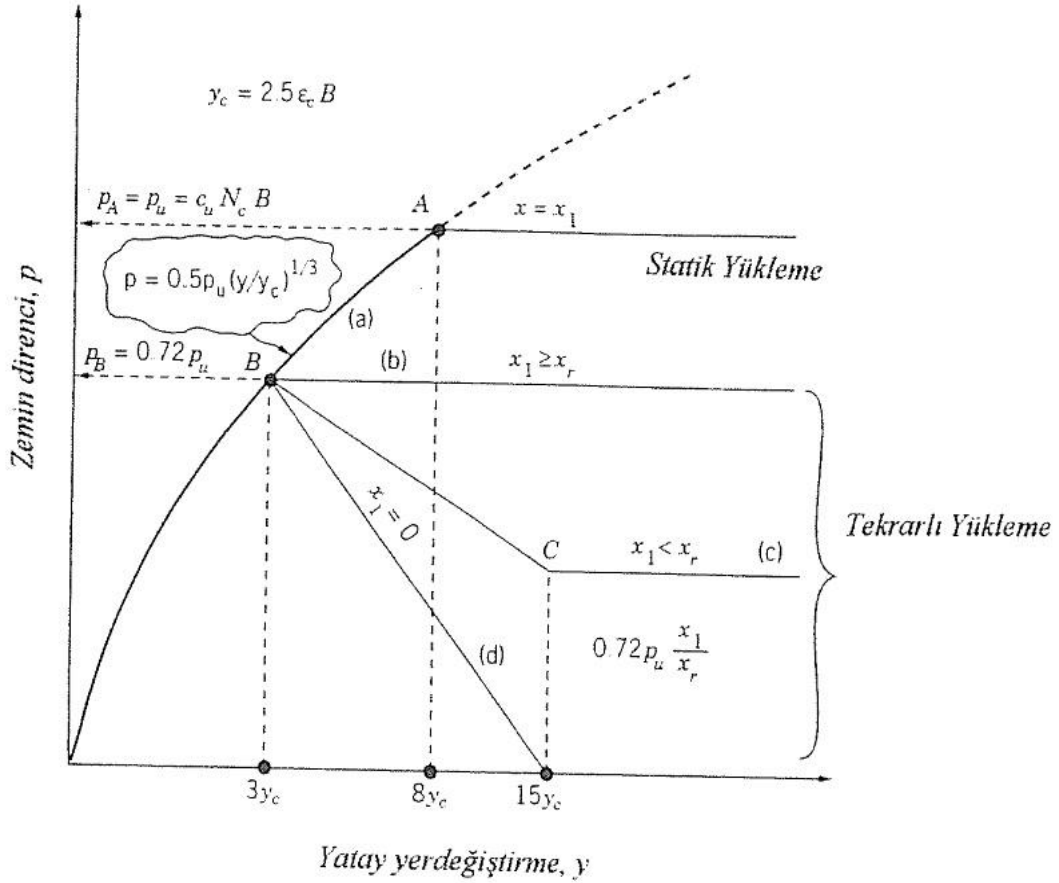
Tekrarlı yüklerin etkisi aşağıdaki adımlar takip edilerek belirlenir.

Tekrarlı yükler altında p-y eğrileri;

1. $x_1 \geq x_r$ ise p-y eğrisi $p_B = 0.72p_u$ noktasından keser (Şekil 3.32b eğrisi).

2. $x_1 < x_r$ ise B noktası C ile birleştirilir, C noktası $y = 15y_c$ karşı gelen noktadır ve $p = 0.72p_u x_1/x_r$ şeklindedir (Şekil 3.32c eğrisi).

$x_1 = 0$ ise B noktası $y = 15y_c$ birleştirilir ve $y \geq 15y_c$ de zemin reaksiyonu sıfır olduğu kabul edilir (Şekil 3.32d eğrisi).



Şekil 3.32 : Yumuşak ve orta katı killer için p-y eğrisinin oluşturulması (Prakash ve Sharma, 1990).

3.6.2.2 Katı killer

Reese ve Welch (1975), katı killerde p-y eğrilerinin tespiti için aşağıdaki yöntemleri tavsiye etmişlerdir:

Kısa süreli statik yükleme;

1. Deneylemlerden c_u , γ ve deviator gerilmenin yarısına karşılık gelen ϵ_{50} birim deformasyon tahmin edilir. Eğer ϵ_{50} değeri bulunamıyor ise, 0.005 veya 0.01 arasında bir değer alınabilir.
2. p_u birim kazık boyu için son zemin direnci, denklem (3.85) ve (3.86) ile hesaplanan değerlerden küçük olanıdır.

$$p_u = \left(3 + \frac{\gamma x}{c_u} + 0.5 \frac{x}{B} \right) C_u \quad (3.85)$$

$$p_u = 9c_u B \quad (3.86)$$

Burada γ zemin ortalama efektif birim hacim ağırlığıdır.

3. Son direncin yarısına karşılık gelen deplasman denklem (3.87) ile bulunur.

$$y_{50} = 2.5B \varepsilon_{50} \quad (3.87)$$

4. p - y doğrusunu oluşturan noktalar aşağıdaki denklemlerle bulunur:

$$p = 0.5p_u \cdot (y/y_{50})^{1/4} \quad (3.88)$$

$y > 16y_{50}$ olduğu durumlarda $p = p_u$ olarak alınabilir.

Çevirmeli yükleme;

1. Statik yükleme için p - y eğrileri elde edilir.
2. Yatay yükün temele kaç kez uygulanacağı tahmin edilir.
3. p/p_u değişik değerleri için, laboratuvar verilerinden ve aşağıdaki denklemlerden C_1 ve C_2 değerleri elde edilir.

$$C_2 = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_i)}{(\varepsilon_{50} \log N)} \quad (3.89)$$

Burada ε_c , N çevrim sonra ölçülen birim deformasyon, ε_i ilk yüklemdeki birim deformasyondur. Laboratuvar değeri yoksa aşağıda gösterildiği gibi alınabilir.

$$C_1 = C_2 = C = 9.6R^4 \quad (3.90)$$

Burada R , denklem (3.91) şeklinde bulunmaktadır.

$$R = p/p_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} \quad (3.91)$$

4. 3.adımda seçilen p/p_u değerine karşılık gelen p değerlerinde çevrimli yükleme için yeni y değerleri, aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$y = y_s + y_{50}C_1 \log N \quad (3.92)$$

Burada y , N çevrim sonra deplasman, y_s başlangıçta yükleme sonrası oluşan deplasmandır.

3.6.2.3 Katı aşırı konsolide killer

Bu tip zeminlerde zemin modülü derinlikle sabit kalmakta ve p-y eğrilerinin çizilmesi için deneysel veriler gerekmektedir. Bhushan ve diğ. (1979) katı aşırı konsolide killer için katı killerde verilen bağıntılarda bir takım değişiklikler yapılması gerektiğini belirtmektedir.

$$p_u = \left(3 + \frac{\gamma x}{c_u} + 2 \frac{x}{B} \right) c_u B \quad (3.93)$$

$$y_{50} = 2.5B \varepsilon_{50} \quad (3.94)$$

$$p = 0.5/p_u \cdot (y/y_{50})^{1/2} \quad (3.95)$$

Bu bağıntılarda yer alan değişikliklerle beraber, katı killerdeki adımlar, katı aşırı konsolide killer içinde geçerli olmaktadır.

3.6.3 p-y eğrilerine etki eden faktörler

3.6.3.1 Yükleme tipini etkisi

Statik yükleme durumu

Kazık yükleme deneyleri kazık dilimlerine yatay bir yük uygulamak, bu yükü birkaç dakika sürdürmek ve zemin reaksiyonunu enstrümantasyonla tayin etmekten ibarettir, p-y eğrilerinden alınacak verileri hesaplamak için deneysel sonuçlardan geliştirilmiş analitik ifadeler vardır. Bu ifadelerden yararlanarak statik eğriler olarak tanımlanan p-y eğrileri elde edilir.

Statik p-y eğrileri bir iskelet eğri gibi düşünülebilir. Bu eğrileri kullanarak zemin özelliklerinin değişik durumları hakkında yorum yapılabilir. Statik p-y eğrileri, p-y yönteminin ana teorisini ifade etmek açısından oldukça yararlıdır. Statik p-y eğrileri; yüklemenin kısa süreli olduğu ve tekrar etmediği durumlarda, toprak itkisi gibi sürekli yükleme durumlarında, kazığın çevresinde aşırı konsolide killer, yumuşak kaya ve temiz kumlar gibi konsolidasyona müsait bir zemin yoksa kullanılabilir. Pratikte sıkça karşılaşılan tekrarlı yükler için p-y eğrileri kullanılırken genellikle kazık deplasmanında ve eğilme momentinde büyük artışlarla karşılaşılır. Yüklemenin

kazık üzerindeki etkisini daha açık bir şekilde görebilmek için hem tekrarlı hem de statik p-y eğrileri için hesap yapılabilir.

Tekrarlı yükleme durumu

Statik yükleme durumunda olduğu gibi tekrarlı yükleme durumu için de arazi deneyleri yapılmıştır. Tekrarlı yükleme durumunda bir yük artımı uygulanır, enstrümantasyon okunur ve yükleme birçok kez tekrar edilir. Bazı durumlarda yük arkadan ve önden uygulanır. Zemin yüzeyinde yer değiştirmede veya eğilme momentinde belirgin bir artış olmayıncaya kadar tekrarlı yüklemeye devam edilir. En son yüklemeye ise maksimum moment, çeliğin akmasına sebep olacak moment değerine kadar yaklaştırılır.

Tekrarlı yüklemelerde suyun varlığı önemli bir etkidir. Killi zeminlerde zemin yüzeyinde suyun bulunması, tekrarlı yük nedeniyle zemin dayanımının kaybolmasına neden olur. Tekrarlı yüklemelerde, eğer kazıkta meydana gelen ötelenme, zeminin elastik olarak davrandığı bir sınır ötelenme değerinden büyükse, yük boşaltıldığında zeminle kazık arasında boşluk oluşur. Zemin içinde bulunan su, bu boşluğa doğru hareket eder ve yük tekrar uygulandığında, bu su yukarı doğru hareket eder. Bu suyun hızı, önemli miktarda zeminin, zemin yüzeyinden dışarı taşmasına neden olabilecek kadar fazla olabilmektedir. Bu durum, zemin dayanımının kaybolmasına neden olmaktadır (U.S. Army Corps of Engineers, 1997).

Tekrar sayısının artışı ile yanal yüklü kazıkların deplasmanlarındaki artışa neden olan iki önemli unsur vardır. Bunlar;

1. Kazık- zemin sisteminin yapısal unsurudur. Özellikleri değişmeden kalan elasto-plastik zemin içindeki kazık için, yük tekrarının artımı ile deformasyonlar yığılmakta ve bu deformasyon dengesinin oluşması farklı çökme ve deformasyonlarla sonuçlanmaktadır.
2. İkinci olarak, tekrarlı yüklemeye bağlı zeminin kendi mukavemet ve rijitliğindeki azalmadır. Bu zeminin gevşemesi olarak adlandırılabilir.

Drenajsız koşullarda yüklenmiş kil için, tekrarlı yükleme iki önemli etkiye sahiptir. Birincisi, zemin modül değerinde bir azalma yapabilmektedir. İkincisi, drenajsız kayma mukavemetinde azalma yapabilmektedir. Böylece yatay yüklü kazık durumunda kazık-zemin etkileşim sınırında azalma meydana gelmektedir. Bütün bu etkiler tekrarlı yükleme sırasında, boşluk suyu basıncında meydana gelen artışla

beraber düşünülerek kazık analizinde dikkate alınmalıdır. Bu durumda, ya her tekrarlı yüklemenin zemin parametrelerine etkisi ayrı ayrı ya da belirli sayıdaki tekrarlı yükleme sonrası zemin parametrelerinde meydana gelen etki dikkate alınarak analizde iki çeşit yaklaşım söz konusu olabilmektedir.

Katı killerde yatay yüklü kazıkların arazi deneyleri sonucu elde edilen p-y eğrilerinde başlangıç eğim ve nihai direnç derinlikle artmaktadır. Kısa süreli statik yükleme ve tekrarlı yüklemelere ait p-y eğrileri karşılaştırıldığında zemin direncinin tekrarlı yükleme sonunda azaldığı görülmüştür. Tekrarlı eğriler için nihai direnç, statik eğrilere göre daha küçük deplasmanlarla elde edilebilmektedir. Nihai direnç noktasından sonra zemin direncindeki keskin azalış tekrarlı yüklerden kaynaklanmaktadır (Reese ve diğ., 1975).

Sağlamer ve Dinçer (1987)'in, model kazıkları üzerinde yaptığı deneylerde, yatay kuvvetin tekrarlı etkimesi sonucunda, zemin yüzeyinde ölçülen kazık yer değiştirmelerinde önemli artışlar olduğu tespit edilmiştir. Kazığa ait yatay yer değiştirmelerin zemin yüzeyinden yaklaşık olarak 7D ile 11D arasında sıfırdan geçtiği belirlenmiştir. Eğilme momentinin maksimum olduğu noktalar zemin yüzeyinden 3D ile 5D arasında değişmektedir. Tekrarlı yükleme kazığa etkileyen maksimum eğilme momentinde % 1 ile % 5 dolayında artış meydana getirmektedir. Maksimum momentteki bu artış ihmal edilebilir mertebede olup, kazığın alt yarısında etkili olmaktadır (Sağlamer ve Parry, 1970). Bu artış statik yükleme altındaki eğilme momentinin ortalama %30'u civarındadır.

Yatay kuvvetin şiddetinin artırılması veya tekrarlı yükleme deneylerinde tekrar sayısının artırılması kazık çevresindeki zemin yer değiştirmelerinin daha geniş ve derin bir bölgeye yayılmasına sebep olmaktadır.

3.6.3.2 Kazık ve zemin özelliklerinin etkisi

Ashour ve Norris (2000), p-y eğrilerine etki eden faktörleri şekil değiştirme kaması (strain wedge) modeliyle araştırmışlardır. Bu model ile kazık eğilme rijitliğinin, kazık şeklinin, kazık başlığının durumlarının etkileri araştırılmıştır.

Kazığın eğilme rijitliği

Kazığın eğilme rijitliğinin tespiti için sıkı/gevşek kum ve yumuşak/katı kile yerleştirilen çelik kazık ve ahşap kazık kullanılmıştır. Karşılaştırılan p-y eğrilerine

göre, kazığın rijitliğinin sıkı kumda önemli bir etkisi, gevşek kumda ise daha makul bir etkisi bulunmaktadır.

Kil zeminde yer alan kazıkların, karşılaştırılması sonucunda ise, rijit kazığın bulunduğu katı kilde, daha yüksek zemin direnci görülmektedir. Buna karşılık yumuşak kil zeminde ise kazık rijitliğinin değişiminin zemin direnci üzerinde önemli bir etkisi görülmemektedir.

Kazık başlığının durumu

Kazık başlığının durumunun p-y eğrilerine etkisinin incelenmesi için serbest başlı veya rijit başlı kazığın, gevşek / sıkı kum ve yumuşak / katı kil zemin içinde davranışı incelenmiştir. Sıkı kuma rijit başlıklı kazık yerleştirildiğinde, serbest başlıklı kazığa göre zeminde daha yüksek direnç görülmektedir. Gevşek kumda ise iki farklı kazık başlığı için de p-y eğrileri birbirine çok benzemektedir. Katı ve yumuşak kilde bulunan rijit başlıklı kazık, aynı zeminde bulunan serbest başlıklı kazığa göre, nihai zemin direncine daha az bir ötelenmede ulaşmaktadır (Ashour ve Norris, 2000).

Kazık şekli

Kazık kesitinin p-y eğrilerine etkisinin incelenmesi için kum ve kil zeminde, kare ve dairesel kesitli, aynı eğilme rijitliğine sahip beton kazıklar kullanılmıştır. Buradan elde edilen eğrilere göre hem kil hem de kum zeminde kare kesitli kazıkta, dairesel kesitli kazığa göre daha büyük bir kazık-zemin direnci görülmektedir (Ashour ve Norris, 2000).

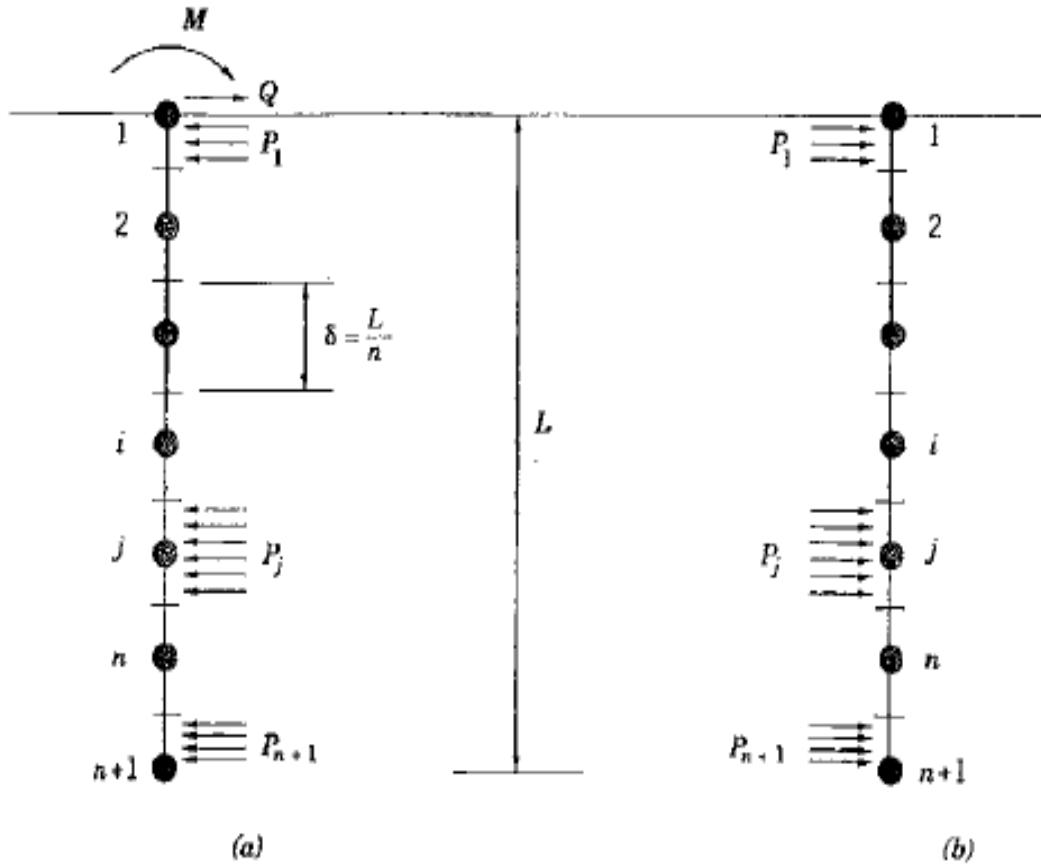
3.7 Elastik Ortam Yaklaşımı

Yatay yük ve momente maruz kalan kazığın yatay yer değiştirmesinin ve momentinin bulunması yatak katsayısı teorisine dayanır. Ancak burada zemin ağırlığının sürekliliği hesaba katılmadığı için bu teori yetersiz kalmaktadır. Poulos, yatay yüklü kazıkların davranışını elastik ortam kabulü olan zeminler için incelemiştir (Poulos, 1971a, 1971b). Kazık etrafındaki zeminin elastik ortam olarak varsayılması teorik olarak gerçekçi bir yöntemdir. Bu yaklaşım, diğer yöntemlere göre daha gerçekçi olmasına rağmen pratikteki problemlere uygulanmasındaki en büyük sorun, zemin modülü E' nin gerçekçi determinasyonudur. Ayrıca, bu

yaklaşımındaki teorik kavramları pratikteki problemlere uygulayabilmek için daha fazla sayıda arazi verilerine ihtiyaç vardır.

Yatay yüklü kazıkların davranışının, elastik ortam yaklaşımı ile çözümü aşağıdaki varsayımlar ile yapılmaktadır:

1. Şekil 3.33' de görüldüğü gibi kazık B genişliğinde, L uzunluğunda ve El sabit rijitliğinde ince, uzun ve dikey dikdörtgen olarak varsayılmaktadır. (Dairesel kazıklarda B genişliği kazık çapı olarak alınmalıdır). Kazık, kazık başı ve sonu hariç (n+1) sayıda eşit uzunluktaki parçaya ayrılmaktadır, bu uzunluk $\delta/2$ 'dir.
2. Analizi kolaylaştırmak için, zemin ile kazık çevresinde oluşabilecek yatay kesme gerilmeleri ihmal edilmiştir.
3. Her elemana üniform yatay P yükünün etkidiği varsayılmaktadır.



Şekil 3.33 : Gerilme dağılımları; a) Kazıktaki gerilmeler, b) Kazık çevresindeki zemindeki gerilmeler (Prakash ve Sharma, 1990).

4. Zemin ideal, homojen, izotropik, yarı sonsuz elastik malzeme, Young Modülü E_s , Poisson oranı ν olan ve kazık özelliklerinden etkilenmediği varsayılmaktadır.
5. Kazığın arka yüzeyine yakın yerdeki zeminin kazığa yapıştığı varsayılmaktadır.

Tam elastik koşullardaki zeminlerde, kazık boyunca kazık ve zemin yer değiştirmeleri eşittir. Poulos, birim elemanların merkezinde kazık ve zemin yer değiştirmeleri eşitlemektedir. Uç ve üstteki iki eleman için yer değiştirmeler hesaplanmaktadır. Her üniform aralıklı noktada kazık boyunca kazık ve zemin yer değiştirmeleri uygun denge koşulları kullanılarak eşitlenmektedir. Buradan her elemanın yatay yer değiştirmesi de elde edilmektedir.

3.7.1 Kohezyonsuz zeminlerde elastik ortam yaklaşımı

Bu yaklaşımda, zemin deplasmanları sonsuz ortamda yatay yükler için Mindlin eşitliklerinden elde edilmekte ve kazık deplasmanları elastik zemine oturan kiriş yaklaşımından bulunmaktadır. Yatay deplasmanlar ve maksimum moment, derinlikle artan elastisite modülü ile bulunmaktadır.

$$E_s = N_h \cdot x \quad (3.96)$$

Bu denklemden, N_h , n_h benzeri katsayıdır. Eğer E_s ve k_h 'nin derinlikle artış oranı aynı ise; $N_h = n_h$ alınabilir.

Poulos ve Davis (1980), serbest başlıklı kazık ve rijit başlıklı kazık için denklemler elde etmişlerdir.

3.7.1.1 Serbest başlıklı kazık

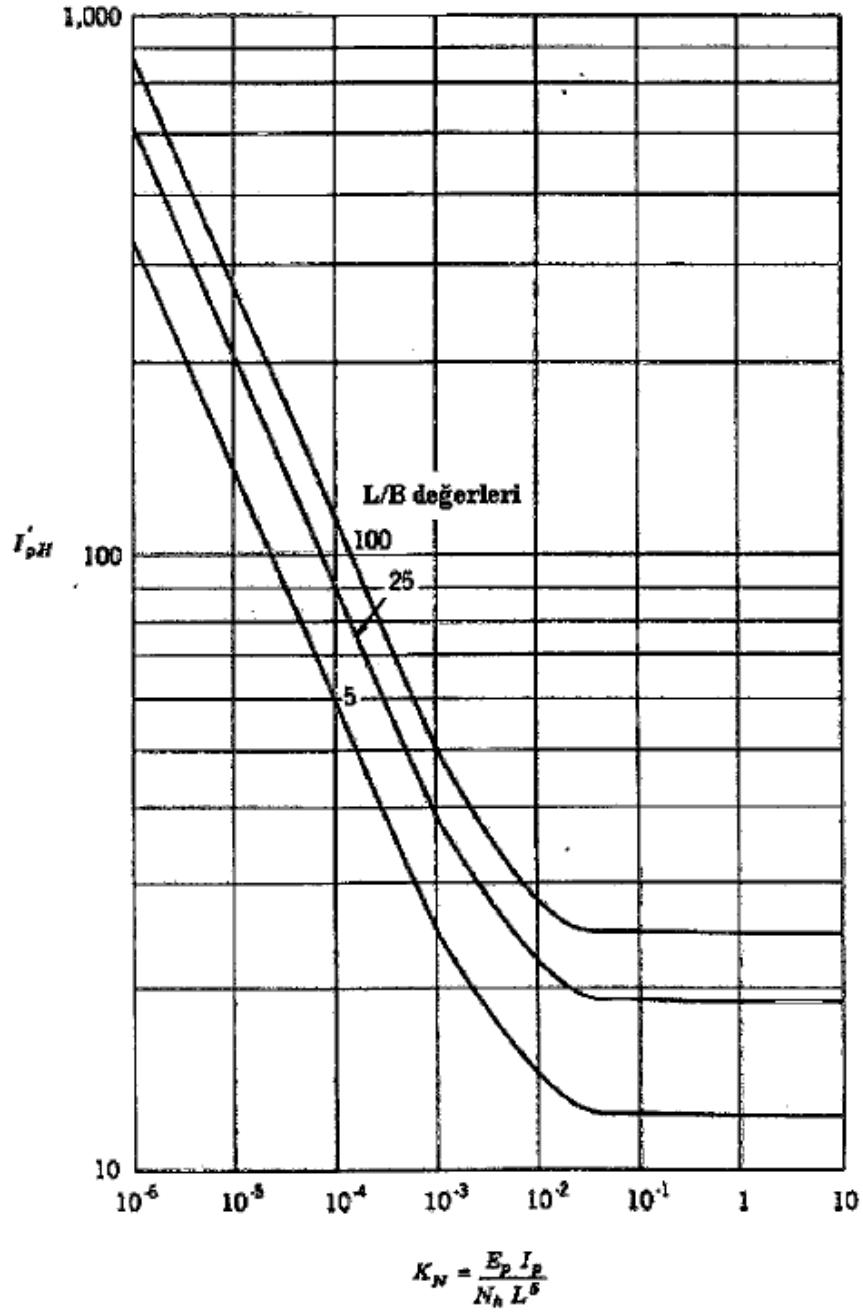
$$y_g = \frac{Q_g}{N_h \cdot L^2} \cdot \left(I'_{pH} + \frac{e}{L} \cdot I'_{pM} \right) + F'_{p} \quad (3.97)$$

Burada I'_{pH} , I'_{pM} ve F'_{p} değerleri Şekil 3.34, 3.35 ve 3.36'dan alınan değerlerdir.

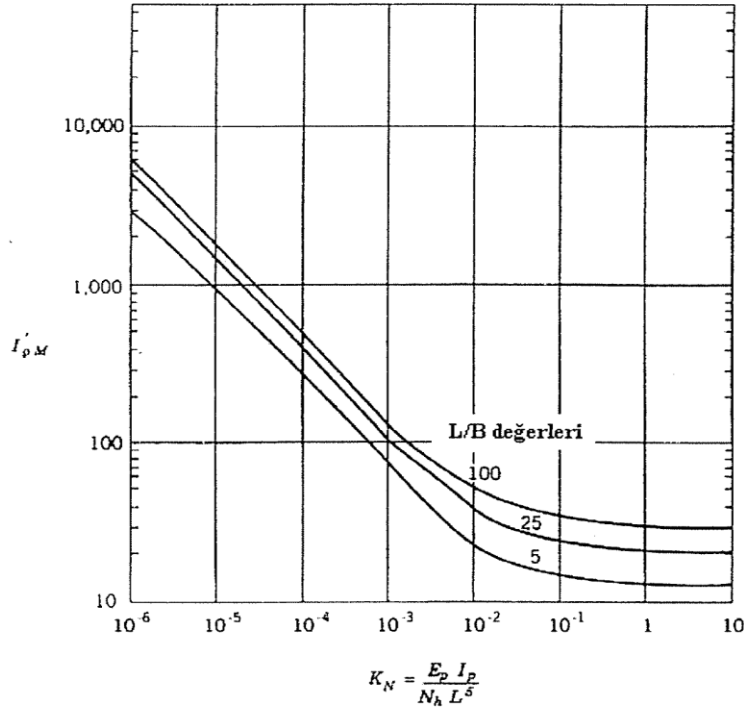
3.7.1.2 Rijit başlıklı kazık

$$y_g = \frac{Q_g}{N_h \cdot L^2} \cdot (I'_{pF}/F'_{pF}) \quad (3.98)$$

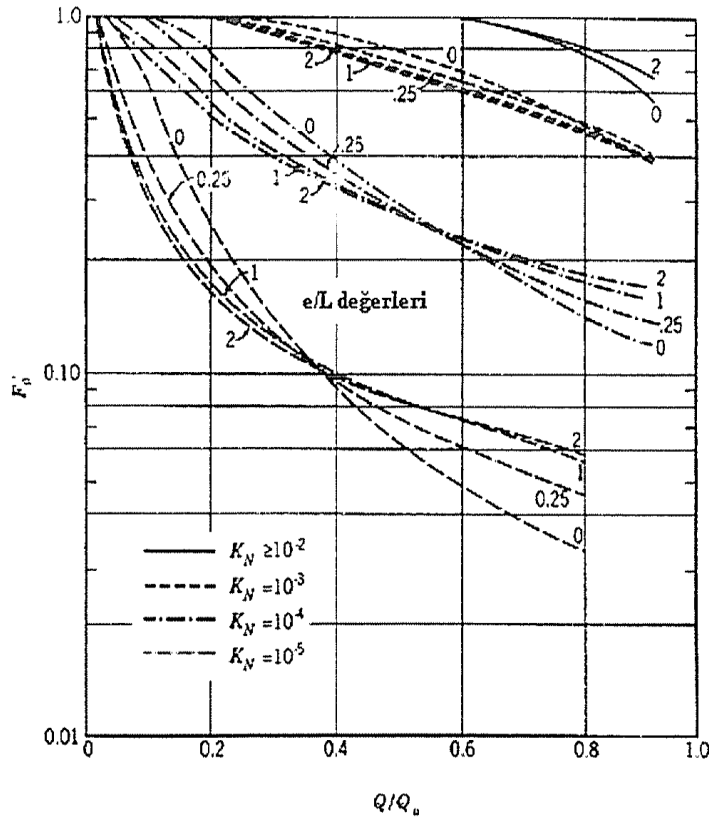
Bu denklemdeki I'_{pF} ve F'_{pF} değerleri Şekil 3.37 ve 3.38'den alınan katsayılarıdır (Prakash ve Sharma, 1990).



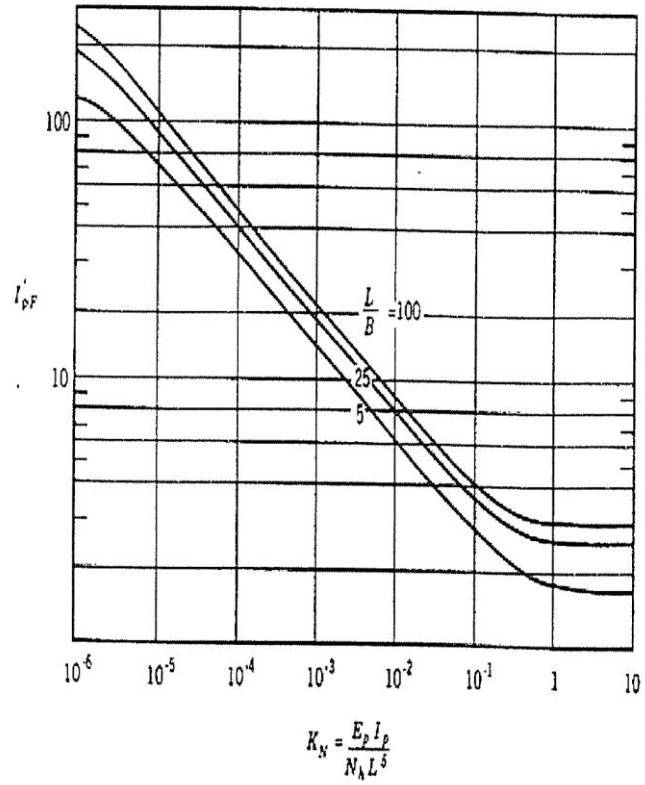
Şekil 3.34 : Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü iÇin I'_{pH} değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).



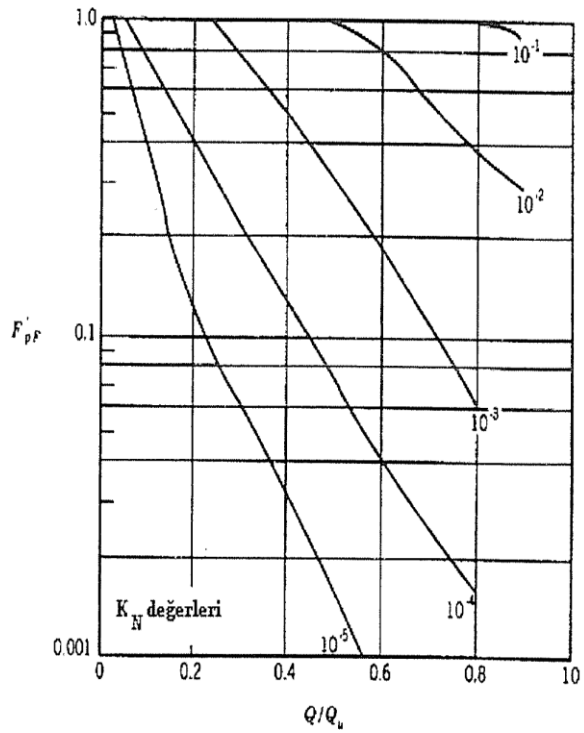
Şekil 3.35 : Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için I'_{pM} değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).



Şekil 3.36 : Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için F'_p değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).



Şekil 3.37 : Rijit başlıklı kazıklarda zemin modülü için I'_{pF} değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).



Şekil 3.38 : Rijit başlıklı kazıklarda zemin modülü için F'_{pF} değerleri (Prakash ve Sharma, 1990).

3.7.2 Kohezyonlu zeminlerde elastik ortam yaklaşımı

Normal konsolide killerde, zemin modülü derinlikle artan zeminlerde, deplasman ve momentler kohezyonsuz zeminlerdeki çözümlerle aynı şekilde bulunmaktadır. Poulos (1971a), zemin modülünün derinlikle sabit olduğu aşırı konsolide killerde yanal yüklü kazığın deplasman ve momentinin bulunması için çözümler önermektedir. Bu çözümler serbest başlıklı ve rijit başlıklı kazıklar için aşağıda anlatılmaktadır.

3.7.2.1 Serbest başlıklı kazık

Poulos (1971a), serbest başlıklı kazıklarda yanal y deplasmanını (3.99) denklemi ile tanımlamaktadır.

$$y = I_{pH} \frac{Q_g}{E_s \cdot L} + I_{pM} \frac{M_g}{E_s \cdot L^2} \quad (3.99)$$

Bu denklemde, I_{pH} ve I_{pM} sırası ile Şekil 3.39'dan bulunmaktadır.

Kazığın dönmesi,

$$\theta = I_{\theta H} \frac{Q_g}{E_s \cdot L^2} + I_{\theta M} \frac{M_g}{E_s \cdot L^2} \quad (3.100)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

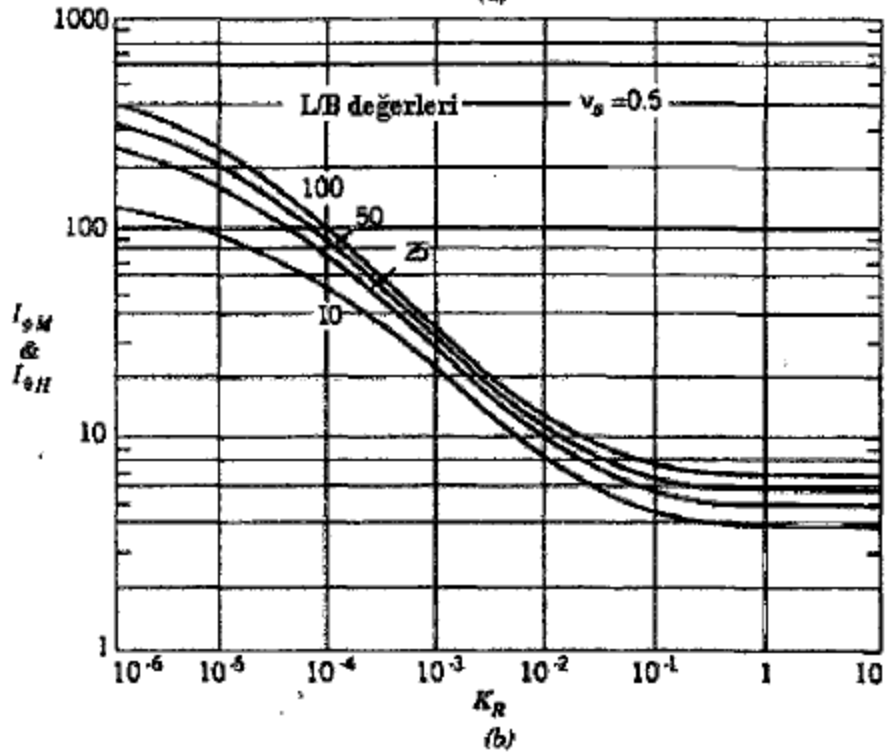
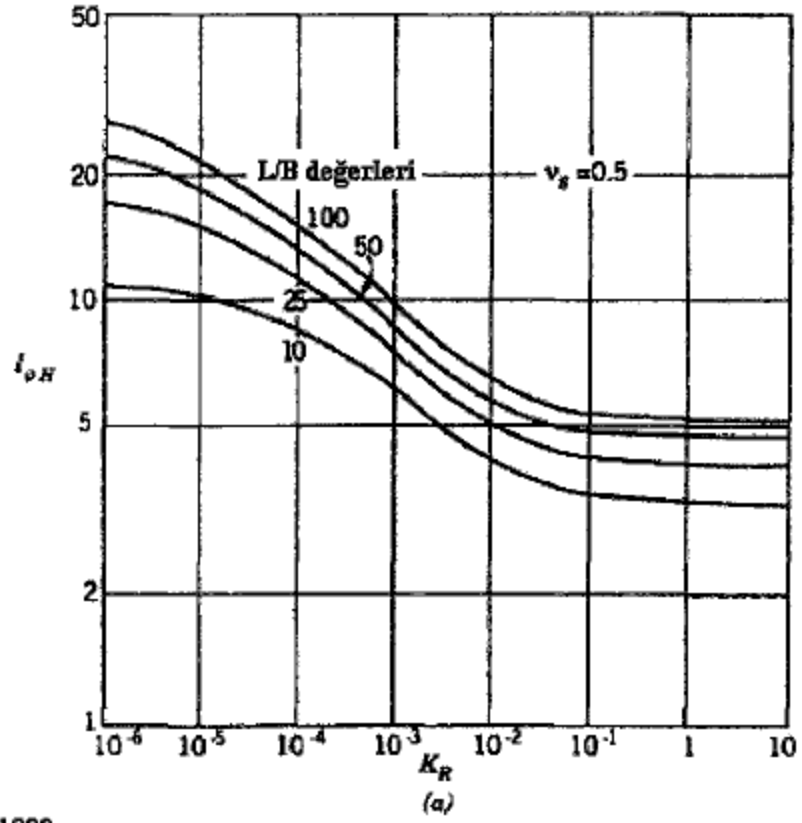
Bu denklemdeki katsayılar, K_R kazık bükülebilirlik faktörünün fonksiyonudur ve denklem (3.101) ile bulunur.

$$K_R = \frac{E_p \cdot I_p}{E_s \cdot L^4} \quad (3.101)$$

3.7.2.2 Rijit başlıklı kazık

Poulos (1971a), rijit başlıklı kazıklarda yanal y deplasmanını (3.102) denklemi ile hesaplamaktadır.

$$y = I_{pF} \frac{Q_g}{E_s \cdot L} \quad (3.102)$$



Şekil 3.39 : Serbest başlıklı kazıklarda sabit zemin modülü için, a. I_{pH} değerleri, b. I_{pM} (Prakash ve Sharma, 1990).

3.8 Karakteristik Yük Yöntemi (CLM)

Duncan ve diğ. (1994) tarafından önerilen ve p-y yöntemi uygulamasından elde edilen veri tabanı üzerinde yapılan istatistiksel çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan bir yaklaşımdır. Karakteristik yük yöntemi, yatay yük taşıyan kazıkların davranışını boyutsal analiz yöntemiyle ve davranış parametrelerini de boyutsuz değişkenlere bağlayarak çözümlenmektedir. Bu yöntem, gerek kohezyonlu ve gerekse kohezyonsuz zeminler içindeki pek çok sayıda rijit ve serbest başlı kazık üzerinde p-y yöntemi ile çözümler yaparak elde edilen sonuçları, boyutsuz değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerini tanımlamak amacı ile geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem aşağıdaki problemlerin çözümünde kullanılmaktadır;

1. Zemin yüzeyi seviyesinde yanal yüklenmiş tutulu ve serbest başlı kazıklar ile kazık başlığının üzerindeki bir seviyede yük alan kazıkların zemin yüzeyi seviyesindeki yerdeğiştirme miktarının bulunması,
2. Yukarıda bahsedilen yükleme şartlarında oluşabilecek maksimum moment miktarının ve yerinin saptanması.

Yöntemde kazığın çap ve eğilme rijitliği ile zeminin mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme davranışı özelliklerini içeren karakteristik bir yük ve karakteristik bir moment tanımlanmaktadır. Karakteristik yük kil ve kum zeminlerde denklem (3.103) ve (3.104) şeklinde hesaplanmaktadır.

Kilde,

$$P_c = 7.34 \cdot B^2 \cdot (E_p \cdot R_1) \cdot \left(\frac{S_u}{E_p \cdot R_1} \right)^{0.68} \quad (3.103)$$

Kumda,

$$P_c = 1.57 \cdot B^2 \cdot (E_p \cdot R_1) \cdot \left(\frac{\gamma' \cdot B \cdot \emptyset' \cdot K_p}{E_p \cdot R_1} \right)^{0.57} \quad (3.104)$$

Karakteristik moment ise kil ve kum zeminlerde denklem (3.105) ve (3.106)'da görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

Kilde,

$$M_c = 3.86 \cdot B^2 \cdot (E_p \cdot R_1) \cdot \left(\frac{S_u}{E_p \cdot R_1} \right)^{0.46} \quad (3.105)$$

Kumda,

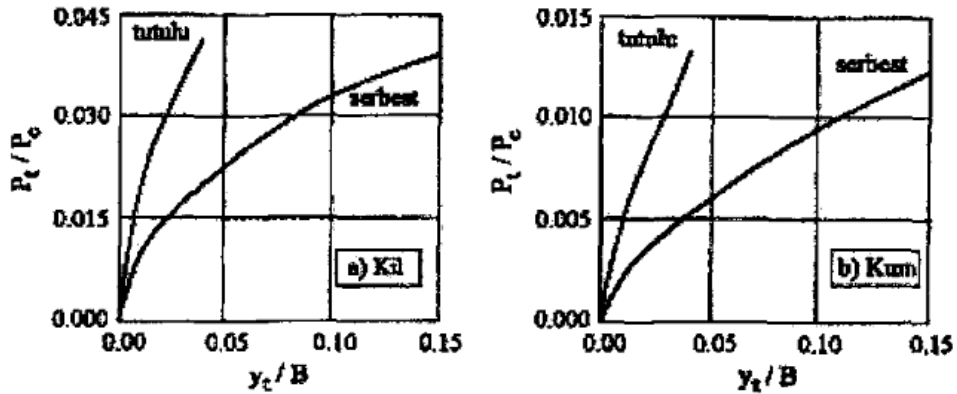
$$M_c = 1.33 \cdot B^2 \cdot (E_p \cdot R_1) \cdot \left(\frac{\gamma' \cdot B \cdot \phi' \cdot K_p}{E_p \cdot R_1} \right)^{0.40} \quad (3.106)$$

Bu bağıntılarda, R_1 atalet momenti oranı olup denklem (3.107) şeklinde verilmektedir.

$$R_1 = \frac{I_p}{I_{daire}} \quad (3.107)$$

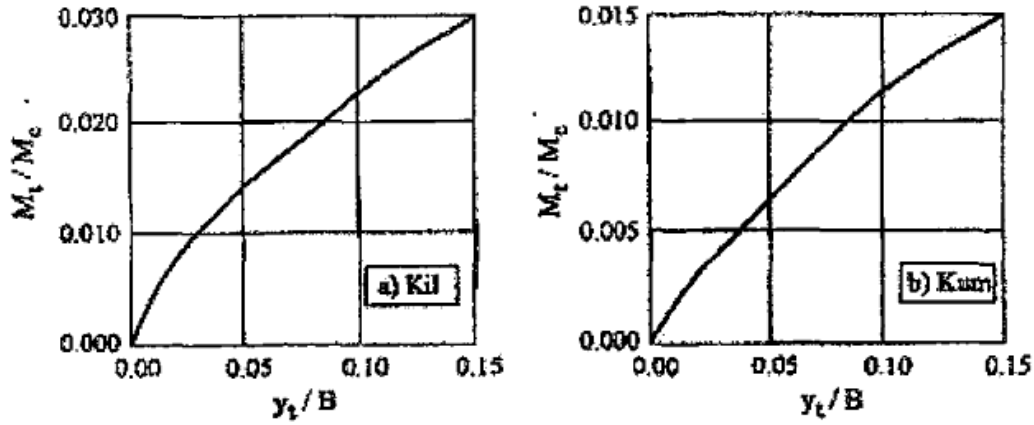
Burada, I_p kazık atalet momenti, I_{daire} ise aynı çaplı dolu dairesel kesit atalet momentini göstermektedir. γ için yer altı suyu altında su altındaki, yer altı suyu üzerinde toplam birim hacim ağırlığı alınmalıdır. K_p , Rankine pasif itki katsayısıdır. Drenajsız kayma dayanımı S_u 'nun arazi ve yn üç eksenli basınç deneyleri ile, ϕ 'nin ise arazi deneyleri ile bulunması önerilmektedir. Yatay yük etkisinde kazık başı yakınının davranışı önemli olduğundan zemin yüzeyinden $8B$ derinliğe kadar ortalama S_u ve ϕ almak yeterlidir. Donatılı kazıklarda eğilme rijitliği $E_p I_p$ 'nin kesit tesirlerinin çatlama yaratacak büyüklükte olması durumunda azaltılmalıdır.

Duncan ve diğ. (1994) tarafından killi ve kumlu zeminlerde hem tutulu hem serbest başlı kazıklar için zemin yüzeyine etkiyen yatak yük ve moment nedeniyle oluşacak yerdeğiştirmeler boyutsuz olarak eğriler şeklinde Şekil 3.40'da gösterilmektedir.



Şekil 3.40 : CLM yönteminde yatay yük nedeniyle ötelenmeler (Duncan ve diğ., 1994).

Eğriler verilen bir yük nedeni ile ötelenmeleri tahmin etmekte kullanıldığı gibi izin verilebilir bir ötelenme için, yükü sınırlandırma türü çözümlerde de kullanılabilir. Eğrilerden kazık başı tutuluğunun deplasmana olan büyük etkisi görülmektedir. Pratikte kazıkların kazık başlıklarına yeterince gömülüp moment transferi için gerekli donatı yerleştirilen durumlarda kazık başının tutulu olduğu varsayılır. Kazık başında moment etkimesi halinde yatay ötelenmeler yine boyutsuz formda Şekil 3.41'den tahmin edilebilir.



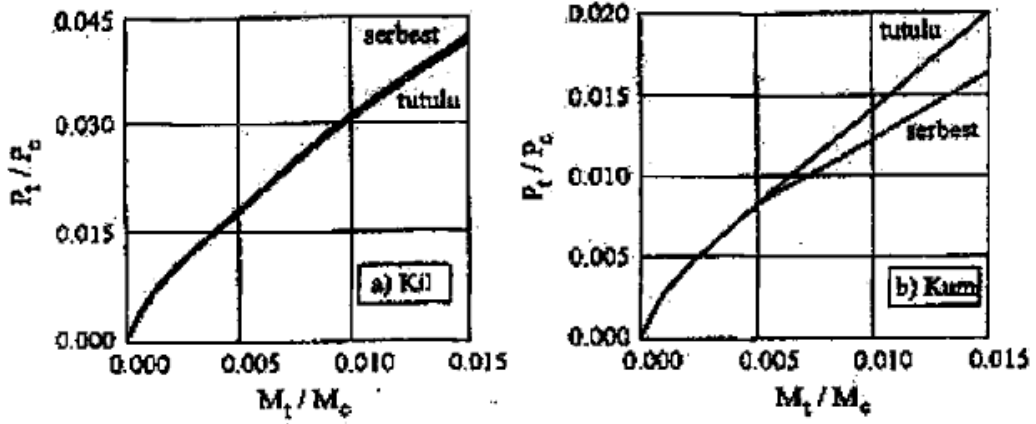
Şekil 3.41 : Kazık başında moment nedeniyle ötelenmeler (Duncan ve diğ., 1994).

Eğer yatay kuvvet zemin yüzeyinden yukarıda etkiyorsa, bu zemin yüzeyine bir yatay kuvvet ve bir moment olarak indirgenir. Kazıkların yük ve moment etkisinde davranışı lineer olmadığından lineer bir süperpozisyon yerine aşağıda belirtilen yolla lineer olmayan bir süperpozisyon önerilmektedir.

1. Yalnız başına yük etkimesi halinde ötelenme Y_{tp} ile yalnız moment etkimesi halinde ötelenme Y_{tm} yukarıdaki eğrilerden bulunur.
2. Momentin doğuracağı ötelenmeyi yaratacak yük P_m ile yükün yaratacağı ötelenmeyi verecek moment M_p yine eğrilerden ters işlem yapılarak bulunur.
3. $P_t + P_m$ ile $M_t + M_p$ yük ve momentlerine karşılık gelen Y_{tpm} ve Y_{tmp} deplasmanları bulunur.
4. Zemin yüzeyinden yukarıda etkiyen yük için beklenen ötelenme denklem (3.108)'deki gibi olacaktır.

$$Y_{birleşik} = 0.5 \cdot (Y_{tpm} + Y_{tmp}) \quad (3.108)$$

Tutulu başlı kazıklarda maksimum momentin kazık tepesinde oluşacağı bilinmektedir. Maksimum moment için Şekil 3.42'deki grafikler kullanılabilir.



Şekil 3.42 : Yük-Moment eğrileri (Duncan ve diğ., 1994).

Serbest başlı kazıklarda ise maksimum moment, zemin yüzeyinden derinde oluşmaktadır. Bunun yeri ve büyüklüğü derinlikle artan yatak katsayısı varsayımı ile tahmin edilebilir (Matlock ve Reese, 1961). Zemin yüzeyindeki ötelenme CLM ile tahmin edildikten sonra denklem (3.109) ile yazılabilir.

$$Y_{birleşik} = \frac{2.43 \cdot P_t}{E_p I_p} \cdot T^3 + \frac{1.62 \cdot M_t}{E_p I_p} \cdot T^2 \quad (3.109)$$

Eşitlikteki 2.43 ve 1.62 değerleri, yatak katsayısı yönteminde anlatılan A_y ve B_y katsayılarıdır. Bu eşitlikten T karakteristik uzunluğu çekilirse denklem (3.110)'da görülen momentin derinlikle değişimi bulunabilir.

$$M_z = A_m \cdot P_t \cdot T + B_m \cdot M_t \quad (3.110)$$

A_m ve B_m yatak katsayısı yönteminde anlatılan katsayılarıdır. Maksimum momentin $Z = 0$ ve $Z = 1.3T$ arasında yer alacağı anlaşılmaktadır. Duncan ve diğ. (1994) CLM yönteminin uygulanabilmesi için kazık uzunluklarının kazık davranışlarında etkili olmayacak kadar yeterli olması gerektiğini ve bunun için minimum derinliğin kazıkla zeminin göreceli rijitlikleri oranının bir fonksiyonu olarak belirlenebileceğini belirtmektedirler. Minimum derinlikler için öneriler Çizelge 3.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.8 : CLM yöntemi için minimum uzunluklar (Duncan ve diğ., 1994).

Zemin Türü	Kriter	Minimum Uzunluk	
Kil	$E_p R_1 / S_u$	100000	6B
		300000	10B
		1000000	14B
		3000000	18B
Kum	$E_p R_1 / \gamma' B \phi' K_p$	10000	8B
		40000	11B
		200000	14B

Minimum önerilen boydan daha kısa kazıklarda ötelenmelerin CLM ile hesaplanandan daha fazla, momentlerin daha az olması beklenmektedir.

Yöntem Reese ve diğ. (1975)'in gerçekleştirdiği yatay yükleme sonuçlarına uygulandığında killi zeminde tahmin edilen ötelenme ölçülenden %70 daha fazla olmuşken, ölçülen ve tahmin edilen momentler uyum içinde bulunmuştur. Kumlu zeminlerde ise hesaplanan ve ölçülen ötelenmeler yalnızca %10 fark etmiş, momentler ise birbirine çok yakın bulunmuştur (Yıldırım, 2009).

4. YATAY YÜKLEME ALTINDAKİ GRUP KAZIKLARIN ANALİZİ

Kazıklar genellikle grup şeklinde imal edilmekte olup tek kazığın davranışına göre daha farklı bir yük deformasyon davranışı göstermektedirler. Grup kazık davranışına zemin ve kazık özelliklerine ilave olarak kazık grubunu oluşturacak olan kazık sayısı, kazıkların grup içerisindeki yerleşimleri, kazıklar arası uzaklıklar, kazık başlığının rijitliği ve zemin yüzeyi ile olan ilişkisi etkili olmaktadır.

Yatay yüklü kazık gruplarında tek kazıkta olduğu gibi kazıkların yapısal göçmesi, grubun aşırı yer değiştirmesi ve kazıklar etrafındaki zeminde nihai taşıma gücüne ulaşma nedeni ile göçme olasılığı birlikte değerlendirilmelidir. Kazık gruplarıyla ilgili problemlerde genellikle en çok yük alan kazıkta doğan maksimum eğilme momenti veya deplasmanların kritik duruma neden oldukları kabul edilmektedir.

Bir grup içerisindeki yerleşime göre grupları geniş ve dar aralıklı diye ikiye ayırmak mümkündür. Geniş aralıklı kazık grubunda bir kazığın deplasmanı diğerini etkilememekte olup yanal yük kazıklara eşit bölünüp daha sonra tek kazık analizi yapılabilir. Dar aralıklı gruplarda ise kazıklar arası zeminin deplasmanından dolayı bir kazığın davranışı diğerini etkilemektedir.

Yanal yük etkisinde, grup içerisindeki herhangi bir kazığın deplasmanı kendisini çevreleyen zemin ve kazıkta yer değiştirmelerin olmasını sağlayabilir. Bu yüzden kazık grupları, gruptaki bir kazığa gelen yüke eşit bir yüklemeye maruz tekil kazığa göre daha fazla deplasman yapmaktadır. Bu davranış kazık-zemin-kazık etkileşimi diye adlandırılır. Bu etkileşimle zemin yumuşamış gibi davranmaktadır.

Bu davranışa etki eden diğer etkenler arasında kazık başlığının zeminle temas durumu ve kazık başlığının varlığı ile onun sağladığı rijitlik sayılabilir. Tek bir kazık bile serbest ve tutulu başlı kazıkta yanal ötelenme 4:1 oranında olduğu bilindiğinden bir grupta kazık başlığının kazık başlarına sağladığı rijitlik özellikle dikkate alınmalıdır. Diğer yandan kazığın yerleştirme biçimi (çakma veya delme) zeminin içerisindeki gerilmeleri farklı şekilde değiştirdiğinden kazık grubunun davranışında

etkili olması beklenir. Kazık gruplarının yanal yükler etkisinde tasarımı için var olan yöntemlerden en çok bilinenleri aşağıda özetlenmektedir (Yıldırım, 2009).

4.1 Değiştirilmiş Birim Yük Transferi Yöntemi

Bogart ve Matlock (1983), tarafından önerilen değiştirilmiş birim yük transferi yöntemi, kazık grubunu tek kazık gibi kabul ederek grup için p-y eğrilerini belirtmektedir. Değiştirilmiş tek kazığın çapı kazık grubunun genişliğine eşittir ve gruptaki kazıklar ve aralarındaki zemini örneklemektedir. Bu yöntem yumuşak kil içerisindeki dairesel kazık grubu için kullanılmaktadır ve yatay yüke karşı olan direncin bütün kazıklar arasında eşit dağıldığı kabulü yapılmaktadır. Dairesel olmayan kazık grupları için yöntem pek uygun değildir (Ooi ve Duncan, 1994).

4.2 Grup Azaltma Faktörü

Kumlar üzerinde yapılan model deneylere dayanmakta olup Davisson (1970)'a göre 8B'den daha fazla aralıkta kazık-zemin-kazık etkileşimi söz konusu değildir. Kazık grubunun yatay yük taşıma gücünü bulmak için yatak katsayısı (kumlu ve normal konsolide killi zeminlerde yatak katsayısı değişim çarpanı n_h veya aşırı konsolide killi zeminlerde değişmez yatak katsayısı k_h) yatay yük yönünde aralığa göre Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi azaltılmalıdır.

Çizelge 4.1 : Grup Azaltma Faktörü (Yıldırım, 2009).

Yük yönünde kazık aralığı	n_h veya k_h 'da azaltma faktörü
3B	0.25
4B	0.40
6B	0.70
8B	1.00

Kazıkların yanal yük taşıma güçlerini deplasmanla sınırlamak için yapılacak analizde bu azaltılmış değere göre tek bir kazığın taşıma gücü bulunduktan sonra grup için tek kazık taşıma güçleri toplanacaktır.

Diğer bir yöntemde grubun yanal taşıma gücünü bulmak için tek kazık taşıma gücü toplamına bir grup etkinlik faktörü uygulanmaktadır.

Kohezyonsuz zeminlerde grup etkinlik faktörü Oteo (1972) tarafından verilmekte olan değerler izelde 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 : Kohezyonsuz zeminler için grup etkinliği (Oteo, 1972).

S/B	Ge
3	0.50
4	0.60
5	0.68
6	0.70

Kohezyonlu zeminlerde grup etkinlik faktörü Prakash ve Saran (1967) tarafından verilen değerler izelge 4.3’de verilmektedir.

Çizelge 4.3 : Kohezyonlu zeminler için grup etkinliği (Prakash ve Saran, 1967).

S/B	Ge
3	0.40
4	0.50
5	0.55
6	0.65
8	1.00

Grup etkinlik faktörü yardımı ile (4.1) denkleminde kullanılarak grup taşıma gücü bulunmaktadır.

$$Q_{ug} = G_e \cdot n \cdot Q_u \quad (4.1)$$

Q_u tek bir kazığın taşıyabileceği son yük, n kazık sayıdır. G_e değerlerinin kohezyonlu zeminlerde, kohezyonsuza göre daha küçük olduğu görülmektedir (Yıldırım, 2009).

4.3 Birleştirme Yöntemi

Focht ve Koch (1973), Poulos'un elastik ortam yöntemi ile nonlinear p-y analizini birleştirmiştir. Grubun yapacağı deplasmanın kazığın hemen yakınında görülecek nonlinear davranış ile kazıktan uzakta daha az gerilme uygulanacak kesimin lineere yakın davranışının birleşiminden meydana geldiğini kabul etmektedir.

Focht ve Koch (1973), nonlinear zemin davranışından dolayı kazığın hemen yanında oluşan deplasmanların analizi nonlinear p-y eğrilerini kullanarak veya Duncan ve diğ. (1994) tarafından önerilen karakteristik yk metoduyla yapılmaktadır. Kazık-

zemin-kazık etkileşiminden dolayı oluşan ikinci deplasman bileşeni Poulos (1971b)'in elastik etkileşim katsayıları ile hesaplanmaktadır. Focht ve Koch (1973) tarafından önerilen yöntemde p-y ya da karakteristik yük metodu kullanılarak kazığın hemen yanındaki zemin ve daha az gerilmeye sahip kazıktan uzaktaki zemin farklı rijitlik değerleri ile temsil edilebilmektedir.

Dunnavant ve O'Neill (1989), yatay yüklü kazık grubu deneylerini bu yöntemi kullanarak analiz yapmışlardır. Kazıklar arasındaki yük paylaşımını ampirik rijitlik modeli, kazık grubundaki deplasmanlar ve momentler için ise birleştirme modelinin daha iyi sonuç verdiği belirtilmektedir.

Kazık grubu tekil bir kazığa göre daha fazla deplasman yapmaktadır. Burada tekil kazığa gelen yük, gruptaki kazık başına düşen yüke eşittir. Gruptaki her kazık çevresindeki zeminde deplasman oluşturur. Bu deplasmanlarda çevre kazıklarda ek yer değiştirmelere sebep olmaktadır. Kazık grubundaki deplasmanın büyük olması eğilme momentlerinin de büyük olmasını sağlamaktadır.

Tek bir kazığın yanal ötelenmesi ve momenti grup için bir büyütme faktörü ile çarpılıp bulunabilmektedir.

$$y_g = C_y \cdot y_s \quad (4.2)$$

$$M_g = C_m \cdot M_s \quad (4.3)$$

Burada y_s ve M_s tek kazık için hesaplanacak yanal ötelenme ve maksimum moment, C_y ve C_m ise ötelenme ve moment büyütme faktörüdür. y_g grup deplasmanı, M_g ise grupta oluşan maksimum momenttir. C_y her zaman bire eşit veya büyüktür. Bu faktörler kazık-zemin-kazık etkileşimini ve fore kazık etkisini hesaba katmaktadır (Duncan ve diğ., 1994).

4.4 Grup Büyütme Yöntemi, Ooi ve Duncan (1994)

Bir grupta bir kazığın çevresindeki zeminin yer değiştirmesine neden olarak diğer kazıkların yer değiştirmesine ek bir etki yapması beklenir. Grup için yer değiştirme tek kazığa göre fazla olacağından kazıklardaki eğilme momentleri de daha fazla olacaktır. Bu nedenle tek bir kazığın yanal ötelenmesi ve momenti grup için büyütme

faktörü ile çarpılıp bulunabilmektedir. Bu bağıntılar (4.4) ve (4.5)'de gösterilmektedir.

$$y_g = C_y \cdot y_s \quad (4.4)$$

$$M_g = C_m \cdot M_s \quad (4.5)$$

Burada, y_s ve M_s tek kazık için bulunacak yanal ötelenme ve moment, C_y ve C_m ise ötelenme ve moment büyütme faktörüdür.

Ooi ve Duncan (1994), birçok kazık grubunda farklı kazık sayısı, farklı kazık aralığı, farklı kazık boyutu, farklı kazık rijitliği ile farklı zemin mukavemet ve rijitliği için konuyu araştırmışlardır. Parametrik çalışmalar sonucunda (4.6) denklemi bulunmuştur.

$$C_y = \frac{A_y + N_k}{B' \cdot \left(\frac{S}{B} + \frac{P_s}{CP_N} \right)^{0.5}} \quad (4.6)$$

Burada, C_y boyutsuz deplasman büyütme faktörü, A kilde 16, kumda 9 alınması gereken boyutsuz katsayı, N_k gruptaki kazık sayısı, B kilde 5.5, kumda 3.0 alınması gereken boyutsuz katsayı, S ortalama kazık aralığı, B kazık çapı, P_s bir kazığa gelen ortalama yük (Toplam yük/kazık sayısı), C kilde 3, kumda 16 olan boyutsuz katsayı, P_N kil için $S_u \cdot B^2$, kum için $K_p \cdot \gamma \cdot B^3$ 'tür. γ üstteki 8B bölgesinde toplam birim hacim ağırlığı, K_p ise 8B bölgesindeki ortalama ϕ 'ye göre bulunacak pasif itki katsayısıdır. ϕ , 8B bölgesindeki kumun ortalama içsel sürtünme açısı, S_u ise 8B bölgesindeki kilin ortalama drenajsız kayma dayanımıdır.

Brown ve diğ. (1988)'e göre serbest başlı kazıkların grubunda maksimum moment ön sıra kazıkta olmaktadır ve en fazla yük ise köşe kazıklardadır. Maksimum momentin büyüklüğü ve yeri etkiyen yükün büyüklüğüne ve statik ya da çevrimli etki etmesine göre değişmekte olup hiçbir basit yöntemle tam tahmin edilemez.

Focht ve Koch (1973) tarafından önerilen teori değiştirilerek ön sıra kazıklardaki maksimum eğilme momentinin bulunmasını sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir. Focht ve Koch teorisini kullanarak grup deplasmanı hesaplanmaktadır. Daha sonra killerde S_u , kumlarda ϕ değeri azaltılarak zemin yumuşatılır ve tek kazık

deplasmanının grup deplasmanına eşit hale gelmesi sağlanır. Maksimum moment bu yumuşatılmış zemin parametresine göre hesaplanabilir. Böylece hesaplanacak moment, grubun fazla deplasmanı ile uyum içinde olacak ve grubun en fazla yüklenen kazığının maksimum momentini verecektir. Böylece moment büyütme faktörü denklem (4.7)'deki şekilde elde edilmiştir.

$$C_m = (C_y)^n \quad (4.7)$$

Burada n sayısı, kil ve kumlarda denklem (4.8) ve denklem (4.9)'da gösterildiği gibi alınacaktır.

Kilde;

$$n = \frac{P_s}{150P_N} + 0.25 \quad (4.8)$$

Kumda;

$$n = \frac{P_s}{300P_N} + 0.30 \quad (4.9)$$

Bu yöntemin üniform aralıklar için geliştirilmesi nedeni ile üniform olmayan aralıklarda ortalama değer olarak hesap yapılabilir. Yöntem, dairesel gruplar veya eğik kazıklar için uygun değildir. Tek kazık deplasman ve momentleri hesaplanırken kazık başlığının rijitliği göz önüne alınmalıdır. Yöntem grup içindeki sıralamayı dikkate almaksızın aynı sayıdaki kazık grupları için aynı deplasman ve moment değerlerini vermektedir. Teorik ve deneysel çalışmalar böyle bir farkın doğabileceğini işaret etmekte iseler de fark çok olmadığından bu konu yöntemin olumsuzluğu gibi görülmemelidir. Yöntem üniform zemin koşullarını kabul etmekle birlikte 8D bölgesindeki ortalama değerler kullanmak farklı ortamlar için pratikte yeterlidir (Yıldırım, 2009).

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PLAXIS

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi, tekrar eden çok sayıda işlemlere ve karmaşık, elle hesaplanması oldukça zaman alan mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözebilen bir sayısal çözüm yöntemidir. Bu yöntem esas olarak fiziksel bir sistemin matematiksel olarak ifade edilmesine dayanmaktadır. Buna göre değişik ve karmaşık geometriye sahip sistemler, çok sayıda basit geometriye sahip parçacığa bölünerek bu parçacıkların ayrı ayrı çözülmesi ile analiz edilir. Bu sistemlerin parçalara bölünmesi ile elde edilen her bir parça eleman olarak isimlendirilmektedirler. Bu aşamada sistem parçalanırken esas sistemde yer alan süreksizlikler dikkate alınmalıdır. Örneğin farklı malzeme özelliklerine sahip geometriler kendi içerisinde parçalara ayrılmalıdır. Ayrılan parçalar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanarak esas geometriyi oluştururlar ve her bir parça için denge denklemleri yazılarak bilinmeyenler sınır şartları yardımı ile elde edilir. Her elemanın şekli, bu elemanı oluşturan düğüm noktalarının koordinatlarıyla belirlenir. Bu şekilde yapılan analizin bir boyutlu olması durumunda elemanlar doğrusal, iki boyutlu olması durumunda elemanlar kare, üçgen ya da dikdörtgen ve üç boyutlu olması durumunda üçgen prizma, dikdörtgen prizma gibi şekillerden oluşurlar. Her düğüm noktasının belirli bir serbestlik derecesi vardır. Bu serbestlik dereceleri elde edilmesi gereken bilinmeyenleri işaret etmektedir. Çözüm için bir asıl değişken seçilerek tek bir elemanda bu değişkenin davranışı modellenir ve matris hesap yöntemiyle tüm sisteme uygulanarak bilinmeyenler hesaplanır (Sert, 2003).

Sonlu elemanlar yöntemi geoteknik mühendisliğinde yükleme, gerilme-şekil değiştirme, konsolidasyon, taşıma gücü, dinamik davranış ve malzeme çeşitliliği olan problemlerde yaygın olarak kullanılabilir.

Geoteknik mühendisliğinde problemlerin çoğunluğu deplasman yöntemi kullanılarak çözümlenmektedir. Deplasman yönteminde, bilinmeyen deplasmandır. Gerilme ve birim şekil değiştirmeler ise ikincil büyüklükler olarak deplasmanların

tanımlanmasına bağı olarak elde edilmektedirler. Sonlu elemanlar yöntemi, modelin sonlu elemanlara ayrılması, elemanda yükleme sonucu oluşacak deplasmanları temsil edecek deplasman modellerinin seçilmesi, elemanın geometrik ve malzeme özelliklerinden elde edilen denge denklemleri katsayılarını ve minimum potansiyel enerji ilkesinden faydalanılarak elde edilen katsayıları içeren rijitlik matrisinin oluşturulması ve oluşturulan eleman rijitlik matrislerinin ve yük vektörlerinin toplanarak sistemin bütünü için rijitlik matrisi ve yük vektörünün elde edilmesi şeklinde tanımlanabilmektedir. Bir sonlu eleman ve bu sonlu elemanı çevreleyen düğüm noktaları arasındaki ilişki denklem (5.1) kullanılarak tanımlanmaktadır.

$$[k] \cdot \{q\} = \{Q\} \quad (5.1)$$

Burada deplasman vektörü $\{q\}$ bilinmeyendir ve uygulanan kuvvetler etkisinde düğüm noktalarının nasıl hareket ettiğini tanımlamaktadır. Eleman rijitlik matrisi $[k]$, eleman özellikleri, malzeme özellikleri ve eleman geometrisi kullanılarak elde edilir. Düğüm noktası vektörü $\{Q\}$ ise eleman üzerinde etkili olan yükleri tanımlamaktadır.

Her bir elemana ait eleman rijitlik matrislerinin ve eleman yük vektörlerinin bir araya getirilip toplanması sonucu sisteme ait toplam rijitlik matrisi ve toplam yük vektörü elde edilmiş olur. Bu işlem sonucunda fiziksel problemin davranışını ifade eden diferansiyel denklem lineer bir denklem takımına (5.2) indirgenir.

$$[k] \cdot \{r\} = \{R\} \quad (5.2)$$

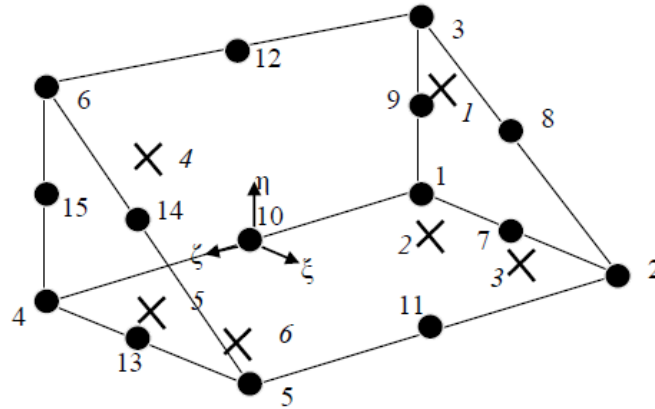
Bu denklemde yer alan $[k]$ toplam rijitlik matrisi, $\{R\}$ toplam yük vektörü ve $\{r\}$ düğüm noktası deplasman vektörüdür.

Bu iki denklemin çözülmesi için sınır koşullarının belirlenmesi ve bu iki eşitliğin uygun şekilde ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Lineer analizlerde doğrudan çözüm yapılırken, doğrusal olmayan zemin davranışı için analizlerde her bir yük adımı için yük vektörleri ve rijitlik matrisleri tekrar oluşturularak çözümlenmektedir.

5.2 Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı

Sonlu elemanlar yöntemi olarak Hollanda Delft Teknik Üniversitesi'nde geliştirilen PLAXIS yazılımı, geoteknik mühendisliğinde hem statik hem de dinamik yükler altında karmaşık geometriye sahip sistemlerin deformasyon ve stabilite analizinde

çoğunlukla tercih edilmekte olan bir programdır. Plaxis 3D Foundation programı, özellikle temel sistemlerindeki yer değiştirme ve taşıma gücü problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilerek, üç boyutlu olarak çözümlenmesi için geliştirilmiştir. Bu programla yapılan analizlerde, tabakalı zemin, karmaşık geometriye sahip sistemler, farklı yönlerde yapılan yüklemeler, statik boşluk suyu basınçları hesaplanabilmektedir. Yapı-zemin etkileşimi, özel ara yüzey elemanları (interface) ile otomatik olarak modellenabilmektedir. Sistemin düzgün olmayan elemanlardan oluşan iki boyutlu sonlu elemanlar ağı otomatik olarak oluşturulmaktadır. İstenildiğinde iki boyutlu sonlu elemanlar ağı, sistemin tümü için ya da sadece bölgesel olarak eleman boyutu ayarlaması ile sıkıştırılabilmektedir. 6 düğüm noktalı üçgen elemanlardan oluşan sonlu elemanlar ağı, y ekseninde doğrusal uzatılarak modelin tümü için üç boyutlu sonlu elemanlar ağı oluşturulmaktadır. Sonlu elemanlar ağında, gerilme ve zorlanmalar her bir elemanın Gauss (gerilme) noktalarında hesaplanmaktadır. 15 düğüm noktalı bir elemanda 6 gerilme noktası bulunmaktadır. Bu elemanlar Şekil 5.1’de gösterilmektedir.

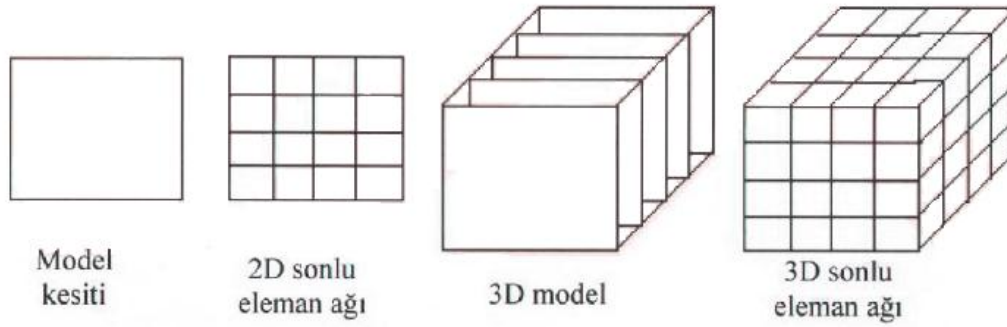


Şekil 5.1 : Plaxis 3D Foundation yazılımında kullanılan sonlu elemanlar.

Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı, birbirleri ile bağlantılı 4 ayrı alt programdan oluşmaktadır. İlk olarak, “INPUT” veri girişi programı, modelin geometrisinin, sınır koşullarının, zemin ve yapı elemanlarının malzeme özelliklerinin belirlendiği ve yük durumlarının atandığı programdır. Veri girişleri tamamlandıktan sonra iki boyutlu sonlu elemanlar ağı otomatik olarak oluşturulur. Sonrasında ise iki boyutlu ağın y eksenindeki çalışma düzlemleri boyunca birbirlerine bağlanması ile üç boyutlu sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Üç boyutlu sonlu elemanlar ağı 15 düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlardan oluşmaktadır. Komşu elemanlar ise birbirlerine ortak düğüm noktaları yardımı ile bağlanmaktadır. İkinci aşama, oluşturulan

modele ait hesaplamaların yapıldığı “CALCULATION” analiz programıdır. Analiz programında yapım aşamaları ve yükleme durumları tek tek tanımlanır. Üçüncü aşama, hesaplamalardan elde edilen sonuçların görüldüğü “OUTPUT” veri çıkış programıdır. Sonuçların grafiksel olarak görülebildiği, istenildiği takdirde önceden belirlenmiş bazı noktalardaki gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin çizdirilebildiği “CURVES” grafik programıdır.

Plaxis “INPUT” programı ile model geometrisi 3 boyutlu olarak oluşturulur. Malzeme özellikleri ve sınır koşulları tanımlanır. İlk olarak, modelin zemin tabakaları, yapılar ve yükleri kapsayan x-z ekseninde düğüm noktaları, çizgiler ve kapalı alanlardan oluşan kesiti çizilmekte ve sonlu elemanlar ağı oluşturulmaktadır. Daha sonra y ekseninin gerekli koordinatları tanımlanmakta, böylece x-z eksenlerindeki kesitin istenen sayıda kopyası, y eksenini boyunca düzlemleri oluşturmaktadır. Düzlemler arasında kalan hacimler de dilimleri oluşturmaktadır. Şekil 5.2’de bu yapı gösterilmektedir.

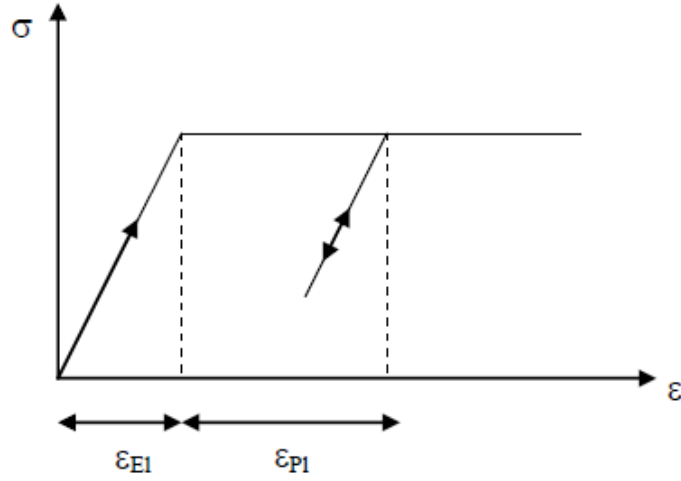


Şekil 5.2 : Sonlu elemanlar ağının oluşturulması.

Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışını belirleyenlerden birisi de, zeminin hangi model olarak tanımlandığıdır. Plaxis 3D Foundation programında, zemin mekaniğinde genellikle kullanılan lineer elastik ve elasto-plastik Mohr-Coulomb zemin modellerine ilave olarak, zeminin hiperbolik elastik-plastik davranışına izin veren pekleşen zemin (Hardening Soil) ve yumuşak zemin akma modeli (Soft Soil Creep) gibi farklı kabullere dayanan zemin modelleri de bulunmaktadır.

Elasto-plastik Mohr-Coulomb modelinde Elastisite modülü E ve Poisson oranı ν zeminin elastik özelliklerini temsil etmekte, kohezyon c ve içsel sürtünme açısı ϕ plastik, hacimsel genişleme açısı ψ ise hacim değiştirme özelliklerini temsil etmektedir. Mohr-Coulomb zemin modelindeki gerilme-şekil değiştirme davranışı

Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Geoteknik mühendisliği problemlerinin analizinde zeminlerin davranışı, az sayıda model parametresine ihtiyaç olması, kohezyon c ve içsel sürtünme açısı ϕ gibi basit fiziksel özellikler kullanılarak göçme kriteri tanımlama olanağının bulunması, zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilecek temel zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile zemin parametrelerinin kolaylıkla elde edilebiliyor olması ve malzeme modelleri ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalar sonucunda Mohr-Coulomb gibi izotropik modellerin kullanılmasının yeterli doğrulukta sonuçlara götürdüğünün ortaya konmuş olması nedeni ile yaygın olarak Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak modellenmektedir (Yang ve Jeremic, 2005; Johnson ve diğ., 2006; Karthigeyan ve diğ., 2006; Karthigeyan ve diğ., 2007).



Şekil 5.3 : Zeminde Mohr-Coulomb gerilme-şekil değiştirme davranışı modeli.

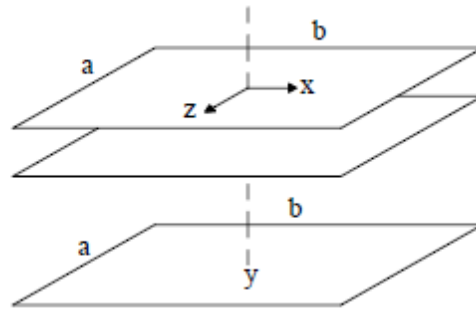
Zeminin elasto-plastik davranışını tanımlayan diğer bir model ise Pekleşen Zemin (Hardening Soil Model)'dir. Bu modelin Mohr-Coulomb modelinden farkı, akma yüzeyinin asal gerilme aralığı ile sınırlı olmayıp, şekil değiştirmeye bağlı olarak genişleyebilmesidir. Üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı Mohr-Coulomb modelinde doğrusal olarak temsil edilirken, Pekleşen Zemin modelinde hiperbolik olarak kabul edilmektedir. Bu sayede gerçek zemin davranışına daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Pekleşen zemin modelinde Mohr-Coulomb zemin modelindeki parametrelere ek olarak üç eksenli basınç deneyinden elde edilen üç ayrı Elastisite modülü parametresi ile zeminin davranışı daha hassas bir şekilde tanımlanabilmektedir.

5.3 Yatay Yüklü Kazıkların Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı ile Analiz Edilmesi

Yatay yük etkisindeki farklı çap ve aralıklara sahip kazıklı sistemlerin, çeşitli zemin parametreleri kullanılarak modellenmesi ile analiz yapıldı. Değişik zemin parametrelerine sahip kum ve kil zeminlerde modellenen bu kazıklı sistemlerin analiz edilmesi sırasında izlenen adımlar aşağıda gösterilmektedir.

5.3.1 Model özellikleri

İlk olarak çalışma düzlemleri oluşturulmaktadır. Bu çalışma düzlemleri, yatay doğrultularda aynı dış sınırlara sahip olmalarına rağmen, aralarındaki düşey mesafe tanımlanan y koordinatlarına göre değişmektedir. Çalışma düzleminin düşey koordinatları, zemin yüzeyi seviyesi, kazık başı ve kazık ucu seviyesi, kazı taban kotu ve uygulanan yükün etkiyeceği yükseklik gibi modele ait yapısal bilgiler göz önüne alınarak belirlenmektedir. Bu çalışma düzlemleri, hesaplama aşamasında zemini, yapısal elemanları ve uygulanan yükleri aktif hale getirmek ya da devre dışı bırakmak için kullanılmaktadırlar. Çalışma düzlemlerinin temsili gösterimi Şekil 5.4’de gösterilmektedir.



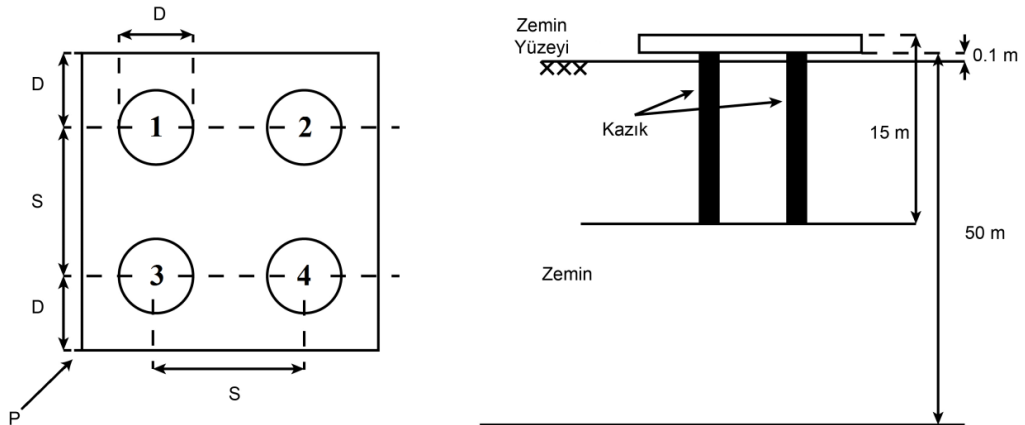
Şekil 5.4 : Çalışma düzlemlerinin temsili gösterimi.

Analizde zemin yüzeyi seviyesi, kazık başı ve sonu, kazık başlığının kazık çapları dikkate alınarak hesaplanacak olan kalınlığı, kazık başlığının zemin ile etkileşiminde uygulanan yatay yük etkisi ile meydana gelen sürtünme nedeni ile oluşan yük kayıplarını önlemek amacıyla kazık başlığı ile zemin arası 10 cm boşluk sağlanabilecek şekilde çalışma düzlemleri tanımlandı.

Yapısal eleman olarak oluşturulacak kazık elemanı “volume pile” olarak isimlendirilen hacim kazık elemanı kullanılarak modellendi. Kazık eleman, hacim

kazığı kullanılarak tanımlandığında, zemin içerisindeki kazık kesit alanına bağlı olarak, kazık elemanını temsil edecek hacimsel bir bölge belirlenmekte ve bu bölgeye kazık malzemesine ait malzeme özellikleri tanımlanmaktadır. Başlangıçta zemin elemanına ait özellikleri taşıyan bölgenin özellikleri değiştirilerek kazık elemanına ait özellikler atanmaktadır. Kazık elemanı, çalışma düzlemleri ile önceden kazık başı ve kazık ucu için tanımlanmış olan sınırlar içerisinde yer almaktadır. Kazık ve kazık çevresindeki zemin arasındaki etkileşim ara yüzey elemanları (interfaces) kullanılarak modellenmektedir. Modelde kazık eleman gibi dolu kesitli rijit yapısal davranış biçimleri non-porous davranış ile modellenmektedir. Non-porous davranış biçimi, genellikle, lineer elastik malzeme modeli ile birlikte kullanılmaktadır. Bu çalışmada da kazık lineer elastik özelliğe sahip non-porous model ile tanımlandı. Analizler 450mm, 650mm, 800mm, 1000mm ve 1200mm çapındaki kazıklar için yapıldı. Modelde 4'lü grup kazık (2x2) şeklinde modellendi. Kazık başlığının kalınlığı, kazık çapı dikkate alınarak hesaplandı. Kazık başlıklarının kalınlıkları, 450mm çapındaki kazıklar için 0.50 m, 650mm çapındaki kazıklar için 0.7m, 800mm çapındaki kazıklar için 0.8m, 1000mm çapındaki kazıklar için 1m ve 1200mm çapındaki kazıklar için 1.2m olarak tanımlandı. 15 m uzunluğundaki dairesel kazıklar kullanıldı.

Analiz edilen modelin plan olarak üstten ve önden görünümü Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5 : Analiz edilen modelin plan olarak üstten ve önden görünümü.

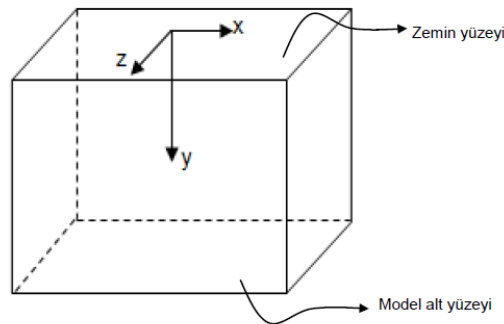
Plaxis 3D Foundation programında uygulanabilecek çeşitli yük tipleri bulunmaktadır. Modelde düşey düzleme etkiyen yayılı yük kullanıldı. Tüm analizlerde kazık başlığına iki doğrultuda 1000 kN'luk yatay yük uygulandı.

Zemin içerisindeki tabakalaşma durumu ve zemin yüzeyi seviyesi “borehole” olarak isimlendirilen sondaj kuyuları kullanılarak tanımlanmaktadır. Gevşek kum, orta sıkı kum, yumuşak kil ve yarı katı kil zeminlere ait zemin parametreleri kullanılarak analizler yapıldı. Zeminde derinlik 50 m olarak seçildi ve yer altı su seviyesinin zemini etkilemeyecek derinlikte -50 m’de olması tanımlandı.

Geometrik modele ait sınır koşulları, aşağıda belirtilen kurallar dikkate alınarak, otomatik olarak tanımlanmaktadır.

1. y-z düzlemine paralel olan model düşey sınırlarının x doğrultusundaki hareketleri engellenmişken ($u_x = 0$) y ve z doğrultularında hareket serbestlikleri mevcuttur.
2. x-y düzlemine paralel olan model düşey sınırlarının z doğrultusundaki hareketleri engellenmişken ($u_z = 0$) x ve y doğrultularında hareket serbestlikleri mevcuttur.
3. Geometrik modelin alt sınır yüzeyinin tüm doğrultulardaki hareketleri engellenmiştir ($u_x = u_y = u_z = 0$)
4. Zemin yüzeyi her doğrultuda hareket serbestliğine sahiptir.
5. Normalleri ne x ne de z doğrultusunda olan düşey model sınırların hareketleri hem x hem de z doğrultularında engellenmişken ($u_x = u_z = 0$) bu düşey sınırlar y doğrultusunda hareket serbestliğine sahiptir.

Üç boyutlu model geometrisi Şekil 5.6’da gösterilmektedir.



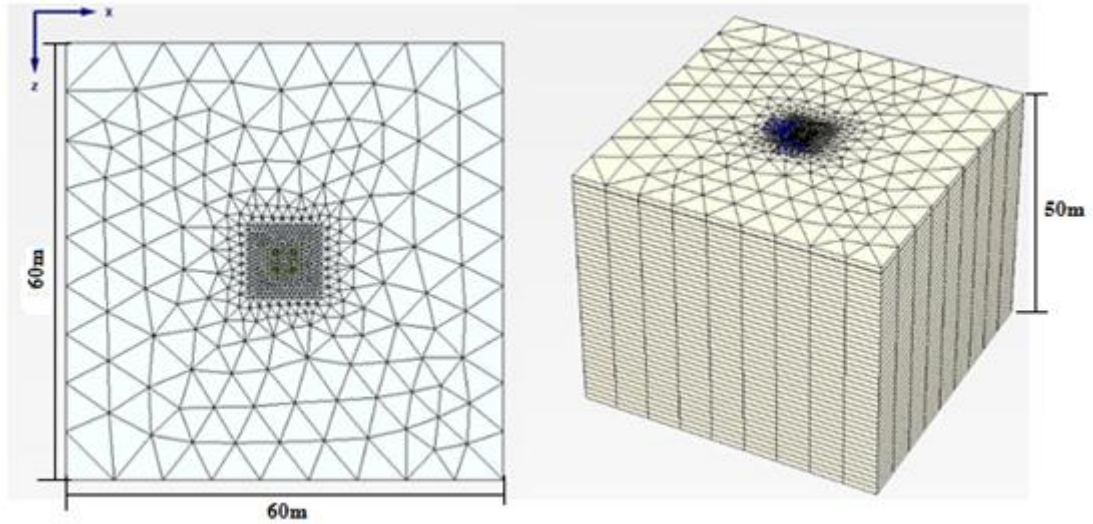
Şekil 5.6 : Üç boyutlu model geometrisi.

Model sınır koşulları, x,y ve z eksenlerinde yapılan analizler sonucunda tüm kazık çapları için belirlendi ve sınırlarda değişim olmayacak şekilde, 60m x 60m x 50m

olarak modellendi. Modelin üst yüzeyinin sınırlarında, yan yüzeylerinde ve model tabanında deplasman değerleri kontrol edilerek, sınır şartlarından etkilenmeyecek şekilde model boyutları seçildi.

5.3.2 Modelin sonlu elemanlar ağ boyutlarının seçimi

Model geometrisi tanımlanıp zemin tabakaları ve yapısal elemanların malzeme özelliklerinin tanımlanmasından sonra analiz edilecek olan model sonlu elemanlara ayrılmaktadır. Sonlu elemanlar ağı, ilk olarak iki boyutlu sonrasında ise üç boyutlu sonlu elemanlar ağının oluşturulması şeklinde iki aşama ile elde edilmektedir. Yatay yönde ve düşey yönde sonlu elemanlar ağının sıklığı ayrı ayrı tanımlanabilmektedir. Sonlu elemanlar ağ sıklığı; çok kaba, kaba, orta, ince ve çok ince olarak ifade edilen farklı değerler alabilmektedir. İki boyutlu sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra, üç boyutlu sonlu elemanlar ağı otomatik olarak yapılabilmektedir. Ağ sıklığını bölgesel olarak arttırmak da mümkündür. Modelde seçilen sonlu elemanlar ağı, yatay yönde ince, düşey yönde ise çok incedir. Model etrafında bölgesel olarak sonlu elemanlar ağı analizde en doğru sonuca ulaşılması amacı ile sıklaştırıldı. Modelin sonlu elemanlar ağ boyutları Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7 : Modelin sonlu elemanlar ağı iki boyutlu ve üç boyutlu gösterimi.

5.3.3 Başlangıç gerilme durumunun tanımlanması

Geoteknik mühendisliğindeki birçok problemin analizinde zeminin kendi ağırlığından kaynaklanan başlangıç gerilme durumunun tanımlanması gerekmektedir. Zemindeki yatay gerilme değeri σ_h , düşey gerilme değeri σ_v ve zeminin sukunetteki

toprak basıncı katsayısı K_0 kullanılarak zemin içerisinde herhangi bir noktadaki yatay gerilme denklem (5.3) şeklinde hesaplanmaktadır.

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v \quad (5.3)$$

Plaxis 3D Foundation programında, başlangıç gerilme durumu K_0 Procedure ya da Gravity Loading seçeneklerinden uygun olanı seçilerek değerlendirmeye alınmaktadır.

K_0 Procedure; zeminin yükleme tarihçesini dikkate alarak başlangıç gerilme durumunun oluşturulması için kullanılmaktadır. Normal konsolide bir zemin için K_0 katsayısının değeri (5.4) denklemindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad (5.4)$$

Aşırı konsolide bir zeminde K_0 katsayısının (5.4) denklemine göre elde edilen değerden daha büyük olması beklenmektedir. K_0 Procedure ile hesaplanan düşey gerilmeler zeminin kendi ağırlığına eşit olmaktadır. Bu nedenle sistemde tam kuvvetler dengesinin sağlanabilmesi için ancak zemin yüzeyinin tamamen yatay ve zemin tabakalarının zemin yüzeyine paralel olması durumunda K_0 Procedure tanımlaması geçerli olmaktadır (Plaxis, 2005).

Gravity Loading yöntemi ile Mohr-Coulomb gibi elastik-tam plastik bir zemin modeli kullanılırken, yatay efektif gerilmenin düşey efektif gerilmeye oranını ifade eden K_0 katsayısının değeri, kullanılan poisson oranına bağlı olarak hesaplanır. Gravity Loading yönteminde K_0 değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$v = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (5.5)$$

Zemin yüzeyinin yatay olmaması durumunda, Gravity Loading yönteminin kullanılması önerilmektedir (Plaxis, 2005).

Bu çalışmada, zemin tabakaları yatay olarak modellendiğinden, initial phase aşamasında başlangıç gerilme durumu K_0 Procedure olarak tanımlandı.

5.3.4 Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri

Analizler farklı kazık çapı, kazık aralığı ve farklı zemin parametreleri kullanılarak yapıldı. Sistem tek tabakalı zemin üzerinde modellendi. Zemin parametreleri zeminin kum veya kil olması durumuna göre tanımlandı. Zemin Mohr-Coulomb modeli olarak kullanıldı. Başlangıçta zemin elemanına ait olan bölgeye, kazık başlığı ve kazık elemanına ait malzeme özellikleri tanımlanarak kazık ve kazık başlığı modellendi. Kazık, hacim kazık (volume pile) olarak isimlendirilen yapısal eleman kullanılarak modellendi. Analizlerde kullanılan kazık betondur. Tüm analizler için kazık malzeme özellikleri sabittir. Kazık ve zemin arasındaki arayüz elemanı program tarafından tanımlandı. Kazık başlığının kalınlığı, kazık çapı dikkate alınarak hesaplandı. Kazık başlıklarının kalınlıkları, 450mm çapındaki kazıklar için 0.50 m, 650mm çapındaki kazıklar için 0.7m, 800mm çapındaki kazıklar için 0.8m, 1000mm çapındaki kazıklar için 1m ve 1200mm çapındaki kazıklar için 1.2m olarak tanımlandı. Zemin parametreleri ("Spundwand-Handbuch Teil 1, Grundlagen" 1986)'de belirtilen değerlerden alındı. Program kohezyonun sıfır değerini kabul etmediğinden, kumda kohezyon değeri 1 olarak alındı. Analizlerde kullanılan kazık ve zemin parametreleri Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 : Analizlerde kullanılan kazık ve zemin malzeme özellikleri

Malzeme Cinsi	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Elastisite Modülü (kN/m^2)	Poisson Oranı	Kohezyon (kN/m^2)	İçsel Sürtünme Açısı ($^{\circ}$)
Kazık ve Kazık Başlığı	24	3×10^7	0.2	-	-
Yumuşak Kil	17	1750	0.4	10	17.5
Yarı Katı Kil	19	7500	0.3	25	25
Gevşek Kum	18	35000	0.4	1	30
Orta Sıkı Kum	19	75000	0.3	1	32.5

Arayüz azaltma katsayısı R_{inter} , 0.9 olarak tanımlandı.

5.3.5 Hesap aşamaları

Geometri ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra önce iki boyutlu ağ, sonra da iki boyutlu ağın y eksenindeki çalışma düzlemleri boyunca birbirlerine bağlanması ile üç boyutlu sonlu elemanlar ağı oluşturuldu.

Hesap aşaması üç adımda tanımlandı. İlk aşama initial phase'dır. Bu aşama, zeminin kendi ağırlığından dolayı oluşan başlangıç gerilme durumunu göstermektedir. K_0 Procedure olarak tanımlandı. K_0 yönteminde sadece zemin ağırlığı ve varsa boşluk suyu basınçları dikkate alınmaktadır. Başlangıç gerilmeleri oluşturulduktan sonraki hesap adımının başlangıcında bu aşamada oluşan deplasmanlar sıfırlanarak sonraki hesap aşamalarında meydana gelecek olan deplasmanlar üzerinde, initial phase aşamasındaki deplasmanların etkisi kaldırılmış olur. Başlangıç gerilmeleri aynen kalmaktadır. Bu seçenekte kullanılarak initial phase aşamasındaki deplasmanların, analizdeki model deplasmanlarına etkisi kaldırıldı.

İkinci aşama, yapısal elemanların tanımlandığı yapım aşamasıdır. Bu aşamada, kazıklar ve kazık başlığı olacak zemin elemanlarına, yapısal malzeme özellikleri atanarak kazıklar ve kazık başlığı olarak tanımlandı.

Üçüncü aşama ise, yükün aktif hale getirilmesinden oluşmaktadır. İki doğrultuda uygulanan 1000 kN'luk yayılı yük kazık başlığına uygulandı.

Hesap aşamaları tamamlandıktan sonra OUTPUT aşamasından farklı zeminler içerisinde, farklı kazık çapı ve kazık aralıkları ile yatay yük etkisinde kazık grubunu oluşturan her bir kazığın taşıdığı yük ve kazık grubunun yaptığı deplasman değerleri bulundu. Bu değerler değişen zemin özellikleri, kazık çapları ve kazık aralıklarına göre karşılaştırıldı. CURVES programı ile kazık merkezinde seçilen noktalarda yük-deplasman grafikleri çizdirilerek kazık çapının %2'sine eşit deplasmanı yapan değer, maksimum yatay deplasman olarak kabul edilerek bu deplasmanı yaptıracak olan yük, göçme yükü olarak belirlendi. Göçme yükleri, farklı kazık çapları ve kazık aralıkları için elde edildi.

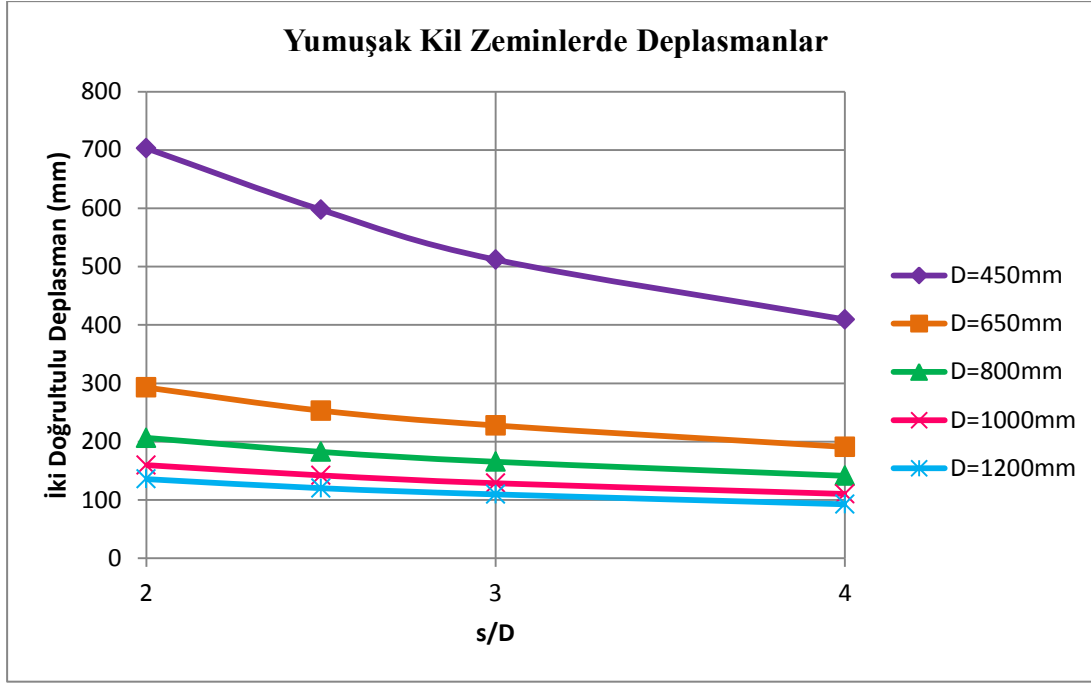
6. ANALİZ SONUÇLARI VE BULGULAR

İki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisindeki kazık grubunda 15m uzunluğundaki kazıkların 450mm, 650mm, 800mm, 1000mm ve 1200mm olarak değişen çaplar kullanılarak 2D, 2.5D, 3D ve 4D kazık aralıkları için gevşek kum, orta sıkı kum, yumuşak kil ve yarı katı kil zemin ortamlarındaki davranışlarını incelemek amacı ile analizler yapıldı. Çapın %2'sine eşit olan yatay deplasman değeri, kazığın yapacağı maksimum yatay deplasman kabul edilerek, yatay yük-deplasman eğrilerinden, bu deplasmanı meydana getiren yükler bulunup göçme yükleri olarak belirlendi. Bu analiz sonuçlarına göre farklı çap ve aralıklardaki kazıkların, farklı zemin ortamlarındaki davranışı yatay yük-deplasman eğrilerinden incelendi. Gruptaki her bir kazığın taşıdığı yük değerleri değişen parametrelere göre değerlendirildi. Analizlerde kullanılan zemin ve kazık parametreleri önceki bölümde gösterilmektedir. Analizlerde göçme yükünün elde edilemediği durumlarda, iki doğrultudaki yatay yükler 5000 kN'a kadar arttırılarak analize devam edildi.

6.1 Kohezyonlu Zeminlerin Analiz Sonuçları

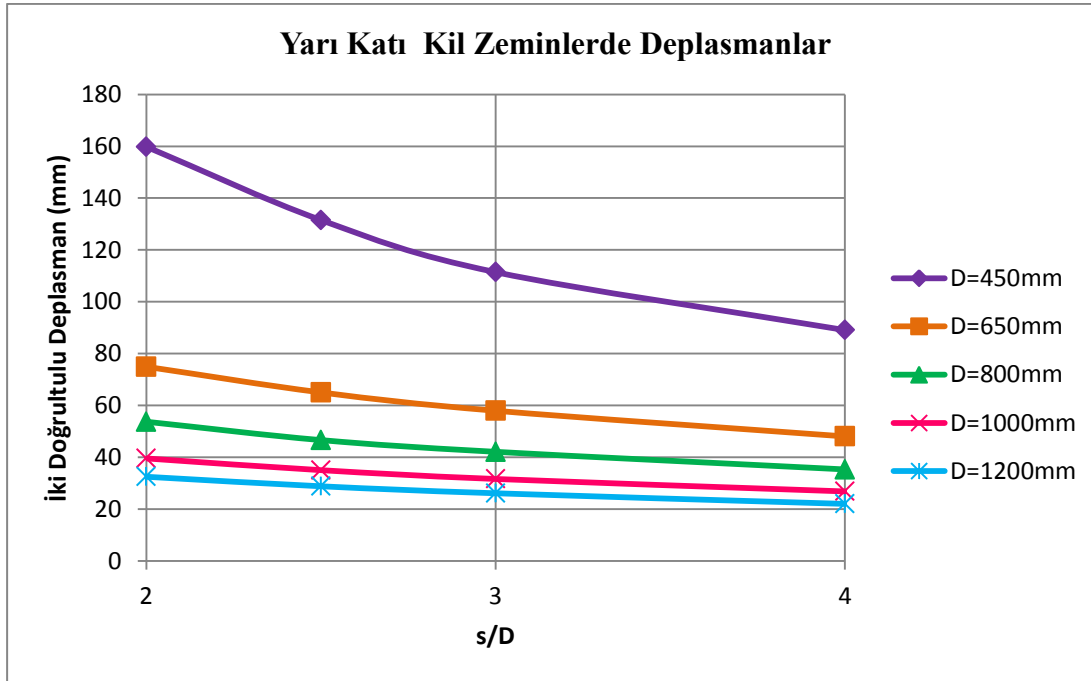
Yumuşak kil ve yarı katı kilden oluşan zemin ortamındaki 15 m uzunluğundaki 2x2 yerleşiminde 4'lü kazık grubunun iki doğrultuda 1000 kN yük etkisindeki davranışı incelendi. Analizde kazık çapları 450 ,650, 800, 1000, 1200 mm ve kazık aralıkları 2D, 2.5D, 3D ve 4D olarak değişen değerlerde analizler yapıldı. Tüm analizlerde kazık başındaki deplasman değerleri alındı. Şekil 6.1'de farklı çaplardaki kazıkların, yumuşak kil zeminlerdeki deplasman-kazık aralığı eğrileri görülmektedir.

Şekil 6.1'de eğrilerden görüldüğü gibi aynı kazık aralığında, kazık çapı arttıkça deplasman değeri azalmaktadır. Aynı kazık çapında kazık aralığı arttıkça da deplasman değerlerinde azalma görülmektedir.



Şekil 6.1 : Yumuşak kil zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıklarında deplasman-kazık aralığı eğrileri.

İki doğrultuda 1000 kN olarak uygulanan yük etkisinde, yarı katı kil zeminlerdeki deplasman-kazık aralığı eğrileri Şekil 6.2’de gösterilmektedir.

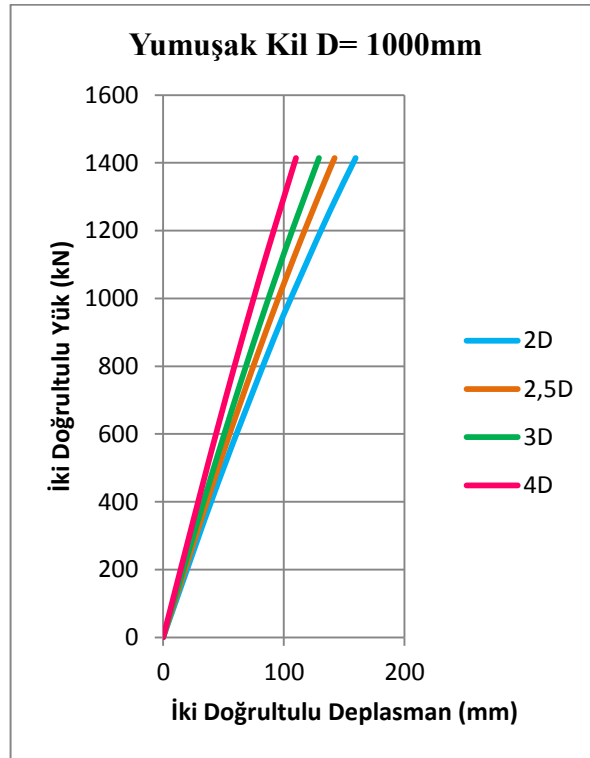


Şekil 6.2 : Yarı katı kil zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıklarında deplasman-kazık aralığı eğrileri.

Şekil 6.2’de görüldüğü gibi, yarı katı killerde de yumuşak killerde olduğu gibi aynı kazık aralığında kazık çapı arttıkça deplasman değeri azalmaktadır. Aynı kazık çapında kazık aralığı arttıkça deplasman değerinde azalma görülmektedir.

İki doğrultuda 1000 kN yük altında yumuşak killerde meydana gelen deplasmanlar, yarı katı killerde meydana gelen deplasmanlardan daha büyük değerlere sahiptir.

1000mm kazık çapında yumuşak kil zemindeki kazık aralıklarının değişimi ile oluşan yük-deplasman eğrileri Şekil 6.3’de gösterilmektedir.

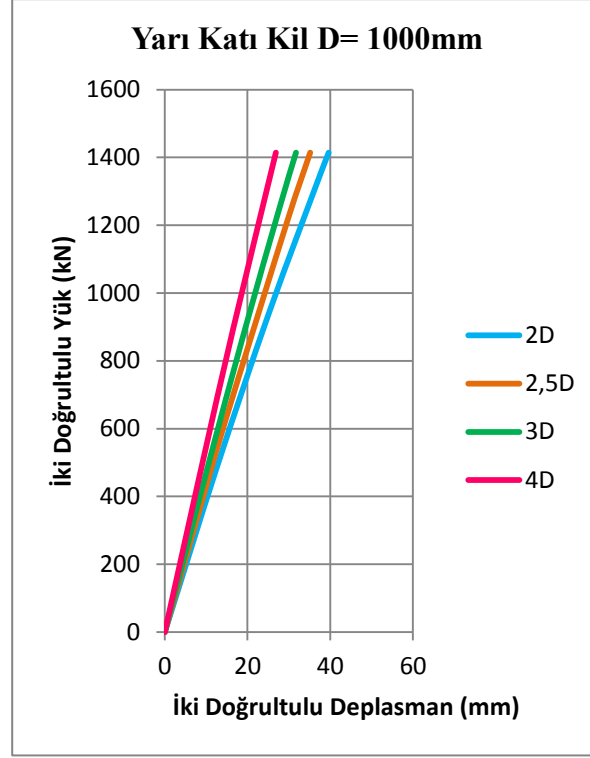


Şekil 6.3 : Yumuşak kil zeminde 1000mm kazık çapındaki kazık aralıkları değişimi ile oluşan yük-deplasman eğrileri.

Şekil 6.3’de görüldüğü gibi aynı çapta kazık aralıkları arttıkça deplasman değeri azalmaktadır. Diğer çaplar 450mm, 650mm, 800mm ve 1200mm için de aynı sonuca ulaşılmaktadır.

1000mm kazık çapında yarı katı kil zemindeki kazık aralıklarının değişimi ile oluşan yük-deplasman eğrileri Şekil 6.4’de gösterilmektedir.

Şekil 6.4’de yarı katı killerde de yumuşak killerde olduğu gibi, aynı çapa sahip kazıklarda, kazık aralıkları arttıkça deplasman değerinin azaldığı görülmektedir. Aynı sonuca 450mm, 650mm, 800mm ve 1200mm kazık çaplarında da ulaşılmaktadır.



Şekil 6.4 : Yarı Katı Kil zeminde 1000mm kazık çapındaki kazık aralıkları değişimi ile oluşan yük-deplasman eğrileri.

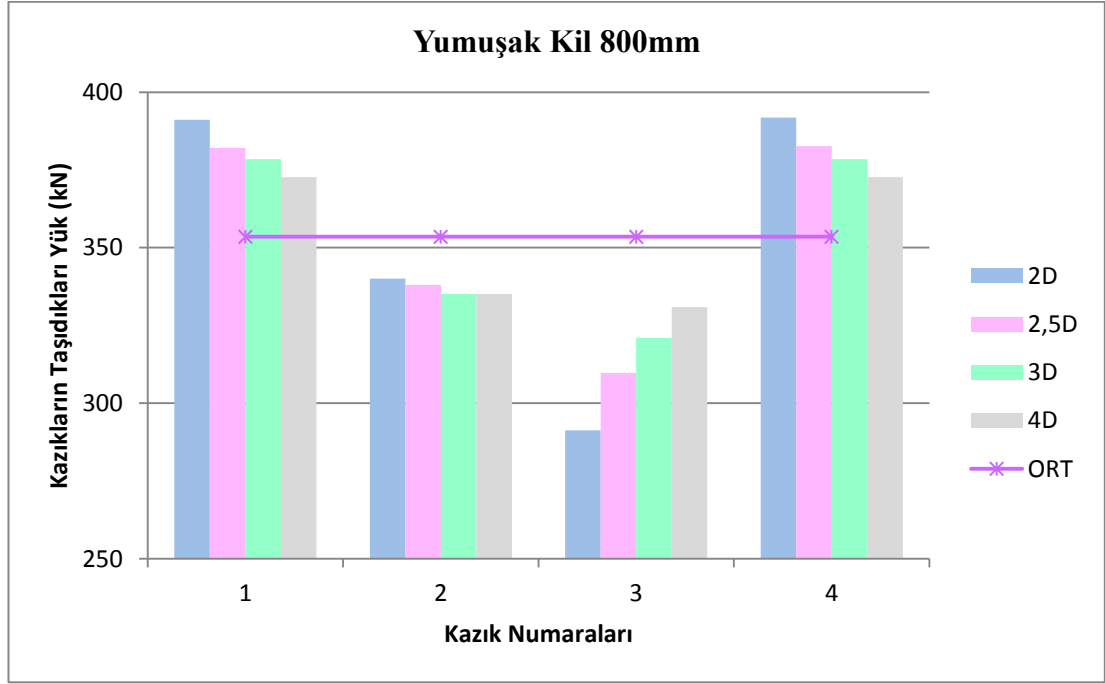
Farklı kazık çapları ve kazık aralıkları ile analiz edilen kohezyonlu zemin koşullarındaki kazık gruplarının iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisinde yaptığı deplasman değerleri Çizelge 6.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1 : Kohezyonlu zeminlerdeki iki doğrultulu deplasmanların tüm kazık çapları ve kazık aralıkları için değerleri

Kazık Aralıkları	İki Doğrultulu Deplasmanlar (mm)									
	450mm		650mm		800mm		1000mm		1200mm	
	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil
2D	703	160	293	75	206	54	160	40	136	33
2,5D	598	132	253	65	182	47	142	35	120	29
3D	512	111	228	58	165	42	129	32	110	26
4D	409	89	191	48	141	35	110	27	93	22

İki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisinde olan kazık grubunda, yüklerin bileşkesi alındığında iki doğrultuda 1414.2 kN yük etki etmektedir. Etki eden toplam yük toplam kazık sayısına bölüldüğünde her bir kazığın taşıyacağı yük değeri 353.5 kN olarak bulunmaktadır. Farklı zemin özellikleri, kazık çapları ve kazık aralıklarında yapılan analizler sonucu bulunan her bir kazığın taşıdığı yük değeri, ortalama her bir kazığın taşıyacağı yük olan 353.5 kN değerine göre oranlanarak değerlendirilmektedir.

Yumuşak kil zeminde iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisinde 800 mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yüklerin farklı kazık aralıklarına göre aldığı değerler Şekil 6.5'te gösterilmektedir.

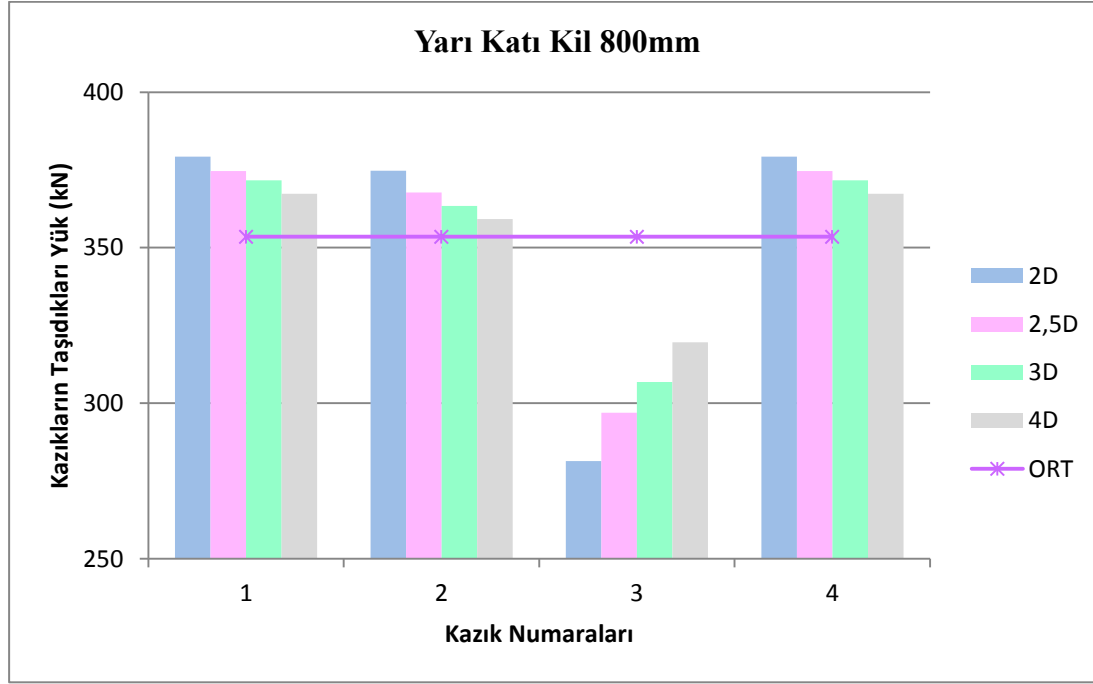


Şekil 6.5 : Yumuşak kil zeminde 800 mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yükün farklı kazık aralıklarına göre gösterimi.

Şekil 6.5'te görüldüğü gibi yumuşak kil zeminde bulunan kazık grubundaki 1 ve 4 numaralı kazıklar ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında, %10.6, 2.5D kazık aralığında, %8.1, 3D kazık aralığında %7.1 ve 4D kazık aralığında %5.4 oranlarında daha fazla yük taşımaktadırlar. 2 numaralı kazıklar ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %3.8, 2.5D kazık aralığında %4.4, 3D kazık aralığında %5.2 ve 4D kazık aralığında %5.2 oranlarında daha az yük taşımaktadırlar. 3 numaralı kazıklar ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %17.6, 2.5D kazık aralığında %12.4, 3D kazık aralığında %9.2 ve 4D kazık aralığında %6.4 oranlarında daha az yük taşımaktadırlar.

Yumuşak kil zeminde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisindeki 800 mm çapındaki kazıkların taşıyacağı yükler, kazık aralığı arttıkça 1 ve 4 numaralı kazıklar için azalmaktadır. 2 numaralı kazıklarda da kazık aralığı arttıkça kazıkların taşıyacağı yük değerleri azalmaktadır. 3 numaralı kazıklarda ise taşıdığı yükler kazık aralığı arttıkça artmaktadır.

Yarı katı kil zeminde iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisinde 800 mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yüklerin farklı kazık aralıklarına göre aldığı değerler Şekil 6.6'da gösterilmektedir.



Şekil 6.6 : Yarı katı kil zeminde 800 mm çapında kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yükün farklı kazık aralıklarına göre gösterimi.

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi yarı katı kil zeminde bulunan kazık grubundaki 1 ve 4 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %7.3, 2.5D kazık aralığında %6, 3D kazık aralığında %5.1 ve 4D kazık aralığında %3.9 oranlarında daha fazla yük taşımaktadırlar. 2 numaralı kazıklar ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %6, 2.5D kazık aralığında %4 ve 3D kazık aralığında %2.8 ve 4D kazık aralığında %1.6 oranlarında daha fazla yük taşımaktadırlar. 3 numaralı kazıklar ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %20.4, 2.5D kazık aralığında %16, 3D kazık aralığında %13.2 ve 4D kazık aralığında %9.6 oranlarında daha az yük taşımaktadırlar.

Yarı katı kil zeminde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisindeki 800 mm çapındaki kazıkların taşıyacağı yükler, kazık aralığı arttıkça 1 ve 4 numaralı kazıkların taşıdıkları yükler azalmaktadır. 2 numaralı kazıkların taşıdığı yükler de kazık aralıkları arttıkça azalmaktadır. 3 numaralı kazıklarda ise kazık aralığı arttıkça taşıdıkları yükler artmaktadır.

Diğer kazık çapları için yapılan analizlerin grafikleri eklerde gösterilmektedir.

İki doğrultulu yatay yük etkisindeki kazık grubunun göçme yüklerini belirlemek amacı ile yükler 5000 kN'a kadar artırılarak analizler yapıldı. Kazık çapının %2'sine eşit olan değer, kazıkların maksimum yapacakları yatay deplasman değeri olarak alınarak, bu deplasman değerini yaptıracak yük göçme yükü olarak belirlendi. Yapılan analizler sonucunda yatay yük-deplasman eğrileri çizdirilerek göçme yükleri hesaplandı.

Yumuşak ve yarı katı kil zeminlerde farklı kazık çaplarındaki göçme yük değerleri Çizelge 6.2'de gösterilmektedir.

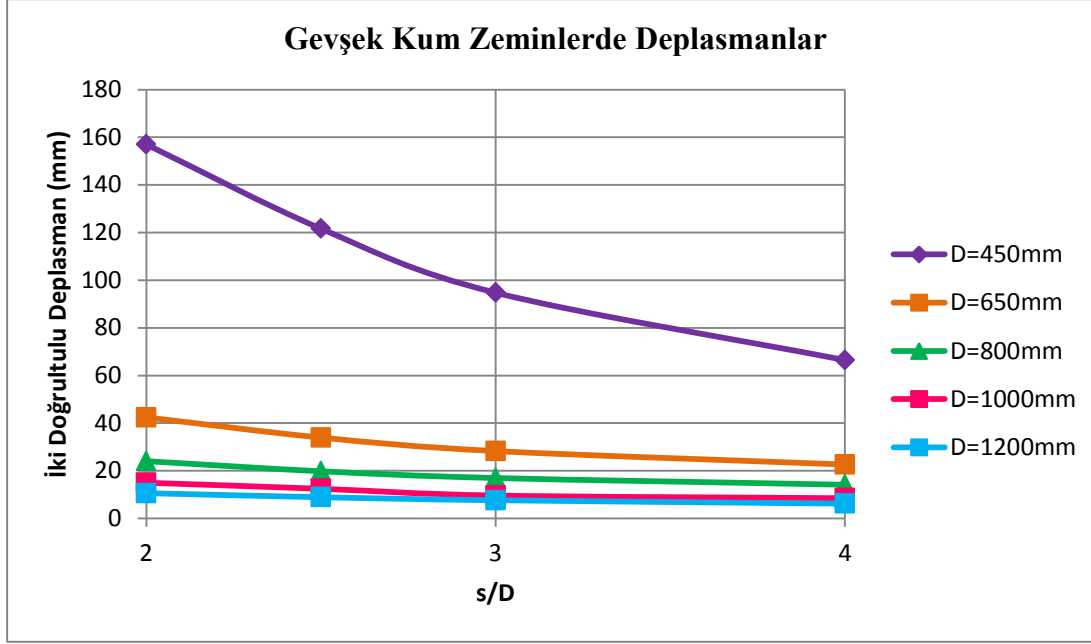
Çizelge 6.2 : Kohezyonlu zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıkları için belirlenen göçme yükleri.

Kazık Aralıkları	Göçme Yükleri (kN)									
	D= 450 mm		D= 650 mm		D= 800 mm		D= 1000 mm		D= 1200 mm	
	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil	Yumuşak Kil	Yarı Katı Kil
2D	43	140	92	309	138	480	198	748	269	1059
2.5D	47	156	100	343	149	532	220	829	298	1179
3D	50	173	107	374	160	603	239	914	325	1287
4D	57	199	122	438	183	675	276	1064	379	1524

Çizelge 6.2'de gösterilen yüklere göre yumuşak kil zeminlerde, yarı katı kil zeminlere göre daha düşük göçme yüklerine ulaşılmaktadır. Yumuşak ve yarı katı kil zeminlerde kazık çapı ve kazık aralığı arttıkça daha büyük göçme yükleri elde edilmektedir. Dolayısı ile kazık çapının ve kazık aralığının artırılması kazık grubunun daha büyük yatay yükler taşıyabilmesi için gereklidir. Zemin rijitliği arttıkça göçme yükü de artmaktadır.

6.2 Kohezyonsuz Zeminlerin Analiz Sonuçları

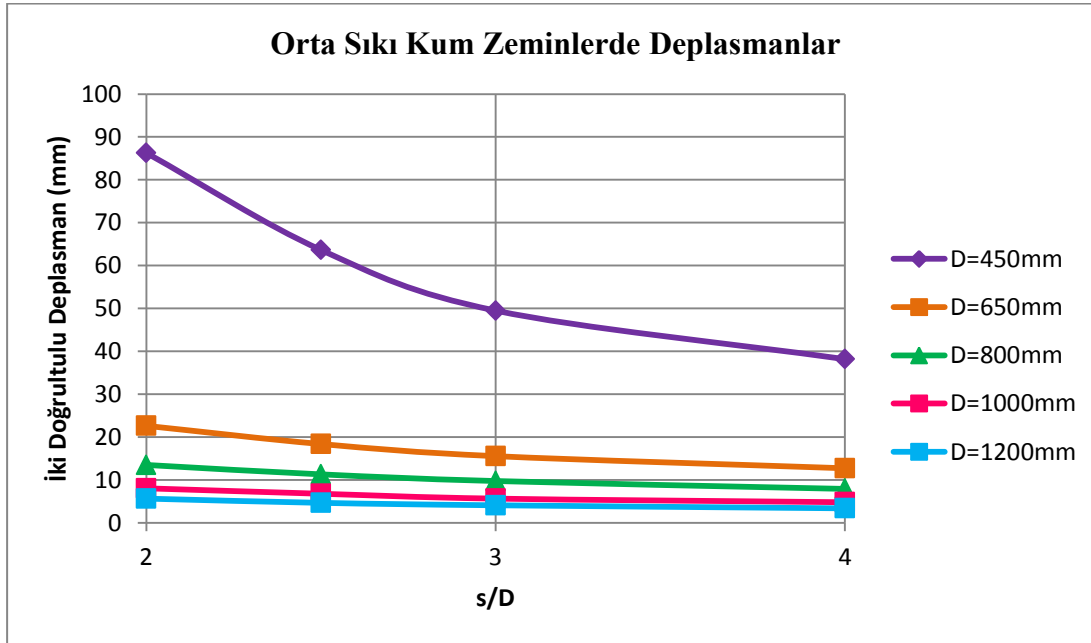
Gevşek kum ve orta sıkı kumdan oluşan zemin ortamındaki 15 m uzunluğundaki 2x2 yerleşiminde 4'lü kazık grubunun, iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisindeki davranışı incelendi. Analizde kazık çapları 450 ,650, 800, 1000, 1200 mm ve kazık aralıkları 2D, 2.5D, 3D ve 4D aralıklarında değişen değerlerde analizler yapıldı. Tüm analizlerde kazık başındaki deplasman değerleri alındı.



Şekil 6.7 : Gevşek kum zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıklarında deplasman-kazık aralığı eğrileri.

Şekil 6.7’de gösterildiği gibi gevşek kum zeminlerde kazık aralığı arttıkça deplasman değeri azalmaktadır. Aynı şekilde kazık çapı arttıkça da aynı kazık aralığında deplasman değerleri azalış göstermektedir.

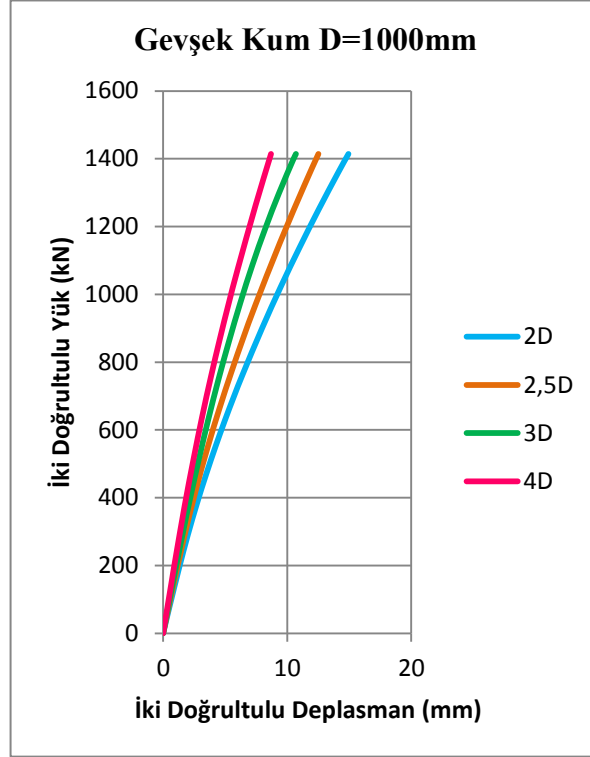
Orta sıkı kum zeminlerde, farklı çaplardaki kazıkların deplasman-kazık aralığı eğrileri Şekil 6.8’de gösterilmektedir.



Şekil 6.8 : Orta sıkı kum zeminlerde, farklı kazık çapları ve aralıklarında deplasman-kazık aralığı eğrileri.

Şekil 6.8’de gösterilen eğriler ile, orta sıkı kumlarda kazık aralığı arttıkça deplasman değerinin azaldığı görülmektedir. Aynı kazık aralığında kazık çapı arttıkça da deplasman değeri azalmaktadır.

Gevşek kum zeminde 1000mm kazık çapında, iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisinde farklı kazık aralıklarında meydana gelen yük-deplasman eğrileri Şekil 6.9’da gösterilmektedir.

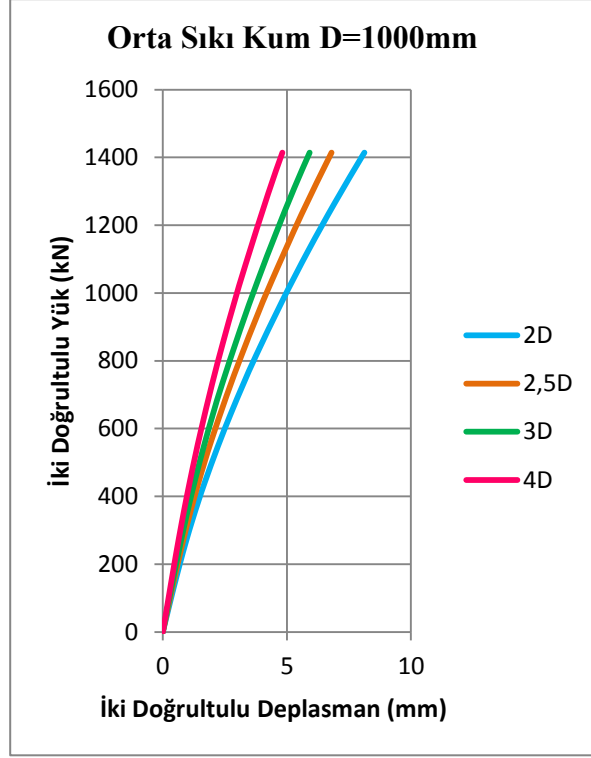


Şekil 6.9 : Gevşek kum zeminde 1000mm kazık çapında farklı kazık aralıklarında meydana gelen yük-deplasman eğrileri.

Şekil 6.9’da görülen eğrilerden, gevşek kum zeminlerde kazık aralıkları arttıkça aynı kazık çapında deplasmanların azaldığı görülmektedir.

Orta sıkı kum zeminde 1000mm kazık çapında, iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisinde farklı kazık aralıklarında meydana gelen yük-deplasman eğrileri Şekil 6.10’da gösterilmektedir.

Farklı kazık çapları ve kazık aralıkları ile analiz edilen kohezyonsuz zemin koşullarındaki kazık gruplarının iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisinde yaptığı deplasman değerleri Çizelge 6.3’de gösterilmektedir.



Şekil 6.10 : Orta sıkı kum zeminde 1000mm kazık çapında farklı kazık aralıklarında meydana gelen yük-deplasman eğrileri.

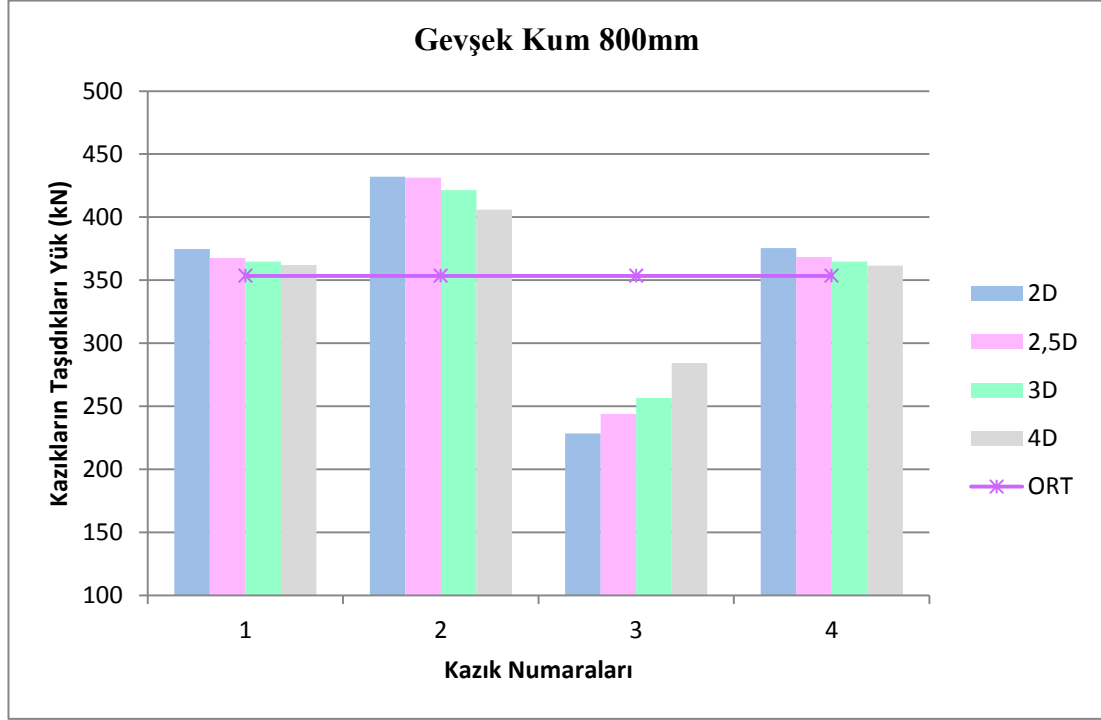
Çizelge 6.3 : Kohezyonsuz zeminlerdeki iki doğrultulu deplasmanların tüm kazık çapları ve aralıkları için değerleri.

Kazık Aralıkları	İki Doğrultulu Deplasmanlar (mm)									
	450mm		650mm		800mm		1000mm		1200mm	
	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum
2D	157	86	42	23	24	14	15	8	11	6
2,5D	122	64	34	18	20	11	12	7	9	5
3D	95	49	28	16	17	10	10	6	8	4
4D	66	38	23	13	14	8	8	5	6	3

Gevşek kum zeminde iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisinde 800 mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yüklerin farklı kazık aralıklarına göre aldığı değerler Şekil 6.11’de gösterilmektedir.

Şekil 6.11’de görüldüğü gibi gevşek kum zeminde bulunan kazık grubundaki 1 ve 4 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %6, 2.5D kazık aralığında %4, 3D kazık aralığında %3.2 ve 4D kazık aralığında %2.4 oranında daha fazla yük taşımaktadırlar. 2 numaralı kazıklar ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %22.2, 2.5D kazık aralığında %22, 3D kazık aralığında %19.2 ve 4D kazık aralığında %14.8 oranlarında daha fazla yük taşımaktadırlar. 3 numaralı kazıklar ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %35.4, 2.5D kazık

aralığında %31, 3D kazık aralığında %27.4 ve 4D kazık aralığında %19.6 oranlarında daha az yük taşımaktadırlar.



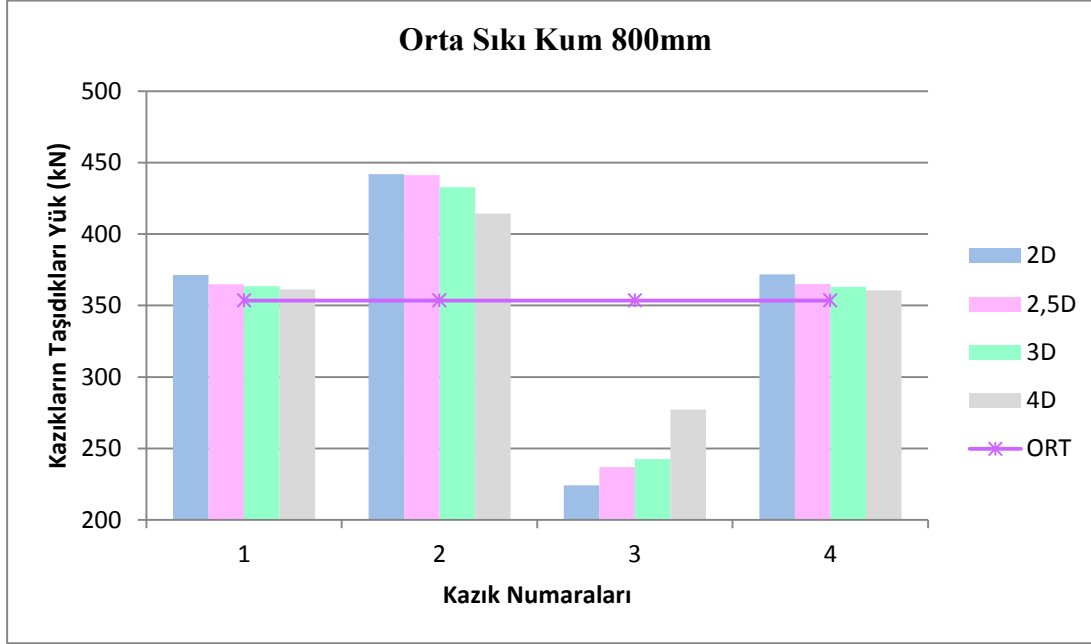
Şekil 6.11 : Gevşek kum zeminde 800mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yüklerin farklı kazık aralıklarına göre gösterimi.

Gevşek kum zeminde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisindeki 800 mm çapındaki kazıklar için kazık aralığı arttıkça 1 ve 4 numaralı kazıkların taşıdıkları yükler azalmaktadır. 2 numaralı kazıkların taşıdıkları yükler de kazık aralığı arttıkça azalma göstermektedir. 3 numaralı kazıklar için ise kazık aralığı arttıkça kazıkların taşıdıkları yükler artmaktadır.

Orta sıkı kum zeminde iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisinde 800 mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yüklerin farklı kazık aralıklarına göre aldığı değerler Şekil 6.12’de gösterilmektedir.

Şekil 6.12’de görüldüğü gibi orta sıkı kum zeminde bulunan kazık grubundaki 1 ve 4 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %5, 2.5D kazık aralığında %3,2, 3D kazık aralığında %2.8 ve 4D kazık aralığında %2.2 oranlarında daha fazla yük taşımaktadırlar. 2 numaralı kazıklar ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %25, 2.5D kazık aralığında %24.8, 3D kazık aralığında %22.4 ve 4D kazık aralığında %17.2 oranlarında daha fazla yük taşımaktadırlar. 3 numaralı kazıklar ortalama taşıyacakları yükten, 2D kazık aralığında %36.6, 2.5D kazık

aralığında %33, 3D kazık aralığında %31.4 ve 4D kazık aralığında %21.6 oranlarında daha az yük taşımaktadırlar.



Şekil 6.12 : Orta sıkı kum zeminde 800mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yüklerin farklı kazık aralıklarına göre gösterimi.

Orta sıkı kum zeminde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisindeki 800 mm çapındaki kazıkların taşıyacağı yükler, kazık aralığı arttıkça 1 ve 4 numaralı kazıkların taşıdıkları yükler azalmaktadır. 2 numaralı kazıkların taşıdıkları yükler de kazık aralığı arttıkça azalma göstermektedir. 3 numaralı kazıklar için ise kazık aralığı arttıkça kazıkların taşıdıkları yükler artmaktadır.

Diğer kazık çapları için yapılan analizlerin grafikleri eklerde gösterilmektedir.

İki doğrultulu yatay yük etkisindeki kazık grubunun göçme yüklerini belirlemek amacı ile yükler 5000 kN'a kadar artırılarak analizler yapıldı. Kazık çapının %2'sine eşit olan değer, kazığın maksimum yapacağı yatay deplasman değeri olarak alınarak, bu deplasman değerini yaptıracak yük göçme yükü olarak belirlendi. Yapılan analizler sonucunda yatay yük-deplasman eğrileri çizdirilerek maksimum taşınabilecek yatay yük değerleri hesaplandı.

Gevşek ve orta sıkı kum zeminlerde farklı kazık çaplarındaki göçme yük değerleri Çizelge 6.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.4 : Kohezyonsuz zeminlerde farklı kazık çapları ve aralıkları için belirlenen göçme yükleri.

Kazık Aralıkları	Göçme Yükleri (kN)									
	D= 450 mm		D= 650 mm		D= 800 mm		D= 1000 mm		D= 1200 mm	
	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum
2D	296	438	691	990	1079	1585	1728	2629	2521	3821
2.5D	336	480	764	1127	1211	1800	1960	2906	2866	4310
3D	385	532	846	1239	1340	1942	2214	3196	3166	4715
4D	437	622	989	1414	1552	2260	2580	3705	3727	5545

Çizelge 6.4’de gösterilen yüklere göre gevşek kum zeminlerde orta sıkı kum zeminlere göre daha düşük göçme yükü değerlerine ulaşılmaktadır. Gevşek ve orta sıkı kum zeminler için kazık çapı ve kazık aralığı arttıkça göçme yükü de artmaktadır. Dolayısı ile kazık çapının ve kazık aralığının artırılması kazık grubunun daha büyük yatay yükler taşıyabilmesi için gereklidir. Zemin rijitliği arttıkça göçme yükü de artmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yatay yükler etkisindeki kazıkların davranışları ve yatay yüklü kazıkların analiz yöntemleri anlatılmaktadır. İki doğrultuda yatay yüklü kazık grubunun, farklı kazık çapları, kazık aralıkları ve zemin özelliklerindeki davranışları Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı ile analiz edilmektedir.

Yatay yüklü kazıkların analizinde kullanılabilecek olan yöntemlerden bazıları olan Brinch-Hansen metodu, Broms metodu, p-y eğrileri, yatak katsayısı yöntemi, elastik teori ve karakteristik yük yöntemi tezin literatür kısmında anlatılmaktadır.

Günümüzde kazıklı temeller çok yaygın olarak zemin problemlerinde kullanılmaktadırlar. Kazıklı temellerin güvenli ve ekonomik olarak optimum kriterlerde tasarlanması gerekmektedir. Bu optimum kriterlerin sağlanması amacıyla birçok sayısal modelleme ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında da, yatay yüklü kazıkların analizinde kullanılan sayısal modelleme yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Bilgisayar ortamında gerçeğe uygun bir şekilde modellenen problemin analizi, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan sonlu elemanlar programları ile çözülebilmektedir.

Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde üç boyutlu model oluşturularak Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı ile analizler yapıldı. Analizlerde yumuşak kil, yarı katı kil, gevşek kum ve orta sıkı kum olmak üzere dört farklı zemin türü kullanıldı. Kazık çapları, 450 mm, 650 mm, 800 mm, 1000 mm ve 1200 mm olmak üzere 5 farklı çap kullanıldı. Kazık aralıkları da 2D, 2.5D, 3D ve 4D şeklinde değiştirilerek analizler yapıldı.

Analizlerde farklı kazık çapları, kazık aralıkları ve zemin özellikleri kullanılarak, iki doğrultuda yatay yük etkisindeki kazık gruplarında oluşan deplasmanlar ve her bir kazığın taşıdığı yük değerlerindeki değişimler analiz edildi. Kazık çapının %2'sine eşit olan değer, kazığın yapacağı maksimum yatay deplasman değeri olarak sınırlandırılarak, bu deplasman değerini meydana getirecek yük, kazık grubunun

taşıyacağı maksimum yatay yük olarak bulundu. Kazıkların taşıyacağı maksimum yatay yükler, farklı kazık çapları, kazık aralıkları ve zemin özellikleri ile yapılan analizler sonucu elde edilen yük-deplasman eğrilerinden elde edildi.

Analiz sonuçlarına göre iki doğrultulu yatay yük etkisinde oluşan deplasmanlar değerlendirildiğinde, en çok deplasman yumuşak kil zeminlerde meydana gelmektedir. 450 mm kazık çapında en büyük deplasmanlar görülmektedir. Aynı kazık çapında kazık aralığı arttıkça deplasman değerleri azalmaktadır. Aynı kazık aralığında da, kazık çapı arttıkça deplasman değeri azalmaktadır. Kohezyonlu zeminlerde, yumuşak kilde meydana gelen deplasmanlar yarı katı kil zeminlerde meydana gelen deplasmanlara göre daha fazladır. Kohezyonsuz zeminlerde ise gevşek kumda meydana gelen deplasmanlar orta sıkı kumda meydana gelen deplasmanlara göre daha yüksek değerlerdedir. Zemin rijitliği arttıkça kazığın yaptığı deplasman değerleri azalmaktadır. Aynı şekilde, kazıklar arası mesafe arttıkça da kazıkların yaptıkları deplasman değerleri azalmaktadır. Bu kazık-zemin-kazık etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Kazıklar arası mesafe arttıkça bu etkileşim azalmakta ve deplasmanlar düşmektedir. Buna karşılık, kazıklar arası mesafe azaldıkça kazıkların birbirlerine olan etkileri, kazık-zemin-kazık etkileşimi, artmakta dolayısı ile kazıkların yaptığı deplasmanlarda artış görülmektedir.

Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde, 450 mm, 650 mm, 800 mm, 1000 mm ve 1200 mm çapındaki kazıklardan oluşan kazık grupları için farklı kazık aralıkları ile yapılan analizler sonucunda, kazık grubundaki her bir kazığın taşıdığı yük değerleri bulundu. Her bir kazığın taşıdığı yük değeri, kazıkların ortalama taşıyacakları yük değerine göre oranlanarak değerlendirildi.

Değerlendirme sonuçlarına göre, yumuşak kil zeminlerde, 450 mm , 650 mm, 800 mm, 1000 mm ve 1200 mm kazık çaplarından oluşan kazık gruplarındaki 1 ve 4 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre %4.7 ile %14.1 arasında değişen oranlarda daha büyük yük taşımaktadırlar. 2 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre -%13.2 ile %14.2 arasında değişen oranlarda yük taşımaktadırlar. 650 mm kazık çapında 3D kazık aralığından sonra kazık çapları arttıkça 2 numaralı kazıklar, ortalama taşınan kazık yüküne oranla daha az yük taşıdıkları görülmektedir. 3 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre -%34.4 ile -%4 arasında değişen oranlarda daha az yük taşımaktadırlar.

Yumuşak killer için Spundwand-Handbuch Teil 1'de belirtilen yumuşak kil ve yarı katı kil zemin özelliklerinin ortalamaları alınarak ve yumuşak kil zemin özelliklerinin üst sınır değerleri kullanılarak analizler tekrarlandı. Bu analizlerin grafikleri eklerde gösterilmektedir. Analizler sonucunda kazık grubunu oluşturan her bir kazığın taşıdığı yüklerin ilk yapılan analizlere benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

Yarı katı kil zeminlerde, 450 mm , 650 mm, 800 mm, 1000 mm ve 1200 mm kazık çaplarından oluşan kazık gruplarındaki 1 ve 4 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre %2.8 ile %10.2 arasında değişen oranlarda daha büyük yük taşımaktadırlar. 2 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre -%6 ile -%13.4 arasında değişen oranlarda daha az yük taşımaktadırlar. 3 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre -%25.8 ile -%9.2 arasında değişen oranlarda daha az yük taşımaktadırlar.

Gevşek kum zeminlerde, 450 mm , 650 mm, 800 mm, 1000 mm ve 1200 mm kazık çaplarından oluşan kazık gruplarındaki 1 ve 4 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre %2.1 ile %13.2 arasında değişen oranlarda daha fazla yük taşımaktadırlar. 2 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre %6.6 ile %38.6 arasında değişen oranlarda daha fazla yük taşımaktadırlar. 3 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre -%60.6 ile -%13.2 arasında değişen oranlarda daha az yük taşımaktadırlar.

Orta sıkı kum zeminlerde, 450 mm , 650 mm, 800 mm, 1000 mm ve 1200 mm kazık çaplarından oluşan kazık gruplarındaki 1 ve 4 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre %1.5 ile %11.4 arasında değişen oranlarda daha fazla yük taşımaktadırlar. 2 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre %12.8 ile %40 arasında değişen oranlarda daha fazla yük taşımaktadırlar. 3 numaralı kazıklar, ortalama taşıyacakları yükten kazık aralıklarına göre -%59.2 ile -%15.6 arasında değişen oranlarda daha az yük taşımaktadırlar.

Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerdeki tüm kazık çapları için yapılan analizler sonucunda, 1 ve 4 numaralı kazıkların taşıdıkları yük oranları, kazık aralıkları arttıkça azalmaktadır. Bu kazıklarda meydana gelen yük kayıpları, farklı kazık

çapları ve kazık aralıklarına göre 2 ve/veya 3 numaralı kazıklar tarafından taşınmaktadır. 3 numaralı kazıkların, analiz edilen tüm kazık çaplarında ve zemin özelliklerinde, ortalama taşıyacakları yükten daha az yük taşıdıkları görülmektedir. Kazık çaplarının artması ile 2 numaralı kazıkların taşıdıkları yüklerde azalma görülürken, 3 numaralı kazıkların taşıdıkları yüklerde artış görülmektedir.

Kazık grubunu oluşturan her bir kazığın taşıdıkları yüklerin, kazıkların grup içerisindeki yerleşimlerine ve kazıklar arasındaki mesafelere bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

Kazık çapının %2'sine eşit olan değer kazığın maksimum yapacağı yatay deplasman olarak alınarak, bu deplasmanı oluşturacak yatay yük, kazığın maksimum taşıyacağı yatay yük olarak belirlendi. Yapılan analizlerden elde edilen yük-deplasman eğrileri sonucu, kazığın taşıyacağı maksimum yatay yük değerinin kazık aralığının artması ile arttığı görülmektedir. Aynı zemin özelliklerinde, kazık çapının artması kazığın taşıyacağı maksimum yatay yük değerini arttırmaktadır. Aynı kazık çapı için, yumuşak kil zeminlerde yarı katı kil zeminlere göre daha düşük maksimum taşınabilecek yatay yük değerlerine ulaşılmaktadır. Gevşek kum zeminlerde de orta sıkı kum zeminlere göre daha düşük maksimum taşınabilecek yatay yük değerleri görülmektedir. Kazık çapının ve kazık aralığının artırılması kazık grubunun daha büyük yatay yükler taşıyabilmesi için gereklidir. Zemin sıklığının artması kazık grubunun taşıyacağı maksimum yatay yükü arttırmaktadır. Kazık grubunun maksimum yatay yük taşıma kapasitesi, kazık çapına, zemin özelliklerine ve kazık aralıklarına bağlıdır.

Bu çalışma Plaxis 2D ile analiz edilirse, modeller oluşturulurken dikkat edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Akbay, Z.** (2009). *Yatay Yüklü Grup Kazıkların Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Aköz, Y., Sağlamer, A. ve Öntuna, K. A.** (1981). *A New Approach to the Analysis of Laterally Loaded Piles*. Soil Mechanics and Foundation Engineering Tenth International Conference, (Sf. Rotterdam.
- Alizadeh, M.** (1968). Lateral Load Tests on Piles Instrumented Timber Piles. *Performance of Deep Foundations*, Sf. 379-394.
- Ashour, M. ve Norris, G.** (2000). Modeling Lateral Soil-Pile Response Based on Soil-Pile Interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), Sf. 420-428. doi: doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(420)
- Bhushan, K., Halley, S. C. ve Fong, P. T.** (1979). Lateral Load Tests on DrillednPiers in Sand. *Preprint of the Annual ASCE meeting St. Louis*, Sf. 26-30.
- Birand, A. A.** (2007). *Kazıklı Temeller* (2. Basım.), Teknik Yayınevi, Ankara.
- Bogart, D. ve Matlock, H.** (1983). Procedures for Analysis of Laterally Loaded Pile Group in Soft Clay. *Proc.Conf. on Geotech. Practice in Offshore Engrg.*, Sf. 499-535.
- Broms, B.** (1964a). The Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils. *J.Soil.Mech.Found.Div.*, 90, Sf. 27-63.
- Broms, B.** (1964b). The Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils. *J.Soil.Mech.Found.Div.*, 90, Sf. 123-156.
- Brown, D. A., Morrison, C. ve Reese, L. C.** (1988). Lateral Load Behaviour of Pile Group in Sand. *J.Geotech.Engrg.*, 114(11), Sf. 1261-1276.
- Coduto, D. P.** (1994). *Foundation Design Principles and Practices*, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- Das, B. M.** (1990). *Principles of Foundation Engineering*, PWS-Kent Series in Engineering, Boston.
- Davisson, M. T.** (1960). Behavior of Flexible Vertical Piles Subjected to Moment, Shear, and Axial Load, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Davisson, M. T.** (1963). Estimating Buckling Loads for Piles. *Proceedings of the Secant Pan American Conference on Sil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, Sf. 351-369.
- Davisson, M. T.** (1970). Lateral Load Capacity of Piles. *Highway Research Record Washington, D.C.*, Sf. 104-112.
- Davisson, M. T. ve Gill, H. L.** (1963). Laterally Loaded Piles in a Layered Soil System. *J.Soil.Mech.Found.Div.*, 89, Sf. 63-94.
- Davisson, M. T. ve Prakash, S.** (1963). A Rewiew of Soil-Pile Behaviour. *High Res. Rec.*(39), Sf. 25-48.
- Duncan, J., Evans, L. ve Ooi, P.** (1994). Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(6), Sf. 1018-1033. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:6(1018)

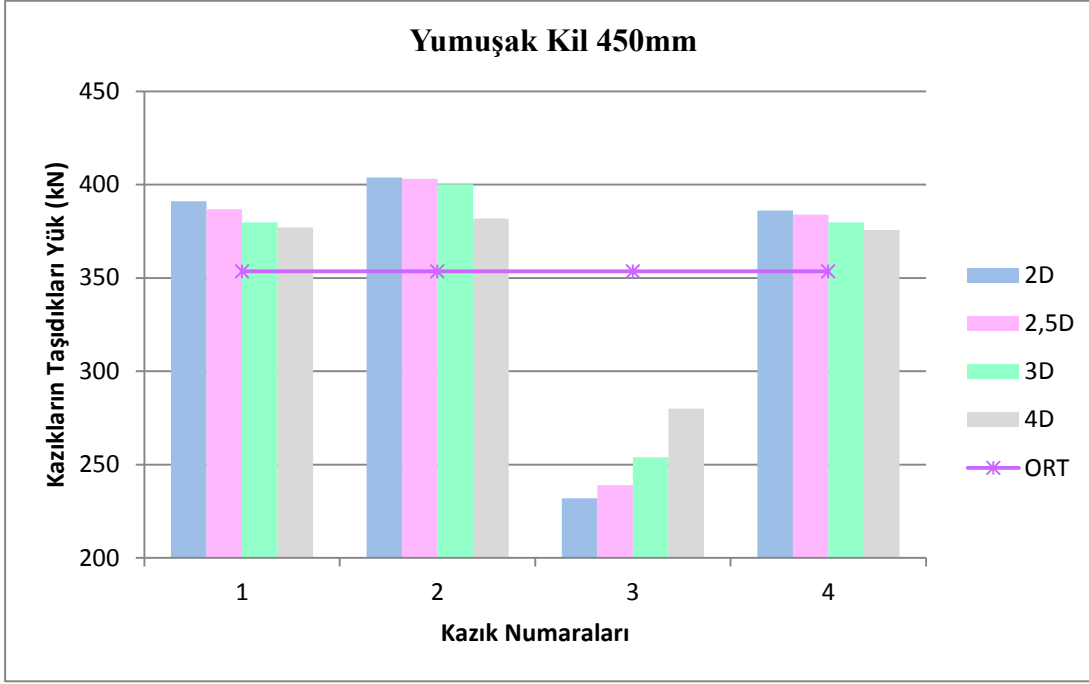
- Dunnivant, T. ve O'Neill, M.** (1989). Experimental Model for Submerged, Stiff Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), Sf. 95-114. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(95)
- Fleming, W. G. K. ve Elson, K.** (2009). Piling Engineering, Taylor & Francis Group.
- Focht, J. A. ve Koch, K. J.** (1973). *Rational Analysis of the Lateral Performance of Offshore Pile Groups*. Fifth Annual Offshore Technology Conference, (Sf. 701-708). Houston, Texas.
- Hansen, J. B.** (1961). The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces, Geoteknisk Institut.
- Ishii, Y., Hayashi, S. ve Koichi Kubo.** (1960). Review on the Current Procedures and Research Activities on the Aseismic Design of Quaywalls in Japan. *Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structures and Foundations in Japan*, Sf. 39-56.
- Johnson, K., Lemcke, P., Karunasena, W. ve Sivakugan, N.** (2006). Modelling the Load-Deformation Response of Deep Foundations Under Oblique Loading. *Environmental Modelling and Software*, 21, Sf. 1375-1380.
- Karthigeyan, S., Ramakrishna, V. V. G. S. T. ve Rajagopal, K.** (2006). Influence of Vertical Load on the Lateral Response of Piles in Sand. *Computers and Geotechnics*, 33, Sf. 121-131.
- Karthigeyan, S., Ramakrishna, V. V. G. S. T. ve Rajagopal, K.** (2007). Numerical Investigation of the Effect of Vertical Load on the Lateral Response of Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (5), Sf. 512-521.
- Keleşoğlu, M. K.** (1999). *Yatay Yüklü Kazıkların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile 3 Boyutlu Nonlineer Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kın, A. S.** (1995). *Yatay Yükler Etkisindeki Büyük Çaplı Kazıkların Davranışlarının Belirlenmesi*. (Doktora Tezi), İ.T.Ü.
- Matlock, H.** (1970). *Correlations For Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay*. Proceedings of the Offshore Technology Conference, (Sf. 544-593). Houston, Texas.
- Matlock, H. ve Reese, L. C.** (1961). *Foundation Analysis of Offshore Pile Supported Structures*. Proceedings Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, (Sf. 91-97). Paris.
- Matlock, H. ve Reese, L. C.** (1962). Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 127(1), Sf. 1220-1247.
- McNulty, J. F.** (1956). Thrust Loading on Piles. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, SCE(SM2)*, Sf. 1-25.
- Mohan, D.** (1988). Pile foundations, Oxford & IBH Publishing Company.
- Ooi, P. S. K. ve Duncan, J. M.** (1994). Lateral Load Analysis of Groups of Piles and Drilled Shafts. *J.Geotech.Engr.Div.ASCE*, 120(6), Sf. 1034-1050.
- Oteo, C. S.** (1972). *Displacement of a Vertical Pile Group Subjected to Lateral Loads*. Proc. 5th, EC.S.M.F.E, (Sf. 397-405). Madrid.
- Özen, M.** (2004). *Yatay Yüklü Tek Kazığın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Nonlineer Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özkan, M. T. ve Sağlamer, A.** (1995). Kazıklı Temeller. *Dünya İnşaat*, 131(7), Sf. 35-38.

- Palmer, L. A. ve Thompson, J. B.** (1948). The Earth Pressure and Deflection Along the Embedded Lengths of Piles Subjected to Lateral Thrusts. *Proc. 2nd Int. Conf. S. M. and F. E., Rotterdam, 5*, Sf. 156-161.
- Plaxis.** (2005). Plaxis 3D Foundation Reference Manual.
- Poulos, H. G.** (1971a). Behaviour of Laterally Loaded Piles: I-Single Piles. *J.Soil.Mech.Found.Div., 97*, Sf. 711-731.
- Poulos, H. G.** (1971b). Behaviour of Laterally Loaded Piles: II-Pile Groups. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 97*, Sf. 733-751.
- Poulos, H. G. ve Davis, E. H.** (1980). Pile Foundation Analysis and Design, Wiley, New York.
- Prakash, S.** (1962). *Behavior of Pile Groups Subjected to Lateral Loads.* (Doktora Tezi), University of Illinois, Urbana.
- Prakash, S. ve Saran, D.** (1967). *Behaviour of Laterally Loaded Piles in Cohesive Soils.* Proc. 3rd Asian Reg.Conf. on SMFE, (Sf. 235-238). Haifa,Israel.
- Prakash, S. ve Sharma, H. D.** (1990). Pile Foundations in Engineering Practice, Wiley.
- Reese, L. C., Cox, W. R. ve Koop, F. D.** (1974). Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand. *Proceeding of the 6th Off-Shore Technology*, Sf. 2080.
- Reese, L. C., Cox, W. R. ve Koop, F. D.** (1975). *Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay.* Proc. 7th Offshore Technol. Conf., (Sf. 671-690). Dallas, Tex.
- Reese, L. C. ve Matlock, H.** (1956). *Non-Dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth.* Proceedings 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, (Sf. 1-41). Austin,TX.
- Reese, L. C. ve Van Impe, W. F.** (2001). Single piles and pile groups under lateral loading, A. A. Balkema.
- Reese, L. C. ve Welch, R. C.** (1975). Lateral Loading of Deep Foundations In Stiff Clay. *Journal of Geotechnical Engineering, 101*, Sf. 633-649.
- Sağlam, A.** (1977). *Açık Deniz Yapılarındaki Kazıkların Davranışı.* (Doktora Tezi), İ.T.Ü.
- Sağlam, A. ve Dinçer, E.** (1987). *Model Kazıklarda Yapılan Yatay Yükleme Deneyleri.* Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği İkinci Ulusal Kongresi, (Sf. 157-172).
- Sağlam, A. ve Parry, R. H. G.** (1970). *Model Study of Laterally Loaded Piles.* 7th European Conf. On SMFE, (Sf. 115-120).
- Sert, S.** (2003). *Aluviyal Ortamda Kazıklı Yayılı Temellerin Üç Boyutlu Analizi.* (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi.
- Spundwand-Handbuch Teil 1, Grundlagen. (1986). Trade ARBED Department.
- Toğrol, E.** (1970). Kazıklı Temeller, Temel Araştırma Yayınları, İstanbul.
- Toğrol, E. ve Tan, O.** (2009). Kazıklı Temeller, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Tomlinson, M. J.** (1994). Pile Design and Construction Practice, E&FN Spon, London.
- Tomlinson, M. J. ve Woodward, J.** (2008). Pile Design and Construction Practice 5th Ed, Taylor & Francis Group.
- U.S. Army Corps of Engineers.** (1997). Design of Deep Foundations.
- Uncuoğlu, E.** (2009). *Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıkların Yatay Yük ve Moment Etkisi Altındaki Davranışlarının Analizi.* (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Yıldırım, S.** (2009). Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı (3. Basım.), İstanbul.

EKLER

EK A: Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yatay yük etkisindeki kazık gruplarındaki her bir kazığın taşıdığı yük değerleri ve farklı kazık çapları ve kazık aralıklarındaki yük-deplasman grafikleri.

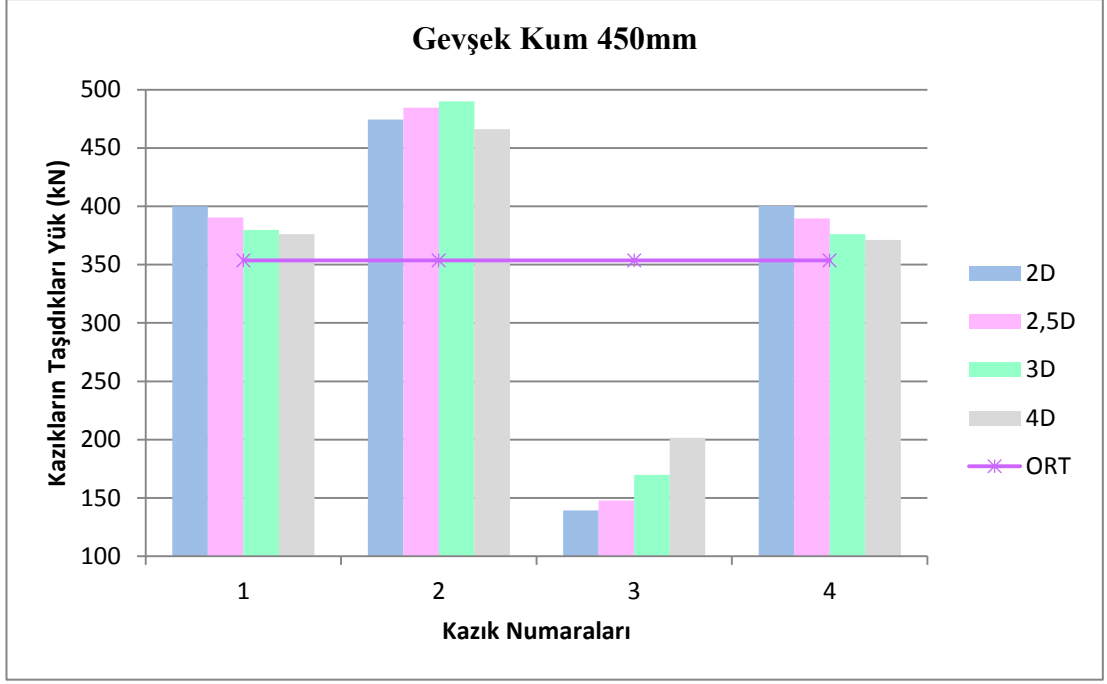
EK A



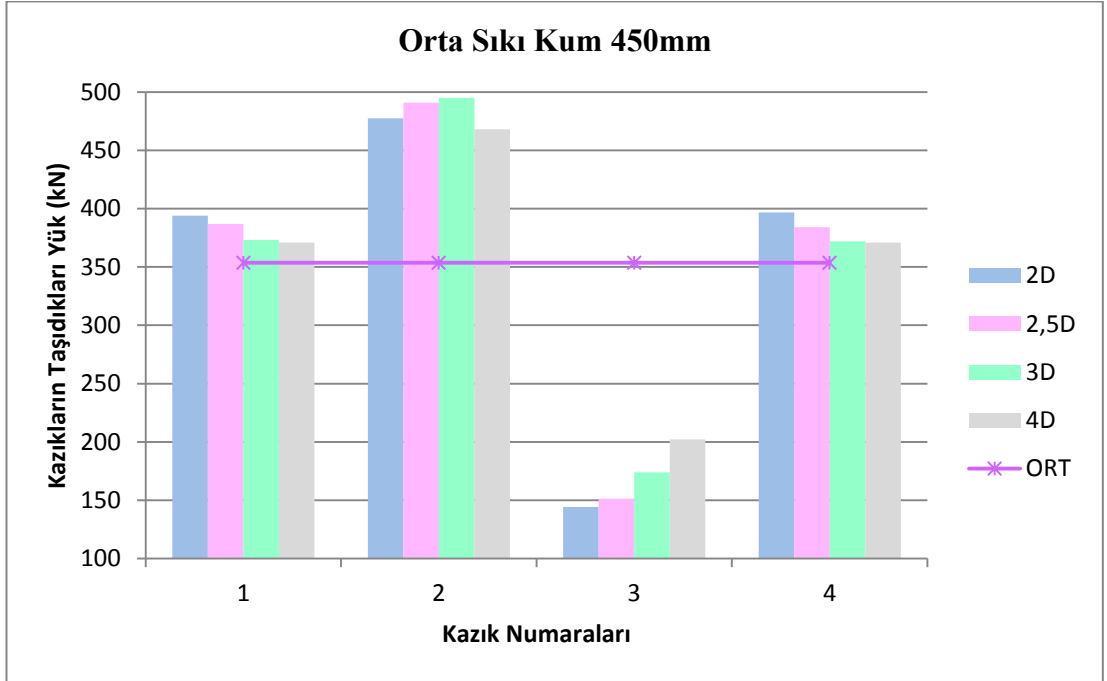
Şekil A.1 : Yumuşak kil zeminlerde D= 450 mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



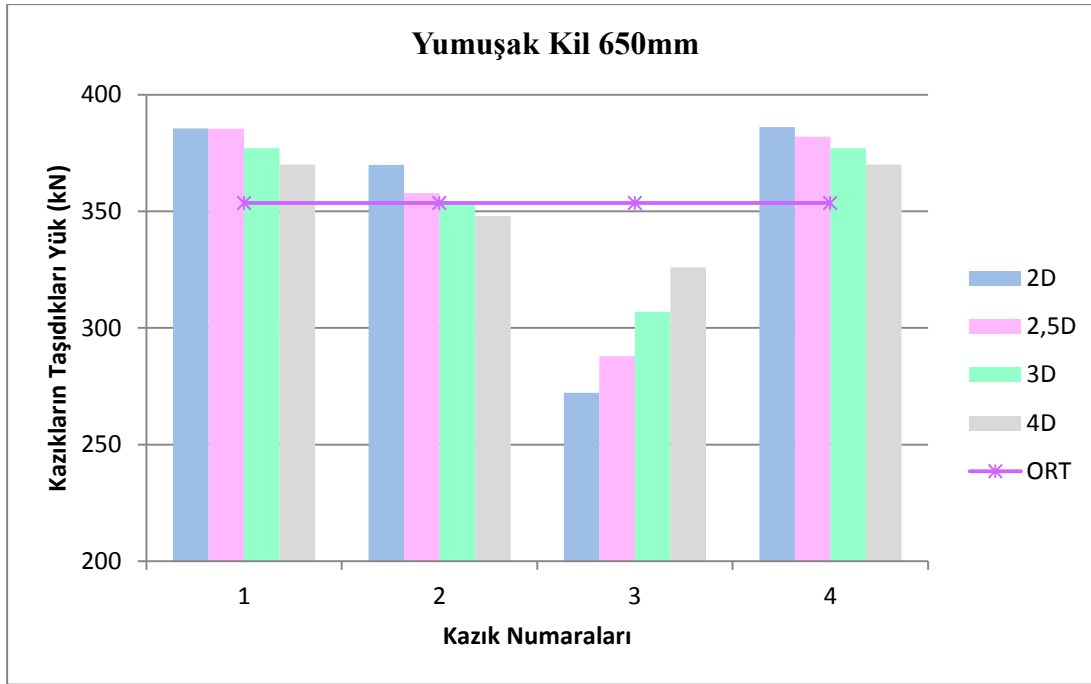
Şekil A.2 : Yarı katı kil zeminlerde D= 450 mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



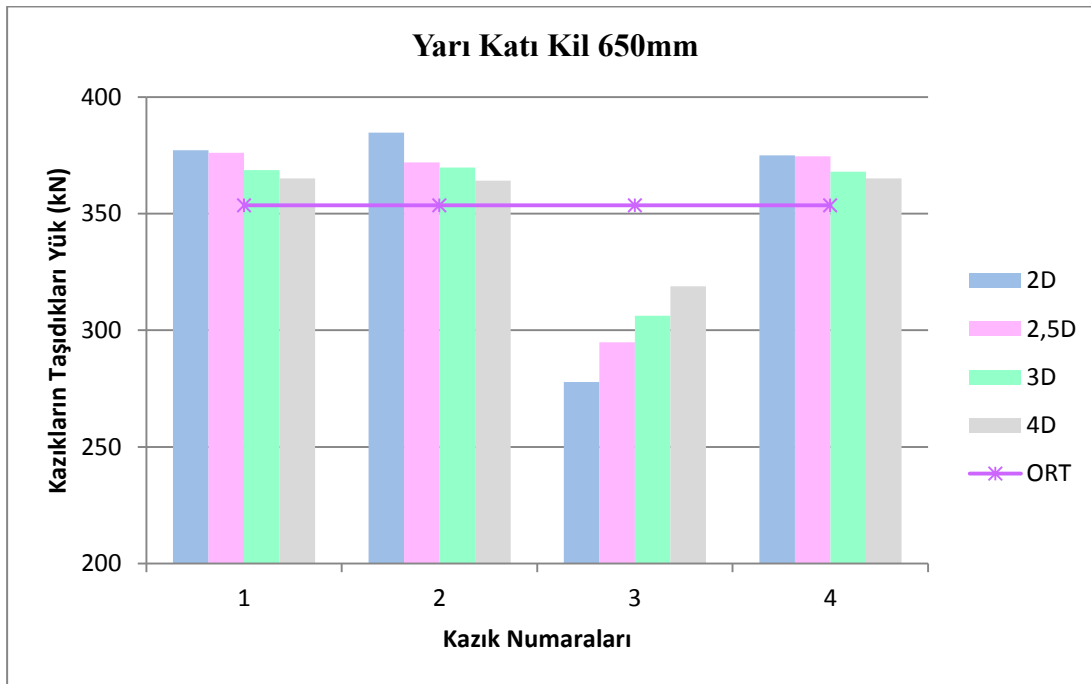
Şekil A.3 : Gevşek kum zeminlerde $D= 450$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



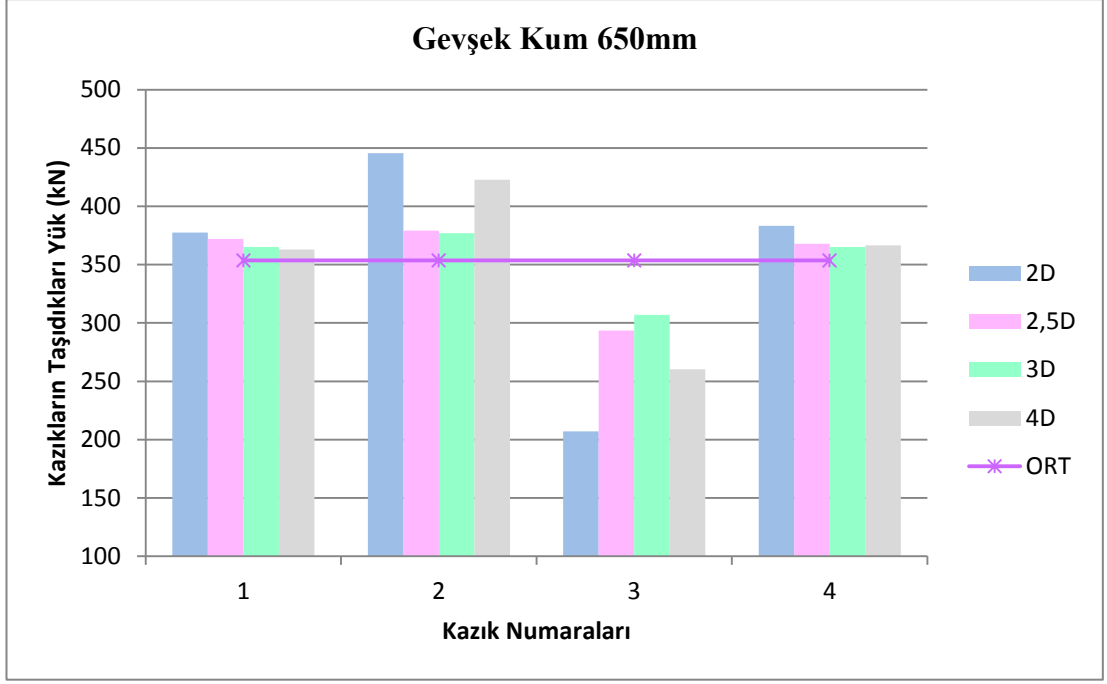
Şekil A.4 : Orta sıkı kum zeminlerde $D= 450$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



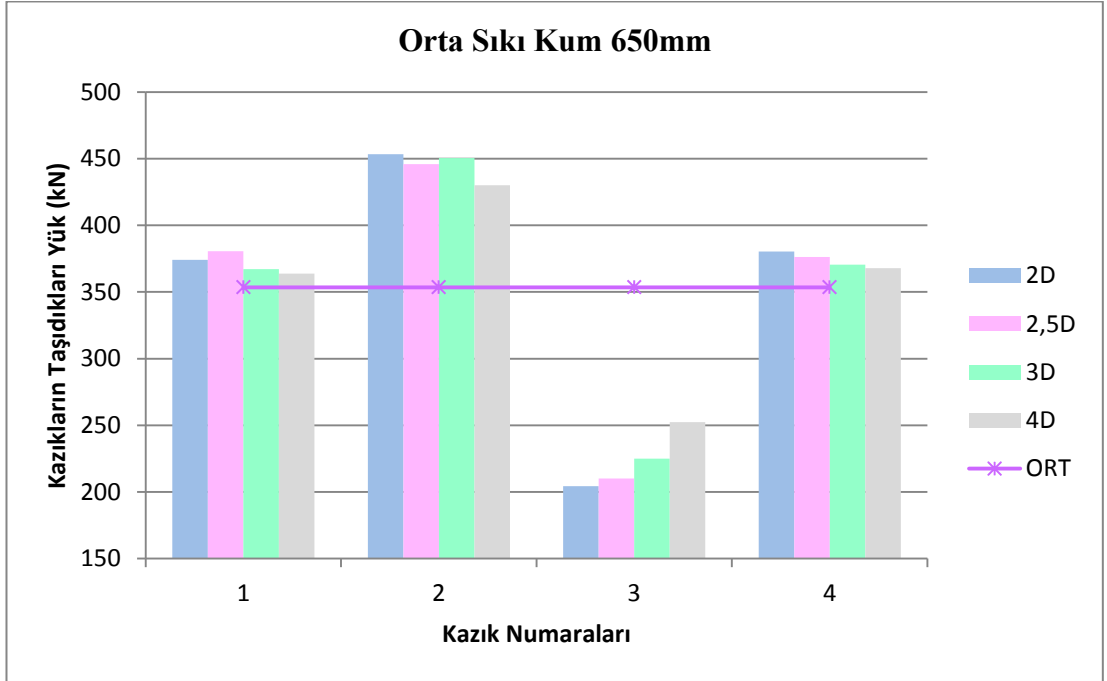
Şekil A.5 : Yumuşak kil zeminlerde $D= 650$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



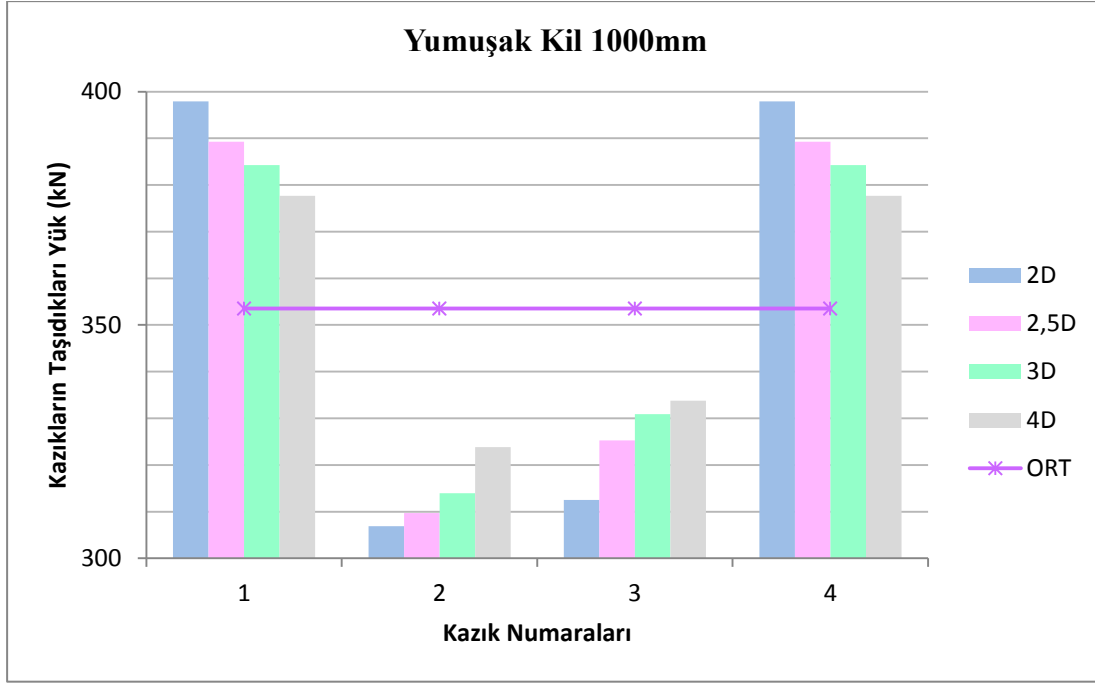
Şekil A.6 : Yarı katı kil zeminlerde $D= 650$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



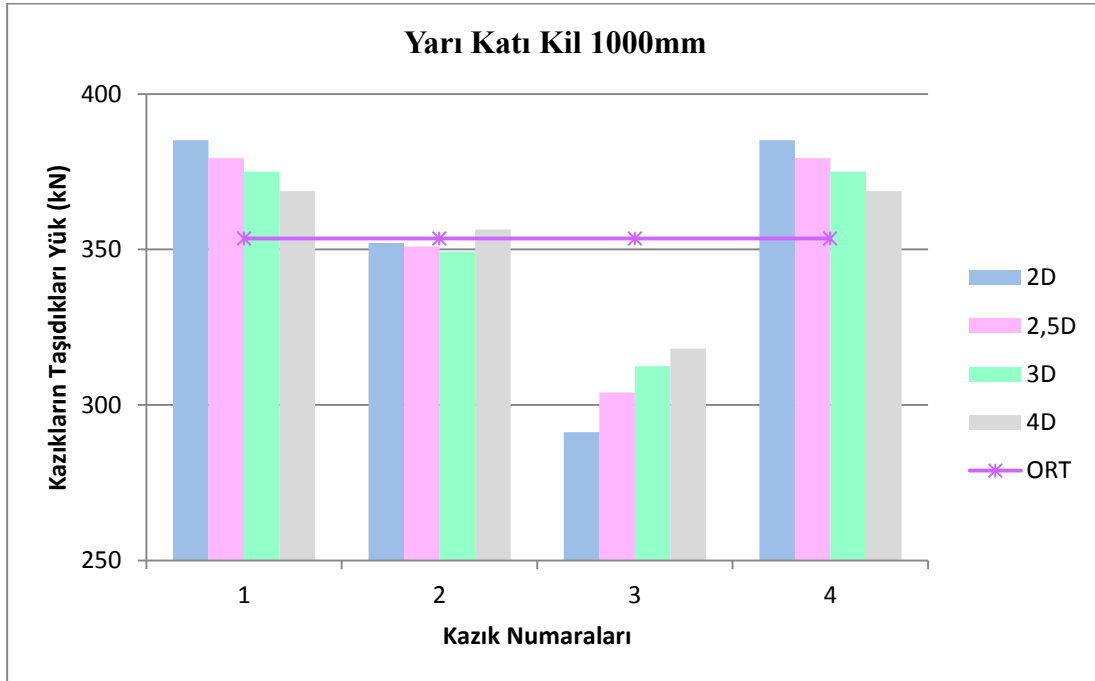
Şekil A.7 : Gevşek kum zeminlerde $D= 650$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



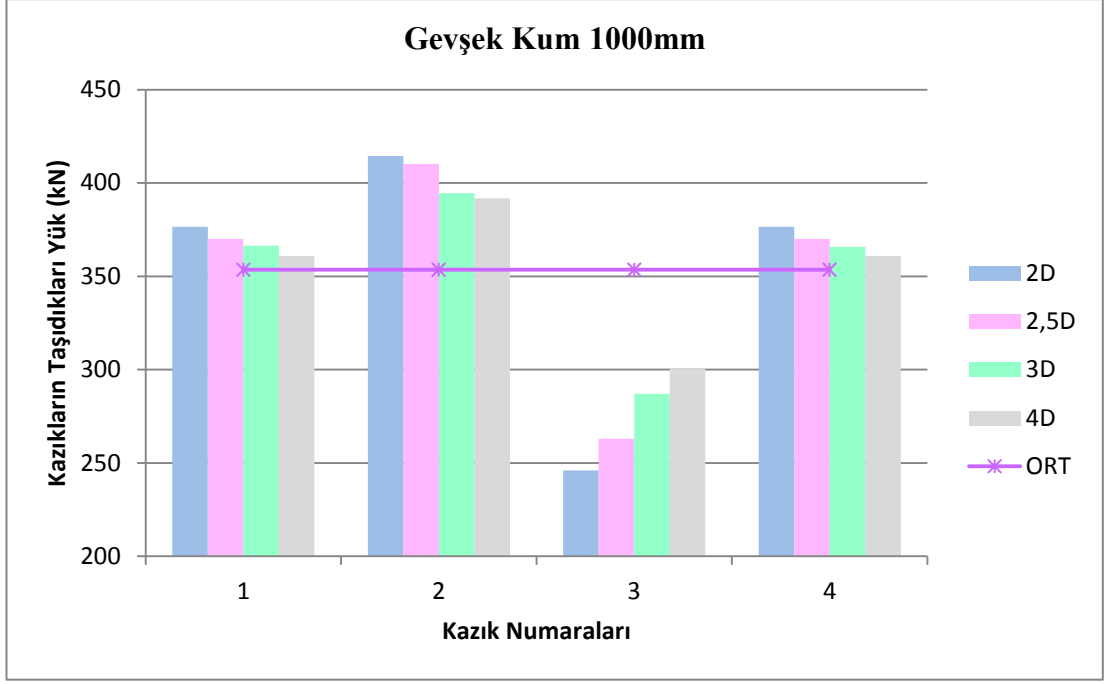
Şekil A.8 : Orta sıkı kum zeminlerde $D= 650$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



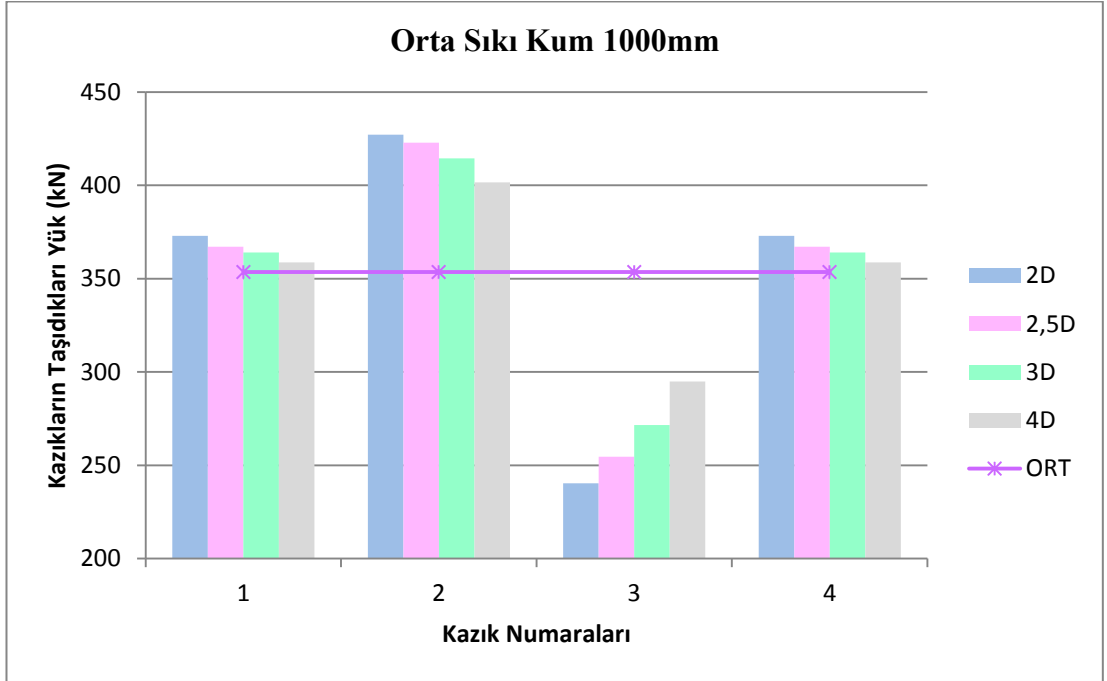
Şekil A.9 : Yumuşak kil zeminlerde $D= 1000$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



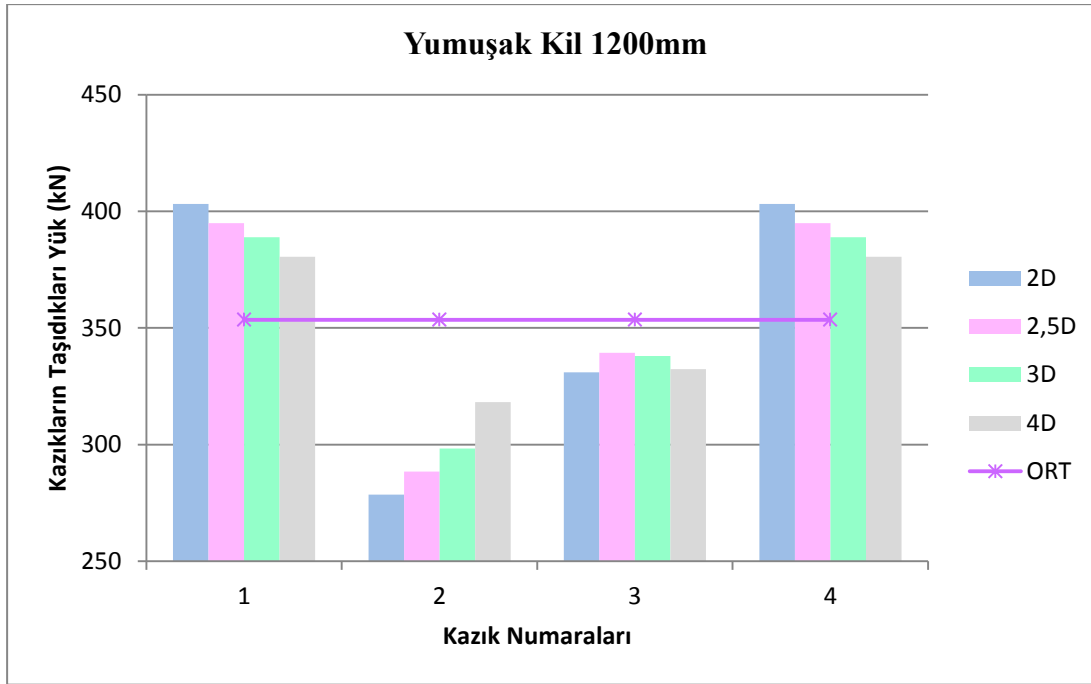
Şekil A.10 : Yarı katı kil zeminlerde $D= 1000$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



Şekil A.11 : Gevşek kum zeminlerde $D= 1000$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



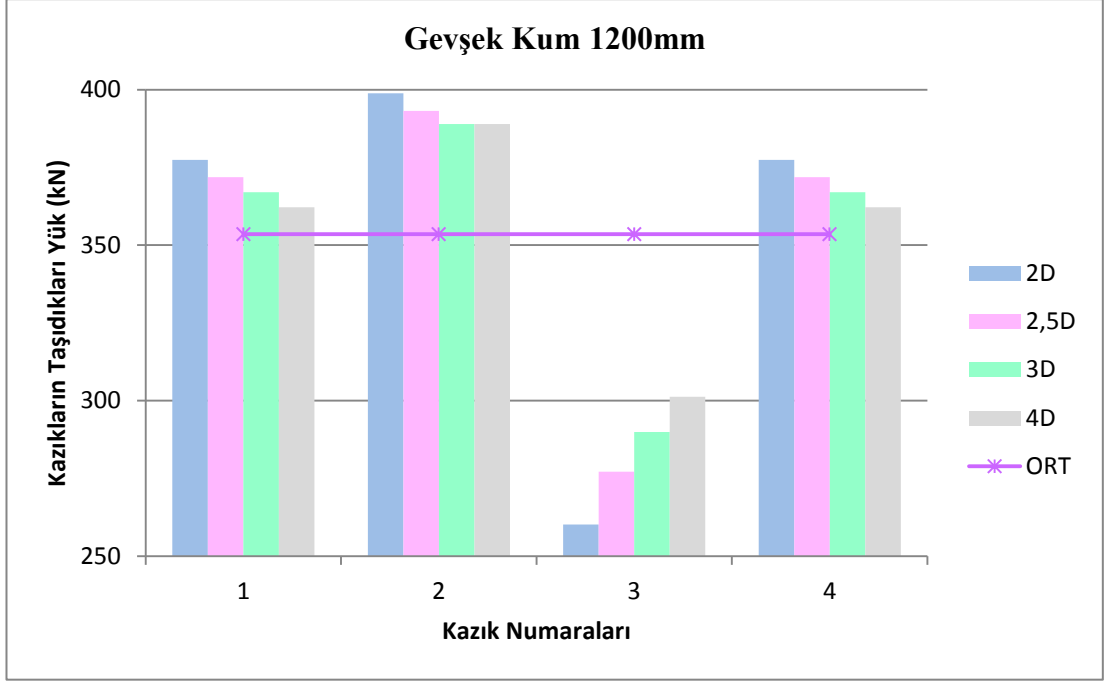
Şekil A.12 : Orta sıkı kum zeminlerde $D= 1000$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



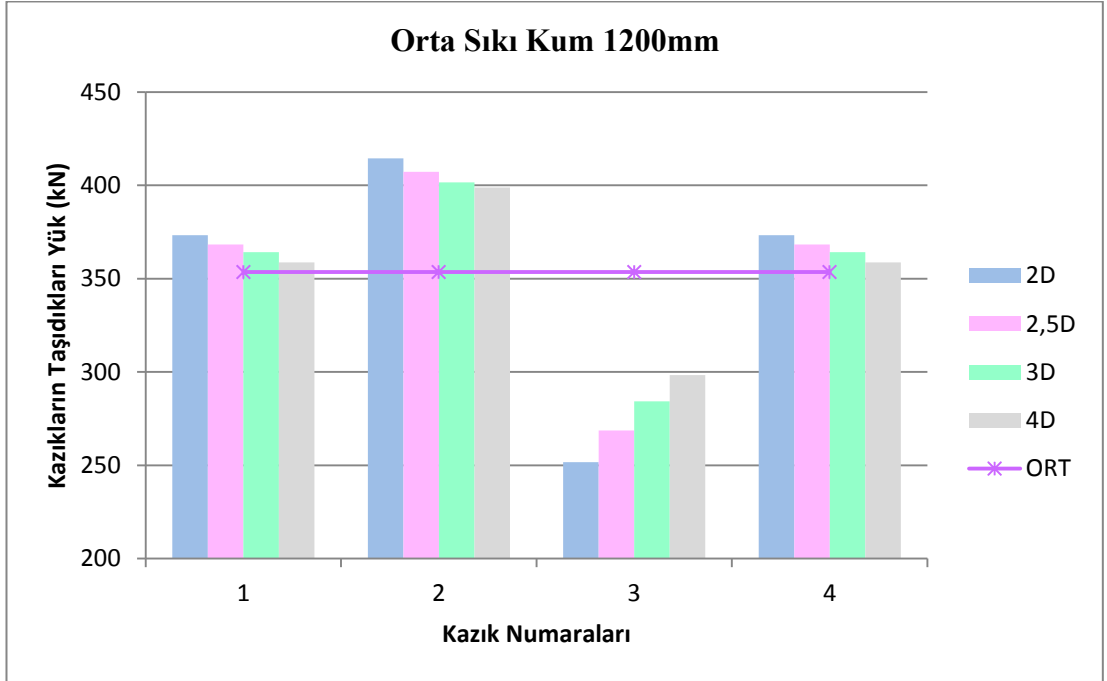
Şekil A.13 : Yumuşak kil zeminlerde $D= 1200$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



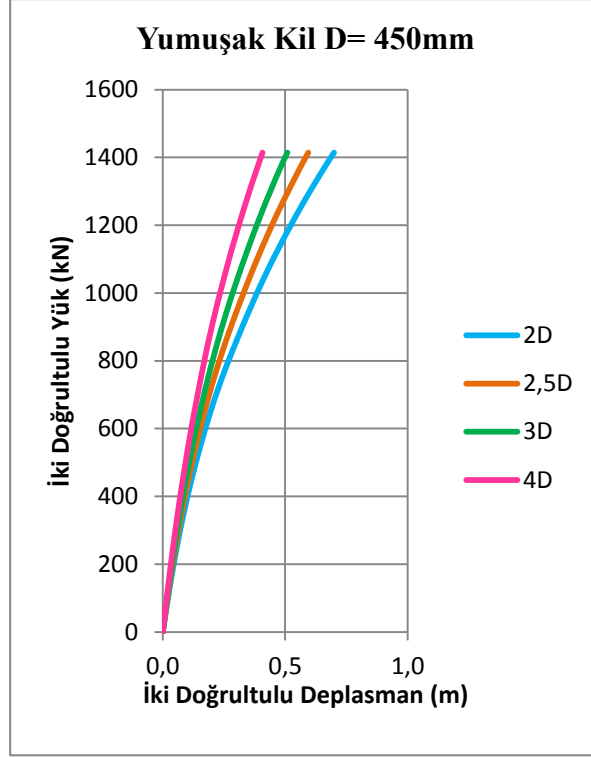
Şekil A.14 : Yarı katı kil zeminlerde $D= 1200$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



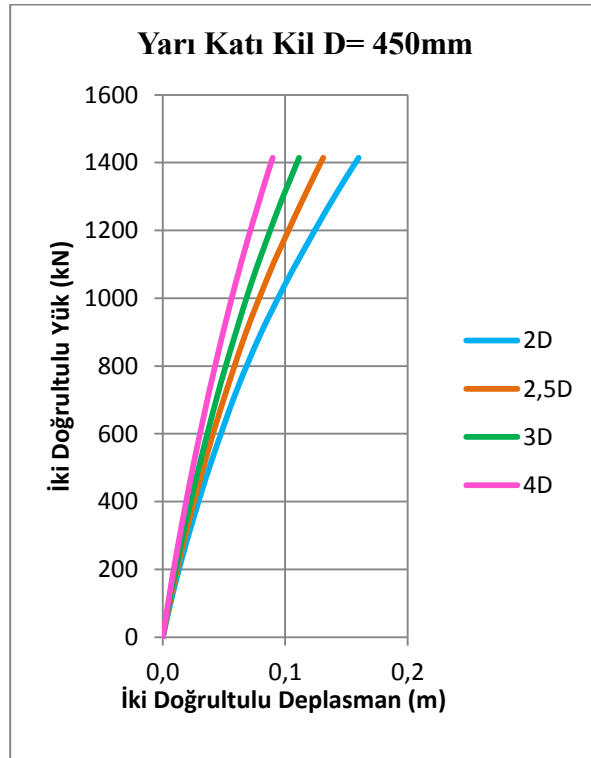
Şekil A.15 : Gevşek kum zeminlerde $D= 1200$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



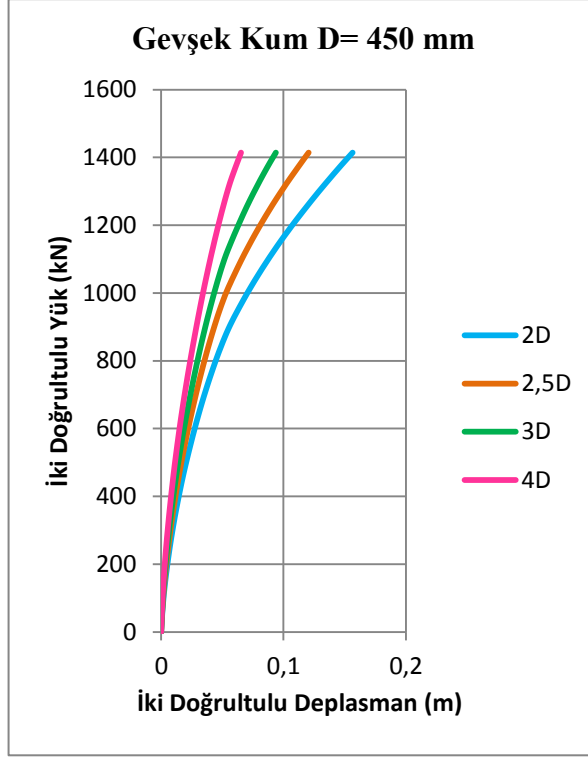
Şekil A.16 : Orta sıkı kum zeminlerde $D= 1200$ mm için her bir kazığın taşıdığı yük değerleri.



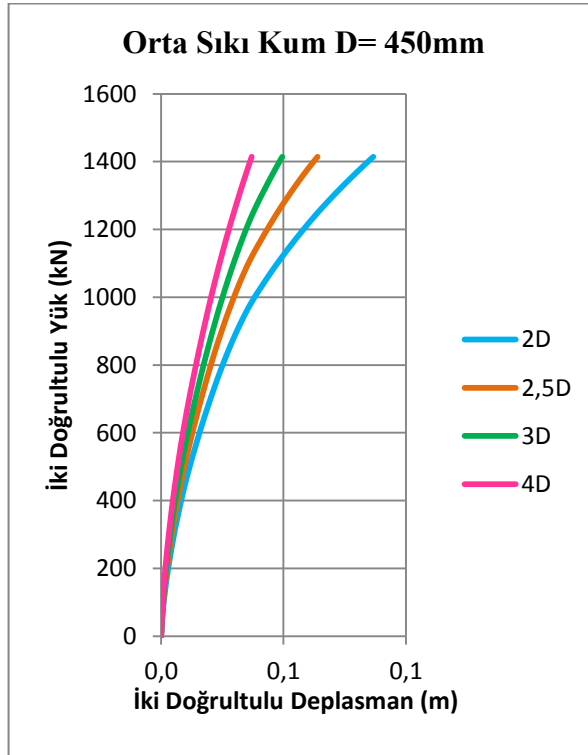
Şekil A.17 : Yumuşak kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=450 mm için yük-deplasman grafiği.



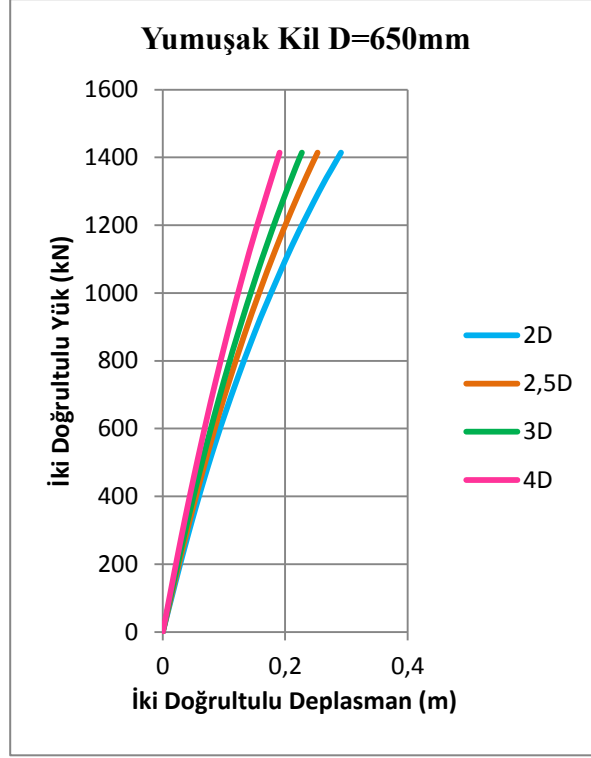
Şekil A.18 : Yarı katı kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=450 mm için yük-deplasman grafiği.



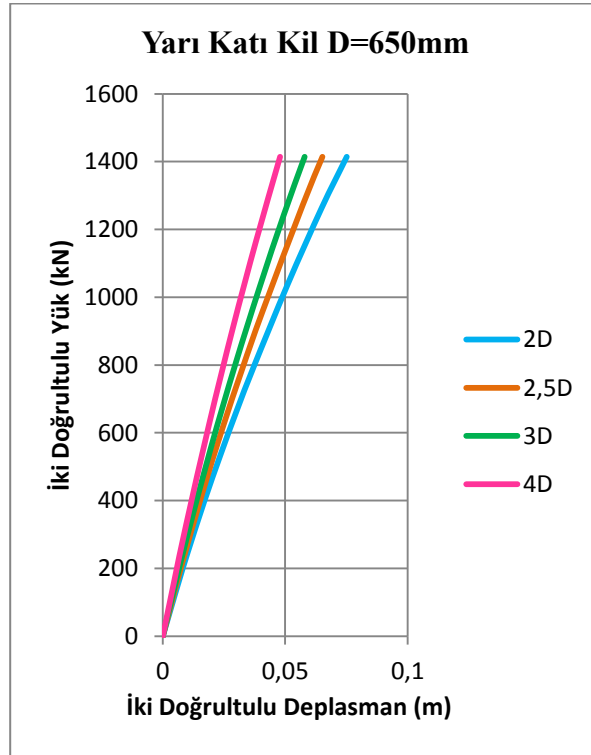
Şekil A.19 : Gevşek kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=450 mm için yük-deplasman grafiği.



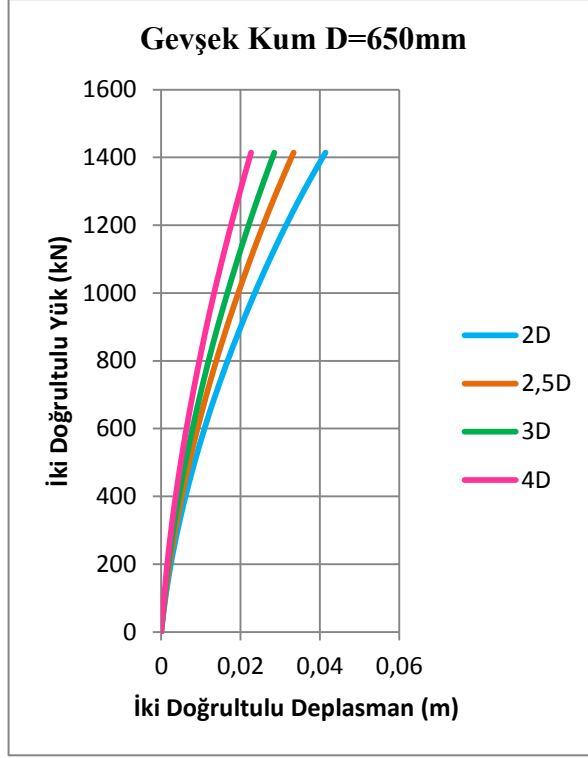
Şekil A.20 : Orta sıkı kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=450 mm için yük-deplasman grafiği.



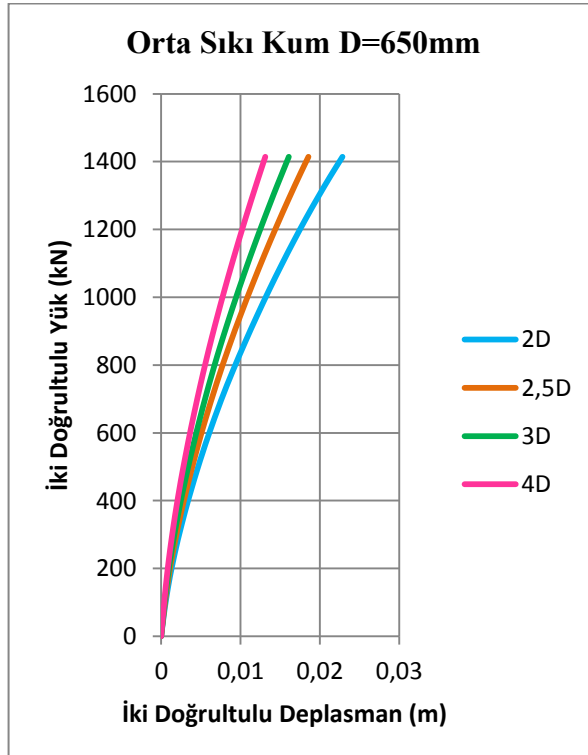
Şekil A.21 : Yumuşak kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=650 mm için yük-deplasman grafiği.



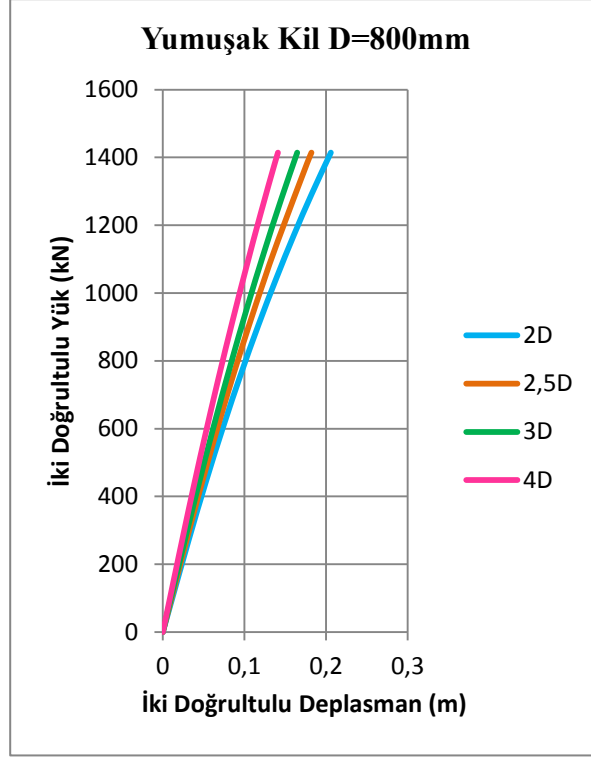
Şekil A.22 : Yarı katı kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=650 mm için yük-deplasman grafiği.



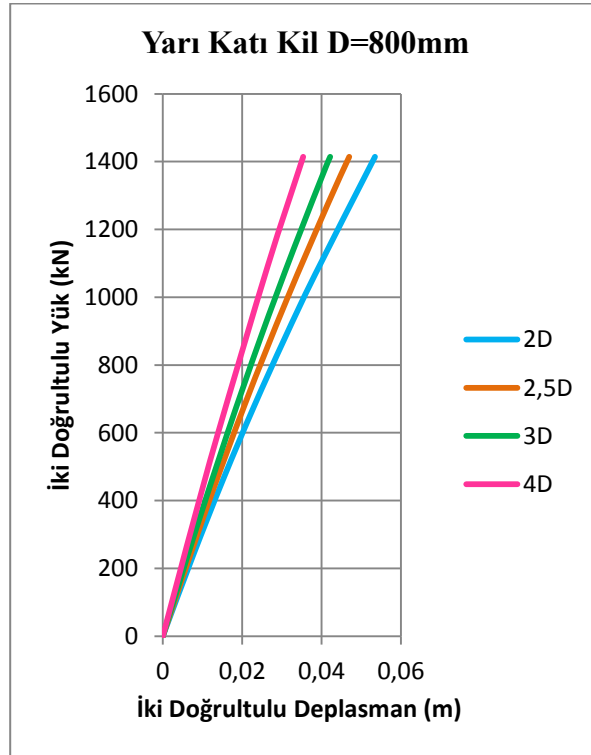
Şekil A.23 : Gevşek kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=650 mm için yük-deplasman grafiği.



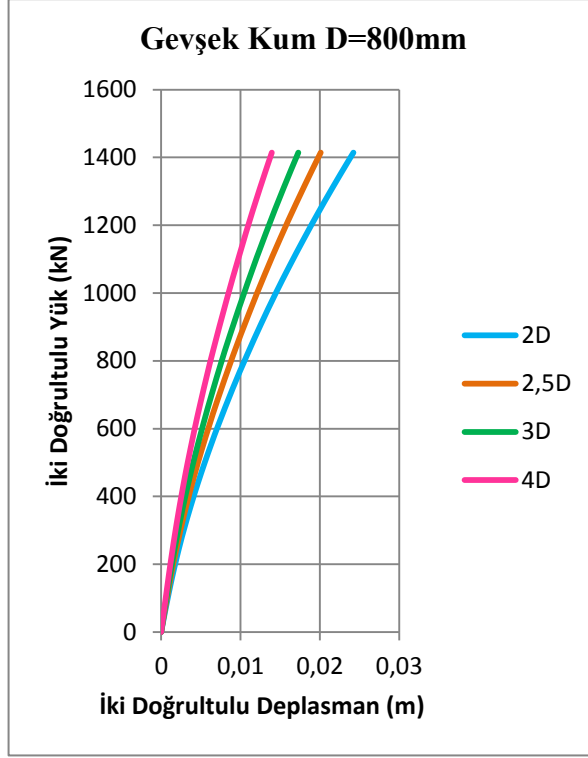
Şekil A.24 : Orta sıkı kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=650 mm için yük-deplasman grafiği.



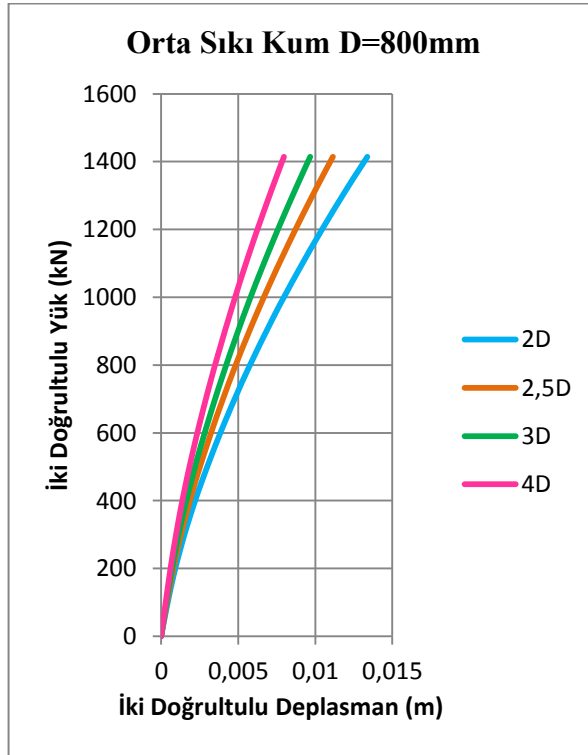
Şekil A.25 : Yumuşak kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=800 mm için yük-deplasman grafiği.



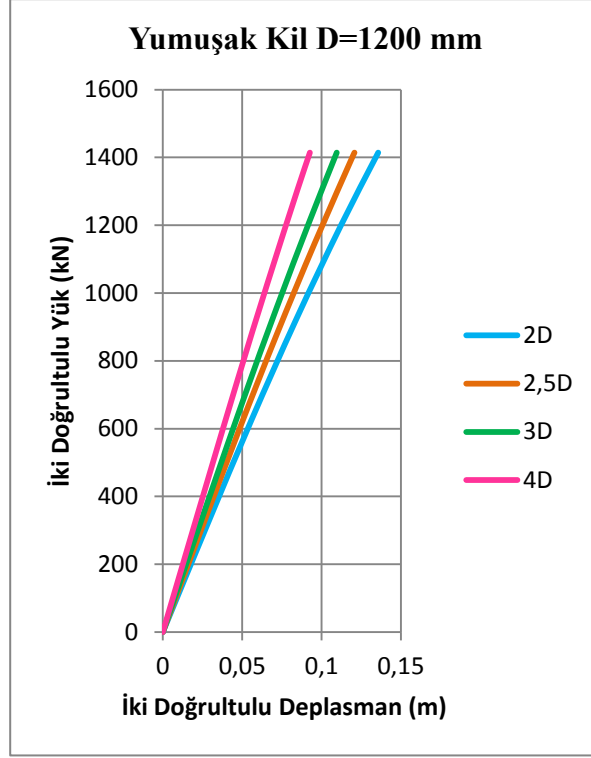
Şekil A.26 : Yarı katı kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=800 mm için yük-deplasman grafiği.



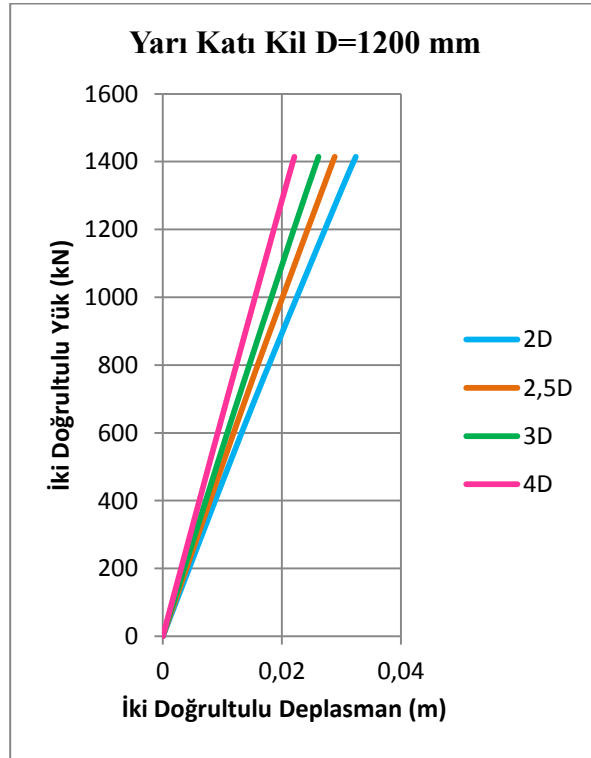
Şekil A.27 : Gevşek kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=800 mm için yük-deplasman grafiği.



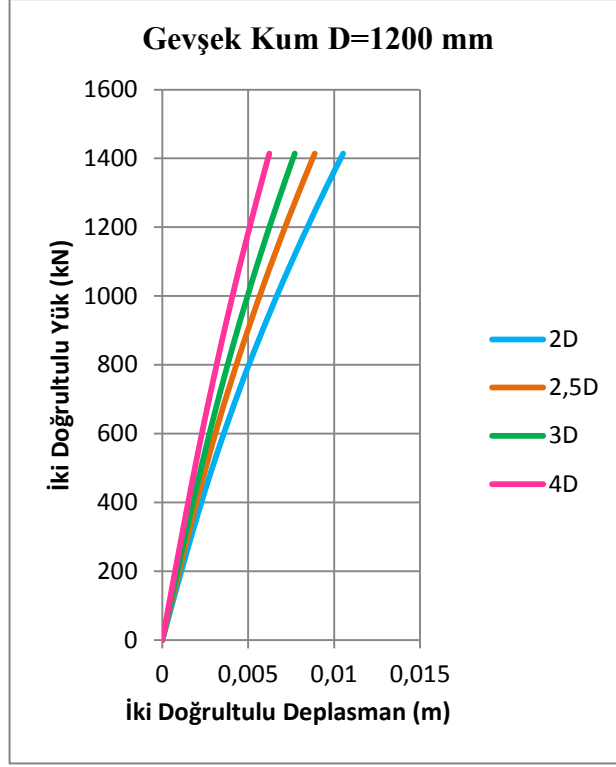
Şekil A.28 : Orta sıkı kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=800 mm için yük-deplasman grafiği.



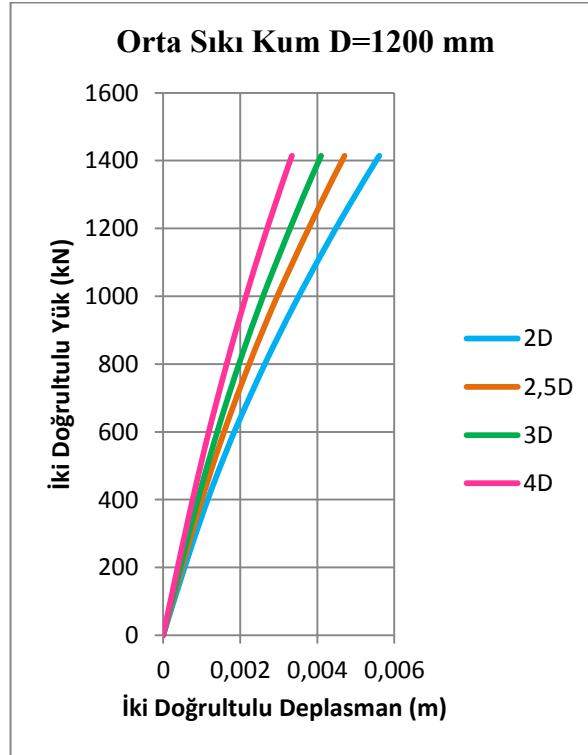
Şekil A.29 : Yumuşak kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=1200 mm için yük-deplasman grafiği.



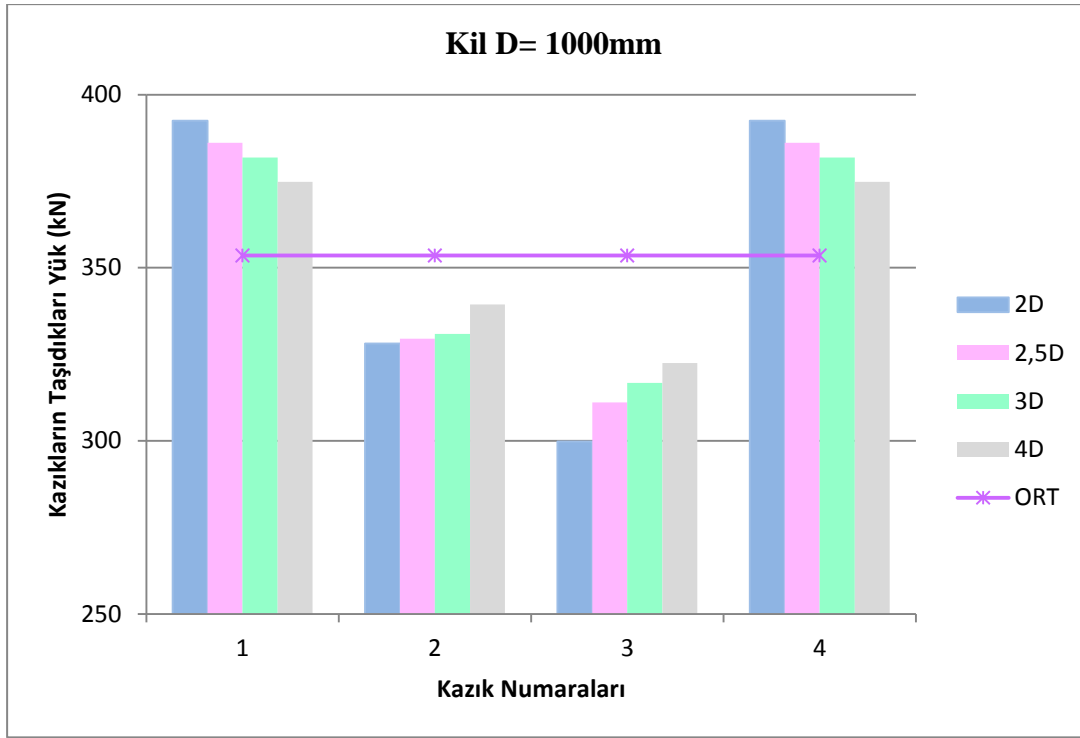
Şekil A.30 : Yarı katı kil zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=1200 mm için yük-deplasman grafiği.



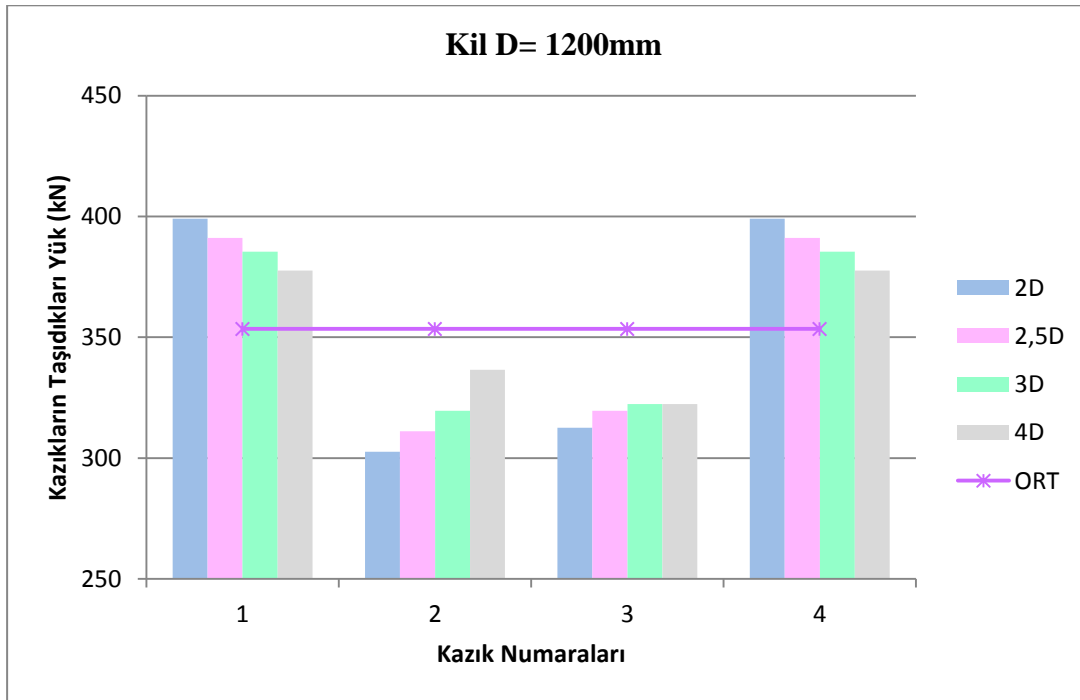
Şekil A.31 : Gevşek kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=1200 mm için yük-deplasman grafiği.



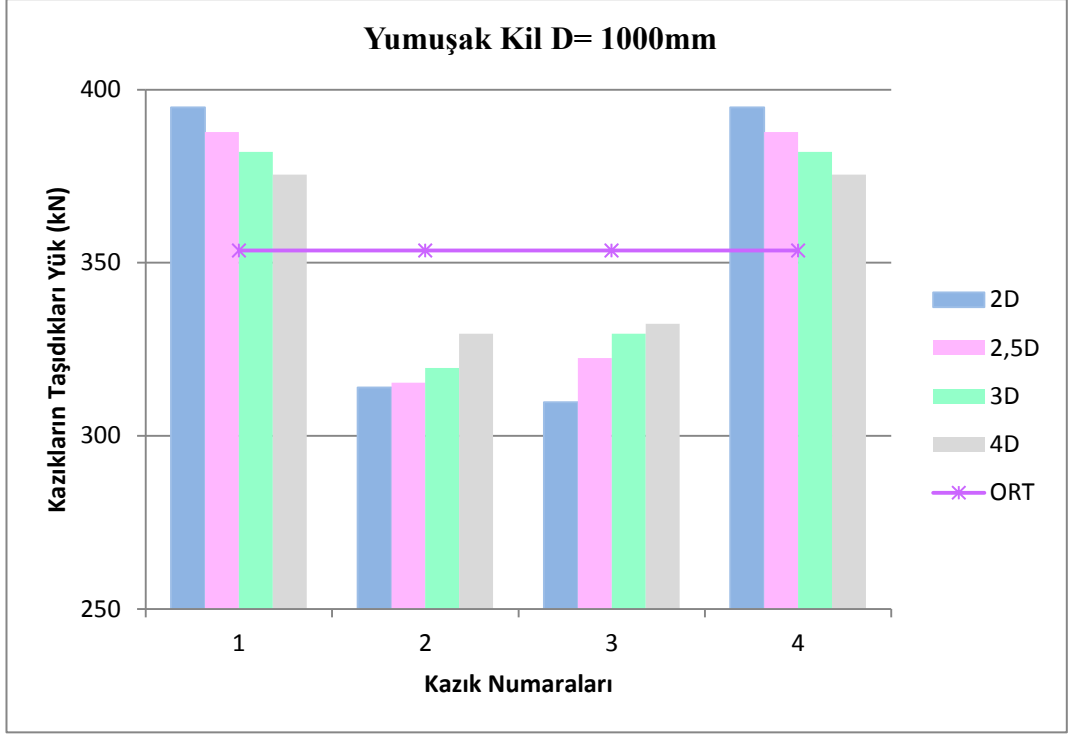
Şekil A.32 : Orta sıkı kum zeminlerde iki doğrultuda 1000 kN yük etkisinde D=1200 mm için yük-deplasman grafiği.



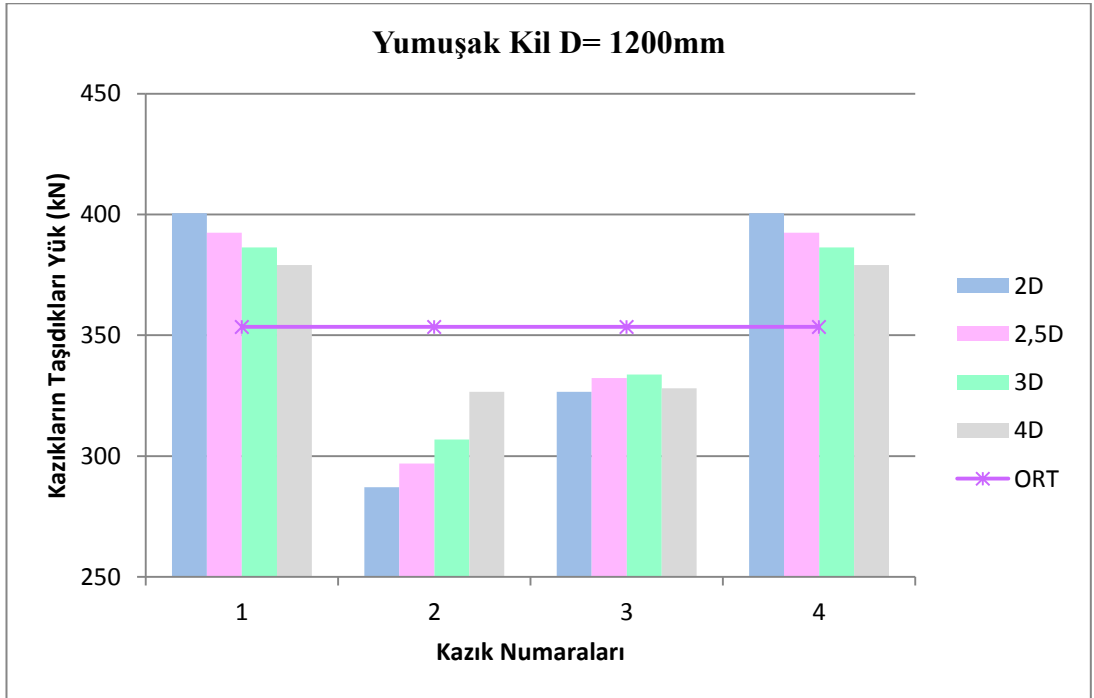
Şekil A.33 : Yumuşak kil ve yarı katı kil özelliklerinin ortalamaları ile hesaplanan zemindeki 1000mm çapındaki kazıkların taşıdıkları yüklerin grafik gösterimi.



Şekil A.34 : Yumuşak kil ve yarı katı kil özelliklerinin ortalamaları ile hesaplanan zemindeki 1200mm çapındaki kazıkların taşıdıkları yüklerin grafik gösterimi.



Şekil A.35 : Yumuşak kil özelliklerinin üst sınır değerleri alınarak hesaplanan zemindeki 1000mm çapındaki kazıkların taşıdıkları yüklerin grafik gösterimi.



Şekil A.36 : Yumuşak kil özelliklerinin üst sınır değerleri alınarak hesaplanan zemindeki 1200mm çapındaki kazıkların taşıdıkları yüklerin grafik gösterimi.

Çizelge A.1 : Yumuşak kil ve yarı katı kil ortalama zemin özellikleri ve yumuşak kil üst sınır zemin özellikleri.

Zemin Cinsi	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Elastisite Modülü (kN/m^2)	Poisson Oranı	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı ($^{\circ}$)
Kil	18	4625	0.4	17.5	21.25
Yumuşak Kil	17	2500	0.4	10	17.5

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Sevda Berra GÜRGÜÇ
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul - 24.03.1987
E-Posta: berragurguc@hotmail.com
Lisans: İstanbul Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği