

75030

**TOPRAK ve KAYA DOLGU BARAJLARIN
ELASTO-PLASTİK DİNAMİK DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Zeki ÖZCAN

75030

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Haziran 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 6 Kasım 1998

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zekai CELEP *Zekai Celep* 12.11.1998
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İlhan EREN *İlhan Eren* 13.11.98
Prof. Dr. Atilla ANSAL
Prof. Dr. Zekeriya POLAT *Zekeriya Polat* 18.11.98
Prof. Dr. Sadettin ÖKTEN *Sadettin Ökten* 19.11.98

KASIM 1998

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KASIM 1998

ÖNSÖZ

Doktora çalışmalarımın her aşamasında değerli bilgileri ve tecrübelerinden faydalandığım, sürekli yardımlarını gördüğüm danışmanım Prof. Dr. Zekai Celep'e minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Konuyu genişletmemde katkıda bulunan Berlin Teknik Üniversitesi'nden Prof. Dr. Dipl.-Ing. Stavros Savidis'e, Doktora Araştırma Bursu (NATO-A2) ile yurtdışı çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK-BAYG'a teşekkür ederim.

Tezimin son kopyasını okuyarak kıymetli bilgileri ile katkıda bulunan Prof. Dr. Nahit Kumbasar'a da içten teşekkürlerimi bildiririm.

Bilimsel çalışmalarımda da sürekli anlayış ve yardımları ile beni destekleyen eşime de teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Doktora tezimin bu alanda çalışan araştırmacılara faydalı olmasını temenni ederim.

Saygılarımla.

Haziran 1998

Zeki ÖZCAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Barajlar ve Deprem	1
1.2 Konu İle İlgili Çalışmalar	3
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	9
BÖLÜM 2 GENEL KAVRAMLAR	13
2.1 Genel	13
2.2 Üç Boyutlu Elastisite	13
2.2.1 Gerilme tansörü	13
2.2.2 Şekil değiştirme tansörü	16
2.2.3 Şekil değiştirme-yerdeğiştirme bağıntıları	17
2.2.4 Bünye denklemleri	18
2.3 İki Boyutlu (Düzlem) Elastisite	19
2.3.1 Düzlem şekil değiştirme	20
2.4 Bir Boyutlu Elastisite	21
2.4.1 Eksenel normal kuvvet	21
2.4.2 Basit kayma	22
BÖLÜM 3 DOĞRUSAL ELASTİK DAVRANIŞ	23
3.1 Genel	23
3.2 Bir Boyutlu Sonlu Eleman Modeli	24
3.2.1 Yapılan kabuller	24
3.2.2 Sonlu eleman ağının kurulması	25
3.2.3 Eleman hareket denklemi	27
3.2.3.1 Eleman kütle matrisi	28
3.2.3.2 Eleman rijitlik matrisi	29

3.2.3.3 Eleman dış yük vektörü	30
3.2.4 Sistem matrisleri	30
3.2.5 Sönüm etkisi	32
3.2.6 Sınır şartları ve başlangıç şartları	33
3.3 İki Boyutlu Sonlu Eleman Modeli	34
3.3.1 Yapılan kabuller	34
3.3.2 Sonlu eleman ağının kurulması	34
3.3.3 Biçim fonksiyonlarının belirlenmesi	35
3.3.4 Eleman kütle matrisi	38
3.3.5 Eleman rijitlik matrisi	38
3.3.6 Eleman dış yük vektörü	40
3.3.7 Sistem matrisleri	41
3.3.8 Sınır şartları ve başlangıç şartları	41
BÖLÜM 4 ELASTO-PLASTİK DAVRANIŞ	43
4.1 Genel	43
4.2 Şekil Değiştirme Enerjisi	43
4.3 von Mises Akma Kriteri	46
4.4 Hiperbol Zemin Modeli	47
BÖLÜM 5 HAREKET DENKLEMİNİN SAYISAL ÇÖZÜMÜ	50
5.1 Genel	50
5.2 Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi	51
BÖLÜM 6 SAYISAL ÇÖZÜMLER	53
6.1 Genel	53
6.2 Atatürk Barajı	53
6.3 Bölgenin Depremselliği ve En Büyük Yer İvmesi	57
6.4 Bir Boyutlu Sonlu Eleman Modeli	61
6.5 İki Boyutlu Sonlu Eleman Modeli	80
6.6 Parametrik Çalışmalar	108
6.6.1 Doğal titreşim frekansları	108
6.6.2 Sönüm oranı	113
6.6.3 Referans şekil değiştirmesi	116
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	118
KAYNAKLAR	124
ÖZGEÇMİŞ	130

SEMBOL LİSTESİ

Latin Semboller

A	: Alan
a_1, a_2	: Sönüm matrisi katsayıları
$[B]$	: Şekil değiştirme-yerdeğiştirme matrisi
$[C]$	: Sönüm matrisi
$[D]$	: Malzeme sabitleri matrisi
E	: Elastisite modülü
$\{f\}$	: Eleman yük vektörü
$\{F\}$	: Sistem yük vektörü
$\{\Delta F^*\}$	: Etkili yük vektörü artımı
f	: Akma fonksiyonu
f_i	: Titreşim frekansı
G	: Kayma modülü
G_0	: Başlangıç kayma modülü
h	: Sonlu eleman boyu
H	: Baraj yüksekliği
$[k]$	: Eleman rijitlik matrisi
$[K]$	: Sistem rijitlik matrisi
$[K^*]$	: Etkili rijitlik matrisi
$[m]$	: Eleman kütle matrisi
$[M]$	: Sistem kütle matrisi

N_1, N_2	: Şekil fonksiyonları
$[N]$	: Yerdeğiştirme fonksiyonu matrisi
S_{ij}	: Deviator gerilme tansörü
t	: Zaman
T	: Kinetik enerji
T_i	: Titreşim periyodu
tr	: İz (diyagonal elemanların toplamı)
U	: Şekil değiştirme enerjisi
U_v	: Şekil değiştirme enerjisi hidrostatik kısmı
U_d	: Şekil değiştirme enerjisi deviatorik kısmı
$\{u\}$	: Düğüm noktası yerdeğiştirme vektörü
u, v, w	: x, y, z koordinatlarında yerdeğiştirme bileşenleri
$\Delta u, \Delta v, \Delta w$	: Yerdeğiştirme artımları
$\Delta \dot{u}, \Delta \dot{v}, \Delta \dot{w}$	: Hız artımları
$\Delta \ddot{u}, \Delta \ddot{v}, \Delta \ddot{w}$	: İvme artımları
$\ddot{U}_{gx}, \ddot{U}_{gy}, \ddot{U}_{gz}$	: Yer hareketi ivme bileşenleri
V	: Hacim
W	: Dış kuvvetlerin işi
x, y, z	: Dik koordinatlar
$\ddot{Y}_i, \dot{Y}_i, Y_i$	: Genelleştirilmiş ivme, hız ve yerdeğiştirmeler
δ_{ij}	: Kroneker deltası
ϵ_{ij}	: Şekil değiştirme tansörü
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	: Asal şekil değiştirmeler
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	: Normal şekil değiştirme bileşenleri

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$: Kayma şekil değiştirme bileşenleri

γ_1, γ_2 : Modal sönüm oranları

λ_i : Özdeğerler

λ, μ : Lamé sabitleri

ν : Poisson oranı

ρ : Kütle yoğunluğu

σ_{ij} : Gerilme tansörü

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal gerilmeler

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Normal gerilme bileşenleri

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$: Kayma gerilme bileşenleri

σ_0 : Ortalama gerilme

σ_Y : Malzeme akma gerilmesi

ω_i : Açısal frekans

Matematik Semboller

$[]$: Kare veya dikdörtgen matris

$\{ \}$: Satır veya sütun vektör

$| |$: Matris determinanı

$[]^T$: Matris transpozu

$[]^{-1}$: Matris tersi

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 Bir hacim elemanı üzerindeki gerilme bileşenleri	14
Şekil 2.2 a) Asal gerilmeler, b) Hidrostatik gerilmeler c) Deviator gerilmeler	16
Şekil 3.1 Toprak baraj için, a) Bir boyutlu kayma kirişi modeli, b) Sonlu eleman ağı	26
Şekil 3.2 Bir boyutlu sonlu eleman modeli: a) Çubuk sonlu elemanı b) Doğrusal şekil fonksiyonları	28
Şekil 3.3 İki doğrusal çubuk elemanın yerdeğiştirmelerin sürekliliğine göre birleştirilmesi	31
Şekil 3.4 2B sonlu eleman çözümlerinde kullanılan üç düğüm noktalı üçgen eleman	35
Şekil 3.5 Üç düğüm noktalı üçgen eleman için doğrusal şekil fonksiyonları	37
Şekil 3.6 Üçgen elemanlarda eleman ve düğüm noktalarının numaralanması	42
Şekil 4.1 Bir ve iki boyutlu sonlu eleman analizlerinde kullanılan çevrimsel elasto-plastik zemin modeli ve ayrıklaştırılması	49
Şekil 6.1 Atatürk Barajının menba-mansab doğrultusunda alınmış tipik enkesiti (filtre bölgeleri ve servis yolları gözönüne alınmamıştır)	55
Şekil 6.2 Atatürk Barajı genel vaziyet planı	56
Şekil 6.3 Bölgesinin haritası ve Doğu Anadolu Bölgesi'nin ana tektonik yapıları [63]	58
Şekil 6.4 Erzincan Depremi (13 Mart 1992) düzeltilmiş doğu-batı, kuzey-güney ve düşey ivme bileşeni	60
Şekil 6.5 1B sonlu eleman çözümlerde kullanılan sonlu eleman ağı, eleman numaraları ve düğüm nokta numaraları (tabakaların malzeme katsayıları, kesiti oluşturan bölgelerin alanlarının bir ağırlıklı ortalamasından belirlenmiştir)	62

Şekil 6.6	Doğrusal elastik analizlerde kullanılan sonlu eleman programı için akış diyagramı	63
Şekil 6.7	Doğrusal olmayan analizlerde kullanılan sonlu eleman programı için akış diyagramı	64
Şekil 6.8	Bir boyutlu sonlu eleman modeli ($l/m=0$ ve $l/m=1/3$ değerleri için) ile Bessel fonksiyonları kullanılarak elde edilen mod biçimlerinin karşılaştırılması	66
Şekil 6.9	1B sonlu eleman modelinde kullanılan, baraj malzemesinin elasto-plastik davranışını belirleyen iskelet eğrisi ($\gamma_r=0.002$)	69
Şekil 6.10	1B sonlu eleman modelinde kullanılan, baraj malzemesi kayma modülünün kayma şekil değiştirmesi ile değişimi ($\gamma_r=0.002$)	69
Şekil 6.11	Doğrusal elastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +172.0 m, +129.0 m, +86.0 m ve +43.0 m yüksekliklerdeki yerdeğıştirmelerin zamanla değişimi	72
Şekil 6.12	Doğrusal elastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +133.3 m, +90.3 m, +47.3 m ve +4.3 m yüksekliklerdeki kayma gerilmelerinin zamanla değişimi	73
Şekil 6.13	Elasto-plastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +172.0 m, +129.0 m, +86.0 m ve +43.0 m yüksekliklerdeki yerdeğıştirmelerin zamanla değişimi	74
Şekil 6.14	Elasto-plastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +133.3 m, +90.3 m, +47.3 m ve +4.3 m yüksekliklerdeki kayma gerilmelerinin zamanla değişimi	75
Şekil 6.15	Doğrusal elastik ve elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile 1B eleman çözümlerinden elde edilen en büyük yerdeğıştirme, kayma gerilmesi ve kayma şekil değiştirmesi zarflarının baraj yüksekliğince değışimleri	76
Şekil 6.16	Elasto-plastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +159.1 m, +133.3 m, +107.5 m, +90.3 m, +73.1 m, +47.3 m, +38.7 m ve +4.3 m yüksekliklerinde kayma gerilmesi-kayma şekil değıştirmesinin zamana bağılı izi	77
Şekil 6.17	Doğrusal elastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen ivme değerlerinin +172.0 m, +86.0 m ve +0.0 m yüksekliklerdeki zamanla değışimi	78

Şekil 6.18 Elasto-plastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen ivme değerlerinin +172.0 m, +86.0 m ve +0.0 m yüksekliklerdeki zamanla değişimi	79
Şekil 6.19 2B sonlu eleman modelinde kullanılan üç düğüm noktalı üçgen elemanlarla kurulan sonlu eleman ağı, eleman ve düğüm nokta numaraları	81
Şekil 6.20 ADINA programı kullanılarak elde edilen doğal titreşim frekansları (1/s) ve mod biçimleri	85
Şekil 6.20 ADINA programı kullanılarak elde edilen doğal titreşim frekansları (devam) (1/s) ve mod biçimleri	86
Şekil 6.21 2B sonlu eleman modelinde kullanılan, baraj gövdesini oluşturan malzemelerin elasto-plastik davranışını belirleyen temel davranış eğrileri	88
Şekil 6.22 2B sonlu eleman modelinde kullanılan, baraj gövdesini oluşturan malzemelerin kayma modüllerinin, kayma şekil değiştirmeleri ile değişimi	88
Şekil 6.23 Doğrusal elastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 40, 30, 22 ve 13. düğüm noktalarındaki yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	93
Şekil 6.24 Doğrusal elastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 40, 30, 22 ve 13. düğüm noktalarındaki düşey yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	94
Şekil 6.25 Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile sırasıyla $t=3.10$ s, $t=3.60$ s, $t=5.10$ s ve $t=5.70$ s de baraj gövdesinde oluşan yerdeğiştirmeler (noktalı çizgi başlangıçtaki, sürekli çizgi yerdeğiştirmiş sonlu eleman ağını göstermektedir)	95
Şekil 6.26 Doğrusal elastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 26, 50, 38 ve 22. elemanlardaki kayma gerilmelerinin zamanla değişimi	96
Şekil 6.27 Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile, sırasıyla $t = 2.95$ s, $t = 3.75$ s, $t = 5.00$ s de baraj gövdesinde hesaplanan τ_{xy} (MPa) kayma gerilmelerinin dağılımı	97
Şekil 6.28 Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile, sırasıyla $t = 2.95$ s, $t = 3.75$ s, $t = 5.00$ s de baraj gövdesinde hesaplanan γ_{xy} (%) kayma şekil değiştirmelerinin dağılımı	98

Şekil 6.29 Elasto-plastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 40, 30, 22, 13. düğüm noktalarındaki yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	99
Şekil 6.30 Elasto-plastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 40, 30, 22, 13. düğüm noktalarındaki düşey yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	100
Şekil 6.31 Elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile sırasıyla $t=3.10$ s, $t=4.30$ s, $t=5.50$ s ve $t=6.60$ s de baraj gövdesinde oluşan yerdeğiştirmeler (noktalı çizgi başlangıçtaki, sürekli çizgi yerdeğiştirmiş sonlu eleman ağını göstermektedir)	101
Şekil 6.32 Elasto-plastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 26, 50, 38 ve 22. elemanlardaki kayma gerilmelerinin zamanla değişimi	102
Şekil 6.33 Elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile sırasıyla $t = 2.40$ s, $t = 3.00$ s, $t = 4.20$ s ve $t = 5.30$ s de baraj gövdesinde hesaplanan τ_{xy} (MPa) kayma gerilmelerinin dağılımı	103
Şekil 6.34 Elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile, sırasıyla $t = 2.40$ s, $t = 3.00$ s, $t = 4.20$ s ve $t = 5.30$ s de baraj gövdesinde hesaplanan γ_{xy} (%) kayma şekil değıştirmelerinin dağılımı	104
Şekil 6.35 Elasto-plastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen 22, 26, 30, 33, 38, 44, 50 ve 56. elemanlardaki kayma gerilmeleri ile kayma şekil değıştirmelerin zamana bağılı izi	105
Şekil 6.36 Doğrusal elastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen +172.0 m ve 0.0 m yüksekliklerdeki ivme değęerlerinin zamanla değışimi	106
Şekil 6.37 Elasto-plastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen +172.0m ve 0.0 m yüksekliklerdeki ivme değęerlerinin zamanla değışimi	107
Şekil 6.38 1B modelde, sönümsüz ve doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle en büyük yatay yerdeğıştirme ve gerilmelerin kararlı zorlama açısal frekansı ile değışimi ($\omega_1 = 4.8$ rad/s, $\omega_2 = 10.4$ rad/s, $\omega_3 = 16.0$ rad/s)	109
Şekil 6.39 2B modelde, sönümsüz ve doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle en büyük yatay yerdeğıştirme, düşey yerdeğıştirme ve gerilmelerin kararlı zorlama açısal frekansı ile değışimi ($\omega_1 = 4.4$ rad/s, $\omega_2 = 6.8$ rad/s, $\omega_3 = 7.9$ rad/s, $\omega_4 = 8.8$ rad/s, $\omega_5 = 9.8$ rad/s, $\omega_6 = 11.4$ rad/s, $\omega_7 = 12.2$ rad/s, $\omega_8 = 13.2$ rad/s, $\omega_9 = 13.8$ rad/s, $\omega_{10} = 15.4$ rad/s)	111

Şekil 6.40	1B modelde, sönümsüz ve elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle referans şekil değiştirmesi (γ_r) nin değişik değerleri için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin kararlı zorlama açısal frekansı ile değişimi ($\omega_{1(0.002)} = 1.83 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(0.005)} = 2.25 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(0.010)} = 3.0 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(\text{doğrusal})} = 4.8 \text{ rad/s}$)	112
Şekil 6.41	2B modelde, sönümsüz ve elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle referans şekil değiştirmesi (γ_r) nin değişik değerleri için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin kararlı zorlama açısal frekansı ile değişimi ($\omega_{1(x1)} = 1.8 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(x2.5)} = 2.1 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(x5)} = 2.8 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(\text{doğrusal})} = 4.4 \text{ rad/s}$)	112
Şekil 6.42	Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle, 1B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının sönüm oranı ile değişimi	114
Şekil 6.43	Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle, 2B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının sönüm oranı ile değişimi	114
Şekil 6.44	Elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle, 1B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının sönüm oranı ile değişimi	115
Şekil 6.45	Elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle, 2B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının sönüm oranı ile değişimi	115
Şekil 6.46	Elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle, 1B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının referans birim şekil değiştirmesi (γ_r) ile değişimi	117
Şekil 6.47	Elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle, 2B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının referans birim şekil değiştirmesi (γ_r) ile değişimi	117

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Şekil 3.6 da verilen sistemin eleman matrisleri ile sistem matrisleri arasındaki ilişki	42
Tablo 6.1 Atatürk Barajı gövde dolgusuna ait bazı büyüklükler [61]	54
Tablo 6.2 Gövde dolgusunda kullanılan malzemelerin ortalama teknik özellikleri [61]	54
Tablo 6.3 Yaralıoğlu ve diğ. [63] tarafından verilen deprem risk analizi sonuçları (% olarak)	57
Tablo 6.4 Electrowatt and Associates [64] tarafından verilen deprem risk analizi sonuçları (en büyük yer ivmesi g olarak)	57
Tablo 6.5 Bir boyutlu sonlu eleman modelinde kullanılan eleman düğüm nokta koordinatları	65
Tablo 6.6a 1B sonlu eleman modelinden hesaplanan sönümsüz serbest titreşim frekansları (1/s) ve periyotları (s)	67
Tablo 6.6b Sonlu eleman çözümleri ve Bessel Fonksiyonları çözümlerinden elde edilen serbest titreşim periyotları (s)	67
Tablo 6.7 İki boyutlu sonlu eleman ağında kullanılan düğüm noktaları koordinatları	82
Tablo 6.8 2B çözümlerde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri ve düğüm nokta numaraları	83
Tablo 6.9 2B modelde sönümsüz serbest titreşim frekansları (1/s) ve periyotları (s)	84

TOPRAK ve KAYA DOLGU BARAJLARIN ELASTO-PLASTİK DİNAMİK DAVRANIŞI

ÖZET

Bu tezde, toprak ve kaya dolgu tipinde inşa edilen barajların deprem gibi dinamik ve tekrarlı yükler etkisi altındaki doğrusal elastik ve elasto-plastik davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde baraj gövdesi ayrı ayrı bir boyutlu ve iki boyutlu modellenerek davranışı değerlendirilmiştir. Bir boyutlu sonlu eleman modelinde, baraj gövdesi değişken kesitli, bir boyutlu sonlu elemanlarla kayma kaması olarak modellenmiştir. İki boyutlu sonlu eleman modelinde ise baraj gövdesi düzlem şekil değiştirme problemi olarak ele alınmış ve üç düğüm noktalı, üçgen sonlu elemanlar kullanılmıştır. Baraj malzemesinin doğrusal olmayan davranışı için hiperbolik zemin modeli kullanılmıştır. Elasto-plastik modülü belirleyen akma yüzeyinin bulunmasında Mises akma kriteri kullanılmıştır. Hareket denkleminin sayısal çözümü de adım adım integrasyon tekniği ile yapılmıştır.

Sayısal örnek olarak, kaya dolgu tipinde inşa edilen Atatürk Barajı'nın deprem davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Yer hareketi olarak 13 Mart 1992 Erzincan depremi düzeltilmiş ivme bileşenleri eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Her iki model ve davranışa ait baraj gövdesinde oluşan yerdeğiştirmeler, şekil değiştirmeler, kayma gerilmeleri ve ivmelerin zamanla değişimleri elde edilerek grafiklerle gösterilmiştir. Ayrıca, doğal titreşim frekanslarının belirlenmesi, sönüm oranının ve referans birim şekil değiştirmesinin davranış üzerindeki etkisini belirlemek için parametrik çalışmalar da yapılmıştır.

Yapılan çözümlerin karşılaştırılmasından; (i) daha az sayıda eleman ve parametrenin belirlenmesine ihtiyaç duyan, daha kısa hesap zamanı ve zorluğu olan bir boyutlu modelin ön boyutlandırma, barajın serbest titreşim frekanslarını belirlemede, baraj gövdesinde meydana gelen yerdeğiştirme, gerilme ve ivmelerin büyüklüklerinin belirlenmesinde kullanılabileceği; (ii) baraj genişliğinin yüksekliğine oranı dört veya daha büyük olduğu hallerde, bir boyutlu modelden elde edilen sonuçların, yerinde yapılan deneyler ve deprem sırasında ölçülen değerlerle uyumlu olduğu, baraj davranışını yansıttığı; (iii) daha fazla parametre ve daha uzun çözüm zamanları gerektiren üç boyutlu analizler yerine iki boyutlu modeller ile yapılan analizlerin yeterli yaklaşımı sağladığı; (iv) dar veya üçgen biçimli vadilere oturan barajlar için üç boyutlu modellerin kullanılması gerekliliği; (v) doğrusal olmayan zemin davranışını daha gerçekçi yansıtan, elasto-plastik davranışın mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır.

ELASTO-PLASTIC DYNAMIC RESPONSE OF EARTH AND ROCKFILL DAMS

SUMMARY

In this thesis, linear elastic and elasto-plastic behaviour of earth and rockfill dams subjected to dynamic and repeated loading are presented. The analyses are carried out by using the finite element method (FEM). For this purpose, the dam is modeled as a one-dimensional (1D) shear-wedge model and a two-dimensional (2D) plain-strain problem. The hyperbolic soil model is used to simulate hysteretic shear stress-strain behaviour of the soil under repeated loading conditions. In the numerical analysis, the dynamic behaviour of the dam subjected to ground motion is investigated with the consideration of a typical cross-section of the Atatürk Dam and the EW-component of motion recorded during Erzincan Earthquake of March 13, 1992 is used. The numerical solutions are carried out for both the linear elastic and elasto-plastic behaviours and the results are presented to show the variations of displacements, shear stresses and accelerations with respect to time, comparatively. Moreover, the parametric studies are carried out to determine the influence of dynamic soil parameters on the behaviour of both models.

Earth dams are large three-dimensional non-homogeneous structures having various inelastic material layers. Consequently, their computational modeling for prediction of their dynamic responses to earthquake shaking is extremely difficult. As a result, existing theories and current dynamic analyses of earth dams involve many simplifying assumptions.

The one-dimensional, linear elastic model that treats the dam wedge-shaped shear beam has enjoyed significant popularity among engineers and researchers over the last four decades. When the length of the shear wedge-compared to its height-is large, the response is approximately one-dimensional. For example, for earth dams with average length/height ratios greater than 4, the shear stresses on the horizontal cross sections become pronounced in the deformations of the dam, consequently the 1D model can predict successfully certain dynamic characteristics of actual earth dams observed during forced vibration tests and during earthquakes. However, it is occasionally required to deal with earth dams for which the ratio of length to height is comparatively small. In this case the normal stresses in the vertical direction effect the behaviour of the dam in addition to the shear stresses. Hence, their response is of a two-dimensional nature.

In general, the investigation of behaviour of dams subjected to ground motion is carried out by taking into account of the shear deformations only. For such a case, dam can be defined as a one-dimensional model that shear waves travels through its

depth (Figure 1). It is widely assumed that soil is an elastic material, and then, the damping term is added to the whole system at the later stage to obtain a more realistic model. In this case, the techniques mainly developed with the assumption of elastic and small deformations are used. If the ground motion is strong, then the soil deforms as a plastic material by exceeded its elastic limit. Consequently a more sophisticated model is required to find realistic solutions which represent non-linear behaviour. By increasing the number of parameters which represent the soil, it may be possible to obtain a better solution. In such a case, the determination of material parameters become a difficult task and due to the complexities of the assumptions it takes longer time to obtained a solution. Therefore, it is necessary to take some precautions. In the presented study cyclic shear stress-strain relation with an elasto-plastic behaviour is used as a model to partially overcome the difficulties mentioned above.

For a 1D model, the equation of motion for dam can be written neglecting damping term as in the following form (Figure 1):

$$\rho(y) \alpha y \ddot{u}(y,t) - \frac{\partial}{\partial y} \left[\alpha y G(y) \frac{\partial u(y,t)}{\partial y} \right] = -\rho(y) \alpha y \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

where $\rho(y)$ is the mass density, $G(y)$ is the shear modulus, $u(y,t)$ is the upstream-downstream displacement (relative to the base of the dam), $\alpha (=2b/H)$ is the dam slope, $\ddot{u}(y,t)$ is the relative acceleration and $\ddot{u}_g(t)$ is the horizontal ground acceleration.

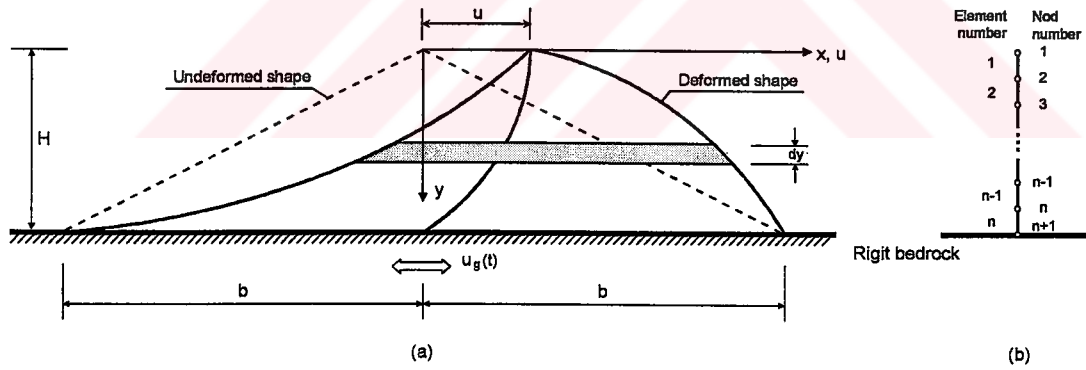


Figure 1. a) 1D shear-wedge model for earth dams, b) Finite element model

For the solution of the governing equations of the problem finite element technique is adopted for grasping various variation of the mass density and the shear modulus along the height of the dam. The horizontal displacement u_i at each node of the considered finite element is assumed to have one degree of freedom (Figure 2a).

The element displacement function u^e with the linear shape function defined at each element coordinates can be given as follows (Figure 2b):

$$u^e(\bar{y}) = \sum_{i=1}^2 N_i^e(\bar{y}) u_i^e = N_1^e(\bar{y}) u_1^e + N_2^e(\bar{y}) u_2^e = u_1^e \left(1 - \frac{\bar{y}}{h_e}\right) + u_2^e \left(\frac{\bar{y}}{h_e}\right) \quad (2)$$

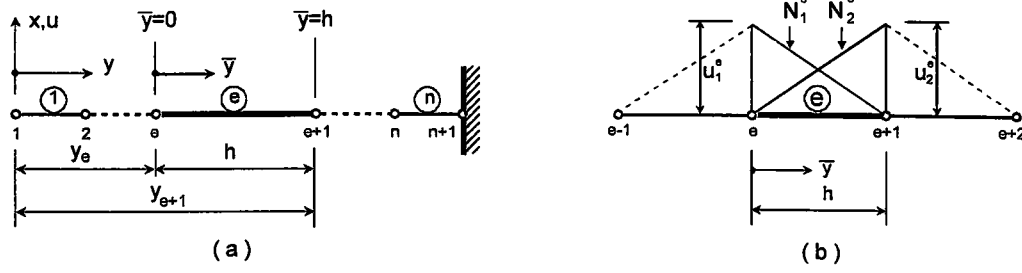


Figure 2. a) 1D Finite element, b) Linear shape functions

Substituting Eq.2 into Eq.1 and integrating the resulting equation through the each element, yield the equation of motion for each element in a matrix form as follows:

$$[m]\{\ddot{u}\} + [k]\{u\} = \{f\} \quad (3)$$

where $[m]$ is the element mass matrix, $[k]$ is the element stiffness matrix, $\{f\}$ is the element force vector. The element matrices can be written in the following form:

$$[m]_e = \rho \int_0^h (y_e + \bar{y}) N_i N_j d\bar{y} = \rho h \begin{bmatrix} (\frac{y_e}{3} + \frac{h}{12}) & (\frac{y_e}{6} + \frac{h}{12}) \\ (\frac{y_e}{6} + \frac{h}{12}) & (\frac{y_e}{3} + \frac{h}{4}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[k]_e = G \int_0^h (y_e + \bar{y}) \frac{\partial N_i}{\partial \bar{y}} \frac{\partial N_j}{\partial \bar{y}} d\bar{y} = \frac{G}{h} \begin{bmatrix} (y_e + \frac{h}{2}) & -(y_e + \frac{h}{2}) \\ -(y_e + \frac{h}{2}) & (y_e + \frac{h}{2}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\{f\}_e = -\rho \ddot{u}_g \int_0^h (y_e + \bar{y}) N_i d\bar{y} = -\rho h \ddot{u}_g \begin{Bmatrix} \frac{y_e}{2} + \frac{h}{6} \\ \frac{y_e}{2} + \frac{h}{3} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

In 2D finite element analysis, the following assumptions are made; a) dam is considered as a plain-strain problem, b) the triangle element with three nodes used in finite element mesh (Figure 3), c) material of dam behaves as a linear elastic material and displacement are small, d) dam is based on a rigid foundation, e) damping of the dam material is assumed to be proportional to the mass and the stiffness matrix (Rayleigh type damping), f) reservoir influences are neglected.

Displacement field within the triangular finite element is assumed to be

$$u(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad , \quad v(x, y) = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y \quad (7)$$

where u and v are displacement component along the direction of x and y axes respectively.

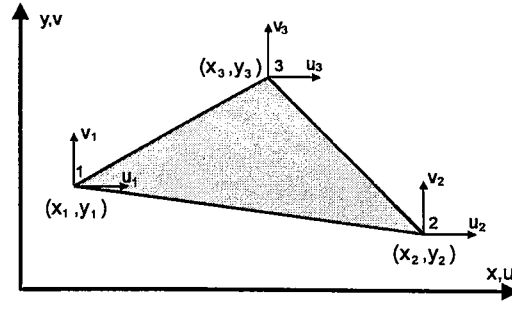


Figure 3. Triangle element with three nodes which are used in FE solutions

Under the assumption given above a computer code is developed. Its flow chart is illustrated in Figure 4. Each of element matrices is connected to each other with consideration of their numbering systems and boundary conditions.

A viscous damping matrix which is proportional to the mass and the stiffness matrix is assumed as:

$$[C] = a_1[M] + a_2[K] \quad (8)$$

where, the coefficients a_1 and a_2 are constants.

By using regular assembling technique and by considering boundary conditions the equations of motion are obtained as a matrix form given as follows:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (9)$$

where, $[M]$ is the system mass matrix, $[C]$ is the system damping matrix, $[K]$ is the system stiffness matrix and $\{F\}$ is the system force vector. $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ and $\{u\}$ are acceleration, velocity and displacement vectors, respectively. Undamped natural frequencies of system can be obtained from the governing equation (9):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (10)$$

In the case of zero shear stress on the crest and zero relative displacement on the base, the boundary conditions can be written from Figure 1a in the following form:

$$\left. \frac{\partial u(y,t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad , \quad u(H,t) = 0 \quad (11)$$

The combination of the governing equation (10) and the boundary conditions (11) leads to the frequency equation of the free vibration of the system. On the other hand equations (9) represent the general dynamic motion of the dam which can be solved by using the corresponding initial conditions. In the forced vibration, it is assumed that the system starts from to stillstand; the corresponding boundary conditions can be given in the following form:

$$u(y,0) = 0 \quad , \quad \dot{u}(y,0) = 0 \quad (12)$$

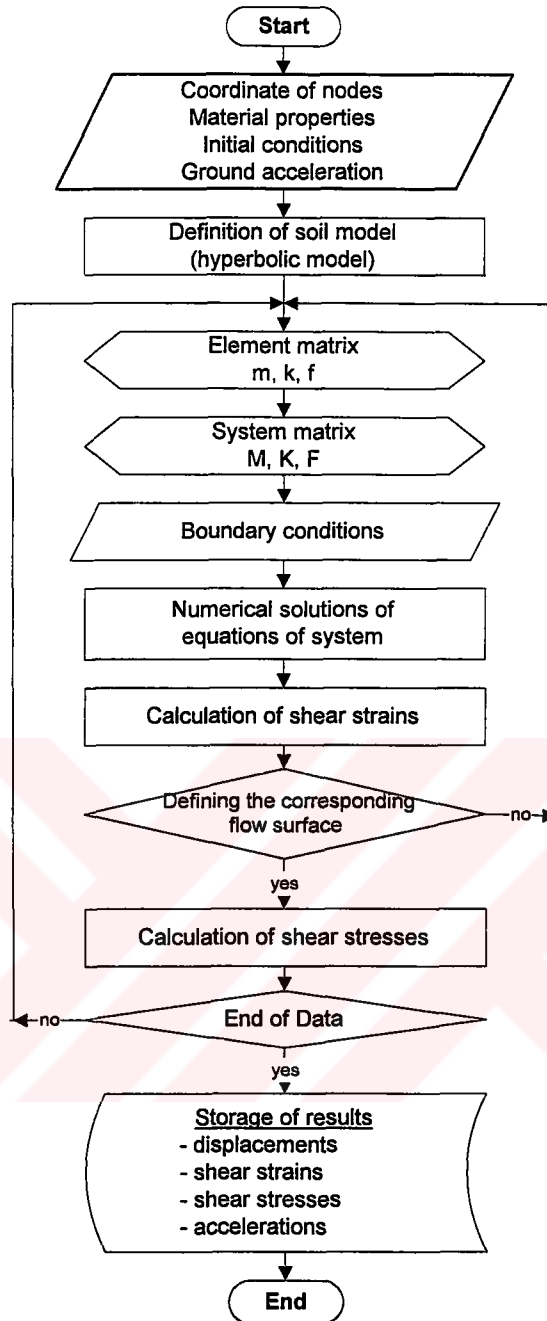


Figure 4. Flow chart for the linear elastic and elasto-plastic material behaviour

These boundary conditions are applied by means of erasing the related rows and column from system matrices in the finite element formulation.

In order to represent the non-linear behaviour of the soil, the non-linear hysteretic material model is adopted. For the description of the non-linear hysteretic shear stress versus shear strain behaviour of the dam material, a one-dimensional elasto-plastic model based on multi-yield surface kinematic plasticity theory is used. The basic principles of the model are shown in Figure 5. The initial loading/unloading stress-strain curve is refereed to as the "back-bone" or "skeleton" curve.

The back-bone curve is assumed to be symmetrical about the origin. In soil dynamics, the following hyperbolic soil model is widely used:

$$\tau = G_0 \frac{\gamma}{1 + (\gamma/\gamma_r)} \quad (13)$$

where, G_0 is the initial shear modulus and γ_r denotes a characteristic soil shear strain which controls the hyperbolic behaviour of the soil. For both loading and unloading directions, this non-linear curve can be used to represent an elasto-plastic behaviour. With respect to the origin, a symmetry is assumed since shear deformations can appear in two directions.

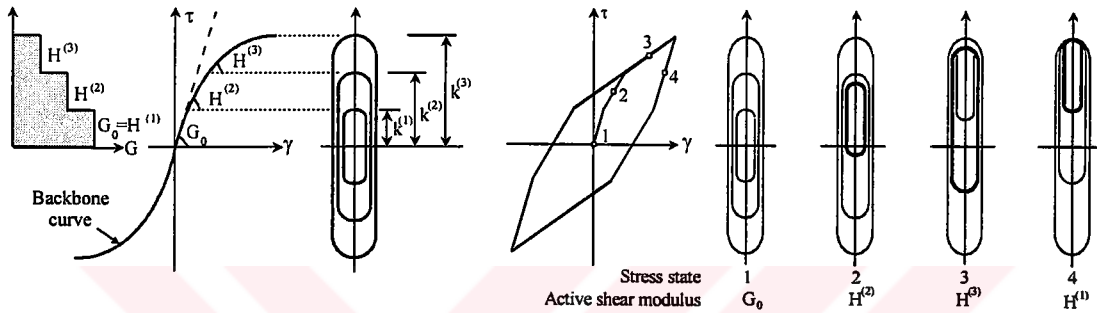


Figure 5. Discretization of the backbone curve, for representing the yield surfaces and the hysteretic behaviour of the soil

For a nonlinear skeleton curve defined as above, the shear modulus changes depending on the level of the shear stress. As it is seen in Figure 5, the shear modulus of the soil decreases as the stress level increases, which means that soil experiences larger deformations when shear stress gets higher. In numerical calculations, the linear line segments are used to represent the continuous shape of the skeleton curve. The slopes of these line segments correspond to the shear stiffness of the soil and they are assumed to be constant within a finite element region (Figure 5). The accuracy of the numerical solutions depends upon the number of linear segments used.

As it is mentioned above the continuous variation of the back-bone curve is approximated by several linear segments along which the tangent modulus, H , is constant. To each linear segment with slope H is associated a yield surface in the stress space. The procedure thus defines a collection $f^1, \dots, f^m$ of nested yield surfaces:

$$f^m = 3 \left[\tau - \alpha^m \right]^2 - \left[k^m \right]^2 = 0 \quad (14)$$

where, k^m represents the size of the yield surface, m ; and α^m represents the offset of the yield surface with respect to the origin.

In a case of plain-strain, the function which defines the yield surface can be expressed in the following form:

$$f^m = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right] - [k^m]^2 = 0 \quad (15)$$

The elasto-plastic modulus associated with the yield surface f^m is denoted by H^m and it can be given as :

$$\dot{\tau} = H^{(m)} \dot{\gamma} \quad H^{(m)} = \frac{G_0}{(1 + (\gamma/\gamma_r))^2} \quad (16)$$

In the numerical solution of the elasto-plastic behaviour of the soil the finite element formulation given for the elastic behaviour is used in a step wise mode to define the position of each finite elements on the behaviour curve with the consideration of their previous positions. A typical cross-section given in Figure 6 is used to investigate earthquake response of the Atatürk Dam. The Atatürk Dam is the largest rockfill dam, which has a height of 172 m from the base and a crest length of 1914 m, in Turkey.

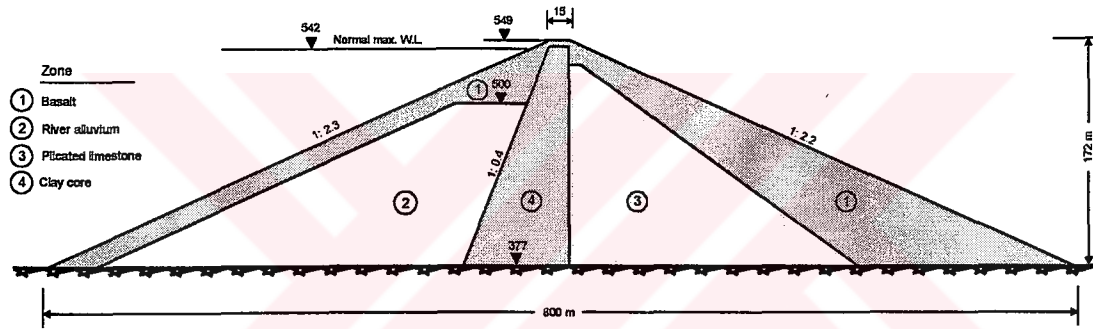


Figure 6. A typical cross-section of the Atatürk Dam

In 1D model, the dam is divided into 20 finite elements of shear-wedge shape. In order to obtain the dynamical response of the dam, the EW acceleration component of Erzincan Earthquake of March 13, 1992 is applied to the bedrock as a ground motion (Figure 7). The numerical solution for the equation of motion is carried out by using the linear acceleration method.

Using the computer code (flow chart in Figure 4) written for this study, the numerical solution for the governing equation of motion is carried out. Solutions are obtained for both linear elastic and elasto-plastic behaviours. The variations of deformations, stresses and accelerations with respect to time are illustrated and given comparatively in figures at various height of the dam. When the results based on the assumption of linear elastic and elasto-plastic behaviour of material are compared, the displacements for the elasto-plastic behaviour are increased about 70% while hand the stresses are decreases about 33% than linear elastic behaviour.

The shear stresses and strains at different elements and their trace (their dependence to each other) in time domain is illustrated in figures where, the cyclic behaviour of the soil can be seen clearly.

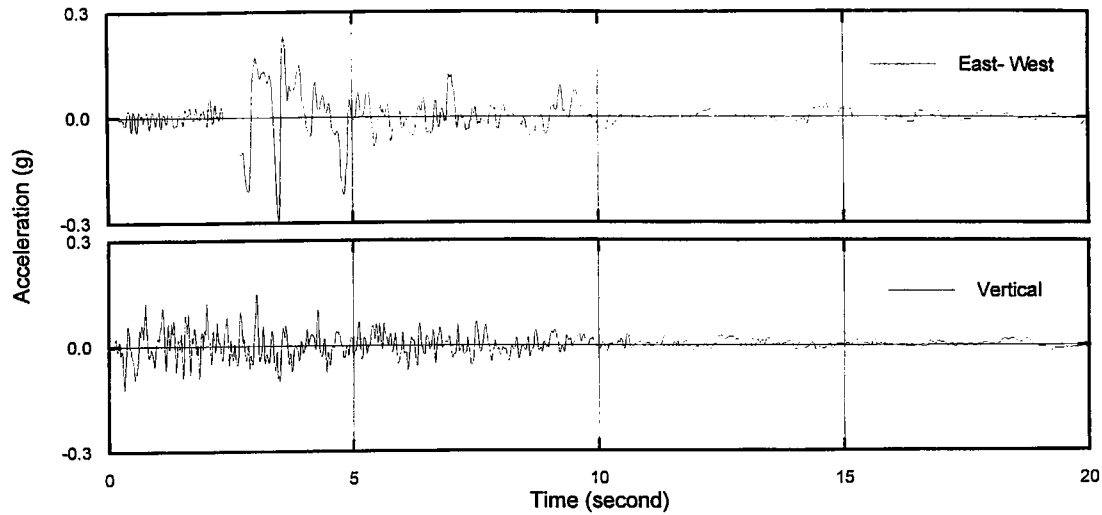


Figure 7. Acceleration time history for the EW-and vertical-component of Erzincan Earthquake of March 13, 1992

Furthermore, in 2D model, the linear elastic and non-linear cyclic shear stress-strain behaviour of dam material are investigated. The typical cross-section of the Atatürk dam is divided into 61 finite elements given Figure 8. The EW and vertical acceleration component of Erzincan Earthquake of March 13, 1992 is applied to dams from the bedrock as an external loading (Figure 7). For the behaviour of both materials of the dam, the variation of horizontal and vertical displacements, shear stresses, shear strains and accelerations with respect to time are presented in curves and contours.

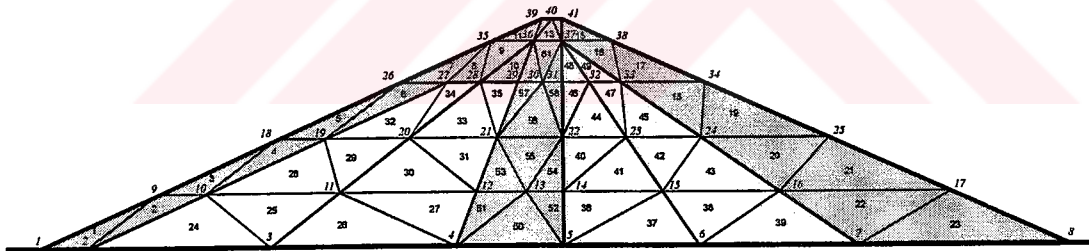


Figure 8. Adopted finite element mesh for the Atatürk dam having triangle elements

In 1D model, the shear modulus decreases as the shear strain increases for the elasto-plastic behaviour. In this case, the soil tends to deform easily as the level of the shear stress increases. As a consequence of this behaviour in the linear elastic response, displacements increase about 70%, whereas shear stresses decreased about 33% and the maximum acceleration value decreases about 100%.

In 2D model, compared to the elastic behaviour, the maximum horizontal displacements about 75% and vertical displacements about 135% are increased in the elasto-plastic response. The maximum shear stress is decreased about 60% in the elasto-plastic response. When the dam base is taken as a reference position, the acceleration in horizontal direction is increased about 100% in the linear elastic response and about 33% in the elasto-plastic response.

Under the assumption of the linear elastic material behaviour, the results obtain from 1D and 2D models are compared and the horizontal displacements calculated in the dam crest are found to be approximately. In both models, the value of shear stresses on the dam base are almost at the same level. Comparing of the 1D model with 2D model, yields the value of horizontal acceleration of the dam crest is about 33% larger in 1D model. These show that 1D models gives results having acceptable level of accuracy.

Moreover, the comparison is made for the elasto-plastic material behaviours of 1D and 2D models. The horizontal displacements of the dam crest are found to be almost same value. In both cases, the maximum horizontal acceleration is about 0.4 g. Therefore, there is an indication that 1D model usually yields sufficient accuracy in many cases with less computation effort.

Also, to show the dependence of the natural frequencies on the variation of material behaviours in 1D and 2D finite elements models, parametric studies are carried out and results are presented in figures. In a similar way, the effect of damping ratio and reference shear strain on the dynamic response of the dam are investigated and the results are given. In both models, it can be seen that the reference shear strain plays a dominant role in the elasto-plastic material behaviour.

Based on the comparison of the numerical done in the presented study the following results can be drawn out:

- The natural frequencies of the dam, the displacements and accelerations of the dam crest and the value of stresses on the base of the dam can be found accurately in the preliminary stage of a project by assuming 1D model when height/length ratio is less than 4 with a minimum computational effort.
- For earth dams with average length/height ratios greater than 4, the 1D model can predict successfully certain dynamic characteristics of actual earth dams observed during forced vibration tests and during earthquakes.
- 2D model may be used in advance stage of the project which has the capability of defining mechanical properties of each element by considering horizontal and vertical variations.
- It is recommended to use 3D models for investigating the earthquake response of dam located in narrow or triangle shaped valleys.
- It should be preferred to use an elasto-plastic soil model which shows more realistic behaviour of a dam material with a better approximation compared to elastic material behaviour.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 BARAJLAR VE DEPREM

Ülkemizin coğrafik ve hidrolojik yapısının elverişli olmasından dolayı sulama ve enerji amaçlı birçok toprak ve kaya dolgu baraj inşa edilmiş ve edilmektedir. Bu yatırımlar pahalı olmakla birlikte tamamlanmalarından kısa bir süre sonra ülke ekonomisine büyük katkılarda bulunmaktadır. Ülkemizin içinde bulunduğu ekonomik şartlar gözönüne alındığında büyük yatırımlara maddi kaynak temin etmekte önemli güçlüklerin olduğu açıktır. Bundan dolayı mevcut kaynakların en iyi şekilde değerlendirilmesi gereği ortaya çıkmaktadır. Mühendislik uygulaması açısından bu optimizasyon, inşaat maliyetlerini ve inşaat süresini yapı güvenliğini etkilemeyecek şekilde en aza indirerek tesisi en kısa sürede servise almak ile mümkün olabilecektir.

Yurdumuzun, dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri üzerinde olduğu gözönünde tutulursa, barajlara, projelendirme aşamasında çok özen gösterilmesi, temel zemininin ve baraj gövdesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gereği ortaya çıkmaktadır. Mühendislik yapılarının dinamik yükler altında, statik yükler altındaki davranışından çok daha farklı davrandığı ve farklı karakterde etkilere maruz kaldığı da bilinmektedir. Toprak ve kaya dolgu barajlarda baraj malzemesi olarak kullanılan zeminin de doğrusal olmayan bir davranış gösterdiği hatırlanırsa barajın doğrusal olmayan deprem davranışının bilinmesi ve depreme karşı güvenliğinin sağlanması kaçınılmaz olmaktadır.

Barajların diğer mühendislik yapılarından çok daha farklı bir özelliği de hasar görmeleri veya yıkılmaları halinde büyük can kaybı ve maddi hasarlara neden

olmalarıdır. Japonya'da 1923 Kanto depreminde Yukarı Murayama Barajları, 1944 Nankai depreminde Otaniike Barajı [1], 1968 Tokachi-Oki depreminde Hokaido Barajı, 1979 Izu-Oshima depreminde Mochikoshi Barajı [2] hasar görmüştür. Bunun gibi ABD'de 1971 San Fernando depreminde Aşağı San Fernando Barajı hasar görmüştür [3]. Şili'de 1985 depreminde yaklaşık 30 kadar toprak dolgu baraj etkilenmiş, La Marquese ve La Palma Barajları tamamen göçmüştür [2]. Yurdumuz'da da 1986 yılında Malatya depreminde kretinde çatlaklar oluşan Sürgü Barajı örnekler arasında sayılabilir [1].

Barajların statik ve dinamik analizinde, yerinde yapılan arazi ölçümleri, laboratuvar deneyleri ve bilgisayar simülasyonu ile sayısal çözümler birlikte kullanılmaktadır. Laboratuvarda model üzerinde yapılan deneylerde, kapsamlı laboratuvar düzeneklerine, çalışma gruplarına, uzun sürelere ve yüksek maliyetlere ihtiyaç duyulduğu ve bunun sonucunda da ancak sınırlı sayıda parametrenin etkisinin gözlenebildiği görülmektedir. Zemin etüdleri ve küçük boyutlu laboratuvar deneylerinin çoğu kez zemin davranışını yansıtamadığı da bilinen bir gerçektir. Bu yüzden çok sayıda deney sonuçlarından istatistiksel sonuçlar çıkarılarak zemin parametreleri tesbit edilmektedir. Ayrıca karmaşık ve farklı tabakalaşma gösteren zeminlerde arazi deneyleri ve test dolguları davranışlarından geri gidilerek zemin parametrelerinin belirlenmesi yoluna gidilmektedir. Bu sebeplerden dolayı pek çok araştırmacı bilgisayar yardımı ile çözümlere yönelmişlerdir.

Bütün bunların yanında toprak barajların modellenmesi ve dinamik analizi oldukça karmaşık bir mühendislik problemidir. Çözümün zorluklarının başında katı-sıvı ortamların birlikte bulunması ve homojen olmayan bir yapıya sahip olmaları, ikinci olarak baraj malzemesinin doğrusal olmayan davranışı, tekrarlı yükler altında farklı davranış göstermesi ve anizotrop olması, son olarak da yapı-sıvı-zemin etkileşiminin olması problemi karmaşık hale getiren faktörlerdendir.

Bu yüzden problemin analitik veya sayısal çözümü için bazı kolaylaştırıcı kabullerin yapılması kaçınılmaz olmaktadır. Yapı-sıvı-zemin etkileşimi ve elasto-plastik zemin davranışının modellenmesindeki gelişmeler, araştırmacıların daha rahat davranmalarını da sağlamaktadır. Günümüzde genellikle karmaşık problemlerin

çözümünde olduğu gibi baraj problemlerinde de sayısal yöntemler, analitik yöntemlerden daha fazla kullanılmaktadır. Böyle olmasının en başta gelen nedeni ise daha fazla parametrenin etkisinin hesaba dahil edilebilmesidir.

Bilgisayar dünyasındaki hızlı gelişmeler de sayısal tekniklerin ihtiyaç duyduğu daha güçlü bilgisayarların üretilmesini ve kullanılmasını sağlamaktadır. Böylece daha etkin modellerin kurulması ve daha gerçekçi baraj davranışının bilinmesi mümkün olmaktadır.

Barajlar önemli ve büyük yatırımlar olduğundan, projelendirme safhasında disiplinler arası kapsamlı işbirliğine de ihtiyaç vardır. Etüd çalışmalarında jeoloji, zemin ve temel mühendisliği, deprem mühendisliği, jeofizik, hidroloji, kaya mekaniği ve tünel mühendisliği dallarında uzmanların eşgüdüm içinde işbirliği de gerekmektedir.

1.2 KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Uzun yıllardan beri toprak ve kaya dolgu barajların deprem etkisi altındaki davranışları ve güvenlikleri bilimsel araştırmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Toprak barajların deprem etkisi altındaki dinamik analizi oldukça basit analitik ve sayısal yöntemlerle başlamıştır. İlk olarak Mononobe 1936 yılında toprak baraj için bir boyutlu kayma kaması modelini geliştirmiştir. Bu çalışmada baraj gövdesi rijit bir temele oturan kayma kirişi olarak modellenmiştir. Bu model daha sonra bu sahada araştırma yapacak araştırmacılar için temel teşkil etmiş ve geliştirilmiştir.

Hatanaka 1952 yılında toprak barajın deprem yükleri altındaki davranışına kayma şekil değiştirmelerinin etkisinin daha belirleyici olduğunu göstermiştir. Yine Hatanaka dikdörtgen biçimli bir vadiye oturan barajı iki boyutlu kayma kirişi şeklinde modelleyerek yeni bir yaklaşım getirmiştir. Ambraseys [4] de kayma kirişi modelini geliştirerek dikdörtgen vadiye oturan trapez kesitli, elastik tabakalı modelle çözüm yapmıştır.

Sonlu farklar yöntemi ilk olarak Ishizaki ve Hatakeyama tarafından 1962 yılında kullanılmıştır. Bu çalışmada barajın menba-mansab doğrultusundaki enkesiti alınmış ve düzlem şekil değiştirme problemi olarak çözülmüştür.

Sonlu elemanlar yöntemi, ilk olarak 1966 yılında, Clough ve Chopra tarafından kullanılmıştır. Bu çözümde baraj iki boyutlu düzlem şekildeğiştirme problemi olarak modellenmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi zeminin elastik davranışının, yapının değişik geometrisinin, farklı sınır şartlarının ve malzeme özelliklerinin kolaylıkla tanımlanabilmesinden dolayı çok benimsenen ve uygulanan bir yöntem olmuştur.

Makdisi ve Seed [5] toprak dolguların deprem davranışını değerlendirmek ve zemin gerilme-şekil değiştirme davranışını modellemek için basitleştirilmiş bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde daha önce Seed ve Idriss [6] tarafından sunulan kayma kırışi modeli ve eşdeğer lineerleştirme yöntemini esas almışlardır. Vrymod [7] da sonlu elemanlar yöntemi ile Oroville Barajı'nın dinamik analizinde eşdeğer lineer yöntemi kullanmıştır.

Gazetas [8] kayma kırışi yaklaşımı ile homojen ve homojen olmayan toprak barajların boyuna ve düşey titreşimlerini incelemek için kayma kırışi yaklaşımını geliştirmiştir. Bunun yanında Abdel-Ghaffar ve Koh [9,10] toprak barajların boyuna titreşimlerinin hesabı için kayma kırışi modelini geliştirmişlerdir. Bu modelde, baraj kayma modülünün baraj yüksekliğince krete doğru azalması gözönünde bulundurulmuştur. Bu konuda ayrıca Dakoulas ve Gazetas [11] 1986 yıllarında kayma modülünün yükseklikle değişiminin değişik formları için homojen olmayan bir boyutlu kayma kırışi modelini genelleştirmişler ve yarı silindirik vadiye oturan bir barajın yatay titreşimlerini kapalı formda elde etmek için kullanmışlardır.

Abdel-Ghaffar ve Scott [12] bir toprak baraj üzerinde iki farklı depremin etkilerini hem zaman alanında hem de frekans alanında incelemişlerdir. Santa Felica Barajı'nın kayma modülü ve sönüm oranı gibi dinamik zemin parametrelerini tahmin etmek için 1971 San Fernando ve 1976 California Depremi'ni kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Bu modelde baraj gövdesi tek serbestlik dereceli sistem olarak

modellenmiştir. Bağıl yerdeğiştirme-mutlak ivmelerden hareketle eşdeğer viskoz sönüm ve ortalama kayma modülü için değerler belirlemişlerdir. Sönüm oranı, çevrimsel döngünün içinde kalan alandan, kayma modülü de döngünün eğiminden hareketle şekil değiştirmelere bağlı olarak elde edilmiştir. Bu yöntem ile Santa Felicia Barajı'nın dinamik kayma modülü ve sönüm oranları hesaplanmıştır.

Elgamal [13] zemin yapıların çevrimsel elasto-plastik deprem davranışını hesaplamak için analitik-sayısal bir yöntem geliştirmiştir. Tabakalı zemin problemini bir boyutlu kayma kirişi ve toprak baraj problemini bir boyutlu kayma kaması modeli ile incelemiştir. Zeminin doğrusal olmayan davranışı, akma ilkelerine uygun çevrimsel elasto-plastik malzeme olarak modellenmiştir [14,15]. Malzemenin dinamik zemin parametreleri şekil değiştirmelerin bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Bu yöntem, kişisel bilgisayarlarda parametrik çalışmalar veya ilk tasarım hesaplarında sayısal yöntem olarak kullanılabilir. Bu yöntem ile Mexico City ve California Depremleri kullanılarak zeminlerin deprem davranışı SHEER [16] programı kullanılarak hesaplanmış ve gözlenen gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır.

Prevost ve diğ. [17] toprak barajların ve zemin yapılarının doğrusal olmayan, çevrimsel dinamik davranışı için basitleştirilmiş bir analiz yöntemi sunmuşlardır. Bu yöntemde baraj gövdesi bir boyutlu kayma kaması olarak modellenmiştir. Çözüm, doğrusal hale getirilmiş problemin öz modlarını esas alan Bessel fonksiyonları kullanılarak yapılmıştır. Çevrimsel gerilme-şekil değiştirme davranışı, çok yüzeyli kinematik plastisite teorisine uygun elasto-plastik bünye denklemlerinin kullanılması ile modellenmiştir [18,19]. Sunulan bu yöntemin hassasiyeti Santa Felicia Barajı'nın elasto-plastik dinamik davranışının analizinde kullanılarak gösterilmiştir. Davranış üzerinde doğrusal olmayan etkilerin belirlenmesi için yapılan parametrik araştırmalar verilmiştir. Ayrıca, sonuçlar barajın ayrıntılı sonlu eleman çözümlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Elgamal ve diğ. [20] dikdörtgen biçimli vadilere oturan toprak barajların doğrusal olmayan deprem davranışını belirlemek için sayısal bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde, baraj gövdesi iki boyutlu kayma kaması olarak modellenerek baraj

malzemesinin doğrusal olmayan çevrimsel ve şekil değiştirmelere bağlı karakteristikleri de hesaba dahil edilmiştir. Baraj malzemesinin çevrimsel gerilme-şekil değiştirme davranışı çok yüzeyli kinematik plastisite teorisine dayandırılan elasto-plastik bünye denklemleri kullanılarak modellenmiştir [21,22]. Analiz, yer hareketine maruz toprak barajların kalıcı etkilerini de içine alan davranış büyüklüklerinin zamana bağlı değişimini belirlemede kullanılabilir. Kuvvetli yer hareketi altında, baraj malzemesinin doğrusal olmayan davranışının deprem davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğu vurgulanmıştır. Bu yöntem, deprem yükleri altında, baraj gövdesinde oluşan gerilmeler, şekil değiştirmeler ve ivmeleri yeterli yaklaşıklıkta hesaplamada kullanılabilir. Oldukça iyi sonuçlar vermesi ve kısa hesap zamanı, yöntemi oldukça etkili kılmaktadır. Dar vadilere oturan toprak barajlar için 1B kayma kirişi modelinin ve 2B düzlem şekil değiştirme modelinin yetersiz olduğu, 3B modellerin kullanılması gerektiği vurgulanmıştır.

Elgamel [23] toprak dolgu olarak inşa edilen La Villita Barajı'nın (Meksika) 3B deprem davranışını, her üç yöndeki titreşimlerini de gözönünde bulunduran basitleştirilmiş sayısal bir yöntemle incelemiştir. Bu çalışmada vadinin gerçek geometrik biçimi ve barajın alüvyonlu temeli de dikkate alınmıştır. Baraj malzemesinin doğrusal olmayan çevrimsel davranışı, artımsal plastisite teorisine uygun denklemler kullanılarak modellenmiştir. İvmelerin ve yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi hesaplanmış ve gerçek olarak gözlenen değerlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca baraj gövdesinin değişik bölgelerinde hesaplanan normal gerilmeler, kayma gerilmeleri ve şekil değiştirmeler gösterilmiştir. Bu hesap yöntemi kaydedilen ivmelerin büyüklüğünü önceden tahmin için de kullanılabilir.

Prevost ve diğ. [24] bir toprak barajın farklı iki yer hareketi altında 2B ve 3B doğrusal olmayan, dinamik sonlu eleman analizini yaparak, sonuçları karşılaştırmışlardır. Kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasındaki ilişkiyi tanımlayan iskelet eğrisi, bu çalışmada da olduğu gibi hiperbolik ve başlangıça göre simetrik kabul edilmiş ve yer hareketinin birbirine dik üç bileşeni de gözönünde bulundurulmuştur. Hesaplarda Princeton Üniversitesi'nde geliştirilen DYNAFLOW [25] adlı bilgisayar programı kullanılmıştır. Barajın değişik bölgelerinde oluşan

gerilme, şekil değiştirme, ivme ve yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması verilmiştir. Santa Felicia Barajı'nda deprem sırasında ölçülen ve hesaplanan deprem davranışları arasında karşılaştırma yapılmıştır. Dinamik davranış üzerinde üç boyutluluğun etkileri belirtilmiştir. Bu tür yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesinde 2B analizlerin uygunluğu değerlendirilmiştir.

Elgamal ve Abdel-Ghaffar [26,27] homojen olmayan, bir bölgeyi toprak barajların çevrimsel elasto-plastik dinamik analizi için basitleştirilmiş analitik-sayısal bir yöntem geliştirmişlerdir. Baraj malzemesinin doğrusal olmayan dinamik davranışı, çok yüzeyle, artımsal plastisite denklemlerinin kullanılması ile modellenmiştir. Analizlerde, yer hareketinin üç bileşeni de aynı anda gözönüne alınmaktadır. Bu yöntem ile Santa Felicia Barajı'nın 3B elasto-plastik deprem davranışı incelenmiş ve diğeri araştırmacıların 3B sonlu eleman çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen bu yöntemin zemin veya zemin yapılarının doğrusal olmayan dinamik davranışını belirlemede etkili ve ekonomik olarak kullanılabileceğı belirtilmiştir.

Mejia ve diğ. [4] toprak ve kaya dolgu barajların dinamik davranışını belirlemek için 3B sonlu eleman tekniklerini ortaya koymuşlardır. Söz konusu yöntemi Oroville Barajı'nın 1975 Oroville Depremi etkisindeki dinamik davranışını incelemek ve barajın dinamik malzeme özelliklerini değerlendirmek için kullanmışlardır. Bu yöntemin kullanılması ile elde edilen değerlerin, Oroville Barajı kabuk malzemesi üzerinde yapılan laboratuvar test sonuçları ile önemli ölçüde uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır. Yine Hatanaka [28] ve Ambraseys [29] baraj kret uzunluğunun baraj yüksekliğine oranının dörtten büyük olduğu durumlarda, 2B ile 3B model çözümlerinden elde edilen temel titreşim frekansları arasındaki farkın %10 dan küçük olduğunu belirtmişlerdir.

Mejia ve Seed [30] farklı vadi biçimlerine sahip iki ayrı barajın 2B ve 3B dinamik analiz sonuçları arasında karşılaştırma yapmışlardır. Dar vadilere oturan barajların dinamik davranışının belirlenmesinde üç boyutluluğun etkisinin dikkate alınması gerektiğı, diğeri hallerde, 2B analizlerin barajın deprem davranışının belirlemesi için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır.

Abdel-Ghaffar ve Koh [31] homojen olmayan yapıdaki toprak barajların 3B dinamik analizi için bir yöntem sunmuşlardır. Rayleigh-Ritz yöntemine dayandırılan analizlerde barajın her üç doğrultudaki doğal titreşim frekansları ve mod biçimleri belirlenmiştir. Barajın elde edilen doğal titreşim frekansları ile deprem kayıtları ve titreşim testlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzer karşılaştırma baraj tepe noktasının zamana bağlı yerdeğiştirmeleri için de yapılmıştır. Sonuç olarak hesaplanan değerlerin ölçülen değerlerle uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Durgunoğlu ve Yazıcıoğlu [32] kaya dolgu barajlarda gerilme ve deformasyon hesabına ait esasları ortaya koyarak Altınkaya Barajı için bir uygulama yapmışlardır. Analizlerde iki boyutlu sonlu elemanlar kullanmışlardır. Baraj malzemesinin doğrusal olmayan davranışının da gözönünde bulundurulduğu analizlerde sonuçlar yatay ve düşey yerdeğiştirmeler ve gerilmelerin dağılımı şeklinde verilmiştir.

Kenneth ve Idriss [33] sonlu elemanlar yöntemi ile bir barajın doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışı ile statik halde ki gerilmelerini hesaplamışlardır. Haznedeki suyun etkisinin de analizlere katıldığı incelemede gerilmelerin yatay ve düşey doğrultulardaki değişimleri elde edilerek karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Özkan ve diğ. [34] 5 Mayıs 1986 Malatya Depremi'nde, kretinde boyuna çatlaklar ve menba tarafında oturmalar şeklinde hasar gören Sürgü Barajı ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Analizlerde 2B sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hasar gören barajın, kritik kayma düzlemleri ve bunlara karşı gelen akma ivmeleri, kayma bloklarının ortalama ivme-zaman geçmişleri ve bunlardan hareketle kalıcı yerdeğiştirmeleri hesaplanmıştır.

Elgamal ve Gunturi [35] toprak ve kaya dolgu barajların dinamik davranışını belirlemek için basitleştirilmiş 3B bir analiz yöntemi geliştirerek El Infiernillo Barajı'nın (Meksika) deprem davranışını incelemiştir. Bu yöntemden elde edilen sonuçları, 3B sonlu eleman çözümleri ve deprem sırasında kaydedilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Analizlerde, baraj ve alüvyon temeli, vadinin gerçek geometrisi tanımlanabilmekte ve zeminin doğrusal olmayan çevrimsel davranışı her üç

doğrultuda da hesaba katılmaktadır. Sunulan yöntemde mod biçimlerinin ve baraj davranışının belirlenmesinde Bessel fonksiyonları kullanılmıştır. Doğrusal olmayan çevrimsel malzeme davranışını modellemek için artımsal plastisite teorisi kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin temel davranış eğrileri hiperbolik bağıntı ile tanımlanmıştır [36]. Yatay ve düşey doğrultularda hesaplanan davranış spektrumları, deprem sırasındaki kayıtlardan elde edilenlerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Martin ve Seed [37] ve Idriss ve Seed [6] yatay tabakalı zeminlerin deprem davranışını incelemede bir boyutlu kayma kırışi modelini kullanmışlardır. Bu modelde, zeminin doğrusal olmayan çevrimsel davranışını eşdeğer doğrusal yöntem ile analizlere dahil etmişlerdir. Bessel fonksiyonları kullanılarak elde edilen çözümlerle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen çözümler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırmalar yerdeğiştirme ve ivmelerin zemin derinliğince değişimi şeklinde yapılmıştır. Bu çalışmada ayrıca, MASH [38], CHARSOIL [39] ve SHAKE [40] programları kullanılarak gerilmelerin ve ivmelerin değişimleri elde edilerek karşılaştırılmıştır.

Yine Idriss ve Seed [41] dolgu zeminlerin dinamik davranışını, yer hareketinin büyüklüğüne, zeminin cinsine ve dolgu biçimine bağlı olarak incelemişlerdir. Zemin yatay düzlemde, sabit kalınlıklı, sonsuz uzunlukta, bir boyutlu yatay tabakalar olarak modellenmiştir.

1.3 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu çalışmanın amacı, toprak veya kaya dolgu tipinde inşa edilen barajların deprem gibi dinamik ve tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışının araştırılmasıdır. Bu amaçla ilk olarak baraj gövdesi bir boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Bu modelde baraj malzemesinin hem doğrusal elastik hem de elasto-plastik davranışı dikkate alınmıştır. İkinci olarak baraj gövdesi iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiş ve bu modelde de ayrı ayrı doğrusal elastik ve elasto-plastik malzeme davranış kabulleri yapılarak modelin ve malzeme kabulünün sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, her iki modelde de

zemin parametrelerinin barajın deprem davranışı üzerindeki etkisini belirlemek için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan sayısal çözümlerde Atatürk Barajı'na ait büyüklükler kullanılarak bu barajın deprem davranışı incelenmiştir.

Bu çalışmaya ilave olarak, Atatürk Baraj gövdesinde kaydedilen gerçek deprem kayıtları ile, yapılan sonlu eleman çözümlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması düşünülmüştür. Fakat Atatürk Barajı için sağlıklı deprem kayıtları elde edilememiştir. DSİ Genel Müdürlüğü, Atatürk Barajı'na gövde dolgusu sırasında yerleştirilen kayıt sistemlerinin, oluşan aşırı oturma ve yerdeğiştirmelerden etkilenerek fonksiyonunu yitirdiğini ve bu türden bilgilerin alınamadığını bildirmiştir. Bu nedenle yerinde yapılan ölçümlerle, bilgisayar yardımıyla elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması yapılamamıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar kendi aralarında değerlendirilmiş ve diğer araştırmacıların verdiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2 de, çalışmanın ileri safhalarında kullanılacak gerilme, şekil değiştirme kavramları ve elastisite teorisine uygun bünye denklemlerinden söz edilmiştir. Bağıntılar üç boyutlu hal için yazılıp, iki ve bir boyutlu hale uygun dönüşümler yapılmıştır. Her üç hal için de şekil değiştirme-yerdeğiştirme, gerilme-şekil değiştirme bağıntıları verilmiştir.

Bölüm 3 de, baraj gövdesinin, doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile 1B ve 2B sonlu elemanlarla modellenmesi, sonlu elemanlar yönteminde izlenen adımlar ve ilgili formülasyon verilmiştir. Verilen 1B ve 2B modellerde yapılan kabuller, kullanılan sonlu eleman ve şekil fonksiyonlarının belirlenmesi, eleman matrislerinin elde edilmesi, eleman matrislerinin birleştirilerek sistem matrislerinin kurulması, yapının sönümü ve sönüm katsayılarının belirlenmesi, sınır şartları ve başlangıç şartlarının ortaya konulması bu bölümde belirtilmiştir.

Bölüm 4 de, elasto-plastik davranışa ait bağıntılar verilmiştir. Akma durumunu belirleyen Mises akma kriterinin şekil değiştirme enerjisinden elde edilmesi ve ilgili bağıntılardan söz edilmiştir. Zeminin çevrimsel elasto-plastik davranışı için zemin temel davranış eğrisi olarak da tanımlanan, zemin dinamiğinde yaygın bir şekilde

kullanılan hiperbolik zemin modeli ve modelin işleyişiyle ilgili temel ilkeler, kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasındaki ilişkiyi tanımlayan elasto-plastik modül ile ilgili bağıntılar sunulmuştur.

Bölüm 5 de, hareket denkleminin sayısal çözümü yapılmıştır. Çözüm için, adım adım integrasyon tekniğinin kullanıldığı doğrusal ivme değişimi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile ilgili temel bağıntılar ve izlenen adımlar verilmiştir.

Bölüm 6 da, sayısal çözümler ve bunlara ait sonuçlar verilmiştir. Sayısal çözümlerde, Atatürk Barajı'na ait büyüklükler kullanılarak bu barajın deprem yükleri etkisi altındaki davranışı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yer hareketi olarak 1992 Erzincan Depremi, düzeltilmiş doğu-batı ve düşey ivme bileşenleri kullanılmıştır. Hem doğrusal elastik, hem de elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile baraj gövdesi ayrı ayrı 1B ve 2B elemanlar kullanılarak modellenmiş ve sayısal çözümleri yapılmıştır. Sayısal hesaplar fortran 77 programlama dilinde yazılarak geliştirilen bir programla yürütülmüştür. Yapının sönümsüz serbest titreşim frekansları da belirlenerek karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Baraj gövdesini oluşturan malzemelerin herbiri için şekil değiştirmelere bağlı elasto-plastik kayma modülü belirlenerek hesaplarda kullanılmıştır. Yer hareketinden meydana gelen, baraj kretinde ve gövdenin değişik yüksekliklerinde ki yerdeğiştirmelerin ve ivmelerin zamanla değişimi, baraj tabanında ve seçilen değişik elemanlarda ki gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin zamanla değişimi hesaplanarak grafikler şeklinde sunulmuştur.

Ayrıca, 1B ve 2B sonlu eleman modellerinde açısal frekansların malzeme özellikleri ile değişimi, sönüm oranı ve referans şekil değiştirmesinin yapının dinamik davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla parametrik çalışmalar yapılarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafiklerle verilmiştir.

Bölüm 7 de, elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması yapılarak bu çözümlerden varılan sonuçlar vurgulanmıştır. Burada yapılan karşılaştırmalar dört grupta toplanmıştır:

1. 1B sonlu eleman modelinde, doğrusal elastik malzeme davranışı ile elasto-plastik malzeme davranışından elde edilen sonuçlar,
2. 2B sonlu eleman modelinde, doğrusal elastik malzeme davranışı ile elasto-plastik malzeme davranışından elde edilen sonuçlar,
3. Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle 1B model ile 2B modelden elde edilen sonuçlar,
4. Elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle 1B model ile 2B modelden elde edilen sonuçlar,

karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde belirtilmiştir.

Ayrıca, bu tezde ele alınarak incelenen konularda yapılabilecek ileri çalışmalar sıralanmıştır.

BÖLÜM 2

GENEL KAVRAMLAR

2.1 GENEL

Bu bölümde, çalışmanın ileriki kısımlarında kullanılacak temel kavramların kısaca tanımları yapılarak, gerilmeler, şekil değiştirmeler ve yerdeğiştirmeler arasındaki bağıntılar özetlenecektir.

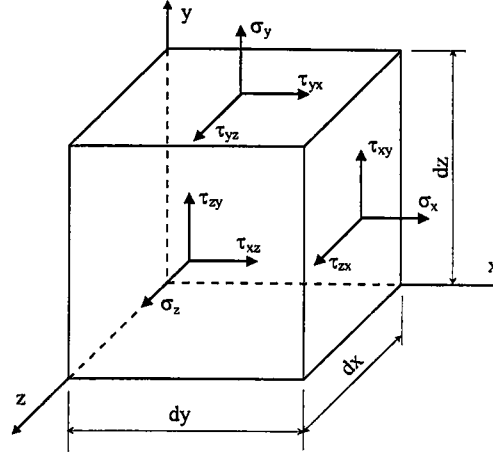
2.2 ÜÇ BOYUTLU ELASTİSİTE

2.2.1 Gerilme tansörü

Dış yüklerle yüklenmiş bir cismin bir noktasındaki gerilme durumu en genel halde altısı bağımsız dokuz gerilme bileşeni ile tanımlanır (Şekil 2.1). Matris formunda,

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

şeklinde gösterilir [42, s.36]. Burada, σ_x , σ_y , σ_z dik koordinat takımında sırası ile x, y, z doğrultularında normal gerilme bileşenlerini, τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{zx} de kayma gerilme bileşenlerini göstermektedir. Birinci indis gerilme bileşeninin üzerine etki ettiği yüzeyi, ikinci indis doğrultusunu gösterir. Pozitif yönler Şekil 2.1 de görüldüğü gibi, hacim elemanının pozitif yüzeyine pozitif doğrultuda etki eden gerilmeler pozitif, negatif yüzeye negatif doğrultuda etki eden gerilmeler pozitif, diğerleri negatif gerilmeler olarak tanımlanır. Pozitif yüzeyin dış normali koordinat takımının pozitif doğrultusunu gösterir.



Şekil 2.1 Bir hacim elemanı üzerindeki gerilme bileşenleri.

Bir noktadaki gerilme hali için, seçilen dik koordinat takımını döndürmek sureti ile üzerinde kayma gerilmelerinin sıfır ve sadece normal gerilmelerin bulunduğu karşılıklı olarak birbirine dik üç düzlem bulunabilir. Bu düzlemlerdeki gerilmelere asal gerilmeler, doğrultularına da asal gerilme doğrultuları denir.

$$|\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}| = 0 \quad (2.2)$$

denkleminin gerçel üç kökü (σ_1 , σ_2 , σ_3) asal gerilmeleri verir. Asal gerilmeler seçilecek eksen takımından bağımsızdır ve birbirine diktir. Eğer kullanılan eksen takımı asal eksenler ise gerilme tansörü basitleşir ve aşağıdaki şekli alır:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ olması hali hidrostatik gerilme durumu olarak tanımlanır ve uzaydaki her doğrultu asal gerilme doğrultusudur.

Bir noktadaki gerilme durumunu hidrostatik ve deviatör gerilme bileşenleri şeklinde iki kısma ayırarak yazmak da mümkündür:

$$[\sigma] = [\sigma]_H + [\sigma]_D \quad (2.4)$$

Deviatör gerilme tansörü, gerilme tansörünün normal gerilme bileşenlerinden, ortalama gerilmenin farkı olarak tanımlanır. İndis notasyonu ile,

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (2.5)$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \text{tr}[\sigma] = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada σ_{ij} , σ_0 , S_{ij} ve δ_{ij} sırası ile gerilme tansörü, ortalama gerilme, deviatör gerilme tansörü ve kroneker deltasını ($\delta_{ij}=1$, $i=j$; $\delta_{ij}=0$, $i \neq j$) göstermektedir. Matris formunda aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$[S] = [\sigma] - \frac{1}{3} \text{tr}[\sigma] = \begin{bmatrix} S_x & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_y & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_0 & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Deviatör gerilme bileşenleri, hacim elemanında biçim değişikliği meydana getiren gerçek gerilme bileşenleridir.

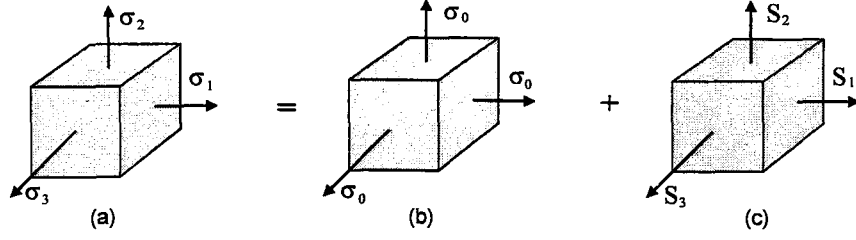
Bir noktada σ_1 , σ_2 , σ_3 asal gerilmeleri ile verilen gerilme durumunu da iki kısma ayırarak yazmak mümkündür (Şekil 2.2).

$$\sigma_1 = \sigma_0 + S_1 \quad \sigma_2 = \sigma_0 + S_2 \quad \sigma_3 = \sigma_0 + S_3 \quad (2.8)$$

Birinci kısımda, elemanın bütün yüzeylerine σ_0 gerilmesi etki etmekte ve bu gerilmelerle elemanın yalnız hacmi değişmekte biçimi bozulmamaktadır. İkinci kısımda ki gerilmelerle elemanın hacmi sabit kalıp biçimi değişmektedir. Hacmin sabit kalması için,

$$S_1 + S_2 + S_3 = (\sigma_1 - \sigma_0) + (\sigma_2 - \sigma_0) + (\sigma_3 - \sigma_0) = 0 \quad (2.9)$$

sağlanması gerekir. Buradan da σ_0 için $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ değeri elde edilir.



Şekil 2.2 a) Asal gerilmeler, b) Hidrostatik gerilmeler c) Deviator gerilmeler

$$\left| \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} \right| = \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (2.10)$$

Determinantın σ 'ya göre açılması ile üçüncü derece bir denklem elde edilir.

$$\sigma^3 - J_1 \sigma^2 - J_2 \sigma - J_3 = 0 \quad (2.11)$$

Burada, J_1 , J_2 , J_3 gerilme tansörünün invariantlarıdır ve koordinat sisteminden bağımsızdırlar. Gerilme tansörünün invariantları açık olarak aşağıdaki şekilde ifade edilirler:

$$\begin{aligned} J_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \\ J_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2 \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.2.2 Şekil değiştirme tansörü

Bir noktadaki şekil değiştirme durumu, Denklem 2.1 de ki gerilme bileşenlerine benzer olarak altısı bağımsız dokuz şekil değiştirme bileşeni ile matris formunda,

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \gamma_{xy}/2 & \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{yx}/2 & \epsilon_y & \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{zx}/2 & \gamma_{zy}/2 & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

şekilde ifade edilir [42, s.34]. Burada, ε_x , ε_y , ε_z dik koordinat takımında sırası ile x, y, z doğrultularında ki normal şekil değiştirme bileşenlerini, γ_{xy} , γ_{xy} ve γ_{xy} de kayma şekil değiştirme bileşenlerini göstermektedir. Yine asal gerilmelere benzer şekilde asal şekil değiştirmeler de, 1, 2 ve 3 indisleri asal doğrultuları göstermek üzere,

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilirler. Şekil değiştirme invaryantları da aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} I_1 &= \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ I_2 &= \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x - (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)/4 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1 \\ I_3 &= \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z + (\gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx} - \varepsilon_x \gamma_{yz}^2 - \varepsilon_y \gamma_{zx}^2 - \varepsilon_z \gamma_{xy}^2) = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.2.3 Şekil değiştirme - yerdeğiştirme bağıntıları

Bir noktanın x, y, z eksenleri doğrultusundaki sırasıyla u,v,w yerdeğiştirme bileşenleri ile şekil değiştirme bileşenleri arasındaki ilişki, ikinci mertebe terimler ihmal edilip yalnız doğrusal terimler gözönünde tutularak şu şekilde ifade edilebilir [42, s.34-35]:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}) & \frac{1}{2}(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}) \\ \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}) \\ \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}) & \frac{1}{2}(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.2.4 Bünye denklemleri

Gerilme ile şekil değiştirme arasındaki doğrusal ilişki Hooke bağıntıları olarak tanımlanmaktadır. Bu kabulde, gerilmeler ile şekil değiştirmeler birbiri ile orantılıdır. Denklem 2.1 de verilen altı bağımsız gerilme bileşeni, Denklem 2.13 de verilen altı bağımsız şekil değiştirme bileşeninin doğrusal bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bunun terside geçerlidir.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.17)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ & & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ & & & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ & & & & D_{55} & D_{56} \\ & & & & & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

simetrik

Burada, $\{\sigma\}$ ve $\{\varepsilon\}$ sırası ile gerilme ve şekil değiştirme vektörleri, $[D]$ ise bağımsız 21 sabitten oluşan simetrik malzeme sabitleri matrisi olup anizotrop ve homojen malzeme için gerilmeler ile şekil değiştirmeler arasındaki doğrusal ilişkiyi göstermektedir. Mesela, 21 olan terim sayısı ortotrop malzeme için 9'a, izotrop malzeme için 2'ye iner ve Denklem 2.18 elastisite modülü E ve Poisson oranı ν terimleri ile aşağıdaki biçimi alır [42, s.42]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 \\ & & & & & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

simetrik

Benzer şekilde, şekil değiştirme bileşenleri de Denklem 2.19 un tersi alınarak gerilme bileşenleri cinsinden yazılabilir [42, s.43]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ & \text{simetrik} & & & 2(1+\nu) & 0 \\ & & & & & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

İzotrop malzeme için Hooke bağıntıları λ ve μ cinsinden aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} D_{11} &= D_{22} = D_{33} = \lambda + 2\mu \\ D_{12} &= D_{13} = D_{23} = \lambda \\ D_{44} &= D_{55} = D_{66} = \mu = G \end{aligned} \quad (2.21)$$

Burada, λ ve μ Lamé sabitleridir ve E , ν cinsinden şu şekilde tanımlanır [42, s.42]:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.22)$$

2.3 İKİ BOYUTLU (DÜZLEM) ELASTİSİTE

Üç boyutlu mühendislik problemlerinin analizini kolaylaştırmak için bazı kabullerin yapılması çok başvurulan bir yoldur. Çözümü kolaylaştırmak için, üç boyutlu problemleri, cismin geometrisine ve yükleme durumuna bağlı olarak iki veya bir boyuta indirmek yoluna gidilir. Düzlem elastisite problemleri (düzlem şekil değiştirme ve düzlem gerilme), üç boyutlu elastisite probleminin yükleme ile ilgili aşağıdaki kabuller altında basitleştirilmesi ile elde edilir: Atalet kuvvetleri, cismin kalınlığı boyunca değişmez, cismin üzerine etki eden dış kuvvetlerin z doğrultusunda bileşeni yoktur ve z doğrultusunda düzgün yayılırlar; paralel düzlemlere etki eden kuvvet yoktur. Bu şartlar altında üç boyutlu elastisite için yazılan formülasyon basitleştirilerek iki boyutlu elastisiteye uyarlanabilir.

2.3.1 Düzlem şekil değiştirme

Üçüncü boyutu diğer iki boyuta göre büyük, geometrisi ve yükleri uzun doğrultuda değişmeyen mühendislik problemleri düzlem şekil değiştirme problemi olarak adlandırılır. Uzun toprak baraj ve istinat duvarı problemi düzlem şekil değiştirme problemi olarak incelenebilir.

Düzlem şekil değiştirme probleminde, büyüklükler yalnızca x ve y koordinatlarının bir fonksiyonu olarak tanımlanır ve birim kalınlıkta bir enkesit gözönüne alınır; z doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşeni w, bütün kesit içinde ihmal edildiğinden ε_z , γ_{yz} , γ_{xz} şekil değiştirme bileşenleri sıfır olur. Diğer şekil değiştirme bileşenleri aşağıdaki şekli alır [42, s.44]:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

Doğrusal elastik ve izotrop malzeme için bünye denklemleri Denklem 2.19 dan,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

şekinde elde edilir. Burada [D] elastik malzeme sabitleri matrisini göstermektedir. Diğer taraftan Denklem 2.20 de $\varepsilon_z = 0$ olduğundan σ_z gerilmesi σ_x ve σ_y gerilmelerine bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.26)$$

Bir noktada elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler seçilen eksen takımına bağlıdır. Çözümlerde, bu bağımlılığı ortadan kaldırmak için asal gerilmeler ve şekil değiştirmeleri kullanmak daha anlamlı olur. Düzlem şekil değiştirme halinde asal gerilmeler aşağıdaki bağıntılardan elde edilir.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_3 &= \nu(\sigma_1 + \sigma_2)\end{aligned}\quad (2.27)$$

2.4 BİR BOYUTLU ELASTİSİTE

2.4.1 Eksenel normal kuvvet

Cismin üç boyutundan ikisi üçüncüsüne göre çok küçük ise cisim bir boyutlu olarak incelenebilir ve çubuk olarak adlandırılır. Bu özel halde, çubuklar eksenleri doğrultusunda kuvvet (çekme veya basınç) aktaran elemanlardır. Kuvvetler çubuk eksenini doğrultusunda ve kesite ağırlık merkezinden dik olarak etki ederler. Kuvvetin yönü, kesitin dış normalinin yönü ile aynı ise pozitif olarak kabul edilir ve çekme adını alır. Aksi halde eksi olur ve basınç kuvveti denir [42, s.37]. x çubuk eksenini göstermek üzere, σ_x dışındaki gerilme bileşenleri sıfır olur ($\sigma_x \neq 0$, $\sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$). ϵ_x şekil değiştirme bileşeni,

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.28)$$

şeklinde ifade edilir. Gerilme-şekil değiştirme arasındaki doğrusal ilişki aşağıdaki şekle dönüşür:

$$\sigma_x = E \epsilon_x \quad (2.29)$$

2.4.2 Basit kayma

Bu durumda çubuk yalnızca kayma kuvvetlerine maruzdur. Çubuğun makaslanması basit kayma haline örnek olarak verilebilir. Çubukta yalnız kayma şekil değiştirmeleri meydana gelir [42, s.38]. Gerilme bileşenleri, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0$, $\tau_{xy} \neq 0$ ve $\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ olarak elde edilir. Bu halde γ_{xy} şekil değiştirme bileşeni,

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.30)$$

şeklinde ifade edilebilir. Verilen τ_{xy} kayma gerilmesi ile γ_{xy} kayma şekil değiştirmesi arasındaki doğrusal ilişki G kayma modülü ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy} \quad (2.31)$$

BÖLÜM 3

DOĞRUSAL ELASTİK DAVRANIŞ

3.1 GENEL

Mühendislik problemlerinin çözümünde hesap adımlarını azaltmak ve çözümü kolaylaştırmak için, belirli şartlar altında bazı kolaylaştırıcı kabuller yapılmaktadır. Bunlar problemin geometrisi ve malzeme davranışı ve yükler ile ilgili kabullerdir. Baraj probleminin yer hareketi altında bir boyutlu ve iki boyutlu dinamik analizinin yapıldığı çalışmanın bu bölümünde, baraj malzemesinin doğrusal elastik davranış gösterdiği, homojen ve izotrop bir yapıda olduğu kabul edilmiştir.

Analizlerde Sonlu Eleman Yöntemi kullanılmıştır. Baraj gövdesinin yer hareketi altındaki dinamik davranışı, ayrı ayrı bir boyutlu (1B) ve iki boyutlu (2B) sonlu elemanlarla modellenerek incelenmiştir. Baraj gövdesi sonlu eleman ağı, 1B modelde, baraj yüksekliğince değişken kesitli bir boyutlu çubuk sonlu elemanlar ile, 2B modelde, üç düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlar ile teşkil edilmiştir.

Bir mekanik problemin sonlu eleman yöntemi ile analizinde aşağıdaki adımlar uygulanır [43,44,45]:

1. Hesabı yapılacak yapının sonlu elemanlara ayrılarak tanımlanması:
 - a. Seçilen elemanlarla sonlu eleman ağının kurulması;
 - b. Düğüm noktalarının ve elemanların numaralanması;
 - c. Düğüm noktası koordinatlarının belirlenmesi.

2. Sonlu eleman ağındaki tipik elemanlar için eleman denklemlerinin elde edilmesi:
 - a. Eleman titreşim denklemin Newton'un İkinci Prensibinden veya enerji ifadelerinden elde edilmesi;
 - b. Şekil fonksiyonunun seçilerek eleman denklemlerinin matris formunda elde edilmesi.
3. Eleman denklemlerinin süperpozisyon ilkesi ile birleştirilerek sistem denklemlerinin elde edilmesi.
4. Problemin sınır şartlarının sistem denklemlerine uygulanması.
5. Sistem denklemlerinin başlangıç şartları gözönünde bulundurularak çözülmesi.
6. Sonuçların tablo veya grafikler şeklinde gösterilmesi.

3.2 BİR BOYUTLU SONLU ELEMAN MODELİ

3.2.1 Yapılan kabuller

Toprak ve kaya dolgu barajlar üç boyutlu, elasto-plastik ve homojen olmayan malzeme davranışları dolayısıyla doğal frekansları ve mod biçimleri gibi dinamik karakterlerinin elde edilmesi, deprem davranışının belirlenmesi oldukça zordur. Bu yüzden problemin modellenmesinde ve çözümünde bazı kolaylaştırıcı kabuller yapılmaktadır.

1. Baraj gövdesi bir boyutlu, sabit kütle yoğunluğuna sahip kama biçimli (değişken kesitli) kayma kirişi olarak modellenebilir. Baraj ortalama uzunluğu baraj yüksekliğine göre büyük boyutlarda ise baraj gövdesi düzlem şekil değiştirme problemi olarak incelenebilir [20,46]. Bunun yanında baraj genişliğinin baraj yüksekliğine oranı dört veya daha büyük ($L/H \geq 4$) olması durumunda baraj bir boyutlu kayma kirişi olarak modellenebilir. Bu modellerin gerçek baraj davranışına yakın sonuçlar verdiği pek çok araştırmacı tarafından gösterilmiş ve kullanılmıştır [24,47,48,49,50].

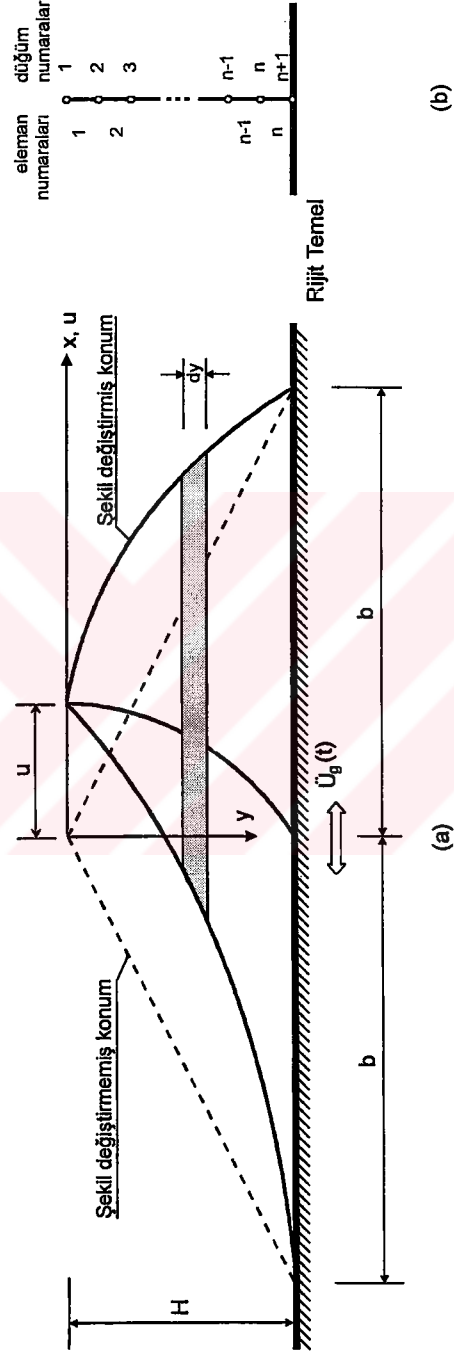
2. Verilen 1B kayma kirişi modelinde baraj gövdesi yalnız kayma şekil değiştirmelerinin gözönüne alındığı, baraj yüksekliğince kayma dalgalarının yayıldığı bir modelle temsil edilir. Kayma şekil değiştirmeleri ve kayma gerilmeleri yatay düzlemde düzgün olarak dağılmaktadır.
3. Baraj gövde malzemesi doğrusal elastik ve küçük şekil değiştirmeler yapmaktadır.
4. Bu çalışmada, baraj malzemesinin homojen olmayan yapısı, kayma modülünün baraj yüksekliğince değiştiği (iç basıncın sürekli artması) kabul edilerek gözönünde bulundurulmuştur; bu değişim yaygın olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır [9,12,51]:

$$G(y) = G_0 \left(\frac{y}{H} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \left(\frac{1}{m} = 0, 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5} \right) \quad (3.1)$$

5. Homojen yatay tabakalardan oluşan baraj gövdesi rijit bir temele oturmaktadır.
6. Baraj gövdesinin sönümü kütle ve rijitlik matrisleri ile orantılı, Rayleigh tipi bir viskoz sönümdür [45].
7. Baraj haznesindeki suyun etkisinin ağırlık barajlarında az olduğu bilindiğinden suyun baraj davranışına etkisi ihmal edilmiştir (boş baraj).

3.2.2 Sonlu eleman ağının kurulması

Baraj gövdesi, baraj yüksekliğince değişken kesitli, bir boyutlu, eşit kalınlıkta çubuk sonlu elemanlarla temsil edilir. Sonlu eleman formülasyonunda baraj gövdesinin üçgen biçiminde olması zorunlu olmamakla birlikte, bu çalışmada Şekil 3.1.a'da verildiği gibi üçgen biçiminde kabul edilmiştir. Sonlu eleman ağı, düğüm nokta numaraları ve eleman nokta numaraları Şekil 3.1.b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Toprak baraj için, a) Bir boyutlu kayma kirişi modeli, b) Sonlu eleman ağı.

3.2.3 Eleman hareket denklemi

Şekil 3.1’de görülen dy kalınlığındaki elemana ait hareket denklemi alışıla gelen kurallar kullanılarak yazılabilir. Kabul edilen 1B kayma kirişi modelinde yalnız yatay yerdeğiştirmeler gözönüne alındığından sadece kayma şekil değiştirmeleri ortaya çıkar [48,51,52]. Kütlenin toplam yerdeğiştirmesi cinsinden, sönümsüz titreşim halinde elemanın dengesinden,

$$\rho(y) \alpha y dy \ddot{u}_t(y,t) - \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{xy}) dy = 0 \quad (3.2)$$

yazılabilir. Burada, $\tau_{xy} = G \gamma_{xy} = G \frac{\partial u}{\partial y}$ ve $\ddot{u}_t(y,t) = \ddot{u}(y,t) + \ddot{u}_g(y,t)$ olduğu hatırlanarak yerine yazılırsa titreşim hareket denklemi aşağıdaki şekli alır:

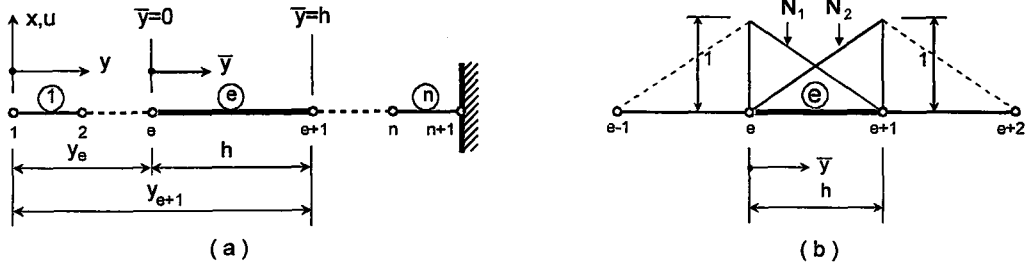
$$\rho(y) \alpha y \ddot{u}(y,t) - \frac{\partial}{\partial y} \left[\alpha y G(y) \frac{\partial u(y,t)}{\partial y} \right] = -\rho(y) \alpha y \ddot{u}_g(t) \quad (3.3)$$

Burada $\rho(y)$ ve $G(y)$ sırası ile baraj yüksekliğince değişen kütle yoğunluğunu ve kayma modülünü, $\alpha (=2b/H)$ baraj eğimini, $u(y,t)$ ve $\ddot{u}(y,t)$ sırası ile düğüm noktasının baraj tabanına göre bağıl yatay yerdeğiştirmesini ve bağıl ivmesini, $\ddot{u}_g(t)$ de yatay yer hareketi ivmesini göstermektedir.

Sonlu elemanlar ağının her bir düğümünün yatay yerdeğiştirmesi (u_i) bir serbestlik derecesi olarak tanımlanır (Şekil 3.2.a). Eleman yerdeğiştirme fonksiyonu (u^e) eleman koordinatlarında yazılan doğrusal şekil fonksiyonu N_i^e ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [43, s.79]:

$$u^e(\bar{y}) = \sum_{i=1}^2 N_i^e(\bar{y}) u_i^e = N_1^e(\bar{y}) u_1^e + N_2^e(\bar{y}) u_2^e = u_1^e \left(1 - \frac{\bar{y}}{h_e}\right) + u_2^e \left(\frac{\bar{y}}{h_e}\right) \quad (3.4)$$

Şekil 3.2.b de N_i^e şekil fonksiyonunun değişimi görülmekte ve eleman düğüm noktalarında aşağıdaki değerleri almaktadır:



Şekil 3.2 Bir boyutlu sonlu eleman modeli: a) Çubuk sonlu elemanı, b) Doğrusal şekil fonksiyonları.

$$\begin{aligned} N_1^e &= 1 \quad (\bar{y} = 0) \quad , \quad N_1^e = 0 \quad (\bar{y} = h) \\ N_2^e &= 0 \quad (\bar{y} = 0) \quad , \quad N_2^e = 1 \quad (\bar{y} = h) \end{aligned}$$

Yerdeğiştirme ifadesi (3.4), hareket denklemi (3.3) de yerine yazılarak eleman boyunca ($0 \leq \bar{y} \leq h$) integrasyonundan eleman için hareket denklemi, matris formunda,

$$[m]\{\ddot{u}\} + [k]\{u\} = \{f\} \quad (3.5)$$

olarak elde edilir. Burada $[m]$ eleman kütle matrisini, $[k]$ eleman rijitlik matrisini ve $\{f\}$ yer hareketinden doğan eleman dış yük vektörünü göstermektedir.

3.2.3.1 Eleman kütle matrisi

Denklem 3.5 deki eleman kütle matrisi m_{ij} ,

$$m_{ij} = \rho \int_0^h (y_e + \bar{y}) N_i N_j d\bar{y} \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilebilir [43, s.214]. Kütle matrisinin elemanları,

$$m_{11} = \rho \int_0^h (y_e + \bar{y}) N_1 N_1 d\bar{y} = \rho \int_0^h (y_e + \bar{y}) \left(1 - \frac{\bar{y}}{h}\right) \left(1 - \frac{\bar{y}}{h}\right) d\bar{y} = \rho h \left(\frac{y_e}{3} + \frac{h}{12}\right) \quad (3.7)$$

$$m_{12} = m_{21} = \rho \int_0^h (y_e + \bar{y}) N_1 N_2 d\bar{y} = \rho \int_0^h (y_e + \bar{y}) \left(1 - \frac{\bar{y}}{h}\right) \left(\frac{\bar{y}}{h}\right) d\bar{y} = \rho h \left(\frac{y_e}{6} + \frac{h}{12}\right) \quad (3.8)$$

$$m_{22} = \rho \int_0^h (y_e + \bar{y}) N_2 N_2 d\bar{y} = \rho \int_0^h (y_e + \bar{y}) \left(\frac{\bar{y}}{h}\right) \left(\frac{\bar{y}}{h}\right) d\bar{y} = \rho h \left(\frac{y_e}{3} + \frac{h}{4}\right) \quad (3.9)$$

olarak elde edilir ve matris formunda toplu olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$[m] = \rho h \begin{bmatrix} (\frac{y_e}{3} + \frac{h}{12}) & (\frac{y_e}{6} + \frac{h}{12}) \\ (\frac{y_e}{6} + \frac{h}{12}) & (\frac{y_e}{3} + \frac{h}{4}) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.2.3.2 Eleman rijitlik matrisi

Eleman rijitlik matrisi k_{ij} de kütle matrisine benzer şekilde,

$$k_{ij} = G \int_0^h (y_e + \bar{y}) \frac{\partial N_i}{\partial \bar{y}} \frac{\partial N_j}{\partial \bar{y}} d\bar{y} \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilir [43, s 87]. Rijitlik matrisinin elemanları,

$$k_{11} = k_{22} = G \int_0^h (y_e + \bar{y}) \frac{\partial N_1}{\partial \bar{y}} \frac{\partial N_1}{\partial \bar{y}} d\bar{y} = G \int_0^h (y_e + \bar{y}) \left(-\frac{1}{h}\right) \left(-\frac{1}{h}\right) d\bar{y} = \frac{G}{h} \left(y_e + \frac{h}{2}\right) \quad (3.12)$$

$$k_{12} = k_{21} = G \int_0^h (y_e + \bar{y}) \frac{\partial N_1}{\partial \bar{y}} \frac{\partial N_2}{\partial \bar{y}} d\bar{y} = G \int_0^h (y_e + \bar{y}) \left(-\frac{1}{h}\right) \left(\frac{1}{h}\right) d\bar{y} = -\frac{G}{h} \left(y_e + \frac{h}{2}\right) \quad (3.13)$$

olarak elde edilir. Burada, G kayma modülünün değeri, eleman kalınlıkları yeteri kadar küçük kabul edilerek her eleman için ortalama bir değer alınmış ve sabit olarak integralin dışına çıkarılmıştır. Kayma modülünün baraj yüksekliğince her elemandaki değişen değeri ise Denklem 3.1'den belirlenmektedir. Eleman rijitlik matrisi toplu olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$[k] = \frac{G}{h} \begin{bmatrix} (y_e + \frac{h}{2}) & -(y_e + \frac{h}{2}) \\ -(y_e + \frac{h}{2}) & (y_e + \frac{h}{2}) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

3.2.3.3 Eleman dış yük vektörü

Yer hareketinden doğan $\{f\}$ eleman dış yük vektörü aşağıdaki şekilde elde edilebilir [43, s.87]:

$$f_i = -\rho \ddot{u}_g \int_0^h (y_e + \bar{y}) N_i d\bar{y} \quad (3.15)$$

$$f_1 = -\rho \ddot{u}_g \int_0^h (y_e + \bar{y}) N_1 d\bar{y} = -\rho \ddot{u}_g \int_0^h (y_e + \bar{y}) \left(1 - \frac{\bar{y}}{h}\right) d\bar{y} = -\rho h \ddot{u}_g \left\{ \frac{y_e}{2} + \frac{h}{6} \right\} \quad (3.16)$$

$$f_2 = -\rho \ddot{u}_g \int_0^h (y_e + \bar{y}) N_2 d\bar{y} = -\rho \ddot{u}_g \int_0^h (y_e + \bar{y}) \left(\frac{\bar{y}}{h}\right) d\bar{y} = -\rho h \ddot{u}_g \left\{ \frac{y_e}{2} + \frac{h}{3} \right\} \quad (3.17)$$

$\{f\}$ eleman dış yük vektörü toplu olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

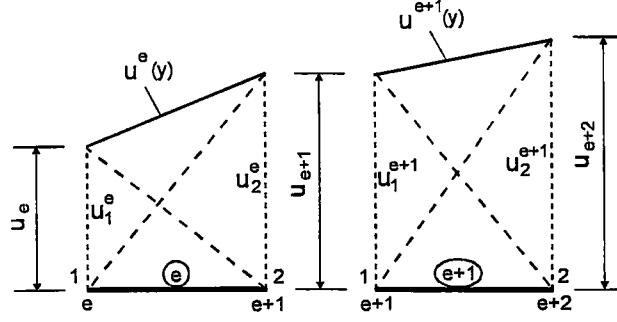
$$\{f\} = -\rho h \ddot{u}_g \begin{Bmatrix} \frac{y_e}{2} + \frac{h}{6} \\ \frac{y_e}{2} + \frac{h}{3} \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

3.2.4 Sistem Matrisleri

Eleman matrisleri Denklem 3.5'de yerlerine yazılıp, h eleman boyu için $h = y_{e+1} - y_e$ değeri ve $\hat{y} = (y_{e+1} + y_e)/2$ kısaltması yapılırsa eleman hareket denklemi aşağıdaki biçimde elde edilebilir:

$$\rho h \begin{bmatrix} (y_{e+1} + 3y_e) & (y_{e+1} + y_e) \\ (y_{e+1} + y_e) & (3y_{e+1} + y_e) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \frac{12G\hat{y}}{h} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = -2\rho h \ddot{u}_g \begin{Bmatrix} y_{e+1} + 2y_e \\ 2y_{e+1} + y_e \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

Eleman matrislerinin herbiri sonlu eleman ağındaki numaralama ve yerdeğiştirmelerin sürekliliği ($u_2^e = u_1^{e+1}$) gözönünde tutularak birleştirilir (Şekil 3.3). Birleştirme işlemi fortran77 programlama dilinde yazılan bir bilgisayar programı yardımı ile aşağıdaki sistematik uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 3.3 İki doğrusal çubuk elemanın yerdeğiştirmelerin sürekliliğine göre birleştirilmesi

$$[S] = \begin{bmatrix} e_{11}^1 & e_{12}^1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ e_{21}^1 & e_{22}^1 + e_{11}^2 & e_{12}^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{21}^2 & e_{22}^2 + e_{11}^3 & e_{12}^3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_{21}^3 & e_{22}^3 + e_{11}^4 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & e_{22}^{n-2} + e_{11}^{n-1} & e_{12}^{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & e_{21}^{n-1} & e_{22}^{n-1} + e_{11}^n & e_{12}^n \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & e_{21}^n & e_{22}^n \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Burada¹ [S] sistem matrislerini (kütle veya rijitlik), e_{ij}^n sonlu eleman matrislerinin (kütle veya rijitlik) elemanlarını göstermektedir. Hareket denkleminin sağ tarafını oluşturan, yer hareketinden ortaya çıkan, {F} sistem dış yük vektörü de, Denklem 3.18 de verilen {f} eleman dış yük vektörlerinin birleştirilmesinden elde edilir.

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} f_1^1 \\ f_2^1 + f_1^2 \\ f_2^2 + f_1^3 \\ f_2^3 + f_1^4 \\ \vdots \\ f_2^{n-1} + f_1^n \\ f_2^n \end{Bmatrix} \quad (3.21)$$

¹ Bu gösterimdeki simgeler yalnız buraya özgüdür.

3.2.5 Sönüm etkisi

Baraj gövdesinin sönümü için, $[M]$ kütle ve $[K]$ rijitlik matrisinin doğrusal bir kombinasyonu olarak $[C]$ orantılı sönüm matrisi tanımlanabilir [45,53]:

$$[C] = a_1[M] + a_2[K] \quad (3.22)$$

Burada, a_1 ve a_2 sönüm matrisi katsayılarını göstermektedir. Benzer şekilde, Modal analiz halinde, modal sönüm matrisi $[\bar{C}] = a_1[I] + a_2[\Lambda]$ olur. Burada, $[I]$ birim matrisi, $[\Lambda]$ modal frekans matrisini göstermektedir. Hareket denklemi genelleştirilmiş koordinatlarla aşağıdaki şekilde yazılabilir [45]:

$$\ddot{Y}_i + 2\gamma_i\omega_i\dot{Y}_i + \omega_i^2Y_i = P_i/M_i \quad (3.23)$$

Burada, $\ddot{Y}_i$, $\dot{Y}_i$, Y_i , sırası ile i . mod için genelleştirilmiş ivme, hız ve yerdeğiştirmeyi, M_i genelleştirilmiş modal kütle, ω_i , açısal frekansı, P_i genelleştirilmiş modal dış yükü ve γ_i modal sönüm oranını göstermektedir. Denklem 3.23 den sönümle ilgili terimin karşılığı yazılarak,

$$2\gamma_i\omega_i = a_1 + a_2\omega_i^2 \quad (3.24)$$

elde edilir. Birinci mod için sönüm oranı γ_1 , ikinci mod için sönüm oranı γ_2 kabul edilirse, Denklem 3.24 den aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\gamma_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{a_1}{\omega_1} + a_2\omega_1\right) \quad , \quad \gamma_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{a_1}{\omega_2} + a_2\omega_2\right) \quad (3.25)$$

Bu iki denklemin çözümünden a_1 ve a_2 katsayıları aşağıdaki biçimde elde edilir:

$$a_1 = 2\omega_1\omega_2 \frac{\omega_2\gamma_1 - \omega_1\gamma_2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad , \quad a_2 = 2 \frac{\omega_2\gamma_2 - \omega_1\gamma_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (3.26)$$

Sönüm teriminin eklenmesi ile hareket denklemi toplu olarak aşağıdaki formu alır:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3.27)$$

Burada, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla sistem kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\ddot{u}(y,t)$, $\dot{u}(y,t)$ ve $u(y,t)$ sırasıyla ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini göstermektedir. Sistemin sönümsüz serbest titreşim frekansları,

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (3.28)$$

sönümsüz serbest titreşim denkleminin çözümünden elde edilir.

3.2.6 Sınır şartları ve başlangıç şartları

Baraj üst yüzeyinde kayma gerilmelerinin ve baraj tabanında bağıl yerdeğiştirmelerin sıfır olması şeklindeki sınır şartları Şekil 3.1 den aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$\left. \frac{\partial u(y,t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad , \quad u(H,t) = 0 \quad (3.29)$$

Sukunet halinde hareketin başladığı kabulü ile, başlangıç şartları,

$$u(y,0) = 0 \quad , \quad \dot{u}(y,0) = 0 \quad (3.30)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem 3.29'daki sınır şartları, Denklem 3.20 ve Denklem 3.21'deki sistem matrislerinin ilgili satır ve sütunların silinmesi ile uygulanır.

Denklem 3.30'daki başlangıç şartlarının uygulanması ve Denklem 3.27 ile verilen sistem hareket denkleminin sayısal çözümü Bölüm 5'de verilmiştir.

3.3 İKİ BOYUTLU SONLU ELEMAN MODELİ

3.3.1 Yapılan kabuller

Problemin iki boyutlu analizinde aşağıda verilen kabuller yapılmıştır:

1. Baraj gövdesi düzlem şekil değiştirme problemi olarak gözönüne alınmış ve 2B olarak modellenmiştir. Baraj ortalama uzunluğunun, baraj yüksekliğine oranı büyük olduğu durumlarda 2B model pekçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [3,17,20,24,30,46,49]. Bu modelde barajın birim kalınlıktaki tipik enkesiti dikkate alınmaktadır.
2. Baraj malzemesi (zemin) doğrusal elastik ve küçük şekil değiştirmeler yapmaktadır.
3. Baraj malzemesinin homojen olmayan yapısı, elastisite modülünün baraj yüksekliğince değiştiği kabul edilerek gözönünde bulundurulmuştur. Bu değişim,

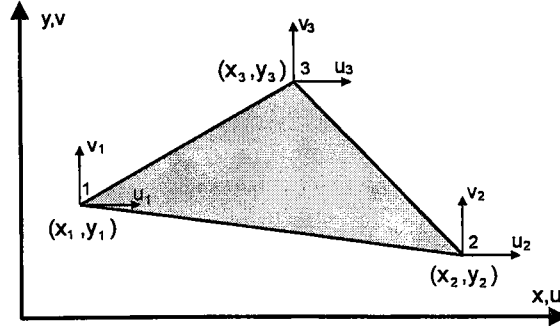
$$E(y) = E_0 \left(\frac{y}{H} \right)^m \quad (m = 0, 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}) \quad (3.31)$$

şeklinde tanımlanabilir [9]. Burada, $E(y)$ baraj yüksekliğince değişen elastisite modülünü, E_0 baraj tabanındaki elastisite modülünü, H baraj yüksekliğini göstermektedir.

4. Baraj gövdesi rijit bir temele oturmaktadır.
5. Baraj malzemesinin sönümü için kütle ve rijitlik matrisleri ile orantılı, Rayleigh tipi bir viskoz sönüm kabul edilmiştir [45,53].
6. Haznedeki suyun baraj davranışına etkisi ihmal edilmiştir (boş baraj).

3.3.2 Sonlu eleman ağının kurulması

Sonlu eleman yönteminde geometrik olarak düzgün olmayan düzlem yapı elemanlarını, sonlu elemanlara ayırmak için oldukça basit olan üçgen elemanlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Baraj probleminin iki boyutlu sonlu eleman analizinde de Şekil 3.4’de verilen, üç düğüm noktalı üçgen eleman kullanılmıştır.



Şekil 3.4 2B sonlu eleman çözümlerinde kullanılan üç düğüm noktalı üçgen eleman

3.3.3 Biçim fonksiyonlarının belirlenmesi

Üçgen elemanın her bir düğüm noktasında iki serbestlik derecesi tanımlanmıştır: u ve v sırası ile x ve y eksenleri doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenlerini göstermektedir. Her bir yerdeğiştirme için üç terimli bir polinom aşağıdaki şekilde yazılabilir [43,45]:

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \\ v &= \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y \end{aligned} \quad (3.32)$$

Burada, u ve v aynı formda fonksiyonlar olduğundan bağıntılar yalnız x doğrultusu için elde edilecektir. Her üç düğüm noktasında, x doğrultusundaki u yerdeğiştirme bileşeni ifadesi matris formunda,

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} \quad (3.33)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, u_1 , u_2 ve u_3 sırasıyla 1, 2 ve 3 nolu düğüm noktalarının x eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenlerini göstermektedir. Burada $[A]$ matrisi,

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, x_i, y_i ($i=1,2,3$) i. düğüm noktasının koordinatlarını göstermektedir. Denklem 3.33 α_i 'lere göre çözülürse,

$$\begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} = [A]^{-1} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (3.35)$$

elde edilir. Burada,

$$[A]^{-1} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} A_1^\circ & A_2^\circ & A_3^\circ \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$A_i^\circ = x_j y_k - x_k y_j, \quad a_i = y_j - y_k, \quad b_i = x_k - x_j \quad (3.37)$$

A_i° , a_i ve b_i üçgen elemanın koordinatlarına bağlı büyüklüklerdir ve i, j, k sırasıyla dairesel permütasyon ile elde edilirler. A_e üçgen elemanın alanını gösterir ve

$$A_e = \frac{1}{2} \det [A] = \frac{1}{2} (A_1^\circ + A_2^\circ + A_3^\circ) = \frac{1}{2} (a_1 b_2 - a_2 b_1) \quad (3.38)$$

bağıntısından hesaplanır. Denklem 3.35, Denklem 3.32'de yazılırsa u için,

$$u(x, y) = \{N\} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (3.39)$$

elde edilir. Burada, $\{N\}$ yerdeğiştirme vektörünü göstermektedir:

$$\{N\} = \{N_1 \quad N_2 \quad N_3\} = \{1 \quad x \quad y\} [A]^{-1} \quad (3.40)$$

İndis notasyonu ile de aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$N_i = \frac{1}{2A_e} (A_i^\circ + a_i x + b_i y) \quad (3.41)$$

Benzer şekilde y eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşeni v için,

$$v(x,y) = \{N\} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (3.42)$$

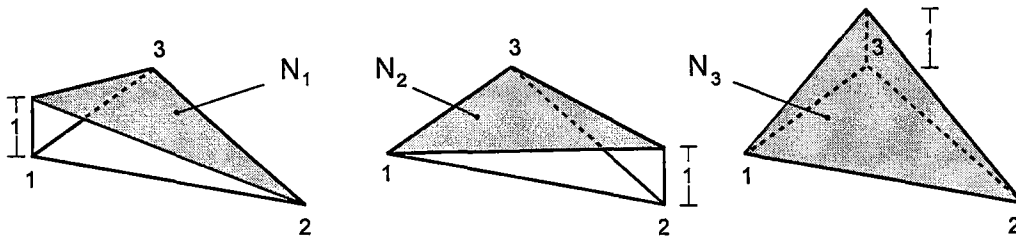
yazılabilir. Burada, v_1 , v_2 ve v_3 sırası ile 1, 2 ve 3 düğüm noktalarının y eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenlerini göstermektedir. Denklem 3.39 ve Denklem 3.42 birleştirilirse eleman için yerdeğiştirme bileşenleri aşağıdaki biçimde elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (3.43)$$

$N_i(x,y)$ fonksiyonu i . düğüm noktasında birim değer, diğer iki düğüm noktasında sıfır değeri alarak doğrusal bir şekilde değişir. Bu değişim Şekil 3.5 de gösterilmiştir.

Denklem 3.43 daha uygun olan aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix} = \{N\} \{u\} \quad (3.44)$$



Şekil 3.5 Üç düğüm noktalı üçgen eleman için doğrusal şekil fonksiyonları

3.3.4 Eleman kütle matrisi

Düzlem eleman için kinetik enerji ifadesi,

$$T = \frac{1}{2} \int_A t \rho (\dot{u}^2 + \dot{v}^2) dA \quad (3.45)$$

şeklinde ifade edilebilir [45]. Denklem 3.44 Denklem 3.45’de yerine yazılırsa;

$$T = \frac{1}{2} \{\dot{u}\}^T [m] \{\dot{u}\} \quad (3.46)$$

elde edilir. Burada, t eleman kalınlığını (t=birim, düzlem şekil değiştirme hali), ρ eleman kütle yoğunluğunu, [m] eleman kütle matrisini,

$$[m] = \int_A \rho [N]^T [N] dA \quad (3.47)$$

göstermektedir. Denklem 3.41 ve Denklem 3.43, Denklem 3.47’de yerine yazılırsa eleman kütle matrisi aşağıdaki biçimde elde edilir:

$$[m] = \frac{1}{12} \rho A_e \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

3.3.5 Eleman rijitlik matrisi

Düzlem eleman için potansiyel enerji ifadesi,

$$U = \frac{1}{2} \int_A t \{\epsilon\}^T [D] \{\epsilon\} dA \quad (3.49)$$

şeklinde ifade edilebilir [45]. Burada, t (=birim) eleman kalınlığını, $\{\epsilon\}$ şekil değiştirme vektörünü,

$$\{\varepsilon\}^T = \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\} \quad (2.23)$$

ve $[D]$ doğrusal elastik malzeme sabitleri matrisini göstermektedir.

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Denklem 3.44, Denklem 2.23 ve Denklem 3.49 da yerine yazılırsa;

$$U = \frac{1}{2} \{u\}^T [k]_e \{u\} \quad (3.50)$$

elde edilir. Burada, $\{u\}$ eleman yerdeğiştirme vektörünü, $[k]$ eleman rijitlik matrisini,

$$[k]_e = \int_A [B]^T [D] [B] dA \quad (3.51)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} [N] \quad (3.52)$$

$[B]$ eleman şekil değiştirme matrisini göstermektedir ve verilen (3.41) ve (3.43) ifadeleri kullanılarak,

$$[B] = \frac{1}{2A_e} \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & 0 & a_3 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 \\ b_1 & a_1 & b_2 & a_2 & b_3 & a_3 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

şeklinde elde edilebilir. Denklem 3.53 görüldüğü gibi eleman koordinatlarına bağlı katsayılar matrisidir. Bu durumda 3.51 ifadesi,

$$[k]_e = A_e [B]^T [D] [B] \quad (3.54)$$

şekline dönüşür. Şekil değiştirme bileşenlerini içeren [B] matrisinin herbir elemanı sabittir. Bunun için bu elemana “sabit şekil değiştirme üçgeni” de denir [43,45].

3.3.6 Eleman dış yük vektörü

Birim alana etki eden atalet kuvvetleri bileşenleri (f_x , f_y) olmak üzere δW virtüel iş,

$$\delta W = t \int_A (f_x \delta u + f_y \delta v) dx dy = t \int_A \begin{Bmatrix} \delta u \\ \delta v \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} dx dy \quad (3.55)$$

şeklinde ifade edilebilir [45]. Burada, t (=birim) eleman kalınlığını, δu ve δv düğüm noktası virtüel yerdeğiştirmelerini göstermektedir. Denklem 3.44, Denklem 3.55’de yerine yazılırsa,

$$\delta W_e = \{\delta u\}_e^T \{f\}_e \quad (3.56)$$

şeklinde elde edilir ve $\{f\}_e$ eleman dış yük vektörünü göstermektedir.

$$\{f\}_e = \int_A \{N\}_e^T \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} dx dy \quad (3.57)$$

f_x ve f_y eleman üzerinde, x ve y doğrultularında sırasıyla $f_{x0} = -\rho \ddot{U}_{gx}$ ve $f_{y0} = -\rho \ddot{U}_{gy}$ sabit değerlerinde ise yer hareketinden doğan eleman dış yük vektörü:

$$\{f\}_e = -\frac{1}{3} \rho A_e \begin{Bmatrix} \ddot{U}_{gx} \\ \ddot{U}_{gy} \\ \ddot{U}_{gx} \\ \ddot{U}_{gy} \\ \ddot{U}_{gx} \\ \ddot{U}_{gy} \end{Bmatrix} \quad (3.58)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada, $\ddot{U}_{gx}$, $\ddot{U}_{gy}$ x ve y eksenleri doğrultusunda yer hareketi ivme bileşenlerini, ρ sabit kütle yoğunluğunu, A_e elemanın alanını göstermektedir. Denklem 3.58, eleman üzerinde $\rho A_e \ddot{U}_g$ olan toplam atalet kuvvetinin düğüm noktaları arasında eşit olarak dağıldığını göstermektedir.

3.3.7 Sistem matrisleri

Sistem matrisleri, eleman matrislerinin sonlu eleman ağındaki yerlerini gözönünde bulunduran bir yöntem ile elde edilir; düğüm nokta numaraları n_1 , n_2 , n_3 olan üçgen elemanın 1. ve 2., 3. ve 4., 5. ve 6. sütunları sırasıyla sistem matrisinin $(2n_1-1)$. ve $(2n_1)$., $(2n_2-1)$. ve $(2n_2)$., $(2n_3-1)$. ve $(2n_3)$. sütunlarına yerleştirilir. Aynı yöntem satırlar için tekrarlanır. Bu işlem bütün elemanlara uygulanır ve sistem hareket denklemini aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3.59)$$

Burada, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırası ile sistem kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\ddot{u}(y,t)$, $\dot{u}(y,t)$ ve $u(y,t)$ sırası ile ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini göstermektedir.

Eleman matrislerinden sistem matrislerinin elde edilmesi Şekil 3.59'da verilen bir örnek üzerinde açıklanmıştır. Eleman matrisi elemanları ile sistem matrisi elemanları arasındaki ilişki de Tablo 3.1'de verilmiştir.

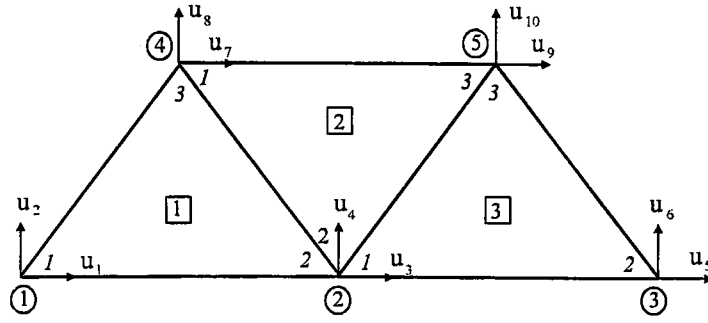
Sistemin sönümsüz serbest titreşim frekansları,

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (3.60)$$

şeklindeki titreşim denkleminin karakteristik denklem çözümünden elde edilir.

3.3.8 Sınır şartları ve başlangıç şartları

Sınır şartları ve başlangıç şartları Bölüm 3.2.6'da bahsedildiği gibi alınmıştır.



Şekil 3.6 Sistemin üçgen elemanlara ayrılarak, eleman ve düğüm noktalarının numaralanması

Tablo 3.1 Şekil 3.6 da verilen sistemin eleman matrisleri ile sistem matrisleri arasındaki ilişki

1. ELEMAN	S	→	1	2	3	4	7	8
$n_1=1$	↓	e	1	2	3	4	5	6
$n_2=2$	1	1	K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{17}	K_{18}
$n_3=4$	2	2	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}	K_{27}	K_{28}
	3	3	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{34}	K_{37}	K_{38}
	4	4	K_{41}	K_{42}	K_{43}	K_{44}	K_{47}	K_{48}
	7	5	K_{71}	K_{72}	K_{73}	K_{74}	K_{77}	K_{78}
	8	6	K_{81}	K_{82}	K_{83}	K_{84}	K_{87}	K_{88}

2. ELEMAN	S	→	7	8	3	4	9	10
$n_1=4$	↓	e	1	2	3	4	5	6
$n_2=2$	7	1	K_{77}	K_{78}	K_{73}	K_{74}	K_{79}	$K_{7,10}$
$n_3=5$	8	2	K_{87}	K_{88}	K_{83}	K_{84}	K_{89}	$K_{8,10}$
	3	3	K_{37}	K_{38}	K_{33}	K_{34}	K_{39}	$K_{3,10}$
	4	4	K_{47}	K_{48}	K_{43}	K_{44}	K_{49}	$K_{4,10}$
	9	5	K_{97}	K_{98}	K_{93}	K_{94}	K_{99}	$K_{9,10}$
	0	6	$K_{10,7}$	$K_{10,8}$	$K_{10,3}$	$K_{10,4}$	$K_{10,9}$	$K_{10,10}$

3. ELEMAN	S	→	3	4	5	6	9	10
$n_1=2$	↓	e	1	2	3	4	5	6
$n_2=3$	3	1	K_{33}	K_{34}	K_{35}	K_{36}	K_{39}	$K_{3,10}$
$n_3=5$	4	2	K_{43}	K_{44}	K_{45}	K_{46}	K_{49}	$K_{4,10}$
	5	3	K_{53}	K_{54}	K_{55}	K_{56}	K_{59}	$K_{5,10}$
	6	4	K_{63}	K_{64}	K_{65}	K_{66}	K_{69}	$K_{6,10}$
	9	5	K_{93}	K_{94}	K_{95}	K_{96}	K_{99}	$K_{9,10}$
	0	6	$K_{10,3}$	$K_{10,4}$	$K_{10,5}$	$K_{10,6}$	$K_{10,9}$	$K_{10,10}$

BÖLÜM 4

ELASTO-PLASTİK DAVRANIŞ

4.1 GENEL

Bilindiği gibi, zeminler statik yüklemelerde olduğu gibi deprem ve benzeri dinamik ve tekrarlı yükleme koşulları altında da doğrusal olmayan bir davranış göstermektedirler. Toprak barajların ve zeminlerin deprem yükleri altındaki elasto-plastik davranışını belirleyebilmek için, zeminde deprem sırasında oluşan ve zaman ile değişen dinamik zemin parametrelerinin gerçeğe uygun olarak bilinmesi gerekli olmaktadır. Zeminlerin doğrusal olmayan bu davranışı gerilmeler ile şekil değiştirmeler arasında kurulan bir bağıntı ile ifade edilebilir [54]. Kayma gerilmelerinin etkili olduğu bir boyutlu şekil değiştirme durumunda, bu bağıntıda birim şekil değiştirmelere veya gerilmelere bağlı olarak değişen kayma modülü tanımlanır. Şekil değiştirmenin veya gerilmenin artması ile zeminin yumuşadığı, daha kolay şekil değiştirebilir duruma geldiği deneysel olarak belirlenir. Bu davranışı kontrol eden kayma modülü artan şekil değiştirme veya gerilmelerle azalma gösterir. Davranış hesaplarında esas alınan gerilme-şekil değiştirme arasındaki doğrusal olmayan bu ilişki, değişik araştırmacılar tarafından çeşitli bağıntılarla ifade edilmiştir. Bu çalışmada, zeminin elasto-plastik davranışı için Hardin ve Drnevich [36] tarafından verilen, hiperbol eğrisi ile tanımlanan, $(\tau - \gamma)$ bağıntısı kullanılmıştır.

4.2 ŞEKİL DEĞİŞTİRME ENERJİSİ

Bir eksenli gerilme etkisinde ki bir çubuk için birim hacimdeki şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu,

$$u = \int_0^{\epsilon_i} \sigma_x d\epsilon_x \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilebilir [55, s.473]. Denklem 2.29'da verilen, elastik bölgede σ_x normal gerilme ifadesi ile birim hacimdeki şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu;

$$u = \int_0^{\varepsilon_1} E \varepsilon_x d\varepsilon_x = \frac{E \varepsilon_1^2}{2} \quad \text{veya} \quad u = \int_0^{\sigma_1} \frac{\sigma_x}{E} d\sigma_x = \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (4.2)$$

şeklini alır. Burada, σ_x ve ε_x normal gerilme ve şekil değiştirme bileşenini, σ_1 ve ε_1 yükleme sonunda erişilen gerilme ve şekil değiştirme bileşenini, E elastisite modülünü göstermektedir.

Eğer elemanda yalnız τ_{xy} kayma gerilmeleri oluşuyorsa, birim hacimdeki şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu Denklem 4.1'deki ifadeye benzer şekilde;

$$u = \int_0^{\gamma_{xy}} \tau_{xy} d\gamma_{xy} \quad (4.3)$$

ifade edilebilir [55, s.477]. Denklem 2.31'de verilen, elastik bölgede τ_{xy} kayma gerilmesi ifadesi ile şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu Denklem 4.3'ün integrasyonundan,

$$u = \int_0^{\gamma_{xy}} G \gamma_{xy} d\gamma_{xy} = \frac{G \gamma_{xy}^2}{2} \quad \text{veya} \quad u = \int_0^{\tau_{xy}} \frac{\tau_{xy}}{G} d\tau_{xy} = \frac{\tau_{xy}^2}{2G} \quad (4.4)$$

olarak elde edilir. Genel halde ise birim hacimdeki şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu ifadesi,

$$u = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{xz} \gamma_{xz}) \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ 2.1 ifadesinde verilen gerilme bileşenlerini $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ 2.13 ifadesinde verilen şekil değiştirme bileşenlerini göstermektedir. Elastik ve izotrop malzeme için Denklem 2.20'de verilen şekil değiştirme-gerilme bağıntıları Denklem 4.5'de yerine yazılırsa;

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\nu(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \sigma_z)] + \frac{1}{2G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \quad (4.6)$$

elde edilir. Eksen takımı olarak asal eksenler seçilirse kayma gerilme bileşenleri ortadan kalkar ve 4.6 denklemini asal gerilmeler cinsinden aşağıda verilen şekli alır:

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (4.7)$$

Bölüm 2.2.1’de ifade edildiği gibi, bir şekil değiştirme durumunu, biri sadece hacim değiştiren hal ile, diğeri hacim sabit kalarak biçim değiştiren hale ayırmak, dolayısı ile enerji ifadesi için de,

$$u = u_h + u_d \quad (4.8)$$

yazmak mümkündür. Burada, u_h hacim değişikliği ile ilgili, u_d biçim değişikliği ile ilgili kısımlarını göstermektedir. Şekil değiştirme enerjisinin hacim değişikliği ile ilgili şekil değiştirme enerjisi kısmını, Denklem 2.8’in Denklem 4.7’de yerine yazılarak σ_0 gerilmesine göre düzenlenmesinden elde edilebilir:

$$u_h = \frac{1}{2E} [3\sigma_0^2 - 2\nu(3\sigma_0^2)] = \frac{3(1-2\nu)}{2E} \sigma_0^2 = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (4.9)$$

Biçim değişikliği ile ilgili ifade ise toplam enerji ifadesi Denklem 4.7’den Denklem 4.9’un çıkarılması ile elde edilir:

$$u_d = u - u_h = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] - \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (4.10)$$

Elde edilen Denklem 4.10 düzenlenip, Denklem 2.22’deki G değeri yazılırsa, biçim değişikliği ile ilgili ifade aşağıdaki biçimi alır [55, s.482]:

$$u_d = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (4.11)$$

4.3 von MISES AKMA KRİTERİ

Özel bir durum olan basit çekme halinde ($\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) σ_1 asal gerilmesi malzeme akma sınırı σ_Y değerine ulaştığında akma gerçekleşecektir. Bu şart altında 4.11 ifadesi;

$$u_{dY} = \sigma_Y^2 / 6G \quad (4.12)$$

biçimini alır [55, s.316]. Bir noktadaki gerilme durumunun akma sınırına ulaşp ulaşmadığına enerji ifadesi kullanılarak ($u_d \leq u_{dY}$) karar verilebilir. Denklem 4.11 bu şart altında,

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 < 2\sigma_Y^2 \quad (4.13)$$

şeklini alır. Verilen bir gerilme durumunda $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeleri,

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_Y^2 \quad (4.14)$$

denkleminin tanımladığı alan içinde kalıyorsa akma oluşmayacaktır. Denklem 4.14, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilme eksen takımında yarıçapı $(2\sigma_Y / 3)^{1/2}$ olan ve asal eksenlerle eşit açı yapan bir silindirin yüzeyini gösterir. Von Mises Kriteri olarak tanımlanan bu kriter Richard von Mises (1883-1953) tarafından ortaya konmuştur [55, s.316]. Plastisite teorisinde önemli bir yeri olan bu bağıntı biçim değiştirme enerjisi ile akma arasındaki ilişkiyi ifade eder. Akma yüzeyini tanımlayan Mises akma kriteri [54,55,56,57] normal ve kayma gerilmeleri ile,

$$f = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} - \sigma_Y = 0 \quad (4.15)$$

şeklinde, deviatör gerilmeler cinsinden ise aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[S_x^2 + S_y^2 + S_z^2 + 6\tau_{xy}^2 \right]^{1/2} - \sigma_Y = 0 \quad (4.16)$$

Bir boyutlu davranışa karşı gelen basit kayma durumunda Denklem 4.15 basitleşerek şu şekli alır:

$$f = \sqrt{3}\tau_{xy} - \sigma_y = 0 \quad (4.17)$$

4.4 HİPERBOLİK ZEMİN MODELİ

Zeminin elasto-plastik davranışının modellenmesi için kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasında doğrusal olmayan bir çevrimsel bağıntının bulunduğu kabul edilmiştir. Bu modelle ilgili temel ilkeler Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Zeminin ilk yüklenme davranışını gösteren gerilme-şekil değiştirme eğrisi iskelet eğrisi olarak alınır. Zemin temel davranış eğrisi olarak da zemin dinamiğinde yaygın bir şekilde kullanılan hiperbolik zemin modeli,

$$\tau = G_0 \frac{\gamma}{1 + (\gamma/\gamma_r)} \quad (4.18)$$

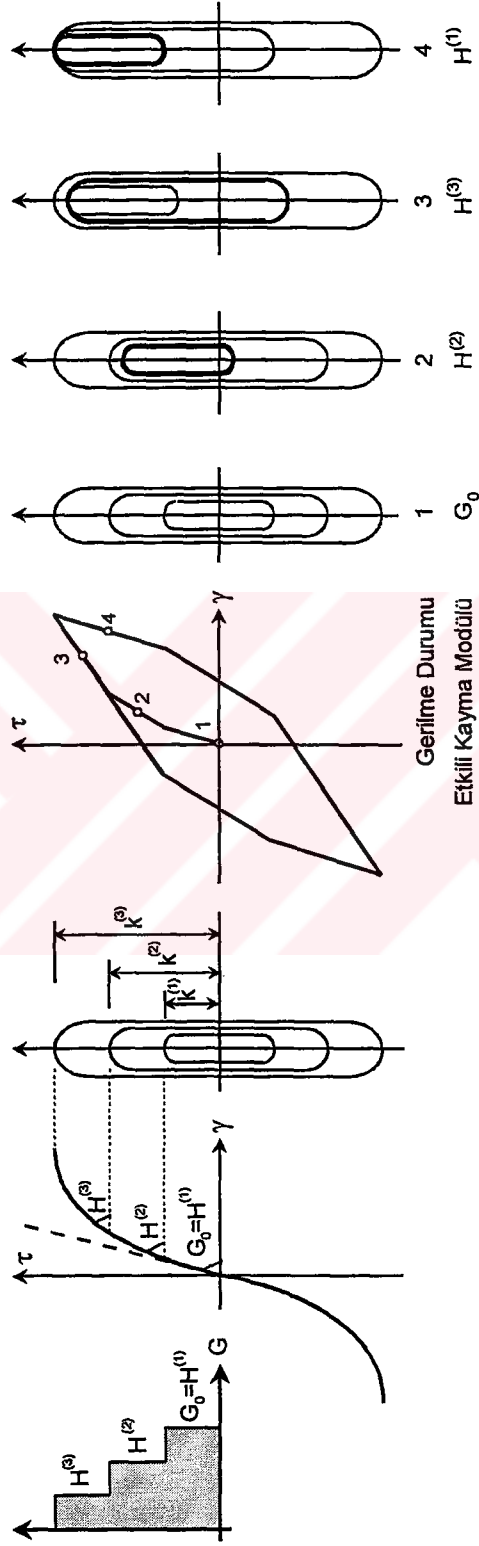
şeklinde ifade edilir [36,54,58,59]. Burada G_0 başlangıç kayma modülünü, γ şekil değiştirmeleri ve γ_r hiperbolik davranışı kontrol eden karakteristik zemin şekil değiştirmesini göstermektedir. Doğrusal olmayan bu eğrinin başlangıca göre simetrik alınması uygundur. Bu suretle kayma gerilmesinin yön değiştirmesi davranışta etkili olmaz. Bu şekilde elasto-plastik davranış gösteren türden tarif edilen ve doğrusal olmayan davranış eğrisinde, kayma modülü kayma gerilmesine bağlı olarak değişmektedir. Artan kayma gerilmelerinde zemin daha kolay şekil değiştirme yapabilir duruma gelmektedir. Sürekli olan bu eğri, sayısal hesaplarda doğru parçaları ile temsil edilebilir. Bu doğrunun eğimi ise karşı gelen seviyedeki ve bu bölgede sabit alınan modülü göstermektedir. Bu doğru parçalarının sayısı, sayısal çözümlemenin hassasiyeti ile ilgilidir. Temel davranış eğrisinin parçalara ayrılması ve boşalmanın farklı yolla yapılması, ancak her doğru parçasının ayrı bir akma yüzeyi tarif ettiği kabulü ile yapılabilir. Bir boyutlu gerilme durumunda akma eğrisi iki uç nokta ile temsil edileceği için, iç içe yuvalanmış akma yüzeyleri Denklem 4.17’den,

$$f^{(m)} = 3 \left[\tau - \alpha^{(m)} \right]^2 - \left[k^{(m)} \right]^2 = 0 \quad (4.19)$$

olarak yazılabilir. Burada; $k^{(m)}$ akma yüzeyinin bir doğrultudaki genişliğini, $\alpha^{(m)}$ bunun başlangıca göre olan ötelenmesini ve τ kayma gerilmesini göstermektedir. Burada m akma yüzeyi ile ilgili elasto-plastik kayma modülü $H^{(m)}$ olarak gösterilirse, gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişki artımlar türünden aşağıdaki şekilde yazılabilir [35,36]:

$$\dot{\tau} = H^{(m)} \dot{\gamma} \quad H^{(m)} = \frac{G_0}{(1 + (\gamma/\gamma_r))^2} \quad (4.20)$$

Sonlu elemanın her bir akma yüzeyine karşı gelen kayma modülü, eğri ile ilişkili olarak çizilen yuvalar yoluyla da açıklanabilir. Buna göre birbiri içinde bulunan yuvaların herbirinde dışarıya doğru azalan rijitlikler tarif edilmiştir (Şekil 4.1). Yükleme durumunda temel davranış eğrisi üzerinde ilerlenirken bu rijitlikler sırayla geçilir. Belirli bir gerilme seviyesinde boşalma sözkonusu olduğunda, dönüş eğrinin başlangıçtaki durumuna paralel olacaktır. Bu durum da, Şekil 4.1 de ayrıştırılmış davranış eğrisinde gösterildiği gibi 4 rijitliğinin 1 rijitliğine eşit olması ile sağlanır. Boşalmaya devam edilirse, iskelet eğrisinin simetrik olduğunda düşünülerek 1 rijitliğinden 2 rijitliğine geçilir. Böylece açıklanan davranışa uyulmuş olur. Sayısal çözümlerde, her sonlu elemanın davranış eğrisinin üzerindeki konumu, geçirdiği konumlarda da hatırlanarak, elastik davranış için verilen sonlu eleman formülasyonu burada da kullanılabilir.



Şekil 4.1. Bir ve iki boyutlu sonlu eleman analizlerinde kullanılan çevrimsel elasto-plastik zemin modeli ve ayrıklaştırılması [48]

BÖLÜM 5

HAREKET DENKLEMİNİN SAYISAL ÇÖZÜMÜ

5.1 GENEL

Yer hareketi etkisi altındaki sistemlerin çözümünde kullanılan yaygın bir yöntem hareket denkleminin sayısal integrasyonudur. Hareket denklemi Bölüm 3’de,

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (5.1)$$

şeklinde elde edilmişti. Doğrusal davranışta, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\{F\}$ dış yük vektörünü göstermektedir. Doğrusal olmayan davranışta ise kayma modülü şekil değiştirmelere, dolayısıyla zamana bağlı olarak değiştiğinden rijitlik matrisi, ona bağlı olarak da sönüm matrisi zamana bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Burada, $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ sırasıyla zamana bağlı ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini göstermektedir.

Bir t zamanından $t+\Delta t$ zamanına gelindiğinde yerdeğiştirmelerde meydana gelecek $\Delta u(t) = u(t + \Delta t) - u(t)$ değişiminden hareket denklemindeki kuvvetlerde oluşacak artımların da dengede olması gerekir. Hareket denklemi artımlar türünden,

$$[M]\{\Delta \ddot{u}(t)\} + [C(t)]\{\Delta \dot{u}(t)\} + [K(t)]\{\Delta u(t)\} = \{\Delta F(t)\} \quad (5.2)$$

şeklinde yazılabilir [60, s.18].

Artım olarak yazılan 5.2 denkleminin sayısal çözümü için hesap yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada adım adım integrasyon tekniğinin kullanıldığı Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi’nden söz edilecek ve çözümlerde kullanılacaktır.

5.2 DOĞRUSAL İVME DEĞİŞİMİ YÖNTEMİ

Hız ifadesi $\dot{u}(t + \Delta t)$, kuvvet serisine açılır ve serinin ilk üç terim gözönüne alınır,

$$\dot{u}(t + \Delta t) = \dot{u}(t) + \ddot{u}(t) \Delta t + \ddot{\ddot{u}}(t) (\Delta t)^2 / 2 \quad (5.3)$$

elde edilir [60, s.19]. Buna karşılık gelen yerdeğiştirme ise,

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \dot{u}(t) \Delta t + \ddot{u}(t) (\Delta t)^2 / 2 + \ddot{\ddot{u}}(t) (\Delta t)^3 / 6 \quad (5.4)$$

şeklinde yazılabilir. İvmenin gözönüne alınan adım içinde doğrusal değiştiği kabul edilirse, $\ddot{u}(t) = \Delta \ddot{u}(t) / \Delta t$ (= sabit) alınarak yukarıdaki ifadeler,

$$\Delta \dot{u}(t) = \ddot{u}(t) \Delta t + \Delta \ddot{u}(t) \Delta t / 2 \quad (5.5)$$

$$\Delta u(t) = \dot{u}(t) \Delta t + \ddot{u}(t) (\Delta t)^2 / 2 + \Delta \ddot{u}(t) (\Delta t)^2 / 6 \quad (5.6)$$

şekline getirilebilir. Bu bağıntılardan ivme ve hız artımları çözülürse,

$$\Delta \ddot{u}(t) = 6 \Delta u(t) / (\Delta t)^2 - 6 \dot{u}(t) / \Delta t - 3 \ddot{u}(t) \quad (5.7)$$

$$\Delta \dot{u}(t) = 3 \Delta u(t) / \Delta t - 3 \dot{u}(t) - \ddot{u}(t) \Delta t / 2 \quad (5.8)$$

elde edilir. Bu sonuçlar 5.2 denklemindeki artımlara ait hareket denkleminde yerine yazılması ile yerdeğiştirme vektöründeki artım $\{\Delta u(t)\}$ için,

$$[K^*(t)] \{\Delta u(t)\} = \{\Delta F^*(t)\} \quad (5.9)$$

bağıntısı elde edilir. Etkili rijitlik matrisi $[K^*(t)]$ ve etkili yük artım vektörünün $\{\Delta F^*(t)\}$ açık ifadeleri aşağıdaki şekilde yazılabilir [60, s.20]:

$$[K^*(t)] = [K(t)] + 3 [C(t)] / \Delta t + 6 [M] / (\Delta t)^2 \quad (5.10)$$

$$\{\Delta F^*(t)\} = \{\Delta F(t)\} + [M] \left(6 \{\dot{u}(t)\} / \Delta t + 3 \ddot{u}(t) \right) + [C(t)] \left(3 \dot{u}(t) + \{\ddot{u}(t)\} \Delta t / 2 \right) \quad (5.11)$$

Sayısal çözümlerde $u(t)$ ve $\dot{u}(t)$ değerleri, başlangıç şartları olarak veya bir önceki adımın sonuçları olarak bellidir. Yük vektörü, sönüm ve rijitlik matrisleri belirli olduğuna göre, karşı gelen ivme vektörü 5.1 denkleminde,

$$\{\ddot{u}(t)\} = \left(\{F(t)\} - [C(t)] \{\dot{u}(t)\} - [K(t)] \{u(t)\} \right) [M]^{-1} \quad (5.12)$$

şeklinde bulunur. Daha sonra 5.10 ifadesinden $[K^*(t)]$ etkili rijitlik matrisi, 5.11 ifadesinden $\{\Delta F^*(t)\}$ etkili yük artım vektörü ve 5.9 ifadesinden yerdeğistirmelerde meydana gelen $\{\Delta u(t)\}$ artım vektörü hesap edilir. Hızlarda meydana gelen artım ise 5.8 ifadesinden bulunur.

Sonuç olarak gözönüne alınan adım sonrası hız ve yerdeğistirme değerleri için,

$$\dot{u}(t + \Delta t) = \dot{u}(t) + \Delta \dot{u}(t + \Delta t) \quad (5.13)$$

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \Delta u(t + \Delta t) \quad (5.14)$$

bağıntıları elde edilir [60, s.19].

BÖLÜM 6

SAYISAL ÇÖZÜMLER

6.1 GENEL

Bu bölümde, kaya dolgu olarak inşa edilen Atatürk Barajının deprem yükleri altında doğrusal elastik ve elasto-plastik davranışı incelenmiştir. Analizlerde, ayrı ayrı bir boyutlu ve iki boyutlu sonlu elemanlarla oluşturulan yapı modelleri kullanılmıştır. Deprem ivmesi olarak bölgede olması muhtemel deprem büyüklüğü belirlenerek sayısal hesaplarda kullanılmıştır. Ayrıca her iki model ve davranış için parametrik çalışma yapılarak yapının davranışı değerlendirilmeye çalışılmıştır.

6.2 ATATÜRK BARAJI

Atatürk Barajı Urfa ilinin 25 km kuzeydoğusuna, Fırat nehri üzerine, kil çekirdekli kaya dolgu baraj tipinde inşa edilmiş bir barajımızdır. Baraj ve hidroelektrik santrali (HES) inşaatı yapımı 1985 yılı Eylül ayında batardo inşaatı ile başlamış ve 1990 yılı Ağustos ayı sonlarında tamamlanmıştır. Gövde dolgusu ise yaklaşık 4 yıllık bir çalışma ile bitirilmiştir.

Tipik enkesiti Şekil 6.1'de, planı Şekil 6.2'de görülen Atatürk Barajı, 172.0 m temelden yüksekliği, 1914.0 m kret uzunluğu, 84.5 milyon m³ gövde dolgu hacmi ve geniş baraj gölü havzası ile ülkemizin en büyük barajıdır. Gövde dolgusuna ait bazı büyüklükler Tablo 6.1'de özetlenmiştir [61].

Baraj gövdesinin geçirimsiz bölgesini oluşturan kil çekirdek taban kayasına kadar inmekte ve bunun altında geçirimsizlik perdesi yer almaktadır. Baraj gövdesinin stabilitesini sağlamak ve dolgunun dış yüzeylerini korumak amacı ile inşa edilen

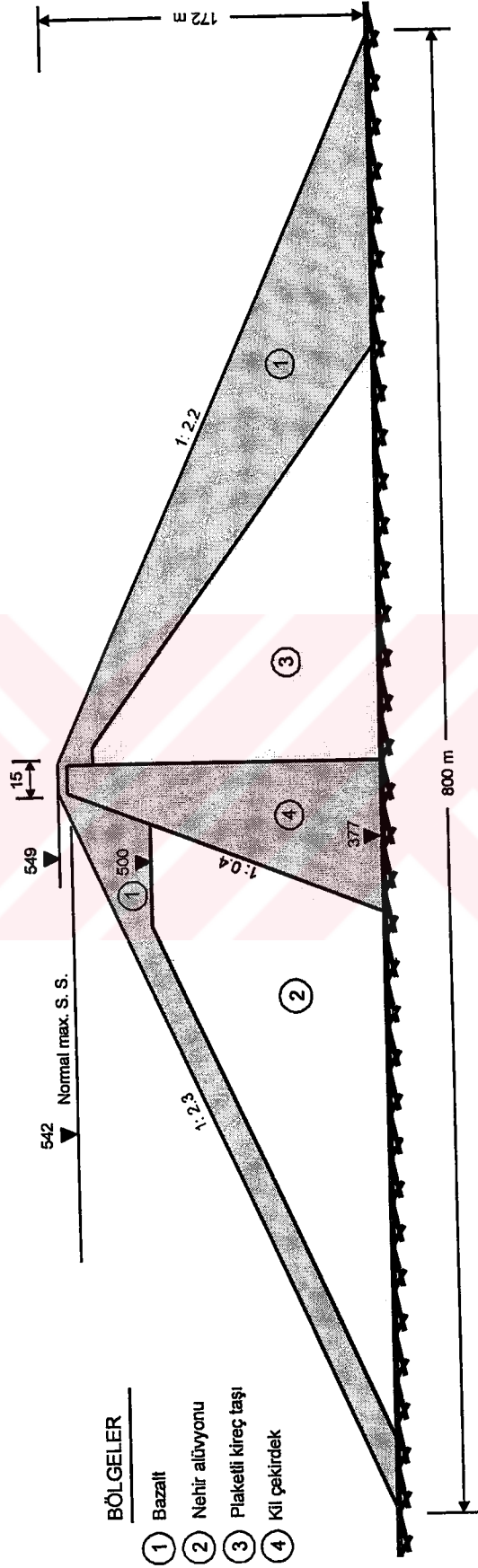
kabuk bölgesi, ince ve kalın bazalttan oluşan ana kabuk malzemeleri ile kabuk içerisinde iç dolgu olarak kullanılan plaketsli kireç taşından inşa edilmiştir. Baraj gövdesinin iskeletini bazalt oluşturmaktadır. Gövde dolgusu memba tarafında sağlam bazalt, mansabında ise sağlam ve ayrıışmış bazalt birlikte kullanılmıştır. Ayrıca gövde dolgusunun mansab kısmında dolusavak ve sulama yapısı kazılarından çıkan plaketsli kireçtaşı da dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Gövde dolgusunda kullanılan malzemelerin teknik özellikleri özetlenerek Tablo 6.2'de verilmiştir [61].

Tablo 6.1 Atatürk Barajı gövde dolgusuna ait bazı büyüklükler [61]

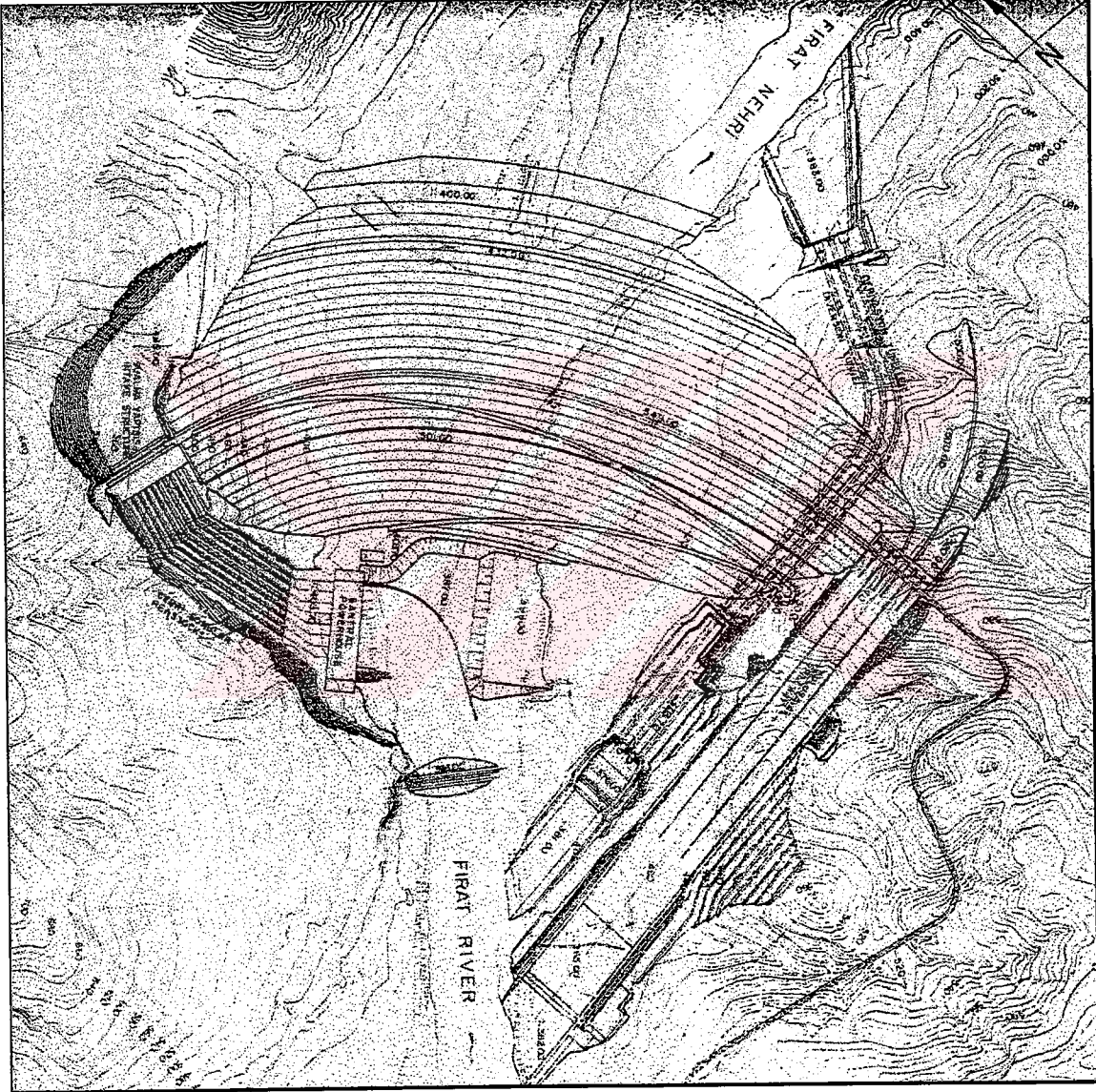
Tipi	Kil çekirdek + kaya dolgu
Temel kotu	377 m
En yüksek su kotu	542 m
Temelden yükseklik	172 m
Kret kotu	549 m
Kret uzunluğu	1914 m
Kret genişliği	15 m
Menba şev eğimi	1 / 2.3
Mansab şev eğimi	1 / 2.2
Gövde dolgu hacmi	84.5 milyon m ³

Tablo 6.2 Gövde dolgusunda kullanılan malzemelerin teknik özellikleri [85]

	Kil	Tuvenan agrega	Plaketsli kireçtaşı	Bazalt
Özgöl ağırlık, g/cm ³	2.67	2.74	2.68	3.01
Tabii su muhtevası, %	22.27	4.05	6.94	1.39
Optimum su muhtevası, %	24.50	—	—	—
Max. k.b. ağırlık, g/cm ³	2.00	2.00	2.10	2.30
Likit limit, %	54.20	—	—	—
Plastik limit, %	20.94	—	—	—
Plastisite indisi, %	33.26	—	—	—
4 # Nolu elekten geçen, %	97.87	—	—	—
200 # Nolu elekten geçen, %	88.75	1.40	—	—
2 µ' den geçen, %	38.37	—	—	—
Kohezyon, kg/cm ³	1.01	—	0.10	0.18
İçsel sürtünme açısı	15.45	39.60	40.20	38.60



Şekil 6.1 Atatürk Barajının menba-mansab doğrultusunda alınmış tipik enkesiti
(filtre bölgeleri ve servis yolları gözönüne alınmamıştır)



Şekil 6.2 Atatürk Barajı genel vaziyet planı

6.3 BÖLGENİN DEPREMSELLİĞİ ve EN BÜYÜK YER İVMESİ

Atatürk Barajı'nın bulunduğu bölgenin haritası ve ana tektonik yapıları Şekil 6.3'de görülmektedir. Kuzey Anadolu Fayı baraj bölgesinin 300 km kuzeyinden geçmektedir. McKenzie'nin [62] tektonik modeline uyan Orta Anadolu, Kuzey Anadolu ve Arap Yarımadası plaklarının kesişim bölgesindedir. 1901-1997 yılları arasında, 36° - 42° E ve 35° - 40° N ile sınırlı bölgede, magnitudü 4.0 ve daha büyük 188 deprem gözlenmiştir. Bunların en büyüğü Kuzey Anadolu Fayı'nda meydana gelen 8.0 büyüklüklü 26.12.1939 Erzincan Depremi'dir.

Bölgenin depremselliği ile ilgili Yaralıoğlu ve diğ.[63] ve Electrowatt and Associates firmasının [64] ayrıntılı çalışmaları vardır. Bölgede olabilecek depremlerle ilgili Yaralıoğlu ve diğ. [63] tarafından yapılan deprem risk analizleri sonuçları % olarak deprem olasılıkları şeklinde Tablo 6.3'de verilmiştir.

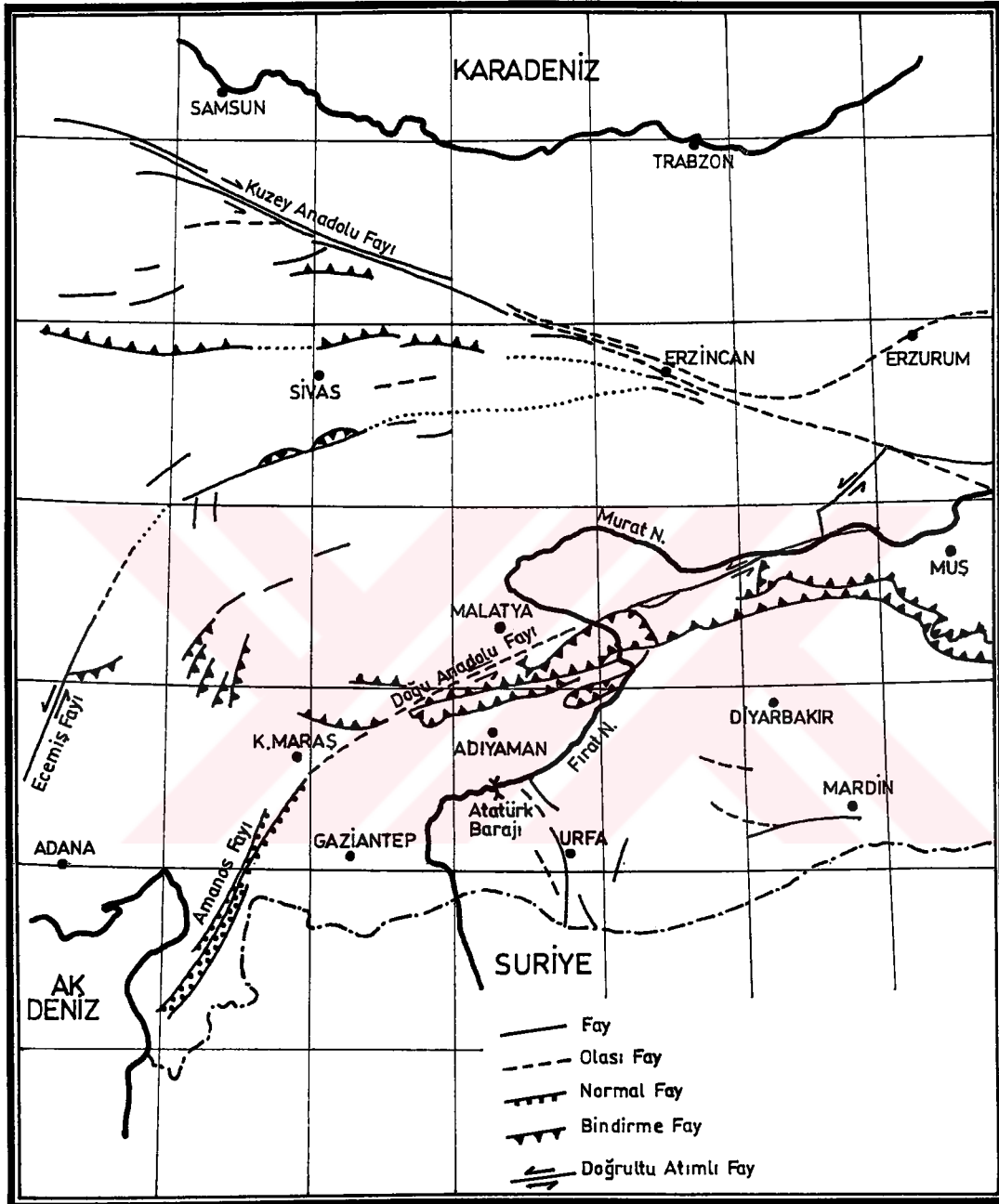
Yine Atatürk Barajı'nın bulunduğu bölge için, Electrowatt and Associates Firması [64] tarafından Adıyaman-Malatya-Elazığ ve Palu-Lice-Bingöl bölgelerinde yapılan deprem risk analizleri Tablo 6.4'de en büyük yer ivmesi g olarak özetlenmiştir.

Tablo 6.3 Yaralıoğlu ve diğ. [63] tarafından verilen deprem risk analizi sonuçları (% olarak)

Süre (Yıl)	En büyük yer ivmesi (g)					
	.05	.10	.15	.20	.25	.30
50	60	19	9.4	4.9	2.7	1.6
100	83	37	18	9.5	5.2	3.2
1000	100	97	81	58	39	26

Tablo 6.4 Electrowatt and Associates [64] tarafından verilen deprem risk analizi sonuçları (en büyük yer ivmesi g olarak)

Süre (Yıl)	Adıyaman-Malatya-Elazığ Bölgesi			Palu-Lice-Bingöl Bölgesi		
	Gutenberg-Richter	Trifunac-Brady	Esteva	Gutenberg-Richter	Trifunac-Brady	Esteva
10	.006	.014	.025	.001	.003	.008
100	.030	.066	.041	.002	.006	.012
1000	.162	.283	.057	.006	.014	.017

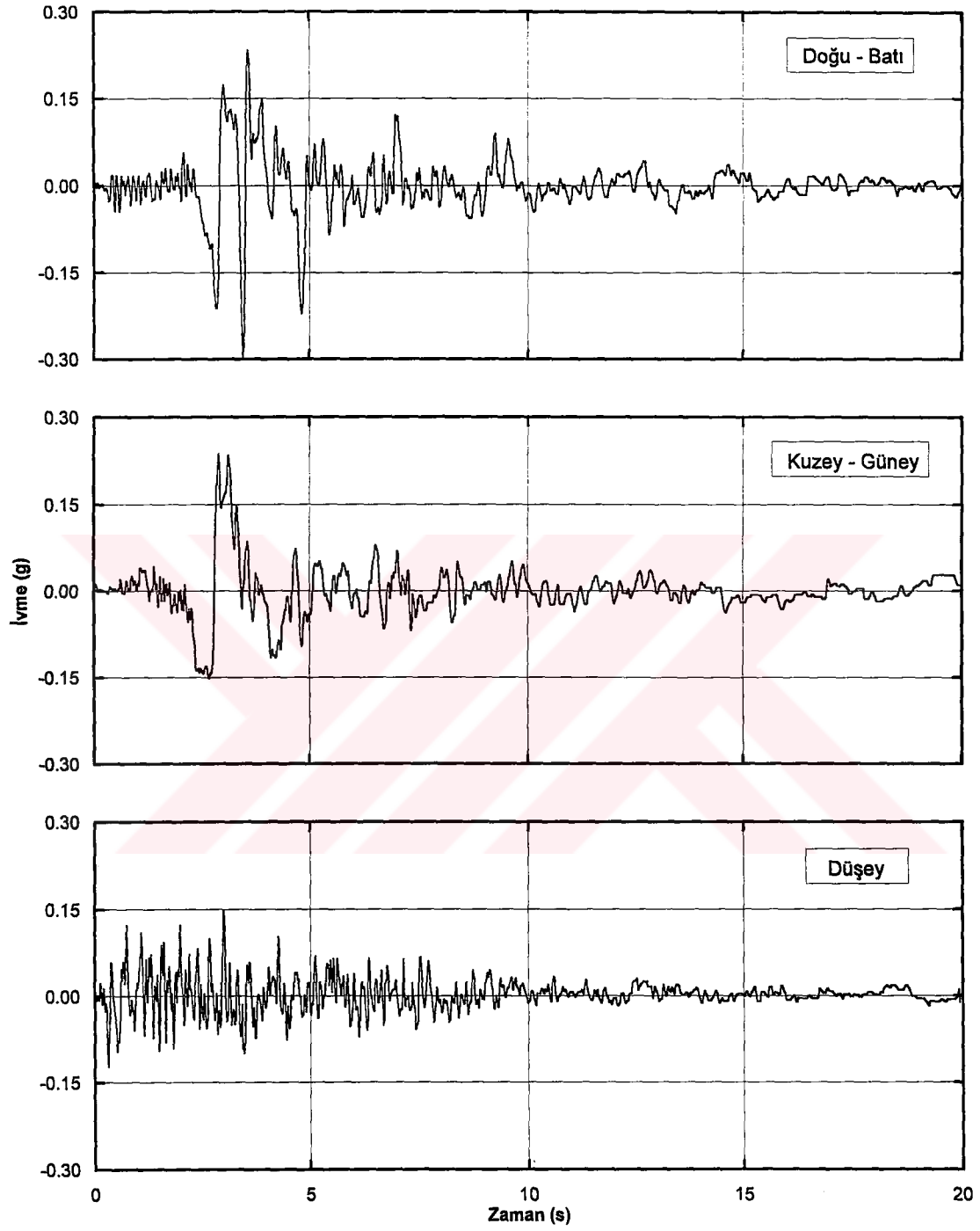


Şekil 6.3 Bölgesinin haritası ve Doğu Anadolu bölgesinin ana tektonik yapıları [63]

Bu araştırma sonuçlarından, ortalama en büyük yer ivmesi değeri 200 yıl için 0.1 g, 1000 yıl için 0.2 g, 3000 yıl için 0.3 g olarak tahmin edilmektedir [64].

Barajın boyutlandırılmasında esas alınacak yer hareketi için, odağı baraj bölgesinden $R=45$ km uzaklıkta, $h=30$ km derinde ve $M=7.5$ büyüklüğünde bir deprem seçilmiştir. Schnabel ve Seed [65] kaya zeminler için böyle bir depremin en büyük yer ivmesinin ortalama değerini 0.20 g olarak vermişlerdir. Bu değer bazı durumlarda 0.25 g değerine ulaşmaktadır. Gürpınar [66] tarafından verilen bağıntı en büyük yer ivmesini 0.35 g olarak vermektedir. Bu değer Öner'e göre 0.30 g, Danovan ve Bornstein'a göre 0.26 g, McGuire'e göre 0.42 g değerini almaktadır. 0.25 den 0.42 ye kadar değişen bu araştırma sonuçları 0.30 g ortalama değerini vermektedir [63].

Yukarıda bahsedilen araştırma sonuçlarından faydalanılarak, sayısal çözümlerde kullanılacak olan en büyük yer ivmesi değeri 0.30 g olarak alınmıştır. Bu amaçla baraj bölgesi civarında meydana gelen 13 Mart 1992 Erzincan Depremi'nin yer ivme kayıtları, maksimum değeri 0.30 g olacak şekilde ölçeklendirilerek sayısal çözümlerde kullanılmıştır. İlk 20 saniyesi kullanılan yer hareketi ivme değerlerinin zamanla değişimi Şekil 6.4'de verilmiştir.

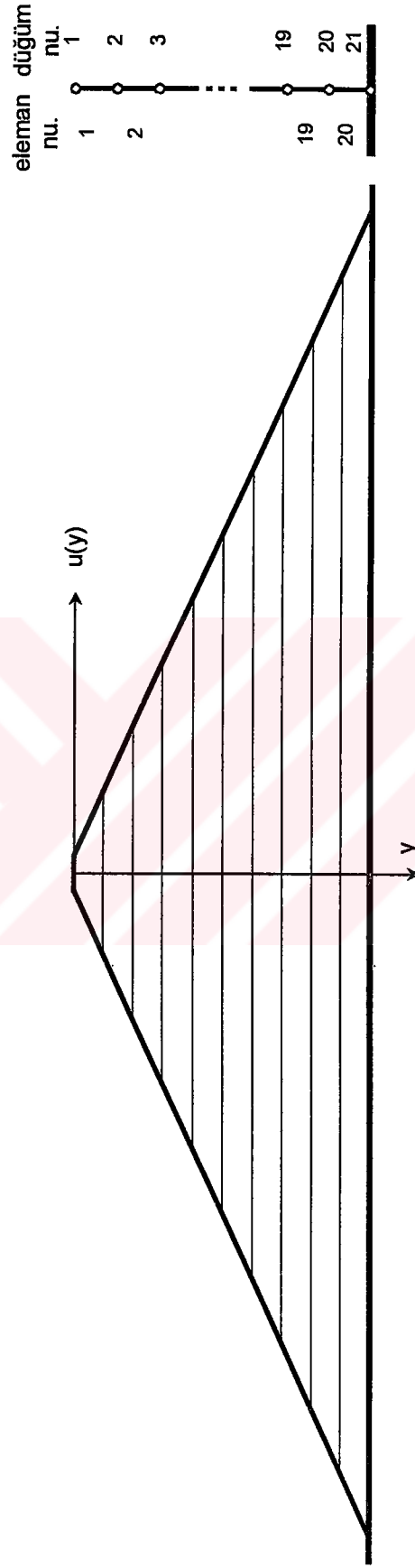


Şekil 6.4 Erzincan Depremi (13 Mart 1992) düzeltilmiş doğu-batı, kuzey-güney ve düşey ivme bileşeni

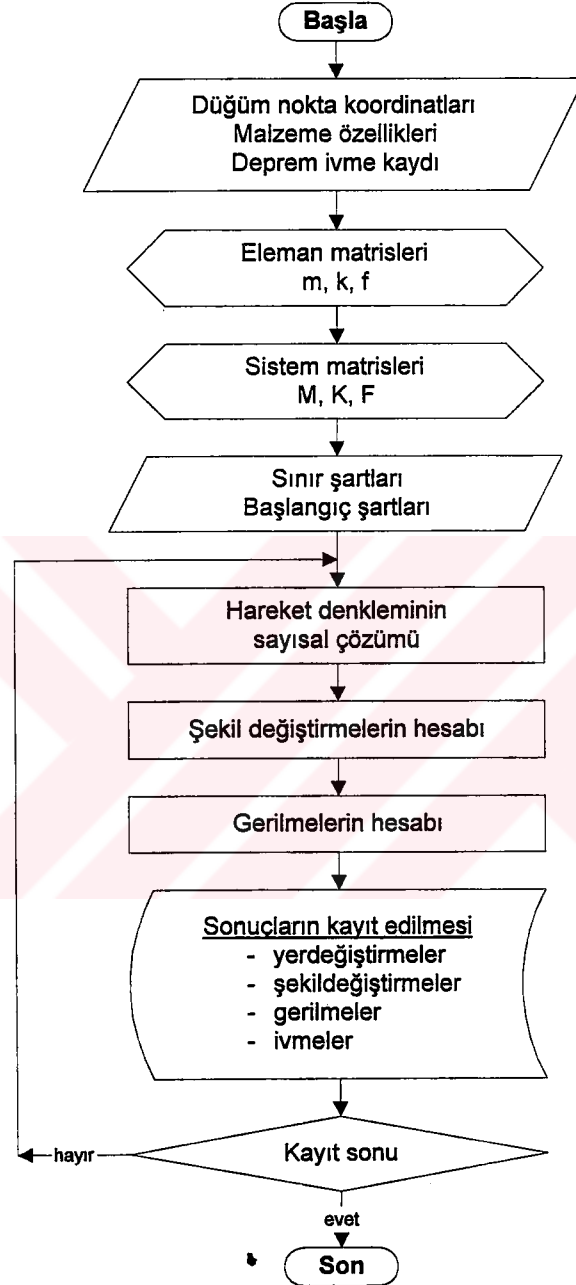
6.4 BİR BOYUTLU SONLU ELEMAN MODELİ

Bir boyutlu sonlu eleman modelinde baraj gövdesi, bir boyutlu kayma kirişi olarak modellenmiştir. Bu modelde baraj, Bölüm 3.2’de anlatıldığı gibi değişken kesitli bir boyutlu sonlu elemanlarla temsil edilir. Baraj gövdesi sonlu eleman ağı, eleman numaraları ve düğüm nokta numaraları Şekil 6.5’de verilen 20 sonlu eleman ile kurulmuştur. Eleman düğüm nokta koordinatları Tablo 6.5’de verilmiştir. Bu modelde baraj gövdesi, kesitini oluşturan bölgelerin alanları ile orantılı olarak hesaplanan tek bölgeci bir kesite dönüştürülmüştür. Birim hacim ağırlığı için $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ sabit değeri ve başlangıç kayma modülü için $G_0 = 280 \text{ MPa}$ değeri belirlenmiştir. Eleman içinde sabit kabul edilen kayma modülü, elemanın bulunduğu konuma bağlı olarak değişmektedir. Kayma modülünün baraj yüksekliğince değişimi için Bölüm 3.1’de Denklem 3.1 ile verilen $l/m = 1/3$ değeri kullanılmıştır.

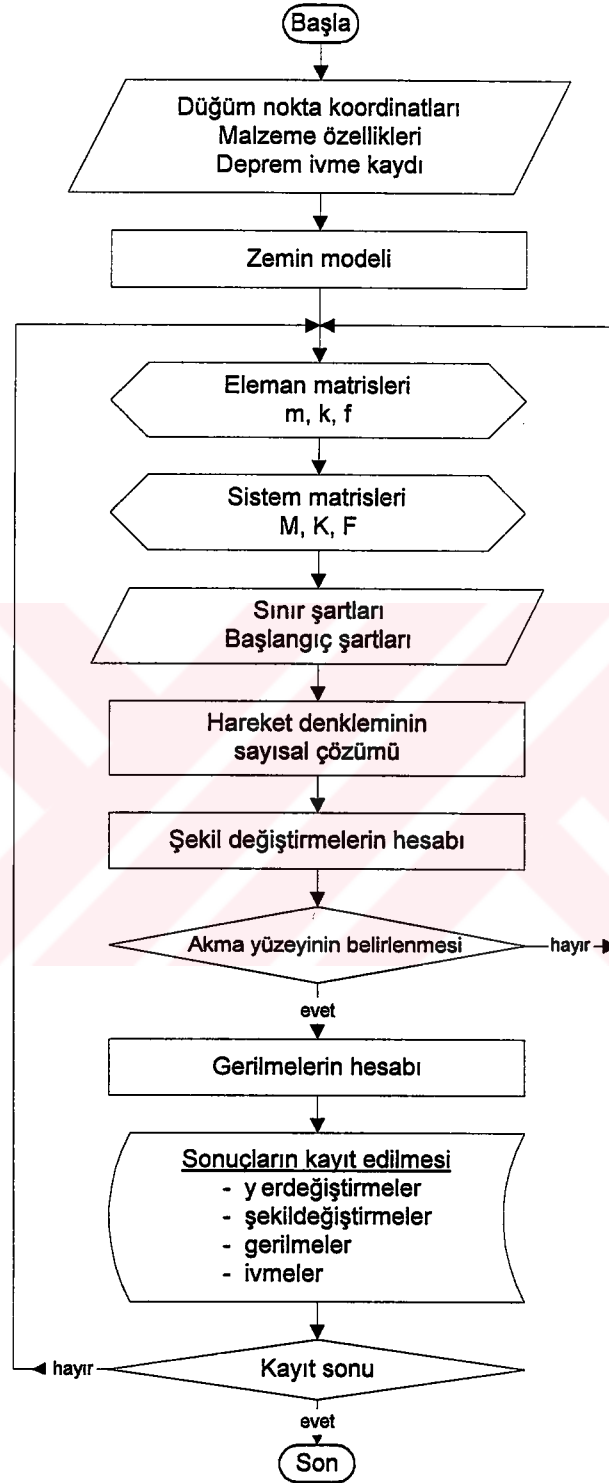
Sayısal çözümler, fortran 77 programlama dilinde geliştirilen bir bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir. Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile çözümlerin yapıldığı doğrusal elastik analizler için akış diyagramı Şekil 6.6’da, çevrimsel, elastoplastik malzeme davranışı kabulü ile çözümlerin yapıldığı doğrusal olmayan analizler için akış diyagramı Şekil 6.7’de verilmiştir. Bu programlar, sonlu eleman sayısı, düğüm nokta sayısı, düğüm nokta koordinatları, eleman düğüm nokta numaraları, sınır ve başlangıç şartları, herbir eleman için başlangıç kayma modülü, birim hacim ağırlığı, poisson oranı ve hiperbolik fonksiyonu belirleyen referans birim şekil değiştirme değeri, yer hareketinin süresi, zaman aralığı ve yer hareketi ivme değerleri gibi problemin giriş bilgilerini bir veri dosyasından alır. Bölüm 3.2’de anlatıldığı gibi, Şekil 6.6 veya Şekil 6.7’de verilen akış diyagramlarındaki adımlar izlenerek eleman matrisleri elde edilir, herbiri sonlu eleman ağındaki numaralama gözönünde bulundurularak birleştirilir ve sınır şartları uygulanarak sistem hareket denklemini oluşturan matrisler elde edilir. Bölüm 5.2’de anlatıldığı gibi hareket denkleminin sayısal çözümü doğrusal ivme değişimi yöntemi ile yapılarak yerdeğiştirmelerin, şekil değiştirmelerin, gerilmelerin ve ivmelerin zamanla değişimleri ayrı ayrı sonuç dosyalarına kayıt edilir. Daha sonra bir grafik görüntüleme programı yardımı ile bu değerlerin zamanla değişimleri ve birbirlerine bağlı değişimleri görüntülenir.



Şekil 6.5 1B sonlu eleman çözümlerde kullanılan sonlu eleman ağı, eleman numaraları ve düğüm nokta numaraları (Tabakaların malzeme katsayıları, kesiti oluşturan bölgelerin alanlarının bir ağırlıklı ortalamasından belirlenmiştir)



Şekil 6.6 Doğrusal elastik analizlerde kullanılan sonlu eleman programı için akış diyagramı



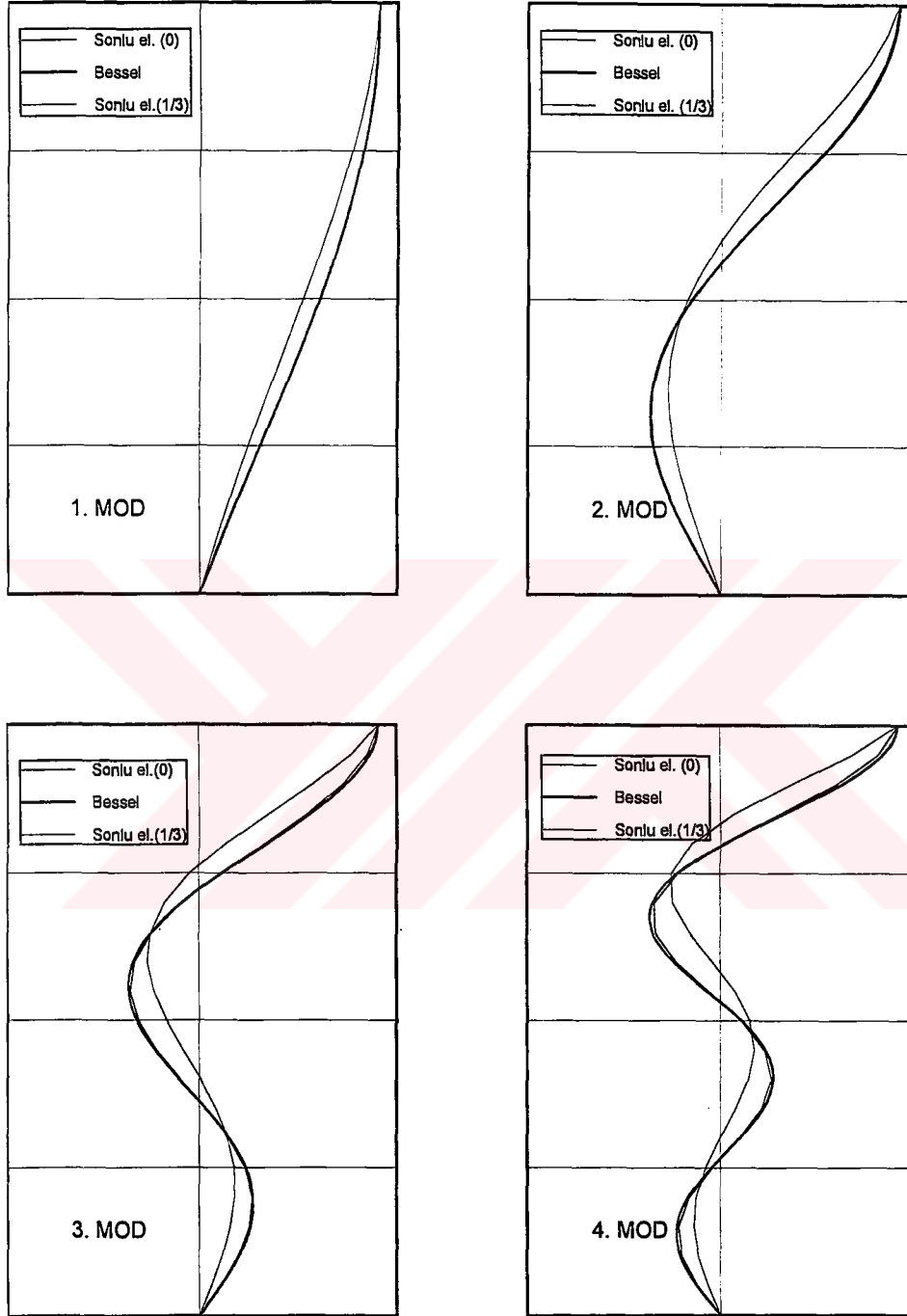
Şekil 6.7 Doğrusal olmayan analizlerde kullanılan sonlu eleman programı için akış diyagramı

Tablo 6.5 Bir boyutlu sonlu eleman modelinde kullanılan eleman düğüm nokta koordinatları

Düğüm numarası	Koordinat y (m)	Düğüm numarası	Koordinat y (m)
1	0.0	12	94.60
2	8.60	13	103.20
3	17.20	14	11.80
4	25.80	15	120.40
5	34.40	16	129.00
6	43.00	17	137.60
7	51.60	18	146.20
8	60.20	19	154.80
9	68.80	20	163.40
10	77.40	21	172.00
11	86.00		

Yapının sönümsüz serbest titreşim frekanslarını ve modlarını belirleyen Denklem 3.28'in sayısal çözümü, İTÜ-EHBE algoritma grubu tarafından hazırlanan, DO2AEF isimli alt program kullanılarak yapılmıştır. Bu program sönümsüz sistemlerin $[A - \lambda B]\{x\} = \{0\}$ şeklindeki matris özdeğer problemini çözer. Barajın ilk dört sönümsüz doğal titreşim frekansı Tablo 6.6.a'da, mod biçimleri Şekil 6.8'de verilmiştir.

Bunun yanında, bir karşılaştırma yapmak amacıyla sistemin serbest titreşim periyotları ve mod biçimleri Bessel fonksiyonları yardımıyla da hesaplanmıştır. Bu hesaplarda, baraj yüksekliğince sabit kayma modülü ve üçgen kesitli boş barajın açısal frekanslarını veren $\omega_i = \frac{\beta_i}{H} \left(\frac{G}{\rho}\right)^{0.5}$ bağıntısı ile, $\beta_1=2.4048$, $\beta_2=5.5201$, $\beta_3=8.6537$, $\beta_4=11.7915$ kökleri kullanılmıştır [60, s.188]. Bağlı olarak serbest titreşim periyotları belirlenerek Tablo 6.6.b'de verilmiştir. Tablo 6.6.b'nin incelenmesinden verilen sonlu eleman çözümleri ile Bessel fonksiyonu çözümleri arasında çok küçük farkların olduğu görülmektedir. Her iki çözüme ait mod biçimleri de Şekil 6.8'de verilmekle birlikte değerlerinin hemen hemen aynı olmasından dolayı bir fark görülmemektedir.



Şekil 6.8 Bir boyutlu sonlu eleman modeli ($l/m=0$ ve $l/m=1/3$ değerleri için) ile Bessel fonksiyonları kullanılarak elde edilen mod biçimlerinin karşılaştırılması

Tablo 6.6.a 1B sonlu eleman modelinden hesaplanan sönümsüz serbest titreşim frekansları (1/s) ve periyotları (s)

Mod	Frekans (1/s)	Periyot (s)	Periyot [63] (s)
1	0.762	1.312	1.30
2	1.644	0.608	-
3	2.538	0.394	-
4	3.446	0.290	-

Tablo 6.6.b 1B sonlu eleman çözümleri ile Bessel Fonksiyonları çözümlerinden elde edilen serbest titreşim periyotları (s)

Mod	Periyot (s) Bessel Fonk.	Periyot (s) $G = G_0$	Periyot (s) $G = G_0 \left(\frac{\gamma}{H}\right)^{0.33}$
1	1.231	1.231	1.312
2	0.536	0.535	0.608
3	0.342	0.340	0.394
4	0.251	0.248	0.290

Yapının sönümü için kütle ve rijitlik matrisi ile orantılı bir viskoz sönüm kullanılmıştır. Sönüm matrisi katsayıları, 3.26 denklemlerinde verildiği gibi, birinci titreşim modunda % 15, ikinci titreşim modunda % 20 sönüm oranı kabul edilerek $a_1 = 0.698896$ ve $a_2 = 0.032169$ şeklinde hesaplanmıştır.

Bir boyutlu kayma kirişi olarak modellenen yapıya, 13 Mart 1992 Erzincan depremi düzeltilmiş D-B ivme bileşeni dış yük olarak uygulanmıştır. En büyük ivme değeri 0.3g olan, $\Delta t = 0.01$ saniye aralıklarla kaydedilen depremin kullanılan ilk 20 saniyelik ivme kaydı Şekil 6.4'de verilmiştir. Çözümlerde yer hareketinin baraj eksenine dik geldiği kabul edilmiştir. Denklem 3.27'nin sayısal çözümü, Bölüm 5.1'de anlatıldığı gibi adım adım integrasyon tekniği kullanılarak, Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi ile yapılmıştır. Doğrusal elastik analizlerde $\Delta t = 0.01$ saniyelik, elasto-plastik analizlerde ise $\Delta t = 0.002$ saniyelik zaman adımları kullanılarak sayısal çözümler elde edilmiştir.

Baraj malzemesi olarak zeminin elasto-plastik davranışı için, Bölüm 4'de açıklanan ve zemin dinamiğinde yaygın bir şekilde kullanılan hiperbolik zemin modeli kullanılmıştır. Bu modelde kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasında

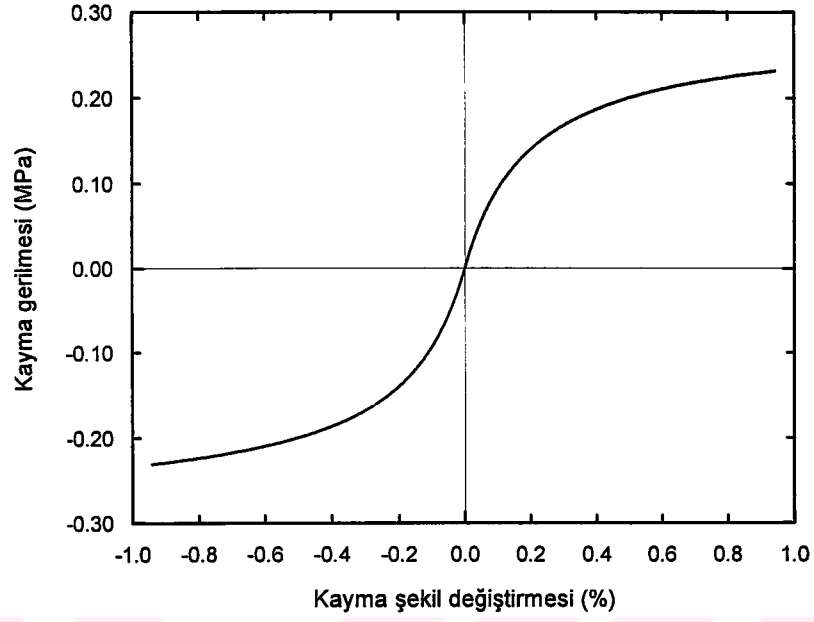
Denklem 4.18 ile verilen, doğrusal olmayan çevrimsel bir bağıntının bulunduğu kabul edilir. Temel davranış eğrisi olarak adlandırılan bu iskelet eğrisinin değişimi Şekil 6.9'da verilmiştir. Verilen 1B çözümlerde, doğrusal olmayan davranışı temsil eden referans şekil değiştirmesi için $\gamma_r = 0.002$ sabit değeri belirlenmiştir. Bu değer değişken kabul edilebilirse de, burada, sayısal değerinin belirlenmesindeki güçlüklerden dolayı sabit kabul edilmiştir. Denklem 4.20 ile verilen elasto-plastik kayma modülünün (G/G_{max}) kayma şekil değiştirmesi ile değişimi Şekil 6.10'da verilmiştir.

Sayısal çözümlerde, doğrusal elastik ve elasto-plastik malzeme davranışları için depremin ilk 20 saniyesinde barajın H tepe noktasında, $3H/4$, $H/2$ ve $H/4$ yüksekliklerinde meydana gelen yerdeğiştirme, şekildeğiştirme, gerilme ve ivmelerin zamanla değişimleri hesaplanmıştır.

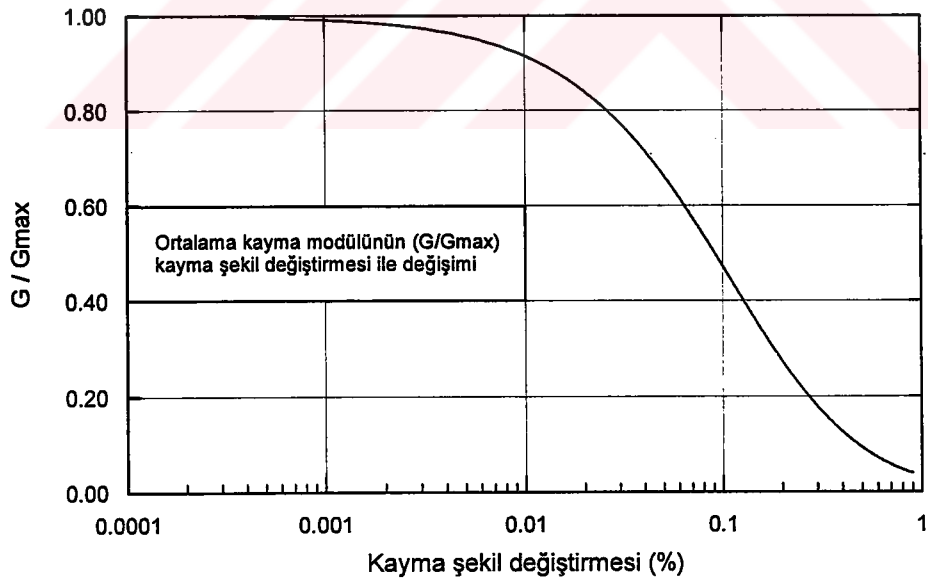
Doğrusal elastik davranışa ait, baraj gövdesinin 172.0, 129.0, 86.0 ve 43.0 m. yüksekliklerindeki düğüm noktalarında meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 6.11'de, 133.3, 90.3, 47.3 ve 4.3 metrelerdeki elemanlarda meydana gelen kayma gerilmelerinin zamanla değişimi Şekil 6.12'de verilmiştir. Elasto-plastik davranış için de yine aynı düğüm noktalarında yerdeğiştirme, elemanlarda kayma gerilmeleri benzer şekilde elde edilmiştir. Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 6.13'de, kayma gerilmelerinin zamanla değişimi de Şekil 6.14'de gösterilmiştir.

Beklendiği gibi yerdeğiştirmeler baraj kretine doğru artarken, gerilmeler azalmaktadır. Yerdeğiştirmelerin oldukça düzgün değişimine karşılık, gerilmelerin yerdeğiştirmelerin türevi ile ilişkili olmaları nedeniyle, ayrıca doğrusal olmayan davranışta farklı boşaltma eğrileri izlendiği için düzensiz bir gerilme değişimi gözlenmektedir.

Şekil 6.11'in incelenmesinden deprem hareketinin oluşturduğu yerdeğiştirmelerde birinci modun katkısının önemli olarak ortaya çıktığı, bazı yerdeğiştirme salınımlarında hareketin birinci periyodu olan 1.31 s'ye yakın periyotlu salınımların belirlediği görülmektedir. Şeklin daha dikkatli incelenmesinden birinci modun üzerine gelen ikinci mod katkısının da yerdeğiştirmenin belirli bölümlerinde ortaya



Şekil 6.9 1B sonlu eleman modelinde kullanılan, baraj malzemesinin elasto-plastik davranışını belirleyen iskelet eğrisi ($\gamma_r=0.002$)



Şekil 6.10 1B sonlu eleman modelinde kullanılan, baraj malzemesi kayma modülünün kayma şekil değişimi ile değişimi ($\gamma_r=0.002$)

çıkan periyodu 0.61 s civarında bulunan salınımlarla gözlenmektedir. Bu durum elastik çözümün her eğrisinde görülmemesi, birinci ve ikinci modun değişik bir suretle üst üste gelmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca küçük olduğu tahmin edilen üçüncü ve diğer modların katkısı da salınımları daha karmaşık hale getirmektedir.

Şekil 6.11 ile Şekil 6.13'ün karşılaştırılmasından elasto-plastik davranışta sistem daha yumuşadığından yerdeğiştirmelerin önemli ölçüde arttığı (yaklaşık 1.70 kat), Şekil 6.12 ile Şekil 6.14'ün karşılaştırılmasından da gerilmelerin azaldığı (yaklaşık 1.33 kat) görülmektedir.

Elasto-plastik yerdeğiştirme ve gerilmelerin zamana bağlı değişimlerinin Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'den incelenmesinden, yerdeğiştirmelerde yaklaşık 3.43 s civarında bulunan salınımlar görülmekte ancak, davranışın doğrusal olmaması nedeniyle serbest titreşim modlarından bahis edilememektedir. Ancak, doğrusal olmayan davranışın etkisiyle yerdeğiştirme salınımlarının uzadığı ve yükleme ve boşaltma davranışının farklı olması nedeniyle kayma gerilmelerinin zamana bağlı değişiminin karmaşık duruma geldiği görülmektedir.

Doğrusal elastik ve elasto-plastik malzeme davranışından deprem süresince elde edilen yerdeğiştirme, şekil değiştirme ve gerilmelerin baraj yüksekliğince oluşan en büyük mutlak değerleri de karşılaştırmalı olarak Şekil 6.15'de sunulmuştur.

Her iki davranışa ait yerdeğiştirme, gerilme ve şekil değiştirmeler incelendiğinde doğrusal elastik davranışta oldukça düzgün değişime karşılık elasto-plastik davranışta ani değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Bu davranış, zorlanan kesitlerde akmaların meydana gelmesi ve sürekli rijitlik azalmasından meydana gelmektedir. Yükleme ve boşaltmada farklı rijitliğin ortaya çıkması da değişimin karmaşık olmasında etkili olmaktadır. Şekil 6.15'in incelenmesinden, elasto-plastik davranışta en büyük kayma gerilmesi ve en büyük şekil değiştirmelerin baraj gövdesinin alt üçte birlik kısımda meydana geldiği görülür.

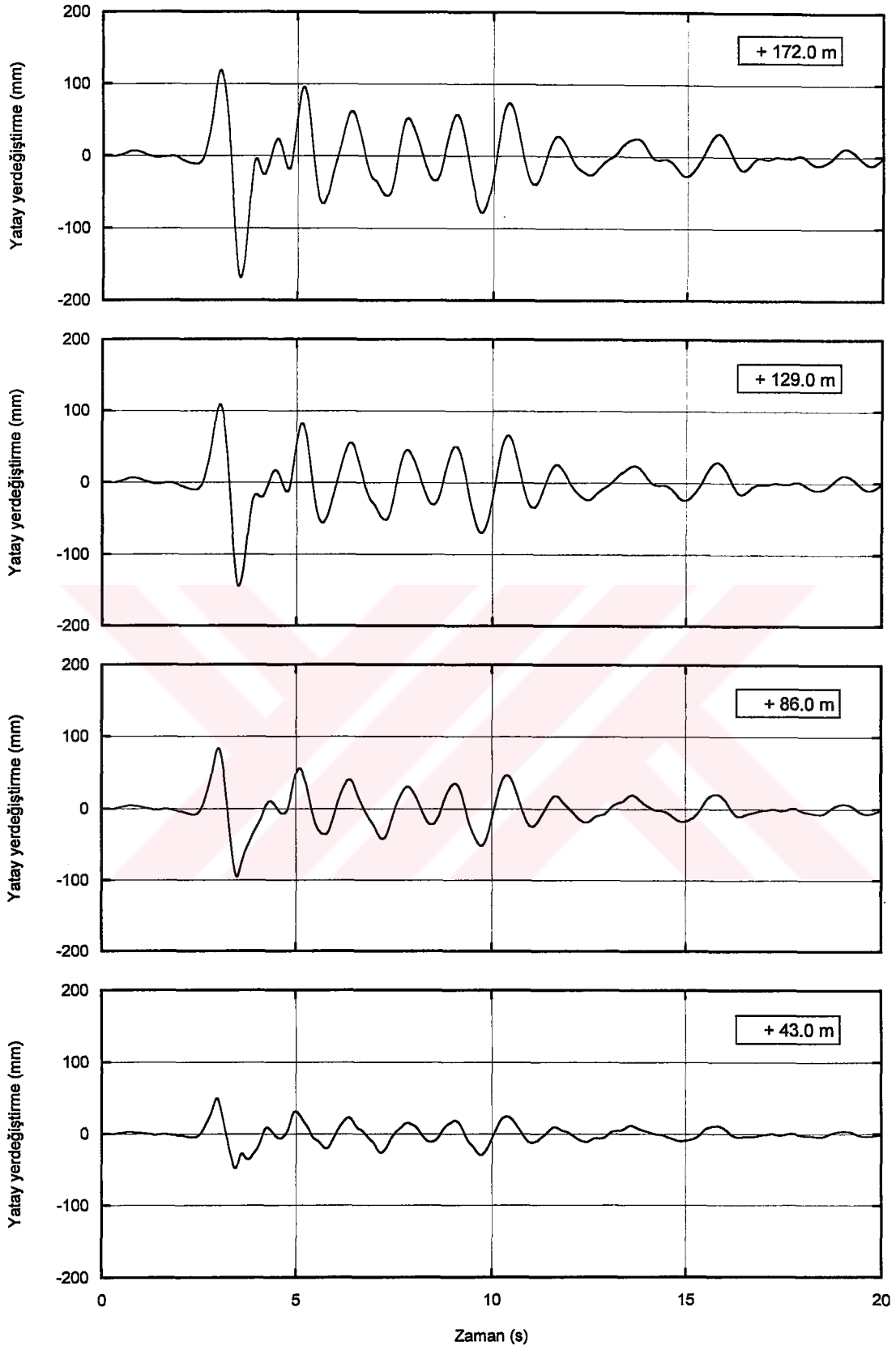
Atalet kuvvetleri nedeniyle barajın en alt kesitlerinde en büyük zorlamaların meydana gelmesi beklenebilir. Ancak bu kesitlerde taban kesit alanının üst kesitlere

göre büyük olması ve kayma modülü G nin baraj yüksekliğince değişmesi yanında referans şekil değiştirmesi γ_r nin sabit kabul edilmesi en çok zorlanan kesitin daha yukarıda meydana gelmesine sebep olmaktadır. En büyük kayma gerilmelerinin meydana geldiği kesit, elastik davranışta baraj yüksekliğinin $1/2$ sinde, elasto-plastik davranışta ise baraj yüksekliğinin yaklaşık $1/3$ ünde ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçların [24]'de verilen sonuçlarla uyumlu olduğu gözlenmektedir.

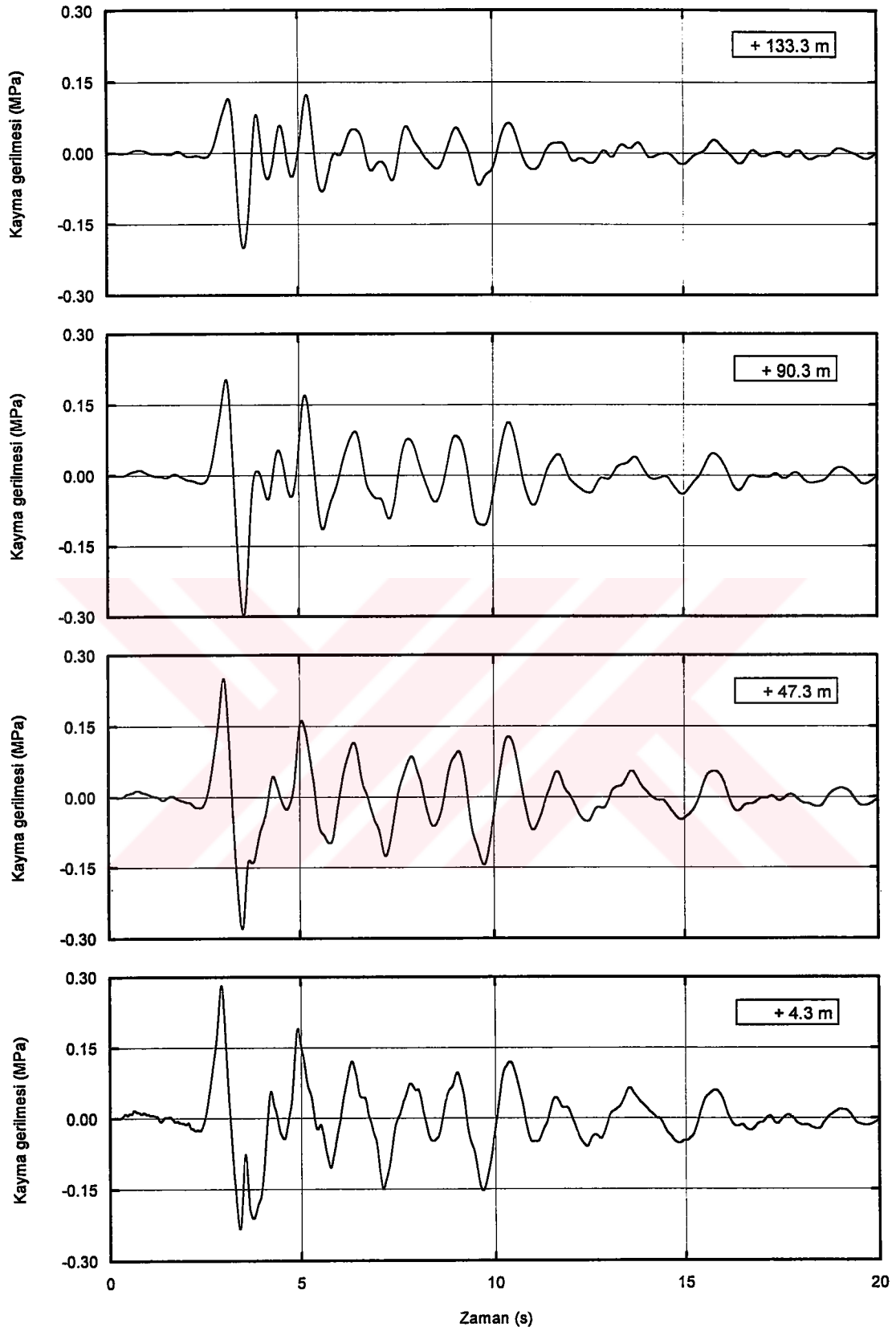
Elasto-plastik davranışa ait değişik tabakalardaki kayma gerilmeleri ile kayma şekil değiştirmelerinin birbirlerine olan bağlılığının zaman içindeki izi Şekil 6.16'da verilmektedir. Burada çevrimsel davranış açıkça görülmektedir. Elasto-plastik şekil değiştirme durumunda, kayma gerilmelerinde, deprem hareketinin özelliğinden dolayı belirgin yükleme ve boşaltmalar yanında küçük boşaltma ve yüklemelerinde meydana geldiği görülmektedir.

Geniş ve açık beliren çevrimle sönüm de artmaktadır. Viskoz sönüm, hız ile orantılı olduğu halde, çevrimsel davranıştan ortaya çıkan sönüm şekil değiştirme ile orantılıdır. Barajın üst tabakalarında küçük şekil değiştirmeler ve büyük hızlar ortaya çıktığından viskoz sönüm etkili olurken alt tabakalarda ise tersine çevrimsel davranıştan ortaya çıkan sönüm etkili olmaktadır. Şekil 6.16'da görüldüğü gibi barajın üst tabakalarında malzemedeki şekil değiştirmeler küçük kaldığı için plastik davranış daha az etkili olmakta ve dinamik davranış küçük ve kapalıya yakın çevrimlerde gerçekleşmektedir.

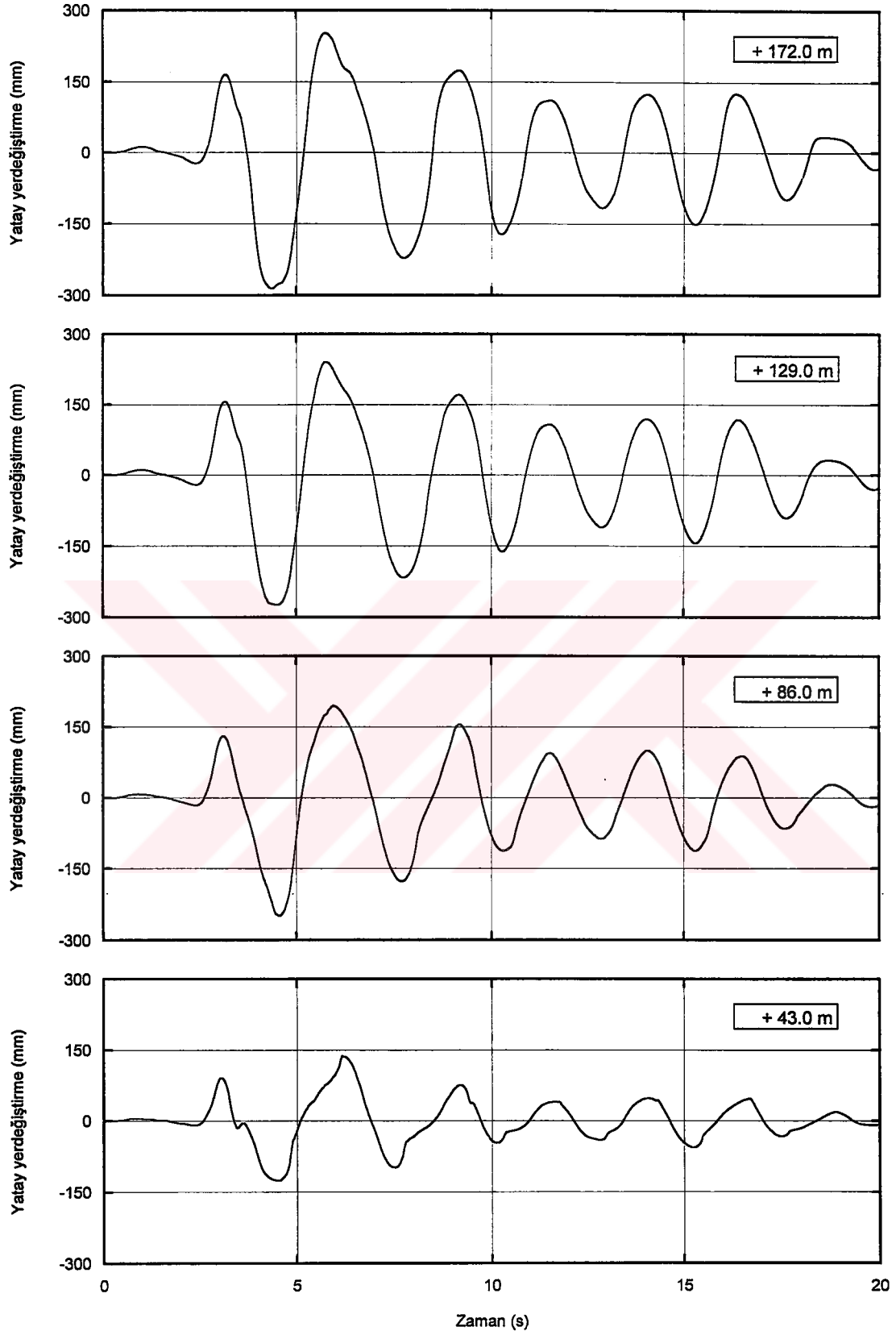
Doğrusal elastik ve elasto-plastik davranışa ait ivmelerin de zamanla değişimi belirlenerek sırası ile Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de verilmiştir. Değişimler, baraj tepe noktasında (172.0 m), orta noktasında (86.0 m) ve baraj tabanında (0.0 m) elde edilmiştir. İvmeler baraj tabanına göre, doğrusal elastik davranışta yaklaşık 2.7 kat, elasto-plastik davranışta ise yaklaşık 1.3 kat artmaktadır. Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'in incelenmesinden elastik davranışta, baraj tepe noktasında elde edilen ivme değerlerinin elasto-plastik davranışa göre yaklaşık 2.0 kat daha büyük olduğu görülmektedir. Diğer bir ifade ile baraj tabanından gelen yer hareketi elastik davranışta elasto-plastik davranışa göre iki kat daha fazla artarak baraj tepe noktasına ulaşmaktadır.



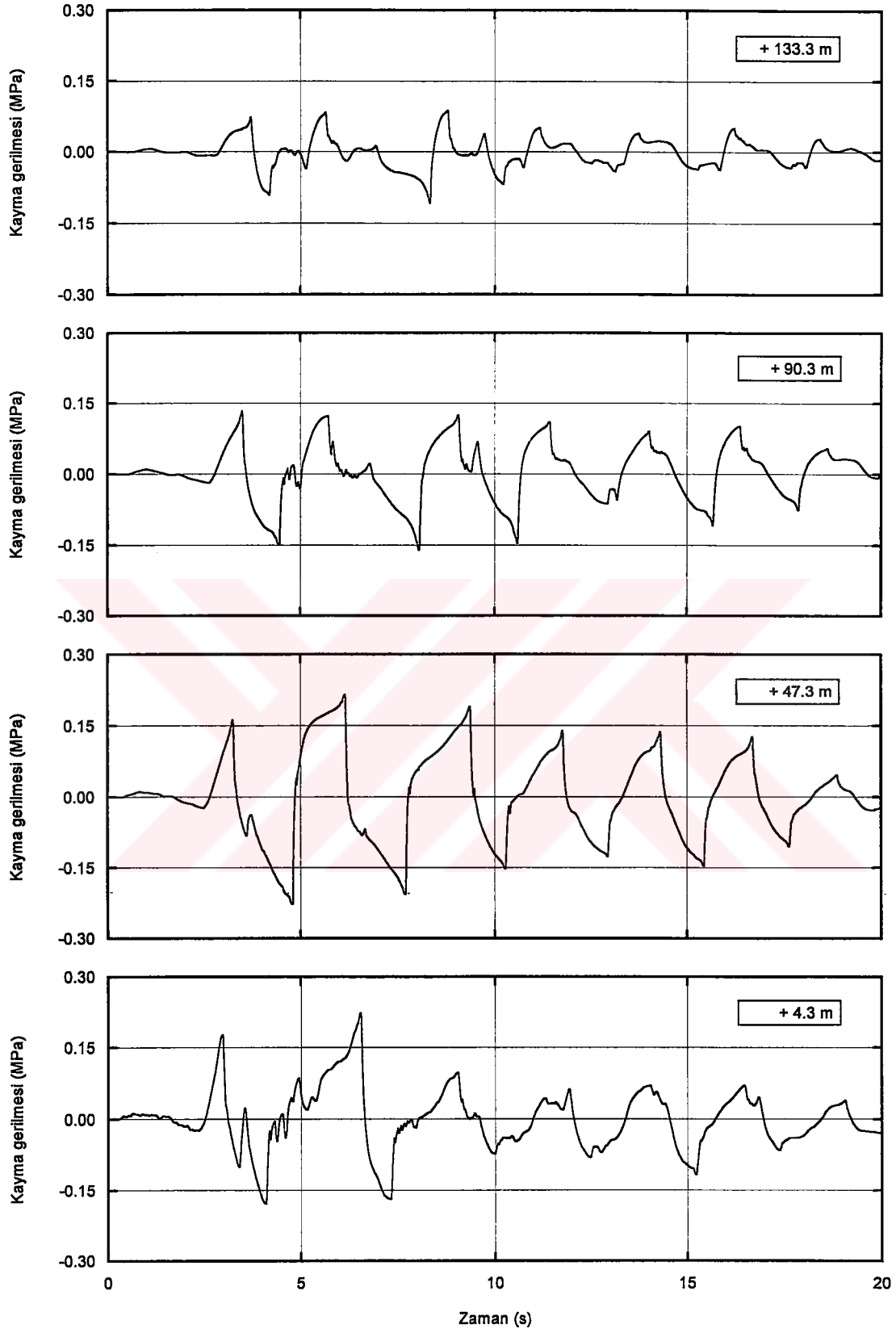
Şekil 6.11 Doğrusal elastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +172.0 m, +129.0 m, +86.0 m ve +43.0 m yüksekliklerdeki yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



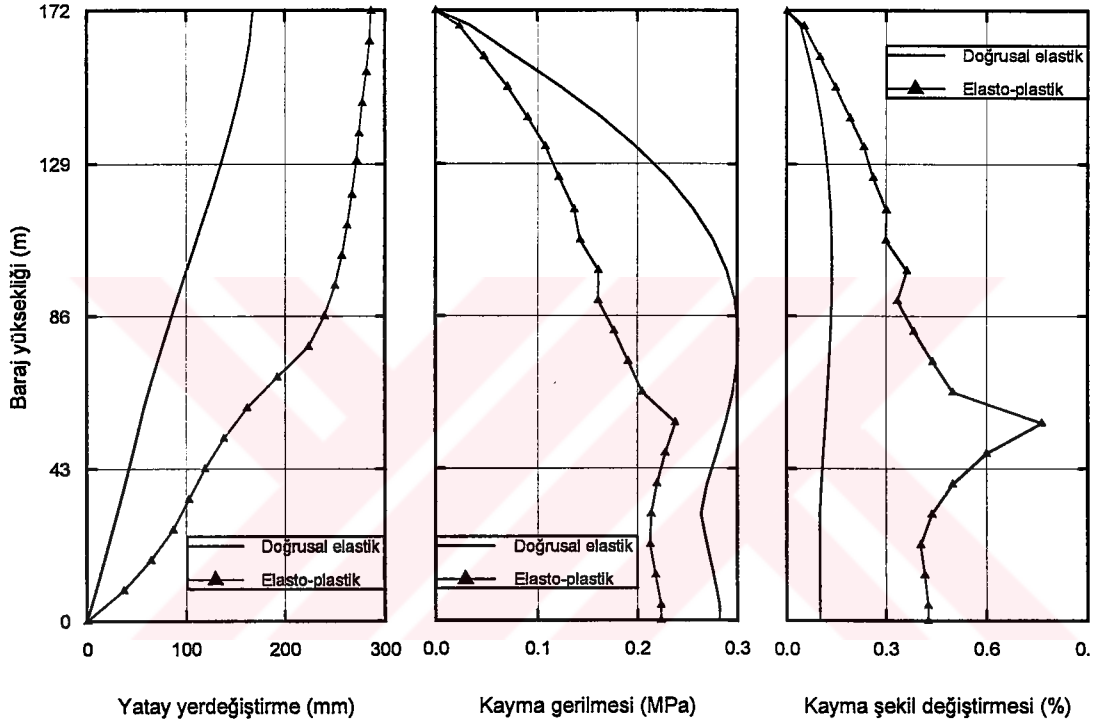
Şekil 6.12 Doğrusal elastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +133.3 m, +90.3 m, +47.3 m ve +4.3 m yüksekliklerdeki kayma gerilmelerinin zamanla değişimi



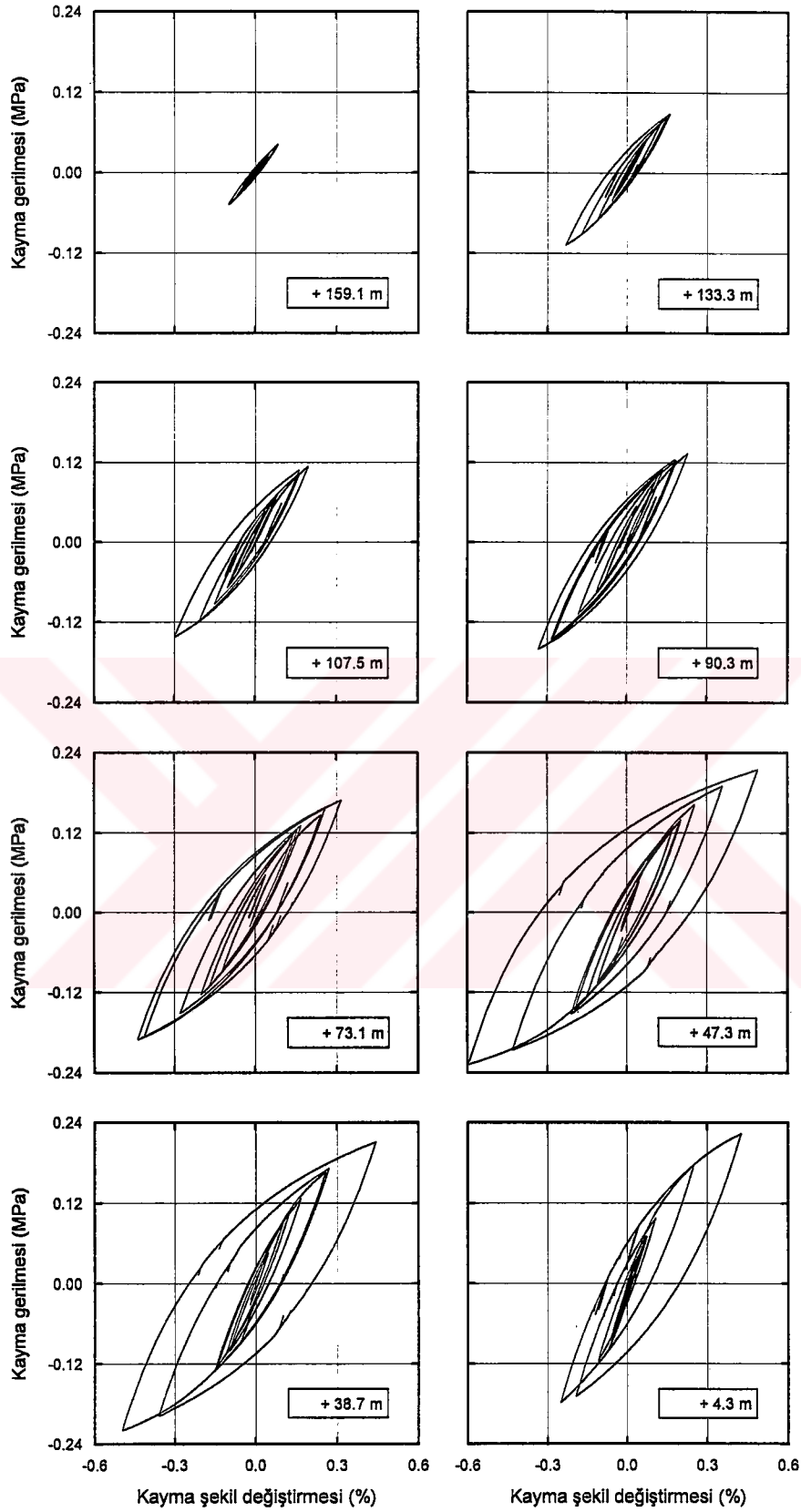
Şekil 6.13 Elasto-plastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +172.0 m, +129.0 m, +86.0 m ve +43.0 m yüksekliklerdeki yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



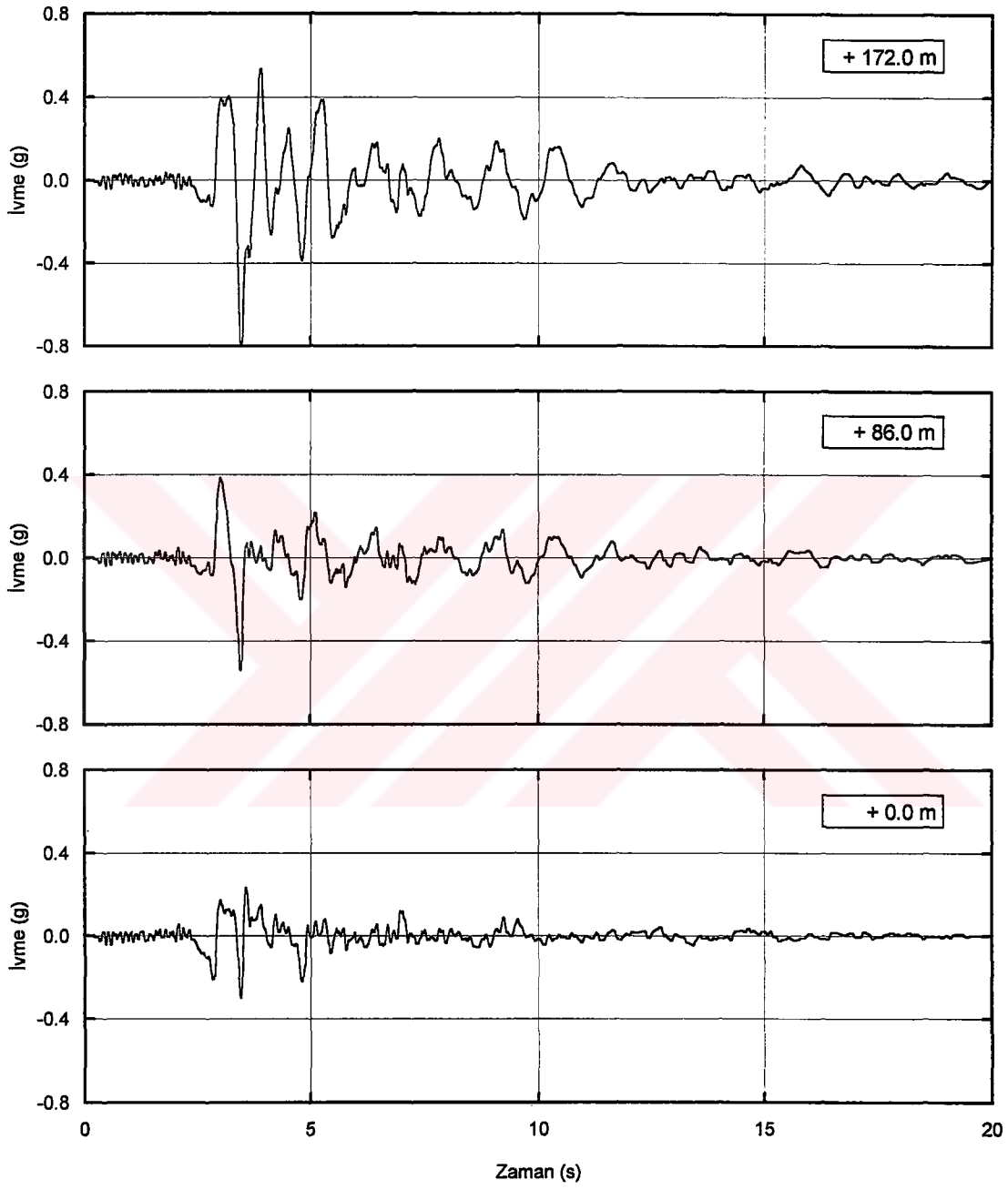
Şekil 6.14 Elasto-plastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +133.3 m, +90.3 m, +47.3 m ve +4.3 m yüksekliklerdeki kayma gerilmelerinin zamanla değişimi



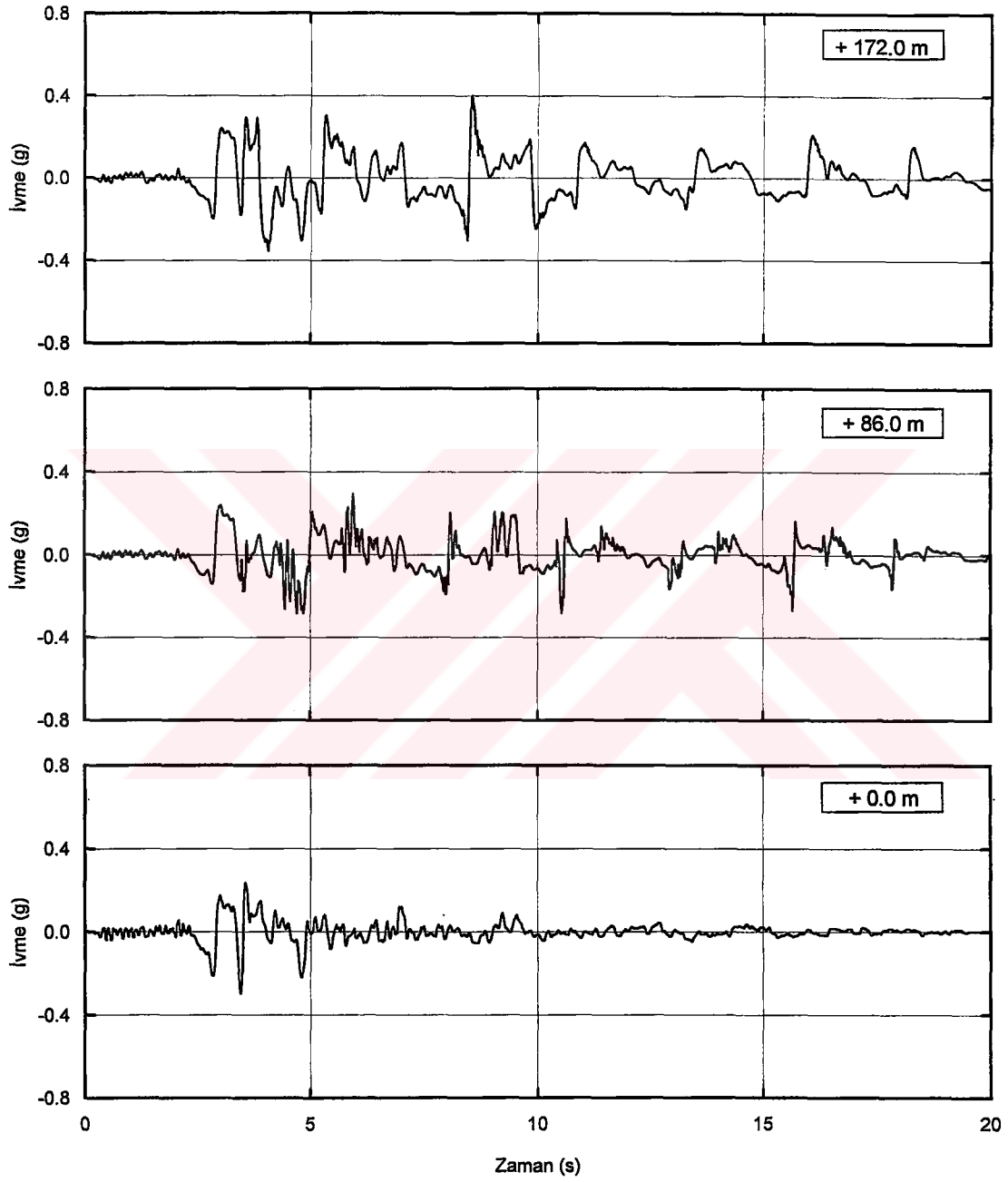
Şekil 6.15 Doğrusal elastik ve elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile 1B eleman çözümlerinden elde edilen en büyük yerdeğiştirme, kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi zarflarının baraj yüksekliğince değişimleri



Şekil 6.16 Elasto-plastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen +159.1 m, +133.3 m, +107.5 m, +90.3 m, +73.1 m, +47.3 m, +38.7 m ve +4.3 m yüksekliklerinde kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirmesinin zamana bağlı izi



Şekil 6.17 Doğrusal elastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen ivme değerlerinin +172.0 m, +86.0 m ve +0.0 m yüksekliklerdeki zamanla değişimi

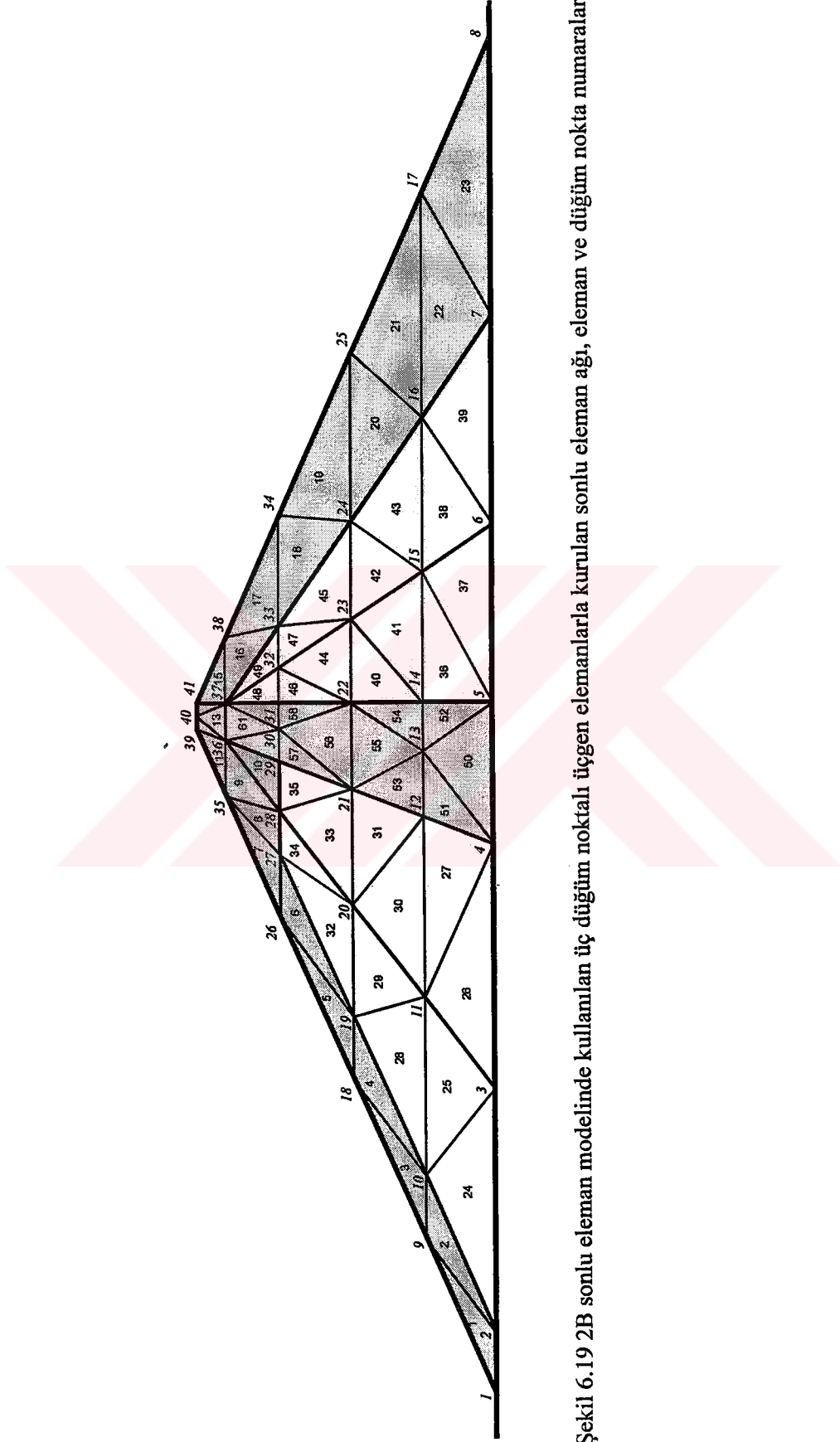


Şekil 6.18 Elasto-plastik davranışta, 1B eleman çözümlerinden elde edilen ivme değerlerinin +172.0 m, +86.0 m ve +0.0 m yüksekliklerdeki zamanla değişimi

6.5 İKİ BOYUTLU SONLU ELEMAN MODELİ

İki boyutlu (2B) sonlu eleman modelinde baraj gövdesi, düzlem şekil değiştirme problemi olarak ele alınmıştır. Bu modelde de bir boyutlu modelde olduğu gibi, Atatürk Barajı'nın doğrusal elastik ve elasto-plastik deprem davranışı incelenmiştir. Sayısal çözümlerde barajın menba-mansab doğrultusunda alınmış Şekil 6.1'de verilen tipik enkesiti kullanılmıştır. Baraj gövdesi bazalt, nehir alüvyonu, plaketli kireç taşı ve kil çekirdek olmak üzere dört ayrı malzemenin kullanıldığı dört ayrı bölgeden oluşmuştur. Baraj gövdesinin menba-mansab doğrultusundaki tipik enkesiti için sonlu eleman ağı, üç düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlarla Şekil 6.19'da verildiği gibi teşkil edilmiştir. Bu modelde baraj enkesiti 41 düğüm noktası ile 61 üçgen sonlu elemana ayrılmıştır. Düğüm nokta koordinatları Tablo 6.7'de, herbir elemanın düğüm nokta numaraları, elastisite modülü (E), birim hacim ağırlığı (γ) ve poisson oranı (ν) gibi malzeme özellikleri de elde edilen bilgiler esas alınarak hesaplanmış ve Tablo 6.8'de verilmiştir.

Sayısal çözümler, fortran 77 programlama dilinde yazılan bir bilgisayar programı yardımı ile yapılmıştır. Doğrusal elastik analizlerin yapıldığı program için akış diyagramı Şekil 6.6'da, elasto-plastik analizlerin yapıldığı program için akış diyagramı da Şekil 6.7'de verilmiştir. Her iki program da problemin giriş bilgilerini bir veri dosyasından alır. Bu bilgiler, sonlu eleman sayısı, düğüm nokta sayısı, düğüm nokta koordinatları, eleman düğüm nokta numaraları, sınır ve başlangıç şartları, her bir eleman için başlangıç elastisite modülü, birim hacim ağırlığı, poisson oranı ve hiperbolik fonksiyonu belirleyen referans birim şekil değiştirme değeri, yer hareketinin süresi, zaman aralığı ve yer hareketi ivme değerleridir. Sistem hareket denklemini oluşturan matrisler, eleman matrislerinin sonlu eleman ağındaki numaralama göz önünde bulundurularak birleştirilmesi ve sınır şartlarının uygulanması ile Bölüm 3.3'de verildiği gibi elde edilir. Denklem 3.59 ile verilen hareket denkleminin sayısal çözümü doğrusal ivme değişimi yöntemi ile Bölüm 5.2'de verildiği gibi yapılarak yerdeğıştirmelerin, şekil değıştirmelerin, gerilmelerin ve ivmelerin zamanla değışimleri elde edilir. Daha sonra bir grafik görüntüleme programı yardımı ile bu değışimlerin zamanla değışimleri ve birbirlerine bağılı değışimleri görüntülenir.



Şekil 6.19 2B sonlu eleman modelinde kullanılan üç düğüm noktalı üçgen elemanlarla kurulan sonlu eleman ağı, eleman ve düğüm nokta numaraları

Tablo 6.7 İki boyutlu sonlu eleman ağında kullanılan düğüm noktaları koordinatları

Düğüm numarası	Koordinatlar	
	X (m)	Y (m)
1	0.0	0.0
2	40.0	0.0
3	183.0	0.0
4	332.0	0.0
5	412.0	0.0
6	500.0	0.0
7	620.0	0.0
8	790.0	0.0
9	92.0	40.0
10	132.0	40.0
11	237.0	40.0
12	347.0	40.0
13	380.0	40.0
14	412.0	40.0
15	477.0	40.0
16	565.0	40.0
17	702.0	40.0
18	184.0	80.0
19	224.0	80.0
20	291.0	80.0
21	362.0	80.0

Düğüm numarası	Koordinatlar	
	X (m)	Y (m)
22	412.0	80.0
23	454.0	80.0
24	511.0	80.0
25	614.0	80.0
26	276.0	120.0
27	316.0	120.0
28	346.0	120.0
29	377.0	120.0
30	395.0	120.0
31	412.0	120.0
32	431.0	120.0
33	456.0	120.0
34	526.0	120.0
35	350.0	152.0
36	389.0	152.0
37	412.0	152.0
38	456.0	152.0
39	396.0	172.0
40	404.0	172.0
41	412.0	172.0

Tablo 6.8 2B çözümlerde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri ve düğüm nokta numaraları

El. No	E. Mod.(MPa)	γ (kN/m ³)	Poisson or.	Düğüm1	Düğüm2	Düğüm3	Bölge
1	375	22.0	0.25	1	2	9	Bazalt
2	375	22.0	0.25	2	10	9	
3	350	22.0	0.25	9	10	18	
4	350	22.0	0.25	10	19	18	
5	325	22.0	0.25	18	19	26	
6	325	22.0	0.25	19	27	26	
7	300	22.0	0.25	26	27	35	
8	400	22.0	0.25	27	28	35	
9	450	22.0	0.25	28	36	35	
10	475	22.0	0.25	28	29	36	
11	500	22.0	0.25	35	36	39	
12	525	22.0	0.25	36	40	39	
13	525	22.0	0.25	36	37	40	
14	525	22.0	0.25	37	41	40	
15	500	22.0	0.25	37	38	41	
16	550	22.0	0.25	33	38	37	
17	600	22.0	0.25	33	34	38	
18	725	22.0	0.25	24	34	33	
19	700	22.0	0.25	24	25	34	
20	1000	22.0	0.25	16	25	24	
21	950	22.0	0.25	16	17	25	
22	1250	22.0	0.25	7	17	16	
23	1000	22.0	0.25	7	8	17	Bazalt
24	560	22.0	0.27	2	3	10	Nehir alüvyonu
25	610	22.0	0.27	3	11	10	
26	760	22.0	0.27	3	4	11	
27	780	22.0	0.27	4	12	11	
28	430	22.0	0.27	10	11	19	
29	430	22.0	0.27	11	20	19	
30	600	22.0	0.27	11	12	20	
31	630	22.0	0.27	12	21	20	
32	380	22.0	0.27	19	20	27	
33	500	22.0	0.27	20	21	28	
34	360	22.0	0.27	20	28	27	
35	500	22.0	0.27	21	29	28	Nehir alüvyonu
36	1000	20.0	0.32	5	15	14	Kireç taşı
37	1100	20.0	0.32	5	6	15	
38	1000	20.0	0.32	6	16	15	
39	900	20.0	0.32	6	7	16	
40	1000	20.0	0.32	14	23	22	
41	1000	20.0	0.32	14	15	23	
42	1000	20.0	0.32	15	24	23	
43	1000	20.0	0.32	15	16	24	
44	850	20.0	0.32	22	23	32	
45	800	20.0	0.32	23	24	33	
46	700	20.0	0.32	22	32	31	
47	700	20.0	0.32	23	33	32	
48	530	20.0	0.32	31	32	37	
49	500	20.0	0.32	32	33	37	Kireç taşı
50	550	20.0	0.39	4	5	13	Kil çekirdek
51	525	20.0	0.39	4	13	12	
52	525	20.0	0.39	5	14	13	
53	450	20.0	0.39	12	13	21	
54	450	20.0	0.39	13	14	22	
55	450	20.0	0.39	13	22	21	
56	425	20.0	0.39	21	22	30	
57	410	20.0	0.39	21	30	29	
58	410	20.0	0.39	22	31	30	
59	325	20.0	0.39	29	30	36	
60	325	20.0	0.39	30	31	37	
61	325	20.0	0.39	30	37	36	Kil çekirdek

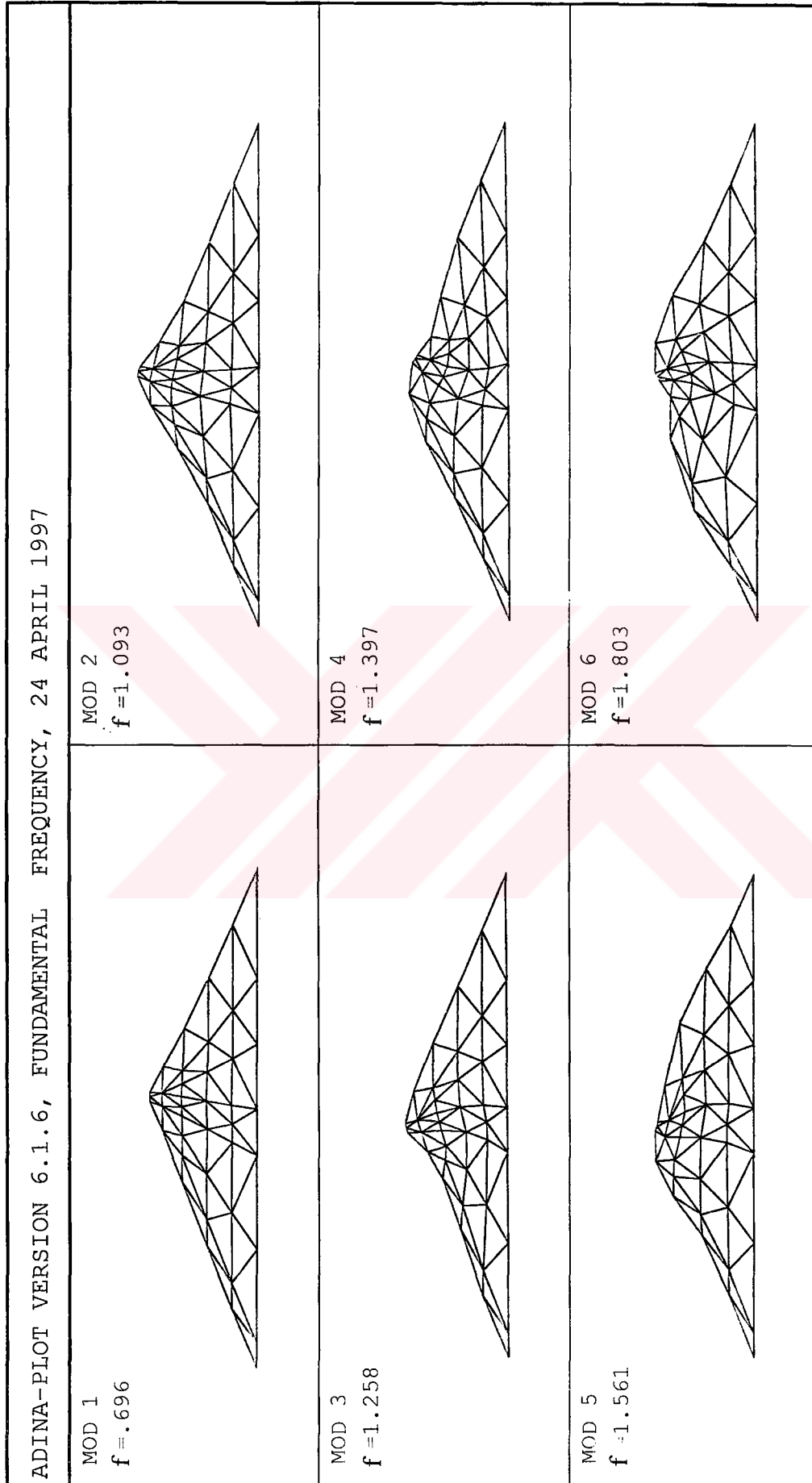
Yapının sönümsüz serbest titreşim frekanslarını belirleyen, Bölüm 6.3’de bahsedilen, 3.60 denkleminin sayısal çözümü ve mod biçimlerinin belirlenmesi İTÜ, EHBE algoritma grubu tarafından hazırlanan, DO2AEF isimli alt program kullanılarak yapılmış ve baraj gövdesinin ilk on iki sönümsüz doğal titreşim frekansı Tablo 6.9’da verilmiştir.

Ayrıca, ADINA [67] programı kullanılarak doğrusal elastik çözümlerden elde edilen yapının ilk on iki serbest titreşim frekansı Tablo 6.9’da ve mod biçimleri Şekil 6.20’de verilmiştir. ADINA programı ile yapılan çözümler TU Berlin, Institut für Grundbau und Baubetrieb, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik’de gerçekleştirilmiştir.

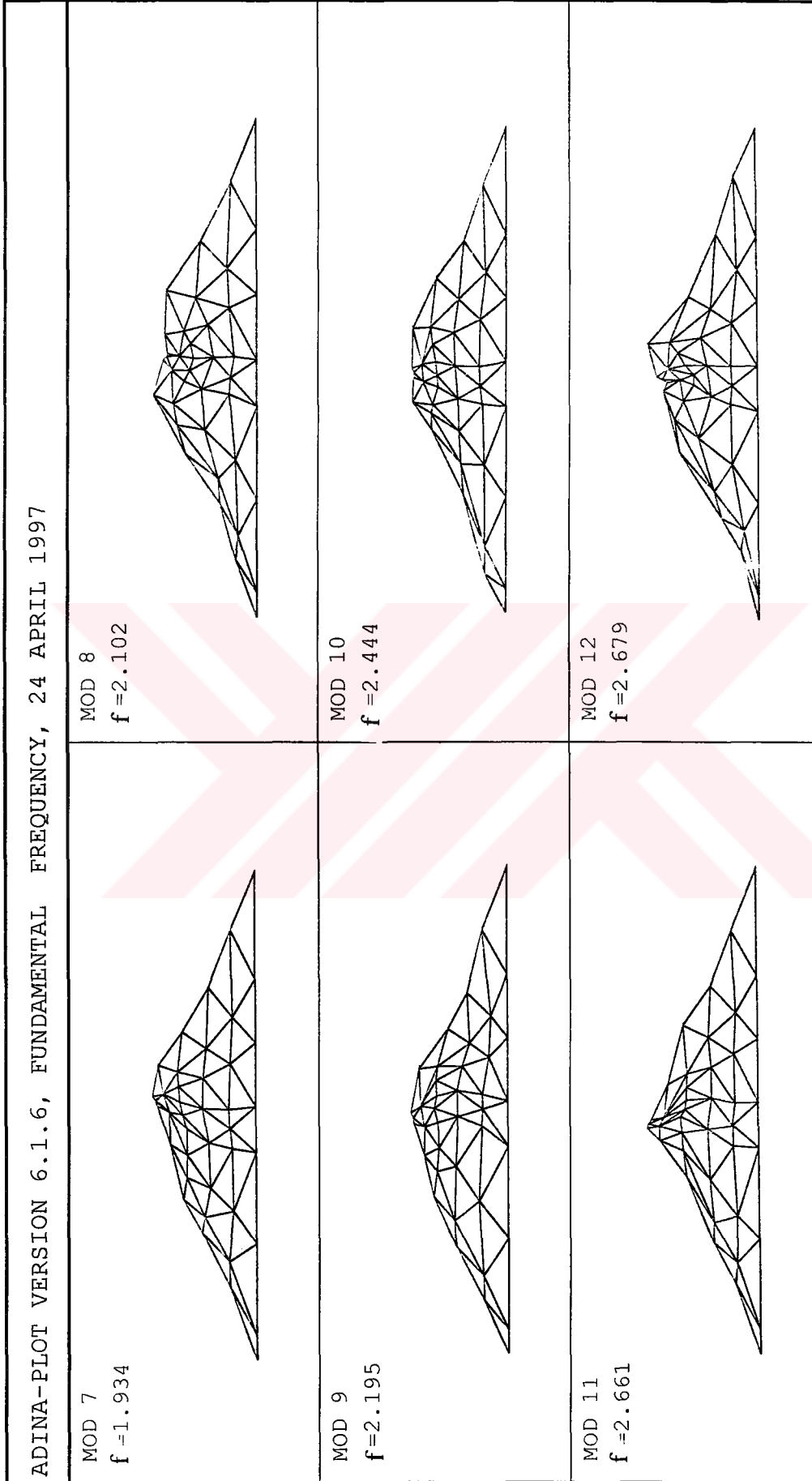
Tablo 6.9 2B modelde sönümsüz serbest titreşim frekansları (1/s) ve periyotları (s)

Mod No	Periyot (s)	Frekans (1/s)	Frekans ADINA
1	1.437	0.696	0.696
2	0.915	1.093	1.093
3	0.795	1.258	1.258
4	0.716	1.398	1.397
5	0.640	1.562	1.561
6	0.554	1.804	1.803
7	0.517	1.934	1.934
8	0.476	2.102	2.102
9	0.455	2.195	2.195
10	0.409	2.445	2.444
11	0.376	2.661	2.661
12	0.373	2.679	2.679

Bir ve iki boyutlu modellerin titreşim periyot ve mod şekillerinin karşılaştırılmasından, belirgin bir şekilde iki boyutlu çözümde birinci modun bir boyutlu modeldeki birinci mod şekline karşı geldiği görülmektedir. $T_{1B}^{(1)} = 1.312$ s ve $T_{2B}^{(1)} = 1.437$ s sonuçları arasındaki farklılığın yatay kesitlerin farklı hareket etmesi sonucu ortaya çıkması yanında bir boyutlu çözümde gözönüne alınan kesit ortalama karakteristik parametrelerinin bir basit yaklaşım olarak belirlenmesi şeklinde yorumlanabilir. İki boyutlu çözümde beklendiği gibi farklı titreşim modları da elde edilmektedir.



Şekil 6.20 ADINA programı kullanılarak elde edilen doğal titreşim frekansları (1/s) ve mod biçimleri



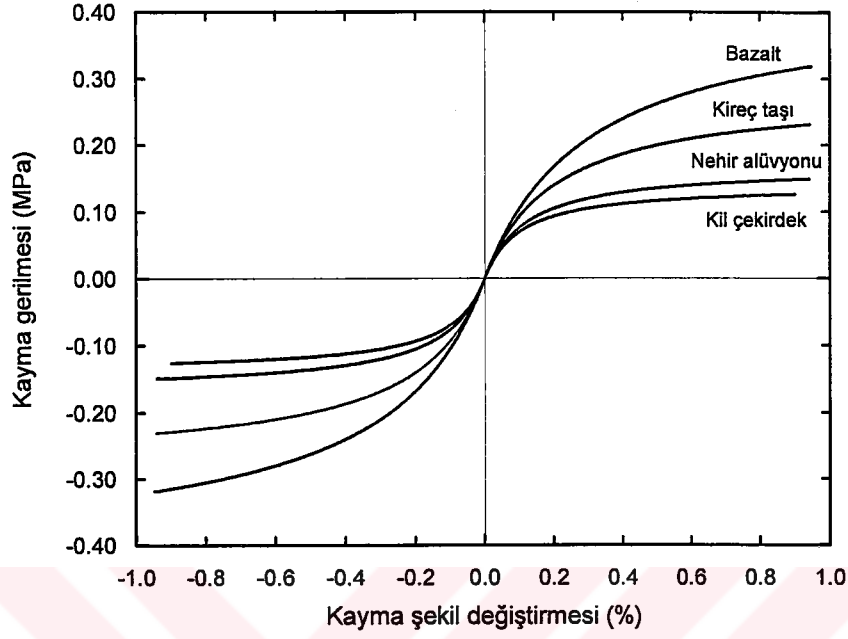
Şekil 6.20 (devam) ADINA programı kullanılarak elde edilen doğal titreşim frekansları (1/s) ve mod biçimleri

Yapının sönümü için kütle ve rijitlik matrisi ile orantılı bir viskoz sönüm kullanılmıştır. Sönüm matrisi katsayıları, 1B çözümlerde izlenilen yöntemle, 3.26 denklemlerinden, birinci titreşim modunda % 15, ikinci titreşim modunda % 20 sönüm kabul edilmesi ile $a_1 = 0.664334$ ve $a_2 = 0.033863$ şeklinde hesaplanmıştır.

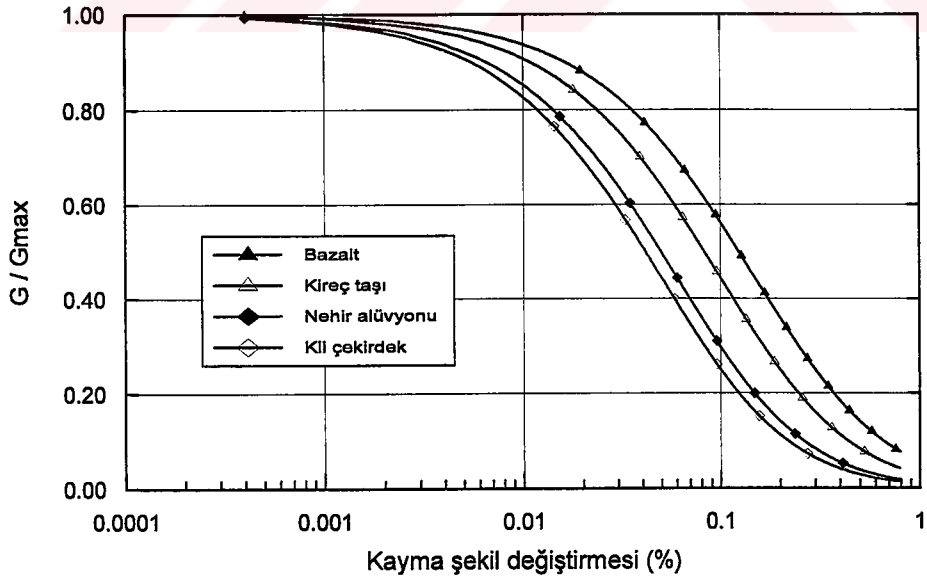
Yapıya dış etki olarak, 13 Mart 1992 Erzincan Depremi'nin düzeltilmiş D-B ivme bileşeni yatay doğrultuda, düzeltilmiş düşey ivme bileşeni de düşey doğrultuda eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Yer hareketinin baraj eksenine dik olarak geldiği kabul edilmiştir. Sayısal çözümlerde kullanılan ilk 20 saniyelik deprem ivme kayıtları Şekil 6.4'de verilmiştir.

Denklem 3.59 ile verilen titreşim denkleminin sayısal çözümü adım adım integrasyon tekniği kullanılarak Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi ile yapılmıştır. Sayısal çözümler, doğrusal elastik analizlerde $\Delta t = 0.01$ saniyelik, elasto-plastik analizlerde $\Delta t = 0.002$ saniyelik zaman adımları kullanılarak elde edilmiştir. Zaman adımlarının seçiminde, deprem kayıtlarının $\Delta t = 0.01$ saniye adım aralığı ile verilmesi yanında, değişik zaman adımları ile yapılan çözümlerin karşılaştırılması etkili olmuştur. Sonuçların grafik olarak verilmesi esas alındığından grafik gösterimi etkilemeyen sayısal yaklaşım seçilmiştir.

Zeminin çevrimsel elasto-plastik davranışı için, hiperbolik zemin modeli kullanılmıştır. Bu modelde kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasında Denklem 4.18'de verilen, doğrusal olmayan çevrimsel bir bağıntının bulunduğu kabul edilir. Verilen 2B sonlu eleman modelinde kullanılan, baraj gövdesini oluşturan malzemelerin elasto-plastik davranışını belirleyen temel davranış eğrilerinin değişimi Şekil 6.21'de, Denklem 4.20 ile verilen elasto-plastik kayma modüllerinin (G/G_{max}) kayma şekil değiştirmeleri ile değişimi Şekil 6.22'de verilmiştir. Bu değişimlerin belirlenmesinde elde edilen malzeme özellikleri etkili olmuştur.



Şekil 6.21 2B sonlu eleman modelinde kullanılan, baraj gövdesini oluşturan malzemelerin elasto-plastik davranışını belirleyen temel davranış eğrileri



Şekil 6.22 2B sonlu eleman modelinde kullanılan, baraj gövdesini oluşturan malzemelerin kayma modüllerinin, kayma şekil değiştirmeleri ile değişimi

Sayısal çözümler, 1B analizlerde olduğu gibi, ayrı ayrı doğrusal elastik ve elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile baraj gövdesinde oluşan yerdeğiştirme, şekildeğiştirme, gerilme ve ivmelerin zamanla değişimleri şeklinde elde edilmiştir.

Doğrusal elastik davranışa ait, baraj gövdesinin değişik yüksekliklerinde seçilen 40, 30, 22 ve 13 numaralı düğüm noktalarının yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 6.23'de, düşey yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi de Şekil 6.24'de verilmiştir. Bu çözümlerin incelenmesinden birinci modun etkisi yaklaşık 1.4 s olan bir salınımın belirgin bir şekilde ortaya çıkmasından görülmektedir. Bu davranışa ait mutlak manada en büyük yatay yerdeğiştirme $t = 3.6$ s de 158 mm, düşey yerdeğiştirme ise $t = 3.6$ s de 44 mm hesaplanmıştır. En büyük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği 3.10, 3.60, 5.10 ve 5.70. saniyelerde baraj gövdesinin bütün düğüm noktalarına ait yatay ve düşey yerdeğiştirmeler belirlenerek Şekil 6.25'de gösterilmiştir.

Yine doğrusal elastik davranışa ait, değişik bölgelerde seçilen 26, 50, 38 ve 22 numaralı elemanlarda kayma gerilmelerinin zamanla değişimi Şekil 6.26'da verilmiştir. Kayma gerilmeleri için de en büyük değerlerin meydana geldiği 2.95, 3.75 ve 5.00 saniyelerde baraj gövdesinin bütün elemanlarında meydana gelen kayma gerilmeleri eş gerilme eğrileri şeklinde Şekil 6.27'de verilmiştir. Benzer şekilde baraj gövdesinin tümü üzerinde, aynı zamanlarda oluşan kayma şekil değiştirmeleri hesaplanarak Şekil 6.28'de gösterilmiştir. Şekil 6.27 ve Şekil 6.28'in incelenmesinden baraj kesitini oluşturan malzemelerin fiziksel özelliklerine bağlı olarak, bazalt ve plaketsli kireç taşı bölgelerinde büyük kayma gerilmeleri ve küçük şekil değiştirmeler, nehir alüvyonu ve kil çekirdek bölgelerinde ise daha küçük gerilmeler ve büyük şekil değiştirmeler meydana geldiği gözlenmektedir. Kayma gerilmelerinin en büyük değerleri de Şekil 6.27'de görüldüğü gibi baraj tabanında orta bölgelerde meydana gelmektedir.

Eş kayma gerilmeleri eğrilerinin yataya yaklaşması, bir boyutlu çözümde, yatay kesitler için yapılan ortalama kayma gerilmesi etkisi altındaki davranışın yaklaşıklığının bir ölçüsü olarak görülebilir.

Elasto-plastik davranış için de belirlenen aynı düğüm noktalarında hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 6.29'da, düşey yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 6.30'da verilmiştir. Bu davranışa ait en büyük yatay yerdeğiştirme $t = 5.5$ s de 300 mm, düşey yerdeğiştirme ise $t = 5.5$ s de 100 mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu yerdeğiştirmeler ile elastik davranıştan elde edilen yerdeğiştirmeler karşılaştırıldığında yatayda yaklaşık 1.75 kat, düşeyde yaklaşık 2.35 kat arttığı görölür.

Doğrusal elastik davranışta yapıldığı gibi, en büyük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği 3.10, 4.30, 5.50 ve 6.60. saniyelerde baraj gövdesinin bütün düğüm noktalarındaki yatay ve düşey yerdeğiştirmeler hesaplanarak Şekil 6.31'de verilmiştir. Şekil 6.31'in incelenmesinden, yerdeğiştirmelerin alüvyon ve çekirdek bölgelerinde ve büyük ölçüde barajın 80-172 m leri arasında meydana geldiği görölmektedir. Barajın stabilitesini sağlamak amacı ile kullanılan bazalt malzemesinin küçük yerdeğiştirmeler yaparak bu işlevini yerine getirdiği söylenebilir.

Yine seçilen aynı 26, 50, 38 ve 22 numaralı elemanlar üzerinde elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile elde edilen kayma gerilmelerinin zamanla değişimi Şekil 6.32'de sunulmuştur. Bu gerilmeler ile doğrusal elastik davranıştan elde edilen gerilmeler karşılaştırıldığında yaklaşık 1.6 kat azaldığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

Kayma gerilmelerinin en büyük değerlerinin meydana geldiği 2.40, 3.00, 4.20 ve 5.30. saniyelerde baraj gövdesinin bütün elemanlarında meydana gelen kayma gerilmeleri belirlenerek eş gerilme eğrileri şeklinde Şekil 6.33'de, kayma şekil değiştirmeleri de Şekil 6.34'de gösterilmiştir. Bu şekillerin incelenmesinden, kayma gerilmelerinin büyük ölçüde kireçtaşı ve bazalt bölgelerinin de içinde olduğu baraj gövdesinin sağ yarısında yoğunlaştığı ve kayma şekil değiştirmelerinin de kil çekirdek ve etrafında meydana geldiği görölmektedir.

Değişik bölgelerde belirlenen 22, 26, 30, 33, 38, 44, 50 ve 56 numaralı elemanlarda kayma gerilmeleri ile kayma şekil değiştirmelerinin zamana bağlı izi Şekil 6.35'de verilmiştir. Çevrimsel elasto-plastik davranışın açıkça göröldüğü bu değişimler

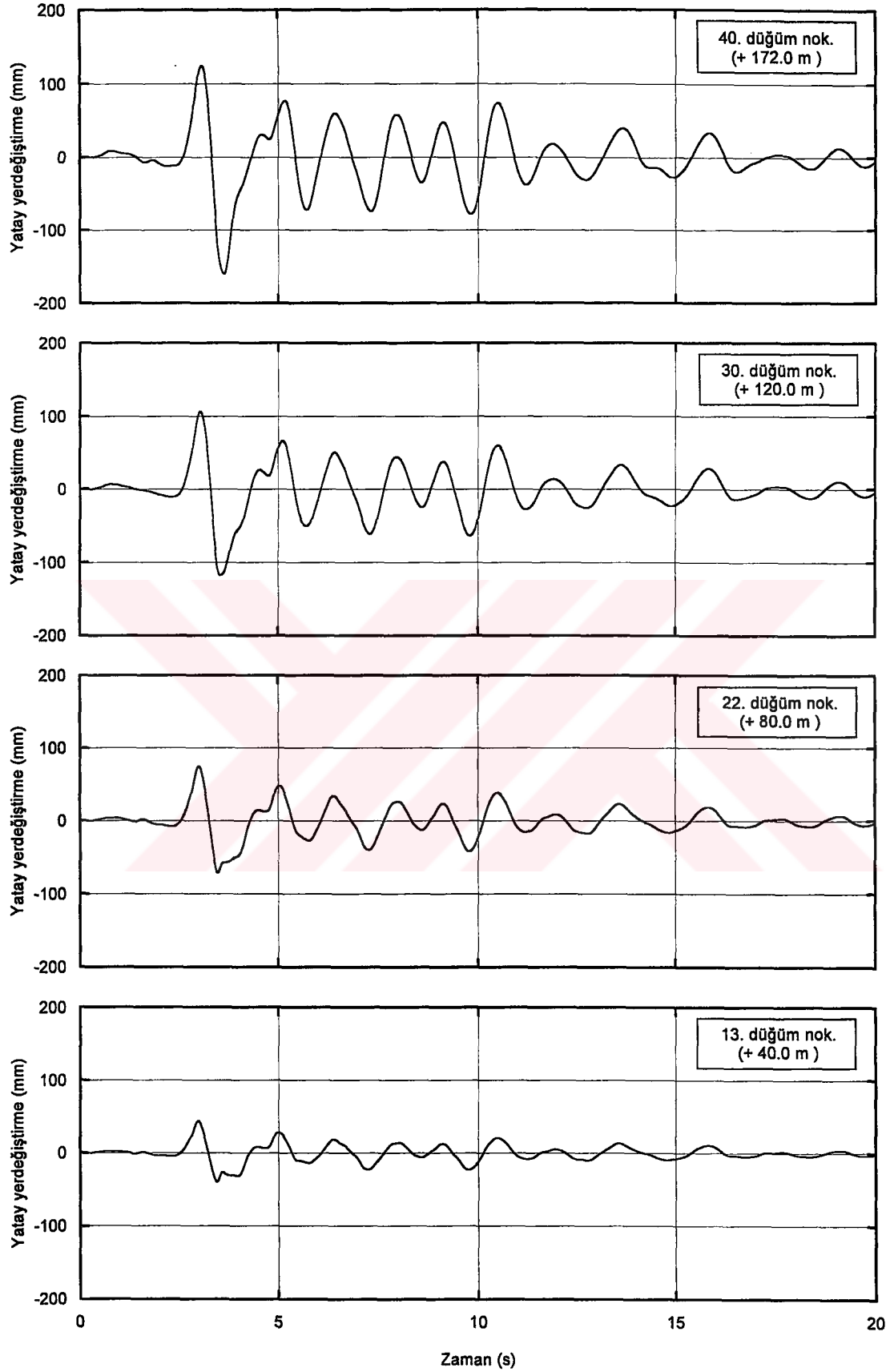
malzeme özelliğine bağlı olarak bazı elemanlarda açık bazı elemanlarda da kapalıya yakın bir çevrimle ortaya çıkmaktadır. Şekil 6.35'in incelenmesinden bazalt gibi elastisite modülü yüksek ve doğrusal davranıştan ayrılmasının daha büyük gerilmelerde ortaya çıktığı malzemede, davranışın da buna uygun olduğu görülür (Eleman 22). Buna karşılık nehir alüvyonunda elde edilen sonuçların bazalttakine göre daha yumuşak davranış sergilediği ve sönümün ortaya çıktığı çevrimsel davranışın daha belirgin meydana geldiği görülmektedir (Eleman 30). Bu tür davranışın ortaya çıkmasında elemandaki gerilme seviyesi de etkili olmaktadır. Yüksek gerilme seviyesi, plastik davranış nedeniyle boşaltmanın yükleme yörüngesi takip etmemesi ve tekrar yükleme ile de değişik bir yol izlemesi nedeniyle ortaya çıkan çevrimsel davranışın daha belirgin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

İki boyutlu eleman çözümlerinden elde edilen yatay ve düşey yönlerdeki toplam ivmelerin zamanla değişimleri, 1B analizlerde yapıldığı gibi, doğrusal elastik ve elasto-plastik davranış için baraj tepe noktasında (172.0 m) elde edilerek sırası ile Şekil 6.36 ve Şekil 6.37'de verilmiştir. Baraj kretinde yatay doğrultudaki ivmelerin baraj tabanına göre, doğrusal elastik davranışta yaklaşık 2.0 kat, elasto-plastik davranışta yaklaşık 1.33 kat arttığı görülmektedir. Düşey doğrultuda elde edilen ivme değerleri ise her iki davranışta da baraj tabanına göre yaklaşık 1.5 kat artmaktadır. Şekil 6.36 ve Şekil 6.37'nin karşılaştırılmasından doğrusal elastik davranışta baraj tepe noktasında hesaplanan yatay ivmelerin, elasto-plastik davranışta hesaplanan yatay ivmelere göre yaklaşık 1.5 kat daha büyük olduğu görülmektedir.

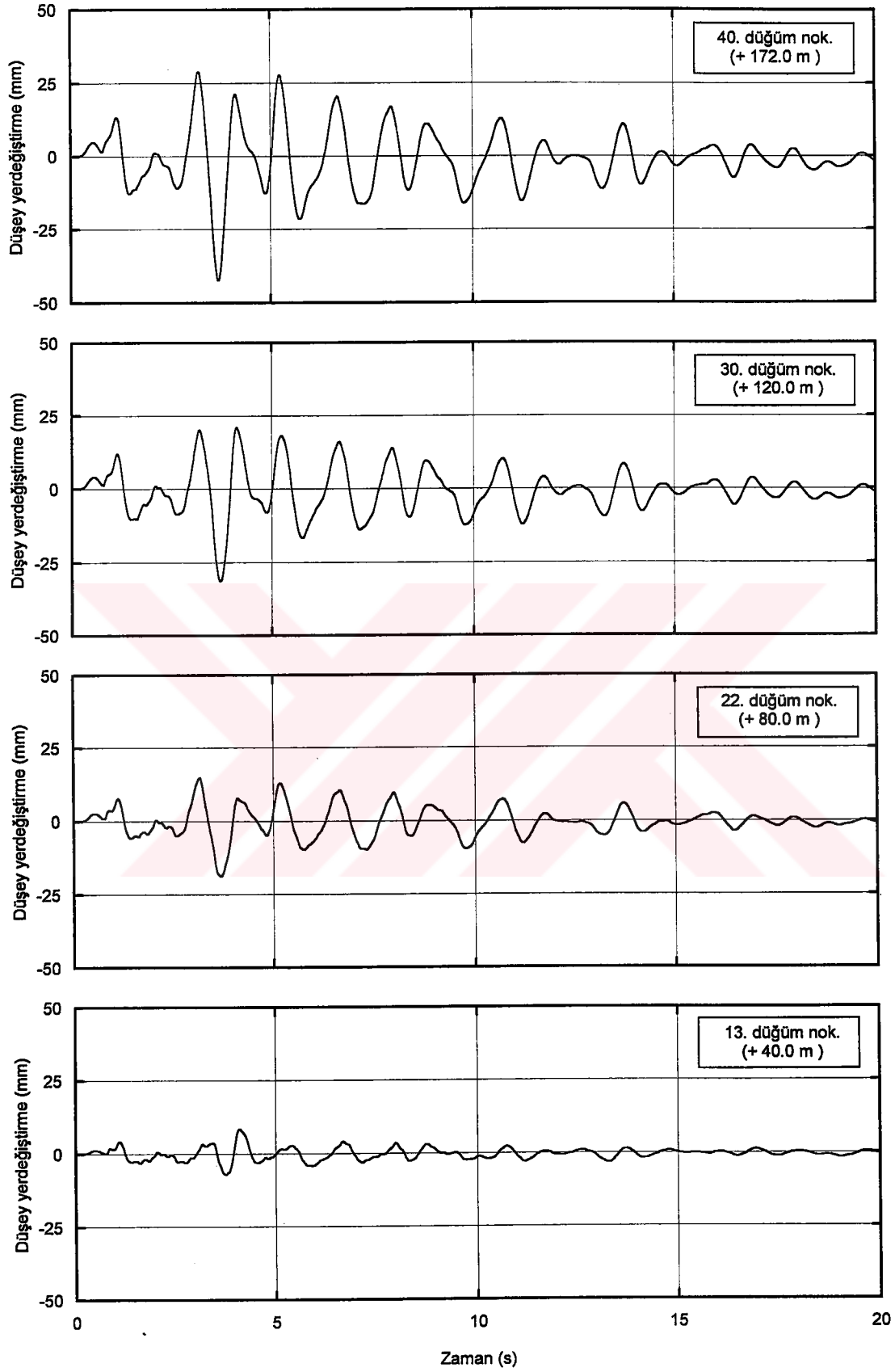
Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile, bir boyutlu ve iki boyutlu model çözümlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, baraj kretinde hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Kayma gerilmeleri için, bir boyutlu modelde, baraj gövdesi belirli yükseklikte tek bir elemanla temsil edildiğinden bir karşılaştırma yapılamamıştır. Bununla birlikte her iki modelde de baraj tabanında ki gerilmelerin büyüklükleri aynı mertebelerde olduğu görülmektedir. Baraj tepe noktasında elde edilen yatay ivme değerleri ise bir boyutlu modelde, iki boyutlu modele göre, %33 daha büyük ortaya çıkmaktadır.

Elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile, bir boyutlu ve iki boyutlu model çözümlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, baraj kretinde hesaplanan yatay yerdeğıştirmelerin hemen hemen aynı olduğu, en büyük yatay yerdeğıştirmenin yaklaşık 300 mm civarında olduğu görölmektedir. Yatay yöndeki en büyük ivme değeri her iki davranışta da 0.4 g mertebesinde ortaya çıkmaktadır.

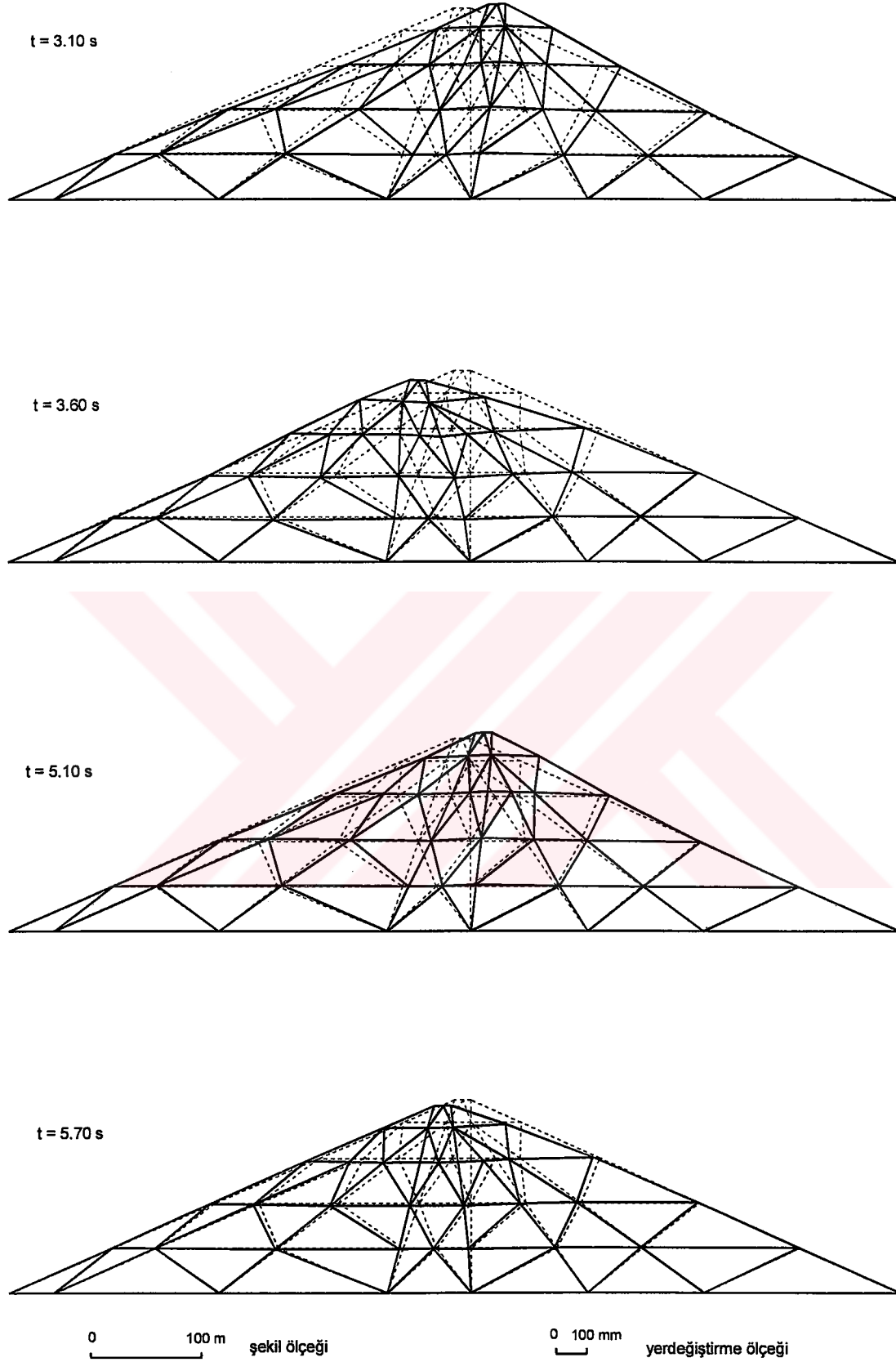




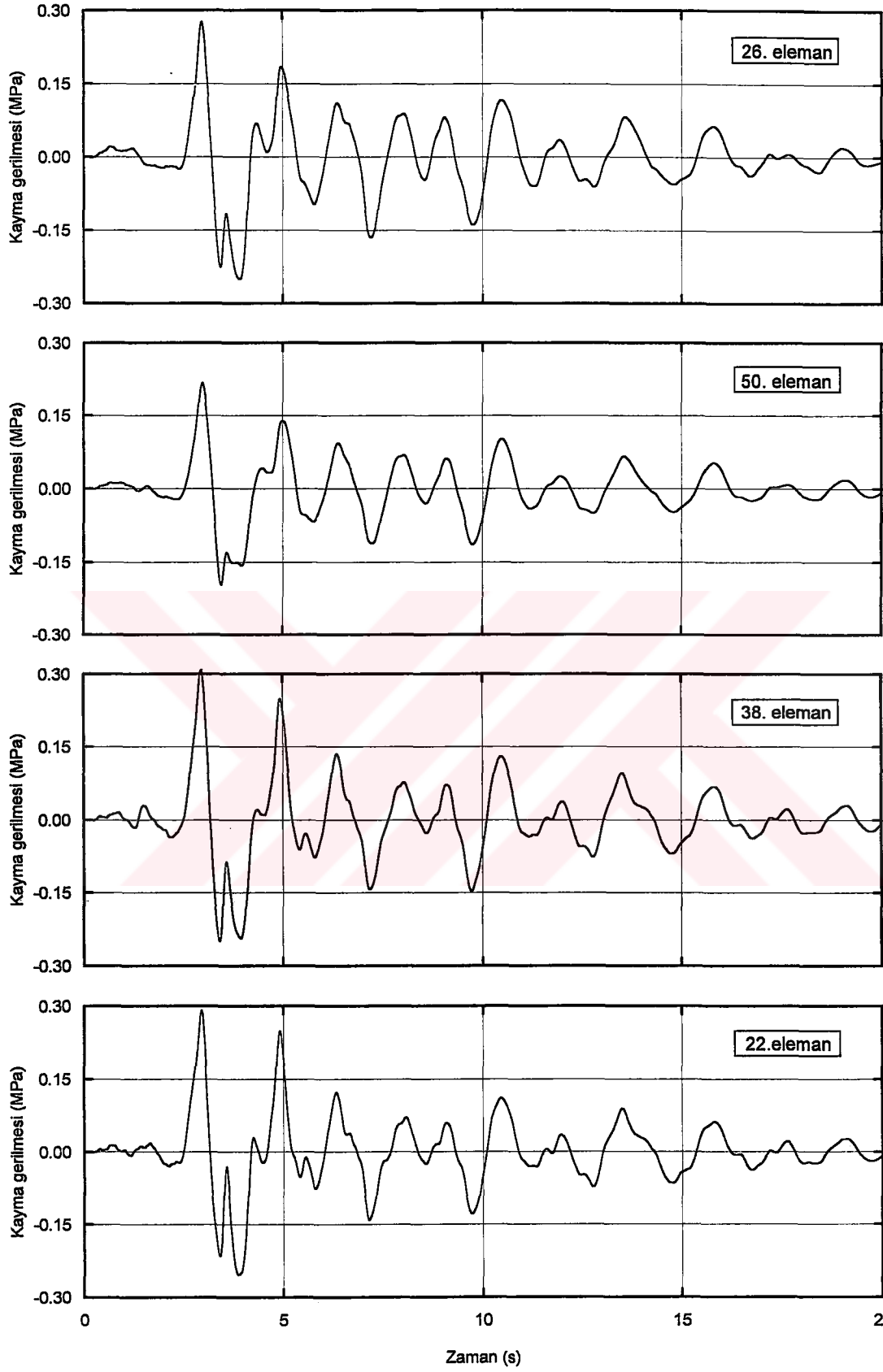
Şekil 6.23 Doğrusal elastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 40, 30, 22 ve 13. düğüm noktalarındaki yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



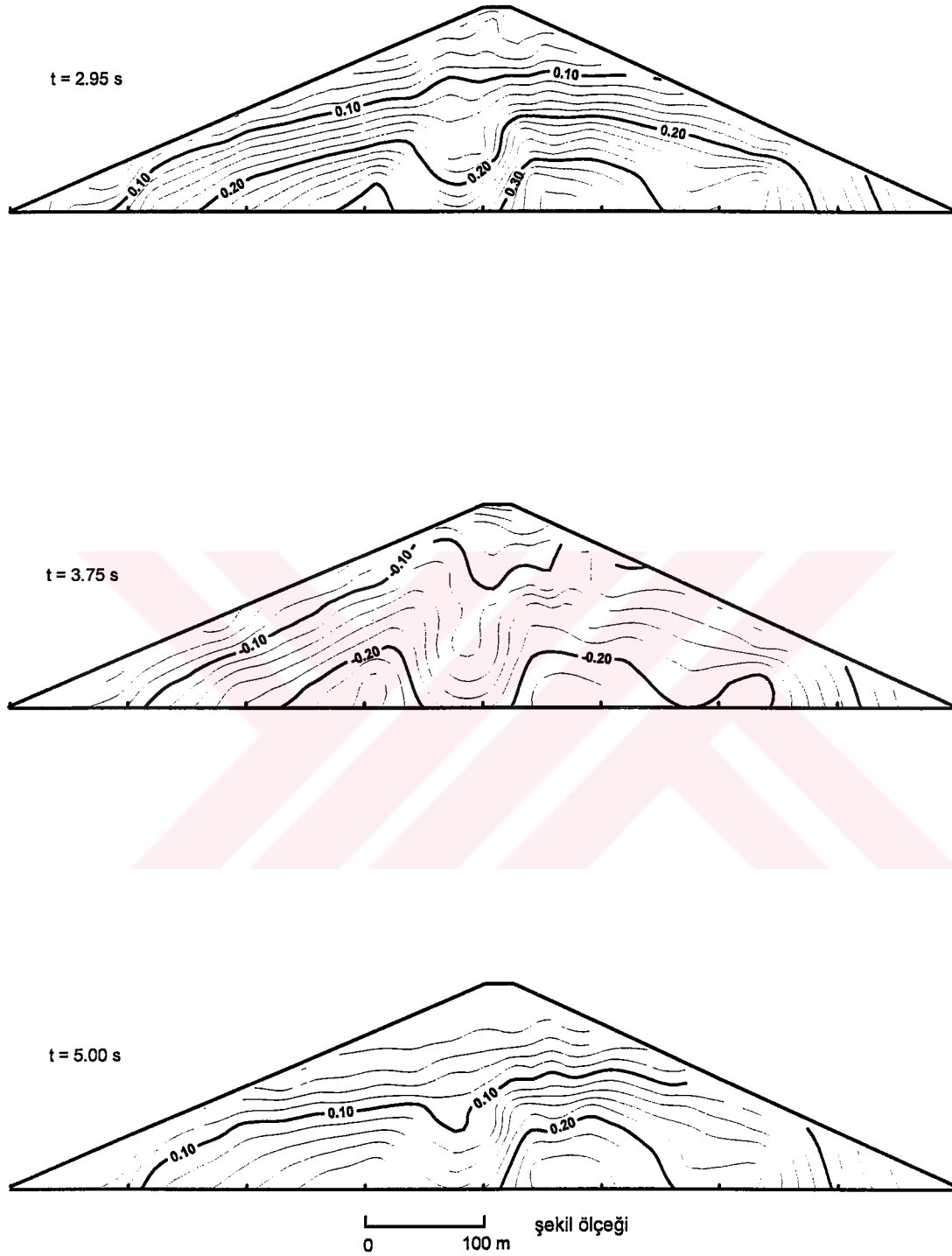
Şekil 6.24 Doğrusal elastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 40, 30, 22 ve 13. düğüm noktalarındaki düşey yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



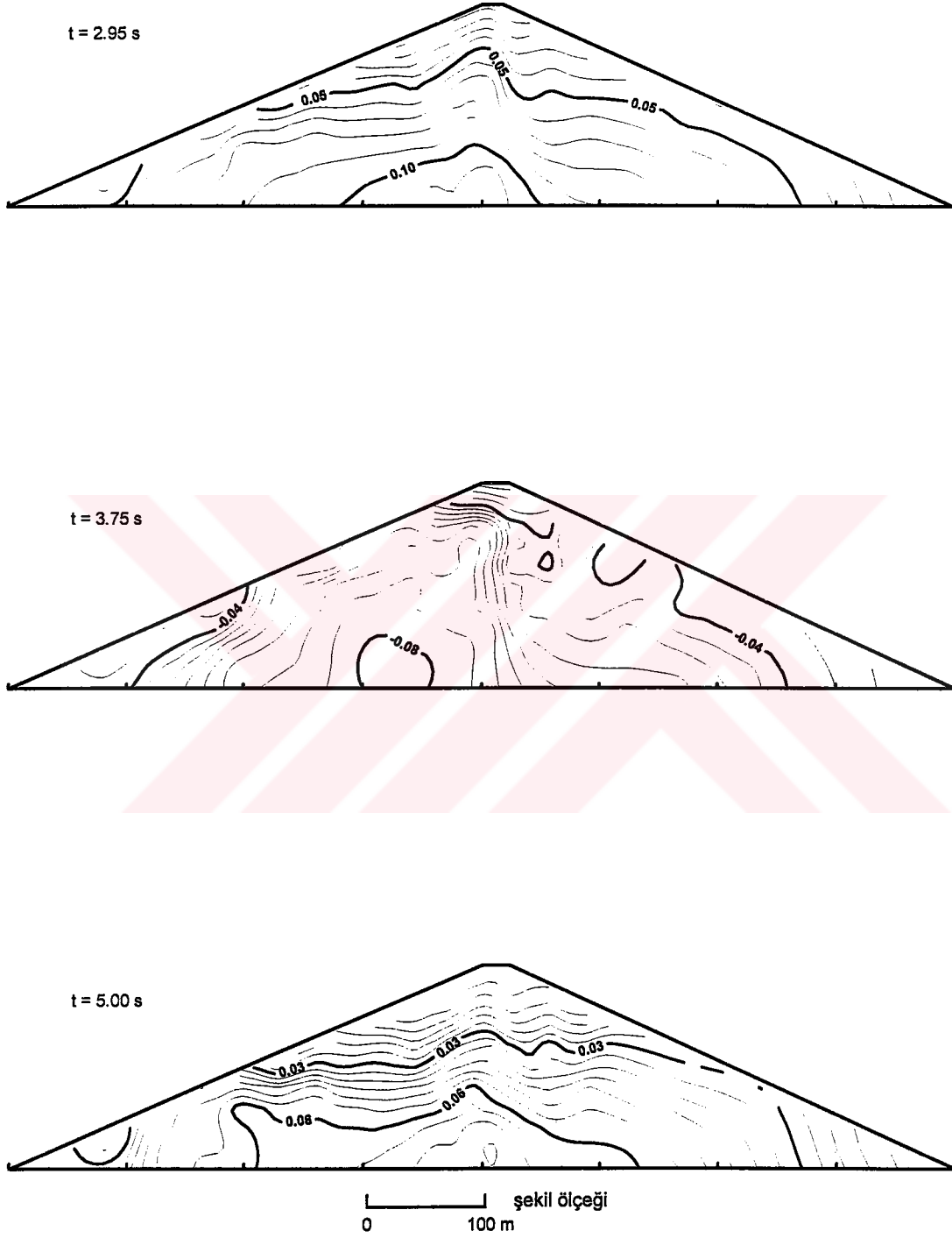
Şekil 6.25 Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile sırasıyla $t=3.10 \text{ s}$, $t=3.60 \text{ s}$, $t=5.10 \text{ s}$ ve $t=5.70 \text{ s}$ de baraj gövdesinde oluşan yerdeğiştirmeler (noktalı çizgi başlangıçtaki, sürekli çizgi yerdeğiştirmiş sonlu eleman ağını göstermektedir)



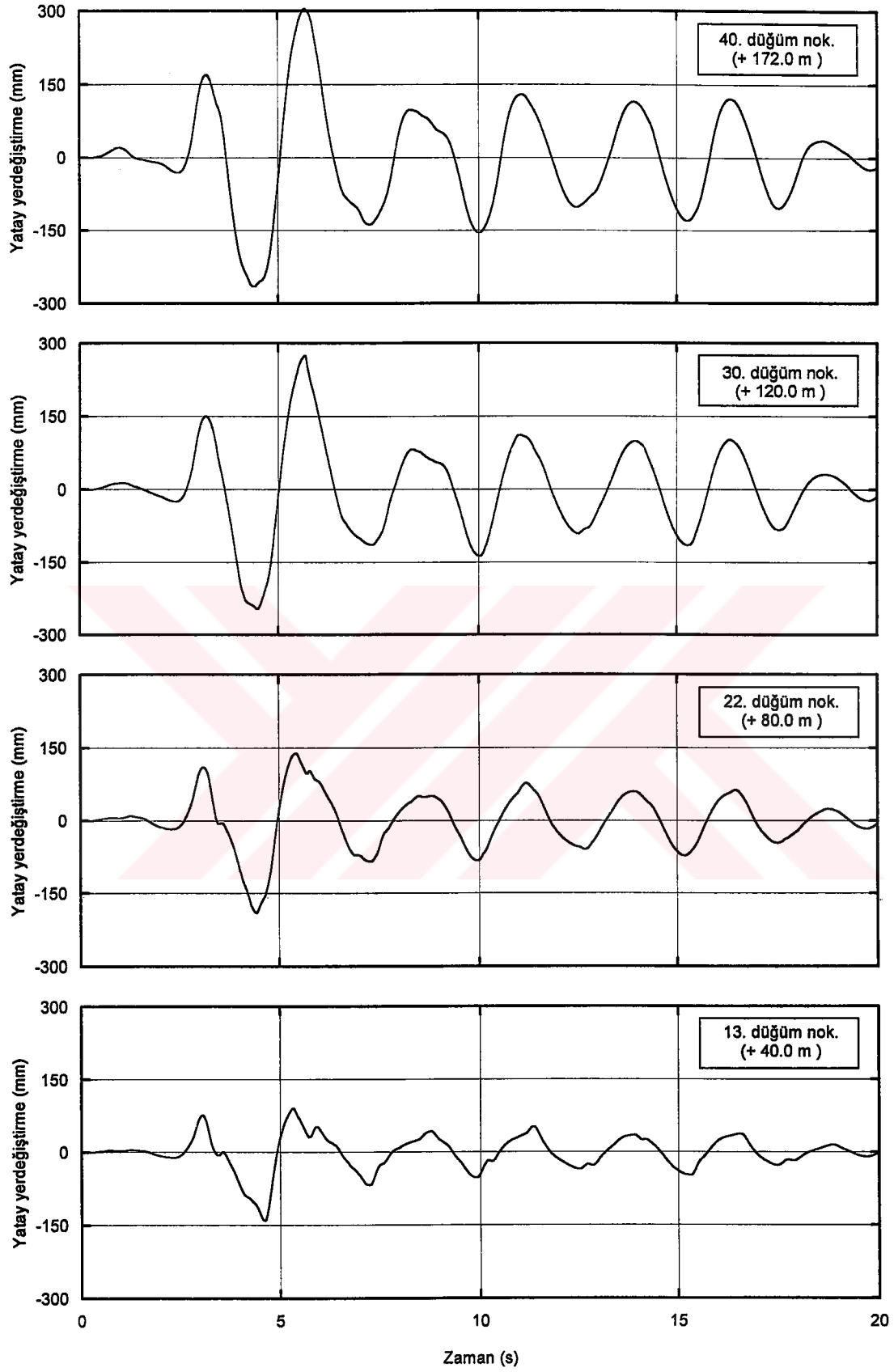
Şekil 6.26 Doğrusal elastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 26, 50, 38 ve 22. elemanlardaki kayma gerilmelerinin zamanla değişimi



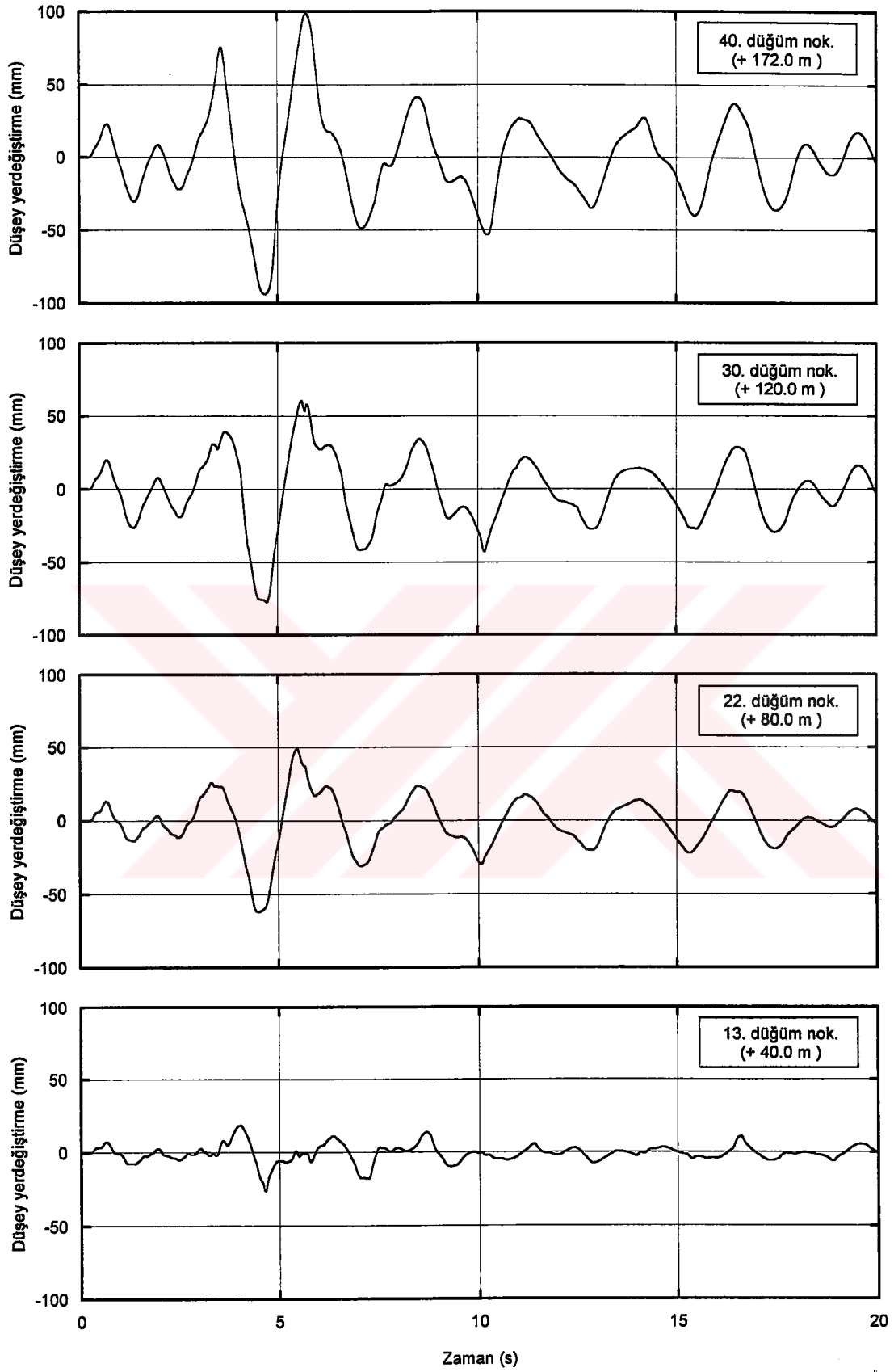
Şekil 6.27 Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile, sırasıyla $t = 2.95 \text{ s}$, $t = 3.75 \text{ s}$, $t = 5.00 \text{ s}$ de baraj gövdesinde hesaplanan τ_{xy} (MPa) kayma gerilmelerinin dağılımı



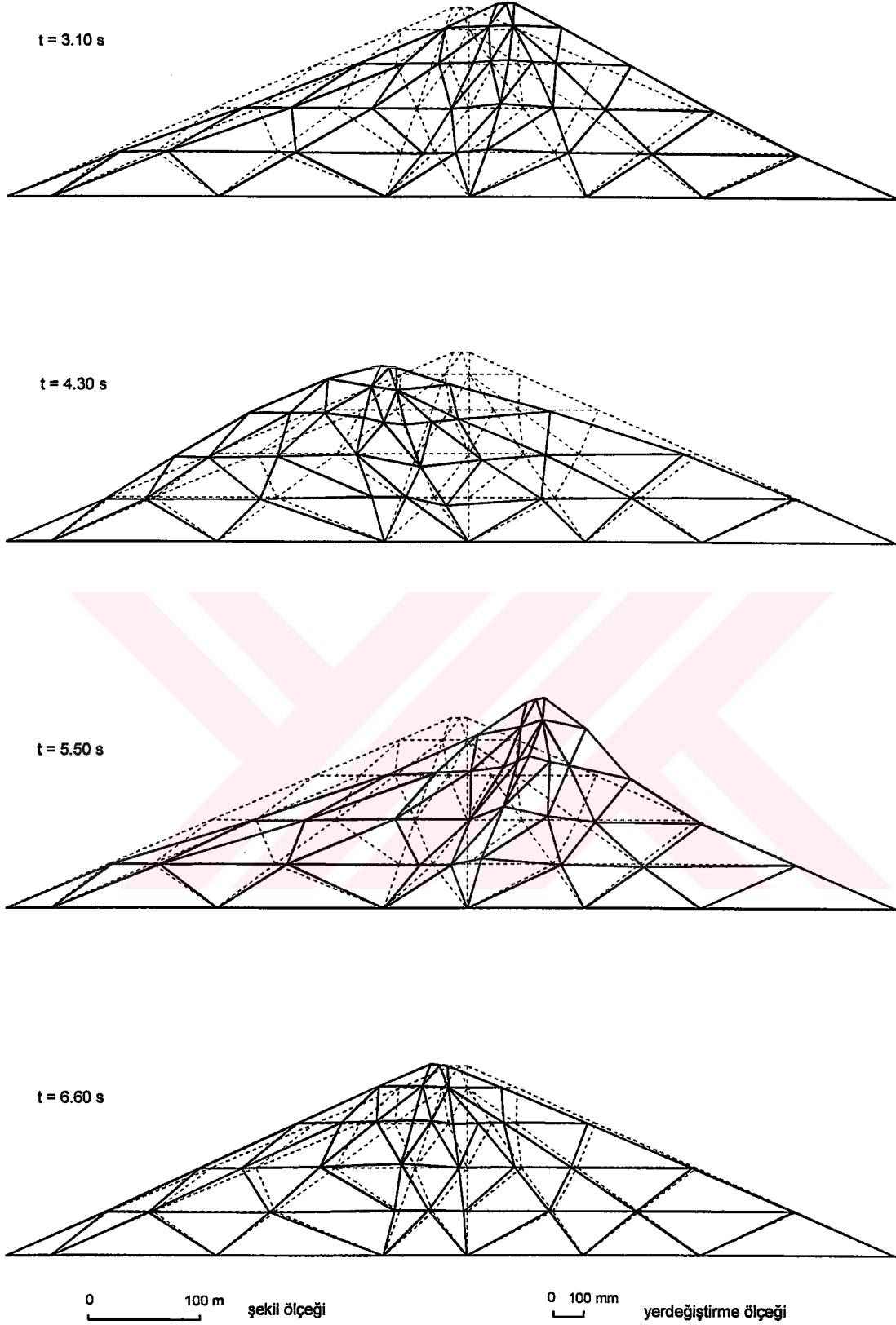
Şekil 6.28 Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile, sırasıyla $t = 2.95 \text{ s}$, $t = 3.75 \text{ s}$, $t = 5.00 \text{ s}$ de baraj gövdesinde hesaplanan γ_{xy} (%) kayma şekil değiştirmelerinin dağılımı



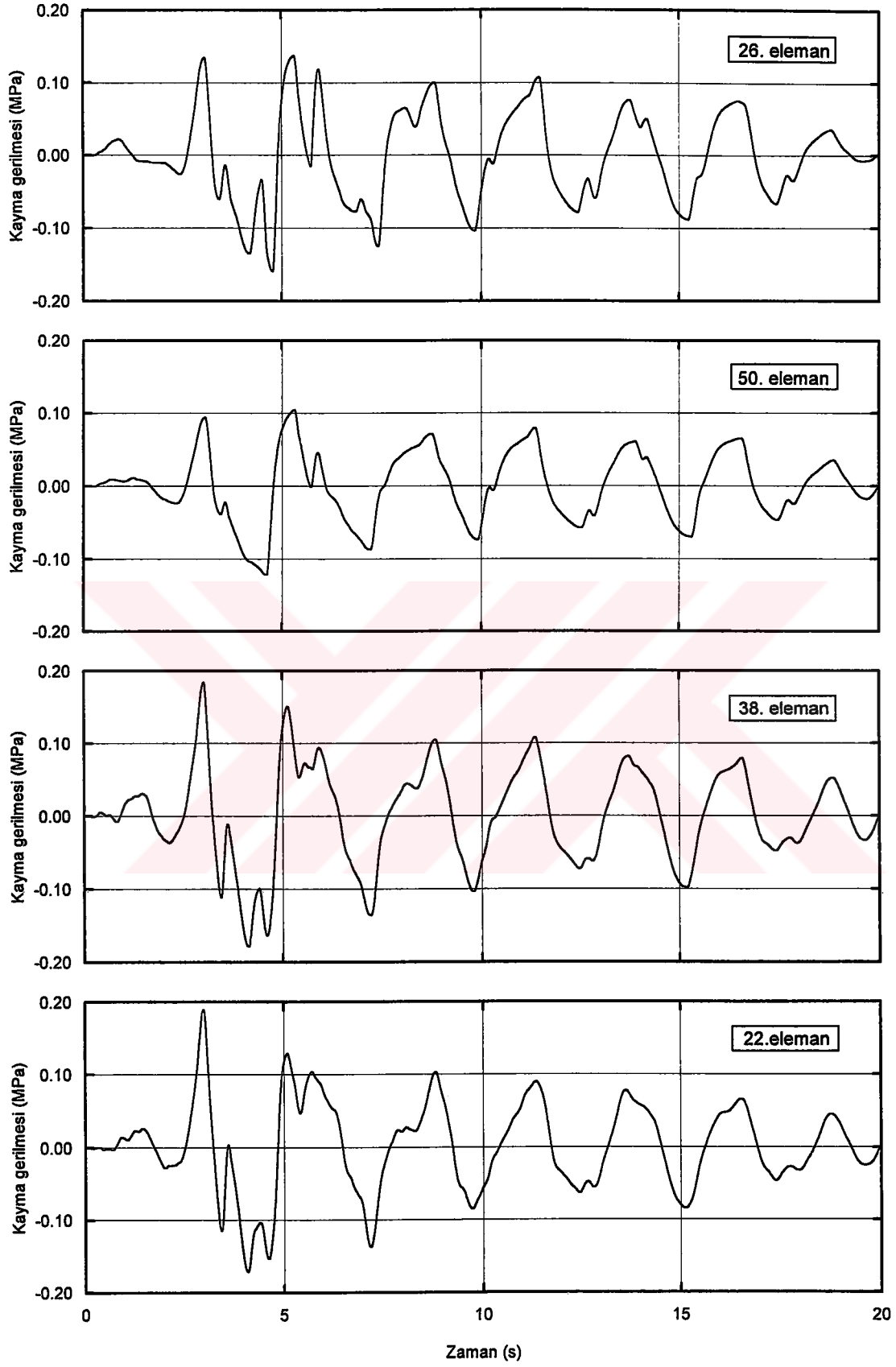
Şekil 6.29 Elasto-plastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 40, 30, 22, 13. düğüm noktalarındaki yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



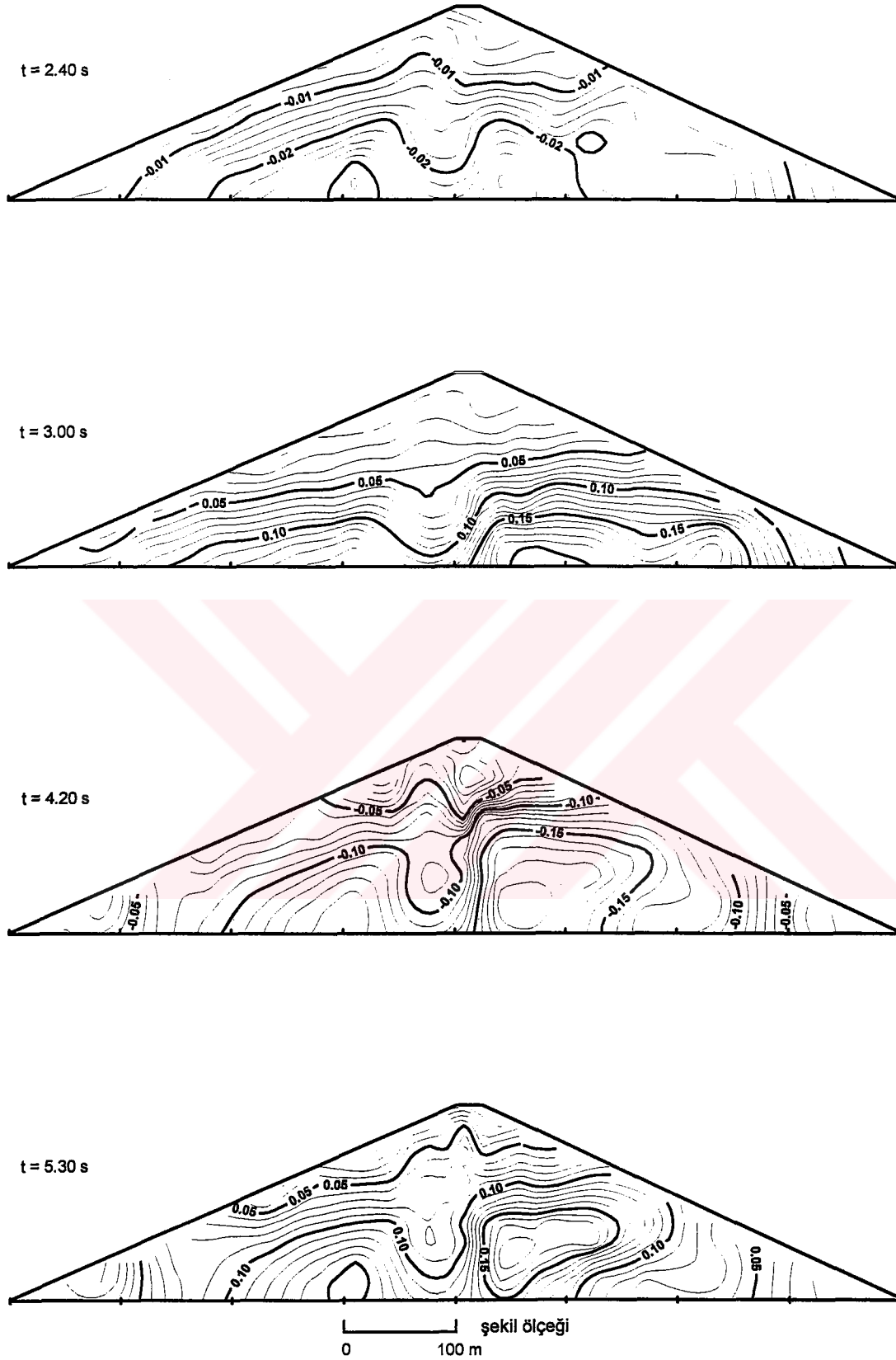
Şekil 6.30 Elasto-plastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 40, 30, 22, 13. düğüm noktalarındaki düşey yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



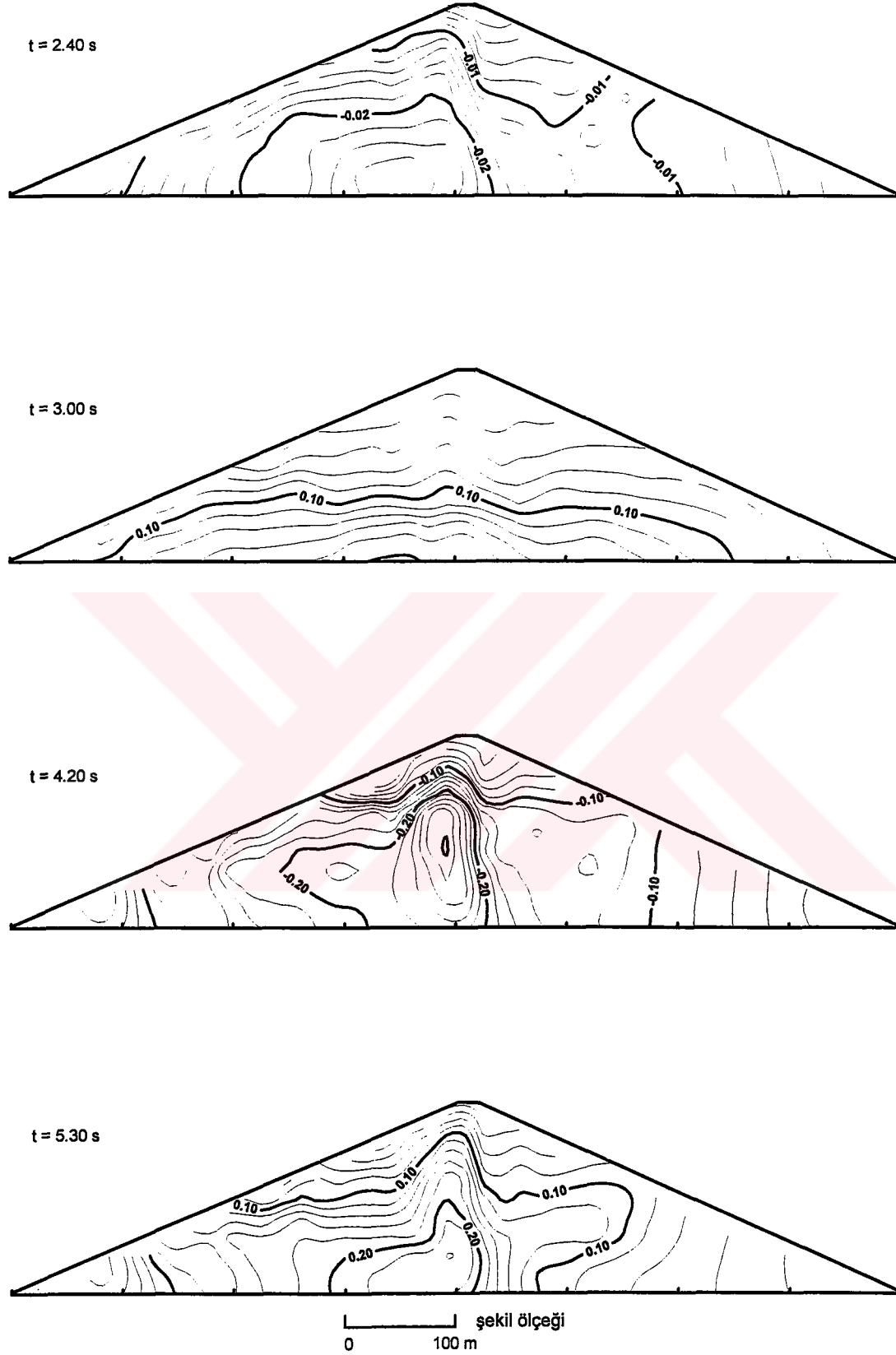
Şekil 6.31 Elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile sırasıyla $t=3.10 \text{ s}$, $t=4.30 \text{ s}$, $t=5.50 \text{ s}$ ve $t=6.60 \text{ s}$ de baraj gövdesinde oluşan yerdeğiştirmeler (noktalı çizgi başlangıçtaki, sürekli çizgi yerdeğiştirmiş sonlu eleman ağını göstermektedir)



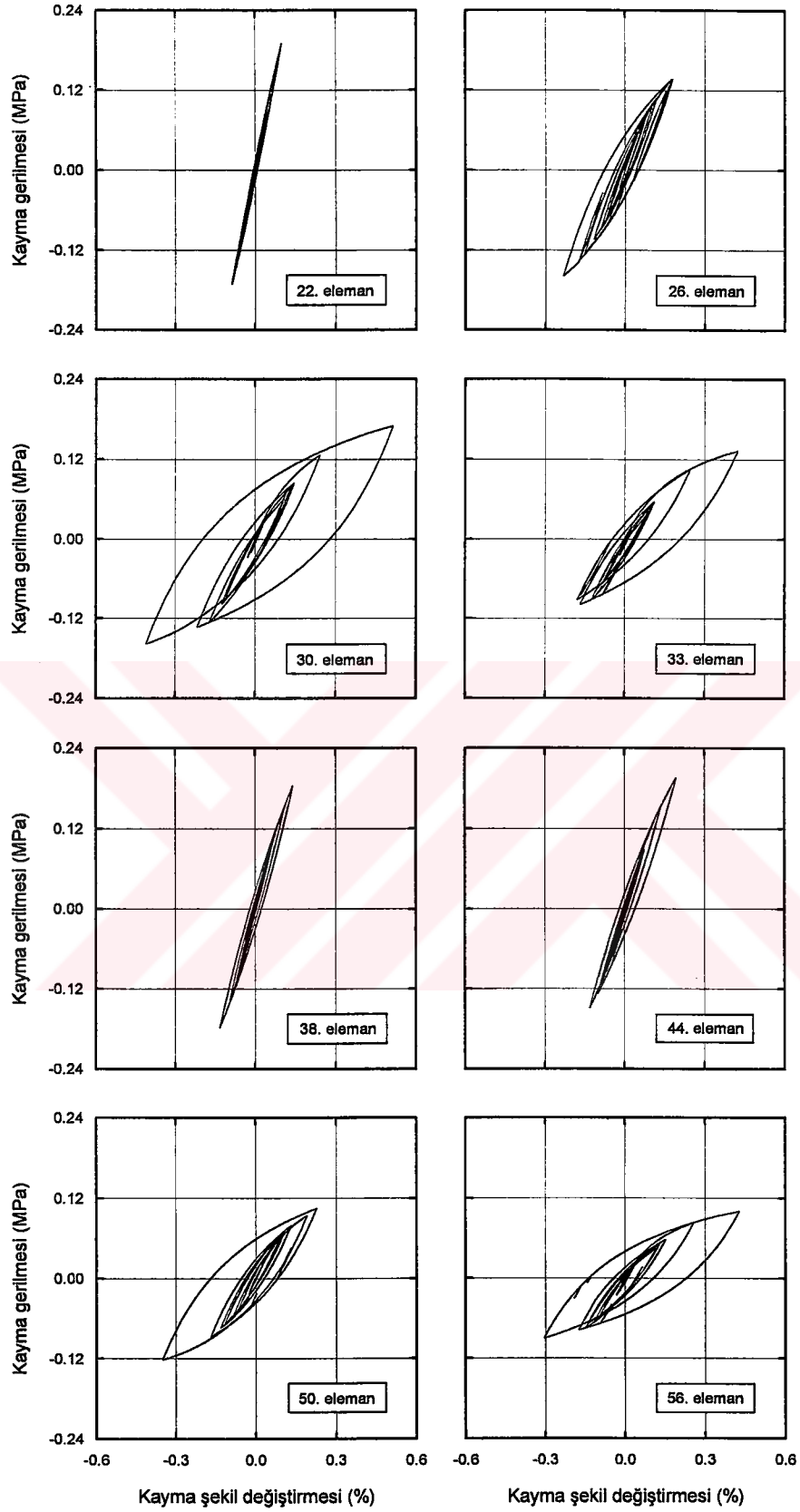
Şekil 6.32 Elasto-plastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 26, 50, 38 ve 22. elemanlardaki kayma gerilmelerinin zamanla değişimi



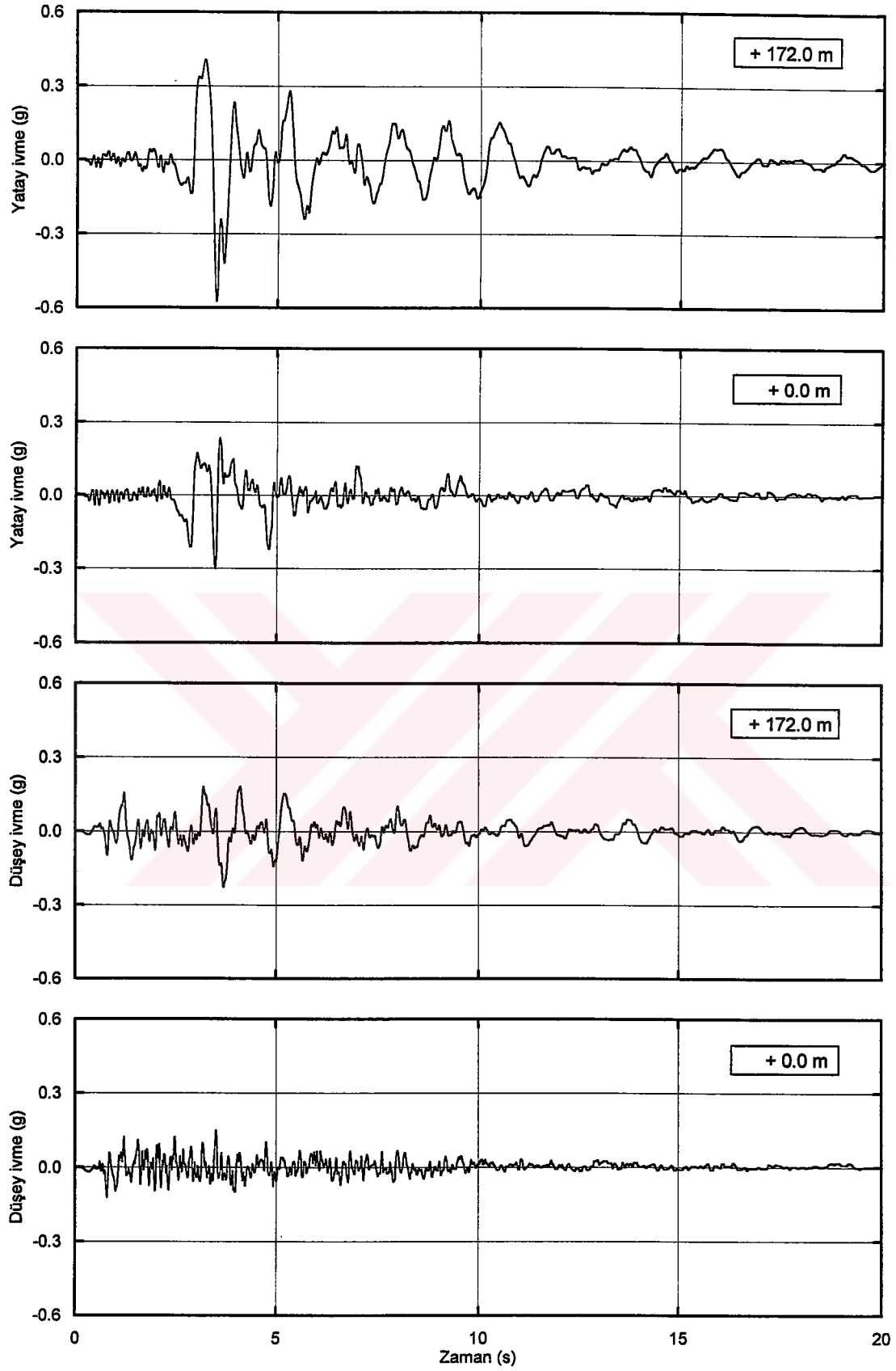
Şekil 6.33 Elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile sırasıyla $t = 2.40 \text{ s}$, $t = 3.00 \text{ s}$, $t = 4.20 \text{ s}$ ve $t = 5.30 \text{ s}$ de baraj gövdesinde hesaplanan τ_{xy} (MPa) kayma gerilmelerinin dağılımı



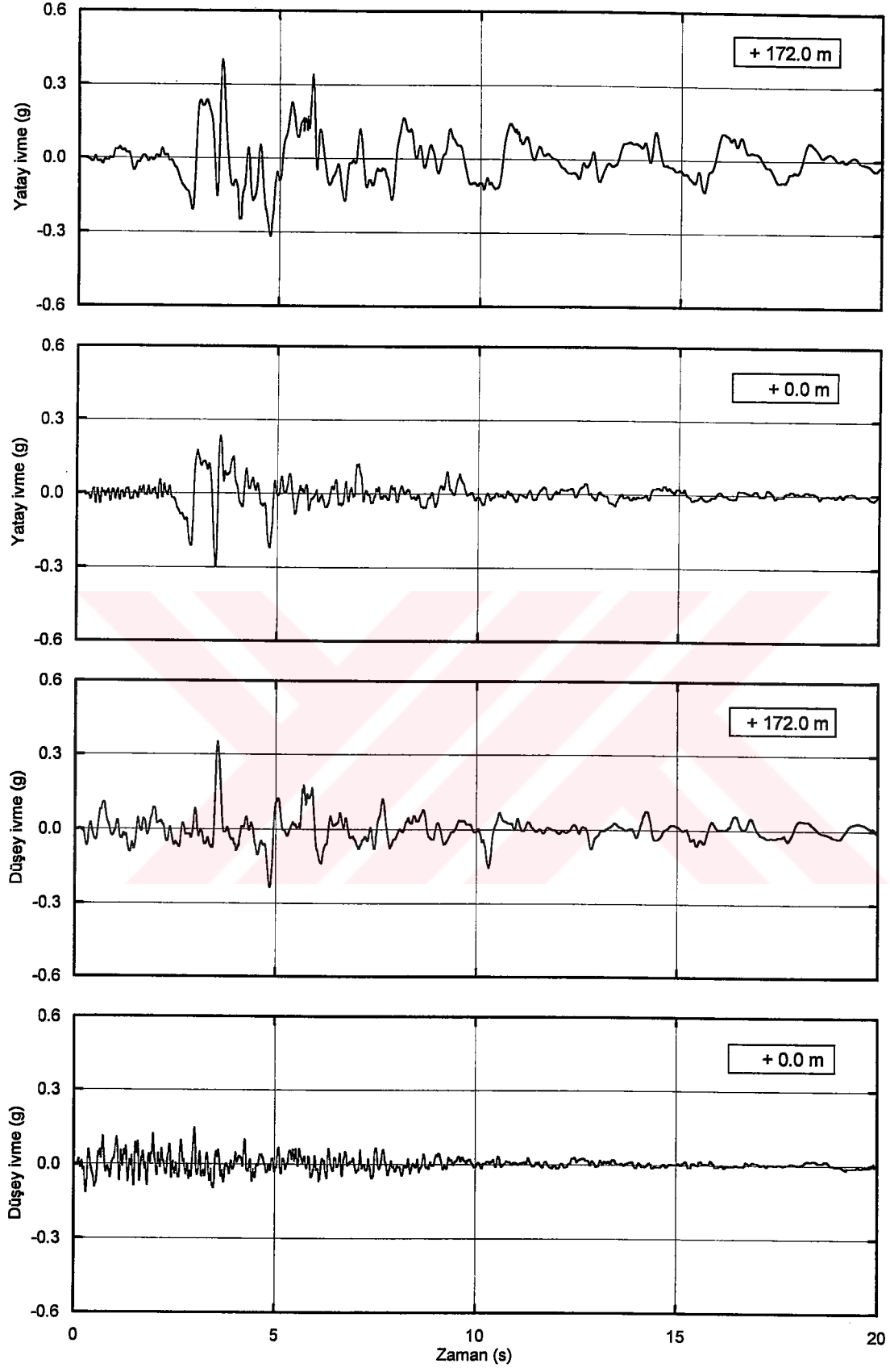
Şekil 6.34 Elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile, sırasıyla $t = 2.40$ s, $t = 3.00$ s, $t = 4.20$ s ve $t = 5.30$ s de baraj gövdesinde hesaplanan γ_{xy} (%) kayma şekil değiştirmelerinin dağılımı



Şekil 6.35 Elasto-plastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen 22, 26, 30, 33, 38, 44, 50 ve 56. elemanlardaki kayma gerilmeleri ile kayma şekil değiştirmelerin zamana bağlı izi



Şekil 6.36 Doğrusal elastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen +172.0 m ve 0.0 m yüksekliklerdeki ivme değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 6.37 Elasto-plastik davranışta, 2B eleman çözümlerinden elde edilen +172.0m ve 0.0 m yüksekliklerdeki ivme değerlerinin zamanla değişimi

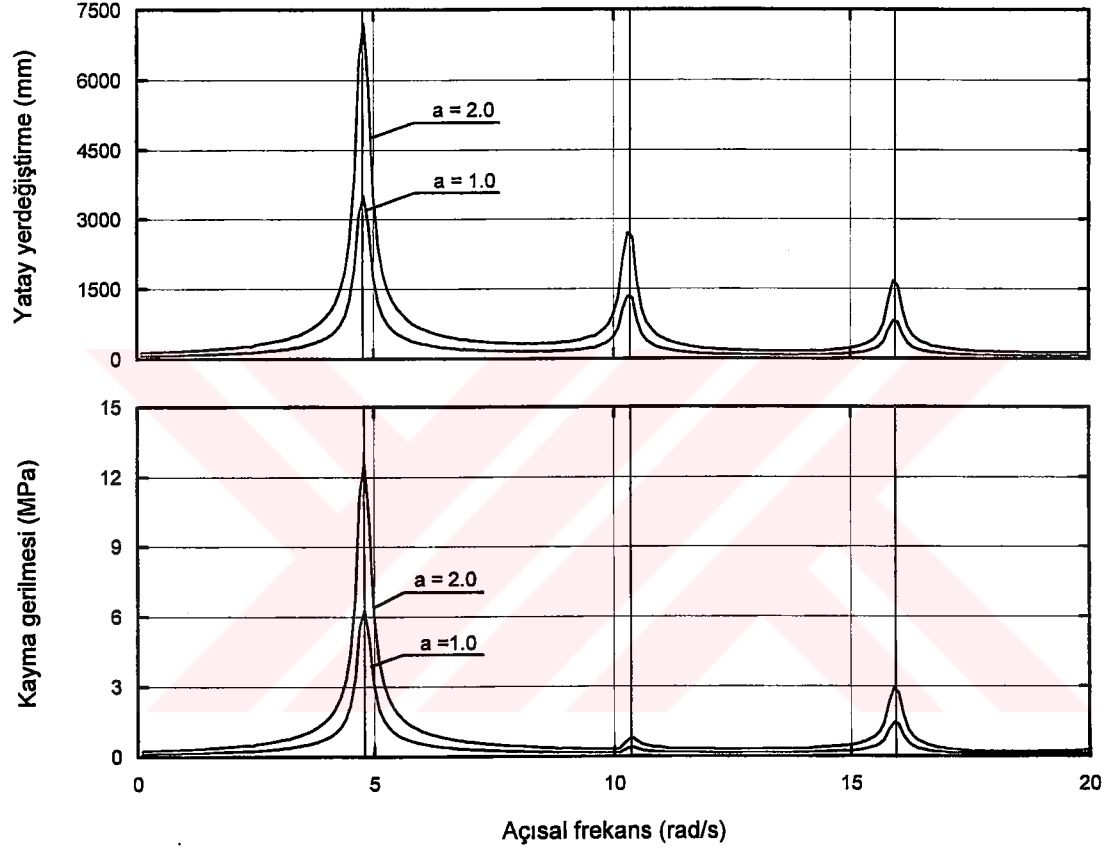
6.6 PARAMETRİK ÇALIŞMALAR

Çalışmanın bu bölümünde bir boyutlu ve iki boyutlu sonlu eleman modellerinde kullanılan parametrelerin farklı değerleri için çözümler elde edilerek bu büyüklüklerin yapının dinamik davranışına olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak yapının serbest titreşim frekanslarının malzeme davranışı ile değişimi incelenmiştir. İkinci olarak yapının elasto-plastik davranışını önemli ölçüde değiştiren, temel davranış eğrisinin biçimini belirleyen γ_r referans şekil değiştirmesinin ve üçüncü olarak sönüm oranının değişik değerleri için çözümler elde edilmiş ve grafiklerle sunulmuştur. Yapılan çözümlerde Bölüm 6.4 ve Bölüm 6.5’de sırasıyla 1B ve 2B sonlu eleman modellerinde verilen Atatürk Barajı’na ait değerler kullanılmıştır.

6.6.1 Doğal Titreşim Frekansları

Atatürk Barajı’nın sönümsüz serbest titreşim frekanslarının elastik ve elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle değişimini belirlemek amacıyla baraj gövdesi $\ddot{U}_g(t) = a \sin(\omega t)$ biçiminde tekrarlı bir yük ile zorlanarak yerdeğiştirmelerin ve gerilmelerin zorlama frekansı ile değişimleri belirlenmiştir.

Bir boyutlu sonlu eleman modelinde, doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle açısal frekansın 0.2 den 20 rad/s ye kadar 0.2 rad/s artımları ile çözümler yapılarak yerdeğiştirme ve gerilmelerin en büyük değerleri belirlenmiştir. Genliğin 1.0 ve 2.0 m/s² değerleri için elde edilen bu çözümler Şekil 6.38’de verilmiştir. Şekilin incelenmesinden, zorlama frekansının yapının doğal titreşim frekansına yakın olduğu bölgelerde, $\omega_1 = 4.8$ rad/s ($f_1 = 0.76$ 1/s), $\omega_2 = 10.4$ rad/s ($f_2 = 1.65$ 1/s), $\omega_3 = 16.0$ rad/s ($f_3 = 2.55$ 1/s) yerdeğiştirme ve gerilme değerleri artarak rezonans bölgelerinin meydana geldiği gözlenmektedir. Bu yöntemle belirlenen doğal titreşim frekansları ile Denklem 3.28’den hesaplanarak Tablo 6.6’da verilen doğal titreşim frekanslarının uyumlu olduğu görülmektedir.



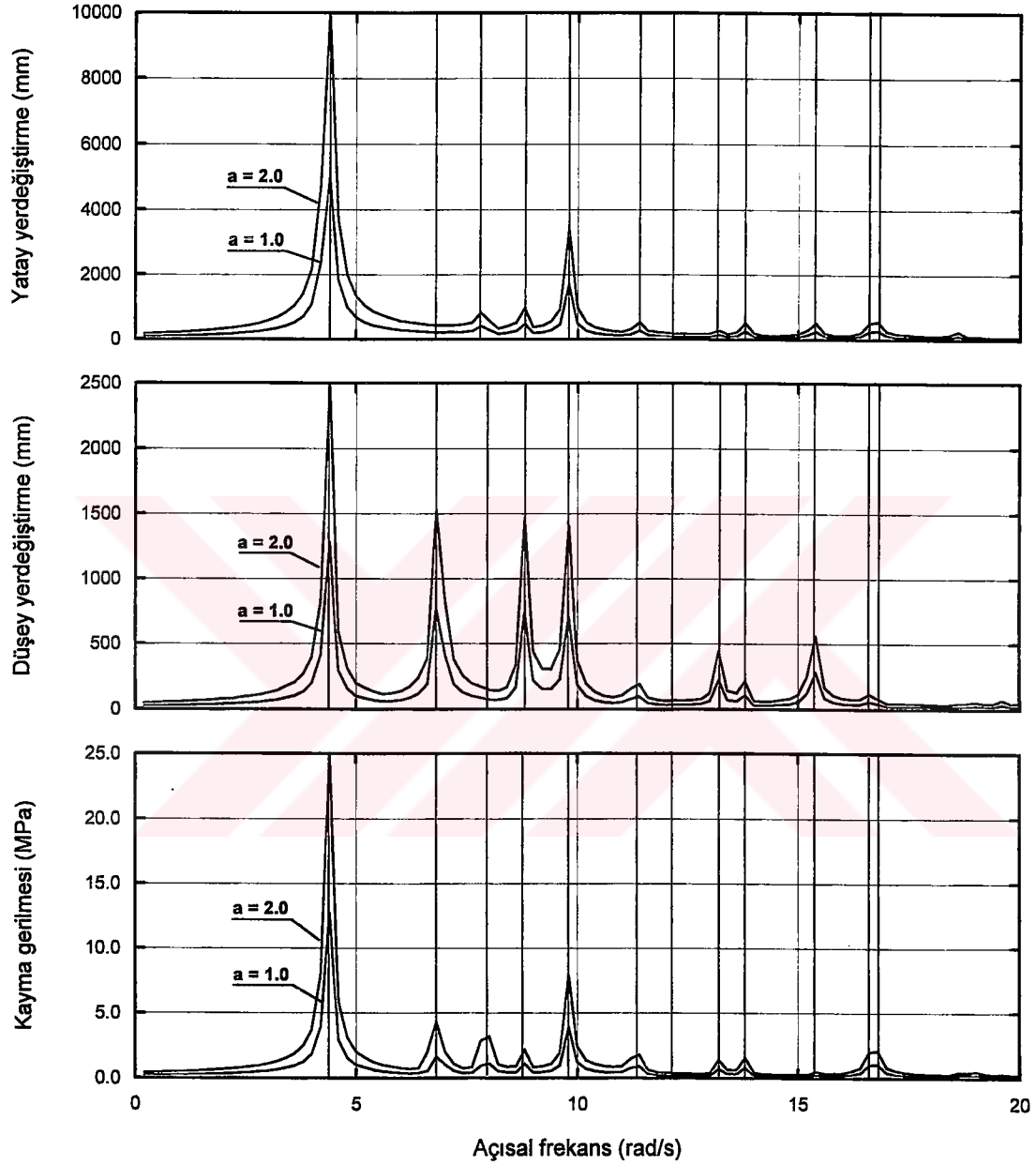
Şekil 6.38 1B modelde sönümsüz, doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle en büyük yatay yerdeğiştirme ve gerilmelerin kararlı zorlama açısal frekansı ile değişimi ($\omega_1 = 4.8$ rad/s, $\omega_2 = 10.4$ rad/s, $\omega_3 = 16.0$ rad/s)

Aynı yöntem ve adımlar izlenerek ve yapının 2B sonlu eleman modeli kullanılarak ilk on sönümsüz serbest titreşim frekansı $\omega_1 = 4.4$ rad/s ($f_1 = 0.70$ 1/s), $\omega_2 = 6.8$ rad/s ($f_2 = 1.08$ 1/s), $\omega_3 = 7.9$ rad/s ($f_3 = 1.26$ 1/s), ... olarak belirlenmiş ve Şekil 6.39'da verilmiştir. Şekil 6.39'da verilen eğrilerden ortaya çıkan frekans değerleri ile Denklem 3.61'den hesaplanarak Tablo 6.9'da verilen değerlerin uyumluluğu görülmektedir.

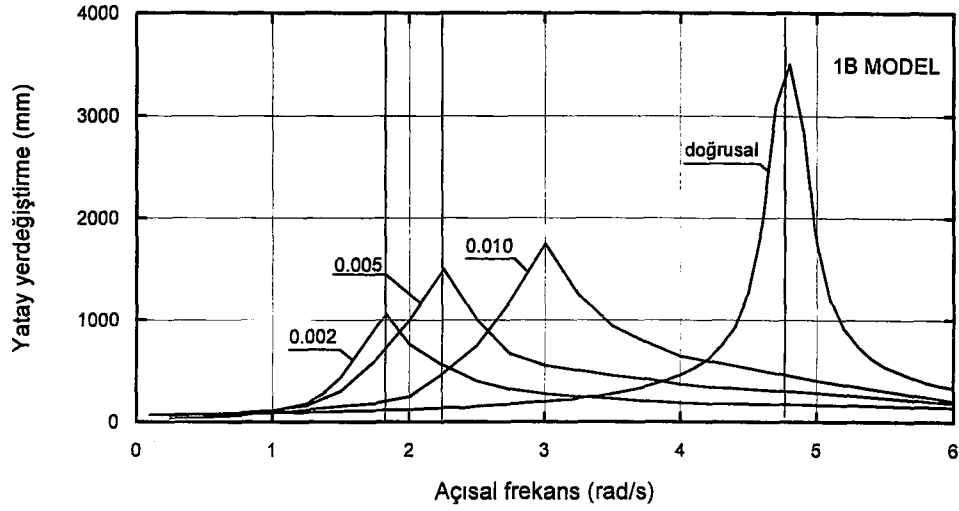
Benzer çözümler elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle, 1B ve 2B sonlu eleman modelleri kullanılarak da yapılmıştır. Bilindiği gibi elasto-plastik davranışta malzeme doğrusal davranıştan uzaklaşmakta, daha kolay şekil değiştirme yapabilmekte ve buna bağlı olarak da yerdeğiştirme salınımları büyümektedir. Elde edilen çözümlerden de bu davranış açıkça görülmektedir.

Bir boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak yapılan çözümlerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.40'da verilmiştir. Bölüm 6.4'de verilen 1B sonlu eleman modeli için referans şekil değiştirmesi $\gamma_r = 0.002$ olarak belirlenmiş ve çözümler elde edilmiştir. Şekil 6.40'da, $\gamma_r = 0.002$ referans şekil değiştirmesinin 1.0, 2.5, 5.0 ve 1000.0 katları alınarak 0.002, 0.005, 0.010 ve 2.0 (doğrusal davranış) değerleri için, yatay yerdeğiştirmelerin zorlama frekansı ile değişimi gösterilmiştir. Referans şekil değiştirmesinin verilen değerleri için birinci açısal frekanslar sırasıyla, 1.83 rad/s (0.29 1/s), 2.25 rad/s (0.36 1/s), 3.0 rad/s (0.48 1/s) ve 4.8 rad/s (0.76 1/s) şeklinde ortaya çıkmıştır. Beklendiği gibi referans şekil değiştirmesinin küçülmesi ile yapının frekansı küçülmekte, diğer bir ifade ile yerdeğiştirme salınımları büyümektedir. Şekil 6.40'da $\gamma_r = 0.002$ değeri için verilen eğri ($\omega_1 = 1.83$ rad/s, $T_1 = 3.44$ s) ile Şekil 6.13'de verilen yerdeğiştirme-zaman eğrisinin karşılaştırılmasından ($T_1 \cong 3.43$ s) elde edilen sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

İki boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak da benzer çözümler elde edilmiş ve Şekil 6.41'de yatay yerdeğiştirmelerin açısal zorlama frekansı ile değişimi şeklinde verilmiştir. Bölüm 6.5'de referans şekil değiştirmesi dört ayrı malzeme için belirlenmiş ve çözümler elde edilmiştir. Bu bölümde de belirlenen bu değerlerin 1.0, 2.5, 5.0 ve 1000.0 katları ile çözümler elde edilerek Şekil 6.41'de, yatay yerdeğiştirmelerin kararlı zorlama frekansı ile değişimi şeklinde verilmiştir.

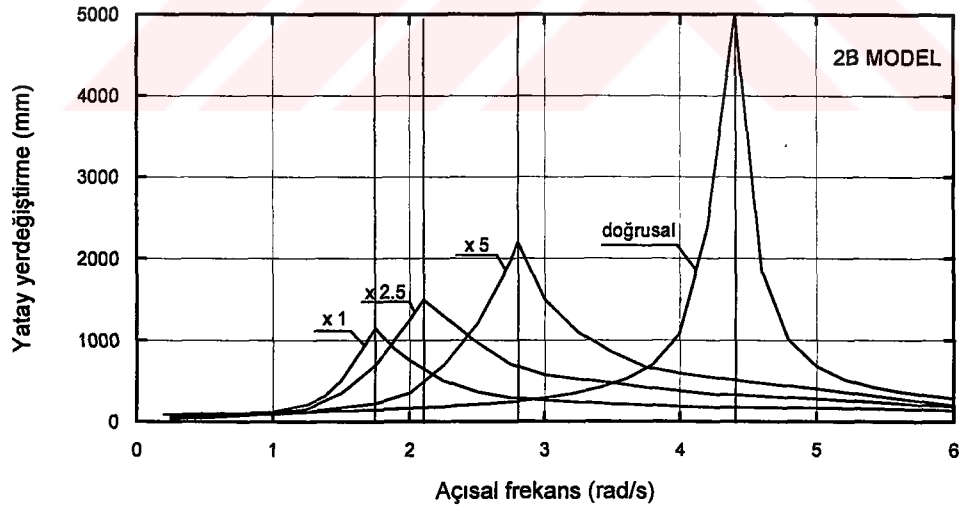


Şekil 6.39 2B modelde sönümsüz, doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle en büyük yatay, düşey yerdeğiştirme ve gerilmelerin kararlı zorlama açısal frekansı ile değişimi
 $(\omega_1 = 4.4 \text{ rad/s}, \omega_2 = 6.8 \text{ rad/s}, \omega_3 = 7.9 \text{ rad/s}, \omega_4 = 8.8 \text{ rad/s}, \omega_5 = 9.8 \text{ rad/s}$
 $\omega_6 = 11.4 \text{ rad/s}, \omega_7 = 12.2 \text{ rad/s}, \omega_8 = 13.2 \text{ rad/s}, \omega_9 = 13.8 \text{ rad/s}, \omega_{10} = 15.4 \text{ rad/s})$



Şekil 6.40 1B modelde sönümsüz, elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle referans şekil değişirmesi (γ_r) 'nin değişik değerleri için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin kararlı zorlama açısai frekansı ile değişimi

($\omega_{1(0.002)} = 1.83 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(0.005)} = 2.25 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(0.010)} = 3.0 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(\text{doğrusal})} = 4.8 \text{ rad/s}$)



Şekil 6.41 2B modelde sönümsüz, elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle referans şekil değişirmesi (γ_r) 'nin değişik değerleri için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin kararlı zorlama açısai frekansı ile değişimi

($\omega_{1(x1)} = 1.8 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(x2.5)} = 2.1 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(x5)} = 2.8 \text{ rad/s}$, $\omega_{1(\text{doğrusal})} = 4.4 \text{ rad/s}$)

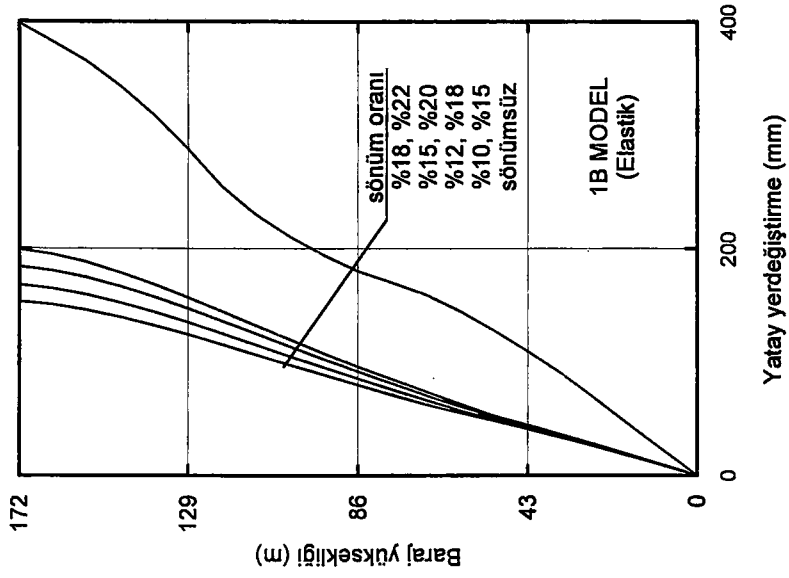
Referans şekil değiştirmesinin verilen değerleri için birinci açısal frekanslar sırasıyla, 1.8 rad/s (0.28 1/s), 2.1 rad/s (0.33 1/s), 2.8 rad/s (0.45 1/s) ve 4.4 rad/s (0.70 1/s) şeklinde ortaya çıkmıştır. Şekil 6.41’de (x 1) olarak verilen eğrideki birinci periyodun değeri ($\omega_1 = 1.8$ rad/s, $T_1 = 3.49$ s) ile Şekil 6.29’da verilen yatay yerdeğiştirme-zaman eğrisindeki tekrarlama periyodu ($T_1 \approx 3.45$ s) karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

6.6.2 Sönüm Oranı

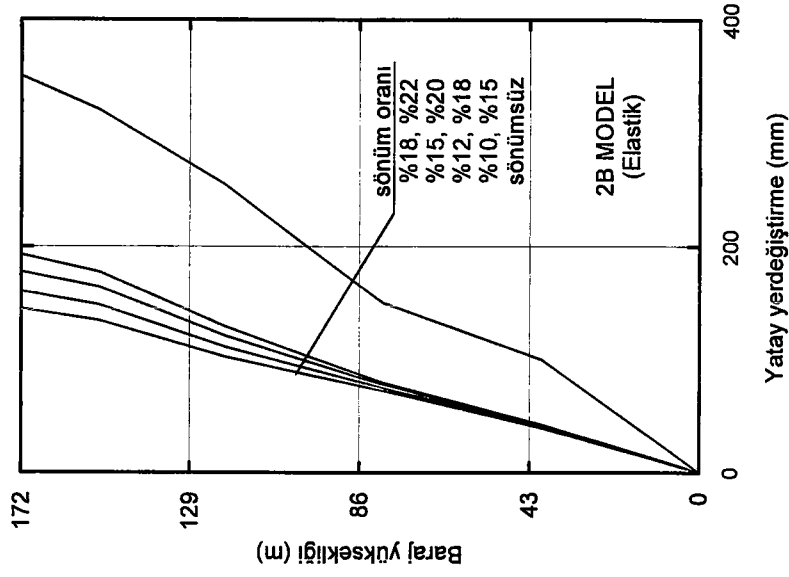
Sönüm oranının dinamik büyüklükler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla da parametrik bir çalışma yapılmıştır. Yapıya yer hareketi olarak, 13 Mart 1992 Erzincan Depremi düzeltilmiş ivme değerleri uygulanmıştır (Şekil 6.4). Bu yer hareketi altında, belirlenen değişik sönüm oranlarında (% olarak 10-15, 12-18, 15-20 ve 18-22) baraj yüksekliğince oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmelerin zarfları elde edilerek, eğriler şeklinde sunulmuştur. Burada, sönüm oranı olarak verilen her bir sayı çiftinin birinci değeri birinci moddaki sönüm oranını ve ikinci değeri ise ikinci moddaki sönüm oranını göstermektedir. Bu değerlerle 3.26 denkleminde orantılı sönüm matrisi katsayıları belirlenerek analizlere dahil edilmektedir.

Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle, 1B sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar Şekil 6.42’de, 2B sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar da Şekil 6.43’de verilmiştir. Beklendiği gibi sönüm oranının artması ile yerdeğiştirme değerleri azalmakta, diğer bir ifade ile sönüm oranının azalmasıyla yerdeğiştirmeler artmaktadır. Her iki modelde de sönüm oranında yapılacak %5 lik bir azaltma yerdeğiştirmeleri yaklaşık %20 oranında arttırmaktadır.

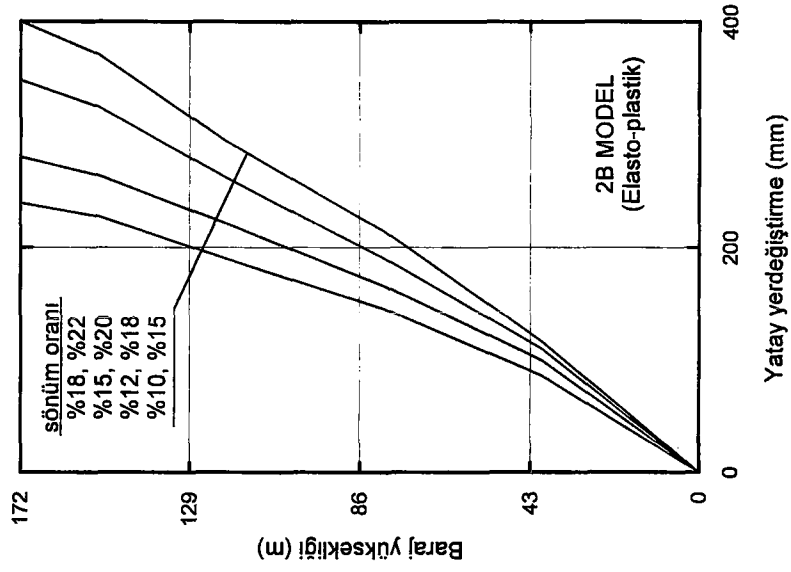
Elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle, 1B sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar Şekil 6.44’de, 2B sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar ise Şekil 6.45’de verilmiştir. Her iki modelde de sönüm oranında yapılacak %5 lik bir azaltma yerdeğiştirmeleri yaklaşık %40 oranında arttırmaktadır. Elastik ile elasto-plastik malzeme davranışından ortaya çıkan yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılmasından, her iki davranış arasında Bölüm 6.5’de belirlenen 1B modelde 1.0/1.70, 2B modelde 1.0/1.75 oranlarının varolduğu görülmektedir.



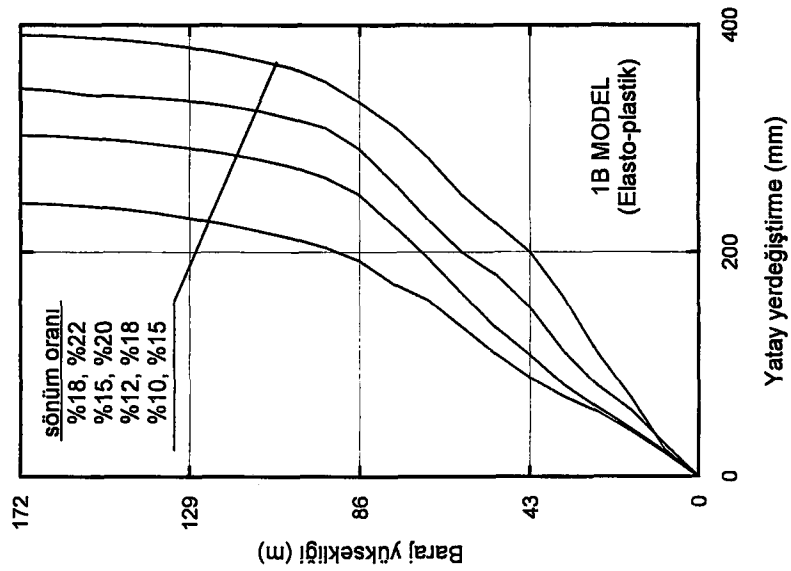
Şekil 6.42 Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle, 1B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının sönüm oranı ile değişimi



Şekil 6.43 Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle, 2B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının sönüm oranı ile değişimi



Şekil 6.45 Elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle, 2B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının sönüm oranı ile değişimi

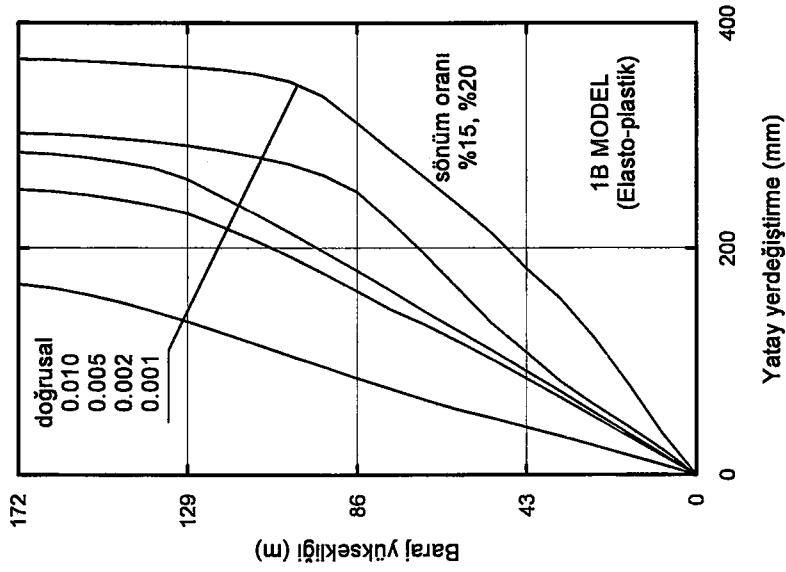


Şekil 6.44 Elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle, 1B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının sönüm oranı ile değişimi

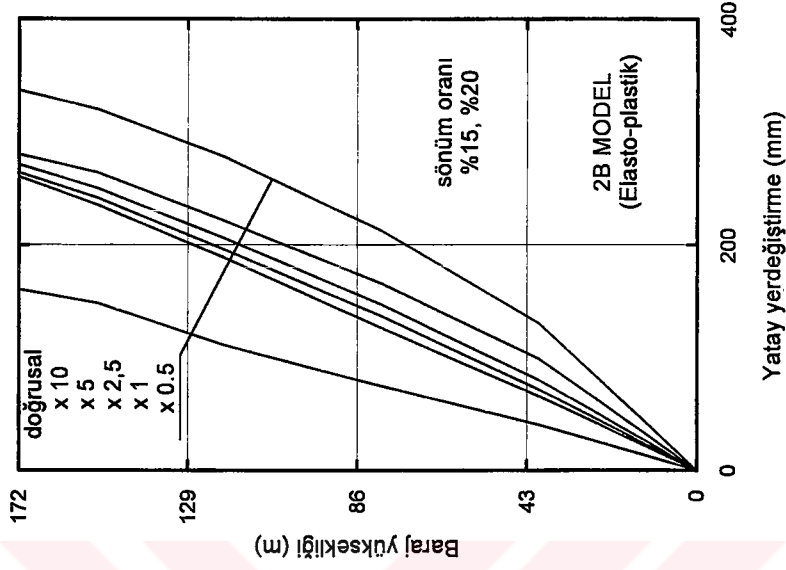
6.6.3 Referans Şekil Değiştirmesi

Referans şekil değiştirmesinin barajın dinamik davranışı üzerindeki etkisini görmek amacıyla Atatürk Barajı'na ait büyüklükler ve γ_r nin farklı değerleri için çözümler elde edilmiştir. Sönüm için Bölüm 6.5'de belirlenen %15, %20 oranları ve Şekil 6.4'de verilen ivme değerleri kullanılmıştır.

Bir boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak, referans şekil değiştirmesinin 0.002, 0.005, 0.010 ve 2.0 (doğrusal davranış) değerleri için, baraj yüksekliğince yatay yerdeğiştirme zarflarının değişimi şeklinde çözümler elde edilmiş ve Şekil 6.46'da sunulmuştur. Benzer değişimler iki boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak, Şekil 6.21'de verilen referans şekil değiştirmeleri setinin 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 ve 1000.0 (doğrusal davranış) katları için, baraj yüksekliğince yatay yerdeğiştirme zarflarının değişimi şeklinde çözümler elde edilmiş ve Şekil 6.47'de sunulmuştur. En büyük yerdeğiştirmelerin 1B boyutlu modelde barajın üst yarısında olduğu, 2B modelde ise baraj yüksekliğince hemen hemen doğrusal değiştiği görülmektedir. Her iki modelde de baraj tepe noktasında elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin hemen hemen aynı değerlerde olması 1B incelemenin bazı durumlarda yeterli yaklaşıklığı vereceğini göstermektedir.



Şekil 6.46 Elasto-plastik malzeme davranış kabuğuyla, 1B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının referans birim şekil değişimi (γ_r) ile değişimi



Şekil 6.47 Elasto-plastik malzeme davranış kabuğuyla, 2B modelde baraj yüksekliğince elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme zarflarının referans birim şekil değişimi (γ_r) ile değişimi

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, toprak veya kaya dolgu tipinde inşa edilen barajların deprem gibi dinamik ve tekrarlı yükler altındaki doğrusal elastik ve elasto-plastik davranışı incelenmiştir. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Baraj gövdesi ayrı ayrı bir boyutlu ve iki boyutlu sonlu elemanlarla modellenerek sayısal çözümler elde edilmiştir. Bu çözümlerde, baraj malzemesinin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranışı gözönünde bulundurulmuştur.

Sonuçların değerlendirilmesi ve karşılaştırmalar dört grupta ele alınmış;

1. 1B sonlu eleman modelinde; doğrusal elastik ile elasto-plastik malzeme davranışı kabulünden elde edilen sonuçlar,
 2. 2B sonlu eleman modelinde; doğrusal elastik ile elasto-plastik malzeme davranışı kabulünden elde edilen sonuçlar,
 3. Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulüyle; 1B ile 2B sonlu eleman modellerinden elde edilen sonuçlar,
 4. Elasto-plastik malzeme davranışı kabulüyle; 1B ile 2B sonlu eleman modellerinden elde edilen sonuçlar
- karşılaştırılmıştır.

Bir boyutlu sonlu eleman modelinde, baraj gövdesi değişken kesitli, bir boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Sayısal çözümler, elastik ve elasto-plastik zemin davranışı için ayrı ayrı yapılmıştır. Baraj malzemesinin çevrimsel elasto-plastik davranışı için hiperbolik zemin modeli kullanılmıştır. Bu modelde, elasto-plastik kayma modülü, baraj gövdesinde oluşan şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak azalmakta veya artmaktadır. Elasto-plastik modülü belirleyen akma yüzeyinin bulunması için Mises akma kriteri kullanılmıştır. Sayısal çözümlerde yer hareketi olarak 13 Mart 1992 Erzincan depremi düzeltilmiş D-B ivme bileşeni kullanılmıştır.

Her iki davranışa ait baraj gövdesinde oluşan yerdeğiştirmeler, şekil değiştirmeler, kayma gerilmeleri ve ivmelerin zamanla değişimleri elde edilerek grafiklerle gösterilmiştir. Bunun yanında elasto-plastik davranışta seçilen elemanlara ait kayma gerilmeleri ile kayma şekil değiştirmelerinin zaman içindeki izi belirlenerek grafikler şeklinde sunulmuştur.

Bir boyutlu modelde, elasto-plastik davranışta, kayma modülünün şekil değiştirmelere bağlı olarak azalması, buna bağlı olarak zeminin daha kolay şekil değiştirme yapmasından dolayı yerdeğiştirmeler artmaktadır. Konu ile ilgili parametrelerin gözönüne alınan sayısal değerleri çerçevesinde elastik davranışa göre, plastik davranışta sistem daha kolay şekil değiştirebilir duruma geldiği için yerdeğiştirmeler yaklaşık %70 artarken, kayma gerilmeleri yaklaşık %33 azalmaktadır. En büyük ivme değeri ise elastik davranışta, plastik davranışa göre yaklaşık %100 artarak ortaya çıkmaktadır.

İki boyutlu sonlu eleman modelinde baraj gövdesi düzlem şekil değiştirme problemi olarak ele alınmış ve üç düğüm noktalı, üçgen sonlu elemanlarla modellenmiştir. Sayısal çözümler ayrı ayrı doğrusal elastik ve elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile yapılmıştır. Sayısal çözümlerde, yer hareketi olarak 13 Mart 1992 Erzincan depremi dzeltilmış D-B ivme bileşeni yatay doğrultuda, dzeltilmış düşey ivme bileşeni de düşey doğrultuda eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Bu modelde de baraj malzemesinin çevrimsel elasto-plastik davranışı hiperbolik zemin modeli kullanılarak modellenmiş, elasto-plastik modülü belirleyen akma yüzeyinin bulunması için de Mises akma kriteri kullanılmıştır. Her iki malzeme davranışına ait baraj gövdesinde oluşan yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin, normal ve kayma gerilmelerinin, şekil değiştirmelerin ve ivmelerin zamana bağlı değişimleri elde edilerek grafikler şeklinde sunulmuştur. Ayrıca, elasto-plastik davranışta seçilen elemanlara ait kayma gerilmeleri ile kayma şekil değiştirmelerinin zaman içindeki izi belirlenerek grafiklerle sunulmuştur.

İki boyutlu modelde, elastik davranışa göre elasto-plastik davranışta baraj gövdesi daha kolay şekil değiştirebilir duruma geldiği için elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme yaklaşık %75, en büyük düşey yerdeğiştirme yaklaşık %135 artmakta,

en büyük kayma gerilmesi de yaklaşık %60 azalmaktadır. Yatay doğrultuda ivmeler baraj tabanına göre, elastik davranışta yaklaşık %100, elasto-plastik davranışta yaklaşık %33 arttığı görülmektedir. Düşey doğrultuda elde edilen ivme değerleri ise her iki davranışta da baraj tabanına göre yaklaşık %50 artmaktadır. Baraj kretinde elasto-plastik davranıştan hesaplanan yerdeğiştirme artarken en büyük yatay ivme değeri, elastik davranışa göre yaklaşık %50 azalmakta, düşey ivme değeri ise değişmemektedir.

Doğrusal elastik malzeme davranışı kabulü ile, 1B ve 2B model çözümlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, baraj kretinde hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin etkilenmediği, hemen hemen aynı sonuçların alındığı görülmektedir. Bu da pek çok durumda bir boyutlu yaklaşımın yeterli sonuç vereceğine işaret etmektedir. Bir boyutlu çözümde malzeme davranışını daha gerçekçi kabul etmenin, iki boyutlu davranışta geometriyi daha gerçekçi, malzeme davranışını daha az karmaşık kabul etmenin yeterli olabileceği görülmektedir. Kayma gerilmeleri için, 1B modelde, baraj gövdesi belirli yükseklikte tek bir elemanla temsil edildiğinden bir karşılaştırma yapılamamıştır. Bununla birlikte her iki modelde de baraj tabanındaki gerilmelerin büyüklükleri aynı mertebelerde olduğu görülmektedir. Baraj tepe noktasında elde edilen yatay ivme değerleri ise 1B modelde, 2B modele göre, yaklaşık %33 daha büyük ortaya çıkmaktadır.

Elasto-plastik malzeme davranışı kabulü ile, 1B ve 2B model çözümlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, baraj kretinde hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin etkilenmediği, en büyük yatay yerdeğiştirmenin yaklaşık 300 mm civarında olduğu görülmektedir. Yatay yöndeki en büyük ivme değeri her iki modelde de 0.4 g mertebesinde ortaya çıkmaktadır. Bu durum da yine bir boyutlu incelemenin pek çok durumda yeterli yaklaşıklık vereceğine işaret etmektedir.

Ayrıca, her iki modelde de temel davranış eğrisinde sönümü ve doğrusal davranıştan ayrılmayı belirleyen referans birim şekil değiştirme değerinin elasto-plastik davranış üzerinde önemli rol oynadığı yapılan parametrik çalışmadan görülmektedir. Referans birim şekil değiştirme değeri küçüldükçe temel davranış eğrisi daha yatık hale

gelmekte ve elasto-plastik modül daha hızlı azalmaktadır. Yapının açısıl frekanslarının referans birim şekil değiştirmesi ile değişimi göstermiştir ki mazeme davranış eğrisinin biçiminin değişmesi yapının tüm davranışını değiştirmektedir.

Bu çalışmanın kapsamı içinde, Atatürk Barajı'nın çevrimsel elasto-plastik deprem davranışını belirlemek için yapılan sonlu eleman çözümleri ile arazide yapılan ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması düşünülmüştü. Ancak Atatürk Barajı için bu türden sağlıklı arazi dataları elde edilememiştir. DSİ Genel Müdürlüğü, Atatürk Barajı'na gövde dolgusu sırasında yerleştirilen ölçüm cihazları ve data iletim hatlarının, gövde inşaatı bitimine yakın oluşan aşırı oturma ve yerdeğiştirmelerden etkilenecek işlevini yitirdiğini ve bu türden bilgilerin alınamadığını bildirmiştir. Bu nedenle yerinde yapılan ölçümlerle bilgisayar çözümlerinin karşılaştırılması ve bu yolla modellerin hassasiyetinin belirlenmesi yapılamamıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar kendi arasında değerlendirilmiş ve diğer araştırmacıların verdiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Yapılan karşılaştırmalardan varılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Projelendirme safhasında yapılacak ön boyutlandırmalarda kullanmak amacı ile, baraj gövdesinin sönümsüz serbest titreşim frekanslarını belirlemek, baraj kretinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin, ivmelerin ve baraj tabanındaki gerilmelerin büyüklüklerini belirlemek için bir boyutlu kayma kirişi modeli kullanılabilir.

Baraj genişliğinin baraj yüksekliğine oranı dörtten büyük ($B/H > 4$) olduğu hallerde bir boyutlu kayma kirişi modelinden elde edilen sonuçların, yerinde yapılan titreşim deneyleri ve deprem sırasında alınan kayıtlarla uyumlu olduğu, belirtilmektedir [12,13,17,24,48,50]. $B > 4H$ olması halinde şekil değiştirme durumuna kayma gerilmeleri hakim olmakta iken, $B < 4H$ durumunda ise eğilme gerilmeleri (basınç ve çekme) hakim duruma geçmektedir. Bu nedenle, B/H oranı küçüldükçe kayma kirişi kabulü uygun sonuçlar vermeyeceği söylenebilir.

2. Bir boyutlu kayma kiriş modelinde, baraj gövdesini oluşturan değişik bölgelerin malzeme özellikleri, bu bölgelerin alanlarının bir ağırlıklı ortalamasından hareketle eşdeğer bir bölgeye dönüştürülmektedir. Böylece daha az sayıda eleman ve parametrenin belirlenmesine ihtiyaç duyulmakta, hesap zamanı ve hesap zorluğu azalmaktadır. Bu durumda malzeme davranışını daha gerçekçi belirleme imkanı ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber, baraj gövdesinin belirli bir tabakası bir tek elemanla temsil edildiğinden elde edilen değer de bütün tabaka için geçerli olacağı unutulmamalıdır. Dolayısı ile bu yöntemle, baraj genişliğince oluşacak farklı etkileri incelemek mümkün olmamaktadır.
3. Baraj gövdesini oluşturan bölgelerin ve konumuna göre herbir elemanın malzeme özelliklerinin ayrı ayrı analizlere dahil edilmesine imkan veren iki boyutlu elasto-plastik sonlu eleman modeli projelendirme safhalarının ileri adımlarında etkili bir şekilde kullanılabilir.
4. Bir ve iki boyutlu modellere göre çok daha karmaşık, daha fazla parametrenin belirlenmesi, etkisinin değerlendirilmesi ve daha uzun çözüm zamanları gerektiren üç boyutlu analizler yerine (baraj boyutları ile ilgili şartlar sağlanıyor ise) problem bir düzlem şekil değiştirme problemi olarak ele alınıp, iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak analiz edilebilir. Pek çok araştırmacı tarafından iki boyutlu modeller ile yapılan analizlerin yeterli yaklaşımı sağladığı belirtilmektedir [4,20,24,30].
5. Dar veya üçgen biçimli vadilere oturan barajların deprem davranışının belirlenmesi için üç boyutlu modellerin kullanılması tavsiye edilmektedir [4,20,24,26,27,30,31].
6. Elasto-plastik davranışta yapının titreşim frekansları, yerdeğiştirme, şekil değiştirme, gerilme ve ivme değerleri elastik davranışa göre önemli ölçüde değişmektedir. Bu nedenle zeminin (baraj malzemesi) gerçek davranışını daha iyi yansıtan çevrimsel elasto-plastik zemin modelinin mutlaka göz önünde bulundurulması önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada incelenen konulara ilave olarak aşağıda ana başlıkları verilen konularda ileri çalışmalar sürdürülebileceği düşünülmektedir:

- 1B ve 2B modellerde baraj gövdesinin rijit bir temele oturduğu kabul edilmiştir. Daha gerçekçi olan, baraj gövdesinin oturduğu zeminin etkilerinin de hesaplara dahil edilebildiği yapı-zemin etkileşimi incelenebilir.
- Bu çalışmada, her iki modelde de baraj haznesindeki suyun etkisi gözönüne alınmamıştır. Haznede ki suyun etkilerinin de dikkate alındığı yapı-sıvı etkileşimi incelenebilir.
- Yukarıda belirtilen her iki etkinin de bir arada ele alındığı yapı-sıvı-zemin etkileşimi incelenebilir.
- Yapılan analizlerde, yapının sönümü için kütle ve rijitlik matrisleri ile orantılı bir viskoz sönüm tanımlanmıştır. Yapı sönüm oranını şekil değiştirmelere bağlı olarak tanımlayıp değişken sönümün etkileşimi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **ÖZKAN, M.Y. YELKEN, S.,** Kurtboğazı Barajı Dinamik Analizi, Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu, İzmir, sf. 23-35, (1993)
- [2] **ERKEN, A., ANSAL, A.,** Toprak Dolgu Barajlarda Sıvılaşma Nedenleri, Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu, İzmir, pp. 1-10, (1993)
- [3] **SEED, H.B., IDRIS, I.M., LEE, K.L., MAKDISI, F. I.,** Dynamic Analysis of the Slide in the Lower San Fernando Dam During the Earthquake of February 9, 1971, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, Sept., pp. 889-911, (1975)
- [4] **MEJIA, L.H., SEED, H.B., LYSMER, J.,** Dynamic Analysis of Earth Dams in Three Dimensions, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.108, No.12, Dec., pp. 1586-1604, (1982)
- [5] **MAKDISI, F.I., SEED, H.B.,** Simplified Procedure for Evaluating Embankment Response, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.105, No.12, Dec., pp. 1427-1434, (1979)
- [6] **IDRIS I.M., SEED, H.B.,** Seismic Response of Horizontal Soil Layers, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.94, No.4, Jul., pp. 1003-1031, (1968)
- [7] **VRYMOED, J.,** Dynamic FEM Model of Oroville Dam, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.107, No.8, Aug., pp. 1057-1077, (1981)
- [8] **GAZETAS, G.,** Longitudinal Vibrations of Embankment Dams, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.107, No.1, Jan., pp. 21-40, (1981)
- [9] **ABDEL-GHAFFAR A.M., KOH, A.-S.,** Longitudinal Vibration of Non-Homogeneous Earth Dams, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.9, No.3, pp. 279-305, (1981)
- [10] **ABDEL-GHAFFAR A.M., KOH, A.-S.,** Earthquake-Induced Longitudinal Strain and Stresses in Non-Homogeneous Earth Dams, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.9, pp. 521-542, (1981)

- [11] **DAKOULAS, P., GAZETAS, G.**, Seismic Shear Vibration of Embankment Dams in Semi-Cylindrical Valleys, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, No. 14, pp. 19-40, (1986)
- [12] **ABDEL-GHAFFAR A.M., SCOTT, R.F.**, Shear Moduli and Damping Factors of Earth Dam, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.105, Dec., pp. 1405-1426, (1979)
- [13] **ELGAMAL, A.-W.M.**, Shear Hysteretic Elasto-Plastic Earthquake Response of Soil Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.20, pp. 371-387, (1991)
- [14] **PREVOST, J.H., KEANE, C.M.**, Multimechanism Elasto-Plastic Model for Soils, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.116, No.9, Sep., pp. 1924-1944, (1990)
- [15] **PREVOST, J.H., KEANE, C.M.**, Shear Stress-Strain Curve Generation From Simple Material Parameters, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.116, No.8, Aug., pp. 1255-1263, (1990)
- [16] **ELGAMAL A.-W.M.**, SHEER: A Nonlinear Elasto-plastic Program for Computation of 1-Dimensional Shear Beam/wedge Dynamic/Earthquake Response, Research Report Rensselaer Polytechnic Institute, Department of Civil Engineering, Troy, NY, Feb., (1989)
- [17] **PREVOST, J.H., ABDEL-GHAFFAR, A.M., ELGAMAL, A.M.**, Nonlinear Hysteretic Dynamic Response of Soil Systems, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.111, No.5, pp. 696-713, (1985)
- [18] **PYKE, R.**, Nonlinear Soil Models for Irregular Cyclic Loadings, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.105, No.6, Jun., pp. 715-726, (1979)
- [19] **SCHULTZE, E., TAUSEN, G.**, A Common Stress-Strain-Relationship for Soils, *Proceedings of the ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo*, Vol.1, pp. 277-280, (1977)
- [20] **ELGAMAL, A.-W.M., ABDEL-GHAFFAR A.M., PREVOST, J.H.**, 2-D Elasto-plastic Seismic Shear Response of Earth Dams: Theory, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.113, No.5, May., pp. 689-701, (1987)
- [21] **PREVOST, J.H.**, Anisotropic Undrained Stress-Strain Behaviour of Clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.104, No.8, Aug., pp. 1075-1090, (1978)
- [22] **SCOTT**, Plasticity and Constitutive Relation in Soil Mechanics, *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.111, No.5, pp. 563-605, (1985)

- [23] **ELGAMAL, A.-W.M.**, Three-Dimensional Seismic Analysis of La Villita Dam, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.118, No.12, Dec., pp.1937-958, (1992)
- [24] **PREVOST, J.H., ABDEL-GHAFFAR, A.M. LACY, S.J.**, Nonlinear Dynamic Analysis of an Earth Dam, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.111, No.7, Jul., pp. 882-897, (1985)
- [25] **PREVOST, J.-H.**, DYNAFLOW: A Nonlinear Transient Finite Element Analysis Program, Report 81-SM-1, Princeton University, Princeton, NJ, Jan., (1981)
- [26] **ABDEL-GHAFFAR A.M., ELGAMAL A.-W.M.**, Elasto-Plastic Seismic Response of 3-D Earth Dams: Theory, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.113, No.11, Nov., pp. 1293-1308, (1987)
- [27] **ABDEL-GHAFFAR A.M., ELGAMAL A.-W.M.**, Elasto-Plastic Seismic Response of 3-D Earth Dams: Application, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.113, No.11, Nov., pp. 1309-1325, (1987)
- [28] **HATANAKA, M.**, Fundamental Considerations on the Earthquake Resistant Properties of the Earth Dam, Bulletin No. 11, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan, (1955)
- [29] **AMBRASEYS, N.N.**, On the Shear Response of a Two Dimensional Wedge Subjected to an Arbitrary Disturbance, *Bulletin of the Seismological Society of Amerika*, Vol. 50, Jan., pp. 45-56, (1960)
- [30] **MEJIA, L.H., SEED, H.B.**, Comparison of 2-D and 3-D Dynamic Analyses of Earth Dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.109, No.11, Nov., pp. 1383-1398, (1983)
- [31] **ABDEL-GHAFFAR A.M., KOH, A.-S.**, Three Dimensional Dynamic Analysis of Nonhomogeneous Earth Dams, *Earthquake Engineering Conference*, Southampton, pp. 681-704, (1982)
- [32] **DURGUNOĞLU, T., YAZICIOĞLU, A.**, Kaya Dolgu Barajlarda Gerilme ve Deformasyon Hesabına Ait Bir Uygulama, *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu*, İzmir, sf. 123-138, (1993)
- [33] **LEE, K.L., IDRIS, I.M.**, Static Stresses by Linear and Nonlinear Methods, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101, Sept., pp. 871-887, (1975)
- [34] **ÖZKAN, Y., ERDİK, M., TUNÇER, M.A., YILMAZ, Ç.**, An Evaluation of Sürge Dam Response During 5 May 1986 Earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp.1-10, (1996)

- [35] **ELGAMAL, A.-W.M., GUNTURI, R.V.**, Dynamic Behaviour and Seismic Response of El Infiernillo Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.22, pp. 665-684, (1993)
- [36] **HARDIN, B.O., DRNEVICH, V.P.**, Shear Modulus and Damping in Soils; Design Equations and Curves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.98, No.SM7, July, pp. 667-692, (1972)
- [37] **MARTIN, P.P, SEED, H.B.**, One Dimensional Dynamic Ground Resposns Analysis, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.108, pp. 935-952, (1982)
- [38] **MARTIN, P.P., SEED, H.B.**, MASH: A Computer Program for the Non-linear Analysis of Vertically Propagating Shear Waves in Horizontally Layered Deposits, Report No. EERC 78-23, University of California, Berkeley, (1978)
- [39] **STREETER, V.L., WYLIE, E.B., RICHART, F.E., CHARSOIL:** Characteristic Method Applied to Soil, National Information Service for Earthquake Engineering, University of California, Berkeley, (1974)
- [40] **SCHANABEL, P.B., LYSMER, J., SEED, H.B.**, SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, Dec., (1972)
- [41] **IDRISS I.M., SEED, H.B.**, Response of Earth Banks During Earthquakes, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.93, No.3, May., pp. 61-82, (1967)
- [42] **HAHN, H.G.**, Methode der Finiten Elemente in der Festigkeitslehre, Akademische Verlagsgesellschaft, Wisbaden, (1982)
- [43] **REDDY, J.N.**, An Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill International Edition, Singapore, (1993)
- [44] **ZIENKIEWICZ, O.C.**, The Finite Element Method, McGraw Hill Publishing Co., London, (1977)
- [45] **PETYT, M.**, Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Press, Cambridge, (1990)
- [46] **PRISCU, R., POPOVICI, A.,STEMATIU, D., STERE, C.**, Earthquake Engineering for Large Dams, John Wiley and Sohns,(1985)
- [47] **ABDEL-GHAFFAR A.M., SCOTT R.F.**, Comparative Study of Dynamic Response of Earth Dam, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.107, No.3, Mar., pp. 271-286, (1981)

- [48] **ELGAMAL, A.-W.M., ABDEL-GHAFFAR A.M., PREVOST, J.H.**, Elasto-Plastic Earthquake Shear-Response of One-Dimensional Nonhomogeneous Earth Dam Models, *Journal Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.13, No.5, pp. 617-633, (1985)
- [49] **ELGAMAL, A.-W.M., ABDEL-GHAFFAR A.M., PREVOST, J.H.**, 2-D Elastoplastic Seismic Shear Response of Earth Dams: Applications, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.113, No.5, May., pp. 702-719, (1987)
- [50] **MAKDISI, F.I., KAGAWA, T., SEED, H.B.**, Seismic Response of Earth Dams in Triangular Canyons, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.108, No.10, Oct., pp. 1328-1337, (1982)
- [51] **ABDEL-GHAFFAR, A.M., SCOTT, R.F.**, Analysis of Earth Dam Response to Earthquakes, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.105, Dec., pp. 1379-1404, (1979)
- [52] **PRATO, C.A., DELMASTRO, E.**, 1-D Seismic Analysis of Embankment Dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.113, No.8, Aug., pp. 904-909, (1987)
- [53] **SEED, H.B., LYSMER J., HWANG, R.**, Soil-Structure Interaction Analysis for Seismic Response, *Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE*, Vol.101, No.5, May., pp. 439-457, (1975)
- [54] **SAGASETA, C., CUELLAR, V., PASTOR, M.**, Cyclic Loading, Deformation of Soils and Displacements of Structures, Vol.3, pp. 981-999, (1991)
- [55] **BEER, F.P., JOHNSTON, E.R.**, *Mechanics of Materials*, (1989)
- [56] **CHAKRABARTY, J.**, *Theory of Plasticity*, McGraw Hill Book Co., Singapore, (1988)
- [57] **PREVOST, J.H., HÖEG, K.**, Effective Stress-Strain-Strength Model for Soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101, No.3, pp. 259-278, (1975)
- [58] **DRNEVICH, V.P.**, Constrained and Shear Moduli for Finite Elements, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101, No.5, May., pp. 459-473, (1975)
- [59] **RICHART, F.E.**, Some Effects of Dynamic Soil Properties on Soil-Structure Interaction, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101, No.12, Dec., pp. 1197-1239, (1975)
- [60] **CELEP, Z., KUMBASAR, N.**, Örneklerle Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş, Sema Matbaacılık, İstanbul, (1992)

- [61] **KARAMAN, N.**, Atatürk Barajı Gövde dolgusunda Oluşan Oturmaların İncelenmesi, Dolgu Barajlar yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu, DSİ Genel Müd., İzmir, sf.109-122, (1993)
- [62] **McKENZIE, D.D.**, Active Tectonics of the Mediterranean Region, Geophys. J.Royal Astr., 30, pp.109-120, (1972)
- [63] **ÖNER, M., YILMAZ, Ç., ERDİK, M., ERTUĞRUL, M.E.**, Earthquake Response Analyses for Atatürk Dam Embankment, Report No. EERI 79-07 Middle East Technical University Earthquake Engineering Research Institute, Ankara, (1979)
- [64] **ELECTROWATT ENGINEERING LTD.**, Atatürk Dam and Hydroelectric Powerplant Design Report, Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources General Directorate of State Hydraulic Works, Ankara, (1979)
- [65] **SCHNABEL, P. B., SEED, H.B.**, Accelerations in Rock for Earthquakes in the Western United States, BSSA, Vol.63, No.2, Apr, pp. 501-516, (1973)
- [66] **GÜRPINAR, A.**, An Alternative to Peak Ground Accelerations as a Design Parameter, Sixth ECEE, Dubrovnik, Vol.1, pp. 219-226, (1978)
- [67] **ADINA** Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis, ADINA User Manuel, Adina R&D Inc., (1990)

ÖZGEÇMİŞ

1963 yılında Bolu'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini 1969-1980 yılları arasında Bolu'da tamamladı. 1980 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Sakarya Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1984 yılında mezun oldu. Yüksek lisans eğitimini İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde, 1985-1987 yılları arasında tamamladı. Doktora çalışmasına 1991 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği programında başladı. Haziran-Temmuz/1995 döneminde DAAD Bursu ile Leipzig Üniversitesi, Herder Enstitüsü'nde dil okuluna katıldı. Ekim/1996-Haziran/1997 tarihleri arasında TÜBİTAK'ın sağladığı Doktora Araştırma Bursu (NATO-A2) ile Technische Universität Berlin, Institut für Grundbau und Baubetrieb, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik'de misafir araştırmacı olarak bulundu. Halen Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisidir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

Yayınlanmış Bilimsel Eserleri:

- Celep, Z. ve Özcan, Z., (1992) "*Erzincan'daki Bir Betonarme Binanın Deprem Davranışının İncelenmesi*", 2.Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, sf. 491-498.
- Celep, Z. ve Özcan, Z., (1993) "*Erzincan'daki Bir Betonarme Caminin Deprem Davranışının İncelenmesi*", Teknik Dergi, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, Cilt 4, No.3, sf. 695-705.
- Özcan, Z. ve Celep, Z., (1994) "*Deprem Yükleri Altında Yatay Tabakalı Zeminlerin Elasto-Plastik Davranışı*", İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı IV. Sempozyumu, İstanbul, sf. 199-208.
- Özcan, Z. ve Celep, Z., (1995) "*Deprem Yükleri Altında Toprak Barajların Elasto-Plastik Davranışı*", 3.Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, sf.245-254.
- Gündüz, Z., Üçpırtı, H. ve Özcan, Z., (1995) "*Yapı Tasarımında Yerel Zemin Koşullarının Önemi*", III. Balıkesir Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu, Balıkesir.
- Özcan, Z., (1996) "*Zeminlerin Dinamik Davranışı ve Dinar Örneği*", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi, 24-25 Ekim 1996, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Özcan, Z., Üçpırtı, H., Savidis, S., Celep, Z., (1997) "*Dynamic response of soil layers in Dinar region during the Dinar Earthquake of October 1, 1995*", Eighth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20-24 July 1997, İstanbul, Turkey, pp.42-43.
- Üçpırtı, H., Özcan, Z., Önalp, Ö., Aydan, Ö., (1997) "*A three dimensional assessment of liquefaction susceptibility of Adapazarı region, Turkey*", Eighth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20-24 July 1997, İstanbul, Turkey, pp.136-137.
- Özcan, Z., (1997) "*Das dynamische Verhalten von Staudämmen unter Erdbebenwirkung*", Seminararbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Grundbau und Baubetrieb, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Berlin, Deutschland.