



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**İKİZ TÜNEL İÇEREN TABAKALI YARI-SONSUZ BİR ORTAMIN
STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SONLU VE SONSUZ
ELEMENLAR KULLANILARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Yusuf Ziya YÜKSEL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Doktora Programı

TEMMUZ 2024

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İKİZ TÜNEL İÇEREN TABAKALI YARI-SONSUZ BİR ORTAMIN
STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SONLU VE SONSUZ
ELEMENLAR KULLANILARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Yusuf Ziya YÜKSEL

182327470001

ORCID: 0000-0002-2615-1590

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Program Seçiniz

Danışman: Prof. Dr. Şeref Doğuşcan AKBAŞ

ORCID: 0000-0001-5327-3406

TEMMUZ 2024



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneliği olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 210D004 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Yusuf Ziya YÜKSEL

İmzası:

YUSUF ZIYA YÜKSEL



Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Tezin oluşma ve çalışma süresince, gece gündüz demeden her türlü desteği veren, yardım eden çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Şeref Doğuşcan AKBAŞ'a yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim. Ayrıca doktora çalışmam süresince ve hayatımın her aşamasında bana maddi - manevi her türlü desteği veren çok kıymetli eşime ve aileme teşekkür ederim.

Tez çalışmamda, Bursa Teknik Üniversitesi'ne, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne Proje no : 210D004 kapsamında, maddi desteklerinden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Temmuz 2024

Yusuf Ziya YÜKSEL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
SEMBOLLER.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xviii
SUMMARY.....	xx
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. TEORİ VE FORMÜLASYON	14
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	38
4.1 Doğrusal Analizler	41
4.1.1 Doğrusal statik analiz sonuçları	42
4.1.2 Doğrusal dinamik analiz sonuçları	63
4.2 Doğrusal Olmayan Analizler	84
4.2.1 Doğrusal olmayan statik analiz sonuçları	84
4.2.2 Doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları.....	93
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	102
KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ	121

SEMBOLLER

P	: Noktasal yük
q	: Düzgün yayılı yük
$q(t)$: Düzgün yayılı harmonik yük
l_U	: Düzgün yayılı yük uzunluğu
c	: Sönüm
p	: Porozite oranı
x, y	: Gerçek eleman yatay ve düşey koordinatları
L_X	: Yatay doğrultuda sonlu eleman uzunluğu
L_{Y1}	: Düşey doğrultuda sonlu eleman uzunluğu
L_{Y2}	: Düşey doğrultuda sonlu eleman uzunluğu
l_{y1}	: Düşey doğrultuda sonlu eleman uzunluğu
l_{y2}	: Düşey doğrultuda sonlu eleman uzunluğu
L_{Xi}	: Yatay doğrultuda sonsuz eleman uzunluğu
L_{Yi}	: Düşey doğrultuda sonsuz eleman uzunluğu
l_x	: Yatay doğrultuda tünel-boşluk iç uzunluğu
l_y	: Düşey doğrultuda tünel-boşluk iç uzunluğu
t_x	: Yatay doğrultuda tünel kalınlığı
t_y	: Düşey doğrultuda tünel kalınlığı
h_x	: Tünel arası mesafe
h_y	: Tünel ile zemin yüzeyi arası mesafe
σ_x, σ_y	: Normal gerilmeler
τ_{xy}	: Kayma gerilmeleri
ρ	: Malzeme kütle yoğunluğu
u, v	: x ve y doğrultularındaki deplasmanlar
$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$: Şekil değiştirmeler
f_x, f_y	: x ve y doğrultularındaki hacim kuvvetleri
D	: Malzeme sabiti
E, G, ν	: Elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranı

A_e	: Eleman alanı
h_e	: Kalınlık
N_i	: Sonlu eleman interpolasyon şekil fonksiyonu
u_i, v_i	: Sonlu eleman düğüm noktalarındaki yer değiştirme
B	: Sonlu eleman şekil değiştirme matrisi
Δ	: Sonlu eleman düğüm noktasındaki yer değiştirme
L	: Diferansiyel operatör
k	: Rijitlik matrisi
m	: Kütle matrisi
C	: Sönüm matrisi
f	: Eleman yük vektörü
$\dot{\Delta}$: Sonlu eleman düğüm noktasındaki hız
$\ddot{\Delta}$: Sonlu eleman düğüm noktasındaki ivme
Γ	: Gauss Legendre integrasyon yöntemi
w_i, w_j	: Ağırlık faktörü
λ_i, λ_j	: Örnek nokta sayıları
ξ, η	: Referans eleman yatay ve düşey koordinatları
J	: Jacobian matrisi
K	: Genel rijitlik matrisi
M	: Genel kütle matrisi
M_i	: Sonsuz eleman geometrik şekil fonksiyonları
u, \dot{u}, \ddot{u}	: Yer değiştirme, hız ve ivme vektörleri
α, β	: Newmark β yöntemi sabitleri
Δt	: Zaman artış adımı
$w_{r=0}$: Boussinesq teorisi
n_x, n_y	: Sonlu eleman sayısı
E_1	: Birinci tabakanın Young modülü
ν_1	: Birinci tabakanın Poisson oranı
ρ_1	: Birinci tabakanın kütle yoğunluğu
E_2	: İkinci tabakanın Young modülü
ν_2	: İkinci tabakanın Poisson oranı
ρ_2	: İkinci tabakanın kütle yoğunluğu
E_3	: Üçüncü tabakanın Young modülü
ν_3	: Üçüncü tabakanın Poisson oranı

ρ_3 : Üçüncü tabakanın kütle yoğunluğu
 E_t : Tünellerin Young modülleri
 $\rho_{\text{tünel}}$: Tünellerin kütle yoğunluğu
 ν_t : Tünellerin Poisson oranı
 t : Süre



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : İki boyutlu 16 düğümlü sonlu eleman için interpolasyon şekil fonksiyonları.....	20
Çizelge 3.2 : İki boyutlu 8 düğümlü sonsuz eleman için geometrik şekil fonksiyonları.....	22
Çizelge 3.3 : İki boyutlu 12 düğümlü sonsuz eleman için interpolasyon şekil fonksiyonları.....	23
Çizelge 3.4 : Beş noktalı Gauss Legendre formülü için ağırlık faktörleri ve örnek nokta sayıları.....	27
Çizelge 4.1 : Yarı sonsuz ortamın mekanik özellikleri	46
Çizelge 4.2 : İkiz boşluklu tabakalı yarı sonsuz ortam üzerinde yakınsama çalışması	58
Çizelge 4.3 : Yarı sonsuz ortamın mekanik özellikleri.	64
Çizelge 4.4 : Probleme kullanılan parametreler	76
Çizelge 4.5 : Doğrusal olmayan statik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri.....	86
Çizelge 4.6 : Doğrusal olmayan dinamik analizlerde kullanılan malzeme ve geometrik parametreler	95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Düzgün yayılı yük etkisi altında ikiz tünel içeren, viskoelastik tabakalı ve homojen poroziteli yarı sonsuz bir ortam.....	14
Şekil 3.2 : Gerilme-Şekil Değiştirme modelleri a) Doğrusal elastik malzeme modeli, b) bilinear gerilme şekil değiştirme malzeme modeli.....	16
Şekil 3.3 : Sınır şartları.....	17
Şekil 3.4 : Tekil yüke maruz kalmış sonlu-sonsuz ortam.....	19
Şekil 3.5 : İki boyutlu onaltı düğüm noktalı sonlu eleman.....	20
Şekil 3.6 : Farklı yönlerde bulunan sonsuz elemanlar.....	21
Şekil 3.7 : Bir boyutlu sonsuz eleman a) Gerçek eleman, b) Referans eleman.....	21
Şekil 3.8 : Sekiz düğüm noktalı sonlu eleman.....	22
Şekil 3.9 : On iki düğüm noktalı sonlu eleman.....	23
Şekil 3.10 : Tünel ve zemin ile uyumlu ağ dağılımı.....	29
Şekil 3.11 : Doğrusal statik problem çözümünün algoritma şeması.....	31
Şekil 3.12 : Doğrusal olmayan statik problem çözümünün algoritma şeması.....	33
Şekil 3.13 : Doğrusal dinamik problem çözümünün algoritma şeması.....	35
Şekil 3.14 : Doğrusal olmayan dinamik problem çözümünün algoritma şeması.....	37
Şekil 4.1 : Üç boyutlu elastik yarı uzaya etki eden noktasal yük Boussinesq (Goodier ve Timoshenko 1970) ve literatür (Curnier 1983).....	40
Şekil 4.2 : İki boyutlu elastik yarı uzaya etki eden noktasal harmonik yük (MATLAB-PLAXIS).....	41
Şekil 4.3 : Noktasal yük altında içinde boşluk bulunan yarı sonsuz ortam.....	42
Şekil 4.4 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun yukarıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 1).....	43
Şekil 4.5 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun yukarıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 2).....	43
Şekil 4.6 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun yukarıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 3).....	43
Şekil 4.7 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun aşağıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 1).....	44
Şekil 4.8 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun aşağıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 2).....	44
Şekil 4.9 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun aşağıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 3).....	44
Şekil 4.10 : Üniform yük altında tabakalı yarı sonsuz ortam.....	45
Şekil 4.11 : Düzgün yayılı yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın gerilme analizi (σ_x).....	46
Şekil 4.12 : Düzgün yayılı yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın gerilme analizi (σ_y).....	46
Şekil 4.13 : Düzgün yayılı yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın gerilme analizi (τ_{xy}).....	47

Şekil 4.14 : Ortam üst yüzeyinden eşit şiddetli uygulanan farklı yükler altında yarı sonsuz ortam. a) Noktasal Yük b) Düzgün Yayılı Yük c) Üçgen Yayılı Yük.....	48
Şekil 4.15 : Farklı yükler altında yarı sonsuz ortamın I-I kesiti boyunca gerilme dağılımı (σ_x).	49
Şekil 4.16 : Farklı yükler altında yarı sonsuz ortamın I-I kesiti boyunca gerilme dağılımı (σ_y).	50
Şekil 4.17 : Farklı yükler altında yarı sonsuz ortamın I-I kesiti boyunca gerilme dağılımı(τ_{xy}).....	51
Şekil 4.18 : Düzgün yayılı yük altında poroziteli iki tabakalı yarı sonsuz bir ortam.	53
Şekil 4.19 : Yarı sonsuz iki tabakalı bir ortamda düzgün yayılı yük altında 1. tabakadaki gözeneklilik oranındaki artışa bağlı olarak 1 noktasındaki düşey yer değiştirmenin değişimi.	54
Şekil 4.20 : Yarı sonsuz iki tabakalı bir ortamda düzgün yayılı yük altında 1. tabakadaki gözeneklilik oranındaki artışa bağlı olarak 2 noktasındaki düşey yer değiştirmenin değişimi.	54
Şekil 4.21 : Yarı sonsuz iki tabakalı bir ortamda düzgün yayılı yük altında 1. noktadaki düşey yer değiştirmenin, 2. tabakadaki gözeneklilik oranındaki artışa bağlı olarak değişimi.	55
Şekil 4.22 : Yarı sonsuz iki tabakalı bir ortamda düzgün yayılı yük altında 2 noktasındaki düşey yer değiştirmenin, 2. tabakadaki gözeneklilik oranındaki artışa bağlı olarak değişimi.	55
Şekil 4.23 : Düzgün yük altında ikiz tünel içeren tabakalı yarı sonsuz ortam.....	57
Şekil 4.24 : Düzgün yayılı yük altında iki boşluklu yarı sonsuz ortam.....	58
Şekil 4.25 : Düzgün yayılı yük altında kesit I-I için tünellerin ortam yüzeyinden (h_y) düşey konumlarının ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri.	59
Şekil 4.26 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin ortam yüzeyinden (h_y) düşey konumlarının ortam derinliği boyunca gerilme dağılımına etkileri.	60
Şekil 4.27 : Düzgün yayılı yük altında III-III kesiti için tünellerin ortam yüzeyinden (h_y) düşey konumlarının ortam derinliği boyunca gerilme dağılımına etkileri.	60
Şekil 4.28 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için ikiz tüneller arasındaki mesafesinin (h_x) ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri.	61
Şekil 4.29 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için ikiz tüneller arasındaki mesafesinin (h_x) ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri.	61
Şekil 4.30 : Düzgün yayılı yük altında III-III kesiti için ikiz tüneller arasındaki mesafesinin (h_x) ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri.	62
Şekil 4.31 : Düzgün yayılı harmonik yük altındaki tabakalı yarı sonsuz ortam.	64
Şekil 4.32 : Harmonik yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın dinamik düşey yer değiştirmesi a) Nokta 1 b) Nokta 2 c) Nokta 3.....	65
Şekil 4.33 : Harmonik yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın dinamik düşey ivmesi a) Nokta 1 b) Nokta 2 c) Nokta 3.	65
Şekil 4.34 : Boşluk bulunan bir ortamdaki boşluk tabanından uygulanan harmonik yük etkisi.	66

Şekil 4.35 : Boşluk tabanından uygulanan düşey noktasal harmonik yükün, boşluğun düşey doğrultuda konumunun değişmesi durumunda 1 noktasında belli bir zaman aralığında meydana gelen yerdeğiştirmesi. .	67
Şekil 4.36 : Boşluk tabanından uygulanan düşey noktasal harmonik yükün, boşluğun düşey doğrultuda konumunun değişmesi durumunda 1 noktasında belli bir zaman aralığında meydana gelen ivmesi.	68
Şekil 4.37 : Boşluk tabanından uygulanan düşey noktasal harmonik yükün, boşluk boyutunun büyümesi durumunda 1 noktasında belli bir zaman aralığında meydana gelen yerdeğiştirmesi.	68
Şekil 4.38 : Boşluk tabanından uygulanan düşey noktasal harmonik yükün, boşluk boyutunun büyümesi durumunda 1 noktasında belli bir zaman aralığında meydana gelen ivmesi.	69
Şekil 4.39 : Yarı sonsuz poroziteli bir ortamda boşluktaki noktasal harmonik yük. .	70
Şekil 4.40 : Noktasal harmonik yük altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında yer değiştirmesi $h_y = 10 m, l = 2.5 m$	71
Şekil 4.41 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında ivmesi $h_y = 10 m, l = 2.5 m$	72
Şekil 4.42 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında yer değiştirmesi $h_y = 2.5 m, l = 2.5 m$	72
Şekil 4.43 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında ivmesi $h_y = 2.5 m, l = 2.5 m$	73
Şekil 4.44 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında yer değiştirmesi $h_y = 11.25 m, l = 7.5 m$	73
Şekil 4.45 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında ivmesi $h_y = 11.25 m, l = 7.5 m$	74
Şekil 4.46 : Düzgün yayılı harmonik yük altında kare ikiz tünel içeren yarı sonsuz ortam.	76
Şekil 4.47 : Tünellerin düşey konumlarının 1 noktası için dinamik düşey yer değiştirmeler açısından etkisi a) $h_y = 10 m$, b) $h_y = 8 m$, c) $h_y = 5 m$	78
Şekil 4.48 : Tünellerin düşey konumlarının 2 noktası için dinamik düşey yer değiştirmeler açısından etkisi a) $h_y = 10 m$, b) $h_y = 8 m$, c) $h_y = 5 m$	78
Şekil 4.49 : Tünellerin düşey konumlarının 3 noktası için dinamik düşey yer değiştirmeler açısından etkisi a) $h_y = 10 m$, b) $h_y = 8 m$, c) $h_y = 5 m$	79
Şekil 4.50 : Tünellerin düşey konumlarının 1 noktası için dinamik düşey ivmeler açısından etkisi a) $h_y = 10 m$, b) $h_y = 8 m$, c) $h_y = 5 m$	79
Şekil 4.51 : Tünellerin düşey konumlarının 2 noktası için dinamik düşey ivmeler açısından etkisi a) $h_y = 10 m$, b) $h_y = 8 m$, c) $h_y = 5 m$	80
Şekil 4.52 : Tünellerin düşey konumlarının 3 noktası için dinamik düşey ivmeler açısından etkisi a) $h_y = 10 m$, b) $h_y = 8 m$, c) $h_y = 5 m$	80

Şekil 4.53 : Tüneller arası mesafenin (h_x), dinamik düşey yer değiştirmeler açısından etkisi a) Nokta 1 için b) Nokta 2 için, c) Nokta 3 için.	82
Şekil 4.54 : Tüneller arası mesafenin (h_x), dinamik düşey ivmeler açısından etkisi a) Nokta 1 için b) Nokta 2 için, c) Nokta 3 için.	83
Şekil 4.55 : Düzgün yük altında ikiz tünellere sahip iki tabakalı yarı sonsuz gözenekli ortam.	85
Şekil 4.56 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_y = 10$ m, $p = 0.3$) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.	86
Şekil 4.57 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_y = 10$ m, $p = 0.3$) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.	86
Şekil 4.58 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_x = 2$ m, $p = 0.3$) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.	87
Şekil 4.59 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_x = 2$ m, $p = 0.3$) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.	88
Şekil 4.60 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_x = 2$ m) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.	89
Şekil 4.61 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_x = 2$ m) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.	90
Şekil 4.62 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_y = 10$ m) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.	91
Şekil 4.63 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_y = 10$ m) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.	92
Şekil 4.64 : Darbe yükü altında ikiz tünellere sahip iki tabakalı yarı sonsuz elasto-plastik gözenekli ortam.	94
Şekil 4.65 : Tüneller arası mesafe sabit tutulup ($h_x = 2$ m), 1 noktasındaki dinamik düşey yer değiştirmelere, tünellerin yüzeyle arasındaki mesafenin etkisi a) $h_y = 9$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 7$ m.	96
Şekil 4.66 : Tüneller arası mesafe sabit tutulup ($h_x = 2$ m, $p = 0.3$), 2 noktasındaki dinamik düşey yer değiştirmelere, tünellerin yüzeyle arasındaki mesafenin etkisi a) $h_y = 9$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 7$ m.	97
Şekil 4.67 : Tüneller arası mesafe sabit tutulup ($h_x = 2$ m), 3 noktasındaki dinamik düşey yer değiştirmelere, tünellerin yüzeyle arasındaki mesafenin etkisi a) $h_y = 9$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 7$ m.	98
Şekil 4.68 : Tüneller arasındaki mesafenin ve ortam porozite oranının 1 noktasındaki düşey yer değiştirmelere etkisi ($h_y = 8$ m).	99
Şekil 4.69 : Tüneller arasındaki mesafenin ve ortam porozite oranının 2 noktasındaki düşey yer değiştirmelere etkisi ($h_y = 8$ m).	99

Şekil 4.70 : Tüneller arasındaki mesafenin ve ortam porozite oranının 3 noktasındaki düşey yer değiştirmelere etkisi ($h_y = 8$ m).**100**



İKİZ TÜNEL İÇEREN TABAKALI YARI-SONSUZ BİR ORTAMIN STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SONLU VE SONSUZ ELEMANLAR KULLANILARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Metropol kentlerde tüneller; trafik, madencilik, askeri tesisler, yer altı kablolarının geçişi gibi birçok farklı ihtiyaca cevap doğrultusunda kullanılmaktadır. Özellikle sığ tünellerin kullanımı, metropol şehirlerde son yıllarda ihtiyaç doğrultusunda artmaktadır. Farklı parametrelere sahip ortamlardaki tünellerin yüzeydeki yapılarla, ortamla ve tünellerin birbiriyle etkileşimi önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada ikiz tünel içeren tabakalı yarı sonsuz ortamın doğrusal ve doğrusal olmayan statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yarı sonsuz tabakalı ortamın, farklı rijitlikleri, boşluk bulunma durumları, tabakalı ortamda farklı konumlarda ikiz tünellerin bulunması durumları araştırılmıştır. Boşluk ve tünel kesitlerinde geometrik olarak kare kesitli tünel ve boşluklar düşünülmüştür. Doğrusal analizlerde lineer elastik, doğrusal olmayan analizlerde bilineer gerilme şekil değiştirme malzeme modeli kullanılmıştır. Statik analizlerde, farklı modellerdeki düşey yer değiştirme ve normal gerilme davranışları incelenmiştir. Dinamik analizlerde, harmonik ve darbe yükü etkisi altındaki yarı sonsuz ortamlardaki, belli bir zaman tanım alanındaki yer değiştirme ve ivme sonuçları incelenmiştir. Dinamik yük etkisindeki davranışları incelemek için Newmark Beta yönteminden yararlanılmıştır. Sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu bölgede kabul edilen belirli sınır şartlarındaki statik ve dinamik analizlerde, yük etkilerinin sınır koşullarına bağlı olarak yansımından dolayı ciddi hatalar ortaya çıkmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, yarı sonsuz ortamı bir bütün kabul eden sonlu-sonsuz eleman modeli kullanılmıştır. Sonlu-sonsuz eleman modeli, yük etkisine yakın bölgede sonlu elemanlarla, yük etkisinden uzak sonsuz ortam, doğrultusuna bağlı olarak sonsuz elemanlarla modellenmiştir. İçerisindeki yapılarla uyumlu ve hesaplama süresini kısaltmak için, 16 düğüm noktalı sonlu eleman kullanılmıştır. Sonsuz ortamda ise, modellerle uyumlu sonsuz bölge doğrultusunda sonsuza giden 8 düğüm noktalı sonsuz eleman kullanılmıştır. Modellerde köşe noktalarda, sonlu-sonsuz modellerle uyumlu 4 düğüm noktalı sonsuz eleman kullanılmıştır. Sonsuz eleman şekil fonksiyonları 16 düğüm noktalı sonlu elemanlarla uyumlu olacak şekilde üretilmiştir. Sonlu-sonsuz eleman modelinde elde edilen denklemler 5 düğüm noktalı Gauss Legendre integrasyon yöntemiyle çözülmüştür. Doğrusal olmayan statik analiz çözümünde, artımsal yük yöntemi uygulanmıştır. Doğrusal olmayan dinamik analizin çözümünün ilk aşamasında sisteme etki eden dinamik yükler belirli bir sonlu sayıya bölünüp zaman ve yük fonksiyonuna bağlı bir şekilde artımsal olarak uygulanmıştır. Her bir yük adımına karşı gelen zaman aralığı yük fonksiyonundan tespit edilip, Newmark Beta yöntemi ile çözüm yapılmıştır. Statik ve dinamik sonuçlarının doğruluğunu test etmek için karşılaştırma çalışması yapılmış ve sonuçlar doğrulanmıştır. Statik sonuçların doğrulanması için Boussinesq teorisi kullanılmıştır. Dinamik sonuçlarda ise PLAXIS paket programında bir ortam modellenerek dinamik analiz gerçekleştirilmiş ve

sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman sayısını belirlemek için, statik analizde yakınsama çalışması yapılmıştır. MATLAB programı kullanılarak modellemeler yapılmış, elde edilen denklem ve algoritmalar kodlanmıştır. Sayısal sonuç ve grafikler MATLAB programı kullanılarak elde edilmiştir. Kodlanan program belirli bir lde otomatize edilmiştir. Sayısal sonuçlar incelendiğinde, ikiz tünel içeren yarı sonsuz ortam problemlerinde gerçekçi sonuçlar elde etmek ve hesaplama maliyetini azaltmak için; sonlu-sonsuz eleman modelinin birlikte tasarlandığı, malzeme modelinin ise doğrusal olmayan formunun dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir. Yük etkisine yakın bölge sonlu elemanlarla, uzak bölge ise sonsuz elemanlarla modellenmelidir. Pratik uygulamalar için önemli bir sonuç, bu tür problemlerin kullanılan sonsuz elemanlı model ile tüm sınır koşullarının dikkate alınabileceğidir.

Anahtar kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, Yarı sonsuz ortam, Sonsuz elemanlar, İki tünel, Tabakalı ortam, Statik analiz, Dinamik analiz.



INVESTIGATION OF STATIC AND DYNAMIC BEHAVIORS OF A LAYERED SEMI-INFINITE MEDIUM WITH TWIN TUNNEL BY USING FINITE AND INFINITE ELEMENTS

SUMMARY

Tunnels in metropolitan cities; used to meet many different needs such as traffic, mining, military facilities, and the passage of underground cables. The use of shallow tunnels, especially in metropolitan cities, has been increasing in line with the need in recent years. The interaction of tunnels in medium with different parameters with the structures on the surface, the medium and the tunnels with each other has become an important issue. In this study, linear and nonlinear static and dynamic analyzes of the layered semi-infinite medium containing twin tunnels performed. Different stiffnesses of the semi-infinite layered medium, the situation of voids, and the situation of twin tunnels at different locations in the layered medium investigated. In the cavity and tunnel sections, geometrically square-section tunnels and cavities considered. A linear elastic material model were used in linear analyses, and a bilinear stress-strain material model were used in non-linear analyses. In static analyses, vertical displacement and normal stress behaviors in different models examined. In dynamic analyses, displacement and acceleration results in a certain time domain in semi-infinite medium under the influence of harmonic and impact loads examined. Newmark Beta method used to examine the behavior under the influence of dynamic load. Finite element method used in numerical analysis. In static and dynamic analyzes at certain boundary conditions accepted in the finite region, serious errors occur due to the reflection of load effects depending on the boundary conditions. Considering this situation, the finite-infinite element model, which accepts the semi-infinite medium as a whole, was used. The finite-infinite element model is modeled with finite elements in the region close to the load effect, and the infinite medium away from the load effect is modeled with infinite elements depending on its direction. In order to be compatible with the structures inside and to shorten the calculation time, a 16-node finite element used. In the infinite environment, an infinite element with 8 nodes that goes to infinity in the direction of the infinite region compatible with the model is used. Infinite elements with 4 nodes, compatible with the finite-infinite model, used at the corner points of the models. Infinite element shape functions produced to be compatible with 16-node finite elements. The equations obtained in the finite-infinite element model solved by the 5-node Gauss Legendre integration method. In the nonlinear static analysis solution, the incremental load method applied. In the first stage of the solution of nonlinear dynamic analysis, the dynamic loads affecting the system divided by a certain finite number and applied incrementally depending on the time and load function. The time interval corresponding to each load step was determined from the load function and the solution was made with the Newmark Beta method. A comparison study conducted to test the accuracy of the static and dynamic results and the results verified. Boussinesq theory used to verify the static results. For dynamic results, an medium modeled in the PLAXIS package program and dynamic analysis

performed and the results compared. To determine the number of finite elements, a convergence study carried out in static analysis. Modeling done using the MATLAB program, and the resulting equations and algorithms coded. Numerical results and graphics obtained using the MATLAB program. The coded program automated to a certain extent. As the numerical results examined, in order to obtain realistic results and reduce the computational cost in semi-infinite medium problems involving twin tunnels; the finite-infinite element model is designed together, and the non-linear form of the material model should be taken into account. The region close to the load effect should be modeled with finite elements, and the remote region should be modeled with infinite elements. An important result for practical applications is that all boundary conditions of such problems can be taken into account with the infinite element model used.

Keywords: Finite element method, Semi-infinite medium, Infinite elements, Twin tunnel, Layered medium, Static analysis, Dynamic analysis.



1. GİRİŞ

Yeryüzündeki zeminler üzerinde patlama, trafik, deprem gibi dinamik yüklerden kaynaklı çeşitli dalgalar oluşmaktadır. Bu yayılan dalgalar, farklı zemin ortamlarında farklı özellikler göstermektedir. Özellikle yapılara gelen sismik dalgalar, yapının yerel zemin koşullarında dinamik karakteristiğini oldukça değiştirmekte ve yapıya daha büyük genlikte etki edebilmektedir. Taşıma gücü, yer altı su seviyesi, toptan göçme gibi problemleri olan zeminlerde yapılan yapıların tasarım ve analizlerinde yapı zemin etkileşimi göz önüne alınması gerekmektedir.

Gözenekli yarı-sonsuz ortam, içinde küçük boşlukların bulunduğu ve katı ortamın bu boşluklarla birlikte hareket ettiği bir ortam olarak tanımlanır. Yarı sonsuz ortam içerisindeki bu gözeneklerde hava, gaz veya sıvı gibi birçok farklı bileşen görülebilmektedir. Özellikle küçük boşluklardan oluşan bir yarı sonsuz ortamda gözeneklilik oranının artması, yüzeydeki yapı ile ortam arasındaki etkileşimi büyük ölçüde değiştirebilmektedir. Bununla birlikte, bir zemin farklı rijitliklere sahip heterojen bir yapıdan oluşmaktadır. Gerçekçi çözümlere yaklaşabilmek için zeminler tabakalı bir yapıda modellenmektedir.

Yapıların zemin ile birlikte etkileşim analizleri oldukça karmaşık ve zordur. Literatürde birçok basit yapı zemin etkileşim modelleri mevcuttur. Örnek olarak Winkler, Pasternak ve Kerr gibi zemin modellerinde zemini basit bir yay olarak tanımlamaktadır. Bu tür modellerde zemin basit reolojik semboller ile tanımlandığından, zeminler gerçekçi bir şekilde modellenmemektedir. Yarı sonsuz zeminlerde dinamik analiz için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri sonlu elemanlar yöntemidir. Ancak bu yöntem tek başına işlevsizdir ve sonsuz bölgenin analizi için yetersizdir. Sonsuz bölgenin belirli bir noktayla sınırlandırılması dinamik sonuçlarda ciddi hatalara neden olabilir. Yapı zemin etkileşiminde zemini daha iyi modelleyebilmek için sürekli ortam modeli kullanılmalıdır. Son yıllarda araştırmacılar yapı zemin etkileşim problemlerinin çözümünde daha gerçekçi model olan sürekli ortam yaklaşımında yoğunlaşmıştır. Bu modelde yapının etkileşim içinde olduğu zemin yarı sonsuz bir sürekli ortam olarak ele alınır. Yapı zemin etkileşim

problemlerinin zorluğu ve karmaşıklığı nedeniyle analitik çözümleri çok zor ve imkansız olduğundan, sayısal çözüm yöntemleri kullanmak mecburidir. Çoğunlukla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çözümlerde, yarı sonsuz sürekli ortam ile düşünülen zemin, sonlu ve sonsuz elemanlarla ayrıklaştırılarak modellenir. Yapının zemin ile temas ettiği yakın bölgesi sonlu elemanlarla, uzak bölgesi ise sonsuz elemanlar ile modellenir. Sonsuza uzanan zemin ortamında bu tür problemlerin analizi oldukça zordur. Böyle problemlerin çözümü için çeşitli yöntemler önerilmektedir. Literatür incelendiğinde bu tip problemler için ortak sistem düşünülerek sonlu-sonsuz elemanlar yöntemi ile çözümlerin daha sağlıklı ve doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Gelişmekte olan metropol kentlerde yer altı yapıları önemli hale gelmiştir. Tüneller trafik, madencilik, askeri tesisler, yer altı kabloları gibi birçok uygulamada kullanılan önemli yer altı yapılarıdır. Bu yeraltı yapılarından, tüneller şehirlerin önemli sorunlarına çözümler sunmaktadır. Büyük yer altı tünelleri, demiryolları ve otoyollar gibi ulaşım ağlarına büyük katkı sağlamaktadır. Ayrıca tüneller, malzeme depolama, kanalizasyon, gaz boruları, elektrik kanalları ve su ulaşımı gibi kentin temel ihtiyaçlarına da cevap vermektedir. Nüfus artışı nedeniyle büyük kentlerde, ihtiyaca cevap vermek için daha büyük tünellerin inşa edilmesi gerekmektedir. Ancak böyle bir tünelin yapımında, kazı hacmi ve teknolojik araçların gerektirdiği maliyet ve zaman kaybı, ikiz tünellere göre kıyaslandığında çok daha yüksek olacaktır. Kalabalık şehirlerde gelişen yer altı ulaşım ağıyla birlikte, birbirine yakın ve sığ derinlikte ikiz tüneller tercih edilmektedir. Tünelin geometrik yapısı stabilitesini ciddi şekilde etkilemektedir. Tünel uygulamalarında dayanıklılık ve tünel açma teknikleri açısından genellikle dairesel tüneller tercih edilmektedir. Dikdörtgen tüneller aynı derecede stabiliteye sahip değildir. Dikdörtgen tünellerin yapımı dairesel tüneller kadar kolay değildir. Ancak dikdörtgen tüneller kazı hacmini minimuma indirir ve kullanılabilir hacmi maksimuma çıkarır. Bu nedenle birçok projede dikdörtgen tüneller tercih edilebilmektedir.

Statik analiz kapsamında, ikiz tüneller arasındaki etkileşim, tünellerin geometrisi, boşluk miktarı, zemindeki konumları ve farklı rijitliklere sahip tabakalı zeminler, zemin ve yapı için çeşitli sorunlar yaratmaktadır. Bu durumu incelemek amacıyla yarı-sonsuz ortamda oluşabilecek farklı durumlar modellenmiştir. Yarı-sonsuz bir ortamda sonlu bir yapının statik yükleme altındaki davranışı geoteknik mühendisliği açısından iyi incelenmesi gereken bir konudur. Statik hesaplamalarda; tüneldeki yükler, farklı

kalınlıktaki tabakalı ortam, olası kayma ve tünel kaplama kalınlığı gibi çeşitli parametreler dikkate alınmalıdır. Kullanım alanına bağlı olarak tünellerin uzun ömürlü olması açısından ortam ile birbirleri arasındaki ikiz tünellerin statik etkilerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Genellikle karayolu ve deniz altı tünellerinde tercih edilen kare kesitli tünellerde kesit geometrisine bağlı olarak farklı gerilme sorunları ortaya çıkmaktadır. Ortamdaki yapının farklı etkiler altında statik analizinde hassasiyet, doğru sonuçlar için önemlidir.

İhtiyaca göre birbirine ve yüzeye yakın ikiz tüneller inşa edilmektedir. Genellikle rijitliği yüksek olan tüneller, rijitliği düşük olan yüzeye yakın alanlarda tüneller arası ve ortam-tünel etkileşimi sonucu farklı problemlere neden olmaktadır. Dinamik analiz kapsamında, harmonik yük altında tünel-ortam etkileşiminin iyi incelenmesi, yüzey yapılarına kıyasla daha önemli hale gelmektedir.

Harmonik yük altında tabakalı ortam içerisinde farklı konumlarda bulunan ikiz tüneller, farklı rijitlik ve kütle yoğunluklarından dolayı yapı ile ortam arasında çeşitli problemlere neden olmaktadır. Tünellerin şekli ve konumları, ortam içindeki parametreler, dinamik yapı zemin davranışını incelerken dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir.

Literatürde, zemin yapılarıyla ilgili sonlu-sonsuz elemanlarla doğrusal olmayan yapı zemin etkileşim analizi ayrıntılı bir şekilde verilmemiş olup, doğrudan sonlu-sonsuz elemanlar kullanılarak kodlama yapılan herhangi bir çalışma mevcut değildir. Yapı ile zemin arasındaki etkileşim sorununun en doğru çözümü, yapı ile zeminin ortak hareketinin dikkate alınmasıdır. Bu bilgiler doğrultusunda, önerilen tez konusu kapsamında literatüre katkı sağlamak ve doğrusal olmayan analiz yapan mühendise, analizi gerçekleştirirken dikkat edilmesi gereken hususları belirterek yol göstermek amacıyla; tüneller, zemin boşlukları, poroziteye sahip zemin, farklı statik ve dinamik yük etkileri ve tabakalı zemin gibi, zemin ve zemin yapılarının, yapı zemin etkileşim problemi için çözüm önerisi olarak MATLAB programında kod yazılarak doğrusal ve doğrusal olmayan iki boyutlu sonlu eleman analizi yapılmıştır. Yapı zemin birlikte hareketi düşünülerek sonlu elemanlar yöntemi ile yapı ve yapıya yakın bölge sonlu eleman, yapıdan uzak bölge sonsuz elemanlarla kodlanarak yapı-zemin için bütüncül bir çözüm sağlanmıştır. Bu çalışmayı destekleyen ilgili literatür aşağıda sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması yapılırken konuyla ilgili çok fazla çalışma irdelendi. Öncelikle statik yarı sonsuz ortam problemlerinin analizi için, sonlu ve sonsuz eleman kullanılarak elde edilen çözümler gösterildi. Literatür araştırması sonucunda; yapı zemin etkileşimini Temel B. (1996) dinamik zemin yapı etkileşim problemlerini sonlu-sonsuz elemanlar ile çözmüştür. Yapıya yakın bölgelerde standart sonlu ve uzak bölgelerde sonsuz elemanlar kullanarak analizi gerçekleştirmiştir. Statik, harmonik ve keyfi yükleme hallerini ayrı ayrı göz önünde bulundurmuştur. Yapı ile zemin malzemesini lineer elastik ve izotrop almıştır. Statik yükleme halinde sonlu sonsuz eleman rijitlik matrislerini Gauss Legendre integrasyon yöntemiyle ele almıştır. Analiz sonuçlarını Fortran dilinde hazırlanan Mathematica programında elde etmiştir. Analizi gerçekleştirirken 8 düğümlü kuadratik sonlu eleman kullanmıştır. Sonlu elemanların şekil fonksiyonlarını vermiştir. İki boyutlu tasvir edilen sonsuz elemanları ise, 5 düğüm noktalı sonsuz eleman olarak tanımlamıştır. Statik problemler için geometrik şekil fonksiyonlarını ve interpolasyon şekil fonksiyonları bir doğrultu için vermiştir. Dinamik hal için azalan fonksiyonlu sonsuz eleman şekil fonksiyonlarının bağıntılarını göstermiştir. Sonsuz elemanların rijitlik matrislerini Newton Cotes integrasyon yöntemiyle elde etmiştir. Yerli H. R. (1998) iki ve üç boyutlu dinamik yapı zemin etkileşimi problemlerinin sonlu ve sonsuz elemanlar kullanarak analizini gerçekleştirmiştir. Yapıya yakın bölgeler sonlu elemanlar ile sonsuza uzanan bölgeler ise birden fazla dalga tipini içeren sonsuz elemanlar ile analiz yapmıştır. İki boyutlu problem için standart 8 düğümlü, izoparametrik, kuadratik sonlu eleman kullanmıştır. Çalışmada sonlu eleman şekil fonksiyonlarını vermiştir. Sonsuz elemanlar için dalga tiplerini ve sönümleri içeren 5 düğüm noktalı azalan fonksiyonlu sonsuz eleman kullanmıştır. Bir doğrultu için sonsuz eleman şekil fonksiyonlarını elde eden denklemleri vermiştir. Eleman rijitlik matrisini Newton Cotes integrasyon yöntemiyle çözmüştür. Bettess P. (1983) statik problemler için sonsuz elemanlar önermiş, sayısal çözümleri Gauss Legendre integrasyon yöntemini kullanarak elde etmiştir. Kumar P. (1985) çalışmasında 5 düğüm noktalı sonsuz elemanlar geliştirmiş ve önermiştir.

Temel B. (1996) yaptığı tez çalışmasında statik problemler için sonlu-sonsuz eleman modeli geliştirerek analizler gerçekleştirmiştir. Yapı ile zemin malzemesini lineer elastik ve izotrop almıştır. Statik yükleme halinde sonlu sonsuz eleman rijitlik matrislerini Gauss Legendre integrasyon yöntemiyle ele almıştır. Analizi gerçekleştirirken 8 düğümlü kuadratik sonlu eleman kullanmıştır. Sonlu elemanların şekil fonksiyonlarını vermiştir. İki boyutlu tasvir edilen sonsuz elemanları ise 5 düğüm noktalı sonsuz eleman olarak tanımlamıştır. Dasgupta (1982) sürekli bir ortamdaki dinamik analizler için bir sonlu eleman formülasyonu önermiştir. El Esnawy ve diğ. (1995) yarım uzayda statik analiz modellemesinde kullanılmak üzere sonsuz elemanlar önermiş ve sonlu ve sonsuz elemanları modelleyerek bir doğrulama çalışması gerçekleştirmiştir. Zienkiewicz ve diğ. (1983) iki ve üç boyutlu sonsuz ortam problemlerinin çözümünde farklı sonsuz eleman haritalama modelleri önermiştir. Pissanetzky (1983) farklı düğüm noktalarına sahip sonlu elemanlarla uyumlu, uygulanabilir bir sonsuz eleman önermiştir. Erkal ve diğerleri (2015) tek boyutlu sonsuz elemanlar kullanılarak üretilen iki boyutlu sonsuz elemanları detaylı bir şekilde açıklamıştır. Liou (1989) belirli bir süre boyunca harmonik yükler altında birden fazla katmandan oluşan zemin problemine çözüm yolları önermiştir. Xie ve diğ. (2013) demiryollarının kum zemin üzerine oturmasını üç boyutlu sonlu ve sonsuz elemanlar kullanarak incelemiştir. Liu ve diğ. (2015) zemindeki asfalt kaplamaların statik tepkilerini incelemek için sonsuz ortamı modellemiştir. Yun ve diğerleri (1995) yapısal yük altında yarı sonsuz tabakalı bir ortamda eksenel simetrik sonsuz bir eleman kullanarak dinamik analiz gerçekleştirmiştir. Karpurapu (1988) farklı özelliklere sahip iki tabakalı yarı sonsuz zemin problemlerini çözmek için kompozit sonsuz eleman önermiştir. Selvadurai ve Karpurapu (1989) suya doymuş zemin davranışını incelemek için kompozit sonsuz elemanlar kullanmıştır. Saini ve diğ. (1978) sonlu-sonsuz ortam problemini barajlardaki hidrodinamik etkileri ve statik yükleri hesaba katarak çözmüştür. Rajapakse ve Karasudhi (1985) dairesel kesitli sonsuz tabakalı zeminin farklı yükler altında statik davranışını araştırmıştır. Booker ve Small (1981) farklı geometrik kesitlere sahip yarı-sonsuz zeminler üzerinde statik ve dinamik analizler yapmıştır. Brunotte ve diğ. (1992) sonsuz ortam problemlerinin çözümü için kolaylıkla uygulanabilir sonlu eleman dönüşümlerini sunmuştur. Wolf ve Song (1996) tünel yükü altında yarı uzayda yapı-zemin dinamik tepkilerini araştırmıştır. Yang ve diğ. (1996) sonlu-sonsuz ortam problemini dinamik dalga etkilerine sahip sonsuz elemanları kullanarak çözmüştür. Tzong ve Penzien (1986) yapısal yükler altında zemindeki

statik etkileşimi incelemek için hibrit bir model geliştirmiştir. Bettess ve Bettess (2007) sonsuz ortamdaki statik problemleri çözmek için iki boyutlu sonsuz elemanlar üretmiştir. Wen ve diğ. (2018) sonsuz ortam problemlerini daha kısa sürede çözen yeni bir sonsuz eleman yaklaşımı önermiştir. Bettess (1992) sonsuz ortam çözümlerinde kullanılacak sonsuz elemanları ayrıntılı olarak incelemiş ve çözüm yöntemlerini sunmuştur. Lynn ve Hadid (1981) statik sonsuz eleman problemlerine doğrudan uygulanabilecek yeni bir sonsuz eleman önermiştir. Guo ve diğ. (1987) sonsuz homojen kazık ortamında statik analiz gerçekleştirmiştir. Haji ve diğ., (2019) altyapı analizinde yerçekimi etkisini dikkate alan sonsuz bir zemin modeli geliştirmiştir. Karpurapu ve Bathurst (1988) yarı-sonsuz zemin problemlerini sonlu elemanlar ve sonlu-sonsuz elemanlar kullanarak analitik olarak araştırmıştır. Houmat (2008) sonsuz ortamla uyumlu sonsuz bir p-elemanı önermiştir. Yang ve Hung (2001) harmonik yükler altında sonlu ve sonsuz elemanlara sahip visko-elastik sonsuz bir ortam üzerinde çalışmıştır. Liu ve Novak (1991) kazık ve zemin arasındaki statik etkileşimi sonlu-sonsuz elemanlar modeliyle analiz etmiştir. Kumar (1985) yarı sonsuz statik ortam problemlerini modellemek için üç farklı türde iki boyutlu sonsuz eleman önermiştir. Demidem ve diğerleri (2014) farklı yarı-sonsuz zemin problemlerini sonlu elemanlar ve sonlu-sonsuz elemanlar modelleri ile incelemiştir.

Literatür incelendiğinde; yapılan dinamik analizlerde sonsuz bölgenin sonsuz elemanlarla tanımlandığı problemlerde daha gerçekçi sonuçların elde edildiğini göstermiştir. Jingbo ve Yandong (1998) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak dinamik dalga etkileri altındaki bir ortamın yapı-zemin etkileşimi analizini gerçekleştirmiştir. Lee ve diğ. (2005) yarı sınırsız ortamın doğrusal olmayan dinamik davranışını araştırmıştır. Song ve diğ. (2022) zamana bağlı harmonik yükün etkisi altında suya doymuş gözenekli bir yarım uzaydaki davranışı incelemiştir. Ai ve Ren (2016) harmonik yük altında çoklu enine izotropik tabakalardan oluşan zeminin davranışını araştırmıştır. Yun ve diğ. (2007) dört farklı tabakadan oluşan dinamik yarı sonsuz ortam etkileşim problemini sonlu-sonsuz elemanlar kullanarak çözmüştür. Song ve diğ. (2018) belirli sınır koşulları altında sonsuz elemanları kullanarak, ABAQUS programında statik ve dinamik analiz için bir zemin modellemiştir. Nanning ve Sholz (2011) suya doymuş yarı sonsuz bir ortamda sonsuz elemanlarla dinamik dalga analizi gerçekleştirmiştir. Yerli ve diğ. (1999) harmonik sonsuz elemanlarla çoklu dalga etkilerini içeren yarı sonsuz zemin problemini modellemiştir. Kumari ve

Sawant (2021) harmonik yük altında sıvılaştan yarı sonsuz ortam problemini çözmüştür. Basu ve Chopra (2004) birden fazla uyumlu tabakadan oluşan zemin üzerinde dinamik dalga analizi gerçekleştirmiştir. Farzarian ve diğ. (2016) çok sayıda mükemmel eşleşmiş tabakadan oluşan heterojen ortamda dinamik dalga dağılımını araştırmıştır. Shrivastava ve Rao (2002) harmonik yük altında üç boyutlu zemin üzerindeki dalga etkilerinden kaynaklanan tepkileri araştırmıştır. Tosecký ve diğ. (2008) yarı sonsuz bir ortamda farklı üç boyutlu sınır koşulları altında dinamik analiz gerçekleştirmiştir. Yang ve Hung (2017) sonlu ve sonsuz elemanlarla harmonik yük altında viskoelastik zemin davranışını incelemiştir. Hung ve Yang (2010) demiryolu tünellerindeki titreşim tepkilerini sonsuz ortam modeliyle incelemiştir. Yun ve diğ. (2000) iki tabakalı yarı sonsuz bir ortamda sonsuz bölgeyi, özel sonsuz elemanlarla modellemiş ve yapı ile zemin arasındaki dinamik etkileşimi araştırmıştır. Kim ve Hyun (1995), üzerinde yapılar bulunan birden fazla tabakadan oluşan zemini sonsuz elemanlarla modelleyerek dinamik analiz gerçekleştirmiştir. Saini ve diğ. (1978), sonlu-sonsuz ortam modeliyle bir toprak-baraj modelinin dinamik davranışını araştırmıştır. Park ve diğ. (2004), sonlu ve sonsuz elemanlara sahip üç boyutlu çoklu tabakalardan oluşan yarı sonsuz ortam modelini analiz etmiştir. Bettess ve Zienkiewicz (1977) dinamik dalga etkilerine sahip sonlu-sonsuz bir eleman geliştirmiştir. Hao ve diğ. (2020) suya doymuş zeminde bir ve iki boyutlu dalga dağılımını hesaba katan sonsuz bir eleman geliştirmiştir. Yang ve diğ. (1996) frekanstan bağımsız sonsuz elemanlarla dinamik yarı uzay problemini araştırmıştır. Tzong ve Penzien (1986) yarı sonsuz bir zeminde yapıyla dinamik etkileşim için hibrit modelleme yapmıştır. Bettess ve Bettess (1991a, 1991b) yarı uzaydaki dinamik problemler için sonsuz elemanlar geliştirmiştir. Yang ve diğ. (2003) demiryolu taşımacılığının bir sonucu olarak birden fazla tabakadan oluşan zemindeki dinamik dalga etkilerini araştırmıştır. Yang ve Hung (2001) dalga etkili sonlu-sonsuz elemanlar kullanarak harmonik yük altında viskoelastik toprağı araştırmıştır. Yang ve diğ. (2022) iki boyutlu viskoelastik zeminde dinamik dalga etkilerini incelemiştir. Keawsawasvong ve diğ. (2021) zemindeki rijit bir temelin farklı yönlerdeki titreşim davranışını araştırmıştır. Zhang ve diğ. (2022) çatlaklı yarı sonsuz bir ortamda dinamik dalga etkileri altında meydana gelen reaksiyonları incelemiştir. Meng ve diğ. (2019) Newmark β yöntemini kullanarak deprem yüklerinin etkisi altında depolama tanklarının zemin üzerindeki davranışını incelemiştir. Shu ve Ma (2023), doymamış elastik bir ortamda dalga etkilerini bir duvarla keserek dalga-duvar-zemin etkileşimi analizini gerçekleştirmiştir. Ding ve diğ.

(2023) yerel olmayan Biot teorisini kullanarak doymuş yarı-sonsuz ortama sahip bir temeldeki gözenek etkilerinin dinamik tepkilerini araştırmıştır. Yang ve diğ. (2022) farklı yönlerden gelen dinamik dalgalar nedeniyle zeminin davranışını incelemek için sonlu-sonsuz eleman modeli geliştirmiştir. Hung ve Yang (2010) tünellerdeki demiryolları üzerindeki harmonik yük nedeniyle zeminin dinamik tepkilerini araştırmıştır. Lin ve diğ. (2016) zeminin deprem yükleri altındaki dinamik tepkilerini araştırmıştır. Liu ve ASCE (2012) elastoplastik toprakta dökme demir malzemedeki yapılmış tünellerin patlama etkisi altındaki davranışını araştırmıştır. Yang ve diğ. (2003) demiryolu tüneli içeren katmanlı zeminde trenin hareketinden kaynaklanan dinamik zemin-yapı etkileşimini araştırmıştır. Yerli ve Temel (1998) yarı sonsuz bir zemin üzerinde farklı türde dinamik dalga etkilerine sahip sonsuz elemanların dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Yang ve diğ. (2010) sonlu ve sonsuz elemanlara sahip çok tabakalı, yarı sonsuz bir zemin üzerinde farklı hızlarda hareket eden bir trenin titreşim davranışını incelemiştir. Yüksel ve Akbaş (2022a, 2022b, 2022c, 2022d, 2023, 2024a, 2024b, 2024c, 2024d) iki boyutlu sonlu ve sonsuz elemanları kullanarak yarı sonsuz ortam problemlerinin statik ve dinamik analizini gerçekleştirmiştir.

Literatürde tünellerin zemindeki statik ve dinamik etkileşimi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Kargar ve diğ. (2014) zemindeki dairesel olmayan tünellerde doğrusal gerilme analizi gerçekleştirmiştir. Jinyang ve diğ. (2015) ikiz dairesel tünellerin statik yer değiştirmesini ve gerilme davranışını araştırmıştır. Li ve Hui (2023) canlı yükler altında tekli ve çoklu zemin tabakalarında bulunan tünellerdeki titreşim tepkilerini incelemiştir. Wang ve diğ. (2017) birbirine yakın, farklı boyutlardaki iki dairesel tünelin statik etkileşimini araştırmıştır. Wang ve diğ. (2018), yarı uzayda farklı boyutlardaki iki dairesel tünelin sürşarj yükü altında statik etkilerini incelemiştir. Fang ve diğ. (2012) birleşik ikiz dairesel tünellerin zemindeki oturma davranışını incelemiştir. Fang ve diğ. (2016) yarı sonsuz bir ortamda farklı bölgelere yerleştirilen ikiz tünellerin yerleşimini ve etkileşimlerini araştırmıştır. Mori ve Abe (2005) farklı boyutlardaki büyük dikdörtgen tüneller üzerinde deneysel çalışmalar yürütmüştür. Kontoe ve diğ. (2011) zemindeki Rayleigh sönümlemesini kullanarak dairesel tünellerin statik analizini gerçekleştirmiştir. Lu ve diğ. (2014) derin dairesel tünellerin şekillerine bağlı olarak statik etkiler altında bir optimizasyon çalışması yürütmüştür. Wilson ve diğ. (2013) drenajsız zemindeki kare kesitli tünellerin stabilitesini incelemiştir. Wilson ve diğ. (2015) drenajsız zeminde ikiz kare kesitli tünellerin

stabilitesi üzerinde çalışmıştır. Assadi ve Sloan (1991) drenajsız toprakta yüzeye yakın tünellerin stabilitesini analitik olarak incelemiştir. Abbo ve diğ. (2013) zemindeki yüzeye yakın kare tünellerin dayanıklılığını araştırmıştır. Nakamura ve diğ. (2003) farklı geometrik şekillere sahip birleşik ikiz tünellerin optimal davranışını araştırmıştır. Clouteau ve diğ. (2005) katmanlı ortamda yarım daire şeklindeki bir tüneldeki dinamik tepkileri incelemiştir.

He ve diğ. (2019), birden fazla tabakadan oluşan zemindeki ikiz tüneller arasında meydana gelen dinamik tepkileri analitik olarak incelemiştir. Tsiniadis ve diğ. (2016) kare tünellerin titreşim davranışını farklı malzeme özellikleriyle karşılaştırmıştır. Xu ve diğ. (2019) farklı malzeme özelliklerine sahip çok katmanlı ortamlardaki ikili dikdörtgen tüneller arasındaki titreşim tepkilerini araştırmıştır. Won ve diğ. (2021) dinamik dalga etkisi altında ikili dairesel tünellerin tepkilerini incelemiştir. Çilingir ve Madabhushi (2011) kare bir tünelin sarsıntı etkisi altındaki davranışını araştırmıştır. Lu ve diğ. (2007) gözenekli bir ortamda dairesel bir tüneldeki titreşim etkisini incelemiştir. Lopes ve diğ. (2014) bir ulaşım tüneli ile yakındaki bir yapı arasındaki dinamik etkileşimi incelemiştir. Tsiniadis ve Pitilakis (2018) dikdörtgen tünellerin yanal sarsıntının etkisi altındaki dinamik tepkisini araştırmıştır. Sandoval ve Bobet (2020) derin zeminde bulunan tünellerdeki titreşimin etkilerini araştırmıştır. Vo ve diğ. (2018) yumuşatılmış sonlu elemanlar kullanarak sürtünmeli bir ortamda kenarları eşit olan dikdörtgen bir tünelin stabilitesini incelemiştir. Hassanlourad ve diğ. (2019) birden fazla tabakadan oluşan bir ortamda yüzeye yakın konumlandırılmış kare bir tünelde titreşim analizi gerçekleştirmiştir. Rabiefar (2023) suya doymuş yarı sonsuz bir ortamda ikili tünellerdeki dinamik dalga saçılımının etkilerini incelemiştir. Tsiniadis ve diğ. (2016) dairesel tünellerin çevredeki dinamik davranışını ve aşırı esneklikteki analiz yöntemlerini incelemiştir. Wu ve diğ. (2021) farklı boyutlardaki çift kutu kesitli tünellerin demiryolu titreşim tepkilerini karşılaştırmıştır. Tiwari ve diğ. (2016) çift özdeş dairesel tünellerde meydana gelen patlama sonucu tünel-zemin etkileşimini araştırmıştır. Liu ve diğ. (2016) dikey olarak yerleştirilmiş ikiz tünellerle yarı sonsuz bir ortamda dinamik dalga etkilerini incelemiştir. Balendra ve diğ. (1991) demiryolu tünellerinde farklı hızlardaki trenlerin oluşturduğu; yapı, zemin ve tüneller arasındaki titreşim davranışını incelemiştir.

Hasheminejad ve Avazmohammadi (2008) çift özdeş tünellerin bulunduğu bir ortamda, titreşim etkileri altında dinamik gerilme analizi gerçekleştirmiştir. Çilingir

ve Madabhushi (2011) derin dairesel tünellerin dinamik davranışını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Lu ve diğ. (2022) farklı esneklik özelliklerine sahip dikdörtgen tünellerin titreşim davranışını incelemiştir. Almashhadany ve Albusoda (2020) deneysel yöntemler kullanarak granüler bir ortamda eşit dikdörtgen kesitli tünellerdeki dinamik etkileri araştırmıştır. Tsiniadis ve diğ. (2013) yumuşak ortamlardaki tünellerin dinamik tepkilerini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak incelemiştir. Raghavendra (2014) farklı boyutlardaki çift tünellerin desteksiz veya destekli sismik tepkilerini araştırmıştır. Jishnu ve Ayothiraman (2020) ikili demiryolu tünellerinde statik ve dinamik yükler altındaki sismik tepkileri incelemiştir. Kamal ve diğ. (2021) belirli bir bölgedeki ikili metro tünellerinin dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Wang ve diğ. (2020) demiryolu tünellerindeki titreşimleri incelemek için sayısal ve deneysel çalışmalar yürütmüştür. Tsiniadis (2017) dikdörtgen tünellerin yanal deprem yükleri altındaki davranışını araştırmıştır. Tsiniadis (2018) çift ve tek tünellerin dinamik titreşim etkileri altındaki davranışlarını karşılaştırmıştır. Lin ve diğ. (2017) sonlu ve sonsuz elemanlar kullanılarak modellenen ikili tünel-zemin üzerinde dinamik analiz gerçekleştirmiştir. Naseem ve diğ. (2020) üçlü tünellerin olduğu yumuşak bir ortamda dinamik tepkileri incelemiştir. Panji ve Mojt bazadeh-Hasanlouei (2021) farklı kesit şekillerine sahip ikili tünellerde sismik analiz gerçekleştirmiştir. Tsiniadis ve diğ. (2015) dikdörtgen tünellerin dinamik tepkilerini incelemiştir. Yang ve diğ. (2019) demiryolu titreşimlerinin etkisi altında dikdörtgen tünellerde deneysel analiz gerçekleştirmiştir. Shirinabadi ve Moosavi (2016) ikili tünellerde statik ve dinamik analizler gerçekleştirmiştir. Lin ve diğ. (2016) dalga etkisi altında 2.5D sonlu-sonsuz elemanları kullanarak zemindeki dinamik tepkileri incelemiştir. Zhang ve diğ. (2023) yüksek hızlı trenlerin tünellerdeki titreşimlerinden kaynaklanan oturmaları araştırmıştır. Megna ve Bracciali (2023) tünellerden geçen trenlerin frenlenmesi sırasında oluşan titreşimden kaynaklanan arızalara çözüm önermiştir.

Gerçekçi sonuçlara ulaşmak için yapı ve zemin davranışı incelenerek malzeme modelinde elasto-plastik zemin vurgulanmıştır. Literatür incelendiğinde; Zou ve diğ. (2018) elasto-plastik sonsuz ortamda dairesel tünellerin davranışını araştırmıştır. Wu ve diğ. (2021) gözenekli elasto-plastik zeminde üç boyutlu dinamik analiz için bir formülasyon önermiştir. Ebrahimian ve diğ. (2012) granüler elasto-plastik zeminde kayma deformasyonunu incelemiştir. Tsiniadis (2018) visko-elasto-plastik bir ortamda çift dairesel tünellerin yanal dinamik etki altındaki davranışını incelemiştir. Zhang ve

diğ. (2021) dairesel boşluklu elastoplastik bir zeminde boşluk boyutlarına bağlı olarak zemin davranışını araştırmıştır. Khan ve diğ. (2021) sert elastoplastik zemindeki ikiz dairesel tünellerde gerçekleştirilen statik gerilme analizini gerçekleştirmiştir. Klar ve diğ. (2007) elastoplastik zeminde ulaşım hattı olarak kullanılan boruların etkileşim analizini gerçekleştirmiştir. Mahapatra ve Dasgupta (1990) zemin problemlerinde elastik ve plastik analizler yapmıştır. Vrakas ve Anagnostou (2015) gözenekli elastoplastik zeminlerdeki tünellerin davranışını farklı zemin modellerinde incelemiştir. Tang ve diğ. (2015) suya doymuş gözenekli elasto-plastik ortamın düzgün yük altında statik davranışını araştırmıştır. Wang ve diğ. (2017) yarı sonsuz bir zeminde farklı boyutlardaki dairesel ikili tünellerin statik davranışını incelemiştir. Gomes (2014) kum elastoplastik zemindeki dairesel tünellerin dinamik davranışını incelemiştir. Zhang ve diğ. (2015) homojen olmayan suya doymuş gözenekliliğe sahip toprak üzerinde sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir. Zerfa ve Loret (2003) Üç boyutlu dinamik yükler altındaki viskoz sınırlara sahip, farklı dalga etkilerini sönmüleyen bir zemindeki davranışlarını parametrik çalışma yaparak incelemiştir. Sıvılaşma durumunda zemin tepkilerini irdelemiştir. Theodorakopoulos (2003) harmonik yükler altındaki iki boyutlu poroziteye sahip bir zeminde dinamik davranışları incelemiştir. Bu kapsamda zemin içindeki gözenekli boşlukların kayma gerilemeleri ve boşluk basıncı tepkilerini de göz önünde bulundurmıştır. Amorosi ve Boldini (2009) Dairesel tünel içeren visko-elastik ve visko-elasto-plastik zeminde enine sismik tepkileri araştırmıştır. Yapılan analizlerde plastik modelden dolayı dinamik yükler dairesel kesitin eğilme momentinde kalıcı artışa neden olacağı tespit edilmiştir. Pisanò ve Jeremić (2014) sürtünmeli visko-elasto-plastik modelde döngüsel kayma gerilmelerini analiz etmiştir. Haider ve diğ. (2019) üçgen dağılımlı yük altındaki yarı sonsuz ortamda dinamik plastik dalga dağılımını, sertleşen plastik mekanik özelliğe sahip ortam etkilerini dikkate alarak incelemiştir. Terzi ve Manolis (2023) dikdörtgen ve dairesel kesitli tünellerde farklı zemin durumlarında ve farklı dinamik yük etkileri altındaki dinamik tepkileri araştırmıştır. Boldini ve diğ. (2010) Visko-elastik yumuşak zeminde yüzeye yakın konumda bulunan dairesel tünellerin doğrusal olmayan dinamik analizlerini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Plastik zemin modellerinde sismik etkilerin tünel üzerinde kalıcı etkileri olduğu gözlenmiştir. Elgamal ve diğ. (1991) üzerinde baraj bulunan, elasto-plastik histeretik bir zeminde kayma etkilerini dikkate alarak dinamik deprem tepkilerini incelemiştir. Jakki ve Sharma (2005) Hoek-Brown akma kriterini dikkate alan elasto-plastik bir

zemin içinde bulunan dairesel bir tünelde sonlu elemanlar yöntemiyle statik gerilme analizi gerçekleştirmiştir. Malzeme akma bölgesinde rijitliğin azalmasıyla birlikte, zeminde akma bölgesi boyutunu, deformasyona uğramış gerilme ve şekil değiştirme davranışını önemli ölçüde etkilemiştir. Conniff ve Kioussis (2007) birleşik yükler altındaki elasto-plastik ortamda oluşan deformasyonu klasik plastisite teorisi kavramlarıyla analiz etmiştir. Nagel ve Meschke (2009) iki ve üç fazdan oluşan poroziteye sahip elasto-plastik bir zeminde, tünel açma işlemleri yapılırken uygulanan basınç kuvvetinin zeminde oluşturduğu tepkileri sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Liu ve Huang (2021) poroziteye sahip izotropik ve elasto- mükemmel plastik Drucker-Prager malzeme modelini dikkate alan bir ortamda oturma problemini incelemiştir. Malzeme modelini sonlu elemanlar yöntemiyle çözmüştür. Andreotti ve Lai (2017) dinamik yapı zemin etkileşim problemlerinde doğrusal olmayan davranışı dikkate alan bir model geliştirmiştir. Gharehdash ve Barzegar (2015) metro tünellerinde meydana gelen titreşimlerin üç boyutlu elasto plastik zeminde tepkilerini incelemek için sonlu farklar yöntemiyle dinamik analiz gerçekleştirmiştir. Khan ve diğ. (2022) elastik-plastik Mohr-Coulomb zemin modelini dikkate alan bir zemin içinde bulunan, kalkan destek sistemi kullanılarak yapılan tünellerde statik analiz gerçekleştirmiştir. Ehlers (1989) suya doymuş gözenekli elasto-plastik zeminde termodinamik analiz gerçekleştirmiştir.

Literatürde gözenekli zemin üzerine yapılan çalışmalar; Khalili ve diğ. (1997) suya doymuş gözenekliliğe sahip dinamik zemin problemlerinde kullanılmak üzere tek boyutlu bir sonsuz eleman önermiştir. Benallal ve Comi (2003) yarı statik yükleme altında suya doymuş gözenekliliğe sahip elastik olmayan zeminin davranışını incelemiştir. Liang ve Zhu (2019) dinamik yükler altında gözenekli yarı sonsuz zeminde dairesel bir tünelde doğrusal olmayan etkileşim problemini çözmüştür. Jeremi'c ve diğ. (2008) suya doymuş gözenekli bir ortamda akış problemini çözmüştür. Nanning ve Schanz (2011) gözenekli zeminlerde dinamik dalga dağılımını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırmıştır. Lotfian ve Sivaselvan (2018) gözenekli zeminlerdeki dinamik tepkileri sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Tasiopoulou ve diğ. (2015) gözenekli topraktaki dinamik ve statik tepkileri incelemiştir. Mesgouez ve diğ. (2005) visko-elastik yarı sonsuz gözenekli bir ortamda dinamik dalga problemini araştırmıştır. Senjuntichai ve Rajapakse (1994) 3 boyutlu tabakalı gözenekli zemin üzerinde statik analiz gerçekleştirmiştir. Edip ve diğ. (2020)

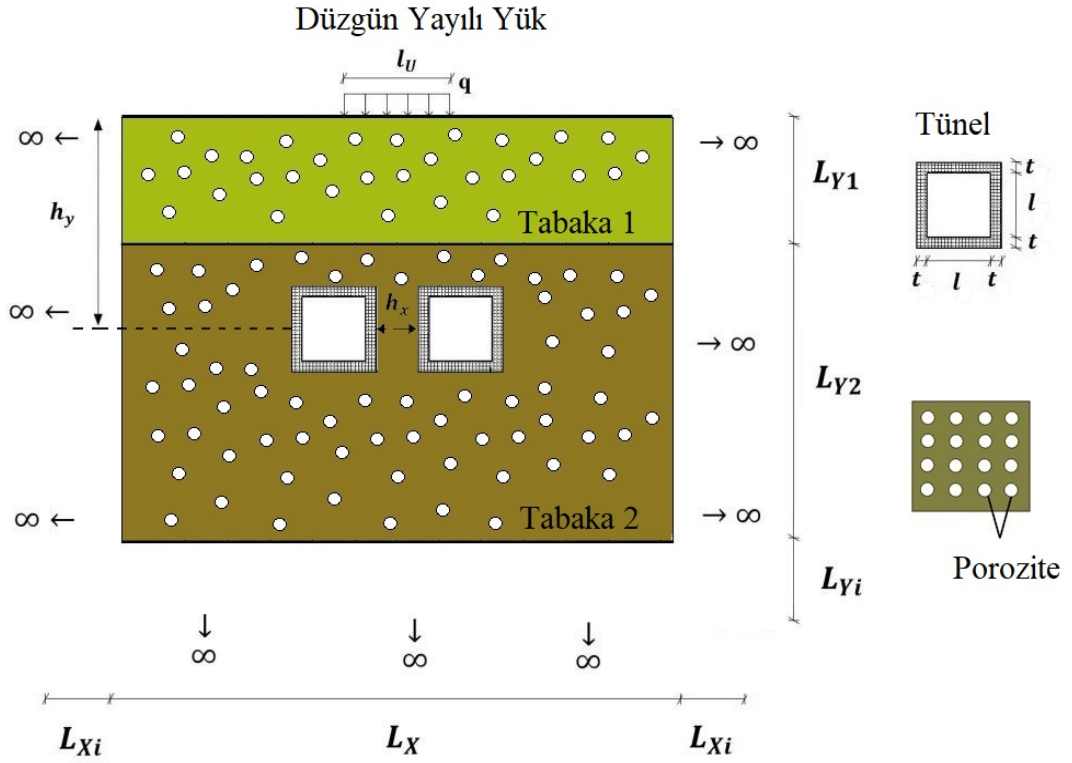
gözenekli suya doymuş yarı sonsuz zeminde kullanılmak üzere yeni bir iki boyutlu sonsuz eleman önermiştir. Zienkiewicz (1982) gözenekli ortamlardaki statik ve dinamik problemlerin çözümü için bir formülasyon önermiştir. Edip ve diğ. (2021) iki boyutlu sonsuz elemanlar kullanarak suya doymuş sonsuz bir ortamı modellemiştir.

Literatür taramasından da anlaşılacağı üzere yarı sonsuz ortamın statik ve dinamik analizine yönelik pek çok çalışma yapılmıştır. Yarı-sonsuz ortamın, statik ve dinamik problemlerinde sonsuz ortam kullanılmadan çözüm teknikleri ve matematiksel modellenmesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Literatür çalışması incelendiğinde yarı sonsuz ortam problemlerinde tünel ve tabaka konumlarının dinamik tepkiler üzerindeki etkilerini inceleyen detaylı çalışmalar bulunmaktadır. Bu araştırma, tünellerin zemin yüzeyinden konumunun ve tünel-zemin etkileşiminin, elastik, viskoelastik özelliğe sahip bir yarı sonsuz ortamın farklı noktalardaki dinamik tepkileri üzerindeki etkisini ayrıntılı olarak ele almayı amaçlamaktadır. Bu konu tünellerin tasarımı için çok önemlidir. Çünkü tünellerin ve tabakaların yerleri özellikle harmonik yükler, deprem veya trafik yüklerinde dinamik tepkileri önemli ölçüde etkileyebilir.

Yapılan çalışmayı önemli hale getiren diğer bir konu ise; yarı sonsuz ortam problemlerinin modellenmesi ve çözümü klasik sonlu elemanlarla yarı sonsuz bir ortamın yeterli uzaklıktaki bir bölgeye sınırlandırılmasıyla elde edilebilmektedir. Uzak mesafelerin sınırlandırılarak sonlu elemanlarla modellenmesi sistem matrislerinin bantlı yapısının ve simetri özelliklerinin bozulmasına neden olur. Bu durumda gerçekçi sonuçlar elde edilemeyebilir. Ayrıca büyük hesaplama maliyetlerine neden olması ve bu modelin programlanması karmaşık hale geldiğinden, çok sayıda denklemin çözülmesi oldukça zordur. Bu denklemleri çözmek ciddi zaman ve çaba gerektirir. Bunun yerine kaynağa yakın bölge sonlu elemanlar, uzak bölgede ise sonsuz elemanlar kullanılarak gerçekçi çözümler elde edilebilir. Bu nedenle gerçekçi bir çözüm elde etmek ve hesaplama maliyetini azaltmak için elemanların uzak bölgesi sonsuz elemanlar kullanılarak modellenmelidir.

3. TEORİ VE FORMÜLASYON

Şekil 3.1'de düzgün yayılı yük altında iki özdeş kare tünele sahip iki tabakalı, poroziteli viskoelastik yarı sonsuz bir ortam gösterilmiştir. Sonlu ortam bölgesinin boyutları yatay yönde L_X olarak, dikey yönde birinci tabaka L_{Y1} ve dikey yönde ikinci tabaka L_{Y2} olarak gösterilmiştir. Sonsuz bölge boyutları sırasıyla yatay ve dikey yönlerde L_{Xi} ve L_{Yi} olarak ifade edildi. Her bir kare tünelin iç uzunluğu l , tünel kalınlıkları ise t olarak belirtilmiştir. Tüneller arası mesafe h_x ve tünellerin yer yüzeyine olan uzaklığı h_y olarak gösterilmiştir. l_U uzunluğundaki düzgün yayılı yük q , zeminin üst orta yüzeyinden gelen yük olarak verilmiştir.



Şekil 3.1 : Düzgün yayılı yük etkisi altında ikiz tünel içeren, viskoelastik tabakalı ve homojen poroziteli yarı sonsuz bir ortam.

Statik ve dinamik problemlerin çözümünde düzlem elastisitedeki hareket denklemleri kullanılmıştır. Nihai hedef ikiz tünel içeren tabakalı ortamdaki statik ve dinamik davranışları incelemektir. Ele alınan bu çalışmada, farklı tabakalı yarı sonsuz ortamın içerisinde tüneller bulunması durumunda statik ve dinamik yükler altındaki mekanik

cevapları incelenmiştir. Ayrıca her bir tabakanın, poroziteli olma durumu da dikkate alınmıştır.

Ele alınan problem bir etkileşim problemi olması ve etkileşim problemlerinin çözümünde daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek ve hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla Şekil 3.1’de görüldüğü üzere sonsuz ortamın uzak bölgeleri sonsuz elemanlarla modellenmesi yapılmıştır. İncelenen problem, düzlem sürekli ortam modeli ile ele alınmıştır. Yarı sonsuz ortamda, homojen porozite modeli kullanılmıştır.

Düzlem elastisitedeki hareket denklemleri, düzlem bir elemana etki eden kuvvetlerden yararlanarak oluşturulan eşitlik 3.1’de sunulan denge denklemleri ile elde edilmektedir.

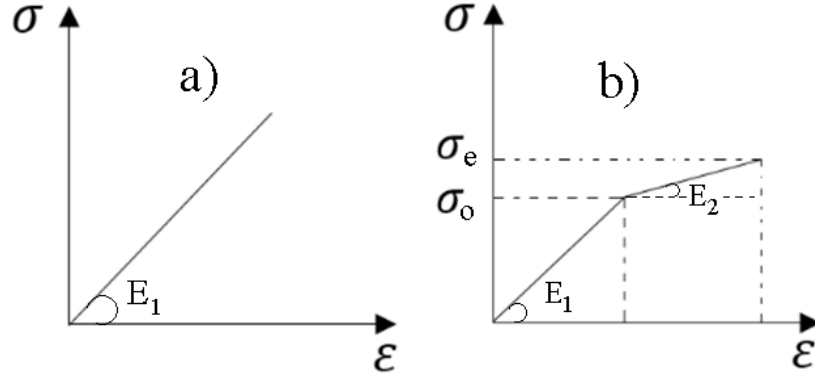
$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + f_x &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + f_y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}\end{aligned}\quad (3.1)$$

Burada f_x ve f_y , sırasıyla x ve y doğrultularındaki hacim kuvvetleridir. σ_x ve σ_y normal gerilmeleri, τ_{xy} kayma gerilmelerini ifade etmektedir. ρ malzeme kütle yoğunluğu, u ve v ise x ile y doğrultularındaki yerdeğişirmeleri göstermektedir. Eşitlik 3.1’deki denklemin sağ tarafının sıfır olması hali, statik durumu ifade etmektedir.

Düzlem sürekli ortam modeline ait şekil değiştirme ile yerdeğişirmeler arasındaki bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\quad (3.2)$$

Çalışmada söz konusu sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan statik ve dinamik sonuçları incelenmiştir. Bu amaçla doğrusal analizlerde, yarı sonsuz ortamın her bir tabakasının gerilme şekil değiştirme ilişkisi şekil 3.2a’da gösterildiği gibi doğrusal elastik olarak düşünülmüştür. Doğrusal olmayan analizlerde ise, yarı sonsuz ortamın her bir tabakasındaki şekil 3.2b’de gösterildiği gibi bilineer gerilme şekil değiştirme ilişkisi kullanılmıştır. Burada E_1 ve E_2 sırasıyla birinci ve ikinci doğruya ait elastisite modülünü temsil eder. σ_o ve σ_e sırasıyla orantılılık gerilme ve elastik gerilme sınırını temsil eder.



Şekil 3.2 : Gerilme-Şekil Değiştirme modelleri a) Doğrusal elastik malzeme modeli, b) Bilineer gerilme şekil değiştirme malzeme modeli.

Hem doğrusal elastik hem de bilineer bünye modelinde, her bir eğriye ait malzeme sabitleri lineer olduğundan dolayı, bünye denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.3)$$

Burada $\{\sigma\}$ gerilme tansörünü, $[D]$ malzeme sabitleri tansörünü ve $\{\varepsilon\}$ şekil değiştirme tansörünü ifade etmektedir.

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad [D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Her bir tabakaya ait malzeme sabitleri tansörü $[D_{ij}]$ elemanları, poroziteye bağlı olarak düzlem şekil değiştirme durumunda izleyen eşitlikte ifade edilmiştir.

$$D_{11} = D_{22} = \frac{E(p)(1 - \nu(p))}{(1 + \nu(p))(1 - 2\nu(p))}$$

$$D_{12} = D_{21} = \frac{\nu E(p)}{(1 + \nu(p))(1 - 2\nu(p))}$$

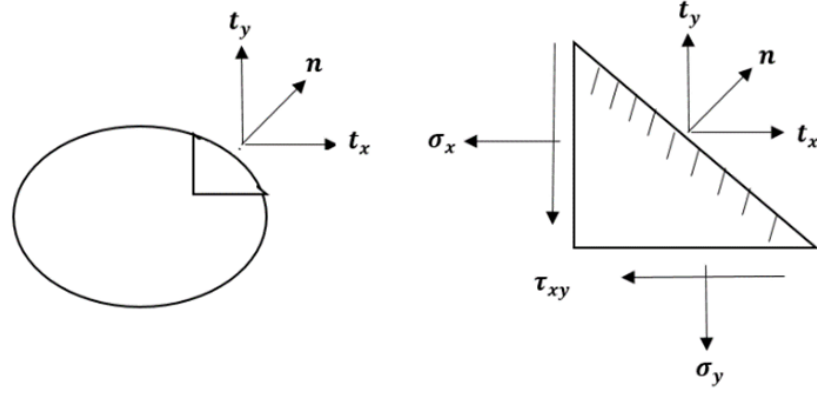
$$D_{33} = G(p) = \frac{E(p)}{2(1 + \nu(p))} \quad (3.5)$$

Burada $E(p)$, $G(p)$ ve $\nu(p)$ sırasıyla elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranı olup porozite oranı p 'ye eşitlik 3.6'da sunulan homojen porozite dağılımına bağlıdır.

$$M(p) = M_0(1 - p) \quad (3.6)$$

Burada M_0 malzemenin herhangi bir mekanik özelliği ve p ise porozite oranını temsil eder. Homojen porozite dağılımı şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Cismin yüzeyinde bulunan sınır şartları aşağıda ifade edilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Sınır şartları.

$$(n_x = \cos \theta, n_y = \sin \theta)$$

$$\begin{aligned} t_x &= \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y \\ t_y &= \tau_{xy} n_x + \sigma_y n_y \end{aligned} \quad (3.7)$$

Hareket denklemleri yerdeğiştirmeler cinsinden izleyen eşitlikte ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{33} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) &= -f_x + \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{12} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{22} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{33} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) &= -f_y + \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Sınır şartları da yerdeğiştirmeler cinsinden aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} t_x &= \left(D_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial v}{\partial y} \right) n_x + D_{33} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) n_y \\ t_y &= \left(D_{12} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{22} \frac{\partial v}{\partial y} \right) n_y + D_{33} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) n_x \end{aligned} \quad (3.9)$$

Söz konusu düzlem elastisite problemine ait sonlu eleman formülasyonları aşağıda elde edilmiştir. Her iki doğrultudaki yerdeğiştirmeler (u , v), interpolasyon şekil fonksiyonları kullanılarak sonlu eleman yaklaşımı gerçekleştirilmektedir.

$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i \quad v = \sum_{i=1}^n N_i v_i \quad (3.10)$$

Burada, N_i interpolasyon şekil fonksiyonunu temsil eder. Eşitlikteki u ve v elemanın herhangi bir noktasındaki yatay ve düşey yer değiştirmeleri, u_i ve v_i ise eleman düğüm

noktalarındaki yer değiştirmeleri temsil eder. Yer değiştirme alanı düğüm noktası yer değiştirmeleri cinsinden izleyen eşitlikte ifade edilmiştir.

$$\{\Delta\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & N_n & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots & 0 & \dots & N_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

şekil değiştirme ve gerilmeler düğüm noktası yer değiştirmeleri cinsinden izleyen eşitlikte ifade edilmiştir.

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\Delta\}, \quad \{\sigma\} = [D][B]\{\Delta\} \quad (3.12)$$

Burada $[B]$ şekil değiştirme matrisi ve $\{\Delta\}$ ise yer değiştirme vektörünü temsil etmektedir.

$$[B] = [L]^T [N] \quad (3.13)$$

Burada, $[L]$ diferansiyel operatörü temsil etmektedir.

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Düzlem bir sonlu elemana ait gerilme ve şekil değiştirme ifadeleri düğüm noktası yerdeğiştirmeleri ile şekil fonksiyonları cinsinden izleyen ifadelerde gösterilmiştir.

$$\{\varepsilon\} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n [B_i]\{\Delta_i\} \quad (3.15)$$

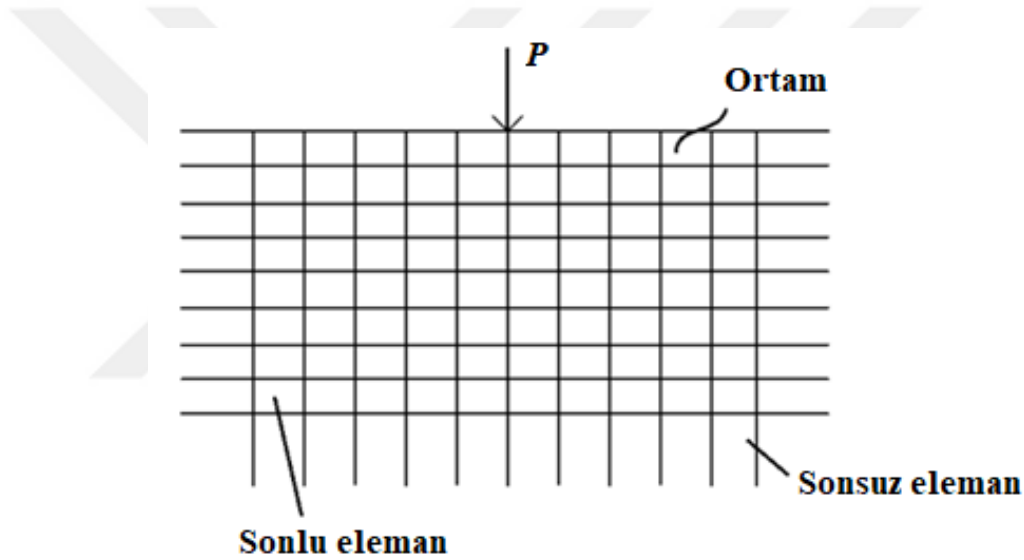
$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} = [D] \sum_{i=1}^n [B_i]\{\Delta_i\} \quad (3.16)$$

Dinamik analizlerde, yarı sonsuz ortamın her bir tabakasında, Kelvin-Voigt viskoelastik malzeme modeli kullanılmış ve bünye bağıntıları şu şekilde sunulmuştur:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + c \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} \\ \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial t} \\ \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad (3.17a)$$

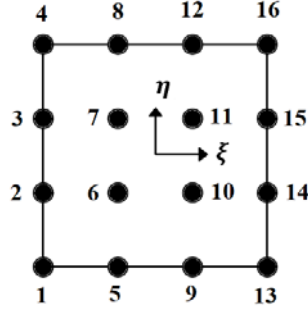
$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} + c[D]\{\dot{\varepsilon}\} \quad (3.17b)$$

Burada c sönüm oranıdır. Statik ve dinamik problemlerin çözümünde 2 boyutlu dikdörtgen kuadratik sonlu eleman kullanılmıştır. Tüneller ve etki eden yüke yakın bölgeler sonlu elemanlarla, uzak bölgeler ise sonsuz elemanlarla modellenmiştir. Statik ve dinamik problemler için sonlu ve sonsuz elemanlar ile bir yarı sonsuz ortam modeli Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Tekil yüke maruz kalmış sonlu-sonsuz ortam.

Sonlu bölgede 16 düğüm noktalı sonlu elemanlar kullanılmıştır. Burada geleneksel 4 yada 8 düğüm noktalı kuadratik sonlu elemanlar yerine 16 düğüm noktalı kuadratik sonlu elemanlar kullanılmasındaki amaç, hesaplama süresini azaltmak ve modeli bilgisayar kodlamasında daha basit hale getirmektir. Bunun sonucunda program daha kolay otomatize edilebilecek ve modellerde daha az sonlu eleman alınarak sonuç alınacaktır. Sonlu elemanlarda Şekil 3.5'ten görüldüğü gibi sonlu ortam bölgesi için 16 düğüm noktalı sonlu elemanlar interpolasyon şekil fonksiyonları Çizelge 3.1'de ξ ve η koordinatlarına göre sunulmuştur.

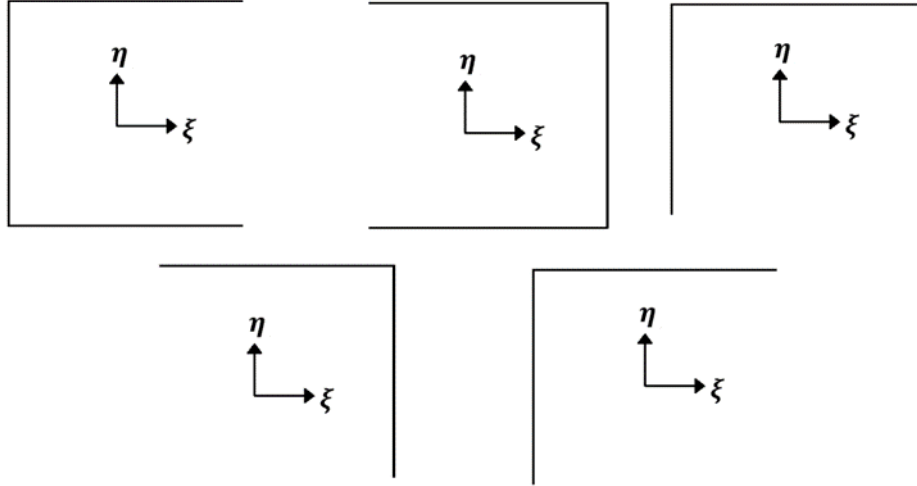


Şekil 3.5 : İki boyutlu onaltı düğüm noktalı sonlu eleman.

Çizelge 3.1 : İki boyutlu 16 düğümlü sonlu eleman için interpolasyon şekil fonksiyonları.

Nod Sayısı	Şekil Fonksiyonu
1	$\frac{81}{256}(1-\xi)(1-\eta)(\frac{1}{9}-\xi^2)(\frac{1}{9}-\eta^2)$
2	$\frac{243}{256}(1-\eta^2)(\xi^2-\frac{1}{9})(\frac{1}{3}-\eta)(1-\xi)$
3	$\frac{243}{256}(1-\eta^2)(\xi^2-\frac{1}{9})(\frac{1}{3}+\eta)(1-\xi)$
4	$\frac{81}{256}(1-\xi)(1+\eta)(\frac{1}{9}-\xi^2)(\frac{1}{9}-\eta^2)$
5	$\frac{243}{256}(1-\xi^2)(\eta^2-\frac{1}{9})(\frac{1}{3}-\xi)(1-\eta)$
6	$\frac{729}{256}(1-\xi^2)(1-\eta^2)(\frac{1}{3}-\xi)(\frac{1}{3}-\eta)$
7	$\frac{729}{256}(1-\xi^2)(1-\eta^2)(\frac{1}{3}-\xi)(\frac{1}{3}+\eta)$
8	$\frac{243}{256}(1-\xi^2)(\eta^2-\frac{1}{9})(\frac{1}{3}-\xi)(1+\eta)$
9	$\frac{243}{256}(1-\xi^2)(\eta^2-\frac{1}{9})(\frac{1}{3}-\xi)(1-\eta)$
10	$\frac{729}{256}(1-\xi^2)(1-\eta^2)(\frac{1}{3}+\xi)(\frac{1}{3}-\eta)$
11	$\frac{729}{256}(1-\xi^2)(1-\eta^2)(\frac{1}{3}+\xi)(\frac{1}{3}+\eta)$
12	$\frac{243}{256}(1-\xi^2)(\eta^2-\frac{1}{9})(\frac{1}{3}+\xi)(1+\eta)$
13	$\frac{81}{256}(1+\xi)(1-\eta)(\frac{1}{9}-\xi^2)(\frac{1}{9}-\eta^2)$
14	$\frac{243}{256}(1-\eta^2)(\xi^2-\frac{1}{9})(\frac{1}{3}-\eta)(1+\xi)$
15	$\frac{243}{256}(1-\eta^2)(\xi^2-\frac{1}{9})(\frac{1}{3}+\eta)(1+\xi)$
16	$\frac{81}{256}(1+\xi)(1+\eta)(\frac{1}{9}-\xi^2)(\frac{1}{9}-\eta^2)$

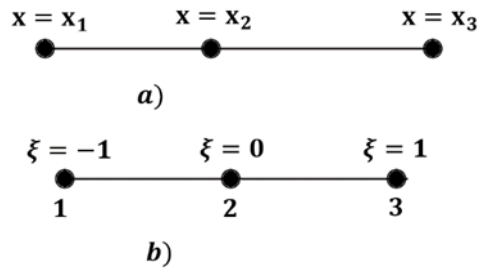
Gerçekçi çözümler elde etmek ve hesaplama süresini azaltmak amacıyla yük ve ortam yüzeyinden uzak bölgeler sonsuz elemanlarla modellendiği daha önce belirtilmişti. Sonsuz elemanda ise bir boyutlu iki düğüm noktalı sonsuz elemanlar kullanılarak, iki boyutlu 8 düğüm noktalı sonsuz elemanlar üretilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Farklı yönlerde bulunan sonsuz elemanlar.

Bu bölümde azalan fonksiyonlu sonsuz elemanlar formüle edilmiştir. Statik ve dinamik hal için rijitlik ve kütle matrisleri elde edilmiştir. Her iki hal için düzlem şekil değiştirme durumu göz önüne alınmıştır.

Şekil 3.7’de 1 nolu düğüm noktasından, 3 nolu düğüm noktasına sonsuza doğru uzanan bir boyutlu sonsuz eleman tasvir edilmiştir.



Şekil 3.7 : Bir boyutlu sonsuz eleman a) Gerçek eleman, b) Referans eleman.

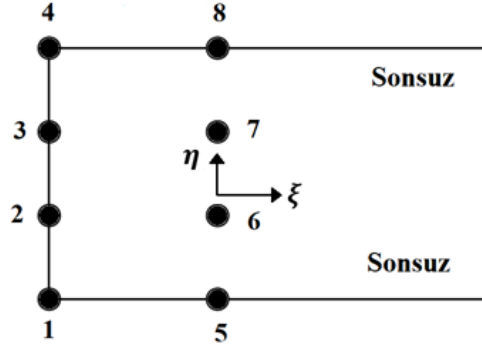
Bir boyutlu 1/r tipi bozunuma sahip sonsuz eleman şekil fonksiyonları izleyen ifadeye gösterilmektedir (Kumar, 1985).

$$N_1 = \frac{-2\xi}{1-\xi} \quad N_2 = \frac{1+\xi}{1-\xi} \quad (3.18)$$

Koordinat dönüşüm ifadeleri aşağıda gösterildiği gibi yazılır;

$$x = N_1x_1 + N_2x_2 \quad (3.19)$$

Uzak ortamda kullanılan sonsuz elemanlar, kullanılan 16 düğüm noktalı sonlu elemanlarla uyum sağlaması açısından 8 düğüm noktalı olarak seçilmiştir (Şekil 3.8). Gösterilen bir boyutlu şekil fonksiyonlarını kullanarak, yöne bağlı olarak iki boyutlu, 8 düğüm noktalı şekil fonksiyonları elde edilmiştir. Sonsuz ortam bölgesi için 8 düğüm noktalı sonsuz eleman geometrik şekil fonksiyonları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Sonsuz elemanın interpolasyon fonksiyonları Çizelge 3.3’te ξ ve η koordinatlarına göre sunulmuştur.

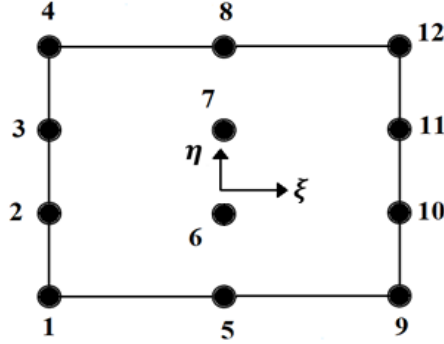


Şekil 3.8 : Sekiz düğüm noktalı sonlu eleman.

Çizelge 3.2 : İki boyutlu 8 düğümlü sonsuz eleman için geometrik şekil fonksiyonları

Nod Sayısı	Şekil Fonksiyonu
M1	$\left(\frac{9}{16}\right)\left(\frac{-2\xi}{1-\xi}\right)(1-\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$
M2	$\left(\frac{27}{16}\right)\left(\frac{-2\xi}{1-\xi}\right)(\eta^2-1)\left(\eta-\frac{1}{3}\right)$
M3	$\left(\frac{27}{16}\right)\left(\frac{-2\xi}{1-\xi}\right)(1-\eta^2)\left(\eta+\frac{1}{3}\right)$
M4	$\left(\frac{9}{16}\right)\left(\frac{-2\xi}{1-\xi}\right)(1+\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$
M5	$\left(\frac{9}{16}\right)\left(\frac{1+\xi}{1-\xi}\right)(1-\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$
M6	$\left(\frac{27}{16}\right)\left(\frac{1+\xi}{1-\xi}\right)(\eta^2-1)\left(\eta-\frac{1}{3}\right)$
M7	$\left(\frac{27}{16}\right)\left(\frac{1+\xi}{1-\xi}\right)(1-\eta^2)\left(\eta+\frac{1}{3}\right)$
M8	$\left(\frac{9}{16}\right)\left(\frac{1+\xi}{1-\xi}\right)(1+\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$

Sonsuz ortam bölgesi için 12 düğüm noktalı sonlu eleman referans alınarak formüle edilmiştir (Şekil 3.9). Sonsuz bölge için, 12 düğüm noktalı sonlu eleman interpolasyon şekil fonksiyonları Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.9 : On iki düğüm noktalı sonlu eleman.

Çizelge 3.3 : İki boyutlu 12 düğümlü sonsuz eleman için interpolasyon şekil fonksiyonları

Nod Sayısı	Şekil Fonksiyonu
N1	$\left(-\frac{1}{2}\right)(\xi)(1-\xi)\left(\frac{9}{16}\right)(1-\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$
N2	$\left(-\frac{1}{2}\right)(\xi)(1-\xi)\left(\frac{27}{16}\right)(\eta^2-1)\left(\eta-\frac{1}{3}\right)$
N3	$\left(-\frac{1}{2}\right)(\xi)(1-\xi)\left(\frac{27}{16}\right)(1-\eta^2)\left(\eta+\frac{1}{3}\right)$
N4	$\left(-\frac{1}{2}\right)(\xi)(1-\xi)\left(\frac{9}{16}\right)(1+\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$
N5	$(1-\xi)(1+\xi)\left(\frac{9}{16}\right)(1-\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$
N6	$(1-\xi)(1+\xi)\left(\frac{27}{16}\right)(\eta^2-1)\left(\eta-\frac{1}{3}\right)$
N7	$(1-\xi)(1+\xi)\left(\frac{27}{16}\right)(1-\eta^2)\left(\eta+\frac{1}{3}\right)$
N8	$(1-\xi)(1+\xi)\left(\frac{9}{16}\right)(1+\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$
N9	$\left(\frac{1}{2}\right)(\xi)(1+\xi)\left(\frac{9}{16}\right)(1-\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$
N10	$\left(\frac{1}{2}\right)(\xi)(1+\xi)\left(\frac{27}{16}\right)(\eta^2-1)\left(\eta-\frac{1}{3}\right)$
N11	$\left(\frac{1}{2}\right)(\xi)(1+\xi)\left(\frac{27}{16}\right)(1-\eta^2)\left(\eta+\frac{1}{3}\right)$
N12	$\left(\frac{1}{2}\right)(\xi)(1+\xi)\left(\frac{9}{16}\right)(1+\eta)\left(\eta^2-\frac{1}{9}\right)$

Sonsuz eleman gerilme ve düzlem şekil değiştirme halleri için geometrik şekil fonksiyonları M_i 'ler kullanılarak Jacobian matrisi aşağıda oluşturulmuştur.

$$[Jac] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{\partial M_i}{\partial \xi} x_i & \frac{\partial M_i}{\partial \xi} y_i \\ \frac{\partial M_i}{\partial \eta} x_i & \frac{\partial M_i}{\partial \eta} y_i \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Jacobian matrisi geometrik şekil fonksiyonlarının kısmi türevlerini içermektedir. Bu durumda (x, y) düzleminde temel alan aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$dxdy = det[Jac]d\xi d\eta \quad (3.21)$$

Burada eşitlik 3.13'teki $[B]$ matrisinde şekil fonksiyonlarının referans eleman koordinatları ξ ve η 'ya göre kısmi türevleri alındığında;

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (3.22)$$

elde edilir. Elde edilen denklem matris formda yazıldığında;

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

formu oluşur. Burada $[J]$, Jacobian matrisidir. Geometrik dönüşüm fonksiyonları kullanılarak Jacobian matrisi şekil fonksiyonları cinsinden aşağıdaki formda hesaplanmıştır.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Burada bağıntı, denklem (3.23)'ün her iki tarafı Jacobian matrisinin tersiyle çarpılıp, gerekli düzenlemeler yapıldığında, şekil fonksiyonlarının x ve y koordinatlarına göre kısmi türevleri,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$[J^*] = [J]^{-1} = \frac{1}{\det[J]} \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial \eta} & -\frac{\partial y}{\partial \xi} \\ -\frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \xi} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Burada $\det[J]$, Jacobian matrisinin determinantıdır. Burada elde edilen ifadeler denklem (3.15)'teki $[B]$ matrisinin yerine yazıldığında şekil değiştirme matrisi elemanları aşağıdaki formda oluşur.

$$[J^*] = \begin{bmatrix} J_{11}^* & J_{12}^* \\ J_{21}^* & J_{22}^* \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$[B_i] = \begin{bmatrix} J_{11}^* & J_{12}^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{21}^* & J_{22}^* \\ J_{21}^* & J_{22}^* & J_{11}^* & J_{12}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Elemana bağlı olarak x-y koordinat takımındaki alan (dA_e), Jacobian dönüşümü yapıldığında,

$$dA_e = dx dy = \det[J] \partial \xi \partial \eta \quad (3.29)$$

elde edilir.

Probleme ait sonlu elemanlar hareket denklemleri enerji ifadeleri ile birlikte Langrange prosedürü uygulanarak elde edilmiştir. Problemin enerji ifadeleri izleyen eşitliklerde sunulmuştur .

$$U_S = \frac{1}{2} \{\Delta\}^T \left(\int_V [B]^T [D][B] \right) \{\Delta\} dV \quad (3.30)$$

$$U_K = \frac{1}{2} \{\dot{\Delta}\}^T \int_V \rho \{\dot{\Delta}\} dV \quad (3.31)$$

$$U_R = \frac{1}{2} \{\dot{\Delta}\}^T \left(\int_V [B]^T c[D][B] \right) \{\dot{\Delta}\} dV \quad (3.32)$$

$$U_L = - \int_0^{l_U} q(t) v(x, t) dx \quad (3.33)$$

Burada U_S , U_K , U_R , U_L sırasıyla şekil değiştirme enerjisi, kinetik enerjisi, Sönüm fonksiyonu ve dış yüklerin potansiyel enerjisini göstermektedir. Denklem 3.31 'de, $\{\dot{\Delta}\}$ hız vektörünü, ρ ise kütle yoğunluğunu temsil etmektedir.

Lagrangian fonksiyonu (I) ve Lagrange denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$I = U_K - (U_S + U_L) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial I}{\partial d_m^{(e)}} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial \dot{d}_m^{(e)}} + Q_{D_m} = 0 \quad (3.35)$$

$$Q_{D_m} = -\frac{\partial U_R}{\partial \dot{d}_m^{(e)}}, m = 1,2,3, \dots 16 \quad (3.36)$$

Burada Q_{D_m} genelleştirilmiş sönüm yükünü gösterir. Eşitlik (3.34-3.36)'da verilen Lagrange prosedürü kullanılarak bir eleman için hareket denklemi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$[K]\{\Delta\} + [M]\{\ddot{\Delta}\} + [C]\{\dot{\Delta}\} = [F] \quad (3.37)$$

Burada $\{F\}$, $[M]$, $[C]$, $[K]$, $\{\Delta\}$, $\{\dot{\Delta}\}$ ve $\{\ddot{\Delta}\}$ sırasıyla bir eleman için; yük vektörü, kütle matrisi, sönüm matrisi, rijitlik tansörü, yer değiştirme vektörü, hız vektörü ve ivme vektörüdür. Bu ifadelerin açılımları izleyen eşitliklerde sunulmuştur.

$$[K] = h_e \int \int_{A_e} [B]^T [D] [B] dx dy \quad (3.38)$$

$$[M] = \rho h_e \int \int_{A_e} [N]^T [N] dx dy \quad (3.39)$$

$$[C] = C \left(h_e \int \int_{A_e} [B]^T [D] [B] \right) dx dy \quad (3.40)$$

$$[F] = h_e \int \int_{A_e} [N]^T \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} dx dy \quad (3.41)$$

Elde edilen integrasyon formu eleman düğüm noktası sayısına bağlı olarak, beş noktalı Gauss Legendre integrasyon yöntemiyle sayısal çözüm elde edilmiştir.

$$\Gamma = \int_a^b f(x) dx = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (3.42)$$

Yer değiştirme ve şekil değiştirme ifadeleri denklem (3.37)'de yerlerine konulduğunda,

$$h_e \int_{A_e} \int \{ \delta \Delta \}^T ([B]^T [D] [B] \{ \Delta \} + \rho [N]^T [N] [\ddot{\Delta}] + C [B]^T [D] [B]) dx dy - h_e \int_{A_e} \int \{ \delta \Delta \}^T [N]^T \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} dx dy \quad (3.43)$$

Eleman rijitlik matrisleri, kütle matrisleri ve eleman yük vektörleri dönüştürülmüş formda aşağıdaki gibi ifade edildi.

$$[K] = h_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] \det[J] \partial \xi \partial \eta \quad (3.44)$$

$$[M] = \rho h_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T [N] \det[J] \partial \xi \partial \eta \quad (3.45)$$

$$[C] = C h_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] \det[J] \partial \xi \partial \eta \quad (3.46)$$

$$[F] = h_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} \det[J] \partial \xi \partial \eta \quad (3.47)$$

Yukarıda elde edilen sonlu eleman hareket denklemlerine ait matrislerin integrasyon hesaplarında beş noktalı Gauss Legendre integrasyon yöntemi kullanılmış olup izleyen eşitliklerde sayısal çözümü dönüştürülmüş formda gösterilmiştir (Çizelge 3.4).

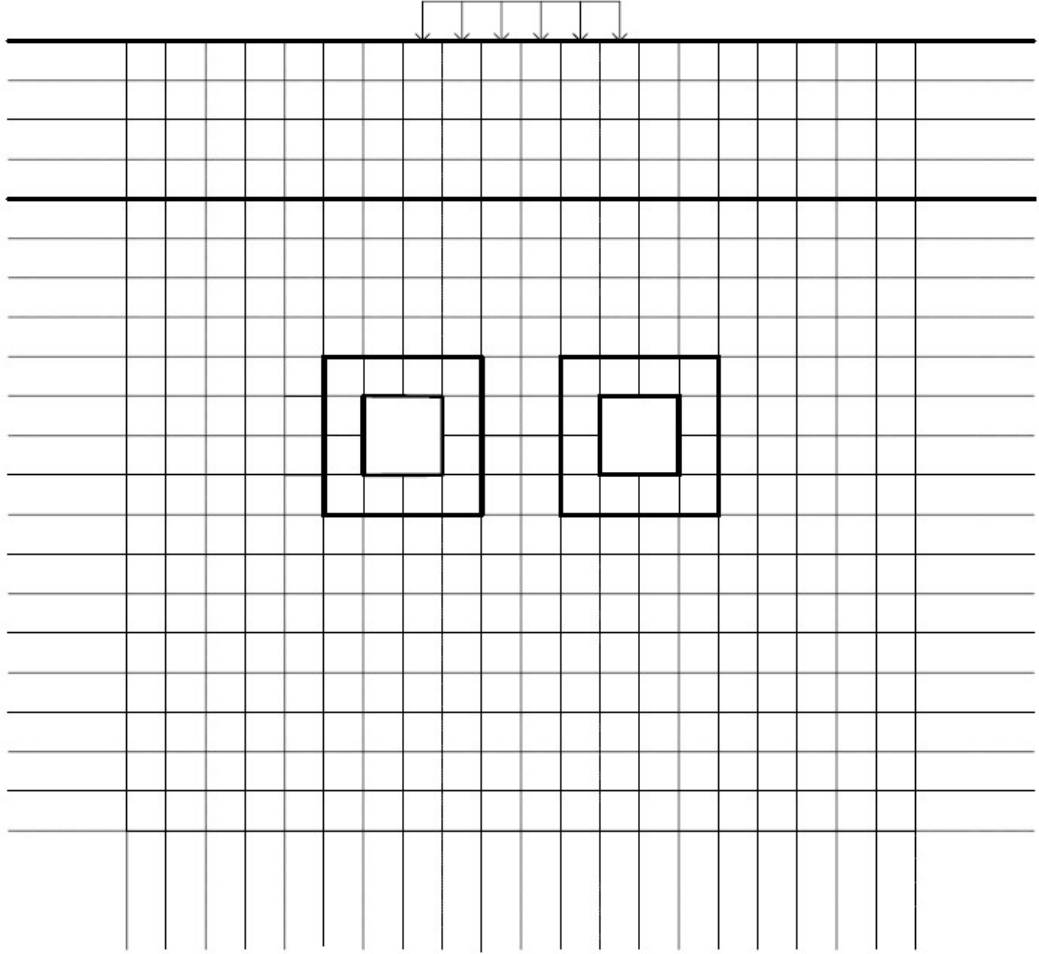
$$\Gamma = h_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) \partial \xi \partial \eta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_i W_j f(\xi_i, \eta_j) \quad (3.48)$$

Çizelge 3.4 : Beş noktalı Gauss Legendre formülü için ağırlık faktörleri ve örnek nokta sayıları.

Nokta (i)	Ağırlık faktörü w_i	Örnek nokta (λ_i)
1	0.2369269	-0,906179846
2	0.4786287	-0,538469310
3	0.5688889	0
4	0.4786287	0,538469310
5	0.2369269	0,906179846

İkiz tünel içeren tabakalı yarı sonsuz ortam, sonlu-sonsuz elemanlarla MATLAB'ta algoritma ve programları yazılarak, statik ve dinamik analizler

gerçekleştirilmiştir(Şekil 3.10). Tünel ve ortam etkileşimini dikkate alarak, etkileşim bölgesine yakın konumda sonlu elemanlar kullanılmıştır. Etkileşim bölgesindeki davranışları açık bir şekilde görebilmek için, etkileşim bölgesinde eleman sayısını arttırmak yerine, düğüm noktası sayısı fazla olan 16 düğüm noktalı kuadratik sonlu eleman tercih edilmiştir. Analizlerde bölgeyi sınırlandırmak ve belirli sınır kabullerinde bulunmak, tünel-ortam davranışlarının değerlendirilmesinde ciddi hatalar ortaya çıkarabilecektir. Bu yüzden bölgeyi sınırlandırmak yerine, belirli bir noktadan sonra sönmülenen, sonlu ve sonsuz bölgeyi bir bütün kabul eden sonsuz elemanlar kullanılmıştır. Modellemede, sonlu elemanlarla uyumlu, sonsuz bölgenin doğrultularına bağlı olarak iki boyutlu 8 düğüm noktalı sonsuz elemanlar tercih edilmiştir. Yarı sonsuz ortam genellikle farklı zemin parametrelerine ve koşullarına sahip olabilmektedir. Bu çalışmada, malzeme parametreleri farklılık gösteren, tabakalı yarı sonsuz ortam, küçük gözenekli yapıya sahip bir ortam, farklı büyüklüklerde boşluklar ve ortam stabilitesini ciddi ölçekte değiştiren tünellerin olması durumları dikkate alınmıştır. Yarı sonsuz ortamda lineer elastik malzeme modeli ve malzeme yönünden doğrusal olmayan modelde bilineer malzeme modeli kullanılmıştır. Kullanılan programda bu durumlar dikkate alınarak bir algoritma yazılmış ve kodlama yapılmıştır. MATLAB programında geliştirilen kodla; tünel, zemin boyutları ve ihtiyaca bağlı olarak istenen modelle uyumlu, programa girilen eleman sayısına bağlı olarak sonlu-sonsuz eleman ağının otomatik bir şekilde dağıtılması sağlanmıştır. Yarı sonsuz ortam içerisindeki herhangi bir noktadan verilen farklı tiplerdeki yüklerin, program içerisinde yapılan kodlamayla sonlu elemanlar yöntemi çerçevesinde uygulaması yapılmıştır. Bilineer malzeme modelinde uygulanan yük, programda parçalara bölünerek belirli bir zaman adımında, zeminde oluşan davranışı dikkate alarak programlanmıştır. Sonlu-sonsuz eleman ağ dağılımı yapılırken tünel içerisinde bulunan boşluk bölgesine denk gelen sonlu elemanlar ise, matris ifadelerindeki karşılığına denk gelen değerleri çıkartılarak boşluk kısımları tanımlanmıştır.



Şekil 3.10 : Tünel ve zemin ile uyumlu ağ dağılımı.

Statik ve dinamik analizlerde daha önce de belirtildiği gibi yarı sonsuz ortamın her bir tabakasının gerilme şekil değiştirme ilişkileri doğrusal elastik ve bilineer gerilme şekil değiştirme malzeme modellerine göre yapılmıştır. İlk aşamada doğrusal elastik malzeme modeline göre statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Bir sonraki aşamada ise doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler bilineer gerilme şekil değiştirme malzeme modeli dikkate alınarak yapılmıştır. Burada not edilmelidir ki tünel yapısının malzemesi tüm analizlerde lineer elastik olarak düşünülmüş olup, sistemin doğrusal olmayan analizinde tabakalı yarı sonsuz ortamın doğrusal olmama durumu göz önüne alınmıştır. İncelenen problemin doğrusal statik analizinin yapılabilmesi için eşitlik 3.37’de elde edilen hareket denklemindeki zamana bağlı ifadeler 0 (sıfır) alındığında, hareket denklemi statik hale indirgenmesiyle çözüm yapılmıştır.

$$[k]\{\Delta\} = [f] \quad (3.49)$$

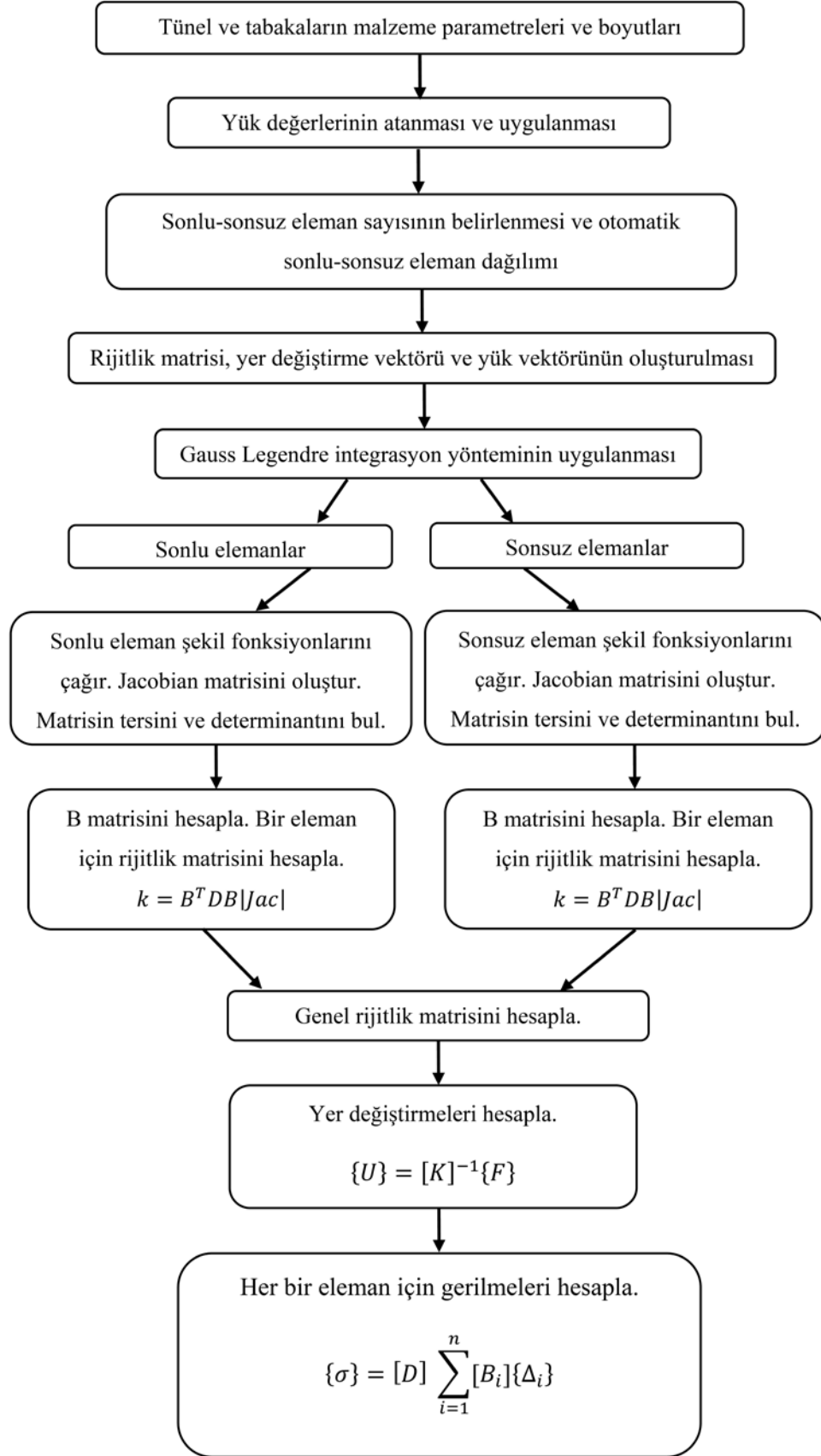
Burada bilinmeyen vektör olan yer değiştirme vektörü $\{\Delta\}$, rijitlik matrisinin $[k]$ tersi alınıp, kuvvet vektörünün $[f]$ tersiyle çapılıp izleyen formda elde edilmiştir.

$$\{\Delta\} = [k]^{-1}[f] \quad (3.50)$$

Statik sonuçlarda gerilme analizinin elde edilmesinde, yukarıda elde edilen yer değiştirme vektörünün eşitlik 3.16'da sunulan gerilme denkleminde yerine yazılmasıyla her bir sonlu elemanda gerilme fonksiyonu elde edilerek yapılmıştır.

Doğrusal statik analize ait algoritma şeması şekil 3.11'de sunulmuştur.



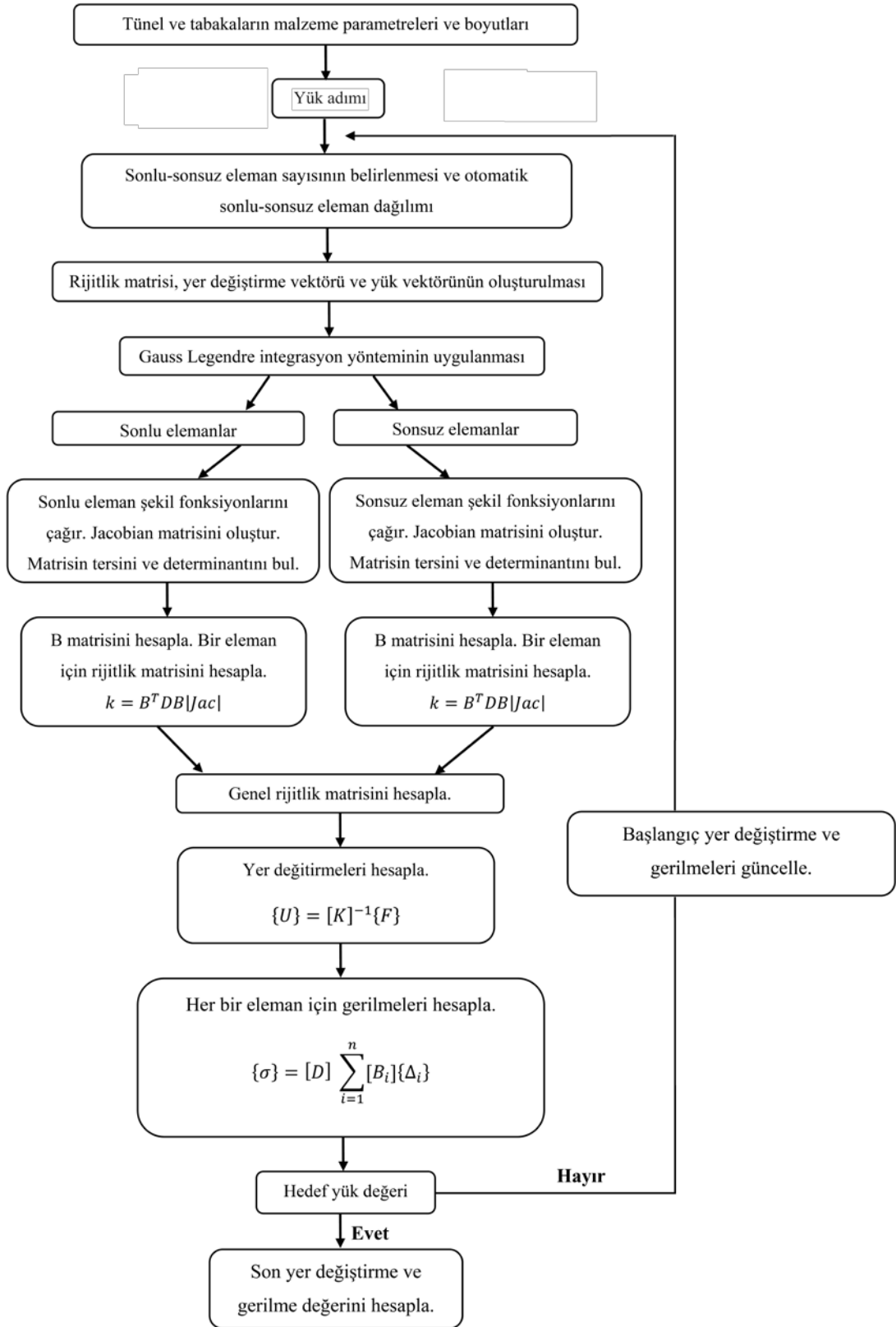


Şekil 3.11 : Doğrusal statik problem çözümünün algoritma şeması.

Daha önceden de belirtildiği üzere doğrusal olmayan analizler, tabakalı yarı sonsuz ortamın malzeme yönünden doğrusal olmama durumuna göre yapılmıştır. Malzeme yönünden doğrusal olmayan modelde, bilineer gerilme şekil değiştirme kullanılmış olup, bu modele göre doğrusal olmama durumu farklı eğimlere sahip iki doğrunun birleşimi ile modellenir. Bu bünye modelinde eğimin değiştiği noktadan itibaren malzemenin doğrusal olmayan bölgesini temsil eder. Özellikle kompleks sistemlerin doğrusal olmayan analizlerinde gerçek gerilme şekil değiştirme eğrileri ile modelleme yapmak oldukça zordur. Ele alınan problemin tabakalı yarı sonsuz ortam olmasından kaynaklı kompleks bir sistem olduğundan, sayısal çözümlerinde gerçek doğrusal olmayan bünye ilişkisini kullanmak oldukça zor olacaktır. Bu durumdan dolayı malzeme yönünden doğrusal olmayan modeli basitleştirmek amacıyla bilineer gerilme şekil değiştirme modeli kullanılmıştır.

Doğrusal olmayan statik analiz çözümünde, artımsal yük yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde sisteme uygulanan yüklerin değeri belli bir sayıya bölünerek, yükler artımsal olarak uygulanır. Buradaki amaç, doğrusal olmama durumunu daha kesin çözebilmektir. Yük adım sayısı arttıkça, doğrusal olmayan çözümler daha da hassas değerlerde elde edilecektir. Özellikle bu yöntem, malzeme yönünden doğrusal olmayan analizlerde ve elastoplastik analizlerde kullanılmaktadır. Her bir yük adımında eşitlik 3.49'da verilen doğrusal statik sonlu eleman denklemi çözülür ve elde edilen sonuçlar bir sonraki yük adımının başlangıç değeri olarak atanır. Burada kullanılan bilineer şekil değiştirme modeli iki farklı eğime sahip olduğundan her bir yük adımı sonucunda elde edilen gerilmeler, kullanılan bilineer gerilme şekil değiştirme eğrisinde hangi bölgeye denk düşüp düşmediği durumu kontrol edilir ve bir sonraki yük adımında kullanılacak malzeme parametreleri o eğrinin değerlerine göre atanır. Burada en önemli olan nokta, yük adımının çok fazla değerlerde alınması ile daha hassas sonuçların elde edilmesidir. Her bir yük adımında her bir sonlu eleman için elde edilen yer değiştirme vektörü eşitlik 3.16'da yerine yazılarak gerilme değerleri elde edilir. Elde edilen gerilme değerleri kullanılarak o sonlu elemana ait maksimum asal normal gerilme hesaplanarak, bilineer gerilme şekil değiştirme eğrisinde kontrol edilir. Her bir yük adımında yapılan bu kontrol sonucunda, bir sonraki yük adımında kullanılacak elastisite modülü tayin edilir. İşlemler nihai yük adımına ulaşıncaya kadar devam eder.

Doğrusal olmayan statik analize ait algoritma şeması Şekil 3.12'de sunulmuştur.



Şekil 3.12 : Doğrusal olmayan statik problem çözümünün algoritma şeması.

Doğrusal dinamik analizde sistemin harmonik yük etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Doğrusal dinamik problemin çözümünde eşitlik 3.37’de verilen hareket denkleminin çözülmesiyle elde edilir. Doğrusal dinamik analizde her bir tabakaya ait

gerilme şekil değiştirme ilişkisi lineer elastik olarak kabul edilmiştir. Doğrusal dinamik analizde eşitlik 3.37’de elde edilen denklemde her bir tabakanın Kelvin Voigt visko-elastik bünye modeline sahip olduğu göz önüne alınarak hareket denkleminin çözümünde harmonik yük etkisi altında zaman tanım alanında Newmark Beta yöntemi kullanılmıştır. Newmark zaman tanım aralığında, sabit ortalama ivme durumu göz önüne alınarak bağıntılar kurulmuştur. Cebirsel denklem sistemi Newmark-Beta yöntemi aşağıda gösterilen prosedür uygulanarak çözülmüştür. Harmonik yük etkisi altında; yer değiştirme, hız ve ivme sonuçlarını veren denklemler aşağıdaki formda gösterilmiştir. Newmark Beta yöntemine göre yer değiştirme, zaman tanım aralığında her bir zaman adımı (Δt) için bulunarak çözüm elde edilmiştir.

$$K_{i+1}u_{i+1} = F_{i+1} \quad (3.51)$$

Burada $t = (i + 1) \Delta t$ süresi için, K_{i+1} genelleştirilmiş rijitlik matrisini ve F_{i+1} genelleştirilmiş kuvvet vektörünü ifade etmektedir.

$$\ddot{u}_0 = \frac{F_0 - C\dot{u}_0 - Ku_0}{M} \quad (3.52)$$

$$a_1 = \frac{1}{\beta\Delta t^2}m + \frac{\alpha}{\beta\Delta t}c;$$

$$a_2 = \frac{1}{\beta\Delta t}m + \left(\frac{\alpha}{\beta} - 1\right)c;$$

$$a_3 = \left(\frac{0.5}{\beta} - 1\right)m + \Delta t \left(\frac{\alpha}{2\beta} - 1\right) \quad (\alpha = 0.5, \beta = 0.25) \quad (3.53)$$

$$\hat{K} = K + a_1 \quad (3.54)$$

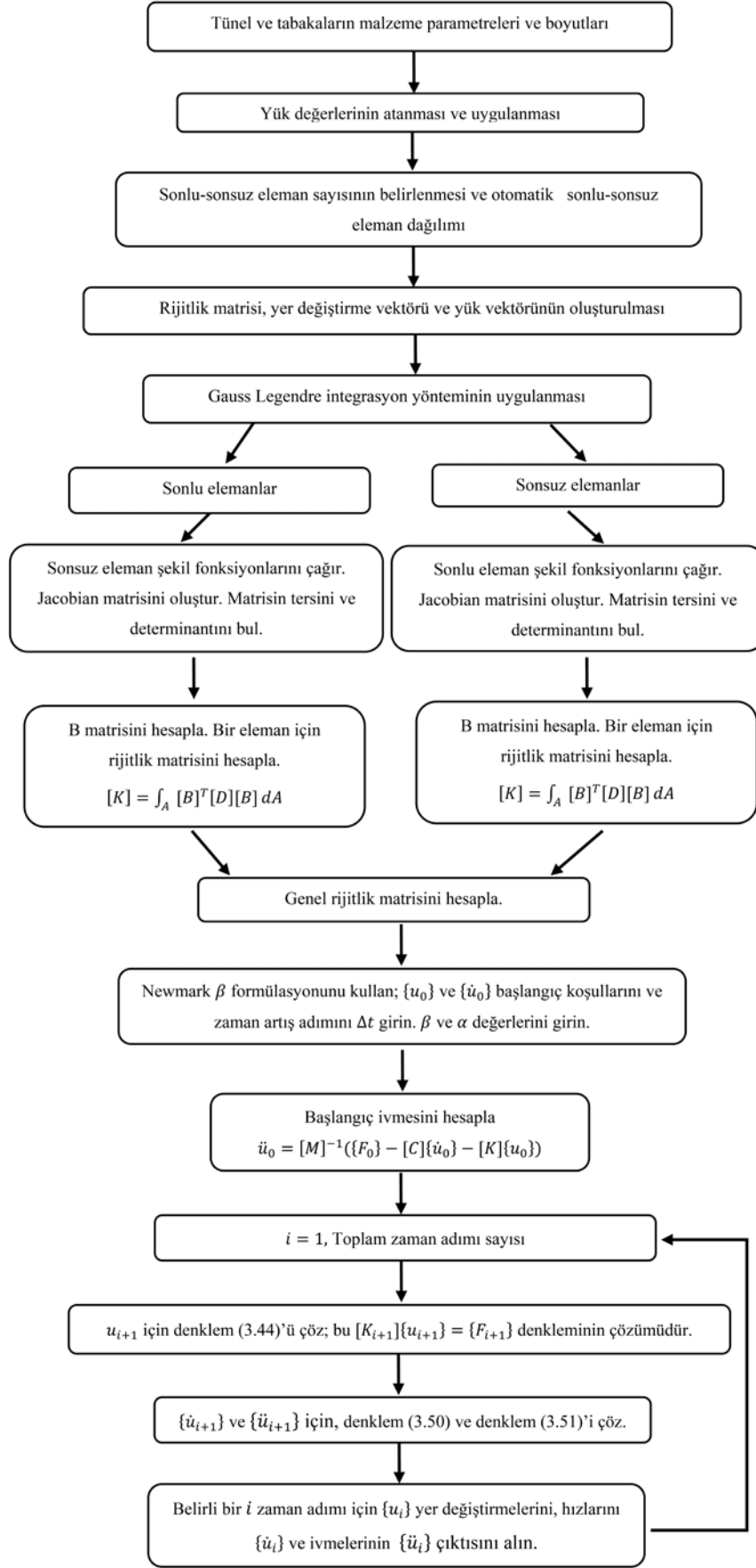
$$F_{i+1} = F_i + a_1u_i + a_2\dot{u}_i + a_3\ddot{u}_i \quad (3.55)$$

$$u_{i+1} = \frac{F_{i+1}}{\hat{K}} \quad (3.56)$$

$$\dot{u}_{i+1} = \frac{\alpha}{\beta\Delta t}(u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right)\dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right)\ddot{u}_i \quad (3.57)$$

$$\ddot{u}_i = \frac{1}{\beta\Delta t^2}(u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{u}_i - \left(\frac{0.5}{\beta} - 1\right)\ddot{u}_{i-1} \quad (3.58)$$

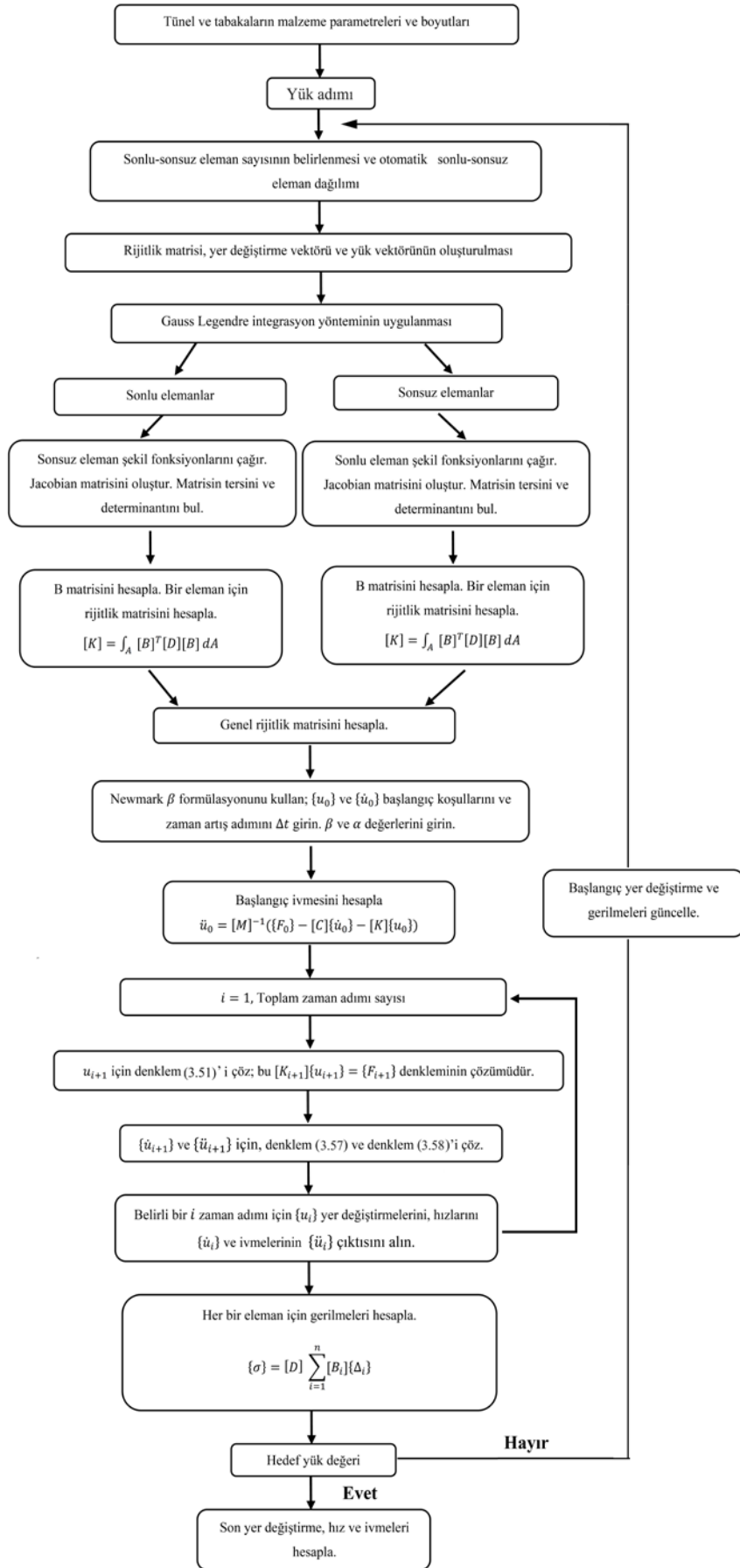
Doğrusal dinamik analize ait algoritma şeması Şekil 3.13’te sunulmuştur.



Şekil 3.13 : Doğrusal dinamik problem çözümünün algoritma şeması.

Doğrusal olmayan dinamik analizin çözümünde ilk aşamada sisteme etki eden dinamik yükler belli bir sonlu sayıya bölünerek zamana bağlı yük fonksiyonuna bağlı bir şekilde artımsal olarak uygulanır. Her bir yük adımına karşı gelen zaman aralığı yük fonksiyonundan tespit edilir ve eşitlik 3.52-3.58'de formülasyonları verilen Newmark β yöntemine göre çözülür. Her bir yük adımında Newmark β yöntemi prosedürünün uygulanması sonucunda elde edilen o yük adımına ait nihai yer değiştirme, hız ve ivmeler bir sonraki yük adımının başlangıç değeri olarak atanır. Ayrıca her bir yük adımı sonrasında elde edilen her bir sonlu elemana ait yer değiştirmeler eşitlik 3.16'da yerine yazılarak gerilme değerleri elde edilir. Elde edilen gerilme değerleri kullanılarak o sonlu elemana ait maksimum asal normal gerilme hesaplanarak, bilineer gerilme şekil değiştirme eğrisinde kontrol edilir. Her bir yük adımında yapılan bu kontrol sonucunda, bir sonraki yük adımında kullanılacak elastisite modülü tayin edilir. İşlemler nihai yük adımına ulaşıncaya kadar devam eder.

Doğrusal olmayan dinamik analize ait algoritma şeması Şekil 3.14'te sunulmuştur.



Şekil 3.14 : Doğrusal olmayan dinamik problem çözümünün algoritma şeması.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Sayısal çalışmalarda, ikiz tünelleri içeren tabakalı yarı sonsuz viskoelastik poroziteli ortamın, statik ve dinamik yükler altında lineer ve bilineer ortam modelleri kullanılarak statik yer değiştirme, gerilme ve dinamik cevapları elde edilmiştir. Bu kapsamda, farklı parametrelere sahip tabakalı ortam, poroziteye sahip olması veya olmaması durumları, farklı büyüklüklerde kare boşluklara sahip ortam olması durumu, farklı yük tipleri altında, farklı boyutlara sahip yarı sonsuz ortamlar ve ikiz tünelleri içeren yarı sonsuz tabakalı ortamlarda statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Statik analizlerde, düşey yer değiştirmeler ve yarı sonsuz ortamda oluşan gerilmeler araştırılmıştır. Dinamik analizlerde, harmonik yük etkisi ve darbe yükü altındaki yarı sonsuz ortamlardaki belli bir zaman tanım alanında yer değiştirme ve ivme sonuçları irdelenmiştir. Statik ve dinamik analizlerde, lineer ve bilineer malzeme modelleri kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Modellemelerde ve sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yarı sonsuz ortamda, yük etkisine yakın bölgede sonlu elemanlar, uzak bölgede ise sonsuz elemanlar kullanılmıştır. Sonlu-sonsuz eleman modelleri için yakınsama çalışması yapılmış ve modele bağlı olarak optimum sonlu ve sonsuz eleman atanmıştır. Sonlu eleman bölgesinde 16 düğüm noktalı kuadratik sonlu eleman, sonsuza uzanan bölgede ise doğrultularına bağlı olarak üretilmiş 8 düğüm noktalı sonsuz eleman kullanılmıştır. Sonlu-sonsuz eleman modelinin köşe noktalarında sonlu elemanlarla uyumlu 4 düğüm noktalı sonsuz eleman kullanılmıştır. Sonlu-sonsuz elemanların sayısal integrasyonunda 5 düğüm noktalı Gauss Legendre integrasyon yöntemi kullanılmıştır. Dinamik analizlerde harmonik ve darbe yük etkisi sonucunda ortam tepkilerini incelemek için, belli bir zaman tanım alanında Newmark Beta yönteminden yararlanılmıştır. Ortam parametreleri her bir problem için kendine özgü olarak, problem içerisinde verilmiştir. Yapılan modellemeler ve sayısal analizlerde MATLAB programı kullanılmıştır. Elde edilen denklemlerin algoritmaları MATLAB programında kodlanmış ve elde edilen sonuçların grafikleri çizdirilmiştir.

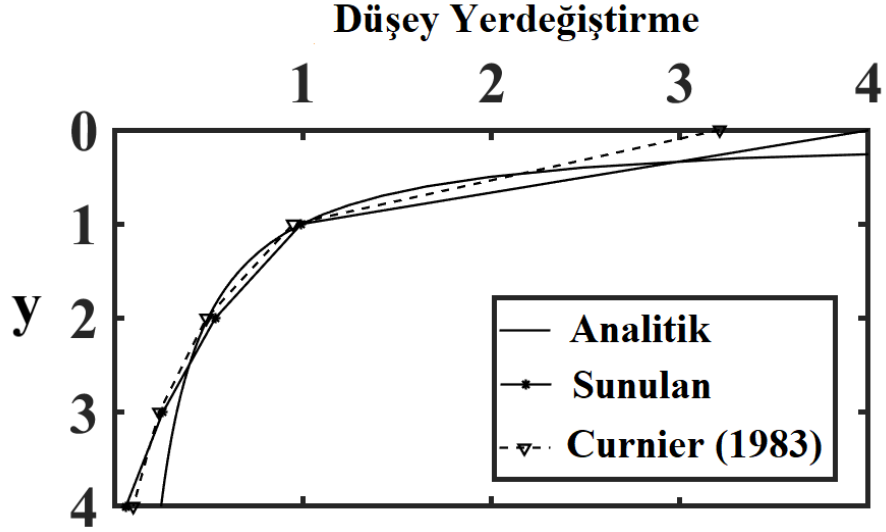
Sonlu-sonsuz elemanlar kullanılarak yarı sonsuz ortam MATLAB programında, belli bir ölçüde otomatize edilmiştir. Otomatize edilen programda;

- Düzlem ortam, sonlu ve sonsuz eleman sayısı girilerek istenilen sayıda sonlu sonsuz elemana bölünebilmektedir.
- Ortam içerisine istenilen sayıda ve büyüklükte boşluk atanabilmektedir.
- Ortam, istenilen sayıda tabakalara bölünebilmektedir.
- Ortam içerisine istenilen sayıda tünel yapıları atanabilmektedir.

Yapı-ortam etkileşim problemlerinde MATLAB programında elde edilen sayısal sonuçları doğrulamak amacıyla, statik sonuçlar üretilen teorik ve literatürdeki sonuçlarla, dinamik sonuçlar ise PLAXIS paket programında elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Statik sonuçların kontrolünde Boussinesq teorisinden yararlanılmıştır. Boussinesq teorik bir formülasyon üretilip, noktasal tekil yükleme altındaki homojen, izotrop ve elastik yarı sonsuz bir ortamda oluşan yer değiştirmeler analitik olarak elde edilmiştir. Sonlu-sonsuz elemanlar kullanılarak oluşturulan modelden elde edilen sonuçlar, Boussinesq teorisi ve literatürdeki statik sonuçlarla (Goodier ve Timoshenko, 1970; Curnier, 1983) Şekil 4.1’de doğrulanmıştır. Boussinesq analitik formülasyonu denklem 4.1 ile ifade edilmiştir. Elastik bir yarım uzaya etki eden noktasal yükün ($P=2$) iki boyutlu problemi analiz edildi. Ortam parametreleri $E = 1$, $\nu = 1$ alınmış, iki boyutlu 16 düğüm noktalı sonlu eleman ve 8 düğüm noktalı sonsuz eleman kullanılarak yarı sonsuz ortam modellenmiştir.

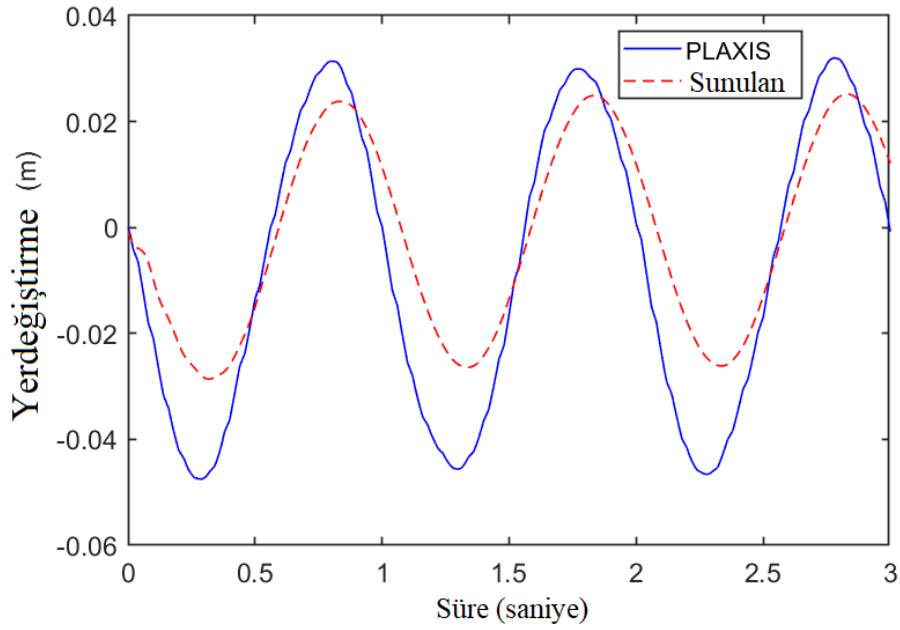
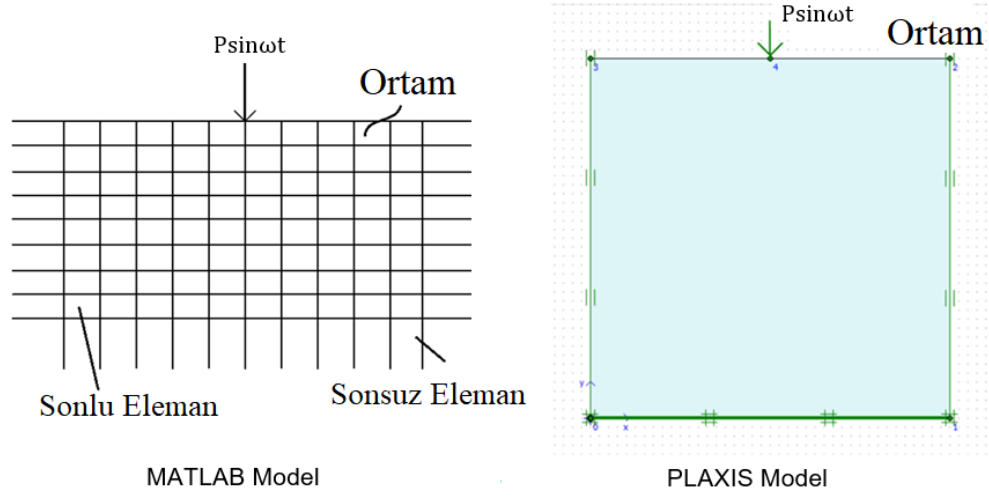
Sayısal çözümlerde $n_x = n_y = 28$ sonlu eleman ve 86 sonsuz eleman kullanılmıştır. Şekil 4.1’de sunulan çalışmadaki sonuçlar literatürle (Curnier 1983) ve Boussinesq’in teorik sonuçlarıyla (Goodier ve Timoshenko, 1970) örtüşmektedir.

$$w_{r=0} = \frac{(1 + \nu)(3 - 2\nu) P}{2\pi E} \frac{1}{y} \quad (4.1)$$



Şekil 4.1 : Üç boyutlu elastik yarı uzaya etki eden noktasal yük Boussinesq (Goodier ve Timoshenko 1970) ve literatür (Curnier 1983)

Dinamik analizlerde yapılan doğrulama çalışmasında yarı sonsuz ortam MATLAB programı kullanılarak modellenmiş, elde edilen sayısal sonuçlar PLAXIS paket programında modellenen ortam sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Modelleme, PLAXIS sonuçları ve Şekil 4.2'deki sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. Elastik bir yarı uzayın üst yüzeyinden bir noktasal harmonik yük ($P = 10^8 N$) etkililip analiz edilmiştir. Yükün periyodu 1 sn olarak alınmış ve 0-3 sn aralığında uygulanmıştır. Zaman artış aralığı $\Delta t = 0.001$ olarak belirlenmiştir. Malzeme özellikleri $E = 80 \times 10^6$, $\nu = 0.3$ 'tür. Ortam birim hacim ağırlığı $24 KN/m^3$, ortamdaki sönüm ise $c = 0$ olarak alınmıştır. Ortam boyutları MATLAB'da $20 m \times 20 m$, PLAXIS'te ise $40 m \times 40 m$ olarak alınmıştır. MATLAB'deki sayısal sonuçlarda kullanılan iki boyutlu elemanlar 16 düğümlü sonlu elemanlar ve 8 düğümlü sonsuz elemanlardır. Sayısal çözümlerde $n_x = n_y = 16$ sonlu eleman ve 50 sonsuz eleman kullanılmıştır. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi bu çalışmanın sunulan sonuçları ile PLAXIS sonuçları iyi bir uyum içindedir.



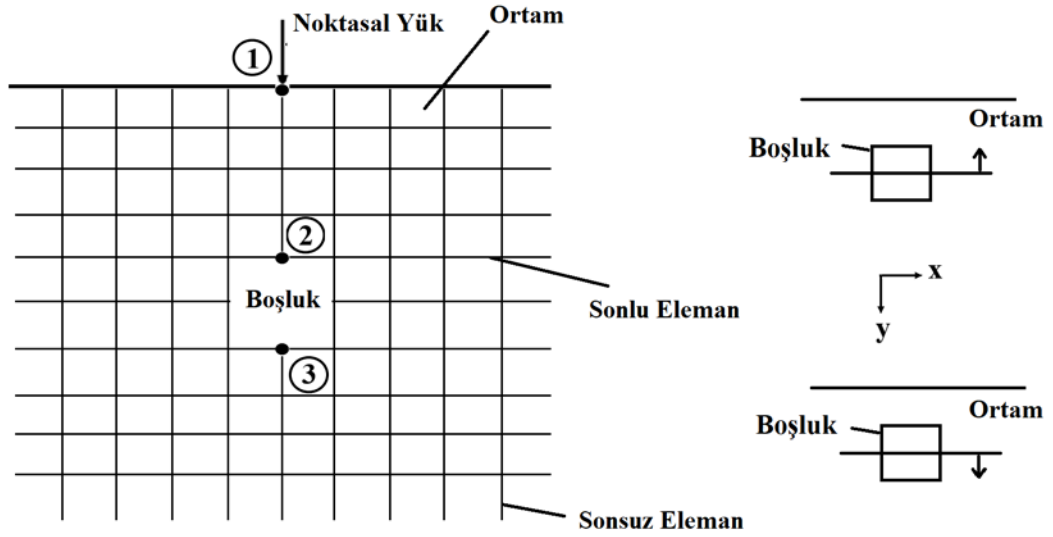
Şekil 4.2 : İki boyutlu elastik yarı uzaya etki eden noktasal harmonik yük (MATLAB-PLAXIS)

4.1 Doğrusal Analizler

Doğrusal statik ve dinamik analizlerde lineer-elastik malzeme modeli kullanılmış olup, yarı sonsuz ortam izotropik kabul edilmiştir. Sayısal sonuçlarda statik analizlerde düşey yer değiştirme ve gerilme davranışları bulunmuş, dinamik analizlerde ise belli bir zaman aralığında düşey yer değiştirme ve ivme sonuçları sunulmuştur.

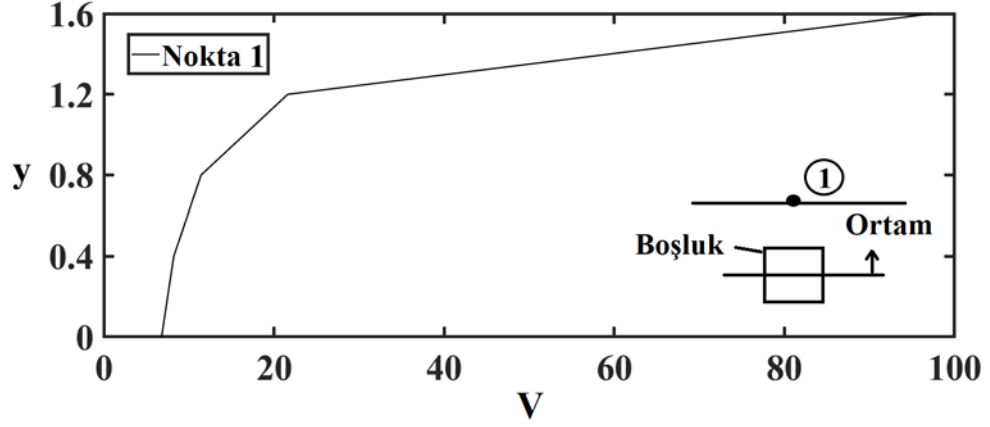
4.1.1 Doğrusal statik analiz sonuçları

Yapılan çalışmada elastik, izotropik ortam ortasında boşluk bulunan iki boyutlu yarı sonsuz ortamda statik analiz gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3). Sonlu eleman modelinde 16 düğüm noktalı sonlu eleman 8 düğüm noktalı sonsuz eleman kullanılmıştır. Sonlu-sonsuz eleman modeli Gauss Legendre integrasyon yöntemiyle çözülmüştür.

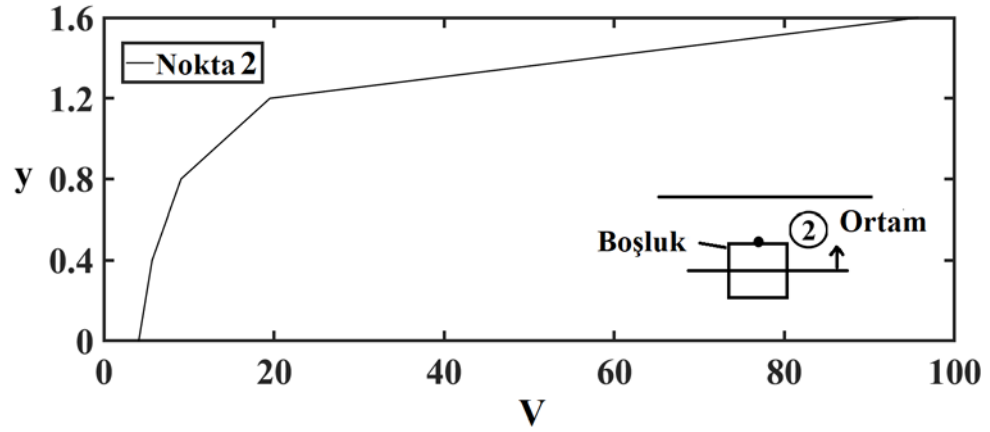


Şekil 4.3 : Noktasal yük altında içinde boşluk bulunan yarı sonsuz ortam

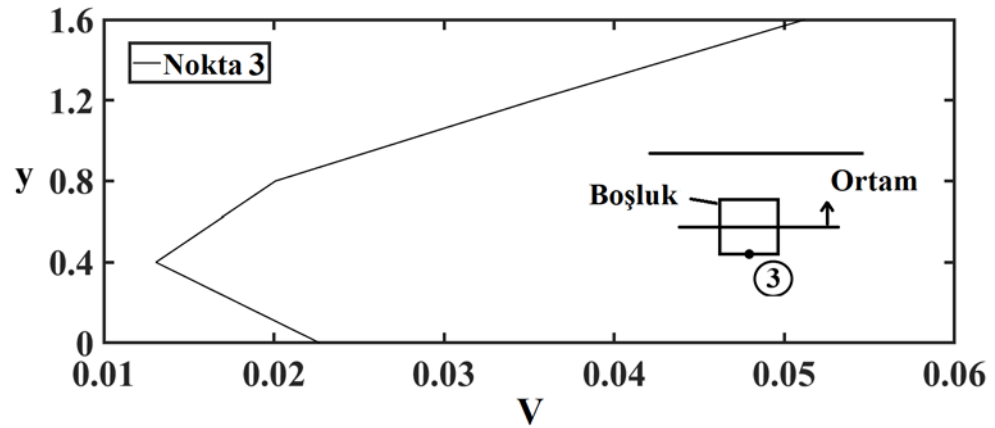
Şekil 4.4 - 4.9'da sunulan grafiklerde, bir boşluğun sonsuz ortamda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak statik yer değiştirmeleri sunulmuş ve tartışılmıştır. Problemden, boşluğun düşey yönde yer değiştirmesi sonucunda sırasıyla ortamın üst yüzeyinin, boşluğun üst yüzeyinin ve boşluğun alt yüzeyinin statik sonuçları sunulmuştur. Yarı sonsuz ortam boyutları sırasıyla $L_x = 8$, $L_y = 8$, $t = 1$ ve kare boşluk boyutu $l = 4$ birim olarak belirlenmiştir. Malzeme parametreleri $E = 1$, $\nu = 0.1$ ve noktasal yük $P = 1$ olarak alındı. Sayısal sonuçlarda $n_x = n_y = 36$ sonlu eleman ve 110 sonsuz eleman kullanılmıştır. Sayısal sonuçların ve şekillerin elde edilmesinde MATLAB programı kullanılmıştır.



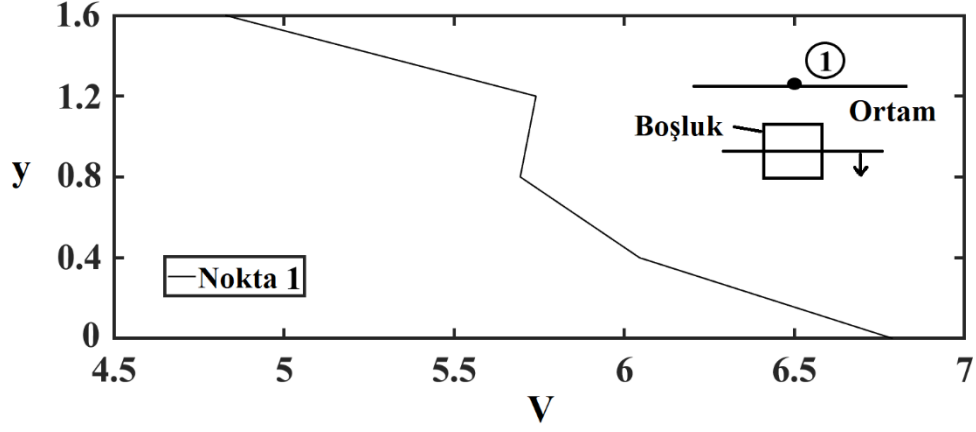
Şekil 4.4 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun yukarıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 1).



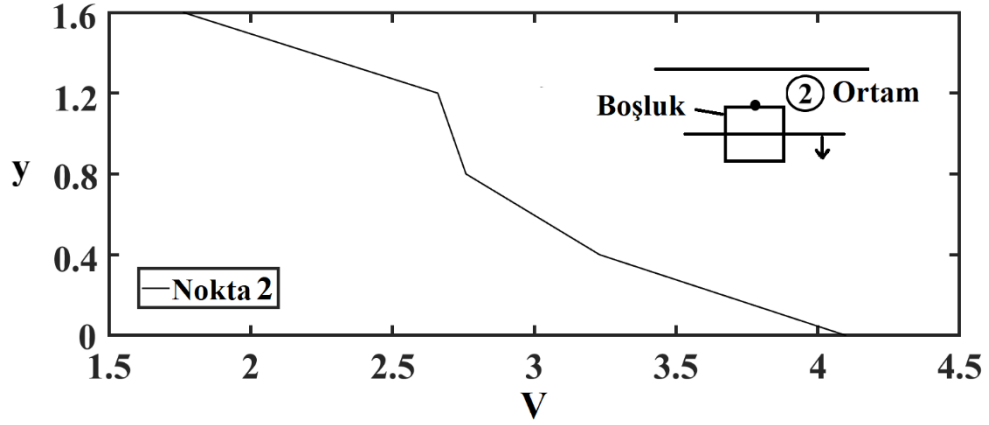
Şekil 4.5 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun yukarıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 2).



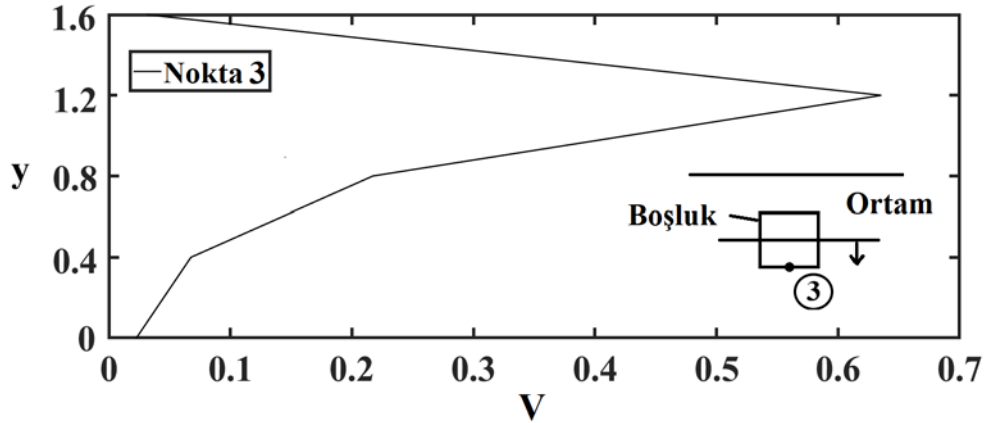
Şekil 4.6 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun yukarıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 3).



Şekil 4.7 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun aşağıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 1).



Şekil 4.8 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun aşağıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 2).



Şekil 4.9 : Noktasal yük altındaki ortamda, boşluğun aşağıya doğru dikey hareketi ile yarı sonsuz ortamın yer değiştirmesi (Nokta 3).

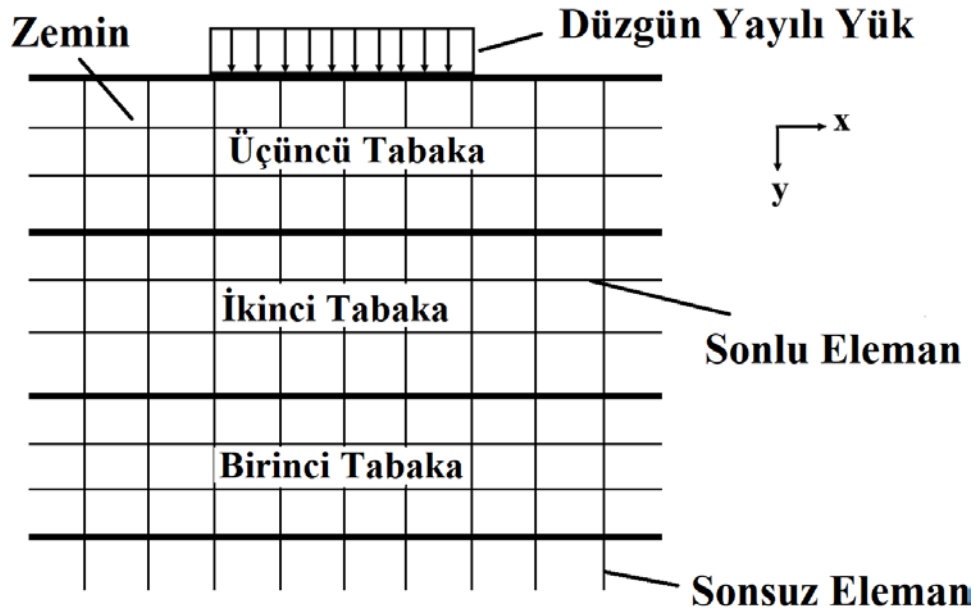
Şekil 4.4 ve 4.5 incelendiğinde, boşluk yarı sonsuz ortamın ortasından yukarı doğru hareket ettikçe 1 ve 2 noktalarındaki yer değiştirmeler artmaktadır. Boşluğun yüzeye daha yakın olduğu noktalarda daha büyük yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Şekil

4.6'da, ortamın alt yüzeyinde boşluk bulunan alanın alt noktasında olması nedeniyle yer değiştirme önce azalmış daha sonra artmaya devam etmiştir.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 incelendiğinde boşluk aşağı doğru hareket ettikçe yani, yükün etki alanından uzaklaştıkça yer değiştirmeler azalmaktadır. 1. noktadaki yer değiştirmeler, 2. noktadaki yer değiştirmelerden daha büyüktür. Şekil 4.9'da 3. noktada, boşluk aşağı yönde hareket ettikçe yer değiştirmeler artmış, belirli bir noktadan sonra azalmıştır.

Sonuç olarak, boşluğun yukarı doğru hareketi rijitliği azalttığı için yer değiştirmeler artmıştır. Boşluğun aşağı doğru hareketi rijitliği arttırdığından bu durum yer değiştirmelerde azalmaya neden olmuştur.

İki boyutlu elastik, izotropik yarı sonsuz tabakalı ortamda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerilme analizi incelenmiştir(Şekil 4.10). Yarı sonsuz bir ortamda, farklı mekanik özelliklere sahip tabakalı ortam için parametrik bir çalışma yapılmıştır. MATLAB ile elde edilen sayısal sonuçlar şekil 4.11 - 4.13'te sunulmuştur.



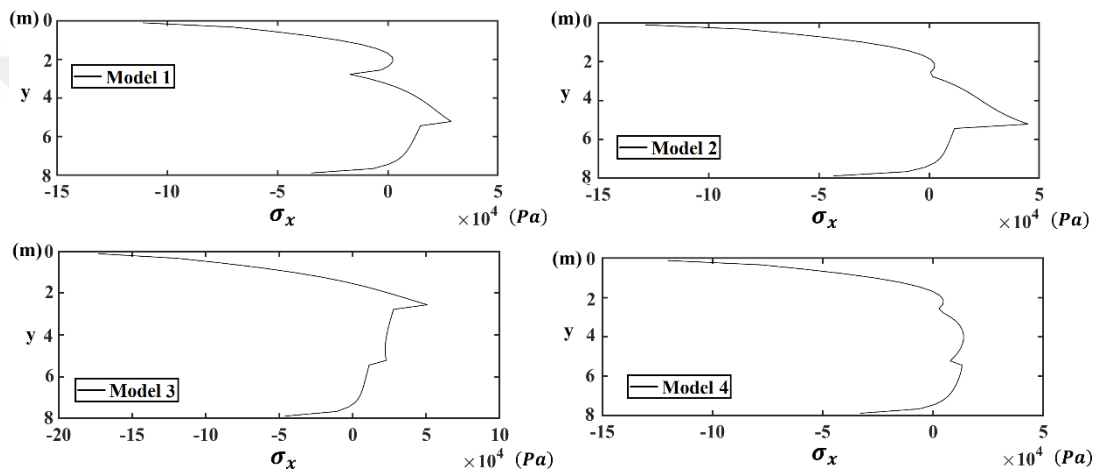
Şekil 4.10 : Üniform yük altında tabakalı yarı sonsuz ortam.

Sayısal sonuçlarda, sonlu ve sonsuz elemanlar kullanılarak farklı malzeme özelliklerine sahip farklı tabaka dizilimleri için üç tabakalı yarı sonsuz ortamın normal gerilmeleri incelenmiştir. Ortam boyutları $L_x = L_y = 8 m$ olarak alınmıştır. Düzenli yayılı yükte $q = 300 N/m$ ve 4 m olarak sabit bir değer seçilmiştir. Bu çalışmada farklı ortam tabaka dizilimleri kullanılmış ve dizilimleri model-1, model-2, model-3, model-4 olarak sıralanmıştır. Yarı sonsuz ortamın mekanik özellikleri Çizelge 4.1'de

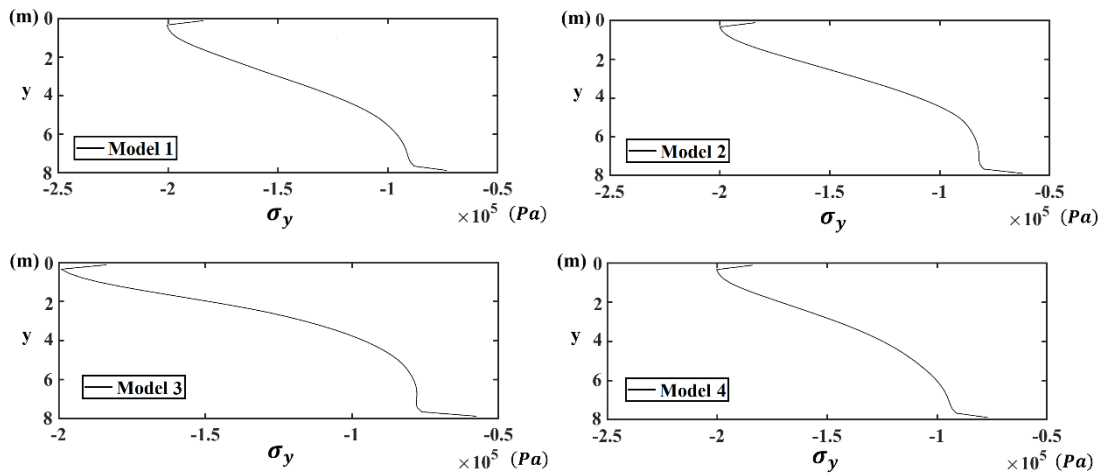
gösterilmiştir. Sayısal sonuçlarda $n_x = n_y = 20$ sonlu eleman ve 62 sonsuz eleman kullanılmıştır.

Çizelge 4.1 : Yarı sonsuz ortamın mekanik özellikleri

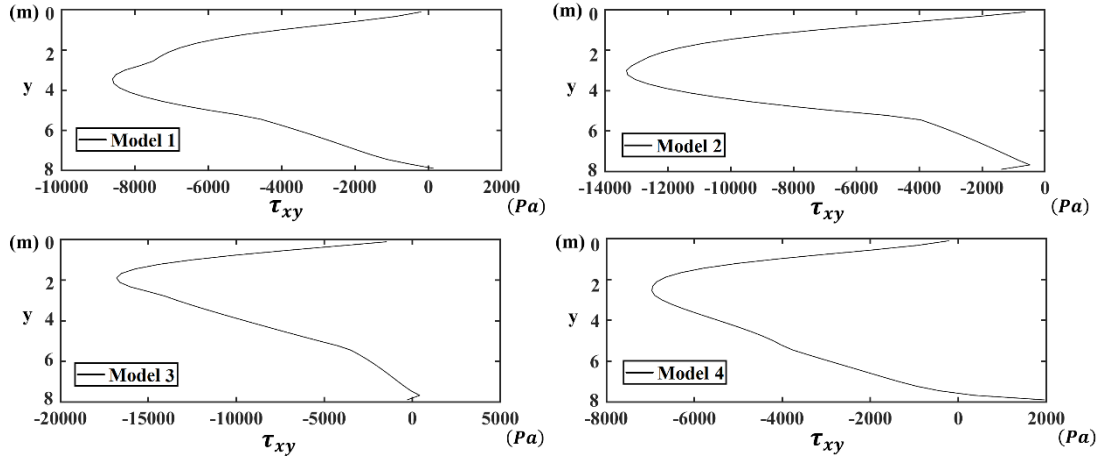
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Birinci Tabaka	$E_1 (Pa)$	$200 * 10^8$	$100 * 10^8$	$400 * 10^8$	$100 * 10^8$
	ν_1	0	0	0	0
İkinci Tabaka	$E_2 (Pa)$	$400 * 10^8$	$400 * 10^8$	$200 * 10^8$	$200 * 10^8$
	ν_2	0	0	0	0
Üçüncü Tabaka	$E_3 (Pa)$	$100 * 10^8$	$200 * 10^8$	$100 * 10^8$	$400 * 10^8$
	ν_3	0	0	0	0



Şekil 4.11 : Düzgün yayılı yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın gerilme analizi (σ_x).



Şekil 4.12 : Düzgün yayılı yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın gerilme analizi (σ_y).

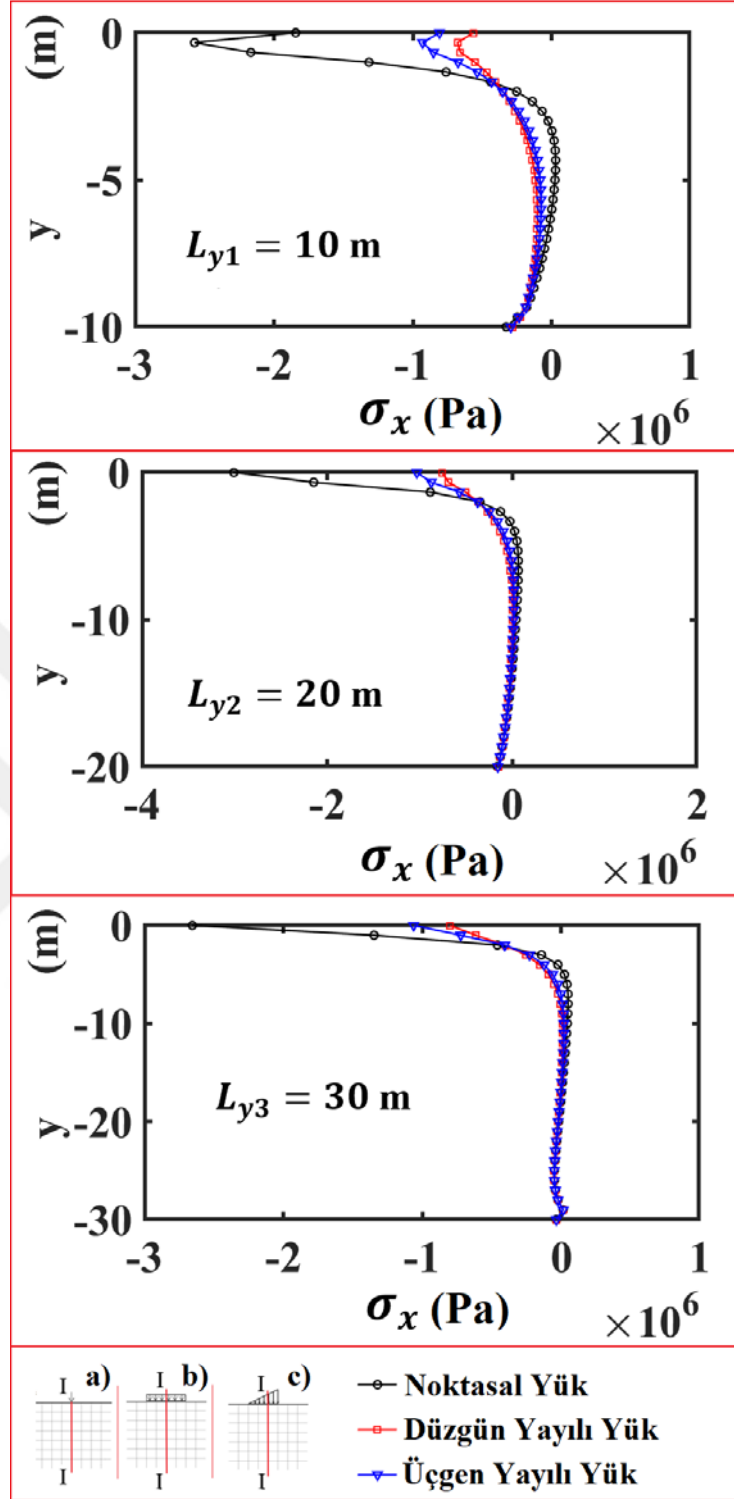


Şekil 4.13 : Düzgün yayılı yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın gerilme analizi (τ_{xy}).

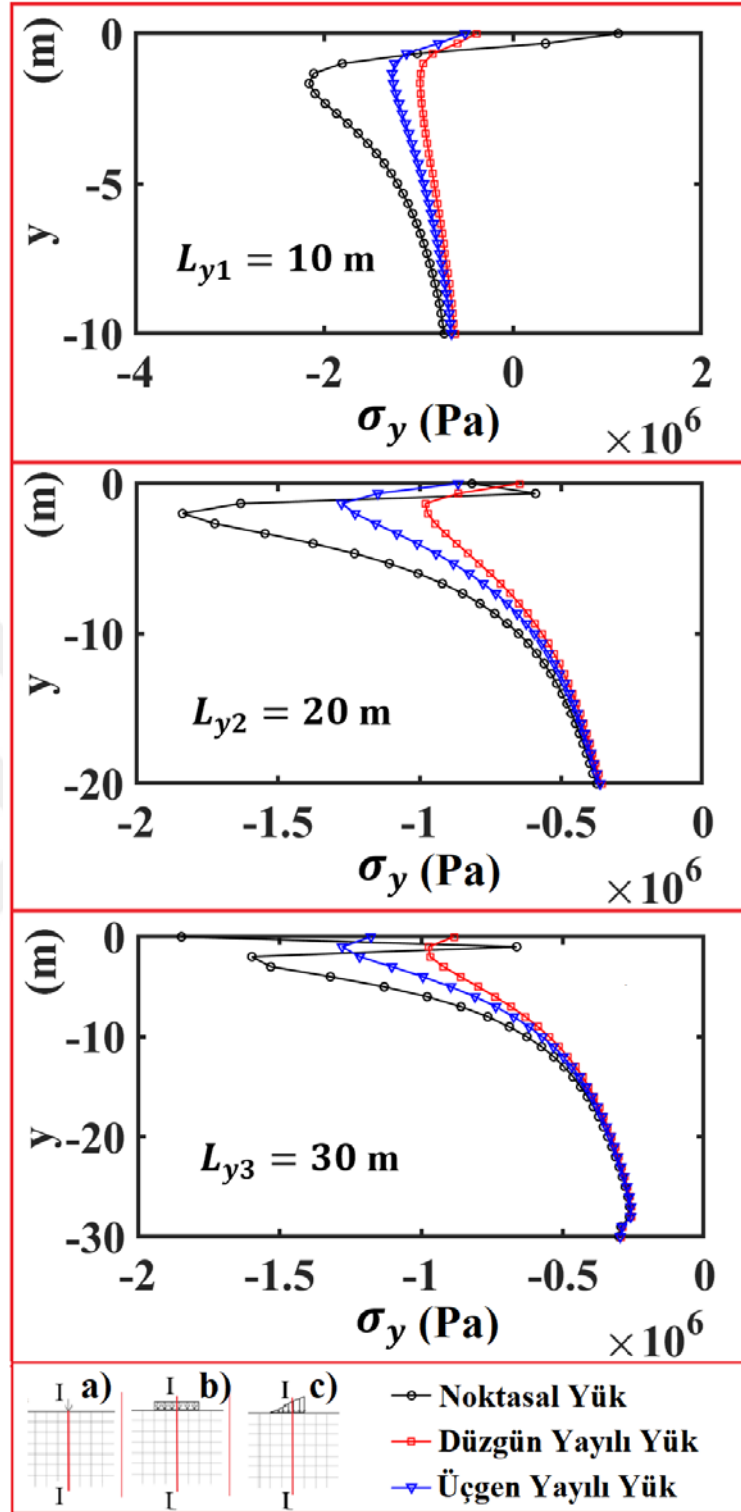
Şekil 4.11’de, düzgün yayılı yük altında tabakalı bir ortamda x-yönündeki normal gerilmeyi göstermektedir. Maksimum gerilmeler ortam yüzeyinde oluşmuştur. Farklı tabaka rijitlikleri farklı gerilmelere neden olmuştur. Şekil 4.12’de, düzgün yayılı yük altında tabakalı bir ortamda y-yönündeki normal gerilmeler gösterilmektedir. Tabaka rijitliği değişiklikleri, y yönündeki normal gerilmeleri fazla değiştirmedeği gözlenmiştir. Şekil 4.13’te, düzgün yayılı yük altındaki tabakalı bir ortamdaki kayma gerilmeleri gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde; maksimum kayma gerilmeleri ortamın orta yüzeyine doğrudur. Model 3’te ortamın üst yüzeyinin rijitliğinin azalması nedeniyle yüzeye yakın bölgede kayma gerilmesi maksimuma ulaşmıştır.

Sonuç olarak; ortam yüzeyinde yatay ve düşey yönlerde normal gerilmeler yüksek çıkmıştır. Yük etki alanından uzaklaştıkça ortamın alt noktalarına doğru olan gerilmeler azalmıştır. Farklı mekanik özelliklere sahip tabakalar arasında süreksizlikler oluşmuştur. Üst tabakalardaki düşük rijitliğe sahip olması, ortamda gerilmeleri arttırmıştır.

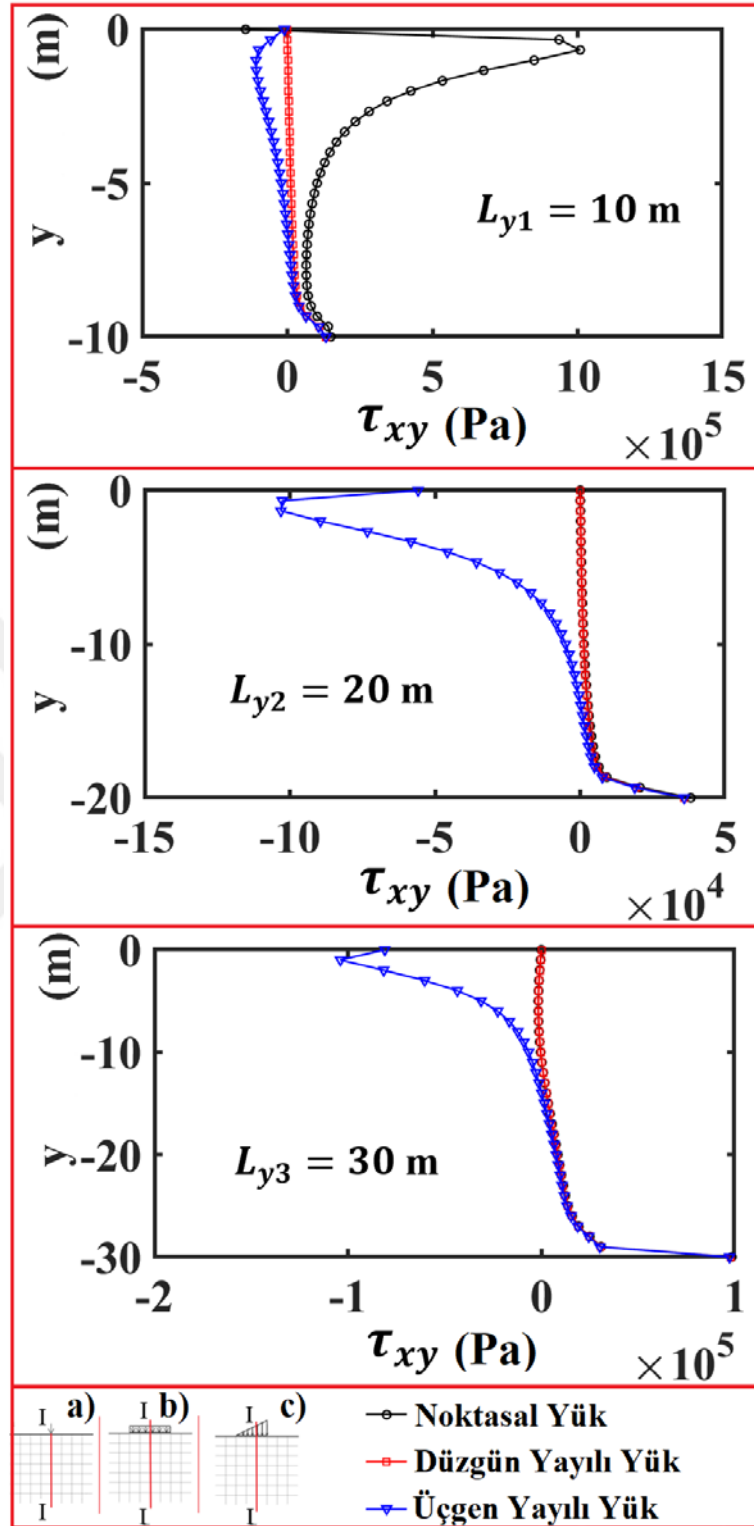
İki boyutlu yarı sonsuz bir ortamda eşit büyüklükteki farklı tipteki yüklerin oluşturduğu farklı gerilme dağılımları incelenmiştir. Farklı yük dağılımları, yarı sonsuz ortamın orta derinliği boyunca farklı gerilmelere neden olur. Ortama uygulanan sabit yükler, yarı sonsuz ortamda farklı yer değiştirmelere neden olacaktır. Bu çalışmada, tek tabakalı yarı sonsuz bir ortamda farklı yükler altında gerilme analizi yapılmıştır. Aynı zamanda farklı derinliklere sahip sonlu eleman bölgesinin statik etkilerde ne gibi farklılıklar oluşturduğu araştırılmıştır.



Şekil 4.15 : Farklı yükler altında yarı sonsuz ortamın I-I kesiti boyunca gerilme dağılımı (σ_x).



Şekil 4.16 : Farklı yükler altında yarı sonsuz ortamın I-I kesiti boyunca gerilme dağılımı (σ_y).



Şekil 4.17 : Farklı yükler altında yarı sonsuz ortamın I-I kesiti boyunca gerilme dağılımı (τ_{xy}).

Şekil 4.15'te farklı ortam derinliklerinde I-I kesiti boyunca σ_x gerilme dağılımı gösterilmektedir. Gerilmeler ortam yüzeyine yakın bölgede maksimumdur. Maksimum gerilme noktasal yükte, minimum gerilme ise düzgün yayılı yüktedir. Eşit büyüklükteki yüklerden özellikle yük etki noktasında, üçgen yayılı yükün ve noktasal

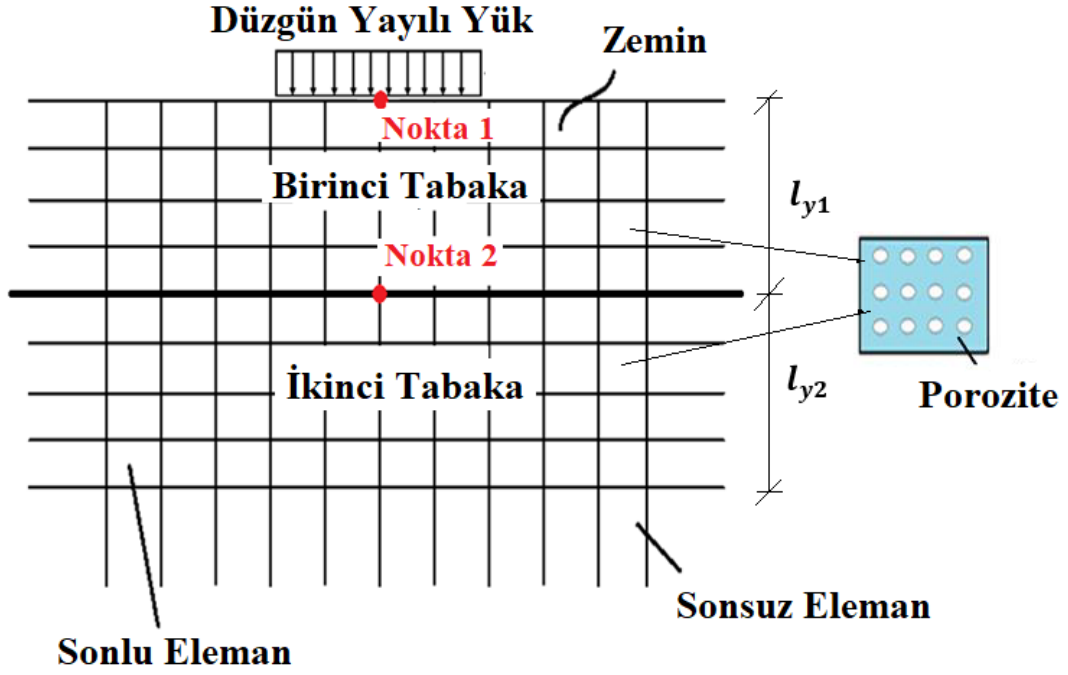
yükün yoğunluğunun daha yoğun olması nedeniyle daha büyük gerilmeler oluşturmuştur. Ortam derinliği arttıkça sönüm etkisi ile gerilmeler 0'a yaklaşmıştır.

Şekil 4.16'da, farklı ortam derinliklerinde I-I kesiti boyunca σ_y gerilme dağılımı gösterilmektedir. Maksimum gerilme noktasal yükte, minimum gerilme ise düzgün yayılı yükte meydana gelmiştir. Ortam derinliği arttıkça yüzeye yakın bölgelerde gerilmeler azalmıştır. Sönüm etkisi nedeniyle ortam derinliği boyunca gerilmeler minimum düzeye gelmektedir.

Şekil 4.17'de, farklı ortam derinliklerinde I-I kesiti boyunca τ_{xy} gerilme dağılımı gösterilmektedir. 10 metre derinlikte yüzeye yakın bölgedeki kayma gerilmesi değeri, noktasal yükte maksimum ve düzgün yayılı yükte minimum bulundu. Ortam derinliği arttıkça, üçgen yayılı yük durumunda maksimum kayma gerilmeleri meydana gelmiştir. Noktasal yük ve düzgün yayılı yük durumunda, gerilme dağılımları birbirine çok yakındır. Ortam derinliği arttıkça ortamın en alt noktasındaki gerilmeler kademeli olarak azalmıştır.

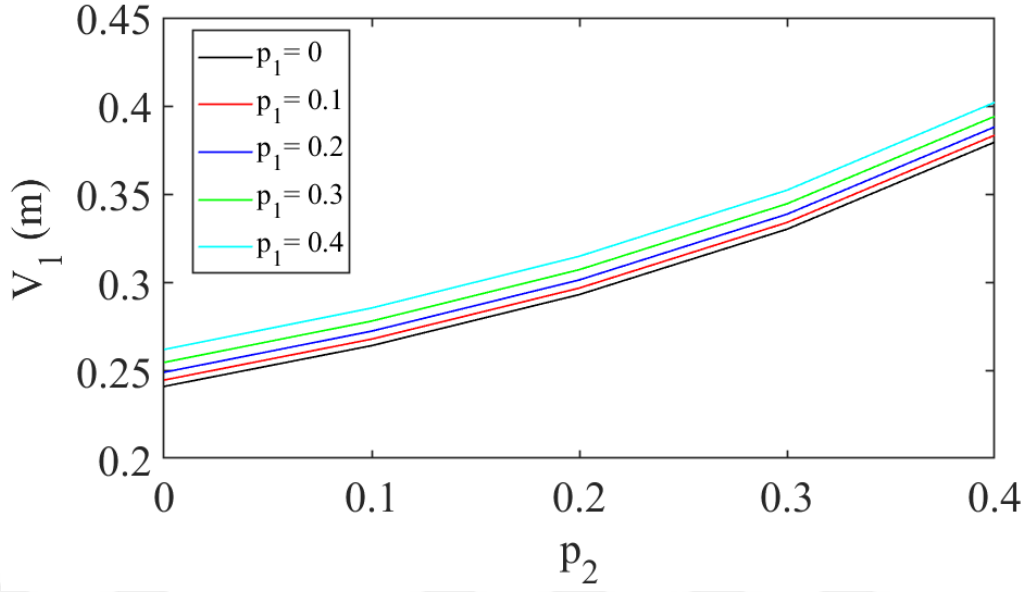
Sonuç olarak, ortamda eşit yoğunlukta farklı dağılmış yükler farklı gerilmelere neden olmaktadır. Genel olarak ortam yapısı heterojen bir dağılım gösterir. Bu da farklı yük dağılımlarından dolayı ortamda farklı deformasyonlara ve oturmalara neden olabilir. Bu nedenle, bina tasarımında ortam derinliğini ve farklı yük türlerinin etkisini dikkate almak önemlidir.

Düzgün yayılı yük altındaki iki tabakalı bir ortamda, tabakaların gözeneklilik oranlarına bağlı olarak düşey yer değiştirmeleri incelenmiştir (Şekil 4.18). Tabakalardan birinde gözeneklilik oranı sabit kalırken diğer tabakanın gözeneklilik oranı değişken olarak alındı. Ortam boyutları l_{y1} ve l_{y2} olarak gösterildi. Düzgün yayılı yük q olarak tanımlandı.

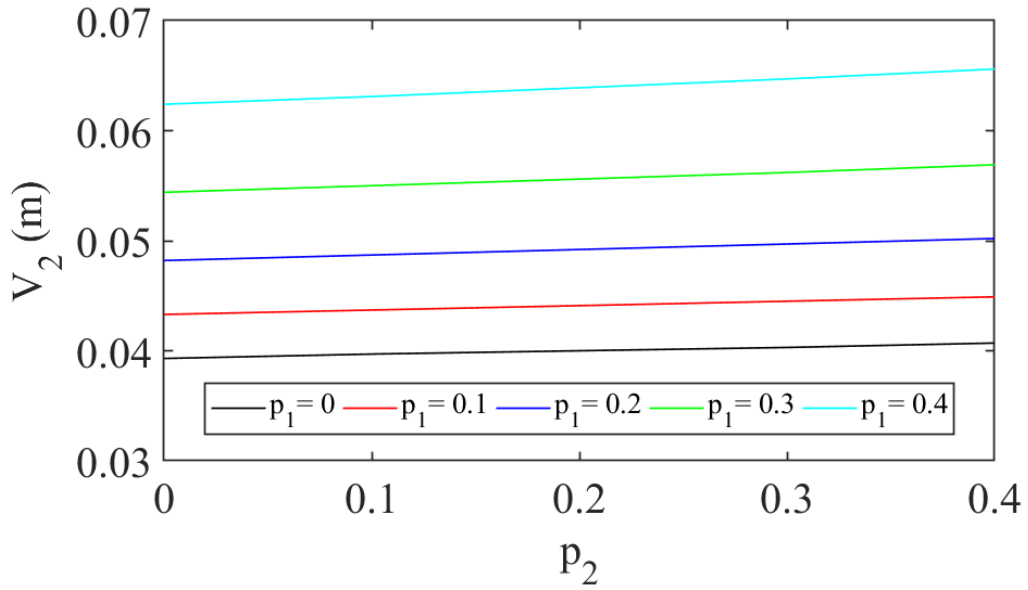


Şekil 4.18 : Düzgün yayılı yük altında poroziteli iki tabakalı yarı sonsuz bir ortam.

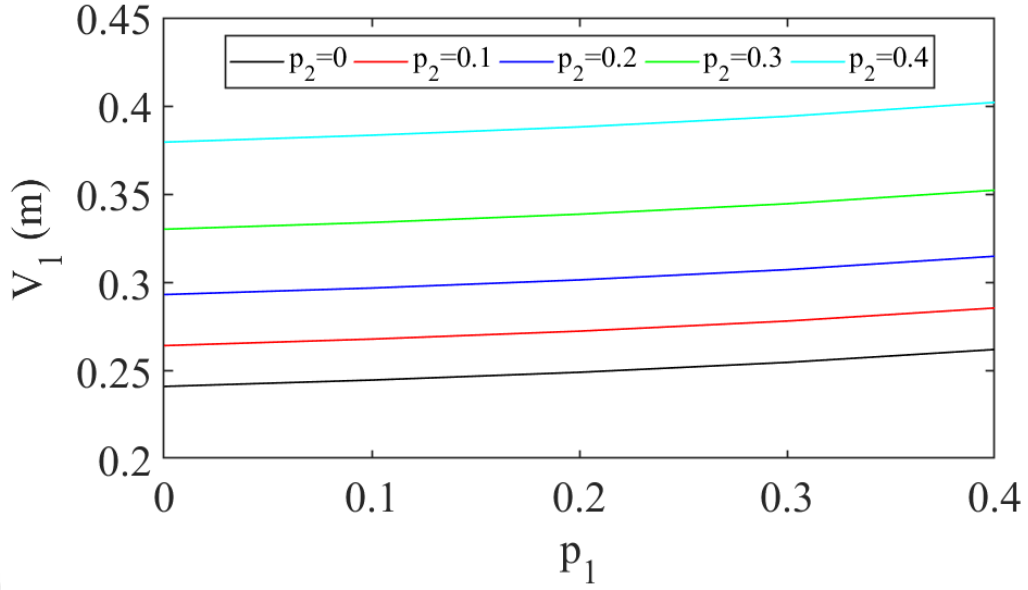
Sayısal sonuçlarda, farklı malzeme özelliklerine ve farklı gözeneklilik oranlarına sahip iki tabakalı yarı sonsuz bir ortamda sonlu ve sonsuz elemanlar kullanılarak yer değiştirmeler şekil 4.19-4.22 de incelenmiştir. Birinci tabaka için ortam parametreleri $E_1 = 2 \times 10^7 Pa$, $\nu_1 = 0.3$ ve ikinci tabaka için ortam parametreleri $E_2 = 4 \times 10^7 Pa$, $\nu_2 = 0.3$ olarak alınmıştır. Ortamın yatay yöndeki boyutları 20 m., düşey yönde ise 20 m. olarak alınmıştır. Düşey yönde tabaka boyutları $l_{y1} = l_{y2} = 10 m.$ 'dir. Düzgün yayılı yük için $q = 800 kN/m$ ve 4 m sabit değeri seçilmiştir. Bu çalışmada, farklı gözeneklilik oranlarına sahip iki tabakalı ortamda gözeneklilik oranlarının tabakalardaki farklı dağılımları sonucu yüzey ve tabaka geçiş noktalarında meydana gelen yer değiştirmeler karşılaştırılarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlarda $n_x = n_y = 20$ sonlu eleman ve 62 adet sonsuz eleman kullanılmıştır.



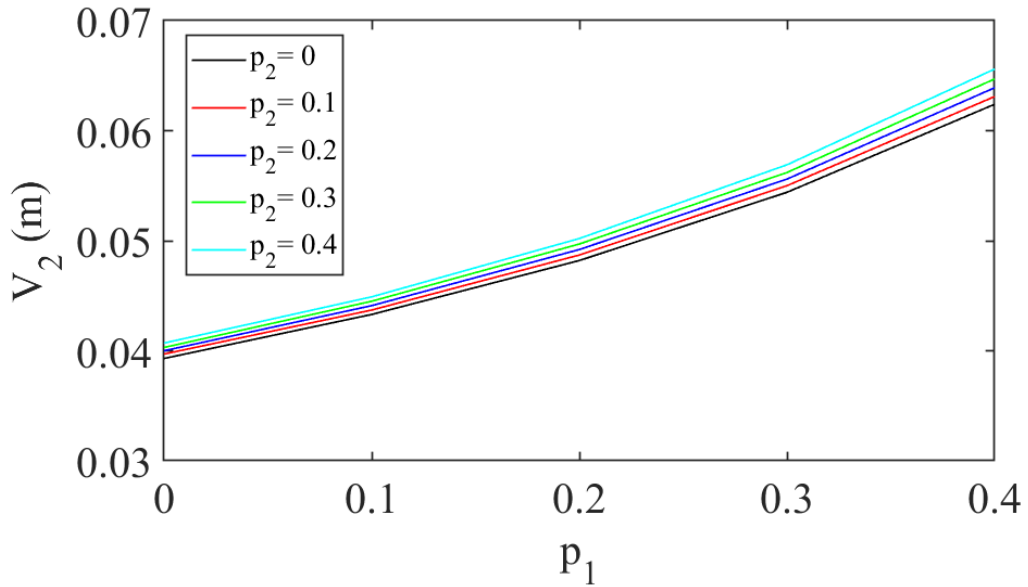
Şekil 4.19 : Yarı sonsuz iki tabakalı bir ortamda düzgün yayılı yük altında 1. tabakadaki gözeneklilik oranındaki artışa bağlı olarak 1 noktasındaki düşey yer değiştirmenin değişimi.



Şekil 4.20 : Yarı sonsuz iki tabakalı bir ortamda düzgün yayılı yük altında 1. tabakadaki gözeneklilik oranındaki artışa bağlı olarak 2 noktasındaki düşey yer değiştirmenin değişimi.



Şekil 4.21 : Yarı sonsuz iki tabakalı bir ortamda düzgün yayılı yük altında 1. noktadaki düşey yer değiştirmenin, 2. tabakadaki gözeneklilik oranındaki artışa bağlı olarak değişimi.



Şekil 4.22 : Yarı sonsuz iki tabakalı bir ortamda düzgün yayılı yük altında 2. noktasındaki düşey yer değiştirmenin, 2. tabakadaki gözeneklilik oranındaki artışa bağlı olarak değişimi.

İki boyutlu farklı malzeme parametreleri ve farklı küçük boşluk oranları için yarı sonsuz ortamın 1 noktasındaki yer değiştirme sonuçları gösterilmektedir (Şekil 4.19). Birinci tabakadaki gözeneklilik oranı belirli bir oranda sabit tutulurken, ikinci tabakadaki farklı gözeneklilik oranlarında meydana gelen yer değiştirmeler gösterilmektedir. İkinci tabakadaki gözeneklilik oranı arttıkça rijitlik azalmış ve yer

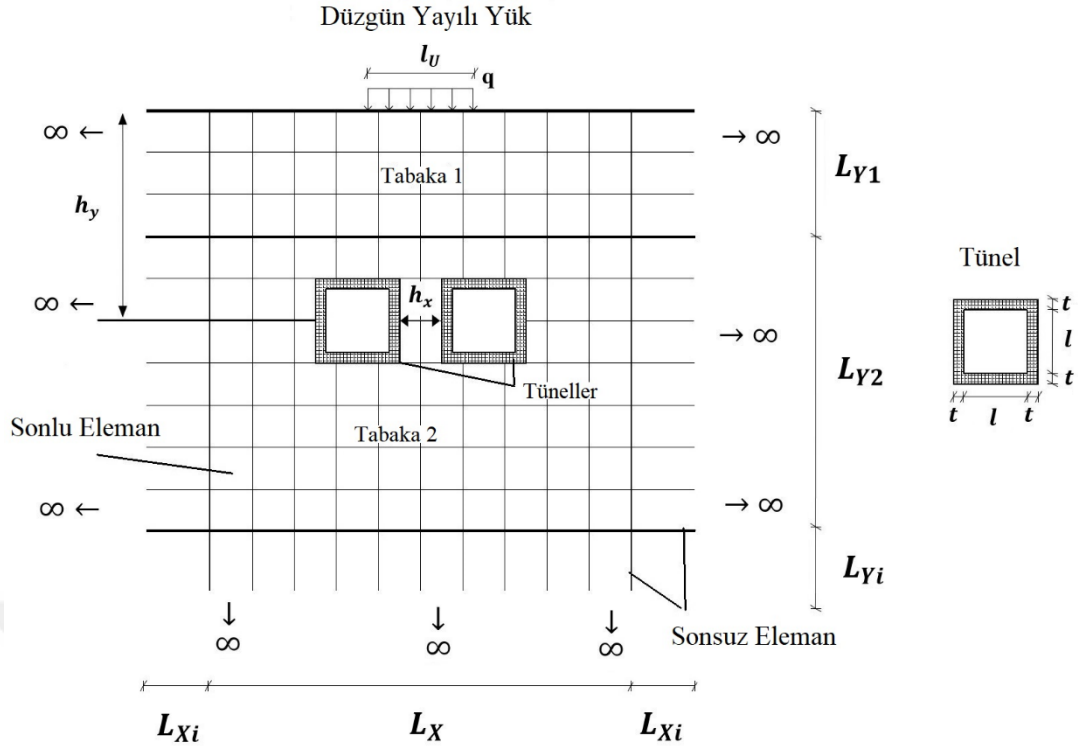
değiştirmeler artmıştır. Yüzey alanına yakın tabakada gözeneklilik oranının en yüksek olduğu durumlarda yer değiştirmelerde hafif bir artış olmuştur. Şekil 4.20'de birinci tabakadaki gözeneklilik oranı sabit olup, ikinci tabakadaki gözeneklilik değişiminin 2 noktasındaki yer değiştirmeleri incelenmiştir. İkinci tabaka birinci tabakaya göre daha rijit olduğundan ve yük etkisi azaldığından gözeneklilik oranındaki artışın yer değiştirmelerdeki artışa etkisi çok daha az olmuştur.

Şekil 4.21'de ikinci tabakadaki gözeneklilik sabit olup, 1. noktada birinci tabakadaki artan gözenekliliğin etkileri incelenmektedir. Şekil 4.19'daki durumla karşılaştırıldığında artan gözeneklilik oranı yer değiştirmelerdeki artışı önemli ölçüde etkilememiştir. Yüksek rijitlik bölgesinde rijitliğin azalması, farklı gözeneklilik oranlarına sahip ortamlar arasında yer değiştirme farklılıklarının oluşmasına neden olmuştur. Yüksek rijitliğe sahip tabakada porozite oranının artması, yüzeydeki yer değiştirmede giderek artan bir fark yaratmıştır. İkinci tabakadaki gözeneklilik sabit tutulurken, rijitliği yüksek olan bölgenin gözeneklilik oranının artması nedeniyle 2. noktadaki yer değiştirmeler artmıştır (Şekil 4.22). İkinci noktadaki yer değiştirmelerdeki artış birbirine çok yakındır.

Sonuç olarak, tabakalardaki gözeneklilik oranı arttıkça ve rijitlik azaldıkça yer değiştirmelerde artış gözlenmiştir. Yüke yakın, rijitliğin düşük olduğu bölgede porozite oranının artışıyla birlikte yer değiştirmeler önemli ölçüde artmıştır. Yük etkisinin azaldığı ikinci bölgedeki yer değiştirmelerdeki artış, yüzey bölgesindeki yer değiştirmeler kadar önemli değildir. Porozite oranının artması yüzeye yakın tabakadaki yer değiştirme değişiminde daha belirleyici olmuştur.

İkiz tünel içeren tabakalı yarı sonsuz bir ortamda statik analiz gerçekteştirilmiştir. (Şekil 4.23). İkiz tünel etkileşimi, tünellerin şekli, boşlukları, ortamdaki konumları ve farklı rijitliklere sahip tabakalı ortamlar, ortam ve yapı için çeşitli problemler yaratmaktadır. Bu durumu incelemek için yarı sonsuz ortam modellenmiştir.

Bu araştırmanın temel amacı, ikiz kare tünellere sahip iki tabakadan oluşan yarı sonsuz ortamların statik yükler altında sonlu ve sonsuz elemanlar kullanılarak gerilme dağılımını analiz etmektir. Tünellerin konumunun ortam derinliği boyunca gerilme dağılımları üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak elde edilmiş ve tartışılmıştır.

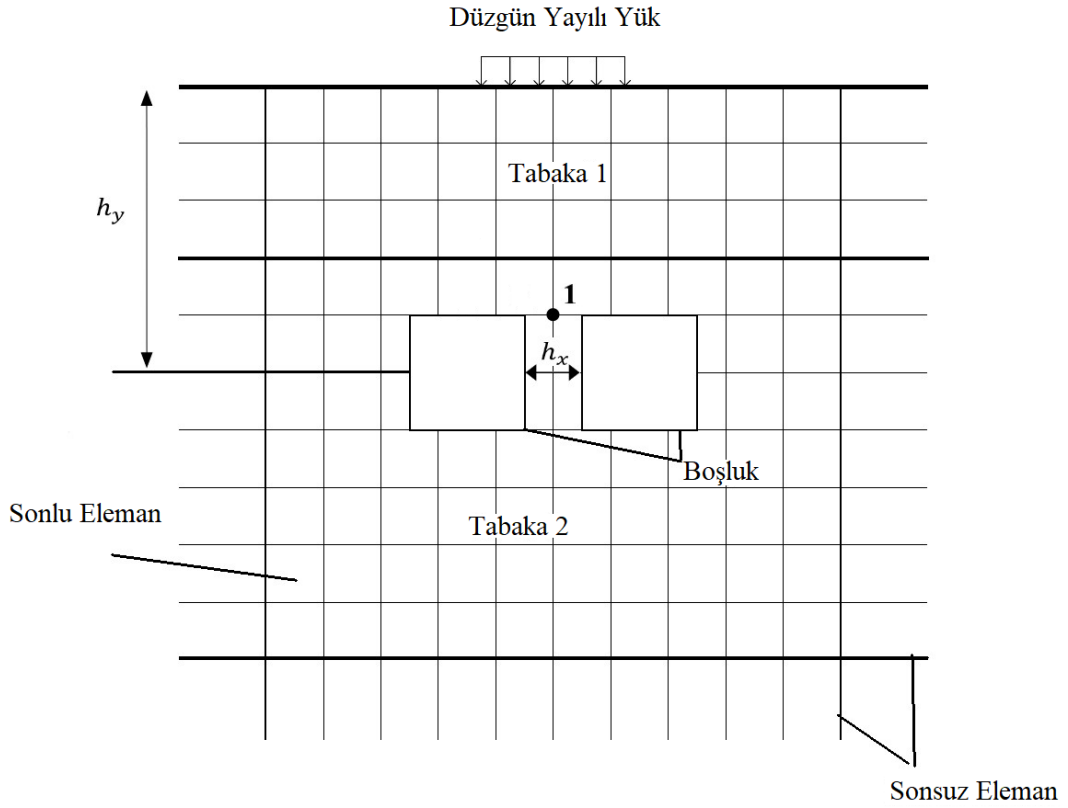


Şekil 4.23 : Düzgün yük altında ikiz tünel içeren tabakalı yarı sonsuz ortam

Şekil 4.23'te düzgün yayılı yük altında iki özdeş tünele sahip iki tabakalı yarı sonsuz bir ortam düşünüldü. Sonlu bölge ortam boyutları yatay yönde L_X olarak, dikey yönde tabaka 1 için L_{Y1} ve dikey yönde tabaka 2 için L_{Y2} olarak gösterilmiştir. Sonsuz bölge boyutları sırasıyla yatay ve dikey yönlerde L_{Xi} ve L_{Yi} olarak ifade edildi. Her bir kare tünelin uzunluğu l , tünel kalınlıkları ise t olarak belirtilmiştir. Tüneller arası mesafe h_x olarak ve tünellerin yer yüzeyinden uzaklığı h_y olarak gösterilmiştir. l_U uzunluğundaki düzgün yayılı yük q , ortamın üst orta yüzeyinden gelen yükleme olarak verilmiştir.

Statik problemin çözümünde ilk olarak yakınsama çalışması yapılmıştır. Yakınsama çalışması için çift boşluklu tabakalı ortamın düzgün yük altında statik tepkileri sonlu-sonsuz elemanlarla (Şekil 4.24) Çizelge 4.2'de elde edilmiştir. Kullanılan model farklı sayılarda sonlu ve sonsuz eleman kullanılarak incelenmiştir. Yarı sonsuz ortamın boyutları şu şekilde dikkate alınmıştır; yatay doğrultuda $L_X = 20$ m, düşey doğrultuda tabaka 1 $L_{Y1} = 5$ m, tabaka 2 $L_{Y2} = 15$ m, sonsuz elemanların yatay ve düşey doğrultuda $L_{Xi} = L_{Yi} = 10$ m, $h_y = 10$ metre ve boşluk boyutları $l = 10$ m. Ortam parametreleri tabaka 1 için; $E_1 = 1.26$ GPa, $\nu_1 = 0.4$ (Hatzigeorgioua ve Beskosbc 2010) ve tabaka 2 için; $E_2 = 22.4$ GPa, $\nu_2 = 0.33$ (Løkke ve Chopra 2017) düzgün yayılı yük 2000 kN/m ve 5 m olarak alınmıştır. Çizelge 4.2'de 32x32 sonlu eleman

sayısından sonra statik tepkilerin yakınsadığı görülmektedir. Bu nedenle problemin tamamında sonlu eleman sayısı 40x40 olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.24 : Düğüün yayılı yük altında iki boşluklu yarı sonsuz ortam.

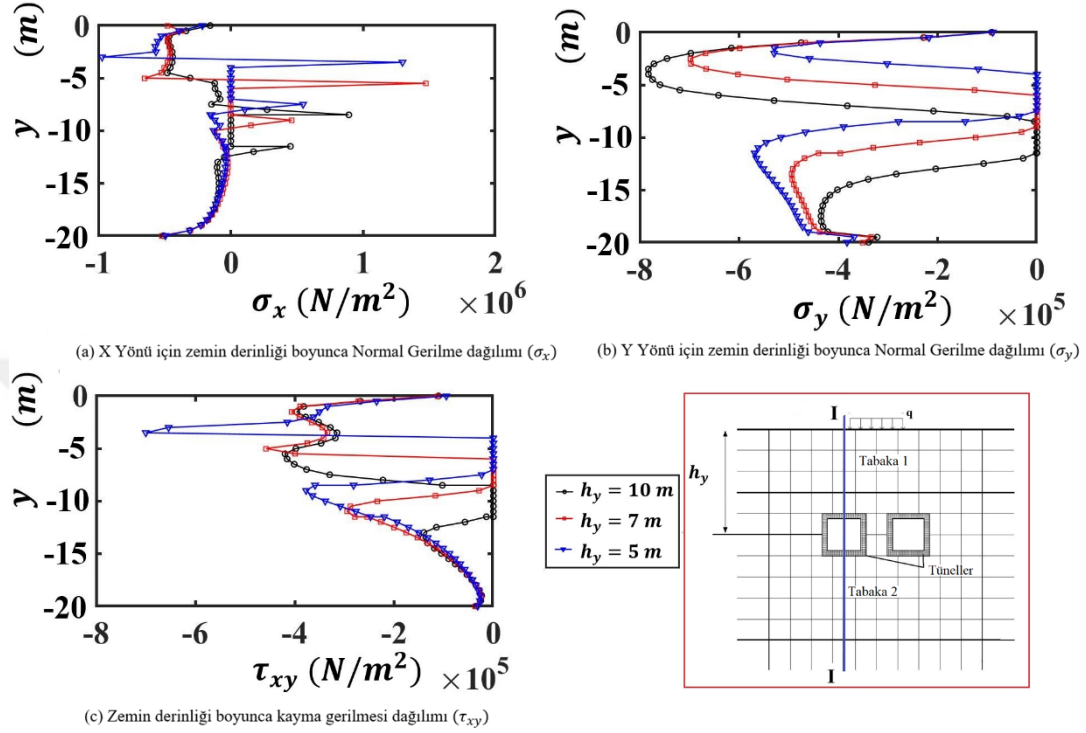
Çizelge 4.2 : İkiz boşluklu tabakalı yarı sonsuz ortam üzerinde yakınsama çalışması

Sonsuz elemanlı sonlu eleman	8×8	16×16	32×32	40×40
$v (10^{-4}) m$	-33.0000	-30.0000	-29.0000	-29.0000
Nokta 1 $\sigma_x (10^5) Pa$	-126.5600	-2.7406	-3.9354	-4.0726
$\sigma_y (10^6) Pa$	-22.3080	-5.0477	-5.0470	-5.0439
$\tau_{xy} (10^4) Pa$	601.6700	3.7678	4.3651	4.0282

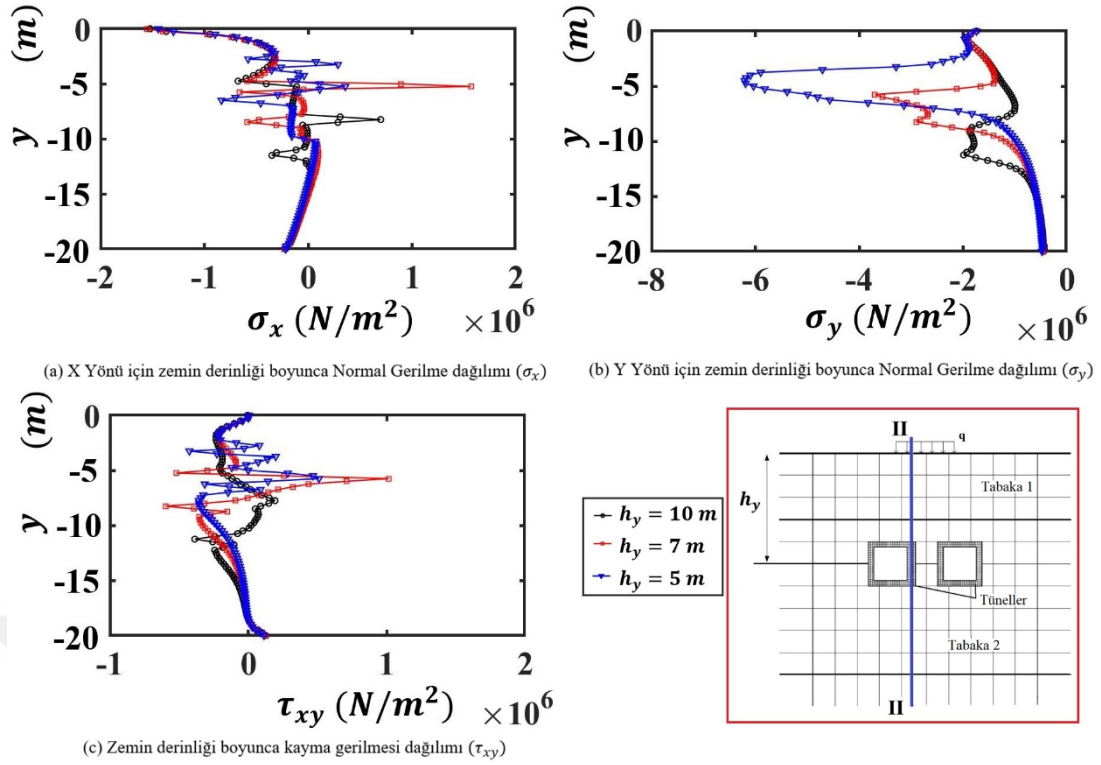
Sayısal çözümlerde, düğüün yük altında ikiz tünelli tabakalı ortam sonlu-sonsuz elemanlarla modellenmiştir (Şekil 4.23). Yarı sonsuz ortam boyunca gerilme dağılımları elde edilmiştir. Yarı sonsuz ortamın boyutları şu şekilde dikkate alınmıştır; $L_X = 20$ m, tabaka 1 $L_{Y1} = 5$ m, tabaka 2 $L_{Y2} = 15$ m, sonsuz elemanlar $L_{Xi} = L_{Yi} = 10$ m, $h_y = 10$ m. ve kare tünel iç genişliği $l = 3$ m tünel kalınlığı $t = 0.5$ m. Ortam parametreleri tabaka 1 için; $E_1 = 1.26$ GPa, $\nu_1 = 0.4$ (Hatzigeorgioua ve Beskosbc 2010) ve tabaka 2 için; $E_2 = 22.4$ GPa, $\nu_2 = 0.33$ (Løkke ve Chopra 2017) olarak

alınmıştır. Benzer tünellerin malzeme parametreleri $E_t = 34.5$ GPa ve $\nu_t = 0.20$ 'dir. Düzgün yayılı yük 2000 kN/m ve 5 m'dir.

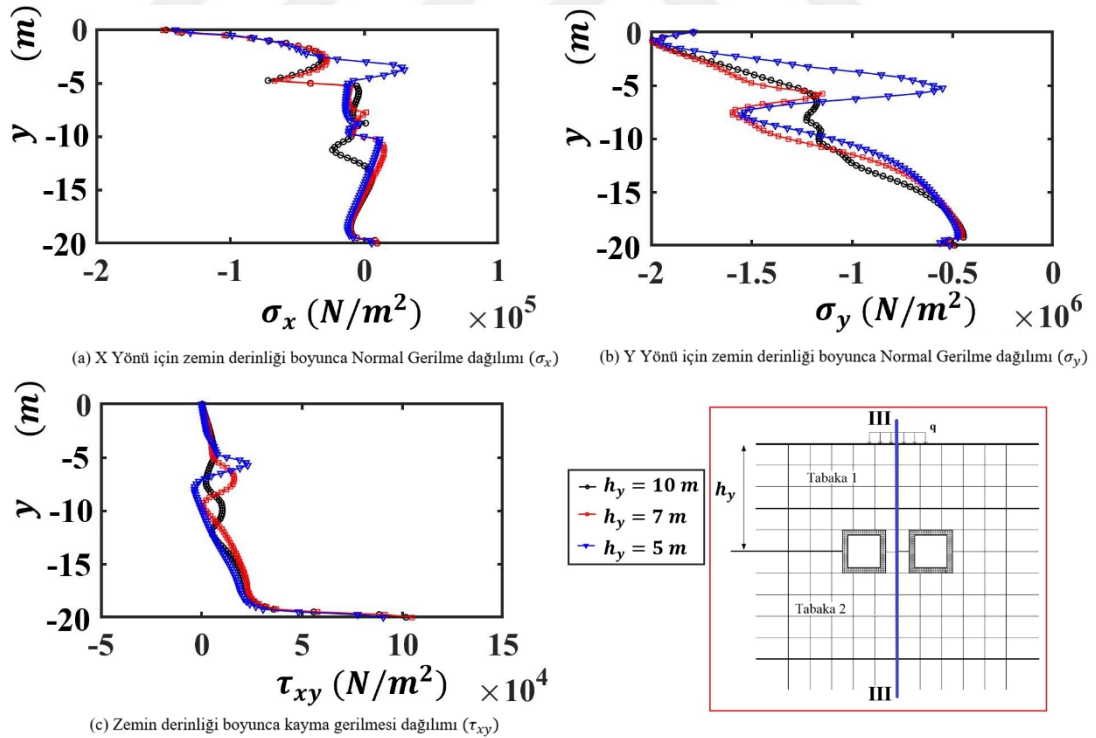
Sunulan sonuçlarda tünellerin konumunun ortam derinliği boyunca gerilme dağılımları üzerindeki etkileri elde edilmiş ve ayrıntılı olarak tartışılmıştır.



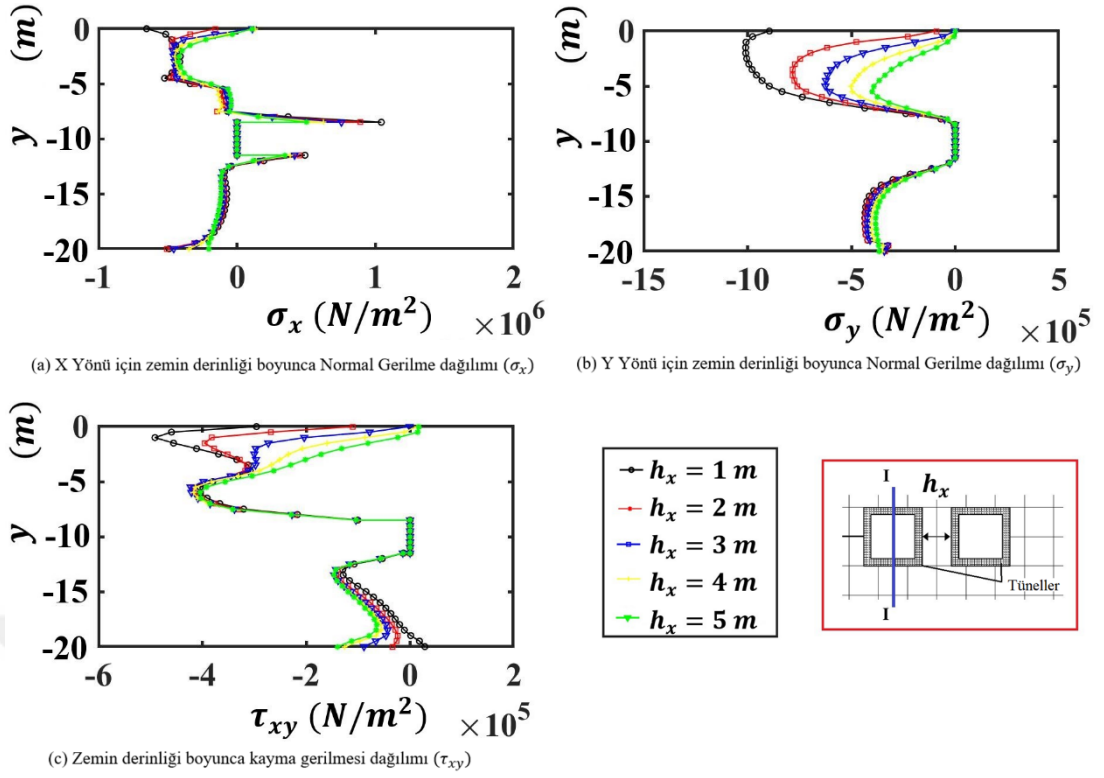
Şekil 4.25 : Düzgün yayılı yük altında kesit I-I için tünellerin ortam yüzeyinden (h_y) düşey konumlarının ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri.



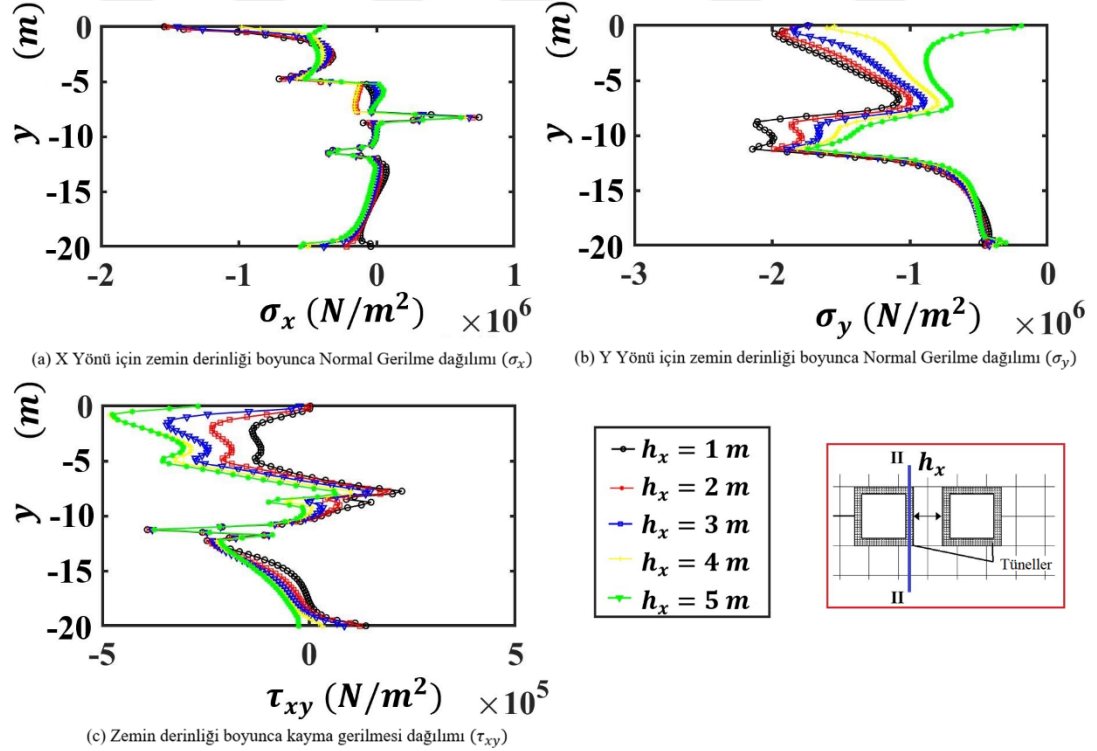
Şekil 4.26 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin ortam yüzeyinden (h_y) düşey konumlarının ortam derinliği boyunca gerilme dağılımına etkileri.



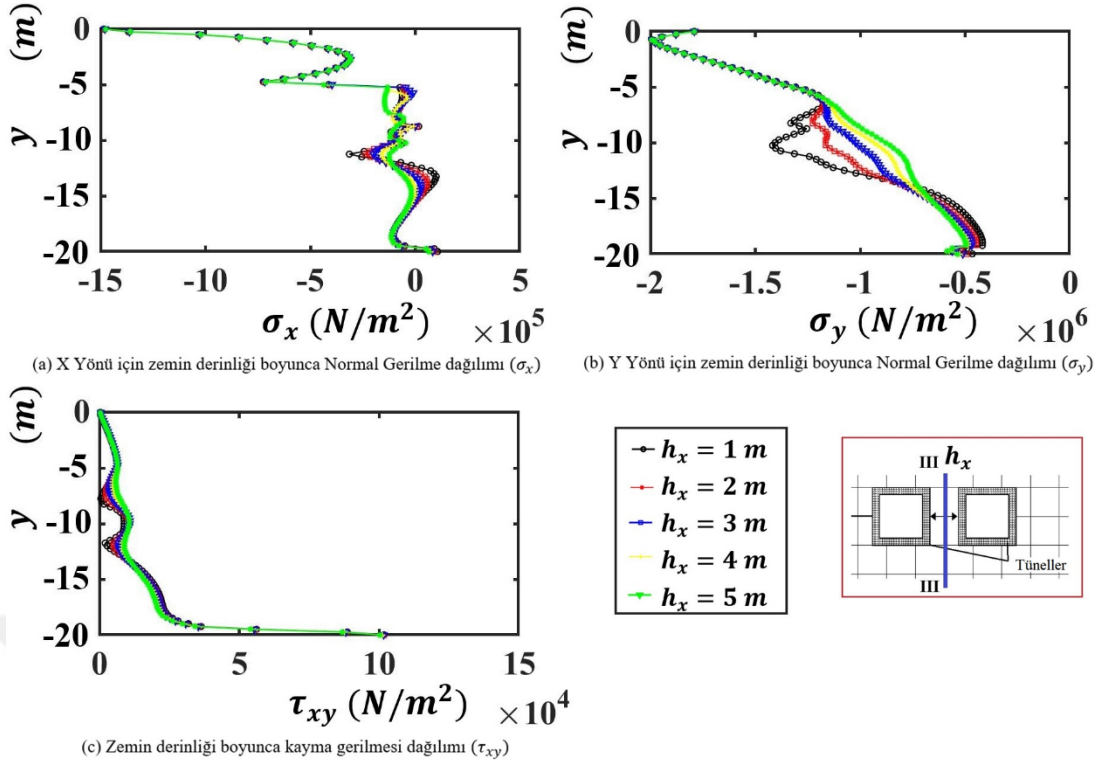
Şekil 4.27 : Düzgün yayılı yük altında III-III kesiti için tünellerin ortam yüzeyinden (h_y) düşey konumlarının ortam derinliği boyunca gerilme dağılımına etkileri.



Şekil 4.28 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için ikiz tüneller arasındaki mesafesinin (h_x) ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri.



Şekil 4.29 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için ikiz tüneller arasındaki mesafesinin (h_x) ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri.



Şekil 4.30 : Düzgün yayılı yük altında III-III kesiti için ikiz tüneller arasındaki mesafesinin (h_x) ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri.

Şekil 4.25 - 4.30'da tünellerin konumunun ortam derinliği boyunca gerilme dağılımları elde edilmiş ve ortam üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Şekil 4.25 - 4.27'de, tünellerin ortam yüzeyinden (h_y) düşey konumlarının, düzgün yayılı yük altındaki ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 4.25 - 4.27'de gösterildiği gibi (h_y) ortam yüzeyi ile tünellerin orta noktası arasındaki mesafeyi tanımladığı görülmektedir. Bu şekillerde, ortam derinliğinin farklı kesitlerinde elde edilen gerilme dağılımları, örneğin I-I, II-II ve III-III kesitleri gösterilmektedir. Şekil 4.25-4.26'daki sonuçlar incelendiğinde; kesit I-I ve II-II'den görüldüğü gibi iç tünelde gerilmeler doğal olarak sıfırdır (Şekil 4.25 ve Şekil 4.26). Tünel sınırlarında tüm gerilmeler ani olarak artmakta ve Şekil 4.25 ve 4.26'dan görüldüğü gibi bu bölgelerde gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Gerilme dağılımları III-III kesitinde, Şekil 4.27'de görüldüğü gibi I-I ve II-II kesitlerinde olduğu gibi ani bir değişim göstermemektedir. Ancak gerilme yığılmaları tünel sınırlarına yakın bölgelerde meydana gelmektedir.

İkiz tünellerin konumu ortam yüzeyine veya birinci ortam tabakasına yakın olduğu durumda, gerilme değerleri oldukça artmaktadır. Bunun nedeni yük ve gerilme dağılımının etkilerinin yüke yakın olan noktalarda çok fazla olmasıdır. Bu nedenle,

sürşarj yükleri altında derin tünellerin aksine sığ tünellerde daha fazla gerilmeler oluşur. Ayrıca en büyük gerilme değerleri I-I kesitinde meydana gelmektedir. Bu durum, tünellerin düşey pozisyonunun gerilme dağılım davranışında çok önemli olduğunu göstermektedir.

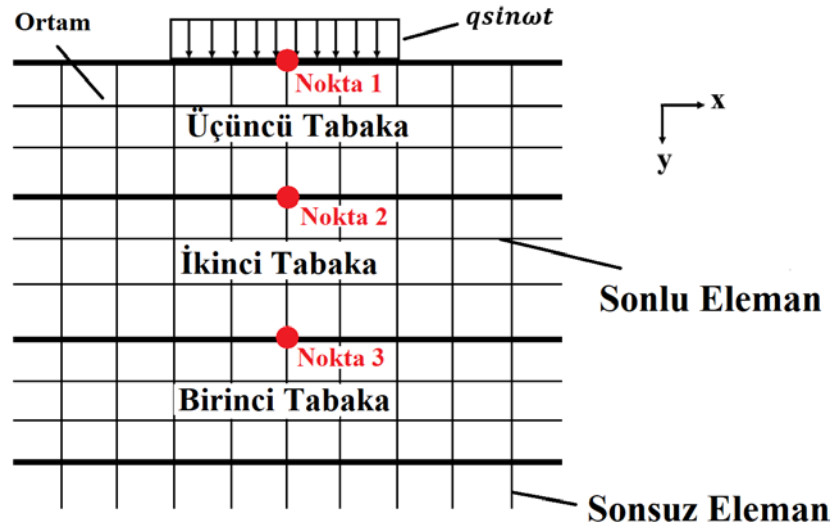
Şekil 4.28 - 4.30'da, ikiz tüneller arasındaki mesafenin (h_x) düzgün yayılı yük altında ortam derinliği boyunca gerilme dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu şekillerde, ortam derinliğinin farklı kesitlerinde elde edilen gerilme dağılımları örneğin I-I, II-II ve III-III kesitleri gösterilmektedir. Şekil 4.28 - 4.30'da (h_x) mesafesi azaldıkça gerilme değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Özellikle (σ_y) gerilmeleri önemli ölçüde değişmiştir. Yatay gerilmeler (σ_x) için gerilme dağılımları (h_x) mesafesinin değişmesiyle çok az bir değişim göstermiştir. Tüneller arası h_x mesafesi azaldıkça, gerilme yığılmaları önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, gerilme dağılımının minimuma indirilmesinde tüneller arasındaki mesafenin çok önemli olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu şekillerden de görüldüğü gibi en büyük gerilme değişimi ortam kesitlerinin üst bölgesinde meydana gelmektedir.

Elde edilen sonuçlardan, tünellerin konumunun, ortam derinliğine bağlı olarak gerilme dağılımı üzerinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Gerilme yığılmaları, tünel sınırlarının yakınında, özellikle sığ tünellerde meydana gelir. Tünel yapılarının daha fazla gerilmeye maruz kaldığı ve sığ ve yakın mesafeli tünellerde kırılma problemlerinin sıklıkla ortaya çıkabileceği sonucuna varılabilir. Sonlu elemanlar yöntemi ve sonsuz ortamı tanımlayan sonsuz elemanlar kullanılarak gerçekçi gerilme analizi elde edilebilir. Ayrıca, sonsuz ortamda sonsuz elemanların kullanılmasıyla, bu karmaşık problemin hesaplama maliyeti azaltılabilir.

4.1.2 Doğrusal dinamik analiz sonuçları

Bu bölümde düzgün yayılı harmonik yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın dinamik analizi yapılmıştır. Ortam yüzeyine yakın bölge sonlu elemanlarla, uzak bölge ise sonsuz elemanlarla modellenmiştir. Sonlu bölge 16 düğüm noktalı sonlu elemanlarla, sonsuz bölge ise 8 düğüm noktalı sonsuz elemanlarla modellenmiştir. Sayısal integrasyon Gauss Legendre integrasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tabakalı yarı-sonsuz ortam sonlu-sonsuz elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Şekil 4.31'de tabakalı yarı sonsuz ortam gösterilmektedir.

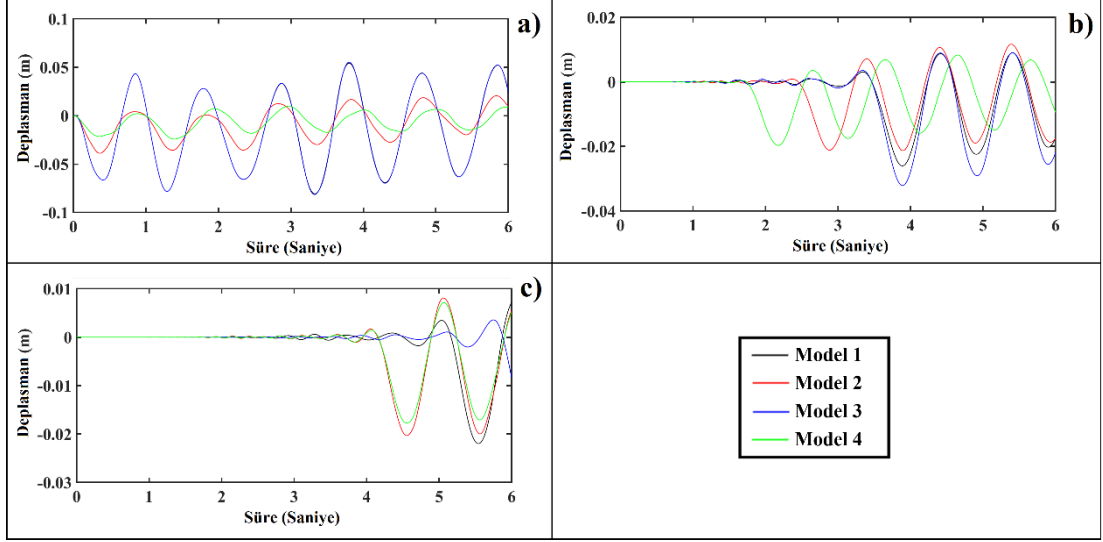


Şekil 4.31 : Düzgün yayılı harmonik yük altındaki tabakalı yarı sonsuz ortam.

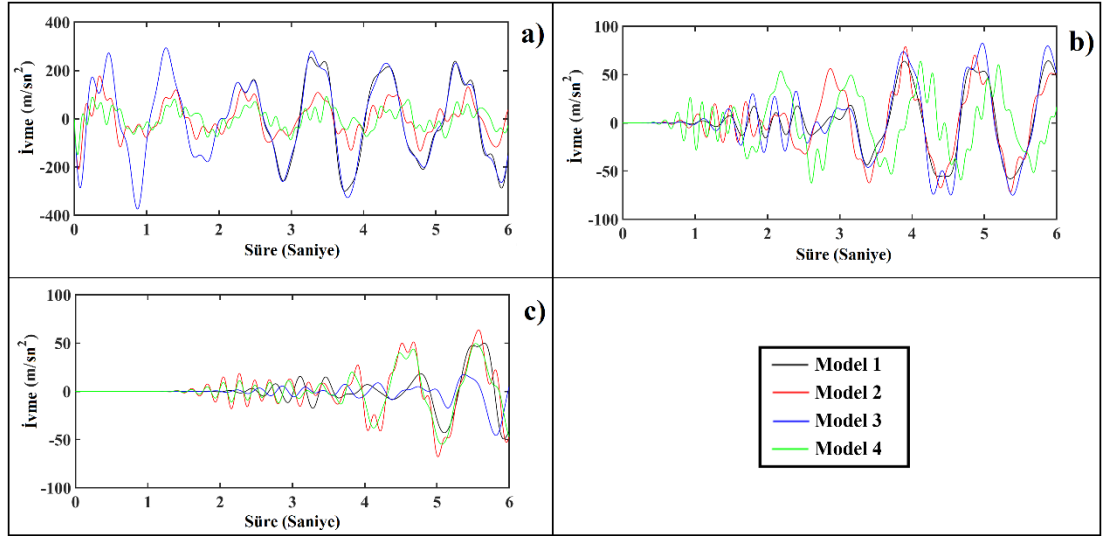
Sayısal sonuçlarda sonlu ve sonsuz elemanlar kullanılarak üç tabakalı ortamın farklı malzeme özelliklerine sahip farklı tabaka dizilimleri için yer değiştirme ve ivme sonuçları incelenmiştir. Yükün periyodu 1 sn olarak alınmış ve 0-6 sn aralığında uygulanmıştır. Zaman artış aralığı $\Delta t = 0.001$ olarak belirlendi. Ortam birim ağırlığı 24 KN/m^3 , ortamdaki sönüm ise $c = 0$ olarak alınmıştır. Ortam boyutları $L_x = L_y = 21 \text{ m}$ olarak alınmıştır. Üniform harmonik yayılı yük ($q \sin \omega t$); $q = 600 * 10^3 \text{ N/m}$ ve 7 m uzunluğunda alınmıştır. Bu çalışmada farklı tabaka dizilimleri kullanılmış olup, bunlar model-1, model-2, model-3 ve model-4 olarak sıralanmıştır. Ortam ortamının mekanik özellikleri Çizelge 4.3'te gösterilmektedir. Sayısal sonuçlarda $n_x = n_y = 18$ sonlu eleman ve 56 sonsuz eleman kullanılmıştır. Sayısal sonuç ve şekillerin elde edilmesinde MATLAB programı kullanılmıştır.

Çizelge 4.3 : Yarı sonsuz ortamın mekanik özellikleri.

		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Birinci Tabaka	$E_1 (Pa)$	$20 * 10^6$	$10 * 10^6$	$40 * 10^6$	$10 * 10^6$
	ν_1	0	0	0	0
İkinci Tabaka	$E_2 (Pa)$	$40 * 10^6$	$40 * 10^6$	$20 * 10^6$	$20 * 10^6$
	ν_2	0	0	0	0
Üçüncü Tabaka	$E_3 (Pa)$	$10 * 10^6$	$20 * 10^6$	$10 * 10^6$	$40 * 10^6$
	ν_3	0	0	0	0



Şekil 4.32 : Harmonik yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın dinamik düşey yer değiştirmesi a) Nokta 1 b) Nokta 2 c) Nokta 3.



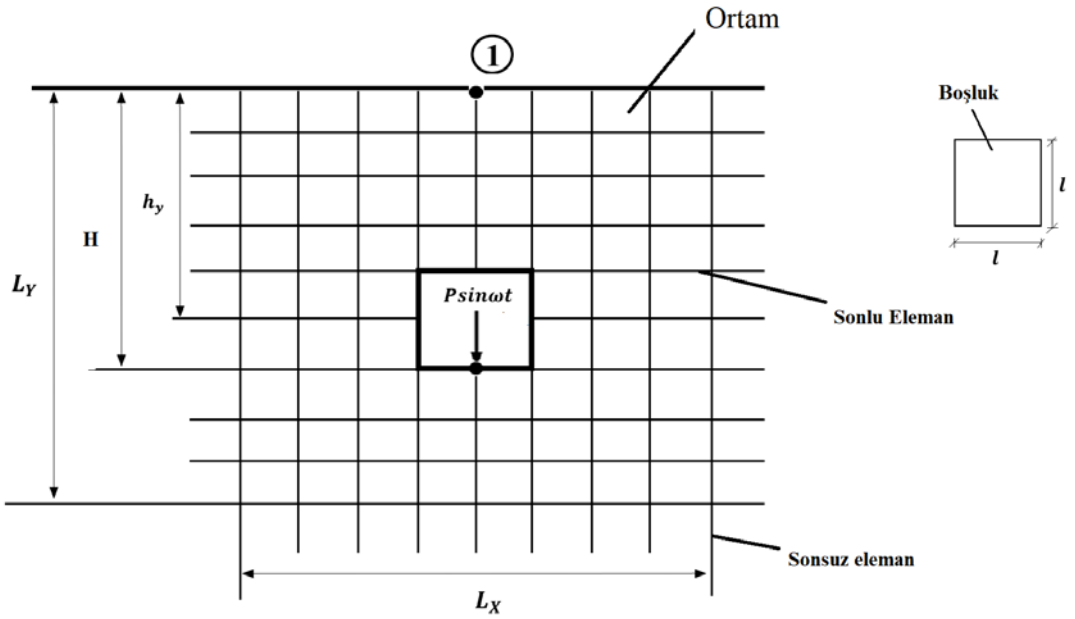
Şekil 4.33 : Harmonik yük altında tabakalı yarı sonsuz ortamın dinamik düşey ivmesi a) Nokta 1 b) Nokta 2 c) Nokta 3.

Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te harmonik yük altındaki tabakalı ortamda, uygulama noktası ve tabaka geçiş noktalarındaki zamana bağlı düşey yer değiştirme ve düşey ivme sonuçları gösterilmektedir. Farklı tabaka rijitlikleri farklı yer değiştirmelere ve ivmelere neden olmuştur. Model 1 ve Model 3'teki yüzeye yakın tabakanın rijitliğinin yüzeydeki yer değiştirmeler için belirleyici olduğunu göstermektedir. Harmonik yük etkisi, ortam derinliğine bağlı olarak ilerleyen saniyelerde tabaka geçiş noktalarında gözlemlenmiştir. Tabaka geçiş noktalarına bakıldığında rijitliği düşük tabakalarda yer değiştirme ve ivme sonuçlarının daha yüksek çıktığı görülmüştür. Yüzey rijitliğinin düşük olduğu ortamdaki tabaka geçiş noktalarında, daha fazla yer değiştirme gözlemlenmiştir. En yüksek yer değiştirme ve düşey ivme uygulama noktasında

meydana gelmiştir. En düşük yer değiştirme ve düşey ivme, yük etkisinin azaldığı 3. noktada meydana gelmiştir. 1 noktasında yüzeye yakın tabaka rijitliği düşük olan bölgeyi gösteren grafiklerde yer değiştirme daha büyüktür.

Sonuç olarak; yüzeyde düşey yer değiştirme ve ivme sonuçları yüksektir. Yük alanından uzaklaştıkça değerler önemli ölçüde azalmıştır. Tabaka rijitliklerinin değiştiği noktalarda yer değiştirme ve ivme kayıtları oldukça farklıdır. Sonuçlara dayalı olarak ortam ve yapıyı bir bütün olarak kabul ederek sonlu-sonsuz elemanlarla yapılan çözümlerde, en doğru sonuçlar elde edilebilir.

Kare bir boşluk içeren yarı-sonsuz ortamda, boşluğun alt taban yüzeyinden uygulanan noktasal harmonik yük etkisinin, ortam yüzeyinde oluşturduğu belirli bir zaman aralığında dinamik tepkileri incelenmiştir (Şekil 4.34). Sayısal sonuçlarda yerdeğiştirme ve ivme sonuçları irdelenmiştir.

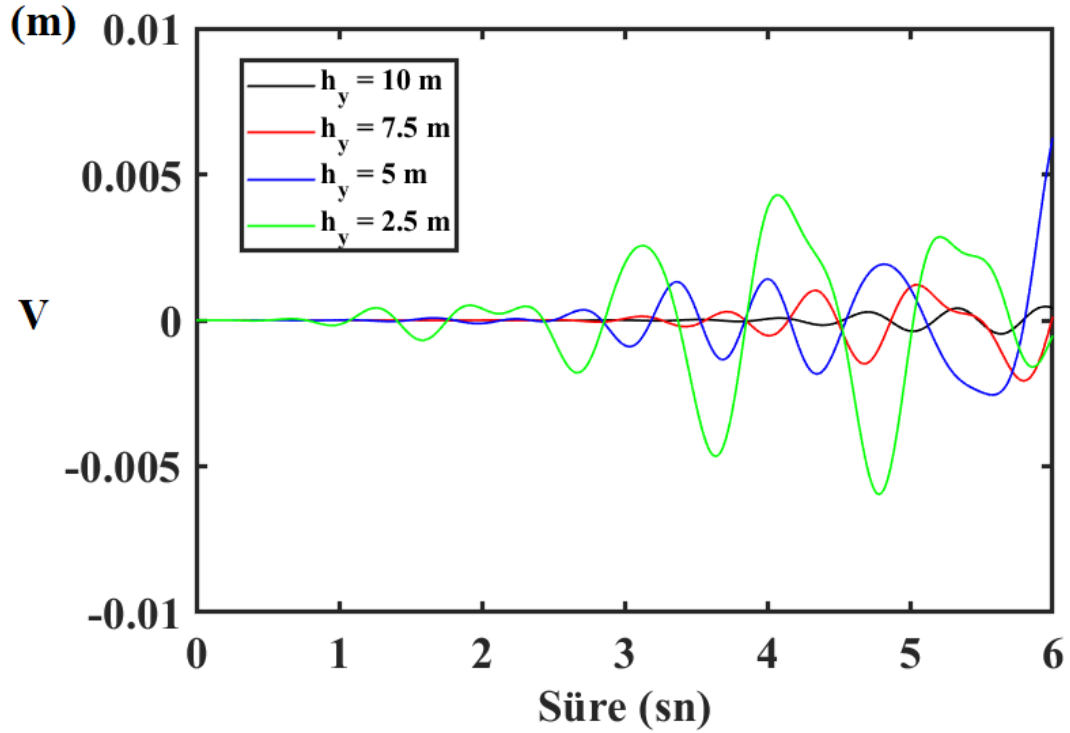


Şekil 4.34 : Boşluk bulunan bir ortamdaki boşluk tabanından uygulanan harmonik yük etkisi.

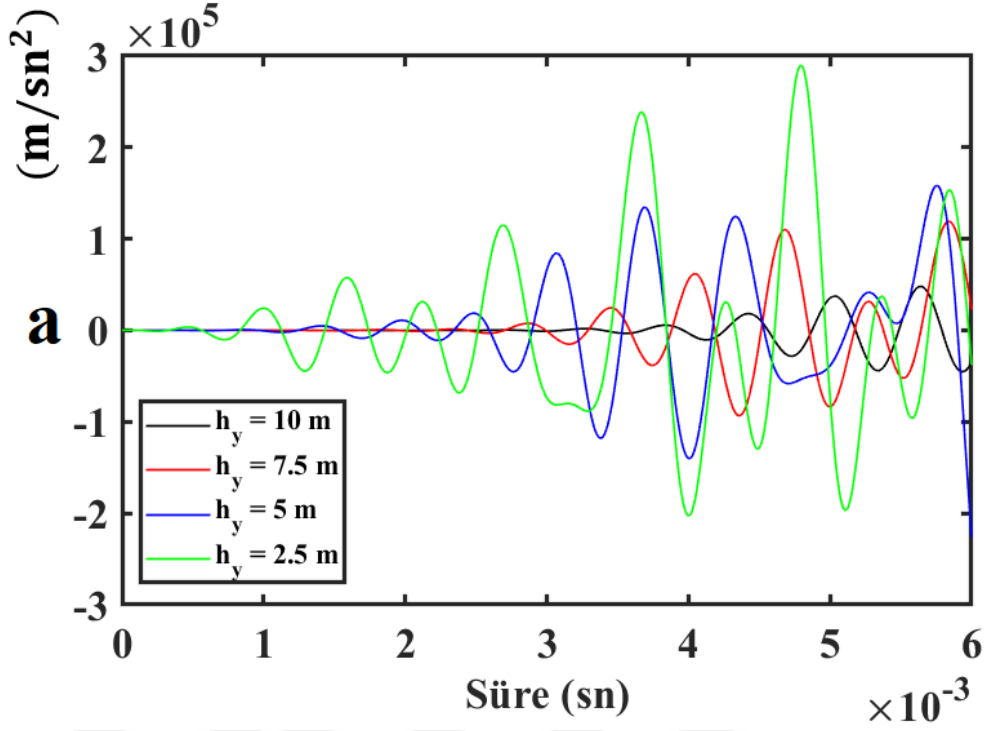
Dinamik analiz için yarı sonsuz ortam modellenmiştir. Şekil 4.34'te modellenen yarı sonsuz ortamın geometrik özellikleri açıklanmıştır. Kare boşluğun boyutları l olarak tanımlandı. Dikdörtgen boşluğun orta noktası ile ortam yüzeyi arasındaki düşey mesafe h_y olarak gösterildi. Dikdörtgen boşluk tabanından ortam yüzeyine kadar olan mesafe H olarak belirtildi. Noktasal harmonik yük $P \sin \omega t$ olarak alındı.

Yapılan analizde, boşluk tabanından uygulanan harmonik yük etkisi altındaki yarı sonsuz ortamın üst yüzeyinde oluşan yer değiştirme (V) ve ivme (a) cevapları şekil

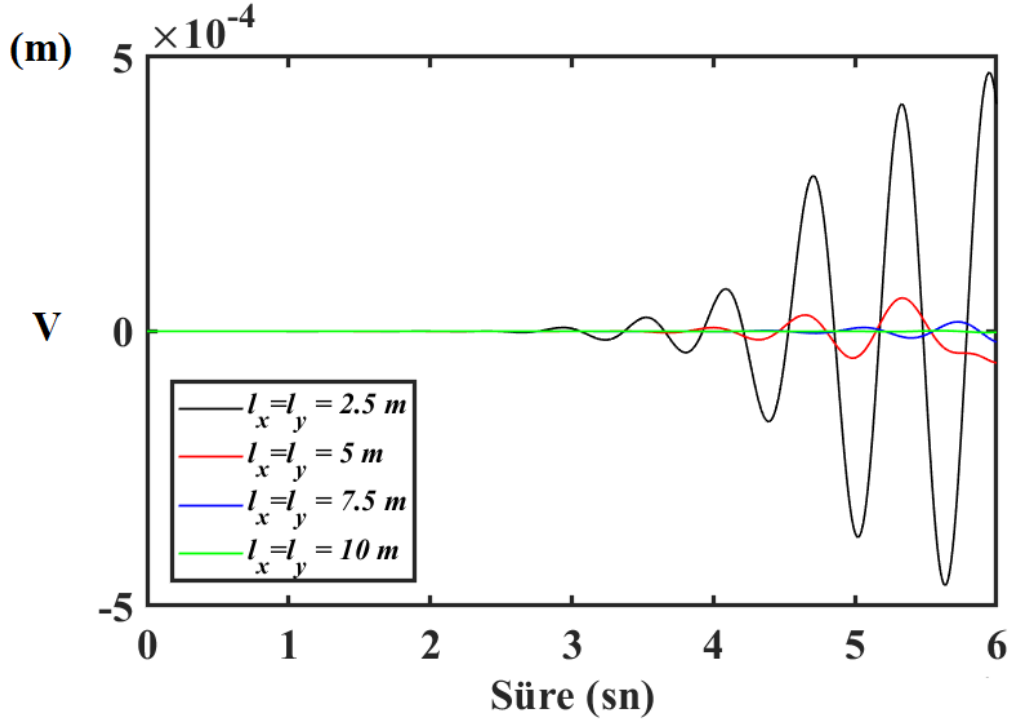
4.35-4.38 de sunulmuştur. Farklı konumlarda bulunması durumu ve farklı büyüklere sahip boşlukların yarı sonsuz ortam yüzeyinde oluşturduğu dinamik tepkiler incelenmiştir. Ortam boyutları sonlu bölge için $L_x = L_y = 20$ m, sırasıyla yatay ve düşey doğrultuda sonsuz bölgede tanımlanan sonsuz eleman ölçüleri 10 m ve 20 m olarak alınmıştır. Kare boşluk ölçüleri, $l = 2.5$ m olarak belirlenmiştir. Boşluk tabanı ile yüzey arasındaki mesafe $H = 12.5$ m olarak gösterilmiştir. Ortam mekanik özellikleri $E = 22.4$ GPa, $\nu = 0.33$ ve $\rho = 2643$ kg/m³ olarak belirtilmiştir (Løkke ve Chopra, 2017). Zaman artış adım sayısı ($\Delta t = 0.001$) olarak belirlendi. Dikdörtgen boşluğun orta yüzeyinden düşey doğrultuda uygulanan noktasal harmonik yük $P = 5 \times 10^6$ KN'dur. Sonlu-sonsuz eleman modelinde $n_x = n_y = 16 \times 16$ sonlu eleman, 50 sonsuz eleman kullanılmıştır.



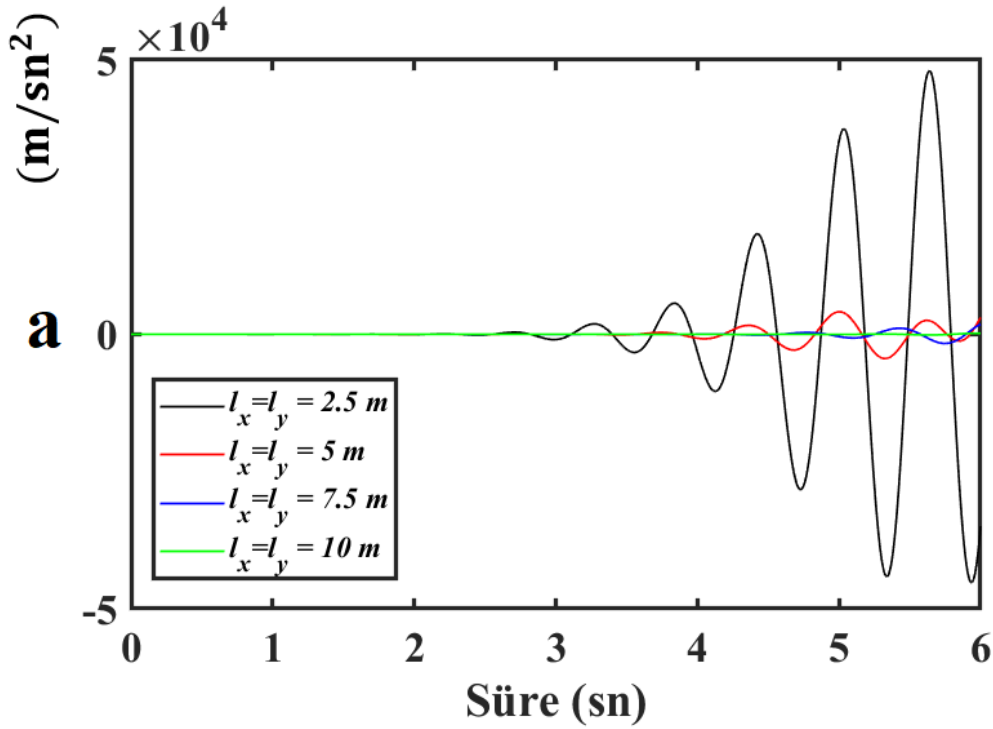
Şekil 4.35 : Boşluk tabanından uygulanan düşey noktasal harmonik yükün, boşluğun düşey doğrultuda konumunun değişmesi durumunda 1 noktasında belli bir zaman aralığında meydana gelen yerdeğiştirmesi.



Şekil 4.36 : Boşluk tabanından uygulanan düşey noktasal harmonik yükün, boşluğun düşey doğrultuda konumunun değişmesi durumunda 1 noktasında belli bir zaman aralığında meydana gelen ivmesi.



Şekil 4.37 : Boşluk tabanından uygulanan düşey noktasal harmonik yükün, boşluk boyutunun büyümesi durumunda 1 noktasında belli bir zaman aralığında meydana gelen yerdeğiştirmesi.



Şekil 4.38 : Boşluk tabanından uygulanan düşey noktasal harmonik yükün, boşluk boyutunun büyümesi durumunda 1 noktasında belli bir zaman aralığında meydana gelen ivmesi.

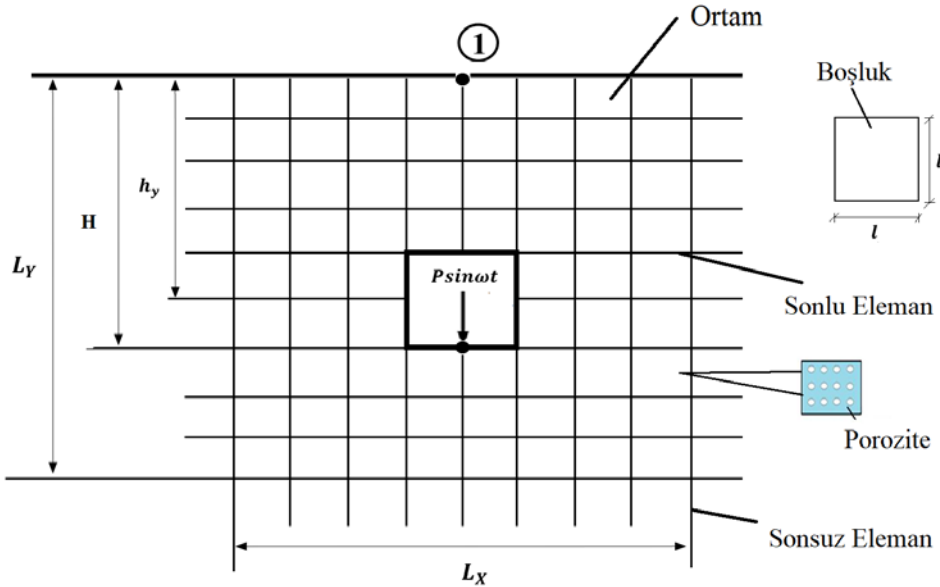
Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da yarım uzayda kare bir boşluğun yüzeyinden düşey doğrultuda uygulanan harmonik yük etkisinin, ortam yüzeyindeki 1 nolu noktada meydana getirdiği yer değiştirme (V) ve ivme (a) sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.35'te kare bir boşluğun ortam yüzeyine yaklaşması sonucu belli bir zaman aralığında 1 noktasındaki yerdeğiştirme tepkileri incelenmiştir. Kare boşluğun yüzeye yaklaşması sonucu 1 noktasındaki dinamik dalga genlikleri artmıştır. Ortam içindeki boşluğun yüzeye yakın olması durumunda, daha fazla sayıda dinamik dalga oluşmuştur. Oluşan dalga genliği ve dalga sayısındaki belirgin değişim, yüzeye yakın bölgenin rijitliğinin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Yüzeye yakın bir bölgede bulunan boşluk, ortam yüzeyinde bulunan 1 noktasında meydana gelen dinamik tepkilerin daha erken sürede oluşmasına neden olmuştur. Şekil 4.36'daki ivme sonuçları incelendiğinde, ivme sonuçlarının yerdeğiştirme sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği ve daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de boşluk tabanı ile yüzey mesafesi H sabit tutulmuş, boşluk yüzeyinde uygulanan harmonik yük etkisinin, boşluk boyutlarının artması sonucu 1 noktasında meydana getirdiği dinamik düşey yer değiştirme (V) ve ivme (a) tepkileri incelenmiştir. Ortam yüzeyindeki 1 noktasında meydana gelen dinamik dalga tepkileri,

belirli bir süre sonra ortaya çıkmıştır. Boşluk boyutlarının en küçük olduğu durumda, yüzeyde oluşan dinamik dalgalar daha erken sürede meydana gelmiş ve daha büyük dalga genlikleri ortaya çıkmıştır. Boşluk boyutları küçüldükçe, ters oranda dalga genlikleri büyüyerek devam etmiştir. Boşluğun yüzeye en uzak olduğu durumda, büyüyen dalga genlikleri ciddi bir fark ortaya çıkarmıştır.

Sonuç olarak dinamik dalga tepkileri açısından, ortam içindeki boşluğun yüzey ile düşey mesafesi ve boşluk boyutunun ciddi bir şekilde önemli olduğu görülmüştür. Ortam içindeki boşluk ve ortam yüzeyi arasındaki mesafe azaldıkça, ortam yüzeyinde meydana gelen dinamik tepkiler belirgin hale gelmiştir. Ortam içinde bulunan boşluk küçüldükçe, yüzeyde meydana gelen dinamik dalga genlikleri artmıştır. İçinde boşluk bulunan ortamlardaki dinamik tepkiler incelendiğinde, boşluk boyutları ve boşluk ile ortam yüzeyi arasındaki mesafe dikkate alınmalıdır.

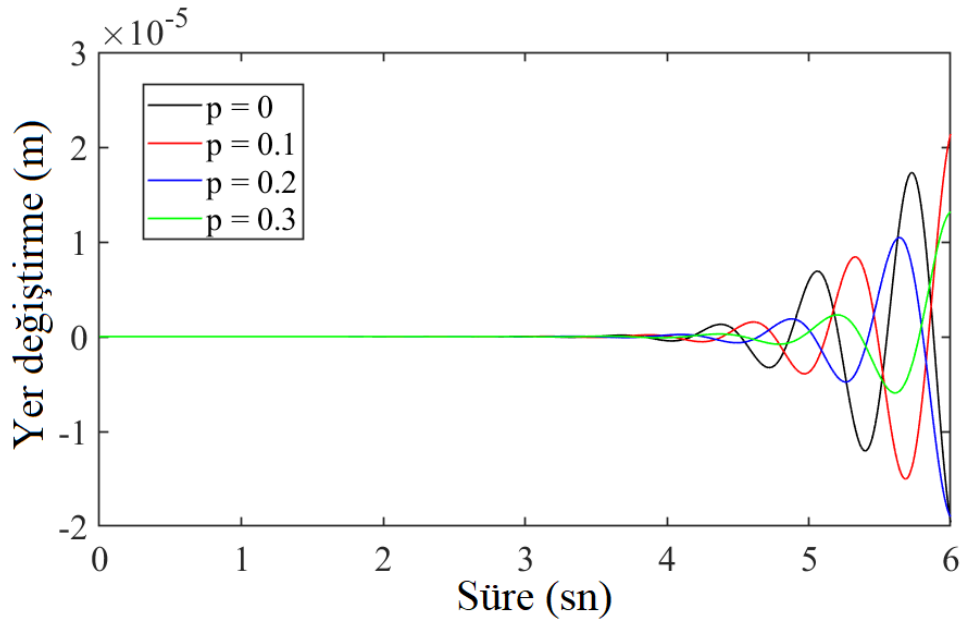
Noktasal harmonik yük altında içinde boşluk bulunan yarı sonsuz poroziteli bir ortam, sonlu sonsuz elemanlarla modellenmiştir (Şekil 4.39). Boşluk boyutu l olarak gösterilmiştir. Ortamdaki boşluğun ortasından yüzeye olan düşey mesafe h_y olarak tanımlandı. Dikdörtgen boşluk tabanı ile yüzey arasındaki mesafe H olarak belirlendi. Harmonik yük $P\sin\omega t$ olarak tanımlandı.



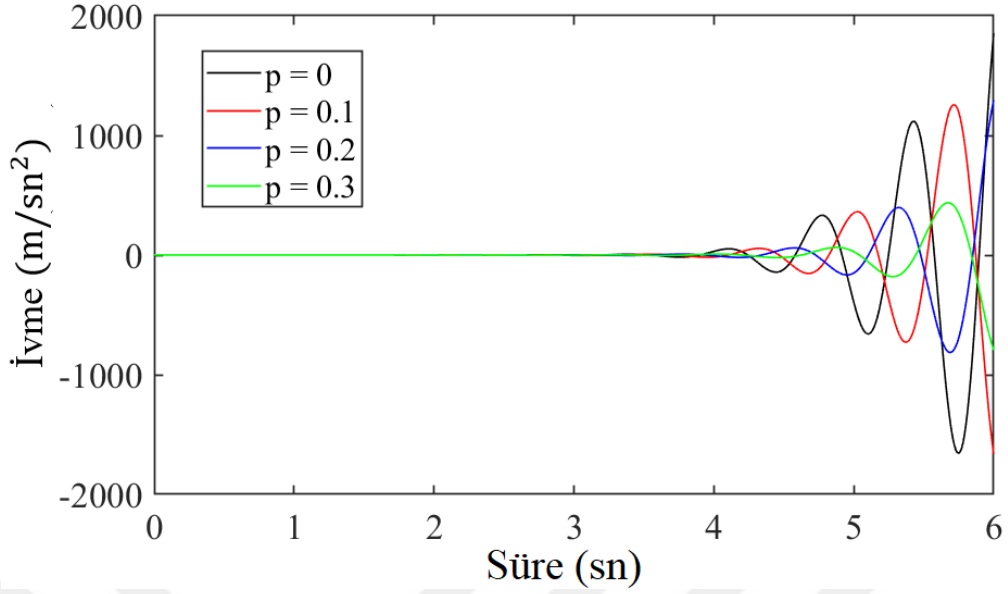
Şekil 4.39 : Yarı sonsuz poroziteli bir ortamda boşluktaki noktasal harmonik yük.

Şekil 4.40 - 4.45'te, kare bir boşluk içeren yarı sonsuz poroziteli bir ortamın, boşluk içindeki harmonik yükün etkisi altındaki yüzeyde meydana gelen yer değiştirme (V) ve ivme (a) sonuçları incelenmiştir. Yarı sonsuz ortamda farklı konumlarda bulunan

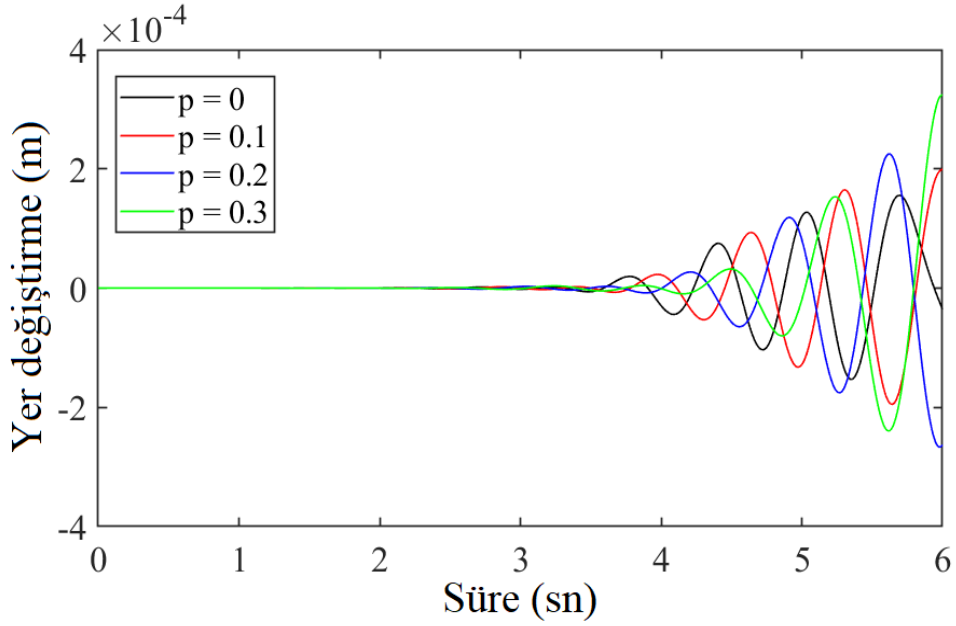
boşluk ve farklı boşluk boyutları durumunda farklı porozite oranlarının oluşturduğu dinamik reaksiyonlar araştırılmıştır. Yarı sonsuz ortam boyutları $L_x = L_y = 20$ m, sonsuz eleman uzunlukları ise yatay yönde 10 m, düşey yönde 20 m olarak alınmıştır. Boşluk boyutları $l = 2.5$ m olarak alınmıştır. Tünel tabanından yüzeye olan mesafe $H = 11.25$ m'dir. Ortam parametreleri $E = 22.4$ GPa, $\nu = 0.33$ ve $\rho = 2643$ kg/m³ olarak belirlenmiştir (Løkke ve Chopra, 2017). Zaman adım aralığı ($\Delta t = 0.001$) olarak alınmıştır. Boşluk tabanının orta noktasından dikey yönde $P = 5 \times 10^6$ KN noktasal harmonik yük uygulandı. Sonlu-sonsuz eleman modelinde $n_x = n_y = 16 \times 16$ sonlu eleman ve 50 adet sonsuz eleman kullanılmıştır.



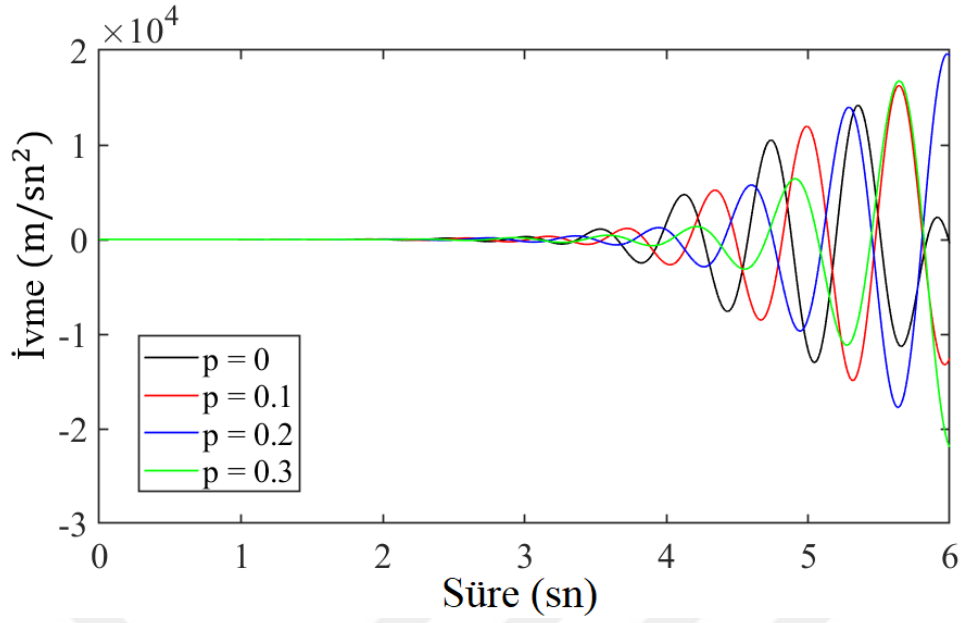
Şekil 4.40 : Noktasal harmonik yük altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında yer değiştirmesi ($h_y = 10$ m, $l = 2.5$ m).



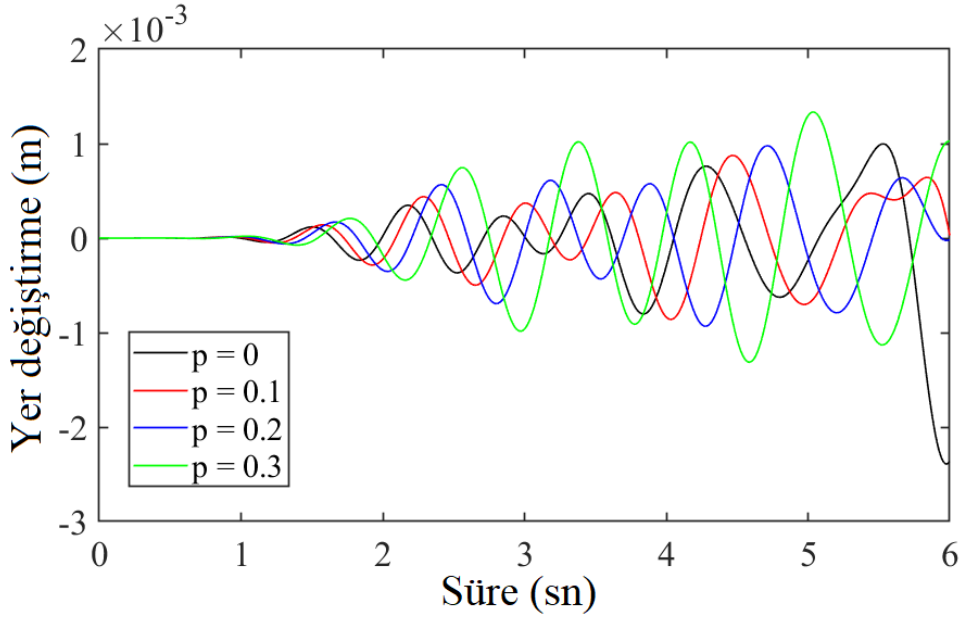
Şekil 4.41 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında ivmesi ($h_y = 10 \text{ m}, l = 2.5 \text{ m}$).



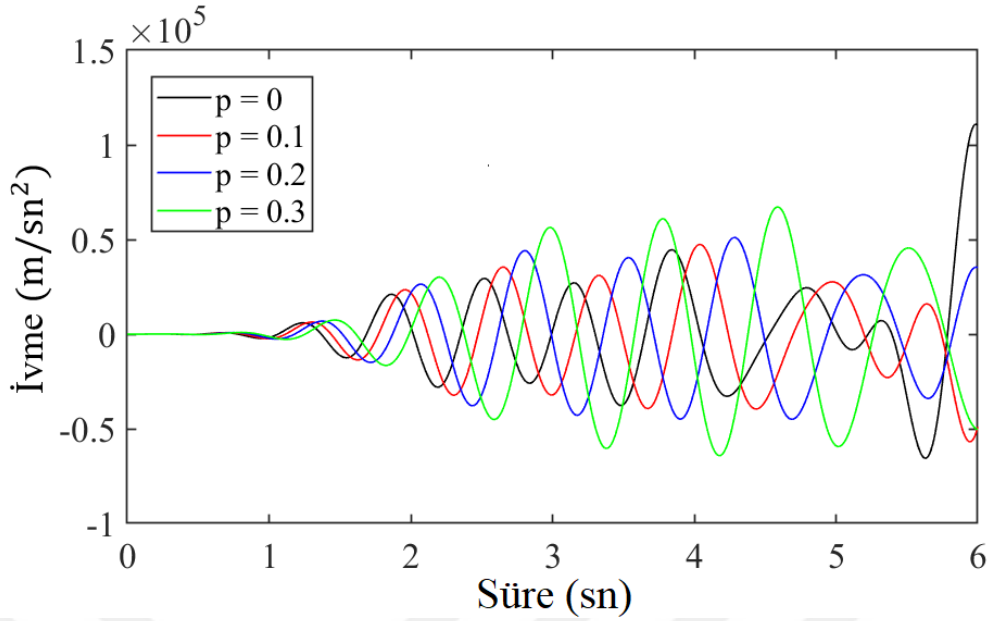
Şekil 4.42 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında yer değiştirmesi ($h_y = 2.5 \text{ m}, l = 2.5 \text{ m}$).



Şekil 4.43 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında ivmesi ($h_y = 2.5 \text{ m}, l = 2.5 \text{ m}$).



Şekil 4.44 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında yer değiştirmesi ($h_y = 10 \text{ m}, l = 7.5 \text{ m}$).



Şekil 4.45 : Noktasal harmonik yükü altındaki kare boşluğun, yarı sonsuz ortamda porozite oranının değişmesi sonucu yüzeydeki 1 noktasının belirli bir zaman aralığında ivmesi ($h_y = 10$ m, $l = 7.5$ m).

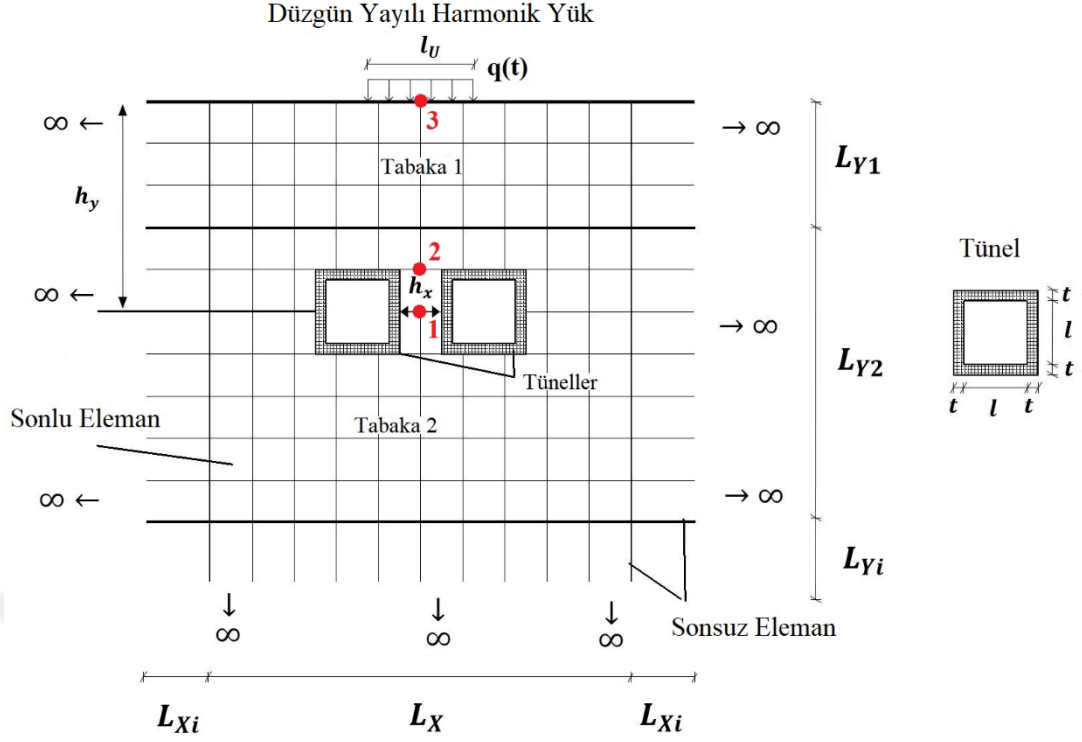
Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de düşey doğrultuda boşluk tabanından uygulanan noktasal harmonik yük altındaki poroziteli ortamın, yüzeyinde belirtilen 1 noktasındaki yer değiştirme ve ivme sonuçları gösterilmektedir. Boşluğun yüzeye olan uzaklığı $h_y = 10$ m ve boşluk boyutu $l = 2.5$ m alınmıştır. Boşluk yüzeye belirli bir mesafede olduğundan, hızına bağlı olarak belirli bir süre sonra yüzeyde dinamik dalga etkileri ortaya çıkmıştır. Ortam porozite oranı arttıkça dinamik dalga genlikleri artmıştır. Rijitliğin azalması bu duruma neden olmuştur. Porozite oranı arttıkça dalga hızları yavaşlamış, dolayısıyla daha büyük genliğe sahip daha az sayıda dinamik dalga oluşmuştur. Porozite oranı arttıkça yer değiştirmeler ve ivmeler zamanla artmıştır.

Şekil 4.42 ve Şekil 4.43’te noktasal harmonik yükün uygulandığı kare boşluk yüzeye yakın konumlandırılmıştır. Boşluğun yüzeye olan uzaklığı $h_y = 2.5$ m ve boşluk boyutları $l = 2.5$ m alınmıştır. Harmonik yükün yüzeye yakın olması nedeniyle yüzeyde dinamik reaksiyonlar daha erken sürede meydana gelmiştir. Porozite oranı arttıkça dalga hızları azalmış, rijitlik azaldıkça dalga genlikleri artmıştır. Boşluk miktarının daha büyük olması nedeniyle rijitlik azalmıştır. Boşluk yüzeye yakın olduğundan dalga sayıları ve dalga genlikleri, başlangıç durumuna göre farklı porozite oranlarında birbirine daha yakın çıkmıştır. Boşluk yüzeye yakın olduğunda 1 noktasındaki yer değiştirmeler ve ivmeler çok daha fazla artmıştır.

Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'te boşluk ile yüzey arasındaki mesafe ortam ortasında sabit tutulmaktadır. Boşluk tabanından yüzeye olan mesafe $H = 11.25$ m olarak alınmıştır. Boşluk boyutu artırılarak $l = 7.5$ m olarak belirtilmiştir. Benzer şekilde porozite oranının artmasıyla birlikte zamanla dalga genlikleri artmış ve dalga sayıları azalmıştır. Porozite oranları ilk duruma göre daha büyük olduğundan yüzeydeki reaksiyonlar daha geç sürede meydana gelmiştir. Boşluk boyutunun büyük olması nedeniyle yüzeydeki yer değiştirmeler ve ivmeler çok daha düşük çıkmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde ortamdaki gözenekliliğin, düşey konumun ve boşluğun boyutlarının önemli olduğu görülmüştür. Boşluk yüzeye yaklaştıkça yüzeyde dinamik reaksiyonlar daha belirgin olarak meydana gelmektedir. Ortamdaki boşluğun büyümesi, yüzeyde meydana gelen dinamik dalga genliklerini arttırmıştır. Artan gözeneklilik oranları yer değiştirmeleri ve ivmeleri arttırmıştır. Ortamdaki boşluk boyutları, konumları ve ortam gözeneklilik oranı yüzeyde oluşan dinamik tepkileri değiştirdiğinden analizlerde bu durumların dikkate alınması gerekir.

İkiz tünel içeren tabakalı yarı sonsuz ortam sonlu ve sonsuz elemanlarla modellenmiş ve doğrusal dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Tünellerin farklı konumlarının ve yarı-sonsuz ortam tabakalarının dinamik tepkiler üzerindeki etkileri, tünel-ortam etkileşimi içerisinde elde edilmiş ve tartışılmıştır. Şekil 4.46'da, düzgün yayılı harmonik yük altında iki özdeş kare tünele sahip iki tabakadan oluşan yarı sonsuz ortam gösterilmektedir. Sonlu elemanlardan oluşan parçanın boyutları sırasıyla yatay yönde L_X , düşey yönde birinci tabaka L_{Y_1} ve düşey yönde ikinci tabaka L_{Y_2} olarak gösterilmektedir. Yarı sonsuz ortamdaki sonsuz bölge yatay yönde L_{X_i} ve düşey yönde L_{Y_i} olarak gösterildi. İkiz kare tünellerin iç uzunlukları l ve tünel kalınlığı t 'dir. Tünellerin ortam yüzeyinden uzaklığı h_y , tüneller arası uzaklığı ise h_x olarak belirtilmiştir. Ortamın üst orta yüzeyinden düzgün yayılı harmonik yükün uzunluğu l_U olarak ve yükün $q(t)$ olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.46 : Düzgün yayılı harmonik yük altında kare ikiz tünel içeren yarı sonsuz ortam.

Bu bölümde sonsuz yarı ortam problemlerinde tünel konumlarının dinamik yer değiştirmeler ve ivmeler üzerindeki etkilerine ilişkin sayısal sonuçlar elde edilmiş ve tartışılmıştır. Sayısal çalışmalarda aşağıdaki parametreler kullanılmıştır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 : Problemden kullanılan parametreler

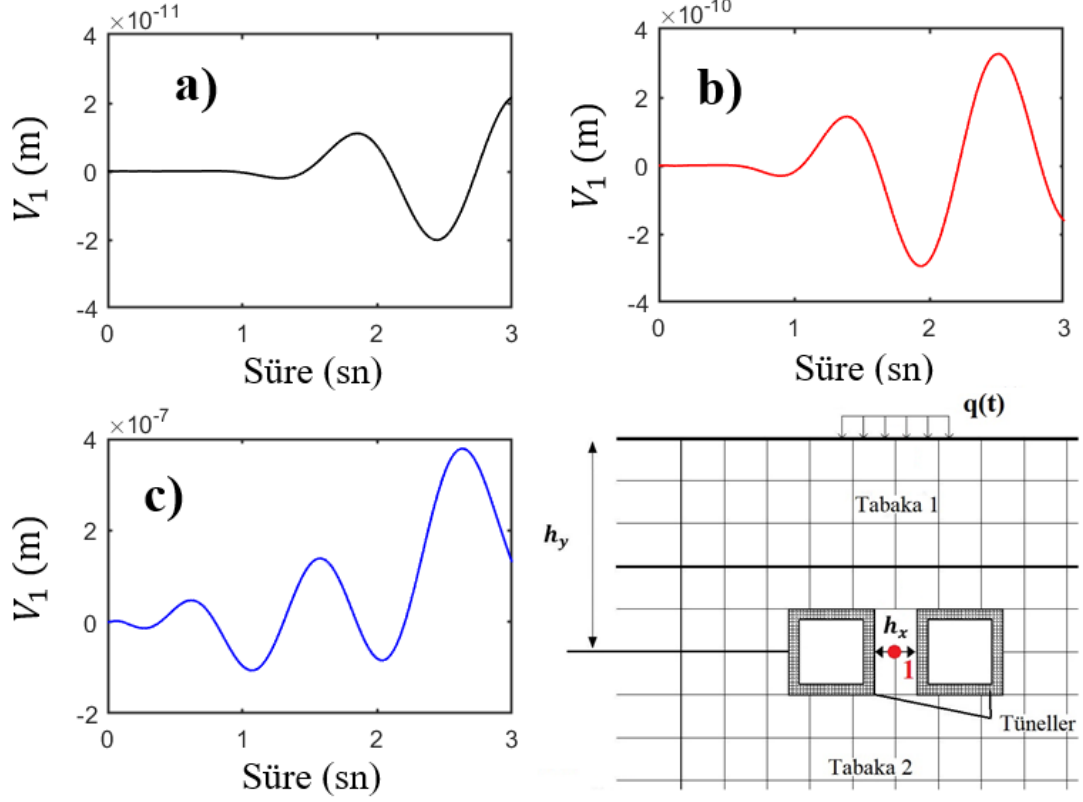
Parametre	Sembol	Değer	Birim	Referans
Düzgün yayılı harmonik yük	$q(t)$	1.25×10^9	N/m	
Düzgün yayılı yük uzunluğu	l_U	4	m	
Sönüm	c	0.0001		
Yatay doğrultuda sonlu eleman uzunluğu	L_X	20	m	
Düşey doğrultuda sonlu eleman uzunluğu	L_{Y1}	5	m	
Düşey doğrultuda sonlu eleman uzunluğu	L_{Y2}	15	m	
Yatay doğrultuda sonsuz eleman uzunluğu	L_{Xi}	10	m	
Düşey doğrultuda sonsuz eleman uzunluğu	L_{Yi}	20	m	
Yatay doğrultuda tünel iç uzunluğu	l_x	4	m	
Düşey doğrultuda tünel iç uzunluğu	l_y	4	m	
Yatay doğrultuda tünel kalınlığı	t_x	1	m	
Düşey doğrultuda tünel kalınlığı	t_y	1	m	
Birinci tabakanın Young modülü	E_1	1.26	GPa	(Hatzigeorgiou ve Beskos, 2010)
Birinci tabakanın Poisson oranı	ν_1	0.4		(Hatzigeorgiou ve Beskos, 2010)
Birinci tabakanın kütle yoğunluğu	ρ_1	1800	kg/m ³	(Hatzigeorgiou ve Beskos, 2010)
İkinci tabakanın Young modülü	E_2	22.4	GPa	(Løkke ve Chopra, 2017)
İkinci tabakanın Poisson oranı	ν_2	0.33		(Løkke ve Chopra, 2017)

Çizelge 4.4 : Problemde kullanılan parametreler (devam)

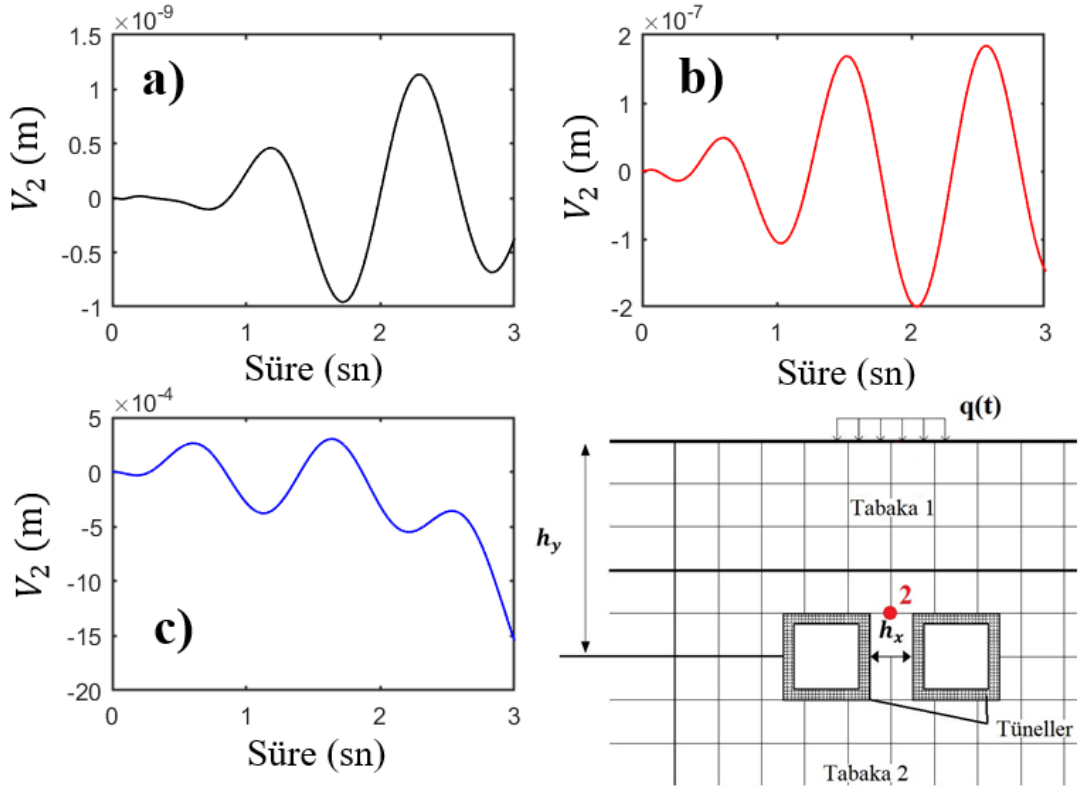
Parametre	Sembol	Değer	Birim	Referans
İkinci tabakanın kütle yoğunluğu	ρ_2	2643	kg/m ³	(Løkke ve Chopra, 2017)
Tünellerin Young modülleri	E_t	34.5	GPa	(Løkke ve Chopra, 2018)
Tünellerin kütle yoğunluğu	$\rho_{\text{tünel}}$	2403	kg/m ³	(Løkke ve Chopra, 2018)
Tünellerin Poisson oranı	ν_t	0.20		(Løkke ve Chopra, 2018)

Tünelin h_x ve h_y konum parametreleri sayısal çalışmada farklılık göstermektedir. Sonlu-sonsuz eleman modelinde hem x hem de y yönünde 20×20 sonlu eleman ve 62 adet sonsuz eleman kullanılmaktadır. Bu değerler için dinamik tepkilerin yakınsadığı belirtilmektedir. Toplam harmonik yük süresi 0-3 sn, periyodu ise 1 sn olarak alınmıştır. Süre (Δt) artış adım aralığı 0.001 olarak belirlendi. Sonlu-sonsuz eleman modelinde tünel, sonlu ortam ve sonsuz ortamla uyumlu sonlu-sonsuz eleman kullanılmıştır(Şekil 4.46).

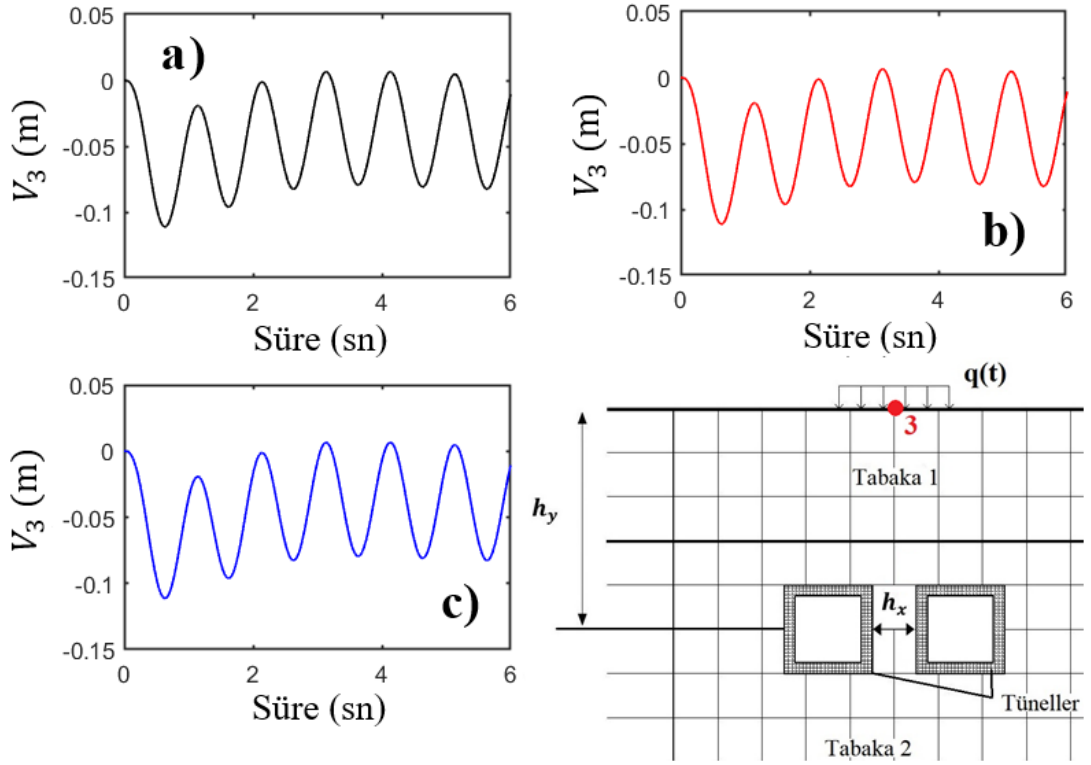
İkiz tünellerin tasarımında, ikiz tünellerin ortam seviyesine ve birbirlerine göre konumları çok önemli bir konudur. Çünkü ikiz tünellerin yanyana konumlandırılması, sistemin stabilitesi ve oluşabilecek göçmeler açısından birçok tehlikeli duruma neden olabilir. Harmonik yük altındaki yarı sonsuz ortamdaki tünellerin konumunun, dinamik tepkileri üzerindeki etkilerini araştırmak için, ikiz tünelin dikey ve yatay konumlarına göre dinamik tepkiler incelenmiştir. İki tünel arası mesafe sabit tutulup $h_x = 2$ m ve ikiz tünelin ortam seviyesinden dikey konumunun (h_y), düşey yer değiştirmeler üzerindeki etkileri Şekil 4.47, 4.48, 4.49 ve düşey ivmeler üzerindeki etkileri Şekil 4.50, 4.51, 4.52’de gösterilmiştir. Şekil 4.53 ve 4.54’te sırasıyla $h_y = 5$ m için, tüneller arasındaki farklı mesafe değerlerine (h_x) göre düşey yer değiştirmeler ve ivmeler gösterilmektedir. Bu sonlu eleman modelindeki dinamik tepkiler, şekil 4.46’daki nokta 1, nokta 2 ve nokta 3 olarak tanımlanan yarı sonsuz ortamdaki birkaç spesifik nokta için elde edilmiştir.



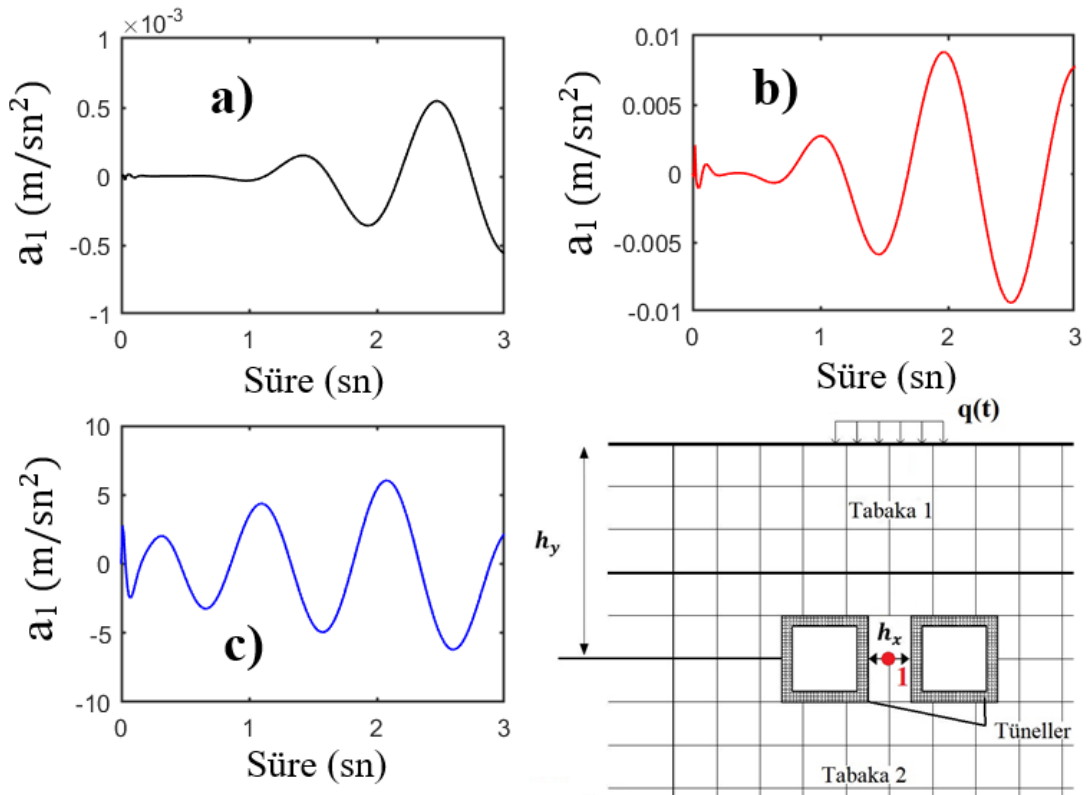
Şekil 4.47 : Tünellerin düşey konumlarının 1 noktası için dinamik düşey yer değiştirmeler açısından etkisi a) $h_y = 10$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 5$ m.



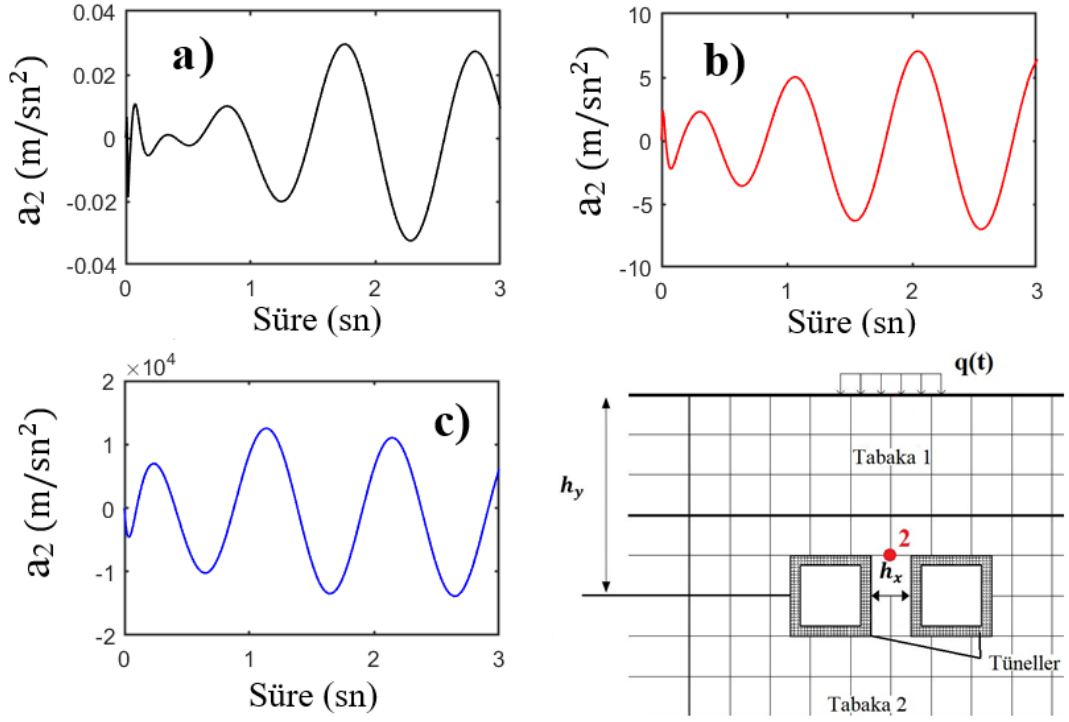
Şekil 4.48 : Tünellerin düşey konumlarının 2 noktası için dinamik düşey yer değiştirmeler açısından etkisi a) $h_y = 10$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 5$ m.



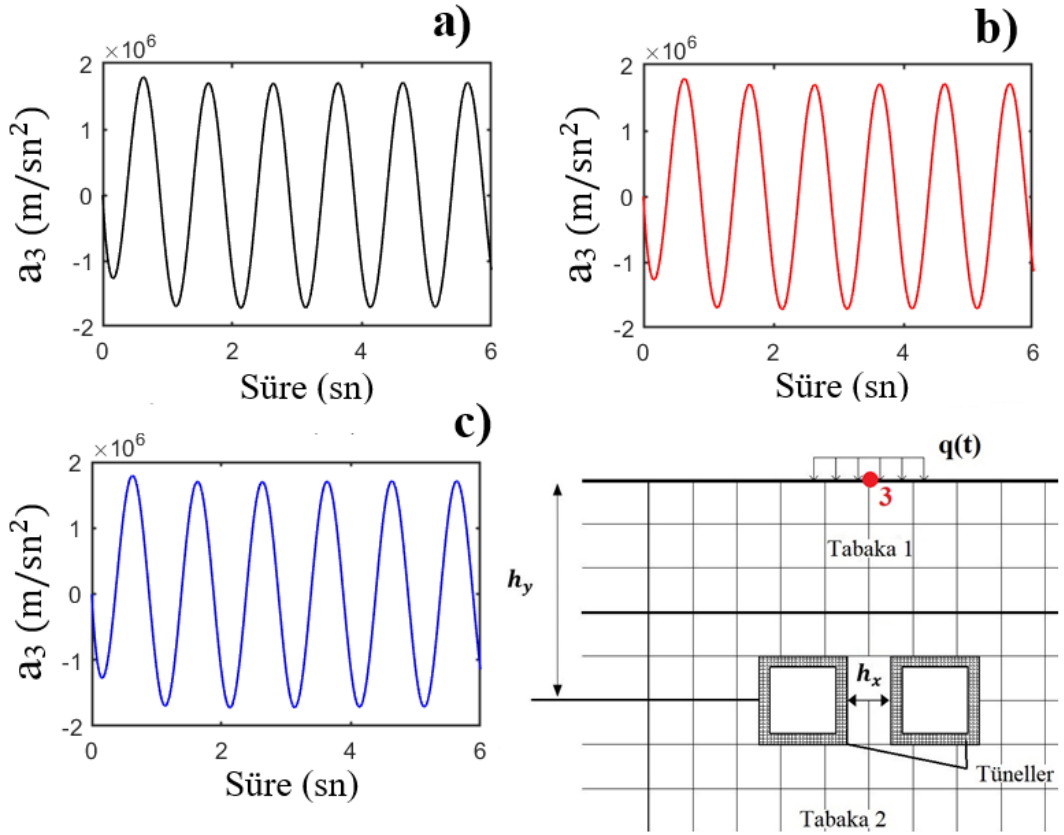
Şekil 4.49 : Tünellerin düşey konumlarının 3 noktası için dinamik düşey yer değiştirmeler açısından etkisi a) $h_y = 10$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 5$ m.



Şekil 4.50 : Tünellerin düşey konumlarının 1 noktası için dinamik düşey ivmeler açısından etkisi a) $h_y = 10$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 5$ m.



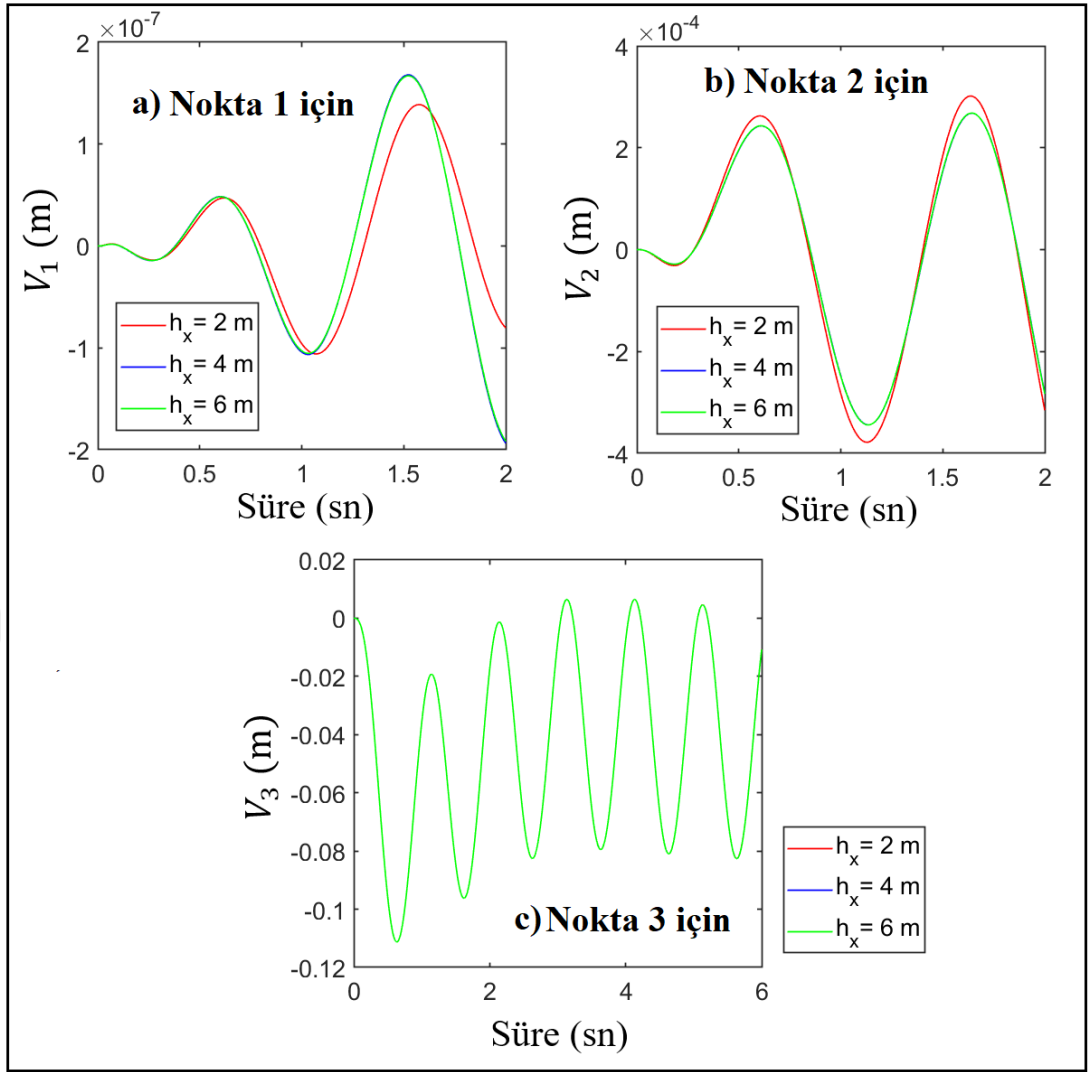
Şekil 4.51 : Tünellerin düşey konumlarının 2 noktası için dinamik düşey ivmeler açısından etkisi a) $h_y = 10$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 5$ m.



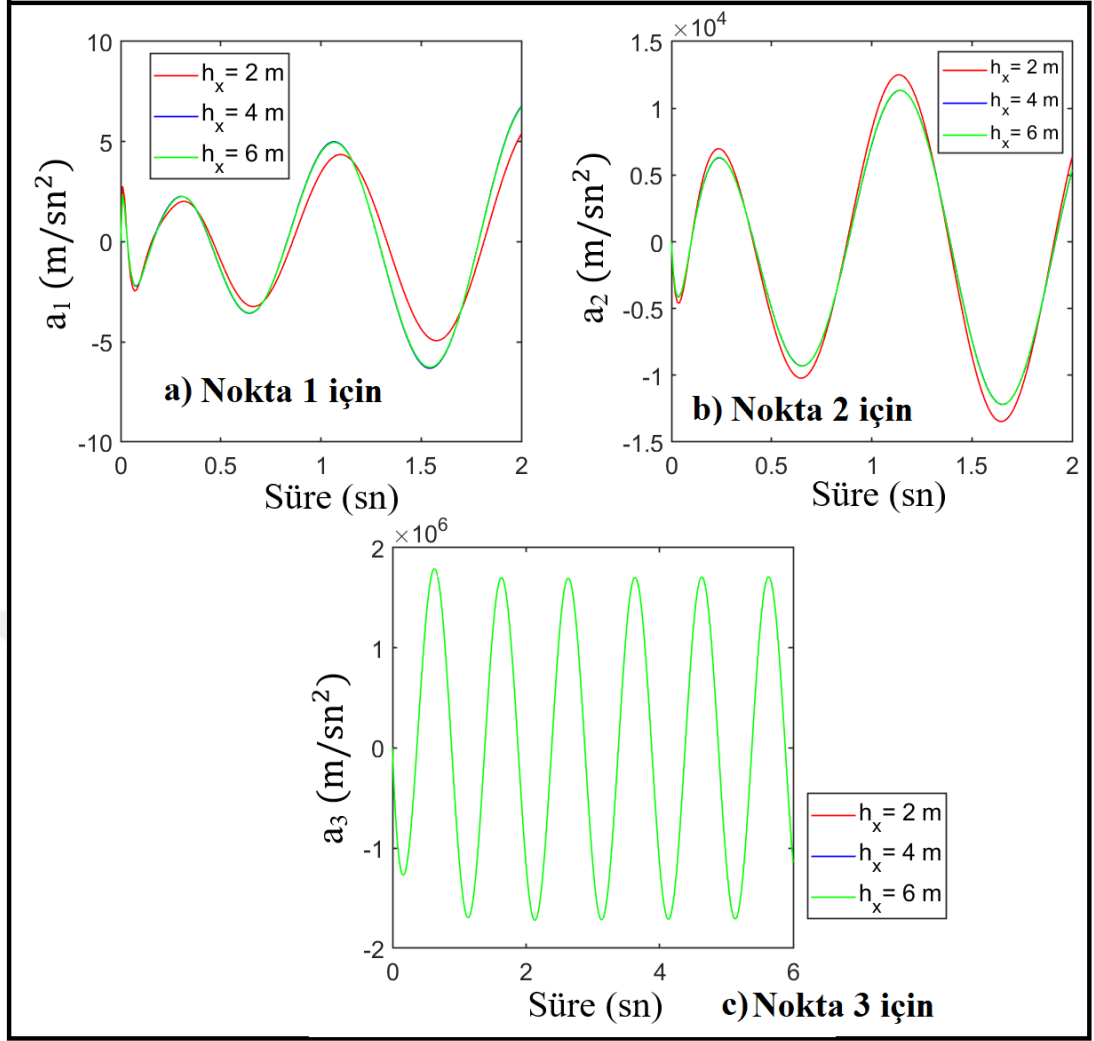
Şekil 4.52 : Tünellerin düşey konumlarının 3 noktası için dinamik düşey ivmeler açısından etkisi a) $h_y = 10$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 5$ m.

Şekillerden görülebileceği gibi Şekil 4.48 - 4.52'de h_y azaldıkça, yani ikiz tünel ortam yüzeyine yaklaştıkça, ortamdaki tüm noktaların yer değiştirmeleri ve ivmeleri önemli ölçüde artmaktadır. Kullanılan parametrelerde birinci tabakanın rijitliği, ikinci tabakanın rijitliğine göre oldukça düşüktür. Bu durumdan dolayı birinci tabakadaki bölgelerde dalgalar çok daha yavaş hareket eder. Tünellerin konumu birinci tabakadaki ortam seviyesine yaklaştıkça dinamik yükten kaynaklanan dalga sayısı ve dalga hızı ciddi şekilde artmıştır. Tabaka 1 ile tabaka 2 arasındaki arayüzde dalgalar kırılır, dolayısıyla dalgalar aniden değişir. Bu durum ikinci noktanın sonuçlarından açıkça görülmektedir. İkinci nokta yüzeye yaklaştıkça dalga sayısı önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca, tünel duvarlarından yansıyan dalgalar, yani iki tünel arasında kalan 1 noktası, tünel duvarlarından yansıyan dalgalara maruz kalmaktadır. Şekil 4.49 ve şekil 4.52'deki üçüncü noktada, yüzeydeki dinamik tepkiler harmonik yük etkisini tam olarak yansıtmaktadır. Tünellerin ortamdaki konumu yüzeyde herhangi bir değişikliğe neden olmamıştır.

Bu grafiklerden çıkan bir diğer sonuç ise, ortam derinliğine ve rijitliğine bağlı olarak dinamik sonuçların belirli bir süre sonra ortaya çıkmasıdır. Şekil 4.49 ve 4.52'deki birinci noktada oluşan sonuçlarda, özellikle tüneller arasındaki dalga yansıması nedeniyle süreç boyunca dinamik sonuçlar giderek artmıştır. Normal şartlarda problemde viskoelastik model kullanıldığından, dalgalar yavaş yavaş emilmektedir. Birinci noktanın sonuçlarından görüldüğü gibi, tünel duvarlarından yansıması sonucu meydana gelen ek dalgalar olabileceğinden dalgalar artmaktadır. Tünelin rijitliği ortama göre daha büyük olduğundan tünelden yansıyan dalgalar ve tünele yakın noktalar, dinamik etkilere daha çok maruz kalabilmektedir. Bu durum dinamik analizde daha gerçekçi çözüm elde etmek için tünel-ortam etkileşiminin çok önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle tünel yapılarının tasarımında ve analizinde etkileşim analizinin dikkate alınması gerekmektedir. Şekil 4.49 ve 4.52'de tünellerin konumlarındaki değişimin üçüncü noktanın yüzeyde olması nedeniyle dinamik tepkilerine etkisi olmadığı için ortam parametrelerinin etkisi görülmemektedir.



Şekil 4.53 : Tüneller arası mesafenin (h_x), dinamik düşey yer değiştirmeler açısından etkisi a) Nokta 1 için b) Nokta 2 için, c) Nokta 3 için.



Şekil 4.54 : Tüneller arası mesafenin (h_x), dinamik düşey ivmeler açısından etkisi a) Nokta 1 için b) Nokta 2 için, c) Nokta 3 için.

Şekil 4.53 ve 4.54'te yüzeye yakın tabaka geçiş noktasında yer alan ikiz tüneller arasındaki mesafenin artması sonucunda 3 farklı noktadaki düşey yer değiştirmeler ile ivme arasında dikkat çekici sonuçlar ortaya çıkmıştır. Birinci noktada, iki tünel arasındaki yansıma nedeniyle dalga genliği artmıştır. İki tünel arasındaki mesafe arttıkça dalga boyu artışında herhangi bir etki görülmemiştir. İkinci noktadaki dinamik sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. İkiz tünellerin birbirine yakın olduğu durumda dinamik sonuçlar önemli ölçüde artmıştır. Tünellerin farklı konumlarda olması üçüncü noktadaki düşey yer değiştirme ve ivmeleri değiştirmemiştir. Belirli bir mesafeden sonra tüneller arasındaki mesafenin, ortamda dikkate alınan noktaların dinamik tepkileri üzerinde etkisi olmamıştır.

Bu incelemeler sonucunda elde edilen temel sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir:

- Tünelin konumu yarı sonsuz ortamın dinamik tepkileri üzerinde önemli rol oynar.

- Tünelde yakın alanda, tünel-ortam etkileşimi nedeniyle diğer yarı sonsuz ortam alanlarının aksine dinamik tepkiler daha fazla etkilenir.
- Tünel duvarlarından yansıyan dalgalar ortamda artan dinamik etkilere yol açar. Bu nedenle tünel yapılarının tasarım ve analizinde etkileşim analizinin dikkate alınması gerekmektedir.
- Tünel ve ortam üzerindeki dinamik etkilerin azaltılmasında ikiz tünelin konumu tasarımda çok önemli bir parametredir.
- Ayrıca yarı sonsuz ortamda tabakalar dinamik yüklerin dalga yayılımında çok etkilidir. İkiz tünelin dinamik davranışında ikiz tünelin yerleşimi uygun bir tabaka üzerinde seçilmelidir.
- Pratik uygulamalar için önemli bir sonuç, bu tür problemlerin hesaplama maliyetinin azaltılabileceği, daha gerçekçi sonuçların elde edilebileceği ve kullanılan sonsuz elemanlı model ile tüm sınır koşullarının dikkate alınabileceğidir.

4.2 Doğrusal Olmayan Analizler

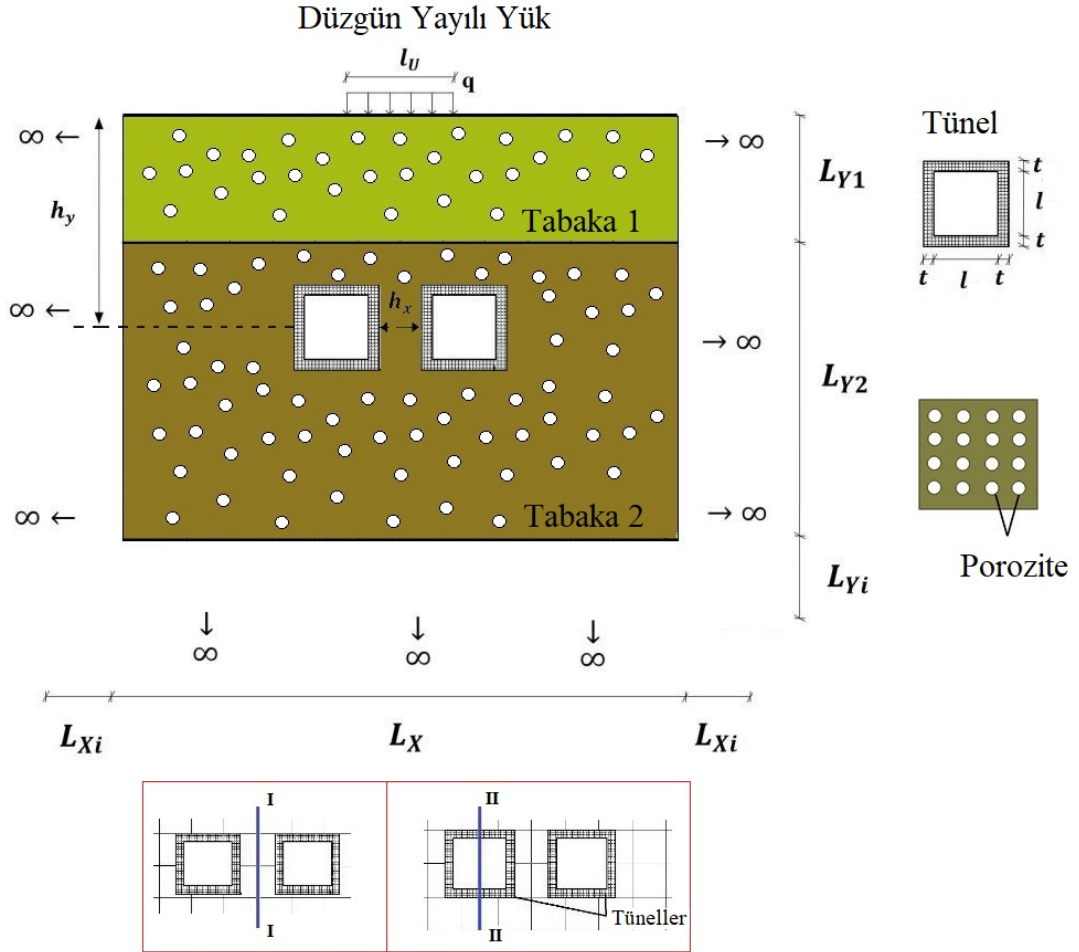
Doğrusal olmayan statik ve dinamik analizlerde bilineer gerilme-şekil değiştirme malzeme modeli kullanılmış olup, yarı sonsuz ortam izotropik kabul edilmiştir. Sayısal sonuçlarda statik analizlerde düşey yer değiştirme davranışları bulunmuş, dinamik analizlerde ise belli bir zaman aralığında düşey yer değiştirme ve ivme sonuçları gösterilmiştir.

4.2.1 Doğrusal olmayan statik analiz sonuçları

İlk etapta ikiz tünel içeren doğrusal olmayan bilineer malzeme modeli kullanılarak oluşturulan yarı sonsuz ortamda statik analiz gerçekleştirilmiştir. Tabakalı, doğrusal olmayan, gözenekli, yarı sonsuz ortamın statik davranışı, ikiz kare tünellerin konumuna bağlı olarak incelenmiştir. Tünellerin konumuna bağlı olarak yarı sonsuz ortamdaki statik düşey yer değiştirmeleri, bilineer elastik malzeme modeli kullanılarak yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.55'te, düzgün yayılı yük altında düzgün dağıtılmış poroziteye sahip tabakalı yarı sonsuz ortamdaki ikiz tünelleri göstermektedir. Sonlu bölgenin ortam boyutları yatay yönde L_X ile, dikey yönde birinci tabaka L_{Y1} , ikinci tabaka dikey yönde L_{Y2} olarak gösterilmiştir. Sonsuz bölgenin boyutları sırasıyla yatay ve dikey yönlerde L_{Xi}

ve L_{Yi} olarak ifade edilmiştir. Her kare tünelin iç uzunluğu l olarak, tünel kalınlıkları ise t olarak belirtilmiştir. Tüneller arası mesafe h_x olarak, tünellerin yüzeye olan mesafesi ise h_y olarak gösterilmiştir. l_U uzunluğundaki düzgün yayılı q yükü, ortamın orta yüzeyinden gelen yük olarak verilmiştir.



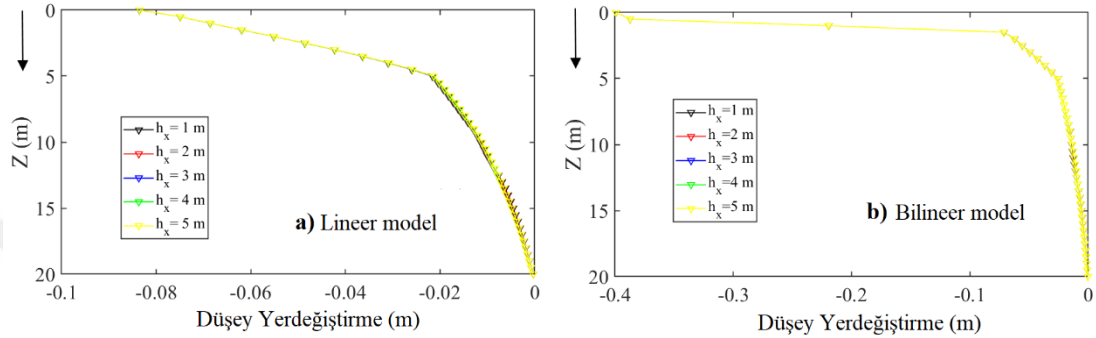
Şekil 4.55 : Düzgün yük altında ikiz tünellere sahip iki tabakalı yarı sonsuz gözenekli ortam.

Sayısal çözümlerde, düzgün yük altında tabakalı, elasto-plastik, gözenekliliğe sahip ortam modellenmiştir. (Şekil 4.55). Yarı sonsuz bir ortamdaki düşey yer değiştirmeler lineer-elastik ve bilineer bünye modelleri için karşılaştırılmıştır. Yarı sonsuz ortamın boyutları şu şekilde dikkate alınmıştır; $L_X = 20$ m, tabaka 1 düşey uzunluğu $L_{Y1} = 5$ m, tabaka 2 $L_{Y2} = 15$ m, sonsuz elemanlar $L_{Xi} = 10$ m $L_{Yi} = 20$ m, $h_y = 10$ m. ve kare tünel iç genişliği $l = 3$ m., tünel kalınlığı $t = 0.5$ m. Tünel malzemesi doğrusal elastik olarak düşünülmüştür. Bu analizde kullanılan malzeme parametreleri parametreleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. $\sigma_o = 5.35 * 10^7$ Pa ve $\sigma_e = 6 * 10^7$ Pa

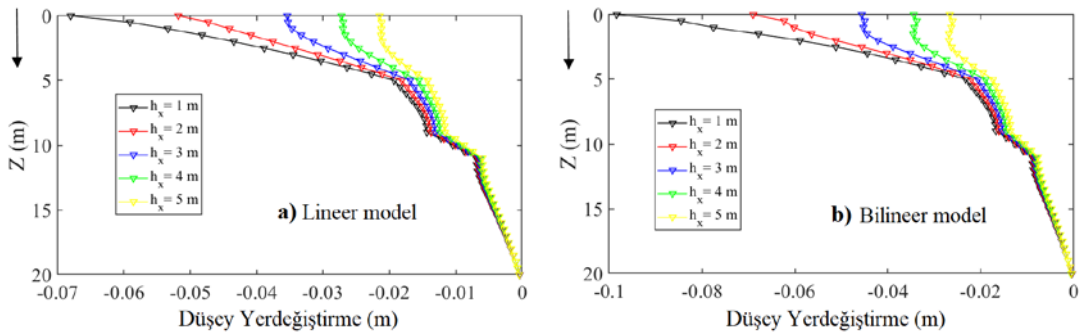
olarak alınmıştır. Düzgün yayılı yük $q = 63000 \text{ kN/m}$ ve $l_U = 5 \text{ m}$ 'dir. Sayısal sonuçlarda $n_x = n_y = 40$ sonlu eleman ve 122 sonsuz eleman kullanılmıştır.

Çizelge 4.5 : Doğrusal olmayan statik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

	$E_1 \text{ (Pa)}$	ν	$E_2 \text{ (Pa)}$	ν
Tabaka 1	$5 * 10^9$	0.33	$5 * 10^8$	0.33
Tabaka 2	$20 * 10^9$	0.33	$2 * 10^9$	0.33
Tüneller (Løkke and Chopra, [2018])	$34.5 * 10^9$	0.2	-	-



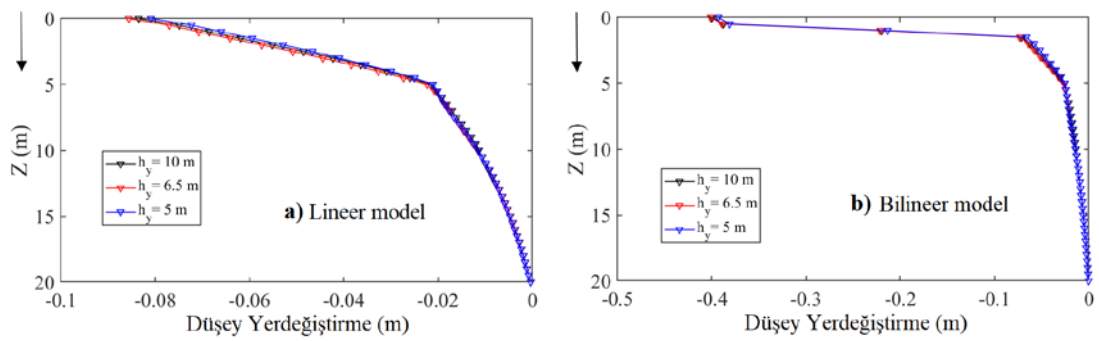
Şekil 4.56 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_y = 10 \text{ m}$, $p = 0.3$) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.



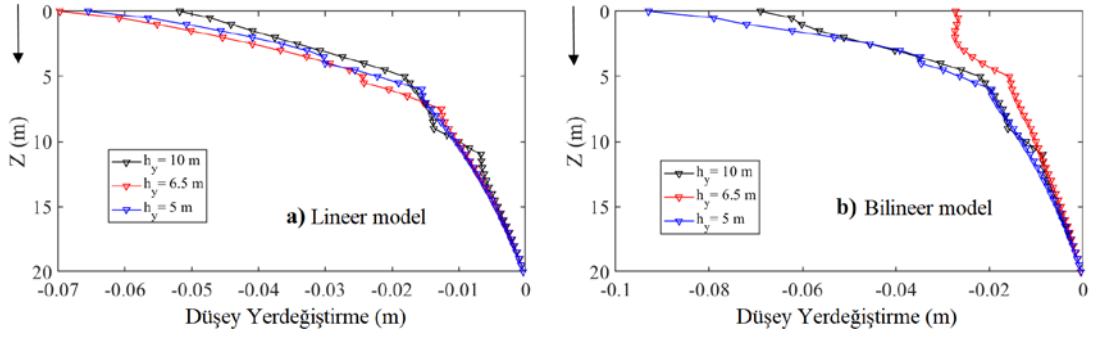
Şekil 4.57 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_y = 10 \text{ m}$, $p = 0.3$) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.

Şekil 4.56 ve 4.57'de, düzgün yayılı yük altındaki, düzgün yayılı poroziteye sahip tabakalı yarı sonsuz ortamda ikiz tünellerin ortam içindeki farklı yatay konumlarına bağlı olarak I-I ve II-II kesitlerindeki düşey yer değiştirme dağılımı gösterilmiştir. Ortam porozite oranı $p = 0.3$, tüneller ortamda sabit tutulmuş olup $h_y = 10 \text{ m}$ olarak alınmıştır. Doğrusal malzeme modeli ve doğrusal olmayan malzeme modeli sonuçları karşılaştırılmıştır. Tüneller arası mesafe sırayla h_x , 1 m'den 5 m'ye kadar artırılmıştır. I-I kesitinde tüneller arası mesafe artışı yer değiştirmelerde ciddi bir değişiklik oluşturmamıştır. Doğrusal model ve doğrusal olmayan modeldeki yer

değişiklikler karşılaştırıldığında, doğrusal olmayan modelde yerdeğişiklikler çok fazla artmıştır. Rijitliğin değiştiği, tabaka geçiş bölgesinde yerdeğişikliklerdeki değişim, belirgin bir şekilde görülmektedir. Doğrusal olmayan modelde ise, özellikle doğrusal olmayan bölgeyi temsil eden gerilme-şekil değiştirme eğrisinde ikinci bölgeye geçişle birlikte, yük etkisine yakın bölgedeki değişim çok fazladır. Şekil 4.57’de II-II kesitindeki düşey doğrultudaki yer değişiklikleri gösterilmiştir. Bu kesitte yük etki bölgesinden uzaklaşıldığı için, düşey yer değişikliklerinin gösterildiği doğrusal olmayan modelde çok büyük bir artış gözlenmemiştir. Doğrusal olmayan modeldeki yer değişiklikleri, doğrusal model sonuçlarına göre daha büyük çıkmıştır. Tüneller arası mesafenin artışıyla birlikte yük etkisinden uzaklaşıldığı için, yüzeye yakın bölgedeki düşey yer değişikliklerinde düşüş gözlenmiştir. Tünellerin birbirine yakın olduğu durumda, II-II kesiti yük etkisine yakın bölgede kaldığından yer değişiklikleri, yüzeye yakın bölgeye doğru, doğrusal olarak artmıştır. Tünellerin birbirinden uzaklaşmasıyla birlikte, etkileşim bölgesinden uzaklaşıldığında, ortam yer değişiklikleri azalmış ve yüzeye doğru azalan parabolik bir forma dönüşmüştür. Tabaka geçiş bölgesinde rijitlik değişimi ve tünellerin bulunduğu konumda ani artan rijitlik farkı, grafiklerde belirgin bir şekilde görülmektedir. Tüneller içindeki boşlukta rijitliğin olmamasından dolayı, sonlu eleman bazında yer değiştirme olmamış olup, eleman bazında yer değişikliklerine bağlı olarak ötelenme durumu gerçekleşmiştir. Bu durumdan dolayı bu bölgedeki yer değişiklikleri lineer azalan bir formda ortaya çıkmıştır.

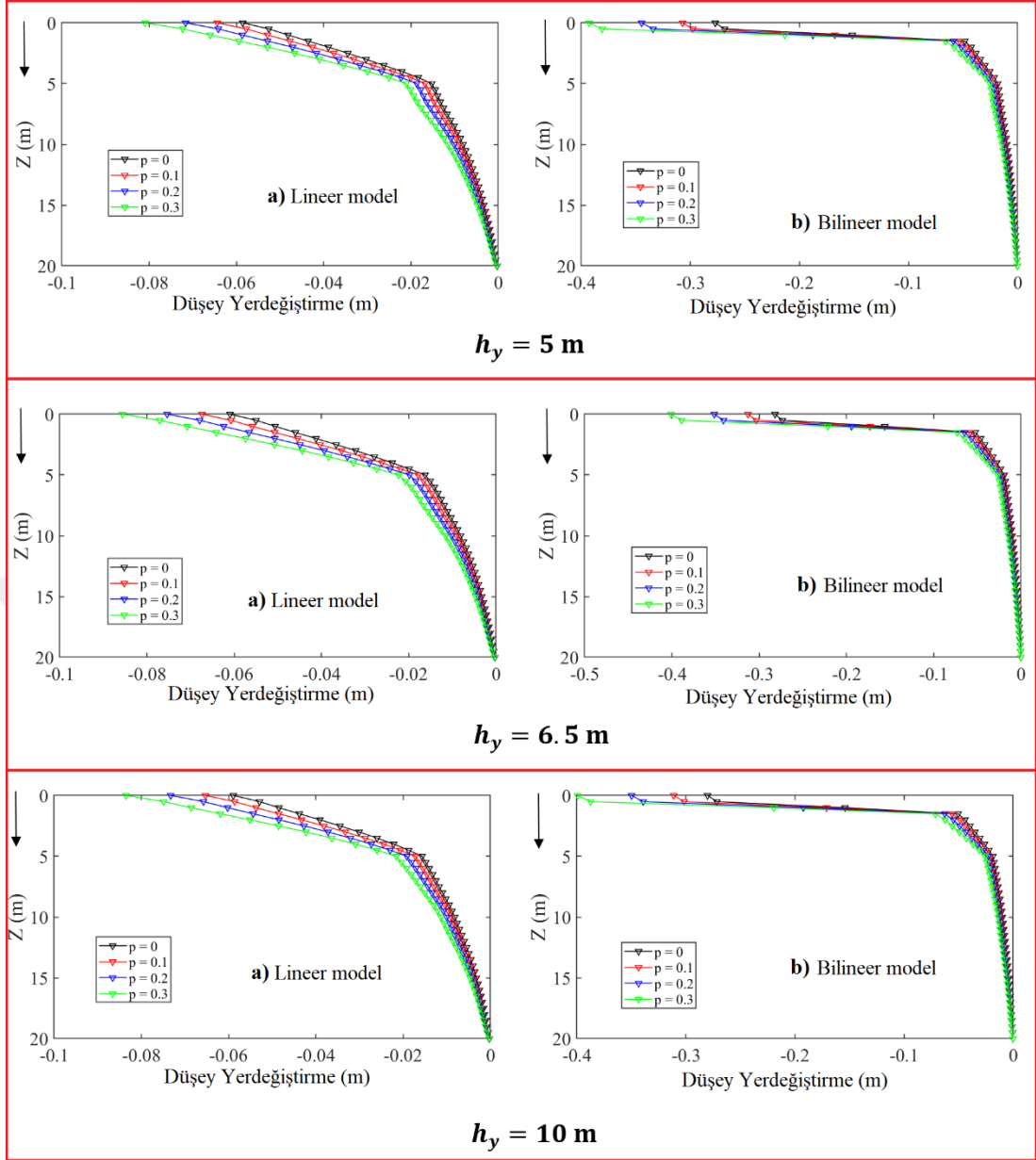


Şekil 4.58 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_x = 2$ m, $p = 0.3$) ortam derinliği boyunca düşey yer değişiklikleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.

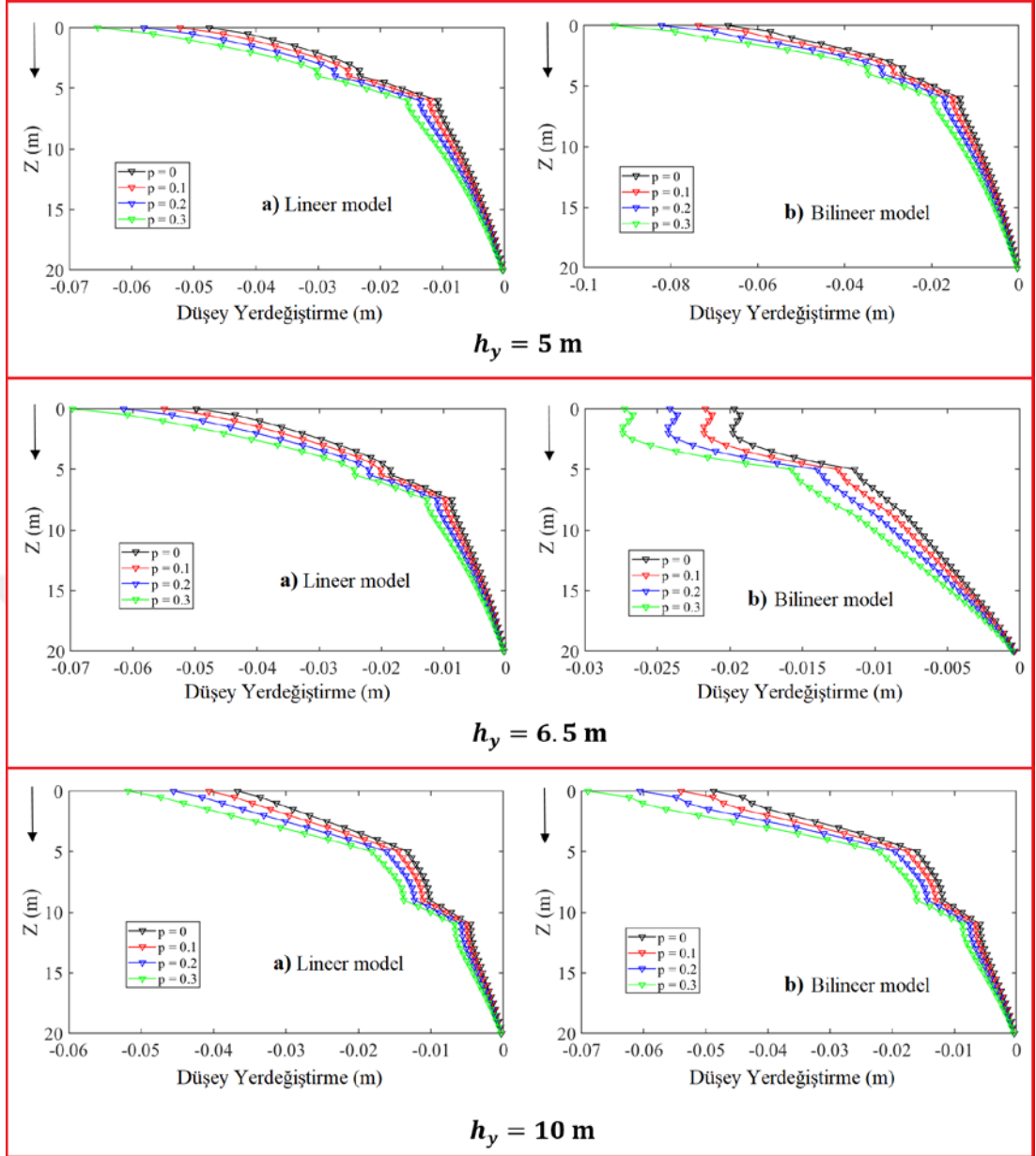


Şekil 4.59 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_x = 2$ m, $p = 0.3$) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.

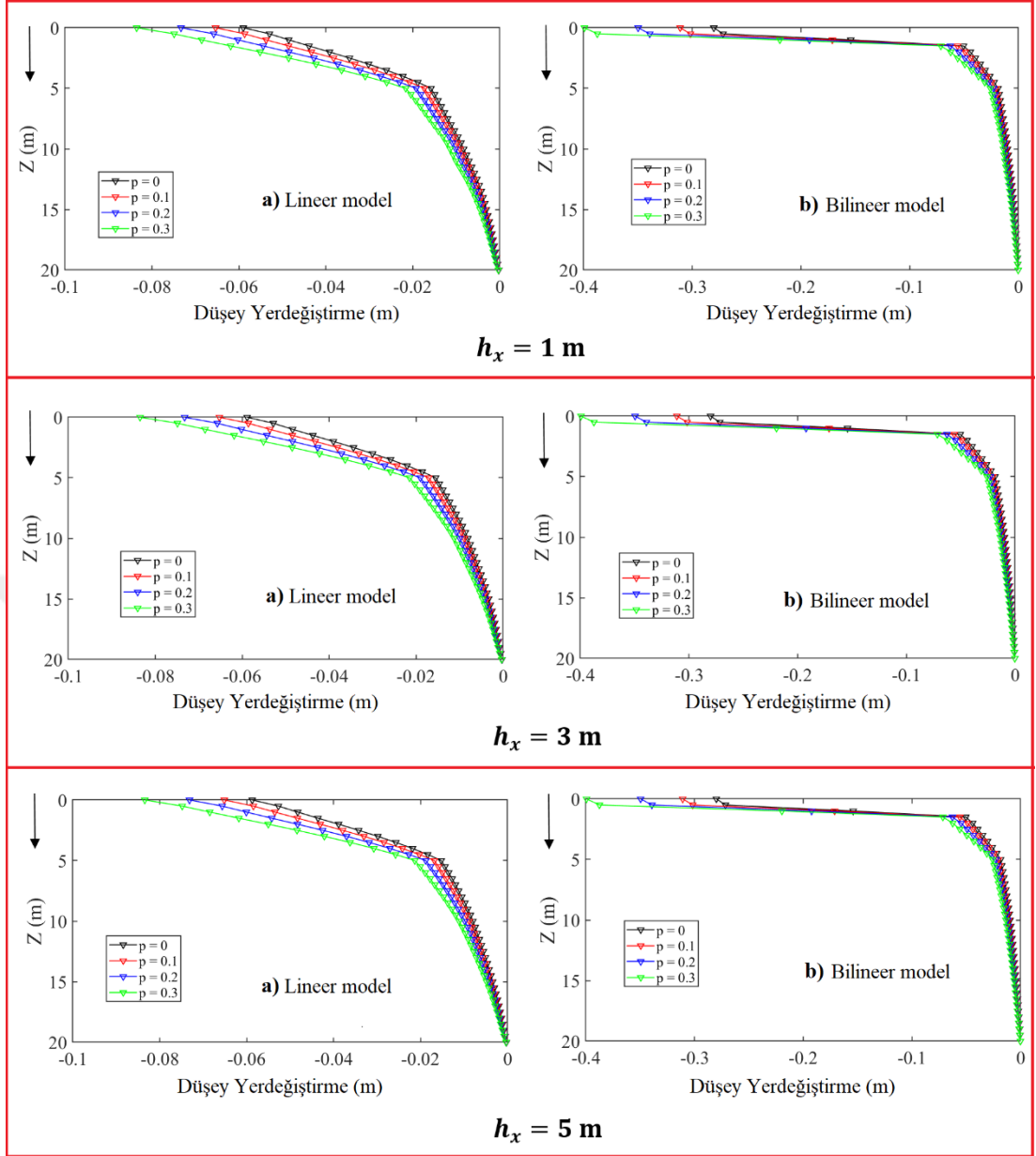
Şekil 4.58 ve 4.59’da düzgün yayılı yük altındaki ikiz tünel içeren, porozite oranı $p = 0.3$ olan tabakalı yarı sonsuz ortamda tüneller arası mesafe sabit olup $h_x = 2$ m, tünellerin yüzeye yaklaşması durumunda I-I ve II-II kesitlerinde meydana gelen düşey yer değiştirmeler gösterilmiştir. Şekil 4.58’de tüneller arası mesafe artışı, yer değiştirmeleri ciddi bir şekilde değiştirmemiştir. Tüneller yüzeye yaklaştıkça, yer değiştirmeler artmıştır. Doğrusal modelde oluşan yerdeğiştirmelerin, tabaka geçiş bölgesinden itibaren azalan rijitlikle birlikte, yüzeye doğru yer değiştirmeleri çok daha fazla arttırarak devam ettiği görülmüştür. Doğrusal olmayan modelde ise, ortamın plastik bölgeye geçişiyle birlikte, yük etkisinin yoğun olduğu, yüzeye yakın bölgedeki yer değiştirme çok belirgindir. Şekil 4.59’da II-II kesitindeki yer değiştirmeler incelendiğinde, doğrusal olmayan modeldeki yer değiştirmeler daha büyük çıkmıştır. En az düşey yer değiştirme, doğrusal modelde tünellerin yüzeye en yakın olduğu durumda, en fazla yer değiştirme ise tünellerin tabaka geçiş noktasına değdiği durumda oluşmuştur. Doğrusal olmayan modelde en fazla yer değiştirme, tünellerin yüzeye en yakın olduğu durumda, en az yer değiştirme ise tünellerin tabaka geçiş noktasına değdiği durumda oluşmuştur. Ortamın plastik bölgeye geçişiyle birlikte, yer değiştirmeler ciddi bir şekilde artmıştır. Tünellerin düşey konum olarak tabaka geçiş bölgesinde yer aldığı durumda rijitliklerin değişmesiyle birlikte, ortamın yüzeye yakın bölgesinin bir kısmının plastik bölgeye geçişiyle birlikte, düşey yer değiştirmeler ciddi şekilde azalmıştır. Grafikler irdelendiğinde, yer değiştirme geçişlerine bakılarak tünel konumları belirgin bir şekilde görülebilmektedir.



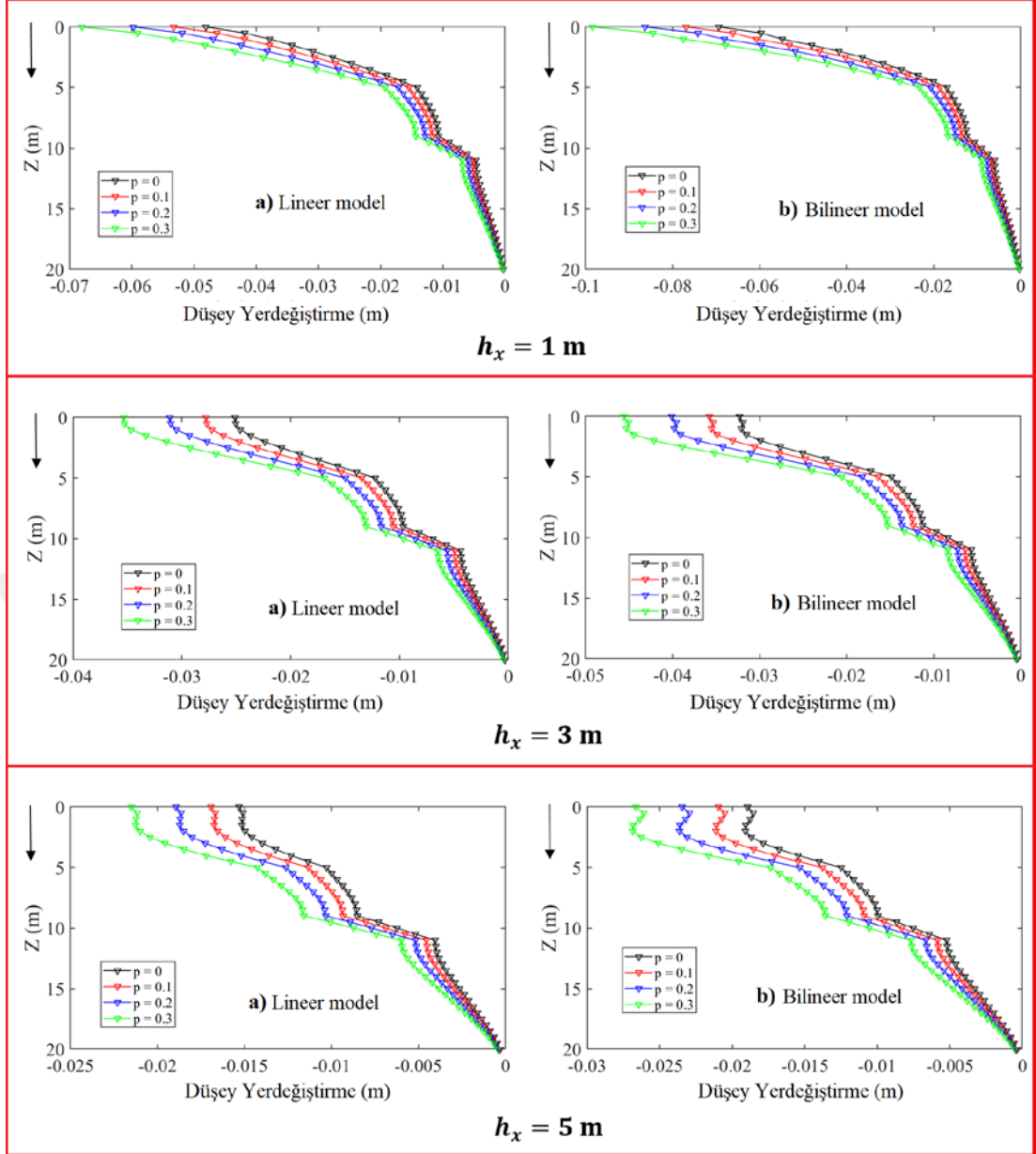
Şekil 4.60 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_x = 2$ m) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.



Şekil 4.61 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin düşey konularının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_x = 2$ m) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.



Şekil 4.62 : Düzgün yayılı yük altında I-I kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_y = 10$ m) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.



Şekil 4.63 : Düzgün yayılı yük altında II-II kesiti için tünellerin düşey konumlarının gözenekli ortam yüzeyinden ($h_y = 10$ m) ortam derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri. a) Lineer model, b) Bilineer model.

Şekil 4.60 ve 4.61’de artan porozite oranlarının ve farklı düşey konumlarda bulunan ikiz tünellerin ($h_x = 2$ m), düşey yer değiştirmelere etkisi incelenmiştir. Şekil 4.60’ta porozite oran artışı sonucu, rijitliklerin düşmesiyle birlikte yer değiştirmeler artmıştır. Doğrusal malzeme modeli ve doğrusal olmayan malzeme modeli karşılaştırıldığında, plastik bölgeye geçişle, özellikle yüzeye yakın bölgedeki artış çok daha fazla olmuştur. Şekil 4.61’de II-II tünel orta düşey kesitinde yer değiştirmeler her iki modelde de artan porozite oranıyla birlikte artmıştır. Yer değiştirmeler arasındaki en belirgin fark, tünellerin $h_y = 6.5$ m olduğu konumda, artan porozite oranı ve plastik bölgeye geçişle

birlikte oluşmuştur. Doğrusal olmayan modelde $h_y = 10$ m ve $h_y = 5$ m olduğu durumlarda yüzeye doğru yer değiştirmeler lineer olarak artış gösterirken, diğer durumda yüzeye doğru artış parabolik bir formda azalmaktadır.

Şekil 4.62 ve 4.63'te artan porozite oranlarının ve düşey konumu sabit ($h_y = 10$ m) tüneller arası mesafe artışının düşey yer değiştirmelere etkisi araştırılmıştır. Artan porozite oranı I-I kesitinde düşey yer değiştirmeleri arttırmış, tüneller arası mesafe artışı düşey yer değiştirmeleri çok fazla etkilememiştir. Doğrusal olmayan modelde yüzeye yakın plastik bölgede artan porozite oranı yer değiştirmeleri ciddi oranda arttırırken, bu fark yüzeyden uzaklaştıkça büyük oranda azalmıştır. Şekil 4.63'te ortam düşey konumu sabit ($h_y = 10$ m) II-II kesiti için yer değiştirmeler incelenmiştir. Porozite oranı artışıyla birlikte yer değiştirmeler her iki modelde de artmıştır. Tüneller arası mesafe artışıyla yük etkisinden uzaklaşmış ve yer değiştirmeler azalmıştır. Doğrusal olmayan modelde bu değişim çok daha belirgin olarak görülmektedir. Tüneller birbirinden uzaklaştıkça elastik bölgede kalmaktadır. Bu yüzden yer değiştirmeler orantılılık sınırından çıktıkça yüzeye yakın bölgedeki yer değiştirmeler lineer formdan çıkıp, sönüm etkisiyle azalan parabolik bir forma dönüşmektedir.

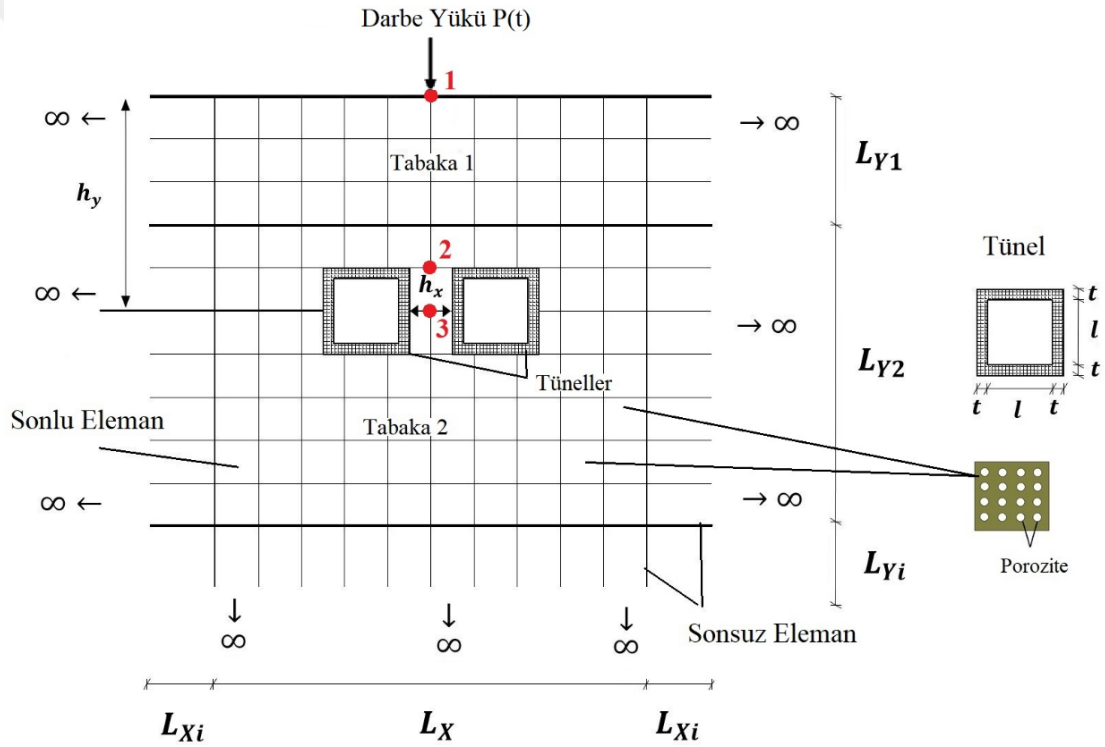
Sonuç olarak tünellerin ortam içindeki konumları, birbirlerine göre durumları, ortam porozite oranları, doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme modelinde ciddi farklılıklar ortaya çıkarmaktadır. Gerçekçi sonuçlara yaklaşmak amacıyla doğrusal olmayan ortam modelinde alınan sonuçlar ciddi olarak farklılıklar ortaya çıkarmaktadır. Analizlerde özellikle tabaka geçiş bölgesine konumlandırılmış ortamda doğrusal olmayan malzeme modelinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Statik yer değiştirmelerde, tünel konumunun ortam ve tünel stabilitesi açısından optimum bir noktada konumlandırılması veya bu duruma bağlı olarak gerekli tedbirlerin alınıp ikiz tünellerin inşası önerilmektedir.

4.2.2 Doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları

İkiz tünel içeren poroziteli, tabakalı yarı sonsuz ortamda doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Tabakalı, bilineer, gözenekli, yarı sonsuz ortamın doğrusal olmayan dinamik davranışı, ikiz kare tünellerin konumuna bağlı olarak incelenmiştir. Tünellerin konumuna bağlı olarak yarı sonsuz ortamdaki belli bir zaman tanım alanında, darbe yükü altında dinamik düşey yer değiştirmeleri, lineer elastik ve

Kelvin Voigt elastoplastik modelleri kullanılarak yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.64'te, noktasal darbe yükü altında, düzgün dağıtılmış poroziteye sahip tabakalı yarı sonsuz ortamdaki ikiz tünelleri gösterilmektedir. Sonlu bölgenin ortam boyutları yatay yönde L_X ile, dikey yönde birinci tabaka L_{Y1} , ikinci tabaka dikey yönde L_{Y2} olarak gösterilmiştir. Sonsuz bölgenin boyutları sırasıyla yatay ve dikey yönlerde L_{Xi} ve L_{Yi} olarak ifade edilmiştir. Her kare tünelin iç uzunluğu l olarak, tünel kalınlıkları ise t olarak belirtilmiştir. Tüneller arası mesafe h_x olarak, tünellerin yüzeye olan mesafesi ise h_y olarak gösterilmiştir. Ortam üst orta yüzeyinden, belirli bir zaman aralığında uygulanan darbe yükü $P(t)$ şekilde gösterilmiştir.



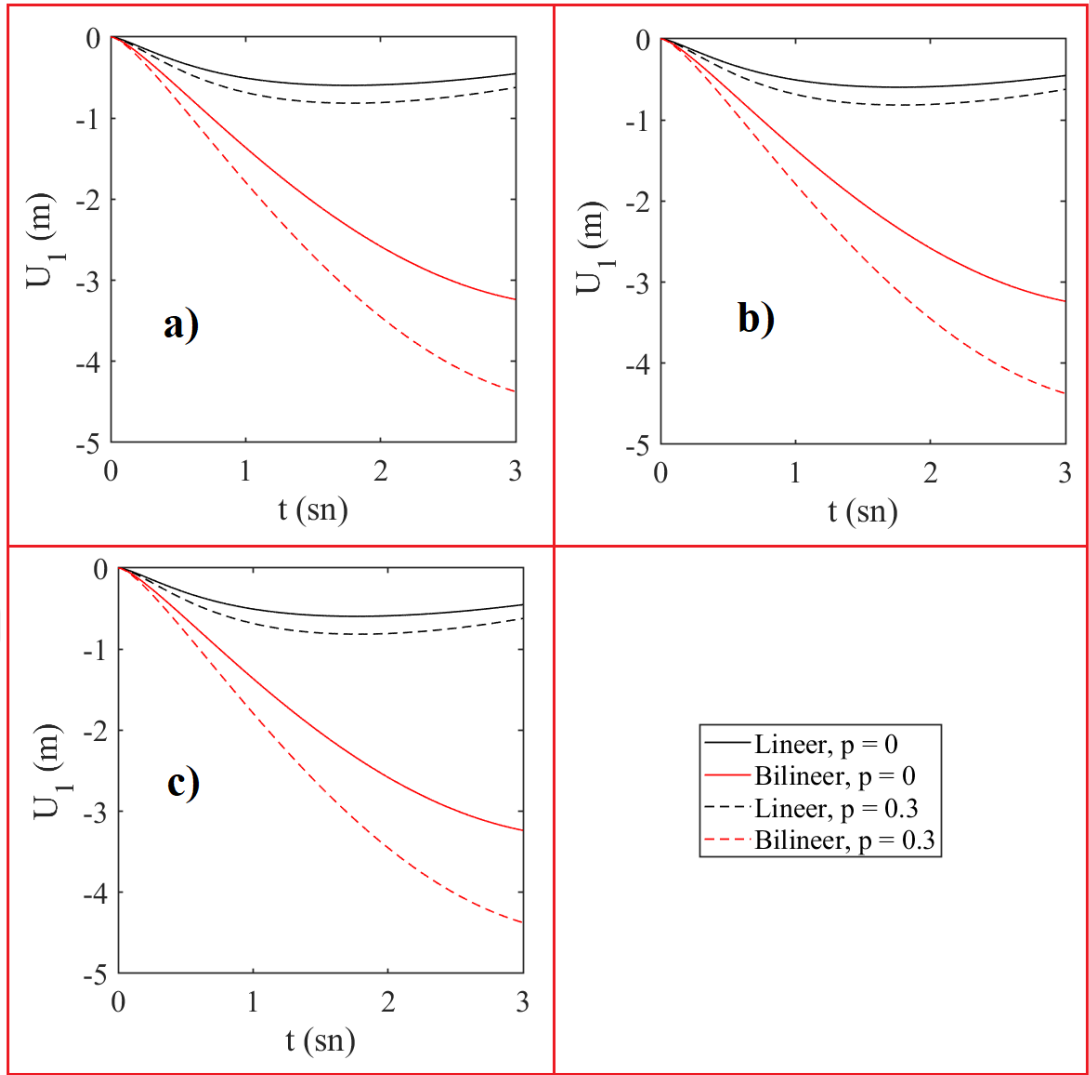
Şekil 4.64 : Darbe yükü altında ikiz tünellere sahip iki tabakalı yarı sonsuz elasto-plastik gözenekli ortam.

Sayısal çözümlerde, darbe yüklü tabakalı elasto-plastik gözenekliliğe sahip ortam modellenmiştir. (Şekil 4.64). Yarı sonsuz bir ortamdaki düşey yer değiştirmeler hem doğrusal elastik ve doğrusal olmayan ortamlar için karşılaştırılmıştır. Bu analizde malzeme parametreleri ve tünel parametreleri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Tünel malzemesi doğrusal elastik olarak düşünülmüştür. $\sigma_o = 22 * 10^8$ Pa ve $\sigma_e = 30 * 10^8$ Pa olarak alınmıştır.

Noktasal darbe yükü $P(t)$ belli bir zaman aralığında azalan doğrusal fonksiyon şeklinde tanımlanmıştır. Newmark Beta yöntemi kullanılarak 0-3 sn aralığında uygulanan darbe yükü 3. saniyeye gelindiğinde viskoelastik özellikten dolayı 0 (sıfır) olmaktadır. Sayısal sonuçlarda $n_x = n_y = 20$ sonlu eleman ve 62 sonsuz eleman kullanılmıştır.

Çizelge 4.6 : Doğrusal olmayan dinamik analizlerde kullanılan malzeme ve geometrik parametreler

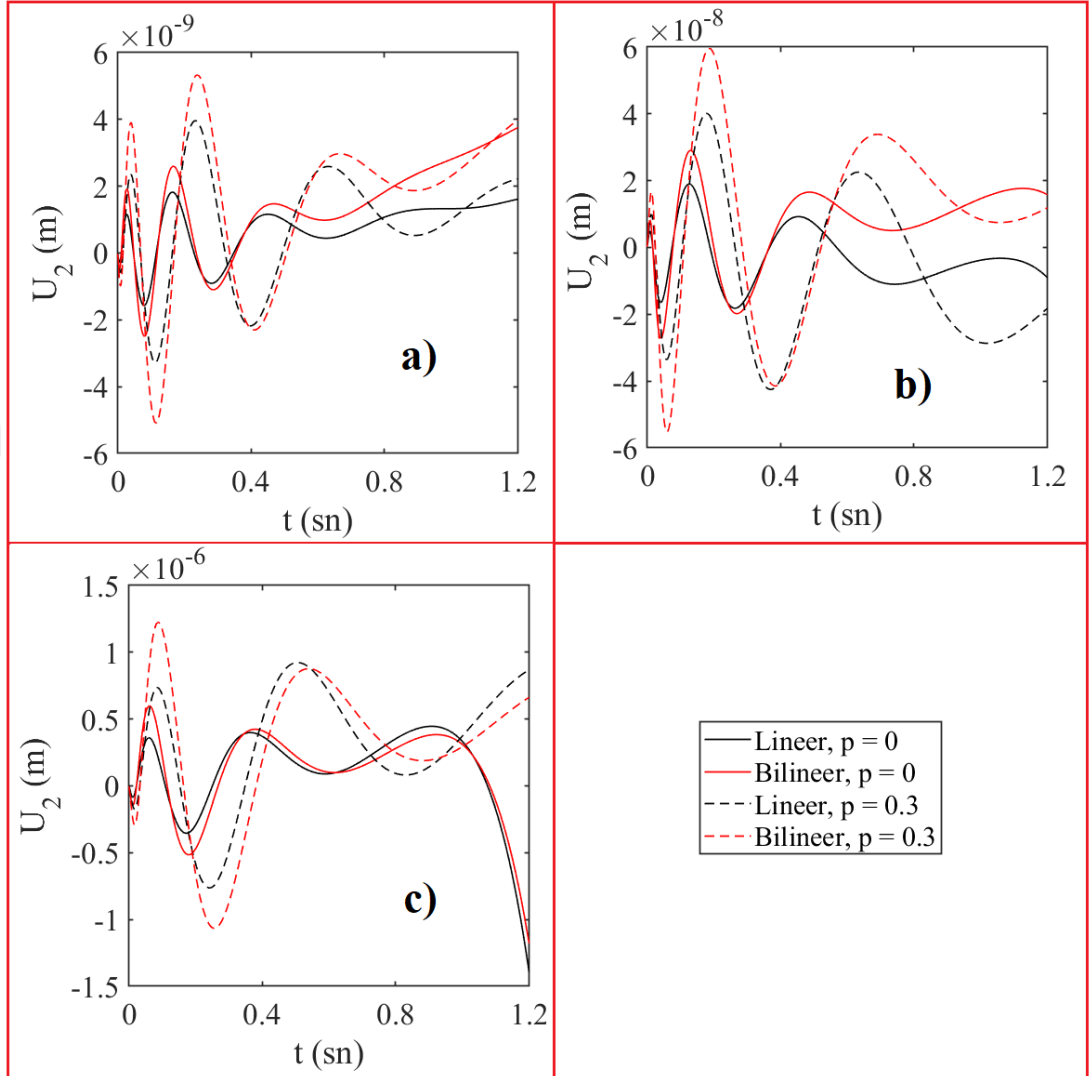
Parametre	Sembol	Referans	
Noktasal darbe yükü (N)	$P(t)$	50000×10^6	
Sönüm	c	0.0001	
Yatay doğrultuda sonlu eleman uzunluğu (m)	L_X	20	
Düşey doğrultuda sonlu eleman uzunluğu (m)	L_{Y1}	5	
Düşey doğrultuda sonlu eleman uzunluğu (m)	L_{Y2}	15	
Yatay doğrultuda sonsuz eleman uzunluğu (m)	L_{Xi}	10	
Düşey doğrultuda sonsuz eleman uzunluğu (m)	L_{Yi}	20	
Yatay ve düşey doğrultuda tünel iç uzunluğu (m)	l	4	
Yatay doğrultuda tünel kalınlığı (m)	t_x	1	
Düşey doğrultuda tünel kalınlığı (m)	t_y	1	
Birinci tabakanın Young modülleri (GPa)	E_1 E_2	5 0.5	(Hatzigeorgiou ve Beskos, 2010)
Birinci tabakanın Poisson oranı	ν_1	0.33	(Hatzigeorgiou ve Beskos, 2010)
Birinci tabakanın kütle yoğunluğu (kg/m^3)	ρ_1	1800	(Hatzigeorgiou ve Beskos, 2010)
İkinci tabakanın Young modülleri (GPa)	E_1 E_2	20 2	(Løkke ve Chopra, 2017)
İkinci tabakanın Poisson oranı	ν_2	0.33	(Løkke ve Chopra, 2017)
İkinci tabakanın kütle yoğunluğu (kg/m^3)	ρ_2	2643	(Løkke ve Chopra, 2017)
Tünellerin Young modülleri (GPa)	E_t	34.5	(Løkke ve Chopra, 2018)
Tünellerin kütle yoğunluğu	$\rho_{\text{tünel}}$	2403	(Løkke ve Chopra, 2018)
Tünellerin Poisson oranı	ν_t	0.20	(Løkke ve Chopra, 2018)



Şekil 4.65 : Tüneller arası mesafe sabit tutulup ($h_x = 2$ m), 1 noktasındaki dinamik düşey yer değiştirmelere, tünellerin yüzeyle arasındaki mesafenin etkisi a) $h_y = 9$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 7$ m.

Şekil 4.65'te, darbe yükü altında ikiz tünel içeren poroziteye sahip yarı sonsuz ortamdaki belli bir zaman tanım alanında oluşan yer değiştirmeler araştırılmıştır. Analizlerde doğrusal ve doğrusal olmayan ortam modelleri kullanılmıştır. İkiz tünellerin farklı düşey konumlarda bulunması durumunda, ortamın 1 noktasındaki düşey yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Uygulama noktasında, tünellerin farklı konumlarda bulunması durumu, yer değiştirmeleri ciddi oranda etkilememiştir. Yer değiştirmeleri, belirli bir süre aralığında uygulanan darbe yükü etkisi ilerleyen süre aralığında arttırmıştır. Yer değiştirmeler belirli bir ivmeyle artarken, belirli bir süre sonra yük etkisi azalarak yer değiştirmeler azalan parabolik bir formda artış göstermiştir. Doğrusal olmayan malzeme modelindeki yer değiştirme, doğrusal malzeme modeline göre çok daha fazladır. Porozite oranları arttıkça, azalan rijitlikle

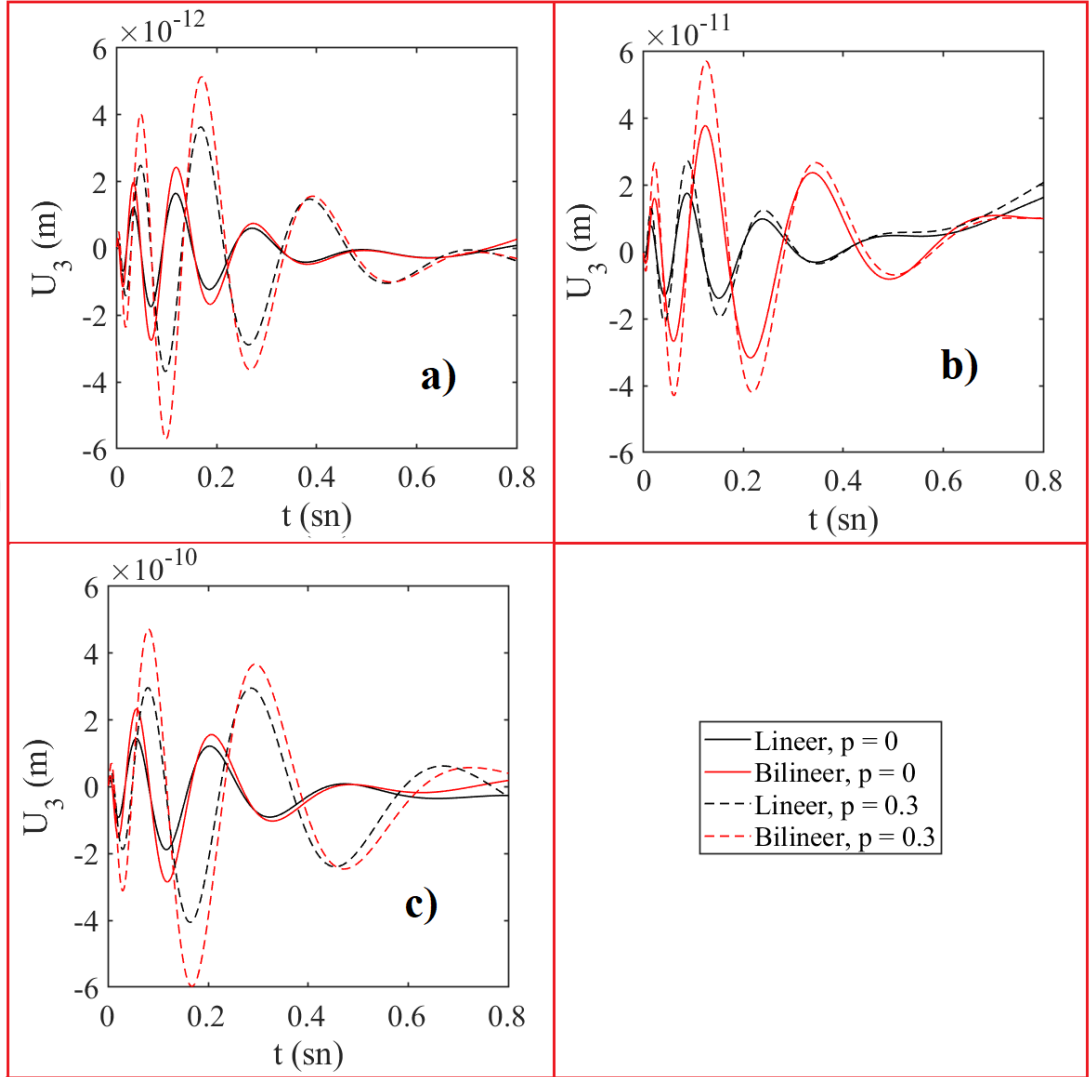
birlikte yer değiştirmeler de artmıştır. Doğrusal olmayan malzeme modelindeki porozite oranına bağlı yer değiştirmelerde oluşan artış farkı, doğrusal modele göre çok daha fazladır.



şekil 4.66 : Tüneller arası mesafe sabit tutulup ($h_x = 2$ m), 2 noktasındaki dinamik düşey yer değiştirmelere, tünellerin yüzeyle arasındaki mesafenin etkisi a) $h_y = 9$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 7$ m.

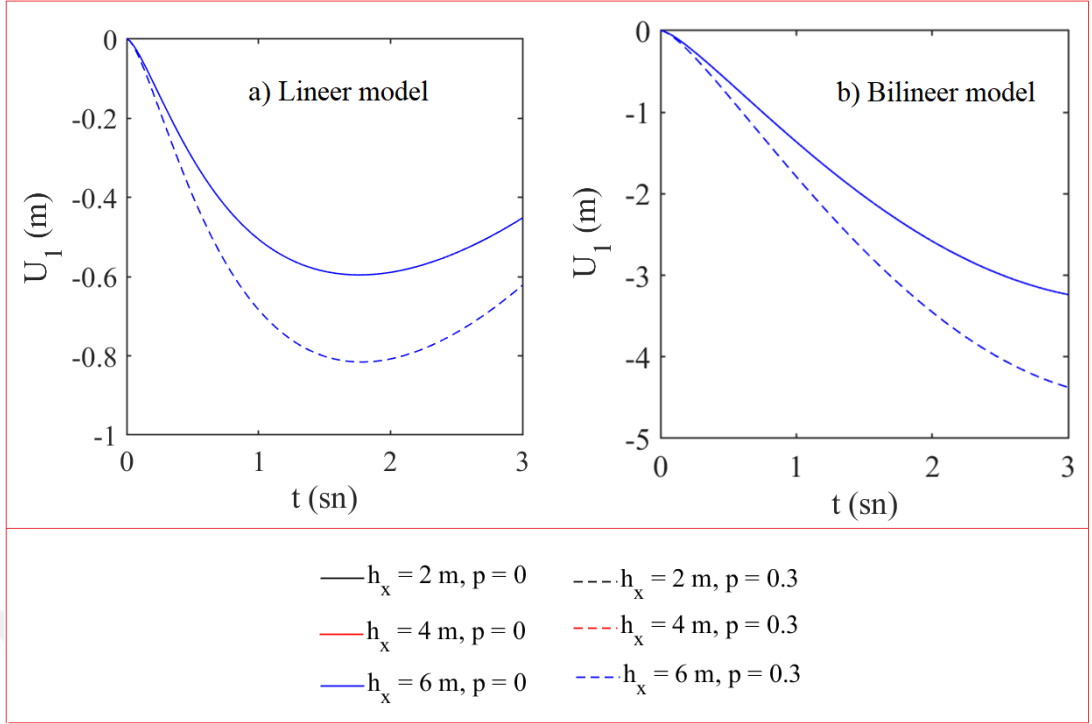
şekil 4.66'da iki tünelin üst orta noktasında, belli bir zaman aralığında oluşan dinamik yer değiştirmeler incelenmiştir. Darbe yükü etkisi doğrusal azalan bir fonksiyon olarak tanımlandığından, ortam derinliğine inildikçe yük etkisi azalmakta ve belirli bir süre sonra sönümlenmektedir. Doğrusal olmayan malzeme modelinde oluşan dinamik dalgalar çok daha büyük yerdeğiştirmeler oluşturmuştur. Porozite oranı artışı dinamik dalga genliklerini arttırmıştır. Tüneler yüzeye yaklaştığı, dinamik yer değiştirmeler artmıştır. İki tünel üst ara noktasında, tünellerin yüzeye yaklaşması sonucu, dalga

sayıları azalmış, dalga genlikleri artmıştır. Tüneller yüzeye yaklaştıkça oluşan dalga genlikleri birbirine yakınlaşmıştır.

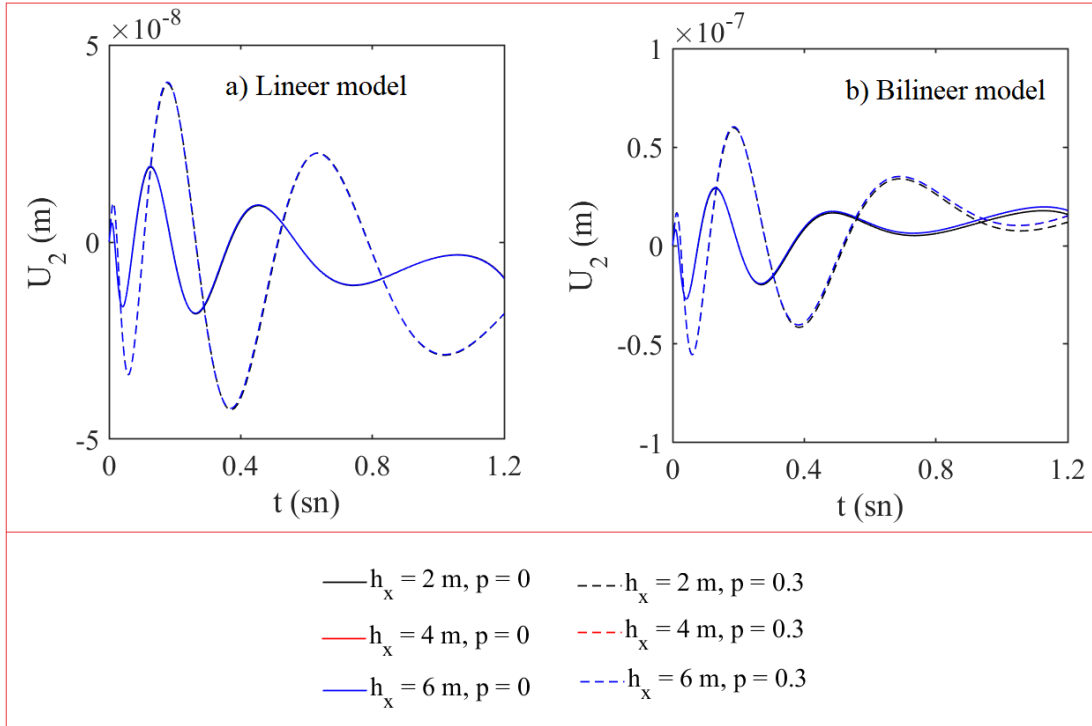


Şekil 4.67 : Tüneller arası mesafe sabit tutulup ($h_x = 2$ m), 3 noktasındaki dinamik düşey yer değiştirmelere, tünellerin yüzeye arasındaki mesafenin etkisi a) $h_y = 9$ m, b) $h_y = 8$ m, c) $h_y = 7$ m.

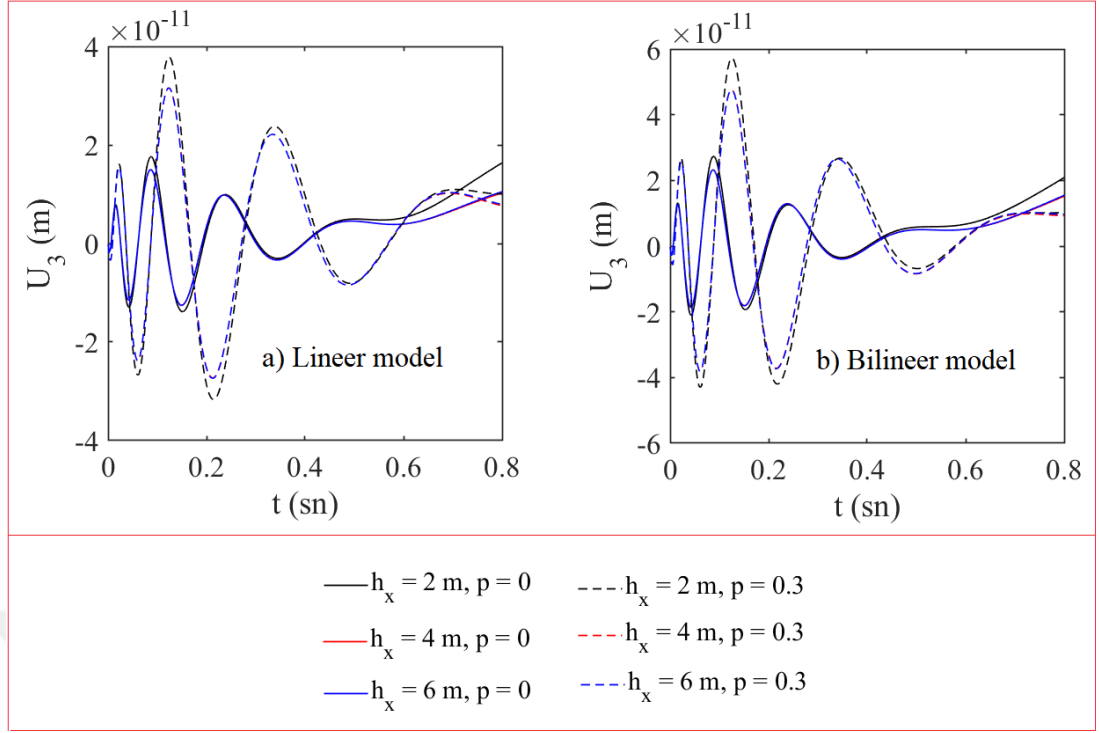
Şekil 4.67’de tüneller arası mesafe ($h_x = 2$ m) sabit olup, ikiz tünellerin yüzeye yaklaşması sonucu 3 noktasında belli bir zaman tanım alanında meydana gelen dinamik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Darbe yükü iki tünel arasında dinamik dalga etkileşimiyle birlikte, dalga genliklerini önce arttırmış sonrasında azalarak sönümlenmiştir. Doğrusal olmayan modelde ve porozite oranı artışında oluşan dalga genlikleri, doğrusal modele göre daha büyüktür. Tüneller yüzeye yaklaştıkça, oluşan dinamik dalgalar daha uzun süreli olarak oluşmuştur. Ortam derinliğine inildikçe, yük etki süresi giderek azalmıştır.



Şekil 4.68 : Tüneller arasındaki mesafenin ve ortam porozite oranının 1 noktasındaki düşey yer değiştirmelere etkisi ($h_y = 8 \text{ m}$).



Şekil 4.69 : Tüneller arasındaki mesafenin ve ortam porozite oranının 2 noktasındaki düşey yer değiştirmelere etkisi ($h_y = 8 \text{ m}$).



Şekil 4.70 : Tüneller arasındaki mesafenin ve ortam porozite oranının 3 noktasındaki düşey yer değiştirmelere etkisi ($h_y = 8$ m).

Şekil 4.68 – 4.70’te, tünel düşey konumu ($h_y = 8$ m) sabit tutulmuş, tüneller arası mesafe (h_x)’in ve porozite oranının artışı sonucunda 1, 2 ve 3 noktalarında oluşan yer değiştirmeler irdelenmiştir. Tüneller arası mesafe artışı yer değiştirmeleri etkilememiştir. Şekil 4.68’de 1 noktasında porozite oranının artışı, yer değiştirmeleri ciddi şekilde arttırmıştır. Doğrusal olmayan modelde oluşan yer değiştirmeler çok daha büyük çıkmıştır. Doğrusal modeldeki artan yer değiştirmeler kısa bir süre sonra azalırken, doğrusal olmayan modelde azalarak artış gösteren bir fonksiyon şeklinde yer değiştirmeler oluşmuştur. Şekil 4.69’da darbe yükü etkisi altındaki yarı sonsuz ortamdaki 2 noktasında belli bir zaman adımıyla oluşan dinamik yer değiştirmeler incelenmiştir. Porozite oran artışından dolayı rijitlik azalmış, dinamik dalga genlikleri ilk saniyelerde artmış, ilerleyen sürelerde azalarak sönümlenmiştir. Porozite oranı arttığında rijitlik azalmasıyla birlikte dinamik dalga genliklerinin etki süresi artmıştır. Doğrusal olmayan modelde dinamik dalga, doğrusal modele kıyasla daha erken sürede sönümlenmiştir. Şekil 4.70’te iki tünel arasında bulunan 3 noktasında belli bir zaman tanım alanında meydana gelen düşey yer değiştirmeler gösterilmiştir. Ortam yüzeyinden uzaklaştıkça, tüneller arasındaki mesafe artışının dinamik dalga tepkilerine etkisi olmuştur. Tünellerin birbirine en yakın olduğu durumla, tünellerin birbirinden uzaklaştığı durumlar arasında fark ortaya çıkmıştır. Doğrusal olmayan

modelde dinamik dalga genlikleri daha büyüktür. Artan porozite oranı tüneller arası mesafe artışından meydana gelen yer değiştirme düşüşünü daha görünür yapmıştır. Ortam derinliğine inildiğinde dinamik dalga tepkilerinde sayısal olarak değişim olsa da dalga tipi formları aynıdır.

Sonuç olarak doğrusal dinamik ve doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları birbirinden oldukça farklı çıkmıştır. Doğrusal olmayan modelde tünellerin birbirine göre ve ortam içindeki konumları dinamik dalga genliklerini oldukça farklılaştırmaktadır. Porozite etkisi dinamik doğrusal olmayan sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Ortam derinliğine inildikçe darbe yük etki süresi giderek azalmaktadır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, ikiz tünel içeren poroziteli yarı sonsuz viskoelastik ortamda doğrusal ve doğrusal olmayan, statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Doğrusal modelde, lineer elastik, izotropik bir malzeme modeli kullanılmıştır. Doğrusal olmayan modelde ise işlem süresi ve hacmini azaltmak amacıyla bilineer elastoplastik, izotropik bir model tercih edilmiştir. Yarı sonsuz ortam sonlu ve sonsuz elemanlarla modellenmiştir. Sonlu elemanlarda, işlem hacmini azaltmak ve modellemeyi basitleştirmek amacıyla, iki boyutlu 16 düğüm noktalı sonlu eleman kullanılmıştır. Sonsuz eleman kısmında ise sonsuz bölge doğrultusuna bağlı olarak, iki boyutlu 8 düğüm noktalı sonsuza uzanan sonsuz elemanlar kullanılmıştır. Statik ve dinamik çözümlerde sonlu-sonsuz eleman formülasyonu, 5 noktalı Gauss Legendre integrasyon yöntemiyle çözülmüştür. Farklı tipte yük etkileri altında statik çözümler elde edilmiştir. Statik çözümlerde, düşey yer değiştirmeler ve eleman bazlı gerilme sonuçları elde edilmiş ve tartışılmıştır. Dinamik çözümlerde ise, harmonik ve darbe yükü etkisi altında yarı sonsuz ortamda oluşan dinamik tepkiler araştırılmıştır. Harmonik ve darbe yükü etkisi altındaki dinamik problemlerin çözümlerinde Newmark Beta yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal olmayan statik analiz çözümünde, artımsal yük yöntemi uygulanmıştır. Doğrusal olmayan dinamik analizin çözümünde ilk aşamada sisteme etki eden dinamik yükler belli bir sonlu sayıya bölünerek zamana bağlı yük fonksiyonuna bağlı bir şekilde artımsal olarak uygulanmış olup, her bir yük adımına karşı gelen zaman aralığı yük fonksiyonundan tespit edilip Newmark Beta yöntemi ile çözüm yapılmıştır. Sayısal sonuçlarda, belli bir zaman tanım alanında yer değiştirme, hız ve ivme sonuçları bulunmuş ve tartışılmıştır. Yapılan modeller MATLAB paket programında kodlanmış ve sayısal analiz sonuçları elde edilmiştir.

Tez çalışmasında elde edilen verilerden aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tabakalı yarı sonsuz ortamda farklı rijitlikler, statik sonuçları oldukça farklılaştırmaktadır. Statik yük altındaki ortamda, yük etkisine yakın bölgelerde gerilmeler oldukça yüksek çıkmaktadır. Üst tabakaların düşük rijitliğe sahip olması, ortamda gerilmeleri arttırmıştır. Tabakalı yarı sonsuz ortamın statik

gerilme sonuçlarında, farklı mekanik özelliklere sahip tabakalar arasında süreksizlikler oluşmaktadır.

- Yarı sonsuz ortam içinde bir boşluk bulunması ortam stabilitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Yüzey bölgesinden statik yükler altında, boşluğun yüzeye yakın bir bölgede bulunması durumunda, rijitliğin azalmasından dolayı yer değiştirmeleri arttırmakta, boşluğun yüzeyden uzak olduğu durumda, rijitliğin artmasından dolayı yer değiştirmelerin azalmasına sebep olmaktadır.
- Tabakalı yarı sonsuz ortamda farklı rijitlikler, statik sonuçları oldukça farklılaştırmaktadır. Statik yük altındaki ortamda, yük etkisine yakın bölgelerde gerilmeler oldukça yüksek çıkmaktadır. Üst tabakaların düşük rijitliğe sahip olması, ortamda gerilmeleri arttırmıştır. Tabakalı yarı sonsuz ortamın statik gerilme sonuçlarında, farklı mekanik özelliklere sahip tabakalar arasında süreksizlikler oluşmaktadır.
- Farklı statik yük tiplerine maruz kalmış yarı sonsuz ortamın sonuçlarında, ortamdaki eşit yoğunluktaki, farklı dağıtılmış yükler, farklı gerilmelere neden olmaktadır. Genel olarak ortam yapısı heterojen bir dağılım gösterdiğinden, bu durum farklı yük dağılımlarından dolayı ortamda farklı deformasyonlara ve oturmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, bina tasarımında ortam derinliğini ve farklı yük türlerinin etkisini dikkate almak önemlidir.
- Yarı sonsuz ortamın porozite etkisi araştırıldığında, tabakalardaki porozite oranı arttıkça, dolayısıyla rijitlik azaldıkça yer değiştirmelerde artış gözlenmiştir. Yük etkisine yakın, rijitliğin düşük olduğu bölgede porozite oranının artışıyla birlikte yer değiştirmeler önemli ölçüde artmıştır. Porozite oranının artması yüzeye yakın tabakadaki yer değiştirme değişiminde daha belirleyici olmuştur.
- Statik yükler altında, ikiz tünel içeren tabakalı yarı sonsuz ortamda, tünellerin konumunun, ortam derinliğine bağlı olarak gerilme dağılımı üzerinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Gerilme yığılmaları, tünel sınırlarının yakınında, özellikle sığ tünellerde meydana gelmiştir. Tünel yapılarının daha fazla gerilmeye maruz kaldığı ve sığ ve yakın mesafeli tünellerde kırılma problemlerinin sıklıkla ortaya çıkabileceği sonucuna varılabilir.
- Harmonik yük etkisi altında tabakalı yarı sonsuz ortam problemlerinde, yüzeyde düşey yer değiştirme ve ivme sonuçları yüksek çıkmıştır. Tabaka rijitliklerinin değiştiği noktalarda yer değiştirme ve ivme kayıtları oldukça farklıdır.

- İçerisinde kare bir boşluk bulunan yarı sonsuz ortamın dinamik dalga tepkileri açısından, ortam içindeki boşluğun yüzey ile düşey mesafesi ve boşluk boyutunun ciddi bir şekilde önemli olduğu görülmüştür. Ortam içindeki boşluk ve ortam yüzeyi arasındaki mesafe azaldıkça, ortam yüzeyinde meydana gelen dinamik tepkiler belirgin hale gelmiştir. Ortam içinde bulunan boşluk küçüldükçe, yüzeyde meydana gelen dinamik dalga genlikleri artmıştır. İçinde boşluk bulunan ortamlardaki dinamik tepkiler incelendiğinde, boşluk boyutları ve boşluk ile ortam yüzeyi arasındaki mesafe dikkate alınmalıdır.
- Dinamik analizlerdeki ortam tepkisinin, ortamdaki porozitenin düşey konumunun ve boşluğun boyutlarının önemli olduğu görülmüştür. Artan porozite oranları yer değiştirmeleri ve ivmeleri arttırmıştır. Dinamik analizlerde bu durumların dikkate alınması gerekir.
- İkiz tünel içeren yarı sonsuz ortamın dinamik analizlerinde, tünelin konumu yarı sonsuz ortamın dinamik tepkileri üzerinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Tünele yakın alanda, tünel-ortam etkileşimi nedeniyle diğer yarı sonsuz ortam alanlarının aksine dinamik tepkiler daha fazla etkilenir.
- Tünel duvarlarından yansıyan dalgalar ortamda artan dinamik etkilere yol açmıştır. Bu nedenle tünel yapılarının tasarım ve analizinde etkileşim analizinin dikkate alınması gerekmektedir. Tünel ve ortam üzerindeki dinamik etkilerin azaltılmasında ikiz tünelin konumu tasarımda çok önemli bir parametredir. Ayrıca yarı sonsuz ortamda tabakalar dinamik yüklerin dalga yayılımında çok etkilidir. İkiz tünelin dinamik davranışında ikiz tünelin yerleşimi uygun bir tabaka üzerinde seçilmelidir.
- Statik sonuçlara, tünellerin ortam içindeki konumları, birbirlerine göre durumları, ortam porozite oranları, doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme modelinde ciddi farklılıklar ortaya çıkarmaktadır. Gerçekçi sonuçlara yaklaşmak amacıyla doğrusal olmayan ortam modelinde alınan sonuçlar ciddi olarak farklılıklar oluşturmaktadır. Analizlerde özellikle tabaka geçiş bölgesine konumlandırılmış ortamda doğrusal olmayan modelin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.
- Statik yer değiştirmelerde, tünel konumunun ortam ve tünel stabilitesi açısından optimum bir noktada konumlandırılması veya bu duruma bağlı olarak gerekli tedbirlerin alınarak ikiz tünellerin inşası önerilmektedir.

- Dinamik analizlerde, doğrusal olmayan malzeme modelinde tünellerin birbirine göre ve ortam içindeki konumları dinamik dalga genliklerini oldukça farklılaştırmaktadır. Porozite etkisi dinamik doğrusal olmayan sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Ortam derinliğine inildikçe darbe yük etki süresi giderek azalmaktadır.
- Sonuç olarak, yapılan analizler değerlendirildiğinde ikiz tünel içeren yarı sonsuz ortam problemlerinde gerçekçi sonuçlar elde etmek ve hesaplama maliyetini azaltmak için; sonlu-sonsuz eleman modelinin birlikte tasarlandığı, malzeme modelinin ise doğrusal olmayan formunun dikkate alınması önerilmektedir. Pratik uygulamalar için önemli bir sonuç, bu tür problemlerin kullanılan sonsuz elemanlı model ile tüm sınır koşullarının dikkate alınabileceğidir.



KAYNAKLAR

- Abbo, A. J., Wilson, D. W., Sloan, S. W. ve Lyamin, A. V.** (2013). Undrained stability of wide rectangular tunnels, *Computers and Geotechnics*, 53, 46-59.
- Ahn, C. Y., Park, D. ve Moon, S. W.** (2022). Analysis of surface settlement troughs induced by twin shield tunnels in soil: A case study, *Geomechanics and Engineering*, 30(4), 325-336.
- Ai, Z. Y. ve Ren, G. P.** (2016). Dynamic analysis of a transversely isotropic multilayered half-plane subjected to a moving load, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83, 162-166.
- Akbaş, Ş. D., Bashiri, A. H., Assie, A. E. ve Eltaher, M. A.** (2021). Dynamic analysis of thick beams with functionally graded porous layers and viscoelastic support, *Journal of Vibration and Control*, 27(13-14), 1644-1655.
- Alimoradzadeh, M. ve Akbas, S. D.** (2022). Nonlinear dynamic behavior of functionally graded beams resting on nonlinear viscoelastic foundation under moving mass in thermal environment, *Structural Engineering and Mechanics*, 81(6), 705-714.
- Alimoradzadeh, M. ve Akbas, S. D.** (2023). Nonlinear vibration analysis of carbon nanotube-reinforced composite beams resting on nonlinear viscoelastic foundation, *Geomechanics and Engineering*, 32(2), 125-135.
- Alimoradzadeh, M., Akbas, S. D. ve Esfrajani, S. M.** (2021). Nonlinear dynamic and stability of a beam resting on the nonlinear elastic foundation under thermal effect based on the finite strain theory, *Structural engineering and mechanics*, 80(3), 275-284.
- Almashhadany, O. Y. ve Albusoda, B. S.** (2020). Experimental study of seismic response of the square tunnel in granular soil, *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 24(2), 80-95.
- Amorosi, A., ve Boldini, D.** (2009). Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(6), 1059-1072.
- Andreotti, G., ve Lai, C. G.** (2017). A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil–structure interaction problem, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15, 2803-2825.
- Assadi, A. ve Sloan, S. W.** (1991). Undrained stability of shallow square tunnel, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(8), 1152-1173.

- Balendra, T., Koh, C. G. ve Ho, Y. C.** (1991). Dynamic response of buildings due to trains in underground tunnels, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 20(3), 275-291.
- Basu, U. ve Chopra, A. K.** (2004). Perfectly matched layers for transient elastodynamics of unbounded domains, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 59(8), 1039-1074.
- Benallal, A. ve Comi, C.** (2003). Perturbation growth and localization in fluid-saturated inelastic porous media under quasi-static loadings, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51(5), 851-899.
- Bettess, P.** (1977). Infinite elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 11(1), 53-64.
- Bettess, P. ve Bettess, J. A.** (1984). Infinite elements for static problems, *Engineering Computations*, 1(1), 4-16.
- Bettess, P. ve Bettess, J. A.** (1991). Infinite elements for dynamic problems: Part 1, *Engineering Computations*, 8(2), 99-124.
- Bettess, P. ve Bettess, J. A.** (1991). Infinite elements for dynamic problems: Part 2, *Engineering Computations*, 8(2), 125-151.
- Bettess, P. ve Zienkiewicz, O. C.** (1977). Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 11(8), 1271-1290.
- Boldini, D., Amorosi, A., ve Palmisano, F.** (2010). Analysis of Tunnel Behaviour Under Seismic Loads by means of Simple and Advanced Numerical Approaches. In *Proceedings of Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, California, May 24-29.
- Booker, J. R. ve Small, J. C.** (1981). Finite element analysis of problems with infinitely distant boundaries, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 5(4), 345-368.
- Brunotte, X. Meunier, G., ve Imhoff, J. F.** (1992). Finite element modeling of unbounded problems using transformations: a rigorous, powerful and easy solution, *IEEE Transactions on Magnetics*, 28(2), 1663-1666.
- Cilingir, U. ve Madabhushi, S. G.** (2011). Effect of depth on seismic response of circular tunnels, *Canadian Geotechnical Journal*, 48(1), 117-127.
- Cilingir, U. ve Madabhushi, S. G.** (2011). Effect of depth on the seismic response of square tunnels, *Soils and Foundations*, 51(3), 449-457.
- Clouteau, D., Arnst, M., Al-Hussaini, T. M. ve Degrande, G.** (2005). Freefield vibrations due to dynamic loading on a tunnel embedded in a stratified medium, *Journal of sound and vibration*, 283(1-2), 173-199.
- Conniff, D. E., ve Kioussis, P. D.** (2007). Elastoplastic medium for foundation settlements and monotonic soil-structure interaction under combined loadings, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31(6), 789-807.

- Cui, C., Liang, Z., Xu, C., Xin, Y. ve Wang, B.** (2023). Analytical solution for horizontal vibration of end-bearing single pile in radially heterogeneous saturated soil, *Applied Mathematical Modelling*, 116, 65-83.
- Cui, C., Meng, K., Xu, C., Liang, Z., Li, H. ve Pei, H.** (2021). Analytical solution for longitudinal vibration of a floating pile in saturated porous media based on a fictitious saturated soil pile model, *Computers and Geotechnics*, 131, 103942.
- Cuong-Le, T., Nguyen, K. D., Hoang-Le, M., Sang-To, T., Phan-Vu, P. ve Wahab, M. A.** (2022). Nonlocal strain gradient IGA numerical solution for static bending, free vibration and buckling of sigmoid FG sandwich nanoplate, *Physica B: Condensed Matter*, 631, 413726.
- Curnier, A.** (1983). A static infinite element, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19(10), 1479-1488.
- Dasgupta, G.** (1982). A finite element formulation for unbounded homogeneous continua, *Journal of Applied Mechanics*, 49(1), 136-140.
- Demidem, M., Boutemour, R., Bali, A. ve Benyoussef, E. H.** (2014). Analysis of Structural and non-Structural Problems by Coupling of Finite and Infinite Elements, *Applied Mechanics and Materials*, 578, 445-455.
- Ding, H., Xu, S., Xu, C., Tong, L., Zhu, B. ve Yang, Q.** (2023). Dynamic responses of saturated soil foundation subjected to a moving strip load based on the nonlocal-Biot theory, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11(5), 2215-2229.
- Ebrahimian, B., Noorzad, A. ve Alsaleh, M. I.** (2012). Modeling shear localization along granular soil–structure interfaces using elasto-plastic Cosserat continuum, *International Journal of Solids and Structures*, 49(2), 257-278.
- Edip, K., Sheshov, V., Bojadjieva, J., Kitanovski, T., Chaneva, J. ve Ivanvoski, D.** (2020). New Infinite Elements for Simulation of Saturated Unbounded Media, *The 17th World Conference on Earthquake Engineering*, 17WCEE Sendai, Japan : September 13-18.
- Edip, K., Sheshov, V., Wu, W. ve Bojadjieva, J.** (2021). Numerical modelling of saturated boundless media with infinite elements, *Acta Geotechnica*, 16, 2683-2692.
- Ehlers, W.** (1989). On thermodynamics of elasto-plastic porous media, *Arch. Mech*, 41(1), 73-93.
- El-Esnawy, N. A., Akl, A. Y. ve Bazaraa, A. S.** (1995). A new parametric infinite domain element. *Finite elements in analysis and design*, 19(1-2), 103-114.
- Elgamal, A. W.** (1991). Shear hysteretic elasto-plastic earthquake response of soil systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 20(4), 371-387.
- Erkal, A., Laefer, D. F. ve Tezcan, S.** (2015). Advantages of infinite elements over prespecified boundary conditions in unbounded problems, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(6), 04014085.

- Fang, Q., Tai, Q., Zhang, D. ve Wong, L. N. Y.** (2016). Ground surface settlements due to construction of closely-spaced twin tunnels with different geometric arrangements, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 144-151.
- Fang, Y. S., Kao, C. C. ve Shiu, Y. F.** (2012). Double-O-tube shield tunneling for Taoyuan international airport access MRT, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 233-245.
- Farzanian, M., Arbabi, F. ve Pak, R.** (2016). PML solution of longitudinal wave propagation in heterogeneous media, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15, 357-368.
- Fu, J., Yang, J., Yan, L. ve Abbas, S. M.** (2015). An analytical solution for deforming twin-parallel tunnels in an elastic half plane, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(5), 524-538.
- Gharehdash, S., ve Barzegar, M.** (2015). Numerical modeling of the dynamic behaviour of tunnel lining in shield tunneling, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, 1626-1636.
- Gomes, R. C.** (2014). Numerical simulation of the seismic response of tunnels in sand with an elastoplastic model, *Acta Geotechnica*, 9, 613-629.
- Haider, A., Song, E., ve Li, P.** (2019). Numerical simulation and absorbing boundary conditions for wave propagation in a semi-infinite media with a linear isotropic hardening plastic model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105627.
- Haji, T. K., Faramarzi, A., Metje, N., Chapman, D. ve Rahimzadeh, F.** (2020). Development of an infinite element boundary to model gravity for subsurface civil engineering applications, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 44(3), 418-431.
- Hao, X., Qingsheng, C. ve Bingjian, Z.** (2020). Directional interpolation infinite element for dynamic problems in saturated porous media, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19, 625-635.
- Hasheminejad, S. M. ve Avazmohammadi, R.** (2008). Dynamic stress concentrations in lined twin tunnels within fluid-saturated soil, *Journal of Engineering Mechanics*, 134(7), 542-554.
- Hassanlourad, M., Naghizadehrokn, M. ve Molaei, V.** (2019). A numerical study of seismic response of shallow square tunnels in two-layered ground, *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 13(3), 167-174.
- Hatzigeorgiou, G. D. ve Beskos, D. E.** (2010). Soil–structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(9), 851-861.
- He, C., Zhou, S., Guo, P., Di, H., Zhang, X. ve Yu, F.** (2019). Theoretical modelling of the dynamic interaction between twin tunnels in a multi-layered half-space, *Journal of Sound and Vibration*, 456, 65-85.
- Houmat, A.** (2008). Mapped infinite p-element for two-dimensional problems of unbounded domains, *Computers and Geotechnics*, 35(4), 608-615.

- Hsiao-Hui, H. ve Yang, Y. B.** (2010). Analysis of ground vibrations due to underground trains by 2.5 D finite/infinite element approach, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 9, 327-335.
- Izra, U., Neskon, U. ve Za, N. E.** (2013). Application of infinite-element calculations for consolidating a railway foundation of blowing sand reclamation, *Materiali in Tehnologije*, 47(5), 621-626.
- Jakki, S., ve Sharma, K. G.** (2005). Elasto-Plastic Analyses of Circular Tunnels at Different Insitu Stress Conditions using Finite Element Method, *Rock Mechanics And Tunnelling Technology*, 11(2), 83-95.
- Jeon, J., Ih, J. G. ve Brunskog, J.** (2021). Wave transmission and vibration response in periodically stiffened plates using a free wave approach, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(6), 3694-3702.
- Jeremić, B., Cheng, Z., Taiebat, M. ve Dafalias, Y.** (2008). Numerical simulation of fully saturated porous materials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(13), 1635-1660.
- Jingbo, L. ve Yandong, L.** (1998). A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction based on interface idea, In *Developments in Geotechnical Engineering*, 83, 261-276.
- Jishnu, R. B. ve Ayothiraman, R.** (2020). Interaction of urban underground twin metro tunnels under static and earthquake loading, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 14(04), 2050019.
- Kamal, H., Hussein, M. ve Akl, A.** (2021). Parametric study of twin tunnel under seismic loads for Cairo Metro Line No. 4, *Housing and Building National Research Center Journal*, 17(1), 137-156.
- Karahan, N.** (2012). *Zemin koşullarının üstyapının dinamik davranışına etkileri* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kargar, A. R., Rahmannedjad, R. ve Hajabasi, M. A.** (2014). A semi-analytical elastic solution for stress field of lined non-circular tunnels at great depth using complex variable method, *International Journal of Solids and Structures*, 51(6), 1475-1482.
- Karpurapu, G. R.** (1988). Composite infinite element analysis of unbounded two-phase media, *Advances in Engineering Software*, 10(4), 202-209.
- Karpurapu, G. R. ve Bathurst, R. J.** (1988). Comparative analysis of some geomechanics problems using finite and infinite element methods, *Computers and Geotechnics*, 5(4), 269-284.
- Keawsawasvong, S., Thongchom, C., Lai, V. Q. ve Mase, L. Z.** (2021). Vertical–horizontal–rocking vibrations of rigid foundations of arbitrary shape on poroelastic layer, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 9(7), 1447-1461.
- Khalili, N., Valliappan, S., Yazdi, J. T. ve Yazdchi, M.** (1997). 1D infinite element for dynamic problems in saturated porous media, *Communications in Numerical methods in Engineering*, 13(9), 727-738.

- Khan, I. A., Venkatesh, K. ve Srivastava, R. K.** (2021). Elasto-plastic finite element analysis of twin tunnels—A comparison of excavation in intact and jointed rock mass, *Materials Today: Proceedings*, 47, 6728-6733.
- Khan, M. A., Sadique, M. R., Harahap, I. H., Zaid, M., ve Alam, M. M.** (2022). Static and dynamic analysis of the shielded tunnel in alluvium soil with 2D FEM model, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 9(1), 73-100.
- Kim, H. K., Moon, J. S., An, J. W., ve Michael, E. S.** (2022). Development of performance evaluation model for road and railway tunnels in use, *Geomechanics and Engineering*, 29(3), 369-376.
- Klar, A., Vorster, T. E., Soga, K. ve Mair, R. J.** (2007). Elastoplastic solution for soil-pipe-tunnel interaction, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 782-792.
- Kontoe, S., Zdravkovic, L., Potts, D. M. ve Menkiti, C. O.** (2011). On the relative merits of simple and advanced constitutive models in dynamic analysis of tunnels, *Geotechnique*, 61(10), 815-829.
- Kumar, D., Kundu, S., Kumhar, R. ve Gupta, S.** (2020). Vibrational analysis of Love waves in a viscoelastic composite multilayered structure, *Acta Mechanica*, 231, 4199-4215.
- Kumar, P.** (1985). Static infinite element formulation, *Journal of Structural Engineering*, 111(11), 2355-2372.
- Kumari, S. ve Sawant, V. A.** (2021). Numerical simulation of liquefaction phenomenon considering infinite boundary, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142, 106556.
- Lee, C. K., Shiojiri, H., Hanada, K. ve Nakagawa, T. T.** (2005). A method for nonlinear dynamic response analysis of semi-infinite foundation soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7-10), 649-659.
- Li, Y. H., Wang, H. L., Zhao, Y. ve Dong, J.** (2022). Prediction of the vibration waveform of surface particles under the action of tunnel cutting blast, *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1), 38.
- Liang, J. ve Zhu, J.** (2019). A FE-IBE method for linearized nonlinear soil-tunnel interaction in water-saturated, poroelastic half-space: I. Methodology and numerical examples, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 454-467.
- Lim, C. W., ve Żur, K. K.** (2021). Wide Rayleigh waves bandgap engineered metabarriers for ground born vibration attenuation, *Engineering Structures*, 246, 113019.
- Lin, K. C., Hung, H. H., Yang, J. P. ve Yang, Y. B.** (2016). Seismic analysis of underground tunnels by the 2.5 D finite/infinite element approach, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 31-43.
- Lin, S. Y., Hung, H. H., Yang, J. P. ve Yang, Y. B.** (2017). Seismic analysis of twin tunnels by a finite/infinite element approach, *International Journal of Geomechanics*, 17(9), 04017060.

- Liou, G. S.** (1989). Analytic solutions for soil-structure interaction in layered media, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 18(5), 667-686.
- Liu, H.** (2012). Soil-structure interaction and failure of cast-iron subway tunnels subjected to medium internal blast loading, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(5), 691-701.
- Liu, M., ve Huang, H.** (2021). Finite element modeling of spherical indentation in a poro-elasto-plastic medium via step displacement loading, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45(10), 1347-1380.
- Liu, P., Wang, D. ve Oeser, M.** (2015). Application of semi-analytical finite element method coupled with infinite element for analysis of asphalt pavement structural response, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2(1), 48-58.
- Liu, W. ve Novak, M.** (1991). Soil-pile-cap static interaction analysis by finite and infinite elements, *Canadian Geotechnical Journal*, 28(6), 771-783.
- Liu, X., Suliman, L., Zhou, X. ve Abd Elmaged, A.** (2022). Parallel tunnel settlement characteristics: A theoretical calculation approach and adaptation analysis, *Geomechanics and Engineering*, 28(3), 225-237.
- Liu, Z., Wang, Y., ve Liang, J.** (2016). Dynamic interaction of twin vertically overlapping lined tunnels in an elastic half space subjected to incident plane waves, *Earthquake Science*, 29, 185-201.
- Løkke, A. ve Chopra, A. K.** (2017). Direct finite element method for nonlinear analysis of semi-unbounded dam-water-foundation rock systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(8), 1267-1285.
- Løkke, A. ve Chopra, A. K.** (2018). Direct finite element method for nonlinear earthquake analysis of 3-dimensional semi-unbounded dam-water-foundation rock systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(5), 1309-1328.
- Lopes, P., Costa, P. A., Ferraz, M., Calçada, R. ve Cardoso, A. S.** (2014). Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 61, 269-285.
- Lotfian, Z. ve Sivaselvan, M. V.** (2018). Mixed finite element formulation for dynamics of porous media, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 115(2), 141-171.
- Lou, J., Fang, X., Fan, H. ve Du, J.** (2022). A nonlinear seismic metamaterial lying on layered soils, *Engineering Structures*, 272, 115032.
- Lu, A. Z., Chen, H. Y., Qin, Y. ve Zhang, N.** (2014). Shape optimisation of the support section of a tunnel at great depths, *Computers and Geotechnics*, 61, 190-197.
- Lu, J. F., Jeng, D. S. ve Lee, T. L.** (2007). Dynamic response of a piecewise circular tunnel embedded in a poroelastic medium, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(9), 875-891.

- Lu, S., Xu, H., Wang, L., Liu, S., Zhao, D. ve Nie, W.** (2022). Effect of flexibility ratio on seismic response of rectangular tunnels in sand: Experimental and numerical investigation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 157, 107256.
- Lynn, P. P., ve Hadid, H. A.** (1981). Infinite elements with $1/r^n$ type decay, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 17(3), 347-355.
- Mahapatra, R. C. ve Dasgupta, S. P.** (1990). Elasto-plastic modelling of plane geomechanics problems, *Computers & Structures*, 37(4), 481-502.
- Mamuk, F.** (2010). *Üç Boyutlu Dinamik Zemin-yapı Etkileşimi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Megna, G. ve Bracciali, A.** (2023). Troubleshooting noise and vibration issues of a metro braking system, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11(6), 2631-2646.
- Meng, X., Li, X., Xu, X., Zhang, J., Zhou, W. ve Zhou, D.** (2019). Earthquake response of cylindrical storage tanks on an elastic soil, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 7, 433-444.
- Mesgouez, A., Lefeuve-Mesgouez, G. ve Chambarel, A.** (2005). Transient mechanical wave propagation in semi-infinite porous media using a finite element approach, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(6), 421-430.
- Mori, K. ve Abe, Y.** (2005). Large rectangular cross-section tunneling by the multi-micro shield tunneling (MMST) method, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(2), 129-141.
- Nagel, F., ve Meschke, G.** (2010). An elasto-plastic three phase model for partially saturated soil for the finite element simulation of compressed air support in tunnelling, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(6), 605-625.
- Nakamura, H., Kubota, T., Furukawa, M. ve Nakao, T.** (2003). Unified construction of running track tunnel and crossover tunnel for subway by rectangular shape double track cross-section shield machine, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2-3), 253-262.
- Naseem, A., Kashif, M., Iqbal, N., Schotte, K. ve De Backer, H.** (2020). Seismic behavior of triple tunnel complex in soft soil subjected to transverse shaking, *Applied Sciences*, 10(1), 334.
- Nenning, M. ve Schanz, M.** (2011). Infinite elements in a poroelastodynamic FEM, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(16), 1774-1800.
- Panji, M. ve Mojtazadeh-Hasanlouei, S.** (2021). Seismic ground response by twin lined tunnels with different cross sections, *SN Applied Sciences*, 3(9), 787.
- Park, K. L., Watanabe, E. ve Utsunomiya, T.** (2004). Development of 3D elastodynamic infinite elements for soil-structure interaction

- problems, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 4(03), 423-441.
- Pisanò, F., ve Jeremić, B.** (2014). Simulating stiffness degradation and damping in soils via a simple visco-elastic-plastic model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 63, 98-109.
- Pissanetzky, S.** (1984). A simple infinite element, *COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 3(2), 107-114.
- PLAXIS** (2002) Reference and scientific manual 2D. Delft.
- Qi, W., Yang, Z., Jiang, Y., Yang, X., Shao, X. ve An, H.** (2022). Investigation on ground displacements induced by excavation of overlapping twin shield tunnels, *Geomechanics and Engineering*, 28(5), 531-546.
- Qin, S., Tang, J., Feng, J., Zhou, Y., Yang, F. ve Wahab, M. A.** (2024). Modal parameter identification in civil structures via Hilbert transform ensemble with improved empirical wavelet transform, *Journal of Vibration and Control*, 30(7-8), 1621-1634.
- Rabiefar, A., Vosoughifar, H., Nabizadeh, A. ve Negahdar, H.** (2023). Analytical approach to scattering of P, SV waves by twin tunnels in saturated half-space, *Archive of Applied Mechanics*, 93(2), 445-466.
- Raghavendra, V.** (2014). Dynamic Analysis of Tunnels in Urban areas With and Without support systems, *International Journal of Engineering Research*, 3(5).
- Rajapakse, R. K. N. D. ve Karasudhi, P.** (1985). Elastostatic infinite elements for layered half spaces, *Journal of Engineering Mechanics*, 111(9), 1144-1158.
- Rezvani, M. A., Esmaeili, M. ve Feizi, M. M.** (2017). Discrete mass modeling for dynamic response of buildings in the vicinity of railway tracks due to train-induced ground vibrations, *Scientia Iranica*, 24(4), 1922-1939.
- Saini, S. S., Bettess, P. ve Zienkiewicz, O. C.** (1978). Coupled hydrodynamic response of concrete gravity dams using finite and infinite elements, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 6(4), 363-374.
- Sandoval, E. ve Bobet, A.** (2020). Effect of input frequency on the seismic response of deep circular tunnels, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 106421.
- Savadatti, S. ve Guddati, M. N.** (2010). A finite element alternative to infinite elements. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 199(33-36), 2204-2223.
- Selvadurai, A. P. S. ve Karpurapu, R.** (1989). Composite infinite element for modeling unbounded saturated-soil media, *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(11), 1633-1646.
- Senjuntichai, T. ve Rajapakse, R. K. N. D.** (1995). Exact stiffness method for quasi-statics of a multi-layered poroelastic medium, *International Journal of Solids and Structures*, 32(11), 1535-1553.

- Sesli, H.** (2013). *Zemin sınır şartlarının yapı-zemin etkileşim sistemlerinin dinamik davranışına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Shi, J., Wang, J., Ji, X., Liu, H. ve Lu, H.** (2022). Three-dimensional numerical parametric study of tunneling effects on existing pipelines, *Geomechanics and Engineering*, 30(4), 383-392.
- Shirinabadi, R. ve Moosavi, E.** (2016). Twin tunnel behavior under static and dynamic loads of Shiraz metro, Iran, *Journal of Mining Science*, 52(3), 461-472.
- Shrivastava, R. K. ve Rao, N. K.** (2002). Response of soil media due to impulse loads and isolation using trenches, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(8), 695-702.
- Shu, J. ve Ma, Q.** (2023). Theoretical study of S-wave passing through an elastic wave impeding block in the unsaturated soil, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11(1), 193-206.
- Song, J., Wang, F., Jia, K. ve Shen, H.** (2022). A Time-domain artificial boundary for near-field wave problem of fluid saturated porous media, *Mathematical and Computational Applications*, 27(4), 71.
- Song, Z., Wang, F., Liu, Y. ve Su, C.** (2018). Infinite element static-dynamic unified artificial boundary, *Shock and Vibration*, 2018, 1-14.
- Şahin, G.** (2019). *Sonlu elemanlar yöntemi ile kazık, zemin çivisi, ankraj modellenmesi* (Yüksek lisans tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Tang, T., Hededal, O. ve Cardiff, P.** (2015). On finite volume method implementation of poro-elasto-plasticity soil model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(13), 1410-1430.
- Tasiopoulou, P., Taiebat, M., Tafazzoli, N. ve Jeremic, B.** (2015). Solution verification procedures for modeling and simulation of fully coupled porous media: static and dynamic behavior, *Coupled Systems Mechanics*, 4(1), 67-98.
- Tassoulas, J. L.** (1981). *Elements for the numerical analysis of wave motion in layered media* (Doctoral dissertation). Retrieved from <https://dspace.mit.edu/>
- Temel, B.** (1996). *Dinamik zemin-yapı etkileşimi problemlerinin sonlu-sonsuz elemanlar ve laplace dönüşüm yöntemi ile analizi* (Doktora tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Terzi, V. G., ve Manolis, G. D.** (2023). Basic numerical modelling issues in dynamic soil-tunnel interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 172, 108060.
- Theodorakopoulos, D. D.** (2003). Dynamic analysis of a poroelastic half-plane soil medium under moving loads, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(7), 521-533.
- Timosenko, S. P., ve Goodier, J. N.** (1951). *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill.

- Tiwari, R., Chakraborty, T. ve Matsagar, V.** (2016). Dynamic analysis of a twin tunnel in soil subjected to internal blast loading, *Indian Geotechnical Journal*, 46(4), 369-380.
- Tosecký, A., Koleková, Y., Schmid, G. ve Kalinchuk, V.** (2008). Three-dimensional transient half-space dynamics using the dual reciprocity boundary element method, *Engineering analysis with boundary elements*, 32(7), 597-618.
- Tran, V. T., Nguyen, T. K., Nguyen-Xuan, H. ve Wahab, M. A.** (2023). Vibration and buckling optimization of functionally graded porous microplates using BCMO-ANN algorithm, *Thin-Walled Structures*, 182, 110267.
- Tsinidis, G.** (2017). Response characteristics of rectangular tunnels in soft soil subjected to transversal ground shaking, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 62, 1-22.
- Tsinidis, G.** (2018). Response of urban single and twin circular tunnels subjected to transversal ground seismic shaking. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 76, 177-193.
- Tsinidis, G. ve Pitilakis, K.** (2018). Improved RF relations for the transversal seismic analysis of rectangular tunnels, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 48-65.
- Tsinidis, G., Pitilakis, K. ve Anagnostopoulos, C.** (2016). Circular tunnels in sand: dynamic response and efficiency of seismic analysis methods at extreme lining flexibilities, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14, 2903-2929.
- Tsinidis, G., Pitilakis, K. ve Madabhushi, G.** (2016). On the dynamic response of square tunnels in sand, *Engineering Structures*, 125, 419-437.
- Tsinidis, G., Pitilakis, K., Anagnostopoulos, C. ve Madabhushi, G.** (2015). Seismic response and design of rectangular tunnels, *The Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics, Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World*, Cambridge, United Kingdom : July 1-10.
- Tsinidis, G., Pitilakis, K., Heron, C. ve Madabhushi, G.** (2013). Experimental and numerical investigation of the seismic behavior of rectangular tunnels in soft soils, *The 4 th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Kos Island, Greece : June 12-14.
- Tzong, T. J. ve Penzien, J.** (1986). Hybrid modelling of a single-layer half-space system in SOIL-structure interaction, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 14(4), 517-530.
- Ungless, R. F.** (1973). *Infinite finite element* (Doctoral dissertation). Retrieved from <https://open.library.ubc.ca/>
- Vo, T. M., Chau, A. N., Nguyen, T. M. ve Nguyen, H. C.** (2018). A node-based smoothed finite element method for stability analysis of dual square tunnels in cohesive-frictional soils, *Scientia Iranica*, 25(3), 1105-1121.
- Vrakas, A. ve Anagnostou, G.** (2015). Finite strain elastoplastic solutions for the undrained ground response curve in tunnelling, *International Journal*

- for *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(7), 738-761.
- Wang, A., Shi, C., Zhao, C., Deng, E., Yang, W. ve He, H.** (2020). Response characteristics of cross tunnel lining under dynamic train load, *Applied Sciences*, 10(12), 4406.
- Wang, H. N., Wu, L., Jiang, M. J. ve Song, F.** (2018). Analytical stress and displacement due to twin tunneling in an elastic semi-infinite ground subjected to surcharge loads, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(6), 809-828.
- Wang, H. N., Zeng, G. S., ve Jiang, M. J.** (2018). Analytical stress and displacement around non-circular tunnels in semi-infinite ground, *Applied Mathematical Modelling*, 63, 303-328.
- Wang, H. N., Zeng, G. S., Utili, S., Jiang, M. J. ve Wu, L.** (2017). Analytical solutions of stresses and displacements for deeply buried twin tunnels in viscoelastic rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 93, 13-29.
- Wen, P. H., Yang, J. J., Huang, T., Zheng, J. L. ve Deng, Y. J.** (2018). Infinite element in meshless approaches, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 72, 175-185.
- Wilson, D. W., Abbo, A. J., Sloan, S. W. ve Lyamin, A. V.** (2013). Undrained stability of a square tunnel where the shear strength increases linearly with depth, *Computers and Geotechnics*, 49, 314-325.
- Wilson, D. W., Abbo, A. J., Sloan, S. W. ve Lyamin, A. V.** (2015). Undrained stability of dual square tunnels, *Acta Geotechnica*, 10, 665-682.
- Wolf, J. P. ve Song, C.** (1996). *Finite-element modelling of unbounded media*. Chichester: Wiley.
- Won, D., Seo, J. ve Kim, S.** (2021). Dynamic response of submerged floating tunnels with dual sections under irregular waves, *Ocean Engineering*, 241, 110025.
- Wu, W., Wan, T., Yang, Y. ve Zheng, H.** (2022). Three-dimensional numerical manifold formulation with continuous nodal gradients for dynamics of elasto-plastic porous media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 388, 114203.
- Xu, L. ve Ma, M.** (2023). Analytical solution of ground-borne vibration due to a spatially periodic harmonic moving load in a tunnel embedded in layered soil, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 24(7), 637-652.
- Xu, Z., Du, X., Xu, C., Hao, H., Bi, K. ve Jiang, J.** (2019). Numerical research on seismic response characteristics of shallow buried rectangular underground structure, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 242-252.
- Yang, W., Zhang, C., Liu, D., Tu, J., Yan, Q., Fang, Y. ve He, C.** (2019). The effect of cross-sectional shape on the dynamic response of tunnels under train induced vibration loads, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, 231-238.

- Yang, Y. B. ve Hung, H. H.** (2001). A 2.5 D finite/infinite element approach for modelling visco-elastic bodies subjected to moving loads, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 51(11), 1317-1336.
- Yang, Y. B., Hung, H. H. ve Chang, D. W.** (2003). Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(4), 263-278.
- Yang, Y. B., Kuo, S. R. ve Hung, H. H.** (1996). Frequency-independent infinite elements for analysing semi-infinite problems, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39(20), 3553-3569.
- Yang, Y. B., Zhou, Z., Zhang, X. ve Wang, X.** (2022). Soil seismic analysis for 2D oblique incident waves using exact free-field responses by frequency-based finite/infinite element method, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(12), 1530-1551.
- Yang, Y., Zhang, J., Yuan, Y. ve Yu, H.** (2021). Dynamic responses of long tunnels in layered viscoelastic ground subjected to inclined SH waves, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106469.
- Yerli, H. R.** (1998). *İki ve üç boyutlu dinamik yapı-zemin etkileşimi problemlerinin sonlu ve sonsuz elemanlar kullanılarak analizi* (Doktora tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yerli, H. R., Temel, B. ve Kiral, E.** (1998). Transient infinite elements for 2D soil-structure interaction analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(10), 976-988.
- Yerli, H. R., Temel, B. ve Kiral, E.** (1999). Multi-wave transient and harmonic infinite elements for two-dimensional unbounded domain problems. *Computers and Geotechnics*, 24(3), 185-206.
- Yi Fei, L., MaoSen, C., Hoa, T. N., Khatir, S., Minh, H. L., SangTo, T. ve Wahab, M. A.** (2023). Metamodel-assisted hybrid optimization strategy for model updating using vibration response data, *Advances in Engineering Software*, 185, 103515.
- Yuksel, Y. Z. ve Akbas, S. D.** (2023). Static stress analysis of multi-layered soils with twin tunnels by using finite and infinite elements, *Geomechanics and Engineering*, 33(4), 369-380.
- Yun, C. B., Chang, S. H., Seo, C. G. ve Kim, J. M.** (2007). Dynamic infinite elements for soil-structure interaction analysis in a layered soil medium, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 7(04), 693-713.
- Yun, C. B., Kim, D. K. ve Kim, J. M.** (2000). Analytical frequency-dependent infinite elements for soil-structure interaction analysis in two-dimensional medium, *Engineering Structures*, 22(3), 258-271.
- Yun, C. B., Kim, J. M. ve Hyun, C. H.** (1995). Axisymmetric elastodynamic infinite elements for multi-layered half-space, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 38(22), 3723-3743.
- Yüksel Y. Z. ve Akbaş Ş. D.** (2022a). Static Responses of A Cavity in A Half-Space by Using Finite Element Method. In *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Mathematics and*

- Engineering Sciences*, (pp.387-396). Ordu, Turkey : University of Ordu, May 20-22.
- Yüksel Y. Z. ve Akbaş Ş. D.** (2022b). Stress Analysis of Multi-Layered Soil Medium by Using Finite and Infinite Elements. In *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Mathematics and Engineering Sciences*, (pp.366-3375). Ordu, Turkey : University of Ordu, May 20-22.
- Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2022c). Stress Distribution in Two-Dimensional Semi-Infinite Medium under the Different Load Types. In *Proceedings of the Second International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*, (pp.953-959). Konya, Turkey, October 15-18.
- Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2022d). Vibration analysis of a sandwich plate with laminated face and porous core layers resting on elastic foundation, *Journal of Innovative Science and Engineering*, 6(1), 32-45.
- Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2023). Dynamic Analysis of Multi-Layered Semi-Infinite Media by Using Finite and Infinite Elements. Golden Light Publishing (Ed.), In *Proceedings of the Third International Civil Engineering and Architecture Congress*, (pp.923-932). Trabzon, Turkey, October 12-14.
- Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2024a). Dynamic Responses of Layered Viscoelastic Half-Medium with Twin Tunnel Under Harmonic Load, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1-19.
- Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2024b). Boşluk İçeren Yarı Sonsuz Bir Ortamda Boşluktaki Harmonik Yük Etkisinin İncelenmesi. Academy Global Publishing House (Ed.), *Proceedings of the Anadolu 14th International Conference On Applied Sciences Mesopotamia 3rd International Group Exhibitions*, (pp. 388-401). Turkey, Gaziantep, February 16-18.
- Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2024c). Harmonic Load Analysis of A Semi-Infinite Porous Medium With Rectangular Cavity. In *Proceedings of The AVRASYA 10th International Conference on Applied Sciences*, Tiflis, Georgia, May 2-5.
- Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2024d). Static Analysis Of A Two-Layered Semi-Infinite Medium with Porosity. In *Proceedings of The AVRASYA 10th International Conference on Applied Sciences*, Tiflis, Georgia, May 2-5.
- Zerfa, F. Z., ve Lorent, B.** (2003). Coupled dynamic elastic–plastic analysis of earth structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(6), 435-454.
- Zhang, H., Lu, M., Zheng, Y. ve Zhang, S.** (2015). General coupling extended multiscale FEM for elasto-plastic consolidation analysis of heterogeneous saturated porous media, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(1), 63-95.
- Zhang, H., Zhang, S., Li, Y., Liu, G., Zheng, Y. ve Jiang, Z.** (2023). Prediction and Control Method of Long-Term Vehicle-Induced Settlement of High-

Speed Railway Tunnel in Diatomite Stratum, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11(5), 2297-2307.

Zhang, H., Zhao, T., Wang, D., Pei, Q., Xu, Y. ve Tian, H. (2022). Wave Scattering by Crack Under Shock P-Wave in an Elastic Half-Space, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1-19.

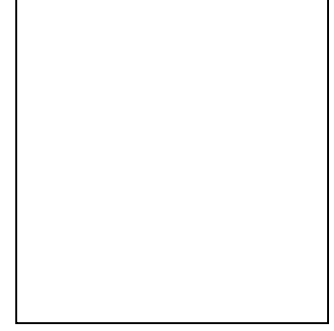
Zhang, Q., He, W., Wang, H. Y., Liu, R. C., Lu, M. M. ve Jiang, B. S. (2021). Elasto-plastic solutions for expanding cavities in strain-hardening and/or softening soils, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 107, 103660.

Zienkiewicz, O. C. (1982). Basic formulation of static and dynamic behaviours of soil and other porous media, *Applied Mathematics and Mechanics*, 3(4), 457-468.

Zienkiewicz, O. C., Emson, C., ve Bettess, P. (1983). A novel boundary infinite element, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19(3), 393-404.

Zou, J. F., Wei, A. ve Yang, T. (2018). Elasto-plastic solution for shallow tunnel in semi-infinite space, *Applied Mathematical Modelling*, 64, 669-687.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Yusuf Ziya Yüksel

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2019, Bursa Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **Araştırma Görevlisi:** 2017-Halen, Bursa Teknik Üniversitesi, M.D.B.Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2023). Static stress analysis of multi-layered soils with twin tunnels by using finite and infinite elements, *Geomechanics and Engineering*, 33(4), 369-380.
- **Yüksel Y. Z. ve Akbaş Ş. D.** (2022a). Static Responses of A Cavity in A Half-Space by Using Finite Element Method. In *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Mathematics and Engineering Sciences*, (pp.387-396). Ordu, Turkey : University of Ordu, May 20-22.
- **Yüksel Y. Z. ve Akbaş Ş. D.** (2022b). Stress Analysis of Multi-Layered Soil Medium by Using Finite and Infinite Elements. In *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Mathematics and Engineering Sciences*, (pp.366-3375). Ordu, Turkey : University of Ordu, May 20-22.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2022c). Stress Distribution in Two-Dimensional Semi-Infinite Medium under the Different Load Types. In *Proceedings of the Second International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*, (pp.953-959). Konya, Turkey, October 15-18.

- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2022d). Vibration analysis of a sandwich plate with laminated face and porous core layers resting on elastic foundation, *Journal of Innovative Science and Engineering*, 6(1), 32-45.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2023). Dynamic Analysis of Multi-Layered Semi-Infinite Media by Using Finite and Infinite Elements. Golden Light Publishing (Ed.), In *Proceedings of the Third International Civil Engineering and Architecture Congress*, (pp.923-932). Trabzon, Turkey, October 12-14.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2024a). Dynamic Responses of Layered Viscoelastic Half-Medium with Twin Tunnel Under Harmonic Load, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1-19.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2024b). Boşluk İçeren Yarı Sonsuz Bir Ortamda Boşluktaki Harmonik Yük Etkisinin İncelenmesi. Academy Global Publishing House (Ed.), *Proceedings of the Anadolu 14th International Conference On Applied Sciences Mesopotamia 3rd International Group Exhibitions*, (pp. 388-401). Turkey, Gaziantep, February 16-18.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2024c). Harmonic Load Analysis of A Semi-Infinite Porous Medium With Rectangular Cavity. In *Proceedings of The AVRASYA 10th International Conference on Applied Sciences*, Tiflis, Georgia, May 2-5.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2024d). Static Analysis Of A Two-Layered Semi-Infinite Medium with Porosity. In *Proceedings of The AVRASYA 10th International Conference on Applied Sciences*, Tiflis, Georgia, May 2-5.

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2017). Bending Analysis of a Composite Laminated Beam by using Ritz Method. In *Proceeding of 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, Elazığ, Turkey, October 19-21.
- **Yüksel, Y. Z., Akbaş, Ş. D. ve Kara, İ. F.,** (2017). Static Analysis of a Composite Laminated Plate. In *Proceeding of 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, Elazığ, Turkey, October 19-21.
- **Yüksel, Y. Z., Akbaş, Ş. D. ve Kara, İ. F.,** (2017). Sıcaklık Etkisi Altındaki Bir Plağın Serbest Titreşim Analizi. In *Proceeding of XX. Turkish National Mechanic Congress (TUMTMK)*, Bursa, Turkey, September 05-09.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2018). Free Vibration Analysis of a Cross-Ply Laminated Plate in Thermal Environment. *International Journal of Engineering & Applied Sciences*, 10(3), 176-189.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2018). Bending Behavior of a Composite Laminated Plate Under Temperature Rising. In *Proceeding of 13th International Congress On Advances In Civil Engineering (ACE-2018)*, Çeşme, Turkey, September 12-14.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2018). Stress Analysis of a Laminated Composite Plate under Temperature Rising. In *Proceeding of 7th International Conference on Advanced Technologies (ICAT'18)*, Antalya, Turkey, 28 April-01 May.

- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2019). Buckling Analysis of a Fiber Reinforced Laminated Composite Plate with Porosity. *Journal of Computational Applied Mechanics*, 50(2), 375-380.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2019). Vibration Analysis of a Porous Laminated Composite Plate. In *Proceeding of International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology*, Afyon, Turkey, October 23-25.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2020). İstinat Duvarlarına Etki Eden Statik ve Dinamik Toprak Basınç Kuvvetlerinin TDY-2007 ve TBDY-2018 Yönetmeliklerine Göre Karşılaştırılması. In *Proceeding of 4th International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management (ISHAD2020)*, Bursa, Turkey, October 24-25.
- **Yüksel, Y. Z. ve Akbaş, Ş. D.** (2021). Hygrothermal Stress Analysis of Laminated Composite Porous Plates. *Structural Engineering and Mechanics*, 80(1), 1-13.
- **Yüksel, Y.Z. ve Akbaş, Ş.D.** (2024). Nem Oranına Bağlı Malzeme Özelliği Dikkate Alınarak Kompozit Bir Plağın Nem Etkisi Altındaki Gerilme Analizi. In *Proceeding of Anadolu 14th International Conference on Applied Sciences*, Gaziantep, Türkiye, February 16-18.
- **Yüksel, Y.Z. ve Akbaş, Ş.D.** (2024). Porozitenin Tabakalı Kompozit Kirişerin Titreşim Davranışına Etkisinin İncelenmesi. In *Proceeding of Avrasya 10th International Conference on Applied Sciences*, Tiflis, Gürcistan, May 02-05.