İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ PARAMETRELİ ELASTİK ZEMİNE OTURAN DAİRESEL PLAKLAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Beyhan TÜRKKAN

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ PARAMETRELİ ELASTİK ZEMİNE OTURAN DAİRESEL PLAKLAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Beyhan TÜRKKAN
(501021044)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Haziran 2005

Tez Danışmanı : Yar.Doç.Dr. Mecit ÇELİK
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ahmet Işın SAYGUN
Doç.Dr.Necdet TORUNBALCI

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Yapı Programında gerçekleştirilen bu yüksek lisans çalışmasında, iki parametreli elastik zemine oturan dairesel plakların hesabı yapılmıştır.

Bu çalışma süresince değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım hocam Prof.Dr.Ahmet Işın SAYGUN'a ve tez danışmanım Y.Doç.Dr. Mecit ÇELİK'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

9 Mayıs 2005 Beyhan TÜRKKAN

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **xii**
SUMMARY **xiii**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Konunun Tanımı 1
1.2. Çözüm Yöntemi 6

2. İKİ PARAMETRELİ ZEMİNE OTURAN PLAKLAR **8**
2.1. İki Parametreli Zemin Karakteristiklerinin Tanımı ve Hesabı 8
2.2. İki Parametreli Zemin Tepkilerinin Plak Sonlu Elemanlarda Göz Önüne Alınması 17
2.3. Temel Dışı İki Parametreli Zemin Ortamının Sonlu Elemanlarla İdealize Edilmesi 21

3. 16 SERBESTLİK DERECELİ HALKA SEKTÖRÜ SONLU ELEMAN **25**
3.1. Eğilmeye Bağlı Şekil Değiştirme Yüzeyinin Belirlenmesi 25
3.2. Eğilme Elemanı Rijitlik Matrisi Tanım ve Hesabı 28
3.3. Elemanın Kesit Zoru – Uç Deplasmanı Bağıntıları 31
3.4. 16 Serbestlik Dereceli Halka Sektörü Sonlu Elemanda [C] ve [CT] Matrisleri 34

4. 4 SERBESTLİK DERECELİ EĞRİSEL ZEMİN SONLU ELEMAN **35**
4.1. γ Zemin Yüzey Parametresinin Hesabı 39

5. DAİRESEL TEMELLER İLE İLGİLİ SAYISAL ÖRNEKLER **42**
5.1. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde 5 m'lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali 42
5.2. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde 10 m'lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali 45
5.3. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde 20 m'lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali 49
5.4. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde 5 m'lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Yayılı Yük Etkimesi Hali 52
5.5. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde 10 m'lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Yayılı Yük Etkimesi Hali 55
5.6. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde 20 m'lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Yayılı Yük Etkimesi Hali 58
5.7. İki Parametreli Elastik Zemine Oturan Değişken Kesitli Dairesel Plak Temelde H=5 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi 61

5.8. İki Parametreli Elastik Zemine Oturan Değişken Kesitli Dairesel Plak Temelde H=10 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi 64
5.9. İki Parametreli Elastik Zemine Oturan Değişken Kesitli Dairesel Plak Temelde H=20 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi 66

6. SONUÇLAR **68**

KAYNAKLAR **70**

EKLER **71**

ÖZGEÇMİŞ **98**

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Gauss İntegral Noktaları ve Ağırlık Fonksiyonları 31
Tablo 3.2. Halka Sektörü Elemanı Deformasyon Matrisi..... 33
Tablo 4.1. Eğrisel Zemin Elemanın Elastik Yataklanma Matrisi..... 37
Tablo 4.2. Eğrisel Zemin Elamanının Kayma Parametresi Matrisi..... 38
Tablo 4.3. Eğrisel Zemin Eleman Deformasyon Matrisi..... 39
Tablo 5.1. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 43
Tablo 5.2. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 43
Tablo 5.3. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 44
Tablo 5.4. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 44
Tablo 5.5. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 44
Tablo 5.6. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 45
Tablo 5.7. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 46
Tablo 5.8. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 47
Tablo 5.9. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 47
Tablo 5.10. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 48
Tablo 5.11. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 48
Tablo 5.12. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 49
Tablo 5.13 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 50
Tablo 5.14 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 51
Tablo 5.15 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 51
Tablo 5.16. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 51
Tablo 5.17. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 52
Tablo 5.18. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 52
Tablo 5.19 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 53
Tablo 5.20 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 54
Tablo 5.21 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 54
Tablo 5.22. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 54
Tablo 5.23. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 55
Tablo 5.24. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 55
Tablo 5.25 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 56
Tablo 5.26 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 57
Tablo 5.27 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 57
Tablo 5.28. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 57
Tablo 5.29. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 58
Tablo 5.30. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 58
Tablo 5.31. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 59
Tablo 5.32. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 60
Tablo 5.33. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 60

Tablo 5.34. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 60
Tablo 5.35. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 61
Tablo 5.36. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 61
Tablo 5.37. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 63
Tablo 5.38. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 63
Tablo 5.39. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 63
Tablo 5.40. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 65
Tablo 5.41. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 65
Tablo 5.42. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 65
Tablo 5.43. Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu..... 66
Tablo 5.44. Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu..... 67
Tablo 5.45. Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu..... 67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 : Winkler Zemin Modeli..... 2
Şekil 1.2 : Filonenko-Brodich Zemin Modeli..... 3
Şekil 1.3 : Hetenyi Zemin Modeli..... 4
Şekil 1.4 : Pasternak Zemin Modeli..... 5
Şekil 1.5 : Vlasov Zemin Modeli..... 6
Şekil 2.1.a : Yüzeysel Temel Görünüşü..... 8
Şekil 2.1.b : Yüzeysel Temel Kesiti..... 8
Şekil 2.2 : Zemine Etkiyen İç Kuvvetler..... 9
Şekil 2.3 : dz Kalınlığındaki Zemin Tabakasına Etkiyen Yükler..... 13
Şekil 2.4 : Elastisite Modülünün Lineer Değişimi..... 16
Şekil 2.5 : Elastisite Modülünün Kuadratik Değişimi..... 16
Şekil 2.6 : Dönmelere Bağlı Olarak Zeminden Temele Gelen Tepkiler..... 18
Şekil 2.7 : Dikdörtgen Elemanda Yüzeydeki ve Sınırdaki Zemin Tepkileri. 19
Şekil 2.8 : Temel Çevre Ortamının Bölgelere Ayrılması..... 21
Şekil 2.9 : Planda Düzgün Olmayan Radye Temel Örneği..... 22
Şekil 2.10 : Radye Temel Çevre Genişliği..... 23
Şekil 2.11 : Yakın Temellerin Karşılıklı Etkileşimi..... 23
Şekil 3.1 : Halka Sektörü Eleman..... 25
Şekil 4.1 : 4 Serbestlik Dereceli Eğrisel Zemin Sonlu Eleman..... 35
Şekil 5.1 : Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri..... 42
Şekil 5.2 : Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri..... 45
Şekil 5.3 : Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri..... 50
Şekil 5.4 : Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri..... 53
Şekil 5.5 : Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri..... 56
Şekil 5.6 : Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri..... 59
Şekil 5.7 : Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri..... 62
Şekil 5.8 : Hesapta Kullanılan Sonlu Eleman Ağı..... 62
Şekil 5.9 : Hesapta Kullanılan Sonlu Eleman Ağı..... 64
Şekil 5.10 : Hesapta Kullanılan Sonlu Eleman Ağı..... 66
Şekil A.1 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 71
Şekil A.2 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 72
Şekil A.3 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 72
Şekil A.4 : Sabit, Lineer ve Kuadratik Tek Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 73
Şekil A.5 : Sabit, Lineer ve Kuadratik Tek Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 73

Şekil A.6 : Sabit, Lineer ve Kuadratik Tek Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 74
Şekil A.7 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 74
Şekil A.8 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 75
Şekil A.9 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 75
Şekil A.10 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 76
Şekil A.11 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 76
Şekil A.12 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 77
Şekil A.13 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 77
Şekil A.14 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 78
Şekil A.15 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 78
Şekil A.16 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 79
Şekil A.17 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 79
Şekil A.18 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 80
Şekil A.19 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 80
Şekil A.20 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 81
Şekil A.21 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 81
Şekil B.1 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 82
Şekil B.2 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 83
Şekil B.3 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 83
Şekil B.4 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 84
Şekil B.5 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 84
Şekil B.6 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 85
Şekil B.7 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 85

Şekil B.8 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 86
Şekil B.9 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 86
Şekil B.10 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 87
Şekil B.11 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 87
Şekil B.12 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 88
Şekil B.13 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 88
Şekil B.14 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 89
Şekil B.15 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 89
Şekil B.16 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 90
Şekil B.17 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 90
Şekil B.18 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 91
Şekil C.1 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 92
Şekil C.2 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 93
Şekil C.3 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 93
Şekil C.4 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 94
Şekil C.5 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 95
Şekil C.6 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 95
Şekil C.7 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar..... 96
Şekil C.8 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri..... 97
Şekil C.9 : Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri..... 97

SEMBOL LİSTESİ

x,y,z	**:** Kartezyen Koordinatları
u, v, w	**:** Plak ortalama yüzeyinde koordinatlar doğrultusundaki yer değiştirmeler
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	**:** x, y ekseni yönündeki deformasyonlar
M_x, M_y	**:** Eğilme momentleri
M_{xy}	**:** Burulma momenti
T_x, T_y	**:** Kesme kuvvetleri
a ,b	**:** Dikdörtgen plağın kenar uzunlukları
w_e	**:** Ortalama yüzeyin eğilme deformasyonlarından dolayı oluşan çökmesi
E ,υ ,G	**:** Elastisite Modülü , Poisson oranı, Kayma Modülü
h	**:** Plak kalınlığı
d_i	**:** Eğilme deformasyonlarına bağlı plak uç deplasmanları
[ ]	**:** Matris gösterimi
f_i, g_i	**:** Uç deplasmanlarının birim değerlerine karşı gelen kübik deplasman fonksiyonları
l_1, l_2	**:** Uç deplasmanlarının birim değerlerine karşı gelen lineer deplasman fonksiyonları
$[A_d]_e$	**:** Eğilme deformasyonlarına bağlı birim durum fonksiyonları matrisi
D	**:** Plak eğilme rijitliği
$[k_e]$	**:** Eğilme elemanı rijitlik matrisi
Pi	**:** Eleman uç kuvveti
[I]	**:** Birim matris
$[K]_{ij}$	**:** Eleman alt matrisleri
$[T_x], [T_y]$ [T]	**:** Transformasyon matrisleri
$[\chi]$	**:** Eğrilik matrisi
$\chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$	**:** Kartezyen koordinatlardaki eğrilikler
$[B_d]$	**:** Eleman deformasyon matrisi
$[B]_{ij}$	**:** Eleman deformasyon alt matrisleri
α	**:** Halka sektörü elemanda merkez açı
R_2	**:** Halka sektörü elemanda iç yarıçap
R_1	**:** Halka sektörü elemanda dış yarıçap
φ, ψ	**:** Halka sektörü elemanda eğilme deformasyonlarına bağlı deplasman fonksiyonları
λ_1, λ_2	**:** Halka sektörü elemanda kayma deformasyonlarına bağlı deplasman fonksiyonları
H_n, H_m	**:** Nümerik integrasyon ağırlık katsayıları
Ø(z)	**:** Zemin çökme yüzeyinin fonksiyonu
τ_{zy}, τ_{zx}	**:** Zemindeki kayma gerilmeleri
C	**:** Zemine ait elastik yataklanma katsayısı

$\mathbf{C_T}$ **:** Zemine ait kayma parametresi
$\mathbf{q_z}$ **:** Zemin reaksiyonları
$\boldsymbol{\gamma}$ **:** Zemin yüzey parametresi
$\mathbf{E_s}$ **,** $\boldsymbol{\upsilon_s}$ **:** Zemin elastisite modülü e poisson oranı
[C] **:** Zemin elastik yataklanma matrisi
$\mathbf{[C_T]}$ **:** İki parametreli zeminde kayma parametresi matrisi
$\mathbf{[A_d]_z}$ **:** Zemin elaman birim durum fonksiyonları matrisi
H **:** Sıkışabilen zemin tabakası kalınlığı
B **:** Zemin etkilerinin yayılma bölgesinin genişliği

İKİ PARAMETRELİ ELASTİK ZEMİNE OTURAN DAİRESEL PLAKLAR

ÖZET

Bu çalışmada iki parametreli elastik zemine oturan dairesel plakların hesabı yapılmıştır. Hesaplarda zemine ait elastisite modülünün sıkışabilen tabaka yüksekliği boyunca sabit, lineer ve kuadratik değişimi ele alınarak zemin yüzey parametresinin ve zemine ait karakteristik büyüklükler bir ardışık yaklaşım yöntemi ile hesaplanmıştır.

Çalışma altı bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde konu ile ilgili literatürde mevcut zemin modelleri kısaca özetlenmiş ve bu çalışmada uygulanan çözüm yöntemi ve yöntemin uygulanışı hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, iki parametreli elastik zeminde zemin karakteristiklerinin tanımı yapılmıştır. İki parametreli elastik zemine oturan plaklarda ve plak bölgesi dışında diferansiyel denklem elde edililerek virtüel iş teoremi yardımıyla zemin karakteristiklerinin elde edilebileceği ve zemin elastisite modülünün derinlikle değişimine bağlı olarak zemine ait karakteristik büyüklüklerin ifadeleri elde edilmiştir.

Üçüncü bölümde onaltı serbestlik dereceli halka sektörü plak sonlu elemanda rijitlik, deformasyon, elastik yataklanma ve kayma parametresi matrislerinin sayısal olarak nasıl elde edildiği gösterilmiştir.

Dördüncü bölümde dört serbestlik dereceli dairesel zemin sonlu elemana ait elastik yataklanma ve kayma parametreleri verilmiştir.

Beşinci bölümde çalışma ile ilgili sayısal örnekler yapılmış, sonuçlar tablo ve şekillerle gösterilmiştir.

Altıncı bölümde ise çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar topluca verilmiştir.

ANALYSIS OF CIRCULAR PLATES ON A TWO-PARAMETER ELASTIC FOUNDATION

SUMMARY

In this study, the analysis of plates on a two-parameter foundation has been done in case of constant,lineer and quadratic changes of modulus of elaticity with depth, in accordance with iteration process by calculation of mode shape parameter, the elastic bedding coefficient and shear parameter coefficient.

The study consists of 6 sections.

In the first section, the purpose of the analysis and description of the study and the steps of the analysis have been examined. The mathematical models, that were used in the previous studies, have been introduced and necessary information regarding the algorithm of the software and its implementation has been given.

In the second section, characteristics of the two-parameter foundation have been described, the governing differential equationsare derived both below and outside of the plate by using the virtual work theorem, numerical characteristics of the foundation has been introduced in accordance with iteration approach.

In the third section, the elastic bedding and shear parameter matrices of circular plate element with sixteen degrees of freedom have been given.

In the fourth section, the elastic bedding and shear parameter matrices of soil element with four degrees of freedom have been given.

In the fifth section, numerical examples have been given regarding the calculations mentioned above.Also, surface figures have been drown by using numerical results.

Finally in the sixth section, aggregated results of the study have been explained.

I. GİRİŞ

1.1 Konunun Tanıtımı

Üst yapı yüklerinin zemin tarafından taşındığı göz önüne alındığında yapı-zemin ilişkisinin inşaat mühendisliği açısından öneminin büyüklüğü anlaşılmaktadır. Her hangi bir yapı ile ilgili mühendislik çözümü yapılırken yapı ile zemin arasındaki etkileşimin doğru, gerçekçi bir şekilde ortaya koyulması kesin çözüme ulaşılması açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple elastik zemine oturan yapı sistemlerinin analizi hakkında pek çok çalışma yapılmıştır. Zemine mesnetlenen yapının davranışı ve zeminin kendi davranışı birbiriyle karşılıklı etkileşimi çeşitli modellerle ifade edilmektedir.

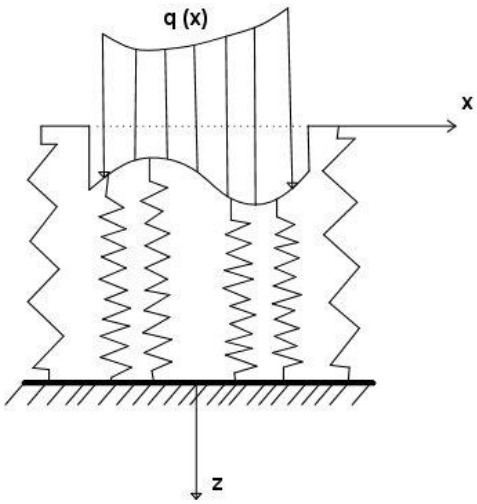
Elastik zemine oturan plakların analizini üç aşamadan oluştuğu kabul edilebilir. İlk aşama, yapının ve zeminin karşılıklı davranışlarını en iyi şekilde temsil edecek uygun zemin modelinin seçilmesidir. İkinci aşama zemine ve plağa ait karakteristik büyüklüklerin değerlerinin seçilmesidir. Son aşamada ise daha önceki aşamalardan elde edilen verilerin kullanılarak, matematik model yardımıyla problemin çözülmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesidir.

Elastik zemine oturan plaklar ve kirişler problemi ilk olarak Winkler (1867) tarafından incelenmiş ve teorinin esasları belirlenmiştir. Bu teori, q zemin tepkilerinin, w plak çökmeleri ile doğru orantılı olduğu kabulüne dayanarak

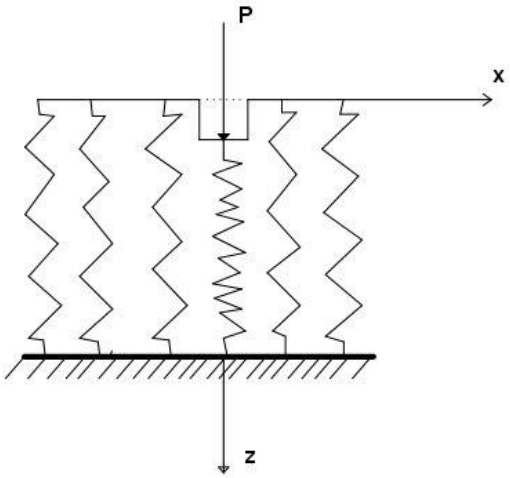
$$q(x,y)=kw(x,y) \tag{1.1}$$

bağıntısını vermektedir.

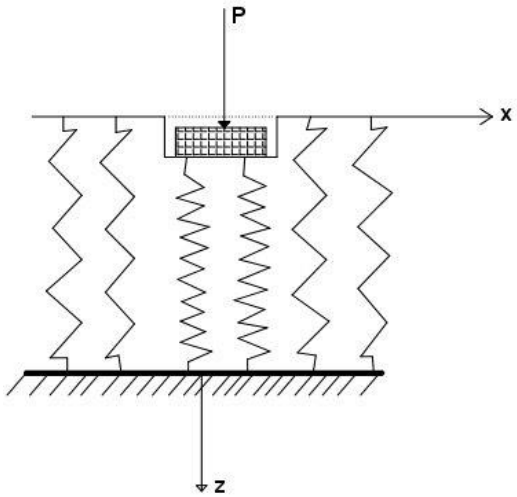
Winkler modelinde zeminin, (1.1) ifadesinin bir sonucu olarak, birbirinden bağımsız, sadece düşey doğrultuda çalışan, lineer elastik yaylardan oluşan bir sistem olduğu kabul edilmiştir. Bu sonuca göre yükün etkidiği yaylarda çökmeler oluşur, diğer yaylarda ise hiçbir çökme oluşmaz. Şekil (1.1) de Winkler zemin modelinde değişik yüklere ait deplasman durumları gösterilmiştir.



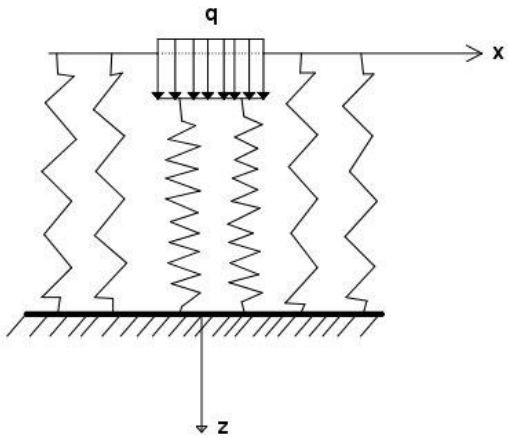
(a) Üniform Olmayan Yayılı Yük Durumu



(b) Tekil Yük Durumu



(c) Rijit Cisimle Yükleme Durumu



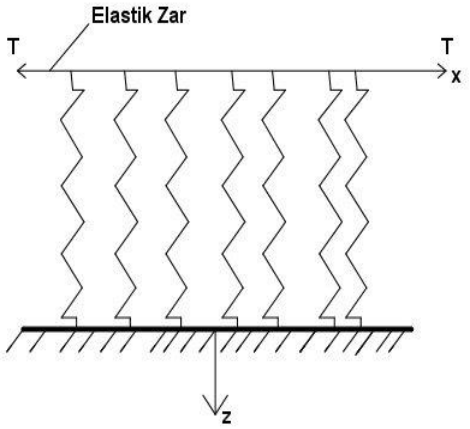
(d) Üniform Yayılı Yük Durumu

Şekil 1.1 Winkler Zemin Modeli

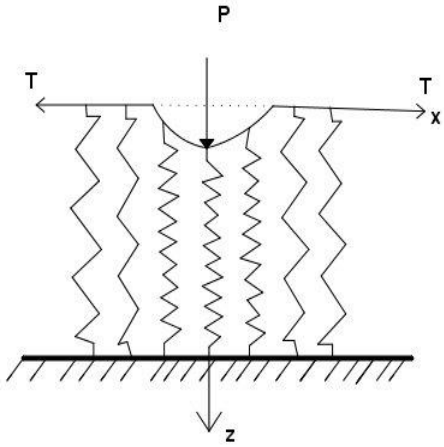
Winkler modelinde zemini karakterize eden sadece k (zemin yatak katsayısı) parametresi vardır. Bu özeliğinden dolayı Winkler modeli tek parametreli model olarak bilinmektedir.

Winkler zemin modelinin, bazı durumlarda yetersiz kalması üzerine araştırmacılar zemin sürekli ortamını daha iyi idealize edebilmek için yeni zemin modelleri geliştirmişlerdir.

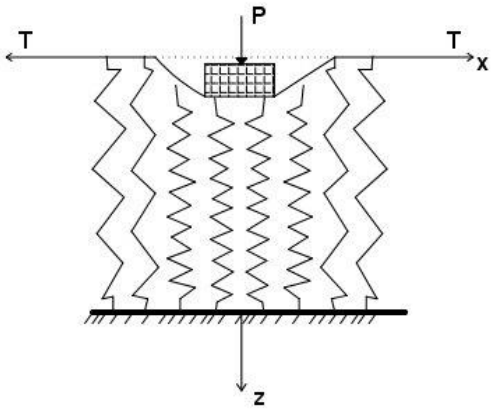
Filonenko - Brodich modelinde (1940–1945), Winkler modelindeki yayların üst yüzeyi Şekil (1.2) de görüldüğü gibi elastik bir zarla bağlı olduğu kabul edilmiştir.



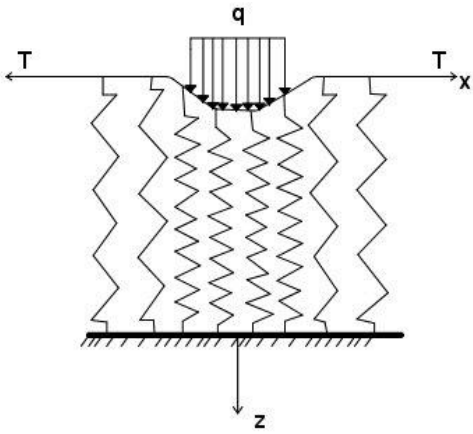
(a) Yüksüz Durum



(b) Tekil Yük Durumu



(c) Rijit Cisimle Yükleme Durumu



(d) Üniform Yayılı Yük Durumu

Şekil 1.2 Filonenko-Brodich Zemin Modeli

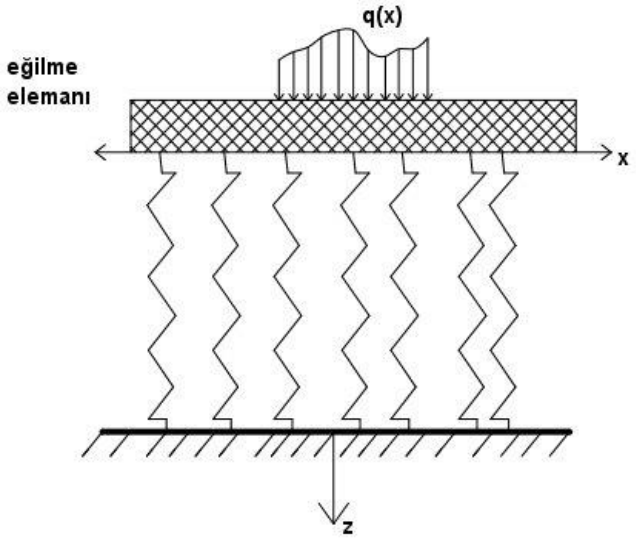
Bu modelde sisteme yükleme yapıldığında yüzeydeki zarda gerilme meydana gelir. Zar ve yaya sisteminin dengesinden zemin reaksiyonu

$$q(x) = kw - T\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \tag{1.2}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Filonenko-Brodich modelinde , (1.2) ifadesinde de görüldüğü gibi, k Winkler modelindeki zemin katsayısı, T ise yayları birbirine bağlayan zarda oluştuğu kabul edilen sabit çekme kuvveti olmak üzere, iki parametre bulunmaktadır.

Hetenyi modelinde (1946) ise Winkler yaylarının üzerinde (Şekil 1.3) , iki boyutlu problemler için elastik bir plak, tek boyutlu problemler için elastik bir kirişin olduğu kabul edilir.



Şekil l .3 Hetenyi Zemin Modeli

Bu modelde D plağın eğilme rijitliği olmak üzere zemin reaksiyonu (1.3) ifadesiyle belirtilebilir.

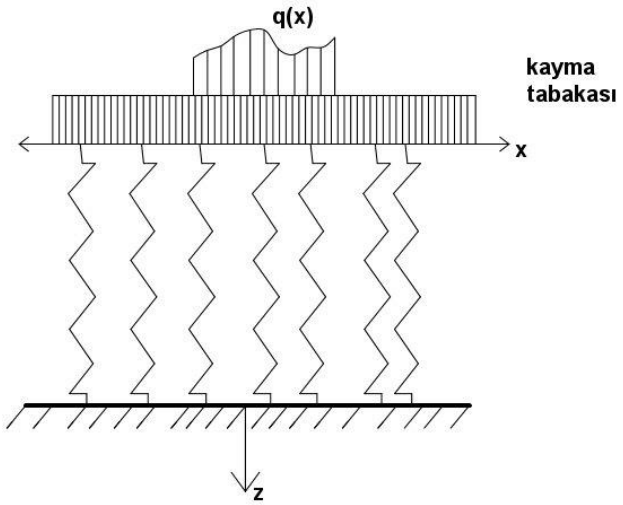
$$q(x) = kw - D\Delta\Delta w \tag{1.3}$$

Bu modelde elastik zemin parametresi k ve D dir.

Pasternak modelinde (1954) Winkler modelindeki yayların üzerinde (Şekil1.4) sadece düşey deplasman yapabilen ve sıkışmayan elemanlardan oluşan, kayma tabakası göz önüne alınmıştır.

Kayma tabakası (x,y) düzleminde izotropik olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla kayma tabakasının kayma modülleri arasında (1.4) bağıntısı geçerlidir.

$$G_x=G_y=G_p \tag{1.4}$$



Şekil l .4 Pasternak Zemin Modeli

(l.4) ifadesindeki G_p ikinci zemin parametresi olmak üzere zemin reaksiyonu

$$q(x,y) = kw - G_p \nabla^2 w \tag{1.5}$$

olarak ifade edilebilir. (1.5) ifadesindeki ∇ Laplacien operatörü olup

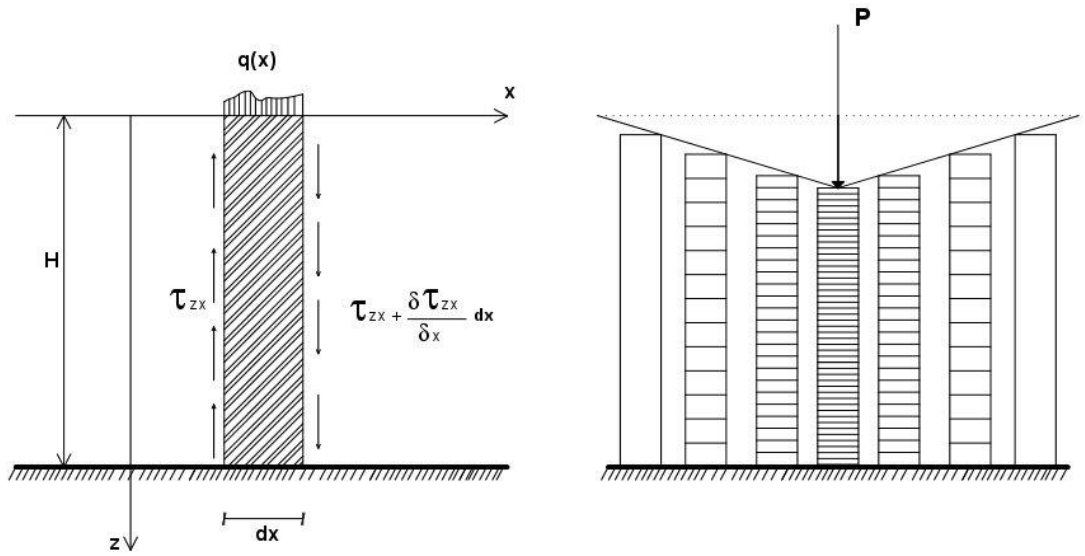
$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) \tag{1.6}$$

şeklinde ifade edilir.

Vlasov modelinde ise diğer zemin modellerinden farklı olarak Şekil (1.5) de görüldüğü gibi x-z düzleminde ele alınan zemin kolonu için yer değiştirmeler (1.7) ifadesindeki şekilleriyle kabul edilmişlerdir.

$$u(x,z) = 0 \ , \quad w(x,z) = w(x)\, \varnothing(z) \tag{1.7}$$

(1.7) ifadesinde u(x,y) x-z düzleminde yatay deplasman, w(x,z) aynı düzlemdeki düşey deplasman ve $\varnothing(z)$ fonksiyonu ise w(x) yer değiştirmelerinin derinlik boyunca (z ekseni boyunca) değişimini veren mod şekil fonksiyonudur. Bu modelde zemin reaksiyonları



Şekil 1.5 Vlasov Zemin Modeli

$$q(x,y) = kw - 2t\left\{\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2}\right\} \tag{1.8}$$

olarak ifade edilebilir. Bu modeldeki elastik zemin parametreleri k ve t dir.

1.2. Çözüm Yöntemi

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, karışık mühendislik problemlerinin çözümünü sonlu sayıda bilinmeyenli bir lineer denklem takımının çözümüne indirgendiğinden, sayısal yöntemlere ilgi artmıştır.

Bu yöntemlerden özellikle sonlu elemanlar yöntemi inşaat mühendisliği bakımından, sisteme ait bilgileri, mesnet şartlarını, dış etkilerin sürekli veya ani değişimlerini gösteren ve sistem sınırlarının düzgün olmaması halini kolaylıkla göz önüne alma olanağı verir.

Ayrıca sonlu serbestlik derecesi iki veya üç boyutlu elemanlar kullanarak karışık sistemlerin çözümüne imkan sağlamaktadır.

Bu yöntemde sonlu elemanlara bölünen bir sürekli sistemin elemanlarının yalnız düğüm noktalarında birbirlerine bağlı olduğu kabul edilir. Eleman yüzeylerinin şekil değiştirmesi ise düğüm noktalarının sonlu sayıdaki deplasman bileşenleri ve bunların koordinat değişkenlerine göre bazı türevlerinden oluşan uç deplasmanlarına bağlı

fonksiyonlarının lineer kombinezonu olarak belirlenebilir. Bu şekil değiştirme durumuna ait yüklemenin ise yalnız uç deplasmanları doğrultusundaki uç kuvvetlerinden oluştuğu kabul edilir. Uç kuvvetleri ile uç deplasmanları arasındaki matris bağıntıları birim deplasman durumlarını tanımlayan deplasman fonksiyonlarından veya elemanda, dengede iç kuvvet durumlarından hareket edilerek enerji teoremlerinden yararlanıp tayin edilebilir. Sisteme gelen yüklerinde yalnız düğüm noktalarından etkiyebileceği kabulü sonucunda yayılı dış etkiler de düğüm noktalarına etkiyen uç kuvvetlerine dönüştürülür.

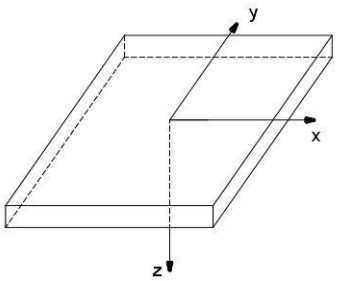
Sonuç olarak sistemin çözümü düğüm noktalarında uç deplasmanları doğrultusunda denge denklemleri anlamındaki lineer denklem takımının çözümüne indirgenmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminin inşaat mühendisliğinde uygulama alanlarından biri de plak sistemlerinin hesabıdır. Özellikle radye temelleri boyutlandırılmasında Winkler tipi zemine oturan dikdörtgen sonlu elemanlar tanımlayarak bu yöntem geniş ölçüde kullanılmıştır. İki parametreli zemin karakteristiklerinin ve bu tür zemine oturan plaklara ait diferansiyel denklemler Bölüm 2 de incelecektir.

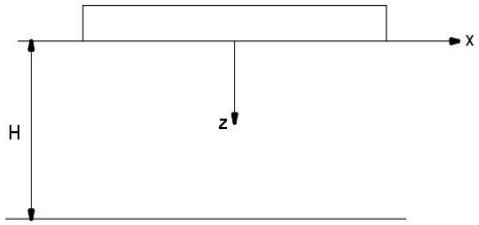
2. İKİ PARAMETRELİ ZEMİNE OTURAN PLAKLAR

2.1. İki Parametreli Zemin Karakteristiklerinin Tanımı ve Hesabı

Şekil (2.la) da görünüşü, Şekil (2.1b) de kesiti görülen



Şekil 2.1a Yüzeysel Temel Görünüşü



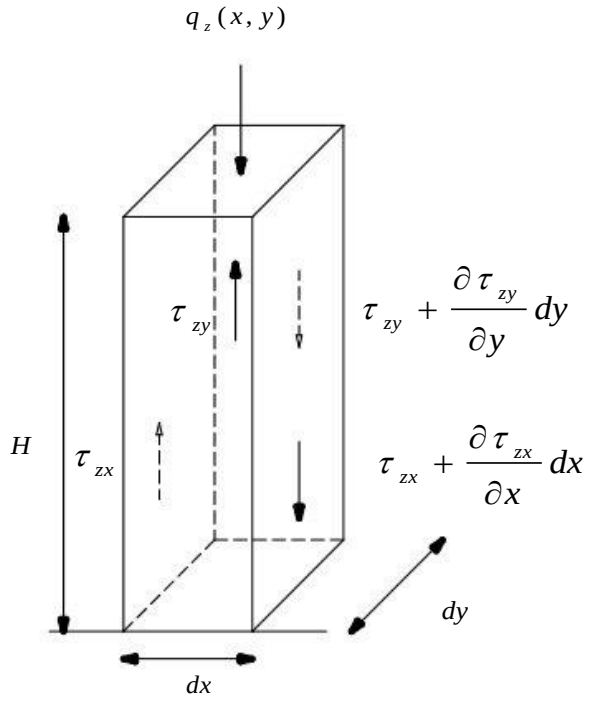
Şekil 2.1b Yüzeysel Temel Kesiti

z = 0 düzleminde zemine oturan yüzeysel temel altında zemin çökme yüzeyi $w(x,y)$ ise, alttaki sıkışabilir zemin tabakası kalınlığı H içinde kalan herhangi bir noktadaki çökme sınır şartları z=0 ; Ø(0)=1 , z=H ; Ø(H)=0 olan

$$w_z = w(x,y)Ø(z) \tag{2.1}$$

gibi bir fonksiyonla gösterilebilir.

Zemin yüzeyi ve zemin içinde u ve v yer değiştirmeleri ise sıfır kabul edilecektir. Herhangi bir x,y noktası civarında dx, dy, H boyutlu bir zemin kolonuna gelen tesirler Şekil (2.2) de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Zemine Etkiyen İç Kuvvetler

H derinliği boyunca homojen bir yapıya sahip olduğunu kabul ettiğimiz zeminin kayma modülü G_s olmak üzere çökme fonksiyonu cinsinden bu tesirler gösterilirse;

$$\tau_{zx} = G_s\left(\frac{\partial w_z}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right) = G_s \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} Ø(z) \tag{2.2}$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = G_s \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} Ø(z) \tag{2.3}$$

$$\tau_{zy} = G_s\left(\frac{\partial w_z}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right) = G_s \frac{\partial w(x,y)}{\partial y} Ø(z) \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = G_s \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} Ø(z) \tag{2.5}$$

olacaktır. Bu kolonda, temelden zemine aktarılan $q_z(x,y)$ yükü ve yanal kayma gerilmeleri sonucu oluşan iç kuvvetler E_s ve v_s zeminin Elastisite Modülü ve Poisson oranı olmak üzere üç boyutlu elastik ortamda

$$\sigma_z = \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \frac{\partial w_z}{\partial z} \tag{2.6a}$$

$$\sigma_z = \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} w(x,y) \frac{\partial \text{Ø(z)}}{\partial \text{z}} \tag{2.6b}$$

şeklindedir. Bu durum yükleme durumu olarak düşünülecektir. Virtüel şekil değiştirme durumu olarak ise bu kolonun üst yüzeyinin birim çökmesi alınacaktır. Bu halde z derinliğinde herhangi bir noktanın çökmesi

$$\overline{w_z} = 1.\text{Ø(z)} \tag{2.7}$$

boy - değişme deformasyonu ise

$$\overline{\varepsilon_z} = \frac{\partial \text{w}_z}{\partial \text{z}} = \frac{\partial \overline{\text{Ø}}\text{(z)}}{\partial \text{z}} \tag{2.8}$$

dir. Virtüel iş teoremini uygularsak:

Dış kuvvetlerin işi:

$$q_z\,dxdy + \int_{z=0}^{H} \{(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} dx - \tau_{zx})\}dy\,\text{Ø(z)dz} + \int_{z=0}^{H} \{(\tau_{zy} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} dy - \tau_{zy})\}dx\,\text{Ø(z)dz} =$$

$$\left\{ q_z + Gs\left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right) \int_{z=0}^{H} \text{Ø}^2\text{(z)dz} \right\} dxdy \tag{2.9}$$

İç kuvvetlerin işi:

$$\int_{z=0}^{H} \left(\sigma_z \overline{\varepsilon_z} dxdy\right) dz = \left\{ \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} w(x,y) \int_{z=0}^{H} \left(\frac{\partial \text{Ø(z)}}{\partial z} \right)^2 \right\} dxdy \tag{2.10}$$

şeklinde yazılabilir. Virtüel iş teoremi gereği (2. 9) ve (2.10) eşitliğinden

$$C = \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \int_{z=0}^{H} \left(\frac{\partial Ø(z)}{\partial z} \right)^2 dz \tag{2.11}$$

$$2C_T = G_s \int_{z=0}^{H} Ø^2(z)dz \tag{2.12}$$

kısaltmaları yapılırsa

$$q_z = Cw(x,y) - 2C_T \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right) \tag{2.13}$$

eşitliği veya kısaca

$$q_z = Cw - 2C_T \Delta w \tag{2.14}$$

elde edilir.

Temelin herhangi bir noktasında üstten gelen q yükü ve temelin q_z zemin tepkisi beraber düşünülürse iki parametreli zemine oturan eğilme plağına ait diferansiyel denge denklemi

$$D(\Delta\Delta w) = q - q_z \tag{2.15a}$$

yazılabilir. q_z nin (2.14) deki ifadesi de yerine konularak

$$D(\Delta\Delta w) - 2C_T(\Delta w) + C(w) = q \tag{2.15b}$$

elde edilir. Temel plağı dışında kalan bir noktada ise diferansiyel denklem

$$-2C_T(\Delta w) + C(w) = 0 \tag{2.16}$$

olacaktır.

Bu ifadelerde C Winkler tipi zemindeki bilinen zemin yatak katsayısını, C_T ise zeminde oluşabilen kayma gerilmelerinin göz önüne alınmasıyla ortaya çıkan zemin kayma parametresini göstermektedir. (2.11) ve (2.12) deki ifadelerden bu

değerlerin zeminin elastik özelliklerine, sıkışabilir zemin tabakası kalınlığı H'ya ve yalnız z=0 ve z=H deki sınır değerleri tam olarak bilinen Ø(z) fonksiyonuna bağlı olduğu görülmektedir.

Ø(z) fonksiyonunun belirlenmesi için en uygun yaklaşım Wallabhan, Straughan ve Das (1989) tarafından verilendir. Bu çalışmada plak ve zemin ortamın toplam potansiyel enerjisi zeminde u = v = 0, w_z = w(x,y) Ø(z) olmak üzere (2.17a) da verildiği gibidir.

$$H = U_{plak} + U_{ze\min} + V_{yük} \tag{2.17a}$$

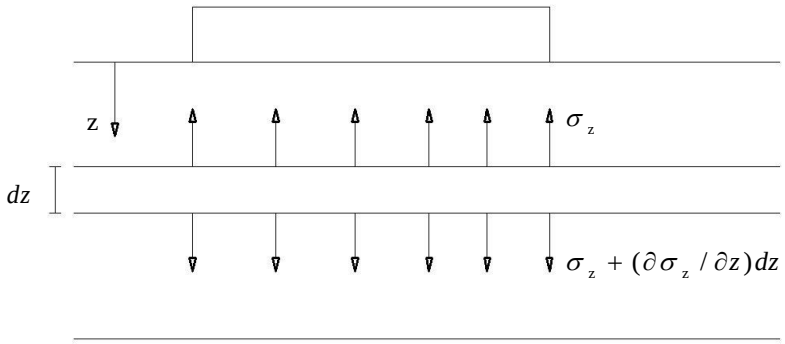
$$U_{plak} = \frac{D}{2}\iint_{\Omega}\left\{(\nabla^2 w)^2 - 2(1-\nu)\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right)^2\right]\right\}dxdy \tag{2.17b}$$

$$U_{ze\min} = \int_0^H \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2}\left\{\sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xz}\gamma_{xz} + \tau_{zy}\gamma_{zy}\right\}dxdydz \tag{2.17c}$$

$$V_{yük} = -\iint_{\Omega} \bar{q} w dxdy \tag{2.17d}$$

Bu ifadenin w(x,y) ye göre minimize edilmesinden yukarıda virtüel iş teoremi ile çıkartılan (2.14) ifadesi ve dolayısı ile (2.15b) ve (2.16) diferansiyel denge denklemi elde edilmiş, Ø(z) e göre minimize edilmesiyle temel boyutlarını ve yükleme şeklinin etkisini de içerecek şekilde Ø(z) değişimini veren sınır şartı diferansiyel denklemi elde edilmiştir.

Aynı diferansiyel denklemi z derinliğinde, dz kalınlığında kayma plağı gibi çalışan bir zemin tabakasının üst ve alt yüzeyine gelen zemin gerilmelerini dış etki, x,y nin farklı noktalarında bunların farklı olmasına bağlı olarak zemin tabakasında oluşacak τ_{zx} ve τ_{zy} kayma kuvvetlerini iç kuvvetler olarak düşünüp bu hali yükleme durumu alarak virtüel iş teoreminin uygulanmasıyla elde edebiliriz.



Şekil 2.3 dz Kalınlığındaki Zemin Tabakasına Etkiyen Yükler

z derinliğindeki tabakada dış yükler;

$$\sigma_z = \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} w(x,y) \frac{\partial Ø(z)}{\partial z} \tag{2.18}$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} w(x,y) \frac{\partial^2 Ø(z)}{\partial z^2} \tag{2.19}$$

iç kuvvetler ise;

$$\tau_{zx} = G_s \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} Ø(z) \tag{2.20}$$

$$\tau_{zy} = G_s \frac{\partial w(x,y)}{\partial y} Ø(z) \tag{2.21}$$

bağıntılarında bulunabilir. Virtüel şekil değiştirme durumu olarak temel yüzeyi altında sıfırdan farklı, temelden uzaklaştıkça sönerek sıfıra gitmesi şeklindeki sınır şartlarını sağlayan herhangi bir çökme yüzeyi seçilebilir. Özel olarak dış etkiler altındaki w(x,y) çökme yüzeyi bu şartları sağladığından tabakanın virtüel şekil değiştirme durumu alınırsa:

Dış kuvvetlerin işi;

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}w(x,y)\,dxdy \tag{2.22}$$

İç kuvvetlerin işi ;

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\tau_{zx}\frac{\partial w(x,y)}{\partial x}+\tau_{zy}\frac{\partial w(x,y)}{\partial y}\right\}dxdy \tag{2.23}$$

olur.

$$m=\frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}w^2(x,y)dxdy \tag{2.24}$$

$$n=G_s\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left(\frac{\partial w(x,y)}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial w(x,y)}{\partial y}\right)^2\right\}dxdy \tag{2.25}$$

Kısaltmaları yapılarak virtüel iş teoreminden

$$-m\frac{\partial^2 Ø(z)}{\partial z^2}+nØ(z)=0 \tag{2.26}$$

eşitliği bulunur. Ø(z) fonksiyonunun z=0 ve z=H deki sınır şartlarını ve (2.26) homojen diferansiyel denklemini sağlayan çözümü

$$Ø(z)=\frac{\mathrm{Sh}\,\gamma\left(1-\frac{z}{H}\right)}{\mathrm{Sh}\,\gamma} \tag{2.27}$$

olup, zemin yüzey parametresi diye adlandırılan γ boyutsuz katsayısı

$$\gamma^2=\frac{n}{m}=H^2\frac{G_s(1+\nu_s)(1-2\nu_s)}{E_s(1-\nu_s)}\frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left(\frac{\partial w(x,y)^2}{\partial x}\right)+\left(\frac{\partial w(x,y)^2}{\partial y}\right)\right\}dxdy}{\int\int w^2(x,y)dxdy} \tag{2.28a}$$

veya

$$\gamma^2 = \frac{H^2(1-2\nu_s)}{2(1-\nu_s)} \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right\}dxdy}{\int\int w^2 dxdy} \tag{2.28b}$$

olur.

Zemin yüzey parametresinin polar koordinatlarda değişimi ise

$$\gamma^2 == H^2 \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \frac{\int_{r=0}^{\infty}\int_{\theta=0}^{2\pi}\left\{\left(\frac{\partial w(r,\theta)^2}{\partial r}\right) + \left(\frac{\partial w(r,\theta)^2}{r\partial\theta}\right)\right\}rdrd\ \theta}{\int_{r=0}^{\infty}\int_{\theta=0}^{2\pi} w^2(r,\theta)rdrd\ \theta} \tag{2.29}$$

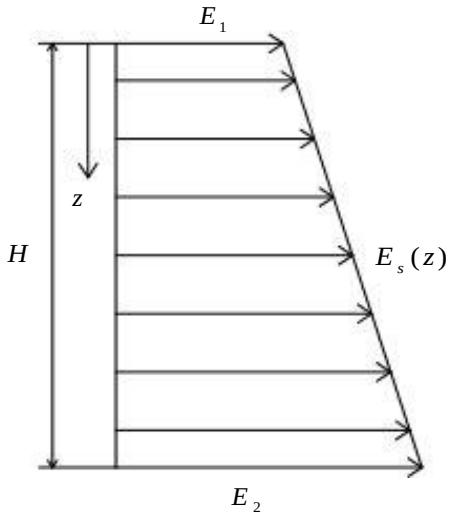
C ve $2C_T$ nin (2.11) ve (2.12) ifadelerinde Ø(z) fonksiyonunun (2.27) deki değeri konur ve integraller alınırsa, elastisite modülü sıkışabilen tabaka derinliği boyunca sabit zeminlerde

$$C = \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \frac{\gamma}{H} \frac{\left[Sh\,2\gamma + 2\gamma\right]}{4Sh^2\gamma} \tag{2.30}$$

$$2C_T = G_s \frac{H}{\gamma} \frac{\left[Sh\,2\gamma - 2\gamma\right]}{4Sh^2\gamma} \tag{2.31}$$

elastisite modülünün Şekil(2.4) gösterildiği gibi lineer değişmesi halinde, ifadeler,

$$E_s(z) = E_1 + (E_2 - E_1)\frac{z}{H} \tag{2.32}$$



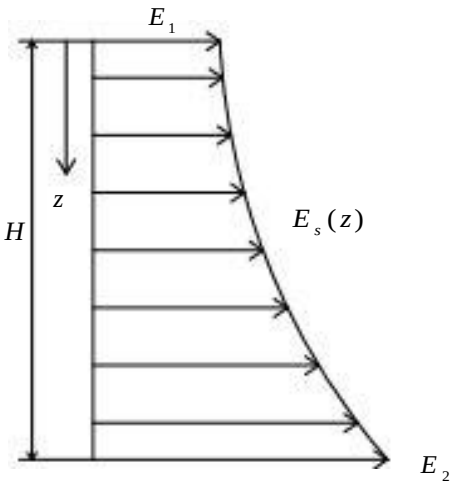
Şekil 2.4 Elastisite Modülünün Lineer Değişimi

$$C = \frac{(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \frac{2E_1\gamma\, Sinh\,(2\gamma) + 2\gamma^2(E_1+E_2) - (E_2-E_1)\left[1-Cosh\,(2\gamma)\right]}{8H Sinh^{\,2}\gamma} \tag{2.33}$$

$$2C_T = \frac{1}{(1+\nu_s)} \frac{H}{\gamma^2} \frac{2E_1\gamma\, Sinh\,(2\gamma) - 2\gamma^2(E_1+E_2) - (E_2-E_1)\left[1-Cosh\,(2\gamma)\right]}{16\, Sinh^{\,2}\gamma} \tag{2.34}$$

elastisite modülünün Şekil (2.5) de görüldüğü gibi kuadratik değişmesi durumunda, C ve $2C_T$ sabitleri

$$E_s(z) = E_1 + (E_2 - E_1)\frac{z^2}{H^2} \tag{2.35}$$



Şekil 2.5 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişimi

$$C = \frac{(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \frac{3\left[E_2 + E_1(2\gamma^2-1)\right]Sinh\,(2\gamma) + 2\gamma\left[E_2(2\gamma^2-3) + E_1(3+4\gamma^2)\right]}{24\,H\gamma Sinh^{\,2}\gamma} \tag{2.36}$$

$$2C_T = \frac{H}{(1+\nu_s)} \frac{3\left[E_2 + E_1(2\gamma^2-1)Sinh\,(2\gamma)\right] - \left[E_2(2\gamma^2+3) + E_1(4\gamma^2-3)\right]2\gamma}{48\,\gamma^3 Sinh^{\,2}\gamma} \tag{2.37}$$

şeklinde elde edilir.

C ve $2C_T$ ifadelerinden görüldüğü gibi zemin yatak ve kayma katsayıları temel altı zeminin elastik özellikleri ve sıkışabilen tabaka kalınlığı yanında γ katsayısına bağlıdır. γ katsayısı bu değerlerin yanında ayrıca temel boyutları, temel rijitliği, yükleme şekline bağlı olarak temel altında (2.15b) ve temel çevresindeki zemin bölgesinde (2.16) diferansiyel denge denklemlerini sağlayan w(x,y) çökme yüzeyi fonksiyonunun belirlenip, (2.29) daki pay ve paydadaki integrallerin temel altı ve çevresi için alınmasıyla bulunabilir. Buradan çözüme bir ardışık yaklaşımla ulaşabileceği anlaşılmaktadır.

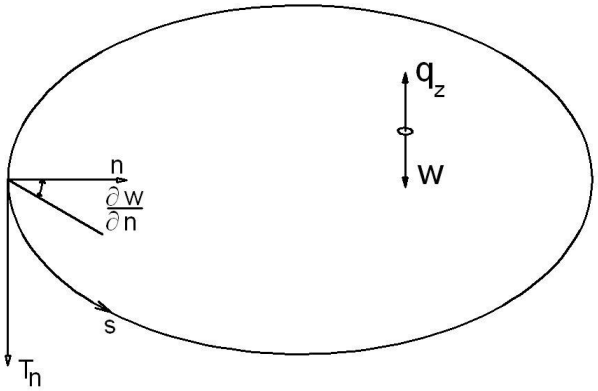
Önce γ ya bir değeri verilip, C ve $2C_T$ bulunacak, bu değerler için temel hesabı yapılıp çökme yüzeyi w(x,y) belirlenecektir. (2.29) ifadesinden yeni γ zemin yüzey parametresi hesaplanıp, bulunan yeni γ değeri için hesaplar tekrarlanacaktır. Ardışık iki adım arasındaki γ değeri birbirine yeterince yaklaşınca ($\gamma_{n+1} - \gamma_n \leq 0.001$) hesap sona erdirilebilir. Bu ardışık yaklaşımın oldukça hızlı olduğu, başlangıçta çok uygun olamayan bir γ değeri seçilmiş olsa bile ardışık adımlar arası γ ların farkının 5-6 adım sonrasında %0. l'den küçük hale geldiği yapılan örneklerde görülmüştür.

2.2 İki Parametreli Zemin Tepkilerinin Plak Sonlu Elemanlarda Göz Önüne Alınması

İki parametreli zemine oturan bir temel plağının w çökme yüzeyine bağlı olarak oluşan zemin tepkilerinin

$$q_z = Cw - 2C_T\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \tag{2.38}$$

yayılı yükü ile ifade edilebileceği bilinmektedir. Kapalı bir yüzeysel bölge içinde yüzeysel yayılı yük şeklindeki bu q_z tepkileri yanında bölge sınırları boyunca, zemin kayma parametresi nedeniyle, sınıra dik doğrultuda dönmeye bağlı olarak Şekil(2.6) deki gibi tepki kesme kuvvetlerinin de oluşacağı dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.6 Dönmelere Bağlı Olarak Zeminden Temele Gelen Tepkiler

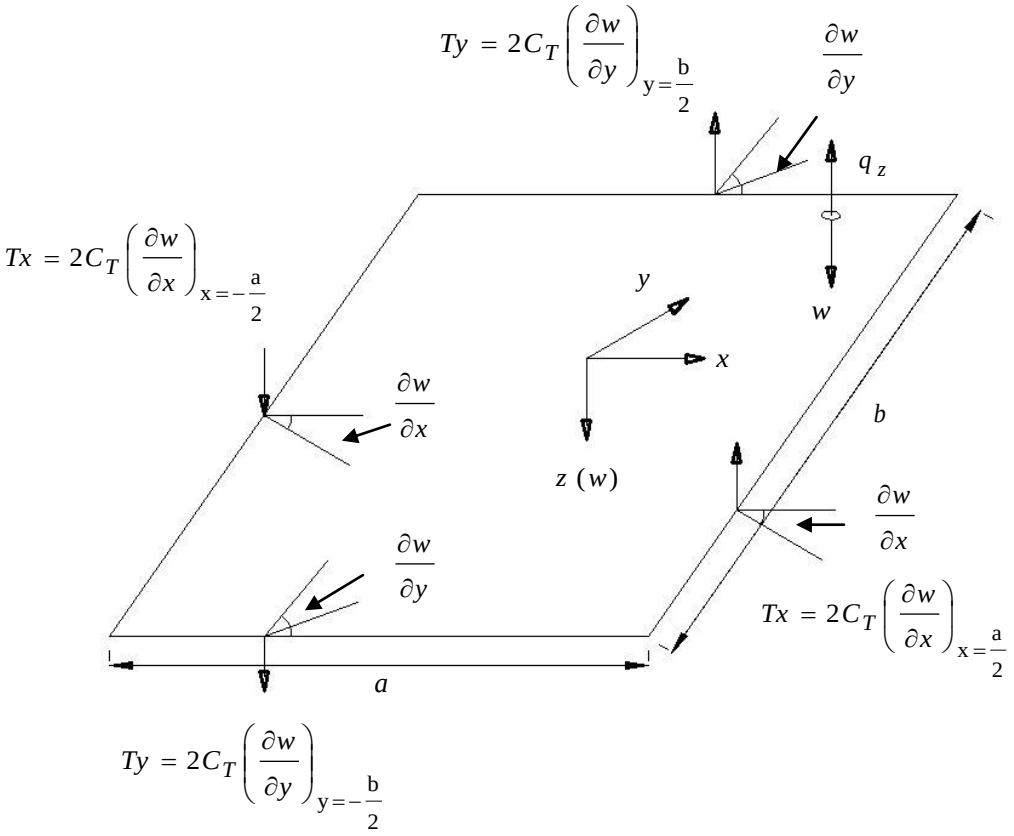
$$T_n = -2C_T\left(\frac{\partial w}{\partial n}\right) \tag{2.39}$$

Sonlu elemanların herhangi i. deplasman parametresi doğrultusunda oluşacak tesirler dış etkiler altında oluşan w şekil değiştirmesini yükleme durumu, i. deplasmanın birim değerine karşı gelen w_i çökme yüzeyini virtüel şekil değiştirme durumu olarak alıp virtüel iş teoreminin uygulanmasıyla elde edilebilir. Elemana dış kuvvet olarak gelen zemin tepkilerinin işi;

$$-\int\int q_z w_i dA \tag{2.40}$$

yüzeysel integrali yanında, eleman kenarları boyunca T_n kesme kuvvetlerinin w_i nin kenarlarda aldığı değerleriyle yaptığı işlerin toplamı olacaktır.

Örneğin (axb) boyutlarında dikdörtgen sonlu elemanda yüzeydeki ve sınırlardaki zemin tepkileri Şekil (2.7) de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Dikdörtgen Elemanda Yüzeydeki ve Sınırdaki Zemin Tepkileri

Buna göre zemin tepkilerinin toplam işi

$$Id_z = -C\int\int w_i w dA + 2C_T\int\int w_i\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)dA$$
$$-2C_T\int w_i\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=\frac{a}{2}}dy + 2C_T\int w_i\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=-\frac{a}{2}}dy$$
$$-2C_T\int w_i\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_{x=\frac{b}{2}}dx + 2C_T\int w_i\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_{x=-\frac{b}{2}}dx \qquad (2.41)$$

olur.

Bu ifadelerde

$$2C_T\int\int w_i\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}dA = 2C_T\int\left(w_i\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=\frac{a}{2}}dy - 2C_T\int\left(w_i\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=-\frac{a}{2}}dy - 2C_T\int\int w_i\frac{\partial w_i}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial x}dA$$

(2.42a)

$$2C_T \int\int w_i \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dA = 2C_T \int \left(w_i \frac{\partial w}{\partial y} \right)_{y=\frac{b}{2}} dx - 2C_T \int \left(w_i \frac{\partial w}{\partial y} \right)_{y=-\frac{b}{2}} dx$$

$$- 2C_T \int\int w_i \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} dA \qquad (2.42b)$$

Kısmi integraller alınıp ifadeler basitleştirilirse

$$Id_z = -C \int\int w_i w dA - 2C_T \int\int \left(\frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right) dA \qquad (2.43)$$

şeklini alıp zemin kayma parametresi C_T ye bağlı integralde, elastik yataklarıma parametresi C ye bağlı integralde olduğu gibi yalnız eleman yüzeyinde bir yüzeysel integrale dönüşmektedir.

Elemanın w şekil değiştirme yüzeyi düğüm noktası uç deplasmanlarına bağlı olarak

$$w = \sum w_i d_i \qquad (2.44)$$

toplamıyla ifade edildiği göz önüne alınır, eşitliğin sağ tarafında yalnız i. deplasman bileşeni doğrultusundaki P_i uç kuvveti kalacak şekilde, zemin tepkileri işi eşitliğin sağına geçirilir ve

$$C_{ij} = C \int\int w_i w_j dA \qquad (2.45)$$

$$C_{Tij} = 2C_T \int\int \left(\frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right) dA \qquad (2.46)$$

kısaltmalar yapılırsa, virtüel iş ifadesi

$$\sum_{j=1}^{n} k_{ij} d_j + \sum_{j=1}^{n} C_{ij} d_j + \sum_{j=1}^{n} C_{Tij} d_j = P_i \qquad (2.47)$$

olur.

Elemanın her bir serbestlik derecesi için benzer iş ifadesi yazılıp, bunların hepsi matris formunda gösterilirse

$$[K][d] + [C][d] + [C_T][d] = [P] \qquad (2.48)$$

bulunur.

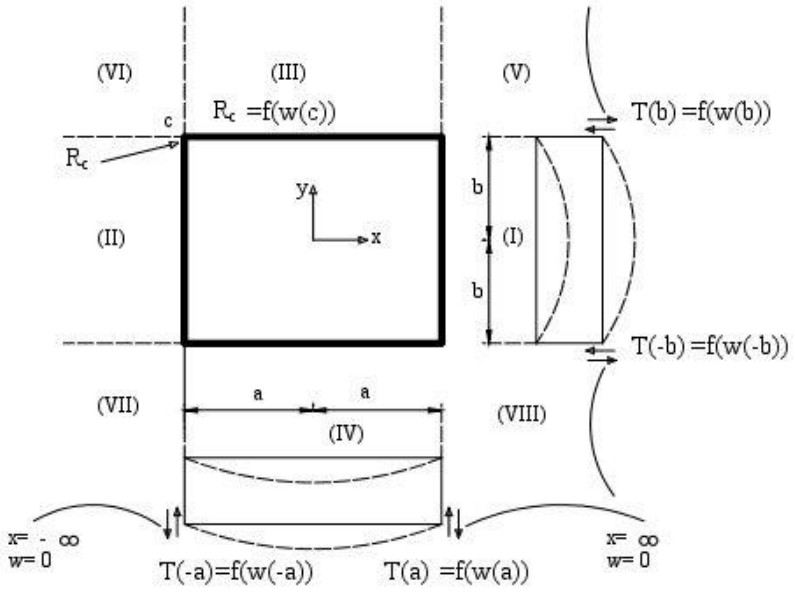
Bu bağıntılarda:

[C] : C elastik zemin yataklarıma katsayısına bağlı, (2.45) ifadesiyle terimleri hesaplanan eleman elastik yataklarıma matrisi

$[C_T]$: C_T zemin kayma parametresine bağlı,terimleri (2.46) formülü ile hesaplanan eleman zemin kayma matrisi olup, zemin etkilerinin plak rijitlik matrisine katkılarını göstermektedir.

2.3 Temel Dışı İki Parametreli Zemin Ortamının Sonlu Elemanlarla İdealize Edilmesi

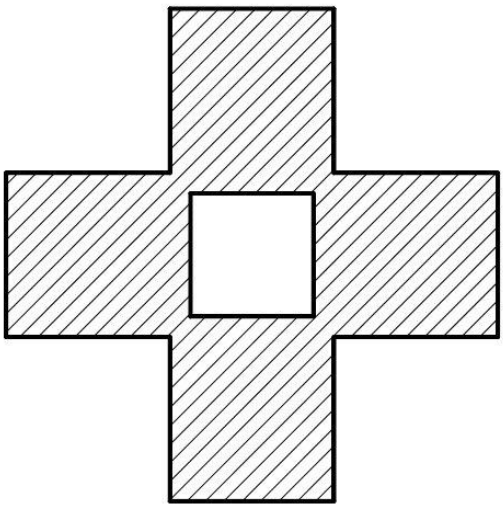
İki parametreli zemine oturan plak temellerin hesabı ile ilgili yapılmış çalışmalarda [3] temel dışında kalan zemin ortamının temel kenar ve köşelerine etkittiği tesirlerin bulunması bazı basitleştirici kabuller yapılarak yaklaşık olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.8 Temel Çevre Ortamının Bölgelere Ayrılması

Örneğin planda (2ax2b) boyutlu bir dikdörtgen temelin çevresindeki zemin ortamı 8 bölgeye ayırmakta, (I-IV) bölgesinden temele gelen tesirler komşu oldukları kenarlardaki çökme fonksiyonunun bağlı, kenarlar boyunca yayılı kesme kuvvetleri ile, (V-VIII) bölgelerinin etkisi temel köşe noktasındaki çökmeye bağlı köşe kuvvetleri ile göz önüne alınmaktadır.

Örneğin Şekil 2.9 gibi planda temel şeklinin dikdörtgenden farklı olması halinde veya temel içindeki boşluklardaki zemin ortamının etkilerinin ifadesi söz konusu olunca kenarlar ve köşeler için çıkarılmış redörler kısmen geçersiz olup yeni yaklaşık redör ifadelerinin tanımlanması gerekecektir.



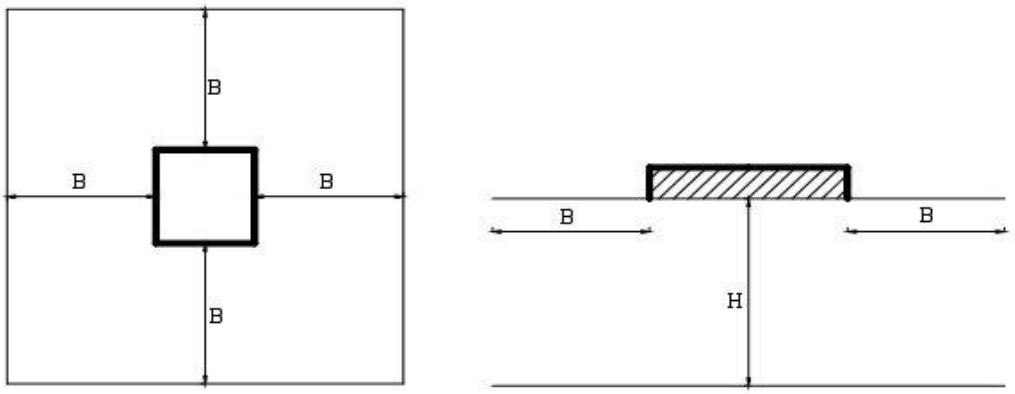
Şekil 2.9 Planda Düzgün Olmayan Radye Temel Örneği

Bu bakımdan bu çalışmada, temel dışındaki, temel etkilerinin yayıldığı ve zemin çökme yüzeyinin sıfırdan farklı olduğu çevre ortamı iki boyutlu zemin sonlu elemanlar ağına bölünecektir.

Yüzeysel dış yüklerin olmayıp temel kenarlarından tesirlere bağlı olarak

$$Cw(x,y) - 2C_T\left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2}\right) = 0 \qquad (2.49)$$

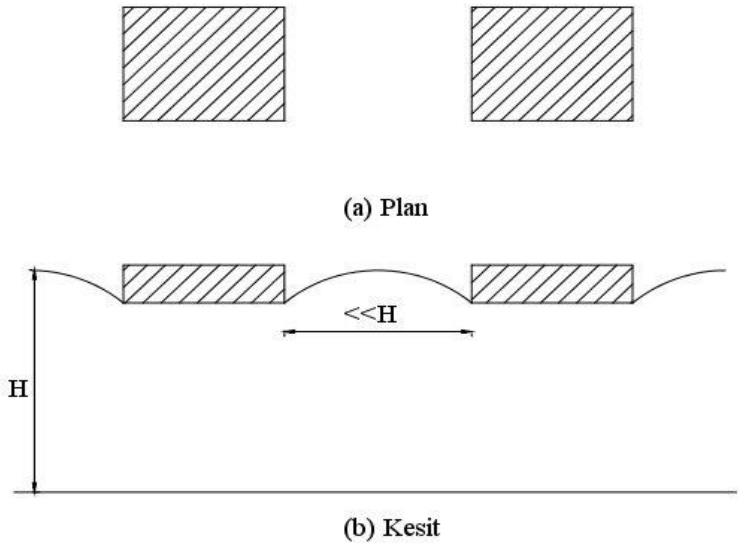
Diferansiyel denklemi sağlayacak şekilde çevre zemin ortamdaki çökmelerin değişimi bu zemin sonlu eleman idealizasyonu ile belirlenebilir.



Şekil 2.10 Radye Temel Çevre Genişliği

Sonlu eleman ağına bölünerek temel çevresi Şekil 2.10 daki genişliği elastik sıkışabilir zemin tabakası sınırlarına kadar veya çok büyükse çökme yüzeyinin yeter derecede sıfıra yakın olduğu uzaklığa kadar alınabilir. Son bölümde yapılan örneklerde zemin bölgesinin genişliği sıkışabilir zemin tabakası kalınlığı H mertebesinde seçilmiş ve bu durumda en dıştaki noktalarda temel altındaki çökmelerin çok küçük mertebelere düştüğü görülerek daha fazla genişletmenin gereksiz olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu şekilde temel dışı ortamının zemin sonlu elemanlarla idealizasyonu Şekil 2.11 deki gibi birbirine yakın temellerin mevcudiyeti halinde bu temellerin karşılıklı etkileşimi göz önüne alınması olanağı da sağlamaktadır.



Şekil 2.11 Yakın Temellerin Karşılıklı Etkileşimi

Temel plağı sonlu eleman çevre zemin ortamının sonlu eleman idealizasyonunda, çökmelerin elemanda her iki doğrultuda lineer değiştiği kabulü uygun görülmüştür. Bunun sonucu zemin sonlu elemanlarda deplasman yüzeyi yalnız köşe noktalarının çökmelerine bağlı olarak ifade edilebilir. Çevre zemin ortamının sonlu eleman idealizasyonunda her bir düğüm noktasında bir bilinmeyen olması temel plağı dışında çok sayıda düğüm noktası bulunması halinde bilinmeyen sayısının aşırı artışını da önlemiş olur.[d] zemin elemanının köşe noktalarının çökmeleri olmak üzere

$$w = \sum w_i d_i = [A_d]_z [d] \tag{2.50}$$

Şeklinde çökme yüzeyi belirleniyorsa, köşe noktalarındaki deplasmanlar doğrultusundaki uç kuvvetleri deplasmanlara

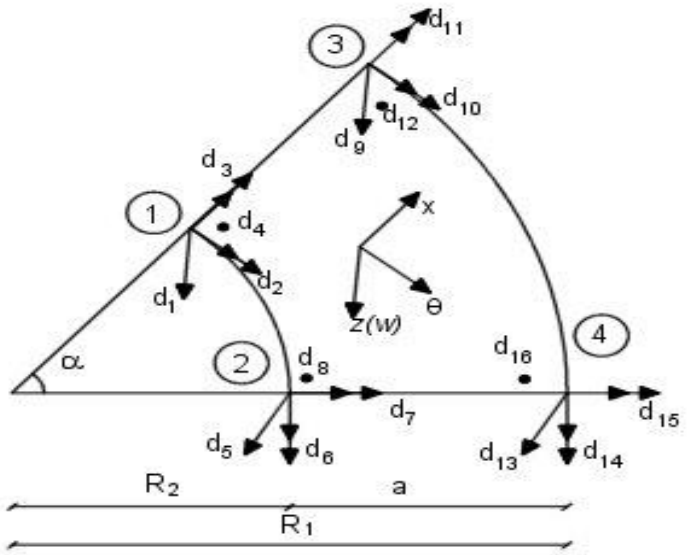
$$[C][d] + [C_T][d] = [P] \tag{2.51}$$

şeklinde bağlayan zemin sonlu eleman [C] ve $[C_T]$ matrisleri aynen temel plağında plak rijitlik matrisine zemin etkilerinin katkılarını gösteren [C] ve $[C_T]$ matrisleri gibi tanımlanıp, terimleri (2.45) ve (2.46) daki bağıntılarla hesaplanabilir. Esasen (2.51) eşitliği (2.48) de [K] rijitliğinin sıfır alınması haline karşı gelmektedir.

3. 16 SERBESTLİK DERECELİ HALKA SEKTÖRÜ SONLU ELEMAN

3.1. Eğilmeye Bağlı Şekil Değiştirme Yüzeyinin Belirlenmesi

Bu çalışmada kullanılan sonlu eleman [2] de Saygun tarafından geliştirilmiş olup her düğüm noktasında çökme, iki dönme ve burulma eğriliği $\frac{\partial^2 w}{\partial r(r\partial\theta)}$ bilinmeyen uç deplasmanı olarak alınmış toplam 16 serbestlik dereceli halka sektörü elemandaki büyüklükler açıklanacaktır. Bu elemanın düğüm noktalarının ve uç deplasmanlarının numaralandırılması Şekil (3.1) de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.1 Halka Sektörü Eleman

Bu elemanda eğilme deformasyonlarından dolayı w_e çökmeleri

$$w_e = \sum_{i=1}^{16} w_{ei} d_i \tag{3.1}$$

şeklinde gösterilebilir.

d_i deplasmanlarının birim değerleri için w çökme fonksiyonunun eleman yüzeyinde yayılışını belirleyen birim durum fonksiyonları 16 serbestlik dereceli dikdörtgen sonlu elemandakine benzer şekilde radyal ve açısal doğrultudaki fonksiyonların çarpımından oluşturulacaktır.

Radyal doğrultuda yardımcı fonksiyonlar olarak bu doğrultudaki x değişkeninin başlangıç noktası, halka sektörü elemanın ortalama yarıçapı seçilmesi halinde yani

$$x = r - \frac{R_1 + R_2}{2} \tag{3.2}$$

alınıp ve

$$\alpha = R_1 - R_2 \tag{3.3}$$

dönüşümü yapılarak (3.4) te tanımlanmış $f_i(x)$, $g_i(x)$ fonksiyonları aynen kullanılabilir.

$$f_1(x) = \frac{1}{2} + \frac{3x}{2a} - \frac{2x^3}{a^3} \qquad \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{a}{2} \rightarrow f_1 = 1, \quad \frac{df_1}{dx} = 0 \\ x = -\frac{a}{2} \rightarrow f_1 = 0, \quad \frac{df_1}{dx} = 0 \end{array} \right\} \tag{3.4a}$$

$$f_2(x) = \frac{1}{2} - \frac{3x}{2a} + \frac{2x^3}{a^3} \qquad \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{a}{2} \rightarrow f_2 = 0, \quad \frac{df_2}{dx} = 0 \\ x = -\frac{a}{2} \rightarrow f_2 = 1, \quad \frac{df_2}{dx} = 0 \end{array} \right\} \tag{3.4b}$$

$$g_1(x) = \frac{a}{8} + \frac{x}{4} - \frac{x^2}{2a} - \frac{x^3}{a^2} \qquad \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{a}{2} \rightarrow g_1 = 0, \quad \frac{dg_1}{dx} = -1 \\ x = -\frac{a}{2} \rightarrow g_1 = 0, \quad \frac{dg_1}{dx} = 0 \end{array} \right\} \tag{3.4c}$$

$$g_1(x) = -\frac{a}{8} + \frac{x}{4} + \frac{x^2}{2a} - \frac{x^3}{a^2} \qquad \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{a}{2} \rightarrow g_2 = 0, \quad \frac{dg_2}{dx} = 0 \\ x = -\frac{a}{2} \rightarrow g_2 = 0, \quad \frac{dg_2}{dx} = -1 \end{array} \right\} \tag{3.4d}$$

Açısal doğrultuda ise, elemanda rijit yer değiştirme kriterinin sağlanması, yani elemanın rijit öteleme ve dönmesi halinde eleman içinde her noktada deformasyon ve kesit zorlarının özdeş olarak sıfır olması için bu doğrultuda yardımcı fonksiyonlarda $Sin\,\theta, Cos\,\theta$ trigonometrik fonksiyonlarının bulunması zorunludur. Bu bakımdan (3.4) deki 3° polinomları yerine açısal doğrultuda değişim,

$$w = a_1 + a_2\theta + a_3 Cos\,\theta + a_4 Sin\,\theta \tag{3.5}$$

seçilecektir. $\theta = \pm\frac{\alpha}{2}$ uçlarında çökme ve dönmelerin ayrı, ayrı birim değerlerine karşı gelen açısal doğrultudaki yardımcı fonksiyonlar ve karşı geldikleri uç koşulları (3.6) de gösterilmiştir.

Fonksiyon	Uç Koşul	
$\varphi_1(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{Sin\,\theta - \theta.Cos\,\frac{\alpha}{2}}{2(Sin\,\frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2}Cos\,\frac{\alpha}{2})}$	$\theta = \frac{\alpha}{2} \rightarrow \begin{cases} \varphi_1 = 1 \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} = 0 \end{cases}$ $\theta = -\frac{\alpha}{2} \rightarrow \begin{cases} \varphi_1 = 0 \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} = 0 \end{cases}$	(3.6a)
$\varphi_2(\theta) = \frac{1}{2} - \frac{Sin\,\theta - \theta.Cos\,\frac{\alpha}{2}}{2(Sin\,\frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2}Cos\,\frac{\alpha}{2})}$	$\theta = \frac{\alpha}{2} \rightarrow \begin{cases} \varphi_2 = 0 \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} = 0 \end{cases}$ $\theta = -\frac{\alpha}{2} \rightarrow \begin{cases} \varphi_2 = 1 \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} = 0 \end{cases}$	(3.6b)
$\psi_1(\theta) = \frac{Cos\,(\theta) - Cos\,\frac{\alpha}{2}}{2Sin\,\frac{\alpha}{2}} - \frac{\theta.Sin\,\frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2}Sin\,(\theta)}{2(Sin\,\frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2}Cos\,\frac{\alpha}{2})}$	$\theta = \frac{\alpha}{2} \rightarrow \begin{cases} \psi_1 = 0 \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} = -1 \end{cases}$ $\theta = -\frac{\alpha}{2} \rightarrow \begin{cases} \psi_1 = 0 \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} = 0 \end{cases}$	(3.6c)

Fonksiyon Uç Koşul

$$\psi_2(\theta) = \frac{Cos(\theta) - Cos\frac{\alpha}{2}}{2Sin\frac{\alpha}{2}} - \frac{\theta.Sin\frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2}Sin(\theta)}{2(Sin\frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2}Cos\frac{\alpha}{2})} \qquad \begin{matrix} \theta = \frac{\alpha}{2} \rightarrow \begin{cases} \psi_2 = 0 \\ \frac{\partial \psi_2}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \\ \theta = -\frac{\alpha}{2} \rightarrow \begin{cases} \psi_2 = 0 \\ \frac{\partial \psi_2}{\partial \theta} = -1 \end{cases} \end{matrix} \qquad (3.6d)$$

Sonlu eleman şekil değiştirmesi birim durumların lineer kombinezonu olarak

$$w = [A_d]_e [d] \qquad (3.7)$$

yazılabilir. Burada $[A_d]_e$ matrisi (3.4) ve (3.6) yardımcı fonksiyonları cinsinden

$$\begin{aligned} [A_d]_e = [& \varphi_2(\theta) f_2(x) \quad \varphi_2(\theta) g_2(x) \quad - \quad \psi_2(\theta) r f_2(x) \quad \psi_2(\theta) r g_2(x) \\ & \varphi_1(\theta) f_2(x) \quad \varphi_1(\theta) g_2(x) \quad - \quad \psi_1(\theta) r f_2(x) \quad \psi_1(\theta) r g_2(x) \\ & \varphi_2(\theta) f_1(x) \quad \varphi_2(\theta) g_1(x) \quad - \quad \psi_2(\theta) r f_1(x) \quad \psi_2(\theta) r g_1(x) \\ & \varphi_1(\theta) f_1(x) \quad \varphi_1(\theta) g_1(x) \quad - \quad \psi_1(\theta) r f_1(x) \quad \psi_1(\theta) r g_1(x)] \end{aligned} \qquad (3.8)$$

şeklinde olması gerekir.

3.2. Eğilme Elemanı Rijitlik Matrisi Tanım ve Hesabı

Eleman deplasman yüzeyine bağlı kesit zorları ifadesini veren (3.9) ifadesi dairesel plaklarda

$$\begin{bmatrix} M_r \\ M_\theta \\ M_{r\theta} \end{bmatrix} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \\ -\left(\frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial w}{r \partial r}\right) \\ -2\frac{\partial w}{\partial r}\left(\frac{\partial w}{r \partial \theta}\right) \end{Bmatrix} \qquad (3.9)$$

şeklinde olup eleman için matris bağıntıları (3.10) ve (3.11) da ifade edilmiştir

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \tag{3.10a}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \tag{3.10b}$$

$$[\partial_e] = \begin{bmatrix} -\dfrac{\partial^2 w}{\partial r^2} \\ -\left(\dfrac{\partial^2 w}{r^2 \partial \theta^2} + \dfrac{\partial w}{r \partial r}\right) \\ -2\dfrac{\partial w}{\partial r}\left(\dfrac{\partial w}{r \partial \theta}\right) \end{bmatrix} \tag{3.10c}$$

$$[M] = [D][\partial_e] w_e \tag{3.11}$$

Elemanın uç kuvvetlerini d_i uç deplasmanlarına bağlayan $[k_e]$ matrisinin tanımı aynı kalmakta ancak eğriliklerin polar koordinatlardaki ifadelerine bağlı olarak

$$k_{ei,j} = D \int_{R_2}^{R_1} \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} \left\{ \frac{\partial^2 w_i}{\partial r^2}\frac{\partial^2 w_j}{\partial r^2} + \left(\frac{\partial^2 w_i}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial w_i}{r \partial r}\right)\left(\frac{\partial^2 w_j}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial w_j}{r \partial r}\right) \right.$$

$$+ \nu \left[\frac{\partial^2 w_i}{\partial r^2} + \left(\frac{\partial^2 w_j}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial w_i}{r \partial r}\right) + \frac{\partial^2 w_j}{\partial r^2}\left(\frac{\partial^2 w_i}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial w_i}{r \partial r}\right) \right]$$

$$\left. + 2(1-\nu)\left(\frac{\partial^2 w_i}{r \partial \theta \partial r} - \frac{\partial w_i}{r^2 \partial \theta}\right)\left(\frac{\partial^2 w_j}{r \partial \theta \partial r} - \frac{\partial w_j}{r^2 \partial \theta}\right) \right\} r \partial r \partial \theta \tag{3.12}$$

şeklinde yazılabilmektedir. Özellikle eleman kesitinin sabit olması halinde birim durumlardaki deplasman bileşenlerinin $[A_d]_e$ matrisinden alınacak ifadeleri x ve θ değişkenleri cinsinden yardımcı fonksiyonların çarpımlarından oluştuğu düşünülürse, her iki doğrultuda integrallerin hesaplanması ve bulunan rijitlik matrislerinin tablolaştırılması mümkündür.

Bulunacak bu ifadelerin oldukça karışık ve uzun formüllerle gösterilebilmesi nedeniyle bu çalışmada elemanın kesit yüksekliğinin değişken olabileceği de göz önüne alınarak rijitlik matrisinin sayısal integrasyon yoluyla hesabı tercih edilmiştir. Gauss integral noktalarından yaralanarak yapılacak sayısal integrasyonda (3.12) ifadesi

$$k_{ei,j} = \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} H_n H_m \frac{\alpha\alpha r}{4} D_{(n,m)} \left\{ \frac{\partial^2 w_i}{\partial r^2}\frac{\partial^2 w_j}{\partial r^2} + \left(\frac{\partial^2 w_i}{r^2\partial\theta^2} + \frac{\partial w_i}{r\partial r}\right)\left(\frac{\partial^2 w_j}{r^2\partial\theta^2} + \frac{\partial w_j}{r\partial r}\right) \right.$$

$$+ v\left[\frac{\partial^2 w_i}{\partial r^2} + \left(\frac{\partial^2 w_j}{r^2\partial\theta^2} + \frac{\partial w_j}{r\partial r}\right) + \frac{\partial^2 w_j}{\partial r^2}\left(\frac{\partial^2 w_i}{r^2\partial\theta^2} + \frac{\partial w_i}{r\partial r}\right)\right]$$

$$\left. + 2(1-v)\left(\frac{\partial^2 w_i}{r\partial\theta\partial r} - \frac{\partial w_i}{r^2\partial\theta}\right)\left(\frac{\partial^2 w_j}{r\partial\theta\partial r} - \frac{\partial w_j}{r^2\partial\theta}\right)\right\} \qquad (3.13)$$

şeklinde NxM noktada hesaplanmış deformasyon terimlerinin H_n ,H_m, ağırlıklı toplamlarının alınmasına dönüşmektedir. Burada N radyal doğrultuda, M açısal doğrultuda alınacak nokta sayısını göstermektedir.

Tablo (3.1) de verilen integral noktaları yerlerinin boyutsuz değerler olduğu göz önüne alınarak her iki doğrultuda

Tablo 3.1 Gauss İntegral Noktaları ve Ağırlık Fonksiyonları

$$\int_{-1}^{1} f(\xi)d\xi = \sum_{i=1}^{N} H_i f(\xi_i)$$

N	$\xi_{i\,(i=1,N)}$	H_i (i=1,N)
2	±0.57735027	1
3	±0.77459667 0	0.55555556 0.88888889
4	±0.86113631 ±0.33998104	0.34785485 0.65214515
5	±0.90617985 ±0.53846931 0	0.23692689 0.47862867 0.56888889
6	±0.93246951 ±0.66120939 ±0.23861919	0.17132449 0.36076157 0.46791393

$$x_n = \frac{a}{2}\xi_n \quad , \quad r_n = \frac{R_1 + R_2}{2} + x_n \quad , \quad \theta_m = \frac{a}{2}\xi_{mn} \qquad (3.14)$$

boyutlu koordinatlarına geçip birim durum fonksiyonları ve bunların türev fonksiyonlarından integrasyon noktalarında deformasyon bileşenleri gerekmektedir. Elemanda kesit yüksekliği değişken ise eleman herhangi bir noktadaki yükseklik köşe noktalarının yüksekliklerine bağlı olarak (3.7) ye benzer bir fonksiyonla tanımlanıp n,m noktasında h ve $D_{(n,m)}$ nin bu fonksiyon yardımıyla nümerik hesaplanmış değeri (3.13) de kullanılmalıdır.

3.3 Elemanın Kesit Zoru – Uç Deplasmanı Bağıntıları

Sistemin belirli dış etkiler altında çözümü yapılarak elemanlarda düğüm noktası deplasmanları bulunduktan sonra her noktada eğilme şekil değiştirmelerinden oluşan eğrilikler;

$$[\chi]=\begin{bmatrix}\chi_r\\ \chi_\theta\\ 2\tau\end{bmatrix}=[\partial_e][w]=\begin{bmatrix}-\dfrac{\partial^2}{\partial r^2}\\ -\left(\dfrac{\partial^2}{r^2\partial\theta^2}+\dfrac{\partial}{r\partial r}\right)\\ -2\dfrac{\partial^2}{r\partial r\partial\theta}-\dfrac{\partial}{r^2\partial\theta}\end{bmatrix}w \tag{3.15}$$

$$[\chi]_d=[B_d][d] \tag{3.16}$$

şeklinde hesaplanabilir. Buradaki $[B_d]$ matrisinin her bir kolonu elemanın serbestlik derecelerinden birinin birim değerlerinde köşe noktalarında oluşacak eğrilikleri göstermektedir. Düğüm noktalarında oluşan eğilme ve burulma momentleri ise

$$[M_d]=[D][B_d][d] \tag{3.17}$$

matris çarpımı ile geçilebilir.

Bu bağıntılar kullanılarak elde edilen eğriliklerden eğilme şekil değiştirmelerinden dolayı oluşan eleman deformasyon matrisi (3.18) daki kısaltmalar yapılarak Tablo (3.4) de gösterilmiştir.

$$e_1=\frac{Sin\ \dfrac{\alpha}{2}}{2\left(Sin\ \dfrac{\alpha}{2}-\dfrac{\alpha}{2}Cos\ \dfrac{\alpha}{2}\right)}\ ,\ e_2=\frac{1}{2}Cotg\ \frac{\alpha}{2}+\frac{\alpha}{2}e_1\ ,\ e_3=-\frac{1}{2}Cotg\ \frac{\alpha}{2}+\frac{\alpha}{2}e_1 \tag{3.18}$$

Tablo 3.2 Halka Sektörü Elemanı Deformasyon Matrisi

		$[d]_1$				$[d]_2$				$[d]_3$				$[d]_4$			
DN	$[\chi]$	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	D_7	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{15}	d_{16}
1	χ_r	$\frac{6}{a^2}$	$\frac{-4}{a}$	0	0	0	0	0	0	$\frac{-6}{a^2}$	$\frac{-2}{a}$	0	0	0	0	0	0
	χ_θ	$\frac{e_1}{R_2^2}$	$\frac{1}{R_2}$	$\frac{e_2}{R_2}$	0	$\frac{-e_1}{R_2^2}$	0	$\frac{e_3}{R_2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2τ	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	χ_r	0	0	0	0	$\frac{6}{a^2}$	$\frac{-4}{a}$	0	0	0	0	0	0	$\frac{-6}{a^2}$	$\frac{-2}{a}$	0	0
	χ_θ	$\frac{-e_1}{R_2^2}$	0	$\frac{e_3}{R_2}$	0	$\frac{e_1}{R_2^2}$	$\frac{1}{R_2}$	$\frac{-e_2}{R_2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2τ	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	χ_r	$\frac{-6}{a^2}$	$\frac{-2}{a}$	0	0	0	0	0	0	$\frac{6}{a^2}$	$\frac{-4}{a}$	0	0	0	0	0	0
	χ_θ	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{e_1}{R_1^2}$	$\frac{1}{R_1}$	$\frac{e_2}{R_1}$	0	$\frac{-e_1}{R_1^2}$	0	$\frac{e_3}{R_1}$	0
	2τ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0
4	χ_r	0	0	0	0	$\frac{-6}{a^2}$	$\frac{-2}{a}$	0	0	0	0	0	0	$\frac{6}{a^2}$	$-\frac{4}{a}$	0	0
	χ_θ	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{-e_1}{R_1^2}$	0	$\frac{e_3}{R_1}$	0	$\frac{e_1}{R_1^2}$	$\frac{1}{R_1}$	$\frac{-e_2}{R_1}$	0
	2τ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2

3.4 16 Serbestlik Dereceli Halka Sektörü Sonlu Elemanda [C] ve [C_T] Matrisleri

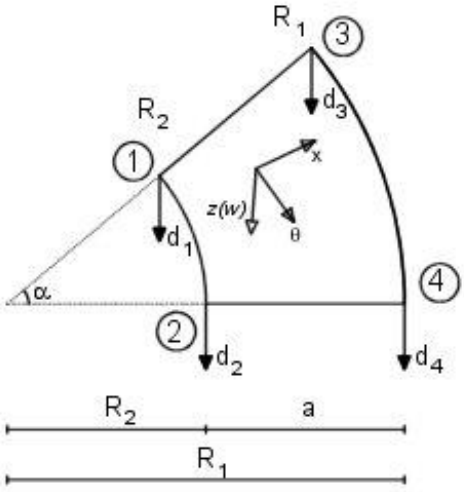
Bölüm 3 te geliştirilen ve kayma deformasyonlarının etkisini de içeren 16 serbestlik dereceli eğrisel dörtgen plak elemanda [C] ve [C_T] matrisleri, N radyal doğrultuda, M açısal doğrultuda alınacak Gauss integral noktaları sayısını göstermek üzere (2.45) ve (2.46) ifadeleri nümerik integrasyonla elde edilebilir.

$$C_{i,j} = C(n.m)\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} H_n H_m \frac{\alpha\alpha\, r}{4}\left\{w_i w_j\right\} \tag{3.19}$$

$$C_{Ti,j} = 2C_T(n.m)\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} H_n H_m \frac{\alpha\alpha\, r}{4}\left\{\frac{\partial w_i}{\partial r}\frac{\partial w_j}{\partial r} + \frac{\partial w_i}{r\partial\theta}\frac{\partial w_j}{r\partial\theta}\right\} \tag{3.20}$$

4. 4 SERBESTLİK DERECELİ EĞRİSEL ZEMİN SONLU ELEMAN

Şekil (4.1) deki (iki parametreli) eğrisel zemin sonlu elemanın [1] şekil değiştirme yüzeyi köşe noktalarının düşey deplasmanlarına bağlı olarak (4.1) gibi tanımlanırsa,



Şekil 4.1 4 Serbestlik Dereceli Eğrisel Zemin Sonlu Eleman

$$w = \sum w_i d_i = [A_d]_z [d] \tag{4.1}$$

Bu formüllerdeki $[Ad]_z$ matrisi radyal doğrultuda lineer açısal doğrultuda ise lineer eşdeğer $\lambda_{ii}(\theta)$ fonksiyonunun çarpımı şeklinde tanımlanırsa

$$[A_d]_z = [\lambda_2(\theta) l_2(x) \quad \lambda_1(\theta) l_2(x) \quad \lambda_2(\theta) l_1(x) \quad \lambda_1(\theta) l_1(x)] \tag{4.2}$$

Fonksiyon Uç Koşulu

$$l_1(x)=\frac{1}{2}+\frac{x}{a} \qquad \left\{\begin{array}{l} x=\frac{a}{2}\rightarrow l_1=1 \\ x=-\frac{a}{2}\rightarrow l_1=0 \end{array}\right\} \qquad (4.3a)$$

$$l_2(x)=\frac{1}{2}-\frac{x}{a} \qquad \left\{\begin{array}{l} x=\frac{a}{2}\rightarrow l_2=0 \\ x=-\frac{a}{2}\rightarrow l_2=1 \end{array}\right\} \qquad (4.3b)$$

$$\lambda_1=\frac{1}{2}+\frac{\sin\theta}{2.Sin\frac{\alpha}{2}} \qquad \left\{\begin{array}{l} \theta=\frac{\alpha}{2}\rightarrow \lambda_1=1 \\ \theta=-\frac{\alpha}{2}\rightarrow \lambda_1=0 \end{array}\right\} \qquad (4.4a)$$

$$\lambda_2=\frac{1}{2}-\frac{\sin\theta}{2Sin\frac{\alpha}{2}} \qquad \left\{\begin{array}{l} \theta=\frac{\alpha}{2}\rightarrow \lambda_2=0 \\ \theta=-\frac{\alpha}{2}\rightarrow \lambda_2=1 \end{array}\right\} \qquad (4.4b)$$

Bu birim durum fonksiyonlarına (4.5) integralinin polar koordinatlardaki (4.6) uygulanarak

$$C_{i,j}=C\int\int w_i w_j dA \qquad (4.5)$$

$$C_{i,j}=C\int_{R_2}^{R_1}\int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} w_i w_j r dr d\theta \qquad (4.6)$$

yataklanma matrisinin terimleri Tablo (4.1) de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Eğrisel Zemin Elemanın Elastik Yataklanma Matrisi

$$C_{11} = C\left\{\frac{(R_1 - R_2)(R_1 + 3R_2)}{48}\left(\alpha + \frac{\alpha - Sin\ \alpha}{1 - Cos\ \alpha}\right)\right\} = C_{22}$$

$$C_{12} = C\left\{\frac{(R_1 - R_2)(R_1 + R_2)}{48}\left(\alpha + \frac{Sin\ \alpha - \alpha}{1 - Cos\ \alpha}\right)\right\}$$

$$C_{13} = C\left\{\frac{R^2{}_1 - R^2{}_2}{48}\left(\alpha + \frac{\alpha - Sin\ \alpha}{1 - Cos\ \alpha}\right)\right\} = C_{24}$$

$$C_{14} = C\left\{\frac{R^2{}_1 - R^2{}_2}{48}\left(\alpha + \frac{Sin\ \alpha - \alpha}{1 - Cos\ \alpha}\right)\right\} = C_{23}$$

$$C_{33} = C\left\{\frac{(R_1 - R_2)(3R_1 + R_2)}{48}\left(\alpha + \frac{\alpha - Sin\ \alpha}{1 - Cos\ \alpha}\right)\right\} = C_{44}$$

$$C_{34} = C\left\{\frac{(R_1 - R_2)(3R_1 + R_2)}{48}\left(\alpha + \frac{Sin\ \alpha - \alpha}{1 - Cos\ \alpha}\right)\right\}$$

(4.7) integralinin polar koordinatlardaki karşılığı (4.8) uygulanarak kayma parametresi matrisi Tablo (4.2) de gösterilmiştir.

$$C_{Ti,j} = 2C_T \int_{R\,2}^{R\,1} \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} \left\{\frac{\partial w_i}{\partial x}\frac{\partial w_j}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y}\frac{\partial w_j}{\partial y}\right\} dA \qquad (4.7)$$

$$C_{Ti,j} = 2C_T \int_{R\,2}^{R\,1} \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} \left\{\frac{\partial w_i}{\partial r}\frac{\partial w_j}{\partial r} + \frac{\partial w_i}{r\partial \theta}\frac{\partial w_j}{r\partial \theta}\right\} r dr d\theta \qquad (4.8)$$

Tablo 4.2 Eğrisel Zemin Elamanının Kayma Parametresi Matrisi

$$C_{T\,11} = 2C_T\left\{\frac{R_1+R_2}{8(R_1-R_2)}\left(\alpha+\frac{\alpha-Sin\,\alpha}{(1-Cos\,\alpha)}\right)+\frac{\alpha+Sin\,\alpha}{2(1-Cos\,\alpha)}\left(\frac{R_1{}^2}{(R_1-R_2)^2}\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)+\frac{R_2-3R_1}{2(R_1-R_2)}\right)\right\}$$

$$C_{T\,12} = 2C_T\left\{\frac{R_1+R_2}{8(R_1-R_2)}\left(\alpha+\frac{Sin\,\alpha-\alpha}{(1-Cos\,\alpha)}\right)-\frac{\alpha+Sin\,\alpha}{2(1-Cos\,\alpha)}\left(\frac{R_1{}^2}{(R_1-R_2)^2}\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)+\frac{R_2-3R_1}{2(R_1-R_2)}\right)\right\}$$

$$C_{T\,13} = 2C_T\left\{-\frac{R_1+R_2}{8(R_1+R_2)}\left(\alpha+\frac{\alpha-Sin\,\alpha}{(1-Cos\,\alpha)}\right)+\frac{\alpha+Sin\,\alpha}{2(1-Cos\,\alpha)}\left(-\frac{R_1R_2}{(R_1-R_2)^2}\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)+\frac{R_1+R_2}{2(R_1-R_2)}\right)\right\}$$

$$C_{T\,14} = 2C_T\left\{-\frac{R_1+R_2}{8(R_1+R_2)}\left(\alpha+\frac{Sin\,\alpha-\alpha}{(1-Cos\,\alpha)}\right)+\frac{\alpha+Sin\,\alpha}{2(1-Cos\,\alpha)}\left(\frac{R_1R_2}{(R_1-R_2)^2}\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)-\frac{R_1+R_2}{2(R_1-R_2)}\right)\right\}$$

$$C_{T\,33} = 2C_T\left\{\frac{R_1+R_2}{8(R_1-R_2)}\left(\alpha+\frac{\alpha-Sin\,\alpha}{(1-Cos\,\alpha)}\right)+\frac{\alpha+Sin\,\alpha}{2(1-Cos\,\alpha)}\left(\frac{R_2{}^2}{(R_1-R_2)^2}\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)+\frac{R_1-3R_2}{2(R_1-R_2)}\right)\right\}$$

$$C_{T\,34} = 2C_T\left\{\frac{R_1+R_2}{8(R_1-R_2)}\left(\alpha+\frac{Sin\,\alpha-\alpha}{(1-Cos\,\alpha)}\right)-\frac{\alpha+Sin\,\alpha}{2(1-Cos\,\alpha)}\left(\frac{R_2{}^2}{(R_1-R_2)^2}\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)+\frac{R_1-3R_2}{2(R_1-R_2)}\right)\right\}$$

$$C_{T\,22} = C_{T\,11}, \qquad C_{T\,23} = C_{T\,14}, \qquad C_{T\,24} = C_{T\,13}, \qquad C_{T\,44} = C_{T\,33}$$

Bölüm 3 te Halka sektörü plak sonlu eleman için çıkartılmış olan (3.12) zemin sonlu eleman için

$$\begin{bmatrix} Tr \\ T_\theta \end{bmatrix} = 2C_T \begin{bmatrix} \dfrac{\partial}{\partial r} \\ \dfrac{\partial}{r\partial\theta} \end{bmatrix} w_k \tag{4.9}$$

yazılarak eğrisel zemin sonlu elemanda deformasyon matrisi

$$a = R_1 - R_2 \tag{4.10}$$

$$b = Cotg\ \frac{\alpha}{2} \tag{4.11}$$

dönüşümleri yapılarak Tablo (4.3) daki gibi elde edilir.

Tablo 4.3 Eğrisel Zemin Eleman Deformasyon Matrisi

		d_1	d_2	d_3	d_4
1	$\frac{\partial w}{\partial r}$	$-\frac{1}{a}$	0	$\frac{1}{a}$	0
	$\frac{\partial w}{r\partial \theta}$	$-\frac{b}{2R_2}$	$\frac{b}{2R_2}$	0	0
2	$\frac{\partial w}{\partial r}$	0	$-\frac{1}{a}$	0	$\frac{1}{a}$
	$\frac{\partial w}{r\partial \theta}$	$-\frac{b}{2R_2}$	$\frac{b}{2R_2}$	0	0
3	$\frac{\partial w}{\partial r}$	$-\frac{1}{a}$	0	$\frac{1}{a}$	0
	$\frac{\partial w}{r\partial \theta}$	0	0	$-\frac{b}{2R_1}$	$\frac{b}{2R_1}$
4	$\frac{\partial w}{\partial r}$	0	$-\frac{1}{a}$	0	$\frac{1}{a}$
	$\frac{\partial w}{r\partial \theta}$	0	0	$-\frac{b}{2R_1}$	$\frac{b}{2R_1}$

Zemin elemanda köşe noktalarındaki kesme kuvvetlerim bulmak için deformasyon matrisinin terimlerim $2C_T$ ile çarpmak gerekir.

4.1 γ Zemin Yüzey Parametresinin Hesabı

Sıkışabilir zemin tabakasının yüksekliği ve elastik sabitlerine bağlı olarak C ve C_T katsayılarının tayini için gerekli γ Zemin Yüzey Parametresinin de açıklanan ardışık yaklaşım yöntemiyle belirlenmesi sırasında, zeminin hesaplanmış bir şekil değiştirme yüzeyine karşı gelen yeni γ katsayısının (2.28- 2.29) ifadesiyle bulunması gerekmektedir.

Bu ifadedeki pay ve paydaya giren integrallerin gerek temel plağının, gerekse temel çevre zemin bölgesinin idealizasyonunda ortaya çıkan sonlu elemanların her birinde ayrı, ayrı bulunup tüm sistem için integral değerlerine bütün elemanlardan gelen katkıların toplanmasıyla geçilebilir.

Bir eleman yüzeyinde çökmenin ve x,y değişkenlerine göre türevlerin değişimi

$$w = \sum_{i=1}^{n} w_i d_i \tag{4.12}$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y}\right) d_i \tag{4.13}$$

şeklinde elemanın düğüm noktaları serbestlikleri cinsinden bilindiğine göre,

$$\int\int w^2 dA = \int\int \left(\sum_{i=1}^{n} w_i d_i\right)\left(\sum_{j=1}^{n} w_j d_j\right) dA = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \left(\int\int w_i w_j dA\right) d_i d_j \tag{4.14}$$

$$\int\int \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right] dA = \int\int \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial w_i}{\partial x} d_i\right)\left(\sum_{j=1}^{n} \frac{\partial w_j}{\partial x} d_j\right) + \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial w_i}{\partial y} d_i\right)\left(\sum_{j=1}^{n} \frac{\partial w_j}{\partial y} d_j\right)\right] dA \tag{4.15}$$

olur. Bu ifadelerdeki düğüm noktaları serbestliklerinin birim değerlerine karşı çökme ve türevleri fonksiyonlarının karşılıklı çarpımlarının eleman yüzeyinde integralleri, [C] ve [C_T] matrisleri terimleri (2.45) ve (2.46) daki C ve 2C_T sabitleri ile çarpılmamış değerlerinden farklı değildir.

Buna göre bir eleman için söz konusu integraller elemanın esasen hesaplanmış [C] ve [C_T] matrisleri yardımı ile

$$\int\int w^2 dA = \frac{1}{C}[d]^T [C][d] \tag{4.16}$$

$$\int\int \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right] dA = \frac{1}{2C_T}[d]^T [C_T][d] \tag{4.17}$$

şeklinde bulunabilir.

Tüm sistem için bütün sonlu elemanlardan gelen katkıların cebrik toplamı alınarak

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]dxdy = \sum_{el}\frac{1}{C}[d]^T[C][d] \tag{4.18}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]dxdy = \sum_{el}\frac{1}{2C_T}[d]^T[C_T][d] \tag{4.19}$$

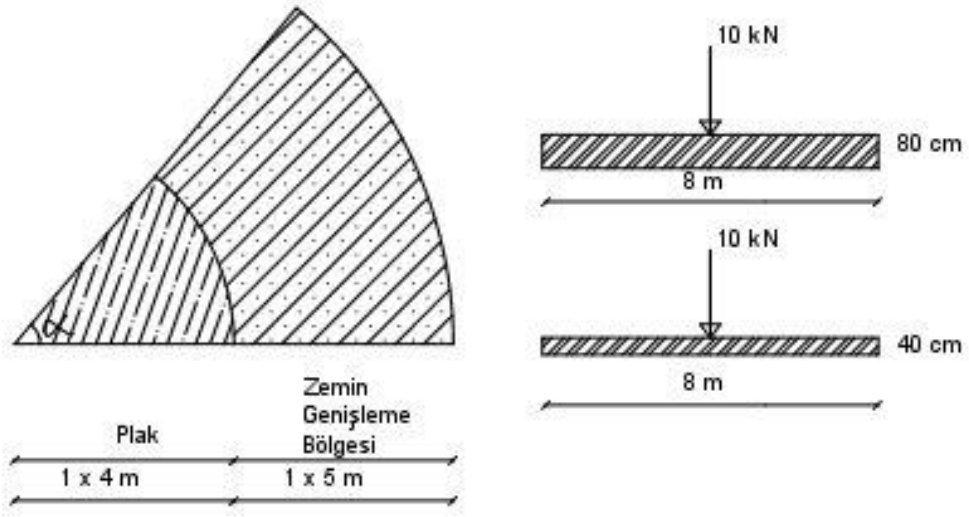
elde edilir. Sonuç olarak bu bağıntılar yardımı ile zemin yüzey parametresini esasen programda mevcut olan eleman matrisleri yardımı ile ek bir algoritma gerek kalmadan elde etmek mümkün olmaktadır.

5. DAİRESEL TEMELLER İLE İLGİLİ SAYISAL ÖRNEKLER

5.1. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde 5 m'lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali

Şekilde kesiti görülen iki parametreli zemine oturan dairesel temelin hesabı yapılacaktır.

Plaklarda ν = 0.167 olarak alınmıştır. 4 m yarıçaplı,40 ve 80cm kalınlıktaki elemanın merkezine P = 10 kN' luk tekil yük etkimesi hali göz önüne alınarak hesap yapılmıştır.



Şekil 5.1 Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri

Dönel simetri şartı kullanılarak sistemin merkez açısı $\alpha = 72^{0}$ olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünmüştür.

Dönel simetri sınır koşulları;

$$w_i \neq 0\,, \qquad \frac{\partial w}{\partial r} \neq 0\,, \qquad \frac{\partial w}{r\partial \theta} = 0\,, \qquad \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial w}{r\partial \theta}\right) = 0 \tag{5.1}$$

Bu örnekte sıkışabilir zemin tabaka kalınlığı H= 5 m olarak seçilmiş ve plak sonlu elemanın yanına ilave edilerek şekilde görüldüğü gibi zemin genişleme bölgesi 1 m'lik sonlu eleman ağları ile modellenmiştir.

Zeminde E_1= 1000, E_2= 5000, ν = 0.25 seçilerek, zemin elastisite modülünün sabit, lineer ve Kuadratik (2^0parabol) olması durumları için hesap tekrar edilmiştir.

Halka sektörü elemanlarda standart formülle elde edilmiş [C] ve [C_T] matrislerinde R_2= 0 iken bazı belirsizlikler olduğundan merkeze birleşen sonlu elemanlarda R_2= 0 yerine çok küçük bir değer olarak R_2= 0.001 alınmıştır.

Ayrıca yalnız C yatak katsayısı kullanılarak temel plağının $\frac{d}{r} = 0{,}1$ olması durumu için Winkler tipi zemine oturması halinde çözüm yapılmış, bu hale ait çökme ve moment değişimlerinin karşılaştırma yapılabilmesi için diyagramlarla gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi zeminin iki parametreli alınması çökmelerin azalttığı, çevre zeminin temel sınırında oluşturduğu kuvvetleri önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

$\frac{d}{r} = 0{,}1$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
5,0461	847,0975	138,1195
4,9493	595,7610	100,7313
4,9448	594,5606	100,9350
4,9479	594,4184	100,9524
4,9479	594,4028	100,9619

Tablo 5.2 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
4,9728	626,07	113,22
4,9723	646,3440	108,4575
4,9723	646,2968	108,4680

Tablo 5.3 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
4,9705	770,7514	165,0987
5,0385	838,2270	140,7916
5,0454	846,2069	138,3832
5,0461	847,0975	138,1195
5,0461	847,1055	138,1171

$\frac{d}{r} = 0,2$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.4 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
4,3301	594,4028	100,9619
4,2553	521,3517	115,1640
4,2444	511,4648	117,4051
4,2442	511,2985	117,4435
4,2442	511,2960	117,4441

Tablo 5.5 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
4,3601	646,2968	108,4680
4,2951	581,7673	125,9852
4,2879	575,1661	128,1722
4,2871	574,3577	128,4464
4,2870	574,3488	128,4493

Tablo 5.6 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

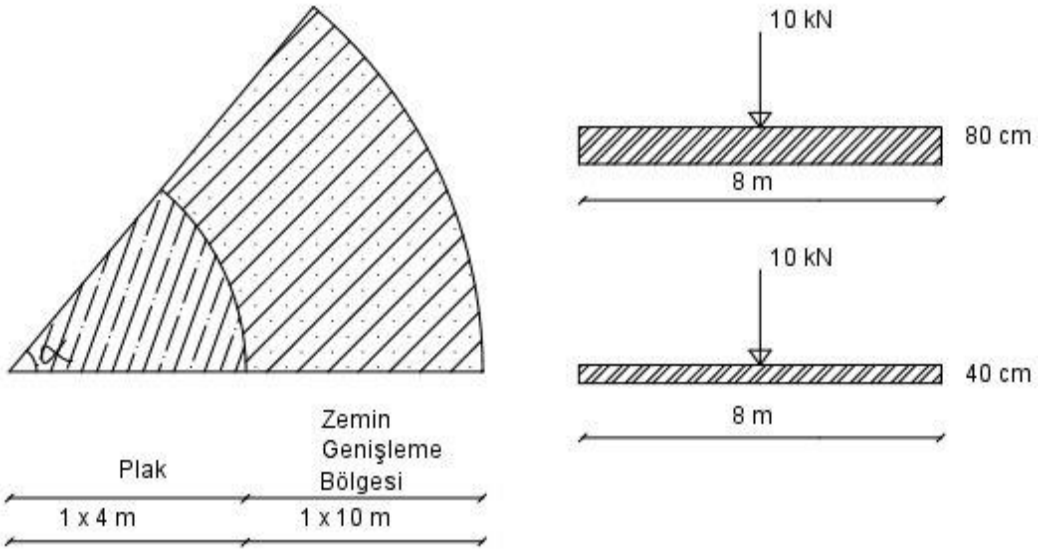
γ	C	C_T
4,2870	574,3577	128,4464
4,3755	759,6377	169,9531
4,3847	769,5885	165,5931
4,3857	770,6321	165,1493
4,3858	770,7514	165,0987
4,3858	770,7525	165,0982

İterasyon sonucunda bulunan zemin parametreleri kullanılarak iki parametreli Elastik zemine oturan plak çözümleri yapılmış ve elde edilen deplasman , M_r ve M_θ moment değişimleri Ek A1 de gösterilmiştir.

5.2. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde H=10 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali

Şekilde kesiti görülen iki parametreli zemine oturan dairesel temelin hesabı yapılacaktır.

Örnek 5.1 de geometrik özellikleri verilen plağın sıkışabilen zemin tabaka kalınlığının H=10 m olması durumu için çözüm yapılmıştır. Zemin elastisite modülü sabit, lineer ve kuadratik (2^0parabol) seçilerek hesap tekrar edilmiştir.



Şekil 5.2 Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri

Sistemin çözümünde dönel simetri şartı (5.1) kullanılarak merkez açısının $\alpha = 72^{0}$ olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünmüştür.

Sıkışabilir zemin tabaka kalınlığı plak sonlu elemanın yanına ilave edilerek şekilde görüldüğü gibi zemin genişleme bölgesi 1 m'lik sonlu eleman ağları ile modellenmiştir.

$\frac{d}{r} = 0{,}1$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.7 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
9,697	509,0116	117,8755
9,8702	581,8223	103,1243
9,8940	593,4884	101,0972
9,8943	593,6420	101,0710
9,8944	593,6604	101,0679

Tablo 5.8 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
9,7151	524,4359	120,8221
9,8838	595,2591	105,1134
9,9065	606,3624	103,0269
9,9068	606,5029	103,0011
9,9068	606,5194	102,9980

Tablo 5.9 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
9,8944	593,6604	101,0679
10,0024	719,5053	120,1156
10,0037	720,1501	119,9650
10,0038	720,2205	119,9485
10,0038	720,2281	119,9468

$\frac{d}{r} = 0,2$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.10 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
8,4884	511,2950	117,4398
8,4842	509,3065	117,8073
8,4836	509,0506	117,8665
8,4835	509,0162	117,8745
8,4835	509,0116	117,8755

Tablo 5.11 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
8,6440	638,6437	142,4532
8,5232	532,5242	118,7834
8,5057	524,5684	120,7881
8,5054	524,4511	120,8182
5,5054	524,4359	120,8221

Tablo 5.12 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

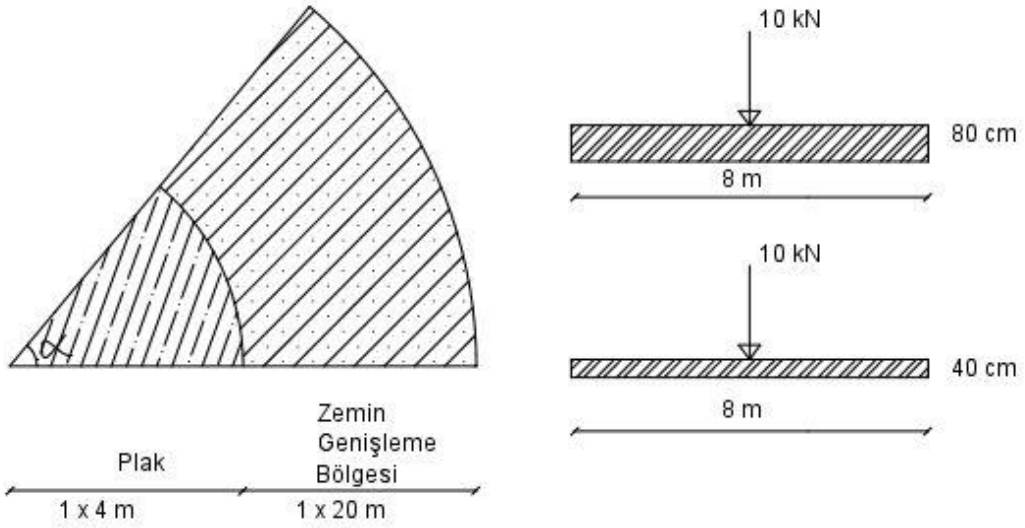
γ	C	C_T
8,7933	720,2289	119,9468
8,6615	647,6019	139,5877
8,6461	639,6945	142,1111
8,6442	638,7665	142,4132
8,6440	638,6437	142,4532

İterasyon sonucunda bulunan zemin parametreleri kullanılarak iki parametreli Elastik zemine oturan plak çözümleri yapılmış ve elde edilen deplasman, M_r ve M_θ moment değişimleri EkA.2 de gösterilmiştir.

5.3. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde H=20 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali

Şekilde kesiti görülen iki parametreli zemine oturan dairesel temelin hesabı yapılacaktır.

Örnek 5.1 de geometrik özellikleri verilen plağın sıkışabilen zemin tabaka kalınlığının H=20 m olması durumu için çözüm yapılmıştır. Zemin elastisite modülü sabit, lineer ve kuadratik (2^0parabol) seçilerek hesap tekrar edilmiştir.



Şekil 5.3 Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri

Sistemin çözümünde dönel simetri şartı (5.1) kullanılarak merkez açısının $\alpha = 72^0$ olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünmüştür.

Sıkışabilir zemin tabaka kalınlığı plak sonlu elemanın yanına ilave edilerek şekilde görüldüğü gibi zemin genişleme bölgesi 1 m'lik sonlu eleman ağları ile modellenmiştir.

$\frac{d}{r} = 0{,}1$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.13 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
19,9053	657,1588	110,5711
19,8027	597,1605	100,4755
19,7904	594,0802	100,9965
19,7890	593,7129	101,0590
19,7888	593,6689	101,0665
19,7888	593,6635	101,0673

Tablo 5.14 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
19,8136	606,5236	103,0034
19,7973	597,4366	101,4550
19,7953	596,9486	101,5396
19,7951	596,8904	101,5497
19,7951	596,8834	101,5509

Tablo 5.15 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
19,5384	574,2232	130,2953
19,8628	646,1520	112,8406
19,9005	655,8829	110,8296
19,9048	657,0149	110,6002
19,9053	657,1441	110,5742
19,9053	657,1604	110,5711

$\frac{d}{r} = 0,2$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.16 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
17,3176	593,6635	101,0673
17,0136	519,5286	115,4893
16,9732	510,4081	117,5530
16,9678	509,1974	117,8325
16,9671	509,0351	117,8701
16,9670	509,0134	117,8751

Tablo 5.17 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
17,3254	596,8834	101,5509
17,0239	523,2263	116,2063
16,9842	514,2418	118,2925
16,9790	513,0596	118,5727
16,9783	512,9025	118,6101
16,9782	512,8788	118,6150

Tablo 5.18 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

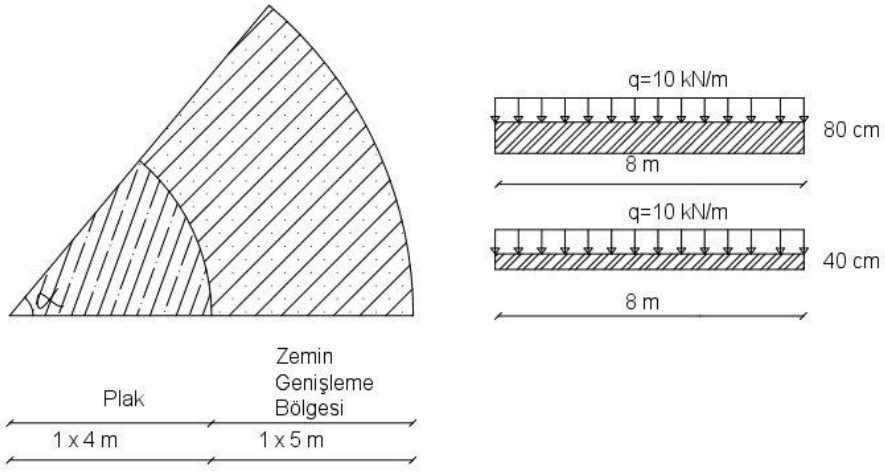
γ	C	C_T
16,9782	569,3448	131,6748
17,1204	573,6109	130,4667
17,1383	574,1476	130,3164
17,1405	574,2148	130,2976
17,1408	574,2232	130,2653

İterasyon sonucunda bulunan zemin parametreleri kullanılarak iki parametreli Elastik zemine oturan plak çözümleri yapılmış ve elde edilen deplasman , M_r ve M_θ moment değişimleri EkA.3 de gösterilmiştir.

5.4. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde H=5 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Yayılı Yük Etkimesi Hali

Şekilde kesiti görülen iki parametreli zemine oturan dairesel temelin hesabı yapılacaktır.

Plaklarda ν = 0.167 olarak alınmıştır. 4 m yarıçaplı,40 ve 80cm kalınlıktaki plak elemana q = 10 kN/m' lik yük etkimesi hali göz önüne alınarak hesap yapılmıştır.



Şekil 5.4 Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri

Dönel simetri şartı kullanılarak (5.1) sistemin merkez açısı $\alpha = 72^0$ olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünmüştür.

Bu örnekte sıkışabilir zemin tabaka kalınlığı H= 5 m olarak seçilmiş ve plak sonlu elemanın yanında ilave edilerek şekilde görüldüğü gibi zemin genişleme bölgesi 1 m'lik sonlu eleman ağları ile modellenmiştir. Zeminde E_1= 1000, E_2= 5000, $\nu = 0.25$ seçilerek, zemin elastisite modülünün sabit, lineer ve Kuadratik (2^0parabol) olması durumları için hesap tekrar edilmiştir.

Halka sektörü elemanlarda standart formülle elde edilmiş [C] ve [C_T] matrislerinde R_2= 0 iken bazı belirsizlikler olduğundan merkeze birleşen sonlu elemanlarda R_2= 0 yerine çok küçük bir değer olarak R_2= 0.001 alınmıştır.

$\frac{d}{r} = 0{,}1$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.19 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
3,1786	380,2400	159,0400
3,1827	391,1940	154,3692
3,1828	391,6311	154,1892
3,1829	391,6478	154,1823

Tablo 5.20 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
3,1873	648,8009	245,5814
3,1867	477,1555	179,7421
3,1866	477,1087	179,7836
3,1866	477,1071	179,7850

Tablo 5.21 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
3,1829	391,6484	154,1823
3,1872	648,4291	245,9915
3,1873	648,7887	245,5948
3,1873	648,8009	245,5814

$\frac{d}{r} = 0,2$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.22 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
3,1170	391,6478	154,1823
3,1136	384,6970	157,1014
3,1135	384,3415	157,2540
3,1135	384,3220	157,2624

Tablo 5.23 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
3,1483	645,5993	249,1816
3,1314	474,4691	182,1799
3,1308	473,3121	183,2673
3,1307	473,2682	183,3091
3,1307	473,2681	183,3091

Tablo 5.24 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

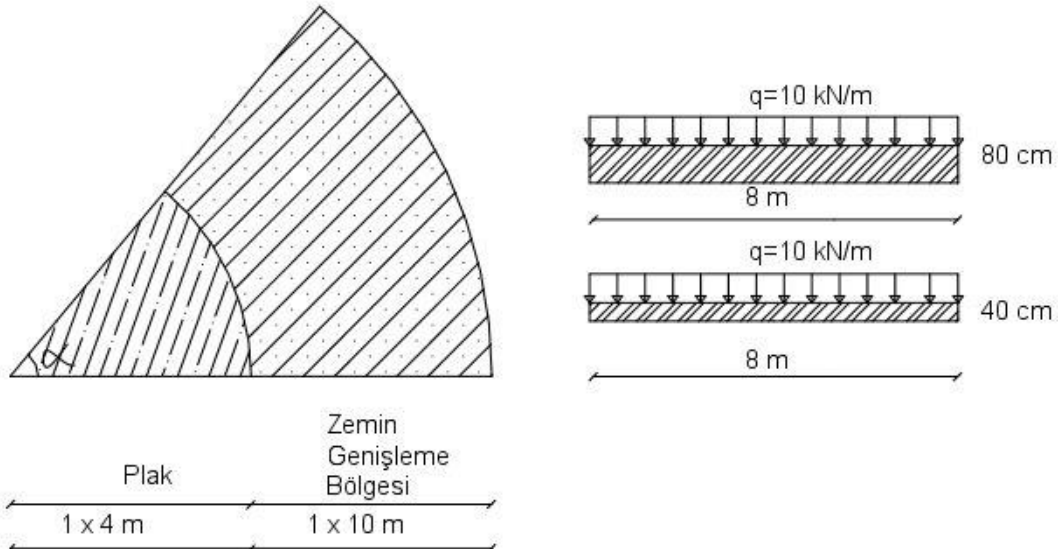
γ	C	C_T
3,1135	384,3220	157,2624
3,1472	642,7791	252,4898
3,1484	645,4979	249,2981
3,1485	645,5991	249,1817
3,1485	645,5993	249,1916

İterasyon sonucunda bulunan zemin parametreleri kullanılarak iki parametreli Elastik zemine oturan plak çözümleri yapılmış ve elde edilen deplasman , M_r ve M_θ moment değişimleri Ek B.1 de gösterilmiştir.

5.5. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde H=10 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Yayılı Yük Etkimesi Hali

Şekilde kesiti görülen iki parametreli zemine oturan dairesel temelin hesabı yapılacaktır.

Örnek 5.4 de geometrik özellikleri verilen plağın sıkışabilen zemin tabaka kalınlığının H=10 m olması ve q =10 kN/m luk yayılı yük etkimesi durumu için çözüm yapılmıştır. Zemin elastisite modülü sabit, lineer ve kuadratik (2^0parabol) seçilerek hesap tekrar edilmiştir.



Şekil 5.5 Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri

Sistemin çözümünde dönel simetri şartı (5.1) kullanılarak merkez açısının $\alpha = 72^{0}$ olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünmüştür.

Sıkışabilir zemin tabaka kalınlığı plak sonlu elemanın yanına ilave edilerek şekilde görüldüğü gibi zemin genişleme bölgesi 1 m'lik sonlu eleman ağları ile modellenmiştir.

$\frac{d}{r} = 0,1$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.25 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
6,3528	373,0370	160,8445
6,3591	381,1969	157,4009
6,3593	381,5746	157,2451
6,3593	381,5916	157,2381

Tablo 5.26 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
6,3620	501,8073	206,5629
6,3600	400,6490	164,9235
6,3599	400,5379	164,9788
6,3599	400,5329	164,9813

Tablo 5.27 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
6,3593	381,5916	157,2381
6,3619	501,6504	206,6682
6,3620	501,8006	206,5763
6,3620	501,8073	206,5629

$\frac{d}{r} = 0,2$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.28 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
6,2252	381,5897	157,2398
6,2171	373,5507	160,6233
6,2166	373,0667	160,8317
6,2166	373,0370	160,8445

Tablo 5.29 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
6,2563	495,4819	210,8947
6,2262	394,6383	167,9734
6,2245	392,9337	168,8608
6,2244	392,8345	168,9127
6,2244	392,8287	168,9157

Tablo 5.30 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

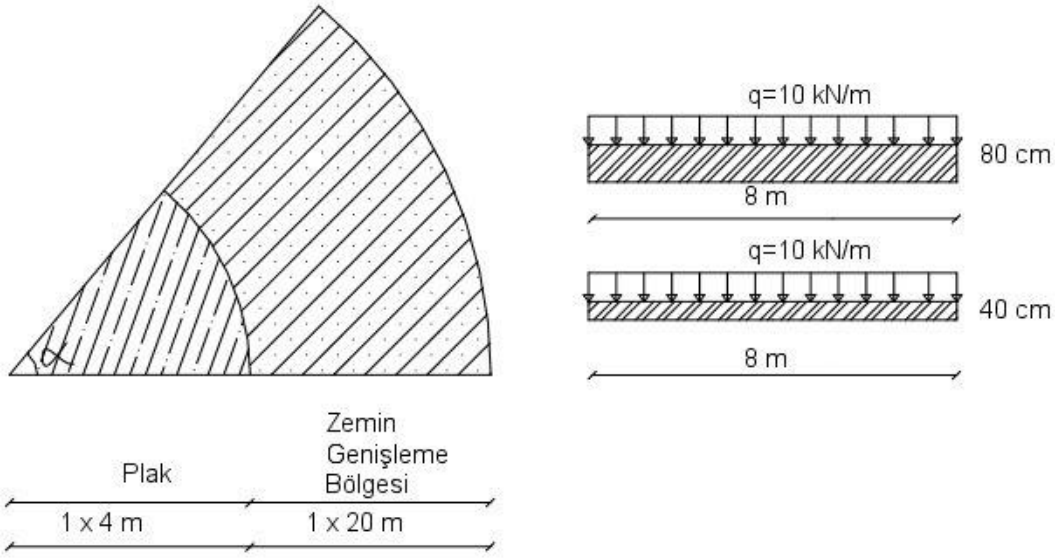
γ	C	C_T
6,2166	373,0370	160,8445
6,2541	493,1090	212,5653
6,2562	495,3557	210,9829
6,2563	495,4755	210,8991
6,2563	495,4819	210,8947

İterasyon sonucunda bulunan zemin parametreleri kullanılarak iki parametreli Elastik zemine oturan plak çözümleri yapılmış ve elde edilen deplasman , M_r ve M_θ moment değişimleri Ek B.2 de gösterilmiştir.

5.6. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde H=20 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Yayılı Yük Etkimesi Hali

Şekilde kesiti görülen iki parametreli zemine oturan dairesel temelin hesabı yapılacaktır.

Örnek 5.4 de geometrik özellikleri verilen plağın sıkışabilen zemin tabaka kalınlığının H=20 m olması ve q =10 kN/m luk yayılı yük etkimesi durumu için çözüm yapılmıştır. Zemin elastisite modülü sabit, lineer ve kuadratik (2^0parabol) seçilerek hesap tekrar edilmiştir.



Şekil 5.6 Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri

Sistemin çözümünde dönel simetri şartı (5.1) kullanılarak merkez açısının $\alpha = 72^{0}$ olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünmüştür.

Sıkışabilir zemin tabaka kalınlığı plak sonlu elemanın yanına ilave edilerek şekilde görüldüğü gibi zemin genişleme bölgesi 1 m'lik sonlu eleman ağları ile modellenmiştir.

$\frac{d}{r} = 0{,}1$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.31 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
12,7217	441,6519	181,9267
12,7188	381,6519	157,2113
12,7186	381,5638	157,2476
12,7186	381,5598	157,2493

Tablo 5.32 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
12,7199	400,5379	164,9788
12,7190	386,3131	159,1780
12,7189	386,2869	159,1893
12,7189	386,2858	159,1898

Tablo 5.33 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
12,7189	386,2869	159,1893
12,7216	441,5684	181,9720
12,7217	441,6482	181,9287
12,7217	441,6517	181,9268

$\frac{d}{r} = 0,2$ olması durumunda ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.34 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
12,4503	381,5598	157,2493
12,4341	373,5096	160,6385
12,4332	373,0244	160,8474
12,4331	372,9945	160,8603

Tablo 5.35 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
12,4775	434,3237	185,9816
12,4395	379,1326	162,3481
12,4372	378,0095	162,8557
12,4371	3377,9414	162,8866
12,4371	377,9373	162,8884

Tablo 5.36 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

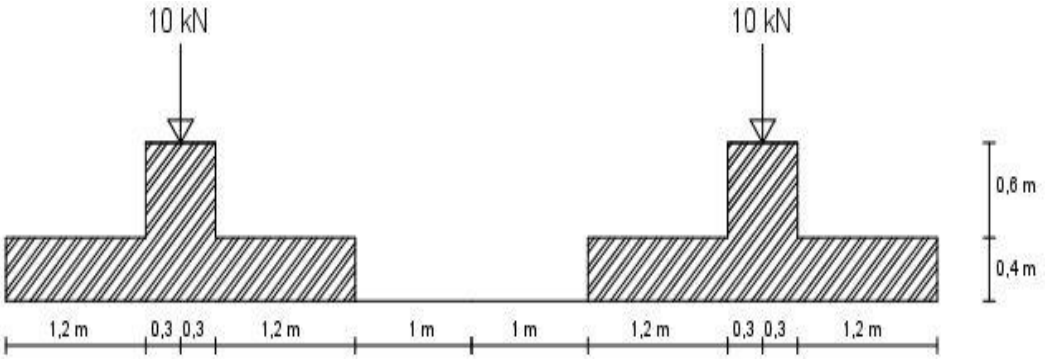
γ	C	C_T
12,4331	372,9945	160,8603
12,4749	432,9926	186,7374
12,4773	434,2484	186,0243
12,4775	434,3197	185,9839
12,4775	434,3237	185,9816

İterasyon sonucunda bulunan zemin parametreleri kullanılarak iki parametreli Elastik zemine oturan plak çözümleri yapılmış ve elde edilen deplasman , M_r ve M_θ moment değişimleri Ek B.3 de gösterilmiştir.

5.7. İki Parametreli Elastik Zemine Oturan Değişken Kesitli Dairesel Plak Temelde H=5 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali

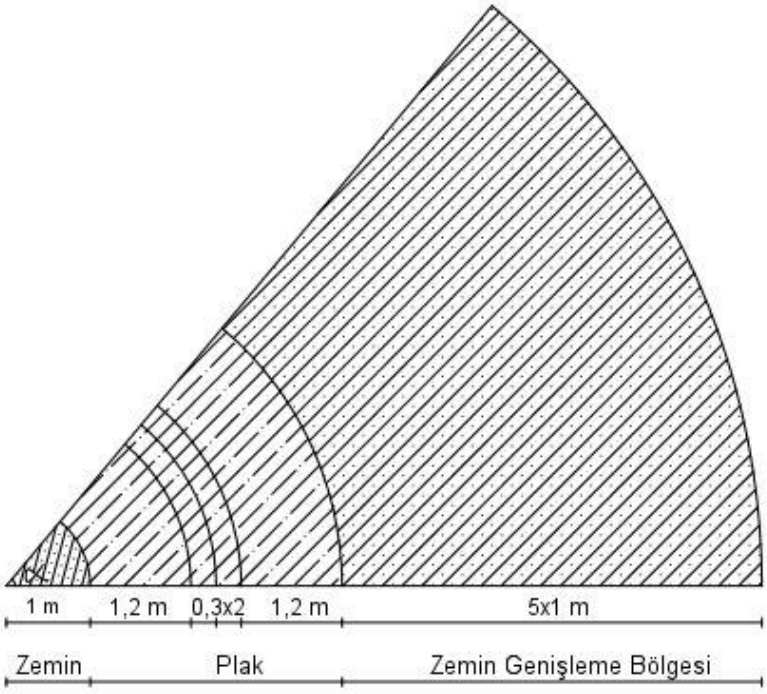
Şekilde kesiti görülen iki parametreli zemine oturan dairesel temelin hesabı yapılacaktır.

Plaklarda $\nu = 0.167$ olarak alınmıştır. 4 m yarıçaplı değişken kesitli plağın ortasında 1 m yarıçapında boşluk vardır. Değişken kesitli plağa P=10kN' lik yük etkimesi hali göz önüne alınarak hesaplar yapılmıştır.



Şekil 5. 7 Seçilen Dairesel Temelin Geometrik Büyüklükleri

Dönel simetri şartı kullanılarak (5.1) sistemin merkez açısı $\alpha = 72^{0}$ olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünmüştür.



Şekil 5. 8 Hesapta Kullanılan Sonlu Eleman Ağı

Bu örnekte sıkışabilir zemin tabaka kalınlığı H= 5 m olarak seçilmiş ve plak sonlu elemanın yanına ilave edilerek şekilde görüldüğü gibi zemin genişleme bölgesi 1m'lik sonlu eleman ağları ile modellenmiştir. Zeminde E_1= 1000, E_2= 5000, ν=0.25 seçilerek, zemin elastisite modülünün sabit, lineer ve quadratik (2^0parabol) olması durumları için hesap tekrar edilmiştir.

Halka sektörü elemanlarda standart formülle elde edilmiş [C] ve [C_T] matrislerinde R_2= 0 iken bazı belirsizlikler olduğundan merkeze birleşen sonlu elemanlarda R_2= 0 yerine çok küçük bir değer olarak R_2= 0.001 alınmıştır.

Ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.37 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
2,8539	333,7219	183,1860
2,7847	351,9545	172,7439
2,7831	351,0178	173,2455
2,7829	350,8680	173,3261

Tablo 5.38 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
2,8284	447,5261	218,3467
2,8506	455,3805	204,3474
2,8535	456,5121	202,4670
2,8539	456,6624	202,4670
2,8539	456,6848	202,4349

Tablo 5.39 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
2,8854	614,9923	296,2381
2,9132	626,0195	275,6620
2,9183	628,2007	272,2174
2,9184	628,2485	272,1436
2,9184	628,2561	272,1319

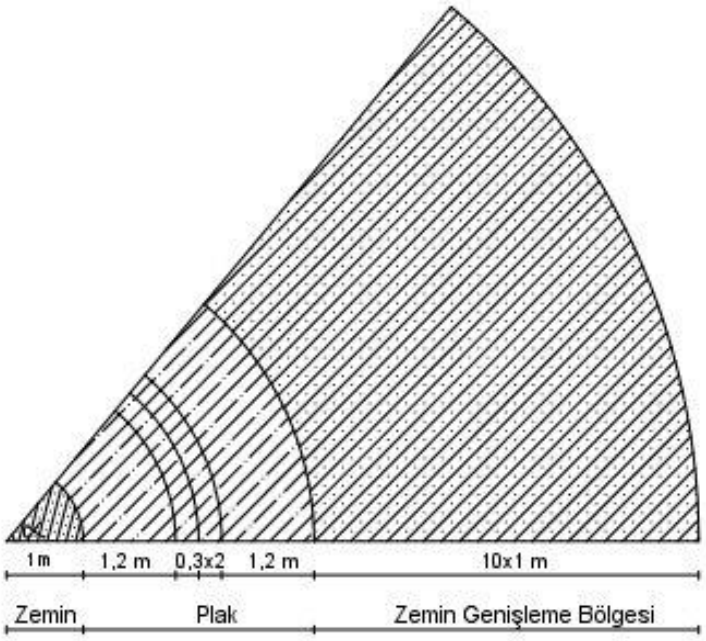
İterasyon sonucunda bulunan zemin parametreleri kullanılarak iki parametreli Elastik zemine oturan plak çözümleri yapılmış ve elde edilen deplasman , M_r ve M_θ moment değişimleri Ek C.1 de gösterilmiştir.

5.8. İki Parametreli Elastik Zemine Oturan Değişken Kesitli Dairesel Plak Temelde H=10 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali

Şekilde sonlu eleman ağı görülen iki parametreli zemine oturan dairesel temelin hesabı yapılacaktır.

Örnek 5.7' de geometrik özellikleri verilen plağın sıkışabilen zemin tabaka kalınlığının H=10 m olması durumu için çözüm yapılmıştır. Zemin elastisite modülü sabit, lineer ve quadratik (2^0parabol) seçilerek hesap tekrar edilmiştir.

Dönel simetri şartı kullanılarak (5.1) sistemin merkez açısı $\alpha = 72^0$ olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünmüştür.



Şekil 5. 9 Hesapta Kullanılan Sonlu Eleman Ağı

Bu örnekte sıkışabilir zemin tabaka kalınlığı H= 10 m olarak seçilmiş ve plak sonlu elemanın yanına ilave edilerek şekilde görüldüğü gibi zemin genişleme bölgesi 1 m'lik sonlu eleman ağları ile modellenmiştir.

Ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.40 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
5,6314	458,1883	240,4903
5,5297	337,9929	177,5276
5,5101	331,9079	180,7644
5,5063	330,7365	181,4252
5,5056	330,5107	181,5492
5,5055	330,4671	181,5731

Tablo 5.41 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
5,7079	456,6758	202,4400
5,5653	363,7014	185,8490
5,5381	355,7378	191,1527
5,5320	353,9378	192,3983
5,5318	353,8829	192,4366

Tablo 5.42 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

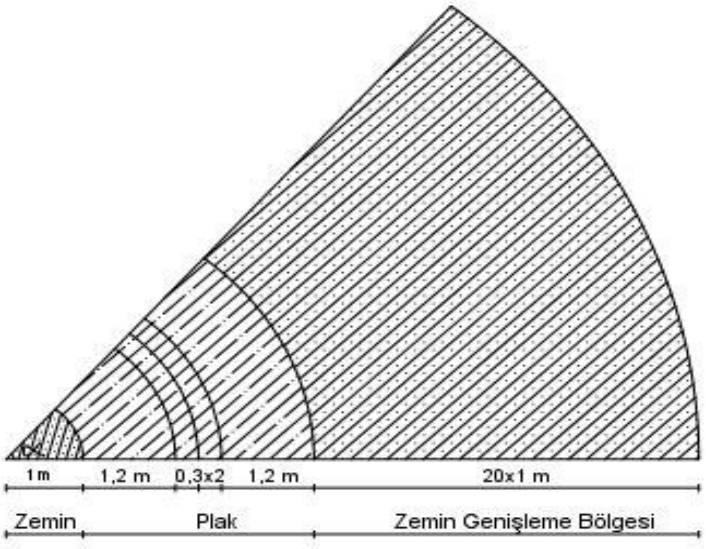
γ	C	C_T
5,6273	456,9719	241,5916
5,6306	457,9392	240,7151
5,6313	458,1373	240,5363
5,6314	458,1779	240,4997
5,6314	458,1883	240,4903

İterasyon sonucunda bulunan zemin parametreleri kullanılarak iki parametreli Elastik zemine oturan plak çözümleri yapılmış ve elde edilen deplasman , M_r ve M_θ moment değişimleri Ek C.2 de gösterilmiştir.

5.9. İki Parametreli Elastik Zemine Oturan Değişken Kesitli Dairesel Plak Temelde H=20 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali

Örnek 5.7' de geometrik özellikleri verilen plağın sıkışabilen zemin tabaka kalınlığının H=20 m olması durumu için çözüm yapılmıştır. Zemin elastisite modülü sabit, lineer ve quadratik (2^0parabol) seçilerek hesap tekrar edilmiştir.

Dönel simetri şartı kullanılarak (5.1) sistemin merkez açısı $\alpha = 72^0$ olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünmüştür.



Şekil 5.10 Hesapta Kullanılan Sonlu Eleman Ağı

Bu örnekte sıkışabilir zemin tabaka kalınlığı H= 20 m olarak seçilmiş ve plak sonlu elemanın yanına ilave edilerek şekilde görüldüğü gibi zemin genişleme bölgesi 1m'lik sonlu eleman ağları ile modellenmiştir.

Ardışık yaklaşım sonucu bulunan yeni γ, C ve C_T değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.43 Elastisite Modülünün Sabit Olması Durumu

Sabit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1}$

γ	C	C_T
11,0109	330,4734	181,5735
11,0101	330,3277	181,6378
11,0099	330,3021	181,6519
11,0099	330,2972	181,6546

Tablo 5.44 Elastisite Modülünün Kuadratik Değişmesi Durumu

Kuadratik $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
11,0309	337,3285	183,7283
11,0246	336,3663	184,2890
11,0232	336,1447	184,4186
11,0231	336,1378	184,4226

Tablo 5.45 Elastisite Modülünün Lineer Değişmesi Durumu

Lineer $\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{5}$

γ	C	C_T
11,1687	397,8865	209,1071
11,1499	395,0603	211,1391
11,1461	394,4963	211,5493
11,1452	394,3611	211,6478
11,1452	394,3566	211,6511

İterasyon sonucunda bulunan zemin parametreleri kullanılarak iki parametreli Elastik zemine oturan plak çözümleri yapılmış ve elde edilen deplasman , M_r ve M_θ moment değişimleri Ek C.3 de gösterilmiştir.

6. SONUÇLAR

İki parametreli elastik zemine oturan plaklarda, plak zemin bölgesinin sonlu elemanlarla idealleştirilerek zemin yüzey parametresi ve zemine ait karakteristiklerin ardışık yaklaşım yöntemiyle hesaplanıp, çeşitli örnekler verilen bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1) İki parametreli elastik zemine oturan plakların hesabı yapılırken plağın ve zemin bölgesinin sonlu elemanlarla idealleştirilip, çözüm sonucunda ulaşılan deplasmanlar yardımıyla çizilen çökme yüzeylerine bakıldığında yapılan modellemenin önerilen zemin modeline uygun olduğu görülmüştür.

2) Plak ve zemin sonlu elemanlar kullanılarak zemin yüzey parametresi ve zemine ait karakteristik büyüklükler ardışık yaklaşım yöntemiyle elde edilmekte olup ardışık yaklaşımın üçüncü veya dördüncü basamağında sonucu ulaşabilmektedir. Özellikle uniform yayılı yükleme durumunda sonuca daha çabuk ulaşıldığı çözülen örnekler ile görülmüştür.

3) Zemin yüzey parametresi ve zemine ait karakteristik büyüklükler yükleme durumu sıkışabilir tabaka kalınlığı ve zeminin elastik özelliklerine bağlıdır. Zeminin sıkışabilir tabaka kalınlığı artıkça zemin yüzey parametresinin arttığı, zeminin yataklanma katsayısının azaldığı ve zeminin kayma parametrisinin arttığı çözülen örnekler ile tespit edilmiştir.

4) E_2/E_1 oranı arttıkça plağa ait çökme ve eğilme moment değerleri azalmıştır. Sıkışabilir tabaka kalınlığı arttıkça plağa ait çökme ve moment değerleri artmıştır

5) 16 serbestlik dereceli halka sektörü sonlu elemanda rijitlik ve yükleme matrisi nümerik olarak hesaplanmakta, özel olarak dönel simetrik dairesel plağa geçiş dönel simetrik durum için gerekli olan deplasman bileşenlerinin sıfır alınması ile mümkün olmaktadır. Merkez açıyı küçültüp, yarıçapları arttırarak yapılan çözümlerden dikdörtgen plak elemanla elde edilen sonuçlara yakın değerler elde etmek mümkündür.

6) Zemin sonlu elemanlar kullanılarak temel dışı ortamını modellemek mümkün olmaktadır. Temel dışında kalan zemin elemanların boyunun sıkışabilir zemin tabakası kalınlığından büyük veya eşit alınması çözümün yakınsaklığı için yeterlidir. Bu durumda plak kenarından itibaren en uzak noktadaki çökme değeri plak kenarındaki çökmenin %2~5 i mertebesine düştüğü gözlenmiştir.

7) İki parametreli zeminde zemin kayma gerilmeleri tesiriyle ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin zemin gerilmelerini düzleştirdiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] Çelik, M,1995.Plak Sonlu Elemanlarda Kayma Şekil Değiştirmelerinin Gözönüne Alınarak İki Parametreli Zemine Oturan Plakların Hesabı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi , İstanbul.

[2] Saygun, A., 1974. Yüzeysel Taşıyıcı Sistemlerin Hesabı İçin Eğrisel Sonlu Elemanlar, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi , İstanbul.

[3] Saygun, A., Trupia A., Eren,İ., 1993. Elastik Zemine Oturan Kirişli ve Kirişsiz Radye Temellerin Hesabı İ.T.Ü İnşaat Fakültesi , İstanbul

[4] Vallabhan, C.V.G., Straughan, W.T., Das.Y.C., 1991. Refined Model for Analysis of Plates on Elastic Foundations, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.117,No 12, pp.2830-2844

[5] Vallabhan, C.V.G., Das.Y.C., 1988. Parametric Study of Beams on Elastic Foundation, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.114, No 14, pp.2072-2082

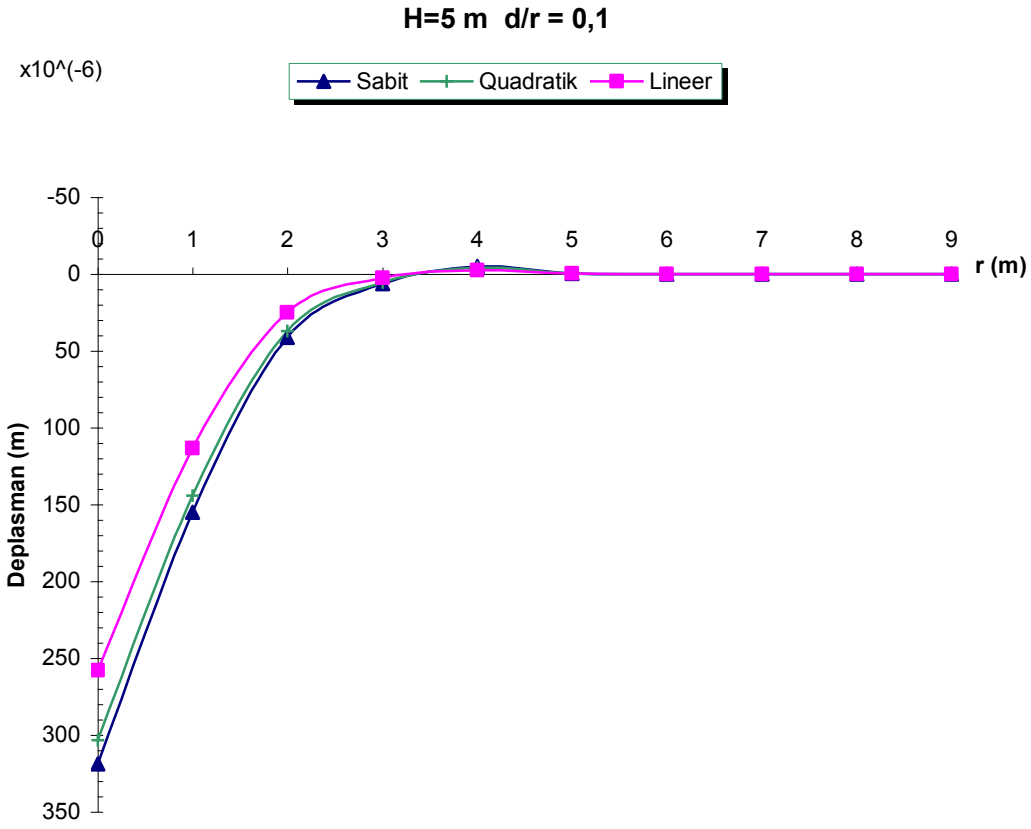
[6] Daloğlu,A., 1992 A Consistent Vlasov Model for Analysis of Plates on Elastic Foundations Using Finite Element Method, *Doctor Philosophy*, Texas Tech. University

[7] Kimençe,B., 1989. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Plak ve Basık Küresel Kabuk Tabanlı Silindirik Tank, *Y.Lisans Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi , İstanbul

[8] Saygun,A.,Çelik, M., 2003.Analysis of Circular Plates on Two-parameter Elastic Foundation, *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol.15,No 2 (2003), pp.249-267

EK A

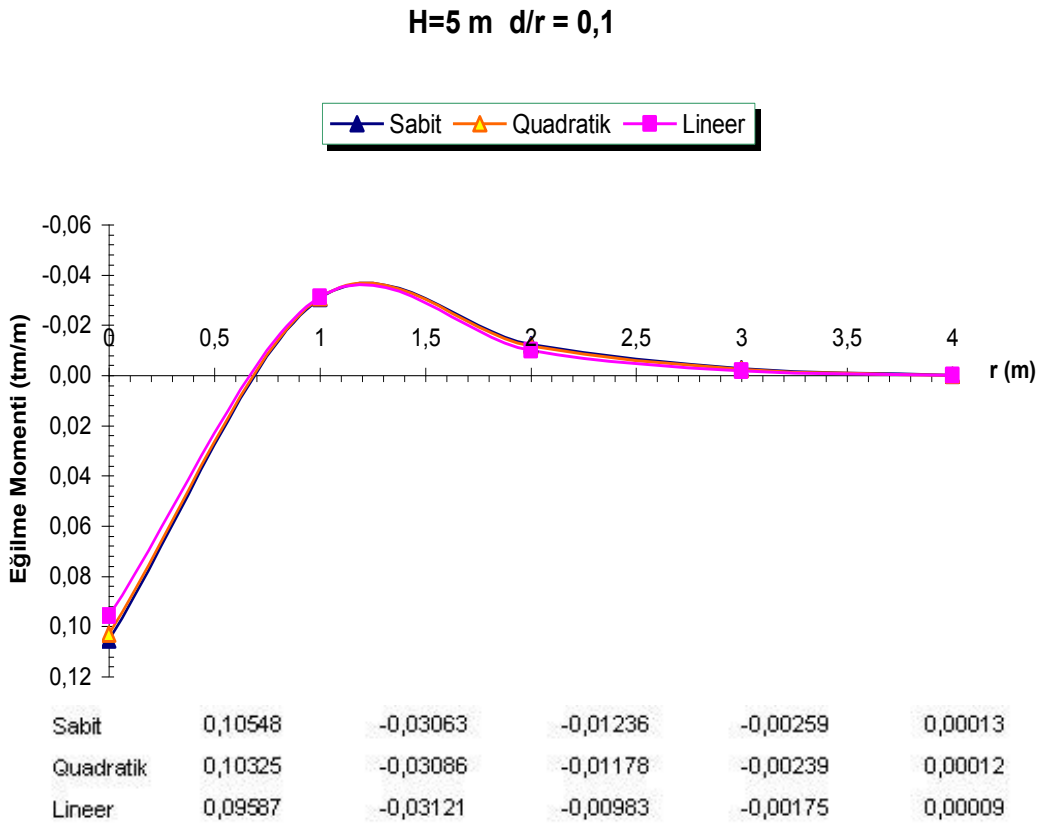
A.1. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde 5 m'lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali



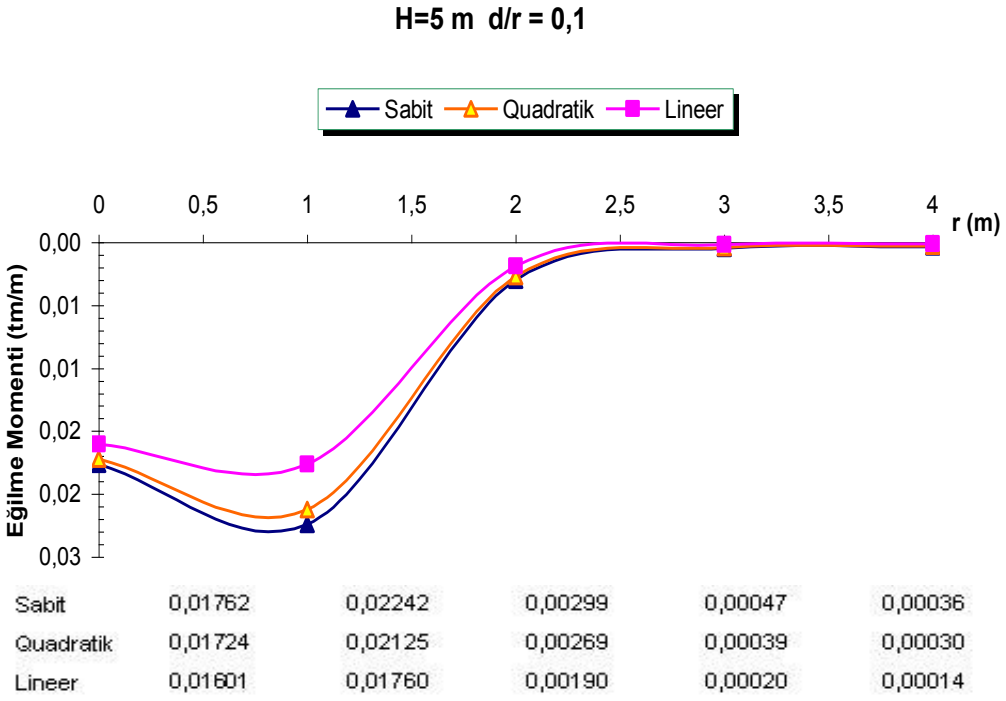
Sabit	318,89	154,99	41,445	6,3833	-4,9104	-0,5802	-0,0695	-0,0084	-0,0011	-0,0003
Quadratik	303,42	144,14	36,901	5,2109	-4,2543	-0,494	-0,0581	-0,0069	-0,0008	-0,0002
Lineer	257,71	113,35	25,178	2,6236	-2,5548	-0,284	-0,032	-0,0036	-0,0004	-0,0001

Şekil A.1 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar

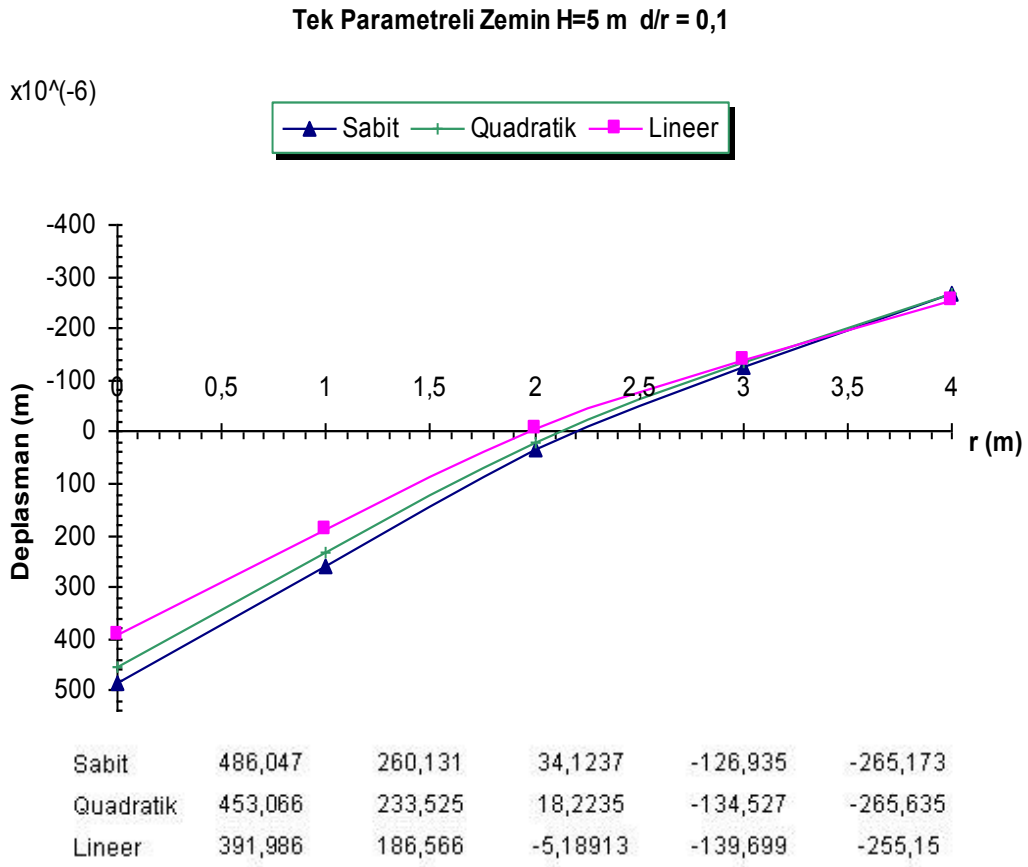
Şekilden de anlaşılacağı gibi sabit, kuadratik ve lineer zemine oturan dairesel plak elaman sırasıyla 3.47, 3.45 ve 3.35. m 'de zeminden ayrılmaktadır.



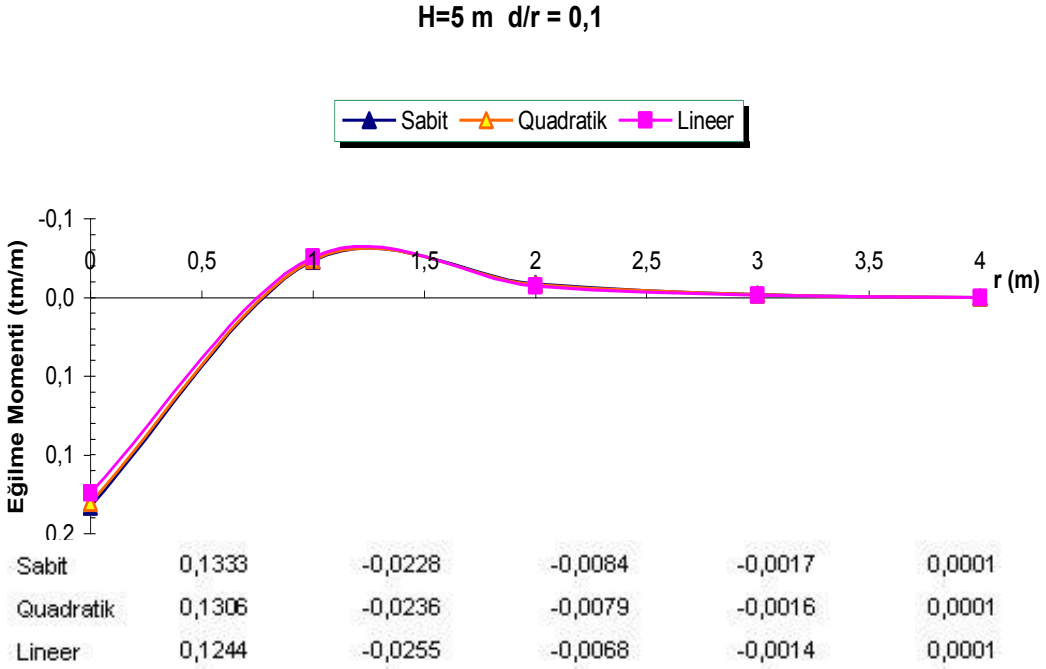
Şekil A.2 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



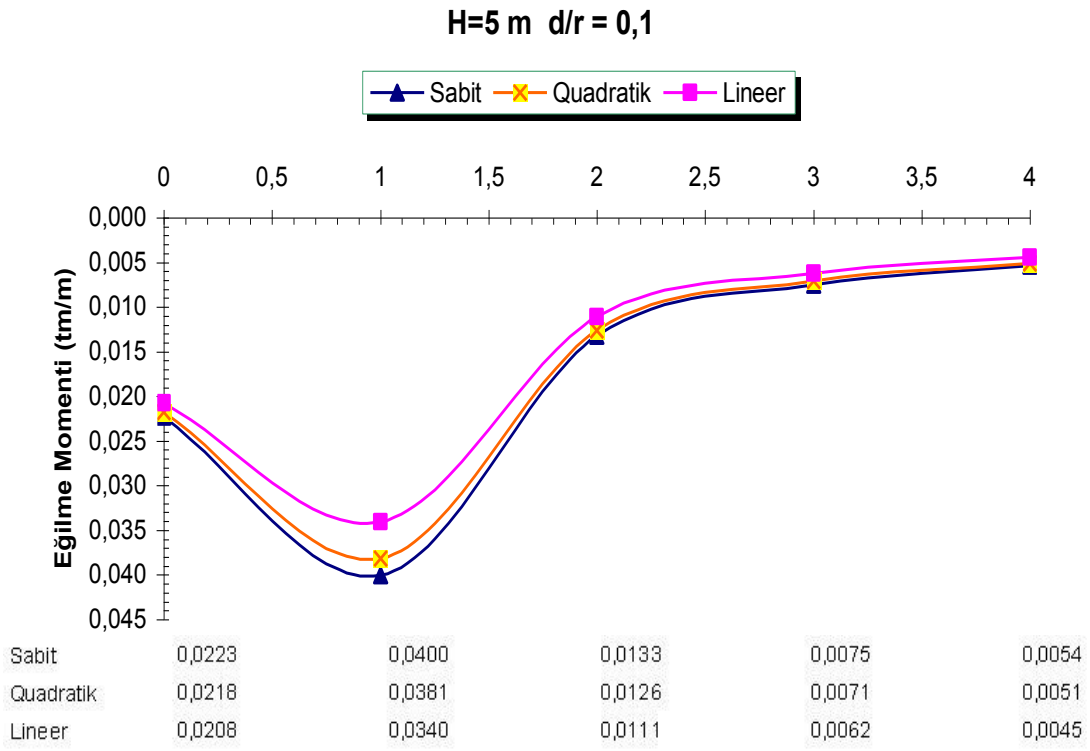
Şekil A.3 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri



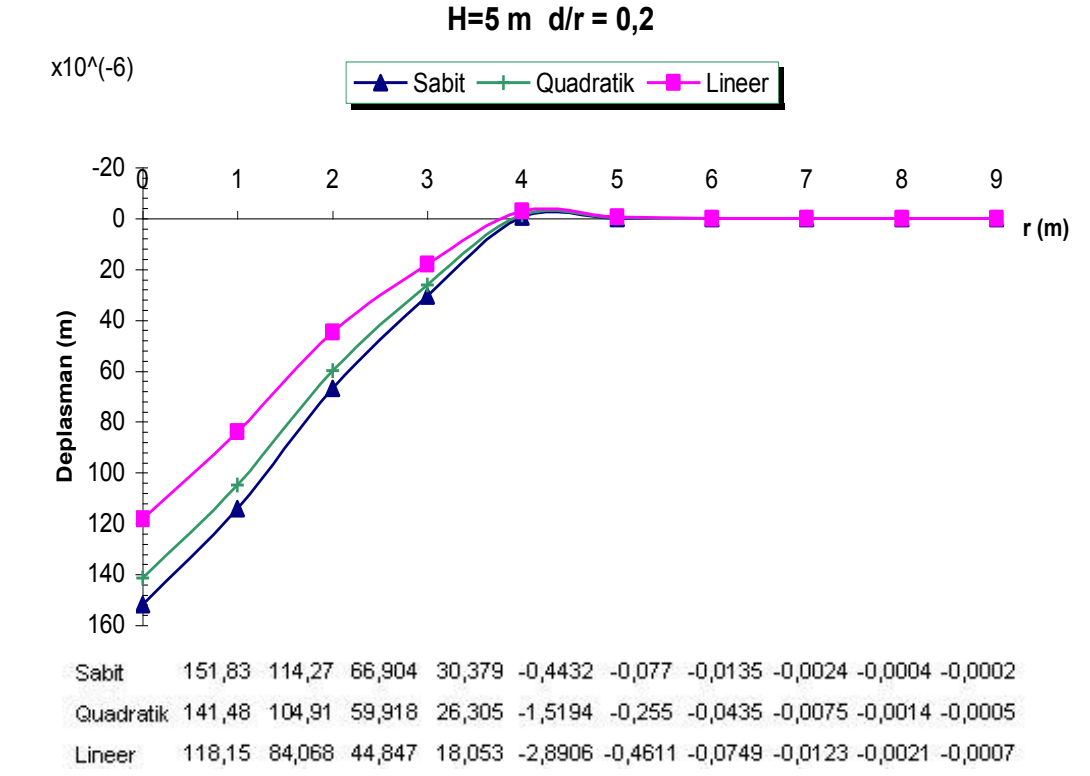
Şekil A.4 Sabit, Lineer ve Kuadratik Tek Parametreli Zeminde Deplasmanlar



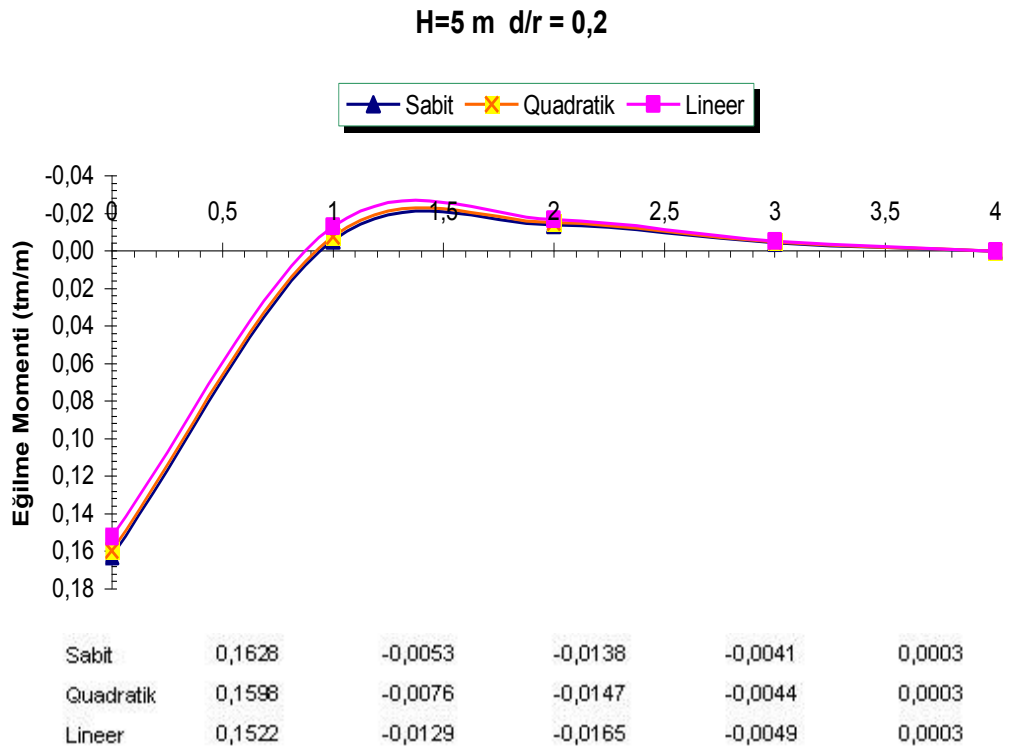
Şekil A.5 Sabit, Lineer ve Kuadratik Tek Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



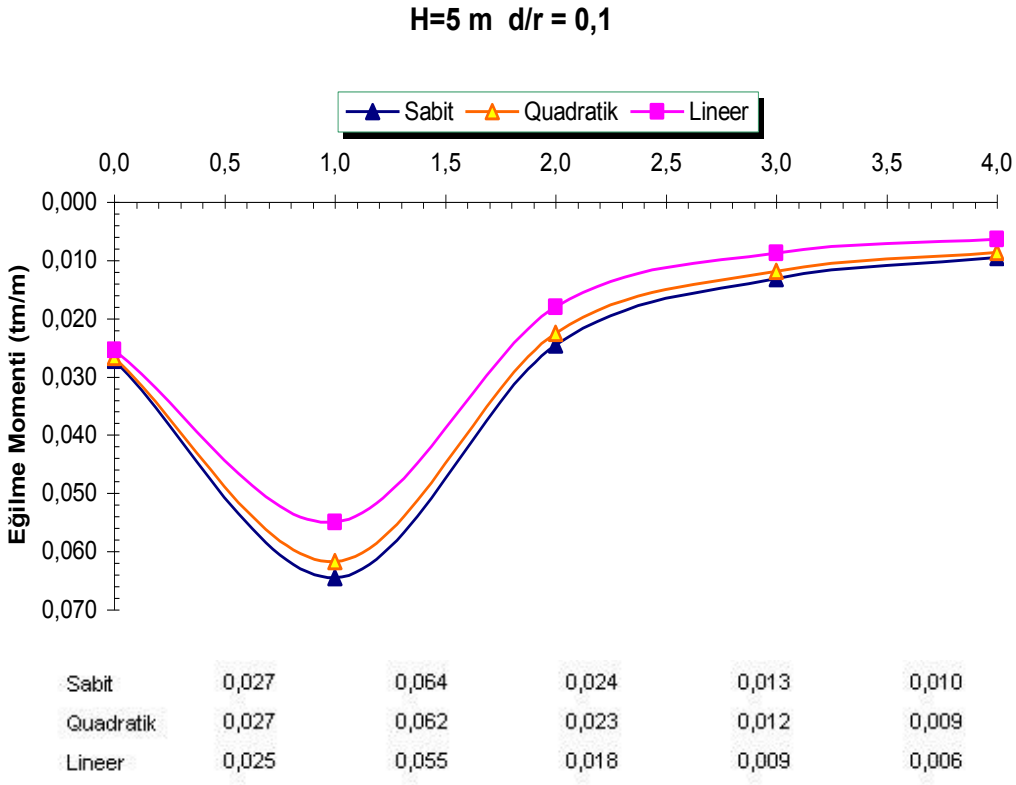
Şekil A.6 Sabit, Lineer ve Kuadratik Tek Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri



Şekil A.7 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar

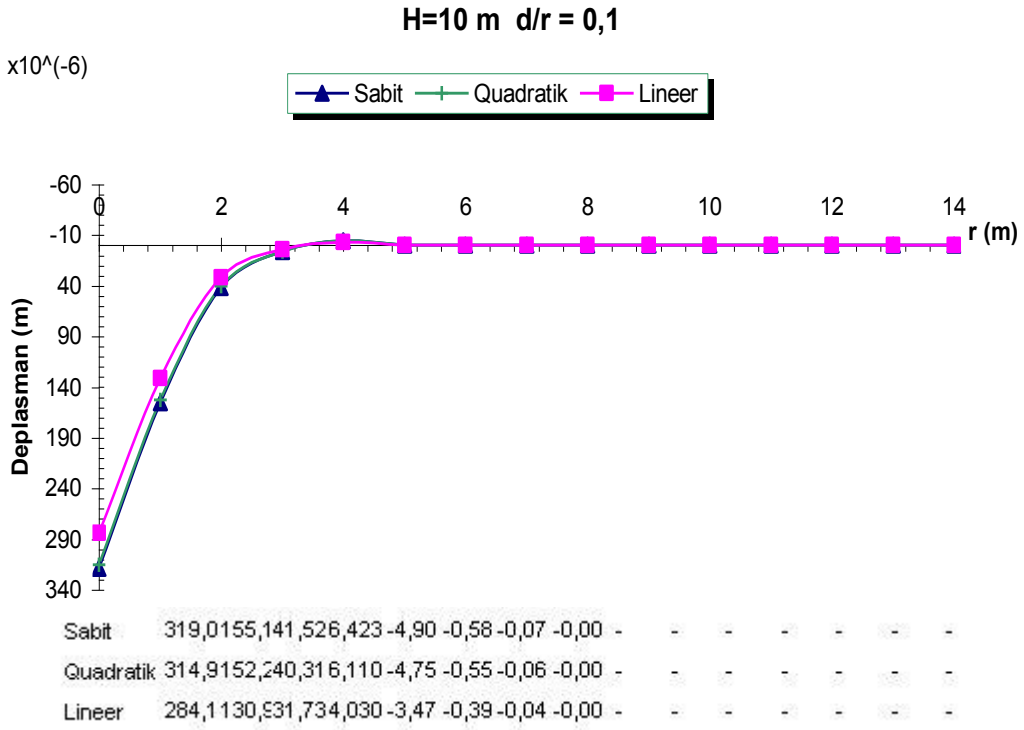


Şekil A.8 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri

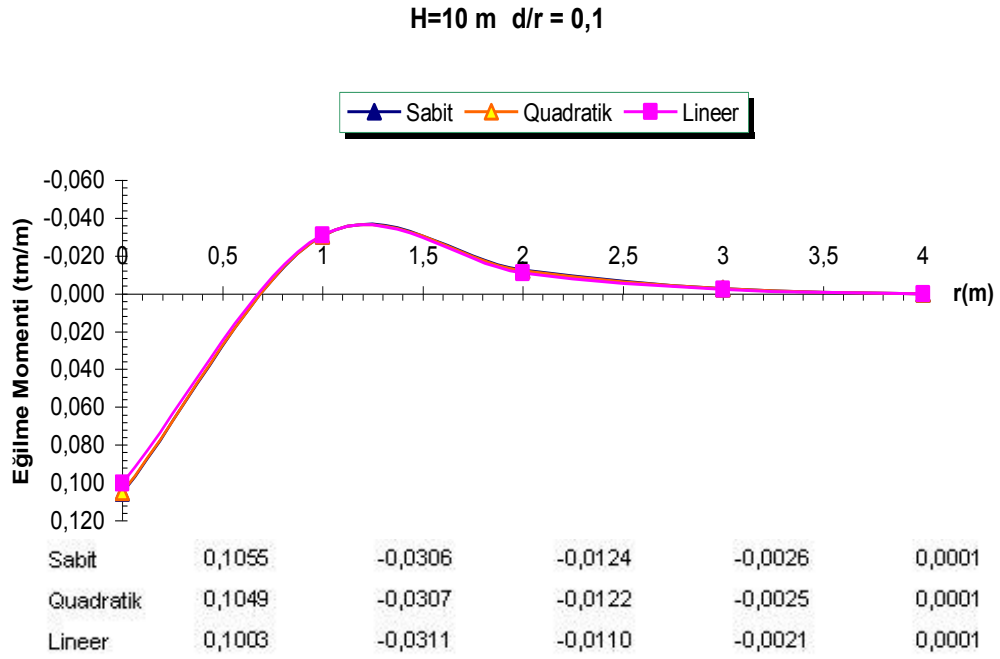


Şekil A.9 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri

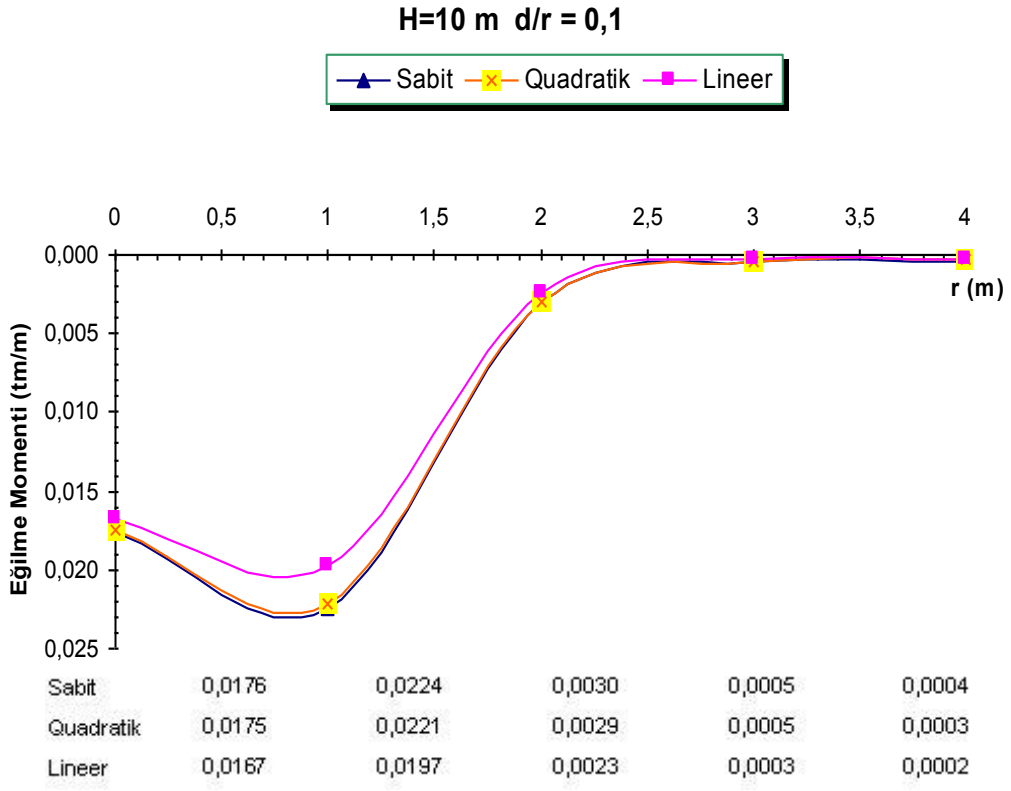
A.2. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde H=10 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali



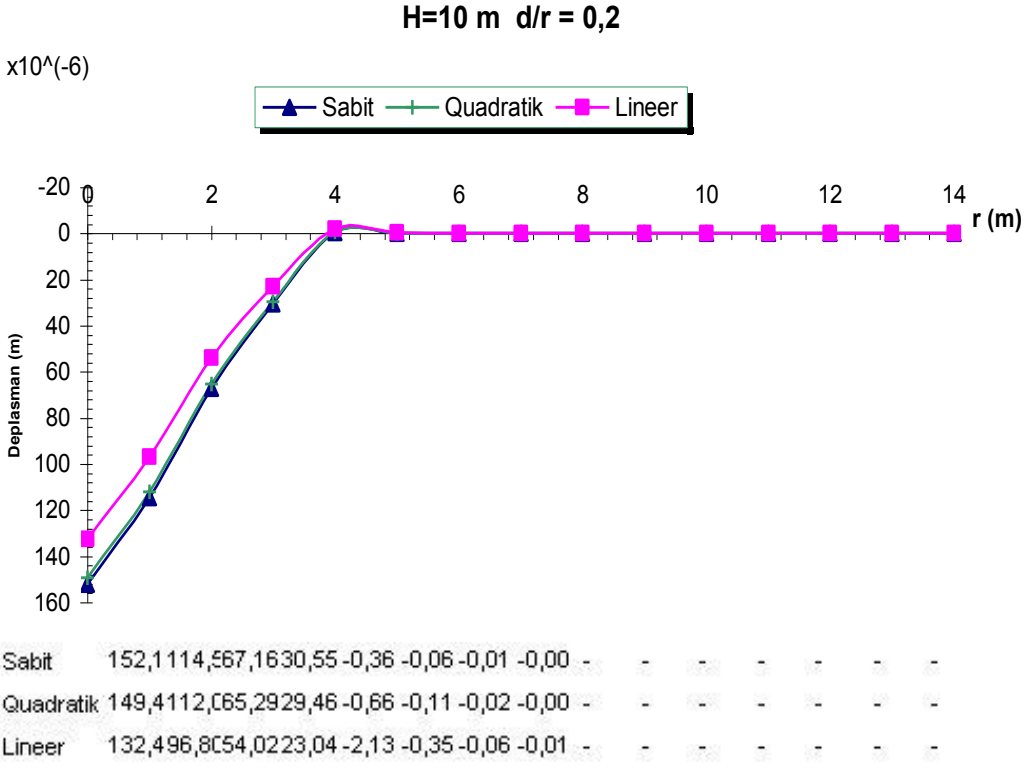
Şekil A.10 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



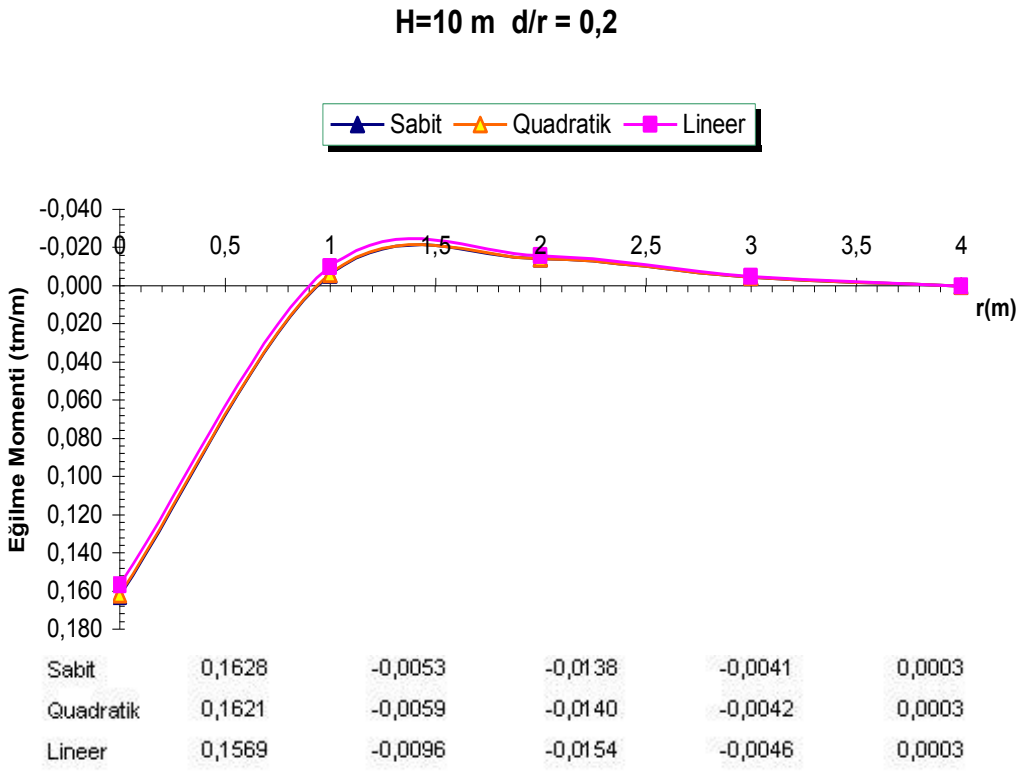
Şekil A.11 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



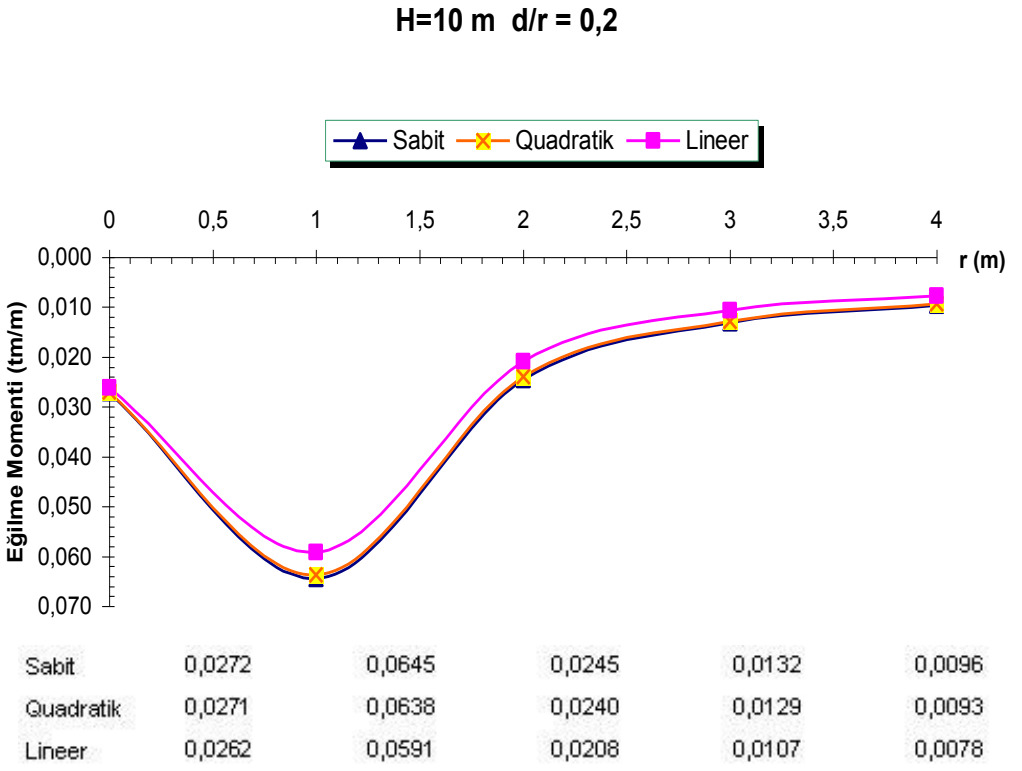
Şekil A.12 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri



Şekil A.13 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar

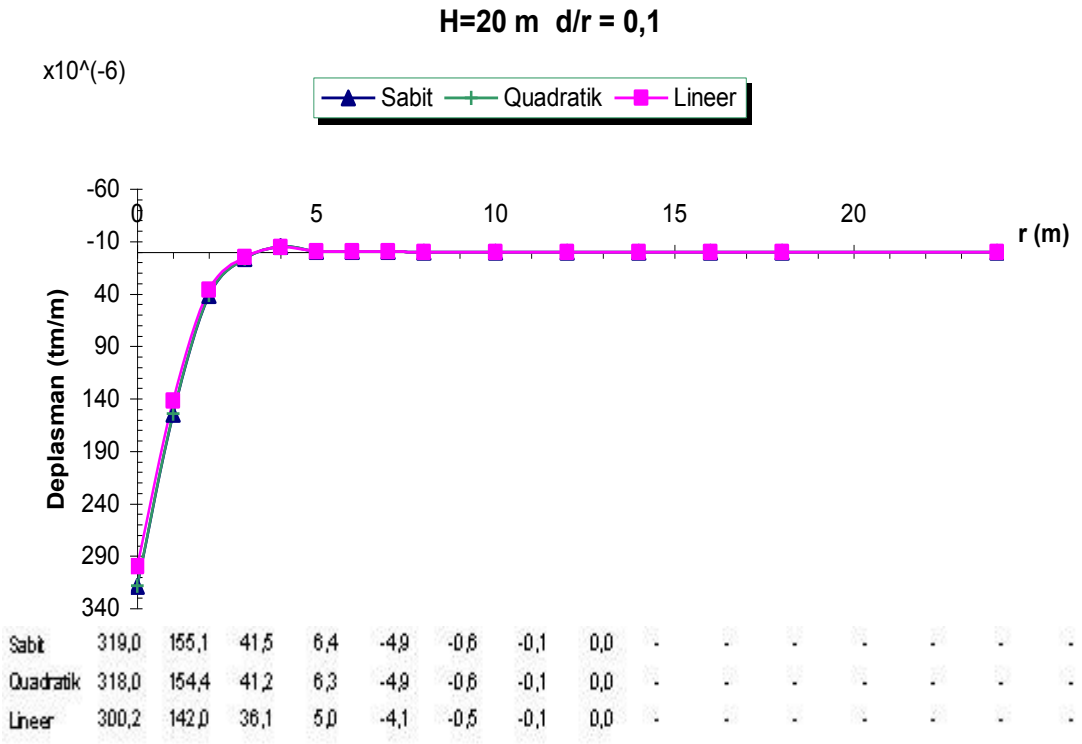


Şekil A.14 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



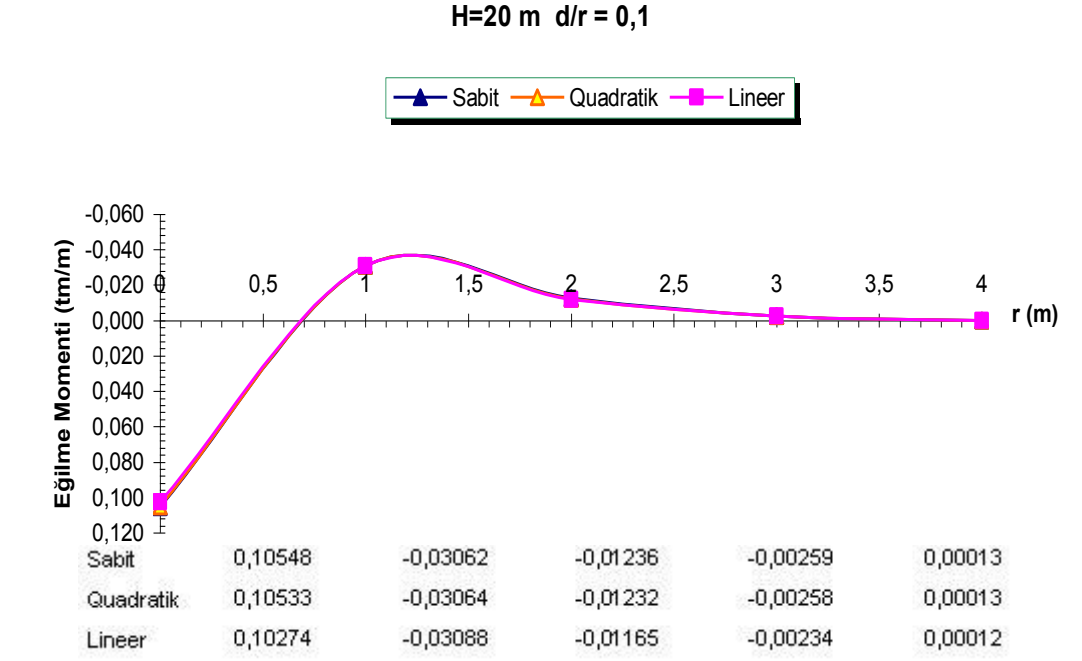
Şekil A.15 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri

A.3. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde H=20 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali



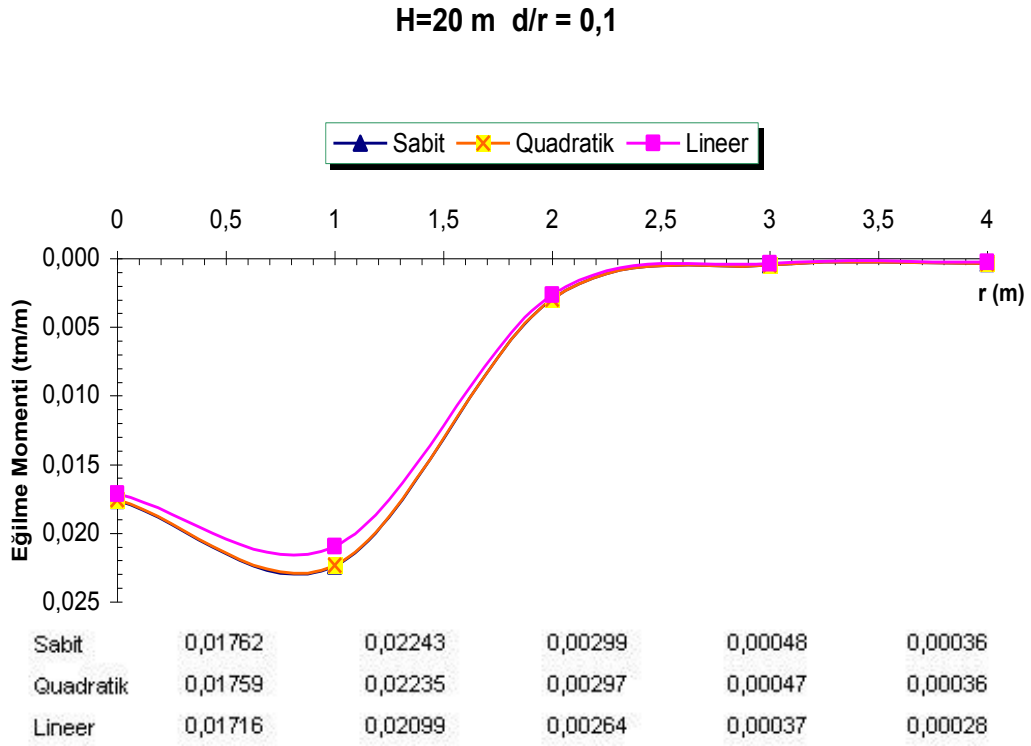
Sabit	319,0	155,1	41,5	6,4	-4,9	-0,6	-0,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Quadratik	318,0	154,4	41,2	6,3	-4,9	-0,6	-0,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Lineer	300,2	142,0	36,1	5,0	-4,1	-0,5	-0,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-

Şekil A.16 Sabit, Lineer ve Kuadratik Iki Parametreli Zeminde Deplasmanlar

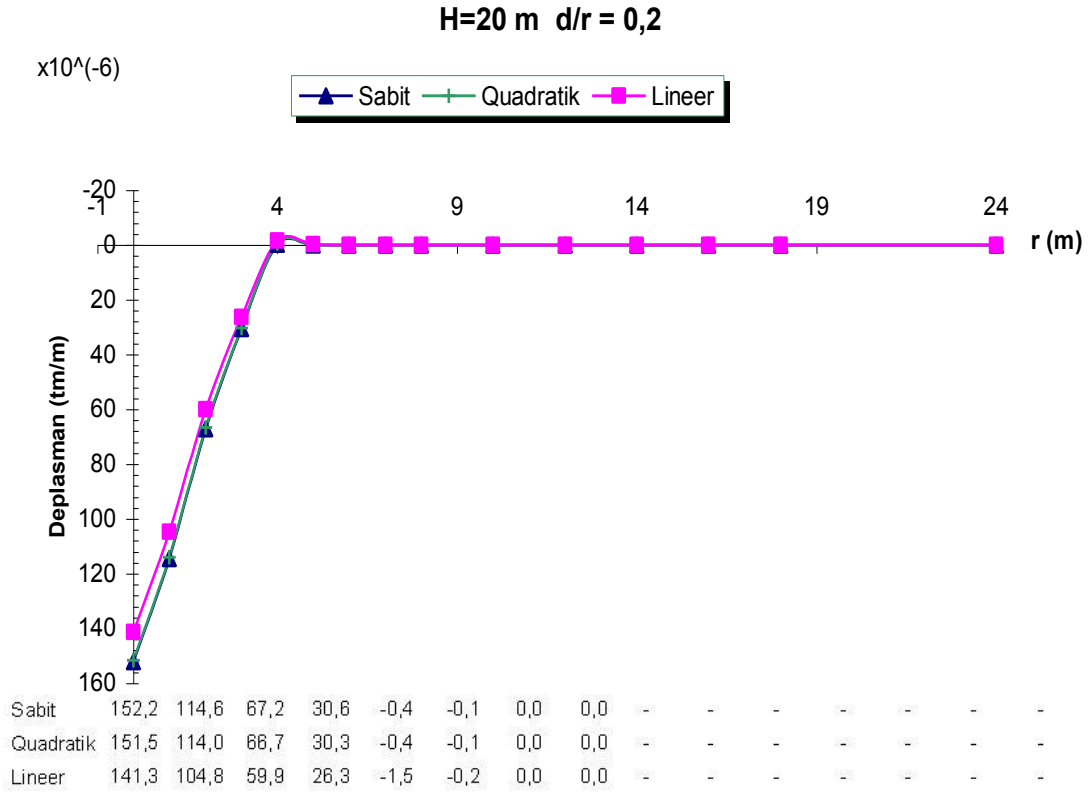


Sabit	0,10548	-0,03062	-0,01236	-0,00259	0,00013
Quadratik	0,10533	-0,03064	-0,01232	-0,00258	0,00013
Lineer	0,10274	-0,03088	-0,01165	-0,00234	0,00012

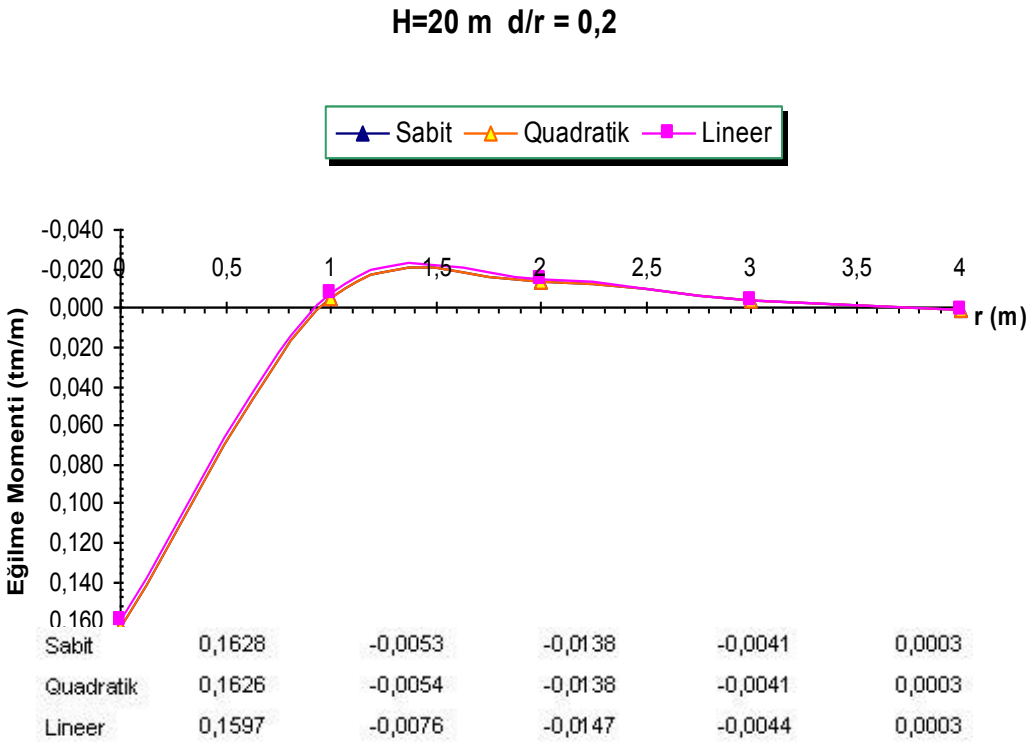
Şekil A.17 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



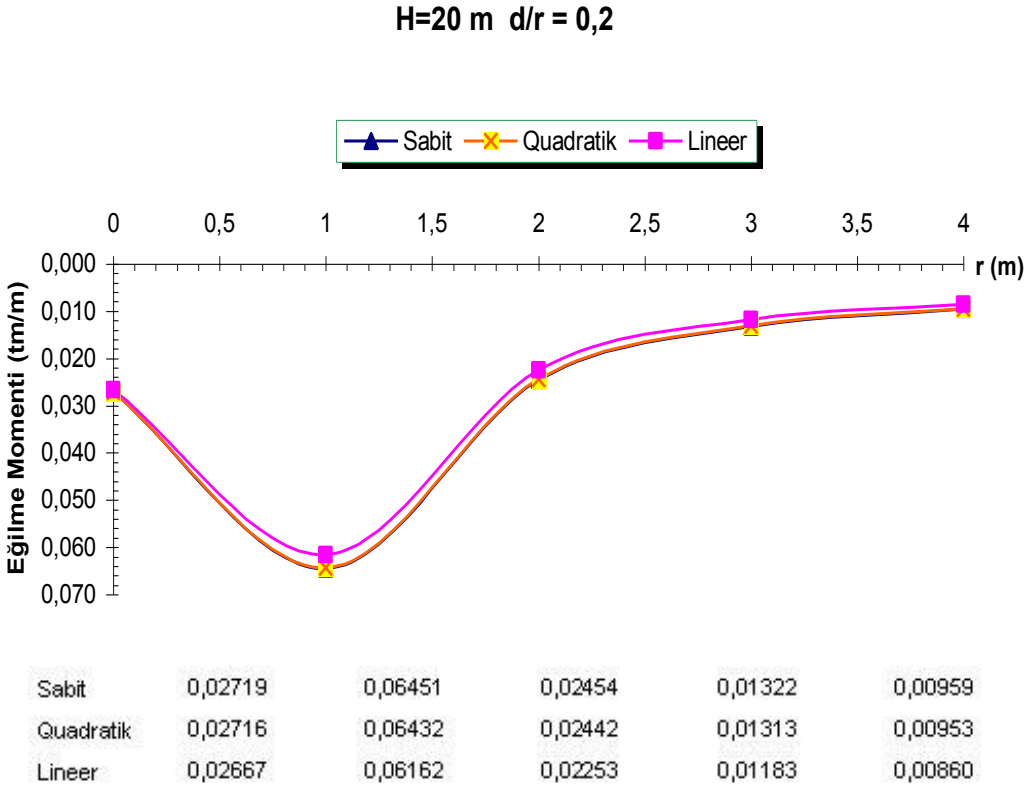
Şekil A.18 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri



Şekil A.19 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



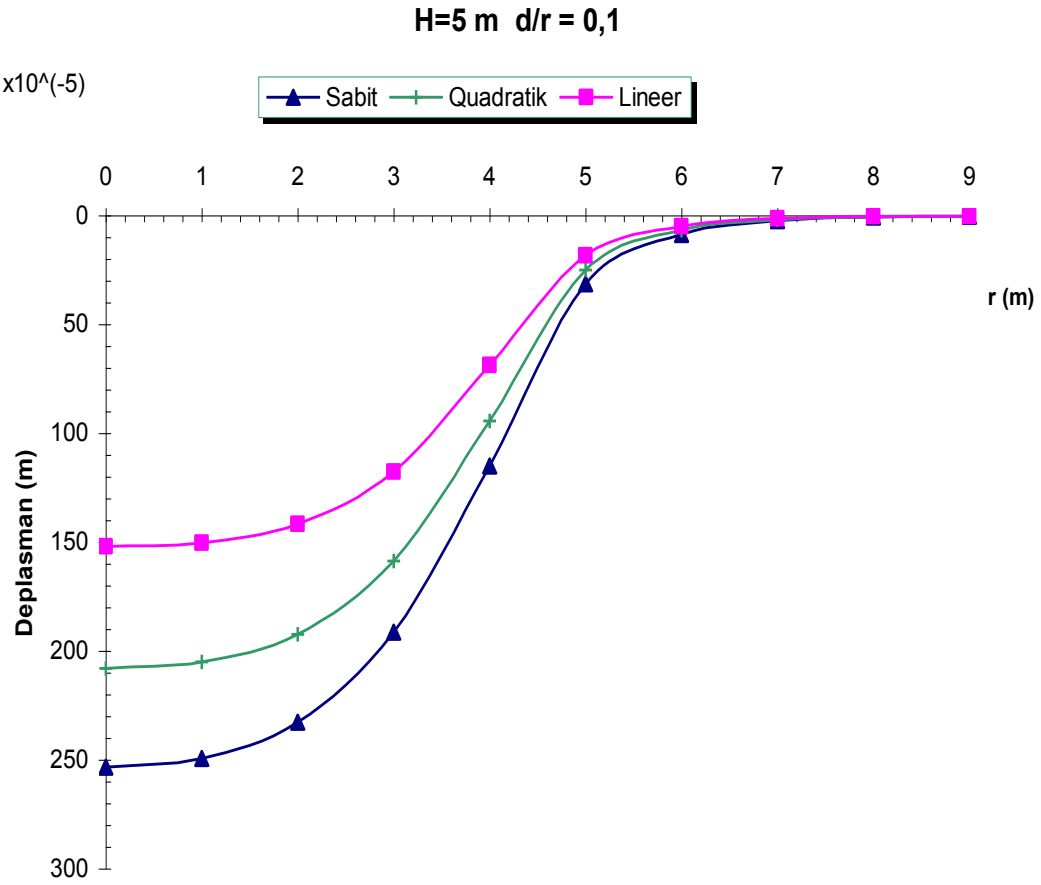
Şekil A.20 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



Şekil A.21 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri

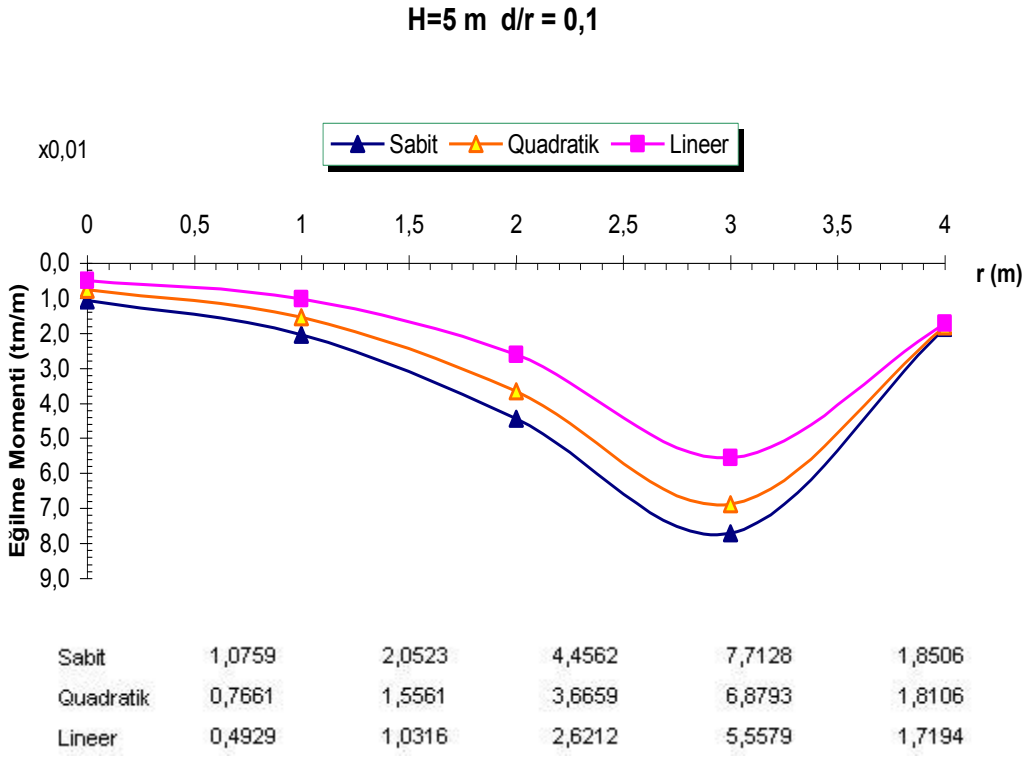
EK B

B.1. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde 5 m'lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Yayılı Yük Etkimesi Hali

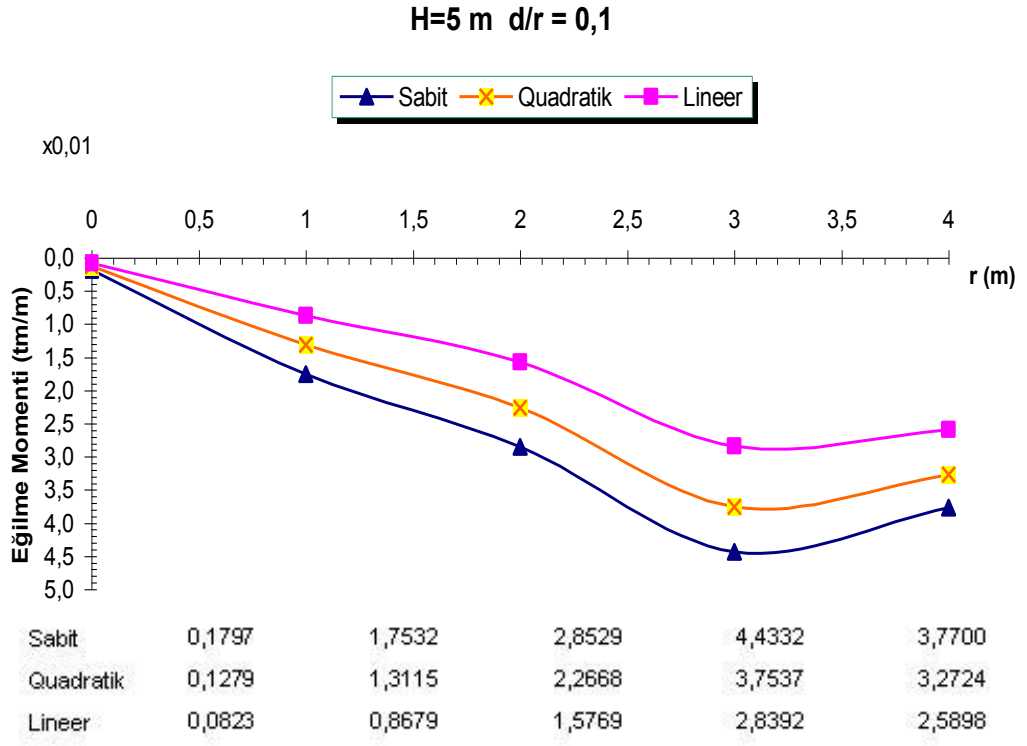


Sabit	253,23	249,2	232,72	191,23	115,16	31,352	8,6972	2,4627	0,7625	0,4187
Quadratik	207,99	205,02	192,37	158,79	94,327	24,913	6,7043	1,8401	0,5503	0,2945
Lineer	152,13	150,17	141,63	117,68	68,701	18,202	4,9139	1,3531	0,4061	0,2179

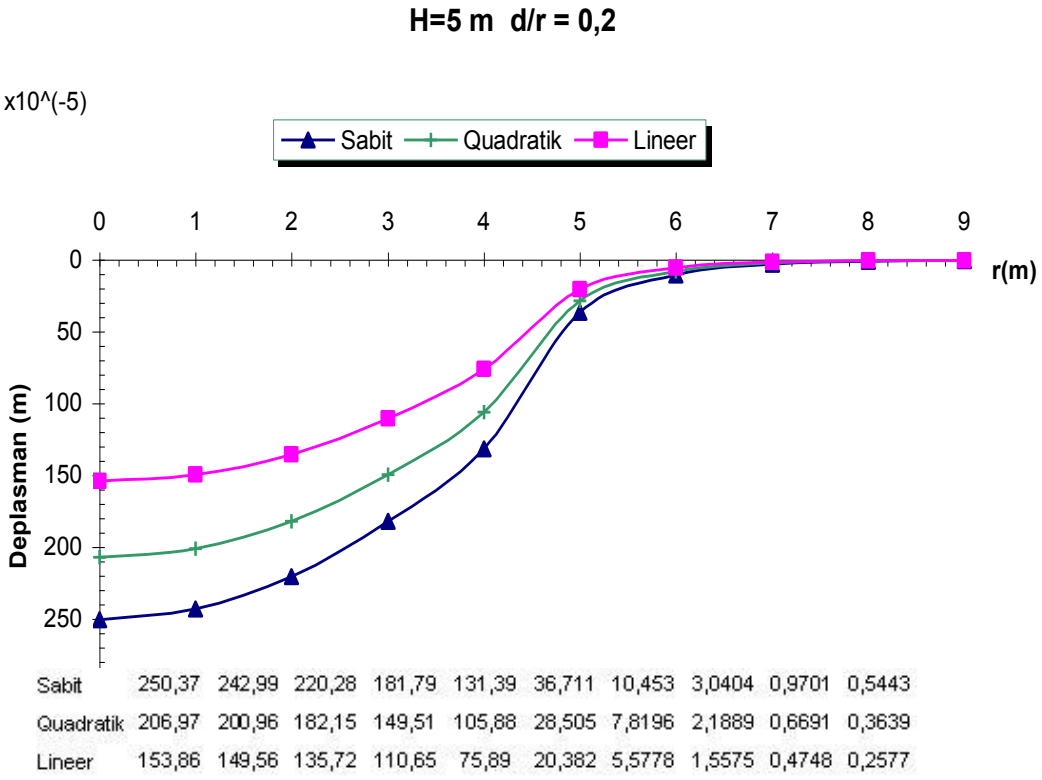
Şekil B.1 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



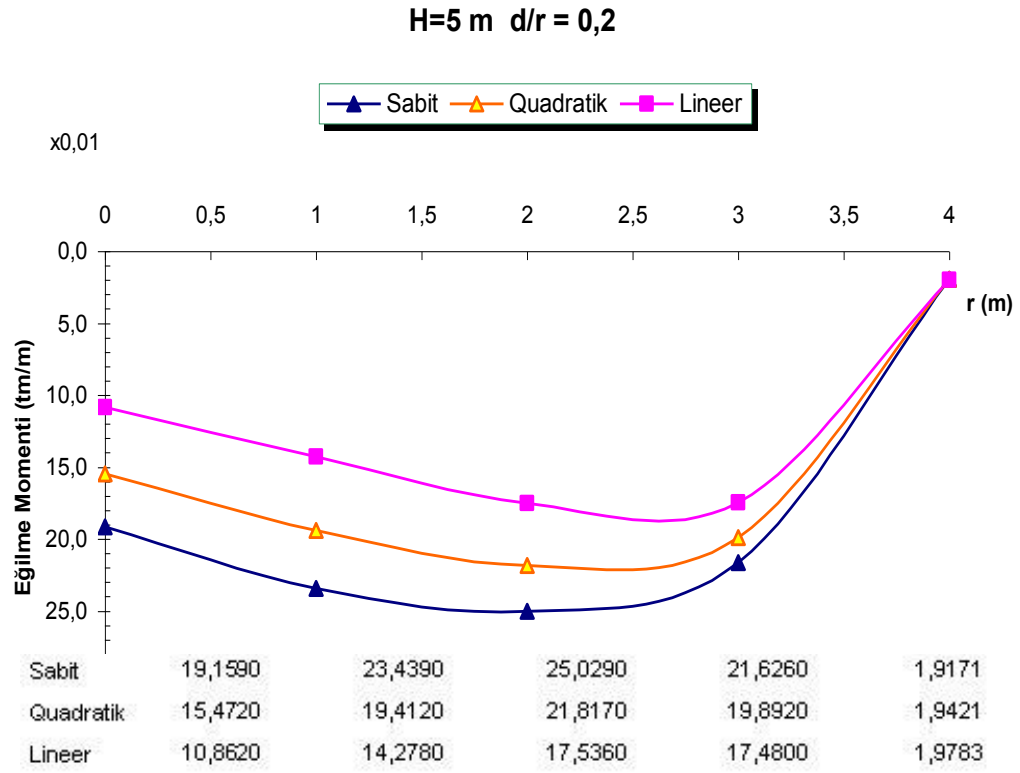
Şekil B.2 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



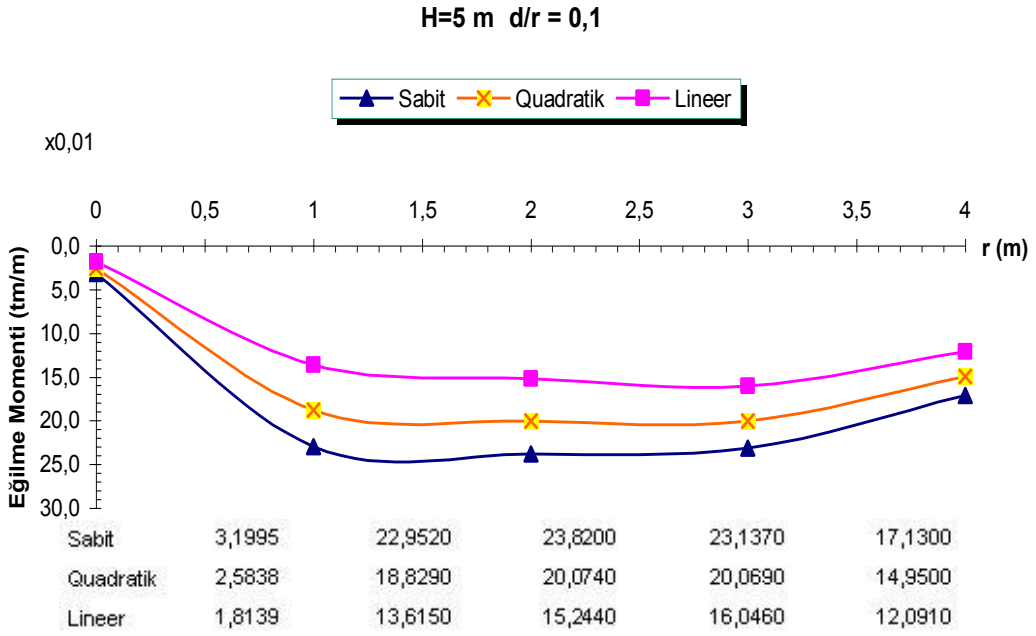
Şekil B.3 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri



Şekil B.4 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar

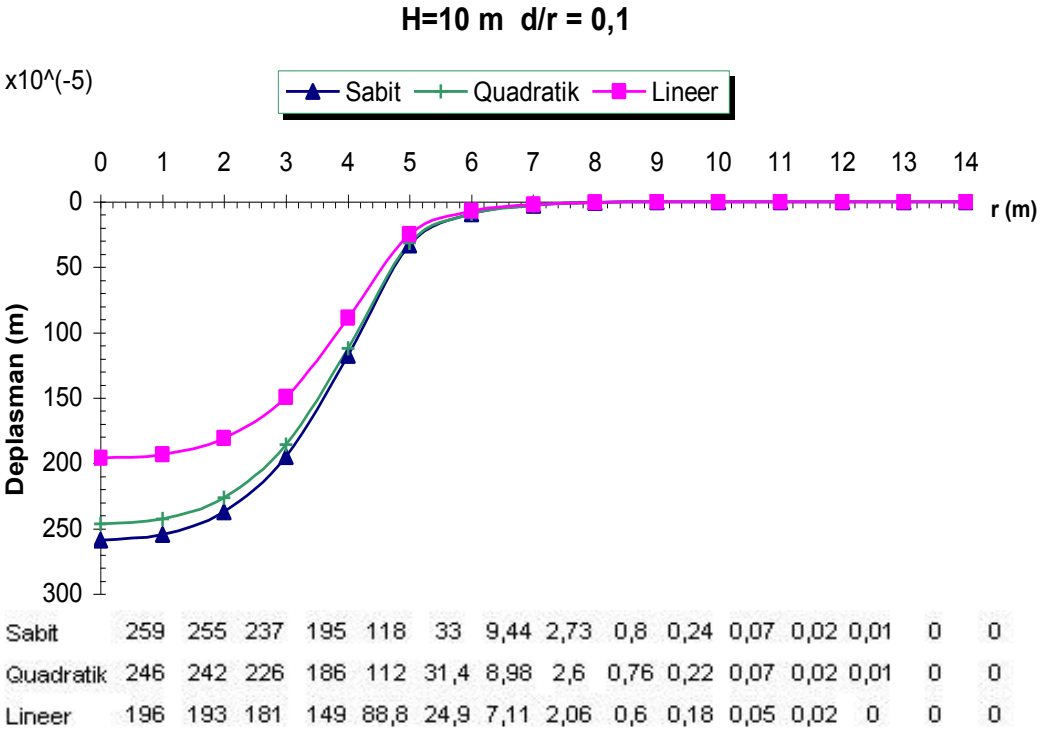


Şekil B.5 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri

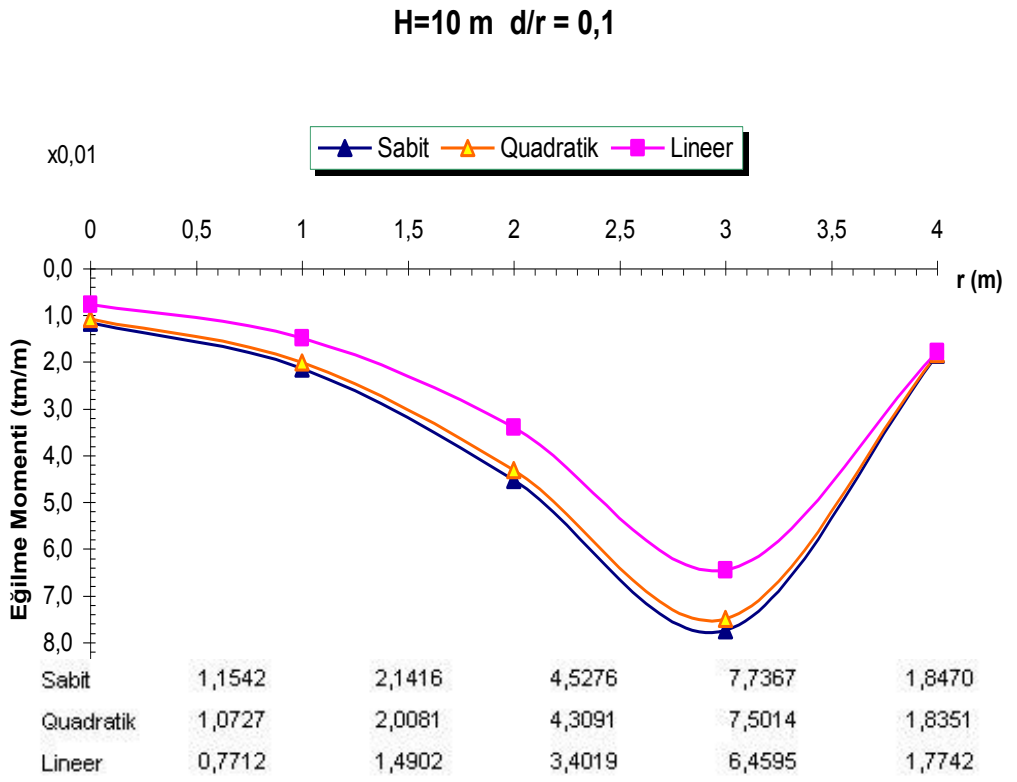


Şekil B.6 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri

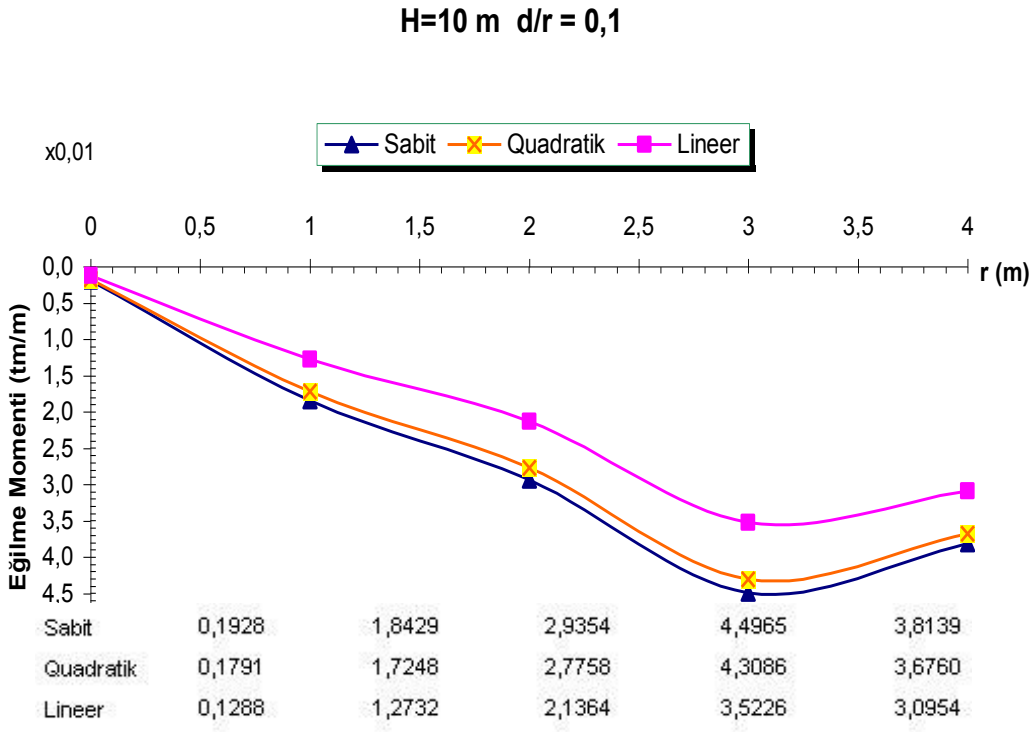
B.2. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde H=10 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Yayılı Yük Etkimesi Hali



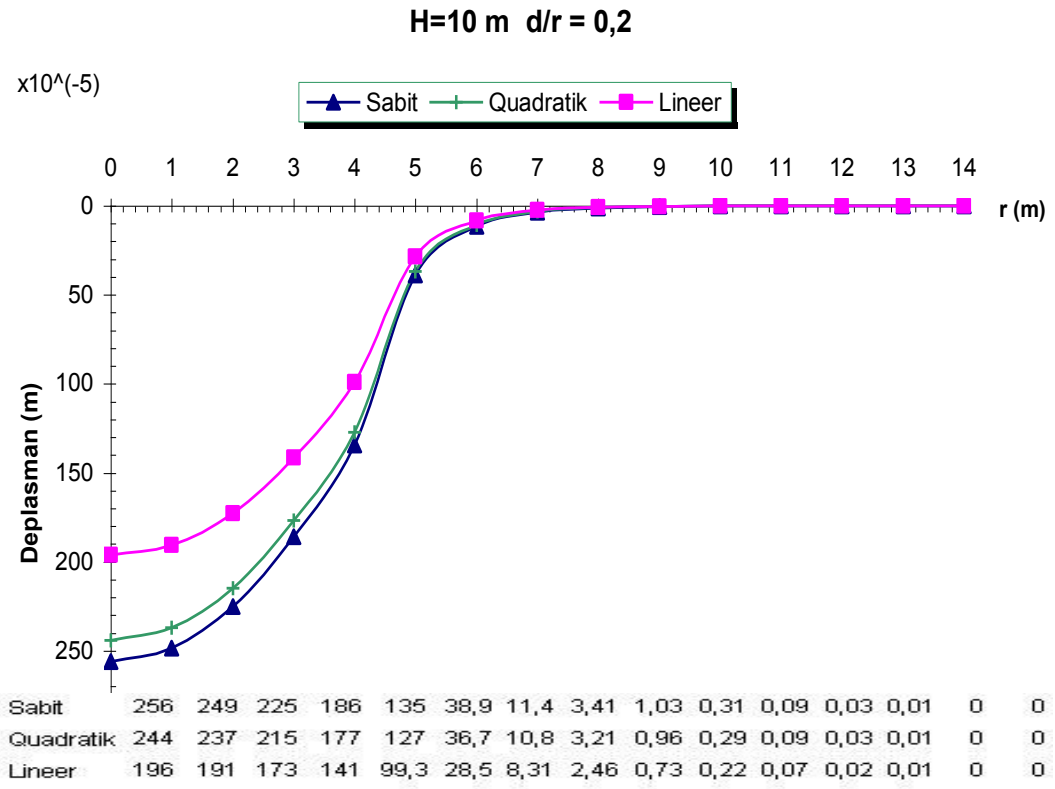
Şekil B.7 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



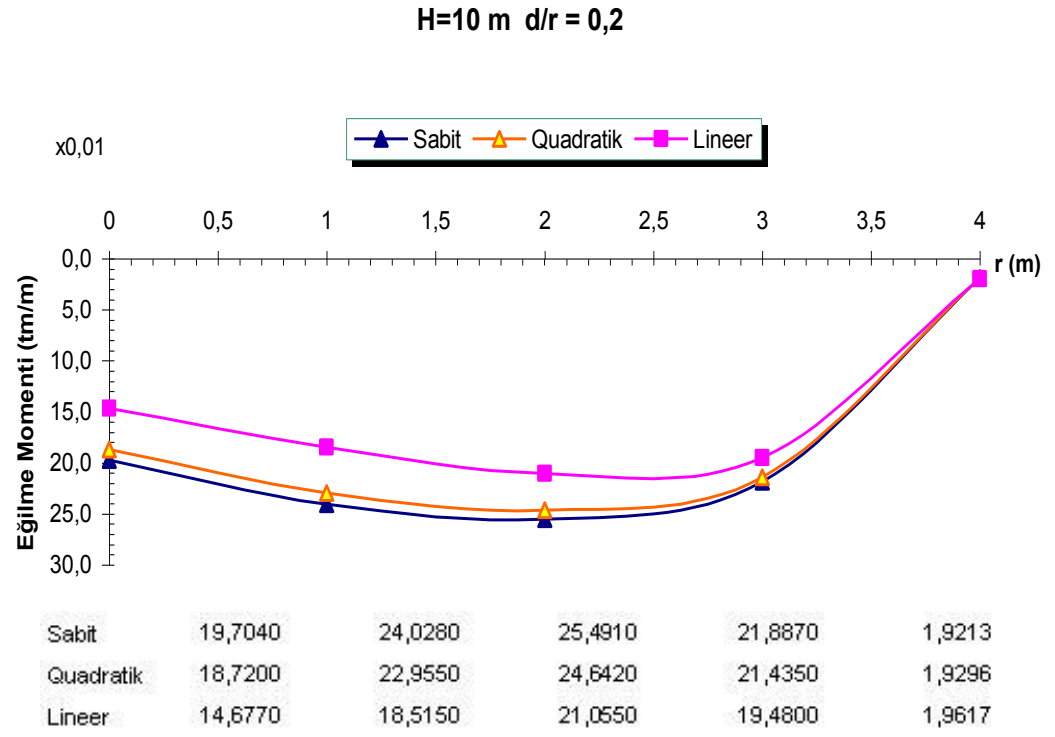
Şekil B.8 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



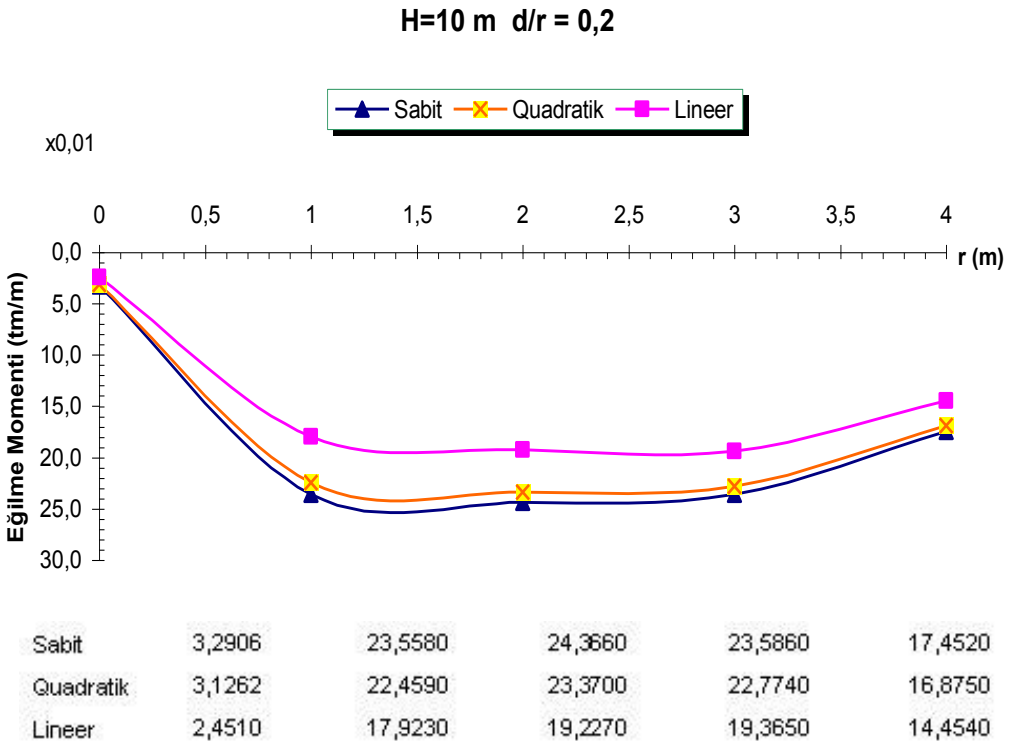
Şekil B.9 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri



Şekil B.10 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



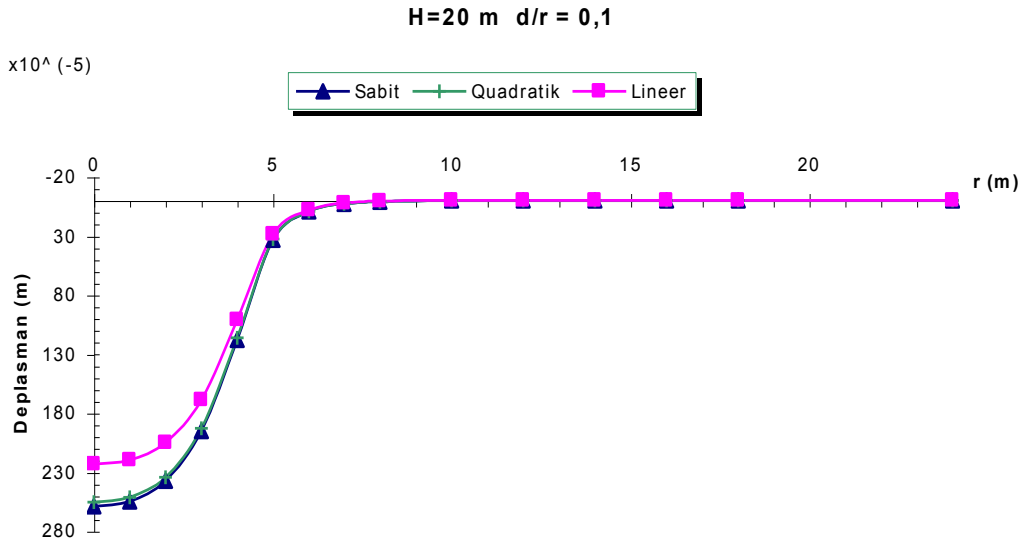
Şekil B.11 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



Sabit	3,2906	23,5580	24,3660	23,5860	17,4520
Quadratik	3,1262	22,4590	23,3700	22,7740	16,8750
Lineer	2,4510	17,9230	19,2270	19,3650	14,4540

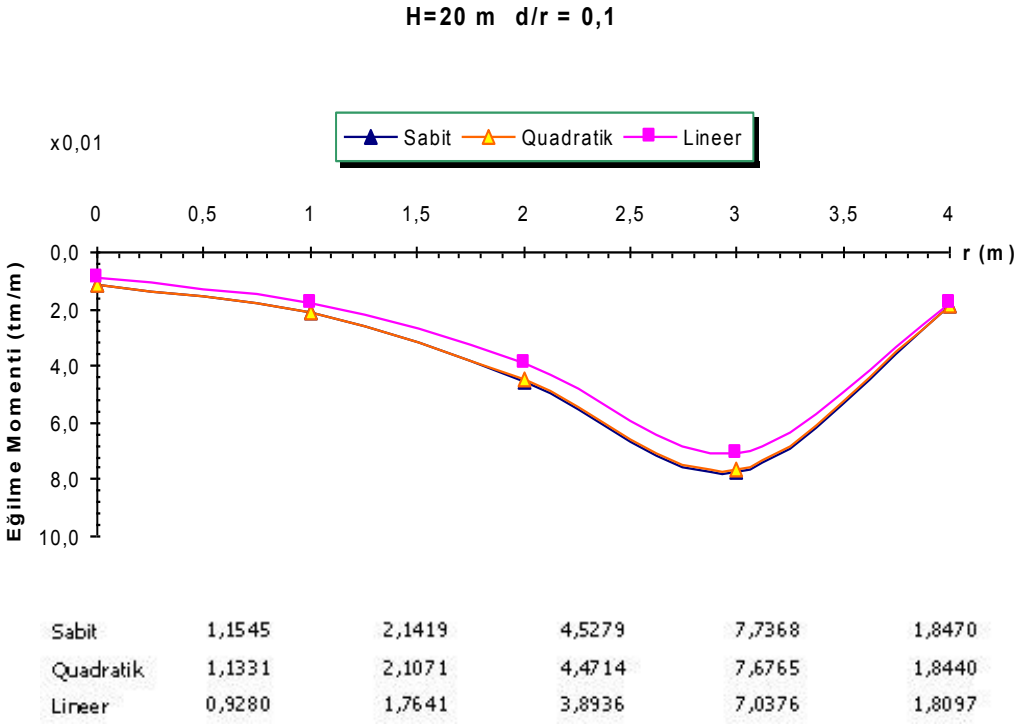
Şekil B.12 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri

B.3. İki Parametreli Zemine Oturan Dairesel Temelde H=20 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Yayılı Yük Etkimesi Hali



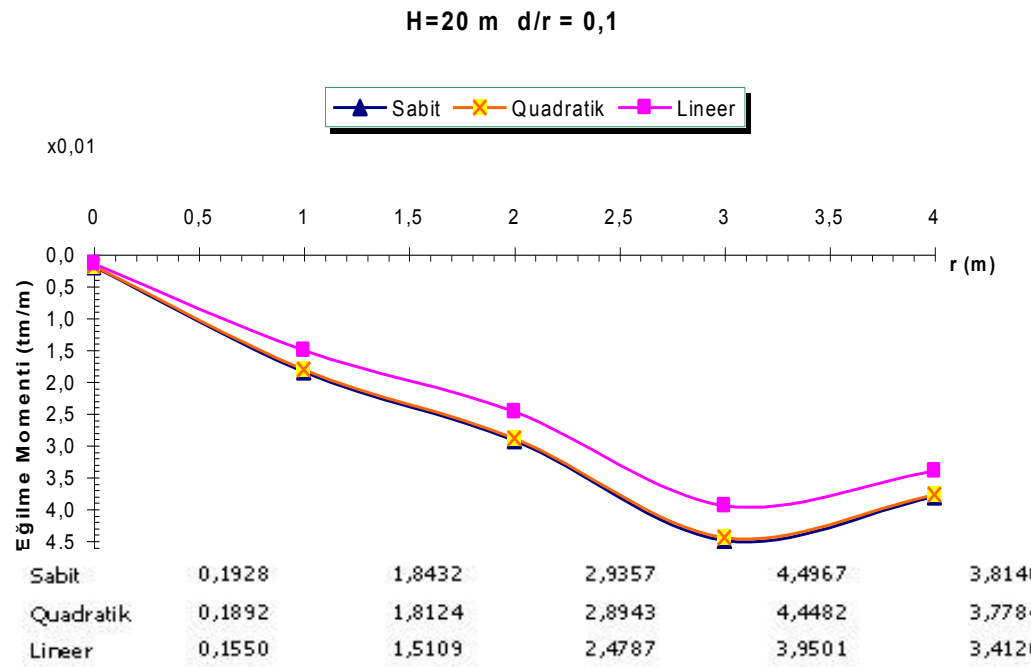
Sabit	258,8	254,6	237,4	194,9	117,7	33,05	9,447	2,735	0,80	-	-	-
Quadratik	255,6	251,4	234,5	192,6	116,2	32,63	9,327	2,700	0,79	-	-	-
Lineer	223,1	219,6	205,4	169,1	101,2	28,41	8,118	2,349	0,69	-	-	-

Şekil B.13 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



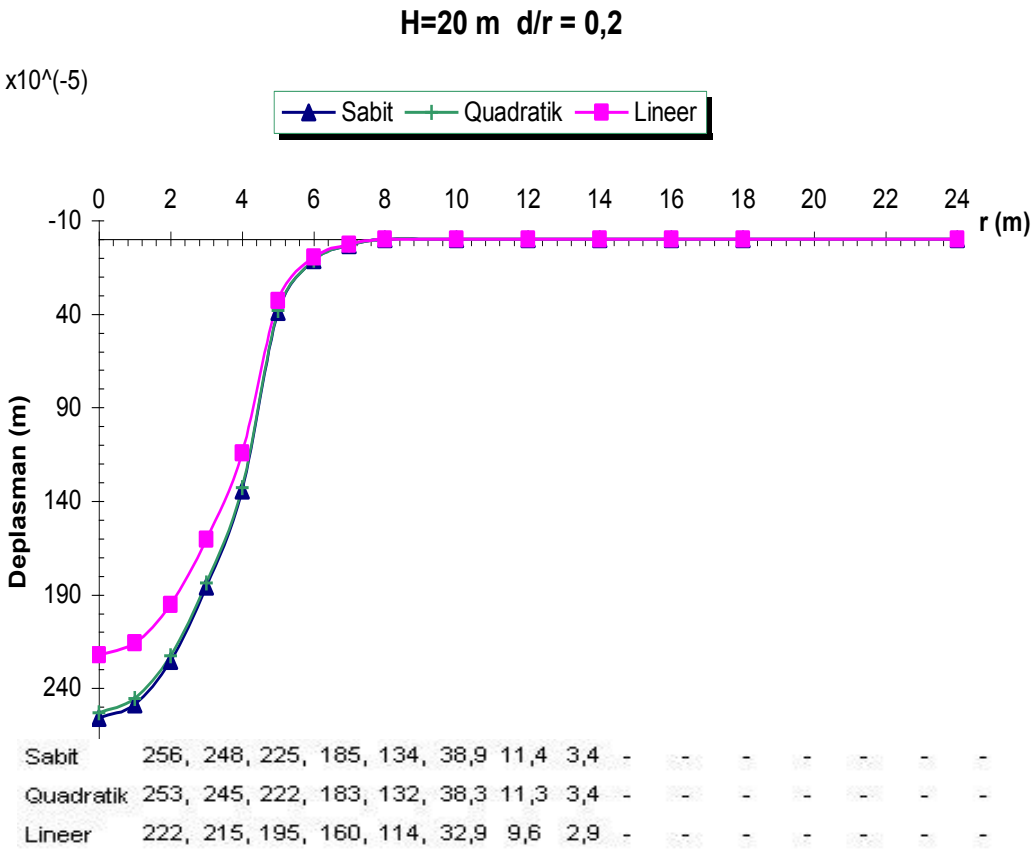
Sabit	1,1545	2,1419	4,5279	7,7368	1,8470
Quadratik	1,1331	2,1071	4,4714	7,6765	1,8440
Lineer	0,9280	1,7641	3,8936	7,0376	1,8097

Şekil B.14 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri

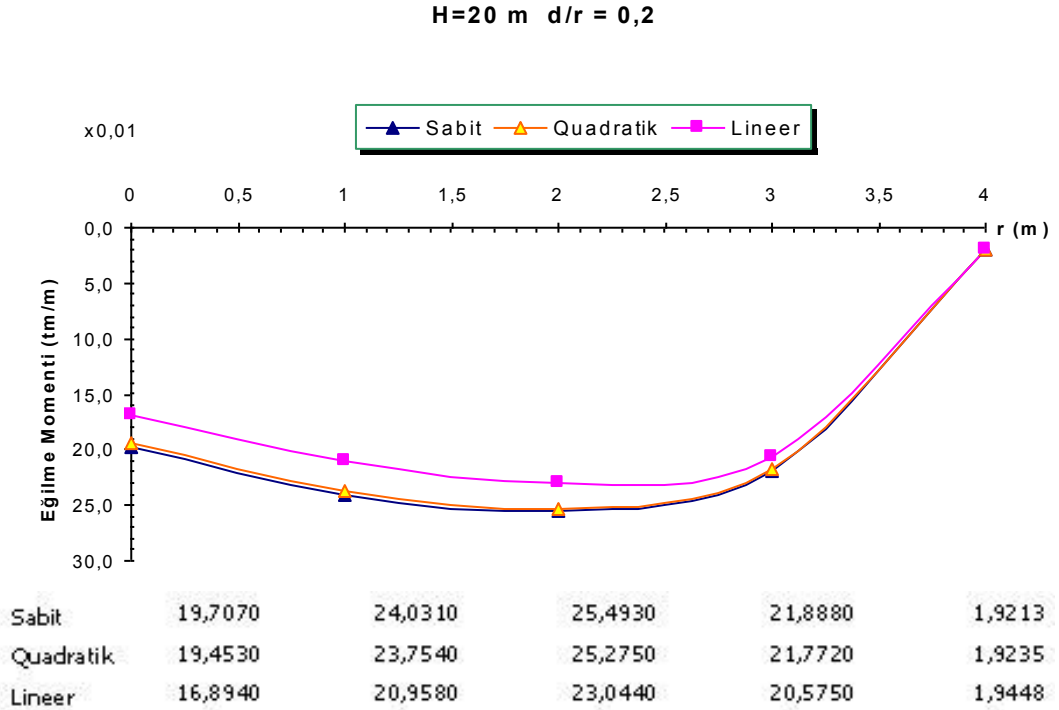


Sabit	0,1928	1,8432	2,9357	4,4967	3,8140
Quadratik	0,1892	1,8124	2,8943	4,4482	3,7784
Lineer	0,1550	1,5109	2,4787	3,9501	3,4120

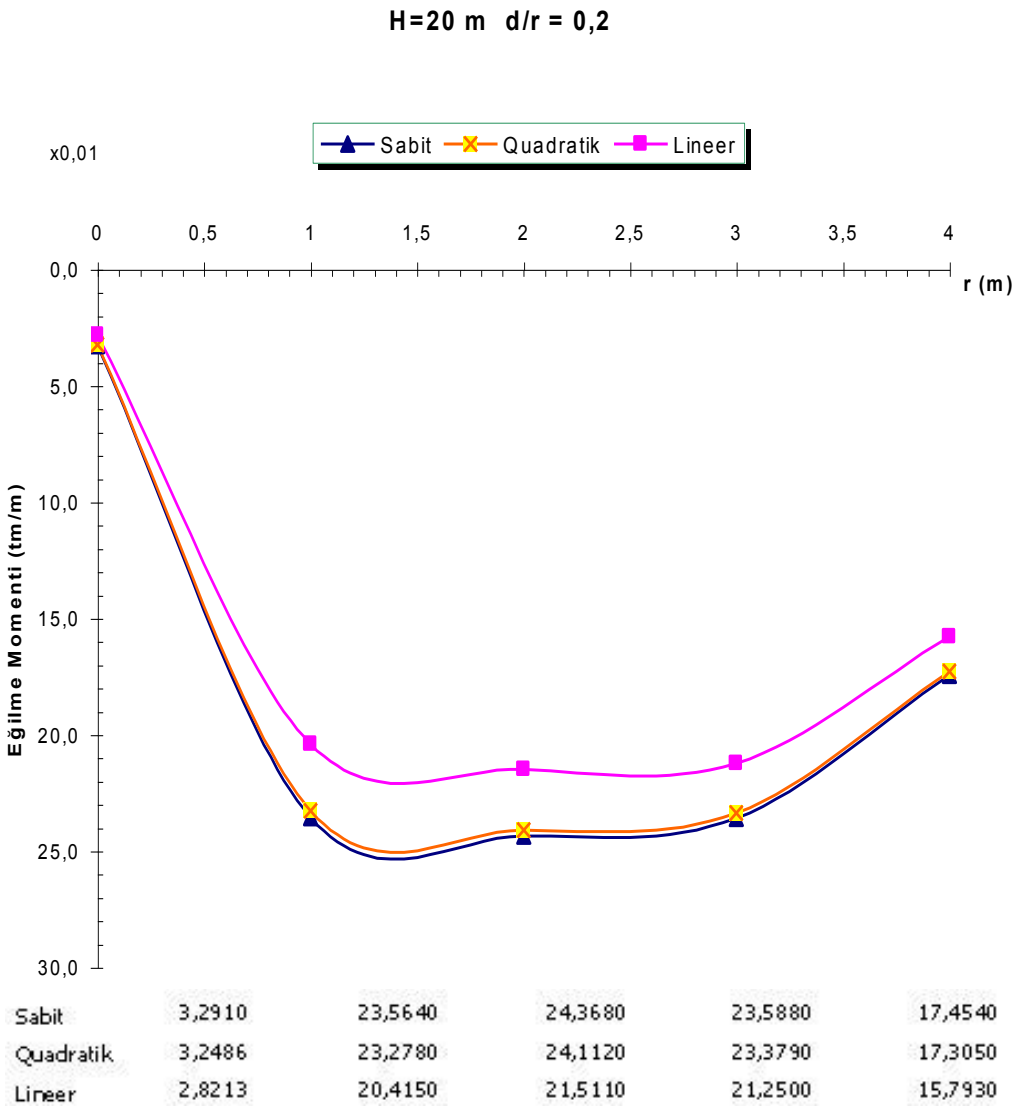
Şekil B.15 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri



Şekil B.16 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



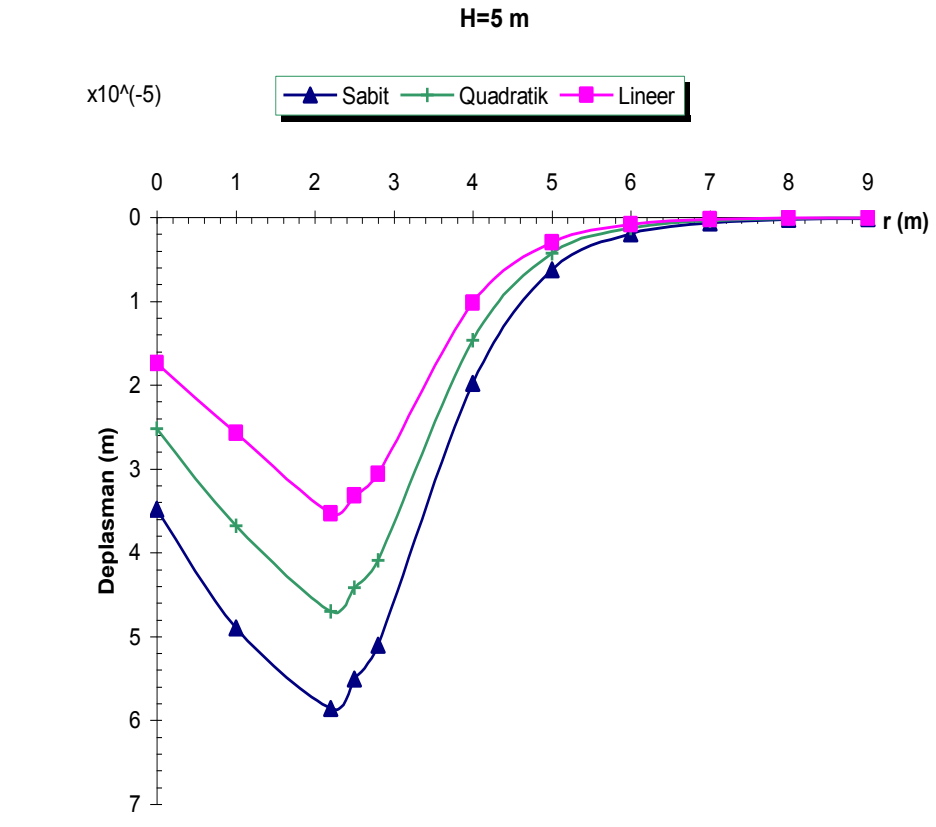
Şekil B.17 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



Şekil B.18 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri

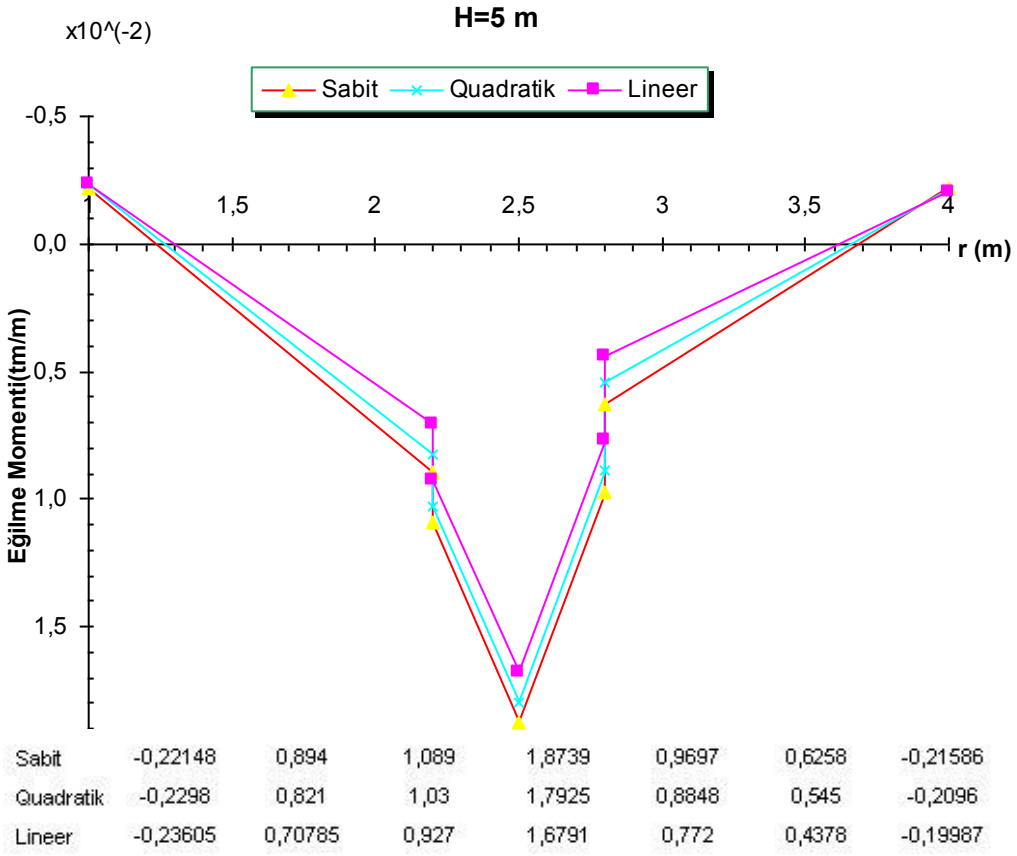
EK C

C.1. İki Parametreli Elastik Zemine Oturan Değişken Kesitli Dairesel Plak Temelde H=5 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali



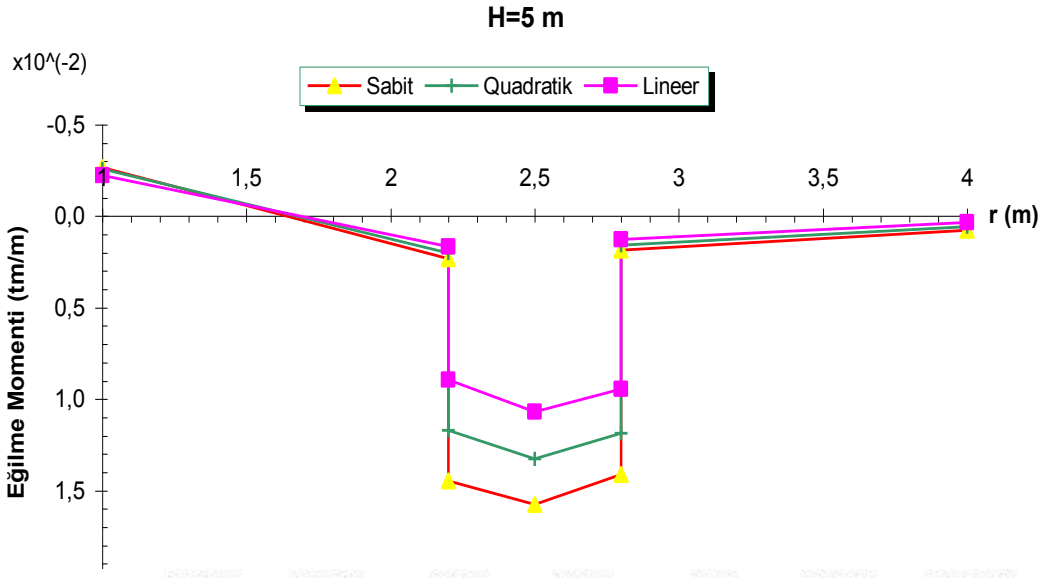
Sabit	3,483	4,895	5,863	5,509	5,107	1,984	0,623	0,200	0,066	0,024	0,015
Quadratik	2,518	3,682	4,704	4,420	4,088	1,465	0,431	0,129	0,040	0,013	0,008
Lineer	1,742	2,570	3,533	3,319	3,061	1,022	0,296	0,088	0,026	0,009	0,005

Şekil C.1 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



Sabit	-0,22148	0,894	1,089	1,8739	0,9697	0,6258	-0,21586
Quadratik	-0,2298	0,821	1,03	1,7925	0,8848	0,545	-0,2096
Lineer	-0,23605	0,70785	0,927	1,6791	0,772	0,4378	-0,19987

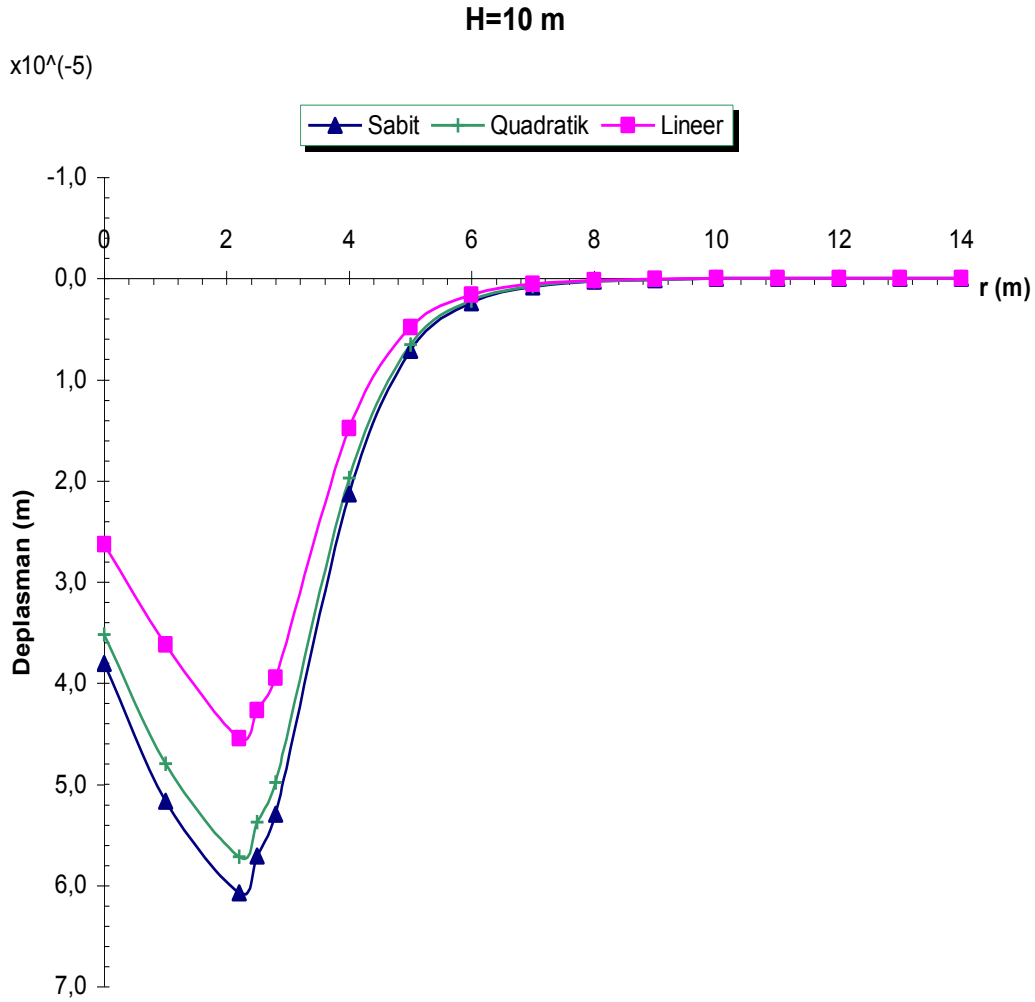
Şekil C.2 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



Sabit	-0,26643	0,2303	1,446	1,5736	1,412	0,1845	0,07497
Quadratik	-0,25737	0,201	1,17	1,3275	1,186	0,158	0,056513
Lineer	-0,224	0,166	0,894	1,069	0,945	0,125	0,035

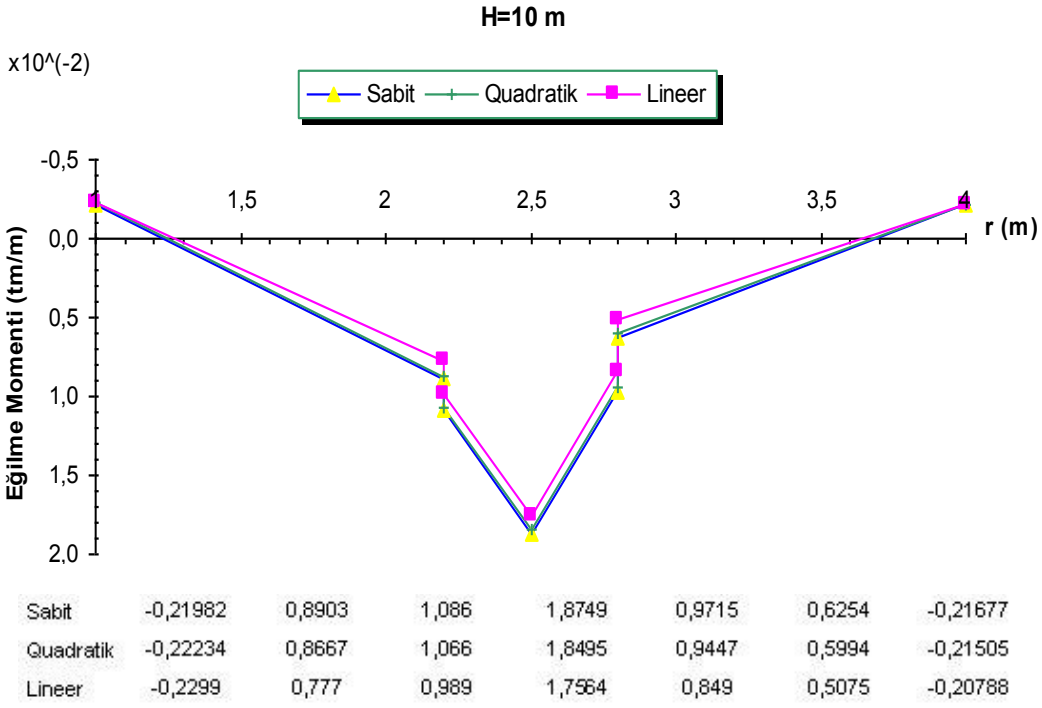
Şekil C.3 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri

C.2. İki Parametreli Elastik Zemine Oturan Değişken Kesitli Dairesel Plak Temelde H=10 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali



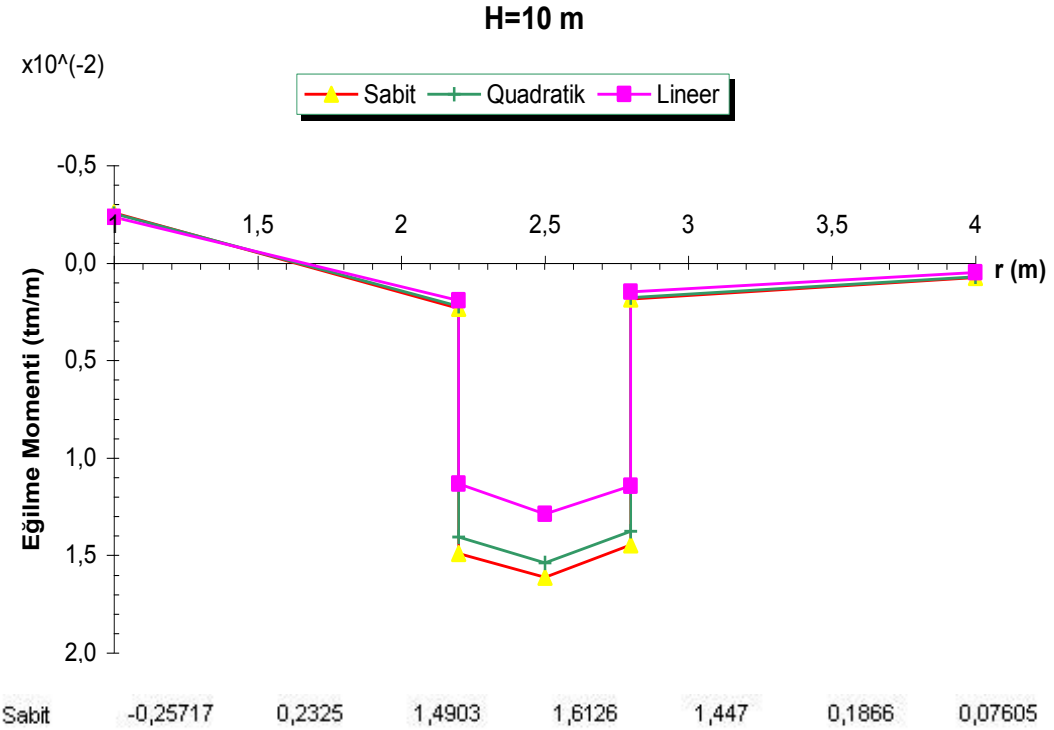
Sabit	3,80	5,16	6,07	5,70	5,29	2,13	0,71	0,24	0,08	0,02	0,01	-	-	-	-	-
Quadratik	3,52	4,79	5,71	5,37	4,98	1,97	0,65	0,22	0,07	0,02	0,00	-	-	-	-	-
Lineer	2,62	3,61	4,54	4,27	3,95	1,47	0,48	0,15	0,05	0,01	0,00	-	-	-	-	-

Şekil C.4 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



Sabit	-0,21982	0,8903	1,086	1,8749	0,9715	0,6254	-0,21677
Quadratik	-0,22234	0,8667	1,066	1,8495	0,9447	0,5994	-0,21505
Lineer	-0,2299	0,777	0,989	1,7564	0,849	0,5075	-0,20788

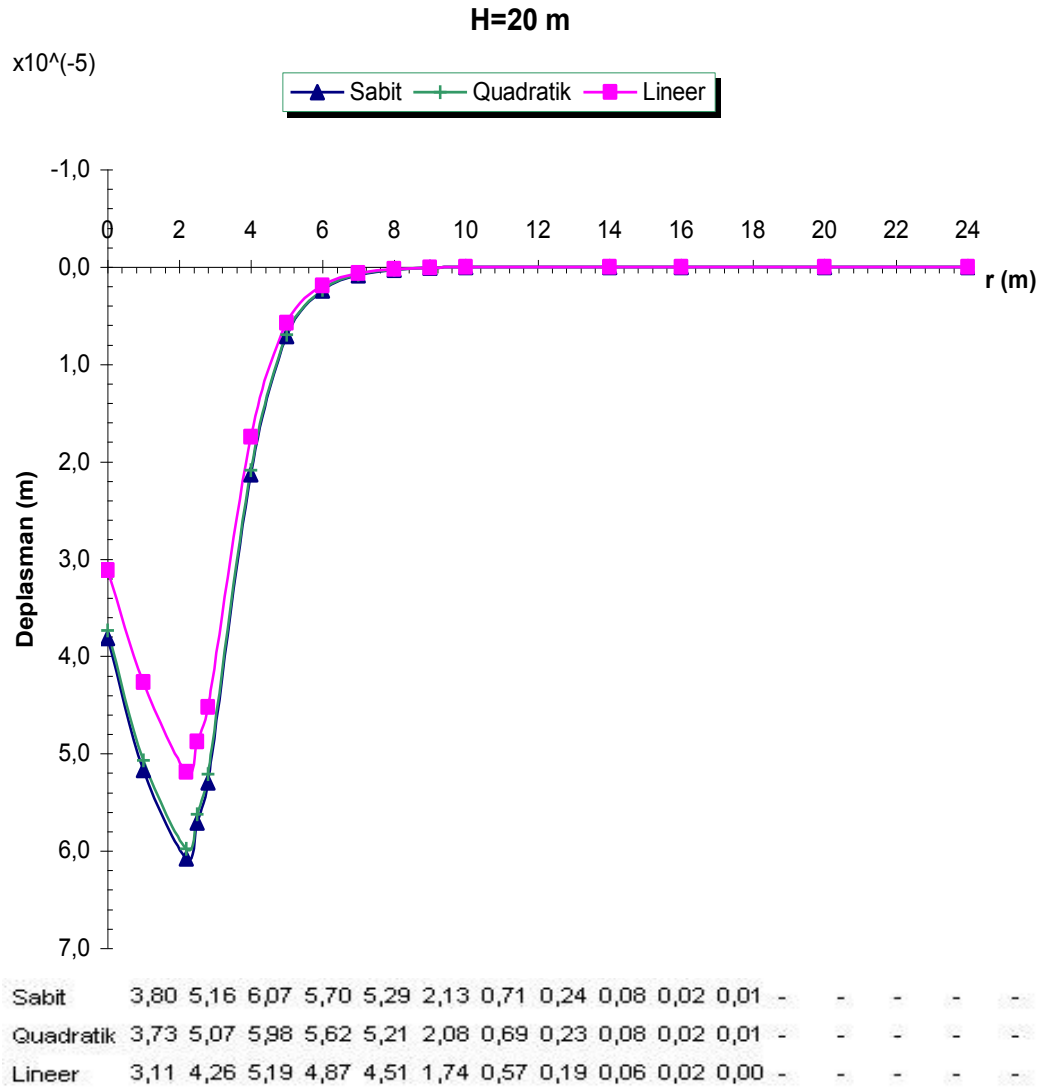
Şekil C.5 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



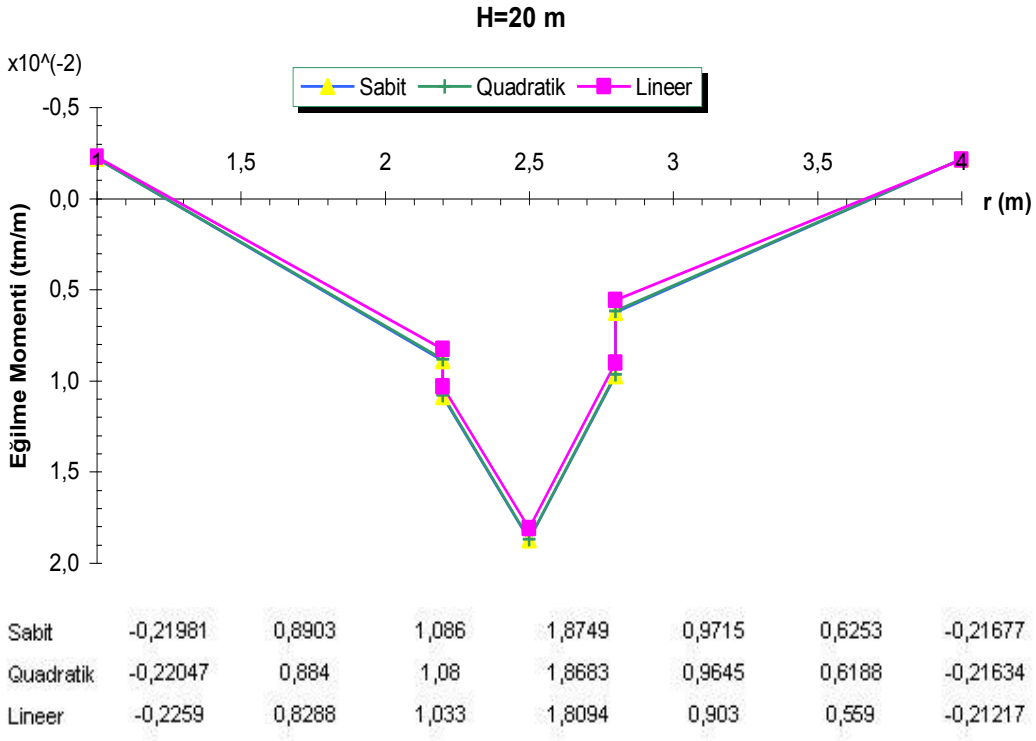
Sabit	-0,25717	0,2325	1,4903	1,6126	1,447	0,1866	0,07605
Quadratik	-0,25363	0,2235	1,408	1,5376	1,378	0,1782	0,070168
Lineer	-0,23499	0,1919	1,134	1,2872	1,146	0,149	0,050222

Şekil C.6 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri

C.3. İki Parametreli Elastik Zemine Oturan Değişken Kesitli Dairesel Plak Temelde H=20 m' lik Sıkışabilir Zemin Tabaka Kalınlığında Tekil Yük Etkimesi Hali

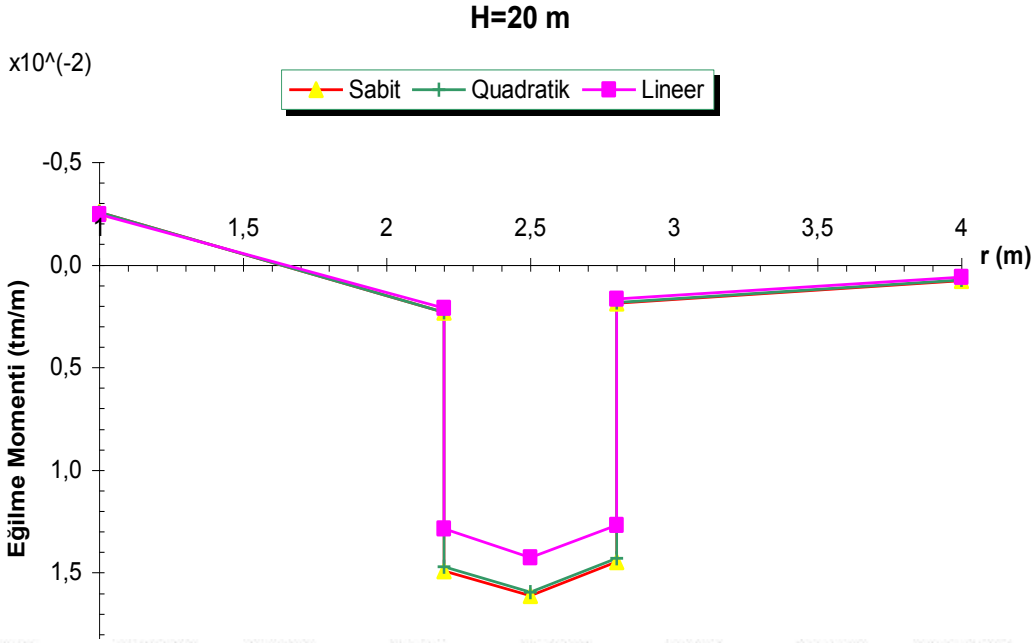


Şekil C.7 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde Deplasmanlar



Sabit	-0,21981	0,8903	1,086	1,8749	0,9715	0,6253	-0,21677
Quadratik	-0,22047	0,884	1,08	1,8683	0,9645	0,6188	-0,21634
Lineer	-0,2259	0,8288	1,033	1,8094	0,903	0,559	-0,21217

Şekil C.8 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_r Eğilme Momentleri



Sabit	-0,25709	0,2325	1,491	1,6129	1,447	0,1867	0,076057
Quadratik	-0,25621	0,23	1,47	1,5932	1,429	0,1844	0,074514
Lineer	-0,24644	0,2097	1,286	1,426	1,27	0,165	0,061284

Şekil C.9 Sabit, Lineer ve Kuadratik İki Parametreli Zeminde M_θ Eğilme Momentleri

ÖZGEÇMİŞ

Beyhan TÜRKKAN, 1979 yılında Bulgaristan'da doğmuştur. İlkokul eğitimine Bulgaristan'da başladıktan sonra 1989 yılında Türkiye'ye göç etmiştir. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamlamıştır.1998 yılında Pertevniyal Süper Lisesinden mezun olduktan sonra üniversite eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesinde tamamlamıştır. 2002 yılında öğrenimini tamamlayarak, 2002 yılı bahar dönemi başlangıcında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Mühendisliği Programı'nda öğrenim görmeye başlamıştır.