İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KEMERLENME HAKKINDA BİR İNCELEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Berna ERÇAĞ

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ZEMİN MEKANİĞİ VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KEMERLENME HAKKINDA BİR İNCELEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Berna ERÇAĞ
501011555

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Şubat 2006

Tez Danışmanı : Doç.Dr. M.Tuğrul ÖZKAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. S.Feyza ÇİNİCİOĞLU (İ.Ü.)
Doç.Dr. İsmail Hakkı AKSOY (İ.T.Ü.)

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Mühendisliği Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu araştırmada, ayrık kazıklı dayanma yapılarında yer alan kazıklar arasında meydana gelen zeminin kemerlenme etkisini incelemek amacıyla Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı ile üç boyutlu analizler yapılmıştır.

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam Doç.Dr.M. Tuğrul ÖZKAN'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince farklı aşamalarda yardımlarını gördüğüm Plaxis Türkiye temsilcisi Müge İNANIR'a, Plaxis B.V. firmasına, Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi öğretim görevlilerinden Dr. Ertuğrul ORDU'ya ve Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü'nden Dr. Hafez KEYPOUR'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bütün öğrenim hayatımda olduğu gibi tez çalışmalarımda da gösterdikleri maddi ve manevi destek ve yardımlarından dolayı çok değerli aileme ve müstakbel eşim Güven Aliş'e teşekkürlerimi sunarım.

Şubat, 2006 Berna ERÇAĞ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vı**
SEMBOL LİSTESİ **vıı**
ÖZET **x**
SUMMARY **xı**

1. GİRİŞ **1**

2. ZEMİN KEMERLENMESİ **3**
2.1. Zemin Kemerlenmesi Olayının Tanımı 3
2.2. Mühendislik Uygulamalarında Zemin Kemerlenmesi 5

3. KEMERLENME MEKANİZMASI **7**
3.1. Düşey Yönde Zemin Hareketi Nedeniyle Oluşan Kemerlenme Üzerine Yapılan Çalışmalar 7
3.1.1. Teorik çalışmalar 8
3.1.1.1. Limit denge teorileri 8
3.1.1.2. Elastik teoriler 18
3.1.1.3. Plastisiteye dayanan teoriler 20
3.1.1.4. Numerik teoriler 20
3.1.2. Deneysel çalışmalar 21
3.1.2.1. 1g deneyleri 21
3.1.2.2. Santrifüj deneyler 22
3.2. Yatay Yönde Zemin Hareketi Nedeniyle Oluşan Kemerlenme Üzerine Yapılan Çalışmalar 24
3.2.1. Amprik metodlar 24
3.2.2. Toprak basıncına dayanan teoriler 25
3.2.3. Deplasmana dayanan teoriler 31
3.2.4. Model deneyleri ve sonlu elemanlar teorileri 32
3.3. Kazıklar Üzerine Etkiyen Yanal Yüklerin Tahmini 47
3.3.1. Lamb ve white metodu 47
3.3.2. Hennes metodu 47
3.3.3. Kamu işleri araştırma enstitüsü metodu 47
3.3.4. Ito ve Matsui metodu 48
3.3.4.1. Plastik deformasyon teorisi 48
3.3.4.2. Plastik akış teorisi 50
3.3.5. Chen ve Poulous metodu 52

3.3.6. Diğer amprik metodlar 54
3.4. Yanal Zemin Hareketine Maruz Kalan Kazıkları Göçme Durumları 55

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PROGRAMIN ÖZELLİKLERİ 59
4.1. Giriş 59
4.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Genel Tanıtımı 60
4.3. Kullanılan Kavramlar 60
4.4. Plaxis 3D Foundation Programının Özellikleri 65

5. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER 71
5.1. Plaxis 3D Foundation ile Kazıklı Dayanma Yapısının Modellenmesi 71
5.1.1. Model geometrisi 71
5.1.2. Sonlu elemanlar ağı ve kullanılan elemanlar 72
5.1.3. Kullanılan yapısal modeller 75
5.1.4. Kullanılan malzeme parametreleri 78
5.2. Plaxis 3D Foundation ile Kazıklı Dayanma Yapısının Analizleri 79
5.2.1. Zemin ortamının değişimi 82
5.2.2. Kazık aralığı değişimi 97
5.2.3. Kazık çapı değişimi 104

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR 120

KAYNAKLAR 125

EKLER 127

ÖZGEÇMİŞ 143

KEMERLENME HAKKINDA BİR İNCELEME

ÖZET

Yeraltı yapılarının uygulanması sırasında yapının inşaa edileceği arazi üzerindeki zeminin kazılması, zeminin sahip olduğu mevcut dengeyi bozmaktadır. Bu durumda kazının düşey olarak teşkilini sağlamak, kazı sahasının çevresinde bulunan bina, yol ve önemli yapılarda oluşabilecek hasar riskini en aza indirmek ve kabul edilebilir sınırlar ölçüsünde tutmak için birçok destekleme sistemi bulunmaktadır. Kazıklı dayanma yapıları bu destekleme sistemleri arasında en yaygın kullanıma sahiptir.

Son zamanlarda, şevlerin stabilizasyonu için, akan zemin kütlesinden ayrık kazıklara aktarılan gerilmeler hakkında önemli bilgiler edinmemizi sağlayan Zeminin Kemerlenme teorisi hakkında birçok çalışma yapılmaktadır. Şev stabilizasyonunun en etkili biçimde tasarımının yapılabilmesi, zeminde en etken bir biçimde kemerlenmeyi sağlayacak kazık aralığının belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Kemerlenmeyi sağlayacak kazık aralığının tasarım mühendisleri tarafından tam olarak bilinmemesi, optimum tasarımın yapılamamasına ve kazıkları gereğinden fazla yakın mesafede koymalarına neden olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; sonlu elemanlar programı kullanarak kazıklı dayanma yapılarında kazıklar arasında meydana gelen zemin kemerlenmesinin varlığını ortaya koymak, gelişiminde etkili olan faktörleri göz önüne alarak optimum tasarım için gerekli olan bilgi tabanını sağlamak ve şevler üzerinde bulunan ayrık kazıklar arasında meydana gelen zemin kemerlenmesi hakkında daha önce yapılmış olan çalışmaları bir araya getirmektir.

Tez çalışması kapsamında, kohezyonsuz zeminler üzerinde kazık aralığına, kazık çapına ve zemin parametrelerine bağlı olarak birçok nümerik analiz çalışması yapılmış ve bu analizler sonucunda zeminin sahip olduğu içsel sürtünme açısı, kazık aralığı ve kazık çapının kazığa gelen yatay kuvvete olan etkisi ile kazığın deplasmanının derinliğe olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen veriler sonucunda; yüzeyden belirli derinliklerde sabit kazık çapı ve kazık aralığında zemindeki içsel sürtünme açısı (ϕ) arttıkça, kazığa gelen yatay kuvvetlerin ve kazık deplasmanlarının azaldığı ve sıkı kumun gerilme mobilizasyonu ve birbirine kenetlenme etkisinin daha fazla olmasından dolayı kemerlenme etkisinin arttığı görülmüştür. Bununla beraber, yüzeyden belirli derinliklerde sabit kazık çapı ve zemin türü durumunda kazık aralığı arttıkça, kazıklara etki eden yatay kuvvet değerlerinin artmakta olduğu, küçük kazık aralıklarında iki kazık arasındaki zemin stabilitesinin kemerlenme görüldüğü sürece daha derin kazı aşamalarına kadar sağlanmakta olduğu görülmüştür. Ayrıca yüzeyden belirli derinliklerde kazık aralığı ve zemin türünün sabit tutulduğu durumlarda kazık çapı arttıkça, kazığın rijitliğinin ve kazığa etki eden yatay kuvvet değerlerinin arttığı; kazık çapının küçük olması durumunda iki kazık arasındaki zeminin daha erken kazı aşamalarında göçtüğü görülmüştür. Ayrıca kazıklar arasında meydana gelen kemerlenme bölgesinin varlığı, tıpkı literatürde yapılan çalışmalar sonucunda olduğu gibi, zemin hareketinin yönü boyunca oluşan deplasman kontürleri ve asal gerilme yönlerinin dönmesi ile belirlenmiştir.

A STUDY ABOUT SOIL ARCHING

SUMMARY

During the application of underground structures the excavation of the soil on the construction area destroy the stability of soil. Therefore, there are many retaining wall systems which is providing the vertical stability of soil, decreasing the damage risk to a minimum level which may occur on the buildings, roads and important buildings around the construction area and holding the values at the allowable limits Discrete pile retaining walls are one of the most effective and widespread usage among other retaining wall systems.

Recently, several research has been performed for slope stabilization to provide important information about soil arching theory which means the stresses transfer from a yielding soil mass to discrete piles. The effective design of slope stabilization is depend on the determination of pile spacing which provides the most effective arching in soil. The lack of an adequate information about effective pile spacing by design engineer causes not to perform an optimum design and to place the piles closer together than they need be.

The objective of this study is to interpret soil arching mechanisms, which is developed between piles in discrete piled retaining walls , by using finite element method, provide quantitative information base which is required for an optimum design with exerting all factors on the development of soil arching and compare the results with the experimental and theoretical researchs about soil arching which was carried out in the literature.

In the contents of this thesis, a series of numerical studies were performed for cohesionless soil depend on pile spacing, pile diameter and internal friction angle of cohesionless soil and at the end of the analysis, the effect of loads on pile were examined related to internal friction angle of cohesionless soil, pile spacing and pile diameter and also the effect of displacements of pile related to depth. According to results; at the definite depth having the same diameter and pile spacing as the internal friction angle of cohesionless soil grows, the loads acting on pile and the displacements of pile decreases and also seen that the arching effect increases because the strength mobilization and the greater degree of interlocking of dense sand is more than loose sand. Besides, at the definite depth having the same pile diameter and soil layer as the pile spacing grows, the loads acting pile increases and it was seen that the stability of soil between two pile was provided to the deep excavation step, if conditions for soil arching are met. In addition, at the definite depth having the same pile spacing and soil layer, as the pile diameter grows, the rigiditity of pile and the horizontal loads acting on pile increase and also it was seen that the soil body between two pile collapses at the early excavation depth in the state of having smaller pile diameter. The existence of arching zone between piles was proved from the displacement contours which formed through the movement of soil and from the rotation of the principal stresses directions as proved in literature.

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 5.1. Analizlerde kullanılan zemin ve kazık malzeme parametreleri... 78
Tablo 5.2. Plaxis 3D Foundation ile yapılan analizler …….. 80
Tablo 5.3. İki kazık arasından zeminin göçtüğü kazı derinlikleri ……..... 81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Aktif kemerlenme etkisi [15] 4
Şekil 2.2 : Pasif kemerlenme etkisi [15] 5
Şekil 2.3 : Düşey yöndeki kemerlenme etkisi [4] …….. 5
Şekil 2.4 : Yatay yönde deplasmana bağlı kemerlenme etkisi [4] ……. 6
Şekil 3.1 : Engesser'in kemerlenme etkisi üzerine yaklaşımı [15] …… 8
Şekil 3.2 : Hayali kemer üzerine etkiyen kuvvetlerin gösterilmesi [15] 9
Şekil 3.3 : Minimum kuvvetin hesaplandığı üçgen prizma [15]……..... 11
Şekil 3.4 : Plaka üzerine gelen yükün düşey iki göçme düzlemi yardımıyla bulunması…… 14
Şekil 3.5 : Mohr dairesi kullanılarak K değerinin hesaplanması [15]……. 15
Şekil 3.6 : Vardoulakis ve diğ.tarafından oluşturulan model deneyi [15]….. 16
Şekil 3.7 : Low ve diğ. tarafından oluşturulan model deneyi kesiti [9]…….. 17
Şekil 3.8 : Aktif kemerlenme durumu için düşey gerilme dağılımı [15]…… 18
Şekil 3.9 : Elastik çözümlerde kemerlenme oluşumu için çekme gerilmelerinin yok edilmesi tekniği…… 19
Şekil 3.10 : Kemerlenme etkisini incelemek amacıyla yapılmış olan sonlu elemanlar modeli [15] ……... 21
Şekil 3.11 : 1g ölçekli Plaka Deney Modeli [15] …….. 22
Şekil 3.12 : Amprik tasarım grafiklerinin kullanımında tasarım alanının oluşturulması [17] ……..... 25
Şekil 3.13 : Şevlerde meydana gelen zemin kemerlenmesi [3]…… 26
Şekil 3.14 : Ito ve Matsui tarafından idealize edilmiş kazık - zemin sisteminin diyagramı …… 29
Şekil 3.15 : Kazık gruplarının etkinliği [17]..... 32
Şekil 3.16 : Tek sıra kazıklar için grup azaltma faktörü [17]……..... 33
Şekil 3.17 : Plakaların ve yük-deformasyon ölçüm sisteminin şematik diyagramı [3] 34
Şekil 3.18 : 2 boyutlu model deneyinin planı [1]……..... 36
Şekil 3.19 : Zeminin kemerlenme etkisi [1]……..... 37
Şekil 3.20 : 3 boyutlu model ve sınır koşulları [4]…… 38
Şekil 3.21 : 2 boyutlu model ve sınır koşulları [4]…… 39
Şekil 3.22 : Kireçli kum zemini içerisindeki model kazıklar için bulunmuş grup faktörü [4].....…….. 40
Şekil 3.23 : Kazık gruplarının dizilim şekli [4]…… 41
Şekil 3.24 : 2 boyutlu sonlu elemanlar modeli [4] 42
Şekil 3.25 : 3 boyutlu kazıklı şev stabilite analizi modeli [4] 42
Şekil 3.26 : 2 boyutlu sonlu elemanlar modeli [8]…… 44
Şekil 3.27 : Zemin hareketi - kazığa etkiyen yük diyagramı [8]……... 45
Şekil 3.28 : Kazıklar arası zemine etkiyen yük – kazık aralığı oranı [8]..... 46
Şekil 3.29 : Kazıklar çevresindeki zemin içinde meydana gelen plastik

deformasyon durumu [7].....…….. 49
Şekil 3.30 : Kazıklar arasındaki zeminde meydana gelen plastik akış durumu [7].....…..... 51
Şekil 3.31 : Tek sıra kazıklar için kullanılan sonlu elemanlar modeli [4]…… 53
Şekil 3.32 : Tek ayrık kazık için normalize edilmiş p – y ilişkisi [4]…….... 53
Şekil 3.33 : Kazının P_u üzerindeki etkisi [4]……..... 54
Şekil 3.34 : Şev stabilitisinde kullanılan rijit kazıkların göçme durumları….. 56
Şekil 3.35 : Birçok göçme durumundaki kazık davranışı [4]…… 58
Şekil 4.1 : Giriş (input) programının çizim ortamı [14]…….. 67
Şekil 4.2 : Plaxis'te kullanılan elemanların düğüm ve gerilme noktaları [13]. 69
Şekil 5.1 : Modelin 2 boyutlu geometrisi……..... 72
Şekil 5.2 : 2 ve 3 boyutlu modelde kullanılan elemanlar [14]…… 72
Şekil 5.3 : 3 boyutlu elemanlardaki pozitif gerilme yönleri [14]…….…… 73
Şekil 5.4 : 3 boyutlu sonlu elemanlar ağı ……..…… 74
Şekil 5.5 : Mohr - Coulomb akma kriteri ile zeminde meydana gelen gerilme - şekil değiştirme davranışı……..…… 75
Şekil 5.6 : Asal gerilme yüzeyi içerisindeki c = 0 iken Mohr – Coulomb Akma Kriteri [13]…….…….. 76
Şekil 5.7 : Asal gerilme yüzeyi içerisindeki c = 0 iken Pekleşen Zemin Modeli [13]…….…… 76
Şekil 5.8 : Pekleşen Zemin Modeli ile zeminde meydana gelen gerilme – şekil değitirme davranışı [13]…….…….. 77
Şekil 5.9 : Modellenen hesap adımları …….…..... 79
Şekil 5.10 : Sabit kazık çapında yüzeyden belirli derinliklerde kazık aralığına göre kazığa gelen yatay kuvvet – içsel sürtünme açısı grafiği…… 85
Şekil 5.11 : Sabit kazık aralığında yüzeyden belirli derinliklerde kazık çapına göre kazığa gelen yatay kuvvet – içsel sürtünme açısı grafiği…… 86
Şekil 5.12 : 3m kazı anında sabit kazık çapı (d=1000mm) ve kazık aralığında içsel sürtünme açısına göre kazığa gelen yatay deplasman – derinlik grafiği……. 82 91
Şekil 5.13 : Göçme anında sabit kazık çapı (d = 1000mm) ve kazık aralığında içsel sürtünme açısına göre kazığa gelen yatay deplasman – derinlik grafiği……. 96
Şekil 5.14 :Yüzeyden belirli derinliklerde sabit zemin türünde kazık çapına göre kazığa gelen yatay kuvvet – kazık aralığı/kazık çapı grafiği.. 100
Şekil 5.15 :Sabit kazık çapı ve yüzeyden belirli derinliklerde içsel sürtünme açısına göre kazığa gelen yatay kuvvet – kazık aralığı/kazık çapı grafiği……. 103
Şekil 5.16 : Sabit zemin türü ve yüzeyden belirli derinliklerde kazık aralıklarına göre kazığa gelen yatay kuvvet – kazık çapı grafiği… 108
Şekil 5.17 :Sabit kazık aralığı ve yüzeyden belirli derinliklerde içsel sürtünme açısına göre kazığa gelen yatay kuvvet – kazık çapı grafiği…….. 109
Şekil 5.18 : 3m kazı anında sabit zemin türü ve kazık aralığında kazık çapına göre kazığa gelen yatay deplasman – derinlik grafiği……. 114
Şekil 5.19 : Göçme anında sabit zemin türü ve kazık aralığında kazık çapına göre kazığa gelen yatay deplasman – derinlik grafiği……. 119
Şekil 6.1 : Kazıklar arasında varolan zeminin deplasman kontürleri…….. 123
Şekil 6.2 : Kazıklar arasında varolan zeminin deplasman hareket yönleri…. 123
Şekil 6.3 : Kazıklar arasında kemerlenme etkisi ile oluşan asal gerilme yönleri……. 124

Şekil A.1 : d = 600mm için s = d aralığı …….. 128
Şekil A.2 : d = 600mm için s = 1.5d aralığı…….. 128
Şekil A.3 : d = 600mm için s = 2d aralığı ……..... 128
Şekil A.4 : d = 600mm için s = 2.5d aralığı…….. 129
Şekil A.5 : d = 600mm için s = 3d aralığı …… 129
Şekil A.6 : d = 800mm için s = d aralığı …….. 130
Şekil A.7 : d = 800mm için s = 1.5d aralığı…….. 130
Şekil A.8 : d = 800mm için s = 2d aralığı ……..... 130
Şekil A.9 : d = 800mm için s = 2.5d aralığı…….. 131
Şekil A.10 : d = 800mm için s = 3d aralığı …… 131
Şekil A.11 : d = 1000mm için s = d aralığı …… 132
Şekil A.12 : d = 1000mm için s = 1.5d aralığı…… 132
Şekil A.13 : d = 1000mm için s = 2d aralığı ……..... 132
Şekil A.14 : d = 1000mm için s = 2.5d aralığı…… 133
Şekil A.15 : d = 1000mm için s = 3d aralığı …….. 133
Şekil B.1 : Sonlu elemanlar ağı……. …… 134
Şekil B.2 : 3m kazı anı için deforme olmuş sonlu elemanlar ağı..…… 135
Şekil B.3 : 3m kazı anı için kazıklar arasında varolan zeminin deplasman kontürleri…….. 137
Şekil B.4 : 3m kazı anı için kazıklar arasında varolan zeminin deplasman kontürleri çizgileri…… 137
Şekil B.5 : 3m kazı anı için kazıklar arasında varolan zeminin deplasman hareket yönleri……. 138
Şekil B.6 :3m kazı anı için kemerlenme etkisi ile oluşan asal gerilme yönleri 138
Şekil B.7 :Göçme anı için deforme olmuş Sonlu elemanlar ağı..……. 139
Şekil B.8 :Göçme anı için kazıklar arasında varolan zeminin deplasman kontürleri……. 141
Şekil B.9 : Göçme anı için kazıklar arasında varolan zeminin deplasman kontürleri çizgileri…… 141
Şekil B.10 : Göçme anı için kazıklar arasında varolan zeminin deplasman hareket yönleri……. 142
Şekil B.11 : Göçme anı için kemerlenme etkisi ile oluşan asal gerilme yönleri 142

SEMBOL LİSTESİ

b	**:** Kazık aralığı
B	**:** Kazık aralığı
c	**:** Kohezyon
C_1	**:** Drenajsız kayma mukavemeti
C_2	**:** Drenajsız kayma mukavemeti
d	**:** Kazık çapı
d	**:** Çubuk kalınlığı
d	**:** Duvar kalınlığı
d_h	**:** Kemer kalınlığı
dF_h	**:** Kemere gelen düşey kuvvet
D	**:** Plaka genişliği
D_1	**:** Kazıklar arsında merkezden merkeze olan uzaklık
D_2	**:** Kazık aralığı
D_r	**:** Kumun relatif sıkılığı
E	**:** Elastisite modülü
EA	**:** Normal rijitlik
EI	**:** Eğilme rijitliği
E_{50}^{ref}	**:** Üç eksenli deneylerde drene edilmiş standart ikinci elastisite modülü
E_{oed}^{ref}	**:** Ödometre yükleme rijitliği
E_{ur}^{ref}	**:** Yeniden yükleme – boşaltma rijitliği
f	**:** Kemerin yüksekliği
fp	**:** Grup etkisi
H	**:** Derinlik
H	**:** Duvar yüksekliği
I_1 I_2 I_3	**:** Deformasyon invaryantları
I_1 I_2 I_3	**:** Deformasyon invaryantları
k	**:** Rijitlik matrisi
k_v	**:** Düşey permeabilite katsayısı
k_h	**:** Yatay permeabilite katsayısı
K	**:** Toprak basıncı katsayısı
K_0^{nc}	**:** Normal konsolidasyon için toprak basıncı katsayısı
K_a	**:** Aktif rankine toprak basıncı katsayısı
K_p	**:** Pasif rankine toprak basıncı katsayısı
M_{crit}	**:** Göçmenin kritik olduğu genişlik
M_m	**:** Optimum relatif genişlik
M_m	**:** Optimum relatif genişlik
N_p	**:** Kayma yüzeyi üzerinde kayan zemin için 3 - 4
N_p	**:** Kayma yüzeyi altında dengede duran zemin için 8 – 12
N_ϕ	**:** Boyutsuz katsayı
p	**:** Azaltma faktörü
p^{ref}	**:** Rijitlik için referans gerilmesi
P	**:** Efektif düşey yük

$\mathbf{P}$: Kazıkların grup etkisi faktörü
$\mathbf{P_{min}}$: Kazıklara etkiyen minimum yük
$\mathbf{P_0}$: Geostatik kuvvet
$\mathbf{P_u}$: Kazığa gelen nihai gerilme
$\mathbf{P_{ui}}$: Grup içerisindeki kazığa gelen kuvvet
$\mathbf{P_{us}}$: Tek kazığa gelen kuvvet
$\mathbf{P_{y1}}$: Kayan zeminin nihai zemin basıncı
$\mathbf{P_{y2}}$: Sabit zeminin nihai zemin basıncı
$\mathbf{P_z}$: Kazıklar üzerine etkiyen yanal kuvvet
$\mathbf{q}$: Uniform yük
$\mathbf{q}$: Deplasman vektörü
$\mathbf{Q}$: Düğüm noktası vektörü
$\mathbf{r}$: Düğüm noktası deplasman vektörü
$\mathbf{R}$: Toplam yük faktörü
$\mathbf{R_f}$: Göçme oranı
$\mathbf{s}$: Kazık aralığı
$\mathbf{S_h}$: Yatayda kazık aralığı
$\mathbf{S_v}$: Düşeyde kazık aralığı
$\mathbf{S_2}$: Kazığın merkezi ile kazının köşesi arasındaki uzaklık
$\mathbf{w}$: Kazık çapı ya da eni
$\mathbf{W}$: Zemin ağırlığı
$\mathbf{z}$: Kazıklar üzerine gelen zemin yükü mesafesi
$\mathbf{z}$: Zemin yüzeyinden olan derinlik
$\boldsymbol{\varepsilon}$: Deplasman vektörü
$\boldsymbol{\varepsilon_x}$ $\boldsymbol{\varepsilon_y}$ $\boldsymbol{\varepsilon_z}$: Normal deformasyon
$\boldsymbol{Ø}$: Zeminin içsel sürtünme açısı
$\boldsymbol{\psi}$: Zeminin genleşme açısı
$\boldsymbol{\lambda}$: Zeminin birim hacim ağırlığı
$\boldsymbol{\gamma}$: Zeminin birim hacim ağırlığı
$\boldsymbol{\gamma_{xy}}$ $\boldsymbol{\gamma_{yz}}$ $\boldsymbol{\gamma_{zx}}$: Kayma deformasyonları
$\boldsymbol{\gamma}$: Zeminin birim hacim ağırlığı
$\boldsymbol{\delta}$: Duvar sürtünme açısı
$\boldsymbol{\delta}$: Zemin deplasmanı
$\boldsymbol{\acute{\eta}}$: Plastik viskozite
$\boldsymbol{\acute{\upsilon}_1}$: Zeminin akış hızı
$\boldsymbol{\acute{\upsilon}}$: Poisson oranı
$\boldsymbol{\acute{\upsilon}_{ur}}$: Yeniden yükleme boşaltma için poisson oranı
$\boldsymbol{\beta}$: Dolgu zeminin sürtünme açısı
$\boldsymbol{\tau}$: Kayma gerilmesi
$\boldsymbol{\tau_x}$ $\boldsymbol{\tau_y}$ $\boldsymbol{\tau_z}$: Kayma gerilmesi bileşenleri
$\boldsymbol{\sigma_x}$ $\boldsymbol{\sigma_y}$ $\boldsymbol{\sigma_z}$: Normal gerilme bileşenleri
$\boldsymbol{\sigma_{hr}}$: Yanal gerilme
$\boldsymbol{\sigma_{vr}}$: Düşey gerilme
$\boldsymbol{\sigma_{nv}}$: Düşey normal gerilme
$\boldsymbol{\sigma_{nh}}$: Yatay normal gerilme
$\boldsymbol{\sigma_v'}$: Etkili jeolojik yük gerilmesi
$\boldsymbol{\sigma_{tension}}$: Çekme gerilmesi
$\boldsymbol{\sigma^T}$: Gerilme vektörü

1. GİRİŞ

Günümüzde kazıklar ve kazık grupları inşaat mühendisliğinde çok önemli bir yere sahiptir. Kazıklar; yapı yüklerinin sağlam zeminlere aktarılması ile düşey, liman ve kıyı yapılarında gemi çarpması, açık deniz yapılarında rüzgar ve dalga yükleri vs. ile yatay yüklere maruz kalabildiği gibi; toprak seddelerinin oturması, kazık çakma işlemleri, kazıların geçici veya kalıcı olarak desteklenmesi, tünel inşaası, şev kaymaları ya da heyelanlar sırasında bir takım yanal ve düşey zemin hareketlerine de maruz kalabilmektedir.

Yanal zemin hareketlerine maruz kalan kazıklar pasif kazık, yapıdan gelen yanal yüklere maruz kalan kazıklara ise aktif kazık denmektedir [4]. Pasif kazıkların kullanımı ile ortaya çıkan sorunlar aktif kazıklara göre çok daha zor çözülebilmektedir. Çünkü kazıdan dolayı pasif kazıklara etkiyen yanal kuvvetler, kazık ve çevre zemin arasındaki etkileşime bağlı olmakta ve bu etkileşim ne yazık ki tam olarak bilinememektedir. Yanal zemin hareketlerine maruz kalan her bir kazığa iki çeşit zemin yükü etki etmektedir. Bunlardan birincisi kazıklı dayanma yapısına gelen yanal toprak basıncı, ikincisi ise zeminin kemerlenmesinden dolayı kazıklara aktarılan basınçtır. Şu ana kadar model deneyleri ve sonlu elemanlar metodu kullanarak yapılan araştırmalarda, şev içerisinde yanal zemin hareketine maruz kalan kazık ve kazık gruplarının davranışları, kazıkların birbirlerine olan etkileri, kazıklar ve çevre zemin arasında oluşan yük transferini sağlayan zeminin kemerlenmesi ve kemerlenmeyi etkileyen faktörler üzerinde durulmuştur. Ancak ayrık kazıklı dayanma yapıları üzerinde, zeminin kemerlenmesi ve kemerlenmeyi etkileyen faktörler hakkında şu ana kadar herhangi bir çalışma yapılmamıştır.

Bu nedenle tez çalışması kapsamında, yanal zemin hareketine maruz kalan ayrık kazıklı dayanma yapılarının direnç mekanizması kemerlenme etkisi göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Tez çalışmasının 2. bölümünde zeminde meydana gelen kemerlenme olayı ve mühendislik uygulamalarındaki yeri, 3. bölümünde zeminin kemerlenme mekanizması üzerine yapılmış olan birtakım çalışmalar verilerek açıklanmaya çalışılmış ve daha sonra kazıklar üzerine etkiyen yanal yükleri

tahmin etmek için kullanılan metodlar ve yanal zemin hareketi sonucunda meydana gelebilecek göçme durumları anlatılmıştır. 4. bölümde sonlu elemanlar yöntemi ve kullanılan PLAXIS 3D Foundation adlı sonlu elemanlar yazılımının özellikleri verilerek, 5. bölümde ise oluşturulan modellerin geometrisi, sonlu elemanlar ağı, kullanılan yapısal modeller ve zemin parametreleri hakkında bilgi verildikten sonra; sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler ve bu analizlerin sonuçları kazığa gelen yatay kuvvet – kazık aralığı, kazığa gelen yatay kuvvet – kazık çapı, kazığa gelen yatay kuvvet – içsel sürtünme açısı ve yatay deplasman – derinlik ilişkileri ele alınarak kazıklar arasındaki zeminde oluşan kemerlenmeye olan etkileri değerlendirilmiştir. Son bölümde ise analiz sonuçları kısaca özetlenerek yorumlanmıştır.

2. ZEMİNİN KEMERLENMESİ

2.1. Zeminde Kemerlenme Olayının Tanımı

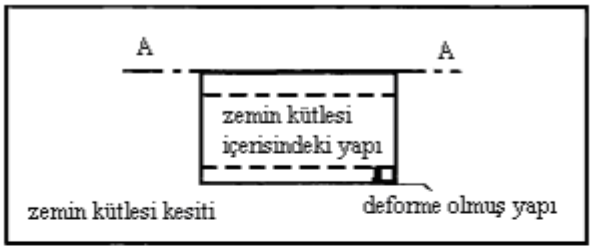
Terzaghi (1943) akan zemin kütlesinden komşu rijit zemine doğru transfer olan gerilme olayını yapmış olduğu bir çalışma ile açıklamıştır. Terzaghi'ye göre; sağlam tabana oturan bir zemin kütlesinde, tabanın bir kısmı sabit kalıp diğer kısmı serbest kalarak aşağıya doğru çökerse, çöken kısmın üzerinde bulunan zemin, sabit kalan kütle arasından aşağıya doğru hareket etmeye başlar. Zemin içerisindeki bu hareket ile, sabit kalan ve hareket eden kısımlar arasındaki temas düzlemi boyunca uyanan kayma dirençleri, hareket eden kısmı ilkel durumda tutmaya çalıştığı için, tabanın çöken kısmına gelen basınçları azaltırken, tabanın sabit kalan kısmına gelen basınçları çoğaltır [16].

Hareket eden zemin kütlesinden sabit kalan kütleye olan bu basınç aktarılması olayına Kemerlenme Olayı adı verilmiş ve tabanının çöken kısmı üzerinde zemin kemerleniyor denmiştir. Terzaghi zeminde kemerlenme teorisinin kullanılabilirliğine dikkat çekmiş ve "Kemerlenme zeminler içerisinde hem arazi hem laboratuarda karşılaşılan en evrensel olaylardan biridir." şeklinde ifade etmiştir [16].

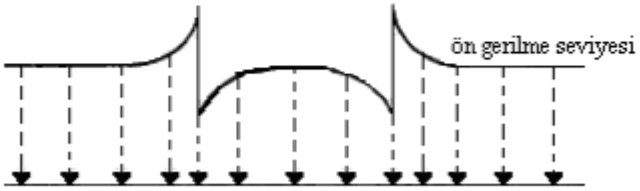
İçerisinde zemin kütlesi bulunduran yatay veya düşey olarak teşkil edilmiş ve bölgesel deplasmana maruz kalan tüm yapılarda mutlaka kemerlenme meydana gelebilmektedir. Çünkü kemerlenme sadece zemindeki kayma gerilmelerinin mobilize olmasıyla gerçekleşmektedir[3]. Terzaghi (1936) zeminlerdeki kemerlenme olayını aktif ve pasif durum olmak üzere ikiye ayırmıştır [15].

Aktif durum, tabanın ya da yapının çevre zemine göre daha fazla sıkışmaya eğilimli olduğu ya da zemin kütlesinden dışarı doğru hareket ettiği durumu göstermektedir. İki düşey duvar arasında granuler malzemenin yerçekimi sayesinde akışında (silo problemlerinde) veya tünellerin inşa edilmesi sırasında kazı yapılmasından sonra zeminde meydana gelen gerilme azalmalarının değerlendirilmesinde aktif durumun varlığı söz konusudur. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere sistem herhangi bir yüke maruz kaldığında, yapı aşağıya doğru hareket etmektedir. Böylece yapı üzerine daha az

gerilme gelirken, komşu zemine gelen gerilme konsantrasyonu çok daha fazla olmaktadır. Zemin içerisindeki daneler, yapının bir kısmından diğer bir kısmına doğru daha sıkı bir hale gelmektedir ve maksimum kemerlenme meydana geldiğinde, yapıya gelen basınç minimuma düşmektedir. Bununla birlikte, eğer yapı deforme olursa, yapı üzerindeki tüm zemin kütlesi yapı ile tamamen göçecektir [15].



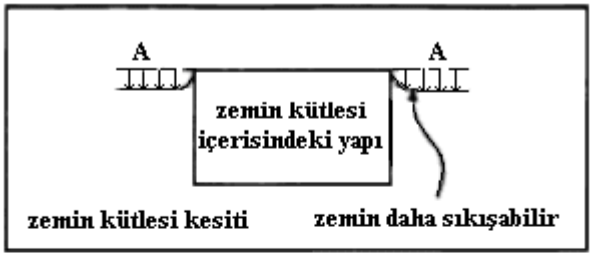
a) komşu zemin kütlesinden daha fazla deforme olan yapı



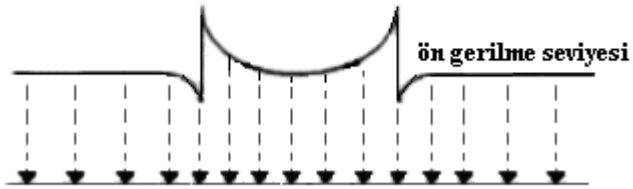
b) A-A düzlemine gelen gerilme dağılımı

Şekil 2.1 : Aktif Kemerlenme Etkisi [15]

Pasif durum ise, çevre zeminin yapıya göre daha sıkışabilir bir eğilimde olduğu durumu göstermektedir. Birçok yüzeyde ve derinde inşaa edilen su yapılarında okyanus altına yukarı yöndeki kuvvetleri iletmek amacıyla kullanılan ankrajların kuvvetlerinin değerlendirilmesinde, zemine gömülmüş olan yapıların ankraj olarak modelize edildiği durumlarda ya da okyanus kaynaklarından yararlanmak amacı ile zemin patlatılarak okyanusun altında tabakalara gömülmüş olan her türlü objede oluşan patlama kuvvetlerinin hesaplanmasında pasif durumun varlığı söz konusudur. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere, zeminin büyük deplasmanlar altında sıkışması nedeniyle, sabit kalan kısım (yapı) ile hareket eden kısımlar (zemin) arasındaki temas düzlemi boyunca uyanan kayma dirençleri, hareket eden kısmı ilkel durumda tutmaya çalıştığı için, çöken zemine gelen basınçları azaltırken, tabana gelen basınçları arttırmakta ve böylece zeminde pasif kemerlenme durumu gerçekleşmektedir [15].



a) yapıdan daha fazla sıkışabilir olan zemin

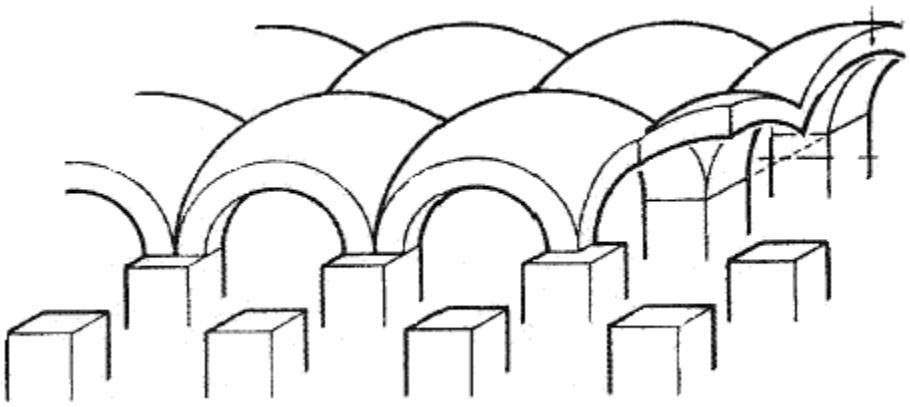


b) A-A düzlemine gelen gerilme dağılımı

Şekil 2.2 : Pasif Kemerlenme Etkisi [15]

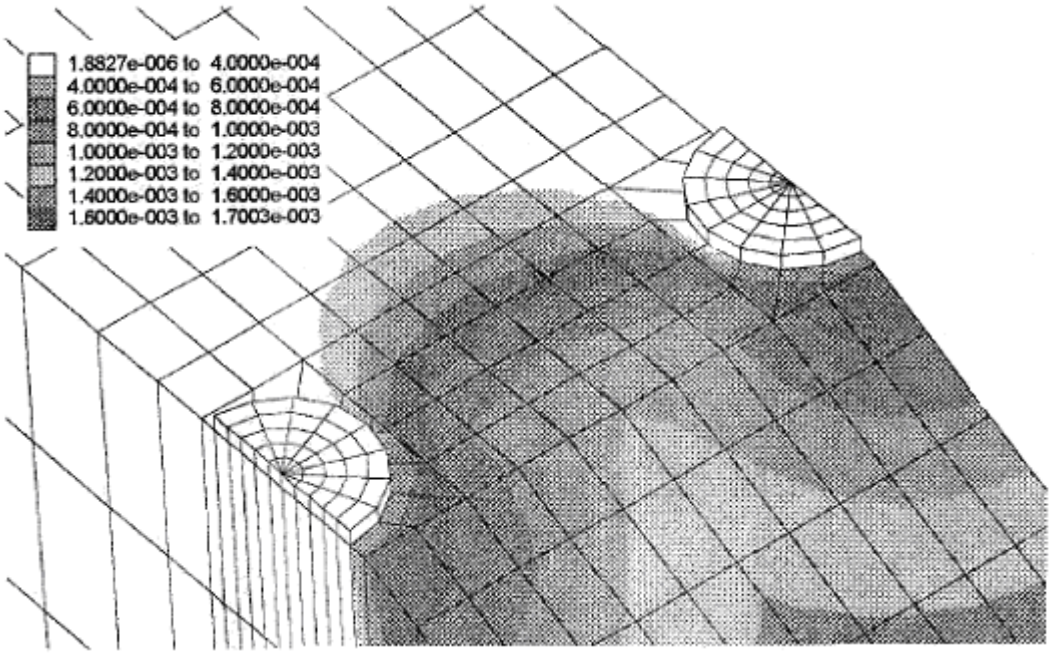
2.2. Mühendislik Uygulamalarında Zemin Kemerlenmesi

Tünel, kanal gibi yeraltı yapılarının tasarımı, düşey yönde zemin hareketi nedeniyle meydana gelen zeminin kemerlenme durumunun bilinmesi ile çok daha iyi bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca Şekil 2.3'te gösterildiği üzere, Hewlett ve Randolph (1988) tarafından kazıklı toprak seddelerinin tasarımında kazık başlığı üzerindeki zeminin düşey yöndeki davranışı ile toprak seddesi yükünün kazıklara transfer edilmesinde ve farklı oturmaların kontrol edilmesinde Zeminin Kemerlenme olayından büyük ölçüde yararlanmıştır. Böylelikle düşey yöndeki kemerlenme etkisi mühendislik uygulamalarında yerini almaktadır [4].



Şekil 2.3 : Düşey Yöndeki Kemerlenme Etkisi [4]

Zeminin Kemerlenme etkisinin mühendislik uygulamalarında düşey yöndeki davranışından yaralanıldığı gibi, yatay yöndeki davranışından da yararlanılmaktadır. Derin kazıların diyafram duvar, kazıklı perde, istinat yapıları vs. gibi yapılar ile geçici veya kalıcı olarak desteklenmesinde, şevin stabilitesinin arttırılmasında veya şevlerin kaymasının önlenmesinde kullanılan ayrık kazıklı perde tasarımında zeminin kemerlenme etkisinin yatay yöndeki davranışından yararlanılmaktadır. Şekil 2.4'te kazıklı şev tasarımında meydana gelen yatay yöndeki kemerlenme etkisi gösterilmiştir[4].



Şekil 2.4 : Yatay Yönde Deplasmana Bağlı Kemerlenme Etkisi [4]

Düşey ve yatay kemerlenme etkisi arasındaki en büyük farklılıklardan biri; düşey yönde zemin hareketi nedeniyle meydana gelen kemerlenme etkisi yerçekimi yükü sebebiyle, yatay yönde zemin hareketi nedeniyle meydana gelen kemerlenme etkisi ise sabit yerçekimi yüklemesi (zeminin kendi ağırlığı altında yüklenmiş hali) altında zemin hareketi nedeniyle meydana gelmesidir [4].

3. KEMERLENME MEKANİZMASI

Kayan zemin kütlesinden komşu sabit kütleye aktarılan gerilme transferi olarak tanımlanan zeminin kemerlenmesi; içerisinde zemin kütlesi bulunduran yatay veya düşey olarak teşkil edilmiş ve bölgesel deplasmana maruz kalmış olan tüm yapılarda meydana gelebilmektedir. Kemerlenme etkisini incelemek ve bu mekanizmayı geliştirmek adına birçok analitik, numerik ve deneysel metod geliştirilmiştir. Kemerlenme mekanizmasının gelişiminde yardımcı olan analitik, numerik ve deneysel metodlar, düşey ve yatay yönde zemin hareketi nedeniyle oluşan kemerlenme üzerinde yapılan çalışmalar olmak üzere aşağıda iki grupta anlatılmıştır.

3.1. Düşey Yönde Zemin Hareketi Nedeniyle Oluşan Kemerlenme Üzerine Yapılan Çalışmalar

1913 yılında Iowa'daki drenaj mühendislerinin yeraltı kanallarının yapısal göçmeleri hakkındaki deneyimlerinden sonra, Marston ve Anderson gömülü boru hatları üzerine gelen zemin yüklerini değerlendirmeye başlamıştır. 1895 yılında geliştirilen Jansen'in silo teorisi göz önüne alınarak yepyeni bir teorinin geliştirilmesi amaçlanmıştır [10]. Terzaghi (1936) düşey yönde zemin hareketi sebebiyle meydana gelen kemerlenme etkisini incelemek amacıyla yapmış olduğu plaka deney testi ile büyük yankı uyandırmış ve bu teoriyi geliştirmek adına birçok bilim adamı (Engesser 1882; Bierbaumer 1913; Krynine 1945; Bolton 1979; Vardoulakis et al. 1981; Handy 1985; Hewlett ve Randolph 1988; Low ve diğ. 1994; Finn 1963; Chelapati 1964; Davis 1968; Gunn 1980; Evan 1983; Kautsabeloulis ve Griffiths 1989; Tanaka ve Sakai 1993; Iglesia 1991) tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar teorik ve deneysel çalışmalar olarak aşağıda özetlenmektedir.

1. Teorik Çalışmalar
    - Limit Denge Teorileri
    - Elastik Teoriler
    - Plastisiteye Dayanan Teoriler

- Numerik Teoriler

2. Deneysel Çalışmalar

- 1g testleri
- Santrifüj Modelleme

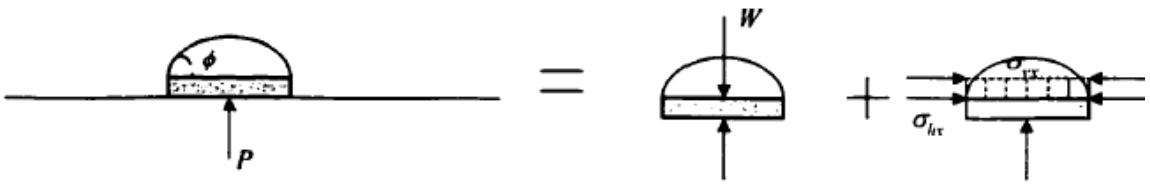
3.1.1. Teorik Çalışmalar

3.1.1.1. Limit Denge Teorileri

Engesser Teorisi (1882)

Engesser (1882) tarafından yapılan çalışmalarda, düşey zemin hareketine maruz kalan plakanın (yapının) her iki ucundan yatayla ϕ açısı (zeminin içsel sürtünme açısı) yapacak şekilde parabolik bir kemerin meydana geldiği; plakaya etki eden yükün ise, kemer altındaki zeminin ağırlığı ve sadece plaka üzerinde artan yanal gerilmenin etkisi ile oluşan yukarı yöndeki düşey gerilmeyi içermekte olduğu ileri sürülmüştür. Engesser'e göre plaka üzerine etkiyen yükü azaltma da yardımcı olan bu düşey gerilme, hayali bir kemerin oluştuğunun düşünülmesi ile jeolojik yükün plakanın her iki yanına transfer olması ile meydana gelebilmektedir [15].

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, plakaya etki eden efektif düşey yük P, kemer altında bulunan zeminin ağırlığı W ve hemen plaka üzerinde artan yanal gerilmenin etkisi σ_{hr} ile oluşan yukarı yöndeki düşey gerilmeden σ_{vr} oluşmaktadır [15].



Şekil 3.1 : Engesser'in Kemerlenme Etkisi Üzerine Yaklaşımı [15]

Yatayın x aksı, düşeyin ise y aksı kabul edilmesiyle, kemerin merkezi göz önünde bulundurularak plakanın sol ucundan sağ ucuna doğru oluşan kemerin parabolik şekli aşağıda 3.1 denklemi ile tanımlanmıştır [15].

$$y = a_p x^2 + b_p x + c_p \qquad \textbf{(3.1)}$$

Parabolik şeklin D genişliğindeki plaka boyunca yatayla ϕ açısı yaparak oluştuğu kabul edildiğinden, parabolik denklem;

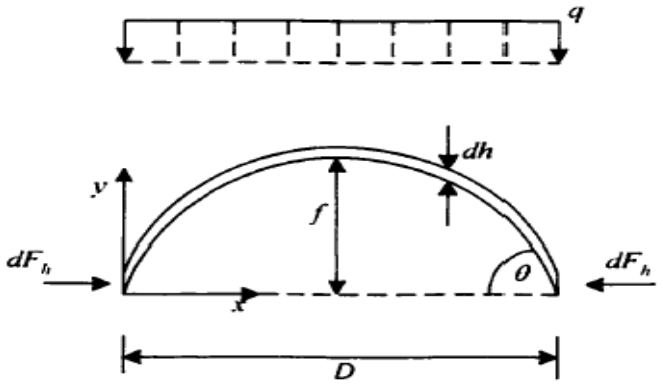
$$y = -\frac{\tan\phi}{D}x^2 + \tan\phi.x \qquad \textbf{(3.2)}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Plakanın uzunluk başına etkiyen ağırlığı, parabolik şeklin altında kalan alan ile zeminin birim hacim ağırlığının çarpılması ile aşağıda verilen 3.3 denkleminde olduğu gibi hesaplanabilmektedir.

$$W = \gamma\int_0^D\left(-\frac{\tan\phi}{D}x^2 + \tan\phi.x\right)dx = \gamma\left(-\frac{\tan\phi}{3D}x^3 + \frac{\tan\phi}{2}x^2\right)I_0^D \qquad \textbf{(3.3)}$$

$$W = \frac{\gamma D^2\tan\phi}{6}$$

Engesser, zemin basıncının plakanın yanlarına dh kalınlığında aynı parabolik yapıya sahip hayali kemer ile aktarılmasında büyük etkisi olan σ_{vr} düşey gerilmesi değerinin Şekil 3.2'de görüldüğü üzere plaka genişliği boyunca kemer üzerine uniform olarak etki ettiğini ileri sürmüştür.



Şekil 3.2 : Hayali Kemer Üzerine Etkiyen Kuvvetlerin Gösterilmesi [15]

Kemerin hemen altında etki eden σ_{hr}, dh değerine bölünerek dF_h yanal kuvveti bulunmaktadır. Zeminin aktif Rankine durumu içerisinde olduğu düşünülerek, σ_{vr};

$$\sigma_{vr} = K_a \times \sigma_{hr} \qquad \textbf{(3.4)}$$

ile hesaplanmaktadır. Burada K_a = aktif Rankine toprak basıncı katsayısıdır.

$$K_a = \frac{1 - sin\phi}{1 + sin\phi} \tag{3.5}$$

Bu denklemde görüldüğü üzere σ_{vr} değeri σ_{hr} değerinden küçüktür. σ_{vr} değeri ayrıca kompansatör görevi gören γ^* değeri gösterilmek istenirse, $q = dh\left(\gamma - \frac{\sigma_{vr}}{H}\right)$ ile tanımlanmakta, aynı zamanda $\sigma_{vr} = \gamma^* H$ olabileceğinden, net uniform yük q;

$$q = dH\left(\gamma - \frac{\sigma_{vr}}{H}\right) \tag{3.6}$$

değeri ile gösterilmektedir. D genişliğinde plakanın yatay uçları arasında ϕ açısı ile oluşan parabolik kemer için, uniform yük q nedeniyle oluşan yanal kuvvet dF_h;

$$dF_h = \frac{qD^2}{8f} = \frac{qD}{2\tan\phi} \tag{3.7}$$

denklemi ile gösterilmiştir. Burada;

f = kemerin yüksekliği $\left(f = \frac{D\tan\phi}{4}\right)$

olmaktadır. Bu durumda yanal gerilme σ_{hr} ve dolayısıyla σ_{vr} ,

$$\sigma_{hr} = \frac{dF_h}{dh} = \frac{D}{2\tan\theta}\left(\gamma - \frac{\sigma_{vr}}{H}\right) \quad , \quad \sigma_{vr} = \frac{HD\gamma K_a}{2H\tan\theta + DK_a} \tag{3.8}$$

şeklinde bulunmuştur.

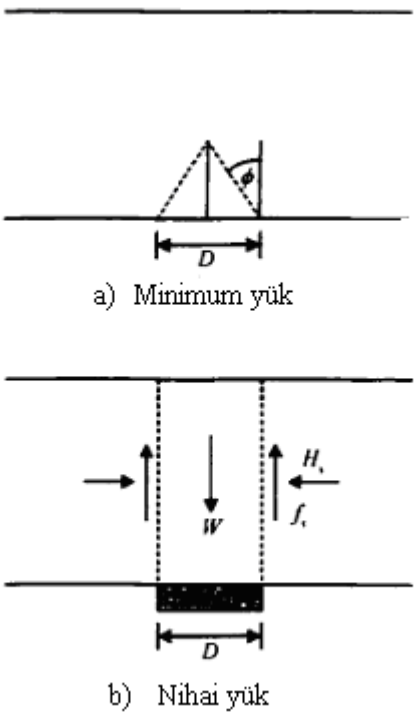
Engesser minimum σ_{vr} için $\theta = \phi$ olacağını, plakaya etkiyen efektif kuvvetin ise σ_{vr} düşey gerilmesinden elde edilen kuvvetlerin toplamı ve kemer altında varmış gibi farz edilen zemin kütlesinin ağırlığı W değerinin toplamı ile elde edilebileceğini ileri sürmüştür. P kuvveti;

$$P = D^2\gamma\left[\frac{HK_a}{2H\tan\phi + DK_a} + \frac{\tan\phi}{6}\right] \tag{3.9}$$

şeklinde tahmin edilebilmektedir. Fakat bu denklem sadece $H/D\rangle 1.5$ olduğu durum için geçerlidir [15].

Bierbaumer Teorisi (1913)

Bierbaumer (1913) tarafından yapılan çalışmalarda aktif durumdaki kemerlenme etkisi durumunda etkiyen minimum yük (yük-deplasman eğrisinin en düşük olduğu durum), Şekil 3.3.a'da gösterildiği üzere düşey zemin hareketine maruz kalan plakanın (yapının) her iki ucundan düşeyle ϕ açısı (zeminin içsel sürtünme açısı) yapacak şekilde üçgen prizma şeklinde bir kemerin meydana geldiği düşünülmüştür.



Şekil 3.3 : Minimum Kuvvetin Hesaplandığı Üçgen Prizma [15]

Plaka üzerine etkiyen minimum yük $P_{\min}$ üçgen prizmanın ağırlığını dengelemektedir.

$$P = \frac{\gamma D^2}{4\tan\phi} \qquad \textbf{(3.10)}$$

Şekil 3.3.b'de gösterildiği üzere, iki düşey göçme düzlemi ile sınırlandırılmış olan zemin kütlesine etkiyen kuvvetlerden maksimum yük bulunabilmektedir. Düşey normal gerilme σ_{nv} değerinin lineer olarak dağıldığı farz edilmiştir. Düşey normal gerilme σ_{nv} değerine bağlı olarakta σ_{nh} değeri;

$$\sigma_{nh} = K\sigma_{nv} = K\gamma H \tag{3.11}$$

şeklinde bulunabilmektedir. σ_{nv} değerinden dolayı yatay normal gerilme σ_{nh} değerinin de lineer olarak dağıldığı farz edilmiştir. Eğer zeminin aktif Rankine durumunda olduğu kabul edilirse aktif toprak basıncı katsayısının $K = K_a = \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi}$ değerini almaktadır. Böylelikle yan yüzeylere etkiyen toplam yatay kuvvet H_s değeri aşağıda 3.12 denklemle hesaplanmaktadır.

$$H_s = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \tag{3.12}$$

Yan yüzeylerdeki sürtünme sayesinde zeminin göçmesi önlenmekte ve f_s;

$$f_s = H_s \tan\phi = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \tan\phi \tag{3.13}$$

değerine eşit olmaktadır. Sonuçta uzunluk başına plaka üzerine gelen net yük;

$$P_{\max} = \gamma H\left(D - K_a H \tan\phi\right) \tag{3.14}$$

değerini almaktadır [15].

Terzaghi Teorisi (1943)

Terzaghi (1943) iki düşey kayma düzlemi arasında sınırlanmış olan bir zemin kütlesinin olduğunu varsayarak temel bir yaklaşım önermiştir. Bu varsayımlar;

1. Analizler düzlem deformasyon davranışı üzerine dayalıdır.
2. Çalışmalar bir zemin kütlesinin yatay elemanının dengesi üzerinde düşünülmüştür.
3. Düşey göçme düzlemlerinde direnç kuvvetine karar vermek için en önemli parametre olan toprak basıncı katsayısı K amprik sabiti olarak davranış göstermektedir.
4. 1g deneysel çalışmaların sonuçları, duvar genişliğinin 2 katından fazla uzaklıkta ki zemin gerilmelerinin plaka yer değiştirmesinden etkilenmediğini göstermiştir [15].

Bu yaklaşımın en büyük dezavantajları;

1. Doğru kayma düzlemi şeklinin olup olmadığı,
2. Göçmeden önce gerilme-deformasyon ilişkisinin bilinmemesi olmuştur.

Terzaghi tarafından yapılmış olan deneylerde incelenmiş gerçek kayma yüzeylerinin Şekil 3.4'te ac ve bd çizgileri ile gösterildiği üzere plaka genişliğinden çok az ötede biraz eğrilerek zemin yüzeyine uzandığına inanılırken, analizlerde kayma yüzeylerinin Şekil 3.4'te ae ve bf çizgileri ile gösterildiği üzere plakanın her iki ucu boyunca düşey olarak yüzeylere uzandığı kabul edilmiştir. Silo basınç yaklaşımı olarak, düşey gerilme σ_v yatay bölümlere karşı bir sabit olduğu farz edilmiştir. Kayma yüzeyleri üzerindeki yatay gerilme σ_h, $K\sigma_v$ değerine eşit olmaktadır (burada K değeri amprik bir sabittir). Buna ek olarak, analizlerde zemin yüzeyi üzerine q sürsaj yükü etkidiği ve zeminde kohezyon (c) olduğu düşünülmüştür. Bu yüzden, kayma yüzeyleri boyunca kayma gerilmesi $\tau = c + \sigma \tan\phi$ şeklinde etkimektedir.

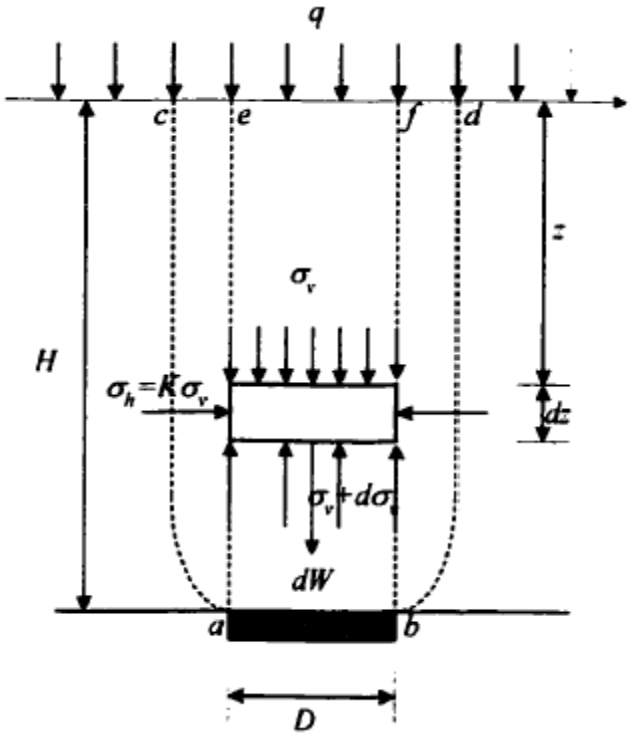
Şekil 3.4'te gösterilen diyagrama etkiyen dz kalınlığında bir zemin parçasında düşey yönde etkiyen kuvvetlerin dengesi;

$$\gamma D dz = D(\sigma_v + d\sigma_v) - D\sigma_v + 2cdz + 2K\sigma_v dz \tan\phi \qquad \textbf{(3.15)}$$

şeklinde oluşturulmuş ve bu lineer diferansiyel sistem $z = 0$'da $\sigma_v = q$ sınır koşullarında çözüldüğünde aşağıda 3.16 denklemi ile ortaya çıkmaktadır.

$$\sigma_v = \frac{D\left(\gamma - \frac{2c}{D}\right)}{2K\tan\phi}\left(1 - e^{-2K\tan\phi\frac{Z}{D}}\right) + qe^{-2K\tan\phi\frac{Z}{D}} \qquad \textbf{(3.16)}$$

Terzaghi, deneysel çalışmaların sonuçları, duvar genişliğinin 2 katından fazla uzaklıkta ki zemin gerilmelerinin plaka yer değiştirmesinden etkilenmediğini ileri sürdüğünden dolayı, kayma direncinin kayma yüzeyinin plakadan $2D$ yukarıya kadar etkili olduğunu ve $2D$ sınırının üstünde kalan jeolojik yükün sürsarj yük olarak etkidiğini ileri sürmüştür. Böylelikle plakanın $2D$ yukarısına düşey olarak



Şekil 3.4 : Plaka Üzerine Gelen Yükün Düşey İki Göçme Düzlemi Yardımıyla Bulunması [15]

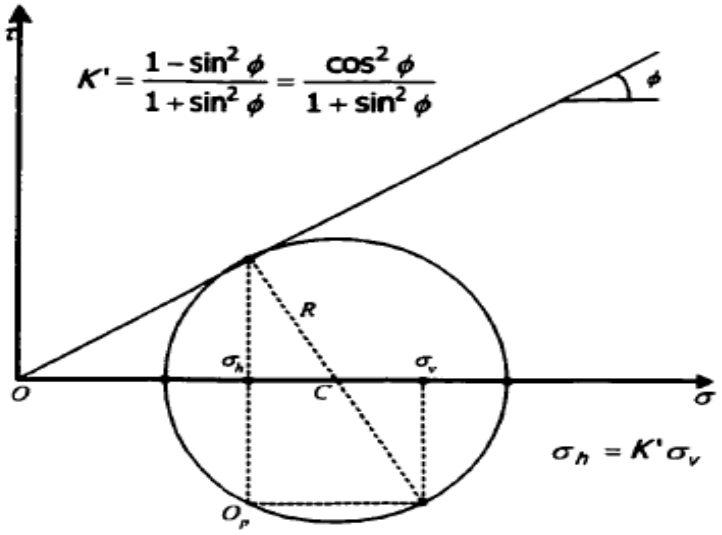
etkiyen yük $q+\gamma(H-2D)$ değerine eşit olmaktadır. Bu durumda teoriye göre plaka üzerine etkiyen yük aşağıda verilen denklem ile bulunmaktadır [15].

$$P=\frac{D^2\left(\gamma-\frac{2c}{D}\right)}{2K\tan\phi}\left(1-e^{-4K\tan\phi}\right)+D\left[c+\gamma\left(H-2D\right)\right]e^{-4K\tan\phi} \qquad \textbf{(3.17)}$$

Krynine Teorisi (1945)

Krynine (1945) Terzaghi'nin yaklaşımında aktif toprak basıncı katsayısının (K_a) kullanımının düşey göçme düzlemleri üzerinde sürtünme olmaması durumunda ancak geçerli olduğunu ileri sürmüştür. Krynine gerçekte Şekil 3.5'te görüldüğü üzere Mohr çemberinden elde edilmiş alternatif K değerinin kullanımı ile sürtünmenin kayma düzlemleri boyunca oluşabildiğini savunmuştur [15].

Elde edilen yeni K değeri, Rankine aktif gerilme teorisinden elde edilen K_a değerine göre oldukça büyüktür. Bu durumda Terzaghi'nin kullanmış olduğu K_a değeri ile plaka üzerine etkiyen kuvvetler tahminlerin üstünde çıkmıştır.



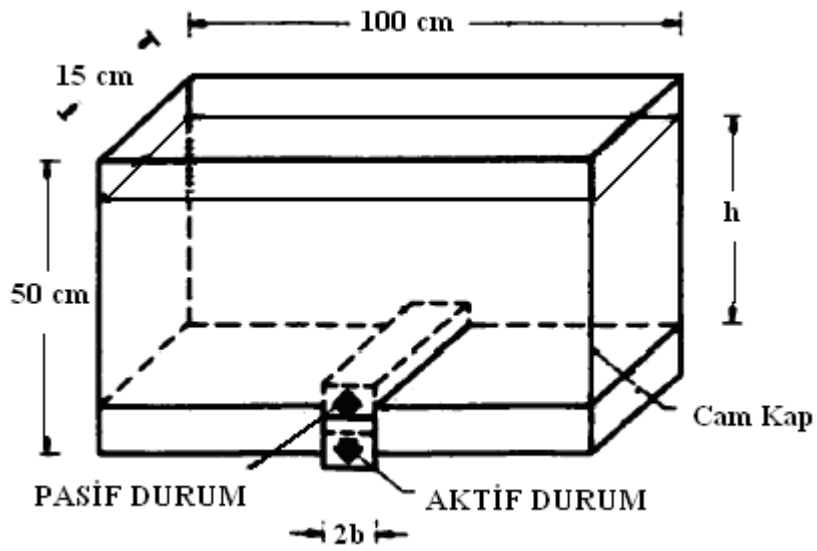
Şekil 3.5 : Mohr Dairesi kullanılarak K Değerinin Hesaplanması [15]

Atkinson ve Potts Teorisi (1977)

Atkinson ve Potts (1977) ve Bolton (1979) tünellerin stabilitesinde kemerlenme etkisini incelemiştir [4].

Vardoulakis ve diğ. Teorisi (1981)

Vardoulakis ve diğ. (1981) kayma yüzeyi bantlarının eğilimine karar vermek amacıyla Şekil 3.6'da görüldüğü üzere küçük ölçekli model deneyleri yapmıştır. Hareket eden kayma bandının statik modeli içsel sınır olarak tasarlanmış, kayma bandının içindeki ve dışındaki gerilme durumlarının plakaya etkiyen gerilmeleri etkilediği farz edilmiştir. Vardoulakis ve diğ. boyutsuz gerilmenin ($\sigma_z/\gamma h$) pasif durum içerisinde oldukça duyarlı olduğunu düşünürken, aktif durum içerisinde kayma bandı sınırına karşı gerilme dağılımının koşullarından dolayı pek duyarlı olmadığını söylemişlerdir. Boyutsuz yük ($\sigma_z/\gamma h$) Terzaghi tarafından ortaya çıkartılmış silo teorisinin modifiye edilmiş şekli ile hesaplanmıştır. Bu teori üzerinde çalışmalar sonucunda ortaya çıkan çözümlerde daha düşük plaka yükleri ile karşılaşılmıştır [15].



Şekil 3.6 : Vardoulakis ve diğ. Tarafından Oluşturulan Model Deneyi [15]

Handy Teorisi (1985)

Handy (1985), daha önce bahsedilmiş olan Krynine (1945) teorisini biraz daha geliştirerek iki duvar arasındaki zemin kütlesinde meydana gelen kemerlenme üzerinde çalışmalar yapmış ve zeminin kemerlenmesini zincir eğrisi şekline benzeyen küçük asal gerilmelerin yörüngesi olarak tanımlamış, kemerlenmenin gelişimini ise asal gerilmelerin dönmesi ile meydana gelebileceğini göstermiştir. Handy'e göre kemerlenme ile birlikte duvarın tabanına yakın olan kısmında düşey ve yatay gerilmeler azalmaktadır [4].

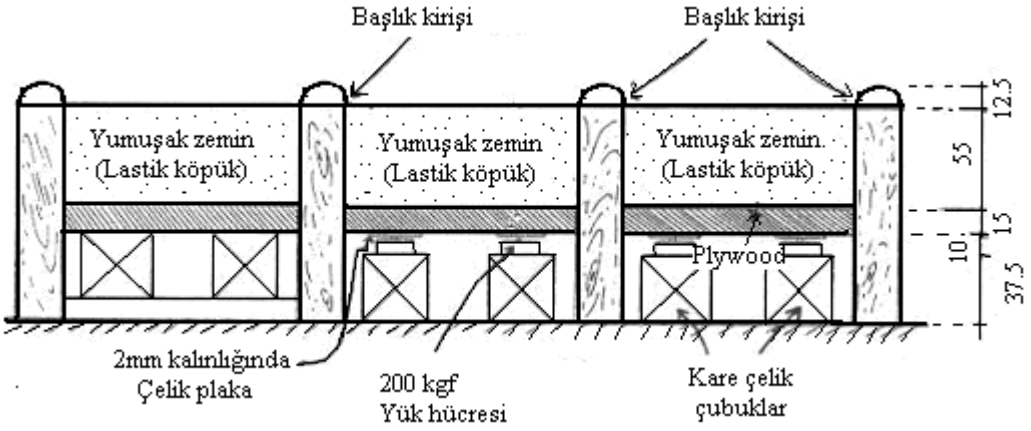
Hewlett ve Randolph Teorisi (1988)

Hewlett ve Randolph (1988) toprak seddeleri altına yerleştirilen kazıklar üzerinde, toprak seddesi yükünün kazıklara transfer edilmesini sağlayan düşey yöndeki kemerlenme olayını Şekil 2.3'te gösterildiği üzere 3 boyutlu olarak incelemiş ve kazık başlıkları arasında uniform kalınlıkta birbirinin üzerine binmeyen yarı-yuvarlak bir kemerlenmenin meydana geldiğini göstermiştir. Hewlett ve Randolph'a göre her bir kemerlenme bölgesi içerisinde büyük ve küçük asal gerilmelerin yönünü gösteren teğetsel ve radyal doğrultular bulunmaktadır [4].

Low ve diğ. Teorisi (1994)

Low ve diğ. (1994), yumuşak zemin üzerine başlıklı kazıklar ile desteklenmiş olan toprak seddelerinde kazıklara aktarılan yük transferinin bulunmasında yardımcı olan kemerlenme etkisini incelemek amacıyla model deneyleri yapmıştır. Şekil 3.7'de

görüldüğü üzere model deneylerinde 1.5m uzunlunda, 0.6m genişliğinde ve 1m yüksekliğinde bir tank içerisine 4 adet kazık başlığını temsil eden tahta bloklar ve yumuşak zemini temsil eden lastik köpük üç bölüm halinde yerleştirilmiştir. Yumuşak zeminin üç bölümü de yumuşak zeminin üzerinde bulunduğu plywood altına yerleştirilen yük hücreleri ile donatılmıştır. Kazık başlıkları ile yumuşak zemini temsil eden lastik köpük arasındaki sürtünmeyi yok etmek için tedbir alınmıştır. En son olarak, kazık başlıkları üzerine dolgu zemini olarak kuru kum dökülmüştür [9].



Şekil 3.7 : Low ve diğ. Tarafından Oluşturulan Model Deneyi Kesiti [9]

Kazık başlığı genişliğinin kazık aralığına oranı 1:4, 1:5, 1:7 ve 1:9 olacak şekilde model deneyleri yapılmıştır. Bu model deneyleri sonucunda;

1. Kazık başlığı tarafından taşınan dolgu yükü payı, kazık başlığının alan oranı ile artmaktadır.
2. Kazık başlığı tarafından taşınan dolgu yükü payı arttıkça, kazık başlığı aralıklarına gelen dolgu yüksekliği oranı da büyük olmaktadır.
3. Kazık başlıkları birbirlerine yakın yerleştirildiğinde yumuşak zemine gelen gerilme artmaktadır.

Low ve diğ. (1994) ayrıca kazık başlığı genişliğinin yarısı kadar kalınlığa sahip olan yarı-silindir zemin kemerinin varsayıldığı 2 boyutlu teorik bir çalışma yapmıştır. Bu teorik çalışmada Hewlett ve Randolph (1988) tarafından yapılan çalışmalardaki varsayımlar aynen alınmıştır. Teorik çalışmaların sonuçları ile deneysel çalışmaların sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine uygun olduğu görülmüştür. Fakat, her ne kadar teorik çalışmalarda boyutsuz parametreler kullanılsa da, ölçek durumları

göz önüne alınmamıştır. Bu yüzden bu konu hakkındaki çalışmalarda santrifüj ya da arazi model deneylerinin yapılması ile sonuçların daha doğru çıkabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca kemerleme üzerindeki yumuşak zeminin sıkışabilirlik etkileri ve yumuşak zemin içerisindeki kazık-zemin etkileşiminin incelenmemesi bu çalışmaların kısıtlarındandır [9].

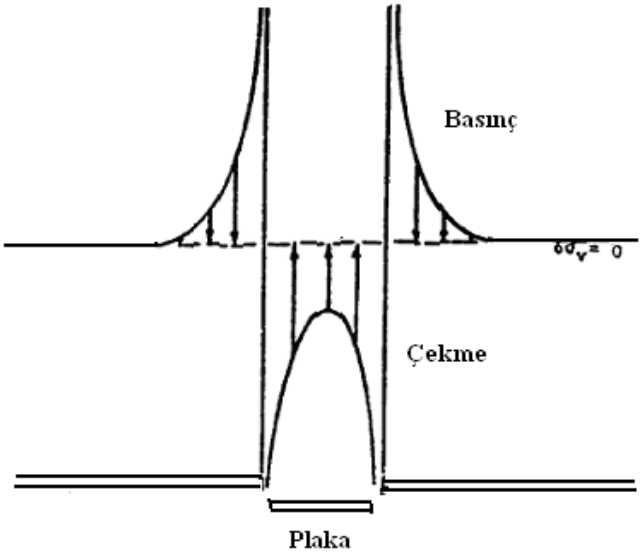
3.1.1.2. Elastik Teoriler

Finn Teorisi (1963)

Finn (1963) Terzaghi'nin aktif plaka deneyi üzerinde elastik çözüm metodu kullanılarak birtakım çalışmalar yapmıştır. Bu teorinin en önemli varsayımları;

1. Problem çok küçük deplasmanlar ile sınırlı bırakılmış ve tamamen elastik davranış gösterdiği düşünülmüştür.
2. Rijit yatay sınır ile plaka üzerine yarı-sonsuz, lineer elastik zemin yerleştirilmiştir.
3. Deplasmandan dolayı gerilme dağılımı, modele gelen gerilme dağılımından ayrı olarak düşünülmüştür.

Toplam gerilme dağılımı, Şekil 3.8'de görüldüğü üzere plakanın uçları arasında (kemerleme bölgesinde) sonsuz çekme gerilmeleri ve plaka yanındaki taban üzerine etkiyen sonsuz basınç gerilmelerinden meydana gelmektedir [15].

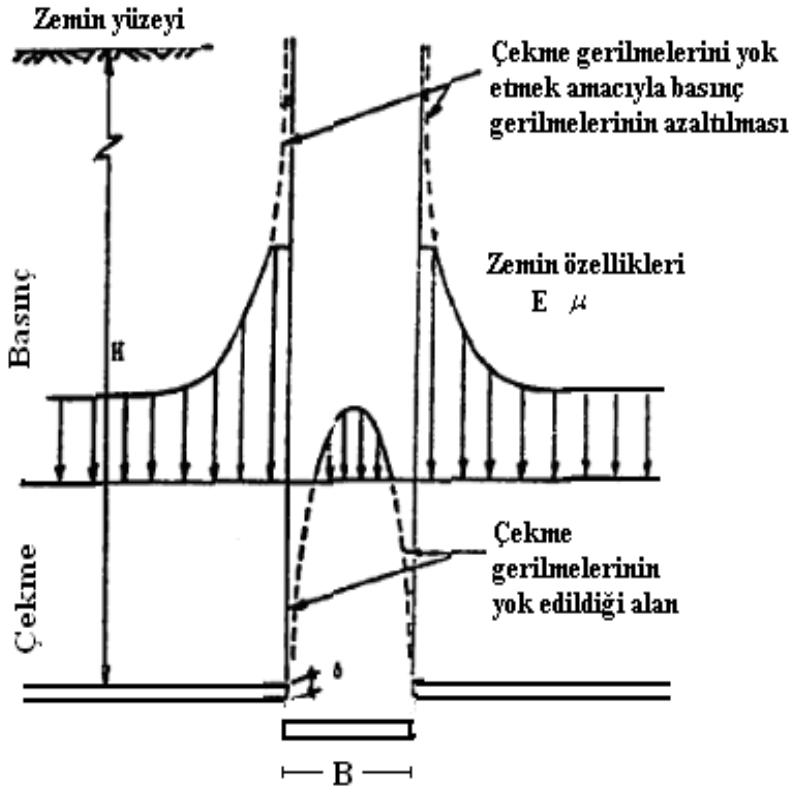


Şekil 3.8 : Aktif Kemerlenme Durumu İçin Düşey Gerilme Dağılımı [15]

Chelapati Teorisi (1964)

Chelapati (1964) kemerlenme oluşumu için gerilme dağılımına karar vermek amacı ile deplasman, malzemenin kendi ağırlığı ve yüzey sürşarj yüklerini süperpoze etmiştir. Çalışmalar sonucunda plaka uçlarında sonsuz gerilmelerin yaratmış olduğu problemin hala devam etmekte olduğu ve bu yüzden granüler zemininin çekmeye karşı direnç sağlayamadığı varsayılmıştır. Her nerede çekme meydana geliyor ise, bu çekme gerilmeleri sıfıra eşitlenerek ayarlanmıştır. Net gerilmeyi dengelemek amacıyla, basınç gerilmeleri aynı zamanda plaka yakınındaki tabanda azaltılmıştır. Şekil 3.9'da bu durum açıkça görülebilmektedir.

Zeminlerde elastisite metodunun kullanımı sadece küçük deformasyon ve deplasmanlar için geçerli olmaktadır. Fakat zeminin kemerlenmesi genellikle büyük deformasyonlara maruz kalındığı durumlarla daha fazla görülmektedir. Bu yüzden kemerlenme etkisi adına plastisiteye dayanan çözümler elastisiteye dayanan çözümlere göre daha doğru çözümler sağlamaktadır [15].



Şekil 3.9 : Elastik Çözümlerde Kemerlenme Oluşumu İçin Çekme Gerilmelerinin Yok Edilmesi Tekniği [15]

3.1.1.3. Plastisiteye Dayanan Teoriler

Davis (1968) ve Gunn (1980) Teorisi

Davis (1968) rijit bloktan oluşan mekanizmaya belirli bir hız verilerek çökmenin meydana geldiği varsayımı ile modellenebilen çok basit üst sınır hesaplamaları oluşturmuştur. Çözüm alabilmek için, dış kuvvetler tarafından yapılan işi, içsel olarak bozunmuş güce eşitlemiştir. Daha sonra Gunn (1980) bu mekanizmayı biraz daha geliştirmiş ve daha rijit bloklar kullanmıştır. Davis Teorisi ile karşılaştırıldığı zaman, Gunn tarafından tasarlamış olan teori üst sınır çözümlerini büyük ölçüde geliştirmiştir. Davis tam olarak doğru çözümü bulmak için, non-lineer denkleme alt sınır çözümü olarak stabilite sayısını vermek amacıyla optimize edilmiş modeli sunmuştur. Gunn tarafından hazırlanan alt sınır içerisinde, daha iyi alt sınır çözümüne öncülük eden statik olarak kabul edilebilir gerilme alanı yapılması için kalın silindirin genleşmesi kullanılmıştır [15].

Evan Teorisi (1983)

Evan (1983) tarafından akış kuralı ile birleştirilmiş plastisite teorisine dayandırılan bir teori geliştirilmiştir. Kayma çizgilerine göre prizma şeklinde oluşturulan model diyagramında; düşey ile ψ (genleşme açısı) değerinde açı ile kayan kısmın yanları oluşturulmuştur. En düşük kuvvet durumunda, açı zeminin içsel sürtünme açısı olan ϕ değerine yaklaşmakta ve prizmadan oluşan malzemenin ağırlığından dolayı plaka üzerine minimum kuvvet etkimektedir. Kuvvetin maksimum olduğu son durumda ise, sınır üzerindeki normal ve kayma gerilmelerinin farklı olması dışında Terzaghi silo teorisine benzemektedir. Evan (1983) aynı zamanda 1g koşullarında plaka deneyleri uygulamış ve sonuçların bu teori ile uyuştuğunu belirtmiştir [15].

3.1.1.4. Numerik Teoriler

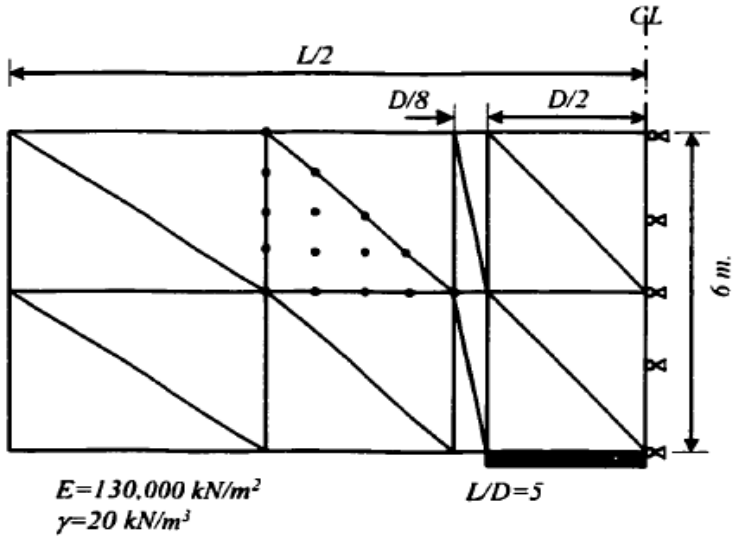
Kautsabeloulis ve Griffiths Teorisi (1989)

Kautsabeloulis ve Griffiths (1989) kemerlenme etkisini incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizlerine dayanan Şekil 3.10'da oluşturulan model üzerinde parametrik çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda yapılan varsayımlar;

1. Zeminin mükemmel elasto-plastik davranış gösterdiği,
2. Akma kuralı ile bileşiminde Mohr Coulomb akma kriteri kullanılmış olduğu,

3. Elemanların 15 düğüm noktalı izoparametrik üçgen elemanlardan oluştuğu,
4. Plaka yanındaki ilk elemanın alt sınırı, geri kalan tutulu bölgenin komşu düğüm noktası ile lineer deplasman dağılımının verildiği kabul edilmiştir.

Aktif ve pasif kemerlenme durumu düşünülerek parametrik çalışmalar yapılmış, bu çalışmalar sonucunda birtakım grafikler oluşturulmuştur [15].



Şekil 3.10 : Kemerlenme Etkisini İncelemek Amacıyla Yapılmış Olan Sonlu Elemanlar Modeli [15]

3.1.2. Deneysel Çalışmalar

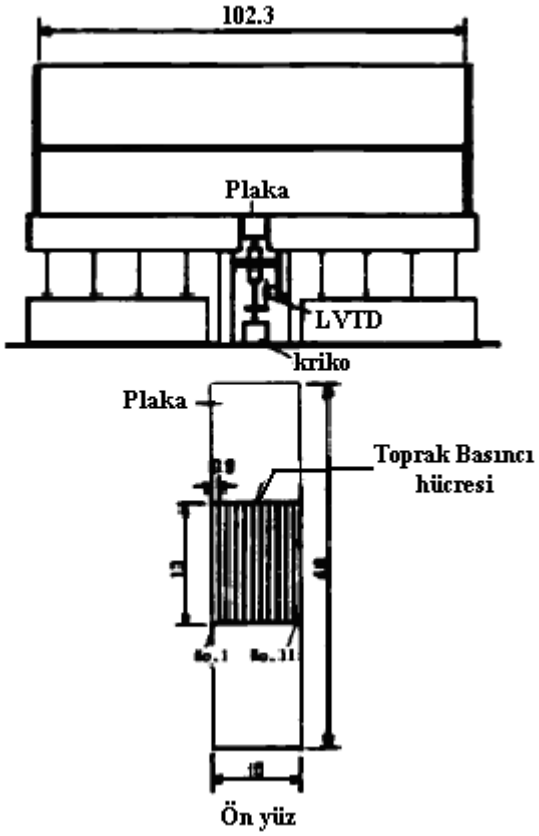
3.1.2.1. 1g Deneyleri

Tanaka ve Sakai Teorisi (1993)

Tanaka ve Sakai (1993) tarafından 2 farklı genişlikte plaka kullanarak kayma bantlarının gelişimlerini incelemek ve yük-deplasman ilişkilerini ölçmek amacıyla aktif ve pasif kemerlenme durumu göz önünde bulundurularak Şekil 3.11'de gösterildiği üzere düzlem deformasyon 1g plaka testleri uygulanmıştır. Kayma bandı etkilerini içeren elasto-plastik model kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar analizleri ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır [15]. Bu karşılaştırma sonucunda;

1. Aktif durumda minimum yük durumundan sonra, hesaplanmış ve incelenmiş toprak basınçları uniform bir dağılım göstermektedir.
2. Aktif durum içerisinde oluşan göçme gelişimi pasif duruma göre daha azdır.

3. En yüksek içsel sürtünme açısında yumuşak-deformasyon modeli sonuçları ile mükemmel plastik kritere göre tasarımı yapılmış model sonuçları aynı olmaktadır.
4. Deneylerde incelenen kayma bandının gelişimi ile analizlerde maksimum kayma deformasyonunun dar bölgesi birbirlerine hemen hemen benzer çıkmıştır.
5. Farklı plaka genişliklerinde değişken iken genişliğin yüksekliğe oranı sabit tutulduğunda, normalize edilmiş toprak basıncı konusunda sonlu eleman analizleri ve deneylerde ölçek etkisi göz önüne alınmamıştır.



Şekil 3.11 : 1g ölçekli Plaka Deney Modeli [15]

3.1.2.2. Santrifüj Deneyleri

Iglesia Teorisi (1991)

Iglesia (1991) yüksek-yerçekimi içinde şerit plakalar üzerine etki eden kemerlenme etkisini araştırmak amacıyla granuler zemin içerisinde santrifüj modelleme yapmıştır. Fakat, plaka üzerine etkiyen ilk ölçülmüş kuvvetler teorik geostatik yüklerden

dramatik olarak ayrılmaktadır. Iglesia plaka/yük hücresinin esnekliği ve komşu tabanın esnekliği arasında farklılıkların olduğunu belirtmiştir. Yük-deplasman eğrisi üzerindeki sıfır deplasmanda kabul edilebilir yük ile bazı düzeltmeler yapılmıştır. Ayrıca zemin parçacığı büyüklüğünün ölçeği, plaka genişliği, jeolojik yük ve yerçekimi seviyesi gibi etkiler göz önünde bulundurularak birçok deneysel araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, granuler zeminin minimum yükü, $\theta = 90 - \phi$ açısı ile plakanın her iki ucundan parabolik kemerlenme hali düşünülerek hesaplamıştır.

Plaka üzerine etkiyen minimum kuvvet, kemer altında bulunan zeminin ağırlığı ve oluşan ek düşey gerilmenin hayali bir kemerin olduğu düşünülerek sağlam olan kısma transfer edilmesi ile bulunabilmektedir. Engesser, Krynine ve Evans teorileri aşağıda verildiği gibi birleştirilerek plaka üzerine etkiyen minimum kuvvet bulunmuştur [15].

Krynine (1945) tarafından geliştirilen toprak basıncı katsayısı ve plakaya etki eden düşey gerilme aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_v = \frac{\cos^2 \phi}{1+\sin^2 \phi}\sigma_h \quad ; \quad K' = \frac{\sigma_v}{\sigma_h} = \frac{\cos^2 \phi}{1+\sin^2 \phi} \tag{3.18}$$

Engesser (1882) tarafından minimum yükün elde edilmesi için kullanılan K_a ve ϕ yerine K' ve $90^0 - \phi$ yerleştirildiğinde yeni oluşan minimum yük;

$$P_{\min} = \gamma D^2 \left(\frac{HK'}{2H\cot\phi + DK'} + \frac{\cot\phi}{6} \right) \tag{3.19}$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada $\cot\phi$ değeri $\tan(90^0 - \phi)$ değerine eşit olmaktadır. Bu minimum yük geostatik kuvvet $P_0 = \gamma HD$ ile normalize edildiğinde;

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_{\min} = \frac{D}{H}\left(\frac{K'}{2\cot\phi + \frac{D}{H}K'} + \frac{\cot\phi}{6} \right) \tag{3.20}$$

denklemi oluşmaktadır. Bu denklem Iglesia (1991) tarafından önerilmiş Engesser-Krynine-Evan çalışmalarının bir araya getirilerek oluşturulduğu bir denklemdir.

3.2. Yatay Yönde Zemin Hareketi Nedeniyle Oluşan Kemerlenme Üzerine Yapılan Çalışmalar

Kazıların geçici veya kalıcı olarak desteklenmesi veya şev ya da heyelanların stabilitesini sağlamak amacıyla yapılan kazıklı tasarımlarda; zeminin hareketi sonucunda kaymaya başlayan zeminin yükleri, kemerlenme sayesinde kazıklara aktarılmakta ve böylece kazıklar arasındaki zemine daha az yük gelmesi sağlanarak şevin ya da dayanma yapısının stabilitesi sağlanmaktadır. 50 yıldan fazla bir süredir şevin stabilitesinin iyileştirilmesi için ayrık kazık uygulamaları yapılmış olsa dahi, hala bu konu hakkında aydınlığa kavuşmamış birtakım eksiklikler bulunmaktadır [4]. Çünkü zeminin kemerlenme mekanizması oldukça karmaşık bölgesel bir mekanizmadır.

Geçmişte kemerlenme mekanizması göz önüne alınarak zemin hareketinin neden olduğu kazıklar üzerine etkiyen yanal yüklerin tahmini, kazıkların şev üzerine en etkili bir biçimde yerleştirilmesi, kayan şev içerisindeki kazık grubunun etkileri konularında birçok analitik, numerik ve deneysel çalışma yapılarak birtakım teoriler geliştirilmiştir. Bu teoriler;

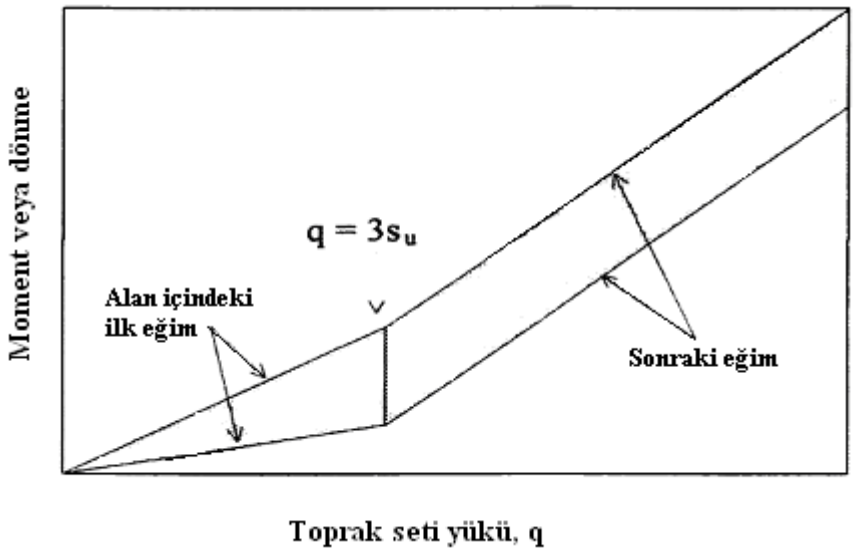
1. Amprik teoriler
2. Toprak basıncına dayanan teoriler
3. Deplasmana dayanan teoriler
4. Model deneyleri ve sonlu elemanlar teorileri

şeklinde 4 grupta toplanmaktadır. Her bir teori aşağıda özetlenmektedir.

3.2.1. Amprik Metodlar

Şevlerin stabilizasyonu için kullanılan kazıkların maksimum eğilme momentlerinin tahmini için laboratuvar ve arazi çalışmalarının sonuçlarına dayanan birçok amprik metod bulunmuştur. Mesela, Steward ve diğ. (1994) değişik arazi ve laboratuar deneyleri sonucunda elde ettiği veriler ile iki çeşit grafik oluşturmuştur. Bunlar maksimum eğilme momentine karşılık zemin ve kazık arasındaki relatif rijitlik ve kazık başlığının yer değiştirmesine karşılık zemin ve kazık arasındaki relatif rijitlik şeklinde oluşturulmuş grafiklerdir. Elde edilen veriler grafikte Şekil 3.12'de

görüldüğü üzere oldukça büyük bir alana yayıldığından dolayı maksimum eğilme momenti ve deplasman için bir tasarım bölgesi sınırı oluşturulmuştur.



Şekil 3.12 : Amprik Tasarım Grafiklerinin Kullanımında Tasarım Alanının Oluşturulması [17]

Bu metodun en önemli avantajı, kazık gruplarının davranışı hakkında yüzeysel ve çabuk olarak tahmin yürütülmesini sağlamasıdır. Diğer bir yandan, verilerin elde edildiği arazi koşullarından farklı bir arazi koşulu için bulunmuş olan bu tasarım grafiği kullanılamamaktadır. Ayrıca kazık aralığı, kazık boyutları ve şev açısı gibi şev stabilitesi tasarımını etkileyen faktörlerin göz önünde bulundurulması amprik metod üzerinde kullanılması sırasında oldukça zordur [17].

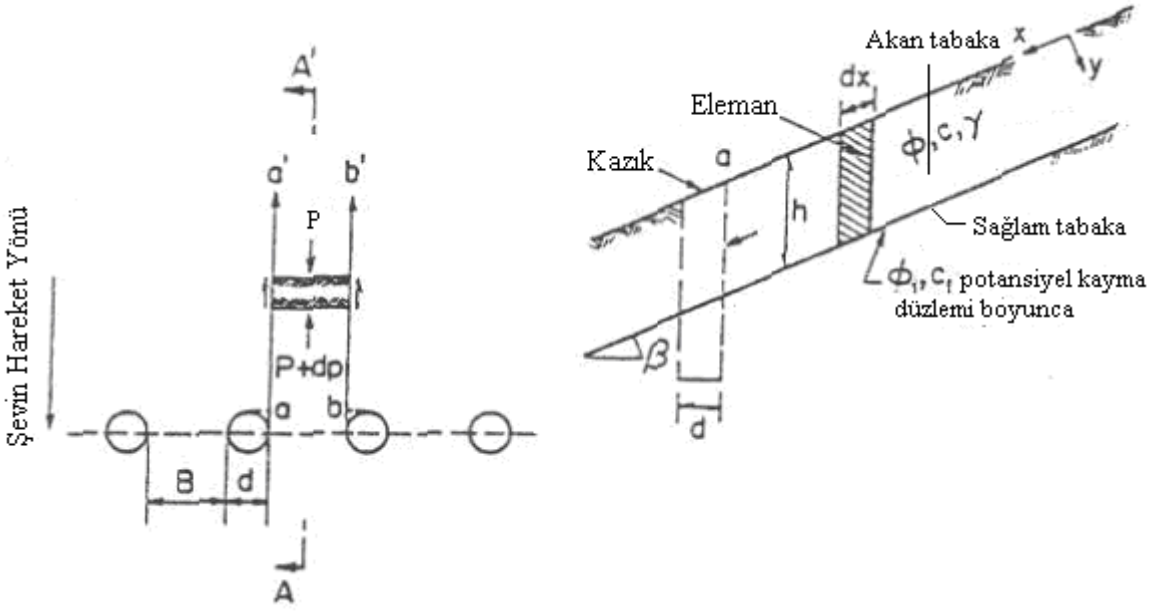
3.2.2. Toprak Basıncına Dayanan Teoriler

Toprak basıncına dayanan metodlar, kazıklı şevlerin stabilitesini artırmak ve güvenlik faktörüne karar vermek amacıyla kazıklara etkiyen toplam kuvvetlerin ya da basınç dağılımının elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Şevler üzerine inşaa edilmiş kazıklara etkiyen toprak basıncına karar vermek iki adımda gerçekleşmektedir. 1. adım; bir şev kesiti içerisinde kazıkların inşaa edileceği alana gelen toprak basıncı değerine karar vererek, 2. adım ise; her bir kazık üzerine etkiyen hesaplanmış toprak basıncının dağılımına karar vermektir. Wang ve Yen (1974), Baransby ve Smith (1975), Ito ve diğ. (1975), Wang ve Liang (1979) ve Reese ve diğ.(1992) tarafından önerilen metodlar toprak basıncına dayanan metodların başlıcalarındandır.

Wang ve Yen Teorisi (1974)

Wang ve Yen (1974), şevlerde meydana gelen kemerlenme etkisini incelemek amacıyla sonsuz şev üzerine yerleşmiş kazıklar üzerinde şev stabilite analiz metodu kullanmıştır. Bu teoride, kayan tabaka ve kazığın gömülü olduğu tabaka olarak modellenmiş olan zeminin, rijit ve plastik olduğu farz edilmiştir [3]. Şekil 3.13'te gösterildiği üzere d çapındaki kazıkların b aralığında yerleştirildiği düşünülmüştür. Bu varsayımın kapsamları ve kısıtları;

1. Sonsuz şev stabilite analizi oldukça karışık 3 boyutlu bir problemdir.
2. Göçme düzlemleri gerçek göçme düzlemlerine pek uymamaktadır. Bu durum kazık aralığı ve kazık boyuları üzerindeki çalışmaların sonuçlarını pek etkileyemeyebilir.
3. Rijit ve plastik zemin davranışının varsayımı plastik akış durumunda gerilme koşullarına etki eden zeminin kemerlenmesini sınırlamaktadır. Bu yüzden elastik yaklaşımın tersine, göçmeden önce zeminin gerilme-deformasyon ilişkisi analizlerde yer almamaktadır.



Şekil 3.13 : Şevlerde Meydana Gelen Zemin Kemerlenmesi [3]

Wang ve Yen (1974) teori çalışmaları sonucunda, kazık aralığının büyük olduğu durumda ve sıfır olduğu durumda kemerlenmenin oluşmayacağı vurgulanmıştır. Teori ile kemerlenmenin en etkili olduğu optimum relatif genişlik ($M_m = B/h$) ve

stabiliteye en az katkısı olan şevler üzerine yerleştirilmiş geniş kazık aralıklarında yani göçmenin kritik olduğu genişlik (M_{crit}) bulunabilmektedir. Aynı zamanda şev uzunluğu ile kemerlenme potansiyeli arasındaki ilişkiyi gösterebilmektedir. Teoriye göre, kemerlenmenin tam olarak oluşması için gerekli olan şev uzunluğu kazık aralığının 5-6 katı olmalıdır [3].

Teori Wang ve Yen (1974) tarafından çeşitli parametrik varyasyonları denemek amacıyla küçük bir bilgisayarda programlanmış ve kohezyonsuz zeminin yük-transfer kapasitesini en çok etkileyecek çeşitli parametrelere karar verilmiştir. Çalışmalar sonucunda;

1. Maksimum ortalama kemerlenme gerilmesinin şevin durgun halde ki durumuna eşit olduğu,
2. Aynı koşullar altında kemerlenmenin büyük c ve ϕ değerlerinde önemli hale geldiği,
3. Kritik kazık aralığı varlığı araştırılarak, kazık aralığının kritik kazık aralığından büyük olması durumunda kemerlenmenin oluşmadığı,
4. Kemerlenme bölgesinin hem kil hem de kumlu zeminlerde meydana geldiği ileri sürülmüştür [3].

Bransby ve Smith Teorisi (1975)

Bransby ve Smith (1975), Sokolovskii (1960) metodunu uygulayarak yanal sürtünme durumunu modifiye etmiştir. Sokolovskii (1960) Mohr Coulomb akma kriterine bağlı olarak zeminin her yerinde akma olduğu ve dengenin temel varsayımlar üzerine dayanan karakteristik metod ile sonlu farklar hesaplama yöntemi geliştirmiştir. Sonlu farklar teknikleri herhangi iki noktanın gerilme durumunun bilinmesi durumunda yeni bir noktadaki gerilme durumunun belirlemesi amacıyla kullanılmıştır. Özel durumlarda, yanal sürtünme etkisi oluştuğu zaman, yanal sürtünme ve zeminin birim hacim ağırlığının birleşmiş olduğu hesaplamalar tek bir vektöre dönüştürülmüştür [3]

İstinat yapısına komşu olan karakteristikleri belirlemek amacıyla bir bilgisayar programı yazılmıştır. Hesaplamalar içsel sürtünme açısı ve duvar sürtünmesinin sürekliliği varsayımına dayanmaktadır. Parametreler sert kum ile yumuşak kum arasında sürtünme katsayısını göstermek amacıyla seçilmiştir. $\mu = \tan\phi$ olduğundan ϕ'nin kullanımı deformasyon bağımlıdır. Teorik varsayımlar ve deneysel çalışmalar

karşılaştırmalarına dayanarak, yukarıdaki denklemde ϕ yerine ϕ_{kritik} kullanılmıştır. Parametrik çalışmalarda, ϕ 1° ila 40° arasında 10° artımlı olarak kullanılmıştır. Duvar sürtünme açısı (δ) ve dolgu zeminin sürtünme açısı (β) 0° ila $\phi°$ arasında 10° artımlı olarak alınmıştır. Zemin elemanının genişliği 0.25 – 5H (H = duvar yüksekliği) arasında seçilmiştir. James ve Bransby (1970) tarafından yapılan testlerde genleşme açısı (ψ) 0° ila 20° arasında değişmektedir. Bu çalışmada ise genleşme açısı (ψ) 0° ila $\phi°$ arasında değişmekte, 0°, $\phi°/2$ ve $\phi°$ değerleri kullanılarak hesap yapılmıştır [3].

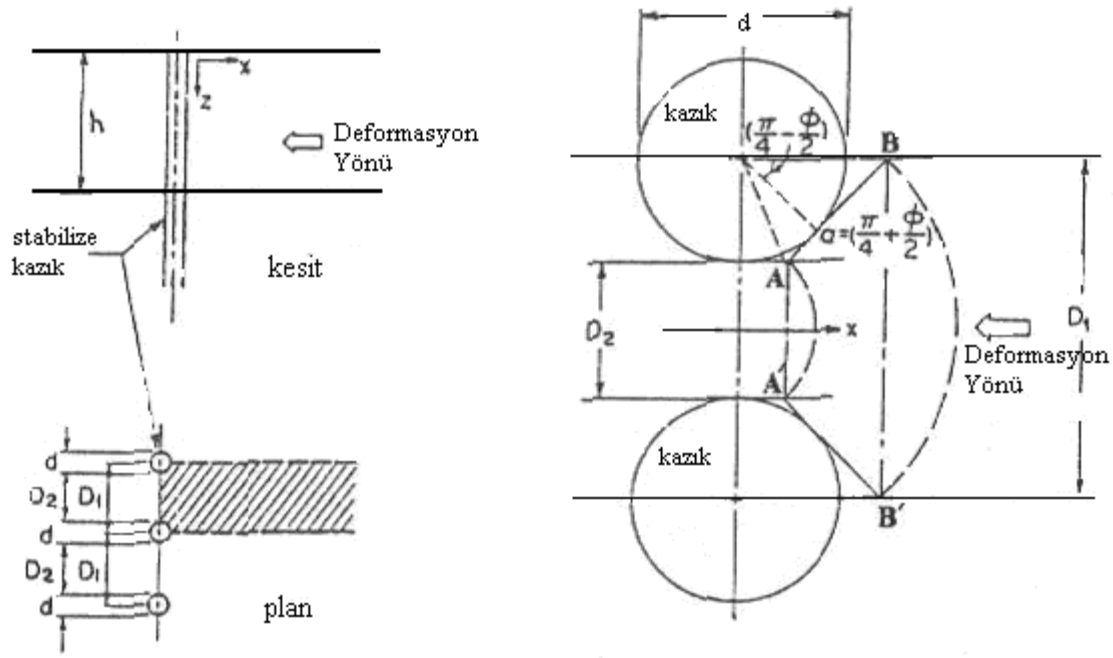
Ito ve diğ. Teorisi (1975)

Ito ve Matsui (1975) çevre zeminde meydana gelen plastik deformasyondan dolayı kemerlenme gelişim mekanizmasını göz önünde bulundurarak tek sıra stabilize kazıklar üzerine etkiyen yanal yüklerin bulunabilmesi için teorik çalışmalar yapmıştır. Şekil 3.14'te gösterildiği üzere plastik deformasyona uğrayan zemin boyunca yerleştirilen D_1 kazık aralığına ve d çapına sahip sağlam zemine gömülü olan tek sıra kazıklar gösterilmiştir. H kalınlığına sahip ve rijit-plastik olarak kabul edilen zemin kütlesi içerisinde, tek sıra kazıkların yönüne dik olarak yanal deformasyon meydana geldiği zaman, kazık ve zemin etkileşimi ile kazıklar arasına yanal kuvvetler etkidiği farz edilmektedir [3].

Ito ve Matsui (1975) analitik denklemlerin çıkarılmasında 4 ana varsayım yapmıştır. Bunlar;

1. Zeminin sadece kazıklar çevresindeki alan içerisinde plastik hale geldiği,
2. Şekil 3.14'te görüldüğü üzere, zemin hareket yönü ile $45+\frac{\phi}{2}$ değerinde açı ile oluşan çizgiler boyunca iki düşey kayma yüzeyi oluştuğu,
3. Kayma yüzeyleri üzerine etkiyen sürtünmenin kuvvetinin ihmal edildiği,
4. Tek sıra kazıklar olarak dizilen düzleme aktif toprak basıncının geldiği kabul edilmiştir.

Yazarlar kendi eleştirilerinde bu teorinin küçük α ve ϕ değerlerinde hatalar verdiğini, $\phi = 0$ olan metaller için doğru, kohezyonsuz zeminler için ise teorinin uygulanabilirliğinin yanlış olduğunu ileri sürmüşlerdir. $c = 0$ olduğunda ise Ito ve Matsui teorisi ile DeBeer Carpenter tarafından elde edilen sonuçlar arasında büyük



Şekil 3.14 : Ito ve Matsui Tarafından İdealize Edilmiş Kazık - Zemin Sisteminin Diyagramı [3]

farklılıklar bulunmuş Ito ve Matsui teorisinden elde edilen sonuçların kullanılmasında kişilerin tedbirli olması gerektiği ileri sürülmüştür. $\phi = 0$ durumu için ise, sonuçlar üzerindeki asal gerilme yönünün etkisi az olmakta ve metallerde teori doğru sonuçlar vermektedir.

Ito ve Matsui teorisine dayanan analizler kazık aralığı sıfır olduğunda yani dayanma duvarı olarak modellendiğinde, kazık üzerine etkiyen kuvvetin sıfır olduğunu göstermiştir. Ayrıca tek kazık için, teori sonucunda gösterilen kuvvet sıfır olmakla beraber, ϕ değerinden de bağımsız olmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar gerçek duruma oldukça terstir. Kazığa etkimesi gereken minimum kuvvet;

$$P_{\min} = \frac{K}{2} \times \gamma \times h^2 \times d \qquad \textbf{(3.21)}$$

ya da kazık üzerine etkiyen standart toprak kuvvetine eşit olmaktadır.

Ito ve Matsui tarafından önerilen bu metod deneysel modelin fiziksel sınırları ile bağdaşmamıştır. Şevin taban yüzeyi, taban sürtünmesi ve uygun asal gerilme yönleri konusunda eksiklikler vardır [3].

Wang ve Liang Teorisi (1979)

Wang ve Liang (1979) kazıklara gelen yatay kuvvetleri hesaplamak amacıyla kazının her iki yanını desteklemiştir. İdealize edilmiş serbest zemin diyagramı kullanarak, kazıklar arasındaki kaplamasız zemin kütlesinin stabilitesini analiz etmişlerdir. Göçme yüzeyi zemin kütlesinin tabanından başlayan logaritmik spiral ile temsil edilmiştir. Serbest zemin yüzeyini çevreleyen iki düşey yan düzlem, düşey yüzey ve yatay zemin yüzeyidir [3].

Wang ve Liang (1979) tarafından geliştirilmiş olan bu teori ile kazıklar arasında hareket eden zemin kütlesi ile kazıklar arkasında sabit kalan zemin yüzeyi arasında meydana gelen sürtünmeden dolayı oluşan moment tahmin edilebilmektedir. Bu teoriye göre, kazıklar üzerindeki yük ancak dönen zemin elemanının yan yüzeyleri boyunca meydana gelen sürtünmeden dolayı etki etmektedir. Bu sürtünme dönme noktasında moment oluşturmaktadır. Her bir kazık, zemin elemanının her iki yan yüzeyinden meydana gelen sürtünme momentlerinden dolayı yük taşımalıdır. Bu momentlerin kazıklar içerisinde nasıl kuvvetler veya gerilmeler şeklinde dağıldığının tahmin edilmesi oldukça zordur. Buna ek olarak, bu analizlerden elde edilen sonuçlar tutulmuş olan desteklerdeki yükün bilinmemesi ve elde edilen momentlerden kuvvetlerin bulunamaması nedeniyle diğer teorilerden elde edilen sonuçlar ile direk olarak karşılaştırılamamaktadır [3].

Reese et al. Teorisi (1992)

Reese ve diğ. (1992) kayan zeminden gelen yanal basınç ve buna karşılık kazığın gösterdiği davranışı bulmak amacıyla iki farklı durumda incelemiştir. Bu durumlar;

1. Yan yana dizilmiş kazıklar arasında hiç boşluğun (perde duvarı) olmadığı durum,
2. Yan yana dizilmiş kazıklar arasındaki boşluğun herhangi bir etkileşimin olmasına izin vermeyecek kadar geniş olduğu durumdur.

İlk durumda, istinat duvarları üzerine etkiyen pasif toprak basıncı hesaplanması için kullanılan toprak basıncı teorileri kullanılabilmektedir. 2. durumda ise, her bir kazığa gelen yanal yükün hesaplanması için Reese ve diğ. (1974) tarafından hazırlanan zeminin kayma kaması kavramı ile hesaplanmıştır. Kazık aralıklarının bu iki limit durum arasında kaldığı genel durum için ise, yük azalması faktörü için amprik eğri önerilmiştir [17].

3.2.3. Deplasmana Dayanan Teoriler

Deplasmana dayanan metodlarda, kazığın eğilme momenti ve toplam yer değiştirmesine karar vermek için yanal zemin deplasmanının büyüklüğü göz önünde bulundurulmaktadır. Bu metod üzerinde birçok kişi çalışmalar yapmıştır. Aşağıda bu çalışmaların başlıcaları verilmektedir.

Steward ve diğ. Teorisi (1994)

Steward ve diğ. (1994) tarafından kazıklı köprü ayaklarının yumuşak kil üzerine oturan toprak seti temeli üzerinde çalışmalar yapılmış ve çalışmalar sonucunda iki adet deplasmana bağlı metod önerilmiştir. Bunlardan en önemlisi Springman (1989) tarafından relatif zemin-kazık deplasmanı ve kazık üzerine etkiyen yanal toprak basıncı arasındaki ilişkiyi elde etmek için kullanılan zemin deformasyon mekanizmasıdır [17]. Bu yaklaşımda basit üçgen deplaman modeli düşünülmüş ve herhangi bir derinlikteki y_s deplasmanı;

$$y_s = \frac{t_{mob} \times (h_s - z)}{2G_m} \qquad \textbf{(3.22)}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada;

$z =$ zemin yüzeyinden aşağıya olan derinlik

$G_m =$ zemin tabakasının kayma modülü

$h_s =$ zemin tabakasının kalınlığı

$y_s =$ yanal zemin hareketi

$t_{mob} =$ zeminin kayma gerilmesi

Poulos Teorisi (1994)

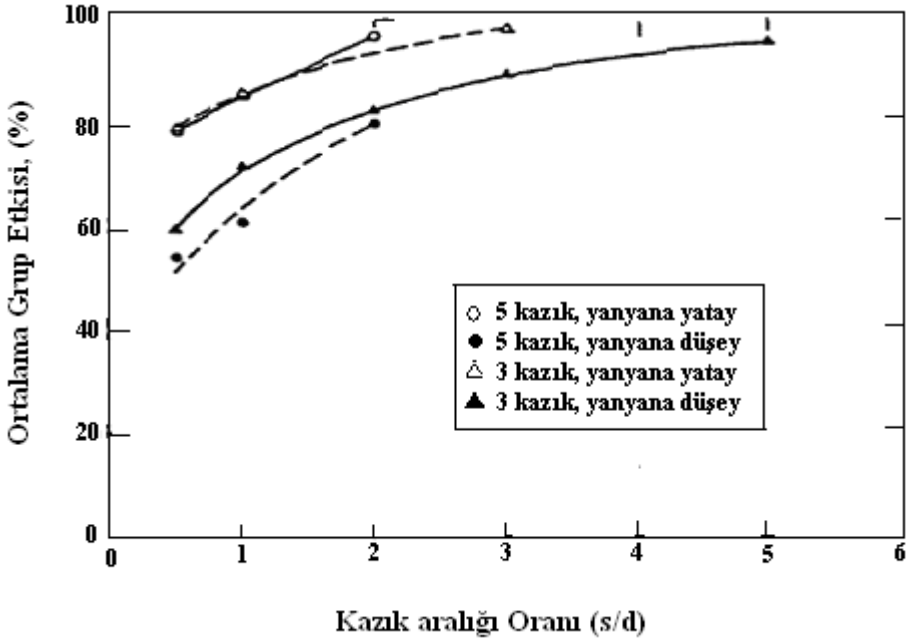
Giderek artan zemin hareketine maruz kalan kazıkların yanal ve düşey davranışının hesaplanması için Poulos (1994) tarafından basitleştirilmiş sınır eleman metodu deplasmana dayalı bir metod olarak geliştirilmiştir. Bu metotta kazığın yerleşim yeri, zeminin kayma gerilmesi, zemin tabakasının kalınlığı, kazık başlığının tutulu ya da serbest olması ve kazıkların yapım aşamasındaki yerleşimi gibi faktörler göz önüne alınmıştır.

Genel olarak düşünüldüğünde, deplasmana dayanan metodlar, kazık-zemin etkileşim mekanizmasını doğru bir şekilde yansıttığı için, toprak basıncı etkisine dayanan metodlardan çok daha iyidir. Diğer bir yandan gerçek arazi koşullarındaki zemin hareketini doğru bir şekilde yansıtmak kazığa etkiyen yanal yüklerin doğru bir şekilde hesaplanmasına göre daha öncelikli olduğu ileri sürülmüştür [17].

3.2.4. Model Deneyleri ve Sonlu Elemanlar Teorileri

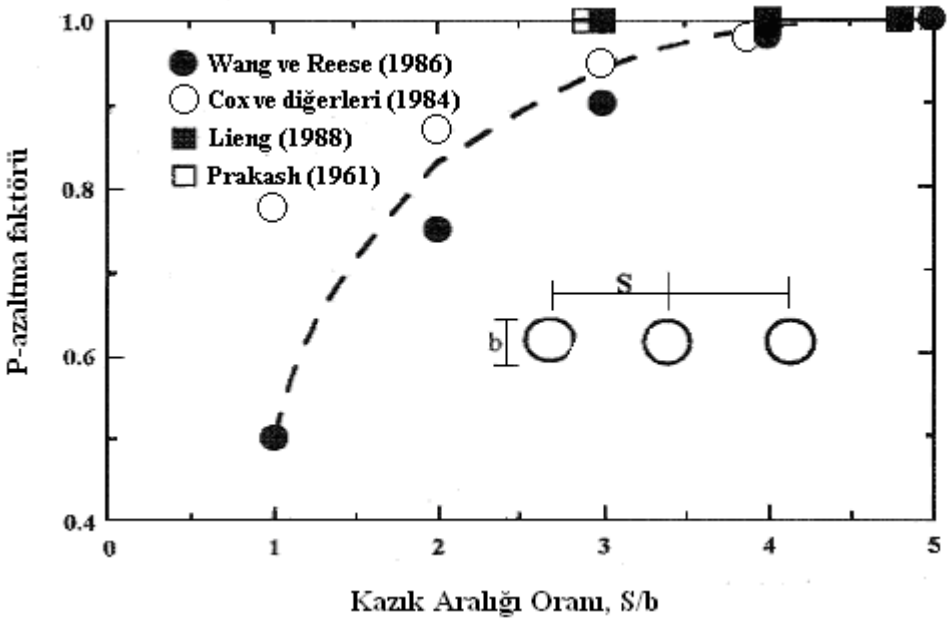
Yanal zemin hareketine maruz kalan kazıkları incelemek amacıyla birçok çeşitte model deneyi ve sonlu eleman analiz çalışmaları yapılmıştır. Yapılmış olan bu çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Parakash (1962) tarafından zemin hareketine maruz kalmış kazık gruplarının etkisini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Wang ve Reese (1986) ve Lieng (1988) tarafından yan yana dizilmiş olan kazık grupları üzerinde yatay yükleme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca Cox ve diğ. (1984) yavaş ve sabit yatay yükler altında kazık gruplarının etkinliğini belirlemek amacıyla birçok laboratuar deneyi yapmıştır. Deney sonuçlarında, Şekil 3.15'te görüldüğü üzere, kazık aralığı kazık çapının 3 katına eşit ve fazla olduğunda, grup içerisindeki kazıkların tek kazık olarak davrandığı ileri sürülmüştür [17].



Şekil 3.15 : Kazık gruplarının etkinliği [17]

Ayrıca Şekil 3.16'da Reese ve diğ. (1992) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen kazık grubu içerisindeki tek bir kazığın ortalama kapasitesinin tek kazık kapasitesine oranı, p, azaltma faktörü ile kazık aralığının kazık çapına olan oranı, S/b, kazık aralığı oranı arasındaki ilişki verilmiştir. Bu grafiğe göre kazık aralığı kazık çapının 4 katına eşit ve fazla olduğunda, kazıkların grup etkisi faktörü (P) değerinin arttığı gözlemlenmektedir. Dolayısıyla bu değerden sonra kemerlenme etkisinin de azalacağı ileri sürülmüştür.

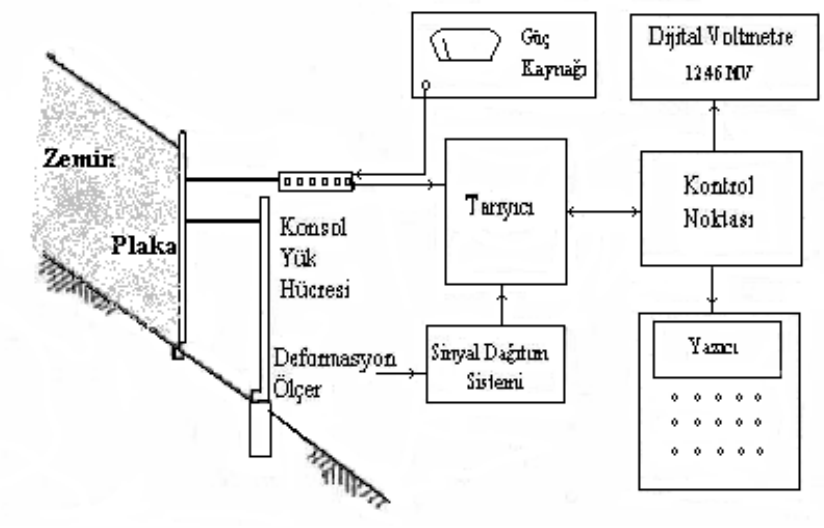


Şekil 3.16 : Tek Sıra Kazıklar İçin Grup Azaltma Faktörü [17]

Bosscher ve Gray (1986), sağlam zemine oturan ayrık kazıklı dayanma yapılarında kumlu zemin içerisinde kazıklar arasında meydana gelmesi muhtemel olan zeminin kemerlenme etkisini oluşturdukları model deneyi ile incelemiş ve kemerlenme ile kumun relatif sıkılığı (D_r), kazık aralığı (B), kazık çapı (d) ve kumun içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi parametreleri karşılaştırılarak aralarındaki ilişkiler göz önünde bulundurmuştur [3].

Bosscher ve Gray (1986) tarafından oluşturulan model deneyi 10 inch derinliğinde, 36 inch genişliğinde ve 12 ft uzunluğunda bir kutu içerisine yerleştirilen sıkı veya gevşek kum ve 4 inch genişliğinde 9 adet plakadan oluşmaktadır. Tutulu plaka olarak adlandırılan kazıklar sağlam zemine oturduğu durum düşünülerek kutu tabanına tutturulmuştur. Tutulu plakalar (kazıklar) arasında kalan plakalar ise zemini (esnek plakalar) göstermektedir. ½ inch aliminyum levhalardan oluşan plakalar kumun

aksine rijit olarak modellenmiştir. Plakalar arasına, sürtünmeyi ve kumun plakalar arasından sızmasını engellemek amacıyla, çok ince esnek plastik şeritler koyulmuştur. Kumun yanal hareketinden dolayı plakalara gelen yüklerin ölçülebilmesi için model rijit bir kiriş ile konsol yük hücresine bağlanmıştır. Şekil 3.17'de plakaların ve yük-deformasyon ölçüm sisteminin şematik diyagramı verilmiştir [3].



Şekil 3.17 : Plakaların ve Yük-Deformasyon Ölçüm Sisteminin Şematik Diyagramı [3]

Yapılan deneyler sırasında kumun hareketinin sağlanması ile tutulu plakalar (kazıklar) arasındaki esnek plakalara (zemine) gelen yük azalırken, tutulu plakalar (kazıklar) üzerine gelen yük artmaktadır. Bu durum yükün esnek plakalardan (zeminden) tutulu plakalara (kazıklara) zeminin kemerlenme mekanizması ile aktarıldığını göstermektedir. Her iki plaka çeşidine de ilk başta aynı aktif toprak basıncı etki etmekte, bu yüzden esnek plakalardaki yük azalması ile tutulu plakalarda ki yük artması kesinlikle toprak basıncı katsayısındaki değişim ile alakalı değildir.

Model deneyleri sonucunda;

1. Zeminde meydana gelen kemerlenmenin varlığı plakalara gelen yük transferinin elde edilmesi sayesinde ispatlanmıştır.
2. Gevşek kumlu zeminde zeminin kemerlenmesi sebebiyle kazıklar arasındaki zeminden kazıklara aktarılan yükler sıkı kumlu zemine göre daha fazla çıkmıştır. Nedeninin ise sıkı kumun gerilme mobilizasyonu ve birbirine kenetlenme etkisinin daha fazla olmasından dolayı kayma yüzeyi üzerinde enine şev yönünde gelen gerilmeler daha az olmaktadır.

3. Tutulu plakanın (kazığın) genişliği sabit iken, esnek plakanın (kazıklar arasındaki zeminin) genişliği arttırıldığında, esnek plakaya gelen yük artmaktadır. Diğer bir deyişle, esnek plakanın (kazıklar arasındaki zeminin) genişliği ne kadar küçük olursa, kemerlenme etkisi o kadar fazla görülebilmektedir. Bu durum kemerlenmenin yüksek esnek plaka genişliklerinde pek etkili olamadığını göstermektedir [3].

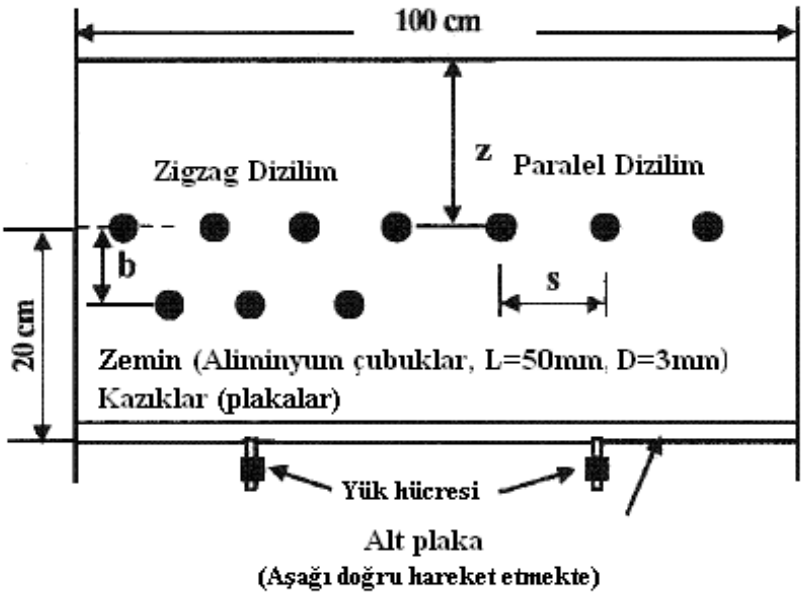
Ayrıca Bosscher ve Gray (1986) üzerinde çalışmış oldukları model deneyleri sonuçları ile zeminin kemerlenme teorilerinden toprak basıncı teorilerini karşılaştırmıştır. Deneysel ve teorik çalışmaların karşılaştırmaları sonucunda;

1. Şev içerisinde, sağlam tabakaya oturan ayrık kazıklar, zeminde kemerlenme görüldüğü sürece, şevin stabilitesini önemli ölçüde arttırmaktadır.
2. Dayanma yapılarının tabanının düşey olarak dönmesi durumunda, modifiye edilmiş Bransby ve Smith numerik metodu sonucunda ortaya çıkan teorik sonuçlar ile yapılan deney modeli sonuçları hemen hemen birbirine benzemektedir.
3. Gevşek zeminin gerilme transfer kabiliyeti düşünüldüğünden daha fazla çıkmıştır.
4. Kazıklı dayanma yapılarında, zeminin kemerlenme etkisinden maksimum yarar sağlamak için malzeme fiyatları, gerilme özellikleri ve büyüklükleri optimum koşullarda seçilmelidir [3].

Adachi ve diğ. (1989) kayan yamaçların stabilitesinin iyileştirilmesinde kullanılan kazıkların potansiyel kemerlenme mekanizmasını araştırmak amacıyla farklı kazık çapları (d), kazık aralıkları (s), kazık şekilleri (dikdörtgen ve dairesel) ve kazık diziliş biçimine (paralel veya zigzag) göre iki boyutlu laboratuar model deneyleri yapmıştır [1].

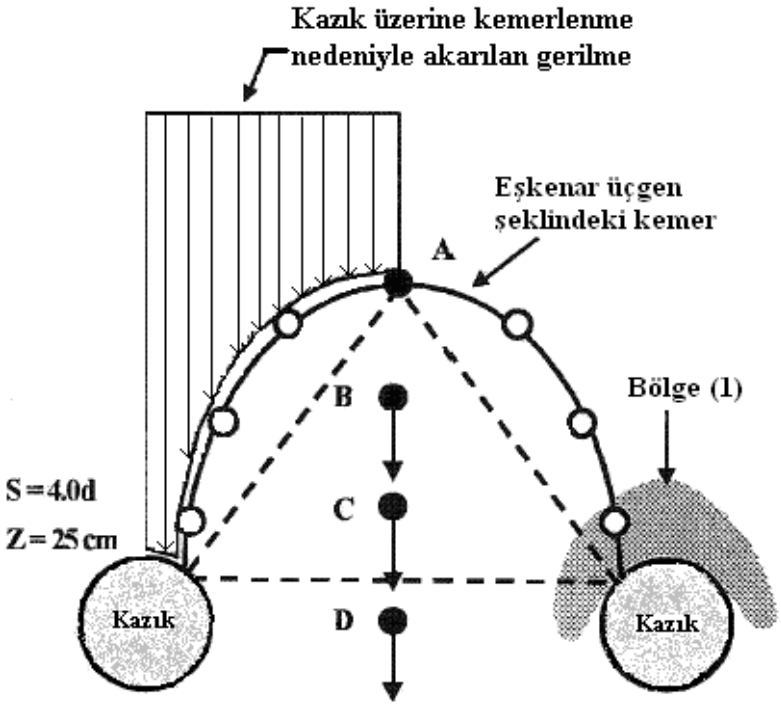
Adachi ve diğ. (1989) tarafından oluşturulan model deneyi Şekil 3.18'de görüldüğü üzere 80 cm yüksekliğinde 100 cm genişliğinde alüminyum çubuklar ile temsil edilen kumlu zemin kütlesi üzerine paralel olarak yerleştirilmiş plaka ile temsil edilen rijit kazıklardan oluşmaktadır. Terzaghi'nin trap door testi mantığında gelişen model deneylerinde, alt plaka aşağıya doğru hareket ettirilerek, kazıkların zemin hareketine maruz kalması sağlanmıştır. Kazıklara gelen yükleri belirlemek amacıyla kazıkları temsil eden plakaların alt plakaya bağlanan her iki ucuna 2'şer adet

deformasyon ölçer ile kazıkların etrafındaki alüminyum çubuklara (kumlu zemin) gömülmüş olan 50 adet hedef noktaya deformasyon ölçer yerleştirilmiştir.



Şekil 3.18 : 2 Boyutlu Model Deneyinin Planı [1]

Adachi ve diğ. (1989) tarafından yapılan deneyler sonucunda iki kazık arasındaki kemerlenme mekanizmasının gelişiminin ne şekilde meydana geldiğini Şekil 3.19'da gösterildiği üzere açıklamıştır. Kazıklar arasında A, B, C, D olarak adlandırılan zemin danelerine bakıldığında, D parçacığı hareket ettikçe, B ve C parçacıklarının da sanki D parçacığı tarafından aşağıya çekiliyormuşçasına hareket etmekte olduğunu; diğer bir yandan deplasmanın oldukça küçük (δ = 0 – 2mm) olduğu aralıkta A parçacığının diğer noktalardaki zemin parçacıkları gibi davrandığını, fakat daha sonra kazıkların varlığından dolayı komşu zemin parçacıkları ile birleşerek iki kazık arasında bir kemer oluşturduklarını ileri sürmüşlerdir. Diğer bir değişle kazıklar arkasındaki zeminin hareket etmesiyle, kazıklar çevresindeki zemin parçacıkları zemin içerisindeki kazığın varlığını onayladığını ve bu bilgiyi hemen A parçacığına ilettiğini; diğer bir yandan, eğer bu bilgi B ve C parçacıklarına iletilmiş olsaydı, çevre parçacıklar ile iletişim özelliğine sahip olmadıklarından dolayı kazıkların varlığını tanıyamayacağını ve bu yüzden aşağıya doğru hareket edeceğini ileri sürmüşlerdir [1].



Şekil 3.19 : Zeminin Kemerlenme Etkisi [1]

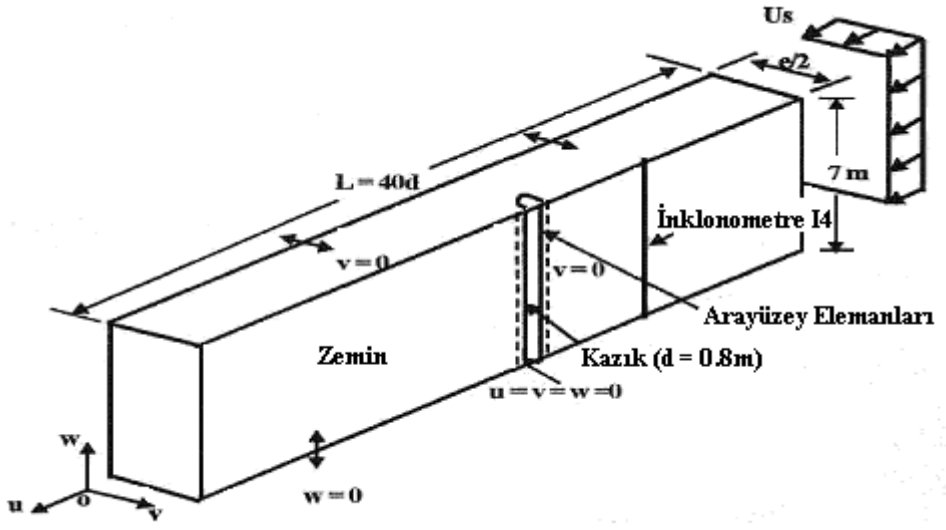
Model deneyleri sonucunda;

1. Zeminde meydana gelen kemerlenmenin varlığı, zemin kütlesi yanal zemin hareketine maruz kaldığında, kazıklar çevresindeki zeminde meydana gelen deformasyon ve deplasman değerlerinin elde edilmesi ve bunların birbiriyle karşılaştırılması sonucunda ortaya çıkmıştır.
2. Dairesel kazıklara etkiyen yükün çoğunlukla dikdörtgen kazıklara etkiyen yükten yaklaşık olarak %15 oranında küçük olduğu ve bunun en önemli nedeninin dairesel kazıklar boyunca hareket eden zemin parçacıklarının Şekil 3.19'da gösterildiği üzere kazıklar çevresinde oluşturduğu 1 nolu bölgeden dolayı olduğu ve dairesel kazıklarda kemerlenme etkisinin biraz daha azaldığı ortaya çıkmıştır.
3. Kazıkların zigzag bir şekilde yerleştirilmesi çifte kemerlenme etkisi yarattığından dolayı kazıkları paralel olarak yerleştirilmesinden daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır.
4. Kemer şeklinin Şekil 3.19'da görüldüğü üzere z mesafesine (kazıklar üzerine gelen zemin yükü mesafesi) göre değiştiği; $z\langle 20cm$ olduğunda kemerin ikizkenar üçgen, $z\rangle 20cm$ olduğunda ise eşkenar üçgen şeklini aldığı ileri sürülmüştür [1].

Ayrıca Adachi ve diğ. (1989) sonlu elemanlar programı kullanarak dikdörtgen kazıklar üzerinde bir takım analizler yapmış ve sonuçlarını model deneyleri sonuçları ile karşılaştırmıştır. Deneysel ve analitik çalışmaların karşılaştırmaları sonucunda;

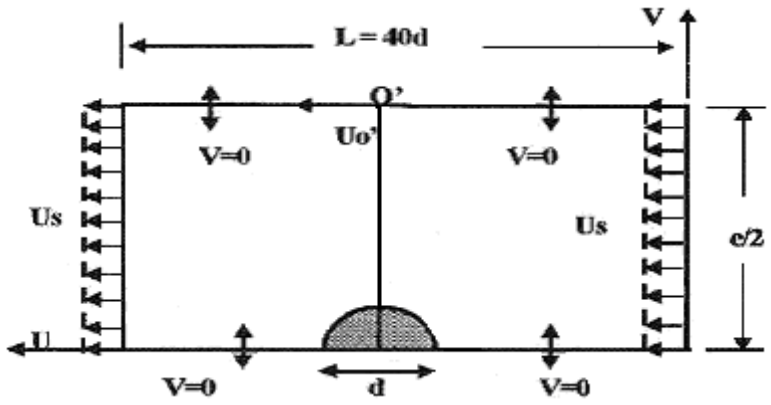
1. Paralel olarak sıralanmış kazıkların, kazıklar önünde meydana gelen kemerlenme etkisi ile şevin stabilitesini arttırabildiği, fakat kazık merkezleri arasındaki uzaklık 8d değerinden büyük olduğu durumlarda, kemerlenme etkisinin meydana gelmediği ve böylece şevin stabilitesinin sağlanamadığı sonucu ortaya çıkmıştır.
2. Her bir kazık aralığında, zeminin kendi jeolojik yükü altındaki (hiçbir zemin hareketine maruz kalmadığı durum) durumunda kazığa etkiyen yük hemen hemen aynıdır. Zemin hareketi (δ) arttıkça, kazığa gelen yükte artmaktadır. Bununla birlikte zemin hareketi δ=3-5 mm olduğunda kazığa maksimum yük gelmekte ve bu değerden sonra yavaş yavaş azalmaktadır [1].

Chaoui ve diğ. (1994) kayan şevler üzerine yerleştirilen kazıkların grup etkisini incelemek amacıyla 3 boyutlu sonlu elemanlar programı ile birtakım numerik analizler yapmıştır. Tek sıra kazıkların bulunduğu 3 boyutlu model ve sınır şartları Şekil 3.20'de verilmiştir. Simetriden faydalanılarak iki kazık arasında bulunan zemin kütlesinin yarısı alınarak oluşturulan modelde rijit kazık ve zemin elemanları arasında kaymayı sağlamak için kazığın yanal yüzeyine ara yüzey elemanları yerleştirilmiştir [4].



Şekil 3.20 : 3 Boyutlu Model ve Sınır Koşulları [4]

Chaoui ve diğ. (1994) aynı modelin 2 boyutlu modelini de Şekil 3.21'de görüldüğü üzere modellemişlerdir. Zemin hareketi her iki sınıra da uniform deplasman uygulanarak modellenmiştir. Rijit kazıklar kullanılarak oluşturulan 2 boyutlu model analizleri sonucunda, ara yüzey elemanının ayrılması kazıklar çevresindeki plastik zemin bölgesini azaltmıştır.



Şekil 3.21 : 2 Boyutlu Model ve Sınır Koşulları [4]

3 boyutlu model ile 2 boyutlu model karşılaştırıldığında ise, 3 boyutlu modelde kazık aralıkları 3.5d değerinden, 2 boyutlu modelde ise 12.5d değerinden fazla olduğunda grup etkisinin oluşmadığı ileri sürülmektedir [4].

Chen ve diğ. (1994,1997) yanal zemin hareketine maruz kalan kazıkların birbirlerine olan etkileşimini incelemek için 2 boyutlu sonlu elemanlar programı kullanarak zemin kazık yüzeyinde son plastik hale gelinceye kadar yani kazığa gelen ortalama yatay kuvvet P_u değerine ulaşıncaya kadar artırımlı yük uygulanması ile zemin hareketi modellenmiştir. P_u üzerindeki grup etkisi boyutsuz faktör f_p ile tanımlanmıştır.

$$f_p = \frac{P_{ui}}{P_{us}} \qquad \textbf{(3.23)}$$

Burada,

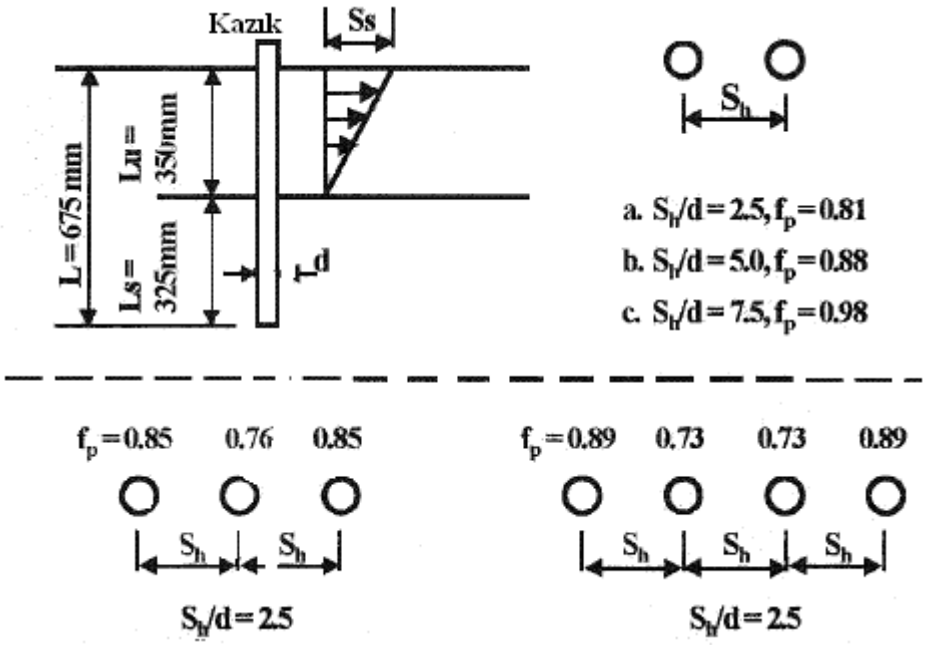
f_p = grup etkisi

P_{ui} = grup içerisindeki kazık için P_u

P_{us} = tek kazık için P_u

şeklinde ifade edilmektedir.

Böylelikle Chen ve diğ. (1997) kireçli kum üzerinde yanal zemin hareketine maruz kalan başlıklı ve başlıksız kazıkların grup etkisini incelemek amacıyla kazıkların grup içerisindeki yerleşimi, kazık aralığı ve kazık sayısı göz önüne alınarak 30 adet laboratuar testi yapmış ve daha sonra da bu laboratuar deneylerini sonlu eleman programı ile yapmış olduğu çalışmalar sonucu ile karşılaştırmıştır. Şekil 3.22'de tek sıra kazık grubu için yapılmış olan çalışmaların grup etkisi sonuçlarını göstermektedir. Bu şekle göre, kazık aralığı ne kadar büyük olursa, grup içerisindeki kazıklara gelen grup etkisi faktörü o kadar büyük olmaktadır. Kazık aralığı kazık çapının 7.5 katına eşit ya da büyük olduğunda (kritik durum), grup kazık olarak yerleştirilen kazıkların tek kazık gibi davranacağı ileri sürülmüştür. Aynı kritik durum yukarıda anlatıldığı üzere Adachi ve diğ. (1989) tarafından yapılan analitik ve deneysel çalışmalar sonucunda da bulunmuştur.

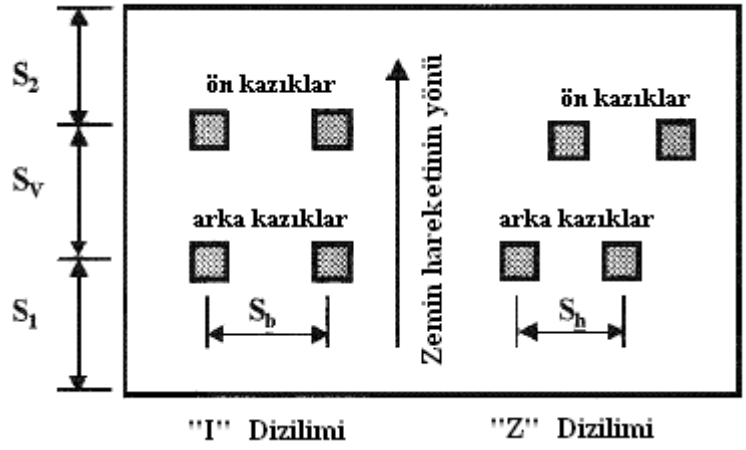


Şekil 3.22 : Kireçli Kum Zemini İçerisindeki Model Kazıklar İçin Bulunmuş Grup Faktörü [4]

Chen ve diğ. (1994) Şekil 3.23'te görüldüğü üzere 2 sıralı paralel ve zigzag kazık dizilimlerine sahip kazık gruplarında kazıkların grup etkisi varlığını belirlemek için birtakım çalışmalar yapmış ve bu çalışmalar sonucunda;

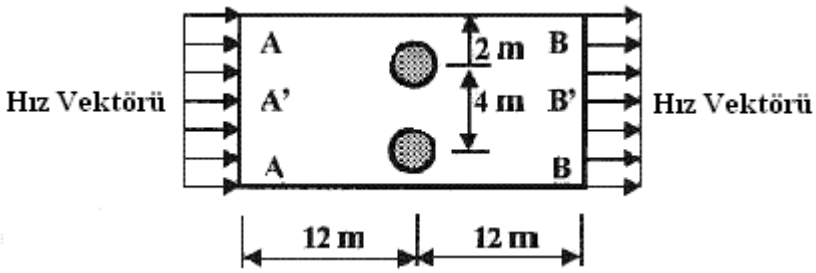
1. S_v değeri yeteri kadar büyük olduğunda, hem I hem Z diziliminin aynı P_u değerine sahip olduğu,

2. Tek sıra ve 2 sıra kazıklar arasında karşılaştırma yapıldığında, kazıklar zemin hareketine maruz kaldığı zaman tek sıra kazıklar 2 sıralı kazıklardan daha büyük zemin basıncına maruz kaldığı,
3. Zemin hareketi ile aynı yönde bulunan kazık aralığının etkisi, S_v, zemin hareketine dikey yönde bulunan kazık aralığının etkisinden, S_h, daha büyük olduğu,
4. S_v değerinin büyük olması, P_u değerinin artmasına; S_h değerinin büyük olması ise kazıkların Z dizilimi dışında P_u değerinin azalmasına neden olduğu ileri sürülmektedir.



Şekil 3.23 : Kazık Gruplarının Dizilim Şekli [4]

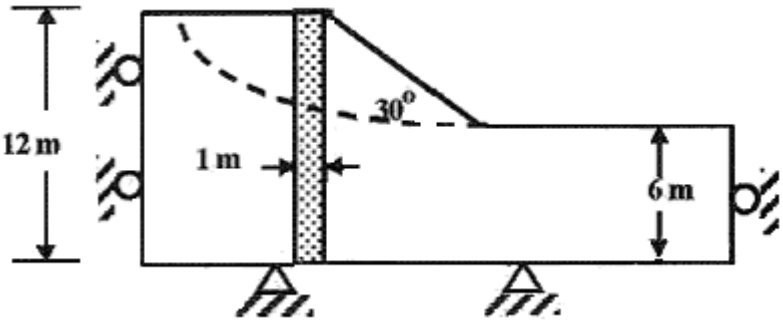
Chien-Yuan Chen (2001) tarafından yanal zemin hareketine maruz kalan pasif grup kazıkların kemerlenme mekanizmasını incelemek ve var olan bilgilere yeni bilgiler katmak amacıyla, FLAC sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler üzerinde birçok analiz yapılmıştır. Şekil 3.24'te özellikle kemerlenme bölgesinin oluşumunun bilinmesinde yol gösterici olan stabilize kazıkların yük transfer mekanizmasını değerlendirmek amacıyla kullanılmış olan 2 boyutlu model gösterilmiştir. Simetri koşullarından yararlanılarak 8m eninde, 24m uzunluğunda sınır koşullarına sahip modele 1m çapında 4m aralıklar ile rijit çelik boru kazıkları temsil etmek amacıyla kiriş elemanları yerleştirilmiştir. Ayrıca kazık ile zemin arasındaki örselenme olasılığını göz önüne almak için kazık ile zemin arasına ara yüzey elemanı yerleştirerek, zemine modelin A-A sınırından 1×10^{-6} m/adım değerinde sahip hız uygulanmıştır [4].



Şekil 3.24 : 2 Boyutlu Sonlu Elemanlar Modeli [4]

Model analizlerinde kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler üzerinde kazık – şev etkileşimini ve kemerlenme mekanizması ile kohezyon, zeminin içsel sürtünme açısı, ön gerilme koşulları, elastisite modülü, ara yüzey elemanı özellikleri ve zeminin genleşme açısı gibi parametreler arasındaki ilişkilerin belirlenmesinin yanı sıra kohezyonsuz zeminler üzerinde tek sıra ve iki sıralı paralel ve zigzag olarak sıralanmış kazıkların grup etkisini incelemek amacıyla, kazıklar 2d, 3d, 4d ve 6d uzaklıklarında yerleştirilerek bir takım analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda iki komşu kazığın tam merkezindeki zemin deplasmanı (δ) ölçülmüş ve kazık düğüm noktalarına etkiyen kuvvetler hesaplanarak kazığa gelen zemin basıncı bulunmuştur.

Ayrıca 2 boyutlu model analizlerinin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla 3 boyutlu analiz programı olan FLAC 3D kullanılarak, Şekil 3.25'te gösterildiği üzere 30^0 eğimli şevin doruk noktasına 3'er m aralıklarla 1m çapında elastik kazıkların tek sıra olarak yerleştirildiği bir model oluşturulmuştur. Kazık ile zemin arasındaki kayma olasılığını modellemek amacıyla kazık ile zemin arasına ara yüzey elemanı yerleştirilmiş ve kazık-şev stabilite analizlerini uygulamak amacıyla gerilme azalım metodu kullanılmıştır [4].



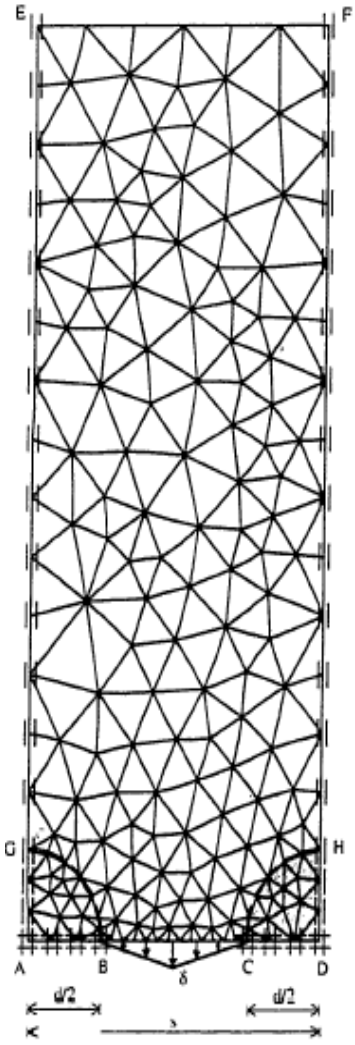
Şekil 3.25 : 3 Boyutlu Kazıklı Şev Stabilite Analiz modeli [4]

Bu çalışmalar sonucunda;

- Kemerlenme bölgesinin, zemin hareketinin yönü boyunca oluşan deplasman kontürleri ve asal gerilme yönlerinin dönmesi ile ispatlanabildiği,
- Kemerlenme etkisinin hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminde görülebildiği,
- Kohezyonsuz zeminlerde, kazıkların önünde ve iki kazık arasında meydana gelen elastik kemer bölgesinden dolayı çifte kemerlenme etkisinin görülebildiği ve iki komşu kazık arasındaki kemerlenme bölgesi şeklinin elips olduğu,
- Killi şevlerde pek iyi görülmeyen düz kemerlenme bölgesinin oluştuğu,
- Zemin genleşmesinin yüksek genleşme açısına sahip zeminlerde kazık şaftının çevresinde daha fazla hacimsel değişimlerin meydana gelmesinden dolayı kemerlenmenin oluşumunu etkileyen önemli parametrelerden biri olduğu,
- Sert ara yüzey elemanı kullanılması durumunda, kemerlenme oluşumunu arttırabildiği,
- Kazık aralığı ne kadar küçük olursa, o kadar büyük kemerlenme etkisinin olduğu,
- Kumlu zeminlerde kazık aralıkları daha küçük olduğu durumda, p-δ eğrileri daha yüksek rijitliğe sahiptir.

Liang ve diğ. (2002) tarafından kazıklı şev stabilite tasarımlarında kemerlenme mekanizmasını incelemek amacıyla 2 boyutlu sonlu elemanlar analiz programı ile Şekil 3.26'da gösterilmiş olan model esas alınarak birçok analiz yapılmıştır.

Deneylerin ilk safhasında Bosscher ve Gray (1986) ve Adachi ve diğ. (1989) tarafından daha önce yapılmış olan model deneylerinde ki zemin parametreleri aynen kullanılarak, bu çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin doğruluğu ispatlanmıştır [8]. Bu çalışmalar sonucunda;

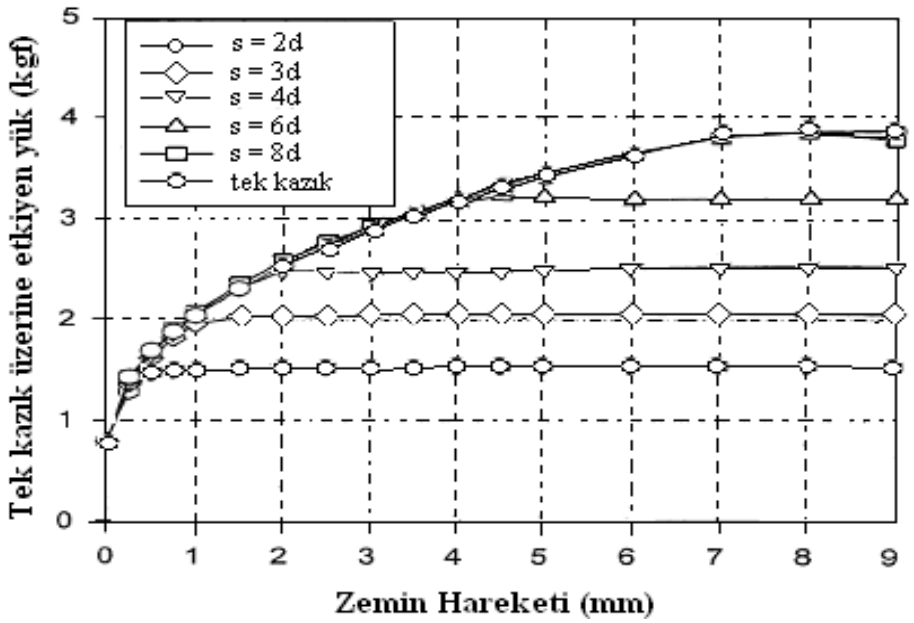


Şekil 3.26 : 2 Boyutlu Sonlu Elemanlar Modeli [8]

1. Adachi ve diğ. (1989) tarafından yapılan model deneyi ile Liang ve diğ. (2002) tarafından yapılan model analiz sonuçlarını karşılaştırmak amacı ile model 2d, 3d, 4d, 6d ve 8d kazık aralıklarında zeminin relatif hareketine karşı kazıkta oluşan yükler incelenmiş ve Şekil 3.27'de gösterildiği üzere sonuç olarak;

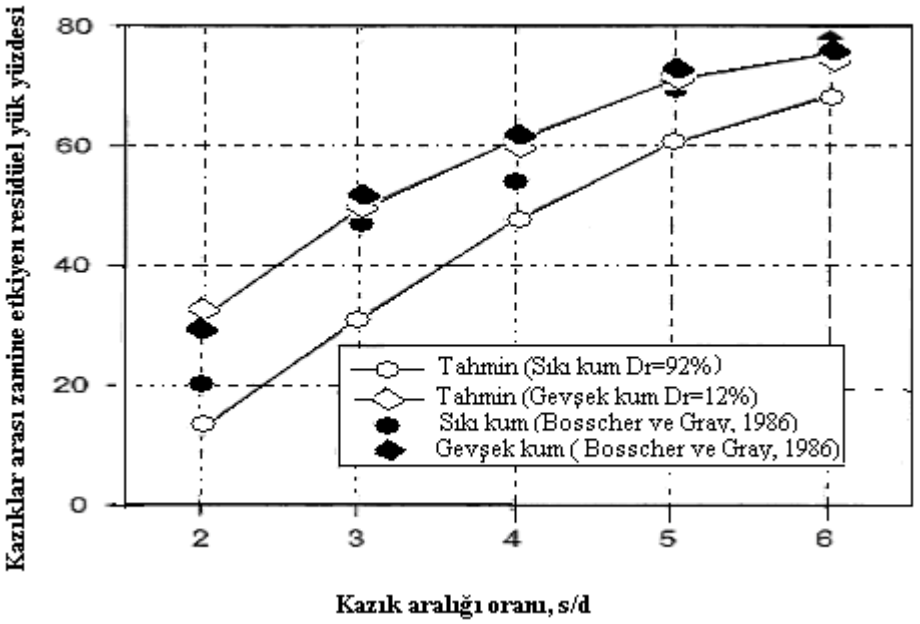
    - Zemin hareketi sıfır olduğunda her bir kazık aralığında oluşan yükün aynı olduğu,
    - Zemin hareketi arttıkça kazıkta meydana gelen yükün deplasman değerinin 3-5 mm olana kadar arttığı, maksimuma eriştikten sonra ise sabit kaldığı ve yükün sabit kalmasının da zeminde kemerlenmenin tam olarak geliştiğinin göstergesi olduğu,

- Kazık aralığı arttıkça kazığa gelen yüklerin arttığı, kazık aralığı 8d'ye eşit ya da büyük olduğunda ise zeminin kemerlenmesi olmadan kazığın tek kazık davranışı gösterdiği,
- Sonuçların s = 4d'ye kadar birbirine yakın olduğu ve s = 4d'den sonra Adachi tarafından yapılan numerik analiz sonuçları farklı akma kriteri kullanıldığından dolayı deney sonuçlarını %25 - %60 arasında arttırmakta olduğu belirlenmiştir [8].



Şekil 3.27 : Zemin Hareketi - Kazığa Etkiyen Yük Diyagramı [8]

2. Bosscher ve Gray (1986) tarafından yapılan model deneyi ile Liang ve diğ. (2002) tarafından yapılan model analiz sonuçlarını karşılaştırmak amacı ile model 2d, 3d, 4d, 6d ve 8d kazık aralıklarında kazık aralığı oranına (s/d) karşı kazıkta oluşan yükler incelenmiş ve Şekil 3.28'de gösterildiği üzere sonuç olarak;
   - Kemerlenme mekanizmasının varlığının yapılan numerik analizlerde ortaya çıktığı,
   - Belirli bir kazık aralığında, kazık üzerine etkiyen yükün en yüksek değerine ulaştığı ve sonra sabit kaldığı ve bu durumun kemerlenmenin tam olarak geliştiğinin göstergesi olduğu,
   - Kazığın çapı sabitken, kazık aralığı arttırıldığında, kazıklar arasındaki zemine gelen yük artmakta olduğu belirlenmiştir [8].



Şekil 3.28 : Kazıklar Arası Zemine Etkiyen Yük – Kazık Aralığı Oranı [8]

Model deneylerin 2. safhasında ise yine 2 boyutlu sonlu elemanlar analiz programı ile zeminin kemerlenmesini etkileyen kazık aralığı (s), kazık çapı (d), kazık biçimi (dikdörtgen ve dairesel kazık), kohezyon (c), zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi faktörler göz önüne alınarak Şekil 3.26'da gösterilmiş model gibi birçok model analizleri yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda ise ;

1. Kazık aralığı arttırıldığı zaman, kemerlenme etkisinden dolayı kazıklara daha az yük geldiği ve bu durumda büyük kazık aralıklarında kemerlenmenin etkili olmadığı,
2. Kazık aralığının kazık çapına oranı sabitken, kazık çapının farklı olması kemerlenmenin neden olduğu yük transferinde çok az etkisi olduğu,
3. Kare kazıkların yuvarlak kazıklara göre kemerlenmenin oluşturduğu yük transferini %5 kadar daha fazla iletebildiği,
4. İçsel sürtünme açısı yüksek olan bir zeminde, kazıklar arasındaki zemin daha az yük taşırken, yükün büyük bir kısmı kazıklara aktarılması ile kemerlenme etkisinin, düşük içsel sürtünme açısına sahip zemine göre daha fazla olduğu,
5. Kohezyonlu bir zeminin yük transfer mekanizmasının önemli olduğu, kohezyonu yüksek olan zeminde kazıklara daha fazla yük transferinin olduğu ortaya çıkmıştır [8].

3.3. Kazıklar Üzerine Etkiyen Yanal Yüklerin Tahmini

Aktif toprak kaymalarının iyileştirilmesinde ya da kazı yüzeylerinin desteklenmesinde kullanılan ve bu yüzden yanal zemin hareketine maruz kalan kazıklara pasif kazık denmektedir. Kazık-şev etkileşimi analizlerinde, kazıklar üzerine etkiyen nihai yanal kuvvetin tahmin edilmesinin doğruluğu önemli olmaktadır. Yanal kazık-zemin gerilmesi için bir limit değer belirlenmeli ve böylece zeminin lokal göçmesine nonlineer davranış elde edilene kadar izin verilmelidir. Kazıklar üzerine etkiyen yükler daha sonra kazıklarda oluşan maksimum kesme kuvveti ve eğilme momentinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Zemin hareketinden (plastik deformasyonundan) dolayı kazıklar üzerine etkiyen yanal kuvvetlerin tahmin edilmesi için bazı kullanılabilir metotlar aşağıda özetlenmektedir.

3.3.1. Lamb ve White Metodu

Lamb ve White, kazık çevresindeki zeminin viskoz bir sıvı olduğunu farz ederek tek kazık ve tek sıra kazıklar üzerine etkiyen yanal kuvvetlerin elde edildiği deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu varsayımdan dolayı üzerinde çalışılmış olan bu metod toprak kaymaları ve şev göçmeleri dışındaki hiçbir durum için kullanılamamaktadır [7] .

3.3.2. Hennes Metodu

Hennes, kohezyonlu zeminin plastik davranış gösterdiği ve kazıkların şevin ya da toprak kaymalarının olacağı yöne paralel olarak sonsuz bir şekilde yerleştirildiği, kazıklara gelen yanal yükleri hesaplayan bir yöntem geliştirmiştir. Fakat Hennes'in varsayımında ise kazıklar arasındaki zeminin kayma ve basınç deformasyonları ihmal edilmektedir. Zaten daha sonra bu metod ile tahmin edilen yanal yüklerin gerçek değerlerinden aşağıda sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır [7].

3.3.3. Kamu İşleri Araştırma Enstitüsü Metodu

Kamu İşleri ve Araştırma Enstitüsü, zemin içerisindeki kazıklar önünde pasif Rankine göçme bölgesinin oluştuğunu farz ederek, kazığa gelen yanal kuvvetler hakkında teorik bir metod geliştirmiştir. Bu varsayımdan dolayı, bu metod ile birlikte şev hareketinin limit durumu içerisinde yanal yükler tahmin edilmektedir. Fakat ele alınan değer nihai limit durumu değil de, şev hareketinin ilk durum içerisinde

meydana gelen değerdir. Bu yüzden, bu metod ile tahmin edilen yanal yükler gerçek değerlerin üstünde sonuçlar vermekte olduğu ileri sürülmüştür [7].

3.3.4. Ito ve Matsui Metodu (1975)

Ito ve Matsui (1997), kazıklar arasındaki mesafe göz önünde bulundurularak plastik deformasyona uğrayan zemin boyunca tek sıra kazıklara gelen yanal yüklerin tahmin edilmesi amacıyla yukarıda anlatılan metodlardan farklı olarak (yukarıda anlatılan metodların hiçbirinde kazık aralıkları, zemin koşulları ve kazık çevresinde bulunan plastik durum tam olarak ele alınmamıştır) sadece kazık çevresindeki zeminde meydana gelebilecek iki çeşit plastik durumu temsil eden metodlar geliştirmiştir [7]. Bu metodlar;

1. Plastik deformasyon teorisi olarak adlandırılan Mohr Coulomb akma kriterini sağlayan plastik durum,
2. Plastik akış teorisi olarak adlandırılan zeminin visko-plastik bir kütle olduğu durumdur.

3.3.4.1. Plastik Deformasyon Teorisi

Ito ve Matsui (1975) plastik deformasyon teorisini oluşturarak yanal zemin hareketinin tek sıra kazıklar üzerine etkiyen yanal kuvvetleri tahmin edebilmek için bir takım varsayımlar ileri sürmüştür. Bu varsayımlar;

1. Zemin tabakası içerisinde Şekil 3.29'da görüldüğü üzere 2 kazık arasında $ACDFF'D'C'A'$ alanı ile sınırlanmış zemin deforme olduğunda, $\overline{EB}$ ve $\overline{E'B'}$ çizgilerinin yapmış olduğu açı $(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi}{2})$ ile $\overline{A}\overline{E}\overline{B}$ ve $\overline{A'E'B'}$ çizgileri boyunca x doğrultusunda 2 adet kayma yüzeyi meydana gelmektedir.

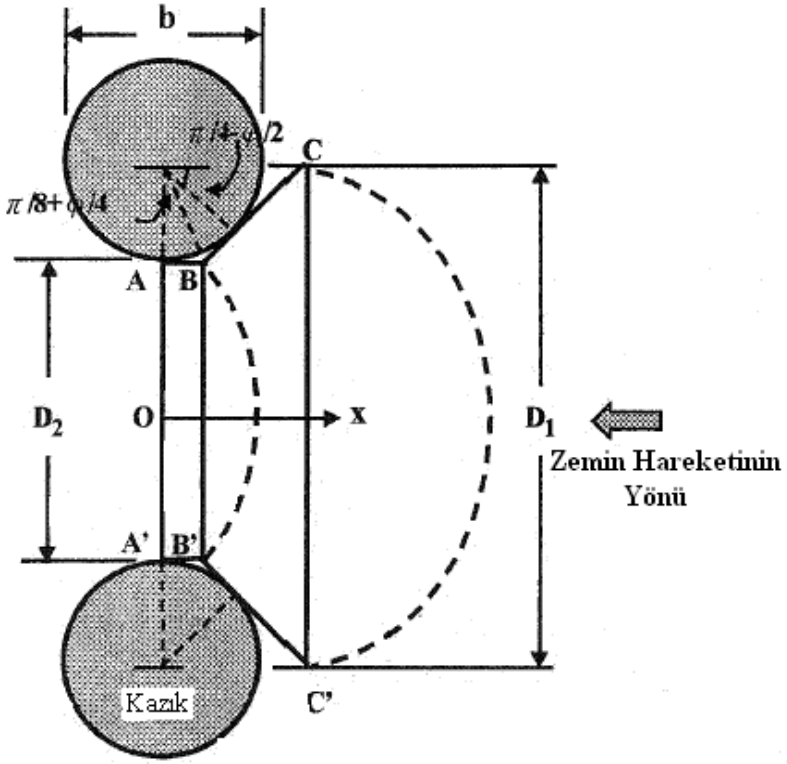
2. Mohr Coulomb akma kriterinin uygulandığı analizlerde zemin tabakası sadece kazıklar çevresinde $AEBB'E'A'$ çizgileri ile sınırlanan bölgede plastik hale gelmektedir. Zemin tabakası içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyona (c) sahip plastik zemini temsil etmektedir.

3. Zemin tabakası düzlem deformasyon koşullarında tasarlanmıştır.

4. $\overline{A}\overline{E}\overline{B}$ ve $\overline{A'E'B'}$ yüzeyleri üzerine sürtünme kuvvetleri etkimiş olsa bile, sürtünme kuvvetlerinin etkimediği durumdaki $AEBB'E'A'$ yüzeyine gelen

gerilme dağılımı ile etkidiği durumdaki gerilme dağılımının hemen hemen aynı olduğu varsayılmıştır.

5. Kazıklar rijit kabul edilmiştir [7].



Şekil 3.29 : Kazıklar Çevresindeki Zemin İçinde Meydana Gelen Plastik Deformasyon Durumu [7]

Bu varsayımların kullanımına dayanarak, kazıklar üzerine etkiyen yanal kuvvet aşağıdaki denklem tarafından tahmin edilmiştir.

$$p(z) = cD_1\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{(N_\phi^{1/2}\tan\phi + N_\phi - 1)}\left[\frac{1}{N_\phi\tan\phi}\left\{\exp\left(\frac{D_1 - D_2}{D_1}N_\phi\tan\phi\tan\left(\frac{\pi}{8}+\frac{\phi}{4}\right)\right)\right.\right. \qquad \textbf{(3.24)}$$

$$\left.\left. - 2N_\phi^{1/2}\tan\phi - 1\right\} + \frac{2\tan\phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2}\tan\phi + N_\phi - 1}\right] - c\left\{D_1\frac{2\tan\phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2}\tan\phi + N_\phi - 1}\right.$$

$$\left. - 2D_2N_\phi^{-1/2}\right\} + \frac{\gamma z}{N_\phi}\left\{D_1\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{(N_\phi^{1/2}\tan\phi + N_\phi - 1)}\exp\left(\frac{D_1 - D_2}{D_1}N_\phi\tan\phi\tan\left(\frac{\pi}{8}+\frac{\phi}{4}\right)\right) - D_2\right\}$$

Burada;

$c =$ zeminin kohezyon gerilmesi

$D_1 =$ kazıklar arasında merkezden merkeze olan uzaklık

$D_2 =$ kazık aralığı

$\phi =$ zeminin içsel sürtünme açısı

$\gamma =$ zeminin birim hacim ağırlığı

$z =$ zeminin yüzeyinden olan derinlik

$$N_\phi = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

Kohezyonsuz zeminler için kazıklara gelen yanal kuvvet 3.24 denkleminde kohezyon yerine sıfır $(c = 0)$ yazılarak 3.25 denkleminde olduğu gibi tahmin edilmektedir.

$$p(z) = \frac{\gamma z}{N_\phi}\left\{D_1\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{(N_\phi^{1/2}\tan\phi + N_\phi - 1)} \exp\left(\frac{D_1 - D_2}{D_1} N_\phi \tan\phi \tan\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4}\right)\right) - D_2\right\}$$

Kohezyonlu zeminler için ise kazıklara gelen yanal kuvvet yukarıdaki denklemde zeminin içsel sürtünme açısı yerine sıfır $(\phi = 0)$ yazılarak aşağıdaki 3.26 denklemi yardımıyla tahmin edilebilmektedir.

$$p(z) = c\left\{D_1\left(3\log\frac{D_1}{D_2} + \frac{D_1 - D_2}{D_2}\tan\frac{\pi}{8}\right) - 2(D_1 - D_2)\right\} + \gamma z(D_1 - D_2) \quad \textbf{(3.26)}$$

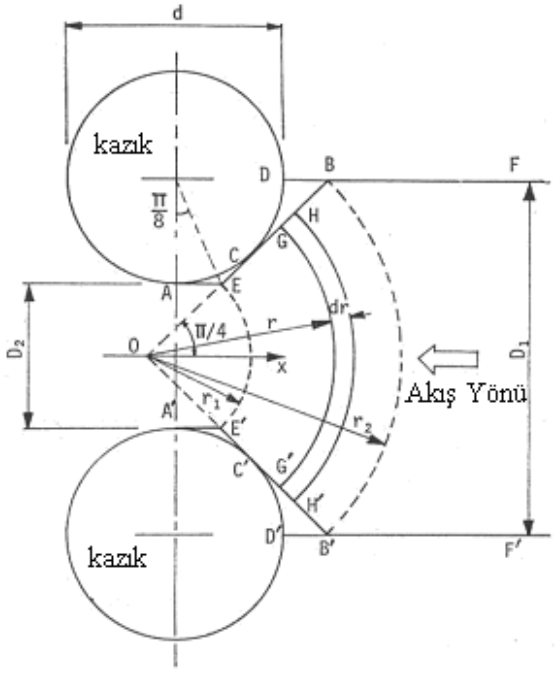
Bu metod rijit kazıklar için ortaya çıkartılmış olmasına rağmen elastik kazıklar içinde genişletilebilmektedir (Ito ve diğerleri, 1981). Metod yaygın kullanılmasına rağmen, grup etkileri hakkında önemli belirsizliklere sahiptir [7].

3.3.4.2. Plastik Akış Teorisi

Ito ve Matsui (1975) plastik akış teorisini oluşturarak yanal zemin hareketinin tek sıra kazıklar üzerine etkiyen yanal kuvvetleri tahmin edebilmek için birtakım varsayımlar ileri sürmüştür. Şekil 3.30'da gösterildiği üzere 2 kazık arasındaki

$ACDFF'D'C'A'$ alanı ile sınırlandırılmış zeminin v_1 hızıyla akabileceğini ileri süren varsayımlar aşağıda verilmiştir [7]. Bu varsayımlar;

1. Kazıkların çevresinde $AEBB'E'A'$ bölgesinde visko-plastik akışın meydana geldiği ve akış yönünün ise x aksıyla $\pi/4$ açısının yaptığı $EBB'E'$ bölgesinde merkeze doğru olduğu ileri sürülmüştür.
2. Zemin tabakasının durgun durumda olduğu kabul edilmiş ve visko-elastik katı olarak adlandırılmıştır.
3. Zemin tabakası uniform olarak derinliğin yönü içerisinde akmaktadır.
4. $GHH'G'$ bölgesi ile çevrili r yarıçapına sahip küçük kil elemanına gelen kuvvetler, toprak basıncından dolayı kuvvetlerin toplamı olarak elde edilmekte ve yumuşak taban yüzeyi ile $\overset{\frown}{GG'}$ yayının genişliği içerisindeki eleman akışının visko-plastik akış şeklinde olacağı farz edilmiştir.
5. Kazıklar rijit olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.30 : Kazıklar Arasındaki Zeminde Meydana Gelen Plastik Akış Durumu [7]

Bu varsayımların kullanımına dayanarak, kazıklar üzerine etkiyen yanal kuvvet aşağıdaki denklem tarafından tahmin edilmiştir.

$$p(z)=\sqrt{2m\tau_y}\left\{\sqrt{1+\frac{m}{2\tau_y D_2{}^2}}-\sqrt{1+\frac{m}{2\tau_y D_1{}^2}}+\log\frac{D_1\left(1+\sqrt{1+\frac{m}{2\tau_y D_1{}^2}}\right)}{D_2\left(1+\sqrt{1+\frac{m}{2\tau_y D_2{}^2}}\right)}\right\} \quad \textbf{(3.27)}$$

$$+(D_1-D_2)\left\{\frac{(\sqrt{2}-1)\pi^2 m}{8D_2{}^2}+(\sqrt{2}-1)\sqrt{\left(\frac{\pi^2 m}{8D_2{}^2}\right)^2+\frac{\pi^2 m\tau_y}{4D_2{}^2}}+\frac{m}{D_1 D_2}+\sqrt{2}\tau_y-2c+\gamma z\right\}$$

Burada;

$c=$ zeminin kohezyon gerilmesi

$D_1=$ kazıklar arasında merkezden merkeze olan uzaklık

$D_2=$ kazık aralığı

$\gamma=$ zeminin birim hacim ağırlığı

$z=$ zeminin yüzeyinden olan derinlik

$\tau_y=$ akma gerilmesi

$m=16\eta_p v_1 \,D_1 \big/ \pi^3$

$\eta_p=$ plastik viskozite

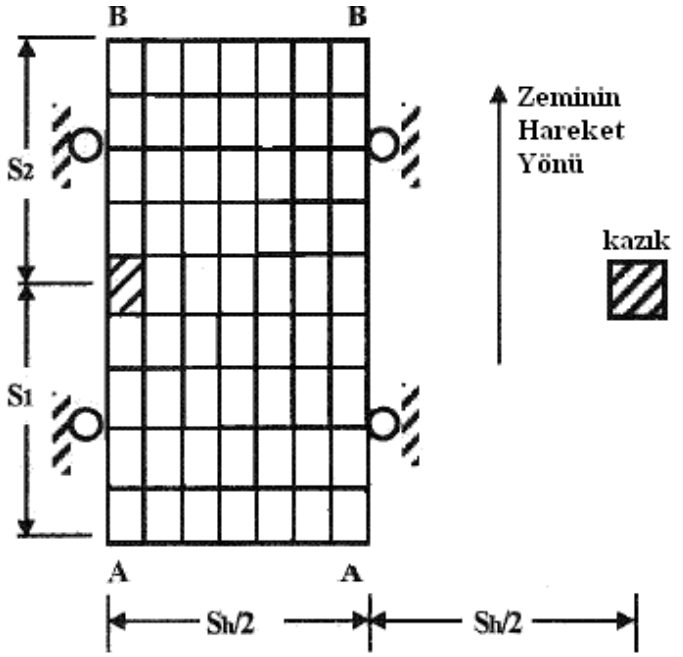
$v_1=$ zeminin akış hızı

3.3.5. Chen ve Poulos Metodu (1994)

Chen ve Poulos (1994) tarafından düşey bir kazının yakınına yerleştirilen kazıkların grup etkilerini incelemek amacıyla, düzlem deformasyon yaklaşımı ile birlikte AVPULL sonlu elemanlar programını kullanarak numerik bir model hazırlanmıştır.

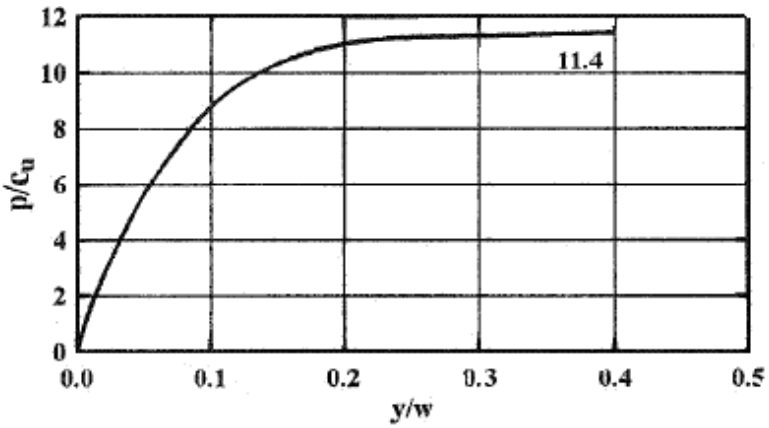
Bu metodta, kazıklar rijit ve kare olarak kiriş sonlu elemanı kullanılarak modellenmiştir. Kazık ve zemin elamanları arasında ayrılma ya da kaymayı modellemek amacıyla kullanılan ara yüzey elamanları ve az kohezyonlu drenajsız kil, Tresca göçme kriterine uyularak elasto-plastik model kullanılmıştır [4].

Şekil 3.31'de oluşturulmuş olan modelin sonlu elamanlar ağı ve sınır koşulları gösterilmiştir. Simetriden faydalanılarak kazık yarım kazık olarak modellenmiştir.



Şekil 3.31 : Tek sıra Kazıklar İçin Kullanılan Sonlu Elemanlar Modeli [4]

A-A sınırında, düğüm noktalarının ilk sırasına kadar uniform zemin deplasmanı artımlı bir şekilde uygulanırken, B-B sınırı kazı koşulunu modellemek için gerilmeden bağımsız olarak ayarlanmıştır. Kazığın rijit olduğu farz edilmiştir. Ortalama gerilme (p), zemin hareketi yönünde kazığa etkiyen gerilmelerin toplamından hesaplanmaktadır. Belirli bir derinlikte p-y eğrisi oluşturulabilmekte ve nihai zemin gerilmesi elde edilebilmektedir. Şekil 3.32'de sonuç olarak çizilmiş p-y eğrisi, nihai gerilmenin (p_u) , $11.4C_u$ olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.32 : Tek Ayrık Kazık İçin Normalize Edilmiş p-y İlişkisi [4]

Eğer kazıya ya da şeve komşu olan bir kazık yanal yemin hareketine maruz kalırsa, p_u yaklaşık olarak aşağıda denklem 3.28 ile belirlenebilmektedir (Chen ve Poulos, 1994).

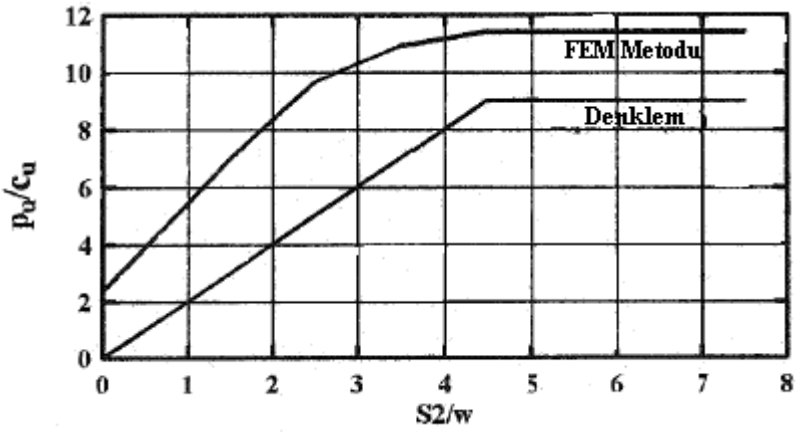
$$p_u = \frac{2S_2 c_u}{w} \quad (\text{maksimum } 9c_u) \qquad \textbf{(3.28)}$$

Burada,

$S_2 =$ kazığın merkezi ile şev ya da kazının köşesi arasındaki uzaklık

$w =$ kazık çapı ya da eni

S_2 değerini çeşitlendirmek, normalize edilmiş nihai zemin gerilmesi P_u / c_u ile normalize edilmiş uzaklık S_2 / w arasındaki ilişki Şekil 3.34'te gösterilmiştir. Şekil 3.33'te ayrıca yukarıdaki denklem sonuçları ile sonlu elamanlar sonuçları karşılaştırılmaktadır. Buna göre, denklemden elde edilen değerler sonlu eleman programı ile elde edilen değerlerden daha düşük bir değer vermekte, fakat her iki metotta da benzer eğilimin olduğu görülmüştür. Sonuçlar $S_2 \rangle 4w$ olması durumunda, en son nihai değere ulaştığını göstermektedir.



Şekil 3.33 : Kazının P_u Üzerindeki etkisi [4]

3.3.6. Diğer Amprik metodlar

Kohezyonlu zeminlerde tek kazıklar için relatif kazık-zemin yer değiştirmesinden dolayı limit akma gerilmesi Chow (1996) tarafından önerilen aşağıda denklem 3.29 ile tahmin edilmektedir.

$$p_y = N_p C_u \qquad \textbf{(3.29)}$$

Burada,

$N_p =$ kayma yüzeyi üzerinde kayan zemin için 3-4

$N_p =$ kayma yüzeyi altında stabil zemin için 8-12 olmaktadır.

Kohezyonsuz zeminlerde kazıklar için limit akma gerilmesi Broms (1963) tarafından önerilen denklem 3.30 ile tahmin edilebilmektedir.

$$p_y = 3K_p \sigma_v' \qquad \textbf{(3.30)}$$

Burada,

$K_p =$ Rankine pasif gerilme katsayısı

$\sigma_v' =$ etkili jeolojik yük gerilmesi şeklinde ifade edilmektedir.

3.4. Yanal Zemin Hareketine Maruz Kalan Kazıkların Göçme Durumları

Stabilize rijit kazıkların göçme durumları, limit denge metodunu kullanan Viggiani (1981) tarafından incelenmiştir. Kazıklar kayma yüzeyinin altında L_2 kalınlığında drenajsız kayma mukavemeti C_2 olan doygun kil üzerine oturtulmuş ve kayma yüzeyinin yukarısında L_1 kalınlığında C_1 drenajsız kayma mukavemetine sahip zemine yerleştirilmiştir [4].

Şekil 3.34'te rijit kazığa ait 3 adet göçme durumu gösterilmiştir. A durumunda, bütün kazık kayan zemin ile birlikte hareket etmektedir. A durumu ancak aşağıda verilen durum gerçekleştiğinde meydana gelebilmektedir.

$$\lambda \langle \lambda' = \chi \left(\frac{\sqrt{2+2\chi} - 1}{1+2\chi} \right) \qquad \textbf{(3.31)}$$

Burada,

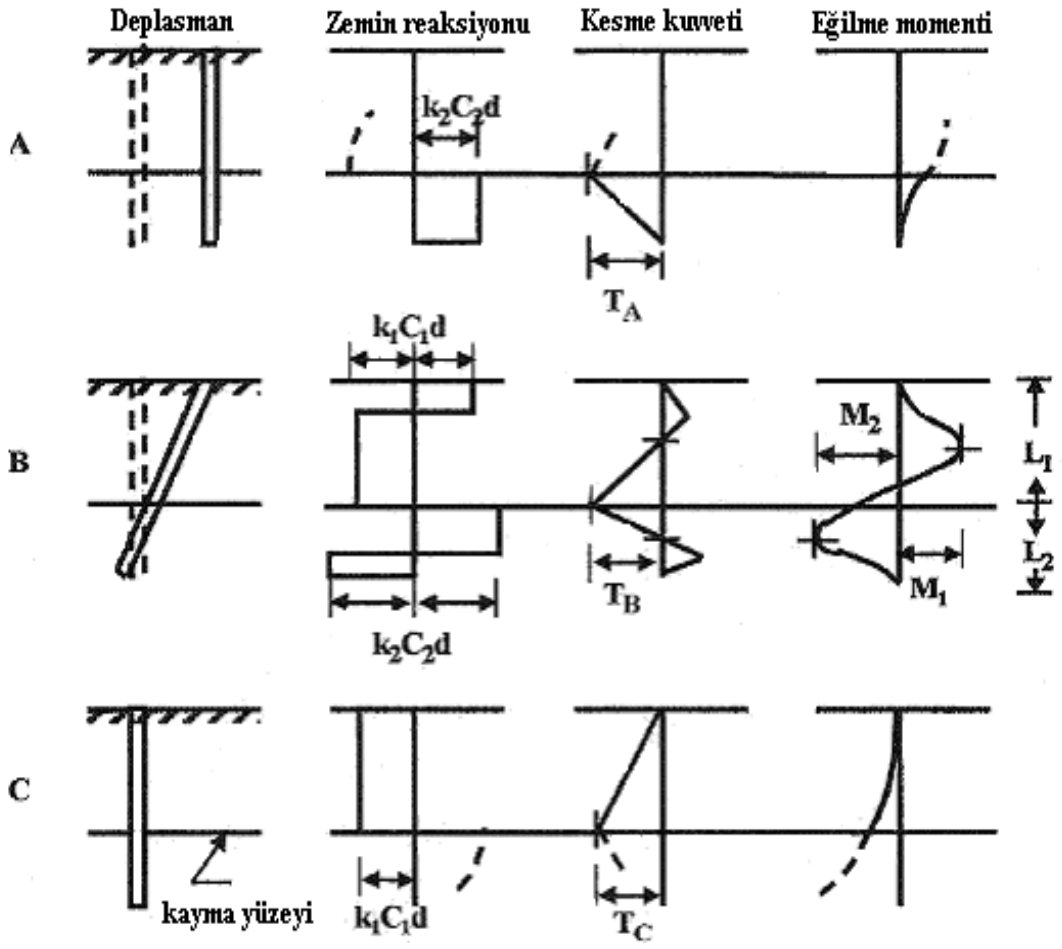
$$\lambda = {L_2}/{L_1} \qquad \chi = {P_{y_1}}/{P_{y_2}} = {k_1 C_1}/{k_2 C_2}$$

P_{y_1} = kayan zeminin nihai yanal zemin basıncı

P_{y_2} = sabit zeminin nihai yanal zemin basıncı

Kazık zemin içerisinde yerinden oynamadan kazık çevresinden zemin akıyorsa, bu durumda C durumu meydana gelmektedir. C durumu ancak aşağıda Denklem 3.32'de verilen durum gerçekleşirse oluşmaktadır.

$$\lambda \rangle \lambda'' = \chi + \sqrt{2\chi^2 + 2\chi} \qquad \textbf{(3.32)}$$



Şekil 3.34 : Şev Stabilitisinde Kullanılan Rijit Kazıkların Göçme Durumları [4]

Kazık rijit bir dönmeye maruz kalarak şev yüzeyinin altında ve üstünde zemin göçerse, bu durumda B durumu meydana gelmektedir. C durumu ancak $\lambda' \le \lambda \le \lambda''$ durumu meydana geldiği zaman gerçekleşmektedir.

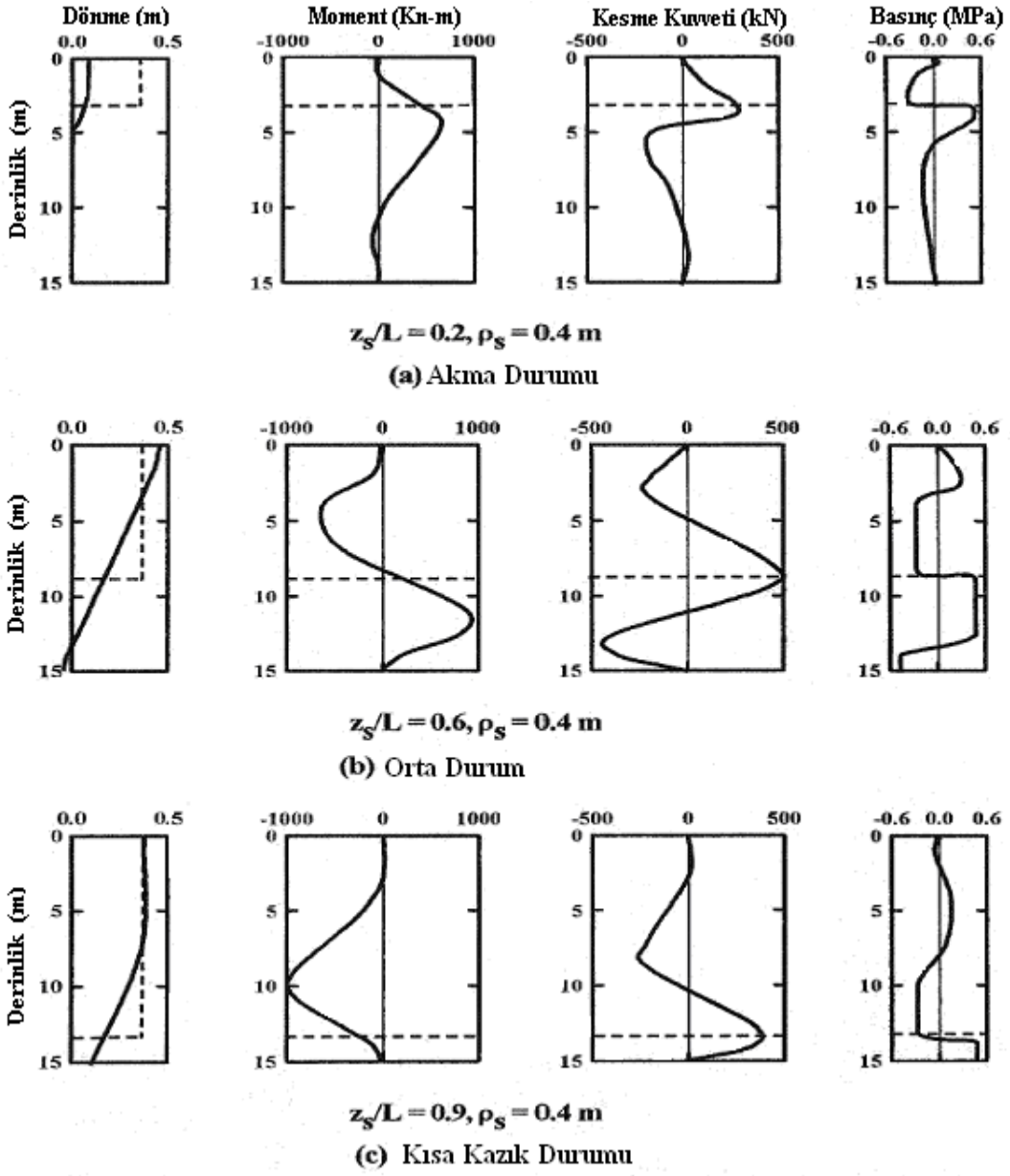
Her ne kadar Viggiani (1981) doygun kil zeminler üzerindeki rijit kazıkların göçme bölgeleri hakkında değerli bilgiler verse de; ne yazık ki uygulamalar rijit kazıkların davranışı ile sınırlı kalmıştır.

Viggiani (1981) metodunun eksiklerini gidermek amacıyla, Poulos (1995) basitleştirilmiş sınır elaman analizini kullanarak yeni bir metod geliştirmiştir. Bu modelde, kazık basit elastik kiriş olarak, zeminde elastik kontinuum olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.35'te analiz sonuçları verilmektedir ve oluşabilecek göçme durumları ;

1. Akma Durumu : Sabit olmayan zeminin plastik hale geldiği ve kazık çevresinde aktığı zaman,
2. Kısa – kazık Durumu : Derin kayma uzunluğu ve yüzeysel sabit uzunluk meydana geldiği zaman,
3. Orta Durum : Sabit ve sabit olamayan tabakadaki zemin gerilmesi kazık yüzeyi boyunca mobilize olduğu zaman,
4. Uzun kazık Durum : Kazığın aktığı ve diğer 3 göçme durumu ile birleştiği zaman meydana gelmektedir.

Şekil 3.36'da verilen göçme durumları incelendiğinde;

1. Kazıkta maksimum kayma gerilmesi kayma yüzeyinde meydana gelmektedir.
2. Akma durumunda, maksimum moment sabit zeminde meydana gelmiş ve kazık hareketi zemin hareketinden oldukça az çıkmıştır.
3. Kısa kazık durumunda, kazık zemin ile aynı deplasmana sahip, maksimum eğilme momenti sabit zemin içerisinde oluşmaktadır.
4. Orta kazık durumunda ise, hem sabit hem de akan zemin içerisinde büyük momentler meydana gelmekte ve kazık başlığı hareketi zemin hareketinden büyük olmaktadır.



Şekil 3.35 : Birçok Göçme Durumdaki Kazık Davranışı [4]

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PROGRAM ÖZELLİKLERİ

4.1. Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi, malzeme özelliklerinin çeşitliliğini ve sınır koşulların farklılığını güçlükle karşılaşmadan bağdaştırabilen, kullanımı kolay, çok yönlü sayısal analiz yöntemlerinden biridir. Günümüzde birçok mühendislik dalında olduğu gibi inşaat ve geoteknik mühendisliğinde, her türlü yapının statik ve dinamik analizinde, zemin mekaniği ve zemin-yapı etkileşiminin incelendiği problemlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Herhangi bir geoteknik tasarım yapılırken, zeminlerdeki gerilme-şekil değiştirme, akım, konsolidasyon (oturma), taşıma gücü ve dinamik davranışların yanı sıra; yapı ve zeminde meydana gelebilecek yerel veya toptan göçme davranışları, yapıya gelen kesit tesirleri (eğilme momenti, eksenel kuvvetler veya kesme kuvvetleri), yapı ve komşu zeminde meydana gelebilecek deformasyonlar, çevre yapılar ve servis ağlarında oluşacak etkilerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Fakat analitik çözüm yöntemleri, yukarıda belirtilen durumların tamamını tek bir çözümde ele alamadıklarından, sadece belli bir durum için fikir verebilmektedirler. Sonlu elemanlar programının kullanılması ile bu eksiklik giderilmiş, problemlerin modellenmesinde birden çok etkinin göz önüne alınarak, kullanılan malzeme özelliklerin seçiminde, sınır koşullarının belirlenmesinde ve yükleme koşullarındaki çeşitlilik özellikleri ile kullanıcılara problemlerin modellenmesinde bir çok kolaylık gösterilerek gerçeğe yakın çözümlerin elde edilmesi sağlanmıştır.

Yöntem, zeminin nonlineer gerilme-deformasyon özelliklerini, çeşitli yük şartlarını ve yapının özelliklerini matematiksel olarak modelleyerek komple bir çözüm yapmasından dolayı şev stabilitesi problemlerinin, kazı problemlerinin, toprak dolgu barajların, gömülü boruların, istinat yapılarının analizinde kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, faydaları ve kolaylıklarından dolayı her geçen gün daha fazla geoteknik mühendisi tarafından kullanılmaya başlanmıştır.

4.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Genel Tanıtımı

Yöntemin ana ilkesi, karmaşık bir yapının idealize edilip basitleştirilmiş bir model haline getirilerek çözümün yapılmasıdır. Sonlu Elemanlar yönteminde, yapıların davranışlarını tespit etmek amacıyla problemin geometrisi düğüm noktalarının koordinatları ile oluşturularak sistem sonlu sayıda elaman adı verilen ufak parçalara ayrılır. Sonlu sayıdaki bu elemanlar yönteme de adlarını vermişlerdir. Yapıyı oluşturan tek bir elemanın davranışı tanımlanabilirse, yapıdaki tüm elemanlar içinde aynı davranışların tanımlanması mümkün olacaktır. Bu tanımlama yapılırken; çözüm için bir değişken seçilerek bu değişkenin tek bir elemandaki davranışı modellenir ve matris tekniği ile tüm sisteme uygulanarak bilinmeyenler bulunur. Deplasmanların ana değişken olarak seçildiği sonlu elemanlar yönteminde, problemin her bir noktasındaki deplasmanlar bilinmeyenlerdir. Deplasman değerleri çözüldüğünde, gerilme ve deformasyonlar deplasmana bağlı olarak bulunurlar.

Bir, iki veya üç boyutlu sonlu elemanlar genel bir matris içerisinde birleştirilir. Her bir elemanın tipi farklı rijit özellikleri ile birlikte tanımlanır. Çeşitli yükleme şartları, yer altı şartları, zeminin ve yapının özellikleri matematiksel olarak modellenebilmektedir. Bir modelin sonlu elemanlar programı ile çözümü yapılırken aşağıdaki işlemler gerçekleşir;

- Sonlu eleman tipi seçimi yapılır,
- Sonlu elemanlar ağı oluşturulur,
- Eleman matrisi hesaplanır,
- Hesaplanan matrisler toplanır,
- Sınır şartları uygulanır,
- Eşitlikler çözülür,
- Son olarak düğüm noktası değerleri kontrol edilir ve çözümde hatalar varsa bilgisayara girilen bilgiler kontrol edilir.

4.3. Kullanılan Kavramlar

Rijitlik Matrisi

Rijitlik Matrisi, bir elemanın geometrik ve malzeme özelliklerinden elde edilen denge denklemleri katsayıları ve minimum potansiyel enerji ilkesinden

faydalanılarak elde edilen katsayıları içermektedir. Rijitlik, düğüm noktalarının deplasmanları ve düğüm noktası kuvvetleri ile ilgilidir. Rijitlik matrisi $[k]$, düğüm noktası vektörü $\{Q\}$ ve deplasman vektörü $\{q\}$ arasındaki ilişki;

$$[k]\times\{q\}=\{Q\} \qquad \textbf{(4.1)}$$

olarak verilmektedir [12]. Rijitlik matrisindeki elemanlar "etki katsayıları"dır.

Toplam Rijitlik Matrisi

Bütün ortam (bünye) için, eleman rijitlik matrisinden kurulan global rijitlik matrisidir. Bu matris tek eleman düğüm noktası kuvvet vektörlerinin kullanıldığı toplam kuvvet ya da yük vektörlerini kapsar. Toplam rijitlik matrisi $[k]$, toplam yük vektörü $\{R\}$ ve düğüm noktası deplasman vektörü $\{r\}$ arasındaki eşitlik Denklem 4.2'de verildiği gibidir [12];

$$[k]\times\{r\}=\{R\} \qquad \textbf{(4.2)}$$

Gerilme Durumu

Elementel hacimdeki yüklü bir bünyedeki gerime durum altı bileşene sahiptir ve şöyle ifade edilir; [12]

$$\{\sigma\}^T=[\ \sigma_x\ \ \sigma_y\ \ \sigma_z\ \ \tau_{xy}\ \ \tau_{yz}\ \ \tau_{zx}\ ] \qquad \textbf{(4.3)}$$

Burada;

$\{\sigma\}^T$ = Gerilme vektörü

$\sigma_x\sigma_y\sigma_z$ = Normal gerilme bileşenleri

$\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx}$ = Kayma gerilmesi bileşenleri

şeklindedir. Eğer koordinat eksenleri asal eksen ise gerilme vektörü şu hale gelir.

$$\{\sigma\}^T=[\sigma_1\ \ \sigma_2\ \ \sigma_3\ \ 0\ \ 0\ \ 0] \qquad \textbf{(4.4)}$$

Gerilme invaryantları $J_1,\ J_2,\ J_3$ aşağıda verilmektedir. [12]

$$J_1=\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z+\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3 \qquad \textbf{(4.5)}$$

$$J_2=\sigma_x\sigma_y+\sigma_y\sigma_z+\sigma_z\sigma_x-\tau_{xy}{}^2-\tau_{yz}{}^2-\tau_{zx}{}^2$$

$$J_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$$

$$J_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x{\tau_{yz}}^2 - \sigma_y{\tau_{zx}}^2 - \sigma_z{\tau_{xy}}^2$$

$$J_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$$

Deformasyon ve Kinematik Durumu

Gerilme gibi deformasyon da 6 bileşene sahiptir ve aşağıdaki gibi ifade edilir [12].

$$\{\varepsilon\}^T = [\ \varepsilon_x\ \ \varepsilon_y\ \ \varepsilon_z\ \ \gamma_{xy}\ \ \lambda_{yz}\ \ \gamma_{zx}\ ] \qquad \textbf{(4.6)}$$

Burada,

$\{\varepsilon\} =$ Deformasyon vektörü

$\varepsilon_x\ \ \varepsilon_y\ \ \varepsilon_z =$ Normal deformasyon

$\gamma_{xy}\ \ \lambda_{yz}\ \ \gamma_{zx} =$ Kayma deformasyonudur.

Deformasyon invaryantları I_1, I_2, I_3 gerilme invaryantlarına benzer şekilde şöyle gösterilir [12].

$$I_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \qquad \textbf{(4.7)}$$

$$I_2 = \varepsilon_x\varepsilon_y + \varepsilon_y\varepsilon_z + \varepsilon_z\varepsilon_x - \frac{1}{4}\left({\gamma_{xy}}^2 - {\gamma_{yz}}^2 - {\gamma_{zx}}^2\right)$$

$$I_2 = \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1$$

$$I_3 = \varepsilon_x\varepsilon_y\varepsilon_z + \frac{1}{4}\left(\gamma_{xy}\gamma_{yz}\gamma_{zx} - \varepsilon_x{\gamma_{yz}}^2 - \varepsilon_y{\gamma_{zx}}^2 - \varepsilon_z{\gamma_{xy}}^2\right)$$

$$I_3 = \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1$$

Lineer İzotropik Elastisite

Genelleştirilmiş Hooke Kanunu'nda en basit hal malzeme lineer, izotropik ve elastik olduğundadır. İzotropik malzemede, bünyedeki her düzlem malzeme davranışının simetri düzlemidir (Yani nokta simetrisi söz konusudur). Deformasyonlar cinsinden (4.8) eşitliği yazılabilir [12].

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E & -v/E & -v/E & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E & -v/E & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{2(1+v)}{E} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{2(1+v)}{E} & 0 \\ & & & & & \frac{2(1+v)}{E} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad \textbf{(4.8)}$$

Gerilmeler cinsinden (4.9) eşitliği yazılabilir. [12].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1/v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ & 1\text{-}v & v & 0 & 0 & 0 \\ & & 1\text{-}v & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2v}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2v}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2v}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad \textbf{(4.9)}$$

Düzlem Deformasyon Durumu

Bir uzun yapının geometrisi ve yükleme durumu boylamasına önemli derecede değişmiyorsa bu duruma düzlem deformasyon durumu denir. Bu tür problemlerde bağımlı değişkenler sadece x ve y koordinatlarının fonksiyonları olabilirler. Bu da kesit üzerinde inceleme yapmamızı sağlar. Z yönündeki deplasman bileşeni, her kesitte 0 olduğunu kabul edersek ε_z, γ_{yz}, γ_{zx} kaybolacaktır ve kalan sıfırdan farklı deformasyon bileşenleri şöyle olacaktır [12];

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}\ , \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{ve} \quad \sigma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \tag{4.10}$$

ε_z'in kaybolmasıyla σ_z gerilmesi σ_x ve σ_y cinsinden Denklem 4.11 ile ifade edilir;

$$\sigma_z = v(\sigma_x + \sigma_y) \tag{4.11}$$

böylece elastik izotropik malzeme için yapısal model (4.12)'deki şekle indirgenecektir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} [1-\nu] & \nu & 0 \\ \nu & [1-\nu] & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

Düzlem Gerilme Durumu

Düzlem deformasyon (z yönündeki boyut x ve y boyutlarına göre çok büyüktür) durumun tersine, düzlem gerilme durumunda z yönündeki boyut çok küçüktür. Kendi düzleminde yüklenen ince plak örneği tipik bir örnek olarak verilebilir. Plak yüzey yükleme yapmadığımızı düşünürsek bileşenleri τ_{yz} ve τ_{zx} yüzeyden kaybolacaktır ve σ_z kalınlık boyunca sıfır olacaktır. Sıfırdan farklı bileşenler σ_x, σ_y ve τ_{xy} kalınlık üzerinden ortalamaları alınabilir ve z'den bağımsız olarak düşünülebilirler. Bu tanımlamayla karakterize edilen gerilme durumu "genelleştirilmiş düzlem gerilme durumu" adını alır. Deformasyon bileşenleri γ_{yz} ve γ_{zx} yüzünden kaybolacaktır ve ε_z şöyle gösterilebilecektir [12] ;

$$\varepsilon_z = -\frac{\gamma}{1-\gamma}\left(\varepsilon_x + \varepsilon_y\right) \tag{4.13}$$

Yapısal ilişki ise şu hale gelecektir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{pmatrix} 1 & \mathrm{v} & 0 \\ \mathrm{v} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{4.14}$$

4.4. Plaxis 3D Foundation Programının Özellikleri

Plaxis programının gelişimi 1987 yılında Delft Teknik Üniversitesi'nde Hidroloji bölümünde başlamıştır. İlk olarak Hollanda da yumuşak zeminler üzerinde bulunan akarsu setlerinin 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü amaçlanmıştır. Daha sonraki yıllarda, Plaxis geoteknik mühendisliğinin diğer alanlarında da kullanılmaya başlanmış ve bu nedenle 1993 yılında PLAXIS BV adında bir firma kurulmuştur. Plaxis'in asıl amacı; geoteknik mühendislerinin uzun hesaplamalara girmeden dizayn yapabilmelerini sağlamaktır. Plaxis araştırma merkezi bu amaçla bu konu üzerinde yoğunlaşarak güçlü çözümler elde etmiş ve sonuç olarak 1998 yılında, Windows için ilk PLAXIS 2D deformasyon ve gerilme analiz programı kullanıcılara sunulmuştur.

Daha sonra 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi üzerinde çalışılmış ve 2001 yılında 3 boyutlu tünel programı olan PLAXIS 3D TUNNEL programı ve 2004 yılında TNO-Diana ile ortaklaşa geliştirilmiş olan ikinci 3 boyutlu PLAXIS programı olan PLAXIS 3D FOUNDATION kullanıcıların hizmetine sunulmuştur. Sonuç olarak PLAXIS tüm ürün serisi ile dünya üzerinde birçok geoteknik mühendisi tarafından kullanılan bir program haline gelmiştir [14].

PLAXIS 3D FOUNDATION, son yıllarda kazıklı radye temeller üzerine artan ilgi nedeniyle, kazıklı radye temelleri ve deniz yapılarını içeren temel yapılarının analizi için geliştirilmiş üç boyutlu Plaxis sonlu elemanlar programıdır [14]. Bu çalışma kapsamında, kazık ve kazıklı dayanma yapılarının modellenmesi ile kazıklar arasındaki kemerlenme etkisinin 3 boyutlu olarak incelenmesine olanak sağlaması nedeniyle PLAXIS 3D FOUNDATION programı kullanılmıştır. Bu nedenle aşağıda bu program serisinin özellikleri anlatılmaktadır.

Program, grafik bilgi girişine olanak sağlayan bir giriş (input) programı, analizlerin gerçekleştirildiği hesap (calculation) programı, analiz sonuçlarını grafik olarak sergeleyebilen çıkış (output) programı ve elde edilen sonuçlarla ilgili istenilen eğrilerin oluşturulmasına olanak sağlayan eğri (curve) programından oluşmaktadır.

Giriş (Input) Programı :

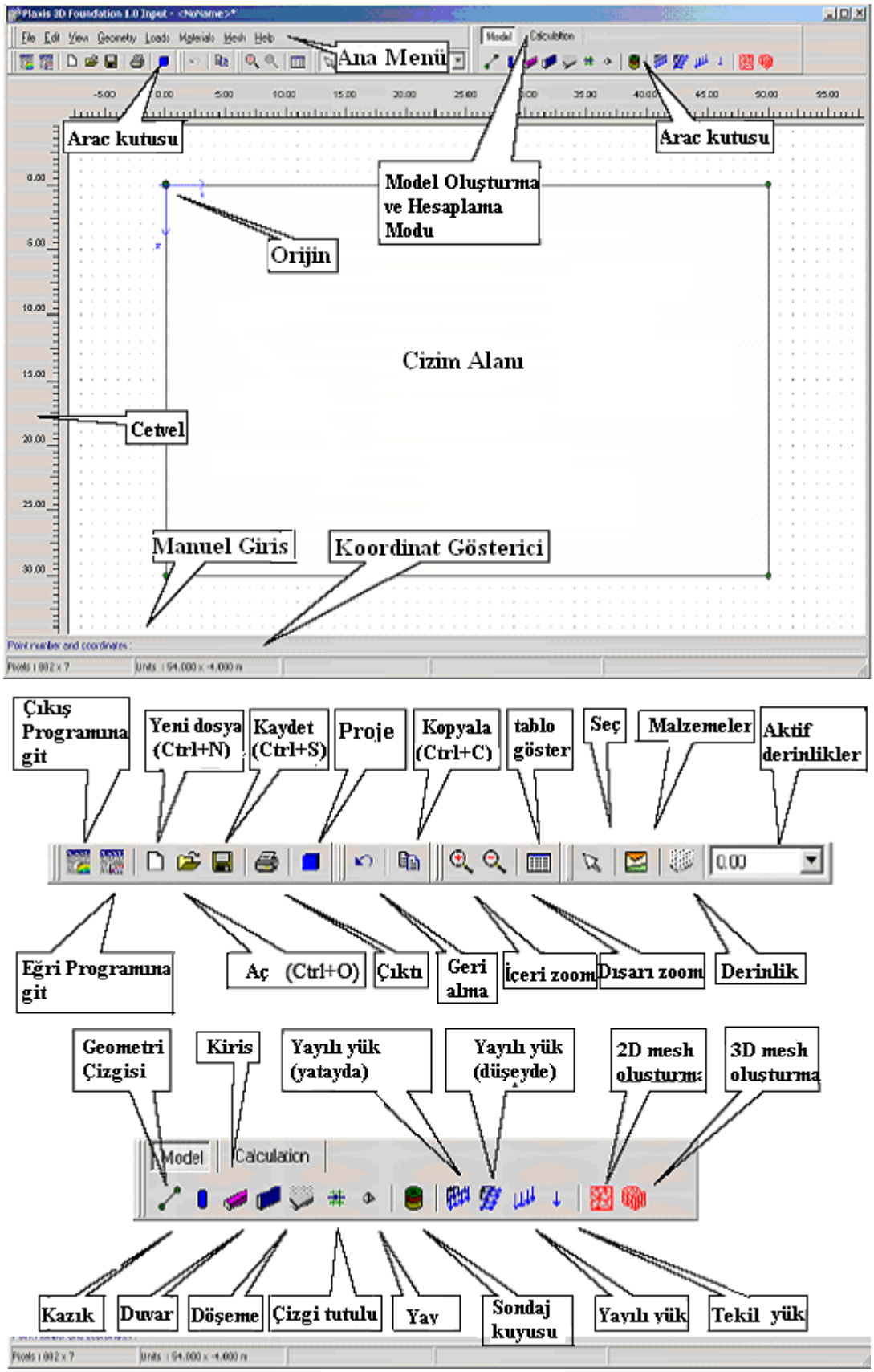
Programın Şekil 4.1'de Giriş (input) programının çizim ortamı verilmiştir. Giriş (input) programında yapılacak olan aşamalar sırasıyla özetlenmektedir;

Modelin 2 boyutlu geometrisinin oluşturulması : İlk olarak yapılması gereken oluşturulacak olan modelin x-z düzleminde çizgisel (lines) elemanlar yardımı ile çalışma alanının sınırlarını belirlemektir. Daha sonra herhangi bir düşey (y) seviyesinde düğüm noktaları, çizgileri ve özellikle yapıların ve yüklerin tanımlanmasına yardımcı olacak x-z düzlemi boyunca yatay düzlemler elde etmek amacıyla oluşturulan 2 boyutlu model Giriş (input) menüsündeki Workplanes komutu kullanılmaktadır. Böylelikle 3 boyutlu modelin oluşturulması için ilk adım atılmaktadır. Daha sonra modelde kullanılacak olan kazık, çubuk, duvar, döşeme ve ankrajları modellemek için kullanmak üzere yaylar gibi yapısal elemanlar Pile, Beam, Wall, Floor ve Spring komutları yardımıyla modellenir. Ayrıca her bir komut altında yapı elemanı ile zemin etkileşimini hesaba katmak amacı ile arayüzey elemanları tarif edilebilmektedir.

Sınır şartlarının belirlenmesi : Program oluşturulan modelin sınır koşullarını otomatik olarak standart sınır koşullarına (modelin alt sınırı x,y ve z yönlerinde tutulu, y-z düzleminin x yönünde tutulu, x-y düzleminin z yönünde tutulu ve zemin yüzeyinin ise bütün yönlerde serbest olduğu koşul) göre kabul etmektedir. Yani menüde diğer Plaxis menülerinde olduğu gibi standart sınır koşullarını ifade eden herhangi bir blok bulunmamaktadır. Ancak gerekli hallerde bu sınır şartlarına müdahale etmek amacıyla çizgisel sınır koşulu line fixity komutu kullanılabilmektedir.

Zemin ve yapısal modellere malzeme parametrelerin tanımlanması: Giriş (input) menüsünde bulunan sondaj deliği (borehole) komutu yardımı ile zemin ya da zemin tabakalarının geometrisi, yer altı su seviyesi ve malzeme tanımlanması yapılabilmektedir. Modelde zemin tabakaları ve zemin yüzeyi tam yatay olmayabilir. Bu durumda birden fazla borehole bloğu kullanılarak zemin tabakalarının geometrisi tanımlanabilmektedir. Ayrıca yapısal elemanların malzeme atamaları ise yine aynı menüde bulunan Materials komutu ile yapılabilmektedir.

Programda zemin özelliklerini belirlemek amacıyla lineer elastik-mükemmel plastik Mohr-Coulomb malzeme modeli ve zeminin hiperbolik elastik-plastik davranışına izin veren pekleşen zemin anlamına gelen Hardening Soil malzeme modeli kullanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında Hardening Soil modeli kullanılmıştır.



Şekil 4.1: Giriş (input) Programının Çizim Ortamı [14]

Elasto-plastik Mohr-Coulomb modeli zemin mekaniği problemlerinin analizlerinde en yaygın kullanıma sahip modelidir. Bu modelde Elastisite modülü (E), poisson oranı (υ), içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), genleşme açısı (ψ), zeminin kuru ve doğal birim hacim ağırlıkları (γ_k, γ_n), yatay ve düşey permeabilite katsayıları $(k_v$ ve $k_h)$ ve zeminin herhangi bir yapısal elemanla temasta olması durumunda ara yüzey elemanlar tanımlanmaktadır [13].

Hiperbolik elastik-plastik davranışına izin veren Hardening Soil modelinde ise Mohr Coulomb modelinde zeminin hacim değiştirme özelliklerini temsil eden içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), genleşme açısı (ψ) parametrelerin yanı sıra; zeminin rijitliği için gerekli olan üç eksenli deneylerde drene edilmiş standart ikinci Elastisite modülü olarak geçen $(E_{50}{}^{ref})$, ödometre yükleme rijitliği $(E_{oed}{}^{ref})$, gelişmiş parametreler olan rijitliğin gerilme seviyesi için güç parametreleri ve yeniden yükleme/boşaltma rijitliği $(E_{ur}{}^{ref} = 3E_{50}{}^{ref})$, yeniden yükleme/boşaltma için poisson oranı $(\upsilon_{ur} = 0.2)$, rijitlik için referans gerilmesi $p^{ref} = 100kPa$, normal konsolidasyon için $(K_0{}^{nc} = 1 - \sin\phi)$, göçme oranı $(R_f = 0.9)$ ve çekme gerilmesi $(\sigma_{tension} = 0)$ parametrelerinin girilmesini gerektirmektedir [13].

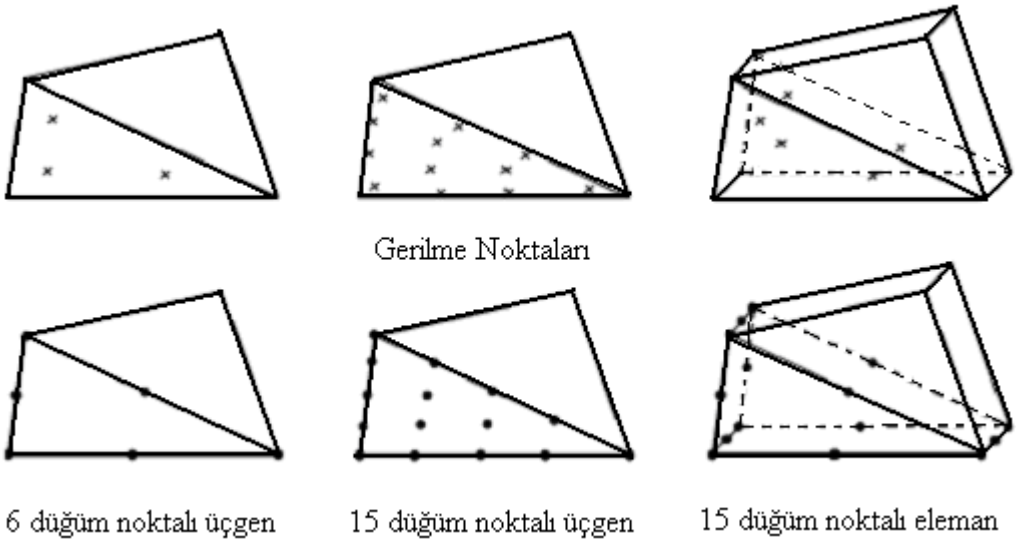
Yapısal elemanlar grubunda bulunan kazık elemanları (pile) için birim hacim ağırlığı (γ), Elastisite modülü (E), poisson oranı (υ); çubuk elemanları (beam) için, normal rijitlik (EA), eğilme rijitliği (EI), çubuk kalınlığı (d), eleman ağırlığı (w) ve poisson oranı (υ); duvar elemanları (wall) için duvar kalınlığı (d), duvarın birim hacim ağırlığı (γ); döşeme elemanları (floor) için döşeme kalınlığı (d), döşemenin birim hacim ağırlığı (γ) değerleri program girdileri kısmında verilmelidir.

Yüklerin zemin ya da yapısal modeller üzerinde tanımlanması : Giriş (input) menüsünde zemin ya da yapısal modeller üzerindeki yüklerin tanımlanması için yatay ve düşey yöndeki yayılı yükleri uygulamak için Distrubuted Loads (horizontal planes) ve Distrubuted Loads (vertical planes) bloğu, çizgisel yükleri uygulamak için Line Load bloğu, noktasal yükleri uygulamak için Point Load bloğu kullanılabilir.

Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması : Model ile ilgili yukarıda verilen tüm işlemlerin bitirilmesinden sonra, Giriş (input) bölümünün son işlemi olarak sonlu elemanlar ağı oluşturulur. 2 boyutlu sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında

Şekil 4.2’ de gösterildiği üzere 6 düğüm noktalı üçgen elemanlardan, 3 boyutlu sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında ise yatay yönde bu 6 düğüm noktalı üçgen elemanların ve düşey yönde 8 düğüm noktalı dikdörtgen elemanların birleşmesiyle oluşan 15 düğüm noktalı kama şekilli elemanlar kullanılmaktadır. Analizlerde yer değiştirmeler düğüm noktalarında, gerilmeler ise Şekil 4.2’de gösterildiği üzere gerilme noktalarında hesaplanmaktadır. Bu program, Plaxis 2D serisinde kullanılabilen 15 düğüm noktalı elemanların kullanılmasını, 3 boyutlu sonlu elemanlar ağı oluşturulması sırasında dosyaların büyük yer kaplamasına ve oldukça fazla zaman kaybına sebep olmasından dolayı önermemektedir.

İlk olarak 2 boyutlu sonlu elemanlar ağını oluşturmak için Giriş (input) menüsünde bulunan Generate 2D mesh komutu kullanılır. Programın standardında sonlu eleman ağı kaba oluşturulur. Ancak istenildiği taktirde tüm zemin ortamı ya da sadece incelenmek istenilen alan sıklaştırılabilir. Daha sora 3 boyutlu sonlu elemanlar ağını oluşturmak için Giriş (input) menüsünde bulunan Generate 3D mesh komutu kullanılır. Böylelikle analizlerin gerçekleştirildiği hesap (calculation) programına geçilebilmektedir.



Şekil 4.2: Plaxis’te kullanılan elemanların düğüm ve gerilme noktaları [13]

Hesap (calculation) programı :

Hesap (calculation) programı başlatıldığında, program giriş kısmında tanımlanmış olan zemini kendi ağırlığı altında otomatik olarak yüklemiştir. Bundan sonra eğer kademeli inşaat yapılması durumunda Staged Construction, tekil ya da yayılı yüklerin artımlı olarak tanımlanması durumunda ise Total Multipliers komutları

kullanılarak problem tanımlanır. Yapım veya kazı aşamaları, var olan zeminin bir başka zemin ile değiştirilmesi, yüklerin uygulanması veya yer altı su seviyesinin değişmesi gibi durumlar elemanların aktif hale getirilmesi ya da kaldırılması gibi problemler tanımlanır ve plastik hesap adımlarında en uygun yük artışları sağlamak için otomatik yük ve zaman artımı (automatic load stepping) özelliği ile göçme yükün tam olarak tespit edilebilmesi için ark kontrol (arc-length control) özelliği kullanıldıktan sonra, Calculate komutuyla zemin ve yapısal elemanların verilen şartlar altındaki davranışları hesaplanır.

Çıkış (Output) programı : Bu program yardımı ile zemin ve yapısal elemanların verilen şartlar altındaki deplasman, deformasyon ve gerilme değerleri gerek grafik gerekse tablo şeklinde kullanıcıya gösterilmektedir. Ayrıca zemin tabakasının herhangi bir yerinden kesit çizilerek davranışın daha iyi gözlenebilmesi sağlanmıştır.

Eğri (Curve) programı : Bu program sayesinde zeminin ya da yapısal elemanların herhangi bir noktasında istenilen grafikler çizilerek gerekli karşılaştırmalar yapılabilmektedir [13].

5. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER

5.1. Plaxis 3D Foundation ile Kazıklı Dayanma Yapısının Modellenmesi

Plaxis Sonlu Elemanlar yöntemi ile kazıklı dayanma yapısının modelleme aşamaları;

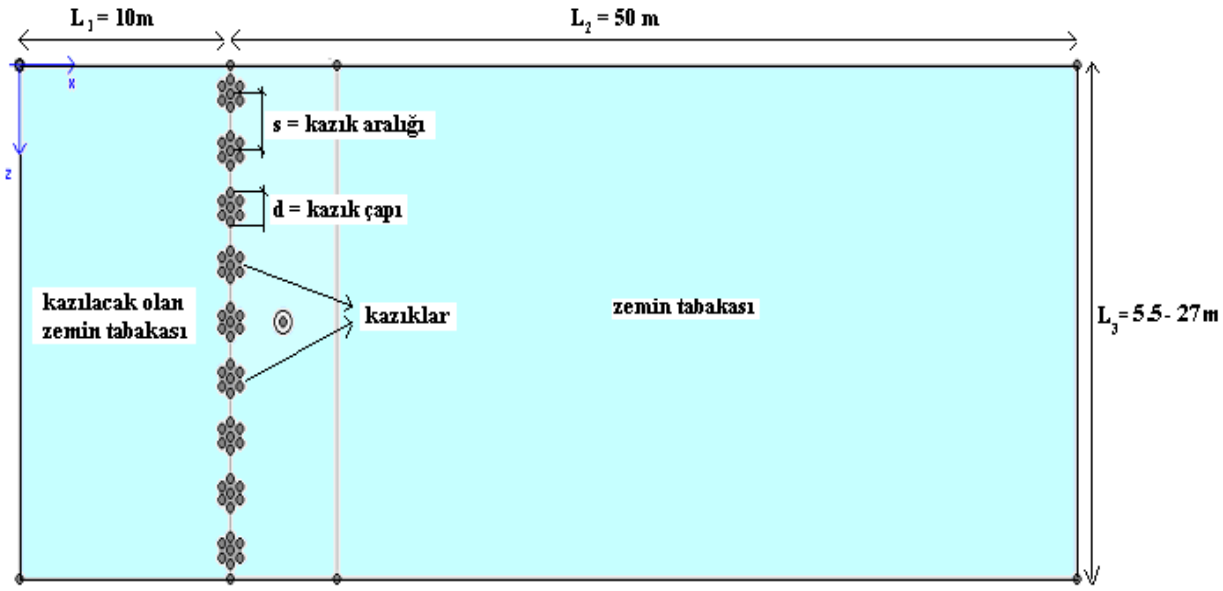
1. Modelin 2 boyutlu geometrisinin oluşturulması,
2. Sınır şartlarının belirlenmesi,
3. Zemin ve kazık malzeme parametrelerin tanımlanması,
4. 2 ve daha sonra 3 boyutlu sonlu elemanlar ağı oluşturulması,
5. Zeminin kendi ağırlığı altında yüklenmesi, model üzerinde kazıkların aktif hale getirilerek tanımlanması ve kazıklı dayanma yapısının ön tarafındaki zeminin belirli derinlikte aktif olmayan hale getirilerek kazı aşamalarının yapılacağı şeklinde hesap adımlarının tanımlanması,
6. En son olarak, zemin ve yapısal elemanların verilen şartlar altındaki davranışlarının hesaplanması şeklindedir.

Tez çalışması kapsamında, kohezyonsuz zeminler (Gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum) üzerinde farklı kazık çaplarında (d = kazık çapı olmak üzere, d = 1000mm, d = 800mm ve d = 600mm), 15m uzunluğa sahip kazıklar, farklı kazık aralıklarında (s = kazık aralığı, d = kazık çapı olmak üzere, s = d, s = 1.5d, s = 2d, s = 2.5d ve s = 3d) kazıklı dayanma yapısını oluşturacak şekilde modellenerek, kazıklar arasındaki zeminde meydana gelen kemerlenmenin varlığını ortaya koymak ve gelişiminde etkili olan faktörleri belirlemek amacıyla Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar programı ile analizler yapıldı ve elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırıldı.

5.1.1. Model Geometrisi

Tez çalışması kapsamında, kazıklar ve kazıklar arasında oluşacak kemerlenme etkisi hakkında daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla, kazıklara gelen gerilmelerin sınır koşullarından etkilenmemesi için, model geometrisi 2 kazık olarak değil de, Şekil 5.1'de gösterildiği üzere zemin içerisinde yerleştirilmiş olan 15m uzunluğuna

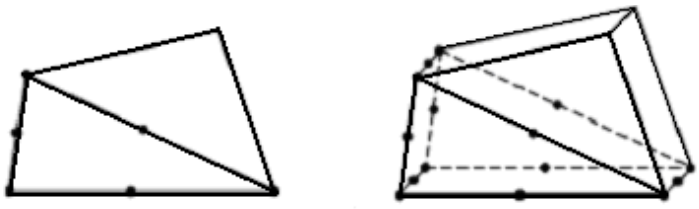
sahip 9 kazıktan oluşturuldu ve analiz sonuçları değerlendirilirken ortada bulunan 2 kazık değerlendirmeye alındı. Kazıkların sol tarafındaki zemin uzunluğu mesafesi belirli derinliklerde kazısı yapılacağından dolayı $L_1 = 10m$, kazıkların sağ tarafında modellenen zemin uzunluğu mesafesi ise $L_2 = 50m$ alındı. Zemin genişliği mesafesi ise kazık çapı ve kazık aralıkları değerlerine göre $5.5 - 27m$ arasında değişmektedir.



Şekil 5.1: Modelin 2 Boyutlu Geometrisi

5.1.2. Sonlu Elemanlar Ağı ve Kullanılan Elemanlar

Model oluşturma aşamalarında, ilk olarak 2 boyutlu ve daha sonra da 3 boyutlu sonlu elemanlar ağı oluşturuldu. 2 boyutlu ağın oluşumunda kullanılan elemanlar Şekil 5.2'de görüldüğü üzere 6 düğüm noktalı üçgen elemanlardan, 3 boyutlu ağın oluşturulmasında ise yatay yönde bu 6 düğüm noktalı üçgen elemanların ve düşey yönde 8 düğüm noktalı dikdörtgen elemanların birleşmesiyle oluşan 15 düğüm noktalı kama şekilli elemanlardan oluşmaktadır.

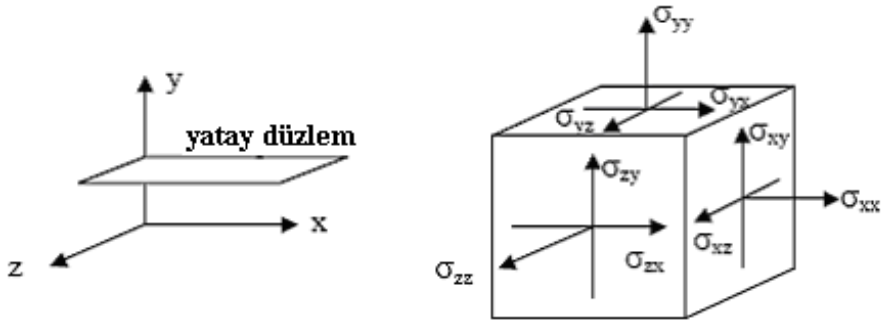


6 düğüm noktalı
2 boyutlu eleman

15 düğüm noktalı
3 boyutlu eleman

Şekil 5.2 : 2 ve 3 Boyutlu Modelde Kullanılan Elemanlar [14]

3 boyutlu elemanlara ait pozitif gerilme yönleri ise Şekil 5.3'te gösterildiği gibidir.

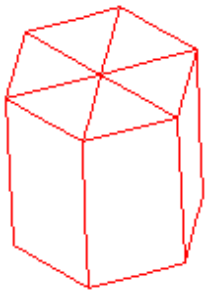


Şekil 5.3 : 3 boyutlu Elemanlardaki Pozitif Gerilme Yönleri [14]

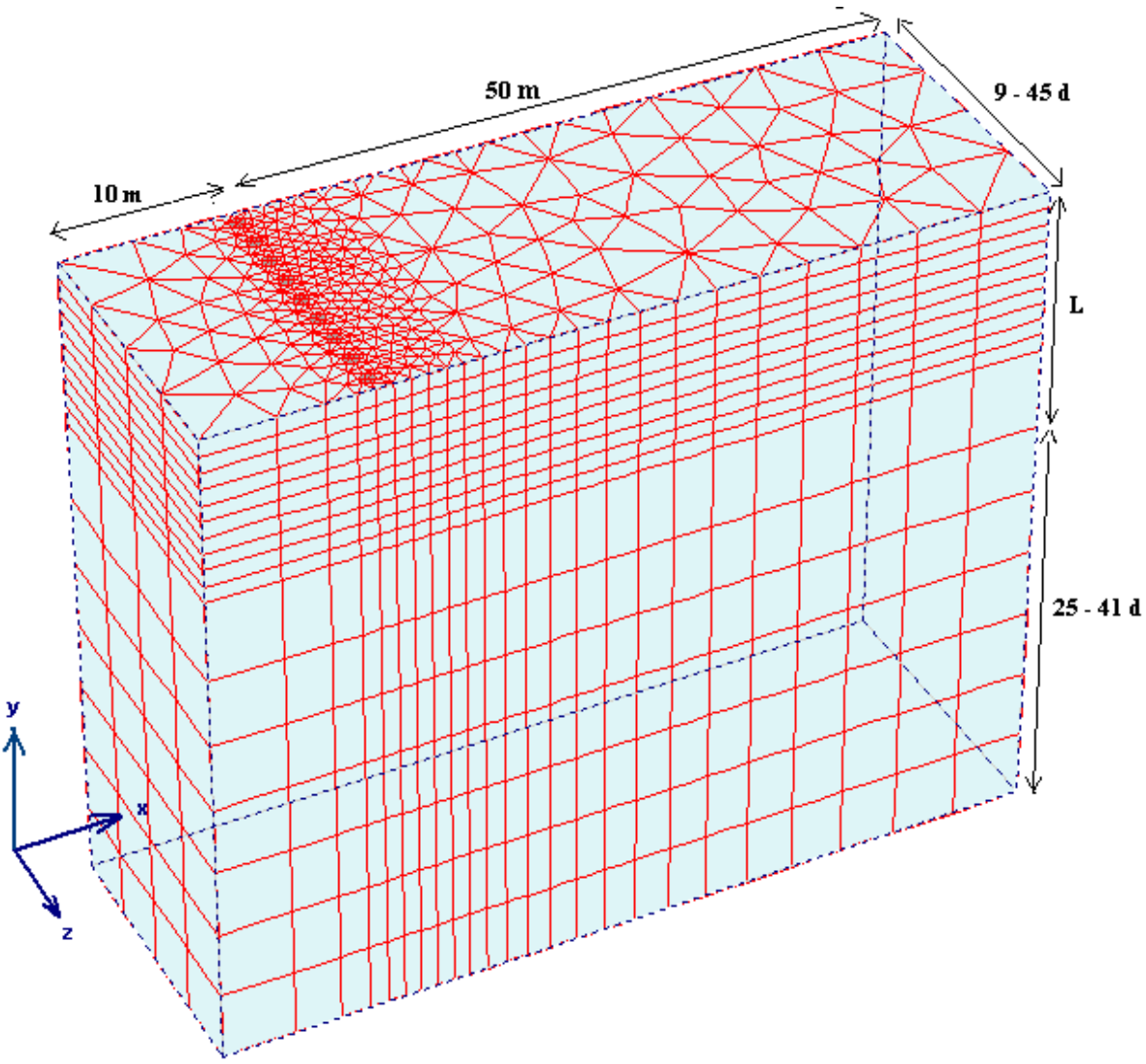
Modellenmiş olan 3 boyutlu Sonlu elemanlar ağı örnek olarak Şekil 5.4'te verilmektedir. Yatayda gerilmelerin yoğun olacağı kazık ve kemerlenmenin meydana geleceği kazıklar arasında kalan zemin ile düşeyde kazı safhalarının gerçekleştiği kısımlarda sonlu elemanlar ağı sıklaştırıldı ve sınırlara doğru ağ seyrekleştirilerek elemanların boyutları arttırıldı. Böylece optimum eleman sayısı ile daha kısa sürede en etkili çözüme ulaşıldı.

Zemin sınırları düşey yönde (y yönünde) kazık boyunun (L) yaklaşık 3 katı, yatay yönde (x yönünde) kazık çapının (d) yaklaşık 10-16 ile 50-83 katı ve 3. boyutta (z yönünde) ise 9-45 katı arasında modellendi. Ayrıca modelin alt sınırı x,y ve z yönlerinde tutulu, y-z düzleminin x yönünde tutulu, x-y düzleminin z yönünde tutulu ve zemin yüzeyinin ise bütün yönlerde serbest olduğu koşullara göre tasarlandı.

Modellerde kullanılan eleman ve düğüm noktası sayısı kazık aralıklarına ve kazık çaplarına göre farklılık göstermektedir. Eleman ve düğüm nokta sayısı, d = 100cm olarak modellendiğinde; s = d durumunda 11240 - 31869, s = 1.5d durumunda 9936 - 27773, s = 2d durumunda 10948 – 30177, s = 2.5d durumunda 11104 – 30531 ve s = 3d durumunda ise 12800 – 34933 şeklinde, d = 80cm olarak modellendiğinde; s = d durumunda 10332 - 29782, s = 1.5d durumunda 11360 - 31685, s = 2d durumunda 12744 – 35105, s = 2.5d durumunda 13056 – 35748 ve s = 3d durumunda ise 12256 – 33605 şeklinde ve d = 60cm olarak modellendiğinde; s = d durumunda 11270 - 32823, s = 1.5d durumunda 10920 - 30983, s = 2d durumunda 11840 – 32933, s = 2.5d durumunda 12744 – 35105 ve s = 3d durumunda ise 12750 – 35000 şeklinde analiz edildi.



(a)



(b)

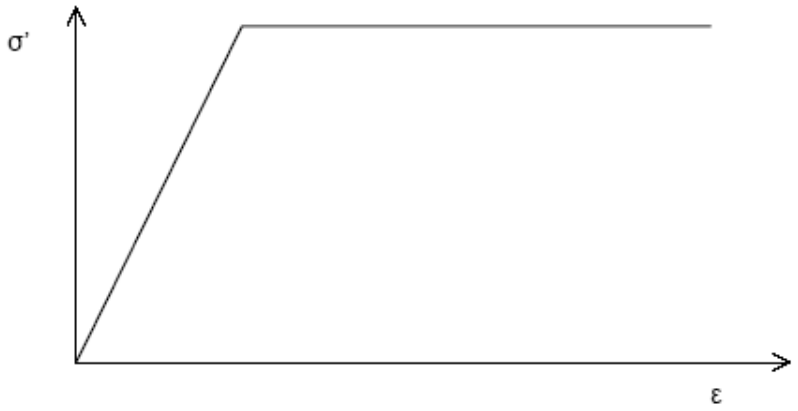
Şekil 5.4 : 3 Boyutlu Sonlu Elemanlar Ağı, (a) Kazık Elemanının Sonlu Elemanlar Ağı (b) Kazıklı Dayanma Yapısının Sonlu Elemanlar Ağı

5.1.3. Kullanılan Yapısal Modeller

Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapılırken zeminin davranışını nonlineer kabul etmek gerçeğe çok yakın çözümlerin elde edilmesini sağladığından dolayı, oluşturulan modelde zemin elasto-plastik kabul edildi. Kazık ise lineer elastik olarak modellendi.

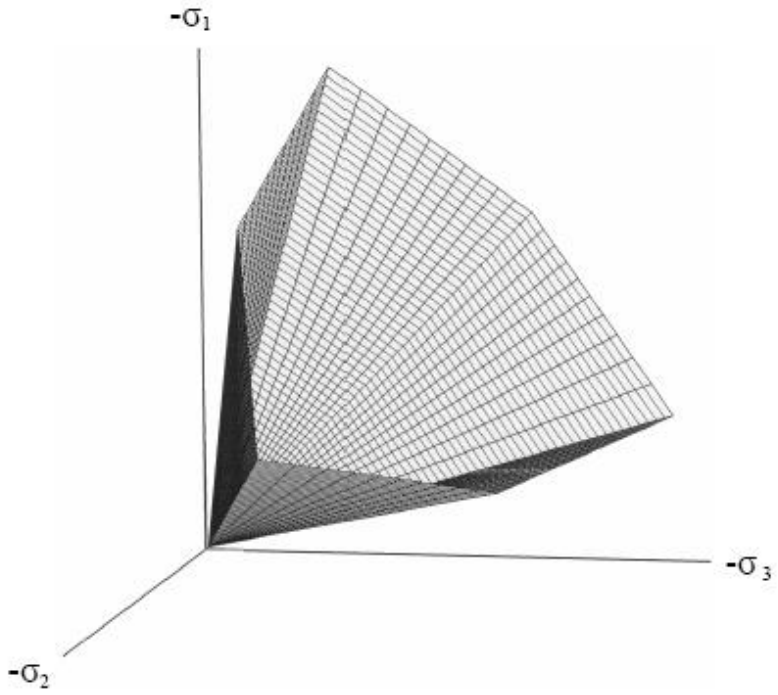
Tez kapsamında zeminin elasto-plastik davranışını gösteren iki adet malzeme modeli ele alındı. Bunlardan birincisi lineer elastik - mükemmel plastik Mohr-Coulomb malzeme modeli, diğeri ise zeminin hiperbolik elastik - plastik davranışına izin veren Hardening Soil "pekleşen zemin" yapısal modelidir.

Elasto – plastik Mohr – Coulomb modelinde E (elastisite modülü) ve ν (poisson oranı) zeminin elastik, c (kohezyon) ve ϕ (zemini içsel sürtünme açısı) plastik, Ψ (genleşme açısı) ise hacim değiştirme özelliklerini temsil etmektedir. Zemin ve kayada gerilme – şekil değiştirme davranışı incelenirken, ilk yaklaşım olarak Mohr – Coulomb akma kriteri ile her tabaka için seçilen sabit ortalama rijitlik değeri hesapların oldukça hızlı yapılmasını ve olası deplasmanlar hakkında bir ön bilgiye sahip olmamızı sağlamaktadır [13]. Mohr – Coulomb modeli kullanıldığında zeminde meydana gelen gerilme – şekil değiştirme davranışı aşağıda Şekil 5.5'te verilmektedir.



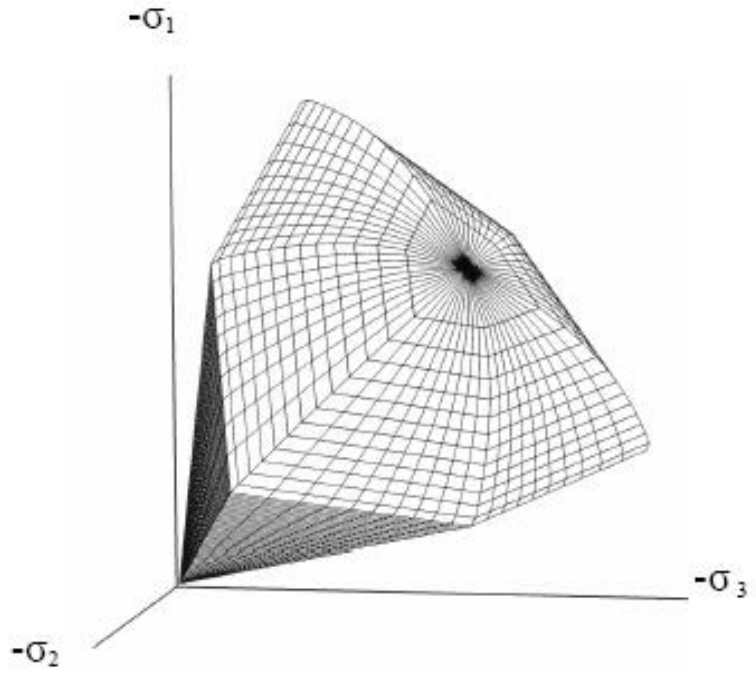
Şekil 5.5 : Mohr – Coulomb Akma Kriteri ile Zeminde Meydana Gelen Gerilme – Şekil Değiştirme Davranışı [13]

Ayrıca Mohr – Coulomb modelinde Şekil 5.6'da görüldüğü üzere akma yüzeyi asal gerilmelerin oluşturduğu hacimle sınırlı olmaktadır [13].



Şekil 5.6 : Asal Gerilme Yüzeyi İçerisindeki $c = 0$ iken Mohr-Coulomb Akma Kriteri [13]

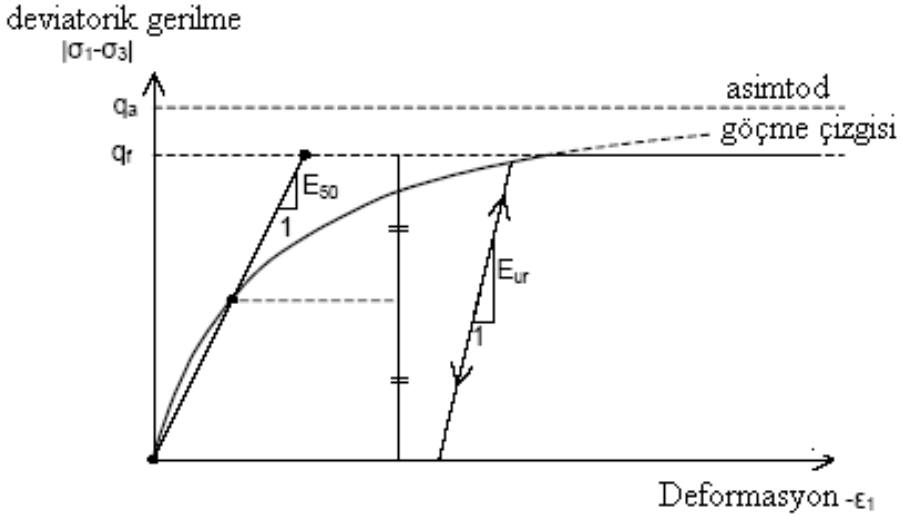
Lineer elastik – mükemmel plastik malzeme modelinin tersine Hardening Soil 'pekleşen zemin' modelinde akma yüzeyi asal gerilmelerin oluşturduğu hacimle sınırlı olmayıp Şekil 5.7'de gösterildiği üzere plastik şekil değiştirmeler ile genişleyebilmektedir [13].



Şekil 5.7 : Asal Gerilme Yüzeyi İçerisindeki $c = 0$ iken Pekleşen Zemin Modeli [13]

Pekleşen Zemin modelinde, üç eksenli hücre kesme deneylerinden elde edilen gerilme – zorlanma ilişkisi Şekil 5.8'de gösterildiği üzere bir hiperbolle temsil edilmektedir. Böyle bir bağıntı ilk olarak Kondner (1963), daha sonra da Duncan ve Chang (1970) tarafından ortaya konmuştur. Plaxis tarafından yumuşak ve sert zeminler için kullanılan Schanz (1998) modeli, bu yaklaşımlardan farklı olarak elastisite teorisinin yerine plastisite teorisini kullanmakta, zeminin hacim değişimi ve yenilme başlığı (yield cap) etkisini dikkate almaktadır [13].

Pekleşen zemin modelinde, zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), genleşme açısı (ψ) parametrelerinin yanı sıra; üç eksenli hücre kesme ve konsolidasyon deneylerinden elde edilen parametreler de kullanılarak zeminin davranışını daha hassas bir şekilde tanımlanabilmektedir. Bu parametreler, zeminin rijitliği için gerekli olan üç eksenli deneylerde standard ikinci Elastisite modülü ya da üç eksenli yükleme rijitliği olarak geçen (E_{50}^{ref}), ödometre yükleme rijitliği (E_{oed}^{ref}), yeniden yükleme/boşaltma rijitliği $(E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref})$, yeniden yükleme/boşaltma için poisson oranı $(\upsilon_{ur} = 0.2)$, rijitlik için referans gerilmesi $p^{ref} = 100kPa$, rijitliğin gerilmeye bağımlılığını belirleyen m katsayısı, normal konsolidasyon için $(K_0^{nc} = 1 - \sin\phi)$ şeklindedir.



Şekil 5.8 : Pekleşen Zemin Modeli ile Zeminde Meydana Gelen Gerilme – Şekil Değiştirme Davranışı [13]

Mohr - Coulomb modelinin aksine Pekleşen Zemin modelinde, zeminde meydana gelen gerilmelere bağlı olarak zeminin rijitliğinin değişmesi, kazı aşamalarının

modellemesinde zemin tabakasının kazılması ile altında bulunan zeminde meydana gelebilecek kabarmaları minimuma indirerek daha gerçekçi çözüm elde edildiğinden dolayı, yapılan tüm analizlerde zemin Pekleşen Zemin modeline göre modellendi.

5.1.4. Kullanılan Malzeme Parametreleri

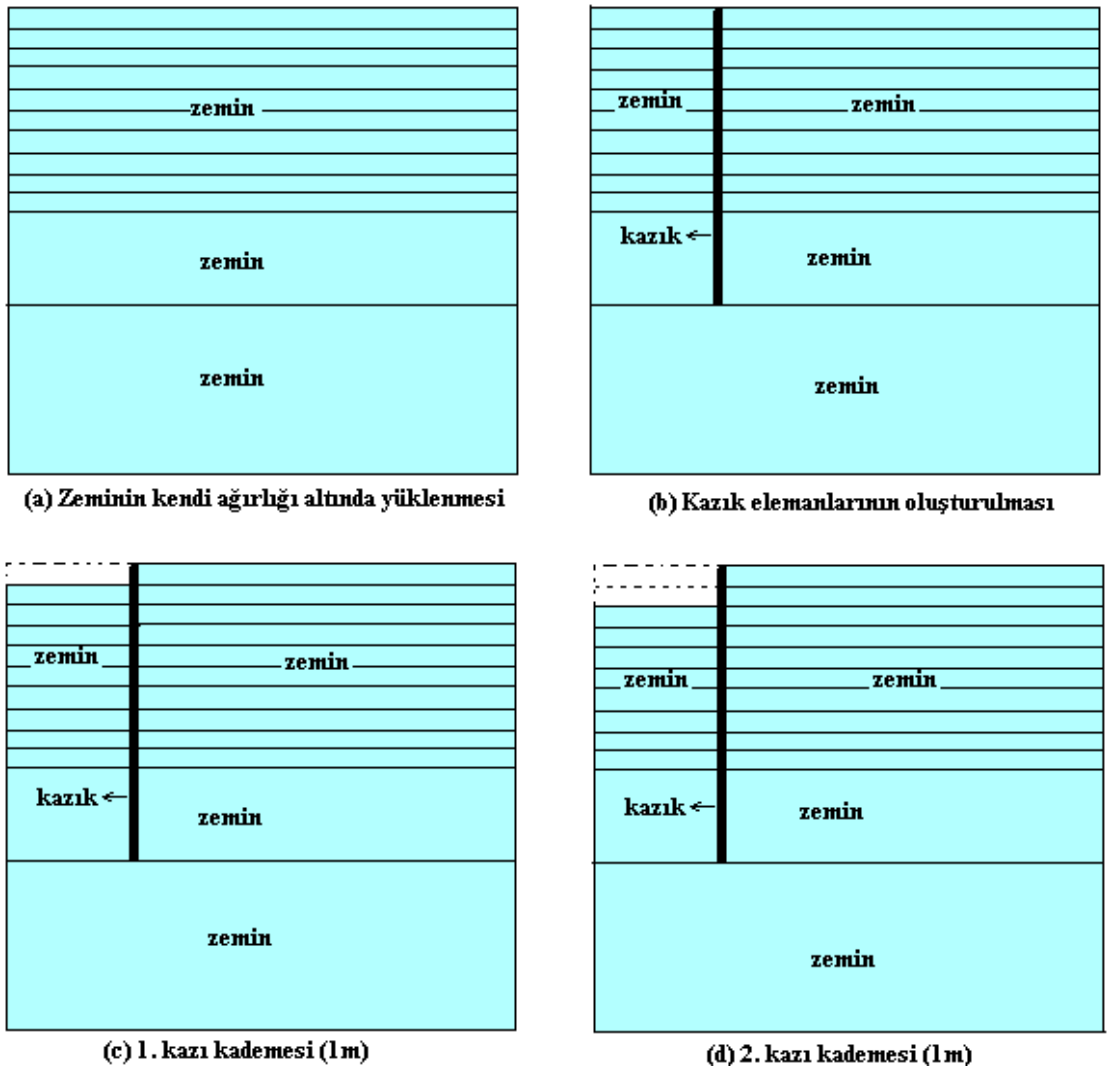
Kazık ve zemin parametrelerinin doğru olarak seçimi zemin mekaniği ve temel inşaatı konusuna giren model ve analizlerde oldukça önemlidir. Analizlerde kullanılan kazık ve zemin parametreleri Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1: Analizlerde Kullanılan Zemin ve Kazık Malzeme Parametreleri

Derinlik (m)	0 - 40	0 - 40	0 - 40	0 - 40	0 - 15
Malzeme Cinsi	Gevşek kum	Gevşek - Orta sıkı kum	Orta sıkı kum	Sıkı kum	Kazık
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Lineer Elastik
Malzeme Tipi	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Geçirimsiz
$\gamma_{doygun}\ (kN/m^3)$	18	18	19	19	24
$E_{50}^{ref}\ (kN/m^2)$	20000	35000	75000	200000	30000000
$E_{oed}^{ref}\ (kN/m^2)$	20000	35000	75000	200000	-
$E_{ur}^{ref}\ (kN/m^2)$	60000	105000	225000	600000	-
$c'\ (kN/m^2)$	1	1	1	1	-
$\phi'\ (°)$	25	30	35	40	-
$\psi\ (°)$	0	0	5	10	-
υ'_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15
m	1	1	1	1	-
$p^{ref}\ (kN/m^2)$	100	100	100	100	-
K_0^{nc}	0.577	0.500	0.426	0.357	-
R_f	0.9	0.9	0.9	0.9	-

5.2. Plaxis 3D Foundation ile Kazıklı Dayanma Yapısının Analizleri

Her bir modelin geometrisi oluşturulup, malzeme parametreleri ve sınır şartları atandıktan sonra hesap adımlarını belirleme kısmına geçildi. İlk olarak zemin, gerçek ortamdaki jeolojik yüklerin elde edilmesi amacıyla, kendi ağırlığı altında yüklendi. 2. safhada zemin deformasyonları sıfırlanarak eski haline getirildi ve kazık elemanlarına kazık malzeme parametreleri atandı. 3. ve sonraki safhalarda ise kazıklı dayanma yapısında yanal zemin hareketi nedeniyle kazıklar arasında meydana gelebilecek kemerlenme mekanizmasını belirlemek amacıyla kazıkların sol tarafında kalan zemin, kazıklar arasındaki zemin göçünceye kadar, sırasıyla düşeyde birer metre kazıldı. Böylelikle hesap adımları tanımlanarak analiz safhasına geçildi ve kazık ile zemin davranışı incelendi. Hesap adımlarının daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 5.9'da ilk 4 adım sırasıyla verilmektedir.



Şekil 5.9 : Modellenen Hesap Adımları

Analizler Tablo 5.2'de gösterildiği üzere kohezyonsuz zeminler üzerinde 15m uzunluğa sahip serbest başlıklı kazıkların farklı kazık çaplarında (d = kazık çapı olmak üzere, d = 1000mm, d = 800mm ve d = 600mm) ve farklı kazık aralıklarında (s = kazık aralığı, d = kazık çapı olmak üzere, s = d, s = 1.5d, s = 2d, s = 2.5d ve s = 3d) kazıklı dayanma yapısını oluşturacak şekilde Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar programı ile yapıldı.

Tablo 5.2: Plaxis 3D Foundation ile Yapılan Analizler

	Kazık Aralıkları (s)				
Zemin Cinsi	s = d	s = 1,5d	s = 2d	s = 2,5d	s = 3d
Gevşek kum	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm
Gevşek – Orta sıkı kum	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm
Orta sıkı kum	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm
Sıkı kum	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm	d = 600mm d = 800mm d = 1000mm

Analizler sonucunda; modellenmiş olan 9 adet kazık arasından sınır koşullarından en az etkilenebilecek olan ortadaki iki kazık ele alındı. İki kazık arasından zeminin göçtüğü andaki durumda kazığa her 1m'de etkiyen gerilme ve deplasman değerleri elde edildi. Kazığa etki eden gerilme değerleri kuvvete dönüştürüldü. Elde edilen deplasman değerleri ile deplasman - derinlik grafikleri çizilerek kemerlenme olayına etkisi değerlendirildi.

Tablo 5.3'te kazı aşamaları sonucunda her bir kazık aralığı, kazık çapı ve zemin türü için iki kazık arasından zeminin göçtüğü kazı derinlikleri verilmektedir.

Tablo 5.3: İki Kazık Arasından Zeminin Göçtüğü Kazı Derinlikleri

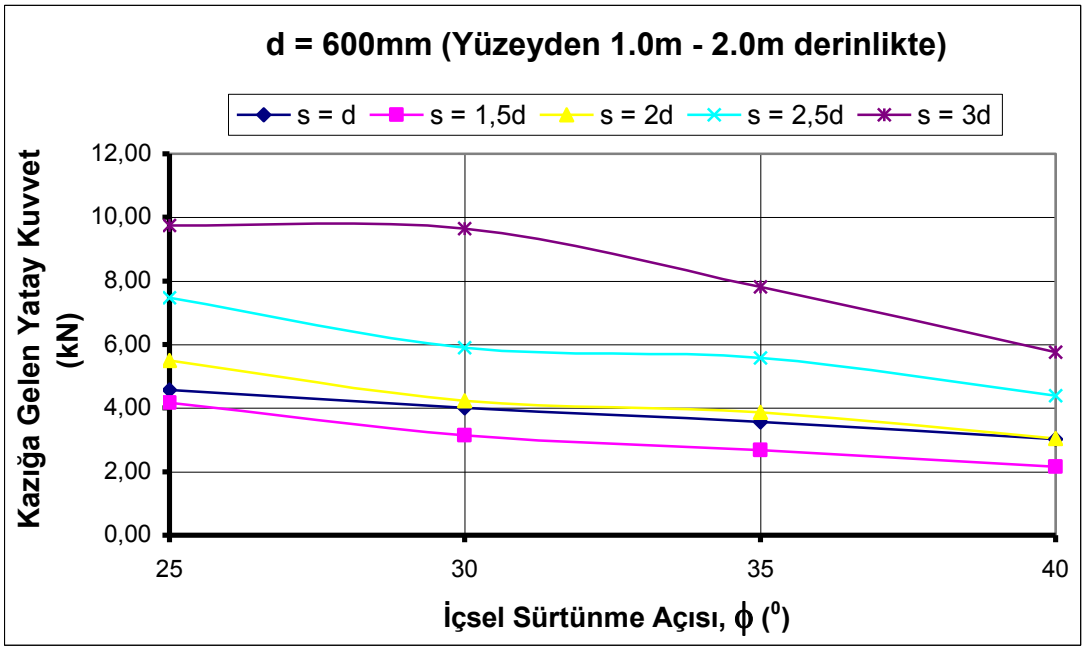
Zemin Türü	Kazık Aralığı	Modelde Göçme Derinliği (m)		
		Kazık Çapı (mm)		
		ϕ 1000	ϕ 800	ϕ 600
Gevşek Kum	s=d	8.00	7.00	6.00
	s=1,5d	6.00	6.00	6.00
	s=2d	4.00	4.00	4.00
	s=2,5d	3.00	3.00	3.00
	s=3d	3.00	3.00	3.00
Gevşek - Orta Sıkı Kum	s=d	8.00	8.00	7.00
	s=1,5d	8.00	7.00	6.00
	s=2d	4.00	4.00	4.00
	s=2,5d	4.00	4.00	4.00
	s=3d	3.00	3.00	3.00
Orta Sıkı Kum	s=d	8.00	8.00	7.00
	s=1,5d	8.00	8.00	7.00
	s=2d	6.00	6.00	6.00
	s=2,5d	4.00	4.00	4.00
	s=3d	3.00	3.00	3.00
Sıkı Kum	s=d	8.00	8.00	7.00
	s=1,5d	8.00	8.00	7.00
	s=2d	6.00	6.00	5.00
	s=2,5d	5.00	4.00	4.00
	s=3d	4.00	4.00	4.00

Tablo 5.3'te görüldüğü üzere seçilen her bir zemin, her bir kazık çapı ve kazık aralığı için göçme anı farklılaştığından dolayı, iki kazık arasında meydana gelen zemin kemerlenmesi olayının varlığını belirlemek ve gelişiminde etkili olan faktörleri göz önüne almak amacıyla, her bir analiz için kazıklar önündeki zeminin 3m kazıldığı andaki durumu ele alındı. 3m kazıldığı anda kazığa gelen gerilme ve deplasman değerleri alınarak; kuvvet - zemin türü, kuvvet - kazık aralığı ve kuvvet - kazık çapı grafikleri çizildi ve birbiri ile karşılaştırıldı.

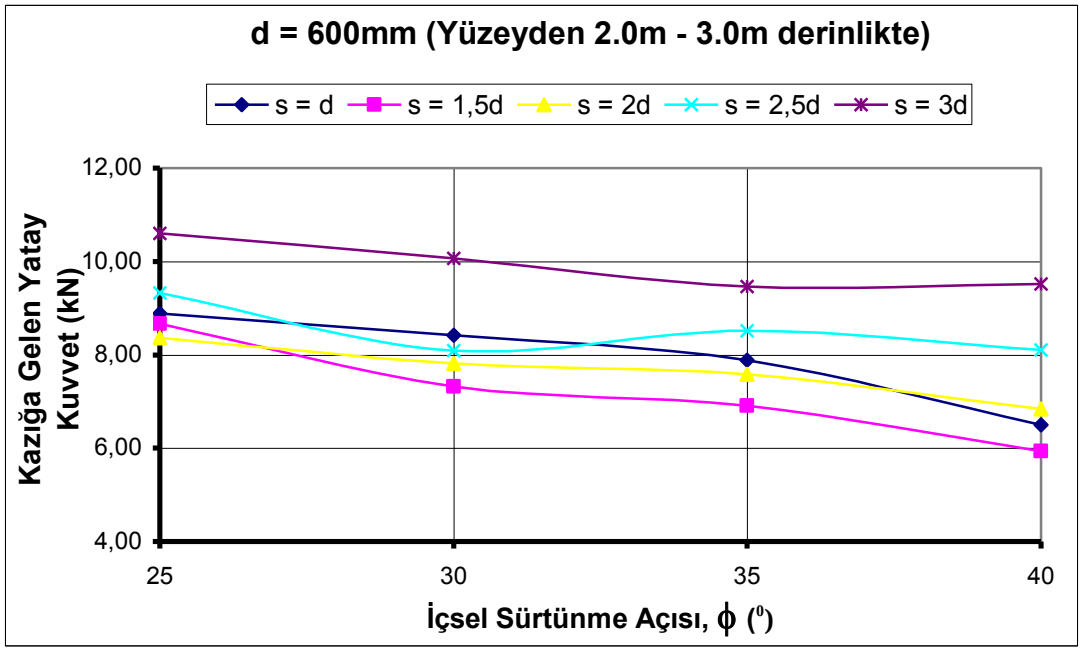
5.2.1. Zemin Ortamının Değişimi

Kazıklı dayanma yapısında kazıklar arasında meydana gelen kemerlenme etkisini incelemek amacıyla oluşturulan modelde; zemin ortamı değişiminin kazığa gelen kuvvete etkisi d = 600mm, d = 800mm ve d = 1000mm olarak seçilen kazık çapları ile s = d, s = 1.5d, s = 2d, s = 2.5d ve s = 3d kazık aralıkları göz önüne alınarak incelendi. Tüm modellerde tek zemin tabakası modellenerek dört farklı zeminde analizler yapıldı. Tablo 5.1'de parametre özellikleri verilmiş olan bu zeminler; gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kumdur.

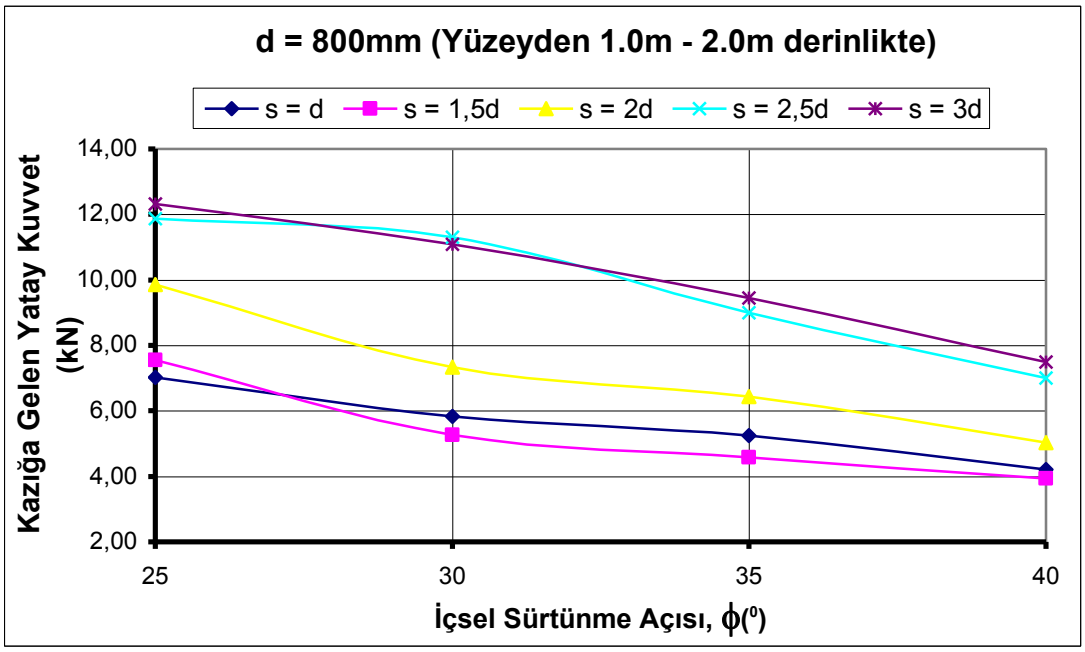
Şekil 5.10'da görüldüğü üzere 3m kazı yapıldığı anda d = 600mm, d = 800mm ve d = 1000mm kazık çapları ve yüzeyden belirli derinlikler için s = d, s = 1.5d, s = 2d, s = 2.5d ve s = 3d kazık aralıklarına göre, gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum zeminlerin sahip olduğu içsel sürtünme açısı(ϕ) göz önüne alınarak, kazığa gelen yatay kuvvet – içsel sürtünme açısı grafikleri çizildi.



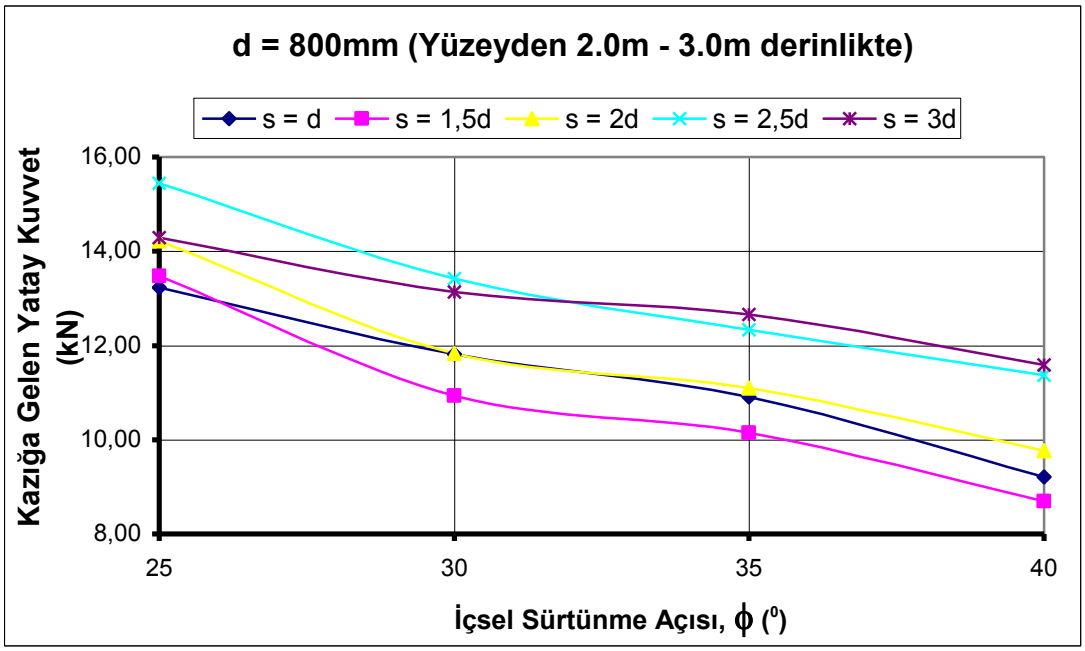
(a)


d = 600mm (Yüzeyden 2.0m - 3.0m derinlikte)
s = d
s = 1,5d
s = 2d
s = 2,5d
s = 3d
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
25
30
35
40
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (⁰)

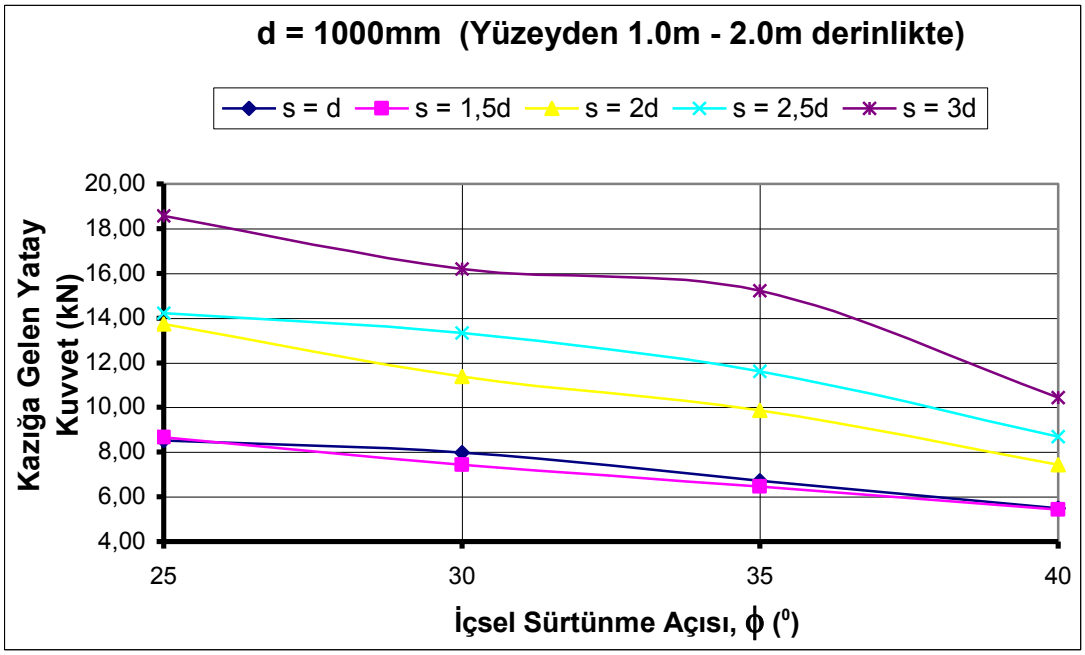
(b)


d = 800mm (Yüzeyden 1.0m - 2.0m derinlikte)
s = d
s = 1,5d
s = 2d
s = 2,5d
s = 3d
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
25
30
35
40
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ(⁰)

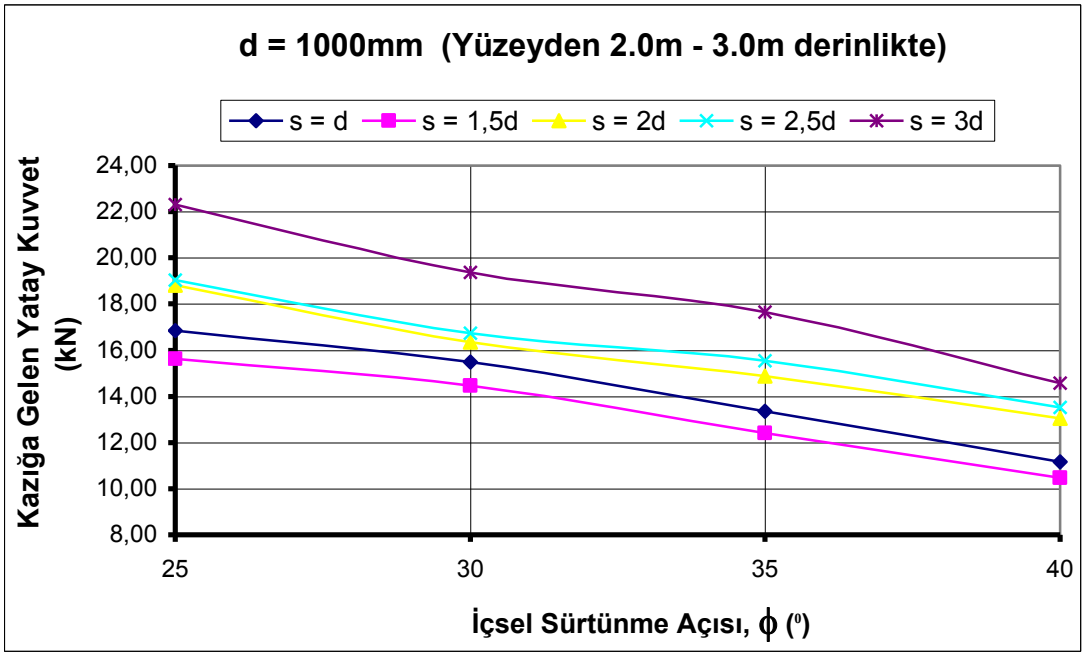
(c)


d = 800mm (Yüzeyden 2.0m - 3.0m derinlikte)
s = d
s = 1,5d
s = 2d
s = 2,5d
s = 3d
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
25
30
35
40
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (⁰)

(d)


d = 1000mm (Yüzeyden 1.0m - 2.0m derinlikte)
s = d
s = 1,5d
s = 2d
s = 2,5d
s = 3d
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
20,00
18,00
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
25
30
35
40
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (⁰)

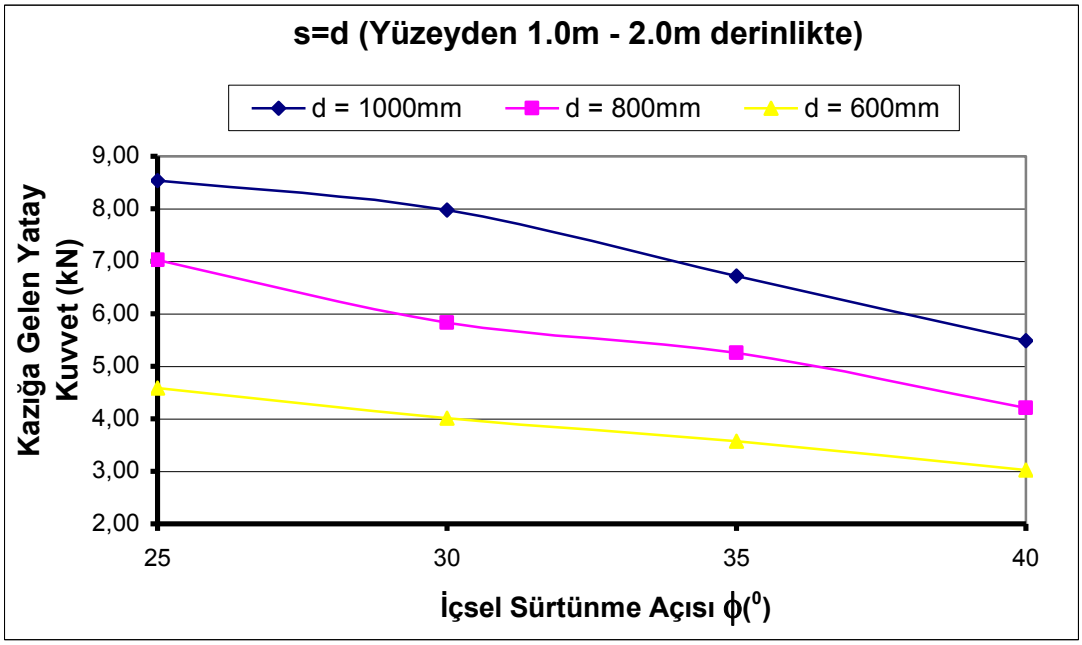
(e)



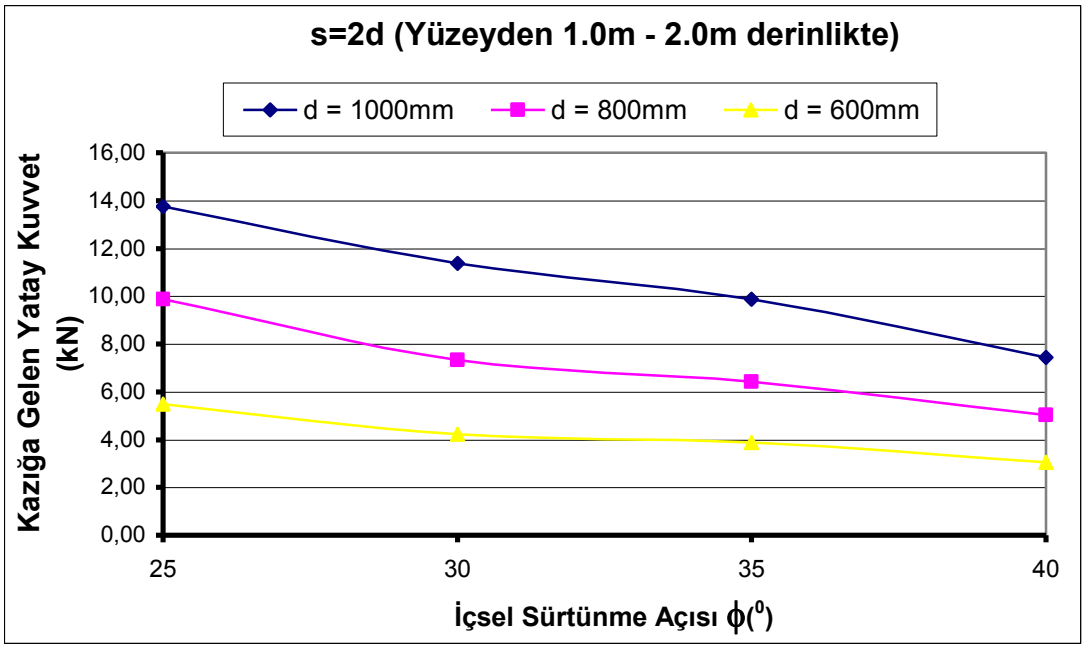
(f)

Şekil 5.10 : Sabit Kazık Çapında Yüzeyden Belirli Derinliklerde Kazık Aralığına Göre Kazığa Gelen Yatay Kuvvet – İçsel Sürtünme Açısı Grafiği

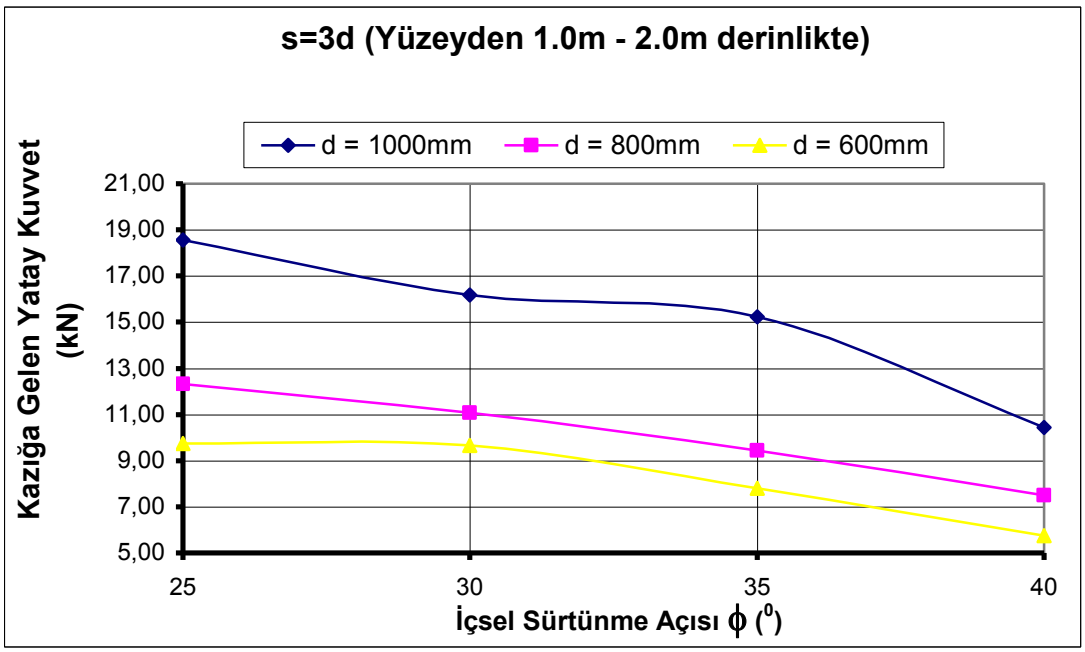
Şekil 5.11'de ise 3m. kazı yapıldığı anda s = d, s = 2d ve s = 3d kazık aralıkları ve yüzeyden belirli derinlikler için d = 600mm, d = 800mm ve d = 1000mm kazık çaplarına göre, gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum zeminlerin sahip olduğu içsel sürtünme açısı (ϕ) göz önüne alınarak, kazığa gelen yatay kuvvet – içsel sürtünme açısı grafikleri çizildi.



(a)



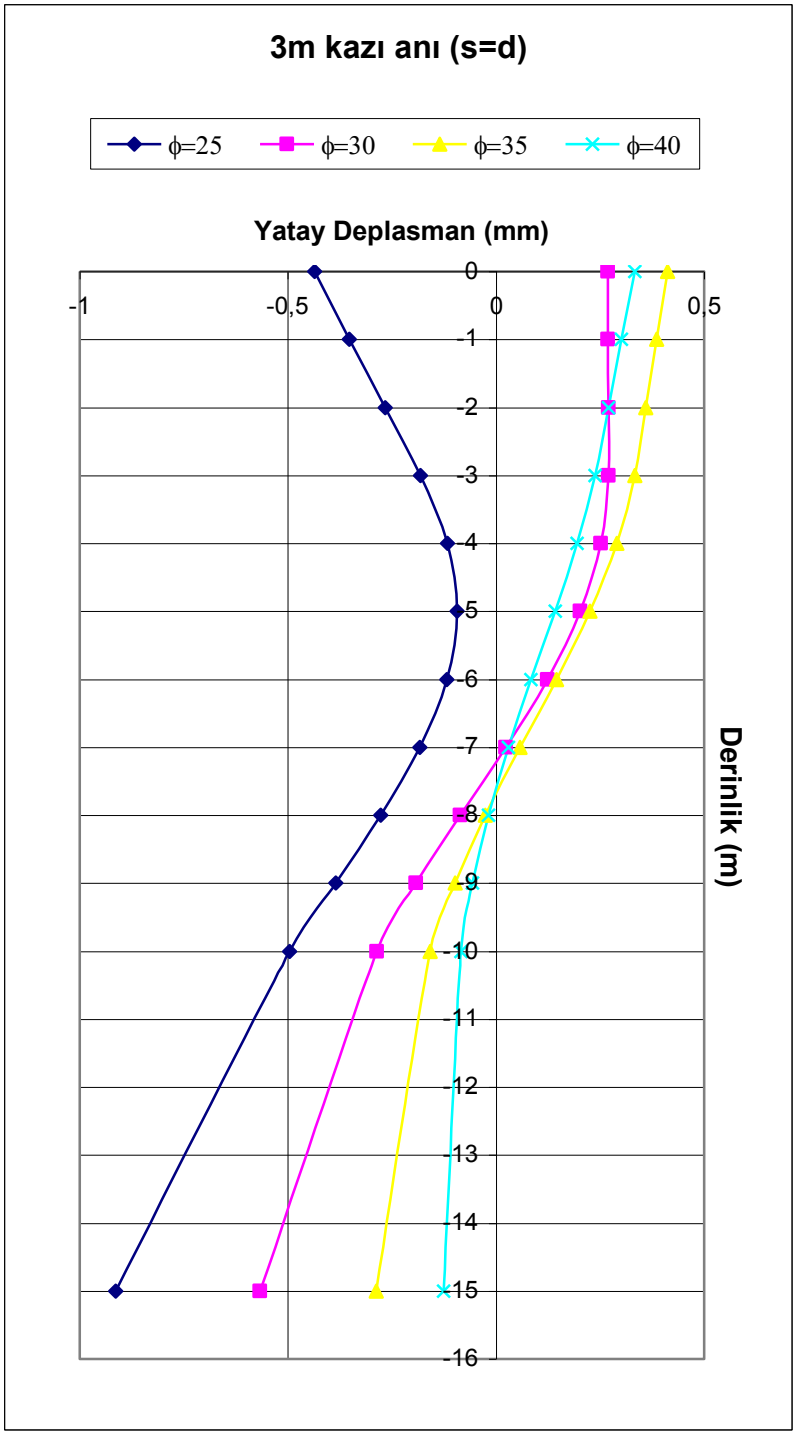
(b)



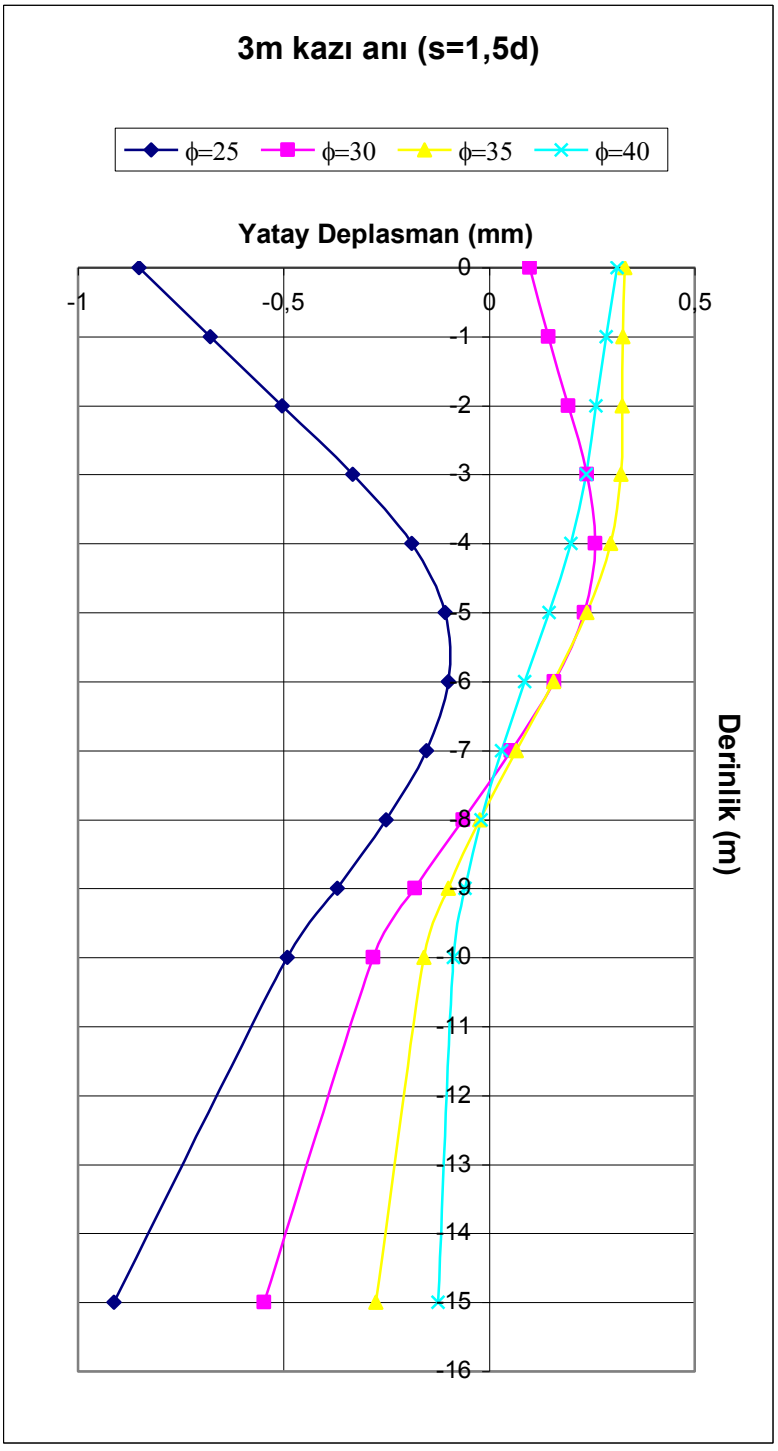
(c)

Şekil 5.11 : Sabit Kazık Aralığında Yüzeyden Belirli Derinliklerde Kazık Çapına Göre Kazığa Gelen Yatay Kuvvet - İçsel Sürtünme Açısı Grafiği

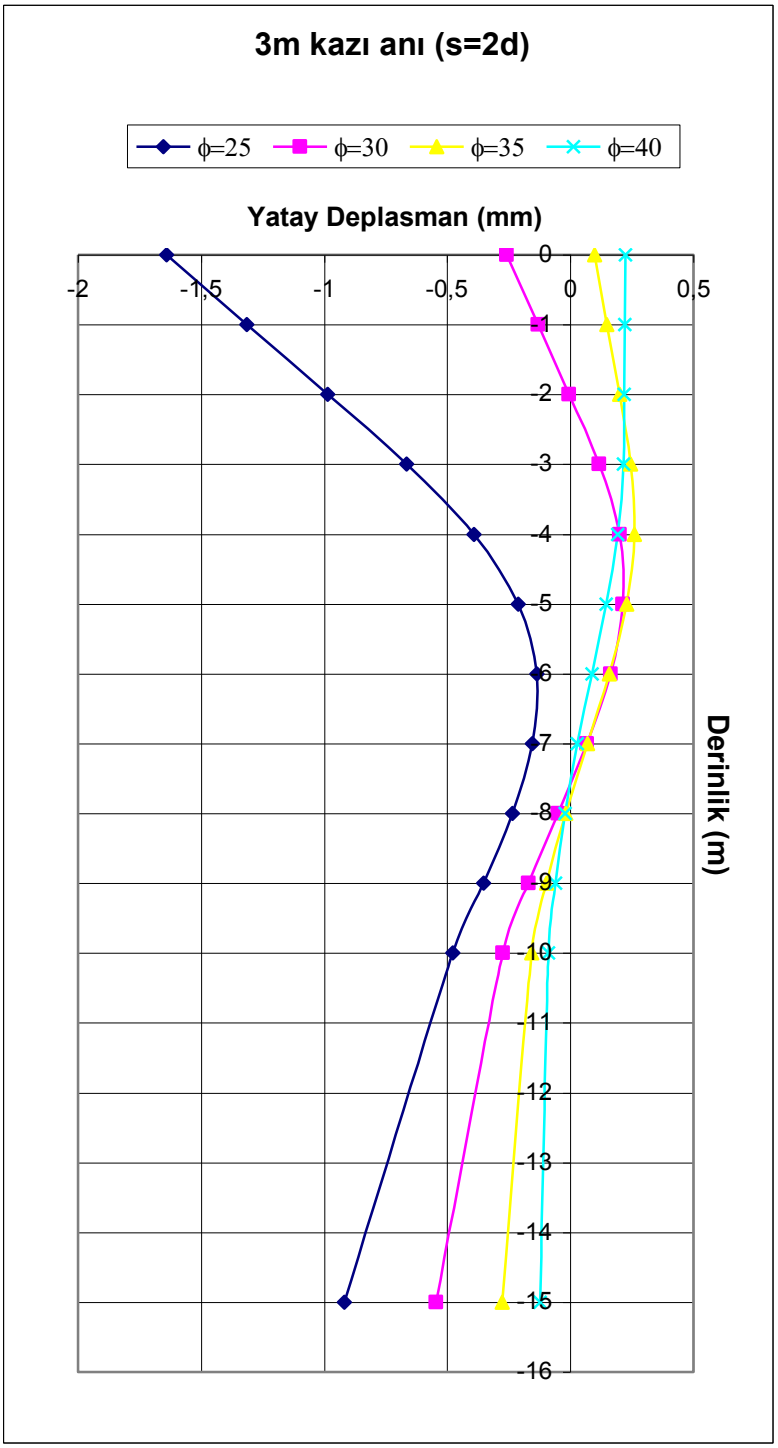
Şekil 5.12'de 3m kazı yapıldığı anda her bir kazık aralığı için seçilen zeminlerin içsel sürtünme açıları göz önüne alınarak kazıkta meydana gelen yatay deplasmanın derinliğe göre değişimi yatay deplasman – derinlik grafikleri çizilerek verildi.



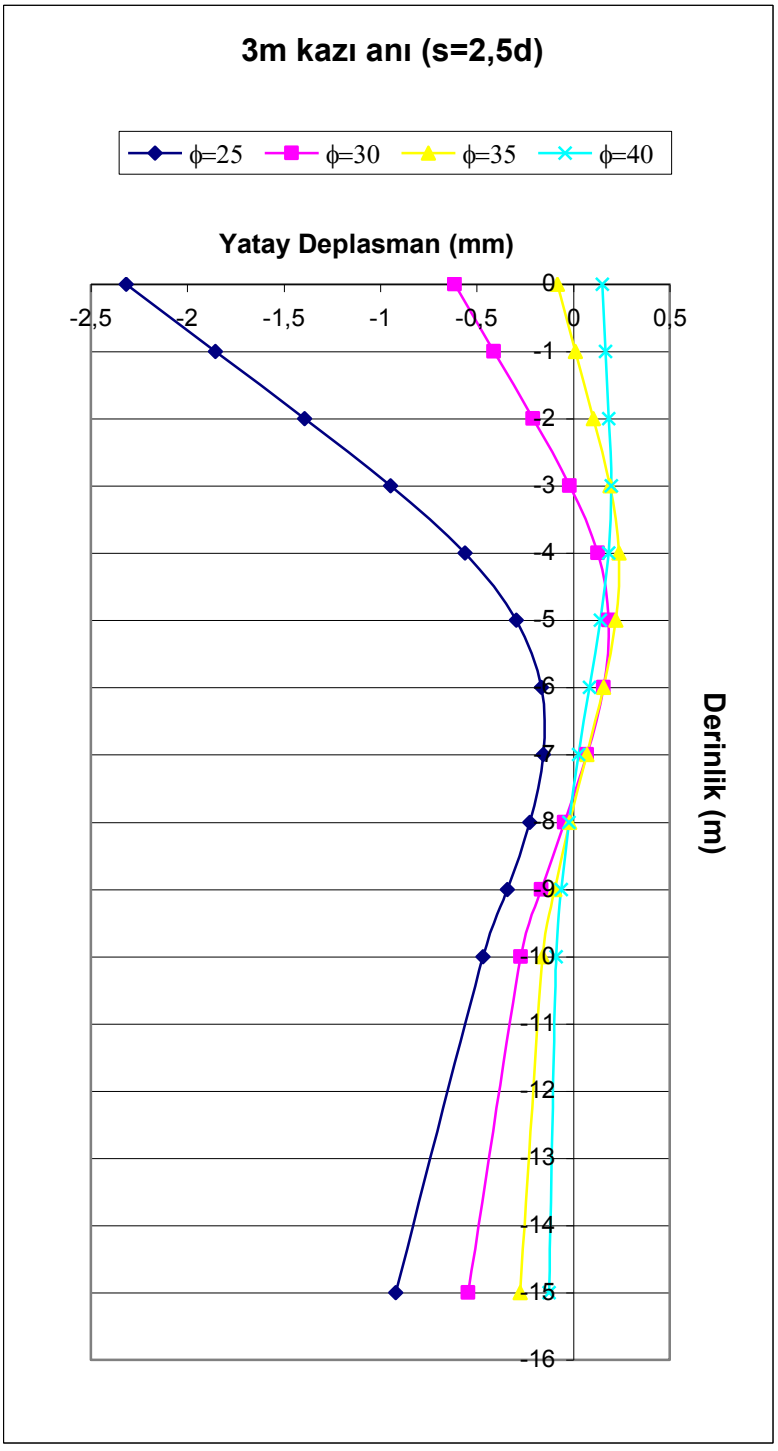
(a)


3m kazı anı (s=1,5d)
ϕ=25
ϕ=30
ϕ=35
ϕ=40
Yatay Deplasman (mm)
-1
-0,5
0
0,5
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Derinlik (m)

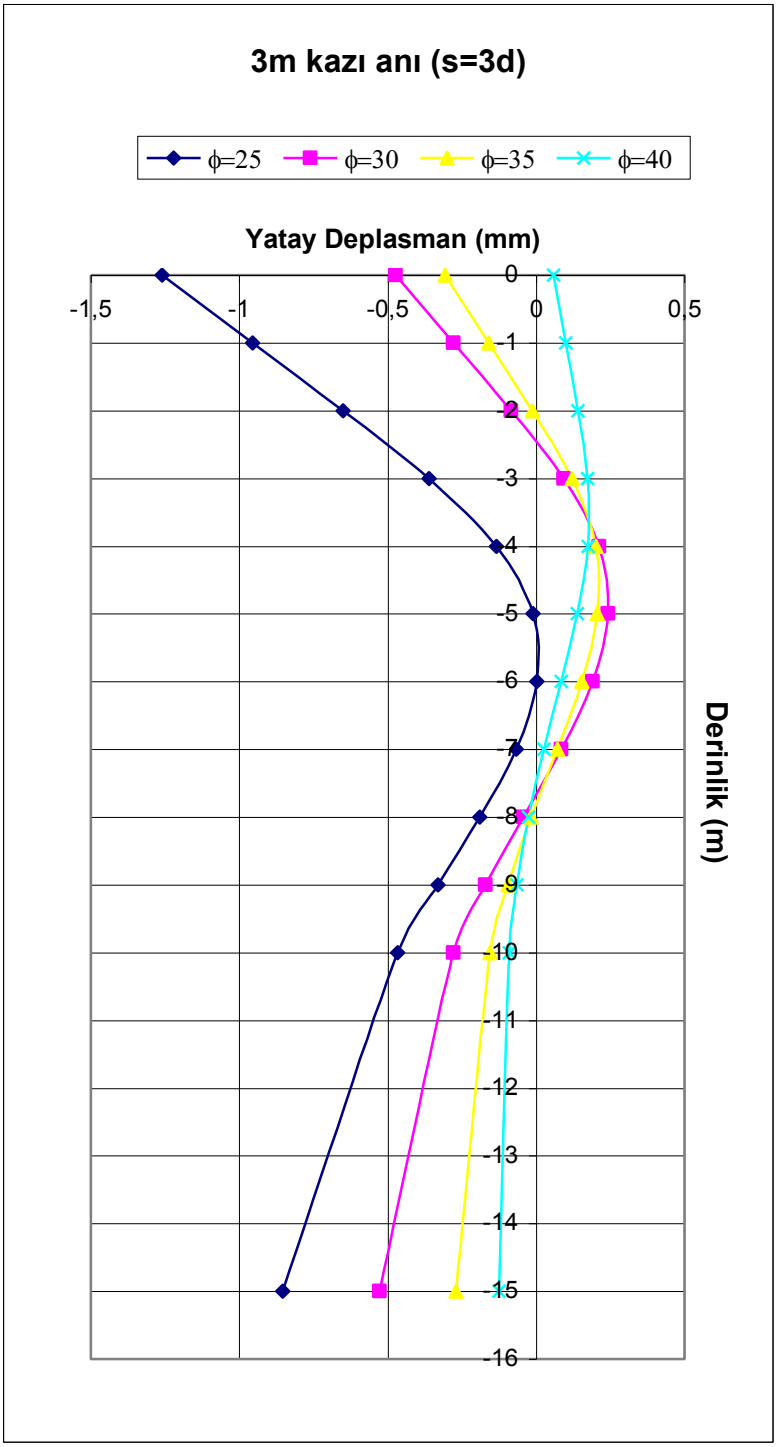
(b)


3m kazı anı (s=2d)
ϕ=25
ϕ=30
ϕ=35
ϕ=40
Yatay Deplasman (mm)
-2
-1,5
-1
-0,5
0
0,5
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Derinlik (m)

(c)


3m kazı anı (s=2,5d)
ϕ=25
ϕ=30
ϕ=35
ϕ=40
Yatay Deplasman (mm)
-2,5
-2
-1,5
-1
-0,5
0
0,5
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Derinlik (m)

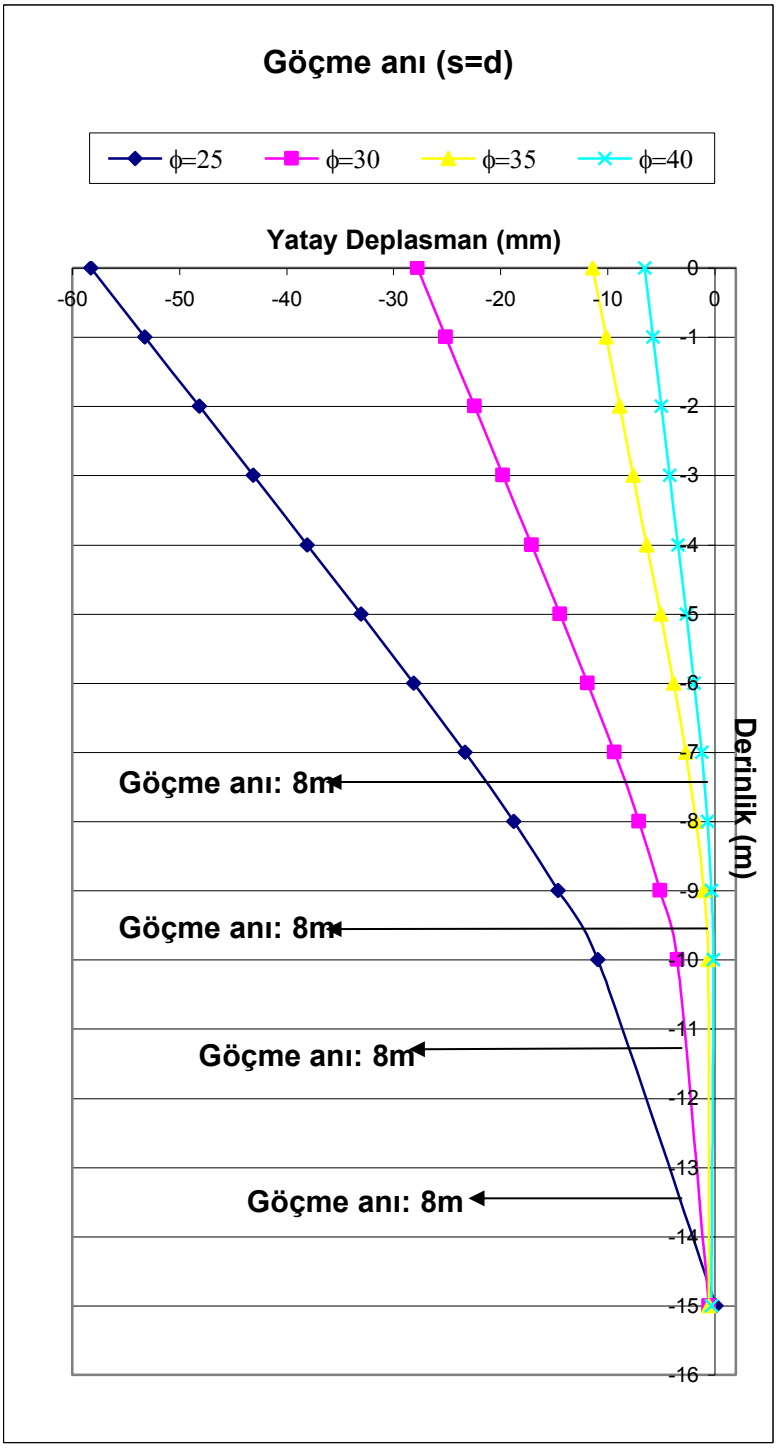
(d)



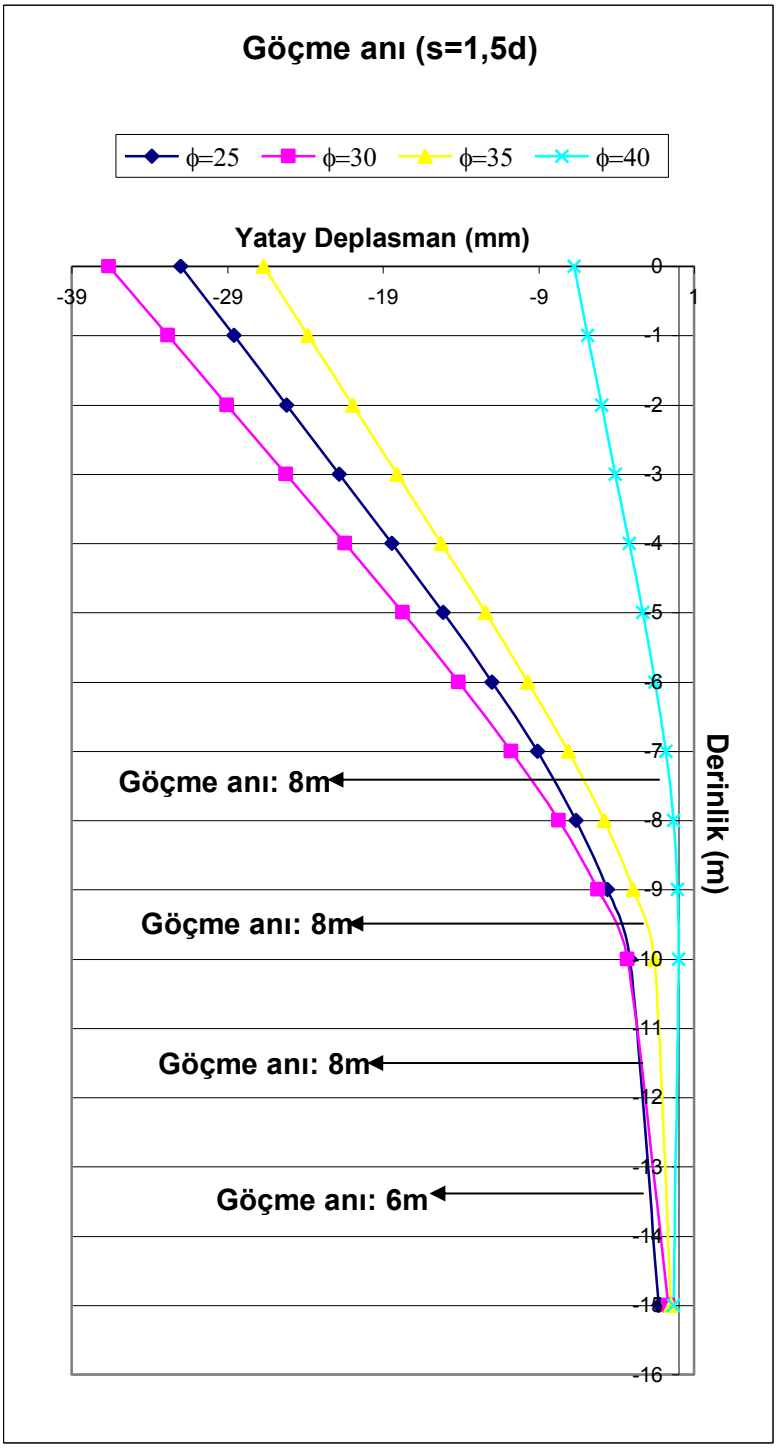
(e)

Şekil 5.12 : 3m Kazı Anında Sabit Kazık Çapı (d = 1000mm) ve Kazık Aralığında İçsel Sürtünme Açısına Göre Kazığa Gelen Yatay Deplasman – Derinlik Grafiği

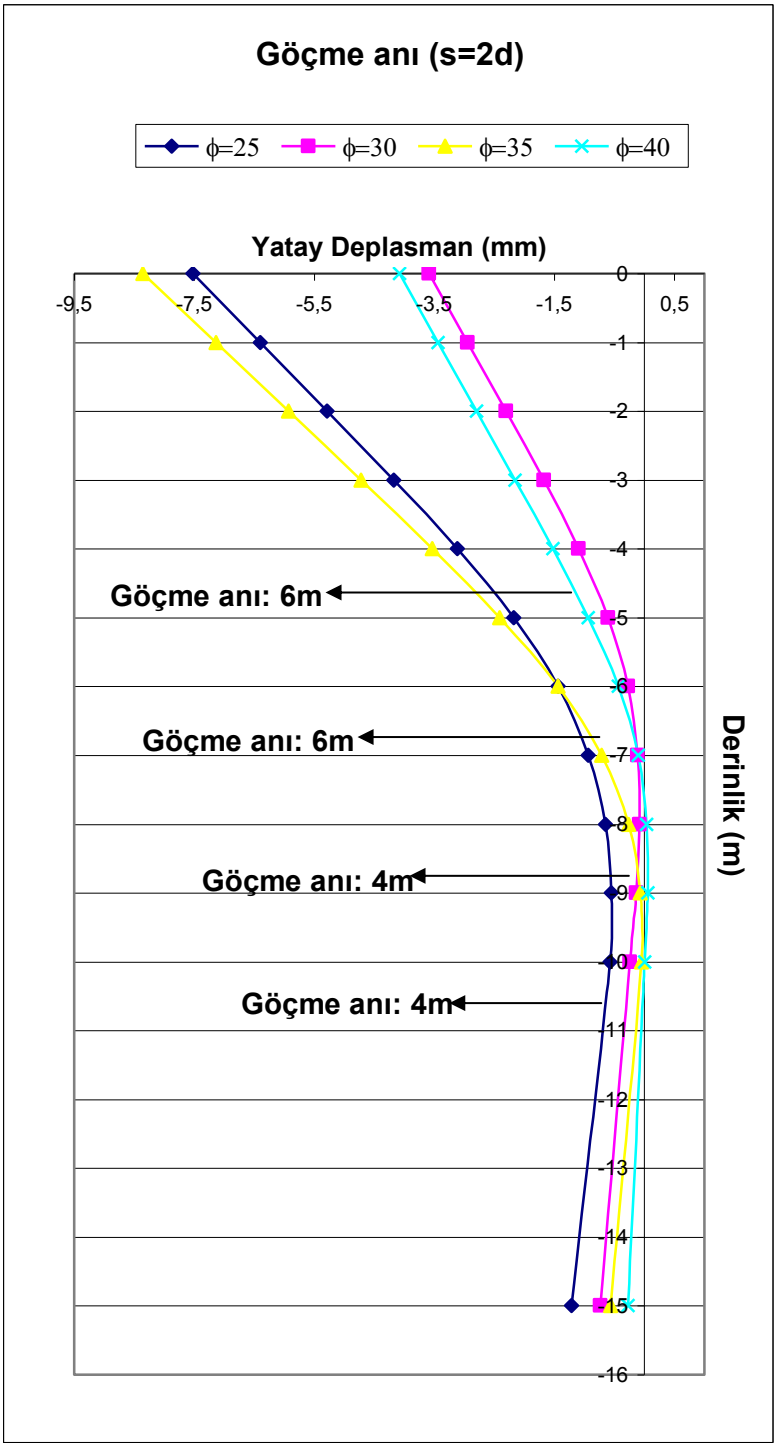
Şekil 5.13'te ise iki kazık arasından zeminin göçtüğü andaki kazı derinliğinde her bir kazık aralığı için seçilen zeminlerin içsel sürtünme açıları göz önüne alınarak kazıkta meydana gelen yatay deplasmanın derinliğe göre değişimi yatay deplasman – derinlik grafikleri çizilerek verildi.



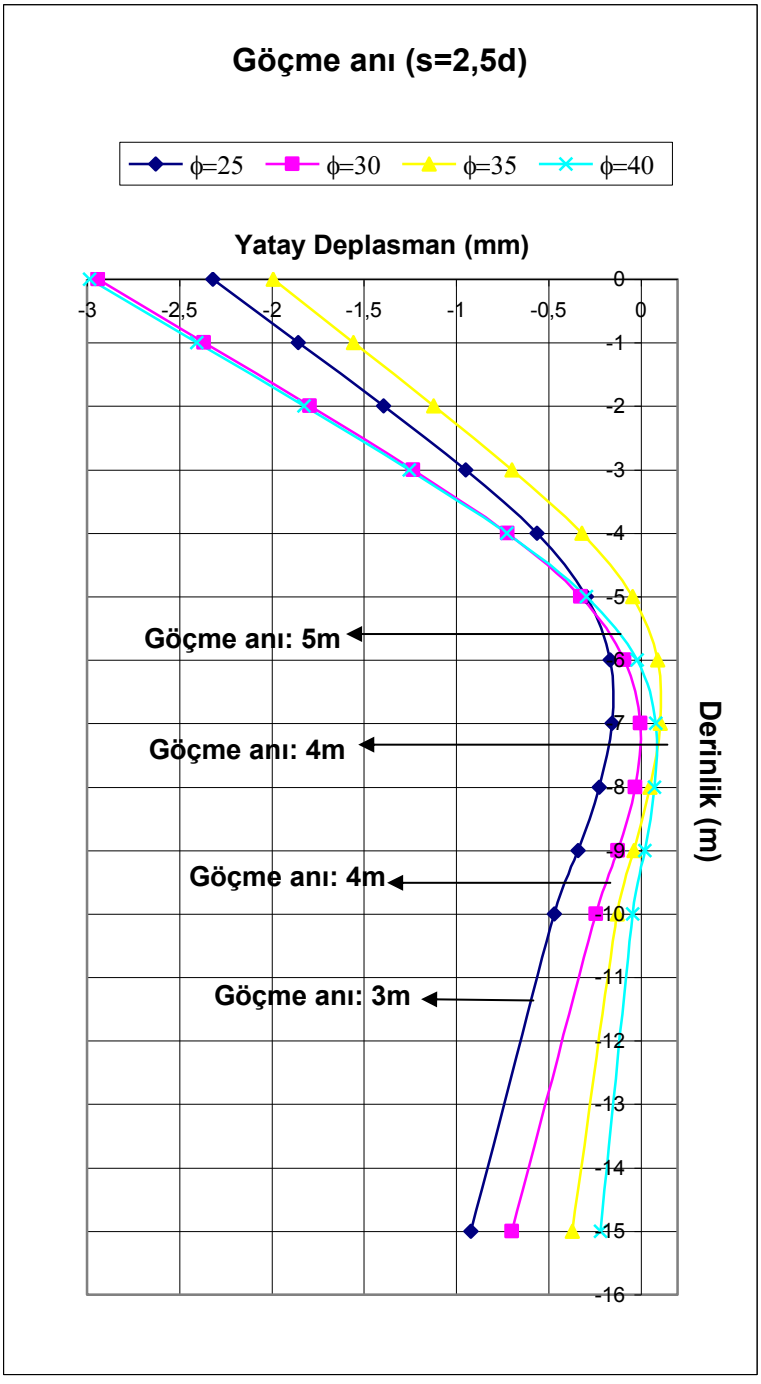
(a)


Göçme anı (s=1,5d)
ϕ=25
ϕ=30
ϕ=35
ϕ=40
Yatay Deplasman (mm)
-39
-29
-19
-9
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Derinlik (m)
Göçme anı: 8m
Göçme anı: 8m
Göçme anı: 8m
Göçme anı: 6m

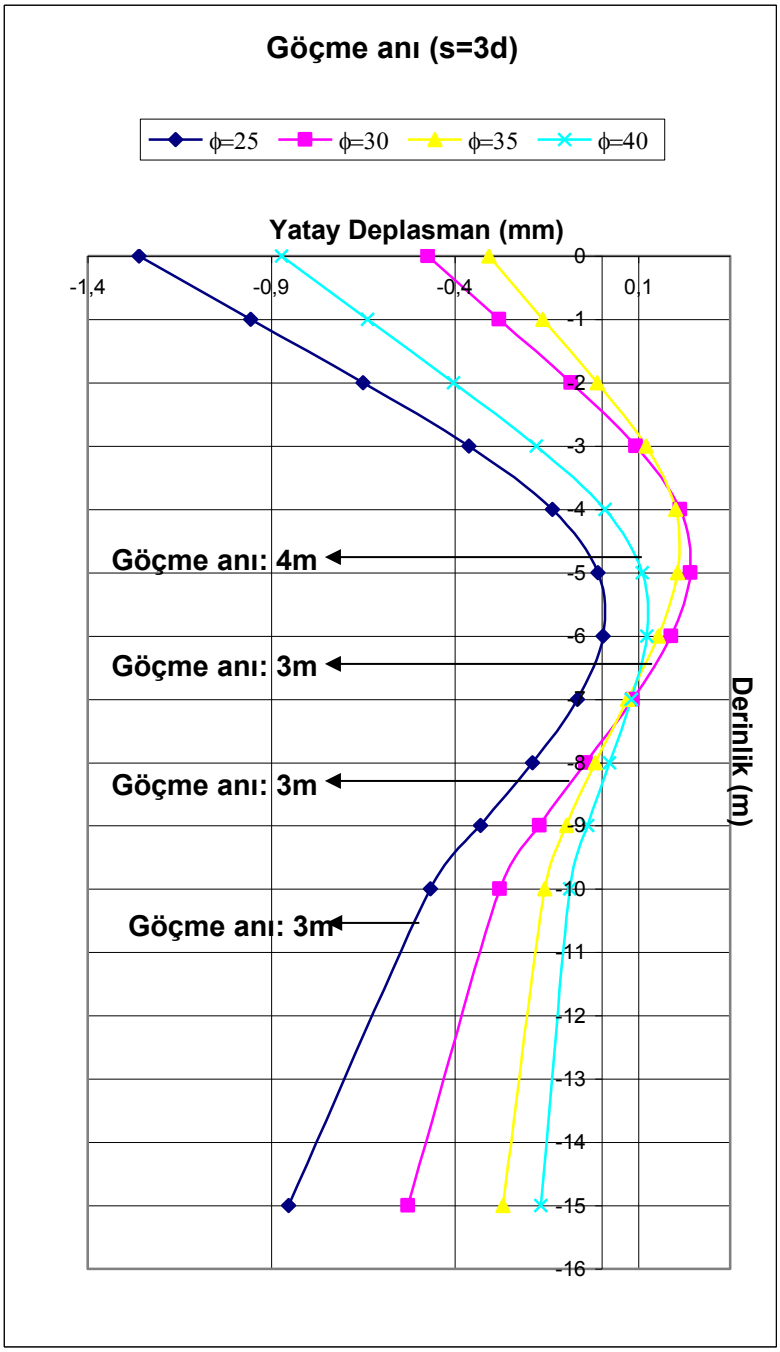
(b)


Göçme anı (s=2d)
ϕ=25
ϕ=30
ϕ=35
ϕ=40
Yatay Deplasman (mm)
-9,5
-7,5
-5,5
-3,5
-1,5
0,5
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Göçme anı: 6m
Göçme anı: 6m
Göçme anı: 4m
Göçme anı: 4m
Derinlik (m)

(c)


Göçme anı (s=2,5d)
ϕ=25
ϕ=30
ϕ=35
ϕ=40
Yatay Deplasman (mm)
-3
-2,5
-2
-1,5
-1
-0,5
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Göçme anı: 5m
Göçme anı: 4m
Göçme anı: 4m
Göçme anı: 3m
Derinlik (m)

(d)



(e)

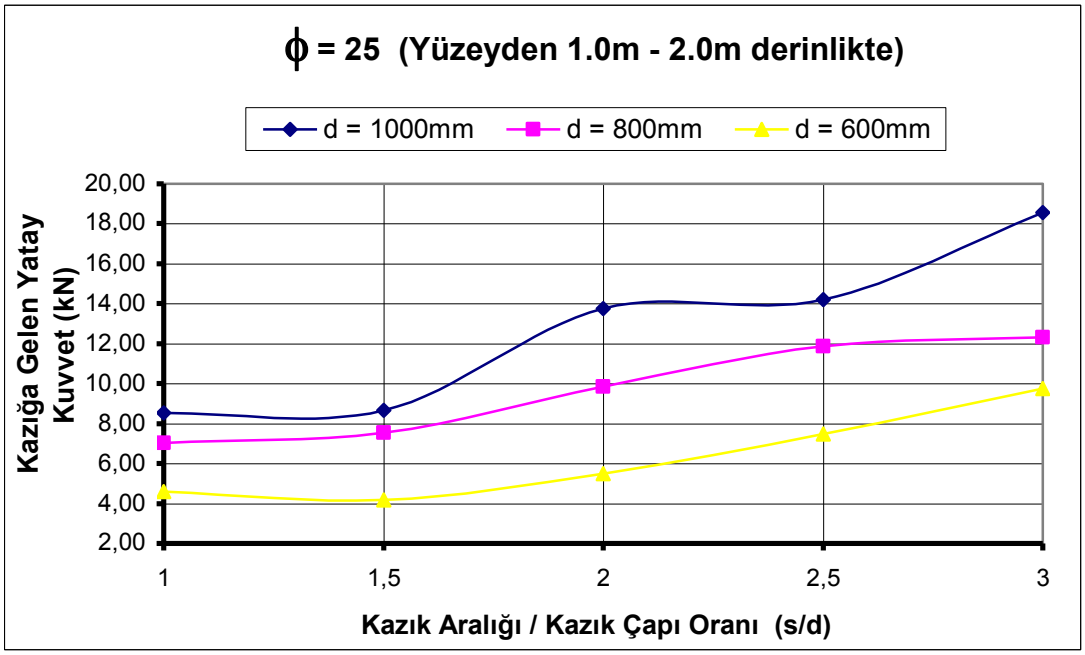
Şekil 5.13 : Göçme Anında Sabit Kazık Çapı (d = 1000mm) ve Kazık Aralığında İçsel Sürtünme Açısına Göre Kazığa Gelen Yatay Deplasman – Derinlik Grafiği

Seçilen zemin türlerinin sahip olduğu içsel sürtünme açısı değişiminin kazığa etki eden yatay kuvvete olan etkisi göz önüne alınarak çizilen grafik eğrileri; sabit kazık çapı, kazık aralığı ve yüzeyden belirli derinliklerde zemindeki içsel sürtünme açısı (ϕ) arttıkça, kazığa gelen kuvvetlerin azaldığını ve yatay deplasman – derinlik grafik eğrileri ise; zemin türlerinin sahip olduğu içsel sürtünme açısı(ϕ) arttıkça, deplasmanların azaldığını göstermektedir.

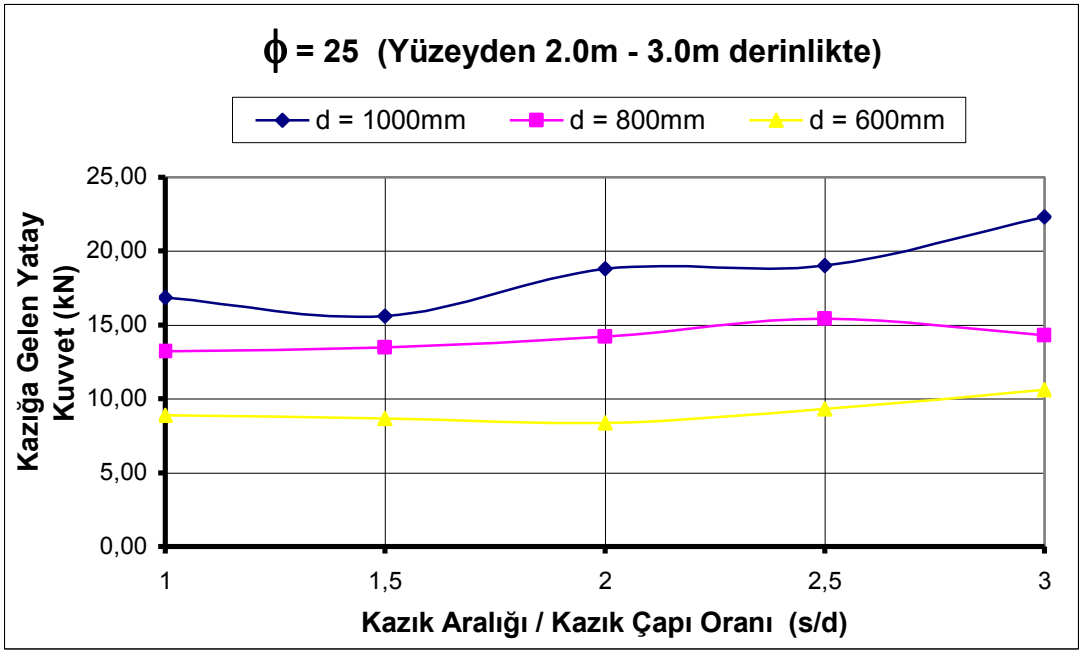
5.2.2. Kazık Aralığı Değişimi

Kemerlenme etkisini incelemek amacıyla oluşturulan modelde; kazık aralığı değişiminin kazığa gelen kuvvete olan etkisi d = 600mm, d = 800mm ve d = 1000mm olarak seçilen kazık çapları ile gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum olarak seçilen zemin türleri göz önüne alınarak incelendi.

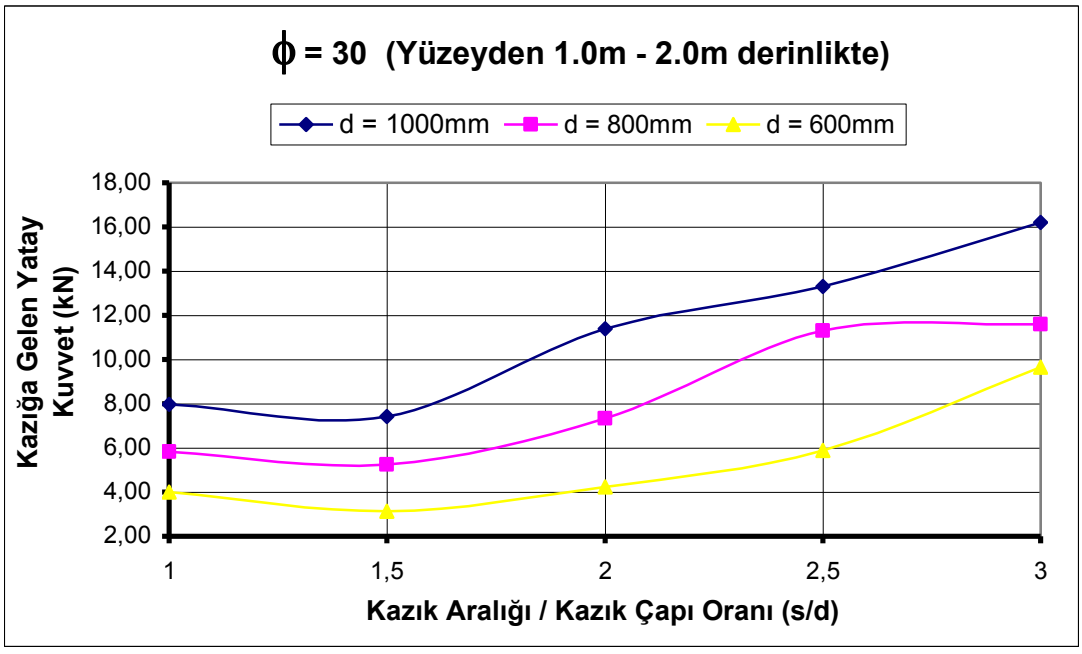
Şekil 5.14'te görüldüğü üzere 3m. kazı yapıldığı anda farklı zemin türlerinin (gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum) sahip olduğu içsel sürtünme açısı (ϕ) ve yüzeyden belirli derinlikler için; d = 600mm, d = 800mm ve d = 1000mm kazık çaplarına göre, kazık aralıkları (s) göz önüne alınarak, kazığa gelen yatay kuvvet – kazık aralığı/kazık çapı oranı grafikleri çizildi.



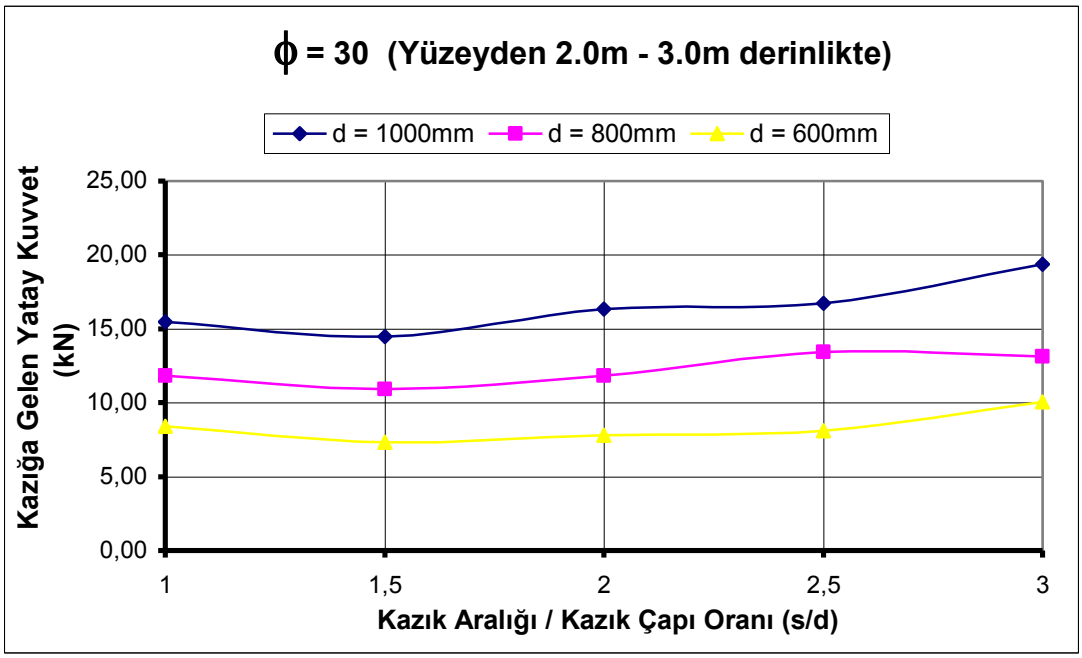
(a)


ϕ = 25 (Yüzeyden 2.0m - 3.0m derinlikte)
d = 1000mm
d = 800mm
d = 600mm
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
1
1,5
2
2,5
3
Kazık Aralığı / Kazık Çapı Oranı (s/d)

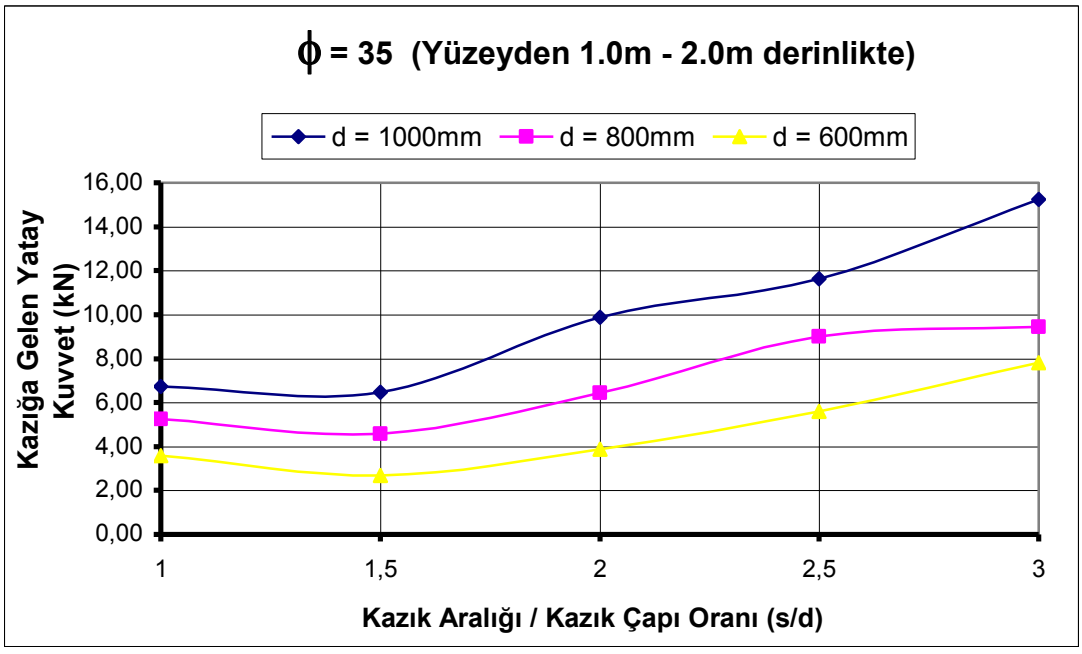
(b)


ϕ = 30 (Yüzeyden 1.0m - 2.0m derinlikte)
d = 1000mm
d = 800mm
d = 600mm
18,00
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
1
1,5
2
2,5
3
Kazık Aralığı / Kazık Çapı Oranı (s/d)

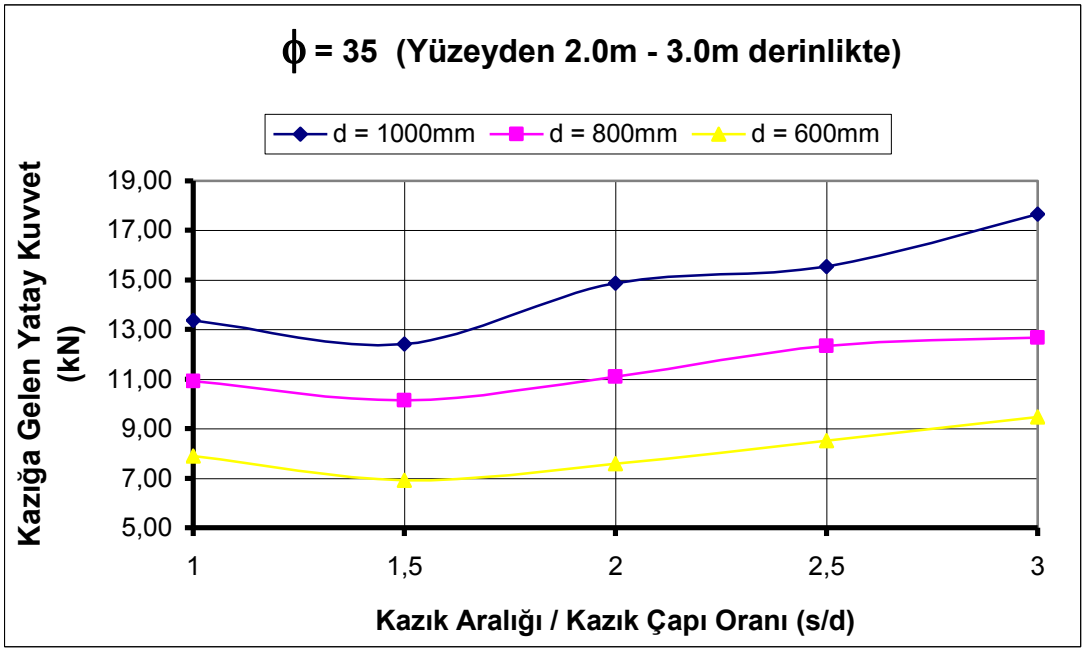
(c)


ϕ = 30 (Yüzeyden 2.0m - 3.0m derinlikte)
d = 1000mm
d = 800mm
d = 600mm
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
1
1,5
2
2,5
3
Kazık Aralığı / Kazık Çapı Oranı (s/d)

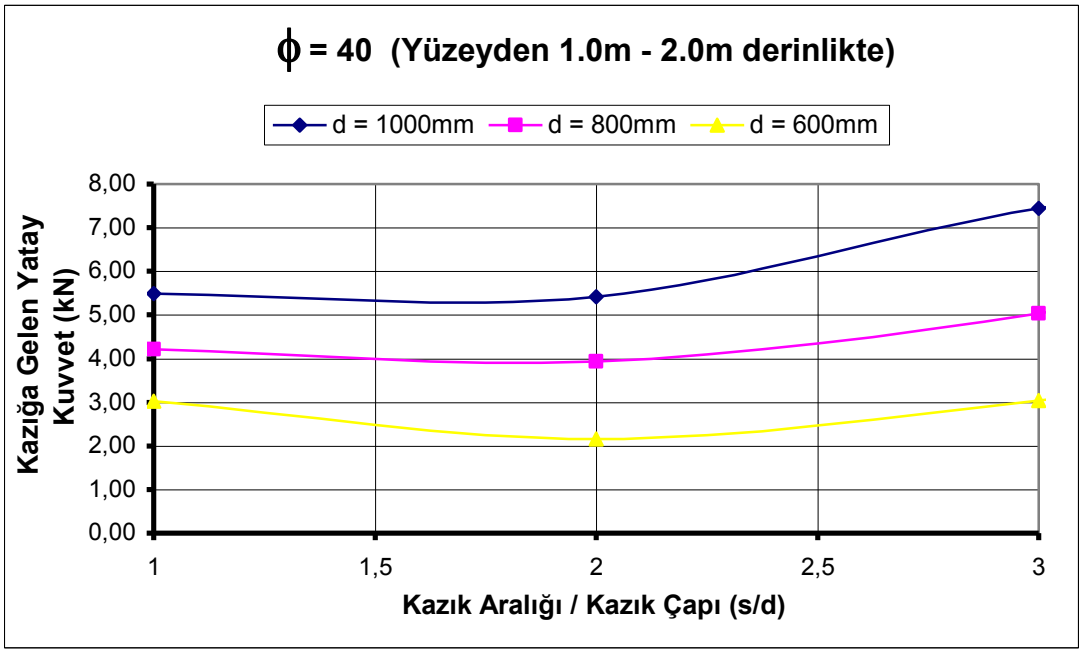
(d)


ϕ = 35 (Yüzeyden 1.0m - 2.0m derinlikte)
d = 1000mm
d = 800mm
d = 600mm
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
0,00
1
1,5
2
2,5
3
Kazık Aralığı / Kazık Çapı Oranı (s/d)

(e)



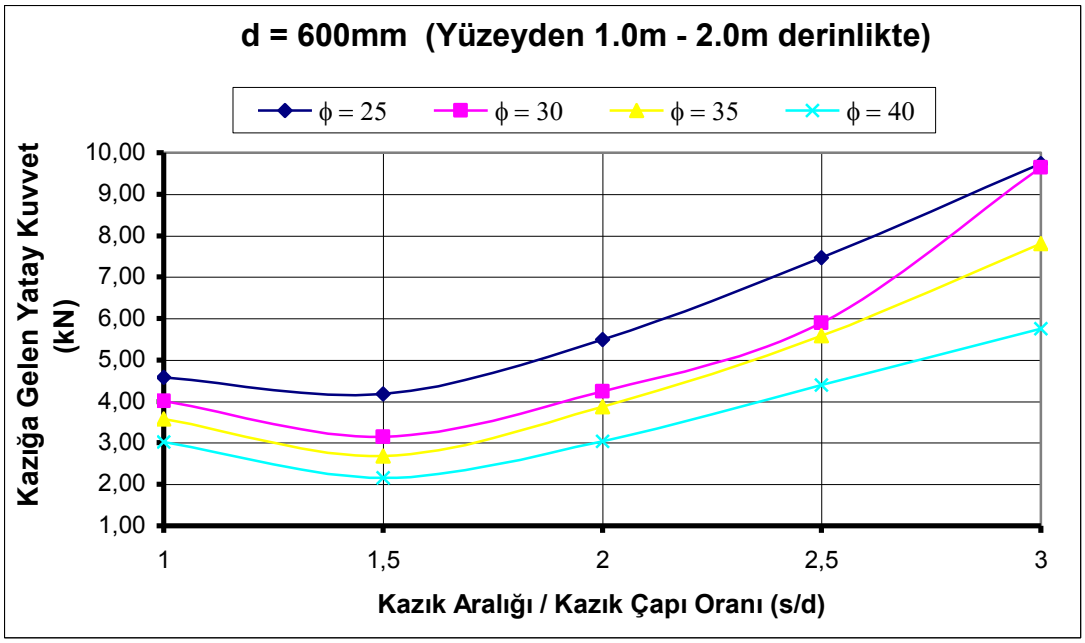
(f)



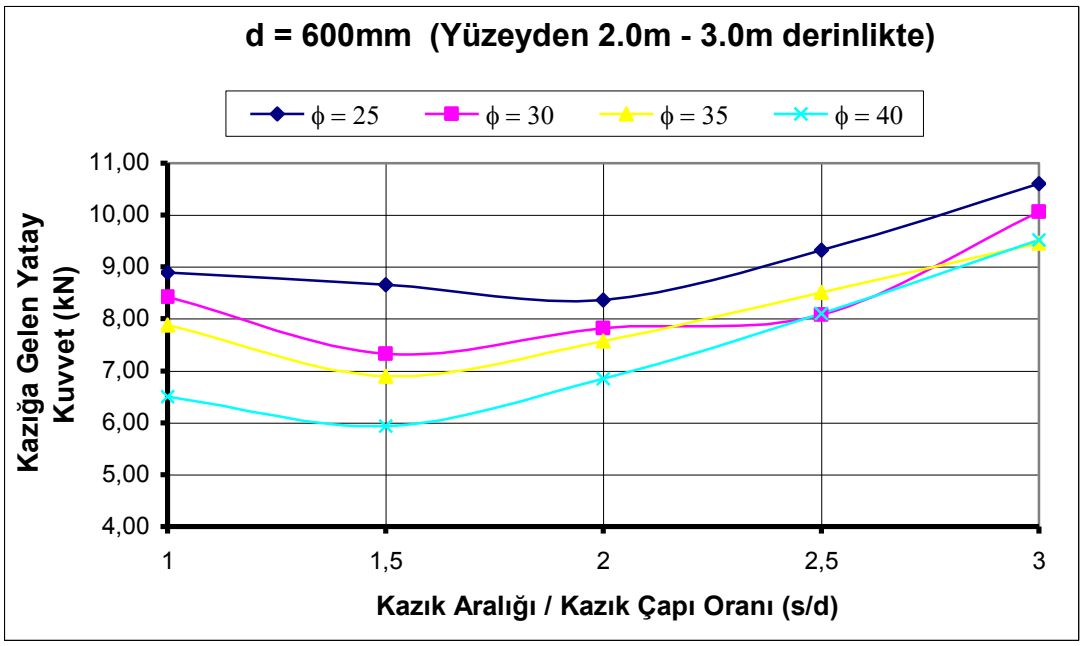
(g)

Şekil 5.14 : Yüzeyden Belirli Derinliklerde Sabit Zemin Türünde Kazık Çapına Göre Kazığa Gelen Yatay Kuvvet – Kazık Aralığı / Kazık Çapı Grafiği

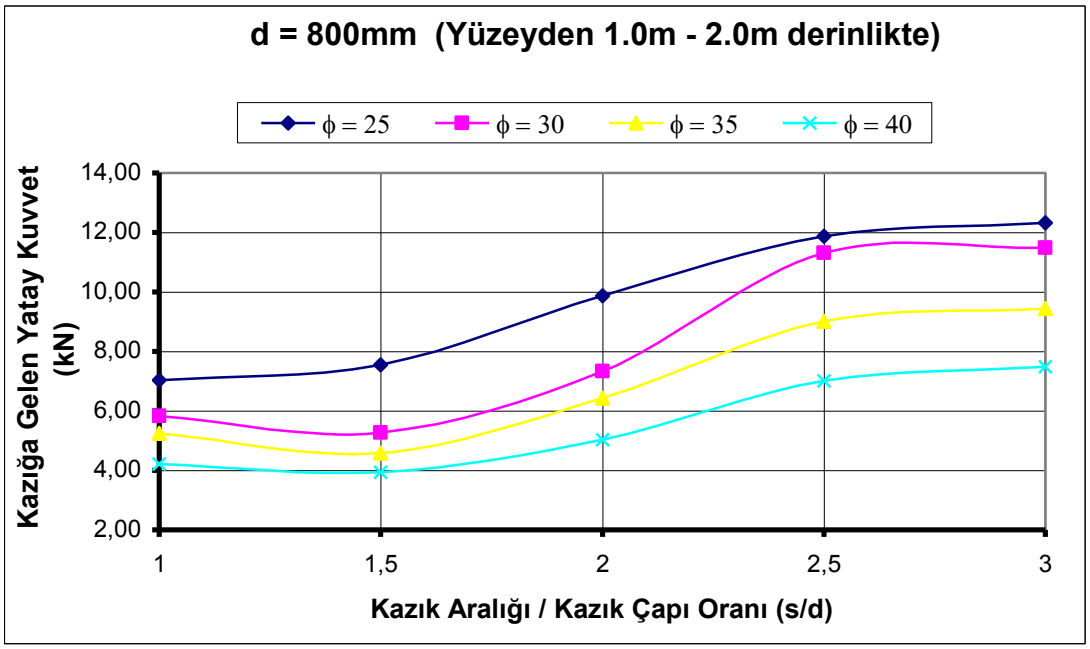
Şekil 5.15'te görüldüğü üzere 3m kazı yapıldığı anda d = 600mm, d = 800mm ve d = 1000mm kazık çapları ve yüzeyden belirli derinlikler için; gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum zeminlerin sahip olduğu içsel sürtünme açısına (ϕ) göre, s = d, s = 1.5d, s = 2d, s = 2.5d ve s = 3d kazık aralıkları göz önüne alınarak, kazığa gelen yatay kuvvet – kazık aralığı grafikleri çizildi.



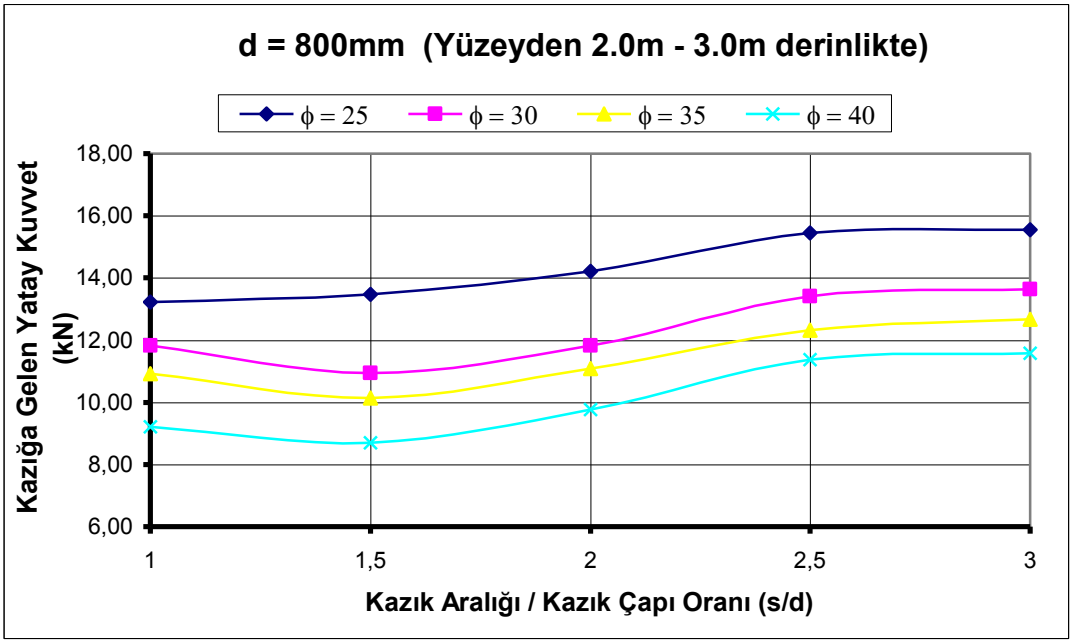
(a)



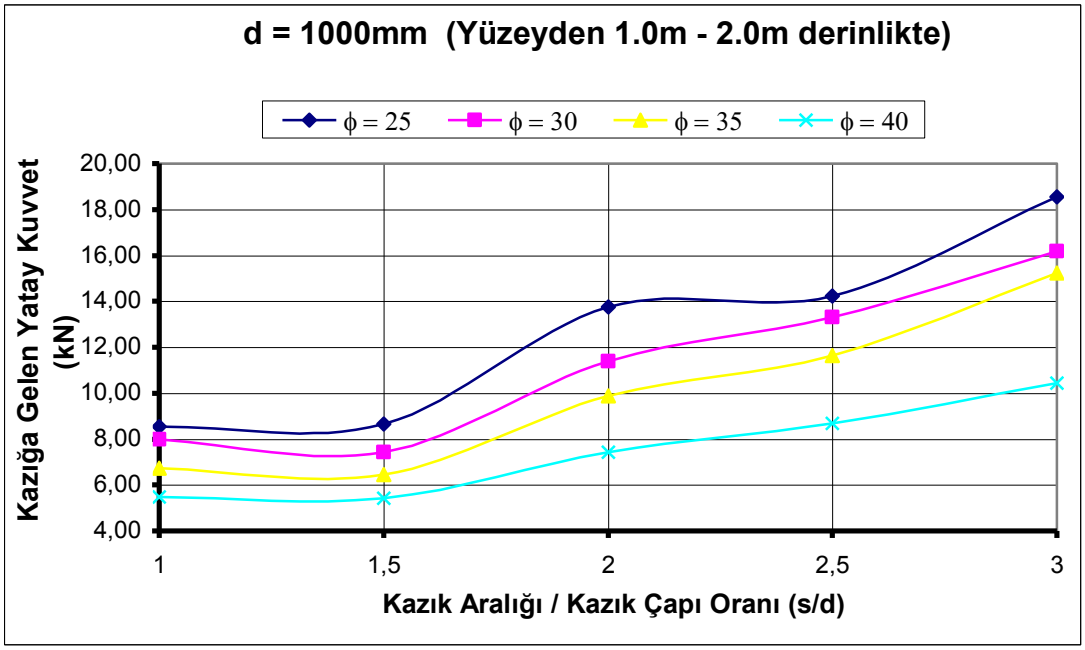
(b)


d = 800mm (Yüzeyden 1.0m - 2.0m derinlikte)
ϕ = 25
ϕ = 30
ϕ = 35
ϕ = 40
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
1
1,5
2
2,5
3
Kazık Aralığı / Kazık Çapı Oranı (s/d)

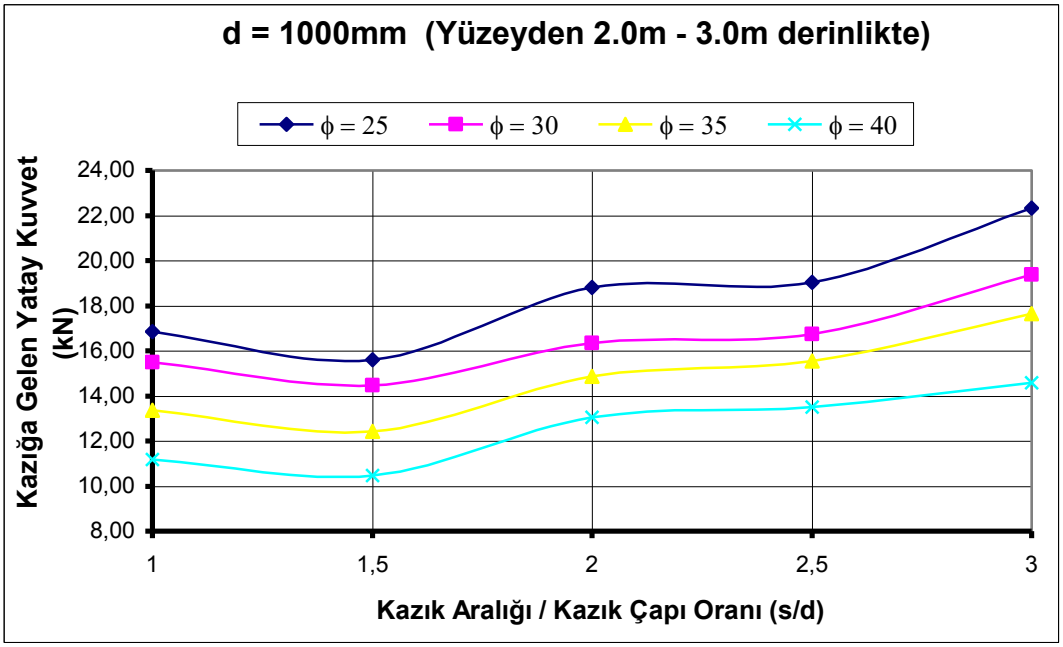
(c)


d = 800mm (Yüzeyden 2.0m - 3.0m derinlikte)
ϕ = 25
ϕ = 30
ϕ = 35
ϕ = 40
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
18,00
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
1
1,5
2
2,5
3
Kazık Aralığı / Kazık Çapı Oranı (s/d)

(d)



(e)



(f)

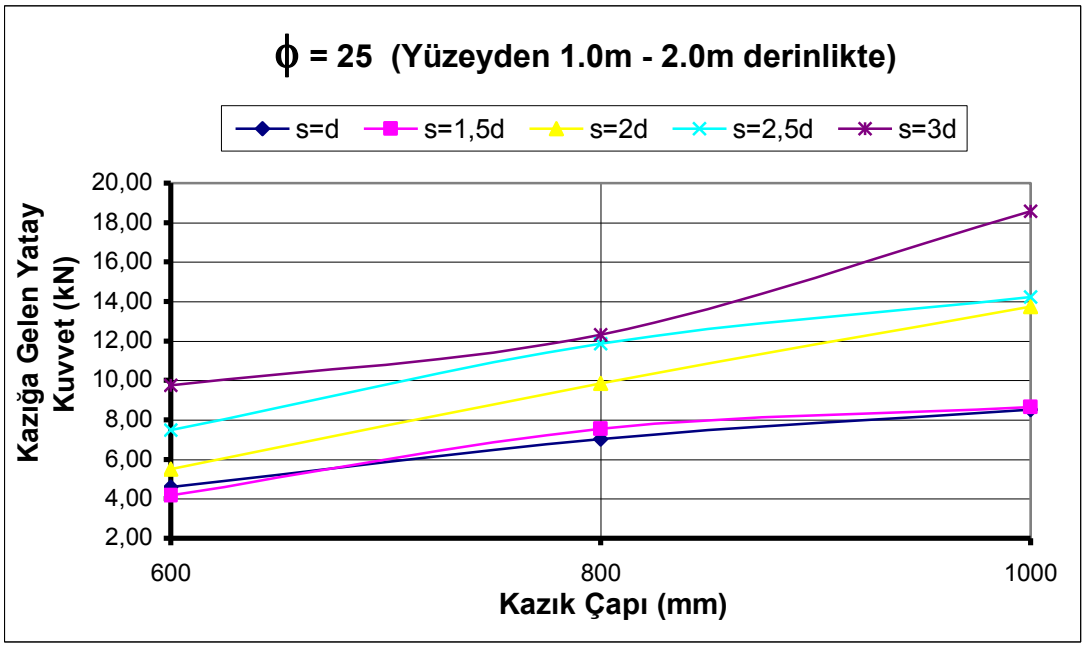
Şekil 5.15 : Sabit Kazık Çapı ve Yüzeyden Belirli Derinliklerde İçsel Sürtünme Açısına Göre Kazığa Gelen Yatay Kuvvet – Kazık Aralığı / Kazık Çapı Grafiği

Seçilen kazık aralığı değişiminin kazığa etki eden yatay kuvvete olan etkisi göz önüne alınarak çizilen grafik eğrileri; sabit kazık çapı, zemin türü ve yüzeyden belirli derinliklerde kazık aralığı arttıkça, kazıklara etki eden yatay kuvvet değerlerinin artmakta olduğunu göstermektedir.

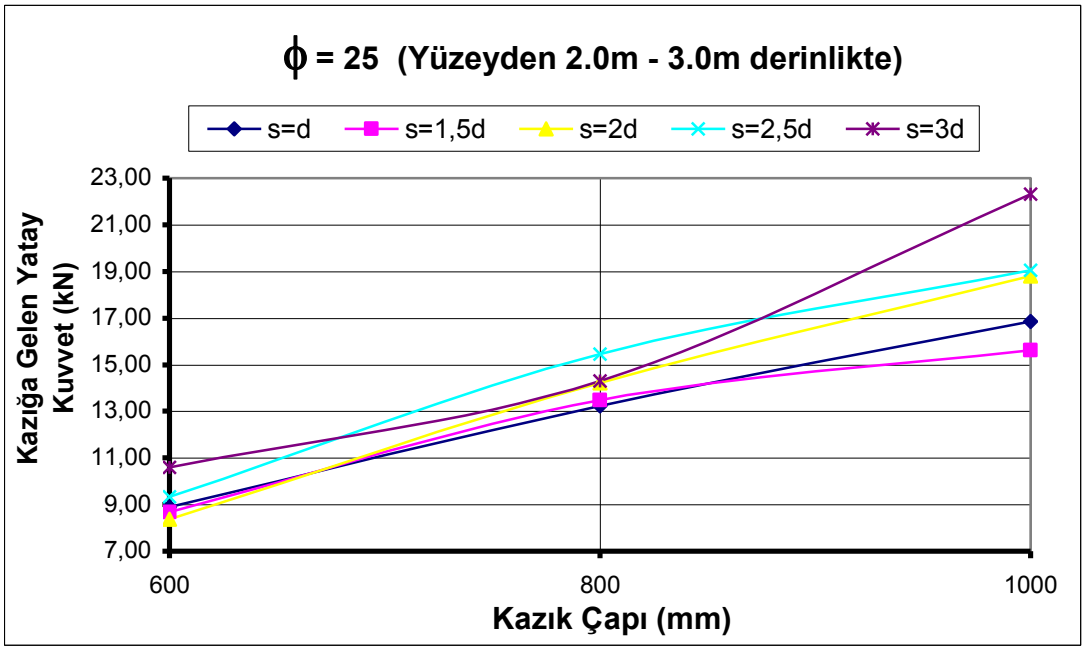
5.2.3. Kazık Çapı Değişimi

Yapılan analizler sonucunda; kazık çapı değişiminin kazığa gelen yatay kuvvete olan etkisi s = d, s = 1.5d, s = 2d, s = 2.5d ve s = 3d olarak seçilen kazık aralıkları ile gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum olarak seçilen zemin türleri göz önüne alınarak değerlendirildi.

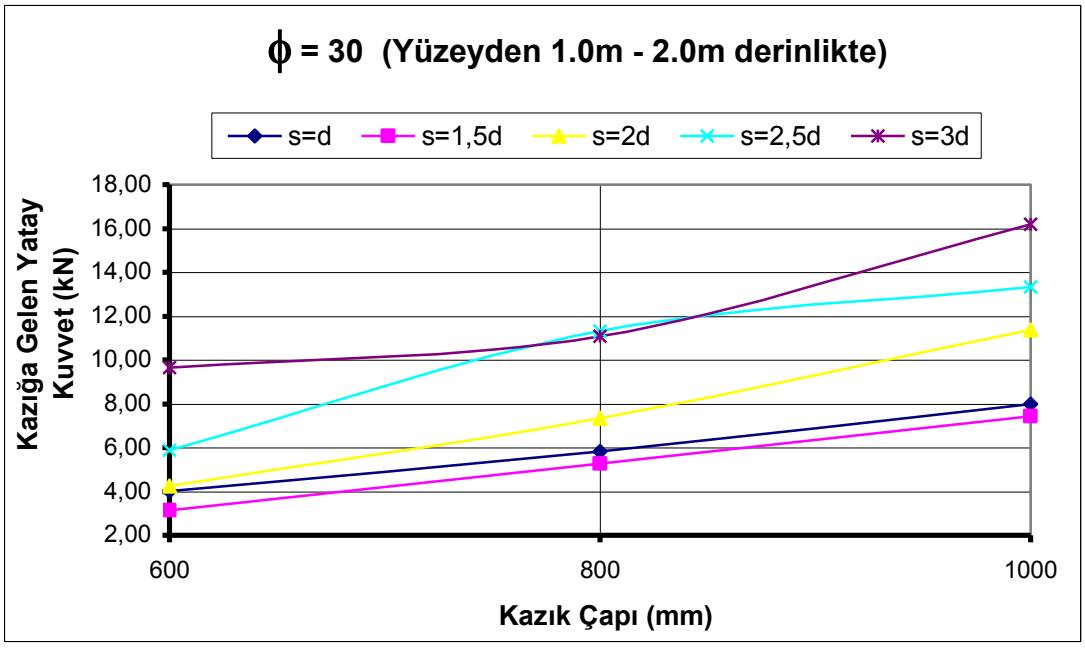
Şekil 5.16'da görüldüğü üzere 3m. kazı yapıldığı anda farklı zemin türlerinin (gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum) sahip olduğu içsel sürtünme açısı(ϕ) ve yüzeyden belirli derinlikler için farklı kazık aralıklarına göre, kazık çapları(d) göz önüne alınarak, kazığa gelen yatay kuvvet – kazık çapı grafikleri çizildi.



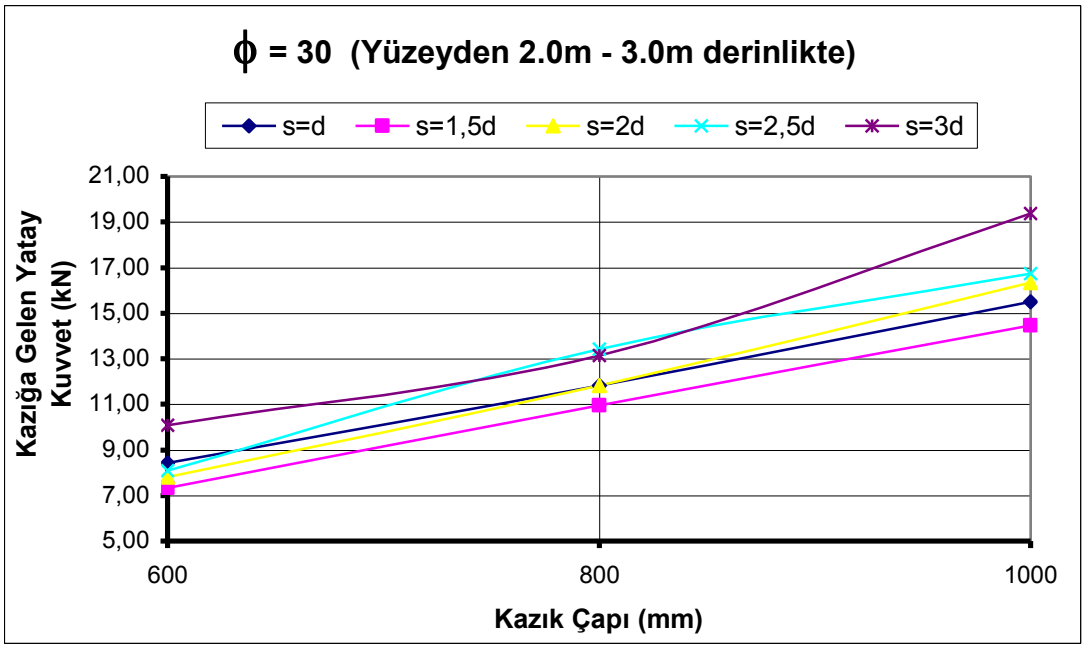
(a)


ϕ = 25 (Yüzeyden 2.0m - 3.0m derinlikte)
s=d
s=1,5d
s=2d
s=2,5d
s=3d
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
23,00
21,00
19,00
17,00
15,00
13,00
11,00
9,00
7,00
600
800
1000
Kazık Çapı (mm)

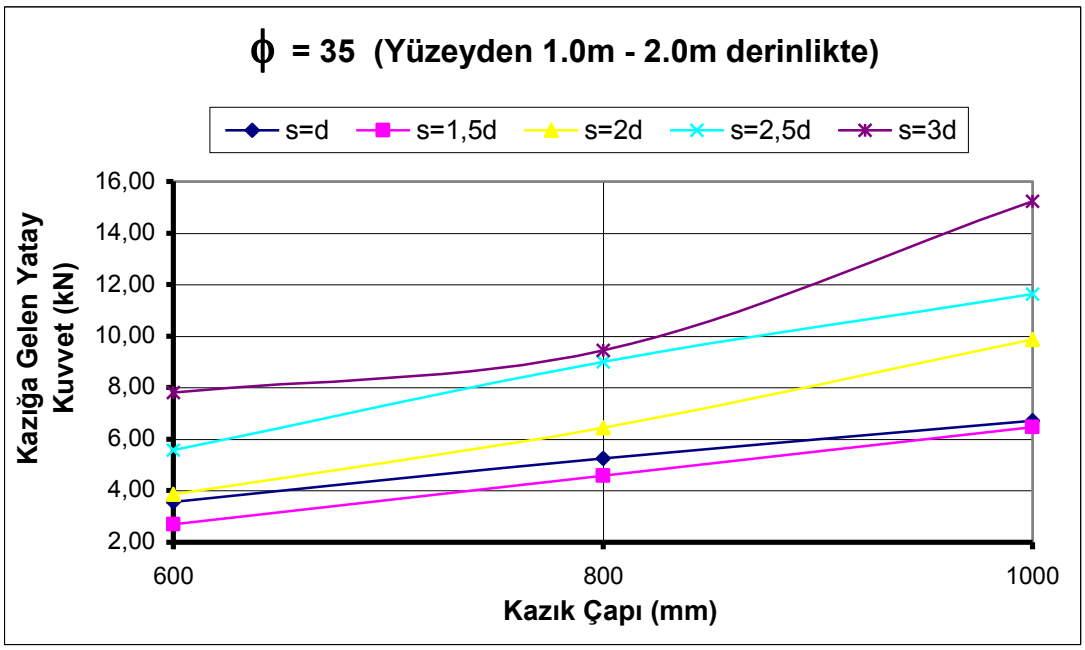
(b)


ϕ = 30 (Yüzeyden 1.0m - 2.0m derinlikte)
s=d
s=1,5d
s=2d
s=2,5d
s=3d
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
18,00
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
600
800
1000
Kazık Çapı (mm)

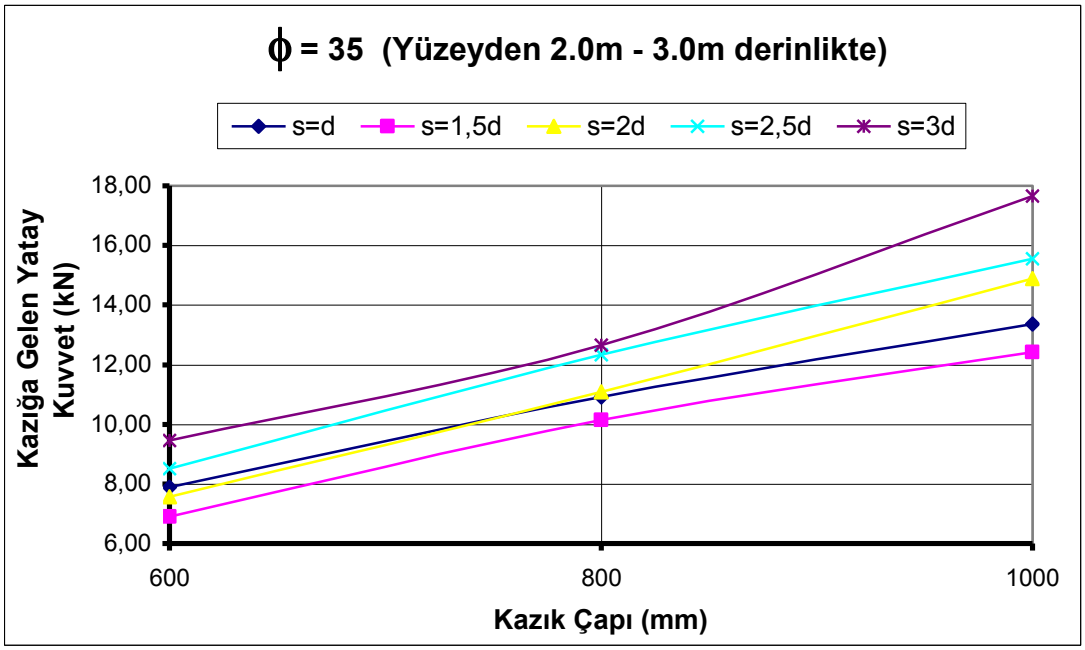
(c)


ϕ = 30 (Yüzeyden 2.0m - 3.0m derinlikte)
s=d
s=1,5d
s=2d
s=2,5d
s=3d
21,00
19,00
17,00
15,00
13,00
11,00
9,00
7,00
5,00
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
600
800
1000
Kazık Çapı (mm)

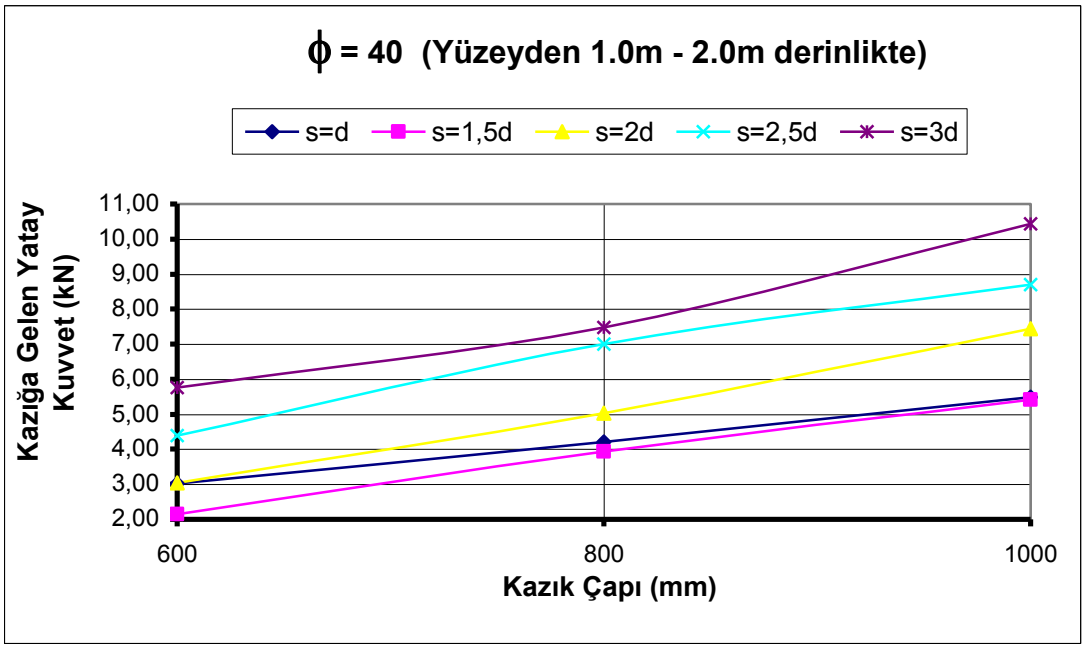
(d)


ϕ = 35 (Yüzeyden 1.0m - 2.0m derinlikte)
s=d
s=1,5d
s=2d
s=2,5d
s=3d
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
600
800
1000
Kazık Çapı (mm)

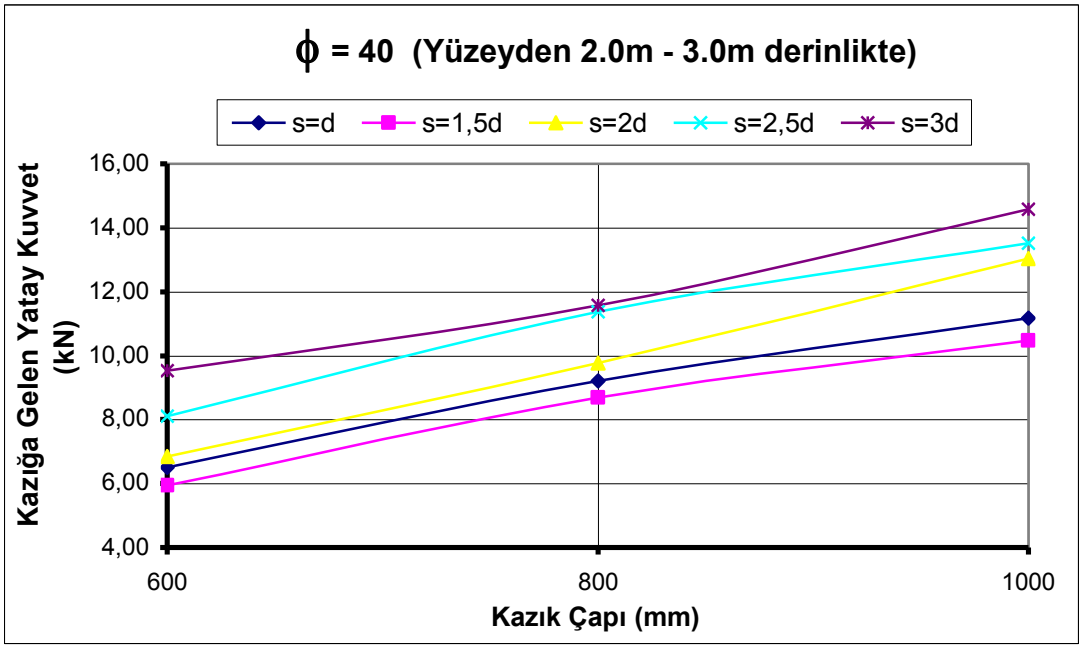
(e)


ϕ = 35 (Yüzeyden 2.0m - 3.0m derinlikte)
s=d
s=1,5d
s=2d
s=2,5d
s=3d
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
18,00
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
600
800
1000
Kazık Çapı (mm)

(f)


ϕ = 40 (Yüzeyden 1.0m - 2.0m derinlikte)
s=d
s=1,5d
s=2d
s=2,5d
s=3d
Kazığa Gelen Yatay Kuvvet (kN)
11,00
10,00
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
600
800
1000
Kazık Çapı (mm)

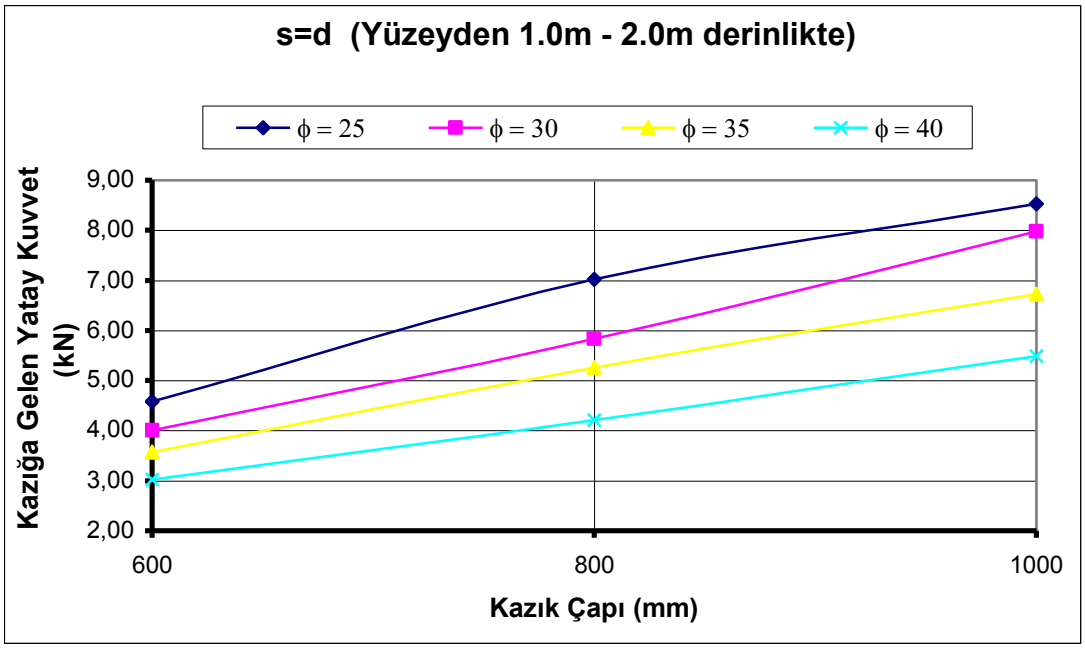
(g)



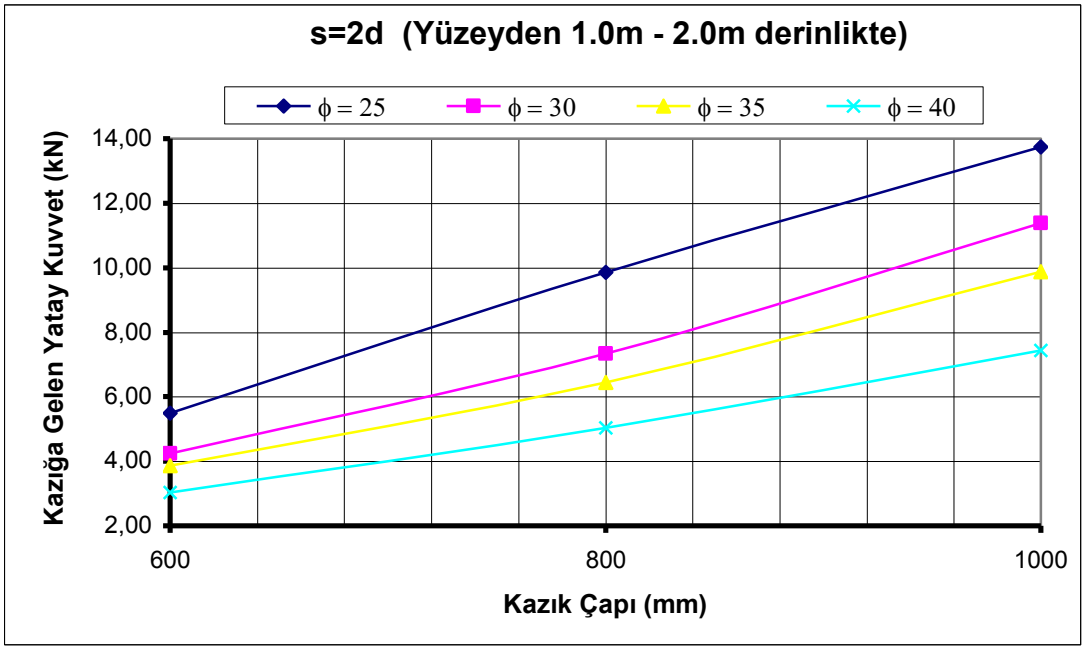
(h)

Şekil 5.16 : Sabit Zemin Türü ve Yüzeyden Belirli Derinliklerde Kazık Aralıklarına Göre Kazığa Gelen Yatay Kuvvet – Kazık Çapı Grafiği

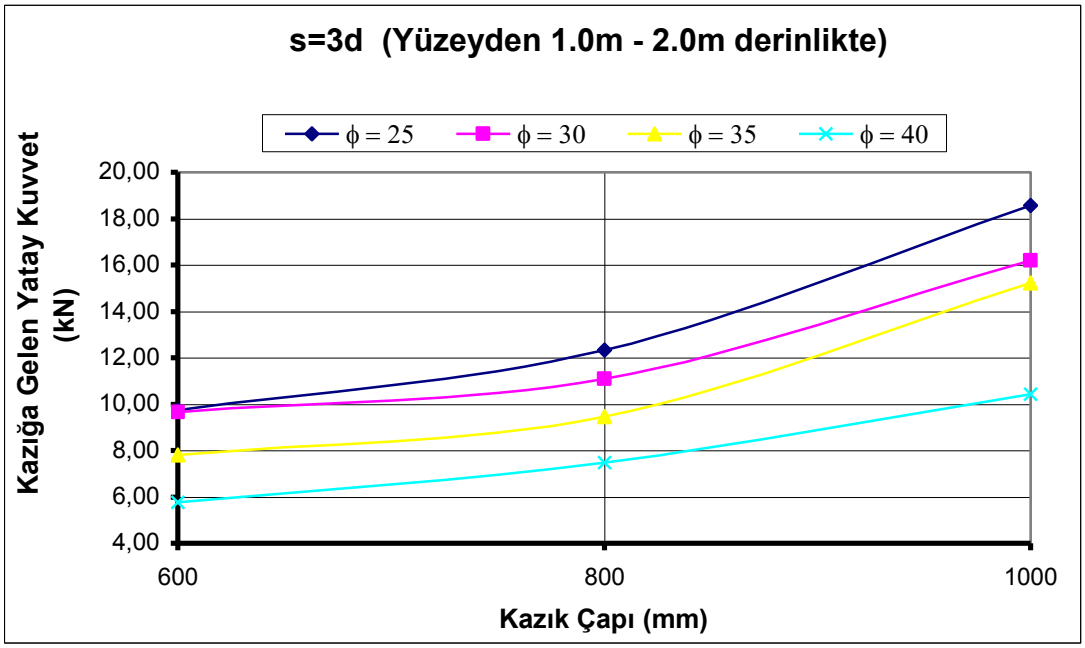
Şekil 5.17'de görüldüğü üzere 3m kazı yapıldığı anda sabit kazık aralığı ve yüzeyden belirli derinlikler için farklı zemin türlerinin (gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum) sahip olduğu içsel sürtünme açısına (ϕ) göre, kazık çapları(d) göz önüne alınarak, kazığa gelen yatay kuvvet – kazık çapı grafikleri çizildi.



(a)



(b)

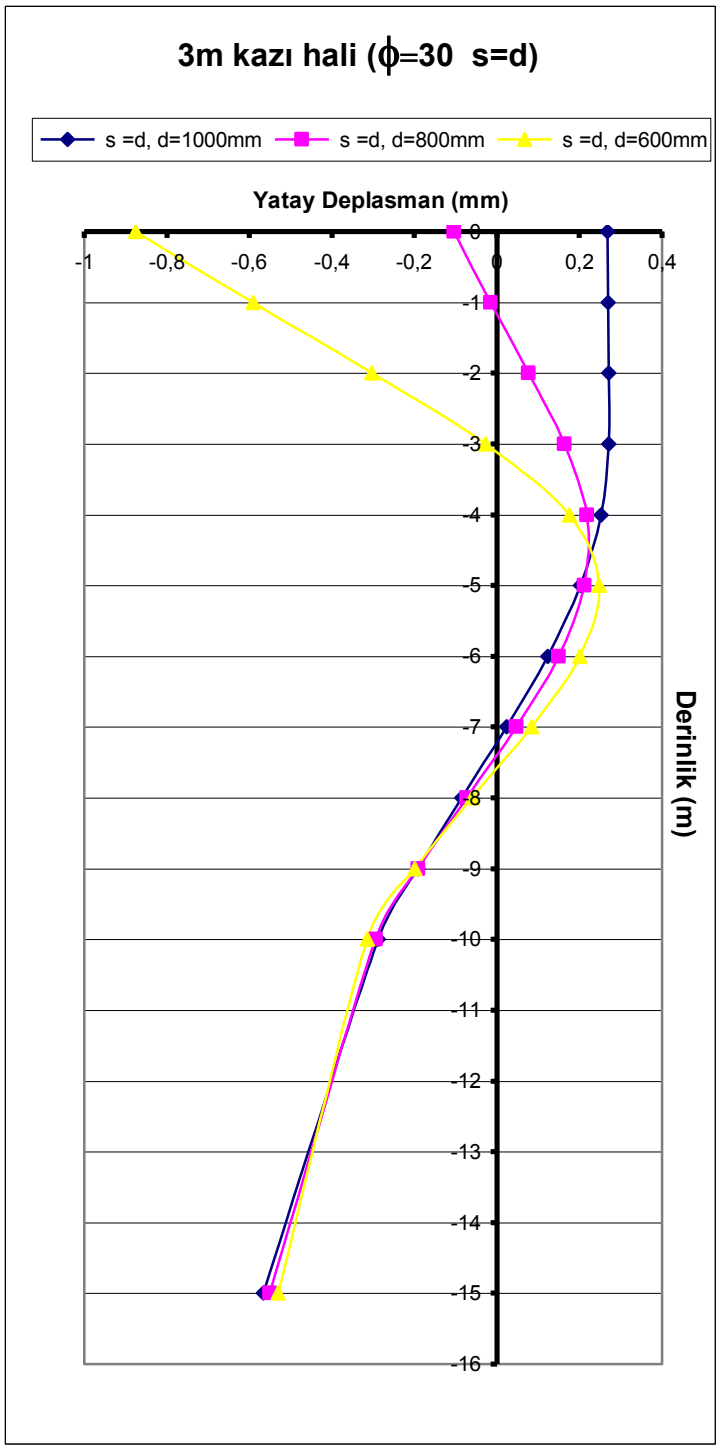


(c)

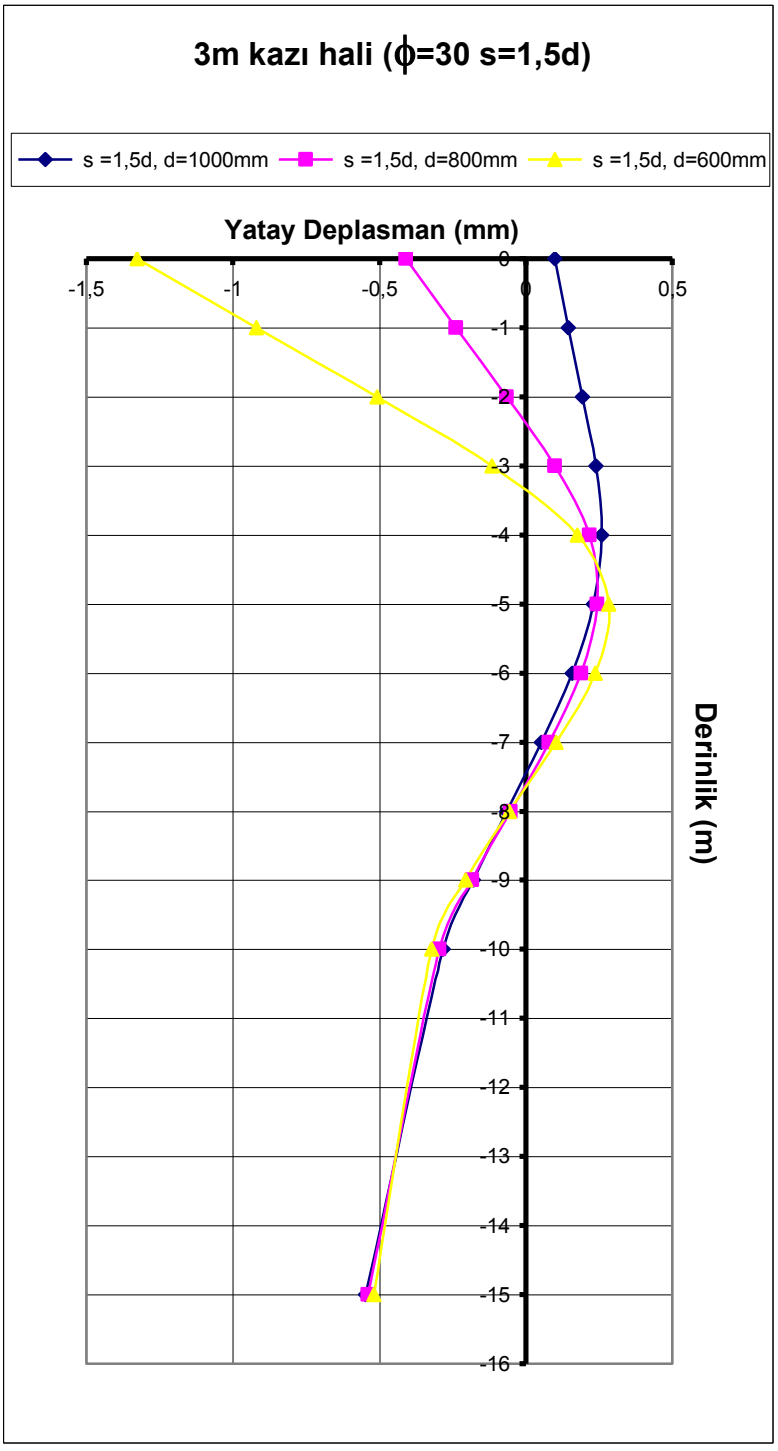
Şekil 5.17 : Sabit Kazık Aralığı ve Yüzeyden Belirli Derinliklerde İçsel Sürtünme Açısına Göre Kazığa Gelen Yatay Kuvvet – Kazık Çapı Grafiği

Seçilen kazık çaplarının kazığa etki eden yatay kuvvete olan etkisi göz önüne alınarak çizilen grafik eğrileri; sabit kazık aralığı, zemin türü ve yüzeyden belirli derinliklerde kazık çapı arttıkça, kazıklara etki eden yatay kuvvet değerlerinin artmakta olduğunu göstermektedir.

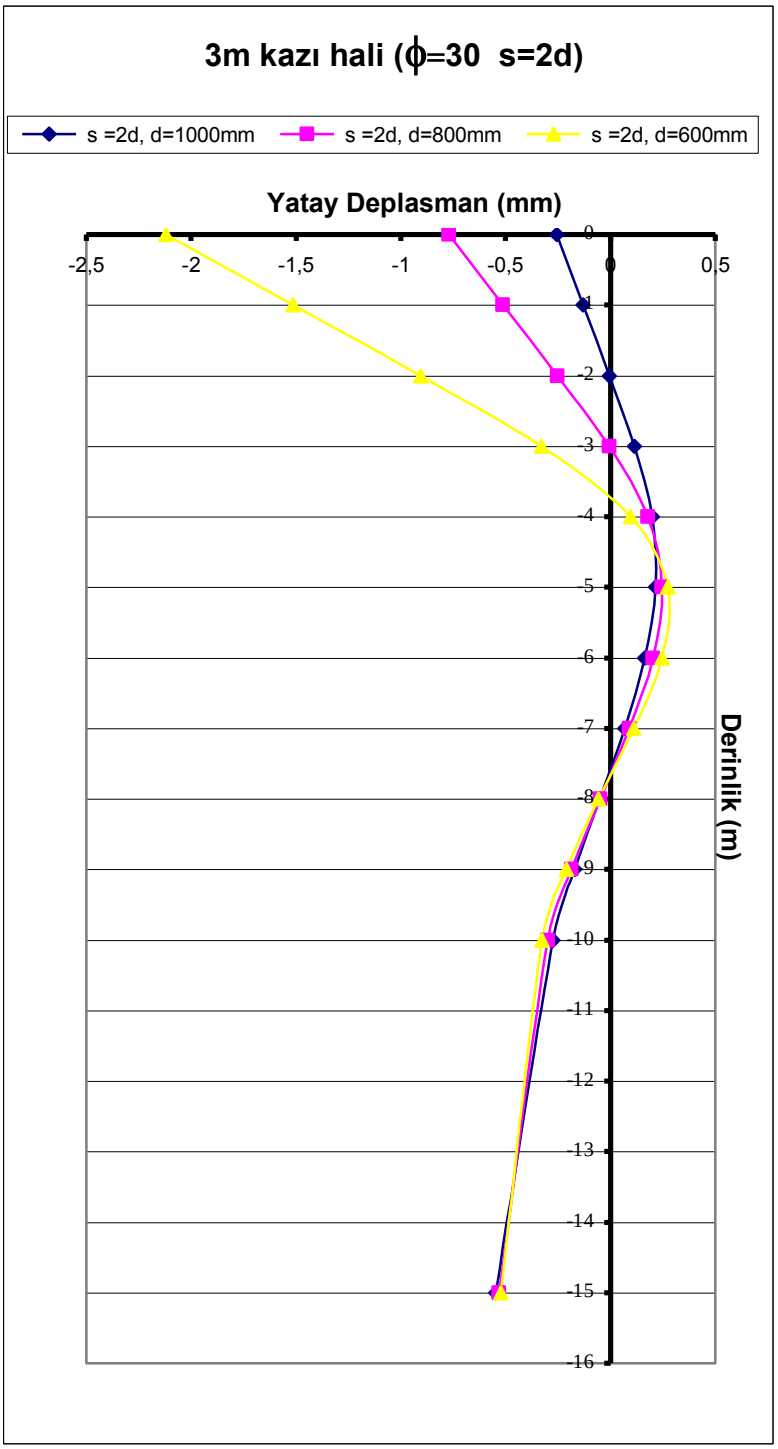
Şekil 5.18'de 3m kazı yapıldığı anda her bir kazık aralığı için içsel sürtünme açısı $\phi = 30^0$ olan gevşek – orta sıkı kumda; kazık çapları göz önüne alınarak kazıkta meydana gelen yatay deplasmanın derinliğe göre değişimi yatay deplasman – derinlik grafikleri çizilerek verildi.



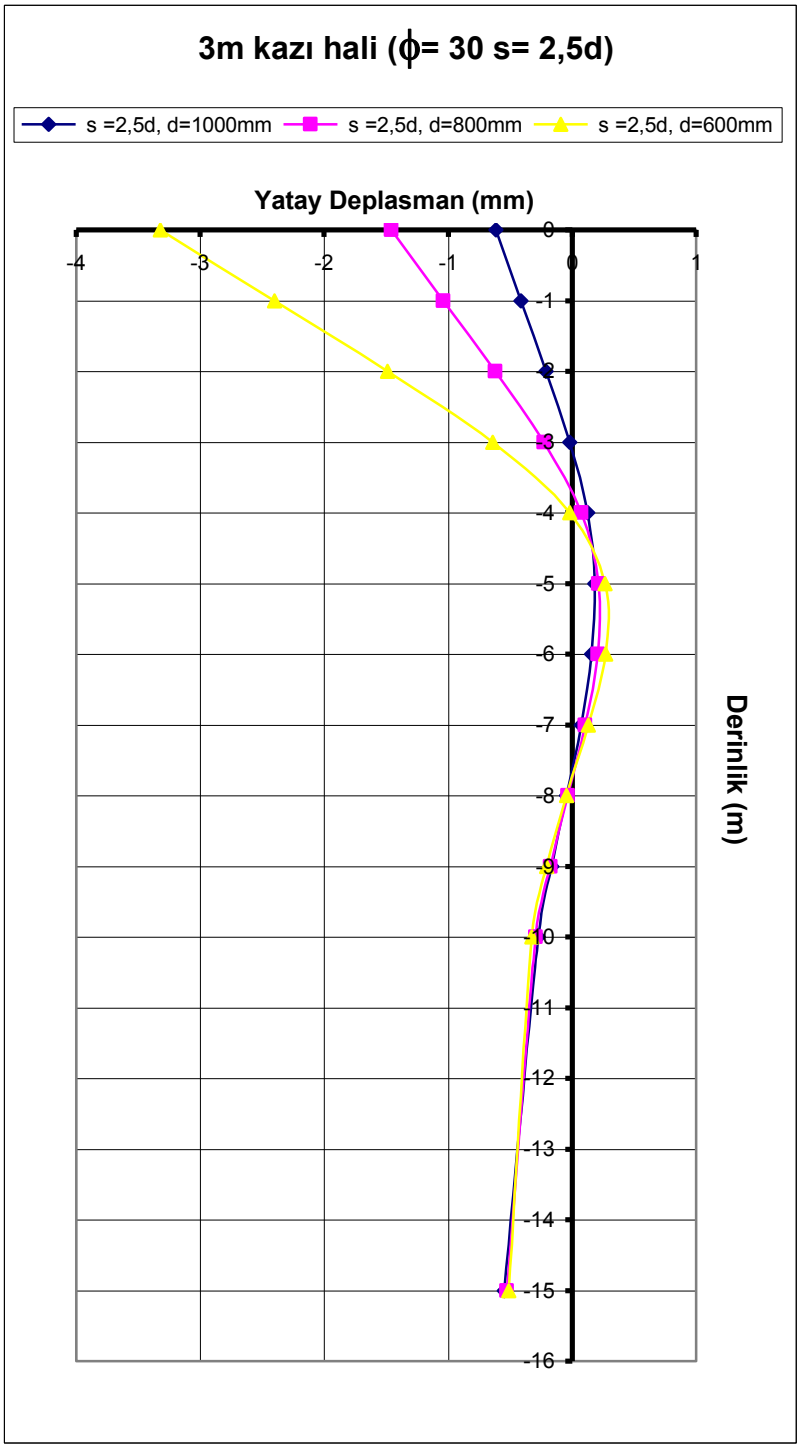
(a)


3m kazı hali (ϕ=30 s=1,5d)
s =1,5d, d=1000mm
s =1,5d, d=800mm
s =1,5d, d=600mm
Yatay Deplasman (mm)
-1,5
-1
-0,5
0
0,5
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Derinlik (m)

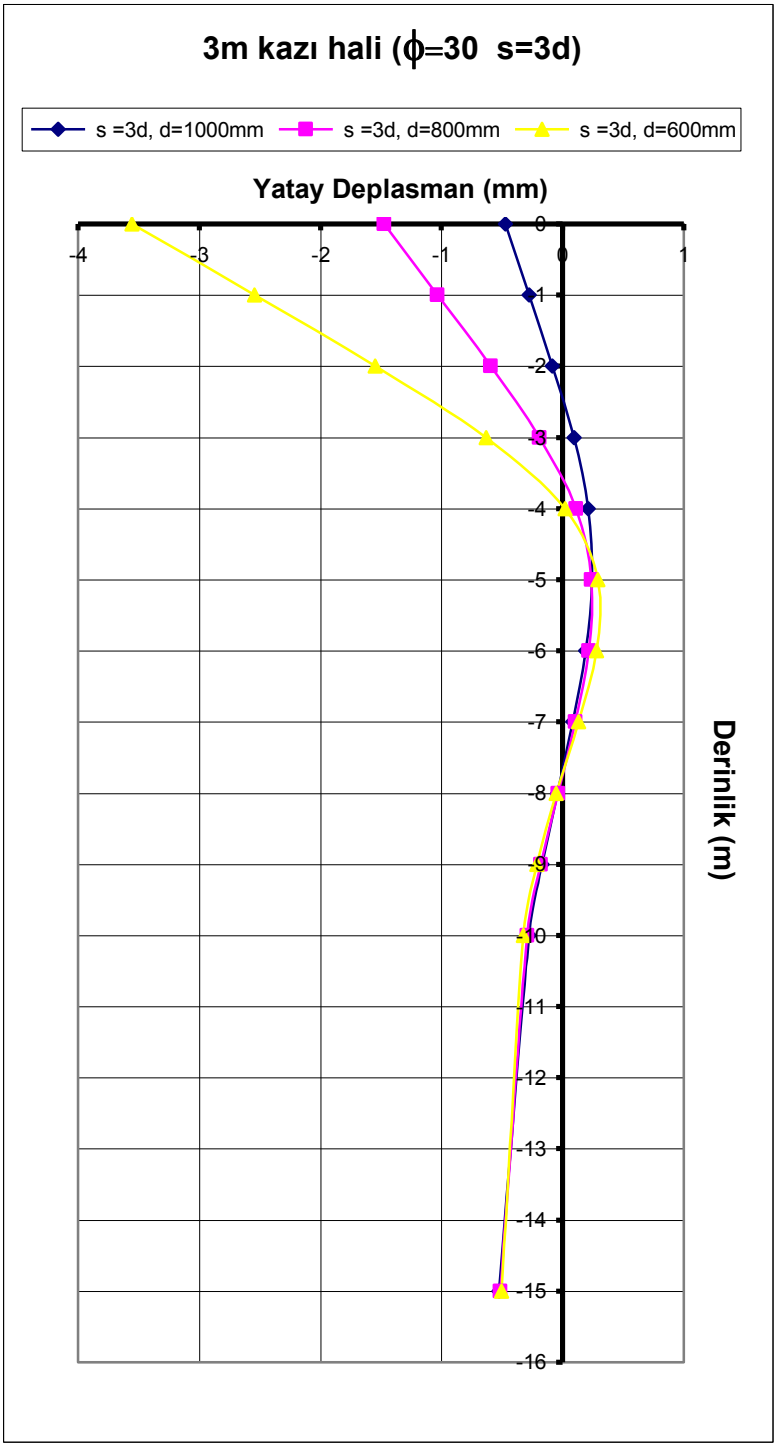
(b)


3m kazı hali (ϕ=30 s=2d)
s =2d, d=1000mm
s =2d, d=800mm
s =2d, d=600mm
Yatay Deplasman (mm)
-2,5
-2
-1,5
-1
-0,5
0
0,5
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Derinlik (m)

(c)


3m kazı hali (ϕ= 30 s= 2,5d)
s =2,5d, d=1000mm
s =2,5d, d=800mm
s =2,5d, d=600mm
Yatay Deplasman (mm)
-4
-3
-2
-1
0
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Derinlik (m)

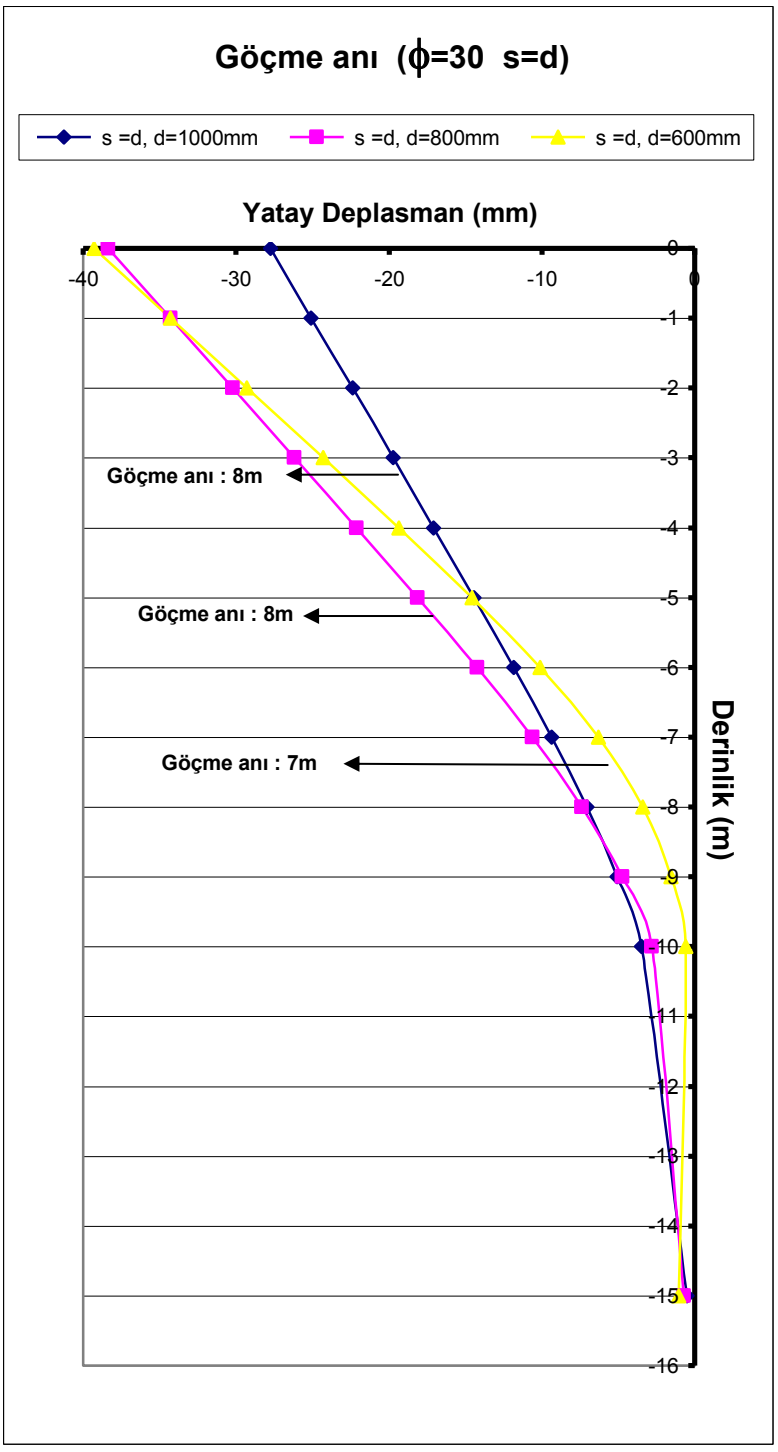
(d)



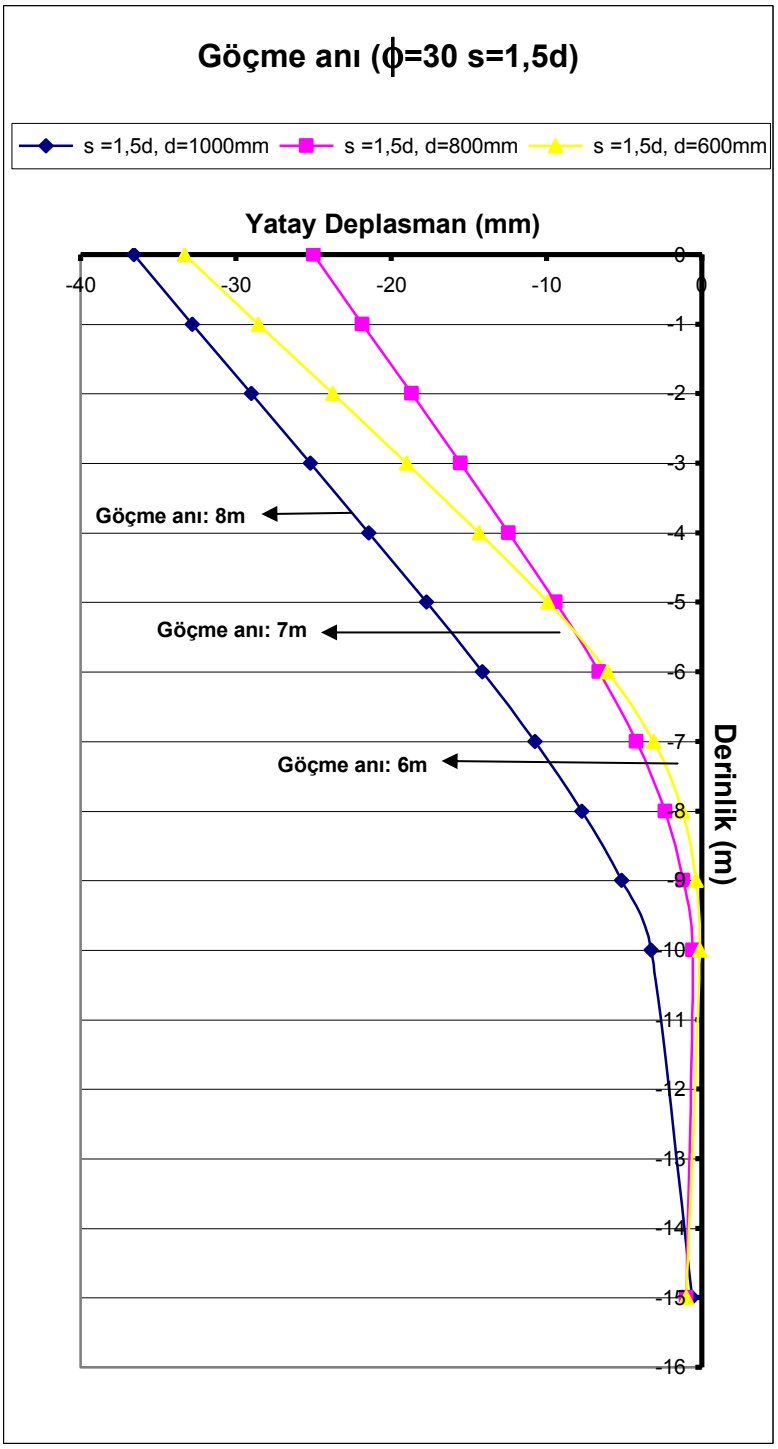
(e)

Şekil 5.18 : 3m Kazı Anında Sabit Zemin Türü ve Kazık Aralığında Kazık Çapına Göre Kazığa Gelen Yatay Deplasman – Derinlik Grafiği

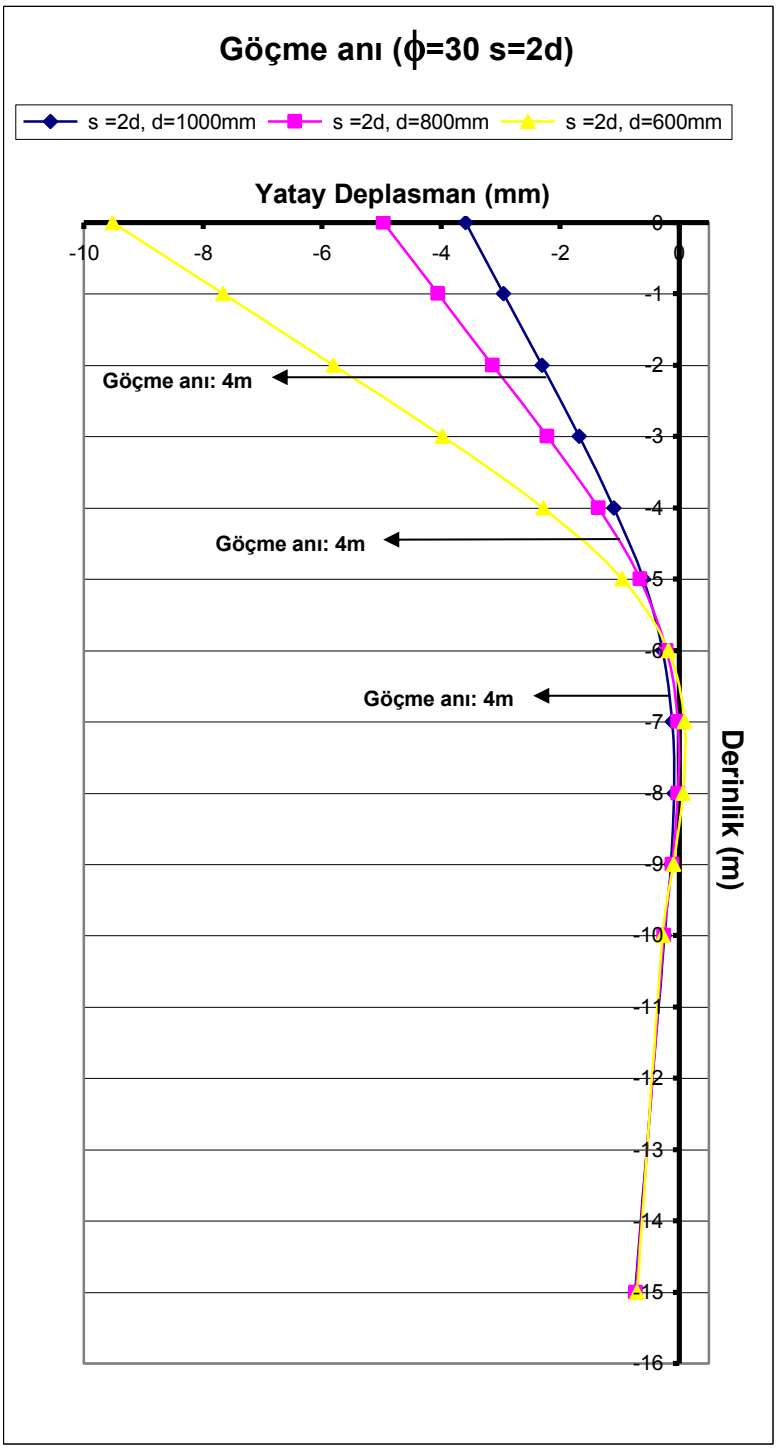
Ayrıca Şekil 5.19'da iki kazık arasından zeminin göçtüğü anda her bir kazık aralığı için, içsel sürtünme açısı $\phi = 30$ olan gevşek – orta sıkı kumda, kazık çapları göz önüne alınarak, kazıkta meydana gelen yatay deplasmanın derinliğe göre değişimi yatay deplasman – derinlik grafikleri çizilerek verildi.



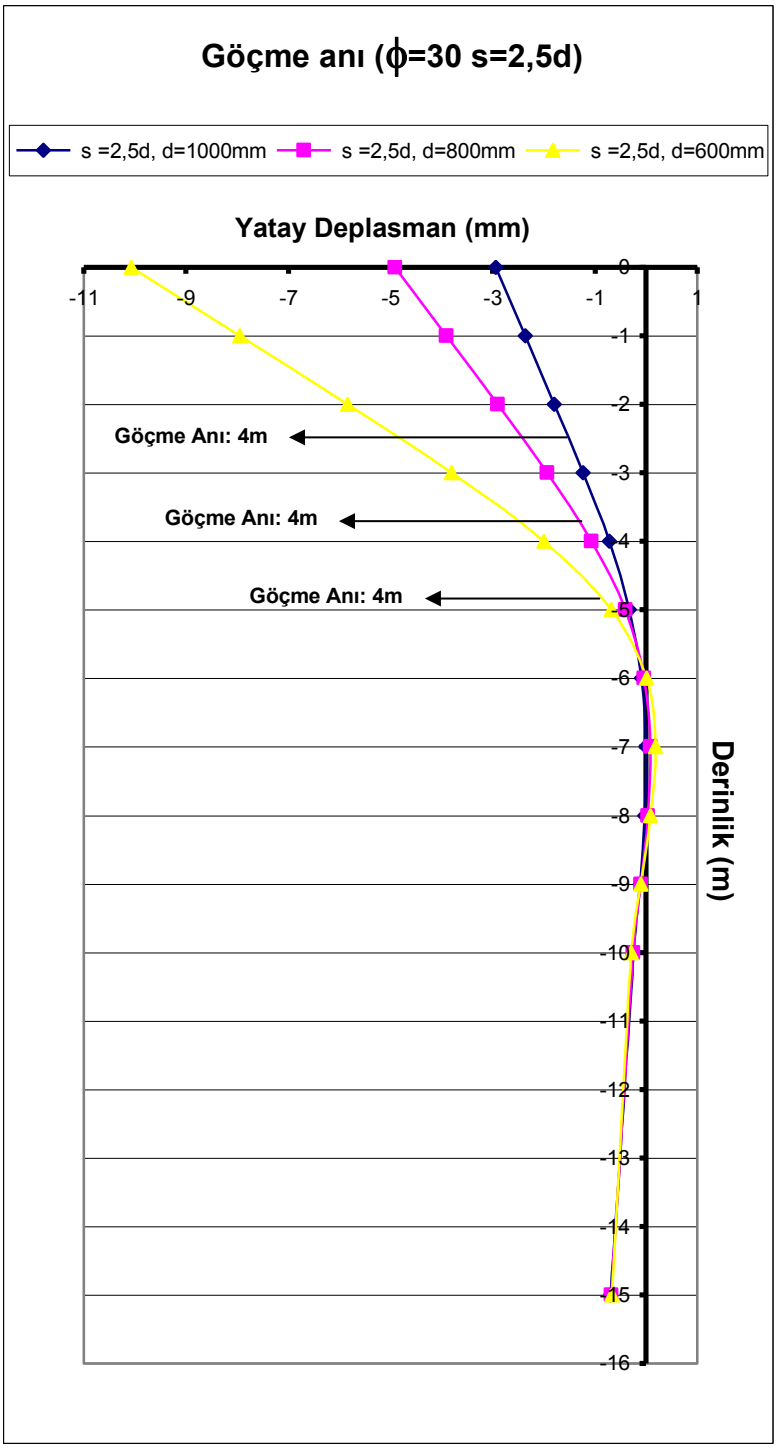
(a)


Göçme anı (ϕ=30 s=1,5d)
s =1,5d, d=1000mm
s =1,5d, d=800mm
s =1,5d, d=600mm
Yatay Deplasman (mm)
-40
-30
-20
-10
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Göçme anı: 8m
Göçme anı: 7m
Göçme anı: 6m
Derinlik (m)

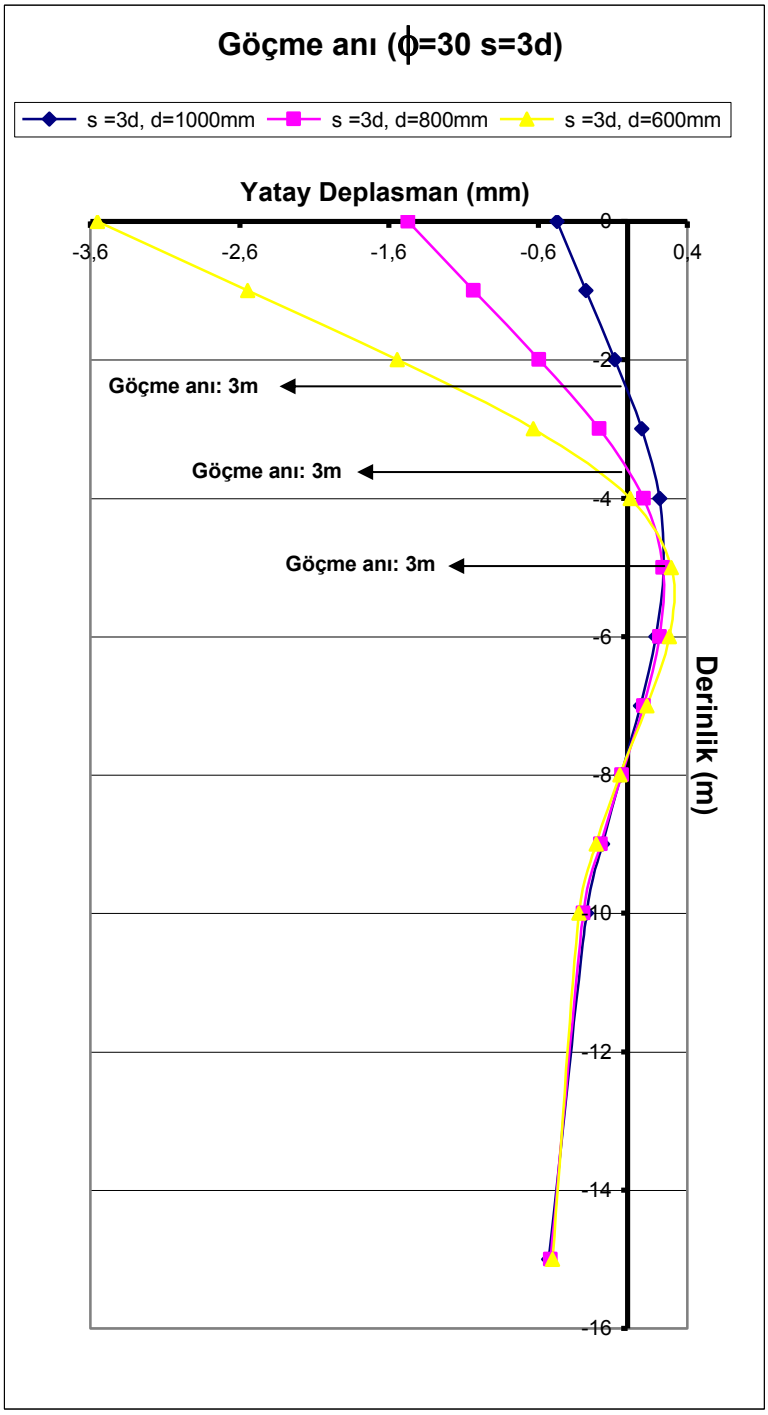
(b)


Göçme anı (ϕ=30 s=2d)
s =2d, d=1000mm
s =2d, d=800mm
s =2d, d=600mm
Yatay Deplasman (mm)
-10
-8
-6
-4
-2
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Göçme anı: 4m
Göçme anı: 4m
Göçme anı: 4m
Derinlik (m)

(c)


Göçme anı (ϕ=30 s=2,5d)
s =2,5d, d=1000mm
s =2,5d, d=800mm
s =2,5d, d=600mm
Yatay Deplasman (mm)
-11
-9
-7
-5
-3
-1
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
Göçme Anı: 4m
Göçme Anı: 4m
Göçme Anı: 4m
Derinlik (m)

(d)



(e)

Şekil 5.19 : Göçme Anında Sabit Zemin Türü ve Kazık Aralığında Kazık Çapına Göre Kazığa Gelen Yatay Deplasman – Derinlik Grafiği

3m kazı yapıldığı ve iki kazık arasından zeminin göçtüğü anda her bir kazık aralığı için, içsel sürtünme açısı $\phi = 30^0$ olan gevşek – orta sıkı kumda, kazık çapları göz önüne alınarak, çizilen yatay deplasman – derinlik grafikleri; kazık çapı arttıkça, kazığa gelen deplasmanların artmakta olduğunu göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Geçmişte kemerlenme mekanizması göz önüne alınarak zemin hareketinin neden olduğu kazıklar üzerine etkiyen yanal yüklerin tahmini, kazıkların şev üzerine en etkili bir biçimde yerleştirilmesi, kayan şev içerisindeki kazık grubunun etkileri konularında analitik, numerik, deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır.

Bilgisayar ortamında gerçeğe uygun bir şekilde modellenen problemin analizi ancak sonlu elemanlar yöntemi ile çözülebilmektedir. Bu çalışmada, yanal zemin hareketine maruz kalan kazıklı dayanma yapılarının davranışı, kazıklar arasında meydana gelen zeminin kemerlenme mekanizması ve gelişiminde etkili olan faktörlere değinilmiştir.

Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar programı ile kohezyonsuz zeminler üzerinde (gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum) 15m uzunluğa sahip serbest başlıklı kazıkların farklı kazık çaplarında (d = kazık çapı olmak üzere, d = 1000mm, d = 800mm ve d = 600mm) ve farklı kazık aralıklarında (s = kazık aralığı olmak üzere, s = d, s = 1.5d, s = 2d, s = 2.5d ve s = 3d) kazıklı dayanma yapısını oluşturacak şekilde birçok analiz yapıldı. Bu analizler sonucunda kazığa gelen yatay kuvvet – kazık aralığı, kazığa gelen yatay kuvvet – kazık çapı, kazığa gelen yatay kuvvet – zemin türü ve yatay deplasman – derinlik grafikleri elde edildi.

Zemin ortamı değişiminin kazığa gelen yatay kuvvete olan etkisi; d = 600mm, d = 800mm ve d =1000mm. olarak seçilen kazık çapları ile s = d, s = 1.5d, s = 2d, s = 2.5d ve s = 3d kazık aralıkları göz önüne alınarak incelendi. Her bir kazık çapı ve kazık aralığı için göçme anı farklılaştığından dolayı, iki kazık arasındaki zeminde meydana gelen kemerlenme olayının varlığını belirlemek ve gelişiminde etkili olan faktörleri birbiri ile karşılaştırmak amacıyla, her bir analiz için 3m kazıldığı andaki durum ele alındı. 3m kazı yapıldığı anda farklı kazık çapları, farklı kazık aralıkları ve yüzeyden belirli derinlikler sabit tutulup, zemin türlerinin sahip olduğu içsel sürtünme açısı(ϕ) göz önüne alınarak, kazığa gelen yatay kuvvet – içsel sürtünme

açısı ilişkisi incelendi. Ayrıca 3m kazı yapıldığı an ile iki kazık arasından zeminin göçtüğü anda, her bir kazık aralığı için seçilen zeminlerin içsel sürtünme açıları (ϕ) göz önüne alınarak kazıkta meydana gelen yatay deplasmanın derinlik ile ilişkisi yatay deplasman – derinlik grafikleri çizilerek değerlendirildi.

Kazığa gelen yatay kuvvet – içsel sürtünme açısı ve yatay deplasman – derinlik grafik eğrilerine göre; sabit kazık çapı, kazık aralığı ve yüzeyden belirli derinliklerde zemindeki içsel sürtünme açısı (ϕ) arttıkça, kazığa gelen kuvvetlerin azaldığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, gevşek kumlu zeminde kemerlenme nedeniyle kazıklar arasındaki zeminden kazıklara aktarılan yükler sıkı kumlu zemine göre daha fazla çıkmaktadır. Ayrıca yatay deplasman – derinlik grafikleri sonucunda zemin türlerinin sahip olduğu içsel sürtünme açısı(ϕ)arttıkça, kazık deplasmanlarının azaldığı görülmektedir. Zemindeki içsel sürtünme açısı (ϕ) arttıkça; kazığa gelen kuvvetlerin ve deplasmanların azalmasının sıkı kumun gerilme mobilizasyonu ve birbirine kenetlenme etkisinin daha fazla olması ile kemerlenme etkisini de arttırmakta olduğu sonucuna varıldı.

Kazık aralığı değişiminin kazığa gelen yatay kuvvete etkisi d = 600mm, d =800mm ve d = 1000mm. olarak seçilen kazık çapları ile gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum olarak seçilen zemin türleri göz önüne alınarak incelendi. Zemin ortamı değişiminin kazığa gelen yatay kuvvete olan etkisinin değerlendirilmesi sırasında olduğu gibi, kazık aralığı değişimi – kazığa gelen yatay kuvvet ilişkisinde de 3m kazı anı alınarak; farklı kazık çapları, farklı zemin türlerinin sahip olduğu içsel sürtünme açısı(ϕ) ve yüzeyden belirli derinlikler sabit tutulup, kazık aralıkları (s) göz önüne alındı ve kazığa gelen yatay kuvvet - kazık aralığı grafikleri çizildi.

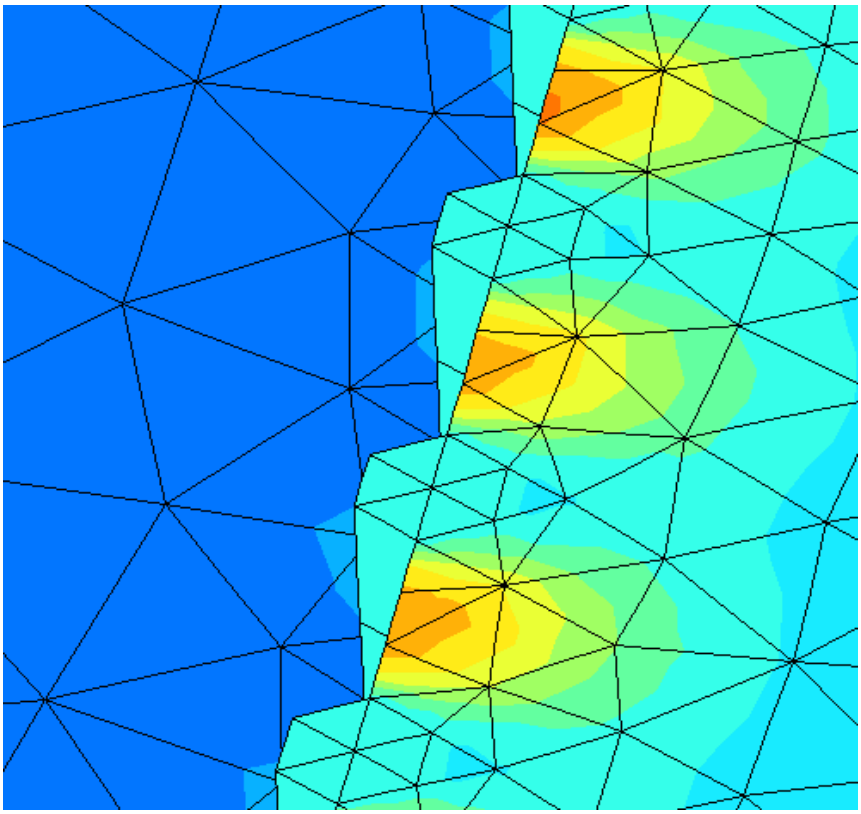
Kazığa gelen yatay kuvvet – kazık aralığı grafiği eğrilerine göre; yüzeyden belirli derinliklerde sabit kazık çapı ve zemin türü durumunda kazık aralığı arttıkça, kazıklara etki eden yatay kuvvet değerlerinin artmakta olduğu görülmektedir. Ayrıca analizler sonucunda, küçük kazık aralıklarında iki kazık arasındaki zemin stabilitesinin kemerlenme görüldüğü sürece daha derin kazı aşamalarına kadar sağlanmakta olduğu; kazık aralığı arttıkça iki kazık arasındaki zemin stabilitesinin daha erken kazı aşamalarında bozulduğu ve zeminin göçtüğü görüldü. Bu durumda,

zeminde kemerlenme var olduğu sürece, kazıklar arası zeminin göçmediği ve kazık aralığı küçüldükçe kemerlenme etkisinin artmakta olduğu açıkça görülmektedir.

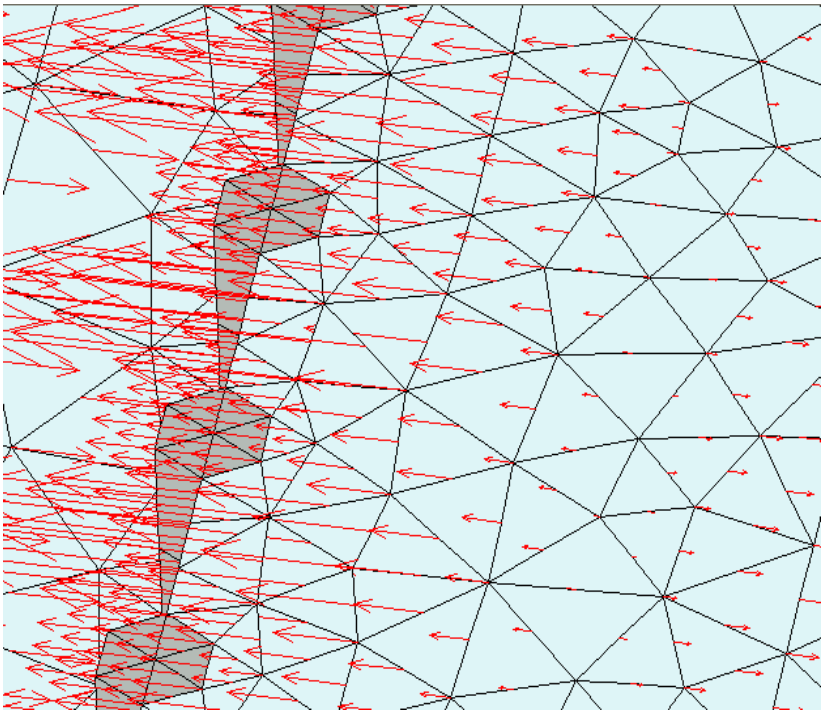
Kazık çapı değişiminin kazığa gelen yatay kuvvete olan etkisi; s = d, s = 1.5d, s = 2d, s = 2.5d ve s = 3d olarak seçilen kazık aralıkları ile gevşek kum, gevşek-orta sıkı kum, orta sıkı kum ve sıkı kum olarak seçilen zemin türleri göz önüne alınarak değerlendirildi. 3m kazı yapıldığı anda farklı kazık aralıkları, farklı zemin türlerinin sahip olduğu içsel sürtünme açısı (ϕ) ve yüzeyden belirli derinlikler sabit tutulup, kazık çapları (d) göz önüne alınarak, kazığa gelen yatay kuvvet – kazık çapı grafikleri çizildi. Ayrıca 3m kazı yapıldığı an ile iki kazık arasından zeminin göçtüğü anda her bir kazık aralığı için, içsel sürtünme açısı $\phi = 30^0$ olan gevşek – orta sıkı kumda, kazık çapları göz önüne alınarak, kazıkta meydana gelen yatay deplasmanın derinliğe göre yatay deplasman – derinlik grafikleri belirlendi.

Kazığa gelen yatay kuvvet – kazık çapı ve yatay deplasman – derinlik grafik eğrilerine göre; yüzeyden belirli derinliklerde kazık aralığı ve zemin türünün sabit tutulduğu durumda kazık çapı arttıkça, kazığa etki eden yatay kuvvet değerleri artarken, kazık deplasman değerleri azalmaktadır. Ayrıca analizler sonucunda, kazık aralığının kazık çapına oranı (s/d) sabit iken; kazık çapının büyük olması, kazığın rijitliğini arttırdığı ve iki kazık arasındaki zemin stabilitesinin daha derin kazı aşamalarına kadar sağlandığı; kazık çapının küçük olması durumunda ise daha erken kazı aşamalarında zemin stabilitesinin bozulduğu ve zeminin göçtüğü görüldü.

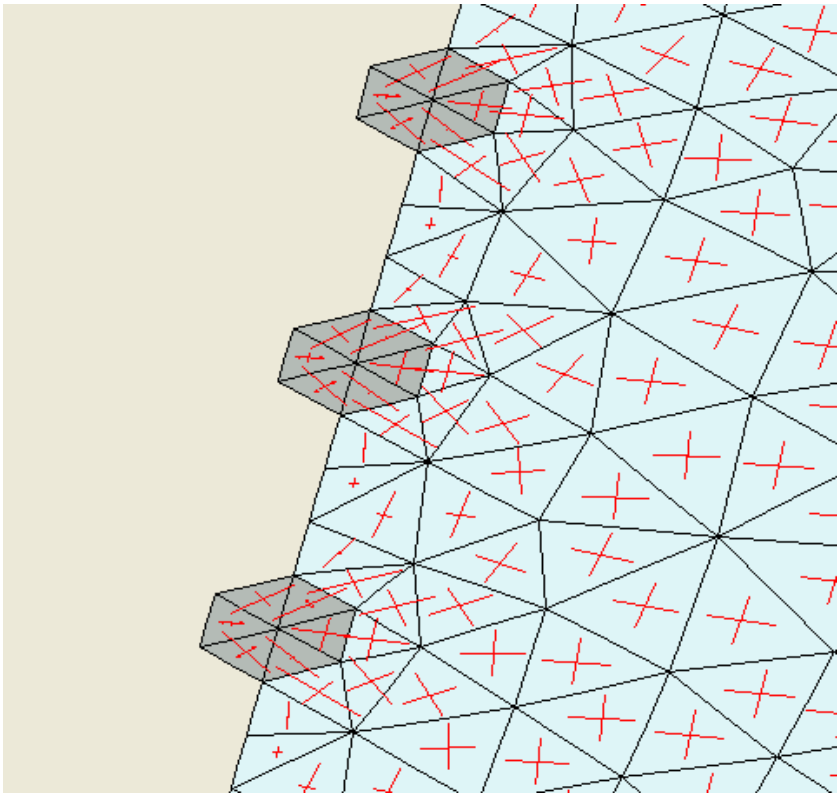
Tez kapsamında seçilen her bir kazık aralığı, kazık çapı ve zemin türünde yapılan analizler sonucunda Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te görüldüğü üzere elde edilen zeminin deplasman kontürleri, hareket yönleri ve asal gerilme yönleri verilmektedir. Chien-Yuan Chen (2001) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda kazıklar arasında meydana gelen kemerlenme bölgesinin, zemin hareketinin yönü boyunca oluşan deplasman kontürleri ve asal gerilme yönlerinin dönmesi ile ispatlanabilmekte olduğu bulunmuştur.



Şekil 6.1 : Kazıklar arasında Varolan Zeminin Deplasman Kontürleri



Şekil 6.2 : Kazıklar Arasında Varolan Zeminin Deplasman Hareket Yönleri



Şekil 6.3 : Kazıklar arasında Kemerlenme Etkisi ile Oluşan Asal Gerilme Yönleri

Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te görüldüğü üzere, kemerlenme bölgesinin varlığı, Chien-Yuan Chen (2001) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda olduğu gibi, zemin hareketinin yönü boyunca oluşan deplasman kontürleri ve asal gerilme yönlerinin dönmesi ile belirlenebilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Adachi, T., Kimura, M. and Tada, S**., 1989. Analysis on the preventive mechanism of landslide stabilizing piles, *3rd Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics*, Niagara Falls, Canada, May 1989, 691-698.

[2] **Balkaya, M.**, 2002. Zemine gömülü boruların mühendislik davranışı, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] **Bosscher, P.J. and Gray, D.H.**, 1986. Soil arching in sandy slopes, *Journal of Geotechnical Engineering,* **112(6),** 626-645.

[4] **Chen, C.Y.**, 2001. Numerical analysis of slope stabilization concepts using piles, California, *PhD Thesis,* University of Southern California

[5] **Chen, L.T., Poulos, H.G. and Hull, T.S.,** 1997. Model tests on pile groups subjected to lateral soil movement, *Soils and Foundations,* **37(1),** 1-12.

[6] **Çamlıbel, N.A.**, 1982. Yamaç stabilitesinin düşey kazıklarla iyileştirilmesi, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[7] **Ito, T. and Matsui, T.**, 1975. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles, *Soils and Foundations,* **15(4),** 43-59.

[8] **Liang, R. and Zeng, S.**, 2002. Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization, *Soils and Foundations,* **42(2),** 83-92.

[9] **Low, B.K., Tang, S.K. and Choa, V.**, 1994. Arching in piled embankments, *Journal of Geotechnical Engineering,* **120(11),** 1917-1938.

[10] **McKelvey, J.A.,** 1994. The anatomy of soil arching, Geotextiles and Geomembranes, **13,** 317-329.

[11] **McVay, M., Casper, R. and Shang, T.,** 1995. Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing, *Journal of Geotechnical Engineering,* **121(5),** 436-440.

[12] **Öztoprak, S.**, 1996. Kazıklı temellerin sonlu elmanlar yöntemi kullanılarak hesaplanması ile ilgili bir inceleme, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[13] **PLAXIS 3D FOUNDATION,** 2004. Plaxis 3D Foundation Material Model Manual, Version 1, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield

[14] **PLAXIS 3D FOUNDATION,** 2004. Plaxis 3D Foundation Reference Manual, Version 1, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield

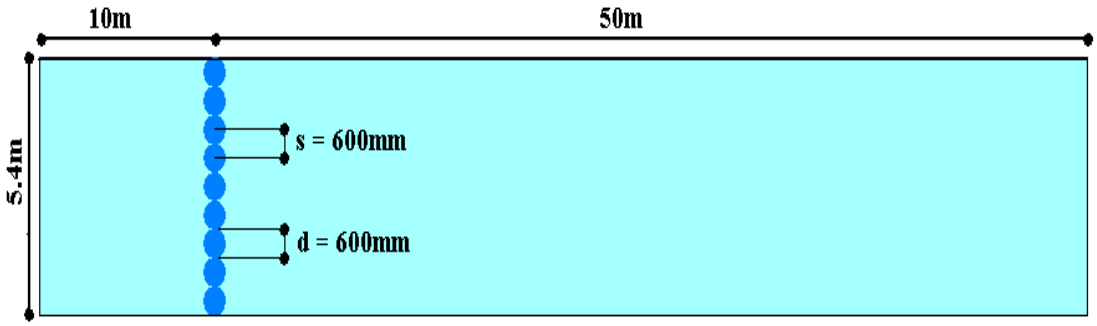
[15] **Santichaianant, K.**, 2002. Centrifuge modeling and analysis of active trapdoor in sand, Colorado, *PhD Thesis,* University of Colorado

[16] **Terzaghi, K.,** 1943. Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, N.Y.

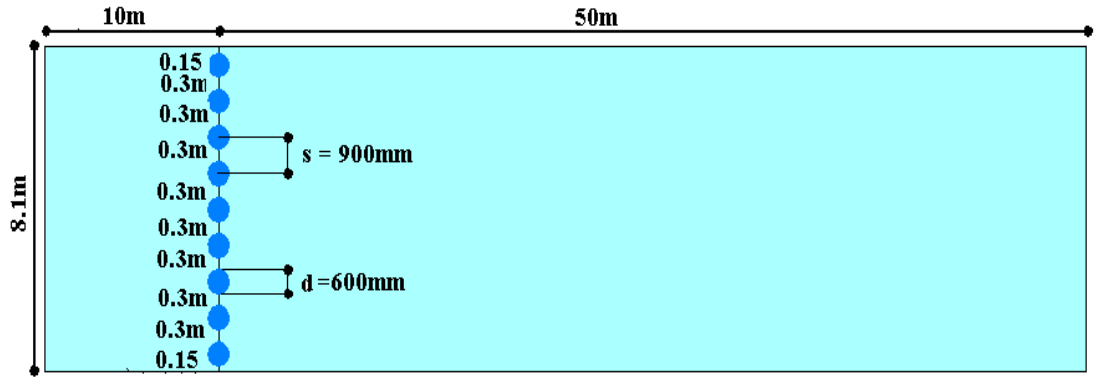
[17] **Zhao, J.**, 1999. Design methodology for drilled shafts stabilized piles, *Phd Thesis,* University of Akron

EKLER

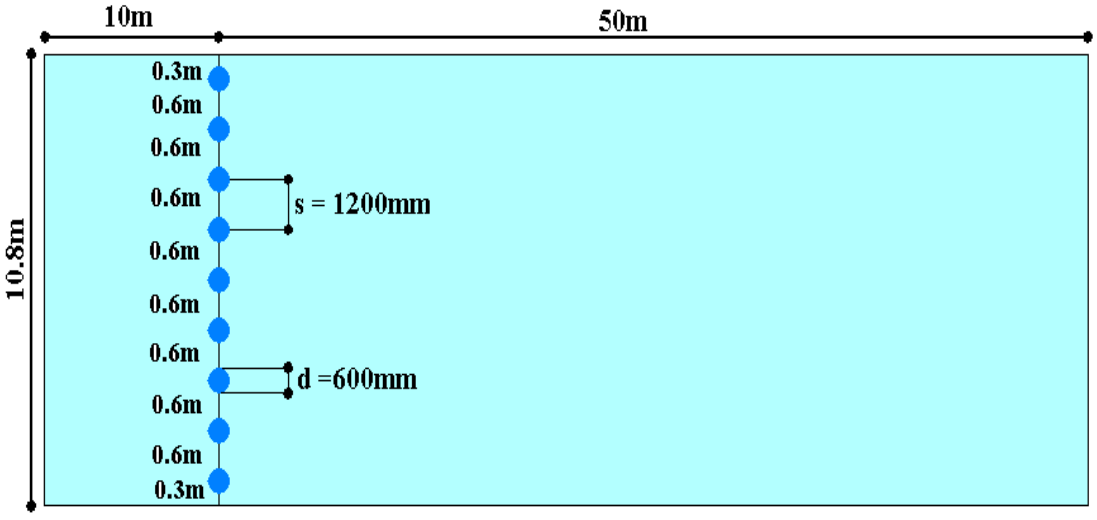
A. Model Geometrileri



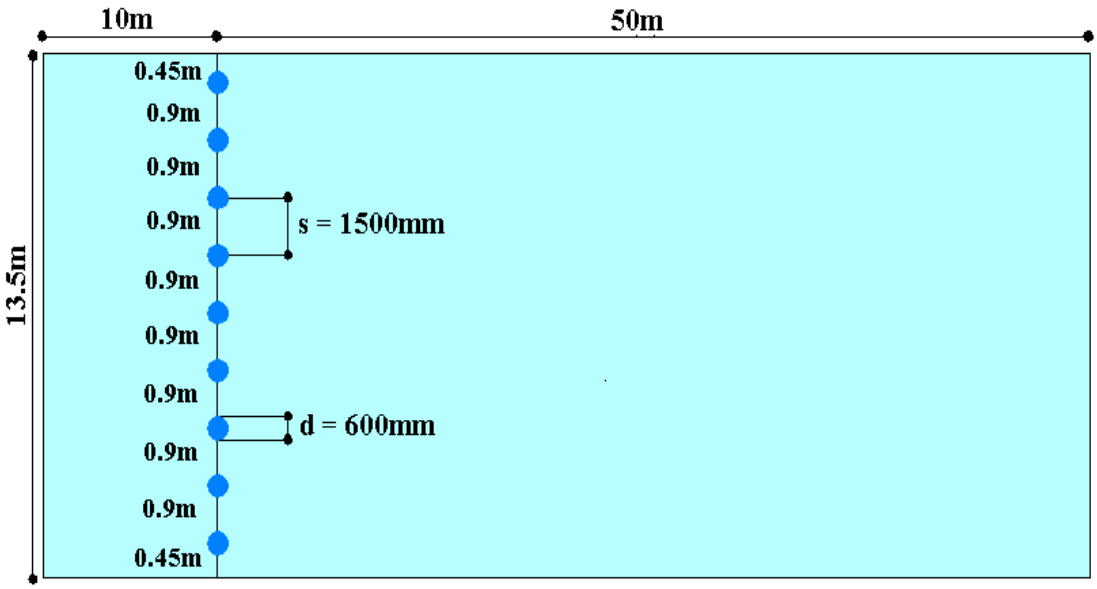
Şekil A.1 : d = 600mm İçin s = d Aralığı



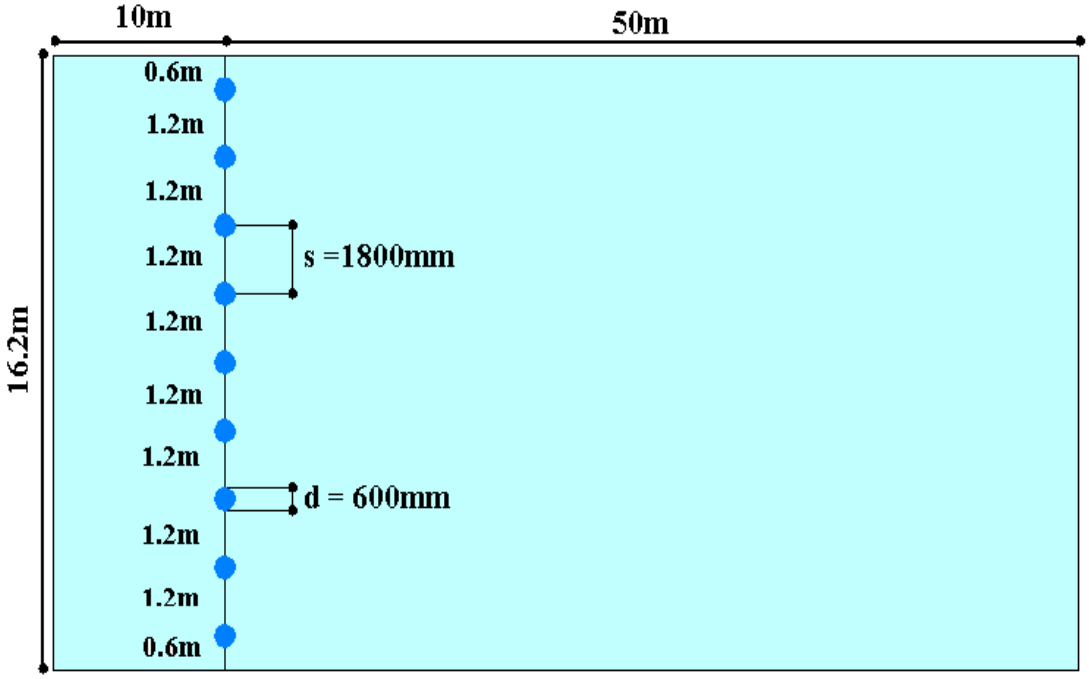
Şekil A.2 : d = 600mm İçin s = 1,5d Aralığı



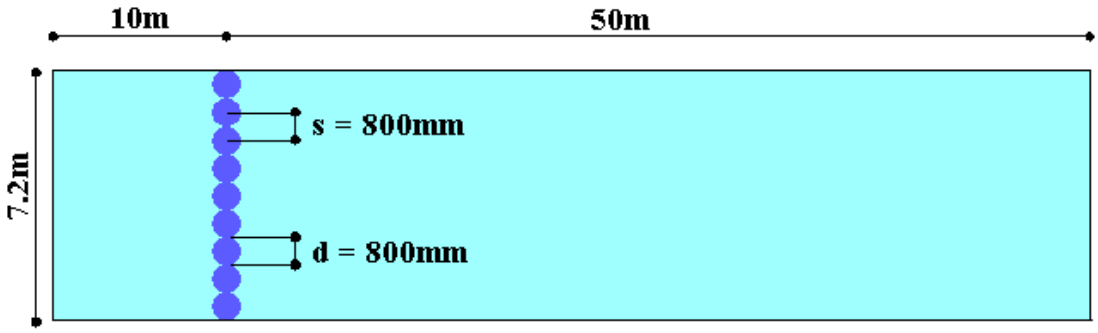
Şekil A.3 : d = 600mm İçin s = 2d Aralığı



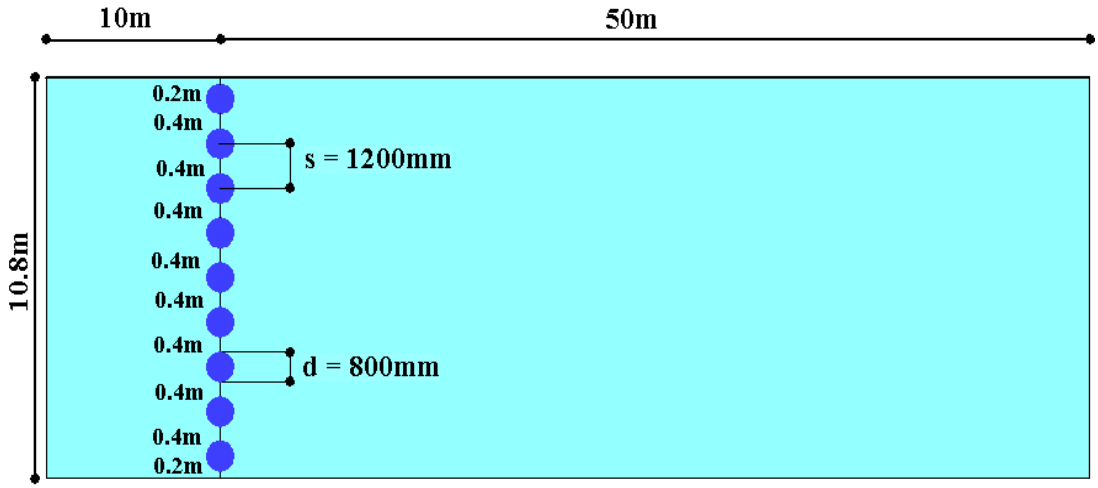
Şekil A.4 : d = 600mm İçin s = 2,5d Aralığı



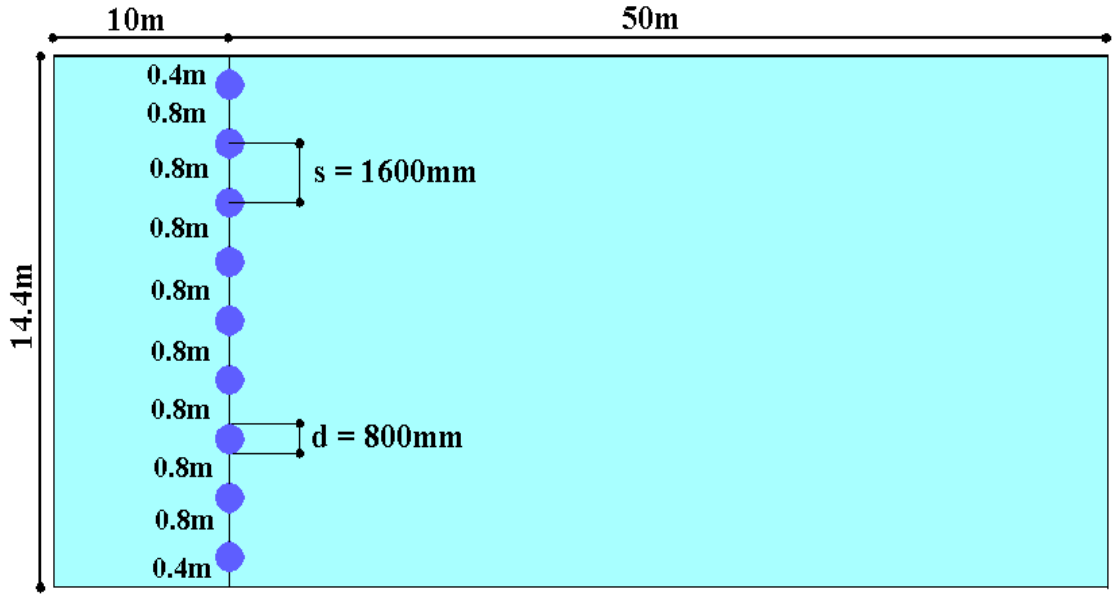
Şekil A.5 : d = 600mm İçin s = 3d Aralığı



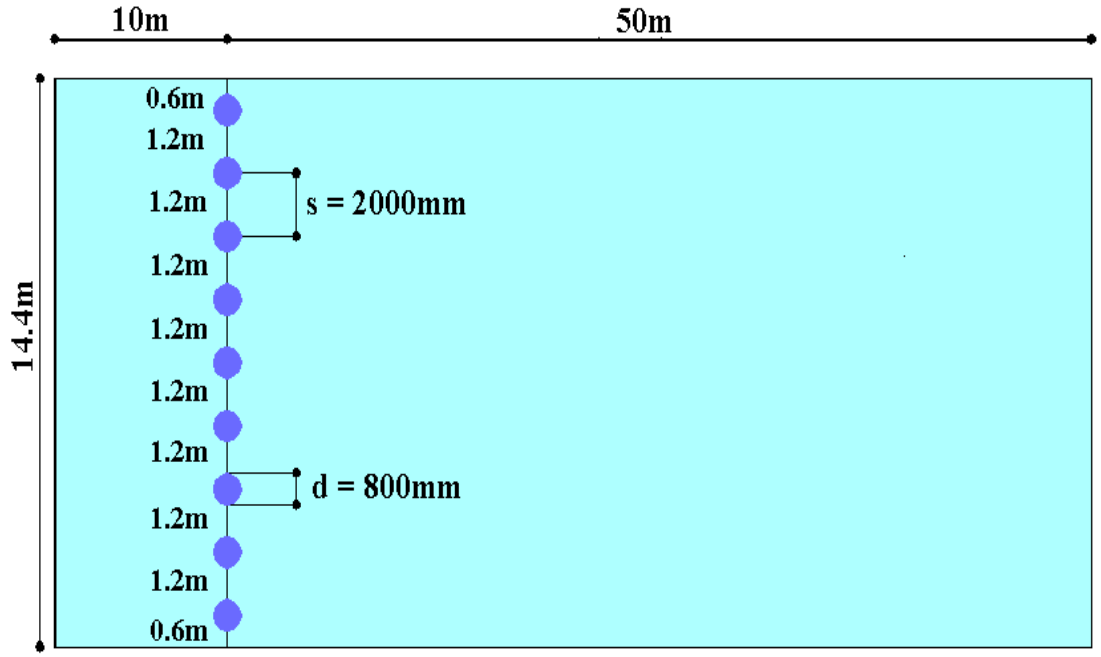
Şekil A.6 : d = 800mm İçin s = d Aralığı



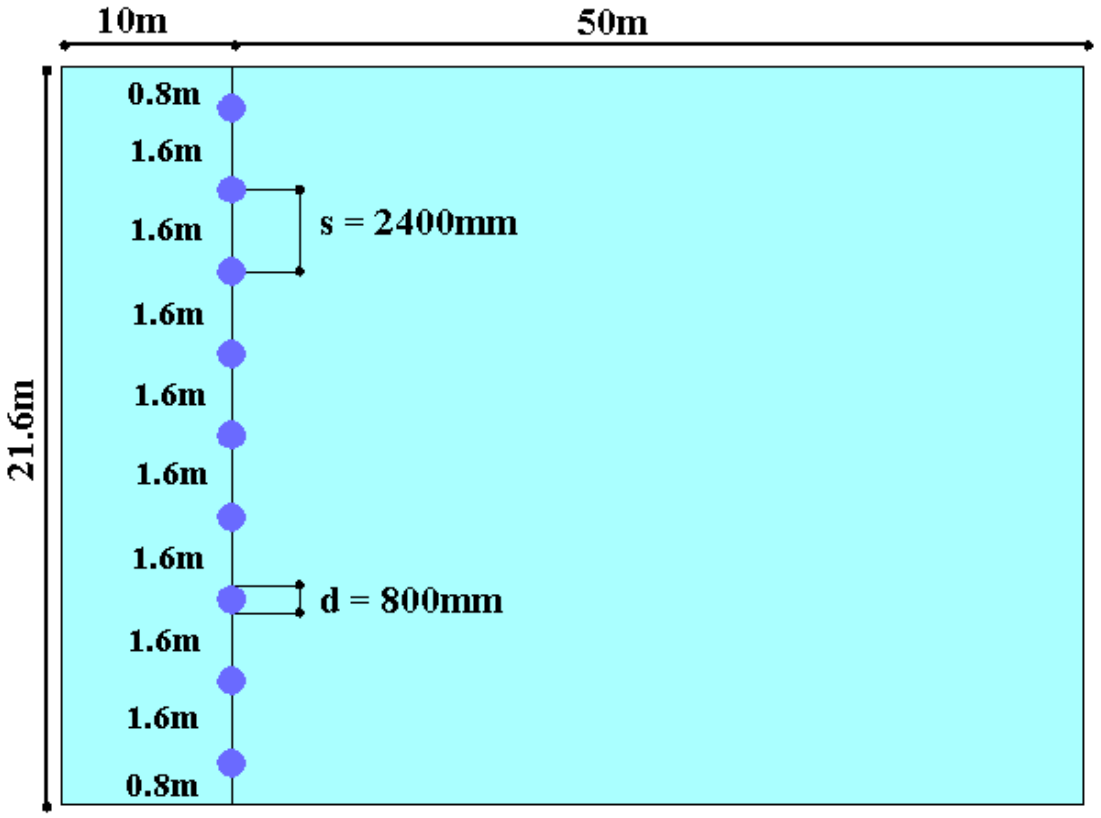
Şekil A.7 : d = 800mm İçin s = 1,5d Aralığı



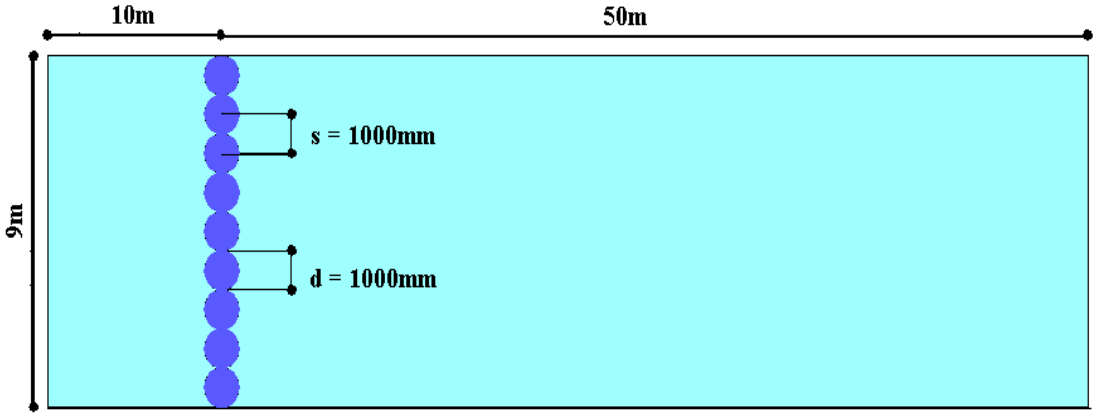
Şekil A.8 : d = 800mm İçin s = 2d Aralığı



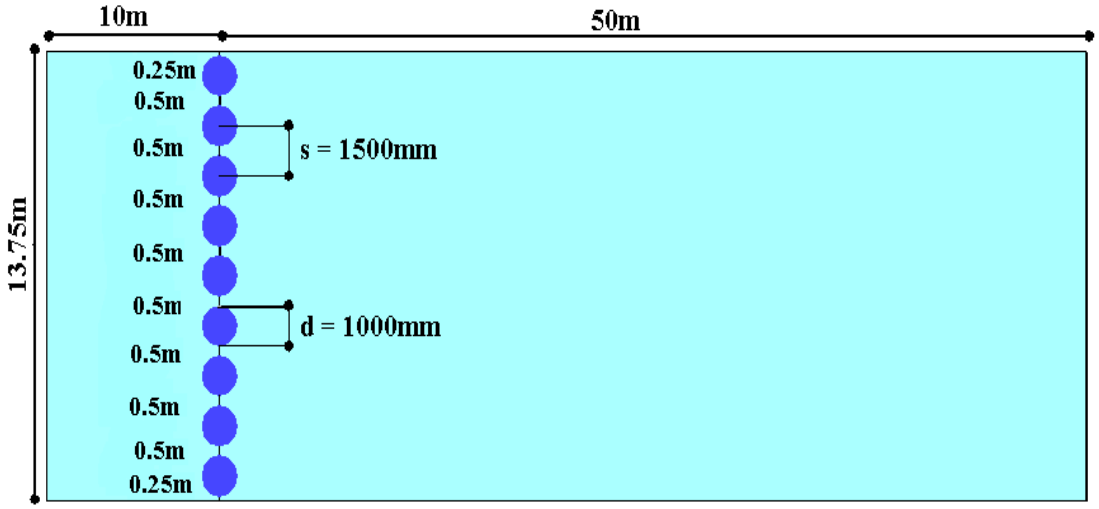
Şekil A.9 : d = 800mm İçin s = 2,5d Aralığı



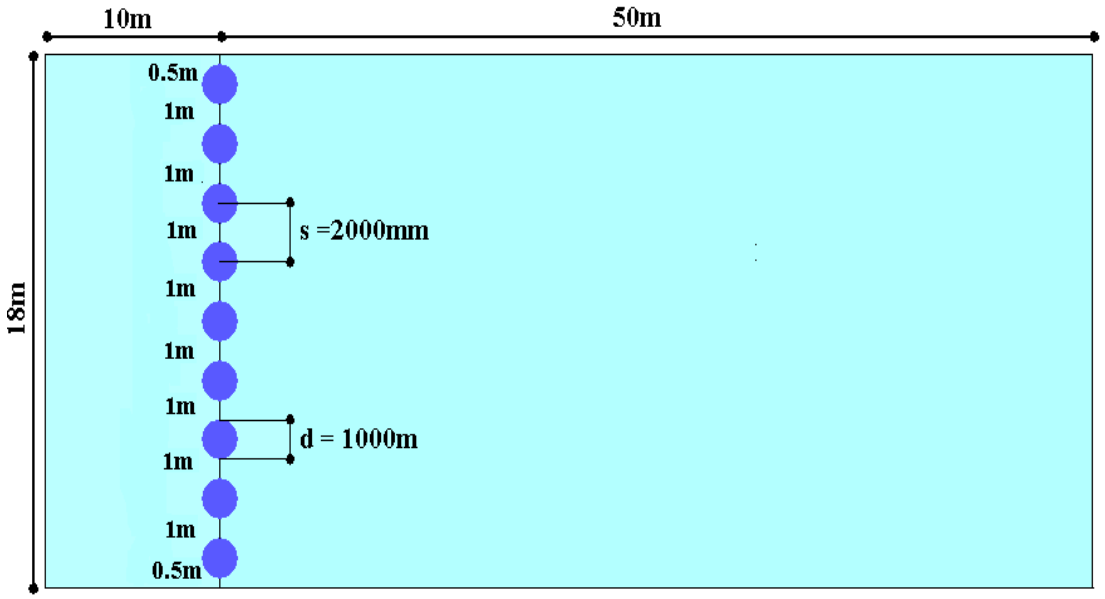
Şekil A.10 : d = 800mm İçin s = 3d



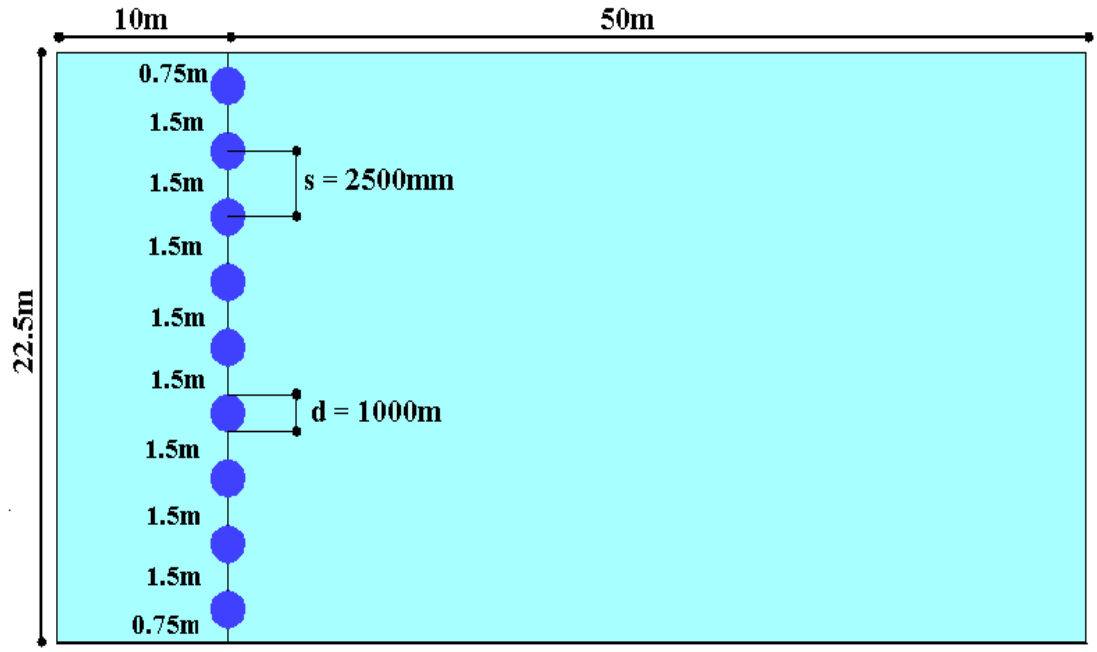
Şekil A.11 : d = 1000mm İçin s = d Aralığı



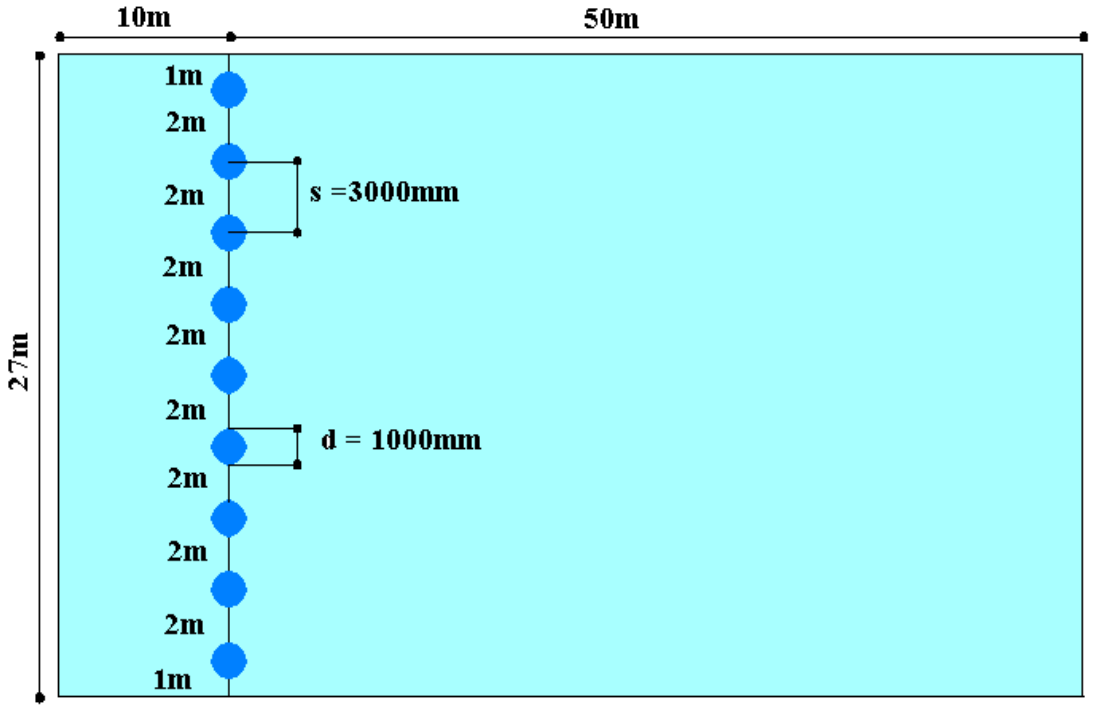
Şekil A.12 : d = 1000mm İçin s = 1,5d Aralığı



Şekil A.13 : d = 1000mm İçin s = 2d Aralığı

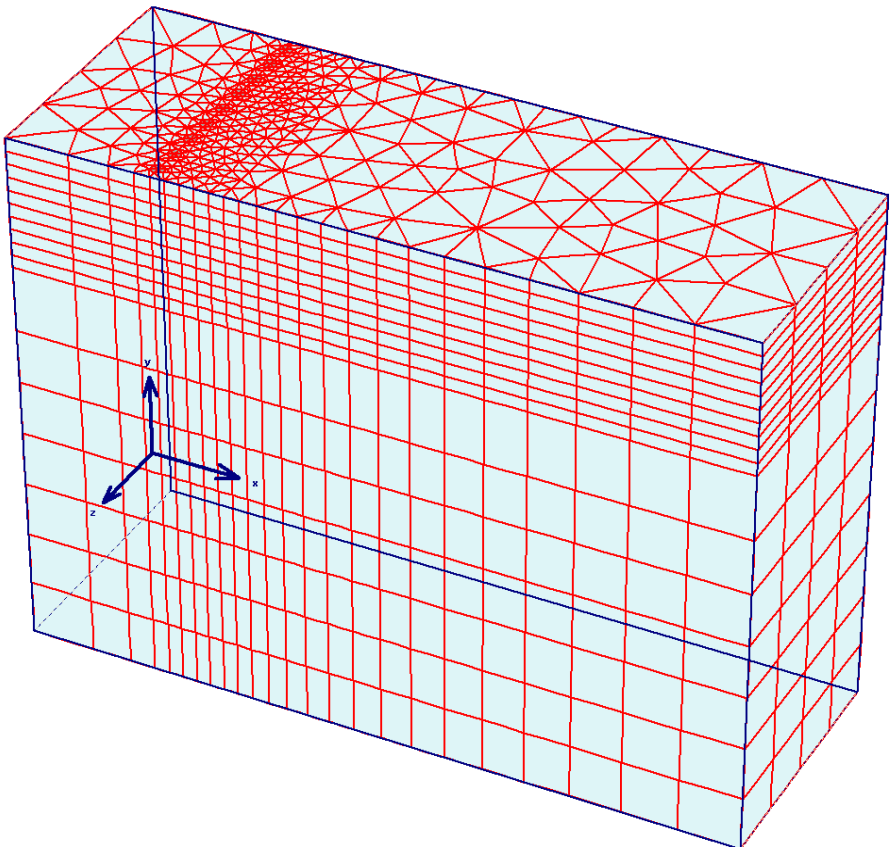


Şekil A.14 : d = 1000mm İçin s = 2,5d Aralığı

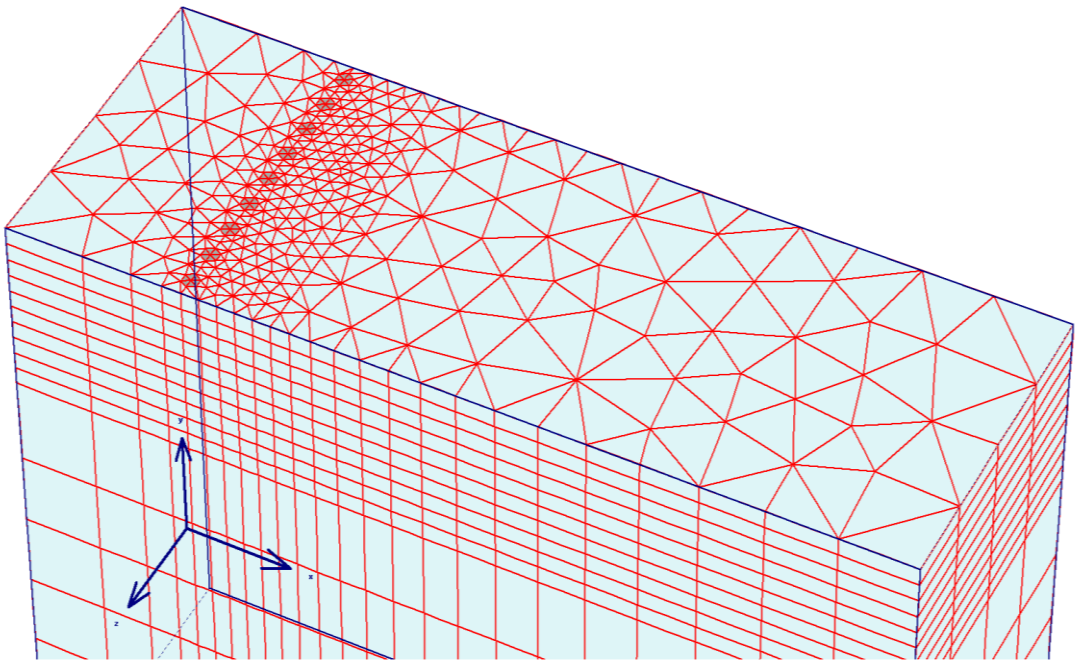


Şekil A.15 : d = 1000mm İçin s = 3d Aralığı

B. s = 2d ve d = 1000mm İçin Oluşturulan Model ve Analizleri

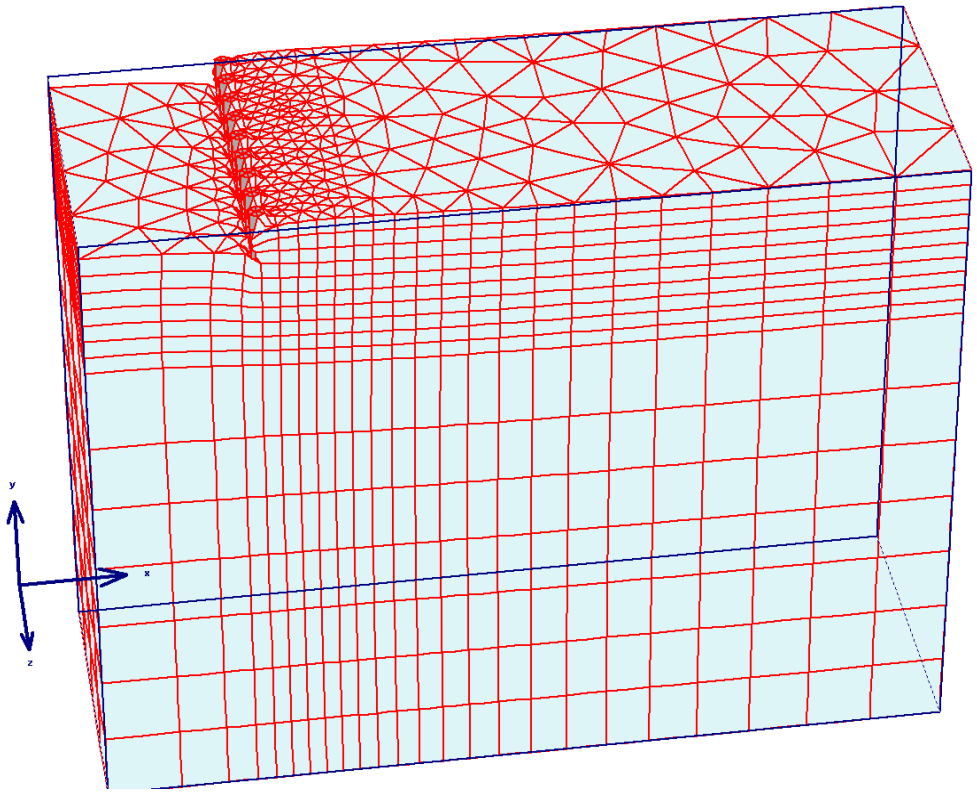


(a)

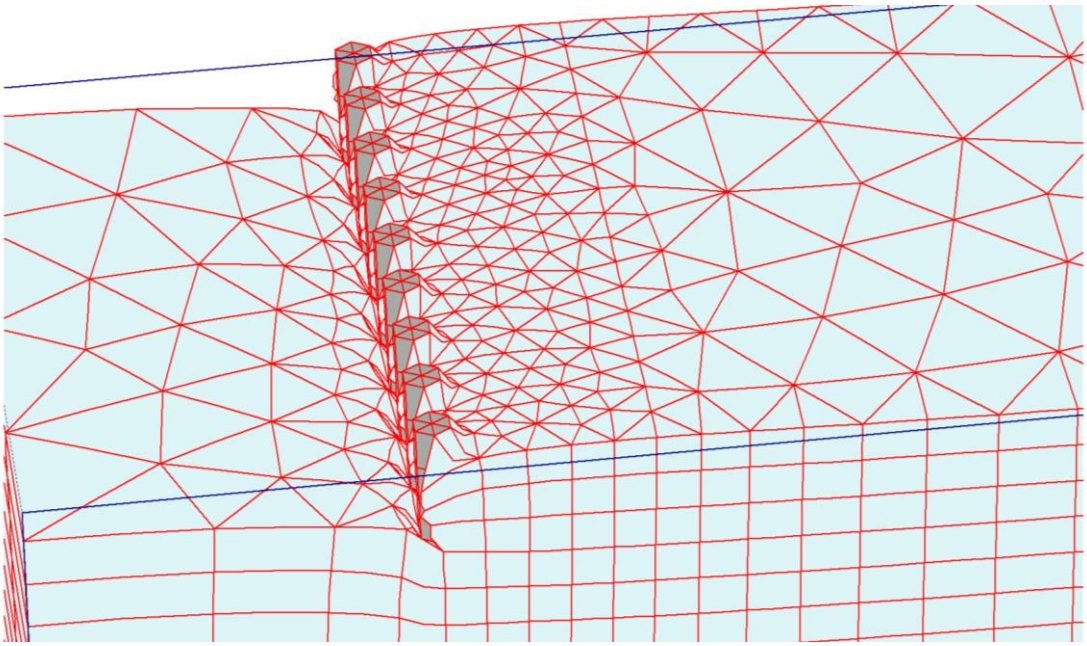


(b)

Şekil B.1 : Sonlu Elemanlar Ağı

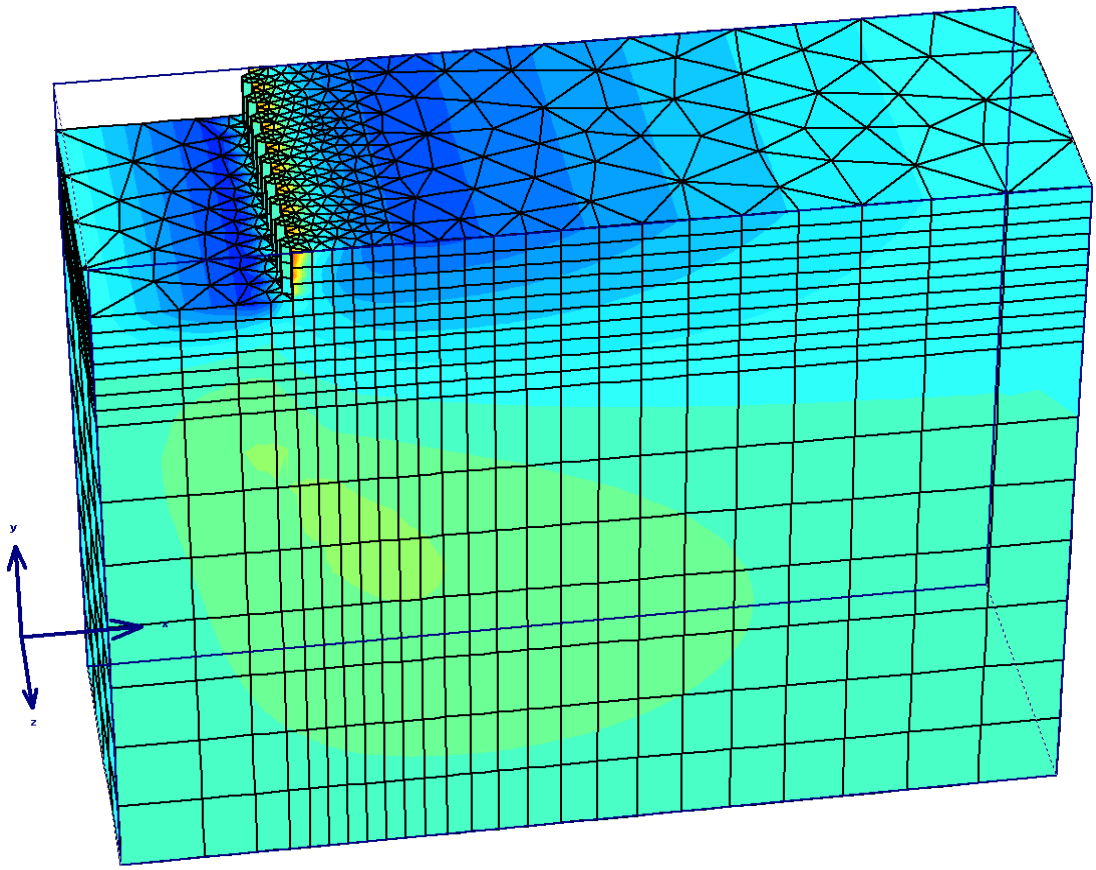


(a)

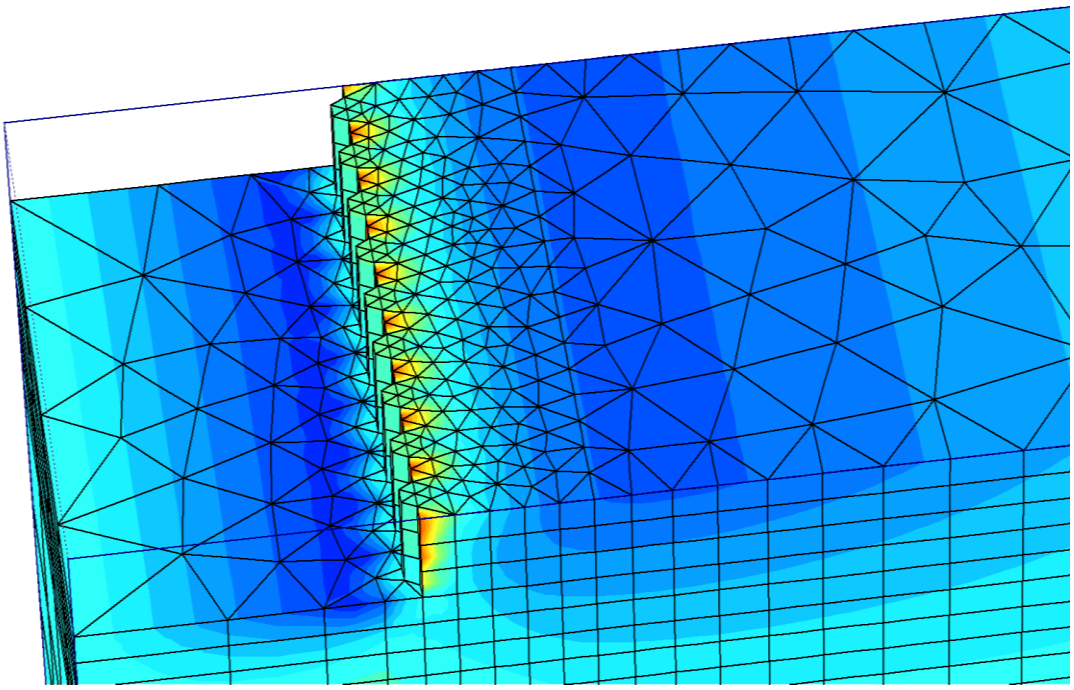


(b)

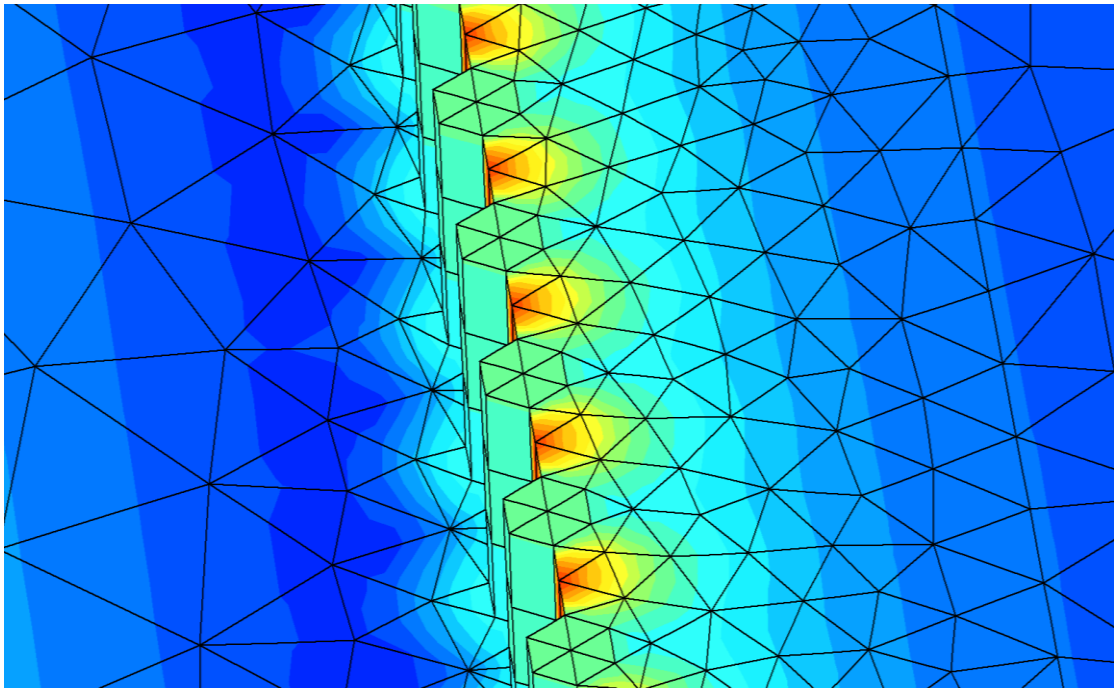
Şekil B.2 : 3m Kazı Anı İçin Deforme Olmuş Sonlu Elemanlar Ağı



(a)

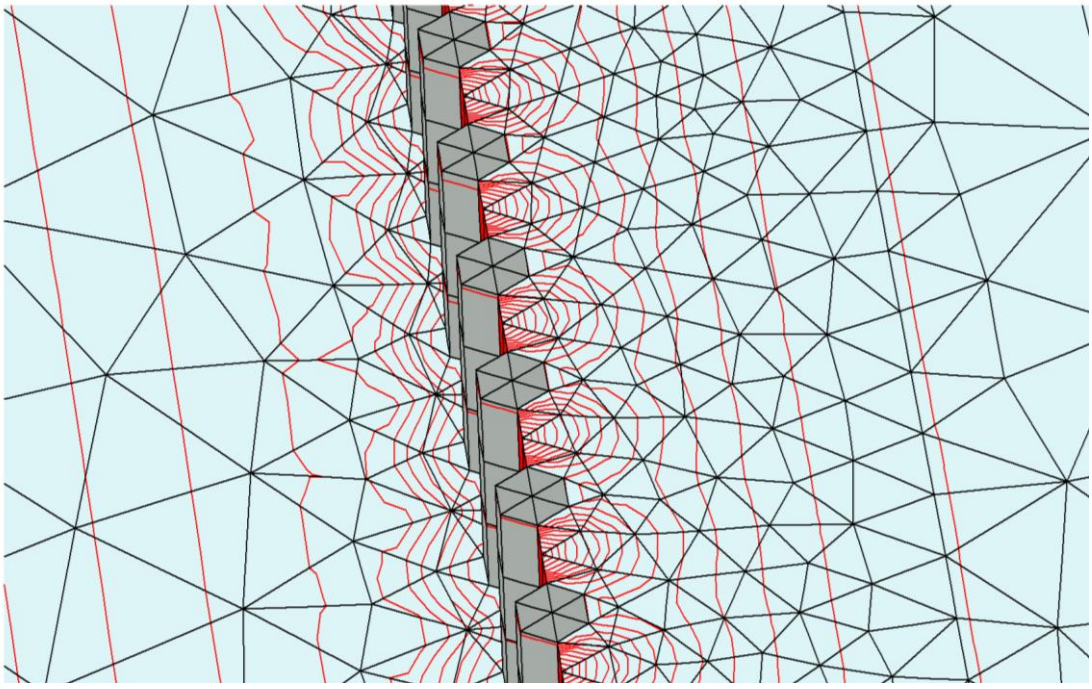


(b)

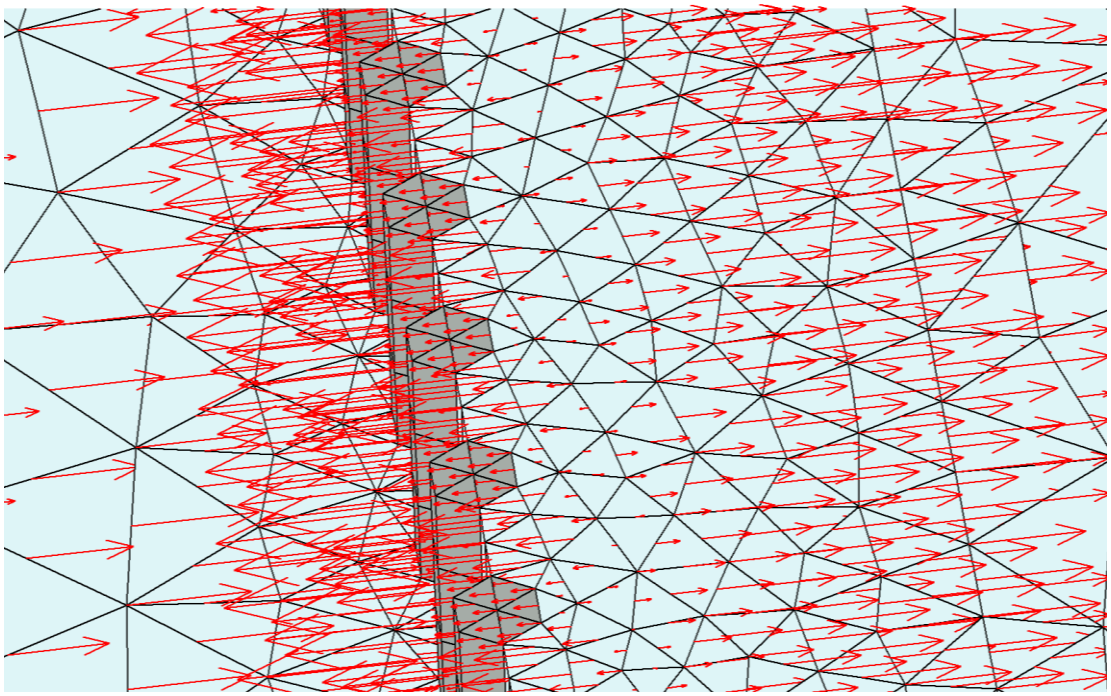


(c)

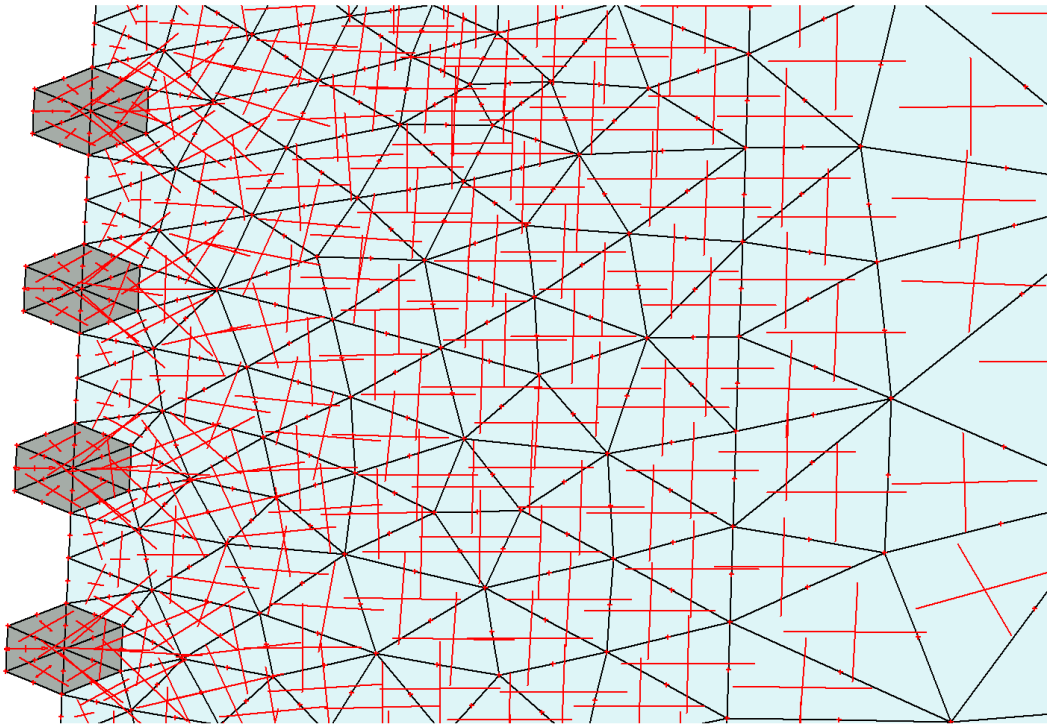
Şekil B.3 : 3m Kazı Anı İçin Kazıklar Arasında Varolan Zeminin Deplasman Kontürleri



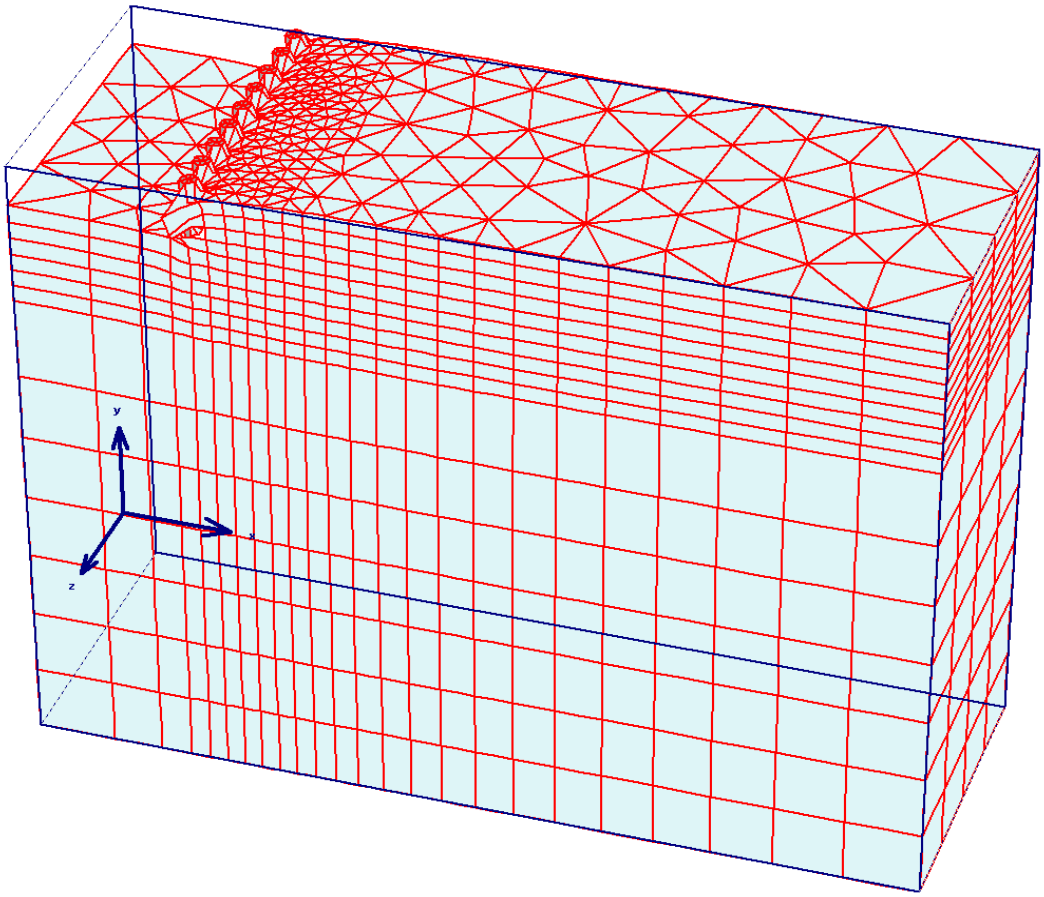
Şekil B.4 : 3m Kazı Anı İçin Kazıklar Arasında Varolan Zeminin Deplasman Kontür Çizgileri



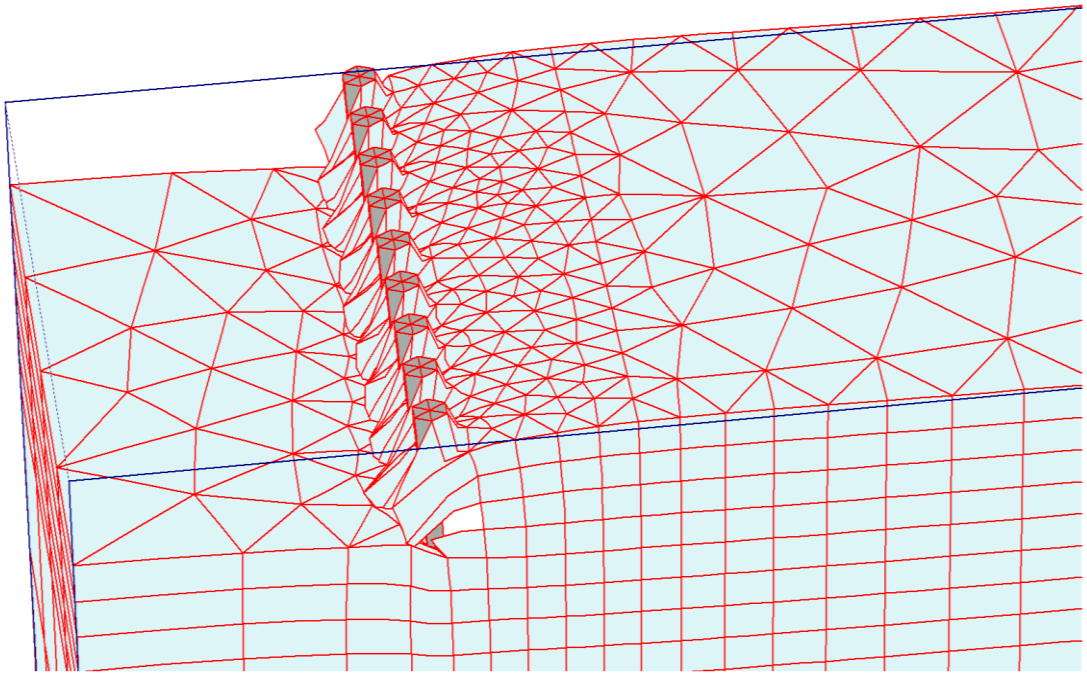
Şekil B.5 : 3m Kazı Anı İçin Kazıklar Arasında Varolan Zeminin Deplasman Hareket Yönleri



Şekil B.6 : 3m Kazı Anı İçin Kemerlenme Etkisi ile Oluşan Asal Gerilme Yönleri

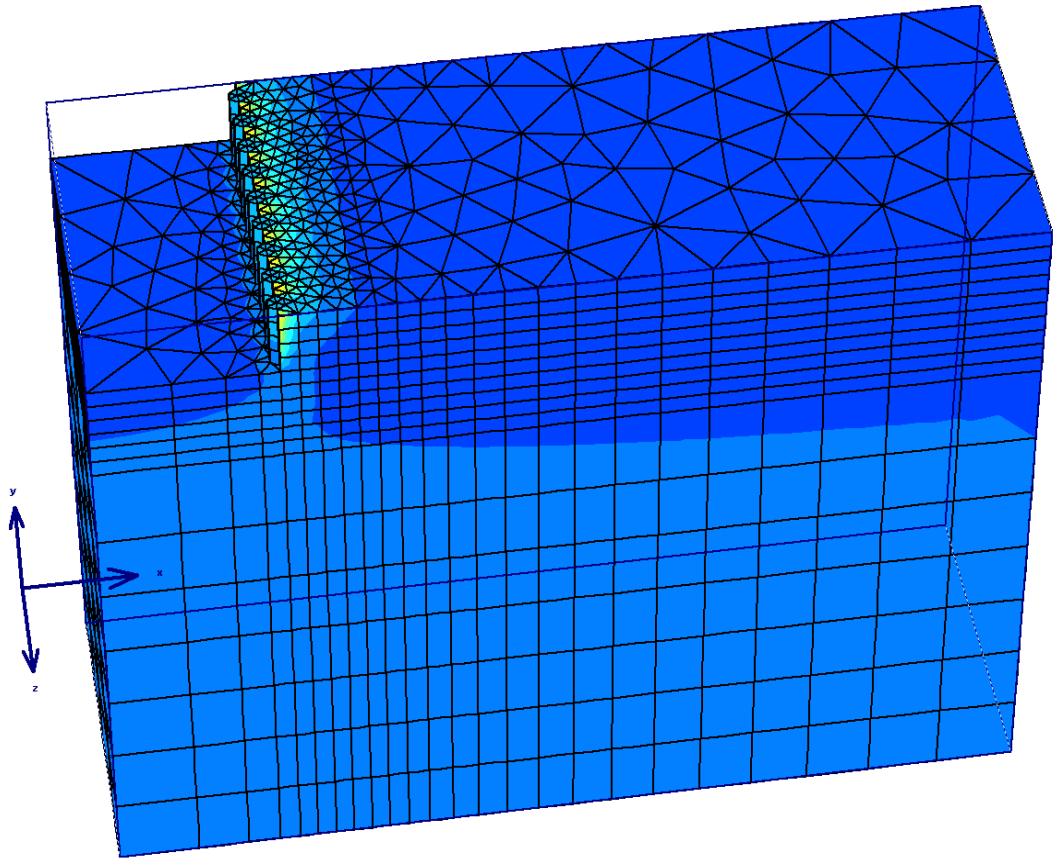


(a)

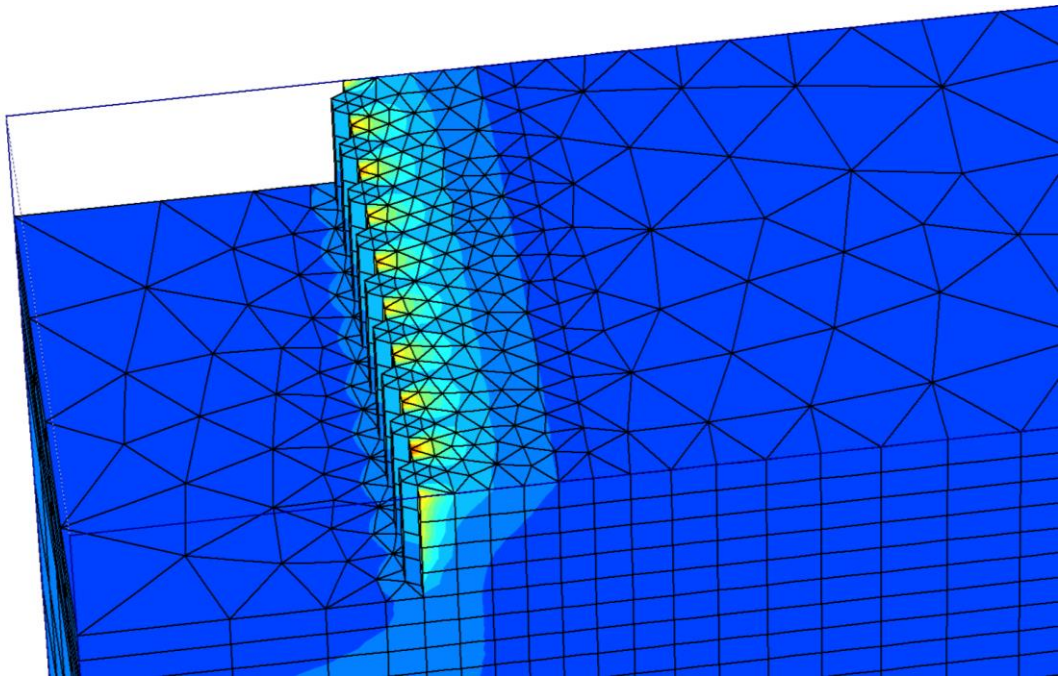


(b)

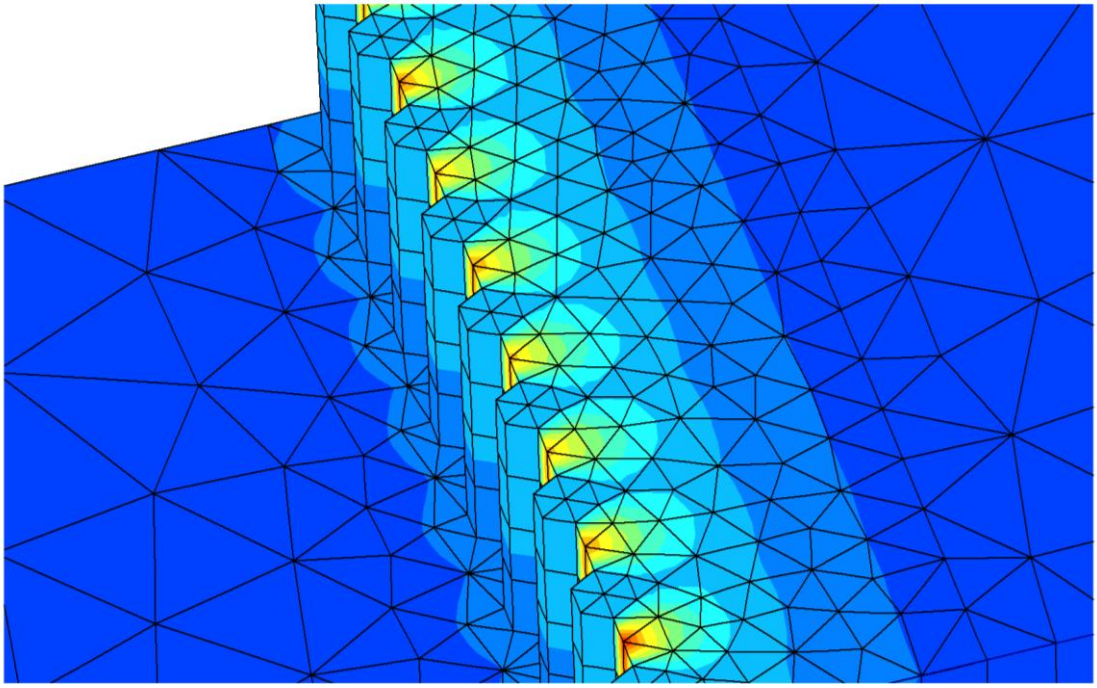
Şekil B.7 : Göçme Anı İçin Deforme Olmuş Sonlu Elemanlar Ağı



(a)

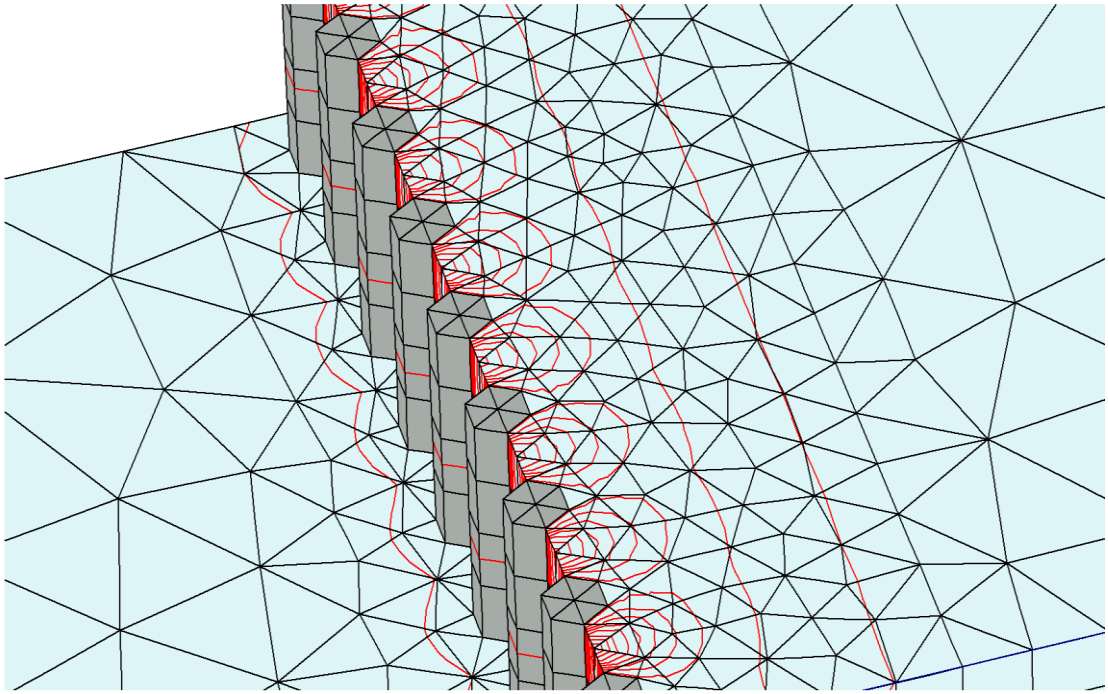


(b)

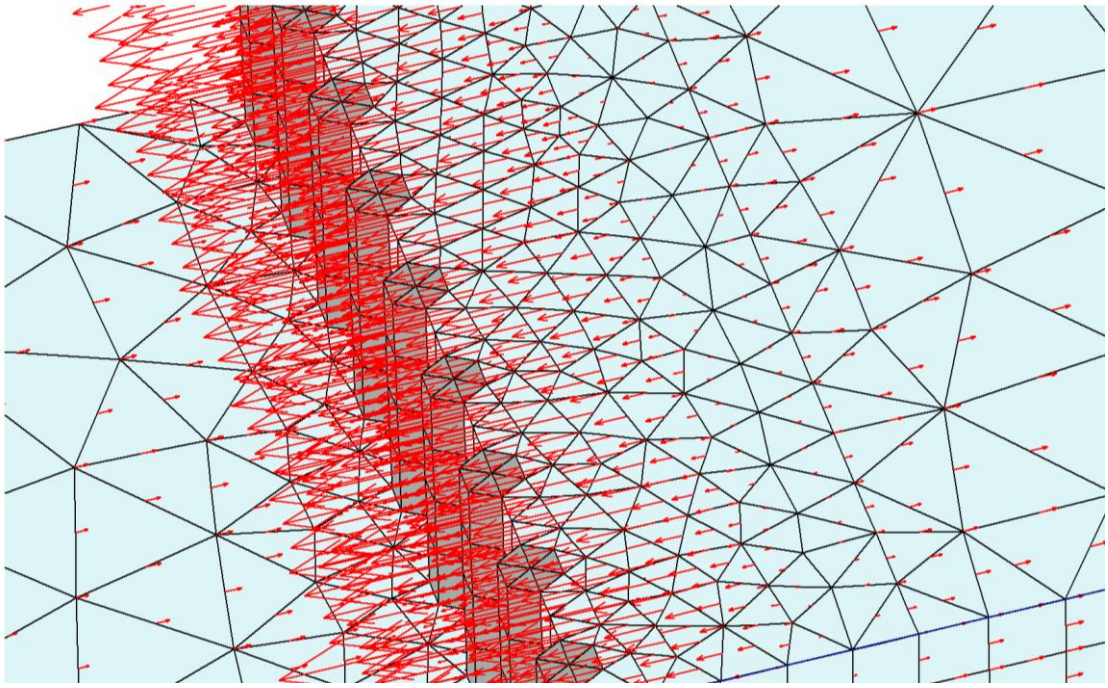


(c)

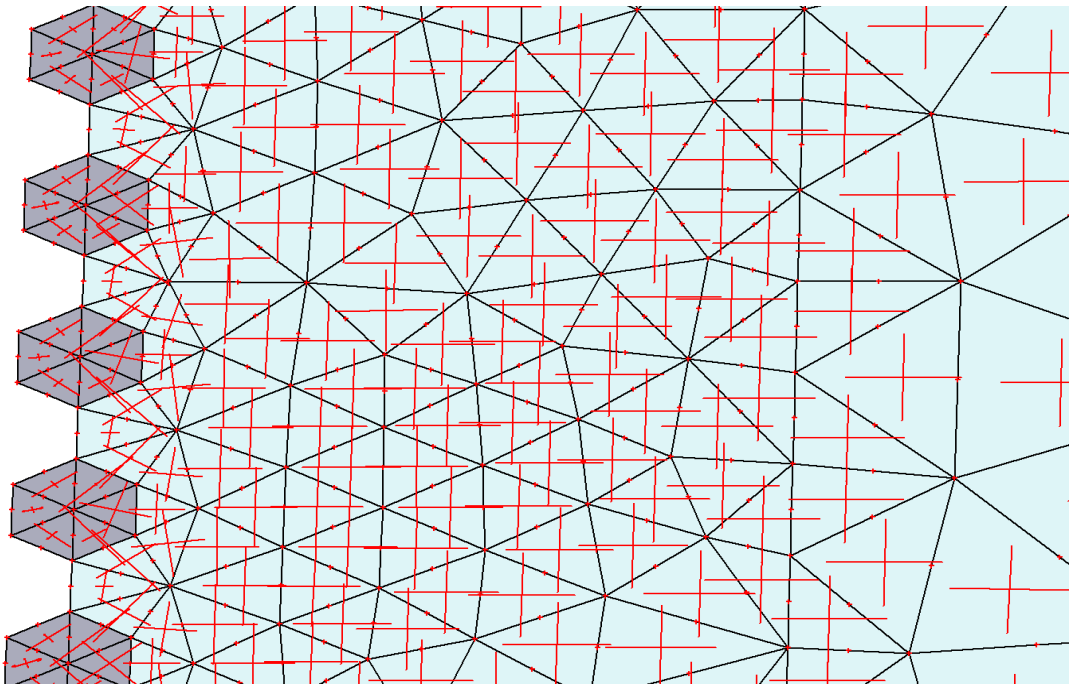
Şekil B.8 : Göçme Anı İçin Kazıklar Arasında Varolan Zeminin Deplasman Kontürleri



Şekil B.9 : Göçme Anı İçin Kazıklar Arasında Varolan Zeminin Deplasman Kontür Çizgileri



Şekil B.10 : Göçme Anı İçin Kazıklar Arasında Varolan Zeminin Deplasman Hareket Yönleri



Şekil B.11 : Göçme Anı İçin Kemerlenme Etkisi ile Oluşan Asal Gerilme Yönleri

ÖZGEÇMİŞ

Berna ERÇAĞ, 1979 yılında İstanbul'da doğmuştur. İlk, orta ve lise öğrenimini Kumburgaz İlkokulu ve Özel Uğur Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1997 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek öğrenimine başlamıştır. 2002 yılında başlamış olduğu İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda öğrenimini halen sürdürmektedir.