



**SONLU ELEMANLAR METODUNUN
KULLANILMASIYLA KARACAÖREN I
TOPRAK DOLGU BARAJINDA
GERİLME VE DEPLASMANLARIN
HESAPLANMASI**

Nuri Seçkin KAYIKÇI

**Yüksek Lisans Tezi
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA 2001**

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

SONLU ELEMANLAR METODUNUN KULLANILMASIYLA KARACAÖREN I TOPRAK DOLGU BARAJINDA GERİLME VE DEPLASMANLARIN HESAPLANMASI

Nuri Seçkin KAYIKÇI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 228 s., 2001.

Anahtar Kelimeler : Sonlu Elemanlar Metodu, Karacaören I barajı, Düzlem-zorlama, Düzlem-gerilme, Deplasman, Gerilme.

Sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmalar 1960'lı yıllarda başlamıştır. Çeşitli araştırmacılar bilgisayarlar yardımıyla sonlu elemanlar modellerini birçok yapıya uyarlamışlardır. Bu çalışmada Burdur il sınırları içerisindeki Karacaören I toprak dolgu barajına sonlu elemanlar modeli uygulanmış, iki ve üç boyutlu analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen neticeler değerlendirilmiş, daha önceleri çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilmiş sonuçlarla kıyaslama yapılmış ve bir sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Bugüne kadar yapılan araştırmalar farklı bilgisayar programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Sap 90 (1992) ve Sap 2000 v 7.4 (2001) bilgisayar programları kullanılarak dolgu baraj modellenmiştir. Gerilme ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen neticeler örnek alınan baraja aittir. Farklı kesitlere ve malzeme özelliklerine sahip barajlar için yine aynı analizlerin yapılması gereklidir. Sonlu elemanlar metodunun kullanılmasıyla yapılan literatürdeki ilk çalışmalar bir ve iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizde baraj gerek iki, gerekse üç boyutlu olarak incelenmiştir. Daha önceleri yapılan çalışmalardan elde edilen neticelere göre geniş vadilerde yapılan analizler için üç boyutlu modellerden deha kesin ve doğru neticeler alınmaktadır (Singh ve Varshney, 1995). Hesaplar lineer olarak farklı kesit uzunluklarına göre gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu analizlerde kabuk elemanı (shell), üç boyutlu analizlerde katı (solid) elemanlar kullanılmıştır. İki boyutlu analizlerde kabuk kalınlığı 1 m, 10 m ve 20 m alınırken, üç boyutlu analizlerde kesit uzunluğu 40 m, 60 m ve 120 m alınarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Araştırmanın ilk bölümlerinde konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar anlatılmış ve sonrasında metod ile ilgili teorik bilgilere yer verilmiştir. Metodun dolgu barajlar üzerindeki uygulanışı incelenmiş ve daha sonra tekrar kullanılan bilgisayar programları hakkında bilgiler açıklanmıştır. Bu bölümü takiben sonuçlar kısmında değerlendirmeler yapılmıştır.

İki boyutlu analizlerde 4 düğüm noktalı, üç boyutlu analizlerde 8 düğüm noktalı izoparametrik elemanlar kullanılmıştır. İki boyutlu analizler ve modellemeler düzlem-zorlama veya gerilme elastisite teorisine göre maksimum boyutlardaki en kesite uygulanmıştır.

Statik ve dinamik yüklemeler altında olası meydana gelebilecek yıkılma riskine karşın barajın davranışı incelenmiştir. Örnek deprem olarak 1976 yılında meydana gelen Çaldıran depremi spektrum değerleri kullanılmıştır. Üç yönde de spektrum değerleri elde edilmiş ve enine yönde etki açısı 45° alınmıştır. Örnek alınan spektrum eğrileri ve mod şekil numaralarına göre deforme olan gövde biçimi, deplasmanlar ve gerilmeler EK bölümünde sunulmuştur.

Hesaplamalarda beş ayrı frekans değeri düşünülmüştür. Baraj gövdesi üç değişik malzemedan meydana gelmiştir. Kabuk zonları kumlu çakıldan oluşurken, çekirdek kil ve temel kayası da konglomera türünden meydana gelmiştir. Temel malzemesi bütün noktalarda homojendir. Malzeme ile ilgili özellikler çeşitli kaynaklardan elde edilmiştir.

Hesaplamalarda ve sonuçların değerlendirilmesinde talveg kotu 00.00 olarak alınmıştır. Baraj 80 m yüksekliğe sahiptir. Vadi genişliği 400 m'dir. Temelde düğüm noktaları

arasındaki yatay mesafe ve düşeyde yine düğüm noktaları arasındaki mesafe 20'şer metre olmuştur.

İki boyutlu analizlerden elde edilen düşey deplasman değerleri ile üç boyutlu analizlerden elde edilen düşey deplasman değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Üç boyutlu analizlerde x ve y yönündeki boyuna ve yatay deplasman değerleri gerilmelerin (özellikle negatif değerli) maksimum olduğu noktalarda ve bölgelerde yine maksimum olarak gerçekleşmiştir. X ve y yönündeki gerilmeler memba ve mansap kabuk zonlarının çekirdek ile birleştiği yerlerde çekirdek içerisinde (00.00 ile +20.00 m kotları arası) ve yine çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında maksimum olarak gerçekleşmiştir. Düşey deplasmanlar (z yönünde) bütün analizlerde krette maksimum olarak meydana gelmiştir. Ayrıca kesit kalınlığının 120 m alınarak yapıldığı üç boyutlu analiz sonucuna göre kret profili iç bükey olmuş ve $x = 60$ m uzunluğunda pozitif değerli gerilmeler kret üzerinde meydana gelmiştir. Genelde iki farklı programdan elde edilen neticeler birbirleriyle uyum sağlamıştır.

Baraj gölündeki su seviyesi yarı yükseklikte düşünülmüş, fakat bu durum gerilme ve deplasman değerleri üzerinde fazla bir değişime sebep olmamıştır.

Temel rijit olarak dikkate alınmış ve gerilme ve deformasyon değerleri sıfır olarak gerçekleşmiştir. Fakat üç boyutlu olarak kesit kalınlığının 120 m alındığı durumda temel içerisinde deplasman ve gerilme değerleri aşırı yüklenme basıncından dolayı az da olsa gelişmiştir.

Krette en kesit üzerinde iç bükey profil meydana gelmiştir. Vadi geometrisini içeren 3 boyutlu analizler yine geniş vadilerde yer alan toprak dolgu barajlara uygulanabilmektedir ve günümüz bilgisayar teknolojisi ile bu yöntem ve karmaşık hesaplamalar mümkündür.

Jüri : Prof. Dr. Ali DOĞAN (Danışman)
Prof. Dr. Bülent TOPKAYA
Yrd. Doç. Dr. Hüsnü DEMİRPENÇE

CALCULATIONS OF DISPLACEMENTS AND STRESSES IN KARACAÖREN I EARTH-FILL DAM USING FINITE ELEMENTS METHOD

Nuri Seçkin KAYIKÇI

Civil Engineering Department, Master of Science Thesis, 228 p., 2001.

Key Words : Finite Elements Method, Karacaören I Earth-fill Dam, Plain-Strain, Plane-stress, Displacement, Stress.

Early studies related to finite elements method are begun in 1960. Computer aided finite elements analysis has been adopted to many structures by several researchers. In this study, finite elements models have been applied to Karacaören I embankment dam that is inside the border of Burdur city in mediterranean zone of Turkey. However two and three dimensional analysis have been performed, results were evaluated and compared with other results which were obtained in the past by several researchers and finally main results were analysed at the end of the study. Researchers have been realised their analysis with different computer programs early of 1960 and 1970. Present study, sample earth-fill dam was modelled by using sap 90 (1992) and sap 2000 v 7.4 (2001) computer programs. Obtained displacement and stress values in this study are only belongs to sample earth-fill dam. Same analysis must be performed for dams which have different sections and material properties. Using finite elements method early studies in literature were realised being one and two dimensional. In this study earth-fill dam was examined both two and three dimensional. Two dimensional analysis was considered by plane-strain elasticity theory. According to results which were obtained in the past, more accurate and definite results are being obtained from three dimensional analysis for analysis which are used for wide valleys (Singh and Varshney, 1995). Computations were made according to different section lengths being linear. Shell elements in two dimensional analysis and solid elements in three dimensional analysis were used. Although shell element's thicknesses were taken 1 m, 10 m and 20 m in two dimensional analysis, in three dimensional analysis section lengths were taken 40 m, 60 m and 120 m, hence obtained results from all of them were evaluated.

Within the initial chapters of the research, studies which have made in the past and related to the subject were explained and then in the third chapter theoretical informations related to method were described. Method's applications to earth-fill were explained and in the following chapter informations about the computer programs are described. At the end of the research stresses, deformations, deformed shapes of the body and stress distribution graphics were evaluated in the conclusion chapter.

In two dimensional analysis 4 noded isoparametric elements according to plane-stress or strain concept, in three dimensional analysis 8 noded isoparametric elements were used. Model was applied to maximum cross-section.

Dam's behaviour was examined using static, dynamic loading and both. Çaldıran earthquake in 1976 was used as a sample earthquake from which the obtained spectrum values were used in the calculations in order to understand any probable failure risk of the body. Spectrum values were obtained in three direction and excitation angle was 45^0 . Sample spectrum curves, deformations according to mode shape numbers, displacements and stresses were presented in appendix.

Five different frequencies were considered in the computations. Dam's body was occured by three different materials. Shell zones include sandy gravels, core includes clay material and foundation includes conglomerate rock formations. Foundation materials were dissipated homogeneous manner. Properties related to materials were obtained from different written sources.

In calculations, streambed elevation was 00.00. Dam height was 80 m as well. Valley width was 400 m. Distance between nodes in foundation and distance between nodes in vertical direction was 20 m.

Vertical displacement values obtained from two and three dimensional analysis are agreed to each other. At points and areas where the stress values are at maximum (especially negative results), longitudinal and horizontal displacement values are also realised at maximum at the same points and areas along x and y direction respectively according to three dimensional analysis. While S_{12} , S_{13} and S_{23} values be shear, S_{11} , S_{22} and S_{33} values are normal stresses. Stresses in x and y directions were realised being maximum at points where the shell zones are joined with core (between 00.00 and +20.00 elevations in the core) and upper corner points of the core trench. Vertical displacements (along z direction) were occurred as maximum at the crest according to all performed analysis. Besides, according to 120 m thick three dimensional analysis result, crest profile was concave down and at $x = 60$ m length, positive stress values were occurred on the crest. Generally values obtained from two different computer programs were agreed to each other.

Water level within the reservoir has been considered half of the maximum pool level but this situation was not caused any changes onb the stress and displacements values.

Foundation was considered as a rigid and therefore stress and displacement values were realised as zero. But according to situation that takes 120 m section length in three dimensional analysis, displacement and stress values were developed rarely in foundation due to overburden pressure.

At crest, on the cross-section, concave down profile was occurred. Three dimensional analysis including canyon geometry may be applied to earth-fill dams which are stayed in wide valley and with present computer technology, this process and complex computations are possible.

Jury : Prof. Dr. Ali DOĞAN (Advisor)

Prof. Dr. Bülent TOPKAYA

Assist. Prof. Dr. Hüsnü DEMİRPEŇE

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SONLU ELEMANLAR METODUNUN
KULLANILMASIYLA KARACAÖREN I
TOPRAK DOLGU BARAJINDA
GERİLME VE DEPLASMANLARIN
HESAPLANMASI**

NURİ SEÇKİN KAYIKÇI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ISPARTA, 2001

106-10

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne

Bu çalışma jürimiz tarafından İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ali DOĞAN

Ali Doğan

Üye : Prof. Dr. Bülent TOPKAYA

Bülent Topkaya

Üye : Yard. Doç. Dr. Hüsnü DEMİRPENÇE

Hüsnü Demirpençe

ONAY

Bu tez *3.11/2001* tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki
başkan ve jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

29.10/2001

S.D.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Adı Soyadı: Prof. Dr. Orhan AYDEMİR

İmza :

Orhan Aydemir

İÇİNDEKİLER

	sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	xii
SİMGELER DİZİNİ.....	xv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1 Dolgu barajların analizinde sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmalar.....	4
2.2 Üç boyutlu vadi geometrisi etkileri ve yapılan çalışmalar.....	7
2.3 Dolgu barajlar.....	8
3 MATERYAL VE METOT.....	11
3.1 Doğrusal olarak sonlu elemanlar metodunun kullanılması.....	11
3.1.1 Problemin kuvvetli ve klasik biçimi.....	12
3.1.2 Problemin zayıf ve değişken biçimi.....	13
3.1.3 Kuvvetli ve zayıf formların dengi, doğal sınır durumları.....	14
3.1.4 Galerkin yaklaşım metodu.....	15
3.1.4.1 Bubnov (Galerkin) metodu.....	15
3.1.5 Matris denklemleri, eğilmezlik matrisi K.....	16
3.2 İki ve üç boyutlu sonlu elemanlar metodu.....	19
3.2.1 Klasik doğrusal elastostatik: kuvvetli ve zayıf biçimleri.....	19
3.2.2 Klasik doğrusal ısı iletimi denklemleri.....	21
3.2.3 İki boyutlu doğrusal dörtgen eleman.....	22
3.2.4 İzoparametrik elemanlar.....	23
3.2.5 Üç boyutlu doğrusal eleman.....	23

3.2.6 Elemanın eğilmezlik formülasyonu.....	24
3.3 Plak ve kiriş yaklaşımları.....	26
3.3.1 Genel.....	26
3.3.2 Reissner-Mindlin plak teorisi.....	26
3.3.2.1 Genel denklem.....	26
3.3.2.2 Zorlama deplasman denklemleri.....	26
3.3.2.3 Virtüel iş denklemi.....	27
3.3.2.4 Zayıf biçim.....	27
3.3.2.5 Matris formülasyonu.....	27
3.3.2.6 Sonlu elemanlar eğilmezlik matrisi ve yük vektörü.....	27
3.3.3 Kirişlerin çözümü.....	29
3.3.3.1 Bileşim denklemi.....	29
3.3.3.2 Zorlama-deplasman denklemleri.....	29
3.3.3.3 Virtüel iş denklemi.....	30
3.3.3.4 Zayıf biçim.....	30
3.3.3.5 Virtüel iş denkleminin matris formülasyonu.....	31
3.3.3.6 Sonlu elemanlar eğilmezlik matrisi ve yük vektörü.....	32
3.3.4 Kabuk elemanları.....	33
3.3.4.1 İndirgenmiş bileşim denklemleri.....	33
3.3.4.2 Zorlama-deplasman matrisi.....	33
3.3.4.3 Eğilmezlik matrisi.....	33
3.3.4.4 Harici kuvvet vektörleri.....	34
3.3.4.4.1 Gövde kuvveti.....	34
3.3.4.4.2 Yüzey kuvveti.....	34
3.3.5 Parabolik, hiperbolik ve eliptik öz değer problemleri.....	34
3.3.5.1 Parabolik durum.....	34
3.3.5.2 Hiperbolik durum: Elasto dinamik ve yapısal dinamik.....	36
3.3.5.3 Öz değer problemleri.....	38
3.3.5.3.1 Kütle matrisi.....	38

3.3.6 Öz değer problemlerinde çözüm teknikleri.....	38
3.3.6.1 Genelleştirilmiş öz değer problemi.....	38
3.3.6.2 Farklı Rayleigh-Ritz indirgemesi.....	39
3.3.6.3 Irons-Guyan indirgemesi.....	39
3.3.6.4 Büyük ölçekte genelleştirilmiş öz değer problemlerinin çözümü için Lanczos yaklaşımı.....	40
3.3.6.4.1 Spektral dönüşüm.....	40
3.3.6.4.2 Rayleigh-Ritz yaklaşımı.....	40
3.4 Dolgu barajlarda sonlu elemanlar metodunun ve yöntemlerin kullanılması.....	41
3.4.1 Genel.....	41
3.4.2 Metot.....	42
3.4.2.1 İçerilen adımlar.....	42
3.4.2.2 Problemin formülasyonu.....	42
3.4.3 Doğrusal olmayan malzemeler.....	48
3.4.3.1 Doğrusal olmayan analiz metotları.....	50
3.4.4 Yapı kanunları (gerilme-zorlama ilişkisi).....	54
3.4.4.1 Doğrusal-elastik analiz.....	54
3.4.4.2 Doğrusal olmayan gerilme-zorlama davranışı.....	55
3.4.5 Çeşitli barajlarda sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmalar.....	58
3.4.5.1 Yüksek homojen baraj.....	58
3.4.5.2 El Infiernillo barajı.....	58
3.4.5.3 Oroville barajı.....	59
3.4.5.4 Zonlu barajlar.....	61
3.4.6 Üç boyutlu analiz.....	61
3.5 Lineer hesaplamaların yapıldığı bilgisayar programlarının tanıtılması ve bazı kriterler.....	63
3.5.1 Genel.....	63

3.5.2 Sürekli sistem-parçalı sistem.....	64
3.5.3 Elemanlar arası uyumluluk ve süreklilik şartları (elemanların uyumsuzluğu).....	65
3.5.4 Elastisite problemlerinin sonlu elemanlar çözümünde denge ve uygunluk.....	66
3.5.5 Yapısal serbestlikler ve yapı serbestlik derecesi.....	67
3.5.6 Programda kullanılan veri dosyaları.....	67
3.5.7 Düzlem-elastisite kavramı.....	69
3.5.7.1 Genel.....	69
3.5.7.2 Düzlem-gerilme hali.....	70
3.5.7.3 Düzlem-deformasyon hali.....	70
4 BULGULAR VE PROGRAMLARIN UYGULANMASI.....	76
4.1 Genel (Karacaören I barajı).....	76
4.2 Karacaören I barajının sonlu elemanlar modeli.....	77
4.3 Değerlendirmeler.....	80
5 TARTIŞMA VE SONUÇ.....	82
5.1 Sonuçların değerlendirilmesi ve elde edilen tespitler.....	82
5.2 Analizlerin değerlendirilmesi.....	83
5.2.1 Mod şekil numaralarına göre meydana gelen deplasmanlar ve rotasyonlar.....	83
5.2.2 Yükleme durumlarına göre meydana gelen deplasmanlar, rotasyonlar ve iki farklı bilgisayar programından elde edilen neticelerin karşılaştırılması.....	96
5.2.3 Gerilme dağılımları ve sonuçların karşılaştırılması.....	103
5.2.3.1 İki boyutlu olarak gerilme dağılımlarının incelenmesi.....	103
5.2.3.2 Üç boyutlu olarak S_{11} gerilme dağılımlarının incelenmesi.....	105
5.2.3.3 Üç boyutlu olarak S_{22} gerilme dağılımlarının incelenmesi.....	108
5.2.3.4 Üç boyutlu olarak S_{33} gerilme dağılımlarının incelenmesi.....	111
5.2.3.5 Üç boyutlu olarak S_{12} gerilme dağılımlarının incelenmesi.....	114

5.2.3.6 Üç boyutlu olarak S_{13} gerilme dağılımlarının incelenmesi.....:	117
5.2.3.7 Üç boyutlu olarak S_{23} gerilme dağılımlarının incelenmesi.....:	121
5.3 Daha önceleri yapılan çalışmalarla bu çalışmanın karşılaştırılması ve değerlendirmeler.....:	124
6 KAYNAKLAR.....:	132
7 EK.....:	137
8 ÖZGEÇMİŞ.....:	228



ÖZET

Sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmalar 1960'lı yıllarda başlamıştır. Çeşitli araştırmacılar bilgisayarlar yardımıyla sonlu elemanlar modellerini bir çok yapıya uyarlamışlardır. Bu çalışmada Burdur il sınırları içerisindeki Karacaören I toprak dolgu barajına sonlu elemanlar modeli uygulanmış, iki ve üç boyutlu analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen neticeler değerlendirilmiş, daha önceleri çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilmiş sonuçlarla kıyaslama yapılmış ve bir sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Bugüne kadar yapılan araştırmalar farklı bilgisayar programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Sap 90 (1992) ve Sap 2000 v7.4 (2001) bilgisayar programları kullanılarak dolgu baraj modellenmiştir. Gerilme ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen neticeler örnek alınan baraja aittir. Farklı kesitlere ve malzeme özelliklerine sahip barajlar için yine aynı analizlerin yapılması gereklidir. Sonlu elemanlar metodunun kullanılmasıyla yapılan literatürdeki ilk çalışmalar bir ve iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizde baraj gerek iki, gerekse üç boyutlu olarak incelenmiştir. Daha önceleri yapılan çalışmalardan elde edilen neticelere göre geniş vadilerde yapılan analizler için üç boyutlu modellerden daha kesin ve doğru neticeler alınmaktadır (Singh ve Varshney, 1995). Hesaplar lineer olarak farklı kesit uzunluklarına göre gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu analizlerde kabuk elemanı (shell), üç boyutlu analizlerde katı (solid) elemanlar kullanılmıştır. İki boyutlu analizlerde kabuk kalınlığı 1 m, 10 m ve 20 m alınırken, üç boyutlu analizlerde kesit uzunluğu 40 m, 60 m ve 120 m alınarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Araştırmanın ilk bölümlerinde konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar anlatılmış ve sonrasında metod ile ilgili teorik bilgilere yer verilmiştir. Metodun dolgu barajlar üzerindeki uygulaması incelenmiş ve daha sonra tekrar kullanılan bilgisayar programları hakkında bilgiler açıklanmıştır. Bu bölümü takiben sonuçlar kısmında değerlendirmeler yapılmıştır.

İki boyutlu analizlerde 4 düğüm noktalı, üç boyutlu analizlerde 8 düğüm noktalı izoparametrik elemanlar kullanılmıştır. İki boyutlu analizler ve modellemeler

düzlem-zorlama veya gerilme elastisite teorisine göre maksimum boyutlardaki en kesite uygulanmıştır.

Statik ve dinamik yüklemeler altında olası meydana gelebilecek yıkılma riskine karşın barajın davranışı incelenmiştir. Örnek deprem olarak 1976 yılında meydana gelen Çaldıran depremi spektrum değerleri kullanılmıştır. Üç yönde de spektrum değerleri elde edilmiş ve enine yönde etki açısı 45° alınmıştır. Örnek alınan spektrum eğrileri ve mod şekil numaralarına göre deforme olan gövde biçimi, deplasmanlar ve gerilmeler EK bölümünde sunulmuştur.

Hesaplamalarda beş ayrı frekans değeri düşünülmüştür. Baraj gövdesi üç değişik malzemedен meydana gelmiştir. Kabuk zonları kumlu çakıldan oluşurken, çekirdek kil ve temel kayası da konglomera türünden meydana gelmiştir. Temel malzemesi bütün noktalarda homojendir. Malzemelerle ilgili özellikler çeşitli kaynaklardan elde edilmiştir.

Hesaplamalarda ve sonuçların değerlendirilmesinde talveg kotu 00.00 olarak alınmıştır. Baraj 80 m yüksekliğe sahiptir. Vadi genişliği 400 m'dir. Temelde düğüm noktaları arasındaki yatay mesafe ve düşeyde yine düğüm noktaları arasındaki mesafe 20'şer metre olmuştur.

İki boyutlu analizlerden elde edilen düşey deplasman değerleri ile üç boyutlu analizlerden elde edilen düşey deplasman değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Üç boyutlu analizlerde x ve y yönündeki boyuna ve yatay deplasman değerleri gerilmelerin (özellikle negatif değerli) maksimum olduğu noktalarda ve bölgelerde yine maksimum olarak gerçekleşmiştir. X ve y yönündeki gerilmeler memba ve mansap kabuk zonlarının çekirdek ile birleştiği yerlerde çekirdek içerisinde (00.00 ile +20.00 m kotları arası) ve yine çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında maksimum olarak gerçekleşmiştir. Düşey deplasmanlar (z yönünde) bütün analizlerde krette maksimum olarak meydana gelmiştir. Ayrıca kesit kalınlığının 120 m alınarak yapıldığı üç boyutlu analiz sonucuna göre kret profili iç bükey olmuş ve $x = 60$ m

uzunluğunda pozitif değerli gerilmeler kret üzerinde meydana gelmiştir. Genelde iki farklı programdan elde edilen neticeler birbirleriyle uyum sağlamıştır.

Baraj gölündeki su seviyesi yarı yükseklikte düşünülmüş, fakat bu durum gerilme ve deplasman değerleri üzerinde fazla bir değişime sebep olmamıştır.

Temel rijit olarak dikkate alınmış ve gerilme ve deformasyon değerleri sıfır olarak gerçekleştirilmiştir. Fakat üç boyutlu olarak kesit kalınlığının 120 m alındığı durumda temel içerisinde deplasman ve gerilme değerleri aşırı yükleme basıncından dolayı az da olsa gelişmiştir.

Krette en kesit üzerinde iç bükey profil meydana gelmiştir. Vadi geometrisini içeren 3 boyutlu analizler yine geniş vadilerde yer alan toprak dolgu barajlara uygulanabilmektedir ve günümüz bilgisayar teknolojisi ile bu yöntem ve karmaşık hesaplamalar mümkündür.

ANAHTAR KELİMELER : Sonlu Elemanlar metodu, Karacaören I barajı, Düzlem zorlama, Düzlem-gerilme, Deplasman, Gerilme

ABSTRACT

Early studies related to finite elements method are begun in 1960. Computer aided finite elements analysis has been adopted to many structures by several researchers. In this study, finite elements models have been applied to Karacaören I embankment dam that is inside the border of Burdur city in mediterranean zone of Turkey. However two and three dimensional analysis have been performed, results were evaluated and compared with other results which were obtained in the past by several researchers and finally main results were analysed at the end of the study. Researchers have been realised their analysis with different computer programs early of 1960 and 1970. Present study, sample earth-fill dam was modelled by using sap 90 (1992) and sap 2000 v 7.4 (2001) computer programs. Obtained displacements and stress values in this study are only belongs to sample earth-fill dam. Same analysis must be performed for dams which have different sections and material properties. Using finite elements method early studies in literature were realised being one and two dimensional. In this study earth-fill dam was examined both two and three dimensional. Two dimensional analysis was considered by plane-strain elasticity theory. According to results which were obtained in the past, more accurate and definite results are being obtained from three dimensional analysis for analysis which are used for wide valleys (Singh and Varshney, 1995). Computations were made according to different section lengths being linear. Shell elements in two dimensional analysis and solid elements in three dimensional analysis were used. Although shell element's thicknesses were taken 1m, 10 m and 20 m in two dimensional analysis, in three dimensional analysis section lengths were taken 40 m, 60 m and 120 m, hence obtained results from all of them were evaluated.

Within the initial chapters of the research, studies which have made in the past and related to the subject were explained and then in the third chapter theoretical informations related to method were described. Method's applications to earth-fill dams were explained and in the following chapter informations about the computer programs are described. At the end of the research stresses, deformations, deformed shapes of the body and stress distribution graphics were evaluated in the conclusion chapter.

In two dimensional analysis 4 noded isoparametric elements according to plane strain or stress concept, in three dimensional analysis 8 noded isoparametric elements were used. Model was applied to maximum cross section.

Dam's behaviour was examined using static, dynamic loading and both. Çaldıran earthquake in 1976 was used as a sample earthquake from which the obtained spectrum values were used in the calculations in order to understand any probable failure risk of the body. Spectrum values were obtained in three direction and excitation angle was 45° . Sample spectrum curves, deformations according to mode shape numbers, displacements and stresses were presented in appendix.

Five different frequencies were considered in the computations. Dam's body was occurred by three different materials. Shell zones include sandy gravels, core includes clay material and foundation includes conglomerate rock formations. Foundation materials were dissipated homogeneous manner. Properties related to materials were obtained from different written sources.

In calculations, streambed elevation was 00.00. Dam height was 80 m as well. Valley width was 400 m. Distance between nodes in foundation and distance between nodes in vertical direction was 20 m.

Vertical displacement values obtained from two and three dimensional analysis are agreed to each other. At points and areas where the stress values are at maximum (especially negative results), longitudinal and horizontal displacement values are also realised at maximum at the same points and areas along x and y direction respectively according to three dimensional analysis. While S_{12} , S_{13} and S_{23} values be shear, S_{11} , S_{22} and S_{33} values are normal stresses. Stresses in x and y directions were realised being maximum at points where the shell zones are joined with core (between 00.00 and +20.00 elevations in the core) and upper corner points of the core trench. Vertical displacements (along z direction) were occurred as maximum at the crest according to all performed analysis. Besides, according to 120 m thick three dimensional analysis results, crest profile was concave down and at $x = 60$ m length,

positive stress values were occurred on the crest. Generally values obtained from two different computer programs were agreed to each other.

Water level within the reservoir has been considered half of the maximum pool level but this situation was not caused any changes on the stress and displacement values.

Foundation was considered as a rigid and therefore stress and displacement values were realised as zero. But according to situation that takes 120 m section length in three dimensional analysis, displacement and stress values were developed rarely in foundation due to overburden pressure.

At crest, on the cross-section, concave down profile was occurred. Three dimensional analysis including canyon geometry may be applied to earth-fill dams which are stayed in wide valley and with present computer technology, this process and complex computations are possible.

KEY WORDS : Finite Elements Method, Karacaören I earth-fill dam, Plane-strain, Plane-stress, Displacement, Stress

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Nüfusumuzdaki hızlı artışla birlikte ülkemizin elektrik enerjisi ihtiyacı da hızla artmaktadır. Bugüne kadar pek çok baraj özellikle dolgu türünde inşa edilmiş ve hali hazırda da inşa edilmeye devam edilmektedir. Sanayideki hızlı ilerleme ve gündeme gelen elektrik enerjisi açığı yeni baraj projelerinin yapılmasını da gündeme getirmiştir. Kısa inşaat süresi ve ekonomik olarak toprak dolgu barajlar tesis edilebilir. Barajlardan elde edilecek elektrik üretimi diğer yöntem ve araçlara göre hem daha güvenlidir hem de uzun hizmet sürelerine sahiptir. Günümüzde Türkiye’de inşaatı devam etmekte olan 100’ün üzerinde baraj mevcuttur.

Dolgu barajlarda harici veya dahili olarak çeşitli etki ve kuvvetlerden dolayı hasarlar ve yıkılmalar meydana gelebilir. Bu yıkılmalar büyük taşkınlar sonucunda, deprem kuvvetleri nedeniyle, kalitesiz malzeme kullanılması, şartnamelere uyulmaması, uygun inşaat metotlarının tatbik edilmemesi ve diğer pek çok nedenlerden dolayı meydana gelebilir.

Dolgu barajlarda hasarlara ve yıkılmalara karşı barajların güvenli olarak inşa edildiği tahmin edilmekteydi. Fakat 1950 ve 1960’lı yıllarda meydana gelen büyük yıkılmalar ve hasarlar sonucunda dolgu barajlarda yapılan hesaplara ve denge analizlerine daha fazla özen gösterilmesi gerekmiştir. Böylece sonlu elemanlar metodu ile dolgu barajların statik ve dinamik analizleri yapıp stabilizeye karşı daha güvenilir neticeler elde edilmiştir. Fakat bu durumda bile baraj yıkılmaları ve sonuçta meydana gelen hasarların önüne geçilememiştir. Dolayısıyla bu konu günümüzde de önemini korumaktadır. 1970 yılında A.B.D.’de güney Dakota’da Rapid şehrinde barajın yıkılmasıyla taşkın meydana gelmiş ve 242 kişi yaşamını yitirmiştir. Buna ilave olarak yüksek oranda can kayıplarının meydana geldiği baraj yıkılmalarına yakın dönemlerde rastlanılmaktadır.

Barajların tasarımında bir araç olarak sonlu elemanlar metodunun kullanılmasıyla uygulanan baraj geometrisine göre elde edilen analizlerle gövde içerisinde gerilmeler hesaplanıp deplasmanlar (özellikle krette) değerlendirilebilmektedir. Buna ilave

olarak deprem yükleri altında barajın nasıl bir davranış sergileyeceği de önceden belirlenebilir. Krette meydana gelebilecek oturmalara karşı inşa sırasında ilave hava payı, kalın kret ve taç bölgesinin temini, uygun çekirdek boyutlandırılması sağlanabilir. Bu çalışma sonlu elemanlar modelini kullanarak Karacaören I toprak dolgu barajında gerilme ve deformasyonların hesaplanması ve deprem yükleri altında barajın ne tip bir davranış sergilediğinin anlaşılması için yapılmıştır.

Ülkemizde yapılan barajların pek çoğu dolgu tipindedir. Diğer baraj tiplerine göre daha az maliyetle ve kısa sürede inşa edilen bu barajlarda çeşitli stabilite problemleriyle karşılaşılabilir.

Bu çalışmamda gerek kaynakların temininde gerekse programların sağlanmasında maddi ve manevi katkılarda bulunan, büyük yardımlarını esirgemeyen Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü başkanı kıymetli hocam Prof. Dr. Sayın Ali Doğan'a;

Yine çeşitli kaynakların elde edilmesinde ilgilenen Yrd. Doç. Dr. Sayın Mustafa Türkmen'e,

Karacaören I barajının projelerinin sağlanmasında D.S.İ. Isparta bölge müdürlüğü proje dairesinde görevli teknik personele,

Programın temin edilmesini sağlayan S.D.Ü. araştırma fonu saymanlığına,

Jüri üyelerinden Akdeniz Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümü başkanı, İnşaat Mühendisliği bölümü Hidrolik dalı öğretim üyesi Prof. Dr. Sayın Bülent Topkaya'ya,

Yine jüri üyelerinden Süleyman Demirel Üniversitesi Hidrolik dalı öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Sayın Hüsnü Demirpençe'ye,

Çeşitli seminer notlarının temininde, kaynakların bulunmasında yardımcı olan İnşaat Mühendisi Sayın Turgay Kaylan'a,

Özellikle tez çalışmalarımnda her türlü ortamı kolaylıkla sağlayan aile büyüklerimden anne ve babama minnet ve şükranlarımı arz ederim.

NURİ SEÇKİN KAYIKÇI
ISPARTA 2001



SİMGELER DİZİNİ

KÜMELER

Rgerçel sayılar

C karmaşık sayılar

Ubileşim

ϵkümeye ait eleman

ÇEŞİTLİ TAM SAYILAR

n_{np}düğüm noktası sayısı

n_{en}eleman sayısı

n_{eq}denklem sayısı

n_{ee}eleman denklem sayısı

n_{dof}serbestlik derecesi sayısı

n_{ed}eleman serbestlik derecesi sayısı

n_{el}eleman sayısı

A, Bglobal nokta sayısı

a, beleman nokta sayısı

P, Qglobal denklem sayısı

p, qeleman denklem sayısı

eeleman numarası

ELEMAN MATRİSLERİ

m^e e 'ninci elemanın kütle matrisi

c^e e 'ninci elemanın sönüm matrisi

k^e e 'ninci elemanın eğilmezlik matrisi

f^e e 'ninci elemanın kuvvet vektörü

a^e e 'ninci elemanın ivme vektörü

v^e e 'ninci elemanın hız vektörü

d^e e 'ninci elemanın deplasman vektörü

GLOBAL MATRİSLER

M.....kütle matrisi
 C.....sönüm matrisi
 K.....eğilmezlik matrisi
 F.....kuvvet vektörü
 a.....ivme vektörü
 v.....hız vektörü
 d.....deplasman vektörü
 A.....sonlu elemanlar operatörü

SINIR DEĞER PROBLEMLERİ

n_{sd}uzay boyut sayısı
 i, j, k, luzaysal indisler
 \mathbb{R}^n_{sd}Euclidean n_{sd} uzayı
 Ω \mathbb{R}^n_{sd} içerisindeki x değerleri
 $\overline{\Omega}$ Ω 'un kapanışı
 x_i, x $\overline{\Omega}$ içerisindeki nokta
 Γ Ω 'un sınırı
 n_i, n Γ 'ye doğru dışarı tarafa birim normal vektör
 Γ_g, Γ_{gi}Dirichlet durumlarının belirli olduğu yerlerde sınır kısmı
 Γ_k, Γ_{ki}Neumann durumlarının belirli olduğu yerlerde sınır kısmı
 δ_{ij}Düğüm sayılarının Kronecker deltası
 ηdüğüm noktası sayısı
 η_g, η_{gi}Dirichlet durumlarının belirlenmesinde düğüm noktası sayısı

VARYASYONAL METOTLAR

hağ parametresi
 δ, δ_ideneme çözümlerinin toplamı
 V, V_ietki fonksiyonlarının toplamı
 $\delta^h, \delta^h_i, \delta^h$deneme çözümlerinin sonlu boyut toplamları
 V^h, V^h_i, V^hetki fonksiyonlarının sonlu boyut toplamları
 u, u_i, udeneme çözümleri

w, w_i, w	etki fonksiyonları
f, f_i, f	kaynak terimleri
g, g_i, g	Dirichlet sınır değeri
h, h_i, h	Neumann sınır verisi
g^h, g_i^h, g^h	g, g_i ve g 'nin Ω 'a göre uzamaları
e, e_i, e	hatalar

ELASTİSİTE

ϵ_{ij}	sonsuz küçük zorlama tensörü
σ_{ij}	Cauchy gerilme tensörü
C_{ijkl}	elastik katsayılar
u_i	deplasman vektörü
$u_{(i,j)}$	ϵ_{ij} 'e eşit deplasman gradyanlarının simetrik kısmı
f_i	belirlenmiş gövde kuvvet vektörü
g_i	belirlenmiş sınır deplasman vektörü
h_i	belirlenmiş sınır çekme vektörü
d_{iA}, d_{iA}^e	düğüm noktası deplasmanları
g_{iA}, g_{iA}^e	belirlenmiş düğüm noktası deplasmanları
B	hacim modülü
E	Young elastisite modülü
ν	Poisson oranı
G, μ	kayma modülü
λ	Lame modülü
B, B_a, B_A	zorlama deplasman matrisleri
D, \vec{D}	malzeme modülü matrisleri
İZOPARAMETRİK ELEMANLAR	
Ω^e	elemanın x kümesinin Ω 'u kapsamı
Γ^e	Ω^e 'nin sınırı
x_1, x_2, x_3	
x, y, z	Kartezyen koordinatları

- \squaredört kenarlı veya katı elemanın x çözüm kümesi
- $x^e: \square \rightarrow \bar{\Omega}^e$izoparametrik şekillendirme
- ξ, ηdört kenarlılar için eleman doğal koordinatları
- ξ, η, ζaltı yüzlü eleman için elemanın doğal koordinatları
- ξ \square içerisindeki nokta
- jşekillendirilen $x^e(\xi)$ 'nin Jacobian determinantı
- $C^0(\Omega)$sürekli fonksiyonlar sınıfı
- $C^k(\Omega)$ k sürekli türevlerine sahip sürekli fonksiyonlar
- N_A, N_a^eşekil fonksiyonları
- x_a, x_a^edüğüm noktaları
- r, s, tüçgen koordinatlar; alan koordinatları
- r, s, t, udört kenar koordinatları; hacim koordinatları
- $l_a(\xi)$ a 'nıncı eleman noktasıyla ilgili Lagrange polinomu
- $\bar{\xi}_l$ l 'ninci integrasyon noktasının konumu
- W_l l 'ninci integrasyon noktasını belirten etki
- U_1, U_2, U_3düzenli integrasyon elemanları
- S_1, S_2, S_3seçici integrasyon elemanları
- PLAKLAR**
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$tensör indisleri
- $e_{\alpha\beta}$alternatör tensör
- wenine deplasman
- θ_αrotasyon vektörü
- $K_{\alpha\beta} = \theta_{(\alpha\beta)}$eğrilik tensörü
- γ_αkesme zorlaması vektörü
- $C_{\alpha\beta\gamma\delta}, C_{\alpha\beta}$elastik katsayılar
- $m_{\alpha\beta}$moment tensörü
- q_αkesme kuvveti vektörü
- Wbelirtilmiş sınır deplasmanı
- θ_αbelirtilmiş sınır rotasyonları

- Ftoplam uygulanmış enine kuvvet
 C_αtoplam uygulanmış bağlantılar
 M_αbelirtilmiş sınır momentleri
 Qbelirtilmiş sınır kesme kuvveti
 splaka sınırının kemer uzunluk parametresi
 $\theta_\alpha = e_{\alpha\beta} \theta_\beta, \theta_s, \theta_n$sağ el kuralına göre rotasyonlar
 k_b^e, k_s^ee'ninci eleman dayanma ve kesme eğilmezlik durumu
 D^b, D^sdayanma ve kesme modülü matrisleri
 B^b, B^sdayanma ve kesme zorlama-deplasman matrisleri

KABUKLAR

- xpozisyon vektörü
 \bar{x}, \bar{x}_areferans yüzeye pozisyon vektörleri
 X, X_afiber vektörleri
 $z_a(\zeta)$kalınlık fonksiyonu
 e_1^l, e_2^l, e_3^lince tabaka kaynaklı vektörler
 e_1^f, e_2^f, e_3^ffiber kaynaklı vektörler
 udeplasman vektörü
 \bar{u}, \bar{u}_areferans yüzeyin deplasmanı
 U, U_afiber deplasmanları
 $\vec{\sigma}^l = D^l \vec{\epsilon}^l$ince tabaka kaynağı içerisinde indirgenmiş yapı denklemi
 $m_{\alpha\beta}$momentler
 n_αmembran kuvvetleri
 q_αenine kesme kuvvetleri

DİNAMİK

- tzaman
 Δtzaman adımı
 nzaman adımı sayısı
 a_n, v_n, d_nsırasıyla $a(t_n), v(t_n)$ ve $d(t_n)$ 'in yaklaşımları
 $\vec{a}_n, \vec{v}_n, \vec{d}_n$sırasıyla ivme, hız, deplasmanın önceden belirlenen değerleri

Δt_{crit}	.....	kritik zaman adımı
A	.....	yükseltme faktörü
A	.....	yükseltme matrisi
$\rho(A)$	.....	yükseltme matrisinin spektral yarıçapı
τ	.....	lokal kesme hataları
$\lambda, \lambda^h, \bar{\lambda}^h$	.....	öz değerler
φ, ϕ	.....	öz değer vektörleri
$\omega, \omega^h, \bar{\omega}^h$	.....	frekanslar
ξ	.....	algoritmik sönüm oranı
$(\bar{T}-T)/T$	.....	rölatif periyot hatası
Ω_{crit}	.....	kritik numune frekansı
M^l, C^l, K^l, F^l	.....	kütlenin, sönümün, eğilmezliğin ve kuvvetin implisit ağ bölünmesi
M^E, C^E, K^E, F^E	.....	kütle, sönüm, eğilmezlik ve kuvvetin eksplisit ağ bölümü
u_{0i}, \dot{u}_{0i}	.....	başlangıç deplasman ve hızları
u_o	.....	başlangıç ısısı
ρ	.....	yoğunluk
c	.....	kapasite

ŞEKİLLER DİZİNİ

		sayfa
Şekil 3.1	İki boyutlu kabuk elemanı.....	22
Şekil 3.2	Sekiz düğüm noktasından oluşmuş üç boyutlu katı eleman.....	24
Şekil 3.3	İzoparametrik elemanlar (dört ve sekiz düğüm noktalı).....	43
Şekil 3.4	{F} ve {δ} arasındaki sembolik doğrusal olmayan ilişki.....	49
Şekil 3.5	Doğrusal olmayan gerilme-zorlama eğrisi.....	49
Şekil 3.6	Temel çoğalma (artım) prosedürü.....	52
Şekil 3.7	Program çalışma yapısı şeması (akış diyagramı).....	71
Şekil 3.8	Sekiz düğüm noktasından oluşmuş izoparametrik üç boyutlu eleman.....	72
Şekil 4.1	Gövdenin iki boyutlu modeli.....	79

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı dolgu barajların sismik analizi ve tasarımında birçok faktör dikkate alınmalıdır. 1950 ile 1960 yılları arasında meydana gelen depremler sonucunda güvenli olarak inşa edildiği zannedilen dolgu barajların yıkılmaları bu konu üzerinde daha dikkatli araştırma yapılması gereğini ortaya çıkarmıştır. Bununla beraber depremler sonucu yıkılan barajlardan meydana gelen taşkınlar sonucu can kaybının ve zararın fazla olması da bu konunun ne kadar ciddi boyutlarda olduğunu göz önüne sermektedir. 1967 yılında Hindistan'da Koyna barajının depremde çökmesi ve A.B.D.'de 1971 San Fernando depreminde pek çok büyük barajın hasar görmesi barajlarda deprem sorununun sanıldığından çok daha ciddi boyutlarda olduğunu ortaya çıkarmıştır (Singh ve Varshney, 1995). Ülkemizde de depremler sonucu hasar gören barajlar mevcuttur. Barajların daha güvenli olarak tasarlanmasında bir araç olarak sonlu elemanlar metodu kullanılmaya başlanmıştır. Bu metod kullanılmaya başlamadan önce yaklaşık neticeler veren yöntemler 1965'li yıllara kadar kullanılmıştır. Diğer metotlarla karşılaştırıldığında sonlu elemanlar metodu daha doğru neticeler vermektedir. Bu metotla gövdeyi ve temeli oluşturan malzeme özellikleri, rezervuar ve gövde yükleri hesaba katılarak doğrusal veya doğrusal olmayan analizler yapılabilmektedir. Gövdenin deforme olmuş şekliyle beraber düğüm noktalarındaki deplasmanlar hem 2 hem de 3 boyutlu olarak belirlenebilir. Ayrıca statik analizden farklı olarak deprem yükleri altında da barajın davranışı incelenip gerilmeler, deplasmanlar, kuvvetler ve daha birçok veri elde edilerek bir analiz yapılabilir (Singh ve Varshney, 1995).

Şiddetli depremler yer yüzeyinden 15-30 km derinlikte, yer kabuğu içerisinde uzun sürelerde oluşan gerilme birikimlerinin fay hatlarında meydana gelen ani yarılmalarla ortaya çıkması ve enerjisini kaybetmesinden kaynaklanır. Böylece oluşan sismik dalgalar yer kabuğu içerisinde yayılır ve yer yüzüne ulaşırlar. Eğer sert yer kabuğu ile söz konusu yapının bulunduğu bölgedeki yer yüzeyi arasında yumuşak bir zemin tabakası mevcut ise sismik dalgalar bu tabaka tarafından belirli bir biçimde büyütülerek yapıya ulaşırlar. Diğer bir taraftan yer yüzeyindeki yapı baraj gibi büyük bir kütleyle sahip ise bu kütle kendi altındaki zeminin dinamik

özelliklerini etkileyecek ve zeminden geçen sismik dalgaların karakterini değiştirecektir. Bir başka deyişle barajın yanındaki serbest yüzeyde oluşan yer hareketi ile aynı seviyede baraj tabanındaki yer hareketi aynı olmayacaktır. Bu özellik zemin-yapı etkileşimi olarak tanımlanmaktadır (Singh ve Varshney, 1995).

Etkileşim probleminin çözüm şeklini daha çok zeminin durumu belirlemektedir. En genel anlamda zemin tipini üç sınıfta ayırmak mümkündür. Bunlardan birincisi derin kayalık veya sert zemin, ikincisi taban kayası üzerine oturan yumuşak zemin tabakası, üçüncüsü derin yumuşak zemindir. Birinci durumda baraj sert kaya zemin üzerine oturur. İkinci durumda ise sert kaya ile baraj arasında yumuşak zemin vardır. Üçüncü durumda sert zeminden bahsedilemez. Eğer baraj birinci durumdaki kayalık veya çok sert bir zeminde yerini alıyorsa, baraj gövdesi sonlu elemanlar yöntemi ile sonsuz rijit bir temel üzerinde yerini aldığı varsayımı ile çözülür. Bu durumda yapı zemin etkileşimi ihmal edilir (Singh ve Varshney, 1995).

Deprem sırasında gövde üzerinde enine, boyuna veya çapraz olarak çatlaklar serisi meydana gelebilir. Ayrıca temel içerisinde sıvılaşma durumları söz konusu ise küçük şiddetli bir sarsıntıda gövde temel üzerinde kayarak dengesini kaybeder. Bununla beraber yine belli sarsıntılar sırasında yamaçlarda veya gövde üzerinde toprak kaymaları ve heyelanlar oluşabilir. Deprem sarsıntısından sonra memba şevi üzerinde meydana gelebilecek çatlaklar içerisinde sızıntı oluşarak borulanma kanalı ve erozyon vasıtasıyla gövdenin stabilitesini kaybetmesine sebep olur. Böyle bir durumla karşılaşıldığında baraj gölündeki su çok geç olmadan tahliye edilmeli ve çatlaklı kısımlar dolgu yapılarak veya başka yöntemlerle onarılmalıdır.

Bu çalışma içerisinde Burdur sınırları içerisinde Antalya Isparta arasında Dere boğazı karayolunun 60'ıncı km'sinde yer alan Karacaören I barajı gövdesi sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Analiz lineer olarak iki boyutlu ve üç boyutlu gerek statik gerekse dinamik yükler altında yapılmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Maksimum boyutlu en kesit kullanılmıştır (D.S.İ., 2000). Temel ve gövde üç malzemeden meydana gelmiştir. Karacaören I barajının kret uzunluğu ve memba ve

mansap topukları arasındaki maksimum kesit uzunluğu 400 m'dir. Baraj yüksekliği 80 m'dir. Temel konglomera kaya oluşumunu içerir. Bu nedenle rijit olarak dikkate alınmıştır (Sucuoğlu, 1988). Merkezi çekirdek geçirimsiz kilden oluşmaktadır. Memba ve mansap kabukları kumlu çakıl içerir. Temelde 20 m'lik bir derinlik hesaba katılmıştır. Parafuy hendeği yer seviyesinin 9 m aşağısına kadar inmektedir. Statik analizde barajın kendi ağırlığı ve su basıncı dikkate alınmıştır. Rezervuar su yükü 79 m olarak projeden belirlenmiştir. Dinamik analizler rezervuarın yarı dolu ve tam dolu olduğu durumlar için yapılmıştır.

Malzeme ile ilgili veriler çeşitli kaynaklardan elde edilmiştir (Köseoğlu, 1987; Sucuoğlu, 1988). Yapılan statik analizde baraj gölündeki memba şevine etkileyen su basıncı ve temele etkileyen gövde ağırlığı dikkate alınmıştır. Deplasmanlar ve düğüm noktalarında oluşan gerilmeler incelenmiş ve bir sonuç elde edilmeye çalışılmıştır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Dolgu Barajların analizinde sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmalar

1900'lü yılların ilk yarısı boyunca dolgu barajlar için standart sismik tasarım uygulaması pseudo-statik (sismik katsayı seçimi ile yapılan şev stabilitesi) denk kuvvet yaklaşımına dayanmıştır. Statik kuvvet etkileri altında şevin stabilitesini kaybetme ihtimali analiz edilmiştir. Yatay kesite uygulanmış kuvvet değeri gövdenin rijit olarak farz edilmesiyle hesaplanmıştır. Atalete denk olan kuvvet çalışılan kesitdeki baraj kütlesi üzerine etkir (Dominguez, 1995). 1950'lerin sonlarına doğru dolgu barajların rijit yapılardan ziyade deforme olabilen yapılar gibi davrandığı dikkate alınmıştır. Süreklilik mekaniğinin genel kurallarını 3 boyutlu baraj gövdesinin dinamik davranışının incelenmesi izlemiştir. Basit kayma durumuyla kıyaslandığında dolgu barajı oluşturan malzemelerin tipinden ve barajın geometrisinden dolayı dayanma deformasyonları deprem boyunca ihmal edilmiştir. Bu durum Hatanaka ve Ambraseys tarafından gösterilmiştir (Dominguez, 1995). Bu gerçek "kayma kirişi" modelinin bu tip bir deformasyonda hesaba katılmasını mümkün kılmıştır. Bu da sonlu elemanlar metoduna alternatif bir metot olmuştur (Dominguez, 1995).

Sonlu Elemanlar modelleri 1960'ların ikinci yarısından beri dolgu barajların sismik analizlerinde en güçlü yöntem olarak kullanılır. Son 30 yıldan beri analizlerde "kayma kirişi" modeli ve "sonlu elemanlar" modeli kullanılmaktadır. Ayrıca son yıllarda "sınır elemanı" modeli kullanılmaya başlanmıştır. Fakat bu metodun beton barajlara uygulanmasından elde edilen sonuçlar daha tatmin edici olmuştur.

1960'ların ikinci yarısı boyunca sonlu elemanlar metodu dolgu barajlarda genel yaklaşım olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1966'da 2 boyutlu doğrusal modeller Clough ve Chopra tarafından yapılmıştır. Modelleme düzlem şekil değiştirme analizi için yapılmıştır (Dominguez, 1995).

Dibaj ve Penzien uyarı özel değişim etkilerini çalışmıştır. 2 boyutlu üçgen elemanlar kullanılmıştır. Modelleme eşit aralıklı memba ve mansap yüzlerine paralel düğüm noktalarının oluşturulmasıyla gerçekleşmiştir. Doğrusal olarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar çalışmasında baraj temelini oluşturan elastik malzeme dikkate alınmıştır.

1969'da Seed ve çalışma arkadaşları Sheffield barajında meydana gelen yıkılma sebeplerini araştırmak için sonlu elemanlar modelini kullanmışlardır.

Yine Seed ve yardımcıları 1973 yılında Alt San Fernando barajında meydana gelen yıkılmanın analiz edilmesi için iki boyutlu sonlu elemanlar metodunu uygulamışlardır (Dominguez, 1995).

1960'ların sonlarında doğrusal olarak yapılan sonlu elemanlar çalışmalarının gerektirdiği bir sonuç da doğrusal olmayan malzemenin hesaba katılması gereğidir. Bu durum 1970 ve 1980'lerde yapılan sonlu elemanlar çalışmaları içerisinde yerini almıştır. Doğrusal olmayan malzeme davranışını hesaba katacak çeşitli basitleştirilmiş metotlar vardır (Dominguez, 1995).

Idriss ve çalışma arkadaşları doğrusal hesaplamaları yapabilmek için sönüm oranlarını ve kayma modülünü farz ederek eşit değer doğrusal yaklaşım geliştirmişlerdir. Farz edilmiş modül ve sönüm oranları her doğrusal adımda düzeltilir. Metot birçok durumda doğru cevaba yakınlaşır, fakat asıl olmayan rezonans frekanslarını oluşturabilir. Bu yaklaşım Dakoulas ve Gazetas tarafından düzeltilmiştir. 1982'de bütün baraj üzerinde tanımlanmış fonksiyonları kullanan genişlemiş çözüme sahip Galerkin formülasyonuna dayanan basitleştirilmiş daha tutarlı metot Prevost tarafından sunulmuştur. Çok yüzeyli kinematik plastiklik teorisine dayanan elastik-plastik esas ilişkilerini kullanarak baraj malzemesinin gerilme-zorlama davranışı modellenir. Son zamanlarda metot saf su basınçlarından dolayı degredasyonun hesaba katılması için düzenlenmiştir (Dominguez, 1995).

Finn ve yardımcıları deprem boyunca etki eden kuvvetleri, kısa süre kalan saf su basınçlarını dikkate alan ve 2 boyutlu elastik olmayan malzeme davranışını hesaba katan model sunmuştur. Dengeli plastisiteye dayanan modellerle karşılaştırıldığında bu metod çok daha doğru neticeler verir ve hesaplamalı olarak daha etkilidir (Dominguez, 1995).

Dengeli plastisite teorisine dayanan çok sayıda sonlu elemanlar modelleri mevcuttur. İlginç modellerden bir tanesi de Prevost ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Araştırmacılar 3 boyut için 8 düğüm noktalı, 2 boyut için 4 düğüm noktalı izoparametrik elemanlar kullanmıştır. Malzemenin histerezise gerilme-zorlama davranışı çok yüzeyle kinematik plastisite teorisinin kullanılmasıyla belirlenir. Simetrik omurga eğrisi boyunca çok yüzeyle kinematik plastisite teorisi kütle-tarzında histerezise davranış meydana getirir. Metod, çeşitli barajlardaki kaydedilmiş tepkilerle karşılaştırılarak onaylanmıştır. Bu yaklaşımın başlıca dezavantajı özellikle 3 boyutlu analizlerde fazla miktarda veri içermesidir. Doğrusal olmayan malzeme özellikleri ile yapılan analiz sonuçlarıyla, doğrusal olan modellerden elde edilmiş neticeler kıyaslandığında hatalarda azalma meydana gelir. Doğrusal olmayan analizler gerçek sonuç değerine daha fazla yakınsama gösterir. Bu azalmaların esas sebepleri enerjinin histerezise dağılımı, potansiyel rezonansların yıkılması ve yok olması, kayma gerilmeleri ile ilgili kesme ivmelerinin nihai malzeme direncini aşmasıdır. Azalma özellikle yüksek frekanslı ivme bileşenleri için önemlidir (Dominguez, 1995). İdealleştirme yapılırken ağ boyutlarının azaltılıp eleman ve düğüm noktası sayılarının artırılmasıyla gerçek sonuç değerlerine daha da yaklaşılr (Singh ve Varshney, 1995).

Sonlu elemanlar metodu malzeme özelliklerini, basınç oluşturmada eğilmezlik bağımsızlığını, 3 boyutlu vadi geometrisini ve vadinin esnekliğini hesaba katar.

Sonlu elemanlar metodu doğrusal olarak 1967'de Clough ve Woodward, Lefebvre, 1972'de Eisenstein, 1976'de Bharat Singh, 1979'da inşa halinde olan Chicoasen

barajına Marsal ve Moreno, 1975’de Lee ve Idriss tarafından uygulanmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

Dolgu malzemesi üzerinde bir boyutlu basınç testinden elde edilen neticeleri kullanarak kaya dolgu için denk basınç yaklaşımına dayanan Young modülünün eş değerlerinin kullanılması ile Llyn Brienne barajının analizinde doğrusal gerilme-zorlama ilişkisini 1973 yılında Penman ve Charles kullanmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

1983 yılında inşa halinde olan El Infiernillo barajında yapılan analizlerden elde edilen elastisite modülü ve poisson oranı parametreleri kullanılarak Justo ve Saura tarafından üç boyutlu doğrusal analiz yapılmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

1972 yılında Palmerton 122 m yüksekliğinde ince merkezi çekirdekli zonlu toprak dolgu baraj üzerinde üç boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir. Baraj 1:1 eğimlere sahip trapez şekilli vadi arasına yapılmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

2.2 Üç Boyutlu vadi geometrisi etkileri ve yapılan çalışmalar

Günümüzde dolgu barajların dinamik tepkisi iki boyutlu sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasıyla bulunabilir. Geniş vadilerde inşa edilen barajlarda yapının tepkisi üç boyutlu olur. Düzensiz şekle sahip vadilerde yapılmış dolgu barajların analizi için üç boyutlu sonlu elemanlarla beraber dengeli plastisite ilişkisini Prevost çalışmıştır. Bu üç boyutlu model çok genel olmuştur fakat karmaşıklığından dolayı oldukça fazla hesaplama verisi içermiştir. Son yıllarda üç boyutu kullanarak daha az karmaşık yaklaşımlar önerilmiştir (Dominguez, 1995).

Martinez ve Bielak 1980 yılında barajın boyuna yönünde Fourier ifadesine dayanan yaklaşımı sundu. Boyuna deformasyonlar ihmal edilmiştir ve barajın orta kesiti iki boyutlu sonlu elemanlar ağı kullanılarak analiz edilmiştir. Simetrik vadiler için

geçerli olan bu yaklaşım az sayıda ifade olması sebebiyle etkili olmuştur (Dominguez, 1995).

Seed ve çalışma arkadaşları prizmatik elemanları kullanarak eşdeğer doğrusal malzeme davranışına dayanarak iki boyutlu düzlem zorlama formülasyonunu üç boyutlu sonlu elemanlar formülasyonuna dönüştürdü. Oroville barajı için üç boyutlu analiz yapıldı (Dominguez, 1995).

Abdel-Ghaffar ve yardımcıları dolgu barajların üç boyutlu sismik analizi için basitleştirilmiş analitik-sayısal metot sunmuştur. Prosedür Rayleigh-Ritz metoduna dayanır ve doğrusal olarak küboide dönüştürülebilir ve herhangi bir baraj geometrisine uygulanabilir. Doğrusal analiz için metot Abdel-Ghaffar ve Koh tarafından sunulmuştur ve hareketin üç boyutlu denklemlerinin Galerkin formülasyonuna ve kayma kirişi kavramına dayanan doğrusal olmayan modellerle beraber son zamanlarda uygulanmıştır. Üç boyutlu incelenmiş dolgu barajların sismik tepkisi üzerine Dakoulas ve Gazetas, Dakoulas ve Hsu tarafından elde edilmiş sayısal çözümler vardır. Bu çözümler önemli basitleştirmelere dayanır, fakat daha az maliyetli yaklaşımlar olduklarından faydalıdır. Barajın sadece kayma ile deforme olan doğrusal elastik gövde olduğu farz edilerek çözümler kayma kirişi modeline dayanır, halbuki vadi rijittir. Modellemenin yapılmasında vadi şekli oldukça önemlidir (Dominguez, 1995).

El Infiernillo barajı için sonlu elemanlar metodu ile analiz yapılmış ve kret hareketleri Lee ve Shen tarafından gösterilmiştir. Covarrubias tarafından yapılan çalışmada çekme gerilmelerinin maksimum olduğu yerlerde çatlakların oluştuğu gösterilmiştir (Singh ve Varshney, 1995).

2.3 Dolgu barajlar

Barajlar gövdenin statik projelendirilmesinde esas alınan gövde şekline göre beton barajlar ve dolgu barajlar olarak ikiye ayrılır. Dolgu barajları da kendi arasında üçe

ayırarak mümkündür. Bunlar; toprak dolgu barajlar (homojen veya zonlu), kaya dolgu barajlar ve ön yüzü betonarme kaplı kaya dolgu barajlardır. Bu çalışmada dikkate alınmış olan Karacaören I barajı toprak dolgu tipinde zonlu olarak inşa edilmiştir.

Baraj tipinin seçiminde rol oynayan ekonomik, hidrolik birçok parametrenin yanı sıra baraj arazisinin topoğrafyası, jeolojisi, iklim koşulları, depremselliği ve yapımda kullanılacak malzemelerin durumu (miktarı ve temin edilebilirliği) de öncelikle göz önüne alınması gereken parametrelerdir.

Önemli bir jeolojik problemi olmayan kaya temeller üzerine hemen her türlü baraj inşa edilebileceği için, baraj tipi seçiminde bu tür temellerin önemli bir etkisi olmaz. Çakıl temeller, silt veya ince kum temeller veya kil temeller üzerinde inşa edilecek barajlarda kabuk şevlerinin yatıklığından dolayı daha geniş bir alana oturan dolgu tipi barajlar (özellikle toprak dolgu) tercih edilir.

Farklı oturmaların beklendiği düzenli olmayan temel şartlarında veya depremselliği yüksek olan yerlerde baraj inşa etme zorunluluğu olduğundan yapının oturmalara sağladığı uyum açısından yine toprak dolgu barajlar ideal baraj tipidir. Çakıl temellerde, özellikle büyük boyutlara varan sızmalara karşı etkin tedbirler alınması gerekir. Silt veya ince kum temellerde öncelikle sıvılaşma tahkiki, borulanma, doygunluğa bağlı potansiyel zemin göçmeleri, yer altı suyu durumu, sızma kayıpları, mansap topuğu erozyonu ciddi bir şekilde incelenmelidir. Kil temeller, sahip oldukları düşük kayma mukavemetleri nedeniyle oldukça yatık dolgu şevlerine ihtiyaç gösterirler. Sonuç olarak zayıf temel şartlarında temelin iyileştirilmesine yönelik diğer önlemlerin yanı sıra temele mümkün olduğu kadar az yük aktaran baraj tiplerinin yani dolgu barajların seçilmesi gerekmektedir.

Yüksekliği 40 m'den daha düşük olan barajlar yapım kolaylığı da göz önüne alınarak homojen dolgu tipinde seçilirler. Yüksek barajlar ise genellikle zonlu tipte yapılırlar.

Diğer barajlara göre dolgu barajlar temel hareketlerine kolayca uyum sağlamalarından dolayı da tercih edilebilirler (Orhon, 1997).



3. MATERYAL VE METOT

3.1 Doğrusal olarak Sonlu Elemanlar metodunun kullanılması

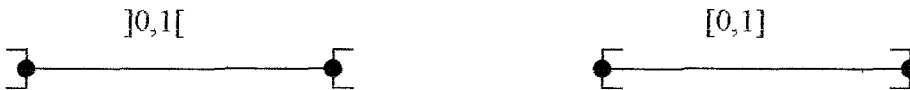
Sınır değeri probleminin çözümü için sonlu elemanlar metodundaki ana unsurlar problemin değişimli veya zayıf ifadesi ve sonlu elemanlar fonksiyonunun kullanımında değişken denklemlerin yaklaşık çözümleridir. Kavramları açıklamada şu örneği dikkate alabiliriz. u için alttaki diferansiyel denklem çözümlerse (Hughes, 1993):

$$u_{,xx} + f = 0 \quad (3.1.1)$$

Burada virgül türev sayısını belirtir. Yani $u_{,xx}$ u 'nun x 'e göre ikinci türevini belirtir. f birim aralıkta tanımlanmış düzgün skaler değerli fonksiyon gibi farz edilir. Buradan,

$$f : [0,1] \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.1.2)$$

Burada $[0,1]$ birim aralığı belirtir. 0 ve 1 dahil olmak üzere x değeri bu aralıkta değer alır. \mathbb{R} reel sayıları gösterir. (3.1.1) durumu $[0,1]$ aralığında belirli x değeri için $f(x)$ 'in reel sayılardan oluştuğunu ifade eder. Bu şekilde her $x \in [0,1]$, $f(x) \in \mathbb{R}$. (3.1.1) denklemi çekme içerisindeki telin enine deplasmanı ile ve yine elastik çubuğun boyuna deplasmanı ile ilgilidir. Bu durumlarda tel içerisindeki gerilmenin büyüklüğü veya çubuk durumunda elastisite modülü gibi fiziksel parametreler bu denklem içerisinde görülür. İlerideki gelişimleri basitleştirmede bu parametreler iptal edilir (Hughes, J.R., 1993). $]0,1[$ uç noktalarını kabul etmeyen birim aralık olarak alınırsa ($0 < x < 1$), $[0,1]$ kapalı diğer durum açık olarak dikkate alınır. Bu durumu şu şekilde gösterebiliriz:



3.1.1 Problemin kuvvetli veya klasik biçimi

(3.1.1) için sınır değeri problemi u fonksiyonu üzerinde oldukça iyi sınır durumlarını içerir. u 'nun aşağıdaki durumları gerçekleştireceği farz edilir (Hughes, 1993).

$$u(1) = g \quad (3.1.1.1)$$

$$-u_x(0) = h \quad (3.1.1.2)$$

Burada g ve h belirli sabitlerdir. u 'nun $x=1$ 'de g değerini kabul ettiği ve u 'nun türevinin de (eğim) $x=0$ 'da $-h$ değerini benimsediğini (3.1.2) ve (3.1.3) denklemleri gerektirir. Sınır durumlarının bu serisi farklı formülasyonların belli anahtar özelliklerini mümkün kılar. (3.1.2) ve (3.1.3) tipindeki sınır durumları “iki noktalı sınır değeri problemi” olarak adlandırılır (Hughes, 1993).

Sınır değeri probleminin kuvvetli biçimi (S) alttaki gibi ifade edilir.

$$(S) \quad \left[\begin{array}{l} \text{Belirli } f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ ve sabitler } g \text{ ve } h, u: [0,1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ fonksiyonunun} \\ \text{bulunması} \\ u_{,xx} + f = 0 \quad]0,1[\text{ üzerinde} \\ u(1) = g \\ -u(0) = h \end{array} \right.$$

$]0,1[$ aralığında $u_{,xx} + f = 0$ yazıldığında, $u_{,xx}(x) + f(x) = 0 \quad x \in]0,1[$ aralığında kabul edilir. (S)'nin tam çözümünü elde etmek önemsizdir.

$$u(x) = g + (1-x)h + \int_x^1 \left\{ \int_0^y f(z).dz \right\} dy \quad (3.1.1.3)$$

Burada y ve z yapay değişkenleri belirtmek için kullanılır. Tam sonuç elde etmek mümkün değildir, fakat S 'nin yaklaşık çözümü daha karmaşık durumlara uygulanabilir (Hughes, 1993).

3.1.2 Problemin zayıf veya değişken biçimi

S 'nin zayıf veya farklı tamamlayıcı karşılığının belirlenmesinde fonksiyonun iki türünün nitelendirilmesi arzu edilir. Başlangıçtan itibaren sınır durumu $u(1)=g$ 'yi temin etmek için olası çözümler gerekir. Diğer sınır durumu tanım içerisinde kapsamaz. Eğer u deneme çözümü ise (Hughes, 1993),

$$\int_0^1 (u_x)^2 dx < \infty \quad (3.1.2.1)$$

(3.1.2.1) bağıntısını sağlayan fonksiyonlar H^1 fonksiyonu olarak adlandırılır. Dolayısıyla $u \in H^1$ 'dir. Bazı durumlarda aralık açıkça içerilir, yani $u \in H^1([0,1])$. δ ile gösterilen deneme çözümlerinin toplamı bütün fonksiyonları içerir ki bu fonksiyonlar integre olabilen türevlerin karesine eşittir ve $x=1$ 'de g değerini belirler. Bu durum aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\delta = \{ u / u \in H^1, u(1) = g \} \quad (\text{deneme çözümü}) \quad (3.1.2.2)$$

Burada δ nesnelere toplamıdır. Fonksiyonların ikinci toplamı varyasyonlar olarak adlandırılır. Toplanma işlemleri deneme çözümlerine oldukça benzemektedir. Burada g sınır durumunun homojen tamamlayıcı karşılığı gerekir. $w(1)=0$ 'ı elde etmek için varyasyonlara ve denklemlere ihtiyaç vardır. Toplama V ile gösterilir ve aşağıdaki biçimde tanımlanır.

$$V = \{ w / w \in H^1, w(1) = 0 \} \quad (\text{varyasyonlar}) \quad (3.1.2.3)$$

Önce yapılan tanımlamalarla beraber sınır değer probleminin uygun zayıf biçimi (W) ifade edilebilir (Hughes, 1993).

$$(W) \left[\begin{array}{l} f, g \text{ ve } h \text{ daha önce tanımlanmıştı. Bütün } w \in V \text{ için } u \in \delta \text{ olursa ve } u \text{ bulunursa} \\ \int_0^1 w_{,x} u_{,x} dx = \int_0^1 w f dx + w(0) h \end{array} \right. \quad (3.1.2.4)$$

Bu tip bir formülasyon mekanikte virtüel yer değiştirme veya virtüel iş olarak adlandırılır. (3.1.2.4) denklemi varyasyonel denklem veya virtüel (zahiri) iş denklemdir. W çözümü zayıf veya genelleştirilmiş çözümdür (Hughes, 1993).

3.1.3 Kuvvetli ve zayıf formların dengi, doğal sınır durumları

Açıkça problemin kuvvetli ve zayıf versiyonları arasında bir ilişki olmalıdır. Bu durum kuvvetli ve zayıf olarak özdeş çözümleri üretir. Bütün fonksiyonların düzenli olduğu farz edilerek böyle bir yaklaşım tesis edilebilir (Hughes, 1993). Orijinal sınır değeri problemine yaklaşık çözümleri elde etmede alternatif başlangıç noktaları mevcuttur, yani problemin kuvvetli ve zayıf ifadeleri vardır. Temel ilke fonksiyonların sonlu boyut toplamlarına uygun olarak δ ve V değerlerine yaklaşımdır. Açık olarak δ ve V sonsuz değerde fonksiyon içerir. Varyasyonel denklemler sonlu boyut bağlamı içerisinde çözülür (Hughes, 1993). Eğer,

$$a(w, u) = \int_0^1 w_{,x} u_{,x} dx \quad (3.1.3.1)$$

$$(w, f) = \int_0^1 w f dx \quad (3.1.3.2)$$

olursa, (3.1.3.1) ve (3.1.3.2) denklemlerini kullanarak varyasyonel (virtüel) denklem aşağıdaki biçimini alır.

$$a(w,u) = (w,f) + w(0)h \quad (3.1.3.3)$$

3.1.4 Galerkin yaklaşım metodu

Galerkin yaklaşım metodu zayıf formülasyonlara dayanan sınır değer problemlerinin yaklaşık çözümünü elde etmede kullanılır. Metodun gelişimindeki ilk adım δ ve V 'nin sonlu boyutsal yaklaşımlarını oluşturmaktır. Fonksiyonların toplamları δ^h ve V^h ile gösterilir. Bu işaretler aralık değerlerinin sonlu elemanlar ağı oluşumu ile ilişkilidir. Karakteristik uzunluk ölçeği h ile parametrize edilmiştir. δ^h ve V^h δ ve V 'nin altında olarak düşünülürse (Hughes, 1993),

$$\delta^h \subset \delta \quad (\text{yani, eğer } u^h \in \delta^h, u^h \in \delta) \quad (3.1.4.1)$$

$$V^h \subset V \quad (\text{yani, eğer } w^h \in V^h, w^h \in V) \quad (3.1.4.2)$$

Yukarıda parantez içerisinde tam anlamlar verilmektedir. (3.1.4.1) ve (3.1.4.2)'den elde edilen sonuçlar, eğer $u^h \in \delta^h$ ve $w^h \in V^h$ ise,

$$u^h(1) = g \quad (3.1.4.3)$$

$$w^h(1) = 0 \quad (3.1.4.4)$$

olur. Toplamlar δ, V, δ^h, V^h fonksiyon uzayları olarak adlandırılır. Matematikte uzay terminolojisi genellikle doğrusal yapı anlamına gelir (Hughes, 1993).

3.1.4.1 Bubnov (Galerkin) metodu

Toplam V^h 'nin belirli olduğu farz edilir. Daha sonra her elemanda $v^h \in V^h$ dir, aşağıdaki biçimde $u^h \in \delta^h$ fonksiyonu oluşturulur (Hughes, 1993).

$$U^h = v^h + g^h \quad (3.1.4.1.1)$$

Burada g^h , esas sınır durumunu temin eden belirli fonksiyondur. Yani,

$$g^h(1) = g \quad (3.1.4.1.2)$$

(3.1.4.1.1) gerekli sınır durumunu da oluşturur.

$$u^h(1) = v^h(1) + g^h(1) = 0 + g \quad (3.1.4.1.3)$$

$w^h \in V^h$ ve $u^h \in \delta^h$ teriminden (3.1.3.3) biçiminde varyasyonel denklem yazılırsa,

$$a(w^h, u^h) = (w^h, f) + w^h(0)h \quad (3.1.4.1.4)$$

Bu denklem yaklaşık zayıf çözümün (u^h) tanımlanmasını sağlar. (3.1.4.1.1)

(3.1.4.1.4)'de yerine yazılırsa,

$$a(w^h, v^h) = (w^h, f) + w^h(0)h - a(w^h, g^h) \quad (3.1.4.1.5)$$

ifadesi elde edilir. Bu denkleme Galerkin denklemi adı verilir (Hughes, 1993).

3.1.5 Matris denklemleri, eğilmezlik matrisi K

Galerkin metodu, lineer cebirsel denklemlerin birleşik sistemlerinin çözümünde kullanılır.

$$\sum_{B=1}^n \alpha(N_A, N_B) \cdot d_B = (N_A, f) + N_A(0)h - \alpha(N_A, N_{n+1})g \quad (3.1.5.1)$$

Yukarıdaki denklemde d_B haricinde bütün değerler bilinir. Bu ifade n bilinmeyenli n denklem sistemi oluşturur. Bu ifade daha açık olarak aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$K_{AB} = \alpha(N_A, N_B) \quad (3.1.5.2)$$

$$F_A = (N_A, f) + N_A(0)h - \alpha(N_A, N_{n+1})g \quad (3.1.5.3)$$

(3.1.5.1) denklemi alttaki biçimde yazılıp basitleştirilerek matris formuna dönüştürülür.

$$\sum_{B=1}^n K_{AB} \cdot d_B = F_A, \quad A=1,2,3,4,\dots,n \quad (3.1.5.4)$$

$$K = [K_{AB}] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.1.5.5)$$

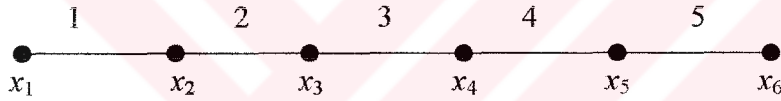
$$F = [F_A] = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (3.1.5.6)$$

$$d = [d_B] = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \quad (3.1.5.7)$$

$$K.d = F \quad (3.1.5.8)$$

Burada K eğilmezlik matrisi, F kuvvet vektörü ve d 'de deplasman vektörüdür. Bu ifadelere matris dengi M denir (Hughes, 1993).

$$d = K^{-1}.F \quad (3.1.5.9)$$



Burada x düğüm noktası koordinatlarını, rakamlar da (1,...,5) eleman numaralarını tanımlar (Hughes, 1993).

Burada $[K]$ matrisi simetrik matristir.

$$\begin{aligned} K_{AB} &= a(N_A, N_B) \\ &= a(N_B, N_A) \\ &= K_{BA} \end{aligned}$$

$$[K] = [K^T] \quad (3.1.5.10)$$

$$(S) \square (W) = (G) \square (M) \quad (3.1.5.11)$$

3.2 İki ve üç boyutlu sonlu elemanlar metodu

3.2.1 Klasik doğrusal elastostatik : kuvvetli ve zayıf biçimleri

σ_1 gerilme tensörünü, u deplasman vektörünü belirsin. f 'de birim hacimde tanımlanmış gövde kuvveti olsun. Sonsuz küçük olan zorlama tensörü ε_{ij} deplasman gradyanlarının simetrik kısmı olarak tanımlanır (Hughes, 1993).

$$\varepsilon_{ij} = u_{(i,j)} = (u_{i,j} + u_{j,i}) \div 2 \quad (\text{zorlama- deplasman denklemleri}) \quad (3.2.1)$$

Gerilme tensörü genelleştirilmiş Hooke's kanunu ile zorlama tensörü teriminden tanımlanır (Hughes, 1993).

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3.2.2)$$

Burada c_{ijkl} 'nin elastik katsayıları x 'in belirli fonksiyonlarıdır. Eğer c_{ijkl} sabitse gövde homojen olur. Elastik katsayılar aşağıdaki özellikleri sağlayacak biçimde farz edilir.

$$c_{ijkl} = c_{klij} \quad (\text{büyük simetri}) \quad (3.2.3)$$

$$\left. \begin{array}{l} c_{ijkl} = c_{jikl} \\ c_{ijkl} = c_{ijlk} \end{array} \right\} \quad (\text{küçük simetri}) \quad (3.2.4)$$

Sınır değer probleminin kuvvetli şeklinin biçimsel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$(S) \quad \left[\begin{array}{l} \text{Belirli } f_I \text{ için } : \Omega \rightarrow \mathbb{R}, g_I : \Gamma_{vI} \rightarrow \mathbb{R}, \text{ ve } h_I : \Gamma_{hI} \rightarrow \mathbb{R}, u_I : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R} \text{ bulunursa,} \\ \sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad \Omega \text{ içerisinde (denge denklemleri)} \end{array} \right. \quad (3.2.5)$$

$$u_i = g_i \quad \Gamma_{vI} \text{ üzerinde} \quad (3.2.6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{ij} n_j = h_i \quad \Gamma_{hI} \text{ üzerinde} \end{array} \right. \quad (3.2.7)$$

Burada σ_{ij} (3.2.1) ve (3.2.2) tarafından u teriminden tanımlanır. g_l fonksiyonu sınır deplasmanları h_l fonksiyonu da sınır direnci olarak tanımlanır. S bazen doğrusal elastostatiğin karışımı sınır değer problemi olarak adlandırılır. Veriler üzerinde uygun hipotezler altında S tek çözüme sahip olur (Hughes, 1993). Zayıf formülasyon aşağıdaki gibidir.

$$(W) \left[\begin{array}{l} \text{Belirli } f_j: \Omega \rightarrow \mathbb{R}, g_l: \Gamma_{vl} \rightarrow \mathbb{R} \text{ ve } h_l: \Gamma_{hl} \rightarrow \mathbb{R} \text{ bütün } w_i \in V_l \text{ için } u_l \in \delta_l \text{ bulunursa,} \\ \int_{\Omega} w_{(i,j)} \cdot \sigma_{ij} \cdot d\Omega = \int_{\Omega} w_l \cdot f_l \cdot d\Omega + \sum_{i=1}^{n_{sd}} \left(\int_{\Gamma_{hl}} w_l \cdot h_l \cdot d\Gamma \right) \end{array} \right. \quad (3.2.8)$$

Burada σ_{ij} (3.2.1) ve (3.2.2) tarafından u teriminden tanımlanır. Katılar mekaniği içerisinde W bazı durumlarda virtüel iş veya virtüel deplasman prensibi olarak tanımlanır. w_l virtüel deplasman ismini alır (Hughes, 1993).

$$\left[\begin{array}{l} \text{Her } w^h \in V^h \text{ olarak } v^h \in V^h \text{ bulunursa} \\ a(w^h, v^h) = (w^h, f) + (w^h, h)_{\Gamma} - a(w^h, g^h) \end{array} \right. \quad (3.2.9)$$

$$(M) \text{ için } Kd=F \text{ olduğu yerlerde } K = \sum_{e=1}^{n_{el}} (k^e), F = F_{d,n} + \sum_{e=1}^{n_{el}} (f^e)^{20} \quad (3.2.10)$$

$$k_{pq}^e = e_{ij}^T \cdot k_{ab}^i \cdot e_j, \quad k_{ab}^e = \int_{\Omega^e} B_a^T D B_b \cdot d\Omega \quad (3.2.11)$$

$$\int_{\Omega^i} N_a \cdot f_i \cdot d\Omega + \int_{\Gamma^i} N_a \cdot h_i \cdot d\Gamma - \sum_{q=1}^{n_{el}} k_{pq}^e \cdot g_{pq}^e = f_p^e \quad (3.2.12)$$

$$p = n_{cd}(a-1) + i \quad (3.2.13)$$

$$q = n_{cd}(b-1) + j \quad (3.2.14)$$

$$\text{bir noktadaki gerilme } \sigma(x) = D(x) \sum_{\alpha=1}^{n_{in}} B_{\alpha}(x) d_{\alpha} \quad (3.2.15)$$

3.2.2 Klasik doğrusal ısı iletimi denklemleri

$$(S) \quad q_{i,i} = f \quad \Omega \text{ içerisinde} \quad (3.2.2.1)$$

$$u = g \quad \Gamma_g \text{ üzerinde} \quad (3.2.2.2)$$

$$-q_i n_i = h \quad \Gamma_h \text{ üzerinde} \quad (3.2.2.3)$$

Burada $q_i = K_{ij} u_j$ 'dir.

(W) için her $w \in V$ ise $u \in \delta^7$ 'nin bulunması

$$a(w, u) = (w, f) + (w, h)_{\Gamma} \quad (3.2.2.4)$$

Burada,

$$a(w, u) = \int_{\Omega} w_i k_{ij} u_j d\Omega \quad (3.2.2.5)$$

$$(w, f) = \int_{\Omega} w_i f_i d\Omega \quad (3.2.2.6)$$

$$(w, h)_{\Gamma} = \int_{\Gamma} w_i h_i d\Gamma \quad (3.2.2.7)$$

(G) için her $w^h \in V^h$ ise $v^h \in \delta^h$ bulunursa,

$$a(w^h, v^h) = (w^h, f) + (w^h, h)_{\Gamma} - a(w^h, g^h) \quad (3.2.2.8)$$

$$(M) \text{ için } Kd = F, \text{ burada } K = \sum_{e=1}^{n_{el}} (k^e), \quad F = F_{d.n.} + \sum_{e=1}^{n_{el}} (f^e)^{20} \quad (3.2.2.9)$$

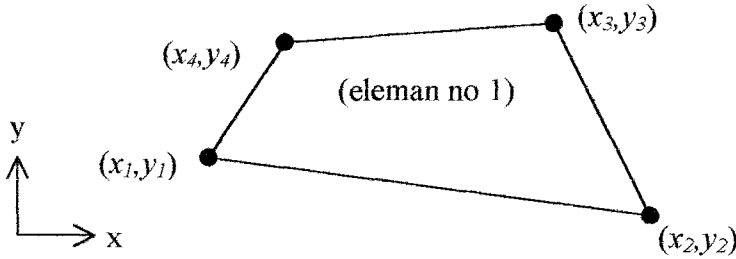
$$k_{ab}^e = \int_{\Omega^e} B_a^T D B_b d\Omega \quad (3.2.2.10)$$

$$f_a^e = \int_{\Omega^e} N_a f d\Omega + \int_{\Gamma_h^e} N_a h d\Gamma - \sum_{b=1}^{n_{el}} k_{ab}^e g_b^e \quad (3.2.2.11)$$

$$\text{noktadaki ısı akım vektörü, } q(x) = -D(x) \sum_{a=1}^{n_{en}} B_a(x) \cdot d_a^e \quad (3.2.2.12)$$

3.2.3 İki boyutlu doğrusal dörtgen eleman

Bu eleman Taig tarafından geliştirilmiştir. Dikdörtgen biçim Argyris tarafından ilk olarak önerilmiştir. Düz kenarlı dörtgen elemanın alanı köşeleri oluşturan dört düğüm noktasının koordinatları ile belirtilir (Hughes, 1993).



Şekil 3.1 : İki boyutlu kabuk elemanı.

İki boyutlu kabuk elemanı x ve y düzlemleri üzerinde oluşur. Bir yönde diğer bir koordinat sabit kalmak koşulu ile numaralandırma yapılır. Dört düğüm noktasından oluşur. Koordinatlar x ve y değerlerinin girilmesiyle de ayrı ayrı verilebilir.

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} \quad (3.2.3.1)$$

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.2.3.2)$$

$$x(\xi, \eta) = \sum_{a=1}^4 N_a(\xi, \eta) x_a^e \quad (3.2.3.3)$$

$$y(\xi, \eta) = \sum_{a=1}^4 N_a(\xi, \eta) y_a^e \quad (3.2.3.4)$$

$$N_a(\xi) = N_a(\xi, \eta) = (1/4) \cdot (1 + \xi_a \xi)(1 + \eta_a \eta) \quad (3.2.3.5)$$

3.2.4 İzoparametrik elemanlar

İzoparametrik kavramı genelde Taig ve Irons tarafından geliştirilmiştir. \square , ξ uzayı içerisindeki alanı belirtirse,

$x: \square \rightarrow \bar{\Omega}^1$ biçiminde olursa

$$x(\xi) = \sum_{a=1}^{n_{en}} N_a(\xi) \cdot x_a^e \quad (3.2.4.1)$$

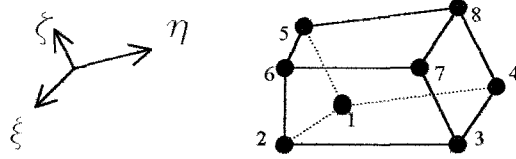
Eğer eleman interpolasyon fonksiyonu u^h aşağıdaki biçimde yazılabilirse,

$$u^h(\xi) = \sum_{a=1}^n N_a(\xi) \cdot d_a^e \quad (3.2.4.2)$$

bu durumda eleman izoparametrik olur.

3.2.5 Üç boyutlu doğrusal eleman

Üç boyutlu analiz için temel elemanı oluşturur. Katı prizma elemanı olarak adlandırılır. Bir elemanı tanımlar. Sekiz düğüm noktasından oluşur. Düğüm noktaları koordinatları girilir. Düğüm noktalarının numaralandırılması herhangi bir şekilde veya belirli düzende girilebilir. Komutlarla düğüm noktası koordinatları yazılabileceği gibi tek tek koordinatların girilmesi şekliyle de katı eleman oluşturulabilir (Hughes, 1993).



Şekil 3.2 : Sekiz düğüm noktasından oluşmuş 3 boyutlu katı eleman.

$$N_a(\xi, \eta, \zeta) = (1/8).(1 + \xi_a \xi)(1 + \eta_a \eta)(1 + \zeta_a \zeta) \quad (3.2.5.1)$$

3.2.6 Elemanın eğilmezlik formülasyonu

Eğilmezlik kodlamasında en önemli 3 uygulama açıklanır. Birinci uygulamaya göre alttaki formül geçerlidir,

$$K^I \cong \sum_{l=1}^{n, b_{sl}} (B^T \bar{D} B)_l \quad (3.2.6.1)$$

Burada $l=1, \dots, n_{b_{sl}}$ için B zorlama-deplasman matrisi, \bar{D} bileşim matrisi, B^T B 'nin transpozudur. Toplamın sağ tarafında kalan ifadelerin tamamı simetriği hesaba katar. İkinci uygulamaya göre,

$$K_{ab}^J \cong \sum_{l=1}^{n, b_{sl}} (B_a^T \bar{D} B_b)_l \quad (3.2.6.2)$$

Üçüncü uygulamaya göre, eğer malzeme izotropik ve homojen olarak varsayılırsa,

$$\begin{aligned}
 k_{iajb}^I &= (\mu(\delta_{ij}\delta_{kl}) + \lambda\delta_{ik}\delta_{jl}) \int_{\Omega} N_{a,k}N_{b,l}d\Omega \\
 &= \mu \left(\delta_{ij} \int_{\Omega} N_{a,k}N_{b,k}d\Omega + \int_{\Omega} N_{a,j}N_{b,i}d\Omega \right) + \lambda \int_{\Omega} N_{a,i}N_{b,j}d\Omega \quad (3.2.6.3)
 \end{aligned}$$

Yukarıda sonlu elemanlar metodunun kodlanmasında en önemli 3 uygulama yer almıştır.

Birinci uygulama en genel ve en basit olanıdır. İkincisi birazdaha özeldir fakat elde edilen verim yüksek olmaktadır. Doğrusal olmayan hesaplamalarda [D] matrisi tam anlamıyla doludur. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizlerde elemanların davranışlarını düzenlemek için popüler metod [B] ifadesinin tam dolu olmasıyla meydana gelir.

Yukarıdaki durumlar altında birinci ifade uygulanabilir. Diğer ifadelerin uygulama alanları yoktur. Diğer ifadelerin ilişkili oldukları durumlar için kullanılması tercih edilebilir. En iyi uygulama şekli amaçların ne olduğuna göre değişmektedir.

Elemanın eğilmezlik formülasyonunun programlanmasında yukarıdaki ifadeler kullanılır.

Yukarıda belirtilen (3.2.6.1) ifadesi her düğüm noktasında hesaplanır ve sonuç olarak her düğüm noktası için hesaplanmış değerler toplanarak ortak bir değer elde edilmiş olur.

3.3 Plak ve kiriş yaklaşımları

3.3.1 Genel

Klasik Bernoulli-Euler kiriş teorisindeki gibi klasik Poisson-Kirchhoff plak teorisi C^1 sürekliliğini gerektirir. Sürekli (yani C^0) sonlu elemanlar interpolasyonları basitçe yapılabilir. Aynı ifade çok boyutlu C^1 interpolasyonları için söylenemez. Klasik teoriye dayanan 2 boyutlu plaka elemanları için uyumlu C^1 interpolasyon planlarını geliştirmede yaratıcılık ön plana çıkar (Hughes, 1993).

3.3.2 Reissner- Mindlin plak teorisi

3.3.2.1 Genel denklem

$$\sigma_{\alpha\beta} = \bar{\lambda} \cdot \delta_{\alpha\beta} \cdot \varepsilon_{\gamma\gamma} + 2\mu \varepsilon_{\alpha\beta} \quad (3.3.2.1)$$

$$\sigma_{\alpha 3} = 2\mu \varepsilon_{\alpha 3} \quad (3.3.2.2)$$

Burada

$$\bar{\lambda} = 2\lambda\mu \div (\lambda + 2\mu) \quad (3.3.2.3)$$

λ ve μ Lamé katsayılarıdır. $\bar{\lambda}$ ve μ , E (Young modülü)'ye ve ν (Poisson oranı)'ye bağlı olarak elenebilir (Hughes, 1993).

$$\bar{\lambda} = \nu E \div (1 - \nu^2) \quad (3.3.2.4)$$

$$\mu = E \div (2(1 + \nu)) \quad (3.3.2.5)$$

3.3.2.2 Zorlama-deplasman denklemleri

$$\varepsilon_{a\beta} = u_{(a,\beta)} = -z\theta_{(a,\beta)} \quad (3.3.2.6)$$

$$\varepsilon_{\alpha 3} = u_{(a,3)} = (-\theta_a + w_a) \div 2 \quad (3.3.2.7)$$

3.3.2.3 Varyasyonel (Virtüel)denklem

$$0 = \int_A (-\bar{K}_{a\beta} \cdot \bar{m}_{a\beta} + \bar{\gamma}_a q_a) \cdot dA - \int_A (-\bar{\theta}_a \cdot \bar{C}_a + \bar{w}F) \cdot dA - \int_S (-\bar{\theta}_a \cdot \bar{M}_a + \bar{w} \cdot Q) \cdot dS \quad (3.3.2.8)$$

3.3.2.4 Zayıf biçim

$$0 = \int_A [\bar{\theta}_{(a,\beta)} \cdot \bar{C}_{a\beta} \gamma_\delta \cdot \bar{\theta}_{(\gamma,\delta)} + \bar{\gamma}_a \cdot \bar{C}_{a\beta} \cdot \bar{\gamma}_\beta] \cdot dA + \int_A (\bar{\theta}_a \bar{C}_a - \bar{w}F) \cdot dA + \int_S (\bar{\theta}_a \bar{M}_a - \bar{w}Q) \cdot dS \quad (3.3.2.9)$$

3.3.2.5 Matris formülasyonu

Varyasyonel (virtüel) denklemin matris formülasyonu aşağıda belirtildiği gibidir (Hughes, 1993).

$$0 = \int_A (\bar{K}^T \cdot D^b \cdot K + \bar{\gamma}^T \cdot D^s \cdot \gamma) dA + \int_A (\bar{\theta}^T \cdot C - \bar{w}F) dA + \int_{S_h} (\bar{\theta}^T \cdot M - \bar{w}Q) dS \quad (3.3.2.10)$$

3.3.2.6 Sonlu elemanlar eğilmezlik matrisi ve yük vektörü

Sonlu elemanlar eğilmezlik matrisi ve yük vektörü varyasyonel denklemin matris biçiminden doğrudan elde edilebilir. \bar{w} , w , θ_a , $\bar{\theta}_a$ olan sonlu elemanlar yaklaşımları w^h , \bar{w}^h , θ_a^h ve $\bar{\theta}_a^h$ olarak belirtilir. n_{en} düğüm noktasına sahip tipik eleman içerisinde,

$$w^h = \sum_{a=1}^{n_{en}} N_a w_a^h \quad (3.3.2.11)$$

$$\bar{w}^h = \sum_{a=1}^{n_{en}} N_a \bar{w}_a^h \quad (3.3.2.12)$$

$$\theta_a^h = \sum_{a=1}^{n_{en}} N_a \theta_{aa}^h \quad (3.3.2.13)$$

$$\bar{\theta}_a^h = \sum_{a=1}^{n_{en}} N_a \bar{\theta}_{aa}^h \quad (3.3.2.14)$$

Burada N_a , a düğüm noktası ile ilgili şekil fonksiyonudur. Sırasıyla w_a^h , \bar{w}_a^h , θ_{aa}^h ve $\bar{\theta}_{aa}^h$; w^h , \bar{w}^h , θ_a^h ve $\bar{\theta}_a^h$ 'nin a 'nıncı düğüm noktası değerleridir (Hughes, 1993).

Aynı şekil fonksiyonları ve düğüm noktası şablonları teriminden tanımlanan θ_a^h ve w^h değerlerini farz etmek gerekli değildir. Eleman eğilmezlik matrisleri ve yük vektörü için aşağıdaki ifadeler elde edilir (Hughes, 1993).

$$k^e = k_b^e + k_s^e \quad (3.3.2.15)$$

$$k_b^e = \int_{A^e} B^{bT} . D^b . B^b . dA \quad (\text{düğüm eğilmezlik integrali}) \quad (3.3.2.16)$$

$$k_s^e = \int_{A^e} B^{st} D^s B^s dA \quad \text{(kesme eğilmezlik integrali)} \quad (3.3.2.17)$$

$$f^e = \{f_p^e\} \quad (3.3.2.18)$$

$$f_p^e = \begin{bmatrix} \int_{A^e} N_a f dA + \int_{s^e \cap s_h} N_a Q dS & p=3a-2 \\ - \int_{A^e} N_a C_1 dA - \int_{s^e \cap s_h} N_a M_1 dS & p=3a-1 \\ - \int_{A^e} N_a C_2 dA - \int_{s^e \cap s_h} N_a M_2 dS & p=3a \end{bmatrix} \quad (3.3.2.19)$$

A^e ve s^e sırasıyla e 'ninci elemanın alan ve sınır değerleridir.

3.3.3 Kirişlerin çözümü

3.3.3.1 Bileşim denklemi

$$\sigma_{33} = E \epsilon_{33} \quad (3.3.3.1)$$

$$\sigma_{a3} = 2\mu \epsilon_{a3} \quad (3.3.3.2)$$

3.3.3.2 Zorlama-deplasman denklemleri

$$\epsilon_{\alpha\beta} = u_{(\alpha,\beta)} = 0 \quad (3.3.3.3)$$

$$\varepsilon_{13} = (w_1^1 - x_2 \theta_3^1 - \theta_2) \div 2 \quad (3.3.3.4)$$

$$\varepsilon_{23} = (w_2^1 + x_1 \theta_3^1 + \theta_1) \div 2 \quad (3.3.3.5)$$

$$\varepsilon_{33} = w_3^1 - x_1 \theta_2^1 + x_2 \theta_1^1 \quad (3.3.3.6)$$

Burada üs ifade "Γ" x_3 'e göre birinci türevi belirtir.

3.3.3.3 Varyasyonel (Virtüel) denklem

$$0 = \sum_{e=1}^{n_{el}} \left\{ \int_0^{h^e} [(\bar{w}_1^1 - \bar{\theta}_2)q_1 + (\bar{w}_2^1 + \bar{\theta}_1)q_2 + \bar{w}_3^1 q_3 + \bar{\theta}_1^1 m_1 - \bar{\theta}_2^1 m_2 + \bar{\theta}_3^1 m_3] dx_3 - \int_0^{h^e} [\bar{w}_1 F_1 + \bar{w}_2 F_2 + \bar{w}_3 F_3 + \bar{\theta}_1 C_1 - \bar{\theta}_2 C_2 + \bar{\theta}_3 C_3] dx_3 \right\} \quad (3.3.3.7)$$

3.3.3.4 Zayıf biçim

$$0 = \sum_{e=1}^{n_{el}} \left\{ \int_0^{h^e} (\gamma_1 \mu A^s \gamma_1 + \gamma_2 \mu A^s \gamma_2 + \bar{K}_1 EI_1 K_1 + \bar{K}_2 EI_2 K_2 + \bar{\varepsilon} EA \varepsilon + \bar{\psi} \mu J \psi) dx_3^e - \sum_{A \in f} (\bar{w}_A^T Q_A + \bar{\theta}_A^T M_A) \right\} \quad (3.3.3.8)$$

$$a(\bar{u}, u) = (\bar{u}, f) + (\bar{u}, h)_{\Gamma} \quad (3.3.3.9)$$

$$(\bar{u}, h)_{\Gamma} = \sum_{A \in f} (\bar{w}_A^T Q_A + \bar{\theta}_A^T M_A) \quad (3.3.3.10)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad \bar{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \bar{w}_3 \\ \bar{\theta}_1 \\ \bar{\theta}_2 \\ \bar{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ C_1 \\ -C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{h} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (3.3.3.11)$$

$$a(\bar{\mathbf{u}}, \mathbf{u}) = \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_0^{h^e} \left(\bar{\gamma}_1 \mu A^s \gamma_1 + \bar{\gamma}_2 \mu A^s \gamma_2 + \bar{K}_1 EI_1 K_1 + \bar{K}_2 EI_2 K_2 + \bar{\varepsilon} EA \varepsilon + \bar{\psi} EJ \psi \right) dx_3^e$$

yukarıdaki denklem (3.3.3.12) denklemdir.

$$(\bar{\mathbf{u}}, \mathbf{f}) = \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_0^{h^e} \left(\bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 + \bar{w}_3 f_3 + \bar{\theta}_1 C_1 - \bar{\theta}_2 C_2 + \bar{\theta}_3 C_3 \right) dx_3^e \quad (3.3.3.13)$$

3.3.3.5 Varyasyonel denklemin matris formülasyonu

$$0 = \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_0^{h^e} \left\{ [\bar{\gamma}^T \cdot D^l \cdot \gamma + \bar{K}^T \cdot D^b \cdot K + \bar{\varepsilon} (EA) \varepsilon + \bar{\psi} (\mu J) \psi] dx_3^e \right\} - \int_0^{h^e} [\bar{w}^T F + \bar{\theta}^T C] dx_3^e - \sum_{A \in f} (\bar{w}_{A \cdot}^T Q_A + \bar{\theta}_{A M A}^T M_A) \quad (3.3.3.14)$$

İlk integral içerisinde birinci toplam kesmeyi, ikinci toplam bükülmeyi, üçüncü toplam normal ve sonuncu toplam ise burkulmayı gösterir (Hughes, 1993).

3.3.3.6 Sonlu elemanlar eğilmezlik matrisi ve yük vektörü

Lokal koordinat sistemine göre alttaki ifadeler elde edilir.

$$k^e = k_b^e + k_s^e + k_a^e + k_l^e \quad (3.3.3.15)$$

$$k_b^e = \int_0^{h^e} B^{bT} \cdot D^b \cdot B^b \cdot dx_3^e \quad (\text{bükülme eğilmezlik ifadesi}) \quad (3.3.3.16)$$

$$k_s^e = \int_0^{h^e} B^{sT} \cdot D^s \cdot B^s \cdot dx_3^e \quad (\text{kesme eğilmezlik ifadesi}) \quad (3.3.3.17)$$

$$k_a^e = \int_0^{h^e} B^{aT} (EA) B^a \cdot dx_3^e \quad (\text{normal eğilmezlik ifadesi}) \quad (3.3.3.18)$$

$$k_l^e = \int_0^{h^e} B^{lT} (\mu J) B^l \cdot dx_3^e \quad (\text{burkulma eğilmezlik ifadesi}) \quad (3.3.3.19)$$

$$f^e = \{f_p^e\} \quad (3.3.3.20)$$

$$f_p^e = \begin{bmatrix} h^e \\ \int_0^h N_a F_L dx_3 \\ 0 \\ (-1)^{i+1} \int_0^h N_a C_i dx_3 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} p = 6a - 6 + i \\ \\ \\ p = 6a - 3 + i \\ \end{matrix} \quad (3.3.3.21)$$

3.3.4 Kabuk elemanları

3.3.4.1 İndirgenmiş bileşim denklemleri

$$\bar{\sigma}^I = \bar{D}^I \bar{\varepsilon}^I \quad (3.3.4.1)$$

3.3.4.2 Zorlama-deplasman matrisi

$$\bar{\varepsilon}^I = \{\bar{\varepsilon}^I\} = \begin{bmatrix} du_1^I / dx_1^I \\ (du_1^I / dx_2^I) + (du_2^I / dx_1^I) \\ \dots \\ u_1 / x_1 \end{bmatrix} \quad (3.3.4.2)$$

u_1 / x_1 'in sıfır olduğu durumlarda düzlem zorlama ve düzlem gerilme durumu ortaya çıkar. (3.3.4.2) ifadesi simetrik olmayan durumlar içindir (Hughes, 1993).

3.3.4.3 Eğilmezlik matrisi

$$\begin{bmatrix} k \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{3.n_{el} \times 3.n_{el}} = [k_{ab}] \quad (3.3.4.3)$$

$$k_{ab} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B_a^T \cdot D \cdot B_b \cdot J \cdot d\xi \cdot d\eta \quad (3.3.4.4)$$

$\begin{matrix} \boxed{} \\ 3 \times 3 \end{matrix}$ $\begin{matrix} -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{matrix}$

3.3.4.4 Harici kuvvet vektörleri

3.3.4.4.1 Gövde kuvveti

$$f_{a}^{\text{gövde}} = \{f_a^{\text{gövde}}\} \quad (3.3.4.5)$$

$\begin{matrix} \boxed{} \\ 3n_{el} \times 1 \end{matrix}$

$$f_a^{\text{gövde}} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N^T \cdot f \cdot J \cdot d\xi \cdot d\eta \quad (3.3.4.6)$$

$\begin{matrix} \boxed{} \\ 3 \times 1 \end{matrix}$ $\begin{matrix} -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{matrix}$

3.3.4.4.2 Yüzey kuvveti

$$f_a^{\text{yüzey}} = \{f_a^{\text{yüzey}}\} \quad (3.3.4.7)$$

$$f_a^{\text{yüzey}} = \int_{-1}^1 N_a^T \cdot h \cdot J_s \cdot d\eta \quad \xi = \begin{cases} 1 & \text{en tepe} \\ -1 & \text{en alt} \end{cases} \quad (3.3.4.8)$$

3.3.5 Parabolik, hiperbolik, ve eliptik öz değer problemleri

3.3.5.1 Parabolik durum

Zayıf formülasyon altındadır.

$$(W) \left[\begin{array}{l} \text{Belirli } f, g, h \text{ ve } u_o \text{ için bütün } w \in V \text{ için } t \in [0, T] \text{ olarak } u(t) \in \delta_1 \text{ bulunursa,} \\ (w, \rho \dot{c}u) + a(w, u) = (w, f) + (w, h)_\Gamma \quad (3.3.5.1) \\ (w, \rho c u(0)) = (w, \rho c u_o) \quad (3.3.5.2) \end{array} \right.$$

Galerkin formülasyonu aşağıdaki biçimdedir.

$$(G) \left[\begin{array}{l} \text{Eğer } f, g, h \text{ ve } u_o \text{ belirliyse bütün } w^h \in V^h \text{ için } u^h(t) \in \delta_1^h \text{ ise } u^h = v^h + g^h \text{ bulunursa,} \\ (w^h, \rho c v^h) + a(w^h, v^h) = (w^h, f) + (w^h, h)_\Gamma - (w^h, \rho c g^h) - a(w^h, g^h) \quad (3.3.5.3) \\ (w^h, \rho c v^h(0)) = (w^h, \rho c u_o) - (w^h, \rho c g^h(0)) \quad (3.3.5.4) \end{array} \right.$$

Matris denklemleri (M) altta ifade edilmiştir.

$$\text{Belirli } F:]0, T[\mathbb{R}^{n, e_2} \text{ ye giderken ise } d:]0, T[\mathbb{R}^{n, e_2} \text{ ye giderken bulunursa,} \\ M \dot{d} + Kd = F, \quad t \in]0, T[, \quad d(0) = d_o \quad (3.3.5.5)$$

$$\text{Burada, } M = \bigwedge_{e=1}^{n_{el}} (m^e) \quad (3.3.5.6)$$

$$m = [m^e_{ab}] \quad (3.3.5.7)$$

$$m^e_{ab} = \int_{\Omega^e} N_a \rho c N_b d\Omega \quad (3.3.5.8)$$

$$K = \bigwedge_{e=1}^{n_{el}} (k^e) \quad (3.3.5.9)$$

$$k^e = [k^e_{ab}] \quad (3.3.5.10)$$

$$k^e_{ab} = \int_{\Omega^e} B_a^T \cdot D \cdot B_b d\Omega \quad (3.3.5.11)$$

$$F(t) = F_{d,n}(t) + \bigwedge_{e=1}^{n_{el}} (f^e(t)) \quad (3.3.5.12)$$

$$f^e = \{f_a^e\} \quad (3.3.5.13)$$

$$f_a^e = \int_{\Omega^e} N_{\alpha} f_{\alpha} d\Omega + \int_{\Gamma^e} N_{\alpha} h_{\alpha} d\Gamma + \sum_{b=1}^{n_{el}} (k_{ab}^e g_b^e + m_{ab}^e g_b^e) \quad (3.3.5.14)$$

$$d_o = M^1 \cdot \bigwedge_{e=1}^{n_{el}} (d^e) \quad (3.3.5.15)$$

$$d^e = \{d_a^e\} \quad (3.3.5.16)$$

$$d_a^e = \int_{\Omega^e} N_{\alpha} \rho c u_{\alpha} d\Omega - \sum_{b=1}^{n_{el}} m_{ab}^e g_b^e(0) \quad (3.3.5.17)$$

3.3.5.2 Hiperbolik durum: Elasto dinamik ve yapısal dinamik.

Zayıf formülasyon ifadeleri alttdadır. Bütün $w \in V$ için belirli f, g, h, \dot{u}_o değerleri kullanılarak $u(t) \in \delta^1, t \in [0, T]$ 'nin bulunması (W);

$$(w, \rho \ddot{u}) + a(w, u) = (w, f) + (w, h)_{\Gamma} \quad (3.3.5.18)$$

$$(w, \rho \dot{u}(0)) = (w, \rho \dot{u}_o) \quad (3.3.5.19)$$

$$(w, \rho u(0)) = (w, \rho u_o) \quad (3.3.5.20)$$

Elastodinamik Galerkin formülasyonu,

Bütün $w^h \in V^h$ için belirli f, g, h, u_o, u_o değerleri altında $u^h(t) \in \delta_t^h$ iken $u^h = v^h \cdot g^h$ 'in bulunması (G);

$$(w^h, \rho \dot{v}^h) + a(w^h, v^h) = (w^h, f) + (w^h, h)_{\Gamma} - (w^h, \rho g^h) - a(w^h, g^h) \quad (3.3.5.21)$$

Matris ifadeleri;

$F:]0, T[\mathbb{R}^{n_{el}}$ ye giderken bu belirli fonksiyon için $d:]0, T[\mathbb{R}^{n_{el}}$ ye giderken bu fonksiyonun bulunmasında;

$$M \dot{d} + K d = F \quad t \in]0, T[\quad (3.3.5.22)$$

$$m^e = [m_{pq}^e] \quad (3.3.5.23)$$

$$m_{pq}^e = \delta_{ij} \int_{\Omega^e} N_a \rho N_b d\Omega \quad (3.3.5.24)$$

$$M = \bigwedge_{e=1}^{n_{el}} (m^e) \quad (3.3.5.25)$$

$$K = \bigwedge_{e=1}^{n_{el}} (k^e) \quad (3.3.5.26)$$

$$k^e = [k_{pq}^e] \quad (3.3.5.27)$$

$$k_{pq}^e = e_i^T \int_{\Omega^e} B_a^T \cdot D \cdot B_b \cdot d\Omega \cdot e_j \quad (3.3.5.28)$$

$$F(t) = F_{d,n}(t) + \bigwedge_{e=1}^{n_{el}} (f^e(t)) \quad (3.3.5.29)$$

$$f^e = \{f_p^e\} \quad (3.3.5.30)$$

$$f_p^e = \int_{\Omega} N_a f_i d\Omega + \int_{\Gamma^e} N_a h_i d\Gamma - \sum_{q=1}^{n_{el}} (k_{pq}^e g_q^e + m_{pq}^e g_q^e) \quad (3.3.5.31)$$

3.3.5.3 Öz değer problemleri

3.3.5.3.1 Kütle matrisi

$$m_{pq}^e = \delta_{ij} \int_{\Omega^e} N_a \rho N_b d\Omega = \delta_{ij} \int_{\square} N_a \rho N_b j d\xi \simeq \delta_{ij} \sum_{e=1}^{n_{el}} N_a(\xi_e) \rho(\xi_e) N_b(\xi_e) J(\xi_e) W_e$$

$$= \begin{cases} \delta_{ij} \rho(\xi_a) J(\xi_a) W_a & a=b \\ 0 & a \neq b \end{cases} \quad (3.3.5.32)$$

3.3.6 Öz değer problemlerinde çözüm teknikleri

3.3.6.1 Genelleştirilmiş öz değer problemi

$$(K - \lambda M) \psi_l = 0 \quad (3.3.6.1)$$

Burada K simetrik, pozitif, yarı belirli, M yine simetrik, pozitif ve belirli matris ifadeleridir (Hughes, 1993).

$$0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_{n_{el}} \quad (3.3.6.2)$$

Burada, $l=1,2,3,\dots,n_{el}$ mod numaralarını belirtir.

$$\psi_k^T M \psi_l = \delta_{kl} \quad (M \text{ ortonormal}) \quad (3.3.6.3)$$

$$\psi_k^T K \psi_l = \lambda_l \delta_{kl} \quad (K \text{ ortogonal}) \quad (3.3.6.4)$$

Büyük ölçekli genelleştirilmiş öz değer probleminin çözümü için kullanılan birçok metod biçimin indirgenmiş sistemini içerir (Hughes, 1993).

$$(K^* - \lambda^* M^*) \psi^* = 0 \quad (3.3.6.5)$$

Burada K^* ve M^* küçük, full, simetrik matrislerdir. Bu ifadenin doğrudan çözümü ile genelleştirilmiş Jacobi metodu elde edilir. (3.3.6.5) ifadesi birinci standart biçime dönüştürülüp çözümlerse, alttaki ifade elde edilir (Hughes, 1993).

$$(K^* - \lambda^* I) \psi^* = 0 \quad (3.3.6.6)$$

3.3.6.2 Farklı Rayleigh-Ritz indirgemesi

$$(K - \lambda M) \psi = 0 \quad (3.3.6.7)$$

$$K = K + \alpha M \quad (3.3.6.8)$$

$$\lambda = \lambda + \alpha \quad (3.3.6.9)$$

Öz vektör yaklaşımları $\psi \cong R \psi^*$ ile belirlenir.

3.3.6.3 Irons-Guyan indirgemesi

$$\left[\begin{array}{cc|cc} K_{11} & K_{12} & -\lambda & \\ K_{21} & K_{22} & & \end{array} \right] \begin{array}{c} \psi_1 \\ \psi_2 \end{array} = 0 \quad (3.3.6.10)$$

$$K^* = R^T K R = K_{11} - K_{12} K_{22}^{-1} K_{21} \quad (3.3.6.11)$$

$$M^* = R^T M R = M_{11} - M_{12} K_{22}^{-1} K_{21} - K_{12} K_{22}^{-1} (M_{21} - M_{22} K_{22}^{-1} K_{21}) \quad (3.3.6.12)$$

3.3.6.4 Büyük ölçekte genelleştirilmiş öz değer problemlerinin çözümü için Lanczos yaklaşımı

3.3.6.4.1 Spektral dönüşüm

$$v = 1 / (\lambda - \sigma) \quad (3.3.6.13)$$

Burada v öz değerdir.

3.3.6.4.2 Rayleigh-Ritz yaklaşımı

$$r = Ky - \theta My \quad (3.3.6.14)$$

Rayleigh-Ritz metodu deneme vektörlerinin her birisine ortogonal olan artan (artık) vektörü gerektirir.

$$X_m^T r = X_m^T Ky - \theta X_m^T My = 0 \quad (3.3.6.15)$$

r için yukarıdaki ortogonal durum içerisinde deneme vektörleri teriminden y yerine yazılırsa, indirgenmiş özdeğer problemi elde edilir.

$$(K_m - \theta M_m)s = 0 \quad (3.3.6.16)$$

Burada ,

$$K_m = X_m^T K X_m \quad \text{ve}$$

$$M_m = X_m^T M X_m \quad \text{'dir.}$$

3.4 Dolgu barajlarda sonlu elemanlar metodunun ve yöntemlerin kullanılması

3.4.1 Genel

Barajlarda denge analizinin genel metodu içerisinde kayma yüzeyi farz edilir ve yeni başlayan yıkılmada denge durumlarının incelenmesi ile güvenlik faktörünün kantitatif tahmini elde edilir. Bu durum, bütün yüzey üzerinde dolgu malzemesinin mevcut mukavemeti ile sınırlı dengeyi korumak için gerekli mukavemeti karşılaştırır. Bu metotlar dengesizlik durumuna uygun olarak barajın güvenlik faktörünü gösterir, fakat barajdaki deformasyonlarla ilgili hiçbir veri elde edilemez.

Son yıllarda baraj kesiti içerisinde gerilme dağılımı ve deformasyonların belirlenmesi için yeni yöntem geliştirilmiştir. Deformasyonların belirlenmesi alttaki belli sayıdaki sebeplerden dolayı zaruridir (Singh ve Varshney, 1995).

- 1) Aşırı kret oturmaları hava payı kaybını oluşturabilir ve böylece suyun baraj kreti üzerinden aşması tehlikesi meydana gelebilir. Kanada'daki Duncan barajının kretinde inşaat aşamasında ve inşaat bittikten sonra 4.2 m'lik oturma meydana gelmiştir (Singh ve Varshney, 1995).
- 2) Dolgunun aşırı ayrışması boyuna çatlakların oluşumunu sağlayabilir ve oluşacak bu çatlaklar gövde dengesi üzerine olumsuz etkiler yapabilir. Böyle çatlaklar, kil temeller üzerine yapılmış dolgu barajda gözlemlenmiştir (Singh vd., 1995).
- 3) Baraj kreti boyunca kesitler arasındaki farklı oturmalar çatlakların gelişmesine sebep olabilir. Bu durumda böyle oluşmuş çatlaklar içerisinden su akışı meydana gelecek ve borulanma ve erozyon ile yıkılma gerçekleşebilecektir. Duncan barajında pek çok sayıda çatlaklar meydana gelmiştir ve baraj bütünlüğünün korunması için onarım metodları uygulanmıştır (Singh ve Varshney, 1995).
- 4) Düşük basınçlı veya az sıkışmış kabuklara yükün bir kısmının transferi ile herhangi bir yükseklikteki su basıncından daha az değerlere bu yükseklikteki gerilmeler indirgenirse (azalır), zonlu dolgu barajın kabuk ve çekirdeğindeki diferansiyel basınçlar hidrolik kırılma ile neticelenir. Özellikle dik eğimlere sahip

vadiler için çekirdek ile yamaçlar arasındaki değme basınçları önemlidir. Böyle durumlarda gerilme ve yer değiştirme analizleri sonlu elemanlar metodu ile en iyi şekilde yapılabilir (Singh vd., 1995). Metot çözümleri doğru olarak temin eder ve geometrideki düzensizlikleri, karmaşık sınır değerlerini, malzemenin doğrusal olup olmamasını hesaba katar. Sonlu farklar metodu ve daha başka metotlarda bu özellikleri dikkate almak ihtimal dışıdır (Singh ve Varshney, 1995).

Zemin kütlesi içerisinde gerçek kayma gerilmelerinin maruz kalınan kayma gerilmelerine oranının (harekete geçme oranının) belirlenmesi ile kaymaya karşı güvenlik faktörü kadar iyi olan kritik kayma yüzeyi doğru olarak belirlenebilir.

3.4.2 Metot

Dolgu barajlar elastik yapılar olarak dikkate alınır. Metodun yeterli kısa tanımı altta açıklanmıştır.

3.4.2.1 İçerilen adımlar

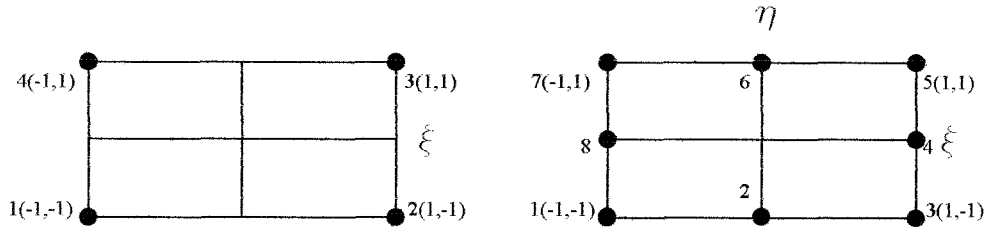
Sonlu elemanlar analizindeki adımlar alttaki gibidir (Singh ve Varshney, 1995).

- 1) Uygun konfigürasyonlu sonlu elemanlar ile dolgu baraj kısımlara ayrılır.
- 2) Eleman özellikleri değerlendirilir.
- 3) Global (yapısal) eğilmezlik matrisini ve yük vektörünü elde etmek için eleman özellikleri belirlenir.
- 4) Sınır değerlerinin tanımlanmasından sonra esas bilinmeyenler (yer değiştirmeler) için neticedeki doğrusal eş zamanlı denklemlerin çözümü yapılır.
- 5) Gerilmeler ve zorlamalar gibi ikincil bilinmeyen miktarların belirlenmesi.

3.4.2.2 Problemin formülasyonu

Burada üç boyutlu elemanların sonlu eleman özelliklerinin değerlendirilmesi için daha önce belirtildiği gibi matematiksel denklemler sunulur.

Dört ve sekiz düğüm noktalı izoparametrik elementler alttaki şekilde görülmektedir (Singh ve Varshney, 1995).



Şekil 3.3 : İzoparametrik elemanlar (dört ve sekiz düğüm noktalı).

Tipik sonlu eleman "e" için, elemanın tanımlanmış düğüm noktaları i, j, m ve eleman içerisinde yer değiştirme $\{f\}$ aşağıdaki biçimlerde ifade edilir.

$$\{f\} = [N]\{\delta\}^e \quad (3.4.1)$$

$$[N] = [N_i N_j N_m \dots] \quad (3.4.2)$$

burada

$$\{\delta\}^e = \{\delta_i \delta_j \delta_m \dots\}^T \quad (3.4.3)$$

$[N]$ 'nin komponentleri genelde pozisyon fonksiyonlarıdır ve $\{\delta\}^e$ özel eleman için düğüm noktası deplasmanlarının listesini belirtir. İki boyutlu eleman için,

$$\{f\} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3.4.4)$$

ifadesi eleman içerisindeki noktada x ve y yönündeki yer değiştirmeleri gösterir ve alttaki (3.4.5) ifadesi de i düğüm noktasında buna karşılık gelen yer değiştirmeleri belirtir.

$$\{\delta_i\} = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} \quad (3.4.5)$$

$[N_i]$, $[N_i^l]$ 'e eşittir. Bu durumda N_i^l , i düğüm noktasının şekil fonksiyonudur ve l 'de 2×2 mertebesinde özdeş matrisdir (Singh ve Varshney, 1995).

Doğrusal (4 düğüm noktalı) dört kenarlı elemanın şekil fonksiyonu lokal koordinatlarla altta belirtilir.

$$N_i^l = (1 \div 4) \cdot (1 + \xi_0) \cdot (1 + \eta_0) \quad (3.4.6)$$

Burada,

$$\xi_0 = \xi \xi_i \text{ ve } \eta_0 = \eta \eta_i \text{ olur.} \quad (3.4.7)$$

ξ_i , η_i , i 'nci düğüm noktasının lokal koordinatları ve ξ ve η 'da ilgili noktanın lokal koordinatlarıdır.

Birbirine yakın çözüm şekillerinin mevcut olmadığı durumlar için sonlu-eleman ilişkisi hesaplamaları içerisinde integrasyon içerildiğine göre nümerik integrasyona müracaat edilir. Kartezyen koordinat sistemi bu amaçlar için uygun değildir. Bu nedenle ilişki doğal koordinat sistemine indirgenir. Doğal koordinat sistemi içerisinde dört kenarlı bir şekle sahip eleman $+1$ veya -1 sınır değerleri ile dikdörtgen biçime dönüştürülür (Singh ve Varshney, 1995).

8 düğüm noktalı elemanda köşe düğüm noktaları için (1,3,5 ve 7),

$$N_i^I = (1 \div 4) \cdot (1 + \xi_o) \cdot (1 + \eta_o) \cdot (\xi_o + \eta_o - 1) \quad (3.4.8.a)$$

Kenarlar üzerinde ortadaki düğüm noktaları için;

i) $\xi_i = 0$ ve $\eta_i = +1$ veya -1 (2 ve 6 düğüm noktaları)

$$N_i^I = (1 \div 2) \cdot (1 - \xi^2) \cdot (1 + \eta_o) \quad (3.4.8.b)$$

ii) $\eta_i = 0$ ve $\xi_i = +1$ veya -1 (4 ve 8 no'lu düğüm noktaları)

$$N_i^I = (1 \div 2) \cdot (1 - \eta^2) \cdot (1 + \xi_o) \quad (3.4.8.c)$$

Elemanı oluşturan bütün noktalardaki deplasmanların bilinmesi ile herhangi bir noktadaki zorlamalar aşağıdaki ifade ile belirlenebilir.

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_u/d_x \\ d_v/d_y \\ (d_u/d_y) + (d_v/d_x) \end{bmatrix} \quad (3.4.9)$$

burada ε_x ve ε_y , x ve y yönündeki zorlamalardır. γ_{xy} ise incelenmekte olan noktadaki kesme zorlamasıdır (Singh ve Varshney, 1995). Kısmi türev ifadesi ile zorlamalar alttaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= d_u / d_x = d(N_i^I u_i + N_j^I u_j + N_m^I u_m + \dots) / d_x \\ &= u_i (dN_i^I / d_x) + u_j (dN_j^I / d_x) + u_m (dN_m^I / d_x) + \dots \quad (3.4.10.a) \end{aligned}$$

ve benzer şekilde,

$$\epsilon_y = d_v / d_y = v_i(dN_i^1 / d_y) + v_j(dN_j^1 / d_y) + v_m(dN_m^1 / d_y) + \dots \quad (3.4.10.b)$$

$$\gamma_{xy} = u_i(dN_i^1 / d_y) + v_i(dN_i^1 / d_x) + u_j(dN_j^1 / d_y) + v_j(dN_j^1 / d_x) + u_m(dN_m^1 / d_y) + v_m(dN_m^1 / d_x) \quad (3.4.10.c)$$

Böylece zorlamalar şu şekilde yazılabilir.

$$\{\epsilon\} = [B]\{\delta\}^e = [B_i B_j B_m \dots]\{\delta\}^e \quad (3.4.11)$$

Burada $[B]$ zorlama yer değiştirme matrisidir. $[B_i]$ şu şekilde verilir:

$$[B_i] = \begin{bmatrix} dN_i^1 / d_x & 0 \\ 0 & dN_i^1 / d_y \\ dN_i^1 / d_y & dN_i^1 / d_x \end{bmatrix} \quad (3.4.12)$$

Benzer şekilde elde edilmiş diğer alt matrisler ile indisleri yer değiştirerek basitleştirilebilir. İzoparametrik elemanlar için;

$$\left. \begin{aligned} x &= \sum N_i^1 x_i, & y &= \sum N_i^1 y_i \\ u &= \sum N_i^1 u_i, & v &= \sum N_i^1 v_i \end{aligned} \right\} \quad (3.4.13)$$

Toplam, eleman içerisindeki düğüm noktası sayısı kadardır. Gerilmeler, zorlamalarla alttaki gibi ilişkilidir.

$$\{\sigma\} = [D](\{\epsilon\} - \{\epsilon_0\}) + \{\sigma_0\} \quad (3.4.14)$$

Burada $[D]$ uygun malzeme özelliklerini içeren elastisite matrisi, $\{\epsilon_0\}$ başlangıç zorlama vektörü, $\{\sigma\}$ gerilme vektörü $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})^T$ ve $\{\sigma_0\}$ başlangıç gerilme

vektörüdür; σ_x ve σ_y x ve y yönlerindeki normal gerilmelerdir ve τ_{xy} kesme gerilmesidir (Singh ve Varshney, 1995).

Elastik ve izotropik malzeme için düzlem-zorlama analizi için elastisite matrisi altta ifade edilen biçimdedir. Burada E Young elastisite modülü ve ν ise elemanı oluşturan malzemenin Poisson oranıdır. $[D]$ ise daha öncede tanımlandığı gibi uygun malzeme özelliklerini içeren elastisite matrisidir.

$$[D] = E \div [(1+\nu)(1-2\nu)] \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (3.4.14)$$

Yer değiştirme kuvvetle alttaki biçimde ilişkilidir:

$$\{F\}^e = [K]^e \{\delta\}^e \quad (3.4.15)$$

Bu ifadedeki $\{F\}^e$ elemanın düğüm noktası yük vektörüdür, $[K]^e$ elemanın stiffness matrisidir ve şu şekilde ifade edilir:

$$[K]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (3.4.16)$$

Burada V eleman hacminden bahseder. Bütün yapı için ifadenin şekli alttaki gibidir:

$$[K] \{\delta\} = \{F\} \quad (3.4.17)$$

burada $\{\delta\}$ global deplasman vektörü, $\{F\}$ global yük vektörü ve $[K]$ toplanmış stiffness matrisidir (Singh ve Varshney, 1995).

Global eğilmezlik matrisi içerisindeki özel eğilmezlik katsayılarının ilave edilmesi ile global eğilmezlik matrisi $[K]$ doğrudan elde edilir. Benzer şekilde sistem için global yük vektörü global vektör içerisindeki uygun konumlarda özel eleman yüklerinin ilave edilmesi ile de elde edilir.

Toplam prosedürün matematiksel ifadesi alttaki biçimdedir. Burada E_η toplam eleman sayısıdır.

$$\left. \begin{aligned} [K] &= \sum_{e=1}^{E_\eta} [K]^e \\ [F] &= \sum_{e=1}^{E_\eta} [F]^e \end{aligned} \right\} \quad (3.4.18)$$

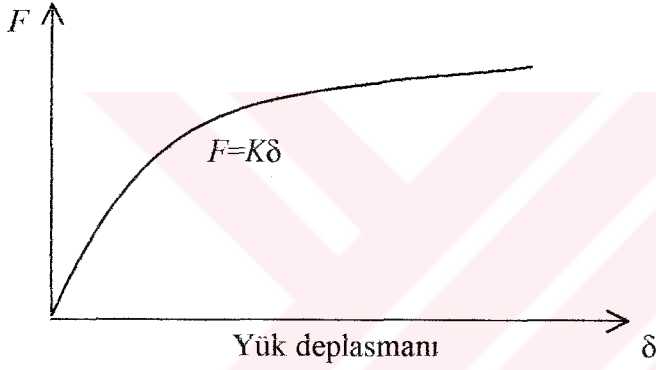
3.4.3 Doğrusal olmayan malzemeler

Zeminlerde gerilme-zorlama ilişkisi genellikle doğrusal değildir. E ve ν elastik sabitlerinin değerleri gerilme seviyesine bağlıdır. Böylece gerilme hesaplamaları karmaşık olur ve doğal halinde problem doğrusal değildir. Birçok dolgu baraj artma yöntemleri ile inşa edilir ve inşa boyunca yükleme derece derece artar, inşa tamamlandıktan sonra rezervuarın su ile doldurulması boyunca da baraj üzerine etkileyen yükler de artmaya devam eder.

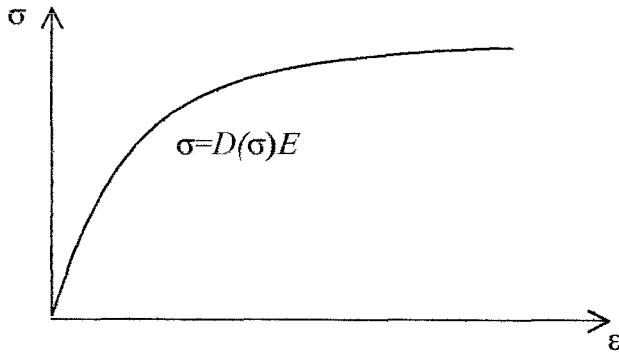
$[D]$ matrisi gerilme ve deplasmanlara bağlı olan E ve ν değerlerini içerdiğine göre $\{F\}$, $[K]$ 'ya $\{\delta\}$ bağlı oldukça $[K]$ matrisi $\{\delta\}$ ve $\{F\}$ 'nin fonksiyonu olur. Böylece bu durum aşağıdaki biçimde gösterilir:

$$[K] = [K(\{\delta\}, \{F\})] \quad (3.4.19)$$

$\{F\}$ ve $\{\delta\}$ arasındaki doğrusal olmayan sembolik ilişki şekil 5.2’de gösterilir. Şekil 5.3, $\{F\}$ yüküne ve deplasmanlara karşılık gelen doğrusal olmayan gerilme-zorlama eğrisini belirtir. Bu durum, gerilme-zorlama veya bileşim kanununa dayanır ki doğrusal olmayan analiz için değişken matris $[D(\{\delta\})]$ belirlenir. Bu metot da doğrusal olmayan problemin çözümü üç temel teknik ile belirlenir: (a) çoğalma veya adım adım bilgi edinme prosedürü, (b) iteratif veya Newton metodları, (c) adım adım iteratif veya karışıklı prosedürler (Singh ve Varshney, 1995).



Şekil 3.4 : $\{F\}$ ve $\{\delta\}$ arasındaki sembolik doğrusal olmayan ilişki.



Şekil 3.5 : Doğrusal olmayan gerilme-zorlama eğrisi.

3.4.3.1 Doğrusal olmayan analiz metodları

Çoğalma prosedürü (a): Bu metodun temeli, yükü birçok küçük yüklere veya artımlara ayırmaktır. Genellikle bu yük artışları eşit büyüklüktedir, fakat eşit olarak arzu edilmez. Yük belli bir zamanda bir artıma uygulanır ve her artımın uygulanması boyunca denklemler doğrusal olarak farz edilir. Her yük artımı boyunca $[K]$ 'nın sabit değeri bu şekilde farz edilir. Fakat farklı artımlar boyunca $[K]$ 'da farklı değerler alabilir (Singh ve Varshney, 1995).

Yüklemenin her adımı için çözüm deplasman $\{\Delta\delta\}$ artımı olarak elde edilir. Yüklemenin herhangi bir safhasındaki total yer değiştirmeyi elde etmek için bu deplasman değerleri toplanır. Artış yöntemi toplam yüke erişilinceye kadar tekrar edilir. Esasen artış prosedürü, doğrusal olmayan problemlere lineer problemdeki seriler gibi yaklaşır. Doğrusal olmama özelliği kısmen doğrusal olarak ele alınıp düzeltilebilir.

Toplam yük $\{F\}$ alttaki biçimde verilir.

$$\{F\} = \{F_0\} + \sum_{i=1}^M \{\Delta F_i\} \quad (3.4.20)$$

burada $\{F_0\}$ başlangıç yük vektörü, M toplam artım sayısı ve $\{\Delta F_i\}$ i 'nci artımdaki çoğalma yük vektörüdür. Böylece i 'nci artımın uygulanmasından sonra yük alttaki biçimde elde edilir (Singh ve Varshney, 1995):

$$\{F_i\} = \{F_0\} + \sum_{j=1}^i \{\Delta F_j\} \quad (3.4.21.a)$$

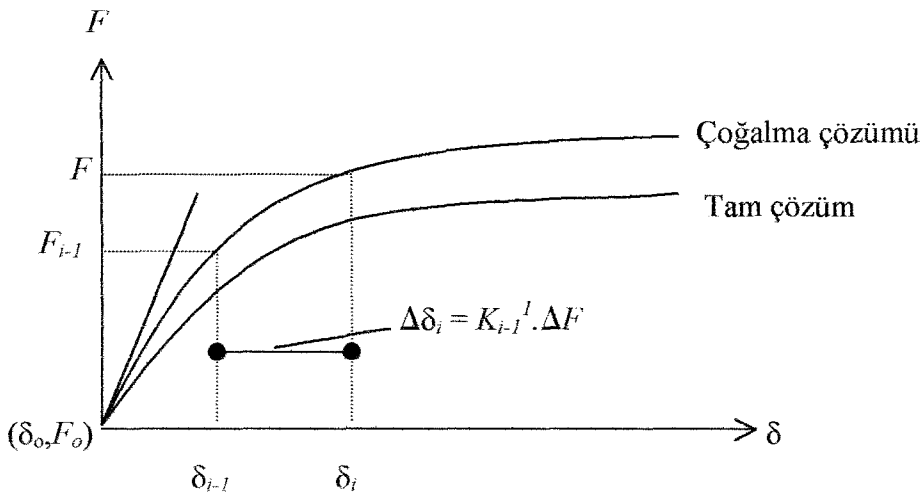
Benzer şekilde i 'nci iterasyondan sonra yer değiştirmede şu şekilde olur:

$$\{\delta_i\} = \{\delta_o\} + \sum_{j=1}^i \{\Delta\delta_j\} \quad (3.4.21.b)$$

burada $\{\delta_o\}$ başlangıç deplasmanını belirtir. Genellikle $\{F_o\}$ ve $\{\delta_o\}$ geçersiz vektörlerdir. Çünkü çözüm gövdenin deforme olmamış halinden başlar. Bununla beraber $\{F_o\}$ ve $\{\delta_o\}$ 'ın herhangi bir başlangıç denge durumu belirlenebilir. Yer değiştirmelerin artımını hesaplamada eğilmezliğin sabit değeri kullanılır. Bu değer bir önceki artımın sonunda değerlendirilir. Bu nedenle:

$$[K_{i-1}]\{\Delta\delta_i\} = \{\Delta F_i\} \quad i=1,2,3,\dots,M \quad (3.4.22)$$

Burada indisler çoğalma (artım) safhasını belirtir, $[K_o]$ eğilmezliğin başlangıç değeridir. $[K_o]$, yüklemenin başlangıcında belirli gerilme-zorlama eğrilerinden türetilmiş malzeme sabitlerinden hesaplanır. Çoğalma (artım) prosedürü şekil 5.4'de gösterilir. Bu prosedürde genellikle $[D\{\sigma\}]$ ifadesini formüle etmede ve eğilmezlik $[K]$ 'yı hesaplamada tanjant modülü (E_t) kullanılır. Sıkça $[K]$ matrisinden tanjant stiffness matrisi olarak bahsedilir.



Şekil 3.6 : Temel çoğalma (artım) prosedürü.

Artım prosedürünün doğruluğu yük değerlerinin daha küçükçe artışı veya yük artımının yarısının uygulanması ile elde edilebilir. Bununla beraber her adım için yeni stiffness artım matrisi $[K_{i-1}]$ hesaplanacağına göre ilave maliyetli hesapların yapılması ile doğruluk temin edilir (Singh ve Varshney, 1995).

Sıfırdan farklı başlangıç gerilmeleri nedeniyle ilave zorluk yaratılmaması bu prosedürün bir avantajıdır. Adım adım yükselen gövde yapısı ile bu metot oldukça iyi bir şekilde uyuşur. Zorlamaların yumuşama davranışı (pik değere ulaştıktan sonra azalan gerilmeler) modellenemeyebilir. Çünkü bu durum son pik davranışı belirten negatif modül değerinin kullanılmasını gerektirir. Gerçek problemlerde analizler pik direnç safhası dışında seyrek olarak gerektiğine göre bu durum bir olumsuzluk yaratmaz (Singh ve Varshney, 1995).

İteratif prosedür veya Newton metodları (b): İteratif prosedür bir hesaplama dizisi içerir. Bu hesaplamalarda her iterasyonda yapı tam olarak yüklenir. Her adımda eğilmezliğin sabit yaklaşık değerinin kullanılması nedeniyle gerekli denge elde edilmez. Her iterasyondan sonra toplam yükün dengede olmayan belli bir kısmı hesaplanır ve deplasmanın ilave artımını hesaplamada bir sonraki adımda kullanılır. Hemen hemen belli oranda dengeye yaklaşıncaya kadar yöntem tekrarlanır. Esasen iteratif prosedür $\{F\}$ yükü altında dengeye yaklaşıncaya kadar çözümde arka arkaya düzeltmeleri gerektirir (Singh ve Varshney, 1995).

İteratif yöntemin i 'ninci döngüsü için gerekli yük aşağıdaki biçimde belirlenir:

$$\{F_i\} = \{F\} - \{F_{e,i-1}\} \quad (3.4.23)$$

Burada $(F_{e,i-1})$ bir önceki adımdan sonra dengelenmiş yüküdür. Deplasmanlara olan artış (çoğalma) i 'ninci adım boyunca alttaki ilişkinin kullanılmasıyla hesaplanır:

$$[K_{i,i}]\{\Delta\delta_i\} = \{F_i\} \quad (3.4.24)$$

Burada i indisi iterasyon döngüsünü belirtir. i 'nci iterasyondan sonra toplam yer değiştirme 3.4.21 denklemindeki ilişkiyi kullanarak hesaplanabilir (Singh vd., 1995).

Nihai durumda $\{F_{e,i}\}$ deplasman $\{\delta_i\}$ 'yi korumada gerekli yük olarak hesaplanır. Deplasman artımlarına veya dengesiz kuvvetler 0 oluncaya kadar prosedür tekrarlanır. Önceden seçilmiş kritere göre $\{\Delta\delta_i\}$ veya $\{F_i\}$ önemsiz olur.

Her iterasyon için farklı eğilmezlik matrislerinin hesaplanmasının yerine biraz değiştirilmiş iteratif teknikler de kullanılır. Bu tekniklerden sadece başlangıç eğilmezlik matrisi $[K_0]$ için faydalanılır. Açıkça, biraz değiştirilmiş metot fazla sayıda iterasyonu zorunlu kılar. Bununla beraber, bazı hesaplamaları yapmaya gerek yoktur, çünkü her döngüde yeni eğilmezlik matrisi oluşturmak gerekli değildir (Singh ve Varshney, 1995).

Adım adım iteratif veya karışıklı prosedürler (c): Bu yöntem iteratif planlardan ve artımın (çoğalmanın) kombinasyonlarından faydalanır. Bu metot içerisinde yük artım şeklinde uygulanır, fakat sonrasında arka arkaya her artım iterasyonu meydana getirilir. Bu metot, biraz daha fazla hesaplama zorluğu ve maliyetiyle daha doğru sonuçlar verir (Singh ve Varshney, 1995).

Karışım prosedürünün hem artım hem de iteratif prosedürlerin avantajlarını içermesi ve her birinin dezavantajlarını en aza indirme eğiliminde olması nedeniyle, adım adım iterasyon hızla yayılarak kullanılmaktadır. Prosedürün iteratif kısmının her safhada yaklaşık denge kalitesini belirlemesine müsaade etmesi ilave hesaplama eforu ile kanıtlanır (Singh ve Varshney, 1995).

Karışım metodunun diğer bir versiyonu art arda yaklaşım prosedürü olarak bilinir. Bu prosedür bazı araştırmacılar tarafından rapor halinde sunulmuştur (Resendiz ve Romo, 1972; Alberro, 1972; Sharma, 1974). Hesaplanmış gerilme ve zorlama değerlerinin arzu edilen doğrusal olmayan ilişki ile uyşuncaya ve tutarlı oluncaya kadar her zamanda her elemana işaret etmiş modül değerlerini ayarlayarak problem tekrarlı bir şekilde analiz edilir. Her iterasyon içerisinde toplam yük uygulanır (Singh ve Varshney 1995).

Her iterasyonda $[K]$ 'nın yeni değeri hesaplandığına ve bazı durumlarda iterasyon sayısı çok büyük olduğuna göre maksimum iterasyon sayısı belirlenir. Resendiz ve Romo tarafından iterasyonları durdurmada kullanılmış kriter, iki ardışık döngü arasındaki deformasyon modülündeki değişimin %10'dan daha az olduğudur. Alberro, Infiernillo barajının analizi için üç iterasyon belirlemiştir. Yapının yeni safhası başladığında iki ön iterasyonun ortalama değerlerine karşılık gelen farklı elemanlar için Young elastisite modülü ve Poisson oranı alınmıştır. Sharma ve çalışma arkadaşları maksimum 3 iterasyon belirlemiştir. Başka denemeleri durdurmak için iki ardışık iterasyonun L_t değerleri arasındaki fark %10'dan daha az olmalıdır (Singh ve Varshney, 1995).

3.4.4 Yapı kanunları (gerilme-zorlama ilişkisi)

Gerilme-zorlama ilişkisi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden birincisi yapısal faktörlerdir. Yapısal faktörler zemin karakteristiklerini içerir. Diğerleri ise çevresel faktörlerdir. Yükleme karakteristikleri ile ilgilidir. Yapıya etki eden basınçlar dikkate alınır. Yapısal faktörler, doğrusal elastik analiz ve doğrusal olmayan gerilme-zorlama davranışı olarak sınıflandırılır (Singh ve Varshney, 1995).

3.4.4.1 Doğrusal-elastik analiz :

Bu analizde, gerilme-zorlama ilişkisi doğrusal olarak dikkate alınır. Doğrusal analizler çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Clough, R.W., ve Woodward,

R.J., 1967; Lefebvre, G.; Eisenstein, Z., 1972; Singh, B., 1976; Marsal, R.J. ve Moreno, E.G., 1979; Lee, K.L. ve Idriss, I.M., 1975), (Singh ve Varshney, 1995).

Penman ve Charles (1973) dolgu malzemesi üzerinde bir boyutlu basınç testinin neticesini kullanarak, kaya dolgu için denk basınç yaklaşımına dayanan Young elastisite modülünün eş değerlerinin düzenlenmesi ile Llyn Brianne barajının analizi için doğrusal gerilme-zorlama ilişkisini kullanmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

Justo ve Saura (1983) El Infiernillo barajının üç boyutlu doğrusal analizini gerçekleştirmiştir. Bu analizde kullanılmış E ve ν parametreleri inşa boyunca gözlemlenmiş analizlerden türetilmiştir (Singh ve Varshney, 1995).

3.4.4.2 Doğrusal olmayan gerilme-zorlama davranışı

Zeminlerde gerilme ile zorlama arasındaki ilişki doğrusal-elastik analize göre daha karmaşıktır. Doğrusal olmayan model iki başlıkta incelenebilir. Bu başlıklardan birincisi iki (çift) doğrusal modeller, ikincisi ise çok yönlü veya parçalı doğrusal modellerdir (Singh ve Varshney, 1995).

İki (çift) doğrusal modeller (a) : Doğrusal olmayan ilişkinin en basit tipidir. Bu durumda gerilmeler kabul edilebilir değer olan σ_{verim} değerine erişinceye kadar malzeme başlangıç modülü $[D_i]$ 'ye sahiptir. Bu durumdan sonra modül $[D_y]$ 'ye doğru değişir. Çift doğrusal gerilme-zorlama ilişkileri çeşitli araştırmacılar tarafından sonlu elemanlar analizi içerisinde kullanılmıştır (Dunlop, 1968; Dunlop ve Duncan, 1970; Holmberg, 1971). Deneyler şunu göstermiştir ki, gerilmelerin hesaplanmış değerleri mukavemet değerine eşit olur ve bazı elemanlardaki gerilmelerin çoğunun zaman modül değerinin azalmasından önce tahsis edilmiş mukavemet değerini aştığı görülmüştür (Singh ve Varshney, 1995).

Çok yönlü veya parçalı doğrusal modeller : Basit olarak açıklanmış gerilme-zorlama ilişkilerinin yerine, daha karmaşık açıklamalar yapılarak bu modeller belirlenir. Bu amaçlar için iki genel biçim mevcuttur. Tablo biçim (i) ve fonksiyonel biçimdir (ii).

Tablo biçimi (i) : Alberro (1972) tarafından El İnfiernillo barajında ve Eisenstein (1972) tarafından Duncan barajında uygulandığı gibi laboratuvar testlerinden elde edilmiş gerilme-zorlama neticeleri sonlu elemanlar analizi için tablo biçimi doğrudan kullanılabilir. Bunun için bazı noktalarda gerilme ve zorlamayı belirten belli sayıda eşleştirme yapılarak bilgisayara değerlerin girilmesiyle gerilme-zorlama eğrilerinin belli sayıda noktaları oluşur. Eğer tek eğri mevcutsa uygun interpolasyon metodu ile arzu edilmiş gerilme ve zorlama seviyeleri için E ve ν malzeme parametreleri interpolate edilir. Eğer birden fazla eğri mevcutsa ki bu durum gerime-zorlama ilişkisinin sınırlı basıncın fonksiyonu olduğu malzemeler için meydana gelir, farklı eğriler içinde interpolasyon yapılabilir. Tablo biçimi bilgisayar hafızasında fazla yer kapladığı için kullanışsızdır (Singh ve Varshney, 1995).

Fonksiyonel biçim (ii) : Tablo biçiminde belli sayıda veri noktası bilgisayara girilir. Fakat fonksiyonel biçimde az sayıdaki parametreler eğriyi tanımlamada yeterlidir. Bu durumda fonksiyonel biçim tablo biçimine göre daha avantajlı olur. Sonlu eleman analizi içerisinde gerilme-zorlama eğrilerinin simülasyonu için en genişçe kullanılan fonksiyon Kondner'in (1963) elde ettiği ifadeyi kullanarak Duncan ve Chang (1970) tarafından formüle edilmiştir. Üç akslı basınç testinde gerilme / zorlama çizimi hemen hemen hiperboldür. Prosedür Mohr-Coulomb yıkılma kriterini kullanır ve tanjant modülü ile Poisson oranı arasında bir ilişki geliştirir. Bu durum toplam ve efektif gerilme teriminden ifade edilebilir. Model geniş bir alanda kullanım bulmuştur. Modelin tanımı aşağıda kısaca belirtilmiştir. Özel gerilme seviyesinde tanjant modülü E_t alttaki şekliyle verilir (Singh ve Varshney, 1995):

$$E_t = (1-mR_f)^2 \cdot E_i \quad (3.4.25)$$

Burada R_f yıkılma durumunda sapma (deviatorik) gerilmesinin nihai sapma gerilmesine oranı olarak tanımlanan yıkılma oranıdır ve alttaki gibi ifade edilir:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{nihai}}$$

Bu ifadede σ_1 ve σ_3 sırasıyla birincil ve ikincil asal gerilmeleri belirtir.

Mobilizasyon (harekete başlama) faktörü $m = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$, herhangi bir elemana etki eden $(\sigma_1 - \sigma_3)$ sapma (deviatorik) gerilmesinin yıkılma sapma gerilmesine $(\sigma_1 - \sigma_3)$ oranı olarak tanımlanır (Singh ve Varshney, 1995).

Özel sınırlı basınç için başlangıç elastisite modülü E_i 'dir. Bu değer Janbu (1963) tarafından tanımlanır (Singh ve Varshney, 1995):

$$E_i = KP_a (\sigma_3 / P_a)^n \quad (3.4.26)$$

Bu ifadede σ_3 sınırlı basınç; P_a , E_i ile aynı birimde ifade edilen atmosfer basıncı; K modül numarasını belirten birimsiz sayı ve n 'de birimsiz üsdür.

Mohr-Coulomb yıkılma kriteri teriminden sınırlı basınç ve basınç mukavemetinin ifade edilmesiyle ve mukavemet parametreleri olarak C ve ϕ 'nin kullanılmasıyla beraber tanjant elastisite modülü değeri 5.27'deki şekliyle ifade edilebilir:

$$E_t = [1 - ((R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)) / (2c \cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi))]^2 \cdot KP_a (\sigma_3 / P_a)^n \quad (3.4.27)$$

Bu ifadede c birim kohezyon ve ϕ malzeme için kayma direnç (sürtünme) açısıdır.

Tanjant Poisson oranı için Kulhawy (1969) tarafından verilen ifade şu şekildedir:

$$v_i = (G-F \cdot \log(\sigma_3 / P_a)) \div (1-d\varepsilon_a)^2 \quad (3.4.28)$$

$$\text{bu ifadede dik zorlama } \varepsilon_a = (\sigma_1 - \sigma_3) / (E_i(1-mR_f)) \quad (3.4.29)$$

burada G bir atmosfer basıncında başlangıç Poisson oranı v_i değeridir, F sınır basıncındaki on kat artış için başlangıç Poisson oranındaki azalma, d zorlama ile v_i 'nin değişim oranını ifade eden birimsiz parametredir (Singh ve Varshney, 1995).

3.4.5 Çeşitli barajlarda sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmalar

3.4.5.1 Yüksek homojen baraj

Clough ve Woodward (1967) kademe kademe yükselen yapının barajdaki gerilme ve deformasyonlar üzerine ve temel elastisitesinin etkisini çalışmak üzere 30.5 m yüksekliğindeki homojen baraja sonlu elemanlar analizini uygulamışlardır.

Analizde E ve ν 'nün sabit değerleri kullanılmıştır. Yerçekimine bağlı analiz neticeleri 10 kademedeki inşa edilmiş barajı dikkate alan analizden elde edilmiş neticelerle karşılaştırılmıştır. Gerilmelerle ilgili olduğu kadarıyla tek adım analizi tatmin edici yaklaşık neticeler vermiştir. İki analizden elde edilen yatay deplasmanlar hemen hemen benzer olmuştur fakat düşey oturmalarda anlamlı farklılıklar meydana gelmiştir (Singh ve Varshney, 1995).

3.4.5.2 El Infiernillo barajı

Bu baraj yeterli derecede ölçüm aletlerinin gövdeye yerleştirildiği ilk olarak inşa edilen toprak ve kaya dolgu baraj örneklerinden birisidir. Meksika'da yapılmıştır. Baraj ince kil çekirdeği içerir ve kaya dolgu kabuk ile merkezi çekirdek arasında filtre ve geçiş zonlarına sahiptir. Barajı oluşturan malzemeler çekirdek için kil, filtre ve geçiş zonu için şartnamelere uygun malzeme, sıkışmış kaya dolgu ve gevşek kaya

dolgu içerir. Üç akslı testle elde edilmiş daneli malzemeler ve konsolide olmuş kil için numuneler alınmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

Gevşek kaya dolgu için laboratuvar çalışmalarında Young elastisite modülü E_t için bir değer elde edilemediğinden Kondner (1963) tarafından formüle edilmiş kural uygulanmıştır. E_t değerleri tablo haline getirilmiştir. Deneysel verilerin eksikliğinden dolayı kil için Poisson oranı sabit olarak alınmıştır yani $\nu=0.45$ olmuştur.

Baraj 486 üçgen eleman ve 271 düğüm noktasıyla idealleştirilmiştir. Baraj temeli tamamen rijit olarak alınmıştır. Baraj 7 kademe ve 3 iterasyon döngüsü ile inşa edilmiştir.

Barajın arka arkaya inşası sırasında iki kademesi için (110 m ve 133 m) hesaplamalar yapılmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

Birçok toprak ve toprak-kaya barajlardan elde edilmiş ölçümlere göre büyük oturmalar, yatay hareketler ve çatlak oluşumları sık sık rezervuarın su ile doldurulmasından sonra meydana gelmiştir. El İnfiernillo barajında deplasmanlar ilk olarak membada gözlemlenmiş daha sonra mansapta meydana gelmiştir. Karmaşık hareketler iki nedenden dolayı meydana gelmiştir. Birincisi baraj üzerindeki su yükleridir, ikincisi ise yıkanmadan dolayı dolgu malzemesinin yumuşaması ve zayıflamasıdır (Singh ve Varshney, 1995).

3.4.5.3 Oroville barajı

Nobari ve Duncan (1972) sonlu elemanlar metodu vasıtasıyla Oroville barajındaki hareketlerin hesaplanması ile rezervuar su ile doldurulduktan sonra meydana gelen etkileri çalışmıştır (Singh ve Varshney, 1995). Rezervuarın su ile doldurulmasının meydana getirdiği etkiler dört bileşene ayrılmıştır:

- 1) Çekirdek üzerindeki su yükü mansapta aşağı doğru hareketlere sebep olmuştur.

- 2) Temel üzerindeki su yükü membada alta doğru hareketlere sebep olmuştur.
- 3) Memba kabuğundaki kaldırma (yüzdürme) kuvvetleri bu zon içerisinde yukarı doğru harekete sebep olmuştur.
- 4) Memba kabuğu yıkanmadan dolayı yumuşamış ve zayıflamıştır. Bu durum bu zon içerisinde alta doğru hareket ile neticelenmiş ve barajın membaında rotasyon meydana gelmiştir.

Rezervuar seviyesinin 80 m'den 120 m'ye yükselmesiyle çekirdeğin yönü membaya doğru olmuştur. Su seviyesinin sürekli artış ile 160 m'ye ulaşması önemsiz mansap hareketine sebep olmuştur. 160 m'den 170 m'ye nihai yükseliş ile büyük mansap hareketi oluşmuştur. Bu durum, yumuşamanın neden olduğu memba hareketlerinin rezervuarın doldurulmasındaki ilk kademe boyunca maksimum değere ulaştığı anlamına gelir çünkü, yıkanmadan dolayı basınç miktarı aşırı yüklemeye basıncının yüksek olduğu durumlarda en büyük olmuştur. Diğer bir taraftan rezervuarın su ile dolmasının daha ileri safhaları (yüksek seviyeleri) boyunca su yüklerinin sebep olduğu mansap hareketleri maksimum olmuştur, çünkü çekirdek üzerindeki su yükü birikmiş su yükünün karesiyle artmıştır. Bu durum barajın ilk olarak neden membaya doğru daha sonra mansaba doğru hareket ettiğini açıklar.

Rezervuarın su ile doldurulması boyunca Oroville barajının analizi için kullanılmış olan ağ sistemi Kulhawy ve Duncan (1972) tarafından kullanılan sistemle aynı olmuştur. Hiperbolik gerilme-zorlama modeli tanjant Young elastisite modülünü ve Poisson oranını hesaplamada kullanılmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

Yatay hareketler birçok barajda olduğu gibi memba yüz topuğu civarı hariç mansap yönünde olmuştur. Hesaplanmış en büyük hareket 27 cm ile orta yükseltide çekirdeğin memba yüzü üzerindeki noktada meydana gelmiştir.

Oturmalar 0 ile 15 cm arasında gerçekleşmiştir. 18 cm ile barajın orta yüksekliğinde çekirdeğin memba yüzündeki noktada maksimum oturma gerçekleşmiştir (Singh ve Varshney, 1995).

İkinci analiz rezervuarda su doluluk oranı üç safhada incelenerek yapılmıştır. El İniernillo barajındaki gözlemlenmiş davranış ile Oroville barajında gözlemlenmiş davranış hemen hemen özdeş olmuştur.

3.4.5.4 Zonlu barajlar

Kulhawy ve Gurtowski (1976) zonlu barajlardaki hidrolik kırılma ve yük transferi olayını çalışmıştır. Zonlu barajlarda meydana gelen yük transferi olayı bitişik zonlardaki değişen eğilmezlik neticesinde oluşur. Eğer çekirdek kabuk malzemesine göre daha yumuşak ise, yük transferi çekirdekten kabuklara doğru meydana gelir. Yük transferi modunun esas anlamı şöyledir ki eğer çekirdek yüksek gerilme haline konsolide olmadan önce rezervuar hızlı bir şekilde doldurulursa, rezervuar su basınçları çekirdek içerisinde düşük gerilmeleri aşabilir. Bu durum yüksek su basınçları ile çatlak oluşumunu veya hidrolik kırılmayı oluşturabilir. Bu şekilde meydana gelebilecek hidrolik kırılma vasıtasıyla oluşan çatlaklar içerisinde de borulanma ihtimali yüksek olacaktır. Fakat eğer zonlu baraj yumuşak kabuk ve sert (katı) çekirdek malzemesine sahipse, bu durumun tersi meydana gelir ve yük transferi kabuklardan çekirdeğe doğru oluşur. Bu yük transferi modu çekirdek içerisinde aşırı gerilmelere sebep olabilir, plastiklik oluşumunu sağlar veya kırılğan durum yaratarak çatlakları oluşturabilir (Singh ve Varshney, 1995).

Araştırma bu bakış açısıyla yapılmıştır. Daha yassıca şev eğimleri, nispeten daha kalınca çekirdek, memba ve mansap yüzü eğimli çekirdek, orta derecede yoğunluğa sahip kabuklar ve en uygun su içeriğinden biraz daha kuru olarak sıkıştırılmış çekirdek malzemesi kullanılarak çatlak oluşum ihtimalinin en aza indirildiği 1976'da yapılan bu çalışma sonrası Kulhawy, Fred H. ve Gurtowski T. M. tarafından açıklanmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

3.4.6 Üç boyutlu analiz

Dolgu barajların analizinde yapılan yaygınca kullanılan varsayımlardan bir tanesi de düzlem-zorlama durumudur ki bu durumda barajın bütün geometrisini çalışmak yerine (barajın bütün geometrisini çalışmak maliyetli, bilgisayar hafızasında çok yer kaplayan, bilgisayar tarafından çözümü kolaylıkla yapılamayan ve veri girişinde hata yapma olasılığını artıran bir durumdur), iki boyutlu problemin analizi yapılabilir, bir veya iki kesit ve belirli bir uzunluk dikkate alınarak üç boyutlu çözüme de gidilebilir. İki boyutlu bir çözümün avantajları belirlidir yani dar vadideki yüksek barajlar için böyle bir çözüm yapılabilir. Yüksekliğine oranla uzun olan ve geniş vadiye yer alan, oldukça düzenli temel üzerine inşa edilen barajlarda üç boyutlu yapı analizi yapılmalıdır. Düzenli en kesitli uzun barajların merkezi enine kesitlerinde düzlem-zorlama analizi daha doğru neticeler verir. Bununla beraber düzlem zorlama analizi dik duvarlı vadilere yerleştirilmiş barajların enine kesitleri için uygun neticeler vermeyebilir. Çünkü yapı-vadi (boyuna) gerilme transferleri mevcut olur (Singh ve Varshney, 1995).

Palmerton, 122 m yüksekliğinde ince merkezi çekirdekli zonlu toprak dolgu barajda 3 boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanarak bir analiz gerçekleştirmiştir. Baraj trapez şekilli vadiye yerleştirilmiş ve vadinin şev eğimleri 1:1 olmuştur. Temel ve yamaçlar rijit olarak farz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre çekirdek içerisinde %59, kabuklarda %22 oranında gerilmeler elde edilmiştir (Singh ve Varshney, 1995).

Eisenstein ve çalışma grubu Kanada'daki Duncan toprak dolgu barajına 3 boyutlu sonlu elemanlar modelini uygulamıştır. Çalışmada 8 düğüm noktalı izoparametrik elemanlar kullanılmıştır. Gövde üzerindeki çatlakların meydana geldiği bölgelerde pozitif gerilmelerin oluştuğu gözlemlenmiştir (Singh ve Varshney, 1995).

Oturmalar genellikle üç sınıfta incelenebilir (Naylor, D.J., Maranhã, J.R., 1997). Yıkılma oturması, inşa işlemleri tamamlandıktan sonra rezervuarın suyla doldurulmasını takiben kabuk zonlarının doygunluğa erişmesi ve şiddetli yağışlar nedeniyle meydana gelir. İkinci olarak sünme oturması mevcuttur. İnşa işlemleri tamamlanıp aşırı yüklemelerden dolayı gövdenin sünmesini içermektedir. Üçüncü tip

oturma ise gerilmelerdeki değişimlerden dolayı meydana gelen oturmalarıdır. Bu açıklamalarla birlikte rezervuar su seviyesindeki hızlı düşüş de oturmaların artmasına sebep olmaktadır. Yüksek basınç gerilmelerinin bütün zamanlar içinde çekirdek içerisinde hüküm sürmesi ve devam etmesi zorunludur. Bu durum, hidrolik kırılmaya ve içsel erozyonun meydana gelme olasılığına karşı barajın güvenliğini sağlar.

Marsal ve Moreno Meksika'da Chicoasen barajına inşaat halindeyken 3 boyutlu sonlu elemanlar metodunu uygulamıştır. Bu araştırma inşaat halindeki bir baraja uygulanan literatürdeki tek çalışmadır. Baraj toprak ve kaya dolgudan oluşmuştur. Talvegden itibaren 210 m yüksekliğinde, ana kaya seviyesinden ise 264 m yüksekliğindedir. Seti oluşturan malzemelerin doğrusal elastik bir davranış sergilediği dikkate alınmıştır. Çekirdekten yamaçlara doğru gidildikçe gerilmelerde azalmalar olmuştur. Gövde içerisindeki gerilme dağılımlarını düzenlemek için zonlarda ve malzeme özelliklerinde değişme yapılmıştır. Çekirdeğin üst kısımlarında asıl gerilme oranının 3'ten büyük olması bu bölgedeki büyük deformasyonların göstergesi olmuştur. Gövde, baraj aksı boyunca eğri şeklinde ve düz biçimde alınarak ayrı iki çalışma yapılmıştır. Akstaki eğrilik etkisi önemli değişikliklere sebep olmamıştır. Sadece kretin 30 ile 40 m alt kotları arasında deformasyon değerlerinde küçük değişmeler meydana gelmiştir. İki boyutlu analizlere nazaran 3 boyutlu analizlerden daha doğru ve kesin neticeler elde edilmektedir (Singh ve Varshney, 1995).

3.5 Lineer hesaplamaların yapıldığı bilgisayar programlarının tanıtılması ve bazı kriterler

3.5.1 Genel

Mühendislik sistemlerinin analizi genel hatlarıyla dört aşamada tanımlanır. Birincisi sistemin analitik yöntemlerle analiz edilmeye elverişli bir şekle dönüştürülmesi (matematiksel model) için idealizasyon; ikincisi, denge denklemlerinin formülasyonu; üçüncüsü, denge denklemlerinin çözümü ve sonuncusu da sonuçların

değerlendirilmesi ve yorumlanmasıdır (Wilson vd., 1992). Burada kullanılan programlar doğrusal olarak hesaplama yapar.

3.5.2 Sürekli sistem-parçalı sistem

Sürekli ortamlar veya sistemler sonsuz sayıda ve sonsuz derecede küçük parçaların (eleman olarak isimlendirilir) bir bütünü olarak düşünülebilir. Bu tür sistemlerin uygulanan zorlamalara olan tepkisi diferansiyel denklemler formundaki denge denklemleri ile ifade edilir ve belirlenir. Ancak bu tür denklemlerin çözümleri genellikle bazı basit zorlamalar, ortam geometrileri ve sınır şartları dışında mevcut değildir (Wilson ve Habibullah, 1992; CSI, 2001).

Pekçok durumda ortamın tepkisini belirlemek için yeterli olacak matematiksel modeller ortamın sınırlı sayıda ve çok iyi tanımlanmış parçaların belli bir düzen ve uyum içinde bir araya gelmesi sonucu oluşmuş olduğu düşüncesi ile mümkündür. Bu tür sistemler parçalı sistemler olarak bilinir ve geliştirilen matematiksel modeller de parçalı modeller olarak anılır. Bütün modellerin analizinde, sistemin tepkisi direkt olarak sisteme ait sınırlı sayıdaki durum değişkeninin (kontrol değişkeni) çözümü sonucu belirlenir.

Gerilme analizi problemleri için ortamın her noktasındaki deplasmanı ifade eden bir deplasman fonksiyonu elde edilebilir.

Problemin çözümünü biraz kolaylaştırmak için ortam üzerine dağılmış birçok kontrol noktası veya bir başka deyişle kontrol istasyonu seçilir. Bu tür noktalara düğüm noktası veya kısaca düğüm denir. Problemin tanımı için seçilen temel değişkenin ve gerekirse bunun türevlerinin bu noktalardaki değeri belirlenebilirse çözüm fonksiyonunun bu noktasal değerinden yola çıkarak ve interpolasyon yöntemiyle çözüm fonksiyonunu belli bir hassasiyet ile temsil eden bir yüzey oluşturulabilir. Söz konusu bilinmeyenlerin saptanması denge denklemlerinin seçilen düğüm noktalarında ifade edilmesi ile oluşturulan ve toplam bilinmeyenler sayısında

denklem içeren setin çözümü ile mümkündür. Dikkatin direkt olarak düğüm noktaları üzerinde odaklaştığı bu yaklaşım bizi Sonlu Farklar yöntemine götürür. Bu yöntemde analiz, analizi yapılacak ortam üzerinde bir düğüm noktaları ağının oluşturulması ile başlar. Daha sonra her düğüm noktasındaki bilinmeyenlere (serbestlik) karşılık gelen denge denklemleri dikkate alınan düğüm noktası ile çevresindeki diğer düğüm noktalarındaki temel değişken ve bunun türevleri olan bilinmeyenler cinsinden ifade edilir. Bu yöntemin başlıca zayıf tarafları arasında her türlü sınır şartının rahatlıkla dikkate alınamaması, düğüm noktaları ile ilgilenirken ortamın düğüm noktaları dışında kalan bölgelerinde yeterli hesaplamaların dikkate alınamaması ve en önemlisi de karmaşık geometrik ortamların analizinde karşılaşılan zorluklar olarak gösterilebilir (Wilson ve Habibullah, 1992; CSI, 2001).

Sonlu Farklar yöntemini bir adım öteye taşıyarak geliştirmek üzere bu yöntemde düğüm noktalarındaki değişkenlerin saptanması sonrası yapılan interpolasyon işlemi düğüm noktalarındaki bilinmeyenler cinsinden parametrik olarak ve analiz öncesi yapılabilecek olursa, sürekli ortamı Kısmen Sürekli Ortam veya Yarı Sürekli Ortam şekline dönüştürmek mümkün olabilir. Bu amaçla sonlu farklar yönteminde kullanılan düğüm noktalarını kendi içlerinde gruplayarak sürekli ortam içerisinde sonlu boyutta alt bölgeler oluşturulabilir. Daha sonra temel değişkenlerinin bu bölgeler içerisindeki değişimini düğüm noktalarında birer değişken olarak tanımladığımız noktasal değerlerini kullanarak sürekli bir fonksiyon şeklinde ifade edebiliriz. Bu geçişte kullanılan ve temel değişkeninin belirli düğüm noktalarındaki noktasal değerlerini bu düğüm noktaları ile tanımlanan bölge içindeki sürekli bir değişime çeviren ve bu bölge içerisinde tanımlanmış olan yardımcı fonksiyonlara İnterpolasyon fonksiyonları (veya Karışım fonksiyonları veya Şekil fonksiyonu) denir. Dolayısıyla sonsuz sayıdaki ve sonsuz küçük elemanların bir bütünü olarak düşünebileceğimiz sürekli ortamı sonlu sayıda ve sonlu büyüklükteki elemanların - Sonlu Elemanların - oluşturduğu yarı sürekli bir ortam şekline dönüştürebiliriz (Wilson ve Habibullah, 1992; CSI, 2001).

3.5.3 Elemanlar arası uyumluluk ve süreklilik şartları (elemanların uyumsuzluğu)

Bir sonlu elemanlar modelinde her eleman problemin genel çözüm fonksiyonunun kendi sorumluluk alanına (elemanın hacmi) düşen kısmını en iyi şekilde üretmekten sorumludur. Genel çözüm fonksiyonu da elemanların ürettiği parçaların birleşmesi ile oluşturulur. Ancak elemanların ürettiği bu parçalar arasındaki geçişlerden problemin matematiksel ifadesi olan tanımlayıcı diferansiyel denkleminin gerektirdiği süreklilik her zaman bulunmayabilir. Özellikle yüksek dereceli diferansiyel denklemlerle tanımlanan problemlerde bu süreklilik şartının koşılması elemanlara gerek davranış gerekse ekonomi açısından aşırı yükler getirebilir. Bu yüzden bazı fiziksel problemlerin çözümü için formüle edilen elemanlarda bilinçli olarak problemin matematiksel olarak getirdiği süreklilik şartlarının altında bir süreklilik sağlanabilir (Wilson ve Habibullah, 1992; CSI, 2001).

Bazı elemanların formülasyonunda kullanılan interpolasyon fonksiyonları “uyumsuz modlar” içerebilir. Bu tür elemanlar yan yana kullanıldığında modelledikleri çözüm yüzeyi parçalarının yer yer iç içe girmeleri veya aralarında boşluk oluşması mümkün olabilir. Bu tür elemanlara uyumsuz eleman denir. Bu bir iç uyumsuzluk durumudur. Uyumsuzluk eleman boyutları küçültülüp ağ yoğunluğu arttıkça giderilmiş olur. Bu şartlar sağlandığı takdirde bu tür elemanlar doğrusal problemlerde son derece başarılı performans gösterirler. Bunu temel nedeni ise bu tür elemanların barındırdıkları uyumsuz modlar nedeni ile geometrik olarak benzer ancak uyumlu elemanlardan oluşmuş modellere göre daha yumuşak ve esnek bir model oluşturmaları ve böylece gerçek sürekli ortam davranışına biraz daha yaklaşımlarıdır. Zira sürekli ortamların sonlu eleman modelleri her zaman gerçek ortamlardan daha katı ve rijittir (Wilson ve Habibullah, 1992; CSI, 2001).

3.5.4 Elastisite problemlerinin sonlu elemanlar çözümünde denge ve uygunluk

Elastisite teorisine göre sürekli ortam içerisinde tanımlanan bir problemin teorik çözümü ortamın her noktasında denge ve uygunluk şartlarını sağlar. Ancak aynı probleme sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan yaklaşık çözüm bu gereklilikleri bire

bir yerine getiremez. Sonlu elemanlar yöntemi ile üretilen çözümler konusunda alttaki yargılarda bulunulabilir (Wilson ve Habibullah, 1992):

- 1) Düğüm noktalarında denge denklemleri kesin olarak sağlanır.
- 2) Düğüm noktalarında uygunluk şartı düğüm noktalarında kullanılan serbestlik dereceleri limitlerinde sağlanır.
- 3) Uygunluk şartı elemanların içinde seçilen polinom tipi interpolasyon fonksiyonları nedeni ile doğal olarak sağlanır.
- 4) Denge şartı elemanlar arası sınır boyunca genellikle sağlanmaz. Dolayısıyla sınırda bulunan bir noktadaki gerilmelerin noktayı elemanlardan birinin içinde sayarak hesaplanan değerleri noktayı bir diğer elemanın içinde kabul ederek bulunan değerinden genellikle farklıdır.
- 5) Denge şartı elemanın içinde genellikle sağlanmaz.
- 6) Elemanlar arası sınır boyunca uygunluk şartı sağlanabilir veya sağlanmayabilir.

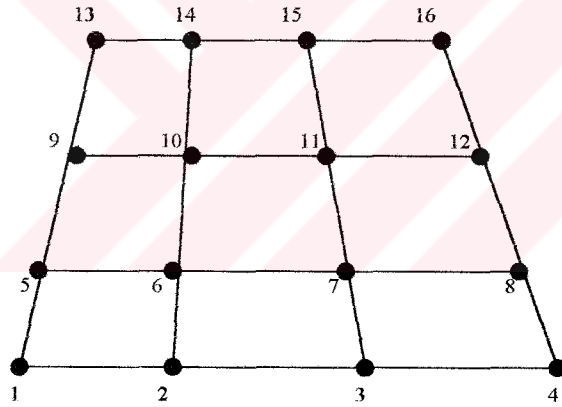
3.5.5 Yapısal serbestlikler ve yapı serbestlik derecesi

Yapılar dış zorlamalara maruz kaldıklarında çeşitli deplasmanlar yapar ve bazı deformasyonlar oluştururlar. Yapının bu tür deplasmanlar ve deformasyonlar sonrası uzaydaki konumu ve geometrisini tanımlamak için gerekli koordinatların her birine yapının serbestliği ve bu koordinatların minimum sayısına da yapının serbestlik derecesi denir. Ancak uygulamada yarı sürekli ortamlara dönüştürdüğümüz yapıların serbestliğini mühendislik yaklaşımı sınırları içerisinde ve birtakım varsayımlar sonrası sınırlı sayılara indirgeyebiliriz.

3.5.6 Programda kullanılan veri dosyaları

İlk tanımlayıcı komut sistemin özelliklerini belirlemek için kullanılır. Statik analiz veya dinamik analiz farklı tanımlayıcılar belirtilerek oluşturulmuştur.

Yukarıdaki ilk tanımlayıcı komut belirtildikten sonra düğüm noktalarının koordinatları belli bir düzen halinde belirtilir. Bir sonlu eleman modelinin oluşturulmasındaki ilk adım sürekli ortam (yapı) geometrisinin uzayda tanımlanmasını sağlayacak bir yapısal koordinat sistemi (global koordinat sistemi) seçimidir. Bu sistem tüm yapı elemanları için ortak bir koordinat sistemidir. Daha sonra bu bölümde sonlu elemanlar modelini oluşturacak düğüm noktaları ile bunların yapısal koordinat sistemi içerisindeki koordinatları tanımlanır ve her sonlu eleman modelinde en az bir düğüm noktası bulunması gerekli olacağından bu bölümün hazırlanması zorunludur. Bölümün tanımlama komutu belirtildikten sonra alt satırlarda düğüm noktalarına ait bilgiler bilgisayara girilir. Bu çalışma içerisinde örnek alınmış dolgu barajın tabanındaki düşey aralıklar ve yatayda oluşan kademe aralıkları (düğüm noktaları arasındaki mesafe) 20 m olarak alınmıştır. Eleman boyu aynı kalmakla beraber barajın üst kısımlarına doğru gidildikçe yatayı oluşturan düğüm noktaları arasındaki mesafe azalmaktadır.



İki farklı tanımlama komutu belirtildikten sonra serbestlik dereceleri kısıtlamaları (mesnetler) bölümü tanımlanır. Sonlu elemanlar modelini oluşturan her düğüm noktası 6 serbestlik derecesine sahiptir veya bir başka deyişle 6 bağımsız deplasman türü sergileyebilir. Bunlar global X, Y ve Z yönlerindeki deplasman vektörleri ile bu eksenler etrafındaki dönmeler (deplasman birinci türevleri) olan R_X , R_Y ve R_Z vektörleridir. Çözülecek sistemin sonlu elemanlar modelini oluşturacak düğüm noktalarındaki serbestlik derecelerinden herhangi biri veya bazıları kısıtlanmış (mesnetlenmiş) ise bu bilgiler bu bölümde tanımlanır. Her yapı yeterli derecede mesnetlenmiş olmalıdır. Bu durum düzlem sistemler için birbirine dik iki yöndeki

deplasmanlar ile düzlem içerisindeki dönmeyi, uzay sistemler için ise birbirine dik üç doğrultudaki deplasmanlar ile yine bu eksenler etrafındaki dönmeleri önlemeye yetecek derecede bir mesnetlenmedir. Karacaören I barajı sağlam konglomera kaya formasyonunun üzerinde bulunmasından dolayı temel rijit olarak dikkate alınmıştır.

İki boyutlu analiz kabuk elemanının kullanılmasıyla yapılmıştır. Kabuk kalınlığı 1 m, 10 m, 20 m ve farklı değerler olarak alınmıştır. Dolgu barajın iki boyutlu olarak incelenmesi bu tanımlama bloğunun özel durumunu oluşturur.

Rezervuardaki su yükü programa tanıtılmıştır. İki farklı su kademesinde hesaplamalar yapılmıştır. İlk olarak rezervuardaki su yüksekliği 40 m olarak alınmış ve daha sonra 40 m arttırılarak 80 m durumunda da sonuçlar incelenmiştir. Rezervuar tarafından gövde üzerine etkileyen su yükleri memba yüz üzerindeki düğüm noktalarında alınmıştır. Memba yüz üzerindeki düğüm noktalarına etkileyen su basıncı değerleri program tarafından hesaplanır.

3.5.7 Düzlem-elastisite kavramı

3.5.7.1 Genel

Tüm gerçek hayat yapıları üç boyutlu olup çeşitli zorlamalar altında değişik noktalarında oluşan deformasyonlar ve bunlara bağlı olarak meydana gelen gerilmeler birer ikinci merteye tensör olan birim deformasyon ve gerilme tensörleri $[\epsilon]$ ve $[\sigma]$ ile ifade edilebilirler. Gerçek malzemeler için simetrik olan bu tensörlerin 6 bağımsız bileşeni vardır. XYZ kartezyen koordinat sisteminde bu bileşenler eksenler doğrultusundaki üç normal gerilme $[\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}]$ ve üç normal deformasyon $[\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}]$ bileşeni ile herbir asal eksen düzlemi içindeki kayma gerilmeleri $[\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}]$ ile kayma birim deformasyonlarıdır $[\epsilon_{xy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz}]$.

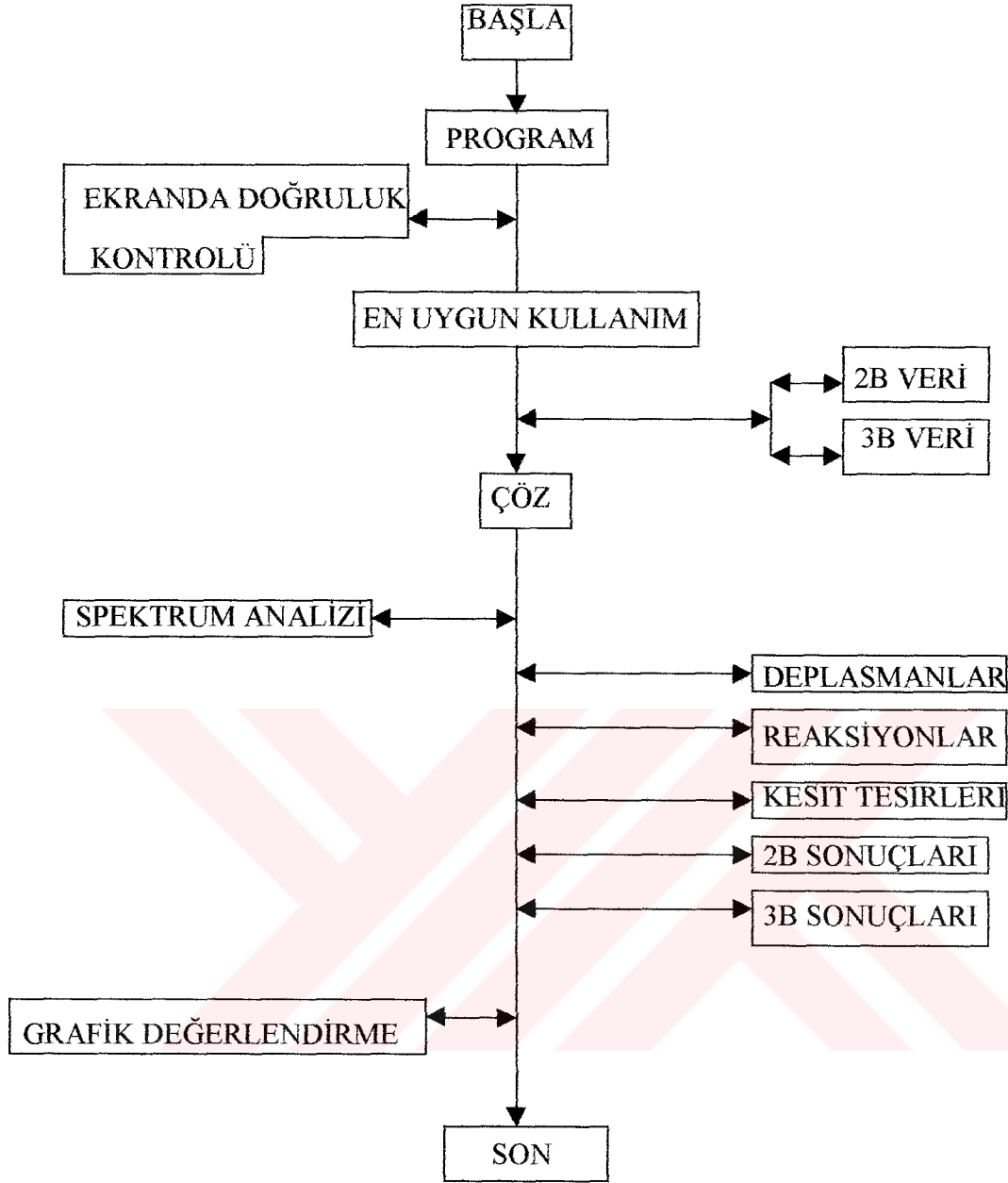
Ancak yine gerçek hayat yapılarının birçoğunda yapı geometrileri ve bunların maruz oldukları zorlamaların özellikleri göz önüne alınacak olunursa yapı içerisindeki herhangi bir noktada oluşacak gerilme ve birim deformasyon halleri için bazı varsayımlar yapmak mümkündür. Bu varsayımlar ve idealleştirmeler sonucu gerçekte üç boyutlu olan bazı yapıların iki boyutlu olarak da düşünülebileceği ve dolayısıyla bu şekilde modellenebileceği görülür (Wilson ve Habibullah, 1992; CSI, 2001).

3.5.7.2 Düzlem gerilme hali

Yüklere maruz ince bir plaka düzlemi üzerinde oluşan gerilme hali 3.5.7.1'deki duruma örnek olarak gösterilebilir. Plakanın XY düzlemi içerisinde olduğu varsayılacak olursa Z doğrultusundaki kalınlığı boyunca oluşacak gerilmeler çok küçük olacağından τ_{xz} , τ_{yz} , σ_{zz} gerilme bileşenlerinin yaklaşık sıfır olduğu kabul edilebilir. Dolayısıyla böyle bir yapıyı doğrudan iki boyutlu olarak düşünüp modellemek mümkündür (Wilson ve Habibullah, 1992; CSI, 2001).

3.5.7.3 Düzlem deformasyon hali

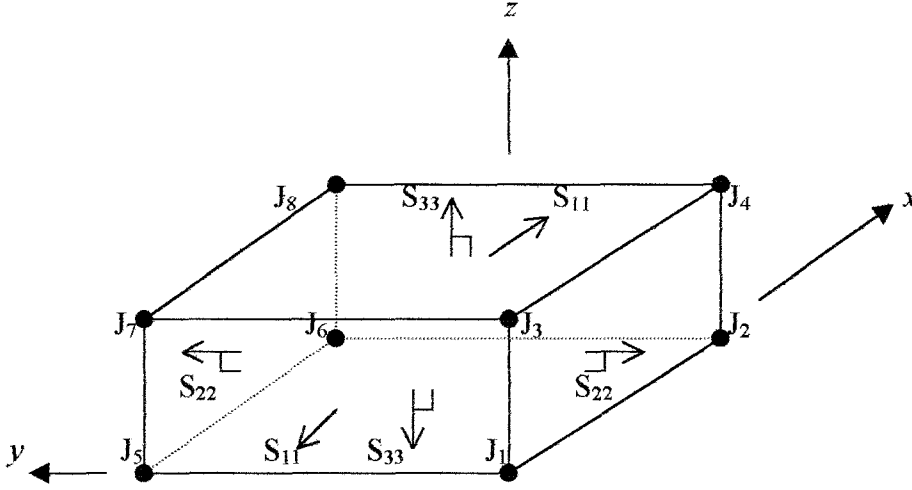
Tipik olarak kesit geometrisi sabit olup aksenal boyu oldukça uzun olan ve ekseni boyunca sabit ve kendi kesit düzlemi içerisinde kalan yüklere maruz kalan yapılarda oluşan gerilme halidir. Hidrostatik basınca maruz baraj üst yapısı bu gerilme haline örnek bir yapıdır. Bu tür yapılarda yapı ekseni boyunca oluşacak deformasyonlara yapının gösterdiği direnç boyu nedeniyle o derece büyüktür ki oluşacak deformasyonlar ihmal edilebilir mertebede olup pratik olarak yapının ekseni boyunca deforme olmadığı kabul edilebilir. Ekseni Z yönü ile çakışık böyle bir yapıda birim deformasyon tensörü bileşenleri için $\epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zz} = 0$ durumu ortaya çıkacağı için yapı XY düzlemi içerisinde kalan kesiti ve bu düzlem içerisindeki kesit sınırları boyunca etkiyen yükler şeklinde modellenebilir (Wilson vd., 1992; CSI, 2001).



Şekil 3.7 : Program çalışma yapısı şeması (akış diyagramı).

Bilgisayar programı kullanılırken ilk olarak sistem tanımlaması yapılır. Daha sonra hangi türde analiz yaptırılmak isteniyorsa bu veri bloğu belirtilir. Statik analiz yaptırılmak isteniyorsa statik analiz kodu bilgisayar tarafından algılanır. Dinamik analiz yaptırılmak isteniyorsa öz değer sayısı belirtilir. Daha sonra koordinatlar ve malzeme özellikleri tanımlanır. Sonlu elemanlar analiziyle düzlem-gerilme veya düzlem-zorlama durumu altında iki veya üç boyutlu olarak elastik yapının analizi

yapılır. Ağ üretimi, odaklanmış yükler, otomatik olarak düzenli yüklerin veya hidrostatik yüklerin uygulanması, farklı yükleme durumları, düğüm noktalarındaki sınır değerleri program tarafından hesaba katılır.



Şekil 3.8 : 8 düğüm noktasından oluşmuş izoparametrik 3 boyutlu eleman (Not: S_{12} x düzlemi üzerinde y yönünde, S_{13} x düzlemi üzerinde z yönünde, S_{23} y düzlemi üzerinde z yönündeki kayma gerilmeleridir. S_{11} x yönünde, S_{22} y yönünde, S_{33} z yönünde düzleme dik normal gerilmelerdir).

Sonlu elemanlar metodu, köşelerinden birbirlerine bağlanmış farklı elemanların gövde üzerindeki montajını dikkate alır. Bu metodun kullanılmasıyla gerçek olan sonuç değerine oldukça iyi bir şekilde yakınsama görülür. Birçok problemin çözümünde ihmal edilen veya fazlaca hesaplanan değerlere sonlu elemanlar metodunun kullanılmasıyla en gerçekçi yaklaşımlar elde edilmektedir. Karmaşık geometriye sahip yapılar, fiziksel özelliklerdeki farklılıklar bu metotta dikkate alınır ve bilgisayar yardımıyla en doğru çözümler elde edilir. Sonlu elemanlar metoduyla kolay ve ekonomik olarak malzeme özelliklerindeki kapsamlı değişimler ve gerçek geometriye yakın yaklaşımlar mümkündür (Bureau of Reclamation, 1977).

Düzlem-gerilme veya düzlem-zorlama durumlarının farz edilemediği yükleme ve yapı şartlarında da 3 boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılabilir. Metodun

problemlere uygulanabilirliği ekonomi ve bilgisayarın depolama kapasitesi ile sınırlıdır.

İki boyutlu sonlu elemanlar modelinde yapı uygun bir şekilde üçgen veya dörtgen elemanlara bölünür. Bu şekilde bölünen parçaların köşe noktaları düğümlerdir. Her elemana uygulanmış çeşitli gerilmelerden dolayı düğüm noktalarındaki biçimsizlik (yer değiştirmeler) elemanın geometrisi ve malzeme özelliklerinin fonksiyonudur. Gövde üzerinde daha önceden meydana gelmiş deplasmanlar da programa önceden tanıtılabilmektedir. Elemanın yukarıda bahsedilmiş biçimsizliği (yer değiştirmesi) ile ilgili olarak katsayı matrisine uygulanmış yük, elemanın kendi eğilmezlik matrisidir. Global eğilmezlik matrisini oluşturmada bütün eğilmezlik matrisleri birleştirilir. Her düğümdeki mevcut yükler belirlenir. Her düğümün iki yöndeki biçimsizliği (yer değiştirmesi) belirsizdir. Mevcut yüklerin neden olduğu biçimsizliklerin eğilmezlik katsayılarıyla ilişkisi belli bir denklem sayısıyla üretilir. Çok kapsamlı katsayı matrisi simetrik olarak oluşturulur. Denklemler nümerik yöntemlerle (Gauss Eliminasyon) çözülür (Bureau of Reclamation, 1977).

İki boyutlu sonlu elemanlar metodunda, her bilinmeyen bir sonraki adımda denklem içerisinde mevcut diğer bilinmeyenler teriminden çözülür. Daha sonra bu bulunan değer bir sonraki denklem içerisinde yerine yazılır. En son denklem, sadece bir bilinmeyen içerir. Bu bilinmeyen değer belirlenir ve bir önceki denklemin çözümünde kullanılır. Bir önceki denklemde sadece iki bilinmeyen mevcuttur. Bir önceki denklemde yerine yazma yöntemi, bütün bilinmeyenler bulununcaya kadar devam eder. Bilinen biçimsizlikler, elemanların eğilmezlikleri, zorlamalar ve zorlamaların kullanılmasıyla gerilme durumları hesaplanır (Bureau of Reclamation, 1977).

İki boyutlu analiz sonuçlarında deplasmanlar, gerilmeler, rotasyonlar, momentler mevcuttur. Hesaplanan değerler sonucunda gövde üzerinde nasıl bir deformasyon olduğu simülasyonla görülebilir.

İki boyutlu doğrusal analizlerde, düğümler arasında doğrusal olarak deplasman dağılımı oluşur. Eğri şeklindeki yüzeyler, yaklaşık düz doğru olarak kabul edilir.

Üç boyutlu analizlerde, yine gövde elastik yapı olarak dikkate alınır. Elemanların ve düğüm noktalarının tanımlanmasında lokal veya doğal koordinat sistemi kullanılır. Sonrasında lokal koordinat sistemi global koordinat sistemine dönüştürülür. Elemanların basit olarak tanımlanabilmesi için lokal koordinat sistemi kullanılmaktadır. Lokal koordinatlar elemanlar için eğilmezlik formülasyonunu oldukça basitleştirir. Düğüm noktaları arasındaki deplasmanların doğrusal olarak değiştiği kabul edilir. Bu durumda, deplasmanlar için aynı interpolasyon (şekil) fonksiyonları kullanılabilir. Geometri ve deplasmanın bu yaygın ilişkisi izoparametrik elemanları oluşturur (Bureau of Reclamation, 1977).

Üç boyutlu analizlerde ilk olarak deplasman fonksiyonları tesis edilir ve eleman zorlamaları formülleştirilir. Düğüm noktası deplasmanları, zorlama-deplasman ilişkisi içerisinde eleman zorlamalarıyla alakalıdır. Elastik yapı için gerilme-zorlama ilişkilerini kullanarak elde edilen deplasmanlardan elemanın gerilmesi hesaplanır. Enerji faktörleri (minimum potansiyel enerji veya virtüel iş), düğüm noktası deplasmanları ile düğüm noktası kuvvetleri arasındaki ilişkiyi tesis etmede kullanılır. Bu ilişki, gerilme-zorlama ve zorlama-deplasman karakteristiklerinin fonksiyonudur. Bu fonksiyona, elemanın eğilmezlik (stiffness) fonksiyonu adı verilir.

Elemanın eğilmezliği sonlu elemanlar çözümünde anahtar özelliktir. Her elemanın eğilmezliği, global eğilmezlik matrisi ($[K]$) içerisinde birleştirilir. Bu matris içerisinde her düğüm noktasındaki eğilmezlik, bu düğümleri içeren her elemandan elde edilen katkıların toplanmasıyla elde edilir. Bütün sistem için denklem seti ve kuvvet, her düğüm noktasındaki bilinen kuvvetlerin eğilmezliği ile deplasmanların çarpımından elde edilir ($[F] = [K].[d]$; $[F].[K]^{-1} = [d]$). Düğüm noktalarındaki deplasmanlar denklem setlerinin çözülmesinden elde edilir. Deplasman değerleri belirlendikten sonra her elemanı oluşturan düğüm noktalarındaki gerilmeler hesaplanır. Elemanın eğilmezlik formülasyonu içerisinde kullanılmış gerilme-

zorlama ve aynı zorlama-deplasman ilişkilerini kullanarak gerilmeler hesaplanır. Düğüm noktasındaki gerilmeler, bu noktadaki bütün elemanların yaptığı katkıların ortalaması alınarak hesaplanır (Bureau of Reclamation, 1977).

Üç boyutlu analizde iki boyutlu analize göre bir fazla düzlem (z) mevcuttur. Üç boyutlu katı elemanlarda 6 yüz vardır.

Karacaören I barajı üzerinde gerek iki gerekse üç boyutlu statik ve dinamik analiz yapılmıştır. Dinamik analizde tepki-spektrum analizi gerçekleştirilmiştir. Dinamik yükleme altında sonuçlar değerlendirilmiştir. Sönüm oranı %5 ve tahrik yönü 45^0 olarak alınmıştır. Birinci deprem bölgesi için şartnameye göre deprem ivmesi $0.40g$ 'dir. Hesaplamalarda önce statik durumlar altında, ikinci olarak sadece dinamik yükler altında ve daha sonra hem statik hem de dinamik yükleme durumu altında mod sayısı (frekans) 5 alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu analizler yapılırken kabuk elemanı membran (zar) olarak dikkate alınmıştır.

Üç boyutlu ve iki boyutlu elemanlar tanımlanırken gövdeyi oluşturan malzemelerin elastisite modülleri, Poisson oranları, birim hacim ağırlıkları ve birim hacim kütleleri doğrudan programa tanıtılır. Gövdenin kaç çeşit malzemeden oluştuğu belirtilir ve ayrı ayrı malzeme özellikleri tanımlanır. Üç boyutlu analizde bütün gerilme değerleri global koordinat sisteminde eleman düğüm noktalarında hesaplanır. Yükleme durumu üç tanedir ve dinamik hesaplamalar 5 farklı frekans için yapılmıştır.

4 BULGULAR VE PROGRAMLARIN UYGULANMASI

4.1 Genel (Karacaören I barajı)

Karacaören I barajı Antalya-Isparta devlet karayolunun 60'ıncı kilometresinde Burdur il sınırları içerisinde inşa edilmiştir. Talvegden itibaren 80 m yüksekliğindedir ve merkezi kil çekirdeğe sahip toprak dolgu barajdır. Baraj çekirdeği nispeten az geçirimli kilden yapılmış, kabuk ve çekirdek malzemeleri ariyet sahalarından elde edilmiştir. Kabuk malzemesi kumlu çakıldan oluşmuş ve üzeri dalga etkisine karşı riprap ile korunmuştur. Analizlerde gövdeyi oluşturan iki malzeme özelliği dikkate alınmıştır. Baraj gövdesinde hemen hemen 6400000 m³ dolgu malzemesi kullanılmıştır. Bunun 1280000 m³'ü merkezi çekirdekte kullanılmış olan geçirimsiz kil malzemesidir. 380 m³'lük malzeme kabuk ile çekirdek arasındaki geçiş zonu için filtre zonunun oluşturulmasında dolgu olarak kullanılmıştır. Riprap tabakası da 2 m dik genişliğe sahiptir ve 225.00 kotundan başlayarak kret kotu olan 275.00 m yüksekliğe kadar devam etmektedir. Talveg kotu 195.00 m'dir. Dolayısıyla memba şevinin alt kesimleri riprap ile korunmamıştır. Mansap eğimi iri bloklu çakıldan meydana gelmiştir. Analizlerde talveg kotu 00.00 olarak alınmıştır.

Barajın memba ve mansap yüzü eğimi 2.5Y:1D'dir. Rezervuardaki normal su seviyesi 270.00, maksimum su seviyesi 272.50, minimum su seviyesi ise 230.00 kotundadır. 223.00 kotunda taban genişliği 2 m ve kenar eğimleri 1:1 olan riprap tabakasının bitiminde hendek oluşturulmuştur.

Kret genişliği 12 m, çekirdek kret genişliği ise 6 m olmuştur. Çekirdeğin memba ve mansap eğimleri 1Y:2D'dir. Memba bölgesine 211 kotunda batardo nehir derivasyonunun sağlanması için inşa edilmiştir. Çekirdeğin taban genişliği 80 m'dir ve temel ile gövde arasındaki değme noktasının 9 m aşağısında bulunan 20 m genişliğinde taban ile çekirdek hendeği oluşturulmuştur. Çekirdek hendeğinin kenar eğimleri 1:1'dir. 5119620 m³'lük malzeme kabuk zonundaki dolgu için kullanılmıştır. Temel sağlam kaya formasyonu olan konglomera kütlelerinden

oluşmaktadır ve temelde homojen bir dağılım görülür. Kret uzunluğu 400 m, barajın maksimum boyutlu en kesiti de 400 m civarındadır.

Barajın 80 m yüksekliği alınarak 1 m, 10 m, 20 m ve 120 m'lik genişlikler alınarak analizler iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Arazide temel ile gövdenin değme noktalarında düzensiz, engebeli bir hat mevcuttur. Yukarıdaki kalınlıklara göre de üç boyutlu analizler yapılmıştır.

Hesaplarda kullanılan baraj malzemesinin özellikleri (elastisite modülü, Poisson oranı, birim hacim ağırlığı, birim hacim kütlesi) çeşitli kaynaklardan sağlanmıştır. Ayrıca malzeme özellikleri daha önce yapılan çalışmalarda kullanılan özelliklerle de mukayese edilmiştir. Baraj ile ilgili gerekli bilgiler Devlet Su İşleri bölge müdürlüğünden temin edilmiştir. Baraj üç tip malzemedен oluşmuştur. Temel konglomera kaya formasyonundan, kabuk zonu kumlu çakıldan ve çekirdek kil malzemesinden oluşmuştur. Konglomera kaya formasyonunun Young elastisite modülü 100000 ton/m^2 (1000000 kN/m^2), birim ağırlığı 2.4 t/m^3 (24 kN/m^3), Poisson oranı 0.3, yoğunluğu (birim hacim kütlesi) 0.24 olarak alınmıştır. Kabuk zonunu oluşturan kumlu çakıl malzemesinin elastisite modülü 60000 t/m^2 , birim ağırlığı 1.9 t/m^3 , Poisson oranı 0.25 ve birim hacim kütlesi 0.19 olarak elde edilmiştir. Merkezi çekirdeği oluşturan kil malzemesinin elastisite modülü 45000 t/m^2 , birim ağırlığı 2.1 t/m^3 , Poisson oranı 0.45 ve birim hacim kütlesi 0.21 olarak kullanılmıştır. Ayrıca suyun birim ağırlığı ise 0.981 t/m^3 olarak alınmıştır (Köseoğlu, S., 1987). Barajın iki boyutlu analizinde yapı membran (zar) olarak tanıtılmıştır.

4.2 Karacaören I barajının sonlu elemanlar modeli ve mod şekil numaraları

Karacaören I barajı oldukça geniş bir vadiye inşa edilmiştir. Vadi genişliğinin baraj yüksekliğine oranı 5'dir. Barajın yüksekliği ve baraj aksı boyunca kret uzunluğu 400 m'dir. İki boyutlu analiz yapılırken 1 m, 10 m ve 20 m'lik zar kalınlıkları dikkate alınmış ve bu kalınlıklarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu analiz hem statik durumlar altında hem de dinamik yüklemeler altında yapılmıştır.

Modelleme dörtgen izoparametrik elemanlardan oluşur. Üç boyutlu analizlerde 40 m, 60m, 120 m'lik aks uzunluğu dikkate alınmıştır.

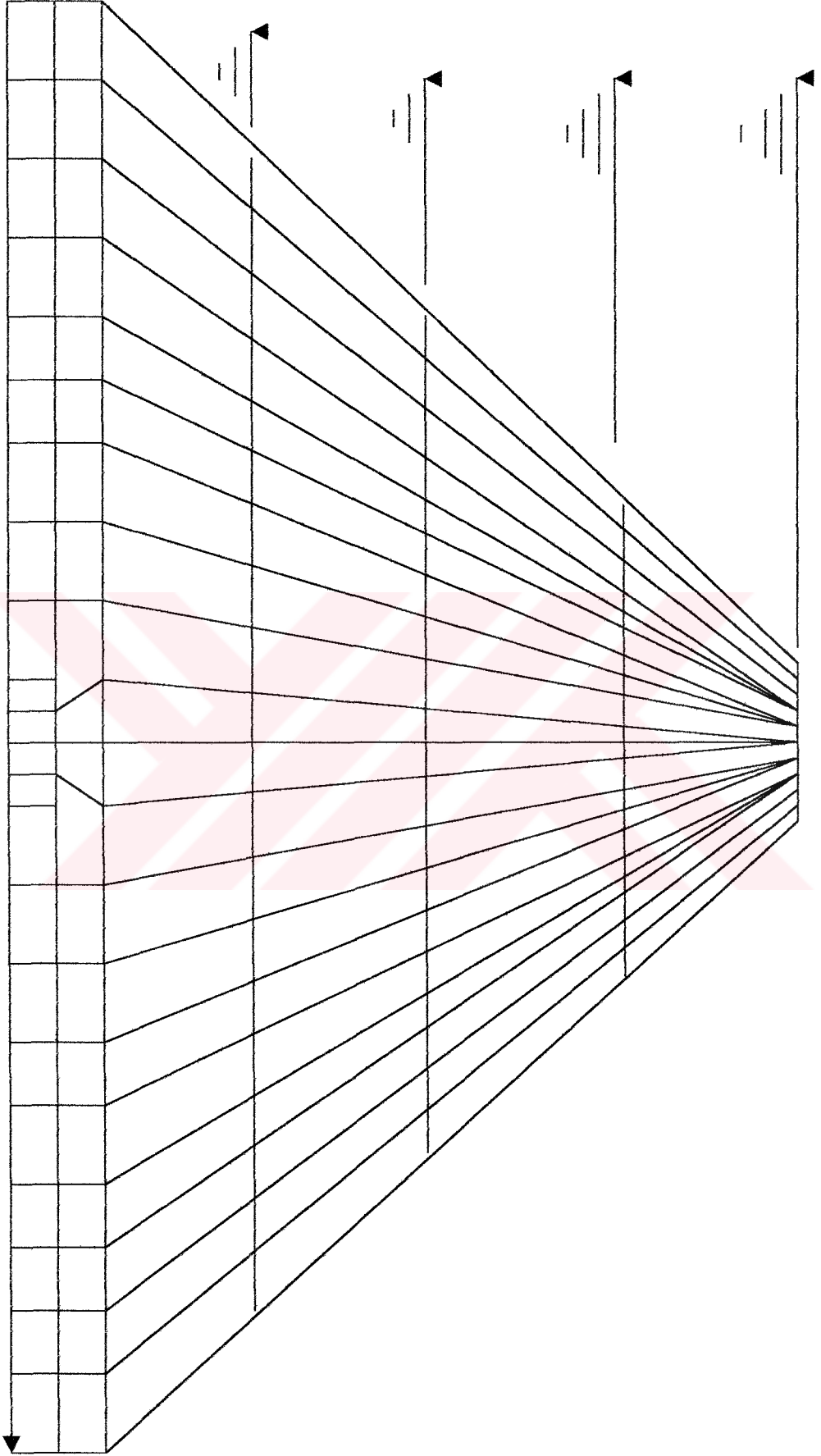
İki boyutlu analiz yapılırken temeli oluşturan malzeme de modellenmiştir. İki boyutlu sistemde 151 düğüm noktası oluşturulmuş ve 122 eleman kullanılmıştır.

Bir eleman dört düğüm noktasıyla oluşturulur. Temel ile barajın değme noktasında düğüm noktası aralıkları 20'şer metre alınarak modelleme yapılmıştır. Düğüm noktaları arasındaki düşey mesafeler de 20 m'dir. Eleman numaralandırma işlemleri sol en alttan başlayıp sağa doğru birer artarak devam eder. Düğüm noktaları numaraları da yine en alt sol köşeden (orijin) başlar ve sağa doğru birer artarak devam eder.

Üç boyutlu analizde x yönü baraj aksı doğrultusunda, y yönü baraj aksının enine doğrultusunda ve z yönünde yükseklik olarak alınmıştır. Orijin sağ alt köşe olarak belirlenmiştir. 40 m'lik kret uzunluğu için üç boyutlu analizde 453 düğüm noktası ve 243 adet dörtgen eleman tanımlanmıştır. 1 eleman 8 düğüm noktasından oluşur.

Bu modellemeler yapılırken barajın maksimum boyutlu en kesiti dikkate alınmıştır. Barajın temeli rijit kabul edildiğinden temeldeki serbestlik dereceleri önemsenmemiştir. Bu noktalarda deplasman değerleri sıfır olarak gerçekleştirilmiştir.

Mod şekil numaraları veya diğer bir ifade ile frekanslar bu çalışma içerisinde 5 olarak alınmıştır. Mod süperpozisyonu baraja gelen deprem kuvvetleri sonucunda barajın hangi doğrultularda salınım veya titreşim göstereceğini belirler. Mod şekil numarası 1 genellikle baraj gövdesinin yatay doğrultudaki (kayma) salınımlarını dikkate alırken mod şekil numarası 2 simetrik olarak düşey ve yatay titreşimleri ve mod şekil numarası 3'de simetri olmaksızın yatay ve düşey deplasmanları hesaba katar. Barajın olası bir depremde nasıl bir salınım yapacağı mod şekil numaraları vasıtasıyla simüle edilebilir.



Şekil 4.1 : Gövdenin iki boyutlu modeli.

4.3 Değerlendirmeler

Araştırma bulguları kapsamlı olarak tartışma ve sonuç bölümünde de irdelenmiştir. Bulgulara göre çeşitli değerlendirmelere bu bölümde kısaca değinilecektir.

Genelde her iki bilgisayar programının kullanılmasıyla hemen hemen aynı bölgelerde ve noktalarda benzer neticeler elde edilmiştir. Z yönünde maksimum deplasmanlar kret üzerinde meydana gelirken, x ve y yönlerinde 3 boyutlu analizlerde çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği bölgelerde çekirdek içerisinde, çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında maksimum gerilmeler ve deformasyonlar meydana gelmiştir. Ayrıca krette memba ve mansap uç noktalarında da çeşitli yüksek deformasyonlar oluşmuştur. Gerilme dağılımları ve bazı deplasman değerleri ek bölümünde şekiller halinde sunulmuştur. Tartışma ve sonuç bölümünde gerilmeler ile deplasmanlar arasındaki ilişkiler de incelenmiştir.

Beliche barajında, Portekizde yapılan bir çalışmaya göre, genelde hesaplanan gerilme ve deplasman değerleri ile gövdeye yerleştirilmiş enstrümanlardan ölçülen değerler karşılaştırıldığında, ölçülen değerlerin hesaplanmış değerlere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir (Naylor vd., 1997). Karacaören I barajında gövde içerisine herhangi bir enstrüman yerleştirilmediğinden dolayı gövde içerisinde gerilmeler ve deplasmanlarla ilgili herhangi bir ölçüm kayıtları mevcut değildir.

Hesaplanmış gerilme dağılımlarının kabuklardan çekirdeğe doğru uygun yük transferini göstermesi, hidrolik kırılma olayına ve neticesindeki içsel erozyona karşı barajın güvenlik kazanmasını temin eder (Naylor vd., 1997). Bu çalışma içerisinde bu duruma rastlanılmamaktadır, çekirdek içerisinde maksimum gerilmeler meydana gelirken deformasyonlar da yine maksimum değerleri almıştır. Yük transferi çekirdekten kabuklara doğru olmuştur. Gerçekte hidrolik kırılma olayının önlenmesinde bir düzeltici tedbir de filtre zonları oluşturmaktır.

Baraj kretindeki maksimum oturma 11-13 cm civarında hesaplanmıştır. Bu durumda Justo'ya göre sıkıştırılmış kuru zeminlerde çatlak oluşum potansiyeli vardır fakat inşa işlemlerinden sonra riskli bir durumla karşılaşılmamıştır (Singh vd., 1995).

Çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında ve kabuk zonu ile birleşme bölgelerinde meydana gelen gerilmeler ve deplasman değerleri, daha önceleri yapılan birçok çalışma neticesinde elde edilmiş sonuçlara uyum sağlamaktadır.

Analiz içerisinde malzeme özellikleri her bölge için sabit olarak alınmıştır. Kullanılan iki farklı bilgisayar programından elde edilen neticeler kıyaslandığında bu iki farklı programın birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Araştırma bulguları bu çalışma içerisinde tartışma ve sonuç bölümüyle yakından ilgilidir. Bu ilgiyi dikkate alarak bazı bulgular bir sonraki bölümde daha detaylı olarak dikkate alınmış, incelemeler yapılmış, daha önceden yapılan çalışmalardan elde edilen neticelerle bu çalışmanın bir değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

5 TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1 Sonuçların değerlendirilmesi ve elde edilen tespitler

Bu çalışmada Karacaören I dolgu barajının statik ve dinamik yükler altında davranışı araştırılmış, deformasyon, gerilme analizi, kuvvetleri ve momentlerin değerlendirilmesi yapılmış, daha önceleri farklı bilgisayar programları ile yapılan sonuçlar ile bu çalışma sonuçları arasındaki ilişkiler incelenmiş ve gerilme dağılımları ile deformasyonlar arasındaki etkileşimler tespit edilmiştir. Çalışma içerisinde iki farklı bilgisayar programı kullanılmıştır. Programlardan sırasıyla birincisi Sap90 iken ikinci program Sap2000 olmuştur. Sap2000 bilgisayar programının son versiyonu 7.4 kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışma içerisinde birbirlerinin devamı olan fakat farklı iki bilgisayar programının aynı yükleme koşullarında verdiği neticelerinde karşılaştırılması imkanı bulunmuştur.

İki programla doğrusal olarak pek çok parametrik çalışma yapılmıştır. Karacaören I dolgu barajı için iki boyutlu analizlerde kabuk (shell) elemanlar dikkate alınırken, üç boyutlu analizlerde katı (solid) elemanlar dikkate alınmıştır. Ayrıca çalışmanın yapıldığı ikinci bilgisayar programında kabuk elemanlar kullanılarak üç boyutlu bir model oluşturulmaya çalışılmış, analiz yaptırılmış fakat farklı neticeler elde edilmiştir. Bu uygulamada kabuklar arası kalınlık 20 metre alınmış ve kesitler kabuk olarak düşünülmüştür.

Analizlerde gerek statik, gerekse Çaldıran depremi spektrum değerleri altında dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Spektrum eğrileri ve ikinci bilgisayar programından elde edilen mod, deformasyon, moment, kuvvet ve gerilme şekilleri sonuçlar kısmının sonunda sunulmuştur. Rezervuar su seviyesi analizlerde maksimum ve yarı yükseklik seviyelerinde düşünülmüştür. İki boyutlu analizler gerçekleştirilirken kabuk elemanı kalınlığı 10 metre ve 20 metre olarak alınmış, kabuk kalınlığının 10 metre ve 20 metre alındığı durumlarda rezervuardaki su

seviyesi tam dolu ve yarı dolu olarak alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Dinamik analizlerde öz değer sayısı 5 olarak belirlenmiştir.

İki boyutlu analizlere ilave olarak üç boyutlu analizler de yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu analizlerde baraj aksı uzunluğu 40 metre, 60 metre ve 120 metre alınmıştır. X yönü uzunluğunun 120 metre olarak alındığı çalışma sadece ikinci programda gerçekleştirilmiştir. Aks uzunluğu boyunun 60 metre alındığı üç boyutlu çalışmada ayrıca su seviyesi yarı yükseklikte düşünülmüş ve sonuçların kıyaslanması yapılmıştır.

5.2 Analizlerin değerlendirilmesi

5.2.1 Mod şekil numaralarına göre meydana gelen deplasmanlar ve rotasyonlar

İki boyutlu 10 metre ve 20 metre kalınlığındaki kabuk elemanları ve üç boyutlu analizler arasında ve birinci program üzerinde bir karşılaştırma yapılırsa, 20 metre kalınlığa sahip kabuk elemanlarında öz değerlerin daha yüksek olduğu görülür. Bunun tersine dairesel frekans değerleri ve frekanslarda daha düşük gerçekleşmiştir. Bu durum kabuk kalınlığının daha fazla olmasına bağlanabilir.

Bu analizde 5 adet mod şekil numarası (frekans) mevcuttur. Kabuk elemanı kalınlığı 10 metre için birinci mod içerisinde 72 no'lu düğüm noktasında x yönünde $0.7709E-08$ m değerli, yine 72 no'lu düğüm noktasında y yönünde $0.1251E-08$ m değerli, 141 no'lu düğüm noktasında z yönünde 1.8036 cm değerine sahip deplasmanlar maksimum olarak gerçekleşmiştir. 72 no'lu düğüm noktası memba taraftadır ve üzerine gelen zati yük ve rezervuar su yükünden dolayı bu noktada maksimum pozitif değerli deplasmanın gerçekleşmesi normaldir. Z yönündeki deplasman 141 no'lu düğüm noktasında maksimum olarak gerçekleşmiştir. Bu nokta krette baraj aksı üzerindedir. Sonuçlar oldukça küçüktür.

20 metrelik kabuk kalınlığı için yapılan analiz sonuçlarından aynı düğüm noktalarında ve aynı bölgelerde maksimum yer değiştirmelerin meydana geldiği görülmüştür.

Kesit kalınlığı 40 metre için yapılan üç boyutlu analizlerde, x yönündeki maksimum deplasman 401 no'lu düğüm noktasında (krette mansap tarafta, 401-402-403-404) 0.008681 m olarak, y yönündeki maksimum yer değiştirme 382 no'lu düğüm noktasında - yönde -0.000650 m olarak ve 384 no'lu düğüm noktasında + yönde (talveg ve çekirdek hendeği üst kotu +00.00 kabul edilirse, +60.00 kotunda memba uç noktası civarında) ve z yönünde 418 no'lu düğüm noktasında + 0.002935 m ve 420 no'lu düğüm noktasında - olarak (krette baraj merkez çizgisine komşu bölgede) maksimum yer değiştirmeler belirlenmiştir. Sonuç değerleri oldukça küçüktür.

Kesit kalınlığı 60 metre için yapılan üç boyutlu analiz sonuçlarından x yönünde 536 ve 537 no'lu düğüm noktalarında 0.006811 m (krette memba tarafta), y yönünde 413 no'lu düğüm noktasında negatif ve 416 no'lu düğüm noktasında pozitif 0.000661 m değerli (+40.00 kotu memba kabuk zonu içerisinde), z yönünde 557, 560, 561, 564 no'lu düğüm noktalarında 0.002955 m olarak (krette baraj merkez çizgisine komşu noktalarda) yer değiştirmeler maksimum olarak bulunmuştur. Bu incelemeler mod şekil numarası 1'e göre yapılmıştır. Elde edilen deplasman değerleri düşük olarak gerçekleşmiştir.

Değer olarak en büyük deplasmanlar barajın kretinde ortaya çıkmıştır. Gövde ile temel kayasının birleşme yerlerinde ankastre mesnetten dolayı yer değiştirmeler 0'dır. Bu veriler mod şekil numarası 1'den elde edilmiştir.

Kabuk kalınlığı 10 metre için yapılan analizde x yönündeki rotasyon 131, 132, 150 ve 151 numaralı düğüm noktalarında 0.000320 olarak (krette memba ve mansap uç noktaları), y yönündeki rotasyon 110 numaralı düğüm noktasında negatif (-0.000102) ve 130 numaralı düğüm noktasında pozitif 0.000102 olarak (kretin 20 m altında + 60.00 kotunda memba ve mansap uç noktalarında), z yönünde 57'inci

düğüm noktasında $0.1052E-9$ olarak (+00.00 kotunu baraj merkez çizgisinin kestiği noktada) maksimum rotasyonlar gerçekleşmiştir.

Kabuk kalınlığı 20 metre için yapılan analizden de aynı noktalarda maksimum değerler elde edilmiştir. Analizler birbirleriyle uyusmaktadır. Sonuç değerlerine bakıldığında kabuk elemanı kalınlığı azaldıkça sonuç rotasyon değerleri daha büyük olmaktadır. X yönündeki rotasyonların maksimum olduğu düğüm noktaları krette barajın köşe noktalarıdır. Y yönündeki maksimum rotasyonlar kretten 20 metre altta köşe uç noktalarındadır.

Mod numarası 2'ye göre yapılan analizlerde kabuk elemanı kalınlığı 10 metre için, x yönünde 141 numaralı düğüm noktasında $0.1249E-6$ m, y yönünde 142 no'lu düğüm noktasında $0.2711E-7$ m, z yönünde 110 no'lu düğüm noktasında pozitif 0.015671 m ve 130 no'lu düğüm noktasında negatif 0.015671 m olarak maksimum yer değiştirmeler gelişmiştir. 110 ve 130 no'lu düğüm noktaları kret seviyesinin 20 m altında (+60.00 kotunda) memba ve mansap uç noktalarıdır. Krette baraj merkez çizgisi üzerinde x ve y yönünde maksimum yer değiştirmeler mevcuttur. Dinamik kuvvetler sonucu gövde üzerinde meydana gelebilecek yer değiştirmeler en fazla krette görülmektedir. Mod şekil numarası 1'e göre elde edilen sonuç değerleri düşük gerçekleşmişti. Aynı durum mod şekil numarası 2'ye göre yapılan analizlerde de mevcuttur.

İkinci modda 20 metrelik kabuk kalınlığı için yapılan analiz sonuçlarına göre x yönündeki maksimum deplasman 145 no'lu düğüm noktasında $0.7845E-6$ m, y yönünde 141 no'lu düğüm noktasında $0.1239E-5$ m, z yönünde 110 no'lu düğüm noktasında pozitif 0.011082 m ve 130 no'lu düğüm noktasında negatif 0.011080 m olarak meydana gelmiştir. Sonuçlar kabuk kalınlığı 10 metre için yapılan analiz sonuçlarıyla ilişkilidir. Yer değiştirmeler krette ve kretin 20 metre altında (+60.00 kotunda) memba ve mansap uç noktalarında maksimumdur.

40 metre kesit kalınlığı için yapılan 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre x yönündeki maksimum deplasman 434 no'lu düğüm noktasında $-0.9625E-3$ m olarak negatif gerçekleşir. Bunun haricinde ikinci en yüksek deplasman 407 no'lu düğüm noktasında pozitif $0.9211E-3$ m olarak gerçekleşmiştir. Y yönündeki maksimum deplasman 0.003455 m olarak 411 no'lu düğüm noktasındadır. Bu değeri takiben diğer yüksek değerler 406, 408, 409, 412, 414 no'lu düğüm noktalarındadır. Z yönündeki maksimum yer değiştirme 328 no'lu düğüm noktasında pozitif 0.002492 m ve 330 no'lu düğüm noktasında negatif -0.002492 m'lik değer bulunmuştur. Maksimum yer değiştirmeler barajın kretinde mansap tarafta ve kretten 20 metre alta $+60.00$ kotunda memba ve mansap uç noktalarında gerçekleşmiştir. Kret seviyesinin 20 metre altında bulunan bölge iç çekirdek zonuna doğru deformasyona uğrama durumundadır. Benzer şekilde kret bölgesi de alt kısımlara doğru deforme olur.

İkinci modda kesit kalınlığı 60 metre için yapılan analiz sonuçlarına göre, x yönündeki maksimum yer değiştirme 517 no'lu düğüm noktasında negatif 520 no'lu düğüm noktasında pozitif 0.000313 m olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca 437, 440, 444, 445, 449, 456 no'lu düğüm noktalarında da yer değiştirmeler yüksektir. Y yönündeki maksimum yer değiştirme 595 no'lu düğüm noktasında 0.005073 m olarak meydana gelmiştir. Bununla beraber 542, 543, 546, 547, 550, 551, 554, 555, 558, 559, 562, 563, 566, 567, 570, 571, 574, 575, 578, 579, 582, 583, 586, 587, 590, 591, 594, 598, 599, 602, 603 no'lu düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerde hemen hemen maksimum değere yakındır. Z yönündeki maksimum yer değiştirme 424 no'lu düğüm noktasında -0.000355 m şeklinde oluşmuştur. Bununla beraber 421, 425, 428 no'lu düğüm noktalarında da maksimuma yakın yer değiştirme değerleri mevcuttur.

Sonuçlar incelendiğinde x yönünde kretin 20 metre altında $+60.00$ kotunda memba uç noktasında maksimum yer değiştirme görülür. Bununla beraber yine kretin 20 metre altında mansap uç bölgesindeki yer değiştirme değerleri yüksektir. X yönünde kretin 20 metrelik alt kotunda baraj deprem yüklerine maruz kaldığında deplasman değerleri fazla olmaktadır. Memba taraftan mansap tarafa doğru baraj gövdesinin taç bölümü zorlanma eğilimindedir. Y yönünde 595 no'lu düğüm noktası maksimum yer değiştirmeye maruz kalır. Bu nokta krette memba taraftadır. Kret üzerinde de

deplasman değerleri nispeten büyüktür. Yukarıda belirtilen noktalar kret üzerindedir ve çoğu memba taraftadır. Z yönünde 424 no'lu düğüm noktasında yer değiştirme en yüksek değerini almıştır. Bu nokta kret kotunun 40 metre altında memba kabuk iç bölgesindedir. Diğer düğüm noktaları da aynı bölge içerisinde yerini alır. Sonuç değerlerine bakıldığında en yüksek deplasman değeri y yönündedir. şu ana kadar mod şekil numaralarına göre elde edilen sonuçlardan deplasman değerlerinin fazla büyük olduğu söylenemez, aksine değerler oldukça düşüktür.

İkinci moda göre kabuk kalınlığı 10 metre için iki boyutlu yapılan analize göre rotasyonlar belirlenirse, x yönünde maksimum rotasyon 110 ve 130 numaralı düğüm noktalarında pozitif ve negatif olarak 0.000315 değerini alır. Bununla beraber 105, 106, 92, 93 numaralı düğüm noktalarında da yüksektir. Buradan anlaşılacağı üzere kret kotunun 20 metre altında (+60.00 kotu) memba ve mansap uç noktalarında rotasyonlar maksimumdur.

Y yönünde maksimum rotasyon 134, 135, 136, 137, 145, 146, 147, 148 no'lu düğüm noktalarında 0.000491 olarak gerçekleşmiştir. Maksimum değerler krette meydana gelir. +60.00 kotunda memba ve mansap uç noktaları en fazla etkilenen bölgelerdir. Bu durumları göze alarak dolgu barajların tasarımında daha yatık şev eğimleri düzenlemek baraj dengesini arttıracaktır. Farklı şev eğimleri ile yapılan analizler sonucunda en düşük deformasyonların, gerilmelerin ve rotasyonların olduğu kesitler belirlenebilir. şiddetli bir deprem olacağının varsayılmasıyla tasarımında daha kalın bir kretin temin edilmesi de baraj dengesini arttıran faktörlerden birisidir.

Z yönünde maksimum rotasyonlar 141 ve 142 no'lu düğüm noktalarında $-0.5511E-8$ olarak ortaya çıkmıştır. Bu noktalar krette merkez çizgisi üzerinde ve yanındadır.

nc moda göre kabuk kalınlığı 10 metre olan iki boyutlu analiz sonuçlarına göre x yönünde 89 ve 109 no'lu düğüm noktalarında rotasyon değerleri 0.000349 olarak maksimumdur. Buna paralel olarak kret üzerindeki değerlerde yüksektir. Maksimum

rotasyonlar kret kotunun 40 metre altında (+40.00 kotunda) memba ve mansap uç noktalarında ortaya çıkmıştır.

Y yönünde 112 no'lu düğüm noktasında pozitif 128 no'lu düğüm noktasında negatif olarak maksimum değerler ± 0.000421 olarak belirlenmiştir. Bununla beraber 111, 127, 129 no'lu düğüm noktalarında da değerler yüksektir. Bu noktalar kret seviyesinin 20 metre altında +60.00 kotundadır. Rotasyonlar krette baraj merkez çizgisi üzerinde gerçekleşmiş ve diğer bölgelerde de simetrik olmuştur.

Z yönünde 101 no'lu düğüm noktasında negatif olarak $-0.1377E-7$ maksimum rotasyon değeri gerçekleşmiştir. Bu nokta kretin 40 metre altında mansap tarafta kil merkezi çekirdek zonu ile kabuk zonunun birleşim yerindedir. Bu noktanın simetriği olan 97 no'lu düğüm noktasında da daha düşük değerler meydana gelmiştir.

Üçüncü moda göre kabuk kalınlığı 20 metre için x yönünde 89 ve 109 no'lu düğüm noktalarında maksimum rotasyon değerleri 0.000247 olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca kret üzerindeki değerler de oldukça fazladır.

Y yönünde 112 no'lu düğüm noktasında pozitif 128 no'lu düğüm noktasında negatif 0.000298 olmak üzere bu düğüm noktalarında rotasyonlar maksimumdur. Bu noktalar kretin 20 metre altında memba ve mansap bölgelerindedir. Krette nispeten değerler merkez çizgisine göre simetrik olarak gerçekleşmiştir.

Z yönünde 115 no'lu düğüm noktasında $0.1725E-6$ olarak negatif yönde rotasyon gerçekleşmiştir. Bu nokta kretin 20 metre altında memba kabuk zonu içerisindedir.

Değerler kıyaslandığında kretteki rotasyonların daha büyük olduğu görülür.

Mod numarası 3'e göre yapılan analizlerde kabuk elemanı kalınlığı 10 metre için x yönünde hemen hemen düğüm noktalarının pek çoğunda deplasman değerleri aynı ve

oldukça küçük olmuştur. Y yönünde 115 no'lu düğüm noktasında deplasman değeri $0.2397E-6$ m olarak maksimum iken birçok düğüm noktasında deplasmanlar sıfır civarında gerçekleşmiştir. Z yönünde 108 ve 90 no'lu düğüm noktalarında yer değiştirmeler maksimum olarak 0.014099 m değerini almıştır. Y yönünde maksimum yer değiştirmenin olduğu 115 numaralı düğüm noktası $+60.00$ kotunda memba tarafta kumlu-çakıl kabuk zonundadır. Z yönünde maksimum yer değiştirmelerin gerçekleştiği noktalar kret seviyesinden 40 metre altta ($+40.00$ kotunda) memba ve mansap uç noktalarına yakındır. 115 numaralı düğüm noktasının simetriğindeki 125 numaralı noktada deplasman değerleri yüksek olmuştur.

Mod numarası 3'e göre kabuk kalınlığı 20 metre için yapılan analizlerde x yönünde 132, 133, 134, 135 no'lu düğüm noktalarında 0.000006 m, y yönünde 136 no'lu düğüm noktasında ve mansaba doğru mevcut diğer düğüm noktalarında da -0.000008 m olarak, z yönünde 108, 90, 89 no'lu düğüm noktalarında 0.009969 m değeriyle yer değiştirmeler maksimum olarak meydana gelmiştir.

X yönünde maksimum deplasmanlar krette memba yüz üzerindedir. Krette mansap yüzde meydana gelen deplasmanlar memba yüze göre nispeten düşük gerçekleşmiştir. Yine y yönündeki maksimum deplasmanın gerçekleştiği nokta krette memba taraftadır. Z yönündeki maksimum yer değiştirmeler kret kotunun 40 metre altında ($+40.00$ kotunda) memba ve mansap uç noktalarında meydana gelmiştir.

Baraj kesit kalınlığı 40 metre için 3 boyutlu yapılan analize göre x yönünde maksimum yer değiştirme -0.000224 m olarak 322 ve 388'de negatif, 324 ve 390'da pozitif olarak 0.000222 şeklinde meydana çıkmıştır. Y yönünde 428'de maksimum (0.006161 m) ve bu noktayı takip eden diğer noktalarda maksimuma yakın yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Z yönünde 276, 274, 319 no'lu düğüm noktalarında pozitif (0.000383 m), 321'de negatif olarak (-0.000379 m) deplasmanlar en yüksek değerlerini almıştır. 276 numaralı düğüm noktasında yer değiştirme değeri maksimumdur (0.000383 m), diğer düğüm noktalarındaki değerler bu değere yaklaşıktır.

X yönünde maksimum yer değiştirme kret kotunun 40 metre ve 20 metre altında (+40.00 ve +60.00 kotlarında) memba uç bölgelerinde gerçekleşmiştir. Y yönünde maksimum yer değiştirmelerin olduğu bölge krette memba taraftadır. Z yönündeki yer değiştirmeler kret kotunun 40 metre altında (+40.00 kotunda) memba ve mansap uç bölgelerinde meydana gelmiştir.

Kesit kalınlığı 60 metre olarak alınan 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre x yönündeki maksimum yer değiştirme 437, 440, 513, 517 numaralı düğüm noktalarında 0.005231 m olarak, y yönündeki maksimum yer değiştirme 544, 548, 580, 584 numaralı düğüm noktalarında pozitif 0.003334 m, 541, 545, 577, 581 numaralı noktalarda negatif olarak gerçekleşmiş, z yönündeki maksimum yer değiştirme 437'de pozitif ve 440 numaralı düğüm noktasında negattif olarak (± 0.002184 m) belirlenmiştir.

X yönünde maksimum deplasmanların olduğu düğüm noktaları kret seviyesinden 20 metre altta (+60.00 kotunda) memba ve mansap uç noktalarındadır. Y yönündeki deplasmanlar kret üzerindedir. Z yönündeki noktalar kretin 20 metre altında +60.00 kotunda memba ve mansap uç bölgelerinde gerçekleşmiştir.

Dördüncü moda göre 2 boyutlu kabuk kalınlığı 10 metre için yapılan analiz sonuçlarından x yönünde 142 numaralı düğüm noktasında yer değiştirmeler $-0.4072E-5$ değeriyle maksimumdur. Bununla beraber 140, 141, 143, 145, 146... numaralı düğüm noktalarında da yer değiştirmeler maksimum değere yakındır ve yüksektir. Bu noktalar barajın kreti üzerindedir. Krette x yönünde deplasman değerleri yüksektir. Barajın alt bölümünde +20.00 kotunda deplasman değerleri düşüktür.

Y yönünde maksimum yer değiştirmeler yine krette ve kret kotunun 20 metre altında +60.00 kotunda görölür. Krette memba ve mansap taraflarda deplasman değerleri yüksektir. Fakat krette barajın merkez çizgisinin geçtiği bölge civarında deplasman değerleri diğer noktalara göre düşük gelişmiştir. Bununla beraber +20.00 kotunda

deplasman sonuçları düşük değere sahiptir. Buradan şu sonuç çıkarılabilir ki kretten alt kotlara doğru inildikçe deplasman değerleri küçülmektedir. Şiddetli bir deprem sonrası oluşabilecek bir yıkılma veya çatlak oluşma tehlikesine karşı birinci derecedeki riskli bölge kret bölgesidir. Büyük ölçekli bir deprem sonrası oluşabilecek heyelan veya çatlama potansiyelinin kretten başlama olasılığı yüksektir.

Z yönünde 109 ve 89 no'lu düğüm noktalarında maksimum yer değiştirmeler belirlenmiştir (-0.017109 m). Bu noktalar kret kotunun 40 metre altında memba ve mansap uç noktalarıdır. Bu bölgedeki diğer düğüm noktalarında da deplasman değerleri nispeten diğer noktalardaki deplasman değerlerine göre yüksektir. Hesaplamalarda kabuk kalınlığı değerinin azaltılmasıyla hesaplanan yer değiştirme değerleri artmaktadır.

Dördüncü moda göre kabuk kalınlığı 20 metre için yapılan 2 boyutlu analize göre x yönünde maksimum yer değiştirme 141 numaralı düğüm noktasındadır (0.008549 m). Bu nokta krette baraj merkez çizgisi üzerindedir.

Y yönünde 91 ve 107 numaralı düğüm noktalarında maksimum deplasmanlar ortaya çıkmıştır (0.000564 m). Bu noktalar kret kotunun 40 metre altında +40.00 seviyesindedir. Krette y yönündeki deplasman değerleri fazla değildir.

Z yönünde 87 ve 88 numaralı düğüm noktalarında maksimum yer değiştirmeler gerçekleşmiştir (-0.2114E-4). Krette nispeten yüksek deplasman değerleri mevcuttur.

Dördüncü moda göre kesit kalınlığı 40 metre için yapılan 3 boyutlu analiz sonuçlarında, x yönünde 406 ve 408 no'lu düğüm noktalarında deplasman değerleri maksimumdur (0.007182 m). Bununla beraber genel olarak x yönünde krette yer değiştirme değerleri maksimuma yakındır. Alt kotlara inildikçe deplasman değerleri azalmaktadır.

Y yönünde 376 no'lu düğüm noktasında negatif, 378 no'lu düğüm noktasında pozitif olarak yer değiştirmeler maksimumdur (-0.002326 m). Bu kotta diğer deplasman değerleri de yüksektir. Krette yer değiştirmeler fazla yüksek değildir. Burada belirtilen düğüm noktaları kret seviyesinin 20 metre altında +60.00 kotunda memba tarafta kumlu-çakıl kabuk zonu içerisinde dir.

Z yönünde 421'de pozitif ve 423'de negatif olarak maksimum deplasmanlar gerçekteşmiştir (0.005372 m). Kret üzerindeki noktalardaki deplasman değerleri de yüksektir.

Aynı mod şekil numarasına göre (4) kesit kalınlığı 60 metre alınarak yapılan 3 boyutlu analiz sonuçlarından, x yönünde 561 ve 564 numaralı düğüm noktalarında deplasmanlar maksimum olarak gerçekteşmiştir (0.006290 m). Kret bölgesinde yer değiştirme değerleri yüksektir. 561 numaralı düğüm noktası baraj merkez çizgisi üzerindedir.

Y yönünde 504'de pozitif ve 501'de negatif olarak maksimum deformasyonlar gerçekteşmiştir (± 0.001831 m). Bu noktalar kret seviyesinin 20 metre altında +60.00 kotunda memba taraftadır. Bu seviyedeki deplasman değerleri kretteki deplasman değerlerinden yüksektir ve hemen hemen maksimum değere ulaşır.

Z yönünde 561'de pozitif ve 564'de negatif olarak maksimum yer değiştirmeler ortaya çıkmıştır (± 0.006400 m). Bu noktalar kret üzerinde baraj merkez çizgisinin geçtiği bölgededir.

Genel olarak dördüncü moda göre yapılan analizlerden bir sonuç çıkarmak gerekirse, 2 boyutlu analizlerde y doğrultusunda veya 3 boyutlu analizlerde z doğrultusunda maksimum yer değiştirmeler devamlı olarak krette meydana gelmiştir. 3 boyutlu olan iki ayrı analiz sonuçları birbirlerine oldukça yakındır. Genel olarak sonuçlar oldukça küçüktür.

Dördüncü mod için rotasyon sonuçlarını incelersek, kabuk kalınlığı 10 metre alınarak 2 boyutlu yapılan analiz sonuçlarından x yönünde 89'da pozitif, 109'da negatif, 110'da negatif ve 130 no'lu noktada pozitif olarak rotasyonlar en yüksek değerleri almıştır (± 0.000303). Bu moda göre yapılan analizde yine x yönünde maksimum deplasmanlar kret üzerinde meydana gelmiştir. Yukarıda bahsedilen düğüm noktaları +40.00 ve +60.00 kotlarındaki memba ve mansap uç noktalarıdır.

Y yönünde krette hemen hemen bütün düğüm noktalarında rotasyonlar maksimum değeri almaktadır (± 0.000504).

Z yönünde 140, 141, 142 ve 143 numaralı düğüm noktalarında rotasyon değerleri maksimumdur ($0.1567E-6$).

Kabuk kalınlığı 20 metre için yapılan iki boyutlu analiz sonuçlarına göre, x yönünde 117 ve 121 numaralı düğüm noktaları dahil olmak üzere bu iki nokta arasında kalan noktalarda ve kretteki bütün noktalarda rotasyon değerleri maksimumdur ve aynıdır (0.000001).

Y yönünde, 109 no'lu düğüm noktasında maksimum rotasyon gerçekleşmiştir (0.000001). Krette rotasyon değerleri 0 olmuştur.

Z yönünde 140, 141, 142 numaralı düğüm noktalarında maksimum rotasyonlar olmuştur (-0.000332).

İki ayrı analizden elde edilen rotasyon sonuçları farklı periyot değerlerine rağmen birbirlerine yakın olarak gerçekleşmiştir.

Mod şekil numarası 5'e göre kabuk kalınlığı 10 metre için yapılan 2 boyutlu analiz sonuçlarının incelenmesinde x yönünde krette +80.00 kotunda ve kret kotunun 20

metre altında +60.00 kotundaki bazı düğüm noktalarında deplasmanlar maksimum olmuştur.

Y yönünde krette yer değiştirmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir. Z yönünde yine kretteki noktalarda maksimum yer değiştirmeler meydana gelmiştir.

Kabuk kalınlığı 20 m alınarak yapılan 2 boyutlu aynı mod Şekil numarasına sahip (5) analiz sonuçlarından, x yönünde 131 ile 135 no'lu düğüm noktaları dahil bu aralıktaki düğüm noktalarındaki deplasmanlar maksimum olarak gerçekleşmiştir (0.000008 m). Burada bahsedilen noktalar kret üzerindedir. Kret üzerinde diğer noktalardaki deplasman değerleri de hemen hemen birbirlerine yakındır.

Y yönünde, krette yer değiştirmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir (± 0.000013 m).

Z yönünde 89 no'lu düğüm noktasında pozitif ve 109 numaralı düğüm noktasında negatif olarak yer değiştirmeler maksimum olarak ortaya çıkmıştır (± 0.012095 m). Bu noktalar kret kotunun 40 m altında +40.00 seviyesinde memba ve mansap uç noktalarıdır.

Kesit kalınlığı 40 m için yapılan 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre, x yönünde 293, 296 no'lu düğüm noktalarında deplasmanlar maksimumdur (0.006726 m). Bununla beraber kret üzerindeki noktalarda yer değiştirme değerleri bütünlük içerisinde yüksektir. 293 ve 296 numaralı düğüm noktaları kret seviyesinin 40 m altında +40.00 kotunda baraj merkez çizgisi üzerinde ve yanındadır.

Y yönünde 384, 385, 387, 388, 390, 328, 330, 331, 333 numaralı düğüm noktalarında bu periyotta maksimum yer değiştirmeler gerçekleşmiştir (0.001891 m). Bu noktalar kret kotunun 20 m altında +60.00 mertebesinde memba ve mansap uç noktalarına yakın noktalardır.

Z yönünde 423 no'lu düğüm noktasında maksimum yer değiştirme meydana gelmiştir. Bu nokta krette baraj merkez çizgisi üzerindedir. Krette bu noktaların haricindeki noktalarda yer değiştirme değerleri de diğer noktalara göre bir bütünlük içerisinde yüksektir. Kretteki deplasman değerleri fazladır.

Kesit kalınlığı 60 m için yapılan 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre x yönünde 309'da pozitif ve 312'de negatif olarak maksimum deplasmanlar gerçekleşmiştir (sırasıyla 0.002066 m, -0.002058 m). Bu noktalar kret seviyesinin 60 m altında +20.00 kotunda baraj merkez çizgisi üzerindedir. Merkez çizgisi üzerindeki noktalarda yer değiştirme değerleri diğer noktalara göre yüksektir.

Y yönünde 317, 320 noktalarında negatif ve 301 numaralı düğüm noktasında pozitif yer değiştirmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir (sırasıyla -0.001579 m, -0.001572 m ve 0.001545 m). Bu noktalar kret kotunun 60 m altında +20.00 seviyelerinde baraj merkez çizgisine oldukça yakın noktalardır.

Z yönünde 579 no'lu düğüm noktasında ve diğer kret üzerindeki noktalarda deplasmanlar maksimumdur ve pozitifdir (0.006836 m).

Beşinci mod şekil numarasına göre kabuk kalınlığı 10 m alınarak yapılan 2 boyutlu analiz sonuçlarından, x yönünde maksimum rotasyon 141 numaralı düğüm noktasındadır (0.001013). Bu nokta krette baraj merkez çizgisi üzerindedir. Kret üzerindeki noktaların hepsinde rotasyon değerleri yüksektir.

Y yönünde 91 numaralı düğüm noktasında rotasyon değeri maksimumdur (-0.000018). Bu nokta baraj kret seviyesinin 40 m altında +40.00 kotunda mamba uç noktasına yakındır.

Z yönünde 123 numaralı düğüm noktasında rotasyon değeri maksimumdur (0.3425E-7). Değerler oldukça küçüktür.

Kabuk kalınlığı 20 m alınarak yapılan 2 boyutlu analiz sonuçlarına göre, x yönünde 89 no'lu düğüm noktasında rotasyon değeri maksimum olarak gerçekleşmiştir (-0.000005 m). 89 no'lu düğüm noktası kret düzeyinin 40 m altında veya diğer bir deyişle +40.00 kotundadır, memba uç noktasıdır. Bu bölge civarındaki yer değiştirmeler doğal olarak kretteki yer değiştirmelerden daha düşük olacaktır. Yer değiştirmeler ve zorlanmalar kret bölgesinde daha fazladır.

Y yönünde, kret üzerindeki noktalarda (hemen hemen bütün noktalar, özellikle 131 ve 151 no'lu düğüm noktaları) rotasyon değerleri diğer noktalara göre yüksektir ve maksimumdur (-0.000357). Dolayısıyla krette düşey deformasyonlar fazla olmuştur.

Z yönünde 137 ve 144 noktaları dahil olmak üzere bu noktalar arasında kalan diğer noktalarda rotasyon değerleri yüksektir (sırasıyla $-0.4398E-6$ ve $-0.1117E-6$). Analiz sonuçlarına göre barajın orta yüksekliğinde memba ve mansap uç noktalarında ve kret üzerinde boyuna deformasyonlar da maksimum olarak gerçekleşmiştir. Bu noktalarda rotasyon değerleri maksimum olmasına rağmen değer olarak oldukça küçüktür.

Sonuç olarak, krette ve alt yükseltilere inildikçe memba ve mansap uç bölgelerinde ve bazı durumlarda da baraj merkez çizgisi üzerinde kalan noktalarda yer değiştirme değerleri yüksek olmaktadır, fakat bu durum analiz sonuçlarına göre herhangi bir riskli durum taşımamaktadır. Değerler oldukça küçüktür. Yukarıdaki analizler birinci programın kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

5.2.2 Yükleme durumlarına göre meydana gelen deplasmanlar, rotasyonlar ve iki farklı bilgisayar programından elde edilen neticelerin karşılaştırılması

Sistemin statik olarak dengede kabul edildiği yükleme durumu 1'de iki farklı bilgisayar programının sonuçlarına göre 2 boyutlu kabuk kalınlığı 10 metre için elde edilen analize göre x ve y yönünde deformasyonlar oluşmaz. Bu yükleme durumunda

sistemin dengede olduğu kabul edilmektedir. Z yönünde boyuna deformasyonlar oluşmaktadır. X yönünde krette rotasyon değerleri maksimumdur. Y yönünde 110 numaralı düğüm noktasında pozitif ve 130 numaralı düğüm noktasında negatif olarak rotasyon değerleri maksimumdur. Bu noktalar baraj kret kotunun 20 m altında +60.00 kotunda memba ve mansap uç noktalarıdır. Bu noktaların olduğu bölgelerde zorlanmalar meydana gelecektir.

Benzer şekilde yükleme durumu 1'e göre iki farklı bilgisayar programından elde edilen 2 boyutlu kabuk kalınlığı 20 m için yapılan analiz sonuçlarına göre yine kret bölgesinde boyuna deformasyonlar gerçekleşmiştir. X yönündeki maksimum rotasyonlar kret bölgesindedir. Yükleme durumu 1'de dinamik kuvvetler dikkate alınmamış sadece rezervuardaki su yükünün gövdeye etkisi hesaplamalara katılmıştır. Yükleme durumu 2 dinamik kuvvetleri dikkate almaktadır. Yükleme durumu 3'de hem statik kuvvetler hem de dinamik kuvvetler hesaba katılmıştır. 2 boyutlu analizlerde y yönünde 110 no'lu düğüm noktasında ve 130 no'lu düğüm noktasında negatif değerlere sahip maksimum rotasyonlar gerçekleşmiştir. Bu noktalar kret kotunun 20 m altında +60.00 seviyesinde memba ve mansap uç noktalarıdır. Statik yükleme durumunda suyun etkisinden dolayı x ve y yönünde rotasyonlar gerçekleşirken z yönünde aks doğrultusunda üçüncü boyut dikkate alınmadığından rotasyon değerleri sıfır olarak sonuçlanmıştır.

İki farklı bilgisayar programından elde edilen sonuçların kıyaslanmasında kesit kalınlığı 40 m alınarak yapılan 3 boyutlu analizden statik yükleme durumu 1 için x yönünde 229 no'lu düğüm noktasında negatif (-0.033869 m), 231 no'lu düğüm noktasında pozitif (0.033869 m), 235 no'lu düğüm noktasında negatif (-0.033868 m), 237 no'lu düğüm noktasında pozitif olarak (0.033868 m) maksimum deplasmanlar gerçekleşmiştir. İki farklı bilgisayar programından elde edilen sonuçların birbirleriyle aynıdır, bazı durumlarda birbirlerine oldukça yakın gerçekleşmiştir. Bu noktalar kretin 60 m altında +20.00 kotunda baraj merkez çizgisi üzerinde ve merkez çizgisine komşu noktalardır.

Y yönünde 226 no'lu düğüm noktasında negatif (-0.015627 m), 228 no'lu düğüm noktasında negatif (0.015627 m), 238 no'lu düğüm noktasında pozitif (0.015673 m), 240 no'lu düğüm noktasında pozitif olarak (0.015673 m) bu noktalarda yatay deplasmanlar en yüksek değerlerini almıştır. Noktalar kretin 60 m altında temel kotunun 20 m üzerinde baraj merkez çizgisine oldukça yakın, merkez çizgisine komşu memba ve mansap tarafta çekirdek ile kabuk zonlarının birleşme noktalarıdır. İki farklı bilgisayar programından elde edilen sonuç değerleri aynıdır ve bazı durumlarda da birbirlerine çok yakındır.

Z yönünde hemen hemen kret üzerindeki bütün noktalarda düşey deplasmanlar en yüksek değeri almıştır. 410 ve 430 numaralı düğüm noktalarında deformasyonlar maksimum olarak gerçekleşmiştir (-0.112578 m). Bu değer nispeten diğer değerlere göre yüksektir. Krette altta doğru 11.25 cm'lik deplasman söz konusudur.

İki farklı bilgisayar programında uygulanmış kesit kalınlığı 60 m alınarak yapılan analiz sonuçlarına göre x yönünde 309 numaralı düğüm noktasında negatif (-0.045107 m) ve 312 numaralı düğüm noktasında pozitif olarak (0.045107 m) deplasmanlar maksimum gerçekleşmiştir. Bu noktalar kret kotunun 60 m altında +20.00 mertebesinde baraj merkez çizgisi üzerindedir. İki farklı programdan elde edilen sonuç değerleri uyusmaktadır.

Y yönünde 317 no'lu düğüm noktasında pozitif (0.018327 m), 320 no'lu düğüm noktasında pozitif (0.018327 m), 301 no'lu düğüm noktasında negatif (-0.018241 m), 304 no'lu düğüm noktasında negatif olarak (-0.018241 m) yer değiştirmeler maksimumdur. Bu noktalar +20.00 kotunda baraj merkez çizgisine komşu çekirdek ile kabuk zonlarının birleşme yerleridir.

Z yönünde 546 no'lu düğüm noktasında negatif (-0.106511 m), 547 no'lu düğüm noktasında negatif (-0.106511 m), 578 no'lu düğüm noktasında negatif (-0.106248 m), 579 no'lu düğüm noktasında negatif olarak (-0.106248 m) belirtilen düğüm

noktalarında yer değiştirmeler maksimumdur. Bu noktalar kret üzerinde memba ve mansap taraftadır.

Dinamik analizi içeren yükleme durumu 2 için yapılan hesaplama sonuçlarına göre hem 2 boyutlu analizlerde hem de 3 boyutlu analizlerde aldırın depremi spektrum değerleri uygulanmıştır. Temelden başlayarak kret seviyesine doğru erişildike deplasman değerleri artmaktadır. Dinamik kuvvetler sonucu en çok etkilenen bölge kret bölgesidir.

Y yönünde 90, 108 ve 109 no'lu düğüm noktalarında 2 ve 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre kret bölgesinde maksimum ve kesit kalınlığı 60 m için yapılan 3 boyutlu analizde 461, 464, 465, 468, 469, 472, 473, 476, 477, 480, 481, 484, 485, 488, 489, 492, 493, 496 numaralı düğüm noktalarında da düşey deplasmanlar maksimuma yakındır. Bu noktalar kretin 20 m alt kotunda baraj merkez çizgisi üzerinde ve civarındaki bölgededir.

Üç boyutlu analizlerde x yönünde yatay deformasyonlar yine kret bölgesinde dinamik kuvvetler sonucu maksimum değerini almaktadır. 3 boyutlu olarak incelenen iki farklı analizin sonuç değerleri de birbirleriyle oldukça iyi bir şekilde uyumaktadır. Temel seviyesinden kret seviyesine doğru yükseklik arttıkça dinamik kuvvetler sonucu düşey deplasmanlar artmakta ve kret noktalarında maksimum değere ulaşmaktadır. Kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak yapılan analiz sonuçlarından z yönünde 401'de ve 410'da negatif (krette mansap tarafta), kesit kalınlığı 60 m için 546 ve 547'de negatif (krette mansap tarafta) maksimum deplasmanlar gerçekleşmiştir.

Yükleme durumu 3'de hem statik yükler altında hem de dinamik kuvvetler etkisinde noktaların davranışları beraberce incelenmiştir. İki boyutlu yapılan analizlerde her iki bilgisayar programından elde edilen neticelere göre z yönünde krette maksimum yer değiştirmeler meydana gelmiştir.

Birinci programla kesit kalınlığı 40 m olarak yapılan 3 boyutlu analiz sonuçlarından x yönünde 231 numaralı düğüm noktasında pozitif, 229 ve 235 numaralı düğüm noktalarında negatif olarak deplasmanlar maksimum olarak gerçekleşmiştir. Birinci programdan elde edilen değerler 3.5186 cm ve -3.2 cm iken ikinci programdan elde edilen sonuç değerleri sırasıyla 3.45 cm ve -3.17 cm'dir. Kesit kalınlığı 60 m olarak alınan 3 boyutlu analizde birinci programın sonuçlarına göre 309 numaralı düğüm noktasında negatif ve 312 numaralı düğüm noktasında pozitif olarak deplasmanlar maksimum olarak gerçekleşmiştir. Birinci programın sonuçları sırasıyla -4.36 cm ve 4.66 cm'dir. İkinci programdan elde edilen neticeler ise -4.25 cm ve 4.56 cm'dir. Sonuç değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Bu noktalar kret seviyesinin 60 m altında +20.00 kotunda baraj merkez çizgisi üzerindedir. Bu bölge kritik bölgedir. Kesit kalınlığı 120 m alınarak analizler ikinci bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiş, maksimum deplasmanların meydana geldiği düğüm noktalarında değişimler olmaz iken kesit kalınlığı arttıkça sonuç değerlerinde de artışlar ortaya çıkmıştır. Kesit kalınlığı 120 m'ye göre 5.38 cm ve -5.20 cm'lik maksimum değerler oluşmuştur.

Y yönünde kesit kalınlığı 40 m için yapılan 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre iki farklı bilgisayar programından elde edilen neticeler ve düğüm noktaları uyumuştur. 238 no'lu ve 240 no'lu düğüm noktalarında pozitif, 226 ve 228 no'lu düğüm noktalarında negatif olarak maksimum yatay deplasmanlar gerçekleşmiştir. Birinci programdan elde edilen sonuçlara göre sırasıyla 1.6165 cm ve -1.4742 cm değerleri elde edilmiştir. İkinci programdan elde edilen sonuçlar ise sırasıyla 1.63 cm ve -1.45 cm'dir. Bu noktalar kret seviyesinin 60 m altında +20.00 kotunda baraj merkez çizgisinin membarında ve mansabında kil malzemesinden oluşmuş merkezi çekirdek zonu ile kum-çakıl malzemesinden oluşan kabuk zonlarının birleşimindedir. Kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu yapılan analizde y yönünde her iki bilgisayar programından elde edilen neticeler hemen hemen aynıdır. 317 ve 320 no'lu düğüm noktalarında pozitif 301 ve 304 no'lu düğüm noktalarında negatif olarak yer değiştirmeler maksimumdur. Birinci programdan elde edilen sonuç 1.92 cm iken ikinci ve daha gelişmiş güncel programdan elde edilen sonuç 1.89 cm'dir. Bu noktalar konum itibariyle yukarıda belirtilen noktaların bulunduğu yer ile aynıdır.

Böyle bir durumda uygulanan kuvvetler sonucu en çok etkilenecek olan bölge kret kotunun 60 m altında baraj merkez çizgisinin geçtiği bölgeler olacaktır. Krette deplasman değerleri nispeten küçük olarak gerçekleşmektedir. Kesit kalınlıkları 40 m, 60 m ve 120 m gibi farklı değerler alınmasına rağmen deplasman değerleri devamlı aynı bölgelerde ve düğüm noktalarında maksimum olarak gerçekleşmektedir. Kesit kalınlığı 120 m alınarak yapılmış analiz sonuçları da diğer kalınlıklardan elde edilmiş sonuçlara uygunluk göstermektedir.

Kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu yapılan analizde z yönünde 434, 407, 410 ve 421 numaralı düğüm noktalarında negatif olarak maksimum düşey yer değiştirmeler gerçekleşmiştir. Birinci programdan elde edilen sonuç -11.2558 cm iken ikinci programdan elde edilen sonuç -10.72 cm'dir. Bu noktalar krette memba ve mansap tarafta ayrıca baraj merkez çizgisi üzerindedir. Kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu yapılan analizde z yönünde 546 ve 547'de ve bu noktaların merkez çizgisine göre simetriklerinde de negatif olarak maksimum yer değiştirmeler mevcuttur. Birinci programdan elde edilen değer -10.41 cm iken ikinci programdan elde edilen değer -10.03 cm'dir. Yer değiştirme yönü temele doğrudur. Kesit kalınlığı 120 m alınarak 3 boyutlu ikinci programın kullanılmasıyla hesaplanan deplasmanlar da yine krette memba ve mansap tarafta maksimum olmuştur. Maksimum değer -9.97 cm'dir.

Yukarıda yapılmış analiz sonuçları birbirleri ile tutarlıdır. Elde edilen neticelere göre düşey z yönünde yer değiştirmeler negatif olarak krette maksimum değerlerini alırken, yatay yer değiştirmeler kret seviyesinin 60 m altında +20.00 kotunda baraj merkez çizgisi üzerinde ve yine aynı kotta çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği noktalarda maksimum değerini almaktadır. X yönünde maksimum boyuna deformasyonlar yine +20.00 kotunda baraj merkez çizgisi üzerinde ve çekirdek ile kabukların birleştiği düğüm noktalarında ve bu bölgelerin arasında kalan alanda meydana gelmiştir. Burada yapılan analizlerden elde edilen deplasman sonuçlarına göre ciddi boyutlarda yer değiştirmeler mevcut değildir.

Kabuk kalınlığı 10 m için 2 boyutlu ve kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu analizler rezervuardaki su seviyesinin yarı yükseklikte alınmasıyla da yapılmıştır. Fakat her iki bilgisayar programından elde edilen neticelere göre deplasman değerlerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır.

Kesit kalınlığı 120 m alınarak yapılan 3 boyutlu analize göre baraj aksı boyunca kret profili memba uç noktalarından, mansap uç noktalarından ve baraj merkez çizgisi üzerindeki noktalardan bakılarak incelenmiştir. Bu incelemede kret profilindeki kemerlenme olayı araştırılmıştır. Analizde z yönündeki düşey deplasman değerleri dikkate alınmıştır. Aks boyunca, baraj merkez çizgisi üzerindeki noktalara memba veya mansap şev eğimi üzerinden bakıldığında (981, 982, 983, 984, 985, 986, 987) iç bükey kret profili oluşmuştur ve 983 no'lu düğüm noktasında bu grup içerisinde en yüksek deplasman değeri meydana gelmiştir (deplasman değerleri sırasıyla -0.0916 m, -0.0964 m, -0.0972 m, -0.0969 m, -0.0966 m, -0.0952 m, -0.0897 m). En kesit üzerinde memba ve mansap uç noktalarına bakıldığında da iç bükey kret profiline rastlanılır. 120 metrelik aks uzunluğu boyunca en yüksek düşey deplasman değerleri negatif olarak 40 metrede meydana gelmiştir.

Statik yüklemeler neticesinde (yükleme durumu 1) temele gelen yükler oldukça fazladır. 2 boyutlu analizlerde 55, 56, 57, 58, 59 numaralı düğüm noktaları kretin 80 m altında 00.00 kotunda baraj merkez çizgisi üzerinde ve memba ve mansap komşu noktalarıdır. Yüklemeler sonucunda en fazla yük taşıyan noktalar bu noktalardır. 3 boyutlu analizlerden de aynı neticeler elde edilmiştir.

Kabuk kalınlığı 10 m için yapılan 2 boyutlu analiz sonuçlarına göre statik yükleme durumu (1) için x yönünde 55, 56, 58, 59 numaralı düğüm noktalarında pozitif değerli momentler en yüksek değerini alır. Yine hemen hemen aynı düğüm noktalarında veya diğer bir ifade ile aynı bölgede y yönündeki momentlerde maksimum olmuştur.

Yükleme durumu 2 için, kabuk kalınlığı 10 m alınan 2 boyutlu analizde x yönünde 54, 55, 56, 58, 61, 62 numaralı düğüm noktalarındaki yükler maksimum değerini almıştır. Kabuk kalınlığı 20 m için yapılan 2 boyutlu analiz sonuçlarına göre 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61 numaralı düğüm noktalarında x yönündeki kuvvetler maksimumdur. 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre yine aynı bölgelerde (00.00 kotunda merkez çizgisinin etrafındaki noktalarda) x yönündeki kuvvetler maksimumdur.

İki ve üç boyutlu analizlerin sonuçları birbirleriyle uyudur, dolayısıyla 00.00 kotunda merkez çizgisinin kestiği noktaya ve komşu noktalara etkiyen kuvvetler maksimumdur.

Yükleme durumu 3'e göre hem 2 hem de 3 boyutlu analizlerden elde edilen sonuçlara göre 00.00 kotunda kuvvetler diğer noktalara göre oldukça fazla olmaktadır. Yüklemelerden en çok etkilenen bölge bu kotta merkez çizgisinin kestiği nokta ve civar komşu noktaların oluşturduğu bölgedir. Krete doğru gidildikçe kuvvetler azalmaktadır.

Kabuk kalınlığı 10 m için 2 boyutlu yapılan analizden kabuk elemanı düğüm noktası kuvvetleri 52, 53 (zati ağırlığın maksimum olduğu noktalar) 56, 57, 58, 77, 78, 79 numaralı düğüm noktalarında maksimum olarak gerçekleşmiştir. Bu noktalar 00.00 ile +20.00 kotlarında baraj merkez çizgisinin kestiği ve kesişme noktasının civarındaki noktalardır. 3 boyutlu analizlerden de aynı neticeler elde edilmiştir.

5.2.3 Gerilme dağılımları ve sonuçların karşılaştırılması

5.2.3.1 İki boyutlu olarak gerilme dağılımlarının incelenmesi

Her iki bilgisayar programından elde edilen neticelere göre, 2 boyutlu kabuk kalınlığı 10 m için yapılan analizde yükleme durumu 3 için S_{11} yönündeki negatif normal gerilmeler krette maksimum değerler almıştır. Maksimum değerler özellikle mansap

tarafıta gerçekleşmiştir. Merkez çizgisine göre bu noktalara simetrik olan krette memba taraftaki noktalar maksimuma yakın değerler almıştır. Bununla beraber kretin 20 m altında +60.00 kotunda 111, 112, 114, 115 numaralı elemanlarda ve krette baraj merkez çizgisine bitişik düğüm noktalarında da negatif değerli gerilmeler maksimum değere yaklaşmıştır. Gövdede +40.00 kotunun üzerinde negatif gerilmeler mevcut iken bu kotun alt kısımlarında pozitif gerilmeler oluşmuştur. 85 ve 86 numaralı elemanlarda, çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında, +00.00 ile +20.00 kotları arasında kalan çekirdek zonunun kabuklarla birleşme yerlerinde ve bu noktalara bitişik düğüm noktalarında pozitif değerli gerilmeler maksimum olmuştur. İki boyutlu gerilme dağılımlarının değerlendirilmesi bilgisayar grafik ortamından elde edilmiştir.

Her iki bilgisayar programından elde edilen neticelere göre 2 boyutlu kabuk kalınlığı 20 m için yapılan analizde yükleme durumu 3 için S_{11} yönündeki maksimum negatif gerilmeler 110 ve 115 numaralı elemanlarda krette meydana gelmiştir. Ayrıca memba şevi üzerindeki noktalarda da gerilme değerleri yüksek olmuştur. Temelden itibaren +40.00 kotuna kadar pozitif değerli gerilmeler oluşurken, bu kotun altında kalan kısımda negatif gerilmeler bir önceki analizde olduğu gibi meydana gelmiştir. Fakat kesit kalınlığının 20 m alınması gerilme dağılımlarının değerlerinde azalmalara yol açmıştır. Çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında +00.00 kotu ile +20.00 kotu arasında çekirdek ile kabuk zonlarının birleşim bölgelerinde maksimum pozitif değerli gerilmeler gerçekleşmiştir. 50 numaralı elemanda maksimum gerilmeler oluşurken bu bölgede zorlanmalar mevcuttur.

İki farklı bilgisayar programıyla yapılan yine farklı 2 boyutlu analiz sonuçları hemen hemen aynı noktalarda ve bölgelerde maksimum gerilme değerlerini oluşturmuştur.

Benzer şekilde S_{22} normal gerilme dağılımlarına bakılırsa her 2 boyutlu farklı bilgisayar programlarından elde edilen neticelere göre krette mansapta ve uç noktada maksimum negatif değerli gerilmeler meydana gelmiştir. Bu noktaların simetriği olan memba uç elemanı maksimum negatif gerilmeye yakın bir gerilme üretmiştir.

Birinci bilgisayar programına göre kretin 40 m altında +40.00 kotunda mansap tarafta yine yüksek gerilmeler elde edilmiştir. Çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında pozitif değerli gerilmeler maksimumdur. +00.00 ile +20.00 kotları arasında çekirdek içerisinde ve çekirdekten iç kabuklara doğru gidildikçe pozitif değerli gerilmeler yüksek olur. Kesit kalınlığı 10 m alınarak yapılan analiz sonuçlarındaki pozitif gerilme değerleri kesit kalınlığı 20 m alınarak yapılan analiz sonuçlarına göre daha yüksek olarak gerçekleşmiştir. 50 numaralı elemanda maksimum pozitif gerilme değerleri ($9.5083E00 \text{ t/m}^2$) mevcuttur. İkinci programdan elde edilen neticelere göre gövde üzerinde kret bölgesi hariç diğer bölgelerde pozitif değerli gerilmeler meydana gelmiştir. Pozitif değerli gerilmeler kret seviyesinden alt kesimlere doğru inildikçe artmaktadır.

İki ayrı bilgisayar programından elde edilen 2 boyutlu farklı analiz sonuçlarına göre S_{12} kayma gerilmeleri incelenirse, memba tarafta pozitif gerilmeler oluşurken mansap tarafta negatif gerilmeler oluşur. +40.00 kotunda memba yüz üzerinde pozitif gerilmeler maksimum değerini alırken +25.00 ile +60.00 kotları arasında negatif gerilmeler mansap yüzde negatif değerini alır. Bununla beraber çekirdek hendeğinin üst memba köşesinde pozitif gerilmeler, üst mansap köşesinde negatif gerilmeler maksimum değere yakındır. İkinci bilgisayar programında kabuk kalınlığının 10 m alındığı durumdan elde edilen sonuç gerilme değerleri kabuk kalınlığı 20 m'ye göre daha yüksek olmaktadır. Temel malzemesi konglomera kaya türünden oluştuğu için rijitlik sonucu gerilmeler sıfır olmuştur.

5.2.3.2 Üç boyutlu olarak S_{11} gerilme dağılımlarının incelenmesi

Birinci bilgisayar programı kullanılarak kesit kalınlığı 40 m için yapılan 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre S_{11} gerilmesi kret kotunun 40 ile 60 m altında +20.00 ile +40.00 kotları arasında 149 ve 150 numaralı katı (solid) elemanlarda maksimum olarak pozitif durumda meydana gelmiştir (sırasıyla $0.1161E2 \text{ t/m}^2$ ve $0.1161E2 \text{ t/m}^2$). Bu bölge çekirdek ile memba kabuk zonunun birleşme bölgesidir. Aynı kotlarda çekirdek ile mansap kabuk zonunun birleşme bölgelerinde de yüksek

gerilme değerleri mevcuttur. +00.00 ile +20.00 kotları arasında çekirdek ile memba ve mansap kabuk zonlarının birleştii bölgelerde, 107 ve 108'inci elemanlarda maksimum negatif değerli gerilmeler meydana gelmiştir (sırasıyla $-0.6309E2 \text{ t/m}^2$ ve $-0.6309E2 \text{ t/m}^2$). İkinci bilgisayar programına göre yine S_{11} gerilmesi için kabuk kalınlığının 40 m alındığı durumlarda krette baraj aksı boyunca orta elemanlarda sadece maksimum olarak negatif değerli gerilmeler oluşmuştur. Memba ve mansap yüze kadar negatif gerilmeler gelişmiştir. Memba ve mansap yüz üzerinde pozitif değerli gerilmeler vardır. Çekirdek hendeğinin diğer elemanlarla birleşen düğüm noktalarında çekirdek içerisinde, +00.00 kotu ile +20.00 kotu arasında çekirdek ile kabukların birleşme yerlerinde negatif değerli gerilmeler yüksek seviyede gerçekleşmiştir (membra kabuk zonu ile çekirdeğin birleşme bölgesinde 108 no'lu elemanda 176 numaralı düğüm noktasında -88.77 t/m^2 , 177 numaralı düğüm noktasında -95.04 t/m^2 , 239 numaralı düğüm noktasında -40.81 t/m^2 , 240 numaralı düğüm noktasında -35.15 t/m^2 ile; 172 no'lu düğüm noktasında 105 numaralı katı elemanda çekirdek hendeğinin memba üst köşesinde, sistem içerisindeki maksimum değer = -158.67 t/m^2). +20.00 kotunda baraj merkez çizgisine komşu düğüm noktalarında maksimum pozitif değerli gerilmeler oluşmuştur. +00.00 kotunda çekirdek hendeğinin köşe düğüm noktalarında hem memba hem de mansap tarafta negatif değerli gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir (çekirdek hendeğinin mansap köşe noktasındaki maksimum gerilme = -161.74 t/m^2). Çekirdek hendeğinin tabanında merkez çizgisinin kestiği noktada negatif gerilmeler maksimuma yakındır. +00.00 kotunda yine merkez çizgisinin çekirdek hendeği ile keştiği noktada negatif değerli gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir. Çekirdek hendeği içerisinde negatif gerilme değerleri oldukça yüksektir. Çekirdek içerisinde de hemen hemen negatif değerli gerilmeler hakimdir. Krette negatif değerli basınç gerilmeleri vardır. Memba ve mansap şevlerine doğru gidildikçe düşük pozitif değerli gerilmeler oluşurken iç kısımlarda düşük negatif gerilmeler mevcuttur. Kret üzerinde deformasyonlar gelişmiş ve kret en kesiti iç bükey bir şekil almıştır.

Birinci bilgisayar programına göre kesit kalınlığı 60 m alınan 3 boyutlu analiz sonuçlarından S_{11} normal gerilmesi maksimum olarak 284 numaralı katı (solid) elemanda +40.00 ile +60.00 kotları arasında memba ve mansap kabuk zonlarının

çekirdek ile birleştiği noktalarda pozitif değerli olmuştur (16.05 t/m^2). +00.00 kotu ile +20.00 kotu arasında memba ve mansap kabuk zonlarının çekirdek ile birleşme bölgesinde maksimum negatif değerli gerilmeler meydana gelmiştir (birinci programa göre 160 no'lu elemanda -59.02 t/m^2 , 161 no'lu elemanda -69.40 t/m^2 , 162 no'lu elemanda -59.02 t/m^2). +20.00, +40.00 ve +60.00 kotlarında çekirdek ile kabuk zonlarının birleşme bölgelerinde pozitif değerli gerilmeler maksimuma yakındır. +40.00 ve +60.00 kotlarında memba kabuk zonu ile çekirdeğin birleşme yerlerinde pozitif değerli gerilme maksimum, yine aynı kotlarda çekirdek ile mansap kabuk zonunun birleşme bölgesinde pozitif değerli gerilmeler maksimuma yakındır.

İkinci bilgisayar programına göre kesit kalınlığı 60 m alınan 3 boyutlu analiz sonuçlarından S_{11} gerilmesi +20.00 kotunda çekirdek içerisinde merkez çizgisine komşu solid elemanlarda pozitif ve negatif değerli gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir (154 numaralı katı elemanda 221 numaralı düğüm noktasında -104.08 t/m^2 , aynı katı elemanda 225 numaralı düğüm noktasında -108.79 t/m^2). +00.00 kotunda ve -09.00 kotunda çekirdek hendeği ile talveg seviyesinde maksimum negatif değerli gerilmeler meydana gelmiştir. Ayrıca +60.00 ile +80.00 kotları arasında çekirdek içerisinde maksimuma yakın negatif değerli gerilmeler mevcut olmuştur. Genellikle orta yükseltilerde çekirdek içerisinde ve kabuklarda maksimuma yakın pozitif değerli gerilmeler meydana gelirken, talveg seviyesinde çekirdek kısmı hariç ve +40.00 ile +80.00 kotları arasında çekirdek içerisinde kalan alanda düşük değerli negatif gerilmeler meydana gelmiştir. İki farklı bilgisayar programından elde edilen neticeler bir noktada birbirlerinden ayrılmaktadır. Birinci programdan elde edilen gerilme değerleri elemana ait olurken, diğer programdan elde edilen değerler düğüm noktalarını yansıtmaktadır.

Aynı şekilde ikinci bilgisayar programına göre kesit kalınlığı 120 m alınan 3 boyutlu analiz sonuçlarından S_{11} gerilme dağılımlarına bakılırsa, genelde +25.00 kotu ile +80.00 kotu arasında memba ve mansap şevi üzerinde pozitif değerli gerilmeler oluşur. +25.00 ile +00.00 kotu arasında düşük negatif değerli gerilmeler gerçekleşmiştir. Kesit uzunluğunun 60 m olduğu yerde ($x = 60 \text{ m}$), baraj aksı uzunluğunun yarısında kret üzerinde pozitif değerli gerilmeler meydana gelmiştir.

+40.00 ile +80.00 kotları arasında genelde çekirdek içerisinde düşük basınç gerilmeleri oluşmuştur. +00.00 kotunda çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında (merkez çizgisine komşu noktalar) maksimuma yakın negatif değerli gerilmeler vardır (301 numaralı elemanda 386 numaralı düğüm noktasında -148.09 t/m^2 , 307 numaralı elemanda 400 numaralı düğüm noktasında -145.80 t/m^2). +20.00 kotunda çekirdek ile kabuk zonlarının birleşme yerlerinden başlayarak merkez çizgisine kadar ilerleyen zonda düşük değerli pozitif gerilmeler oluşmuştur. Kret üzerinde pozitif değerli gerilmeler hakim olmasına rağmen çekirdek bölgesinde nadiren negatif değerli gerilmelerde gerçekleşmiştir. +00.00 kotunda baraj merkez çizgisi ile çekirdek hendeğinin birleştiği üst noktada pozitif değerli gerilmeler oluşurken, alt bölgede negatif gerilmeler meydana gelmiştir. Benzer şekilde $x = 0 \text{ m}$ 'deki kesite bakıldığında +00.00 kotunda çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında negatif değerli maksimum gerilmeler meydana gelmiş, bu noktalardan dış bölgelere gidildikçe negatif gerilme değerleri azalmıştır (yukarıda belirtilen değerler). +20.00 kotunda çekirdek ile kabukların birleşme bölgelerinde baraj merkez çizgisine doğru pozitif değerli gerilmeler meydana gelmiştir. Krette, negatif değerli gerilmeler baraj merkez çizgisi doğrultusunda ve baraj aksı boyunca çekirdek içerisinde oluşmuştur. Kret profili iç bükey olarak gerçekleşmiş ve aks uzunluğunun yarısında şevler üzerinde pozitif değerli gerilmeler oluşmuştur. Temeldeki kaya oluşumunun zemin emniyet gerilmesi 200 t/m^2 olarak alınırsa, çekirdek hendeğinin üst köşelerinde meydana gelen gerilmeler bu değer altında kalmaktadır.

5.2.3.3 Üç boyutlu olarak S_{22} gerilme dağılımlarının incelenmesi

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{22} gerilme dağılımları incelenirse, gövdenin büyük bir kısmında negatif değerli gerilmeler meydana gelmiştir. +00.00 ile +20.00 kotları arasında 107, 108, 101 ve 102 numaralı elemanlarda çekirdek ile memba ve mansap kabuk zonlarının birleşme bölgelerinde maksimum negatif değerli gerilmeler meydana gelmiştir (sırasıyla -74.37 t/m^2 , -74.37 t/m^2 , -74.33 t/m^2 ve -74.33 t/m^2). Krette memba ve mansap uç noktalarda 205 ile 243 numaralı elemanlarda negatif değerli gerilmeler düşüktür (sırasıyla -17.12 t/m^2 ve -16.85 t/m^2).

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak aynı ($S_{22} = \sigma_{yy}$) gerilme dağılımları incelenirse, çekirdek hendeği ile merkez çizgisinin +00.00 kotunda kesiştiği düğüm noktalarında maksimum'a yakın negatif gerilmeler meydana gelmiştir (169 no'lu düğüm noktasında -35.27 t/m^2). +20.00 kotunda baraj merkez çizgisine komşu memba ve mansap taraftaki düğüm noktalarında maksimuma yakın pozitif ve negatif değerli gerilmeler oluşmuştur (-53.77 t/m^2 'lik gerilme 102 numaralı elemanda 227 numaralı düğüm noktasına aittir). Kret üzerinde baraj merkez çizgisinin geçtiği bölge civarında yüksek negatif değerli gerilmeler meydana gelmiştir. Memba ve mansap şevlerine doğru gidildikçe ve şev eğimleri üzerinde düşük negatif değerli gerilmeler hakim olmuştur. Kret üzerinde baraj aksı boyunca negatif değerli gerilmeler merkez çizgisinin izlediği yol boyunca meydana gelmiştir. Memba ve mansap kabuklarının +00.00 ile +20.00 kotları arasında çekirdek ile birleştiği bölgelerde yüksek negatif değerli gerilmeler gelişmiştir (101 numaralı elemanda 226 numaralı düğüm noktasında -45.37 t/m^2). Çekirdek hendeğinin üst memba ve mansap köşelerinde negatif değerli gerilmeler de maksimumdur (103 numaralı elemanda 166 numaralı düğüm noktasında -117.52 t/m^2 ve 107 numaralı elemanda 172 numaralı düğüm noktasında -126.66 t/m^2).

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak S_{22} gerilme dağılımları incelenirse, +00.00 kotu ile +20.00 kotu arasında memba ve mansap kabuk zonlarının çekirdek ile birleştiği düğüm noktalarında ve elemanlarda çekirdek içerisinde maksimum negatif değerli gerilmeler üretilmiştir (-69.95 t/m^2 151 numaralı eleman için, 152 numaralı eleman için -77.22 t/m^2 , 153 numaralı eleman için -69.95 t/m^2 , 160 numaralı eleman için -69.81 t/m^2 , 161 numaralı eleman için -77.47 t/m^2 , 162 numaralı eleman için -69.81 t/m^2). Bir önceki analizden elde edilen negatif gerilme değeri ile bu analizden elde edilen sonuç değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Gövde üzerinde negatif değerli gerilmeler yaygındır.

Yine yüklem durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{22}) gerilme dağılımları incelenirse, +00.00 kotunda çekirdek hendeğinin üst noktalarında negatif gerilmeler maksimum olarak

gerçekleşmiştir (154 numaralı elemanda 221 no'lu düğüm noktasında -102.97 t/m^2 , yine 154 numaralı elemanda 225 no'lu düğüm noktasında -107.61 t/m^2). Yine aynı kotta çekirdek içerisinde, çekirdek ile kabukların birleşme yerlerinde maksimuma yakın negatif gerilmeler oluşmuştur. +20.00 kotunda çekirdek ile kabukların birleşme yerlerinde de negatif gerilmeler hakimdir. Kretle kretin 20 m alt kotu arasında çekirdek içerisinde maksimuma yakın negatif gerilmeler oluşmuştur. Kretin 40 m alt kotunda baraj orta yüksekliğinde merkez çizgisinin kestiği noktalarda tek ve maksimum pozitif gerilmeler meydana gelmiştir. Gövde üzerinde negatif gerilmeler ağırlıklıdır ve yaygındır. Orta yükseltilerde çekirdeğin iç bölgesinde ve kabuklarda düşük negatif gerilmeler gerçekleşmiştir.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 120 m için 3 boyutlu olarak aynı gerilme dağılımları incelenirse, $x = 0 \text{ m}$ 'deki kesit için +20.00 ile +60.00 kotları arasında çekirdek içerisinde pozitif değerli gerilmeler oluşmuştur. Genelde baraj gövdesi üzerinde negatif gerilmeler hakimdir. +00.00 kotunda çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında negatif değerli gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir. Krette çekirdek içerisinde yüksek değerli negatif gerilmeler oluşmuştur. Memba ve mansap sevi üzerinde düşük değerli negatif gerilmeler mevcuttur. $X = 120 \text{ m}$ kesiti için yine aynı bölgelerde negatif gerilmeler gerçekleşmiş fakat $x = 0$ kesitine göre sayısal değerler daha fazla olmuştur. $X = 120 \text{ m}$ kesitinde diğer kesit benzeri +00.00 ile +20.00 kotları arasında çekirdek içerisinde negatif gerilmeler meydana gelirken, +20.00 ile +60.00 kotları arasında aynı bölgelerde negatif gerilmelerle beraber pozitif gerilmelerde oluşmuştur. Krette çekirdek içerisinde nispeten yüksek negatif değerli gerilmeler mevcuttur. Baraj aksı boyunca oluşmuştur.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{22} düğüm noktası gerilmeleri incelenirse, +00.00 kotunda çekirdek hendeğinin üst mansap ve memba köşe noktalarında 166 ve 172 numaralı düğüm noktalarında negatif değerli gerilmeler maksimum olmuştur. Bununla beraber +60.00 kotunda mansap uç bölgesinde 328, 329, 330 numaralı düğüm noktalarında da

maksimum negatif değerli gerilmeler üretilmiştir. Aynı kotta memba uç bölgesinde 388, 389, 390 numaralı düğüm noktalarındaki gerilmeler maksimum değere yakındır.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak S_{22} düğüm noktası gerilmeleri incelenirse, çekirdek hendeğinin memba ve mansap taraftaki üst köşe noktalarında özellikle 230 ve 231 numaralı düğüm noktalarında negatif değerli gerilmeler yüksektir. Maksimum düğüm noktası gerilmesi negatif olarak +60.00 kotunda mansap uç bölgesinde 437, 438, 439 ve 440 numaralı düğüm noktalarında meydana gelmiştir. Bu noktaların merkez çizgisine göre simetriği olan memba uç bölgesinde negatif gerilme değerleri maksimuma yakındır. Kret üzerindeki noktalarda boydan boya negatif gerilmeler mevcuttur. Çekirdek içerisinde genelde negatif ve pozitif gerilmelerin ortaklaşa kombinasyonları mevcuttur.

5.2.3.4 Üç boyutlu olarak S_{33} gerilme dağılımlarının incelenmesi

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{33} gerilme dağılımları incelenirse, çekirdek ile memba ve mansap kabuk zonlarının birleştiği noktalarda çekirdek içerisinde özellikle 101, 102, 107, 108 numaralı elemanlarda maksimum olarak negatif değerli gerilmeler meydana gelmiştir (sırasıyla -135.2 t/m^2 , -135.2 t/m^2 , -135.3 t/m^2 , -135.3 t/m^2). Gövdede negatif değerli gerilmeler yaygındır. Pozitif değerli gerilmeler nadirdir. Çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği elemanlarda üst kotlara doğru negatif gerilme değerlerinde artışlar olmuştur.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{33}) gerilme dağılımları incelenirse, +40.00 kotunun üzerinde memba ve mansap şevlerinde pozitif değerli gerilmeler gerçekleşmiştir. Kret üzerinde ve hemen hemen kabukların iç bölgelerinde düşük değerli negatif gerilmeler oluşmuştur. Kabukların iç kesimlerinden başlayarak çekirdek iç kesimlerine doğru ve çekirdek hendeğine doğru negatif değerli gerilmeler

artmaktadır. Çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında +00.00 kotunda hem memba hem de mansap taraftaki negatif gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir (103 numaralı elemanda 166 numaralı düğüm noktasında -193.96 t/m^2 , 105 numaralı elemanda 172 numaralı düğüm noktasında -192.66 t/m^2). Çekirdek hendeğinin tabanında -09.00 kotunda merkez çizgisinin kestiği noktada negatif gerilmeler yüksektir. -09.00 ile $+45.00$ kotları arasında memba ve mansap şevlerinde düşük değerli negatif gerilmeler vardır. İç bölgelere ve alt kesimlere doğru gidildikçe ve çekirdek hendeğine yaklaştıkça negatif gerilme değerleri artmaktadır. Kret en kesitinde iç bükey oturma eğrisi ve şevler üzerinde pozitif gerilmeler varken iç kesimlere doğru gidildikçe negatif gerilme değerleri artmaktadır.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak aynı gerilme dağılımları incelenirse, çekirdek ile memba ve mansap kabuk zonlarının birleştiği yerlerde +00.00 ile +20.00 kotları arasında kalan bölgede özellikle 161 numaralı elemanda maksimum negatif gerilmeler oluşmuştur (-127.6 t/m^2 161 numaralı elemanda). Krette negatif gerilme değerleri yüksektir. Gövdede pozitif değerli gerilmeler nadirdir.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{33}) gerilme dağılımları incelenirse, gövde üzerinde her noktada negatif değerli gerilmeler hakimdir. Sadece kret ve kret kotunun 20 m altında memba ve mansap şevleri üzerinde pozitif değerli gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir. +00.00 ile +20.00 m kotları arasında çekirdek içerisinde ve çekirdekle kabukların birleşim yerlerinde maksimum negatif değerli gerilmeler oluşmuştur (151 numaralı elemanda 301 numaralı düğüm noktasında -136.43 t/m^2 , 160 numaralı elemanda 317 numaralı düğüm noktasında -136.14 t/m^2 , 151 numaralı elemanda 221 numaralı düğüm noktasında -132.96 t/m^2 , 160 numaralı elemanda 229 numaralı düğüm noktasında -132.28 t/m^2). Bu bölgeden kabukların iç kesimlerine doğru gidildikçe negatif gerilmelerin değerlerinde azalmalar olmaktadır. +60.00 kotundan alt kesimlere doğru inildikçe memba ve mansap şevleri üzerinde düşük değerli negatif gerilmeler oluşmuştur. Talveg ile talveg seviyesininin 25 m üst kotu

arasında maksimum negatif gerilmeler oluşur. Bu bölgeden dış kesimlere doğru gidildikçe gerilme değerleri azalmaktadır.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 120 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{33}) gerilme dağılımları incelenirse, +45.00 ile +80.00 kotları arasında gerek memba şevi üzerinde gerekse mansap şevi üzerinde pozitif değerli gerilmeler oluşmuş ve krete kadar devam etmiştir. Kret seviyesinden alt kesimlere ve iç bölgelere doğru inildikçe negatif değerli gerilmeler artmakta ve $x = 0$ m kesitinde +00.00 kotu ile +20.00 kotu arasında çekirdek ile kabukların birleşme bölgelerinde ve çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında negatif gerilme değerleri maksimuma yaklaşmaktadır (295 numaralı elemanda 386 numaralı düğüm noktasında -157.88 t/m^2 , 307 numaralı elemanda 400 numaralı düğüm noktasında -177.44 t/m^2). Kesit kalınlığı arttıkça maksimum gerilme değerlerinde azalmalar oluşur. Çekirdek hendeğinin tabanında merkez çizgisi ile kesişme noktasında maksimum negatif gerilmeler oluşmaktadır. $X = 120$ m kesitine bakıldığında aynı bölgelerde maksimum negatif gerilmeler meydana gelmiş ve büyüklükleri de hemen hemen aynı olmuştur (306 numaralı elemanda 392 numaralı düğüm noktasında -185.62 t/m^2 , 300 numaralı elemanda 392 numaralı düğüm noktasında -146.86 t/m^2 , 312 numaralı elemanda 406 numaralı düğüm noktasında -184.22 t/m^2 , 318 numaralı elemanda 406 numaralı düğüm noktasında -146.21 t/m^2). Baraj aksı boyunca kret üzerinde merkez çizgisi hizasında negatif gerilmeler orta büyüklüklerde gerçekleşmiştir. Değerler temel kaya malzemesi için zemin emniyet gerilmesi olan 200 t/m^2 'den düşüktür. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi düşey yüklerin değerleri en fazla çekirdek hendeğinde görülmektedir.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{33} düğüm noktası gerilme dağılımları incelenirse, maksimum negatif gerilme talvegde merkez çizgisinin kestiği noktalarda (169, 171) oluşmuştur. Bu noktalarda negatif gerilmeler maksimum iken çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği bölgelerde özellikle +20.00 kotunda maksimuma yakın negatif gerilmeler mevcuttur. Gövde içerisinde pozitif gerilmeler gelişmemiştir.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak S_{33} düğüm noktası gerilme dağılımları incelenirse, +00.00 ile +20.00 kotları arasında baraj merkez çizgisinin kestiği noktada ve çekirdek ile memba ve mansap kabuk zonlarının birleşme yerlerinde negatif gerilmeler maksimum olmuştur. +40.00 kotunda memba uç noktasında negatif gerilmeler en düşük değerini almaktadır (433-436 no'lu düğüm noktaları). Gövde içerisinde pozitif değerli gerilmelere rastlanılmamıştır.

Buraya kadar yapılan analizlerden iyi neticeler alınmış ve sonuçlar birbirleri ile uyum sağlamıştır. Vadi genişliği arttıkça gerilme değerlerinde bir azalma veya artmanın olduğunu söylemek pek doğru olmaz fakat ikinci programın kullanılmasıyla burada yapılan analizlere göre kesit kalınlığının 120 m alındığı durumlardaki gerilme değerleri diğer durumlara göre düşük gerçekleşmiştir.

5.2.3.5 Üç boyutlu olarak S_{12} gerilme dağılımlarının incelenmesi

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{12} gerilme dağılımları incelenirse, talvegde çekirdek ile memba ve mansap kabuk zonlarının birleştiği yerde, özellikle 103 numaralı elemanda negatif değerli gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir (-4.443 t/m^2). Yine talveg seviyesinde baraj merkez çizgisine komşu elemanlarda (özellikle 104 ve 105) pozitif değerli gerilmeler maksimum olmuştur (sırasıyla 4.643 t/m^2 ve 4.626 t/m^2). Krette gerilme değerleri yüksektir. Yine krette memba bölgesinde negatif gerilmeler mevcuttur. Çekirdek içerisinde pozitif ve negatif gerilmelerin kombinasyonları vardır.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{12}) gerilme dağılımları incelenirse, memba ve mansap şevleri üzerinde genelde pozitif değerli gerilmeler meydana gelmiştir. Çekirdeğin memba tarafında pozitif değerli gerilmeler oluşurken mansap tarafta negatif gerilmeler meydana gelmiştir. +00.00 kotunda çekirdek hendeğinin memba tarafındaki üst köşe

noktasında maksimum pozitif gerilmeler meydana gelirken yine çekirdek hendeğinin mansap tarafta kalan üst köşe noktasında negatif gerilmeler oluşmaktadır (101 numaralı elemanda 166 numaralı düğüm noktasında 2.39 t/m^2 , 107 numaralı elemanda 172 no'lu düğüm noktasında -2.32 t/m^2). +05.00 m kotunda memba tarafta düşük negatif gerilmeler oluşurken, mansap tarafta bunun simetriği olarak düşük pozitif gerilmeler oluşmaktadır. Krette memba tarafta pozitif gerilmeler mansap tarafta negatif gerilmeler hakimdir.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{12}) gerilme dağılımları incelenirse, +20.00 ile +40.00 kotları arasında çekirdek ile mansap kabuk zonunun birleştiği bölgede ve çekirdek ile memba kabuk zonunun birleştiği bölgede çekirdek içerisinde maksimum negatif gerilmeler meydana gelmiştir (211 numaralı elemanda -5.622 t/m^2 , 220 numaralı elemanda 5.698 t/m^2). Talveg seviyesinde yine aynı bölgelerde negatif gerilme değerleri maksimuma yakındır. Gövde içerisinde negatif ve pozitif gerilmeler düzenli sıralar halinde arka arkaya sıralanmıştır. Birinci programın kullanılmasından elde edilen sonuç gerilme değerleri kesit kalınlığı 40 m için yapılan analiz sonuçlarından biraz daha fazladır. Kesit kalınlığının artmasıyla sonuçlarda artmıştır. Fakat sonuçlar arasında fazla bir fark yoktur.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{12}) gerilme dağılımları incelenirse, memba tarafta genelde pozitif gerilmeler yaygınken, mansap tarafta negatif gerilmeler mevcuttur. +20.00 m kotunda ve +40.00 m kotunda çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği noktalarda ve bu noktalara komşu katı (solid) elemanlarda (çekirdek içerisinde) pozitif ve negatif gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir (211 numaralı eleman içerisinde 301 numaralı düğüm noktasında -8.28 t/m^2 'lik kayma gerilmesi elde edilmiştir). Kretten başlayarak 20 m alt kota ilerleyen memba yüz üzerinde ve talveg seviyesinden başlayıp 40 m üst kota kadar ilerleyen memba yüz üzerinde düşük değerli pozitif gerilmeler mevcuttur. +40.00 ile +60.00 kotları arasında memba yüz üzerinde küçük değerli negatif gerilmeler meydana gelmiştir. Merkez çizgisine simetrik olarak mansap tarafta hemen hemen aynı değerlere sahip negatif gerilmeler üretilmiştir.

+20.00 m kotunda çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği bölgelerde maksimum olarak negatif gerilmeler oluşmaktadır (162 numaralı elemanda 316 numaralı düğüm noktasında -10.43 t/m^2). Mansap tarafta kalan çekirdek bölgesinde negatif gerilmeler mevcuttur. +80.00 ile +70.00 kotları arasında mansap yüzde negatif gerilmeler varken, +70.00 ile +25.00 kotları arasında yine mansap yüzde pozitif gerilmeler oluşmuştur. Barajın memba ve mansap topuğunda gerilmeler en düşük değerlerini almıştır.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 120 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{12}) gerilme dağılımları incelenirse, $x = 0$ m kesitinde memba tarafta pozitif gerilmeler meydana gelirken mansap tarafta negatif gerilmeler oluşmuştur. +00.00 kotunda memba kısımda negatif gerilmeler meydana gelirken mansap tarafta pozitif gerilmeler oluşmuştur. $X = 60$ m eksen olarak kabul edildiğinde 0 ile 60 m arasındaki kesit kalınlığı için mansap yüzde düşük negatif gerilmeler oluşmuş, 60 ile 120 m kesit kalınlığı arasında mansap yüzde pozitif gerilmeler meydana gelmiştir. $X = 0$ m kesiti için, çekirdek hendeğinin mansap taraftaki üst köşesinde maksimum negatif gerilme (301 numaralı elemanda 386 numaralı düğüm noktasında -30.90 t/m^2) ve +20.00 kotunda çekirdek ile mansap kabuğunun birleşme bölgesinde yüksek negatif gerilmeler oluşmuştur. Bu noktalara simetrik olarak memba tarafta aynı bölgelerde pozitif gerilmeler maksimum ve maksimumuna yakın olarak gerçekleşmiştir. Memba yüz üzerinde $x = 0$ ile $x = 60$ m kesitleri arasında pozitif gerilmeler oluşmuş, $x = 60$ m ile $x = 120$ m arasında +00.00 ile +40.00 kotlarında negatif gerilmeler, +40.00 ile +80.00 kotları arasında pozitif gerilmeler meydana gelmiştir. Krette memba şevi ile çekirdek arasında negatif gerilmeler gelişirken, mansap tarafta şev ile çekirdek arasında pozitif gerilmeler oluşmuştur. Maksimum gerilmelerin olduğu noktalar çekirdek hendeği üst köşeleri ve +20.00 kotunda memba ve mansap kabuk zonlarının çekirdek ile birleştiği bölgelerdir. $X = 120$ m olan kesite bakıldığında memba tarafta pozitif gerilmeler meydana gelirken, mansap tarafta negatif gerilmeler oluşmaktadır. Vadi genişliği arttıkça gerilme değerlerinde de artışlar gözlenmiştir.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{12} düğüm noktası gerilme dağılımları incelenirse, çekirdek hendeğinin memba taraftaki üst köşe noktasında (174 numaralı düğüm noktası) negatif gerilme maksimum olarak gerçekleşmiştir. Yine talveg seviyesinde çekirdek ile mansap kabuğunun birleşme noktasında (162 numaralı düğüm noktası) negatif değerli gerilmeler yüksek olmuştur. +60.00 kotunda mansap ve memba uç noktalarında pozitif gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir. 160, 168, 172 numaralı düğüm noktalarında pozitif gerilmeler yüksektir.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak S_{12} düğüm noktası gerilme dağılımları incelenirse, +20.00 m kotunda 301 ve 320 numaralı düğüm noktalarında çekirdek ile memba ve mansap kabuk zonlarının birleşim yerlerinde maksimum negatif gerilmeler gerçekleşmiştir. +60.00 m kotunda mansap tarafta 456 numaralı düğüm noktasında, yine aynı kotta çekirdek ile mansap kabuğunun birleşme bölgesinde 469 numaralı düğüm noktasında, krette mansap uç noktasında (521) negatif gerilme değerleri yüksektir. Genelde mansap kabuk zonunda negatif gerilmeler gelişmiştir. Pozitif gerilmeler 304, 317 no'lu düğüm noktalarında maksimum olarak gerçekleşmiştir. Bu noktalar +20.00 m kotunda memba ve mansap kabuk zonlarının çekirdek ile birleştiği noktalardır. Kret kotunun 20 m altında aynı şekilde çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği noktalarda pozitif gerilme değerleri yüksektir. Kret üzerinde 536, 540, 589, 593, 585 numaralı düğüm noktalarında pozitif gerilme değerleri maksimuma yakındır. Kesit kalınlığı 60 m alınarak yapılan analizde gerilme sonuçları kesit kalınlığı 40 m alınarak yapılan analizden elde edilen sonuçlarla aynı olmasına rağmen, bu analiz sonuç değerleri biraz daha yüksektir. Vadinin daha geniş incelenmesinden dolayı küçük fazlalık değerleri olabilir. Genelde baraj merkez çizgisinin devam ettiği çekirdek içerisindeki noktalarda pozitif gerilmeler meydana gelmiştir.

5.2.3.6 Üç boyutlu olarak S_{13} gerilme dağılımlarının incelenmesi

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{13} gerilme dağılımları incelenirse, talvegde memba ve mansap kabuk zonlarının çekirdek ile birleştiği yerlerde çekirdek içerisinde özellikle 101 ve 107 numaralı elemanlarda maksimum negatif gerilmeler oluşmuştur (sırasıyla -8.745 t/m^2 ve -8.668 t/m^2). +20.00 ile +40.00 kotları arasında bu kotlar arasında kalan elemanlar için aynı şekilde çekirdek ile kabuk zonlarının birleşim bölgelerinde maksimuma yakın negatif ve pozitif gerilmeler meydana gelmiştir (141 numaralı elemanda 5.99 t/m^2 , 147 numaralı elemanda 6.283 t/m^2). Talveg seviyesinde çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği bölgelerde çekirdek içerisinde 102 ve 108 numaralı elemanlarda maksimum pozitif gerilmeler oluşmuştur (sırasıyla 9.71 t/m^2 ve 9.635 t/m^2).

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{13}) gerilme dağılımları incelenirse, $x = 40 \text{ m}$ kesitinde çekirdek hendeğinin içerisinde ve üst köşe noktalarında pozitif değerli gerilmeler maksimum olarak meydana gelirken (102 numaralı elemanda 168 numaralı düğüm noktasında 14.87 t/m^2), $x = 0 \text{ m}$ 'lik kesitte aynı bölgede hemen hemen aynı büyüklükte negatif değerli gerilmeler meydana gelmiştir (105 numaralı elemanda 172 numaralı düğüm noktasında -14.80 t/m^2 , 101 numaralı elemanda 166 no'lu düğüm noktasında -13.63 t/m^2). Gerilme dağılımları $x = 20 \text{ m}$ 'lik kesit kısmında baraj merkez çizgisine göre simetrik olarak gerçekleşmiştir. -09.00 ile $+20.00 \text{ m}$ kotları arasında $x = 0$ ile $x = 20 \text{ m}$ 'lik kısım arasında kesit uzunluğu boyunca (x yönünde) negatif değerli gerilmeler meydana gelirken $x = 20$ ile $x = 40 \text{ m}$ 'lik kesitler arasında aynı büyüklükte pozitif değerli gerilmeler meydana gelmiştir. $X = 0 \text{ m}$ kesit yüzünde çekirdek hendeğinin içerisinde ve köşe noktalarında maksimum negatif gerilmeler oluşurken, $x = 40 \text{ m}$ 'lik yüz üzerinde çekirdek hendeği içerisinde +00.00 kotunda ve çekirdek ile kabukların birleşim bölgesinde pozitif değerli gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir. -09.00 ile $+20.00$ kotları arasında $x = 0$ kesitinde tabanda negatif gerilmeler hakimdir. +60. 00 ile +80.00 kotları arasında çekirdek içerisinde yine düşük negatif gerilmeler vardır. Memba ve mansap yüzde pozitif gerilmeler hakimdir ($x = 0$ kesitinde). +60.00 m kotunda memba ve mansap iç bölgelerinde negatif gerilmeler mevcuttur. $X = 40 \text{ m}$ kesitinde -20.00 ile $+20.00 \text{ m}$

kotları arasındaki bölgede pozitif gerilmeler oluşmuştur. Barajın orta yükseltilerinde negatif gerilmeler vardır. +60.00 m ile +80.00 m kotları arasında çekirdek içerisinde pozitif gerilmeler oluşurken, aynı kotlar arasında memba ve mansap yüzler üzerinde düşük seviyelerde negatif gerilmeler gerçekleşmiştir.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{13}) gerilme dağılımları incelenirse, talveg seviyesinde çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği yerlerde çekirdek içerisinde, çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında ve 151, 154, 157 numaralı elemanlarda maksimum negatif gerilmeler meydana gelmiştir (sırasıyla -14.18 t/m^2 , -19.87 t/m^2 ve -19.81 t/m^2). Talveg seviyesinde 153, 156, 159 numaralı elemanlarda da maksimum pozitif gerilmeler gerçekleşmiştir (sırasıyla 15.32 t/m^2 , 21.15 t/m^2 ve 21.10 t/m^2). Kesit kalınlığı 60 m alınarak elde edilen analiz sonuçları diğer analiz sonuç değerlerinden biraz yüksekçe olmaktadır. Gerçekte iki analizden elde edilen değerler birbirlerine oldukça yakındır. Negatif ve pozitif gerilme değerleri genelde belli bir sıra halinde meydana gelmiştir.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak ($S_{13} = \tau_{xz}$) aynı gerilme dağılımları incelenirse, $x = 60 \text{ m}$ kesitinde +00.00 kotu ile +20.00 m kotları arasında çekirdek içerisinde çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında maksimum pozitif değerli gerilmeler gerçekleşmiştir (153 no'lu elemanda 224 numaralı düğüm noktasında 20.35 t/m^2 , 162 numaralı elemanda 232 numaralı düğüm noktasında 21.49 t/m^2). $X = 0 \text{ m}$ kesitinde yine aynı kotlar arasında aynı bölgelerde maksimum negatif gerilmeler meydana gelmiştir (151 no'lu elemanda 221 numaralı düğüm noktasında -20.35 t/m^2 , 160 numaralı elemanda 229 numaralı düğüm noktasında -20.11 t/m^2). $X = 0 \text{ m}$ kesitinde kabuklarda aynı kotlar arasında düşük değerli pozitif gerilmeler oluşmuştur. Memba ve mansap yüz üzerinde düşük değerli negatif gerilmeler meydana gelmiştir. +40.00 m kotundaki çekirdek noktalarında negatif gerilmeler yine maksimum olmuştur (örnek olarak 212 numaralı elemanda 390 numaralı düğüm noktasında -27.89 t/m^2). Krette genelde pozitif gerilmeler hakimdir.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 120 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{13}) gerilme dağılımları incelenirse, $x = 120$ m kesitine bakıldığında +00.00 ile +20.00 m kotları arasında çekirdek içerisinde negatif gerilme değerleri maksimum olmuştur (306 numaralı elemanda 392 numaralı düğüm noktasında 31.55 t/m^2). Çekirdek hendeği içerisinde maksimum pozitif gerilmeler mevcuttur. Gövdede 35 m kotunun alt kısımlarında pozitif değerli gerilmeler mevcutken bu kotun üzerinde kalan kısımda negatif değerli gerilmeler yaygındır. +45.00 m ile +80.00 m kotları arasında memba ve mansap yüzde düşük pozitif değerli gerilmeler oluşmuştur. $X = 0$ m'lik kesite bakıldığında +00.00 kotunda çekirdek ile kabukların birleşme yerlerinde ve çekirdek hendeğinin üst köşe noktalarında maksimum negatif gerilmeler oluşmuştur (301 numaralı elemanda 386 numaralı düğüm noktasında -31.95 t/m^2). +25.00 m kotundan krete kadar pozitif değerli gerilmeler gelişmiştir. Memba ve mansap yüzde +60.00 ile +80.00 m kotları arasında negatif gerilmeler gelişmiştir. Memba ve mansap yüzde yer yer pozitif gerilmeler yer yer negatif gerilmeler oluşmuştur.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{13} ortalama düğüm noktası gerilme dağılımları incelenirse, talvegde çekirdek hendeğinin üst noktasıyla baraj merkez çizgisinin kesişme noktasında 169 numaralı düğüm noktasında maksimum negatif gerilme oluşmuştur. Yine aynı kotta ve aynı yerde çekirdek hendeğinin mansap üst noktasında çekirdek ile mansap üst kotunun birleşim bölgesinde sırasıyla 165, 168 ve 171 numaralı düğüm noktalarında maksimum pozitif değerli gerilmeler oluşmuştur.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak S_{13} ortalama düğüm noktası gerilme dağılımları incelenirse, talveg seviyesinin 20 m üzerinde +20.00 m kotunda çekirdek içerisinde baraj merkez çizgisinin kestiği noktada 305 ve 309 numaralı düğüm noktalarında ve talveg seviyesinde çekirdek ile merkez çizgisinin kesiştiği noktada 225 numaralı düğüm noktasında maksimum negatif gerilmeler meydana gelmiştir. Yine benzer şekilde talveg seviyesinin 20 m üzerinde ve talveg seviyesinde çekirdekte baraj merkez çizgisinin kestiği noktada 228, 232 ve 312 numaralı düğüm noktalarında maksimum

pozitif gerilmeler meydana gelmiştir. Yapılan iki farklı 3 boyutlu analiz sonuçları birbirleriyle uyudur. Kesit kalınlığı 60 m için yapılan analiz sonuçlarına göre krette memba ve mansap uç bölgelerinde pozitif gerilmeler gelişmiştir. Kesit kalınlığı 40 m için yapılan analizden pozitif gerilmenin en düşük olduğu nokta mansap topuğudur (139 numaralı düğüm noktası). Negatif gerilmeler 370 numaralı düğüm noktasında kretin 20 m alt kotunda memba tarafta minimum olarak gerçekleşmiştir.

Yukarıda incelenen farklı analiz neticeleri birbirleriyle aynı paralellik gösterir. Maksimum negatif ve pozitif gerilmeler aynı bölgelerde oluşmuştur. İkinci programın kullanılmasıyla gerçekleştirilen 3 boyutlu analiz neticelerine göre, kesit kalınlığının fazla olduğu durumlarda gerilme değerlerinde de artışlar gözlenmiştir. Vadi genişliği arttıkça gerilmelerde de artışlar olmuştur.

5.2.3.7 Üç boyutlu olarak S_{23} gerilme dağılımlarının incelenmesi

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{23} gerilme dağılımları incelenirse, kret ile 20 m altında bulunan bölgenin mansap tarafındaki 215 ve 216 numaralı elemanlarda maksimum negatif gerilmeler oluşur (sırasıyla -15.99 t/m^2 , -15.99 t/m^2). $+40.00$ ve $+60.00$ kotları arasında kalan çekirdek ile mansap kabuk zonunun birleşim bölgesinde 179, 180 numaralı elemanlarda da negatif gerilme değerleri yüksek olmuştur (sırasıyla -12.59 t/m^2 ve -12.59 t/m^2). Aynı kotlar arasında çekirdek ile memba kabuk zonunun birleşim yerlerinde de maksimuma yakın pozitif değerli gerilmeler elde edilmiştir. Krette memba yüze yakın 233 ve 234 numaralı elemanlarda pozitif gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir (sırasıyla 16.75 t/m^2 ve 16.76 t/m^2). Talveg seviyesinde çekirdek ile memba kabuk zonunun birleştiği bölgeye yakın 111 ve 112 numaralı elemanlarda da yüksek pozitif gerilme değerleri mevcuttur (sırasıyla 13.45 t/m^2 ve 13.45 t/m^2). Gövdenin mansap tarafından merkez çizgisine kadar olan kısımda negatif gerilmeler oluşmuştur. Merkez çizgisi simetri aksı kabul edilerek memba tarafta pozitif gerilmeler üretilmiştir.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{23}) gerilme dağılımları incelenirse, $x = 0$ kesitinde memba tarafta pozitif gerilmeler, mansap tarafta ise negatif gerilmeler mevcuttur. +20.00 m kotunda memba tarafta çekirdek ile kabuk zonunun birleşim yerinde ve komşu elemanlarda yüksek pozitif gerilmeler oluşurken (107 numaralı elemanda 238 no'lu düğüm noktasında 13.77 t/m^2), mansap tarafta yine çekirdek ile kabuk zonunun birleşim bölgesinde maksimum negatif gerilmeler meydana gelmiştir (101 numaralı elemanda 226 numaralı düğüm noktasında -13.19 t/m^2). Barajın orta yüksekliklerine kadar memba yüzü üzerinde düşük pozitif gerilmeler diğer üstte kalan kısımda yüksek pozitif gerilmeler meydana gelirken, mansap yüz üzerinde orta yükseltiye kadar düşük, üst kısımlara doğru yüksek değerli negatif gerilmeler meydana gelmiştir. $X = 40 \text{ m}$ kesitine bakıldığında tablo aynı şekildedir.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{23}) gerilme dağılımları incelenirse, krette mansap tarafta 323 numaralı elemanda negatif gerilme (-14.13 t/m^2), yine krette mansap tarafta bulunan 349, 350 ve 351 numaralı elemanlarda pozitif gerilmeler maksimum olarak gerçekleşmiştir (sırasıyla 14.78 t/m^2 , 15.09 t/m^2 ve 14.78 t/m^2).

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak aynı (S_{23}) gerilme dağılımları incelenirse, baraj merkez çizgisinin memba tarafında basınç gerilmeleri varken, mansap tarafta çekme gerilmeleri mevcuttur. +20.00 m kotunda çekirdek ile memba kabuk zonunun birleştiği bölgede maksimum negatif gerilmeler, yine aynı kotta çekirdek ile mansap kabuk zonunun birleştiği bölgede maksimum pozitif gerilmeler meydana gelmiştir. 00.00 kotu ile +60.00 kotları arasında memba yüz üzerinde düşük basınç gerilmeleri vardır. +40.00 ile +80.00 kotları arasında mansap yüz üzerinde nispeten yüksek pozitif gerilme değerleri mevcuttur. Mansap ve memba topuklarında sırasıyla pozitif ve negatif gerilmeler en düşük değerlerini almaktadır.

Yükleme durumu 3'e göre ikinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 120 m için 3 boyutlu olarak aynı gerilme dağılımları incelenirse, $x = 120$ m kesiti için mansap tarafta negatif gerilmeler, memba tarafta pozitif gerilmeler oluşmuştur. Memba tarafta maksimum pozitif gerilmeler 00.00 kotunda çekirdek hendeğinin üst köşesinde (312 numaralı elemanda 406 numaralı düğüm noktasında 16.53 t/m^2) ve +20.00 kotunda çekirdek ile kabuk zonunun birleşim bölgesinden başlayarak memba şevine doğru ilerler. Mansapta 00.00 kotunda çekirdek hendeğinin üst köşesinde ve +20.00 kotunda çekirdek ile kabuk zonunun birleştiği noktada negatif gerilmeler maksimumdur. Krette memba tarafta maksimuma yaklaşan pozitif gerilmeler mevcuttur. Yine kretin mansap bölgesinde negatif gerilmeler hakimken ara bölgelerde pozitif gerilmelerde meydana gelmiştir. $X = 0$ kesitine bakıldığında $x = 120$ m kesitinde olduğu gibi memba tarafta pozitif gerilmeler meydana gelirken mansap tarafta negatif gerilmeler oluşmuştur. Memba kısmında 00.00 ve +20.00 kotları arasında çekirdek içerisinden başlayarak kabuk zonunun içlerine doğru ilerleyen maksimum pozitif gerilmeler gerçekleşir. Mansap tarafta yine aynı kotlarda çekirdek hendeğinin üst köşesinde ve çekirdek ile mansap kabuk zonunun birleşim noktasında maksimum negatif gerilmeler oluşmuştur (301 numaralı elemanda 386 numaralı düğüm noktasında -27.20 t/m^2 , 307 numaralı elemanda 400 numaralı düğüm noktasında 30.10 t/m^2). 3 boyutlu şekil incelendiğinde memba yüz üzerinde tamamen pozitif gerilmeler meydana gelirken, mansap yüz üzerinde de negatif gerilmeler meydana gelmiştir. Mansap taraf tamamen negatif gerilmelere maruz kalırken, memba tarafta bir bütün olarak pozitif gerilmeler hakimdir.

Yapılan analiz sonuçları birbirleriyle uygundur ve vadi genişliğinin artması sonucunda da gerilme değerlerinde artışlar gerçekleşmiştir. Daha doğru neticeler elde etmek için sistemin ve vadi genişliğinin bir bütün olarak incelenmesi ve iki boyutlu analizler yerine vadi genişliğini kapsayan üç boyutlu analizlerin yapılması tercih edilmelidir.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 40 m için 3 boyutlu olarak S_{23} ortalama düğüm noktası gerilme dağılımları incelenirse, +60.00 m kotunda mansap uç bölgesinde 328, 329 ve 330 numaralı düğüm noktalarında

negatif gerilme değerleri maksimumdur. Benzer şekilde aynı kotta memba uç bölgesinde 388, 389 ve 390 numaralı düğüm noktalarında pozitif gerilme değerleri maksimum olarak gerçekteşmiştir. +20.00 m ve +40.00 m kotlarında çekirdek ile mansap kabuk zonunun birleşme bölgesinde de negatif gerilme değerleri yüksektir. Aynı kotta çekirdek ile memba kabuk zonunun birleştiği bölgelerde 238, 240 ve 305 numaralı düğüm noktalarında da pozitif gerilme değerleri yüksektir. Kısaca +20.00 m kotunda memba ve mansap kabuk zonlarının çekirdek ile birleşme bölgelerinde pozitif ve negatif gerilme değerleri maksimuma yakındır.

Yükleme durumu 3'e göre birinci programın kullanılmasıyla kesit kalınlığı 60 m için 3 boyutlu olarak S_{23} ortalama düğüm noktası gerilme dağılımları incelenirse, +60.00 m kotunda mansap uç noktasında 438, 439 numaralı düğüm noktalarında maksimum negatif gerilmeler gerçekteşirken, aynı kotta memba uç noktasında maksimum pozitif gerilmeler meydana gelmiştir. Krette gerilme değerleri yüksektir.

İki analizden elde edilen sonuçlara göre kretin 40 m, 60 m ve 80 m alt kotlarında mansap tarafta negatif gerilmeler üretilirken, memba tarafta pozitif gerilmeler oluşmuştur. Krette mansap uç noktasından baraj merkez çizgisine kadar olan noktalarda negatif, merkez çizgisinden memba uç noktasına kadar olan noktalarda pozitif gerilmeler hakimdir.

5.3 Daha önce yapılan çalışmalarla bu çalışmanın karşılaştırılması ve değerlendirmeler

Bu çalışmada Çaldıran depreminin uygulanması ile elde edilen deplasman değerleri düşüktür, bu nedenle deplasmanların gövde üzerinde tehlikeli neticelere varacak deformasyonlara sebep olacağı elde edilen neticelere göre söylenemez.. Şiddetli depremlere dayanmada alınacak tedbirlerden bazıları kret bölgesinin daha kalın yapılması ve memba ve mansap şev eğimlerinin daha fazla eğimli olarak düzenlenmesidir. Deformasyonların azalmasını veya düşük olmasını sağlayacak yöntem, uygun sıkışma metodunun uygulanması ve malzemenin oldukça iyi

derecelerde yoğun olmasını sağlamaktır. Sıkışmayı sağlayacak makineler çeşitli silindirlerdir. Amaç sert ve katı bir zemin elde etmektir. Ayrıca deprem kuvvetleri sonucunda meydana gelen deformasyonlar, temele uygulanan aşırı yüklenme basıncı ile temel malzemesinin gevşek olması veya fazla su içeriğine sahip olması nedeniyle konsolidasyona uğraması neticesinde de meydana gelebilir.

Baraj gölündeki su seviyesinin yarıya düşürülmesi sistem üzerinde önemli bir etki yaratmamaktadır. Beton ağırlık veya beton kemer barajlarda su yükünün sistem üzerine etkisi (özellikle hidrodinamik etki) düşünülebilir, fakat bu durum bu çalışmada önemli gerilme ve deformasyon değişikliklerine sebep olmamıştır.

Baraj gölü su ile doldurulup freatik çizginin meydana gelip az miktardaki sızıntının oluşmasıyla veya diğer bir deyişle kilden oluşturulmuş çekirdek malzemesi baraj gölünün su ile doldurulması sonucu doyumluğa eriştikten sonra, suyun kaldırma (yüzdürme) kuvvetleri ile düşey deplasmanlar baraj kretine doğru gerçekleşebilir (Singh ve Varshney, 1995). Çekirdek içerisinde ve üzerinde meydana gelebilecek aşırı saf su basınçları uygun malzemelerden elde edilmiş filtrelerin ve drenlerin yerleştirilmesi ile önlenir. Bununla beraber çekirdek malzemesinin en uygun su içeriğine göre daha kuru olarak yerleştirilmesi gölün su ile doldurulmasından sonra doyumluğa erişen kil malzemesinde kabarmalara sebep olabilir. Bu durum çekirdek içerisinde çatlak oluşmasına neden olur ve sızıntı debisinin artmasıyla bu çatlak genişler ve erozyon kanalını meydana getirir. Böylece hidrolik kırılma olayı gerçekleşmiş olur. Bu durum filtrelerle, drenlerle ve çekirdeğin memba yüzünün eğimli yapılmasıyla önlenir. Benzer şekilde aşırı fazla su içeriği ile yerleştirilmiş kil malzemesi yüklemeler ve üst dolgular tamamlandıktan sonra aşırı yüklenme basıncı nedeniyle konsolide olup düşey deplasman değerlerinin alt kısımlara doğru artmasına sebep olabilir. Bu durum gevşek kohezif malzemelerden oluşmuş temel içerisinde de görülebilir. Gevşek, kohezif olmayan malzemelerden oluşmuş temel için zeminin doyumluğa erişip aşırı kaldırma kuvvetleri oluşturması sıvılaşmaya, mansap topuğu bölgesinde kaynamalara, erozyon kanalının oluşmasına veya gövdenin şiddetli bir deprem sonrası temel üzerinde kaymasına sebep olabilecektir.

Gövdeye yerleştirilecek malzemelerin %20-%25'lik en uygun su içeriğine sahip olması arzu edilir.

Bu çalışmada temel malzemesi konglomera kayası olduğundan sınır şartları gövde ile temelin değme noktalarında ankastre mesnet olarak dikkate alınmıştır. Temel sınır şartlarının değişmesi veya temel malzemesinin kaya olmaması durumunda gerilme ve deformasyon değerlerinde de değişme olacaktır.

Hesaplamalarda üç ana malzeme vardır. Bunlar kil, kumlu çakıl ve konglomera kayasıdır. Çekirdek malzemesinin elastisite modülü en küçüktür. Kumlu çakıl malzemesinin elastisite modülü biraz daha büyüktür ve en büyük modül değeri temeli oluşturan kaya malzemesininidir. Elastisite modül değerlerine bakıldığında çekirdeği oluşturan kil malzemesi daha esnek ve elastiki malzeme olduğu anlaşılmaktadır.

Çekirdekte deformasyon değerleri genellikle orta ve yükseğe yakın seviyelerdedir. Üç boyutlu analizlere göre x yönündeki maksimum yer değiştirme +20.00 m kotunda çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği bölgelerde çekirdek içerisinde maksimum ve çekirdek hendeğinin üst noktalarında da maksimuma oldukça yakındır. Y yönündeki maksimum yer değiştirme yine +20.00 m kotunda çekirdek ile kabuk zonlarının birleştiği bölgelerde çekirdek içerisinde maksimum ve çekirdek hendeğinin üst noktalarında maksimuma oldukça yakın olmuştur. Z yönündeki maksimum yer değiştirmeler ise krette gerçekleşmiştir. Gerilme değerleri de maksimum veya yüksek olarak maksimum deformasyonların meydana geldiği noktalarda veya bölgelerde oluşmuştur. Daha doğrusu maksimum gerilmelerin (özellikle negatif değerli) meydana geldiği noktalarda ve bölgelerde yine maksimum deformasyonlar oluşmuştur.

Kesit kalınlığı 120 m alınarak yapılan 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre baraj aksı boyunca kret profili iç bükey olarak gerçekleşmiştir. X = 60 m olan nokta üzerinde pozitif değerli gerilmeler oluşmuştur.

Genel olarak hesaplanan deformasyon değerleri ile gövde içerisine yerleştirilmiş ve enstrümanlarla ölçümü yapılan yer değiştirme değerleri arasında farklılık olabilir. Hesaplanan değerler daha düşük veya daha yüksek olabilir. Bu farklılıkların nedenleri gövdeyi oluşturan malzeme özelliklerinin hangi derecede dikkate alındığı ve arazideki malzeme özellikleri ile hesaplamalarda kullanılan malzeme özelliklerinin aynı olup olmaması, modellemede maksimum değerlerin elde edildiği noktalarda enstrümanların olup olmadığı, kompaksiyon yöntemleri ve sıkıştırma derecesidir. Malzeme yumuşak ve gevşekse, iyi derecede sıkıştırma yapılmamış ve iyileştirme tedbirleri uygulanmamışsa, emniyet gerilmesi değeri de doğal olarak düşük olacaktır.

İki boyutlu analizlerde yer değiştirme değerleri kret bölgesinde maksimum olarak gerçekleşmiştir. Birinci programın kullanıldığı iki boyutlu analizlerde genelde kabuk kalınlığı azaldıkça sonuç değerleri artmaktadır. Kabuk kalınlığının çok az alındığı durumlarda sonuçlar (özellikle deplasmanlar) oldukça büyük gerçekleşmektedir. Birinci programa göre gerilme dağılımlarına bakıldığında kabuk kalınlığının artmasıyla gerilme değerleri de azalmıştır.

Yük transferi genellikle çekirdekten kabuklara doğru olmuştur. Çekirdek malzemesinin yoğunluğu ($\rho_{kil} = 0.21$) kabuk malzemesinin yoğunluğundan ($\rho_{kumlu-çakıl} = 0.19$) fazladır. Özellikle çekirdek ile kabuk zonlarının birleşim bölgelerinde çekirdek içerisinde yüksek gerilmeler mevcuttur. Talveg seviyesinde çekirdek hendeğine gelen yükler maksimumdur.

Justo, krette meydana gelen oturmaların ne tip bir çatlak oluşturduğunu incelemiştir. Bu incelemeye göre 50 mm'den daha az olan kret oturmalarında gövde üzerinde çatlaklar meydana gelmez. 50 mm'ye eşit veya daha büyük oturmalar sonucunda sıkıştırılmış kuru zeminlerde enine çatlamlar görülür. 18 cm'yi aşan oturmalarda hidrolik kırılma meydana gelebilir. Bu çalışmada 3 boyutlu olarak ikinci programa göre yapılan analizlerden kretteki oturma değerleri maksimum 11 cm olarak gerçekleşmiştir. Dolayısıyla krette sıkışmış kuru zeminlerde enine çatlak oluşum

riski mevcuttur. Fakat bu durumun baraj güvenliğine bir etkisi olmamıştır (Singh ve Varshney, 1995).

Baraj içerisinde boyuna deformasyonlardan dolayı oluşan pozitif zorlamalar çekirdek malzemesinin dayanma kapasitesini aştığı zamanlarda enine çatlamlar meydana gelebilir. Negatif değerli gerilmelerin düşük, pozitif değerli gerilmelerin yüksek olduğu yerlerde çatlak oluşumu ihtimali yüksektir (Singh ve Varshney, 1995). Çatlak oluşumunu sağlayacak pozitif zorlamalar kısmen zeminlerin iyi ve sağlam sıkıştırılması ile önlenabilir.

Kil malzemesinin birim hacim ağırlığı ve birim hacim kütlesi kabukları oluşturan malzemeye göre daha fazladır. Böylece çekirdek kabuk malzemesine göre birim hacimde daha ağırdır. Ayrıca daha da yoğun olmalıdır.

Gerilmelerin saf su basıncı değerinden daha az olması durumu hidrolik kırılmanın gerçekleşme ihtimalini yükseltir. Diğer bir deyişle çekirdeğin memba ve mansap yüzünde düşey gerilmenin çok az olması durumu hidrolik kırılmaya yol açabilir (Singh ve Varshney, 1995).

Bu çalışmada zonları oluşturan her malzemenin sabit elastisite modülü değerine sahip olduğu kabul edilmiştir. Gövdenin üst kısımlarına elastisite modülü düşük daha esnek malzemelerin yerleştirilmesi krette meydana gelebilecek çatlak oluşumu potansiyelini düşürecektir (Singh ve Varshney, 1995).

Önceleri gerçekleştirilen birçok sonlu elemanlar analizlerine dayanarak gerilme dağılımları değerlendirildiğinde, depremler boyunca ve sonrasında fazla miktarda çekme gerilmelerinin olduğu zonlar barajın memba ve mansap şev eğimleri üzerindedir. Büyük depremler sonrası çatlakların oluşum bölgeleride şev eğimleri üzerinde yer almaktadır. Buradan, şiddetli deprem sonucu şev eğimi üzerinde meydana gelen çatlakların, yine şevler üzerinde maksimum çekme gerilmelerinin

oluştugu bölgelerde gerçekleştiği sonucuna varılır. Zira, sonlu elemanlar metodu ile yapılan pek çok analizde bu durum ortaya çıkmıştır (Singh ve Varshney, 1995).

Deplasmanların ve gerilmelerin düşük olduğu bölgeler mansap ve memba topuk bölgeleridir. Genellikle memba tarafta gerilme değerleri yüksek olmuştur. Çok düşük gerilme seviyelerinde zeminin mukavemeti ve katılığı daha yüksek olur. Kayma gerilmesinin zeminin kayma mukavemetini aştığı zamanlarda çatlak oluşumu veya yıkılma riski artmaktadır.

Modlara bağlı olarak elde edilen deplasman ve rotasyon değerleri Çaldıran depremi ile eşdeğer spektrum değerine sahip bir depremin meydana gelmesi sonucunda Karacaören I toprak dolgu barajının davranışını sergiler.

Dolgu barajların tasarımında alternatif tip en kesitler oluşturularak gerilme dağılımları ve deformasyonların incelenmesiyle en uygun en kesit belirlenmiş olacaktır.

Gövde içerisindeki negatif ve pozitif gerilme dağılımları baraj şekline ve zonların pozisyonuna göre değişme gösterebilir. Bu nedenle farklı gövde kesitleri için ayrı ayrı gerilme ve yer değiştirme analizleri yapılmalıdır.

İkinci programa göre 3 boyutlu yapılan analizlerde kesit kalınlığı arttıkça düşey deplasman değerlerinde 5 mm civarında azalmalar olmuştur. Yani kesit kalınlığının 120 m alındığı durumda elde edilen düşey yer değiştirme değerleri kesit kalınlığı 40 m alınarak elde edilen düşey deplasman değerlerinden düşük olmuştur. Kesit kalınlığının 40 m alındığı durumda krette maksimum 11 cm'lik oturma hesaplanmıştır.

Üç boyutlu olarak birinci bilgisayar programıyla iki farklı analiz, ikinci bilgisayar programıyla üç farklı analiz yapılmıştır. Kesit kalınlığı 40 m, 60 m ve 120 m alınmıştır. Vadi genişliğinin baraj yüksekliğine oranı 4.5'dan fazla olduğu için

($400/80=5$), 3 boyutlu analizlerin daha doğru sonuç verdiği kabul edilmektedir (Singh ve Varshney, 1995). Üç farklı analiz sonuçlarından (özellikle ikinci programın kullanılmasıyla), özellikle kesit kalınlığının 40 m ve 60 m alındığı durumlarda sonuç gerilme değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Aradaki küçük farklar dikkate alındığında kesit kalınlığının fazla olduğu analizlerde sonuçlar daha büyük olmaktadır. Bu küçük fark ihmal edilirse vadi genişliğinin gerilmeler üzerine etkisi önemsizdir denilebilir. Fakat kesin ve daha doğru neticeler elde etmek için gövdeyi vadi genişliğine göre modellemek günümüz bilgisayar teknolojisi ile mümkündür. İki boyutlu analizler yerine vadi genişliğini de kapsayan üç boyutlu analizler yapılabilir ve daha doğru neticeler elde edilebilmektedir.

Krette, yine krette çekirdek ile kabuk zonlarının birleşim bölgesinde, kabuk zonlarında, diğer kotlarda aynı biçimde çekirdek ile kabuk zonlarının birleşim bölgelerinde, memba ve mansap uç noktalarında, temel ile gövdenin kontakt noktalarında, çekirdek hendeği ile temelin kontakt noktalarında, çekirdek hendeğinde, yamaçlarda ve yamaçlarla gövdenin birleşme yerlerinde, temel içerisinde deplasman ve gerilme değerleri gelişmektedir. Deformasyon ölçme aletleri, gerilme-zorlama metreleri, piezometreler ve diğer enstrümanlar böyle kritik bölgelere yerleştirilmeli ve büyük depremler sırasında ve sonrasında veya olağan dışı hallerde (büyük yağış, sel veya taşkın durumlarında) düzenli periyotlar halinde okumalar yapıp sonuçlar değerlendirilmelidir. İtalya'da Vaiont bölgesinde Vaiont rezervuarında büyük hacimli bir toprak kayması meydana gelmiş ve neticesinde mansap bölgesinde büyük sel felaketi yaşanmıştır (Jansen, 1988). Yamaçtaki toprak kaymasını oluşturan zemin kütlelerinde heyelanın meydana gelmesinden önce deformasyon ölçme aygıtları yerleştirilmiş ve o bölgedeki zeminde bir hareketliliğin olduğu önceden anlaşılabilmiş olsaydı iyileştirme tedbirleri alınabilir ve belki de böyle bir felaketin önüne geçilmiş olunabilirdi. Gövde içerisinde meydana gelebilecek herhangi bir basınç artışı veya deplasman değerlerindeki değişimler gözlenmelidir. Herhangi bir riskin var olup olmadığı araştırılmalıdır. Baraj gölündeki su seviyesi maksimumda tutulmaya başlandığında, su seviyesindeki ani düşüşlerden sonra veya şiddetli bir deprem sonrası gövde üzerinde gerekli kontroller yapılmalıdır. Su seviyesinde herhangi bir değişim olup olmadığı incelenmelidir. Genellikle büyük

dolgu barajların gevşek ve yumuşak toprak türlü malzemelerin üzerine yapılmasından ziyade sağlam kaya üzerine yerleştirilmesi tercih edilmelidir. Hali hazırda aktif olan, ilerleyen zamanlarda aktif duruma gelebilecek fay hatlarının veya sığ derinlikteki zayıf kırıkların üzerlerine yapılan büyük barajlar şiddetli bir deprem sonrası zarara uğrayabilir. Faylarda meydana gelecek hareketlilikler veya yatay ve düşey yer değiştirmelerde gövdeye zarar verebilir.

Sonbahar ve kış mevsimlerinde maksimum taşkınların beklendiği durumlarda rezervuar su seviyesi düşürülmeli, düşük seviyelerde tutulmalı ve beklenen taşkın hacmine göre ayarlanmalıdır. Maksimum taşkınların beklendiği bir durumda rezervuar su seviyesi maksimumda veya en üst işletim seviyesinde ise ve eğer büyük ölçekli bir deprem meydana gelirse, bu durumun gövdenin stabilitesini olumsuz yönde etkileme riski büyüktür.

Çaldıran depremi tepki-spektrum eğrileri ve ikinci programın kullanılmasıyla elde edilen sonuç gerilme ve deplasman değerleri ekler bölümünde sunulmuştur.

6 KAYNAKLAR

- Abdel-Ghaffar, A.M., Koh, A.S., 1982. Three Dimensional Dynamic Analysis of Non-homogeneous Earth Dams, *Soil Dyn. And Earthq. Engrg.*, pp. 136-144.
- Akyüz, H., Ocak 1990. Dolgu Barajların Dinamik Analizi, K.T.Ü., Yüksek lisans Tezi.
- Ambraseys, N.N., 1960. On the Shear Response of a Two Dimensional Truncated Wedge Subjected to an Arbitrary Disturbance, *Bull. Seism. Soc. Am.*, pp. 45-46.
- Bayülke, N., İnan, E., Güler, H., 1990. Strong Motion Accelerograph Records of Turkey, volume II, Republic of Turkey Ministry of Public Works and Settlement General Directorate of Disaster Affairs Earthquake Research Department, Ankara, Turkey, 33-44 p.
- Bureau of Reclamation, 1973. Design of Small Dams, United States Department of Interior, 816 p.
- Bureau of Reclamation, 1977. Design of Arch Dams, United States Department of Interior, 872 p.
- Chopra, A.K., 1967. Earthquake Response of Earth Dams, *J. Soil Mech. And Found. Div., ASCE, SM2*.
- Clough, R.W., and Chopra, A.K., 1966. Earthquake Stress Analysis in Earth Dams, *J. Engrg. Mech., ASCE, EM2*.

CSI, 2001. Sap2000 Users Manual, California, Berkeley, U.S.A.

Dakoulas, P., and Gazetas, G., 1985. Non- Linear Response of Embankment Dams, Proc. 2nd Int. Conf. Soil Dyn. And Earthquake Engrg., Springer-Verlag, pp. 29-44.

Dakoulas, P., Gazetas, G., 1985. Seismic Shear Vibration of Embankment Dams in, Semi-cylindrical valleys, Earthq. Engrg. And Struct. Dyn., pp. 19-44.

Dakoulas, P., Hsu, C., 1993. Lateral Response of Dams in Semi-elliptical Rigid Canyons, Soil Dyn. And Earthq. Engrg., pp. 497-507.

Dibaj, M., and Penzien, J., 1969. Response of Earth Dams to Travelling Seismic Waves, J. Soil Mech. And Found. Div., ASCE, SM2.

Dominguez, J., 1995. Earth and Concrete Dams, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain

Finn, W.D.L., Yogendrakumar, M., Yoshida, N., Yoshida, H., 1986. TARA-3: A Program to Compute The Response of 2D Embankments and Soil Structure Interaction Systems to Seismic Loading, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Finn, W.D.L., 1988. Dynamic Analysis in Geotechnical Engineering, Earthq. Engrg. And Soil Dyn. II, ASCE, pp. 523-592.

Hatanaka, M., 1952. Three Dimensional Consideration on the Vibration Of Earth Dams, J. Jap. Soc. Civ. Eng., pp. 10.

- Hughes, J.R., 1993. The Finite Element Method, Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Prentice Hall, pp. 800.
- Idriss, I.M., Lysmer, J., Hwang, R., and Seed, H.B., 1973. A Computer Program For Evaluating the Seismic Response of Soil Structures by Variable Damping Finite Element Procedures, Report no. EERC, Univ. of Calif., Berkeley, pp. 73-16.
- Jansen, R.B., 1988. Advanced Dam Engineering Design, Construction and Rehabilitation, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 811.
- Köseoğlu, S., 1987. Temeller, Statiği ve Konstrüksiyonu 1, Temel Bilgiler, Matbaa Teknisyenleri Basım Evi, 3. Baskı, İstanbul.
- Makdisi, F.I., Kagawa, T., Seed, H.B., 1982. Seismic Response of Earth Dams in Triangular Canyons, J. of the Geotech. Engrg. Div., ASCE, GT10, pp. 1328-1337.
- Martinez, B., Bielak, T., 1980. On the Three Dimensional Seismic Response of Earth Structures, Proc. of the Seventh World Conf. on Earthq. Engrg., İstanbul, pp. 523-528.
- Mejia, L.H., Seed, H.B., Lysmer, J., 1982. Dynamic Analysis of Earth Dam in Three Dimensions, J. of the Geotech. Engrg. Div., ASCE, pp. 1586-1604.
- Mejia, L.H., Seed, H.B., 1983. Comparison of 2D and 3D Dynamic Analysis of Earth Dams, J. of the Geotech. Engrg. Div., ASCE, pp. 1383-1398.

- Naylor, D.J., Maranha , J.R., Maranha das Neves, E., Veiga Pinto, A.A., 1997. A Back Analysis of Beliche Dam, *Geotechnique*, 47, no:2, pp. 221-233.
- Orhon, M., 1997. Baraj tiplari ve Yapım kriterleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri odası yayını, yıl 42, sayı 391, Barajlar I, s 12.
- Özcan, Z., Kasım 1998. Toprak ve Kaya Dolgu Barajların Elasto-Plastik Dinamik Davranışı, İ.T.Ü., Doktora Tezi.
- Prevost, J.H., Abdel-Ghaffar, A.M., Elgamal, A.W.M., 1985. Non-linear Hysteretic Dynamic Response of Soil Systems, *J. Engrg. Mech., ASCE*, pp. 696-713.
- Singh, B. and Varshney, R.S., 1995. *Engineering for Embankment Dams*, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 732 p.
- Sucuoğlu, H., 1988. Su Yapıları Semineri, Samsun, O.D.T.Ü., 140-158 s.
- D.S.İ., 2000. Karacaören I barajı maksimum Tip Enkesit Projesi. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı D.S.İ. Isparta Bölge Müdürlüğü, Isparta.
- D.S.İ., 1993. Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı D.S.İ. Genel Müdürlüğü, İzmir, 37 s.
- D.S.İ., 1985. Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı D.S.İ. Genel Müdürlüğü, Adana.
- Wilson, E.L., Habibullah, A., CSI, 1992. *Sap90 Users Manual*, California, Berkeley, U.S.A.

Yiangos, A., Prevost, J.H., 1991. Two-dimensional Two-phase Elasto-Plastic Seismic-Response of Earth Dams, Research rep., NCEER, State University of New York, Buffalo, U.S.A.



7 EK

İkinci programın kullanılmasıyla 3 boyutlu olarak elde edilen gerilme ve deformasyon şekilleri, mod şekil numarasına göre elde edilen deplasmanlar sayfalar halinde sunulmuştur.

Deprem Araştırma Enstitüsünün (1977) kayıtlarına göre Çaldıran depremi 24 Kasım 1976 tarihinde meydana gelmiştir. Deprem 6.9 büyüklüğünde gerçekleşmiştir. 9232 ev yıkılmış ve 3840 kişi ölmüştür (Bayülke vd., 1990). Depremde 254 km'lik yüzey kırılmış ve bazı noktalarda 2-3 m'lik açıklıklar meydana gelmiştir. Van'dan 80 km'de ve Ağrı'dan 90 km'de deprem tetiklenmiş ve maksimum ivmeler Van'da g değerinin %7'si, Ağrı'da g değerinin %3'ü olmuştur. Deprem hareketi İran'da Maku bölgesinde kaydedilmiştir (Bayülke vd., 1990).



DEPREM ARASTIRMA Dairesi BASKANLIĞI DEPREM KUŞKUSUZLUĞU SUBE KUDURLUĞU

CONNECT-ASSORTMENT
NEUTRALITY AXIS

PLACE
HAKU-IRAN

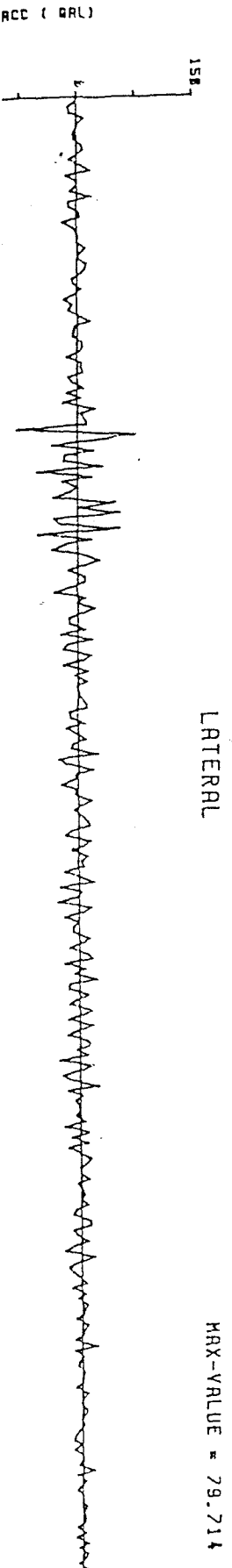
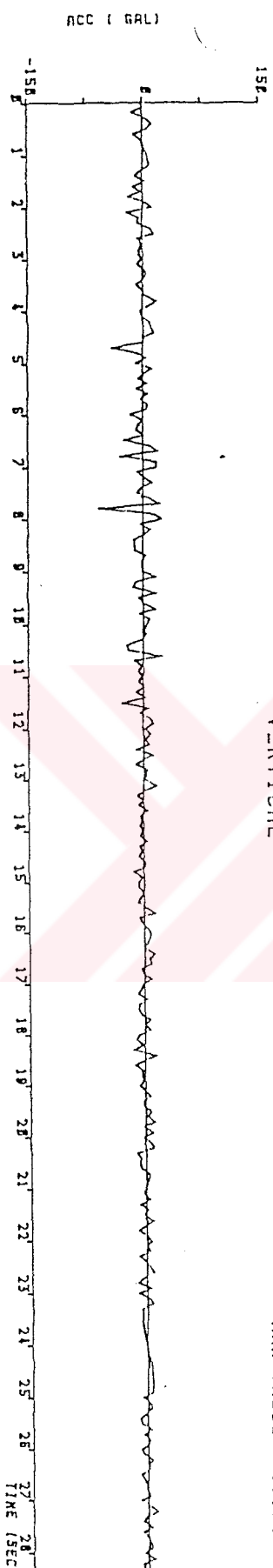
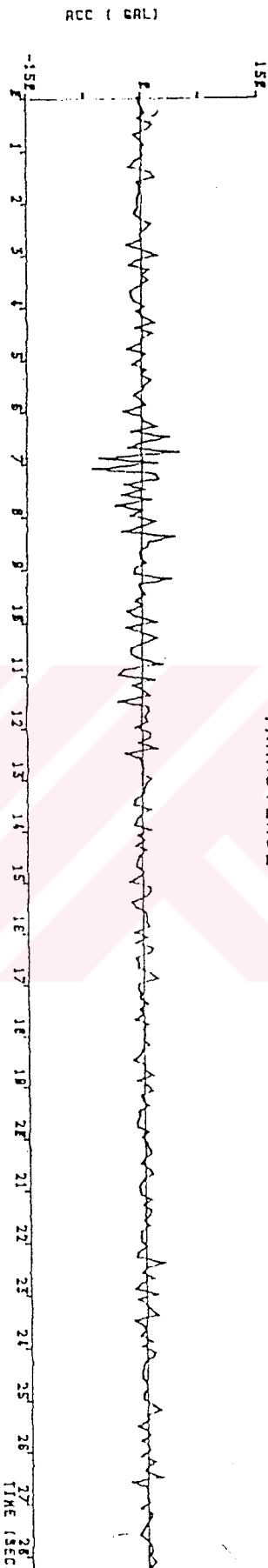
DATE
24.11.1976

SAMPLE-NO.
283

SAMPLE-INTERVAL
0.100 (SEC)

CONTINUE-TIME
20.330 (SEC)

PAGE: 1



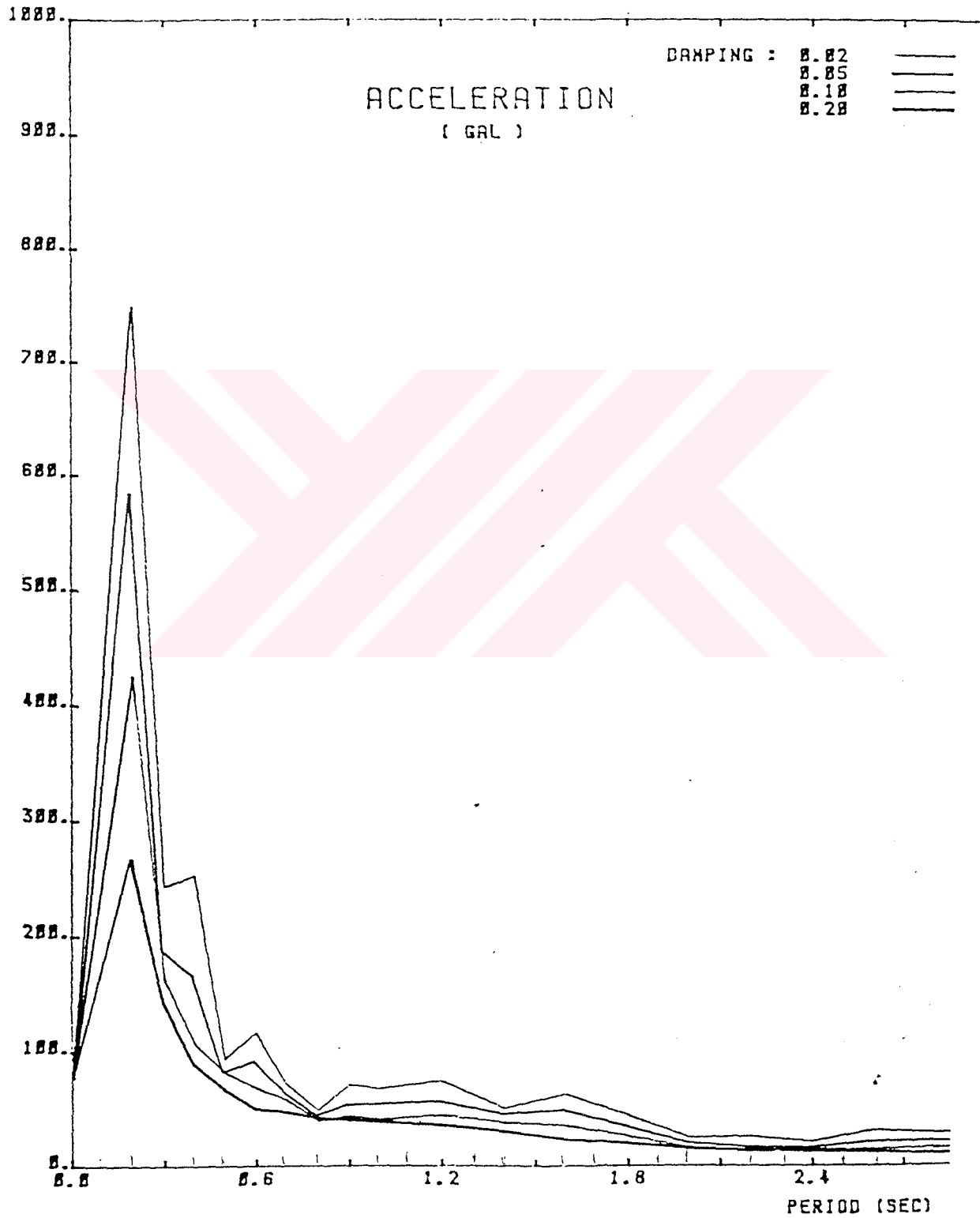
DEPREM ARASTIRMA DAIRESI BASKANLIGI DEPREM MUHENDISLIGI SUBE MUDURLUGU

***** RESPONSE SPECTRUM ***** PAGE:

PLACE
MAKU-IRAN

DATE
24.11.1976

DIRECTION
LATERAL



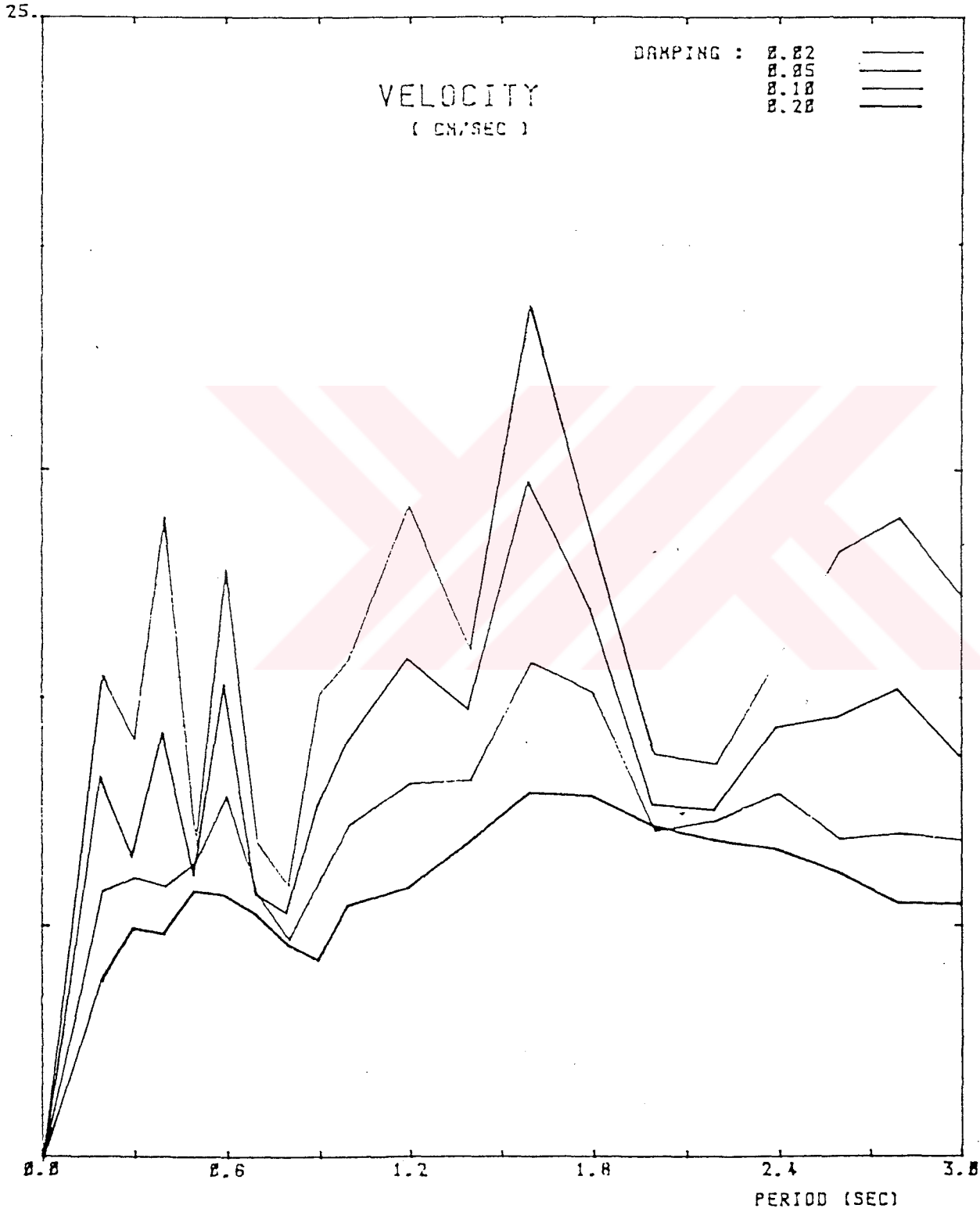
EPREM ARASTIRMA DAİRESİ BAŞKANLIĞI DEPREM MÜHENDİSLİĞİ SUBE MÜDÜRLÜĞÜ

***** RESPONSE SPECTRUM ***** PAGE: 2

LACE
AKU-IRAN

DATE
24.11.1976

DIRECTION
LATERAL



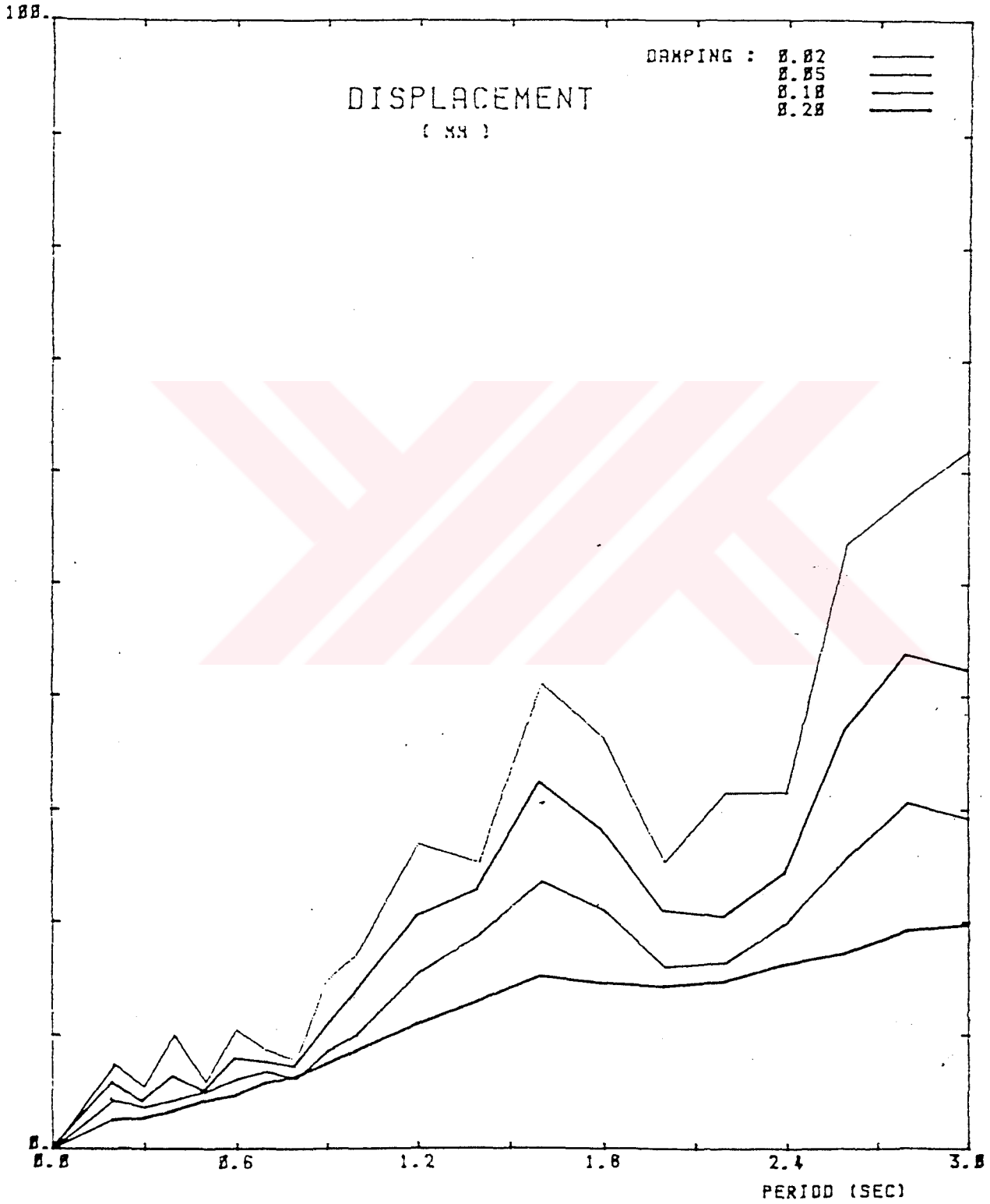
DEPREM ARASTIRMA DAIRESI HASKANLIGI DEPREM MUHENDISLIGI SUBE MUDURLUGU

***** RESPONSE SPECTRUM ***** PAGE: 3

PLACE
MAKU-IRAN

DATE
24.11.1976

DIRECTION
LATERAL



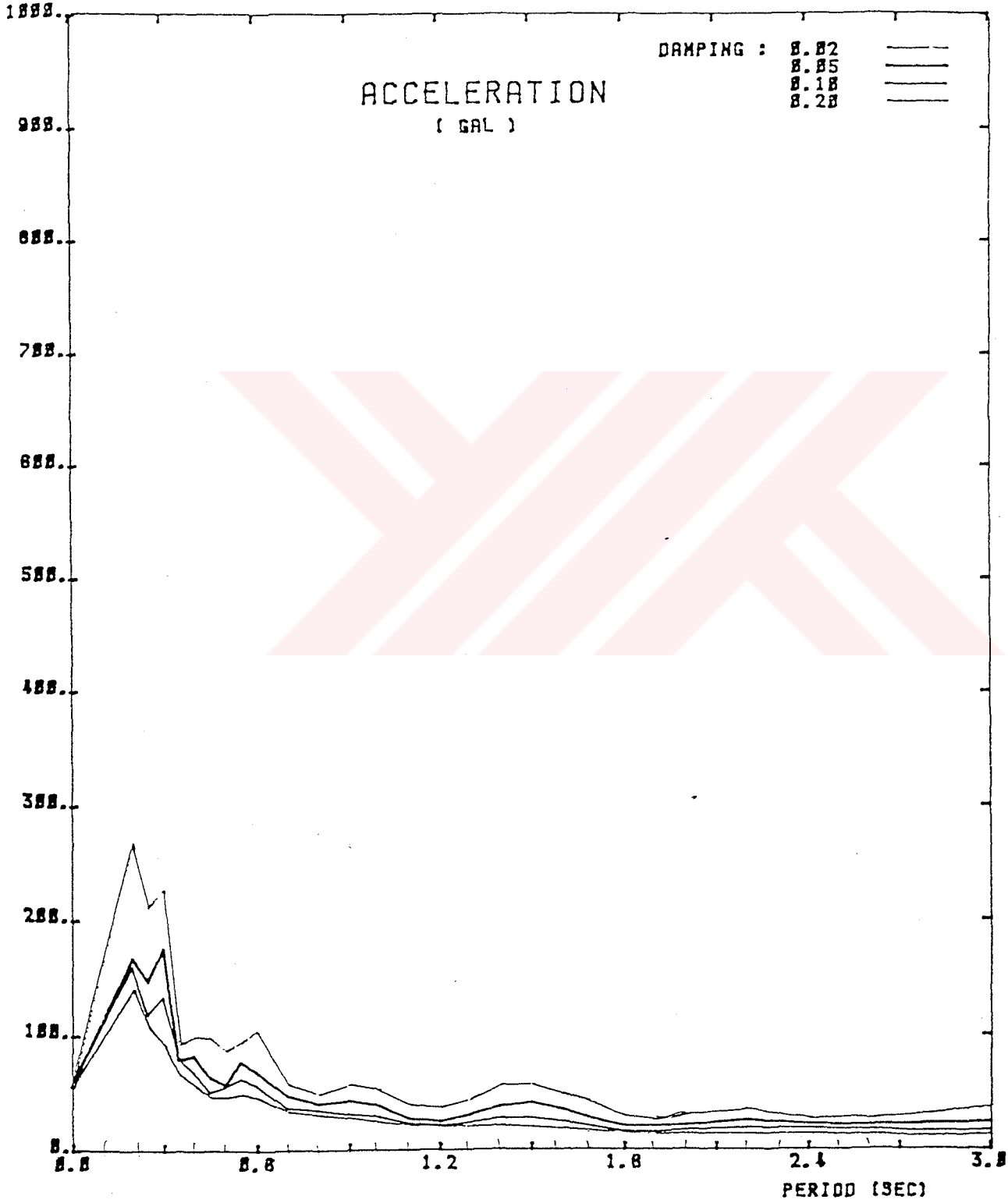
DEPREM ARASTIRMA DAIRESI BASKANLIGI DEPREM MUHENDISLIGI SUBE MUDURLUGU

***** RESPONSE SPECTRUM ***** PAGE: 4

PLACE
MAKU-IRAN

DATE
24.11.1976

DIRECTION
VERTICAL



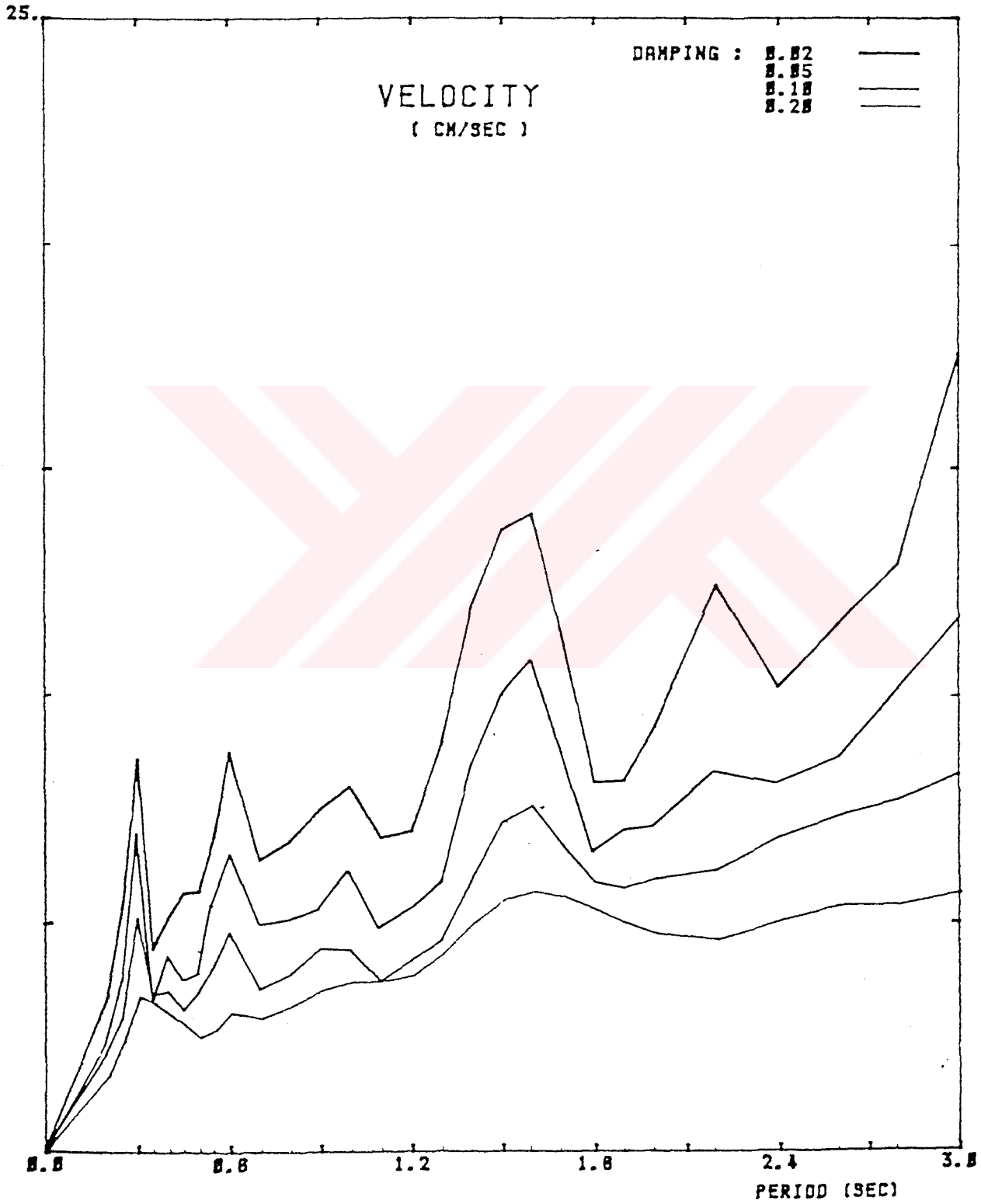
DEPREM ARASTIRMA DAIRESI BASKANLIGI DEPREM MUHENDISLIGI SUBE MUDURLUGU

***** RESPONSE SPECTRUM ***** PAGE: 5

PLACE
MAKU-IRAN

DATE
24.11.1976

DIRECTION
VERTICAL



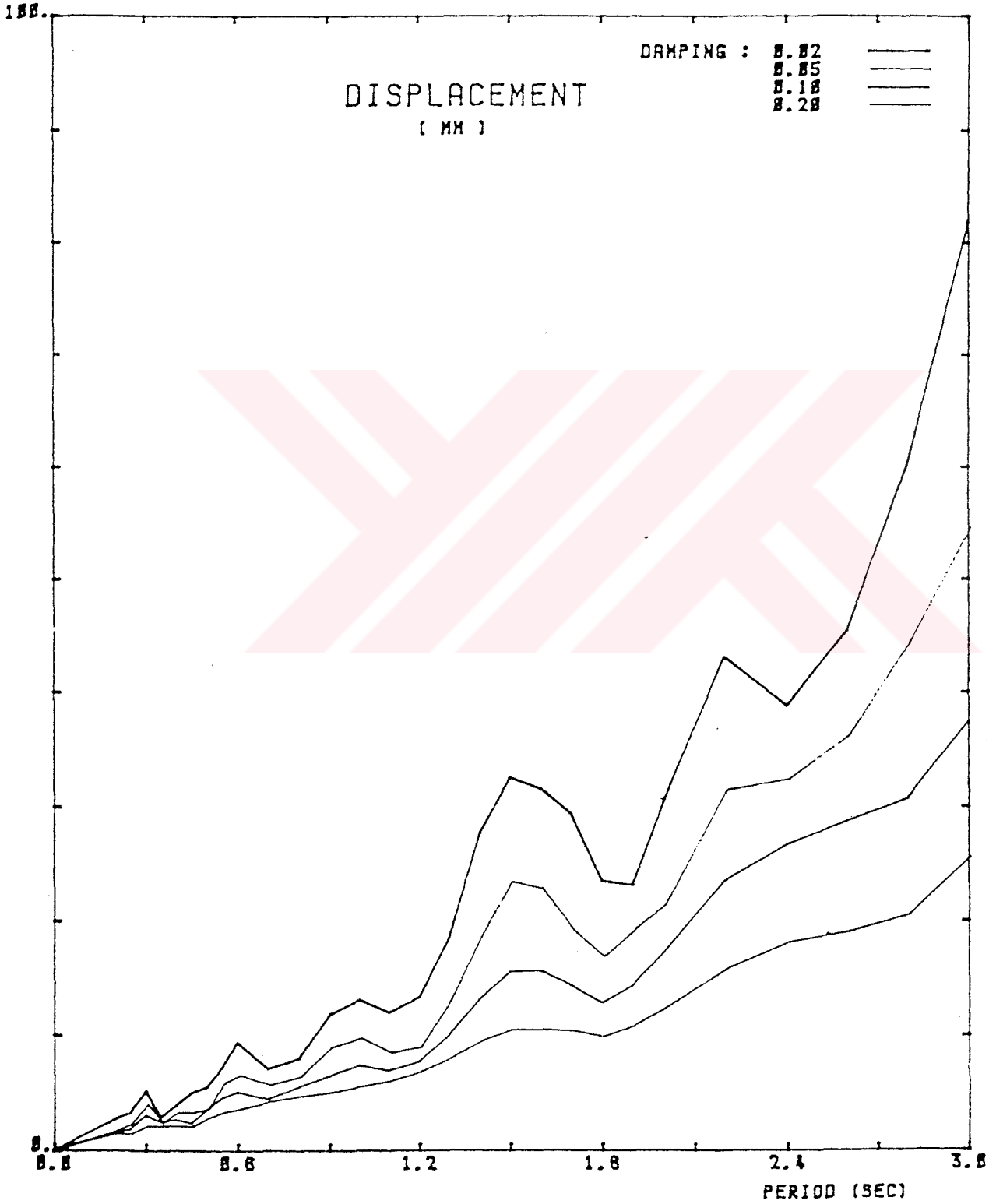
DEPREM ARASTIRMA DAİRESİ BAŞKANLIĞI DEPREM MÜHENDİSLİĞİ ŞUBE MÜDÜRLÜĞÜ

***** RESPONSE SPECTRUM ***** PAGE: 8

PLACE
MAKU-IRAN

DATE
24.11.1976

DIRECTION
VERTICAL



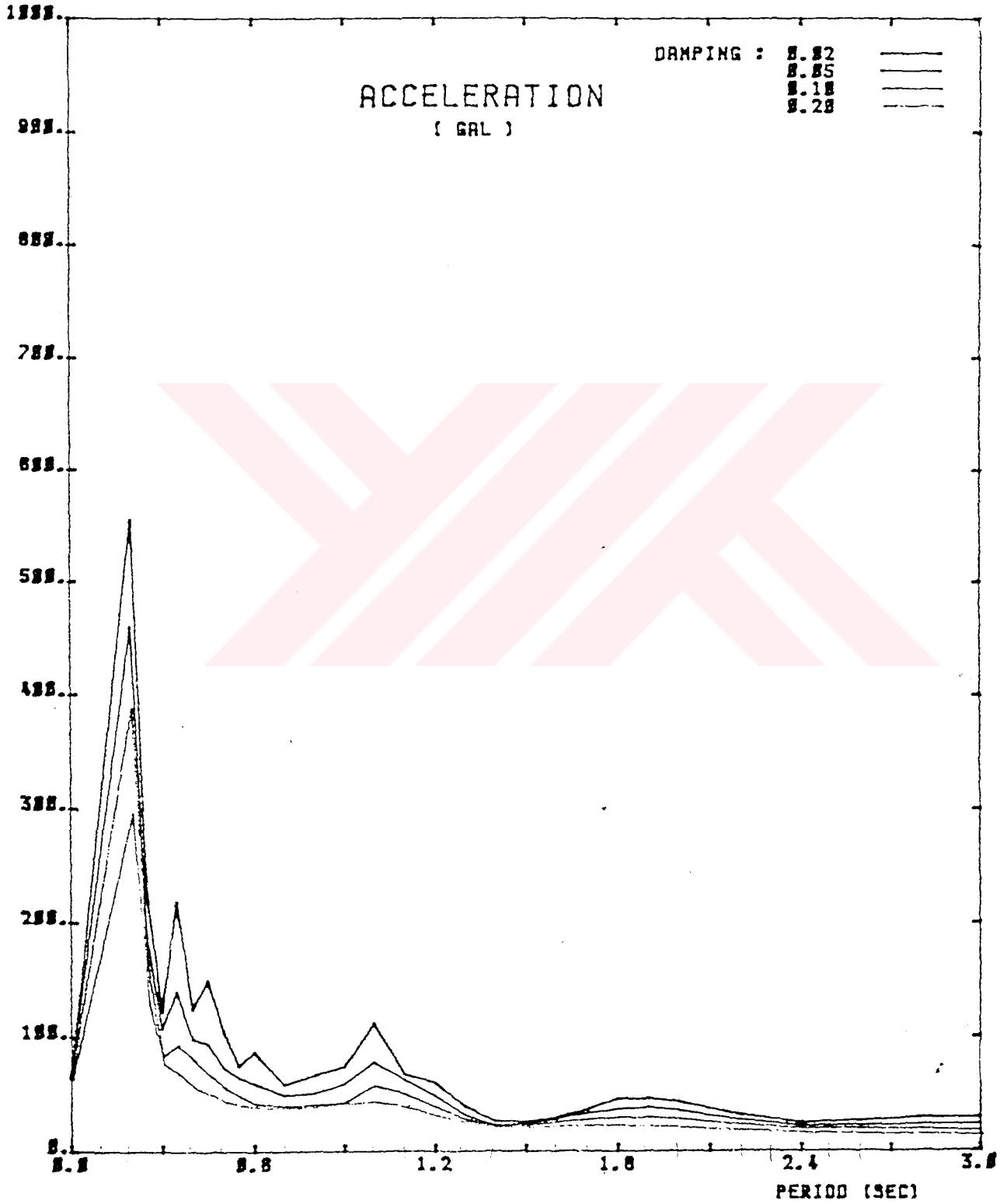
DEPREM ARASTIRMA DAIRESI BASKANLIQI DEPREM MUHENDISLIGI SUBE MUDURLUGU

***** RESPONSE SPECTRUM ***** PAGE: 7

PLACE
MAKU-IRAN

DATE
24.11.1976

DIRECTION
TRANSVERSE

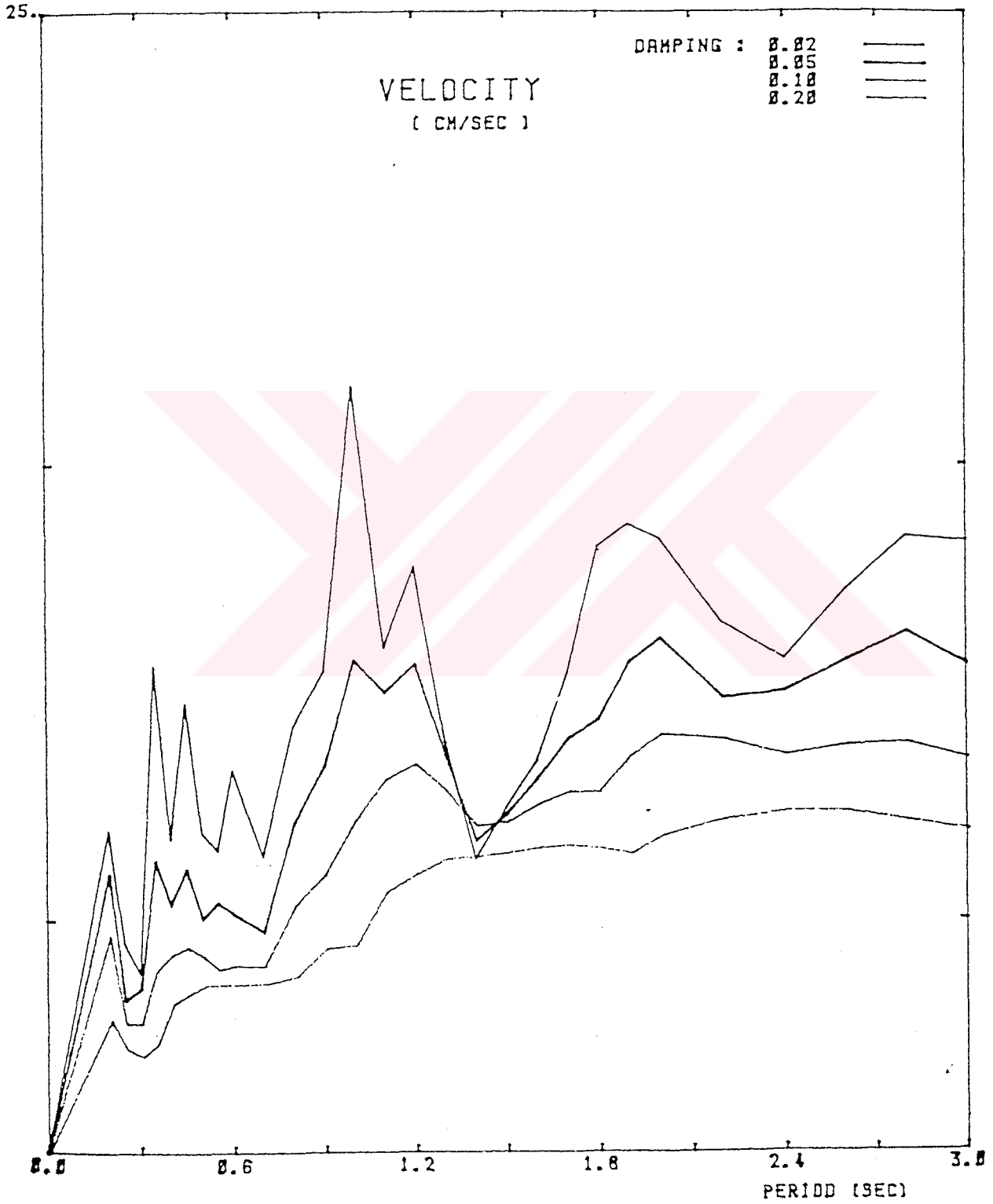


***** RESPONSE SPECTRUM ***** PAGE: 8

PLACE
MAKU-IRAN

DATE
24.11.1976

DIRECTION
TRANSVERSE



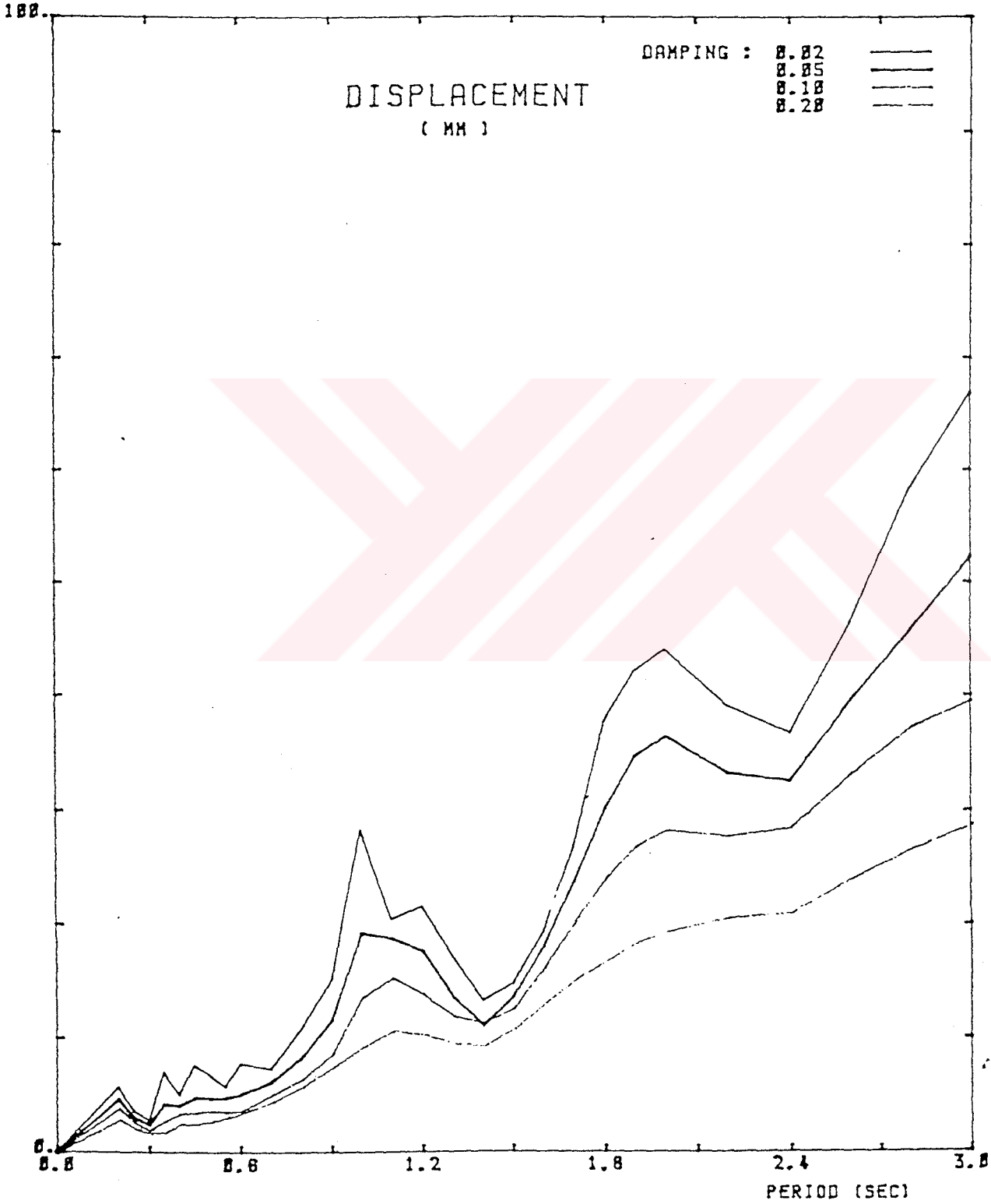
EPREM ARASTIRMA DAİRESİ BASKANLIĞI DEPREM MÜHENDİSLİĞİ ŞUBE MÜDÜRLÜĞÜ

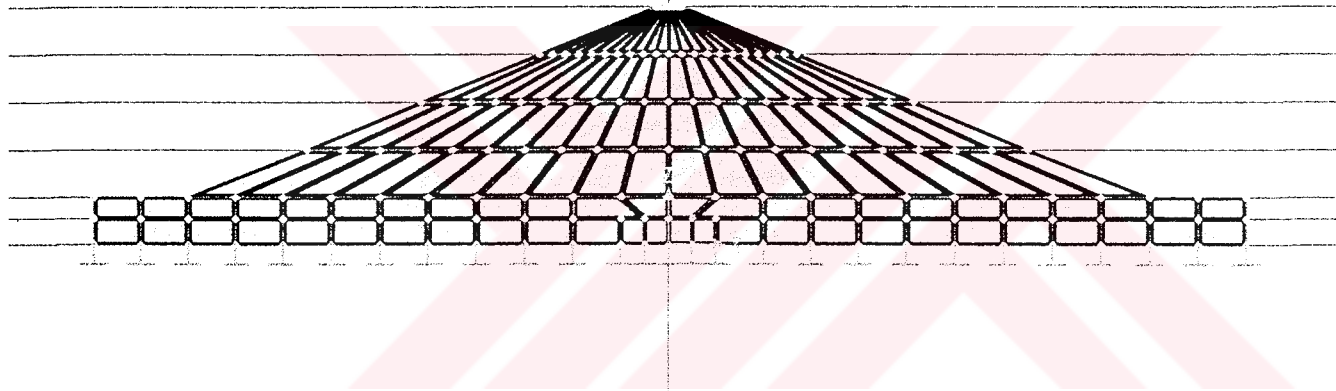
***** RESPONSE SPECTRUM ***** PAGE: 8

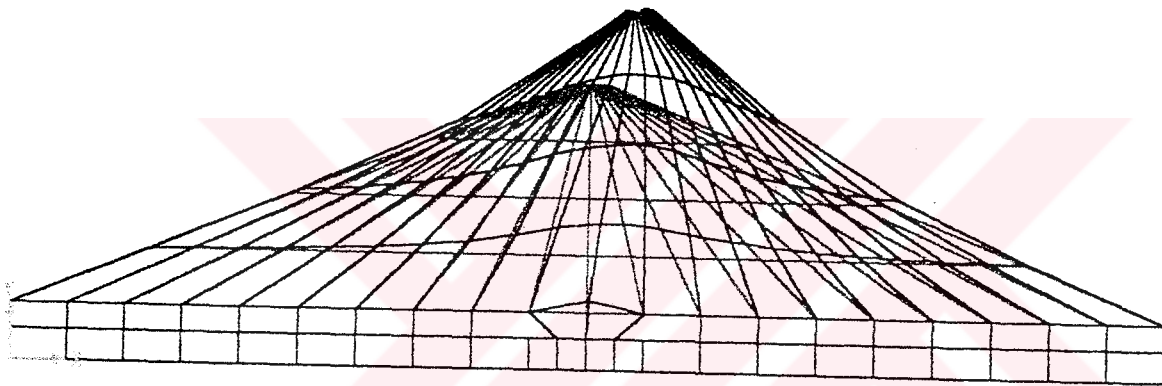
_ACE
AKU-IRAN

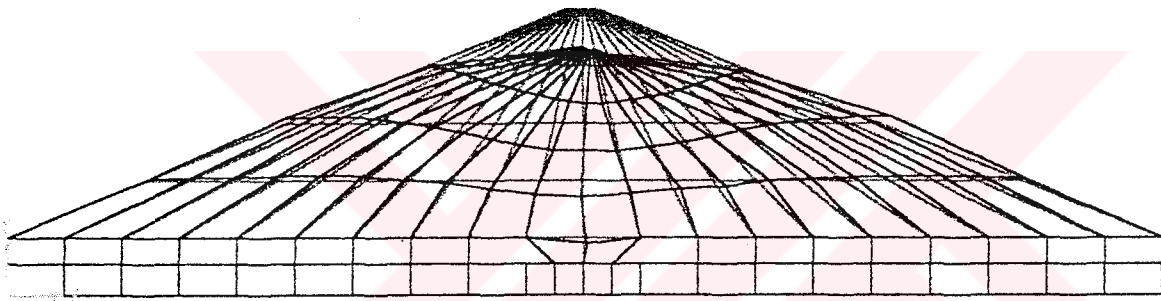
DATE
24.11.1976

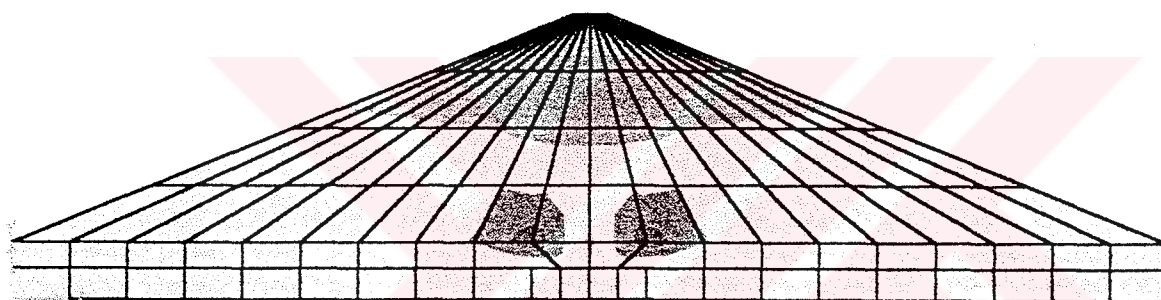
DIRECTION
TRANSVERSE

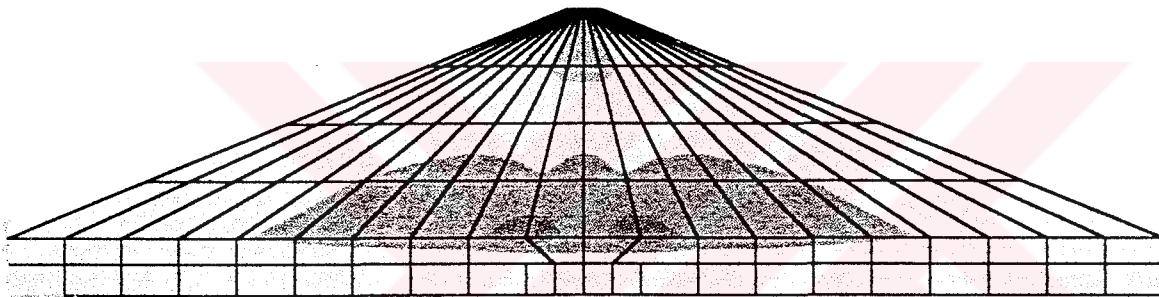






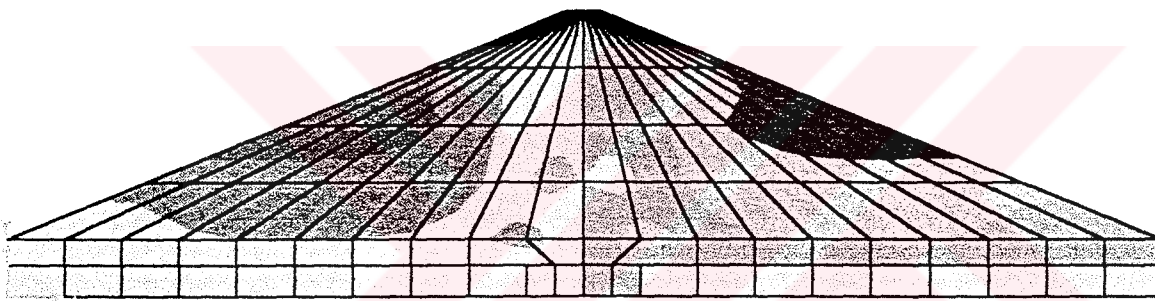




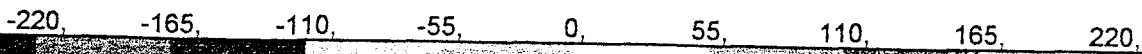
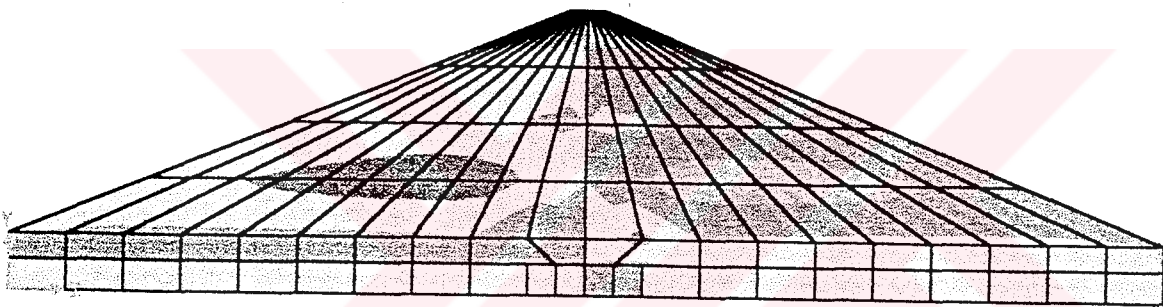


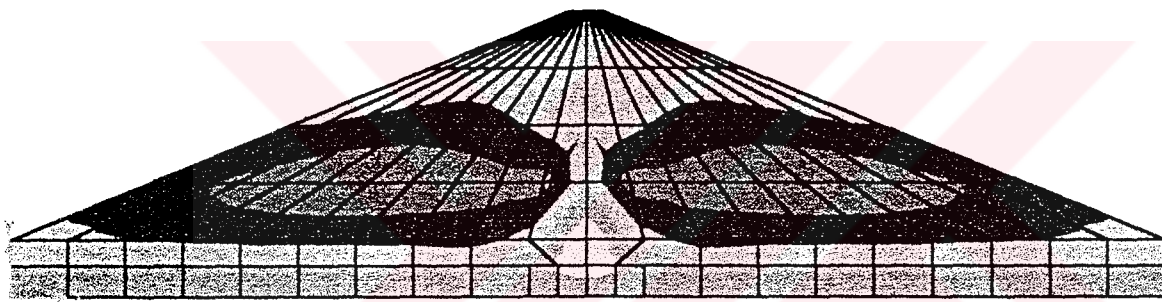
-3,00 -2,25 -1,50 -0,75 0,00 0,75 1,50 2,25 3,00 E+3





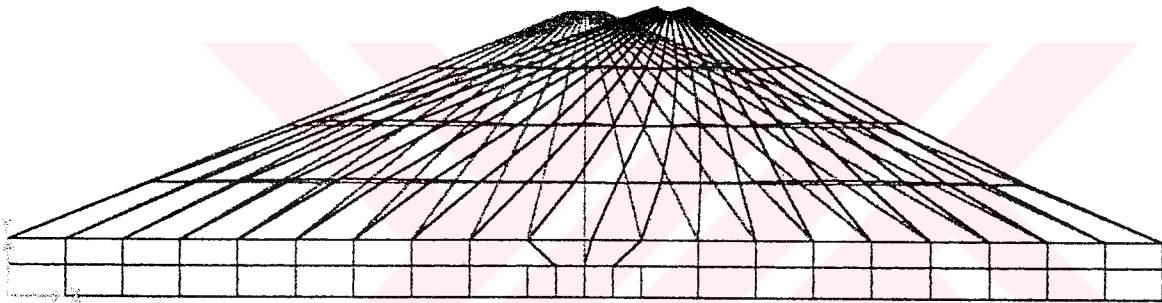
-520, -390, -260, -130, 0, 130, 260, 390, 520,

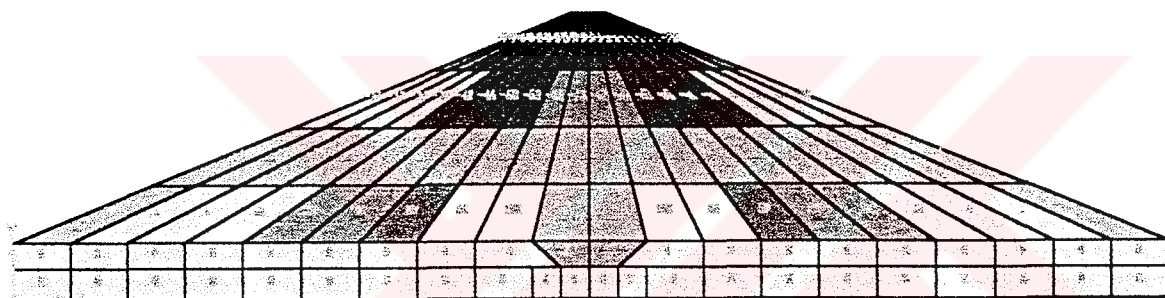




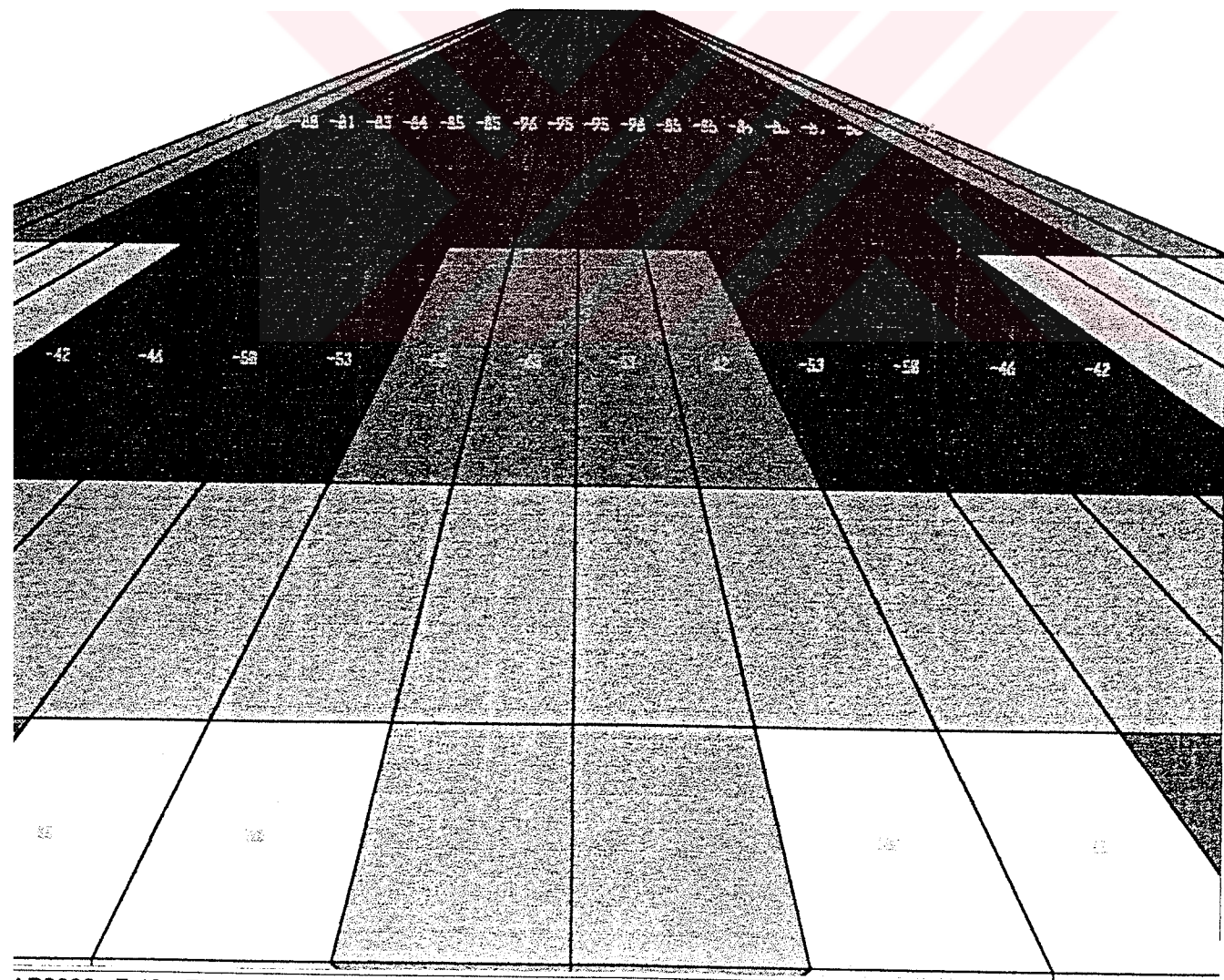
-180, -120, -60, 0, 60, 120, 180, 240, 300,

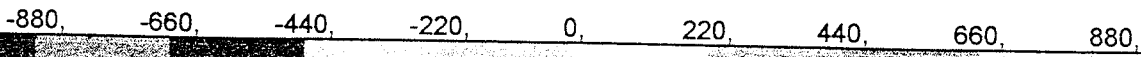
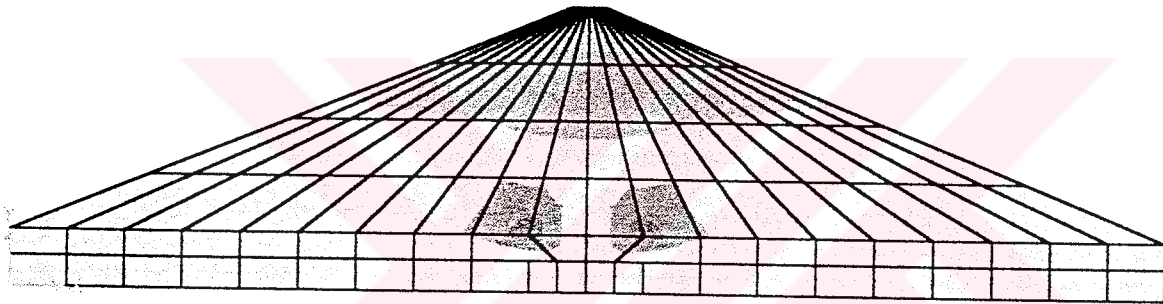


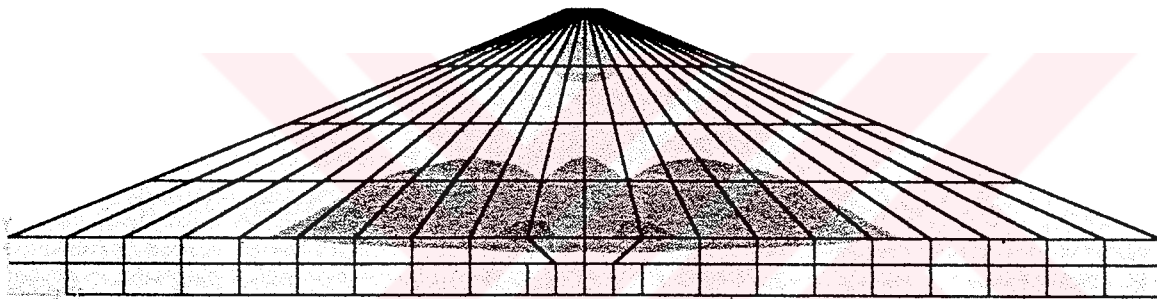




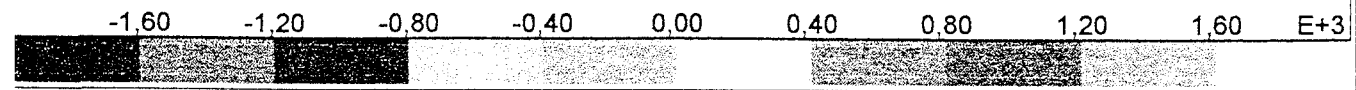
-80,0 -60,0 -40,0 -20,0 0,0 20,0 40,0 60,0 80,0

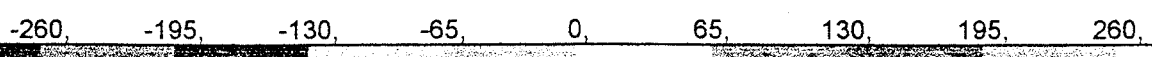
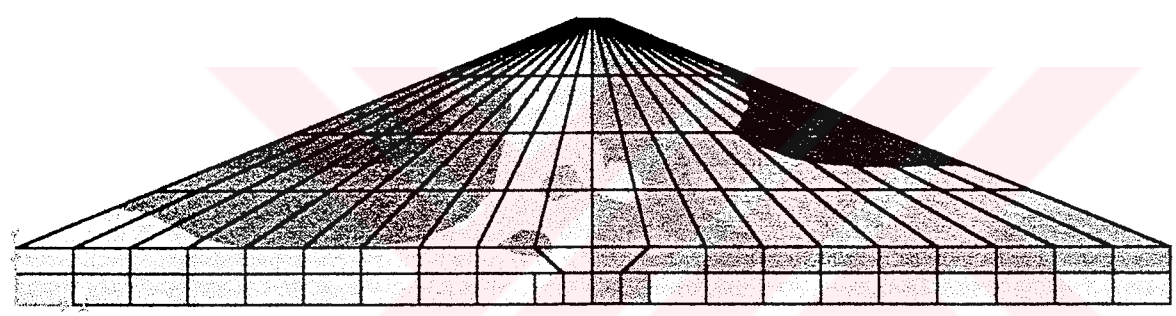


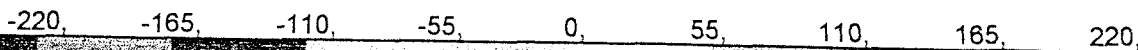
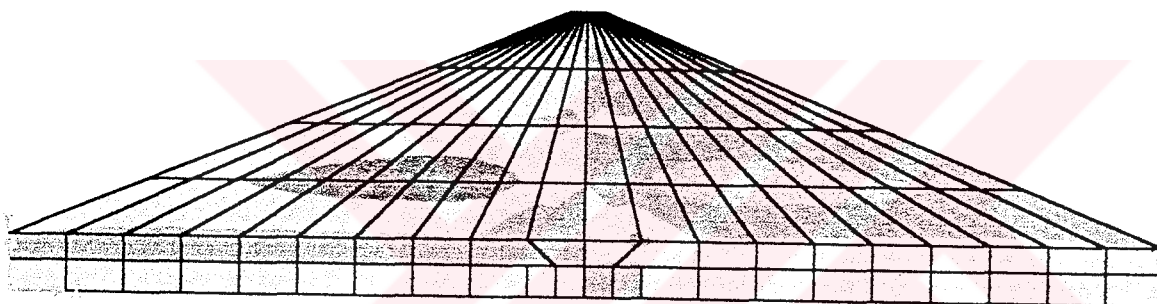


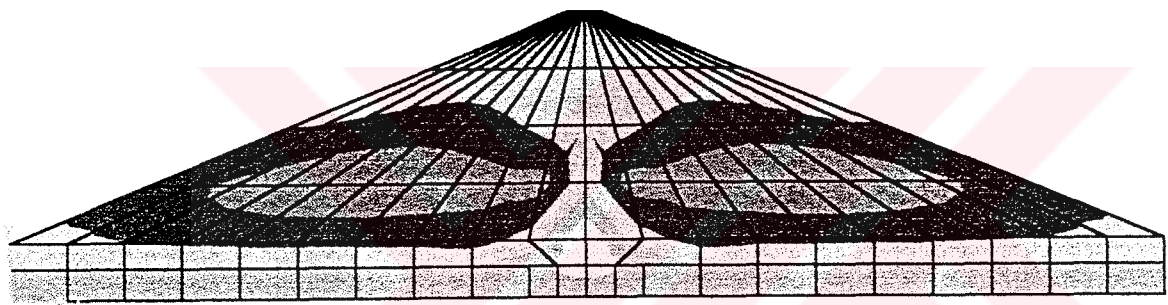


-1,60 -1,20 -0,80 -0,40 0,00 0,40 0,80 1,20 1,60 E+3

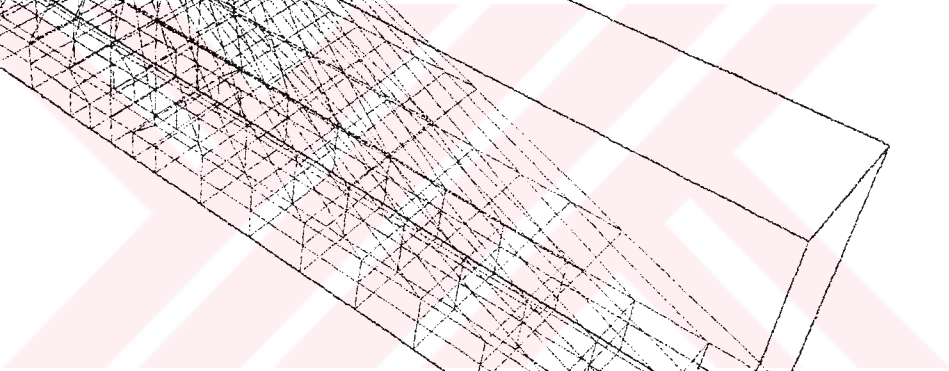
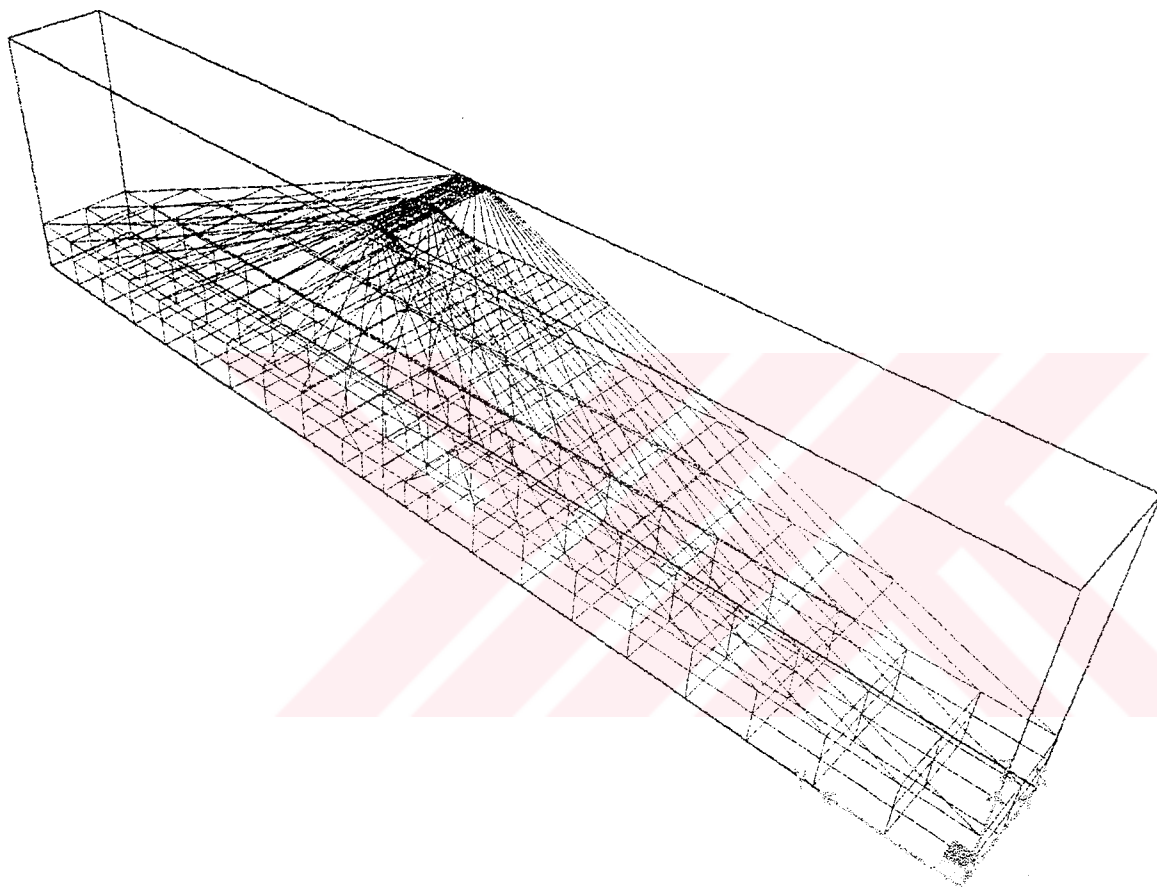


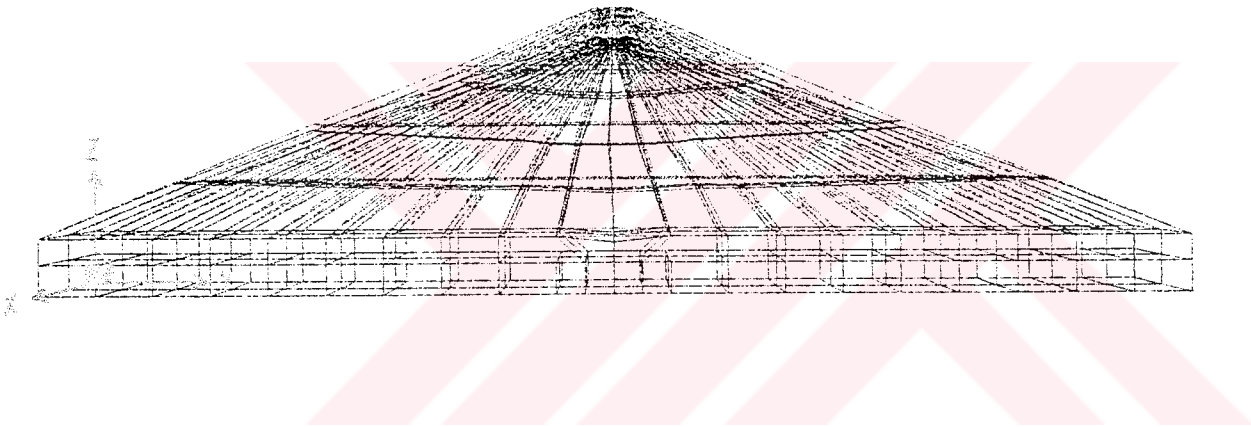


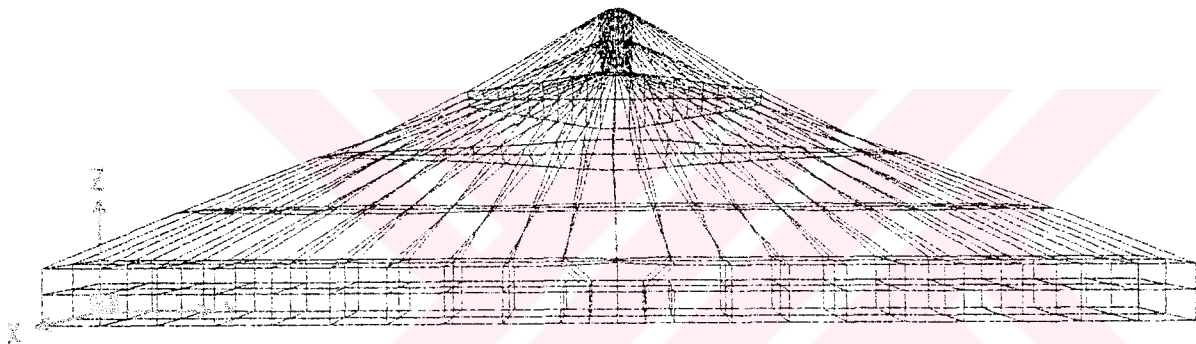


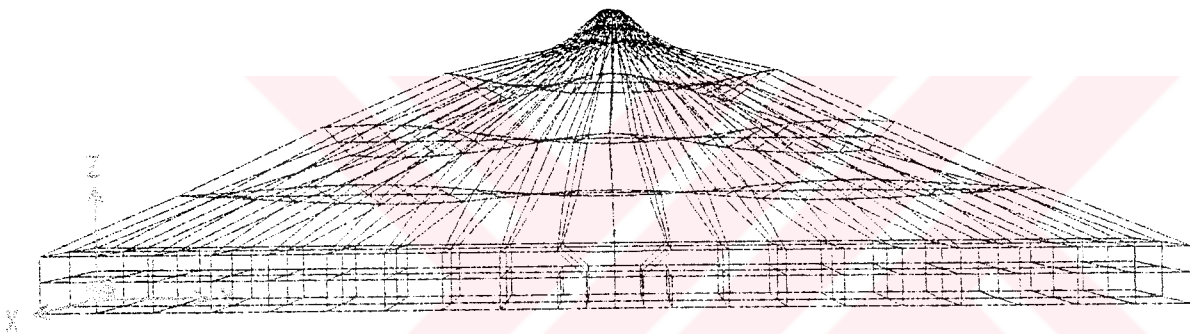


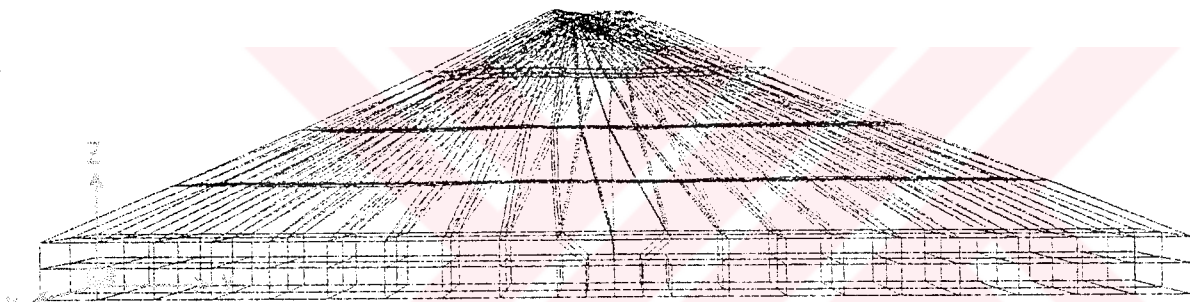
-180, -120, -60, 0, 60, 120, 180, 240, 300,

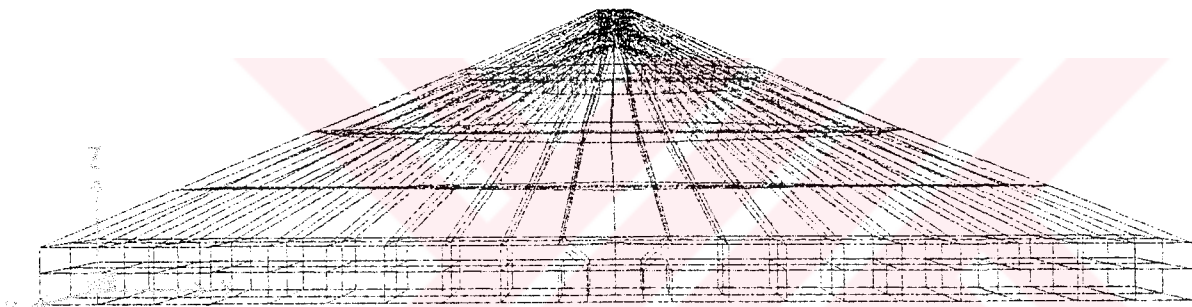


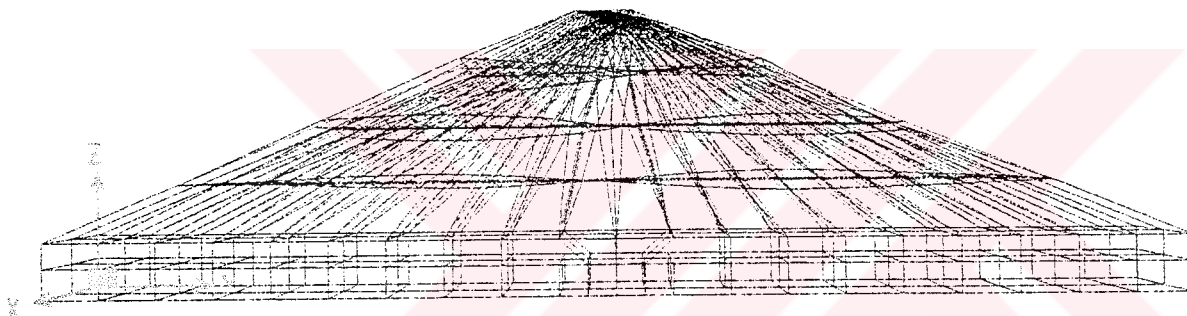


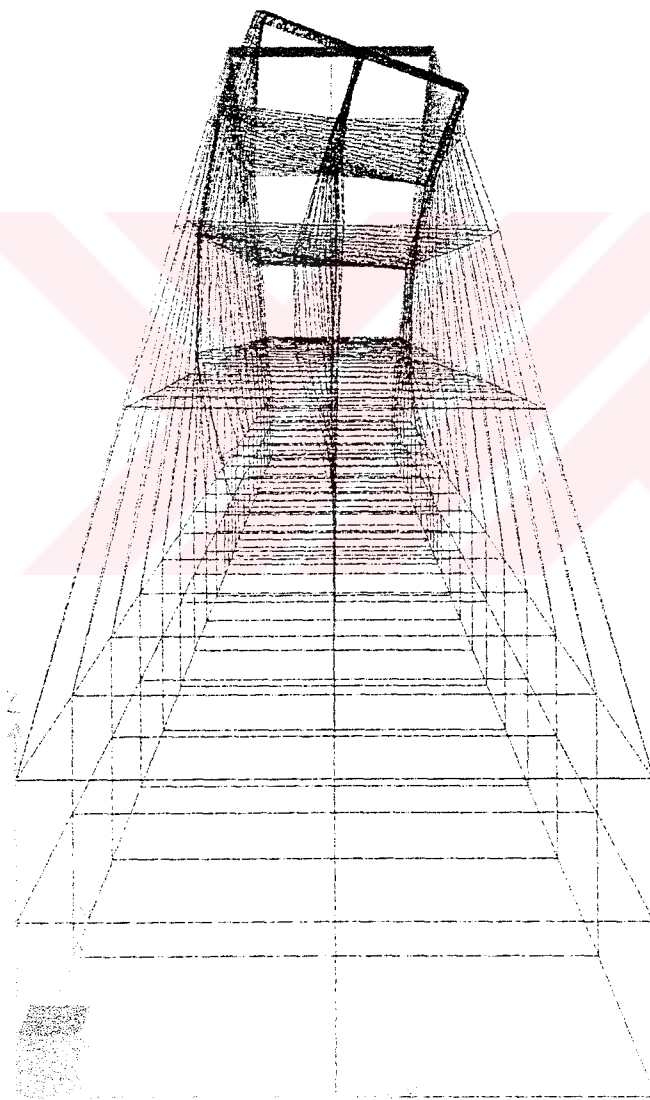


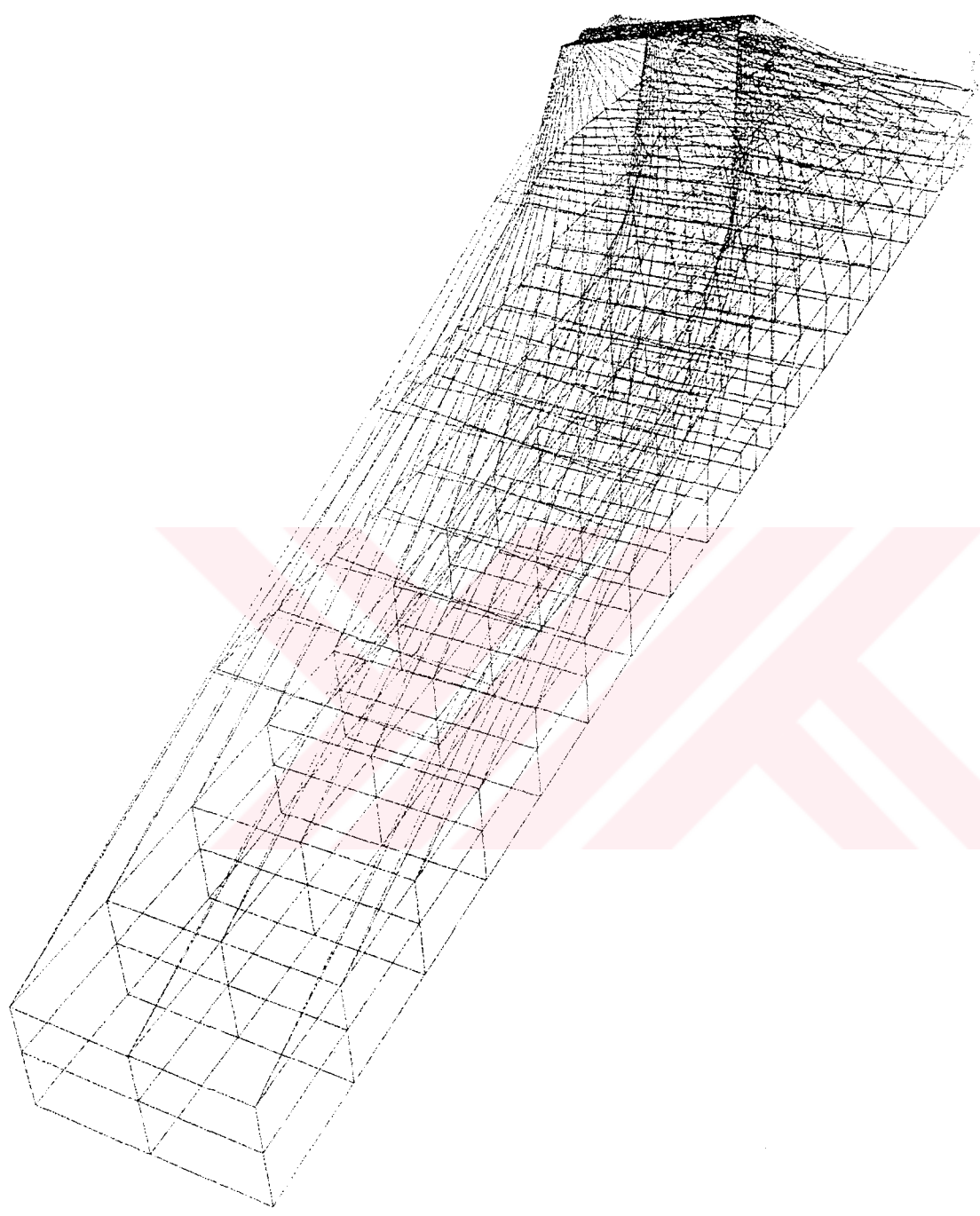


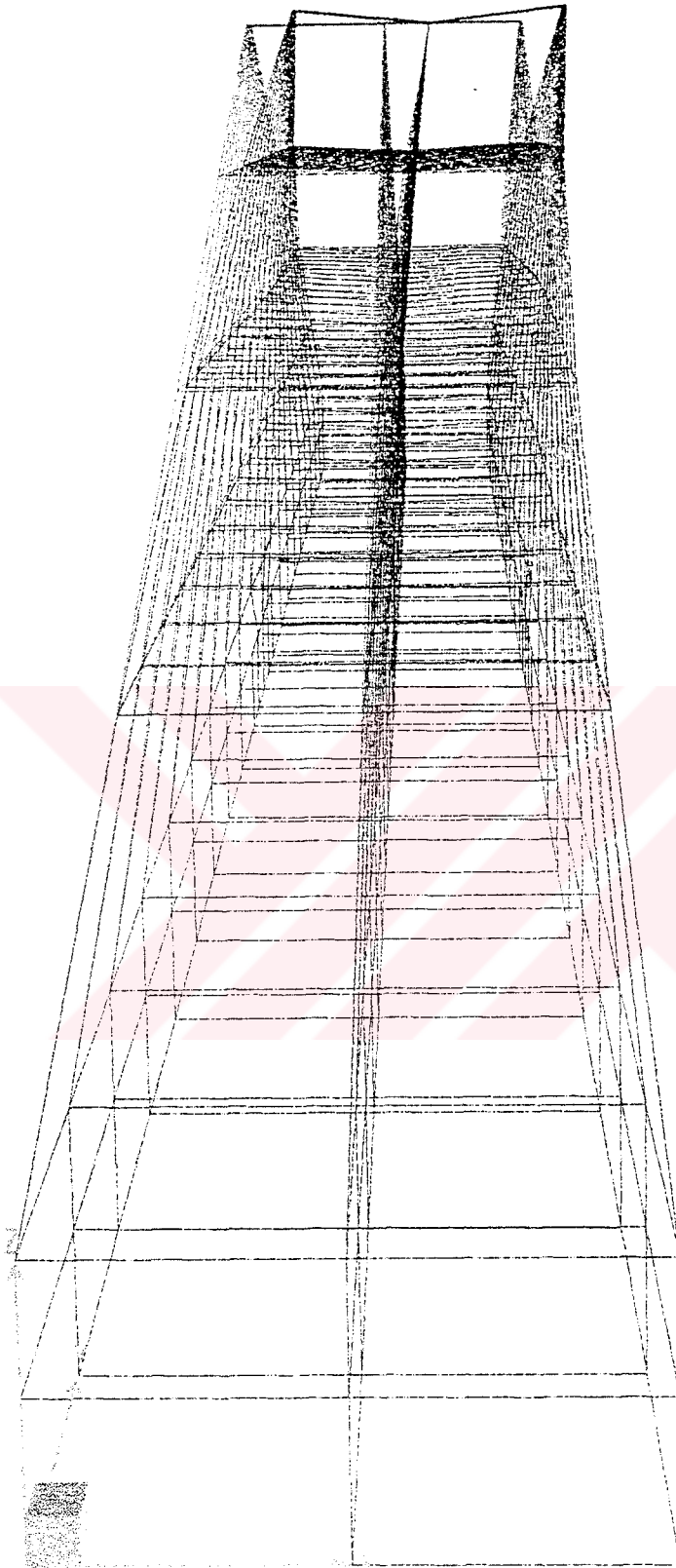


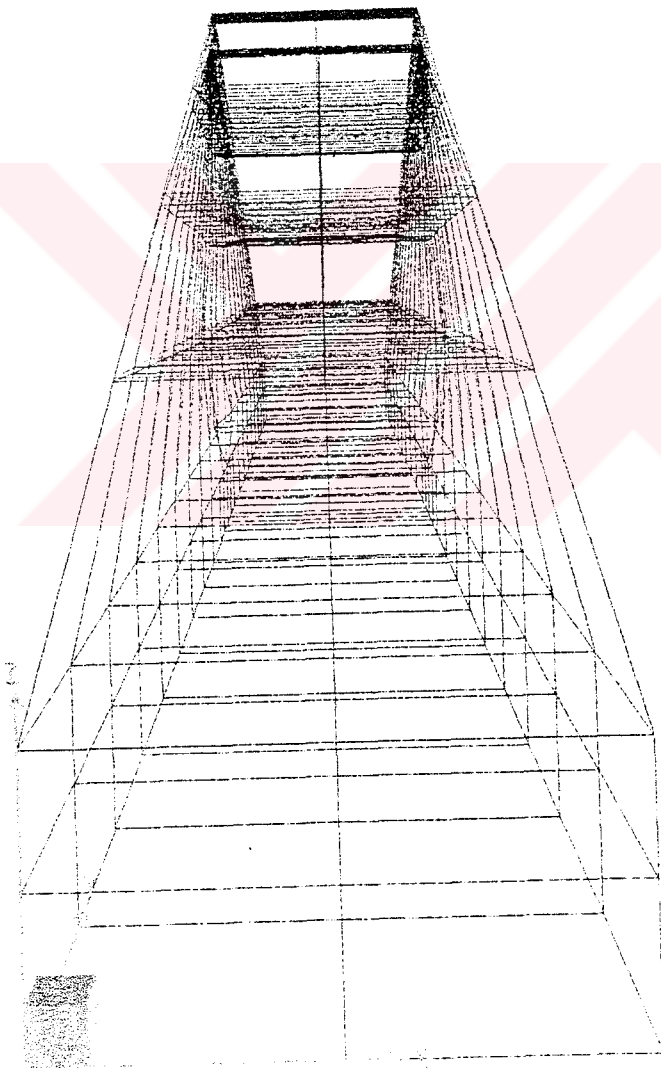


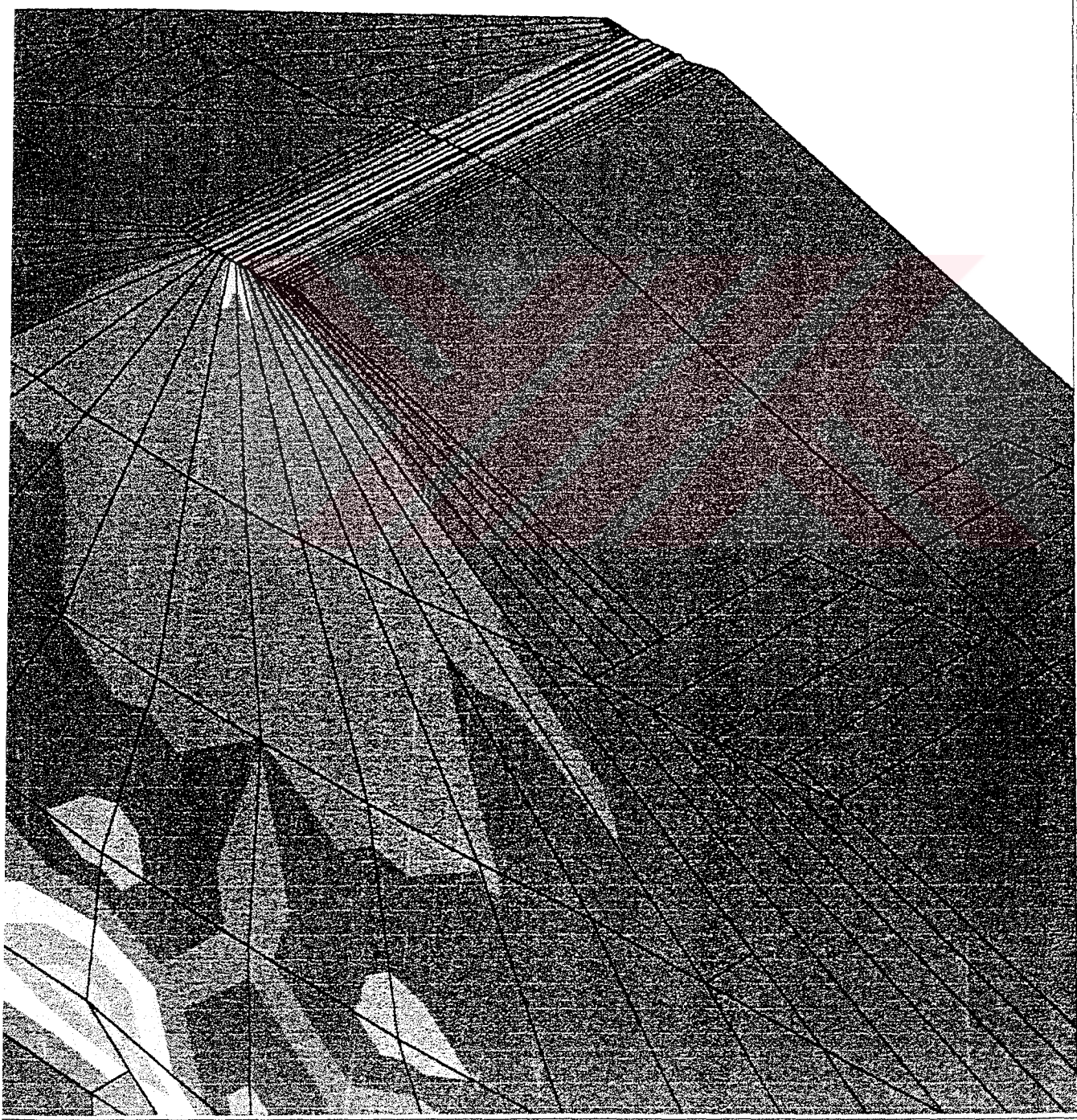




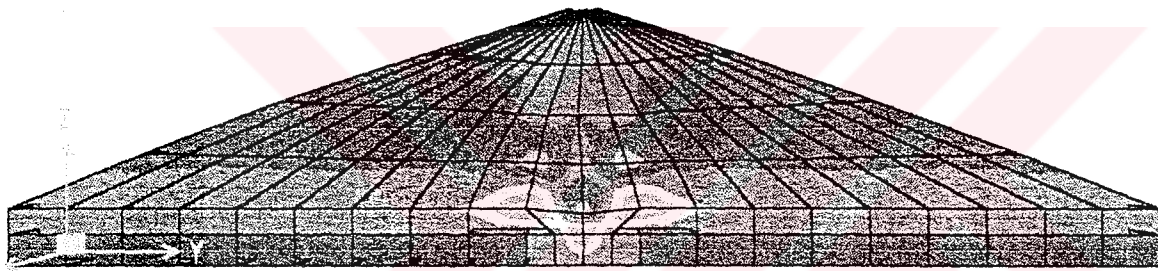




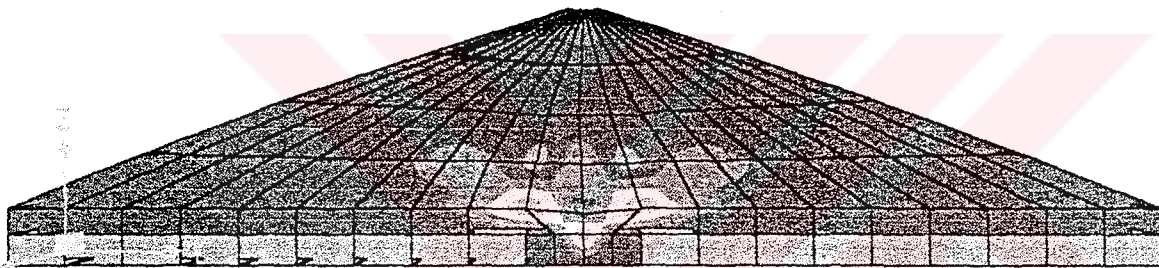




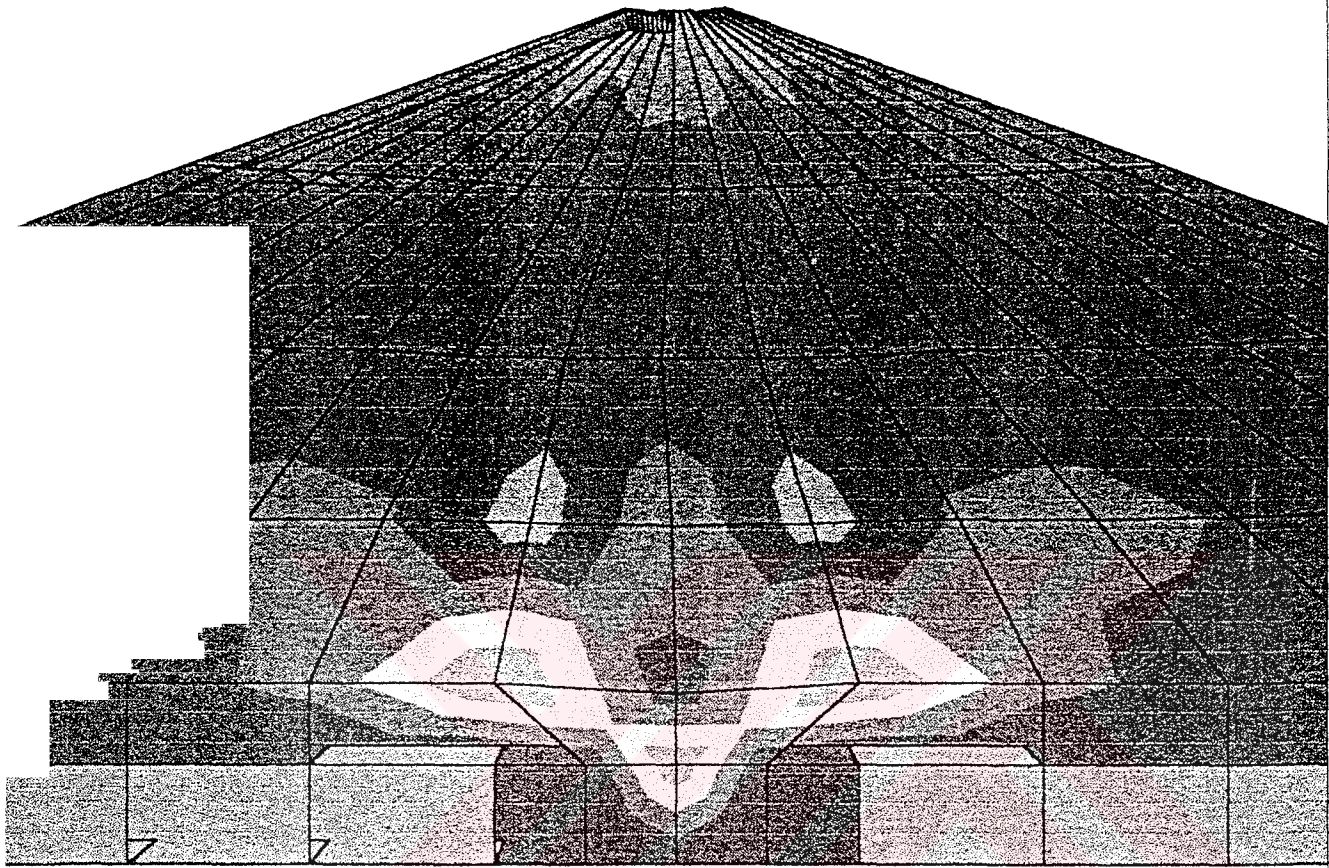
SAP2000 v7.40 - File:3bB40 - S11 Contours (3) - Ton-m Units



-168, -140, -112, -84, -56, -28, 0, 28, 56,

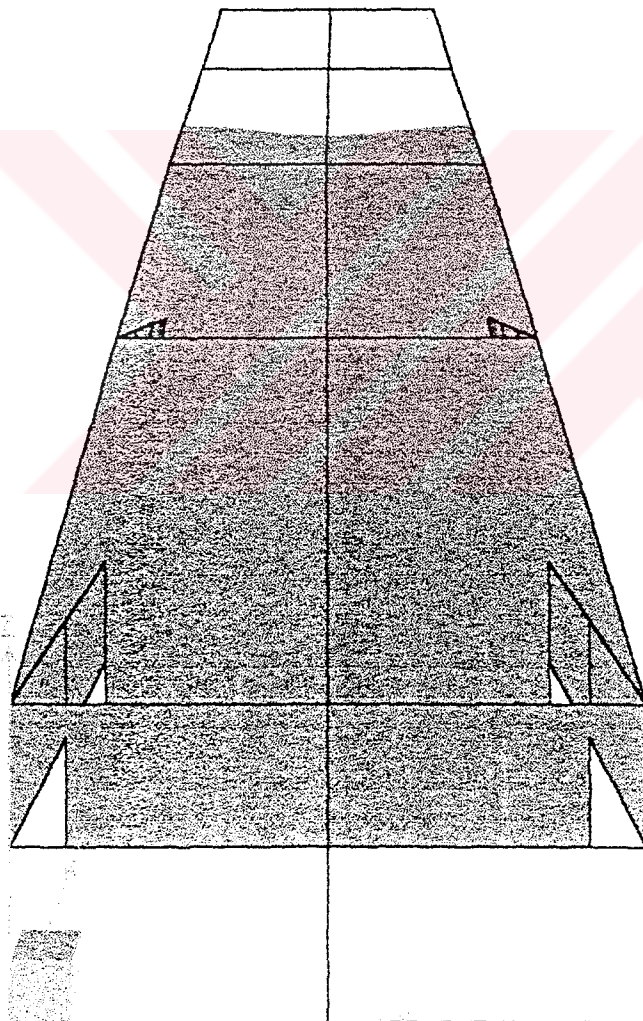


-182, -156, -130, -104, -78, -52, -26, 0, 26,

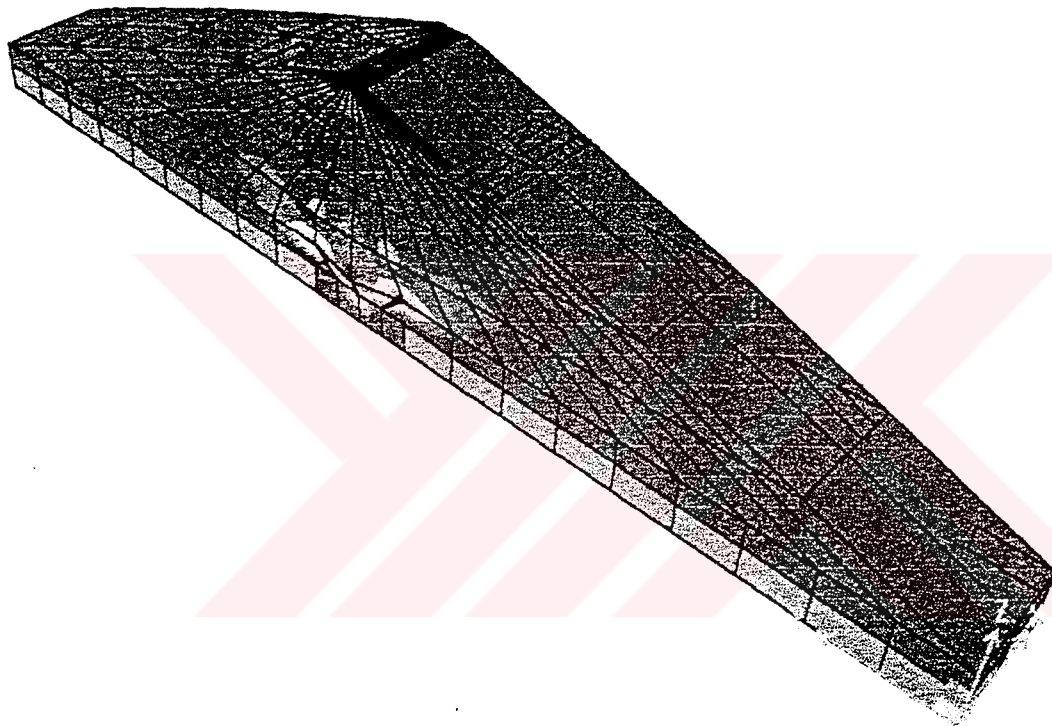


-182, -156, -130, -104, -78, -52, -26, 0, 26,

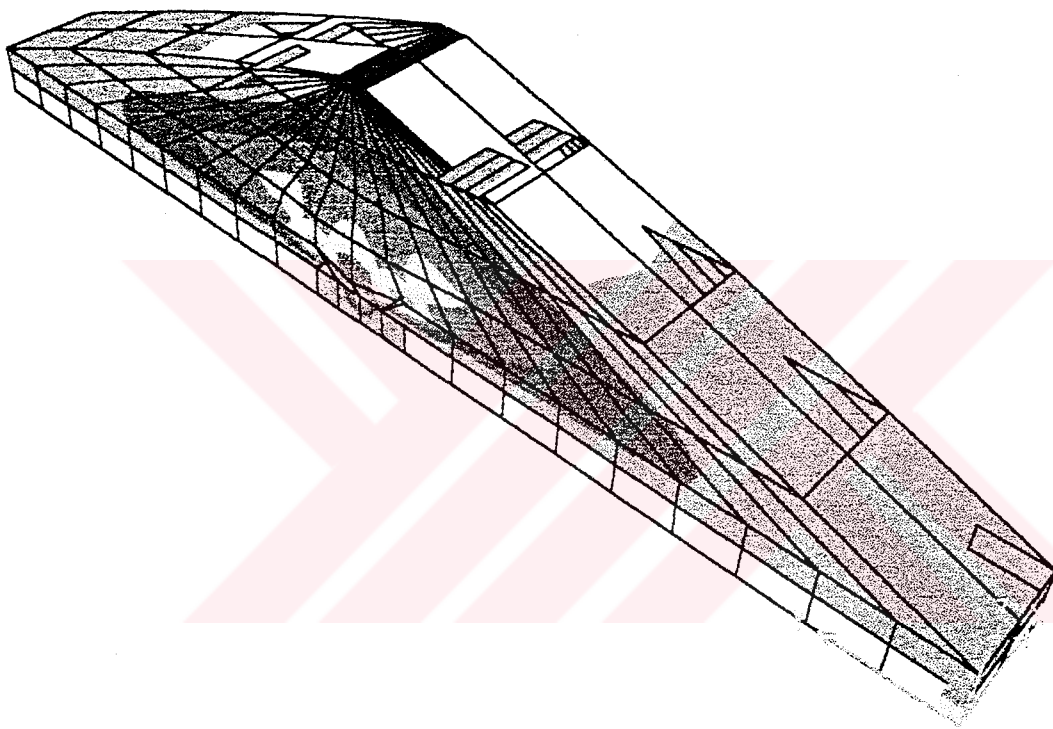




-224, -196, -168, -140, -112, -84, -56, -28, 0,

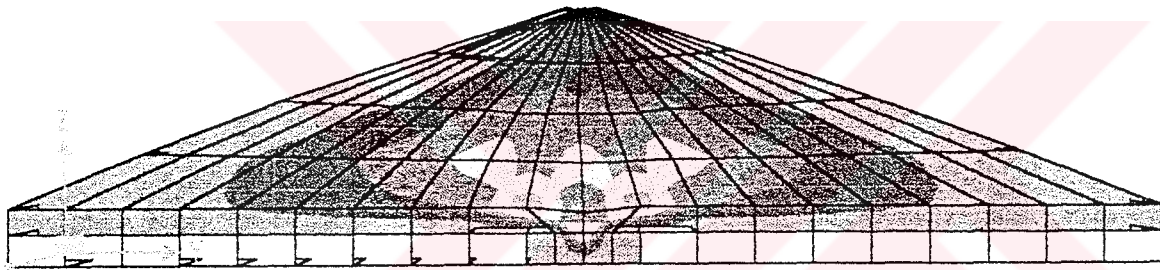


-182, -156, -130, -104, -78, -52, -26, 0, 26,



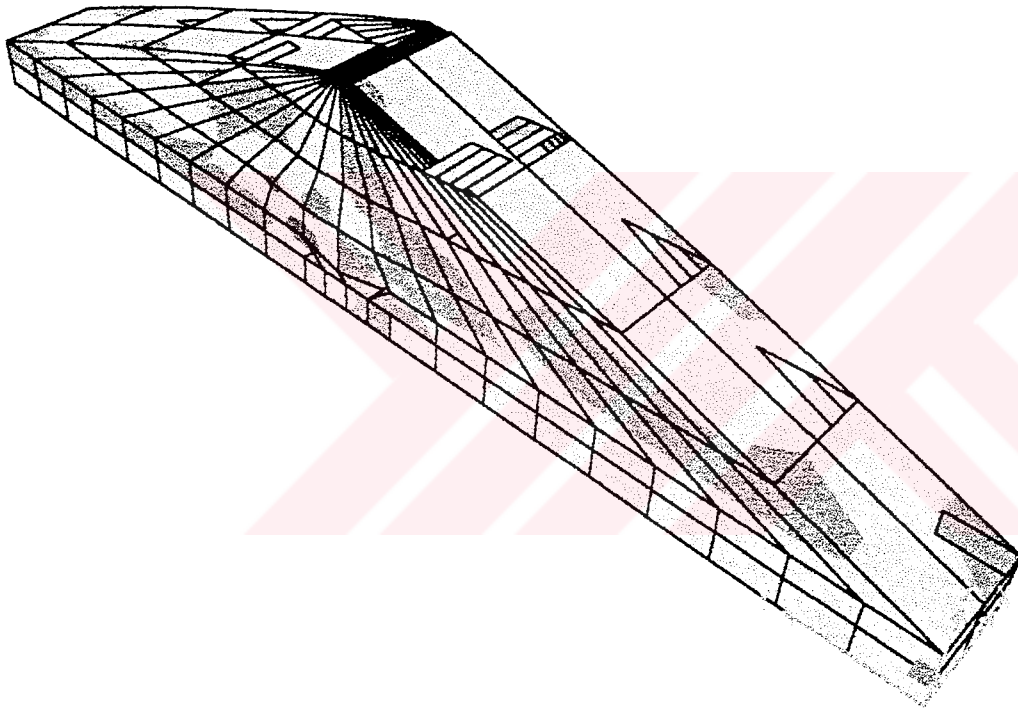
-224, -196, -168, -140, -112, -84, -56, -28, 0,



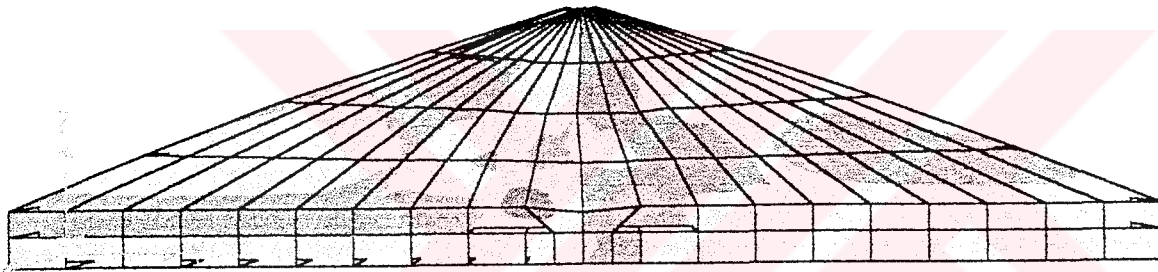


-224, -196, -168, -140, -112, -84, -56, -28, 0,



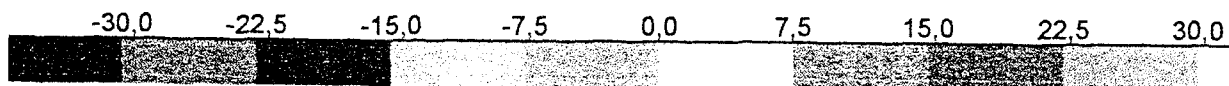
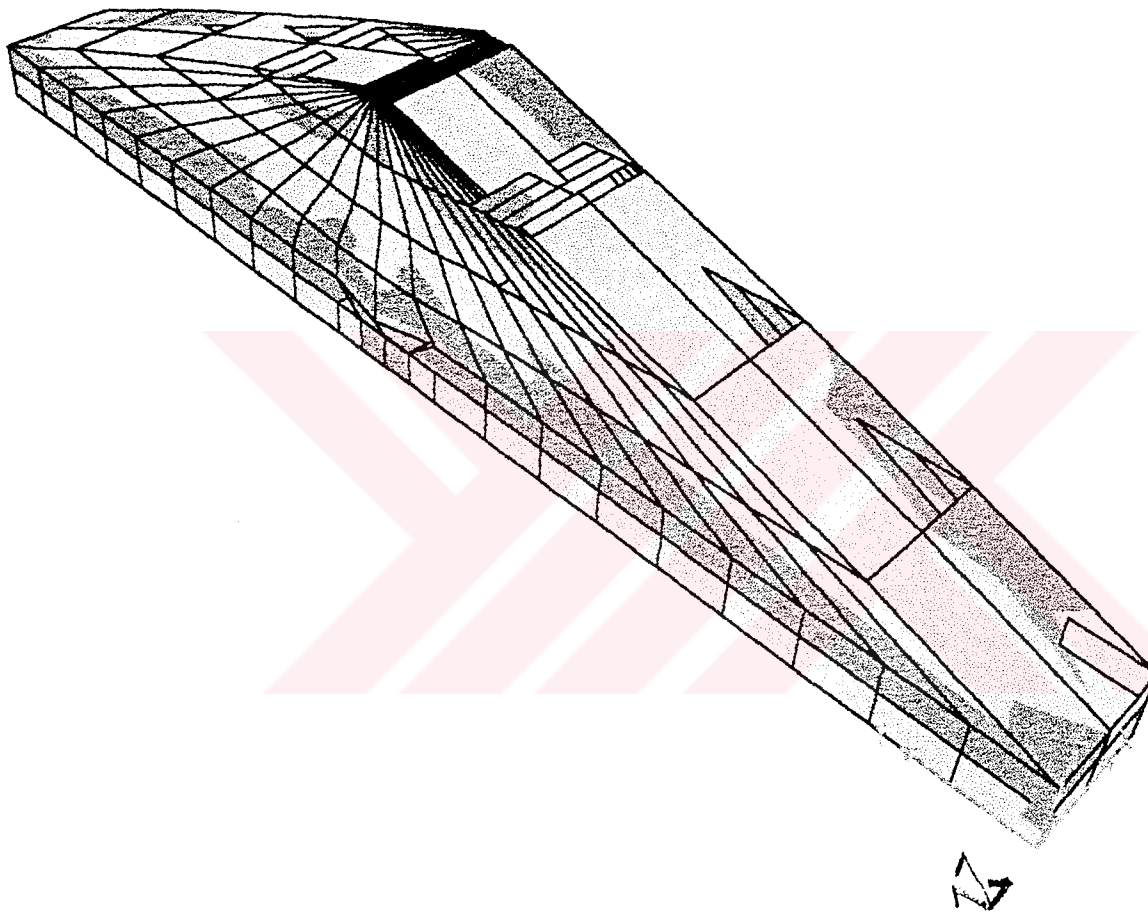


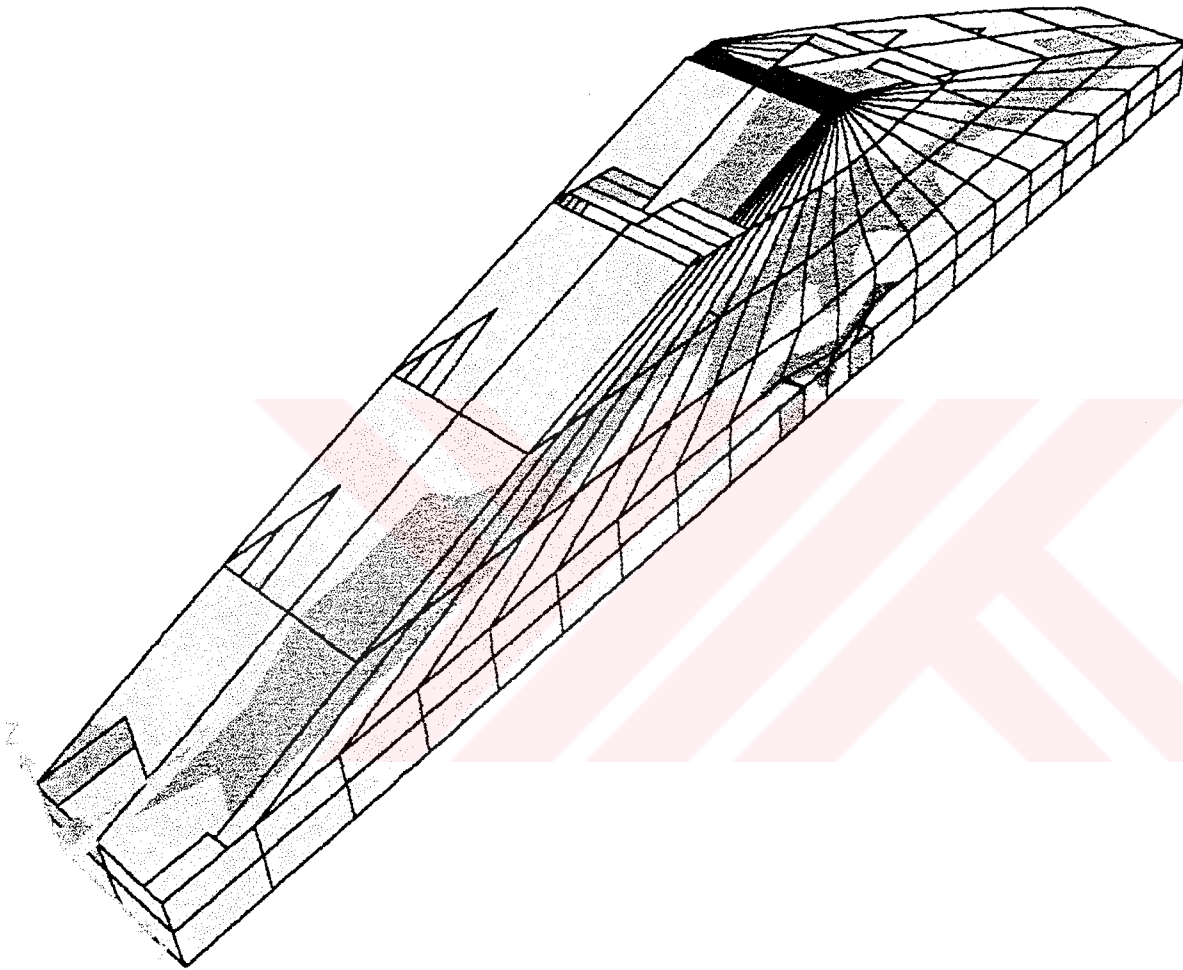
-18,0 -13,5 -9,0 -4,5 0,0 4,5 9,0 13,5 18,0



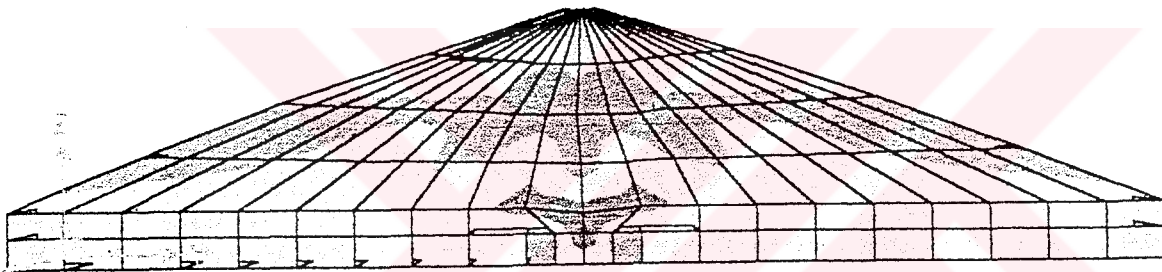
-18.0 -13.5 -9.0 -4.5 0.0 4.5 9.0 13.5 18.0



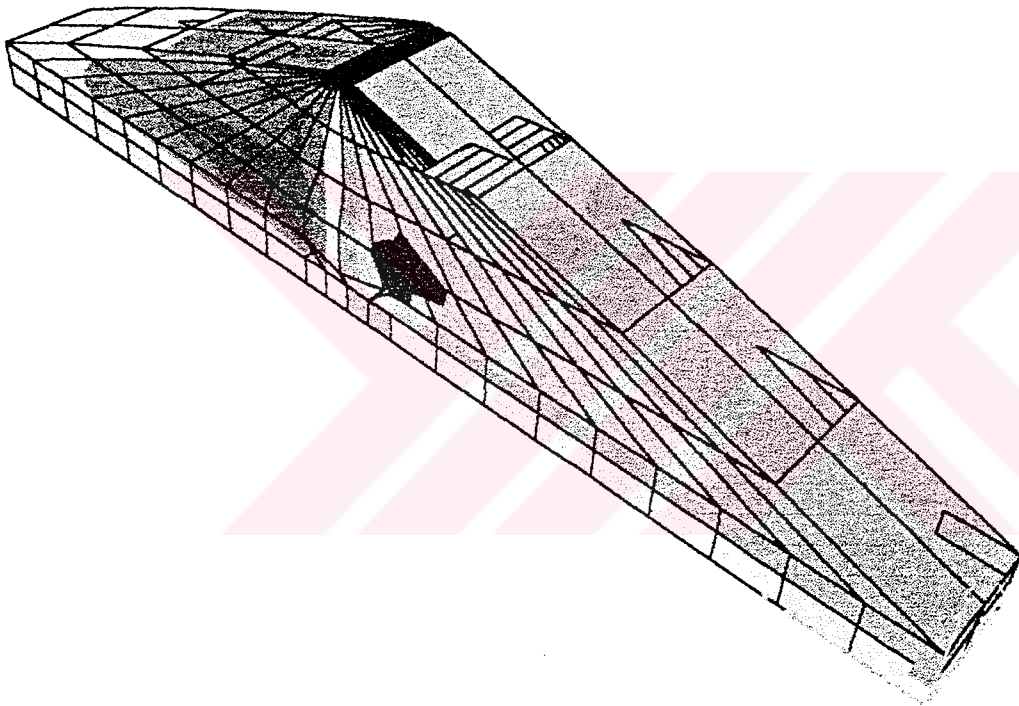




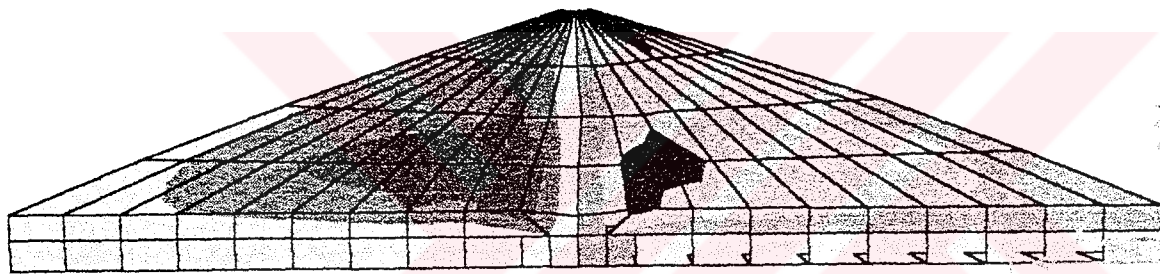
-30.0 -22,5 -15,0 -7,5 0,0 7,5 15,0 22,5 30,0



-30,0 -22,5 -15,0 -7,5 0,0 7,5 15,0 22,5 30,0

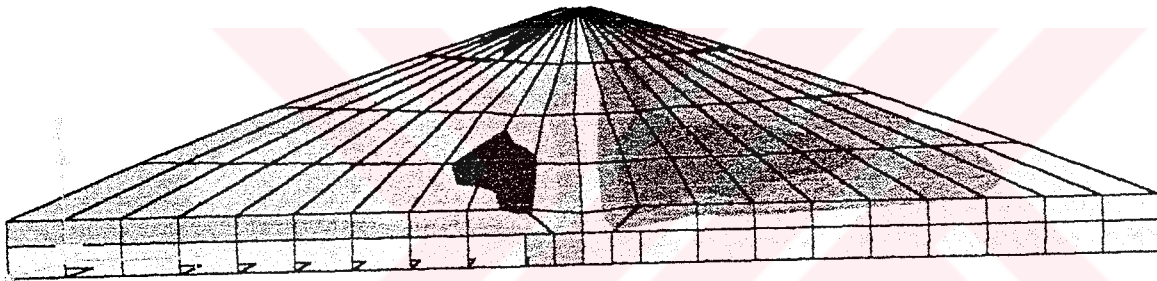


-16,0 -12,0 -8,0 -4,0 0,0 4,0 8,0 12,0 16,0

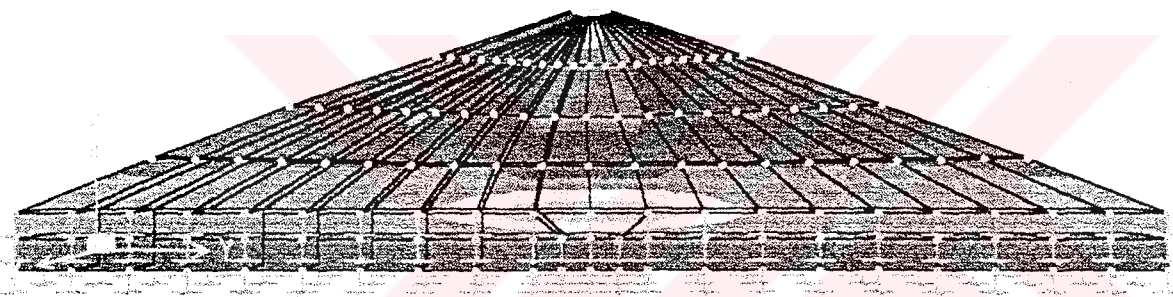


-16,0 -12,0 -8,0 -4,0 0,0 4,0 8,0 12,0 16,0



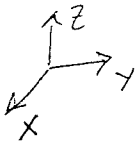
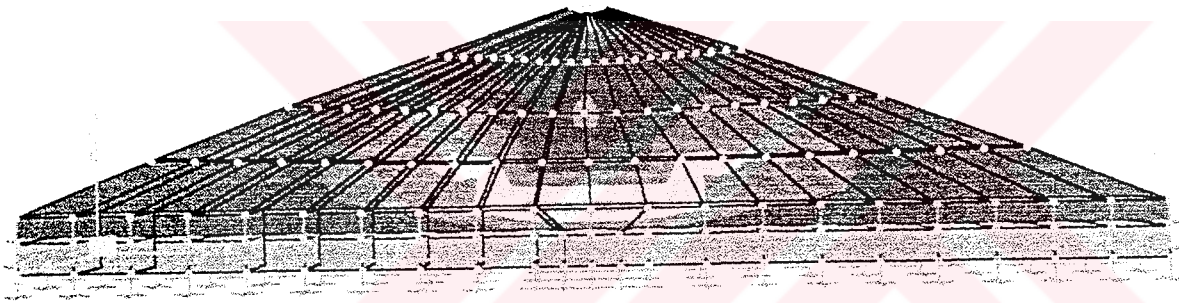


-16.0 -12.0 -8.0 -4.0 0.0 4.0 8.0 12.0 16.0

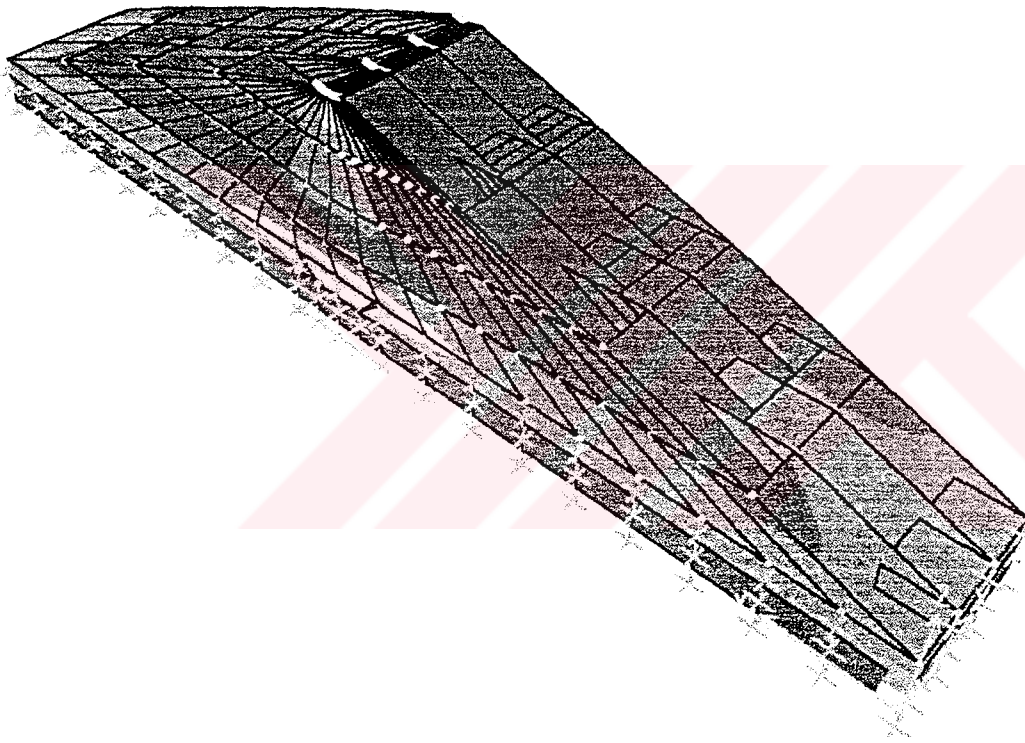


-108, -90, -72, -54, -36, -18, 0, 18, 36,



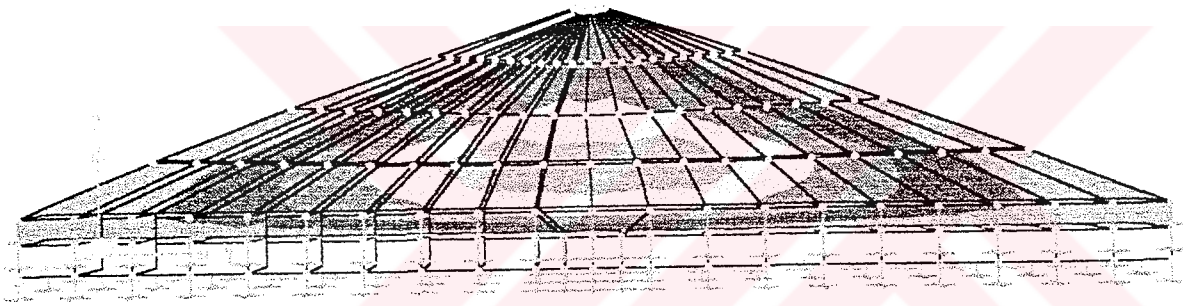


-105, -90, -75, -60, -45, -30, -15, 0, 15,

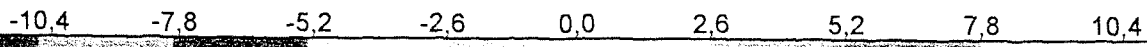
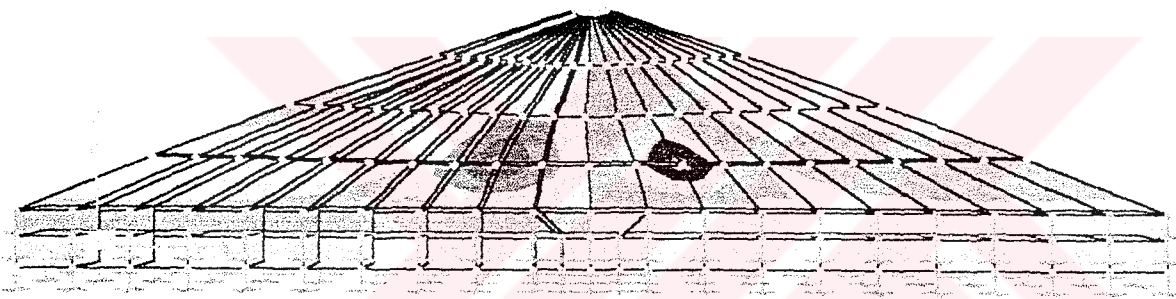


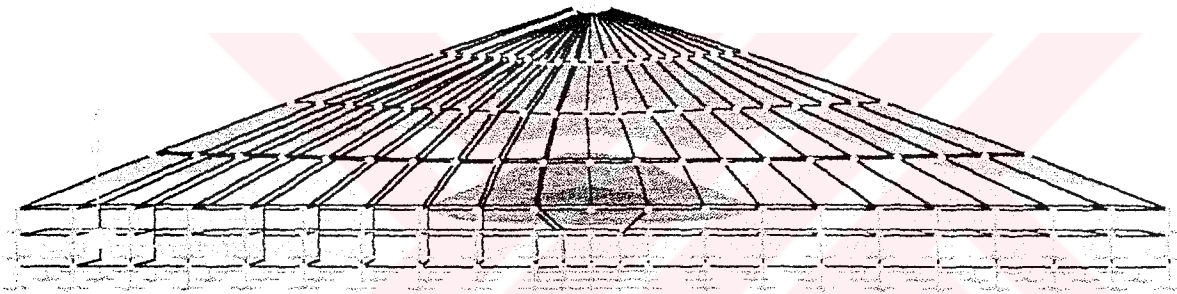
-108, -90, -72, -54, -36, -18, 0, 18, 36,

↑
combono

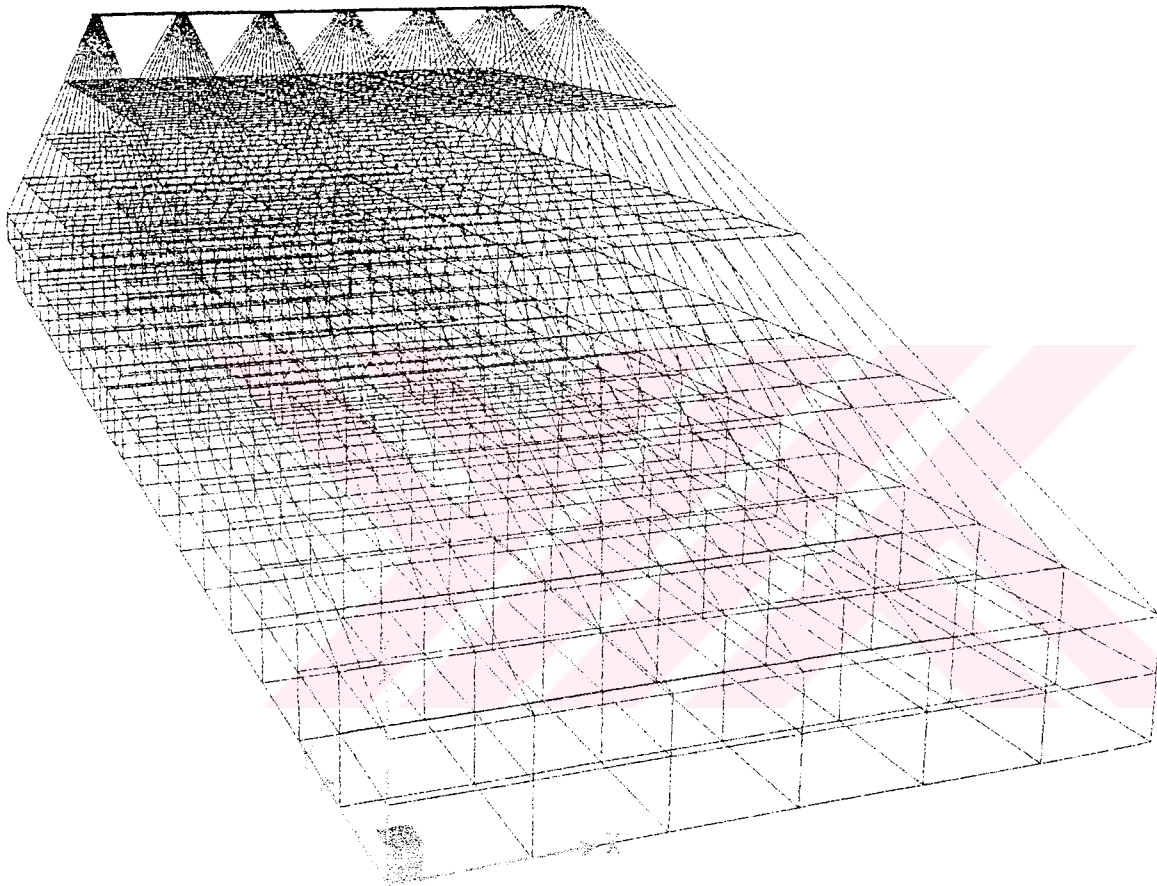


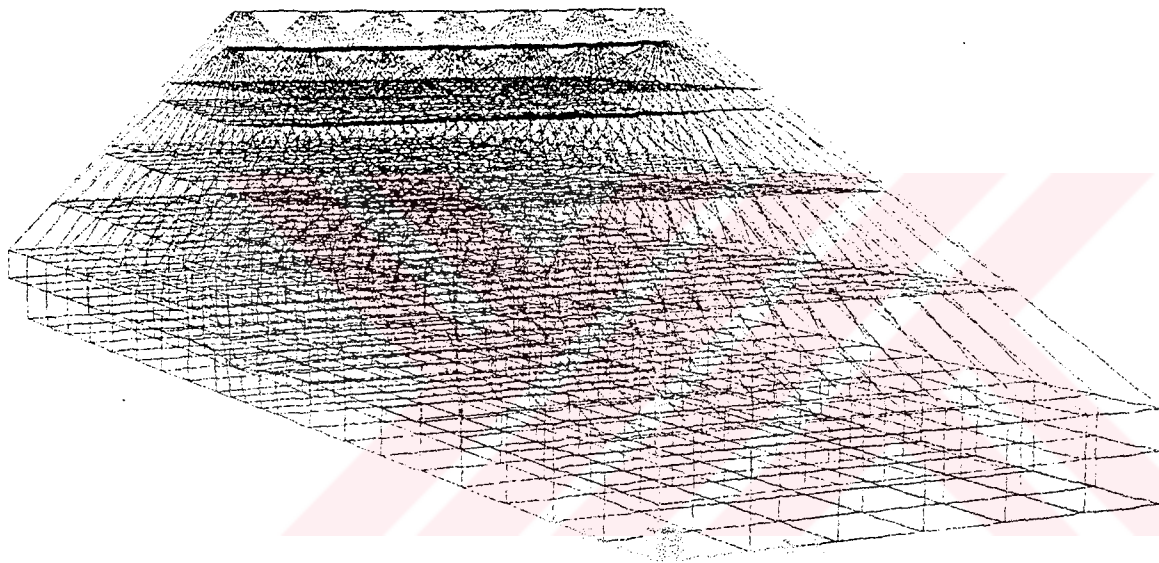
-144, -126, -108, -90, -72, -54, -36, -18, 0,

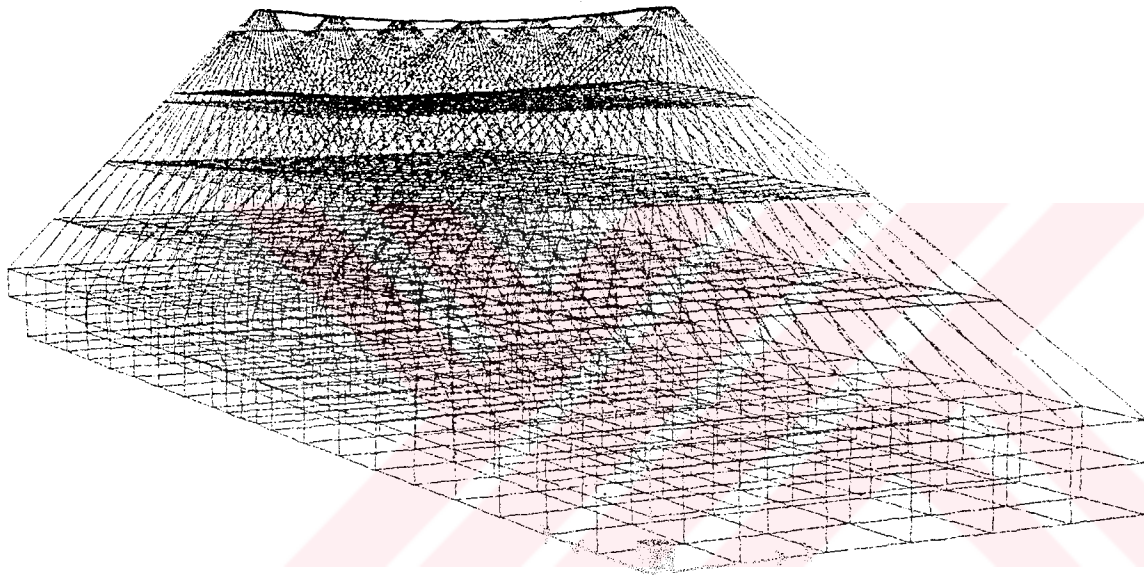


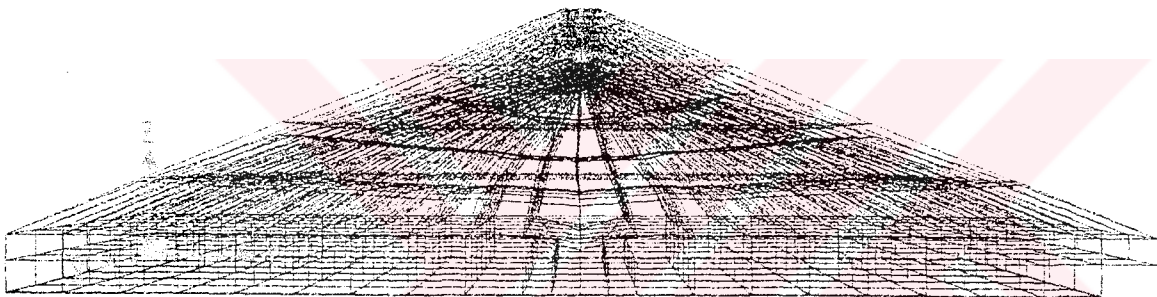


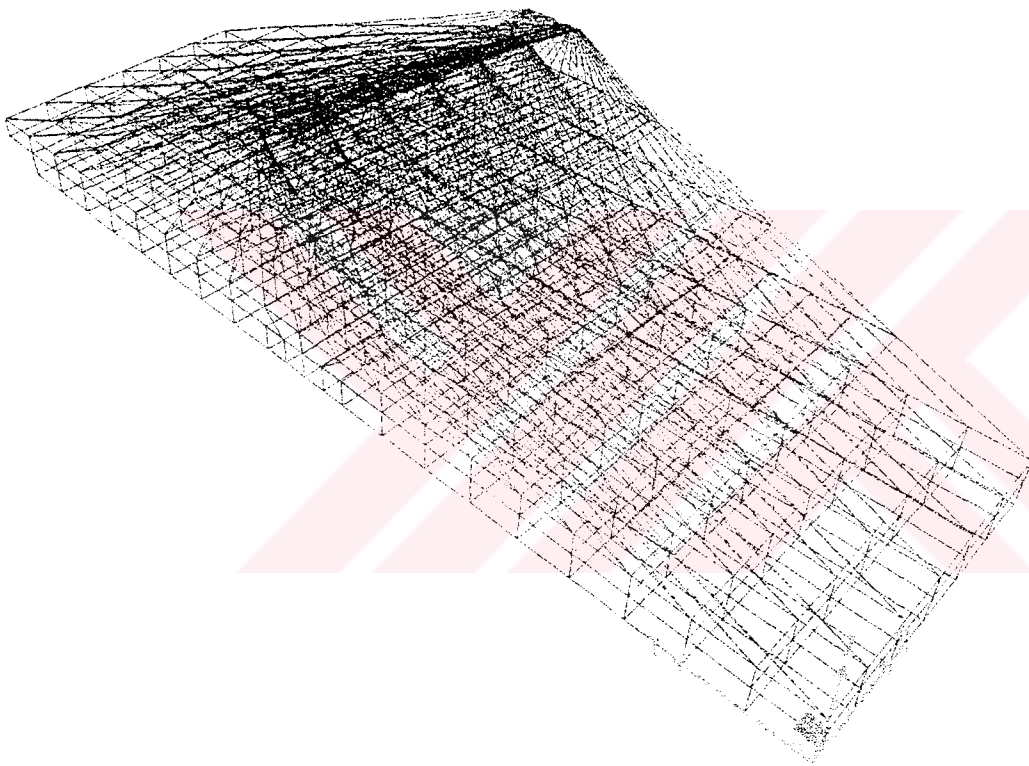
-18,0 -13,5 -9,0 -4,5 0,0 4,5 9,0 13,5 18,0

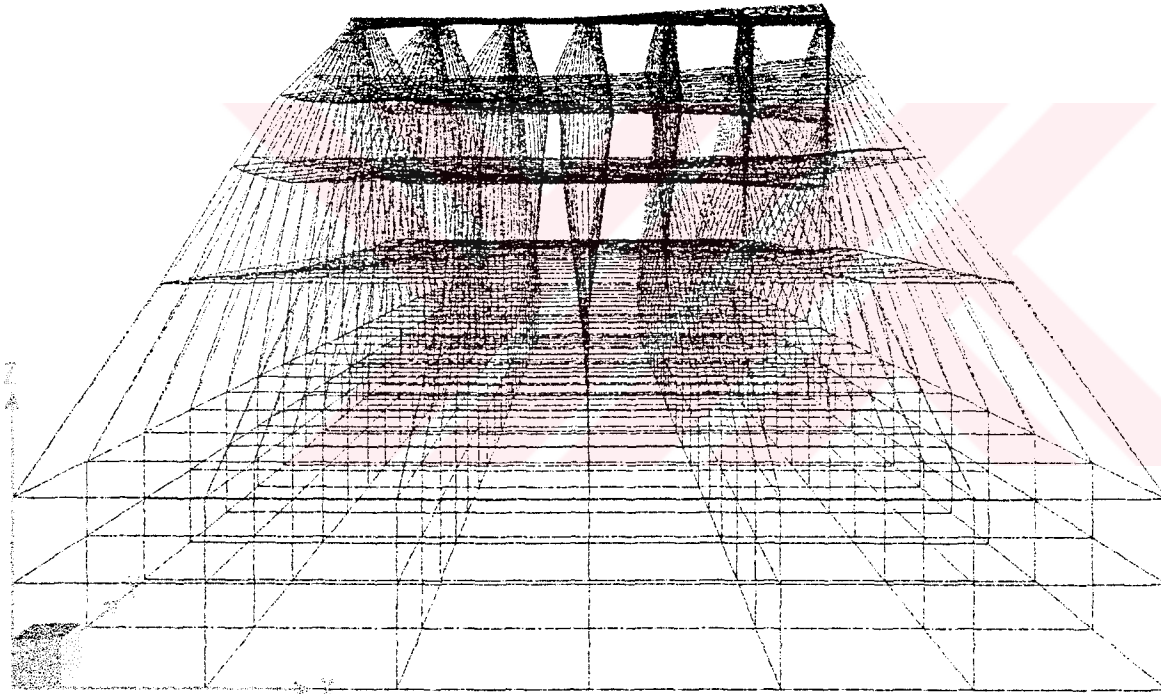


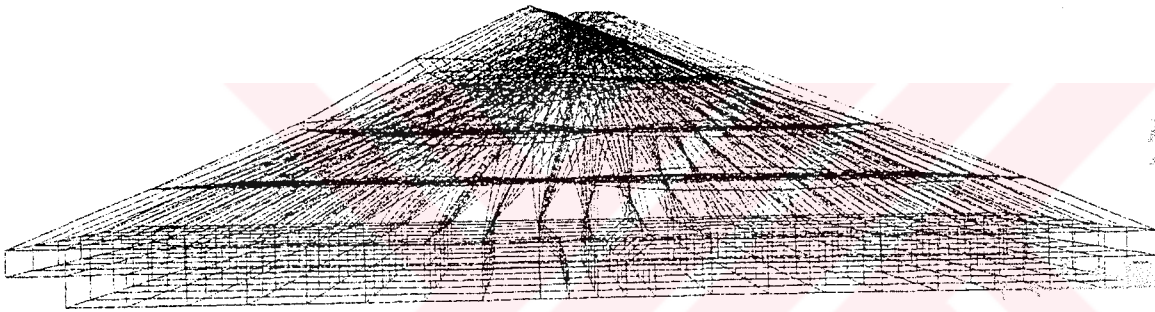


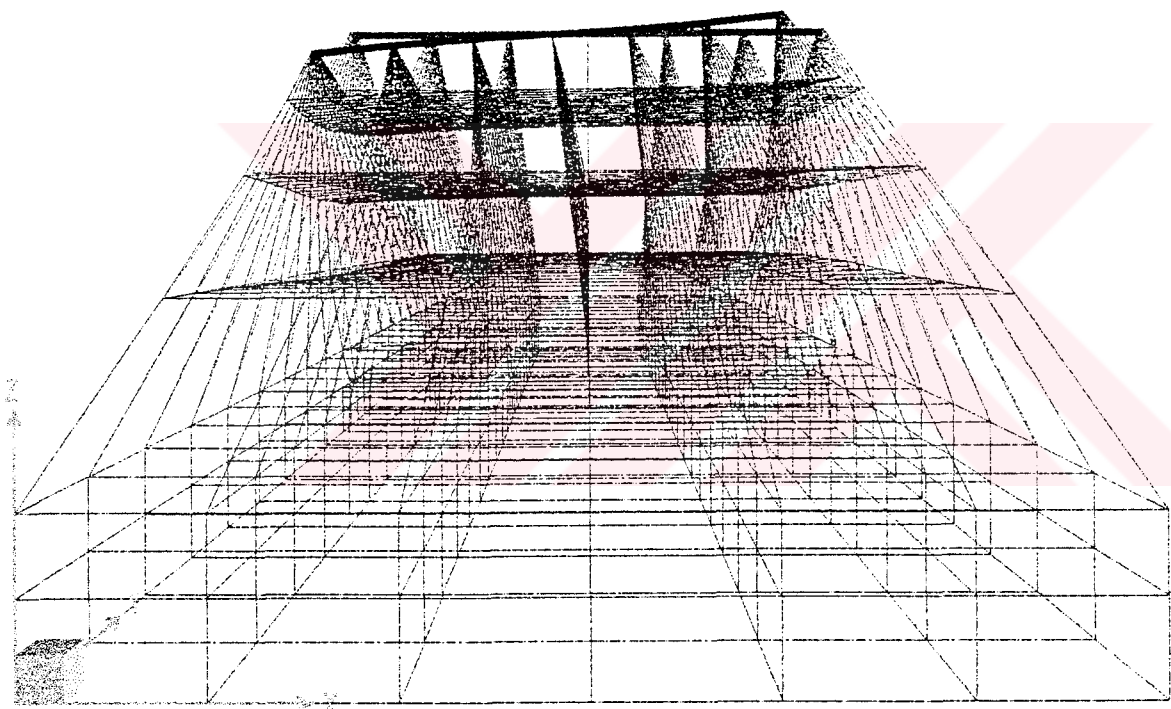


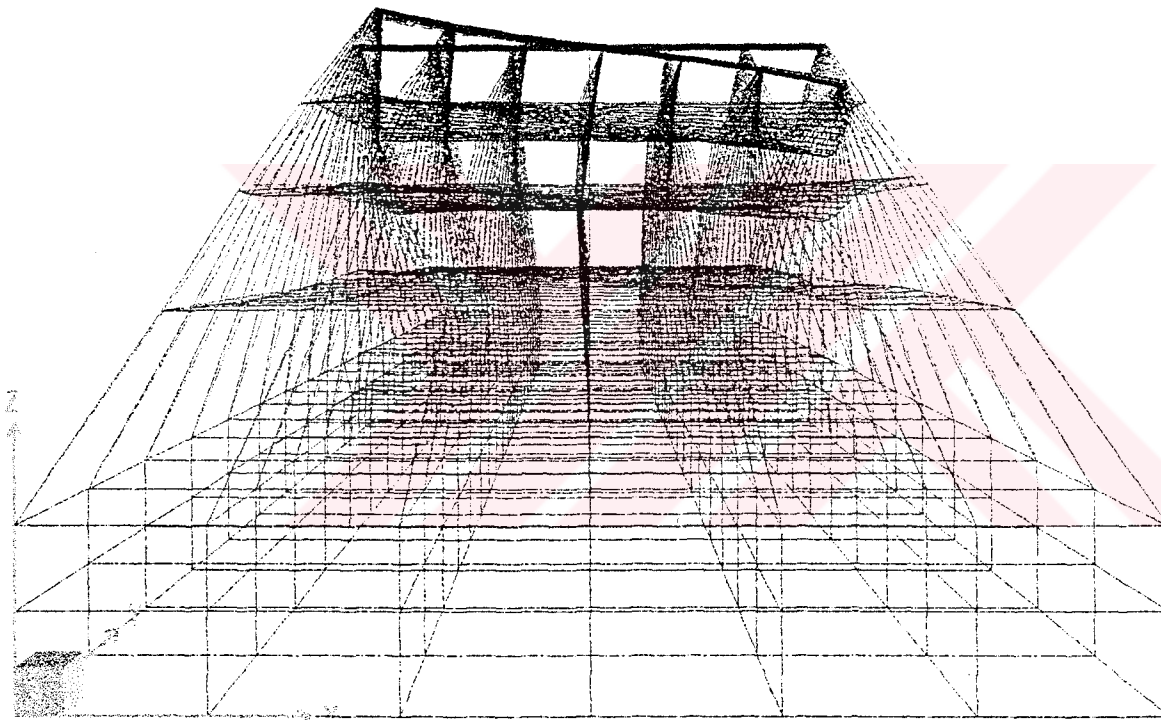


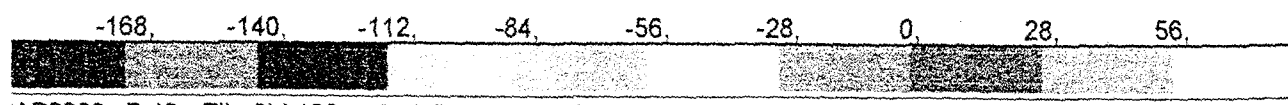
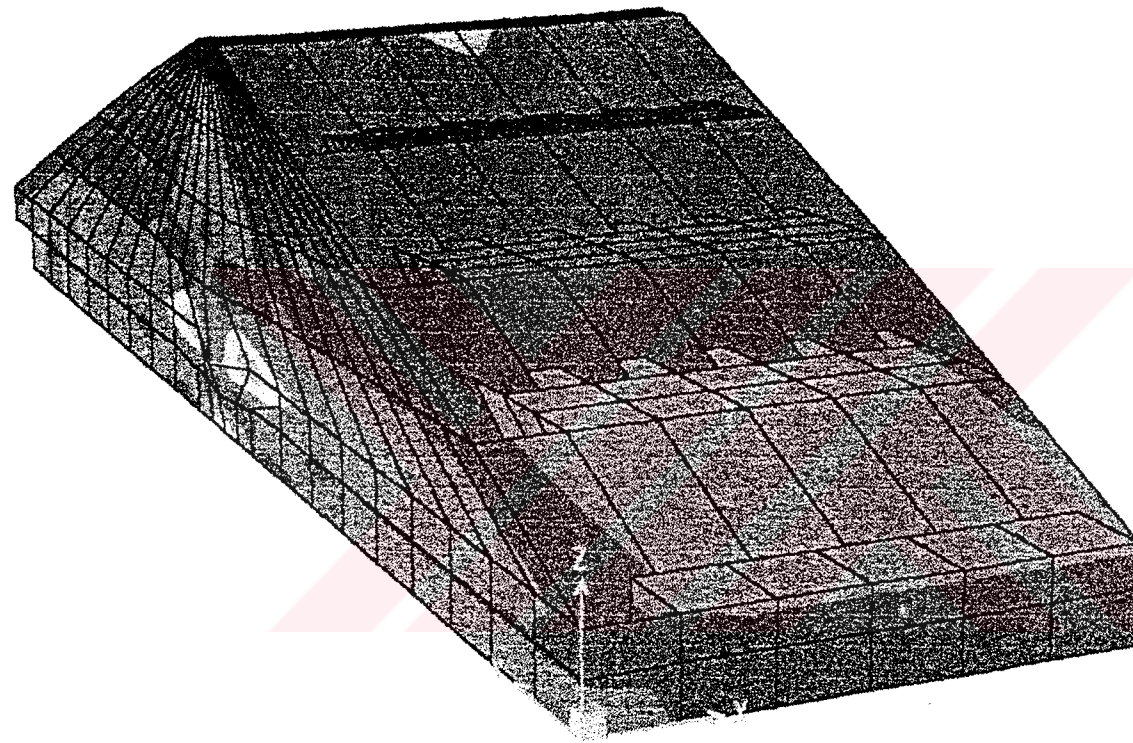


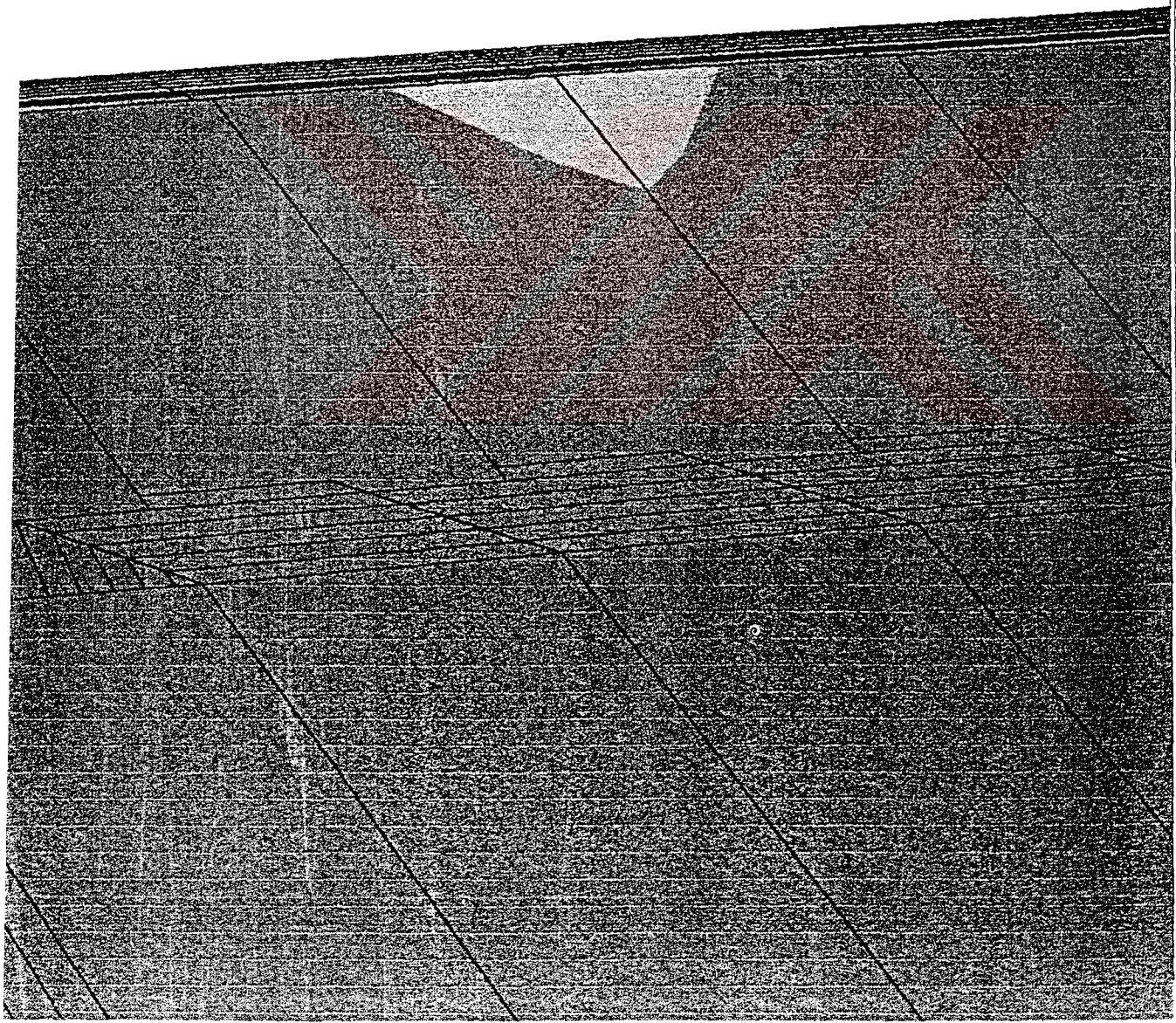




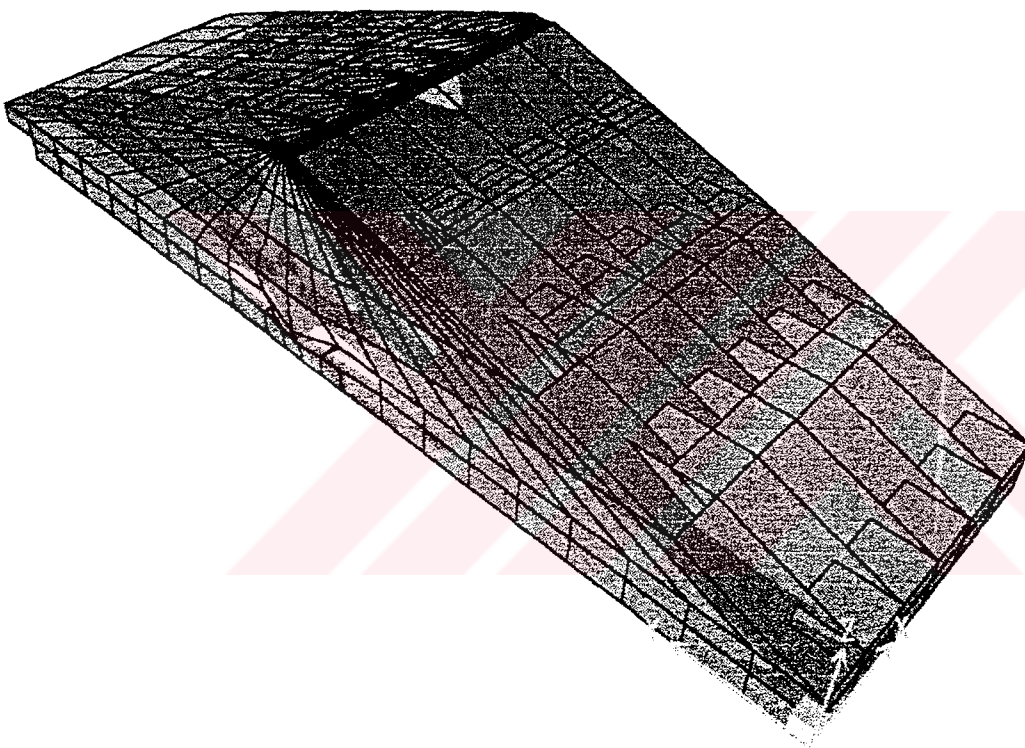




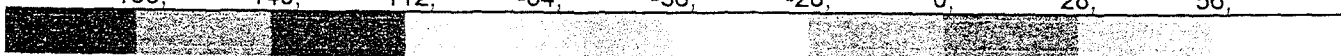


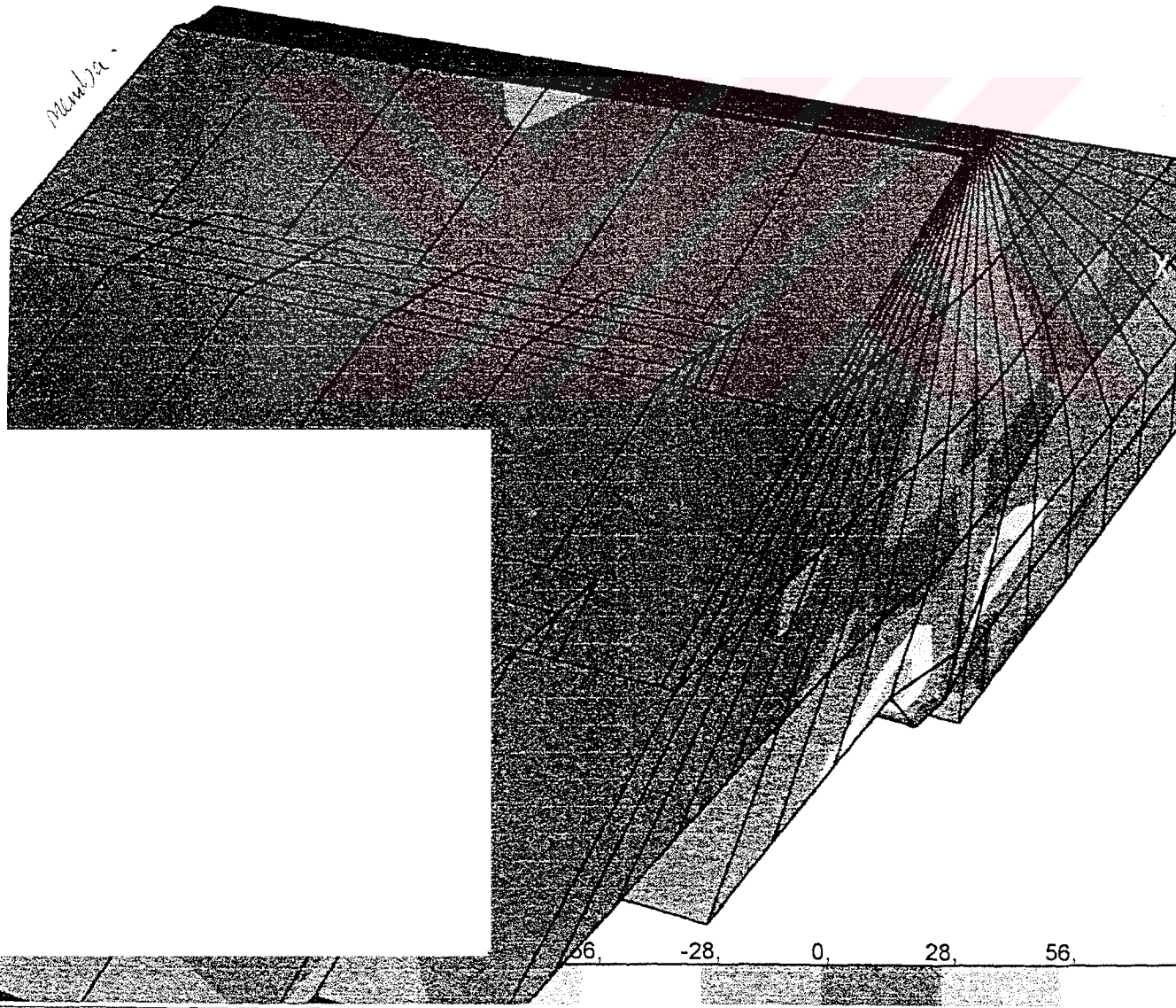


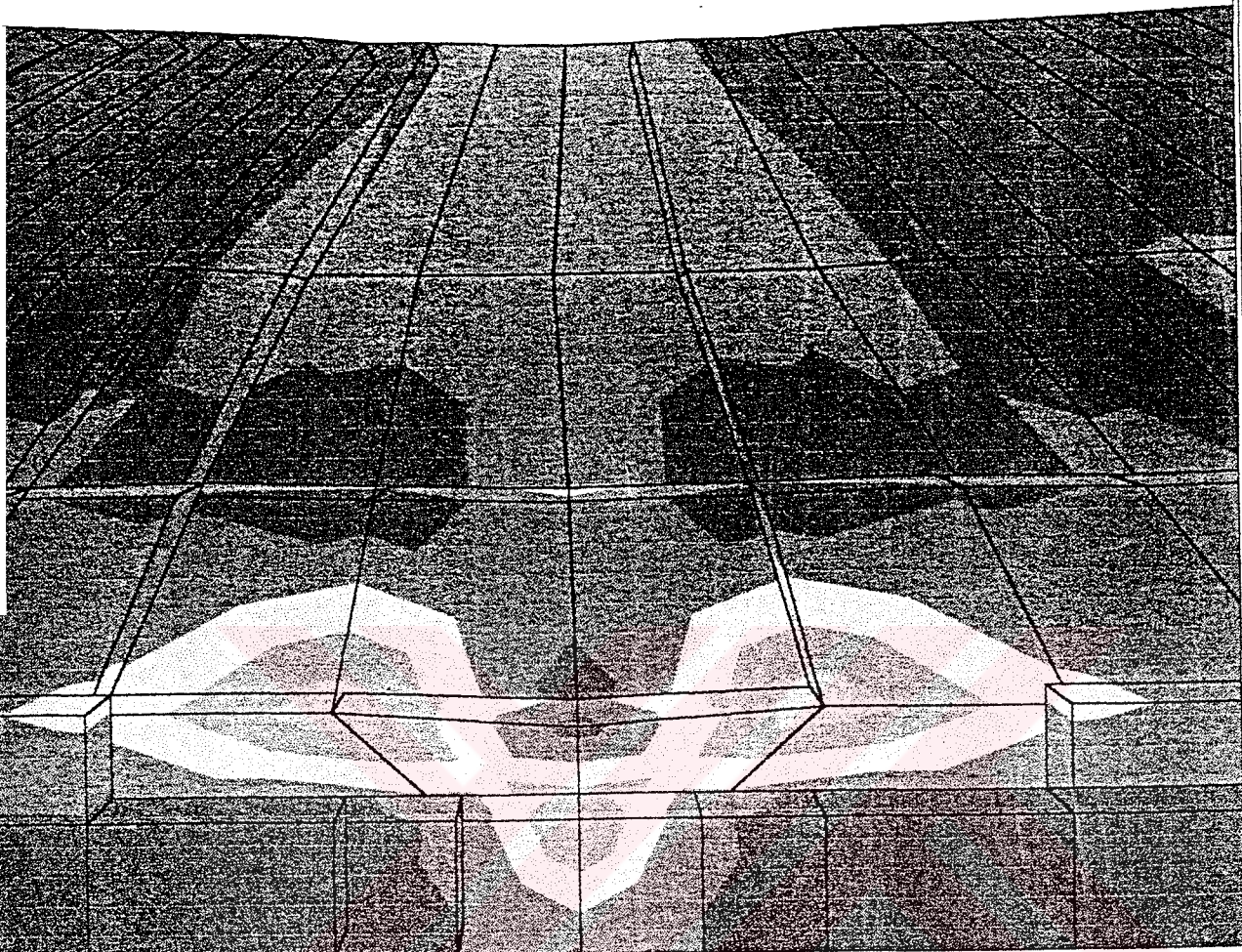
SAP2000 v7.40 - File:3bb120 - S11 Contours (3) - Ton-m Units



-168, -140, -112, -84, -56, -28, 0, 28, 56,

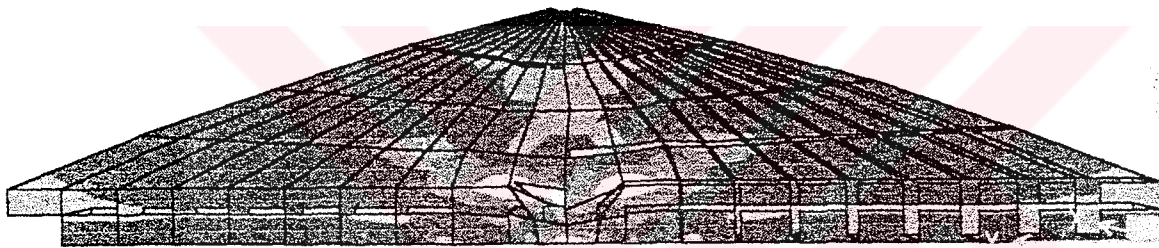






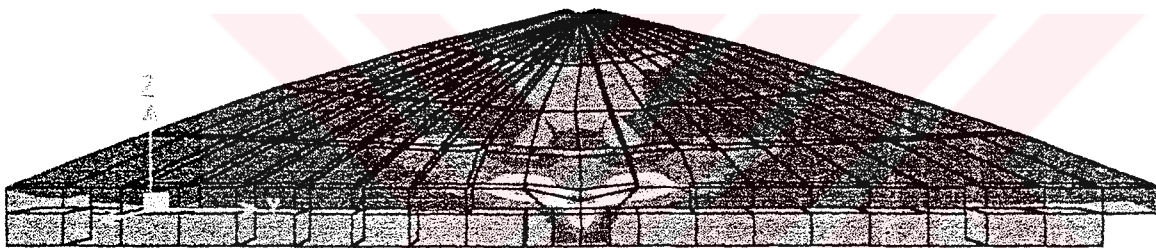
-168, -140, -112, -84, -56, -28, 0, 28, 56,





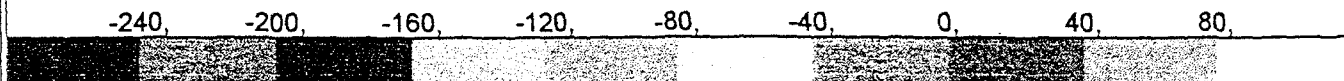
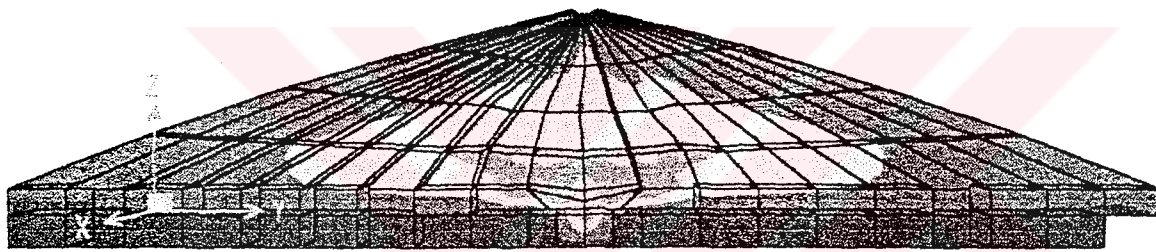
-175, -150, -125, -100, -75, -50, -25, 0, 25,

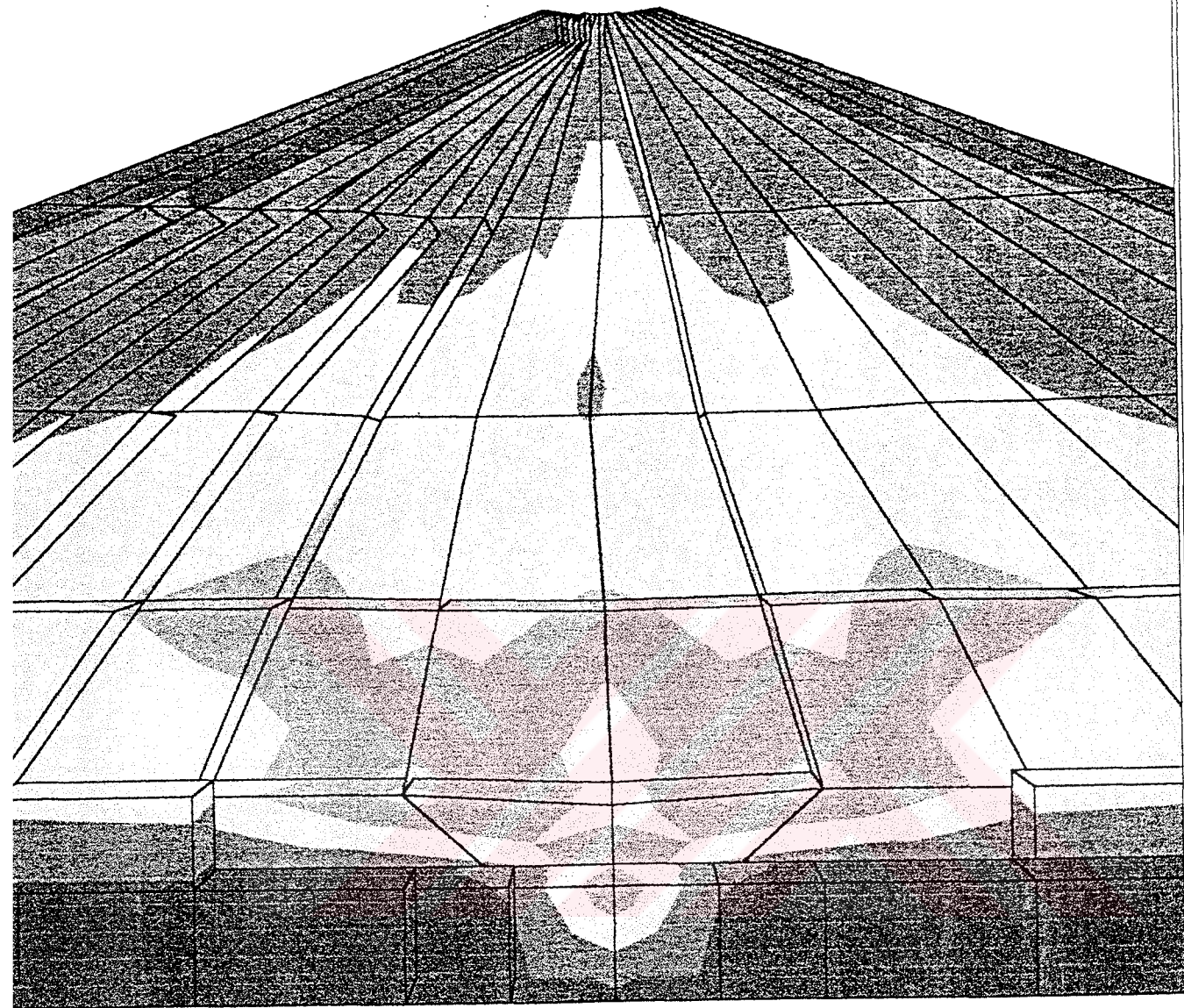




-175, -150, -125, -100, -75, -50, -25, 0, 25,



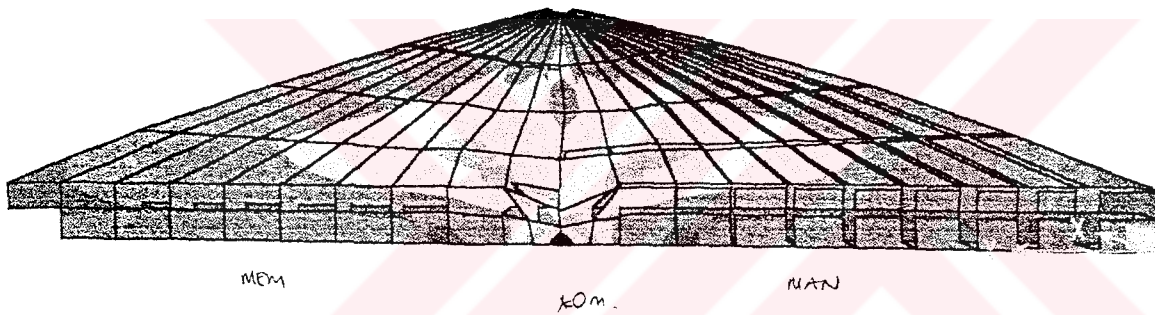




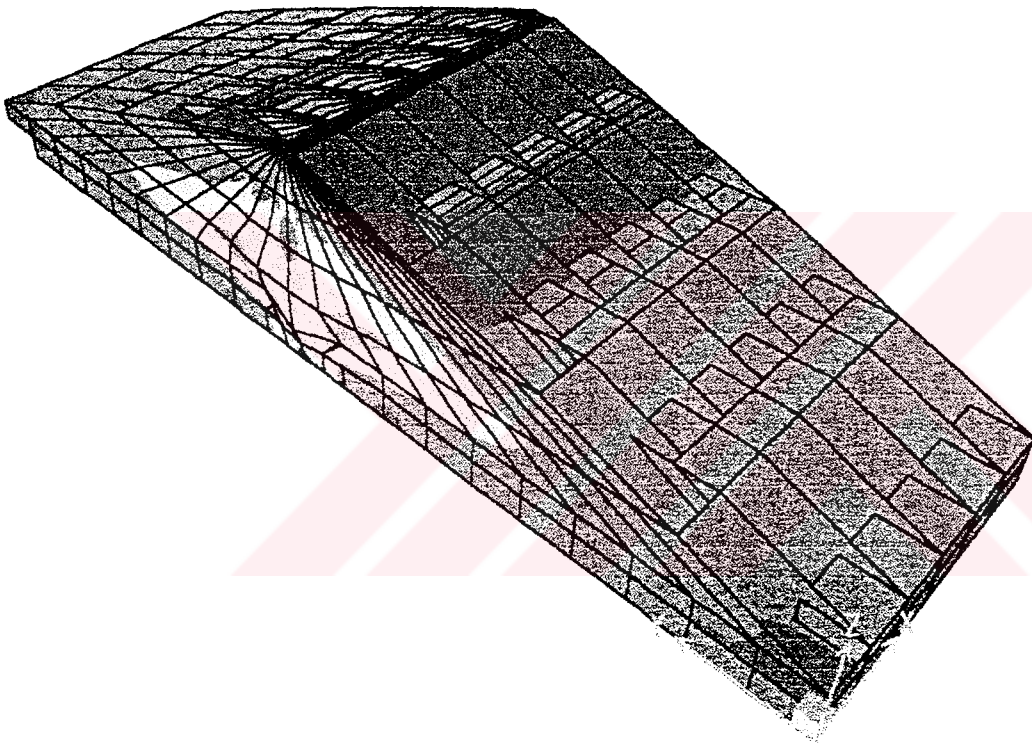
x=120m.

-240, -200, -160, -120, -80, -40, 0, 40, 80,

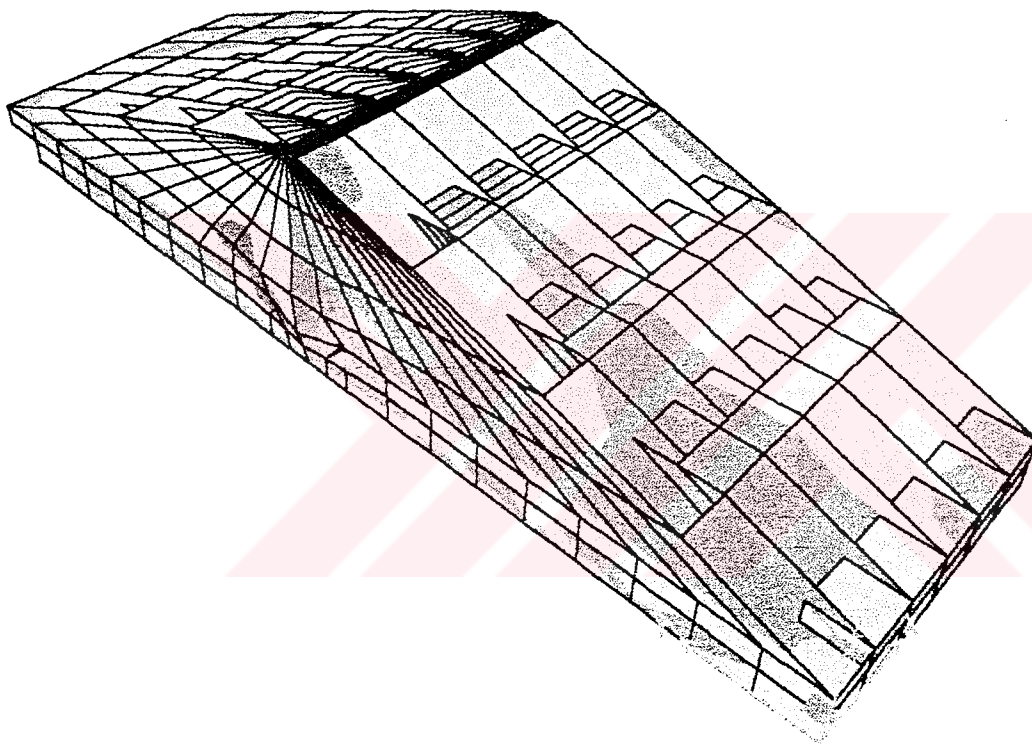




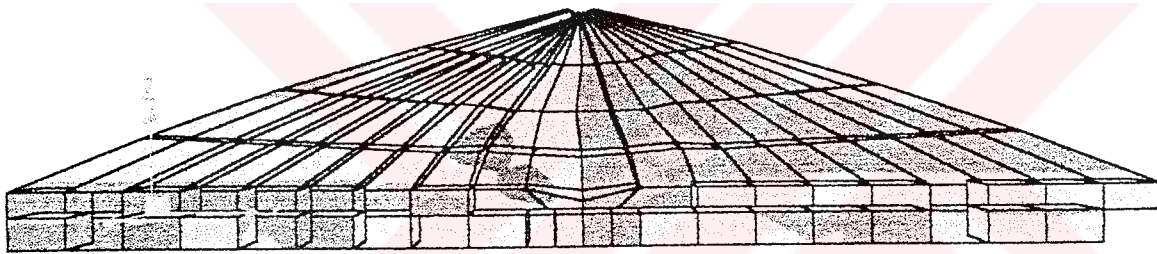
-240, -200, -160, -120, -80, -40, 0, 40, 80,



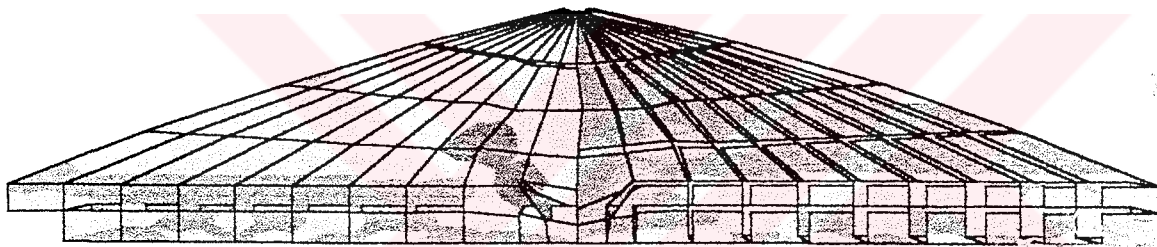
-240, -200, -160, -120, -80, -40, 0, 40, 80,



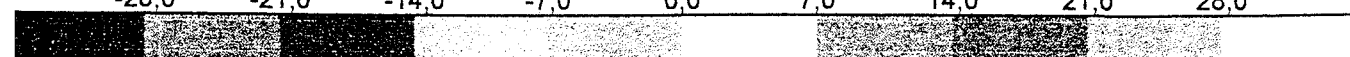
-28.0 -21.0 -14.0 -7.0 0.0 7.0 14.0 21.0 28.0

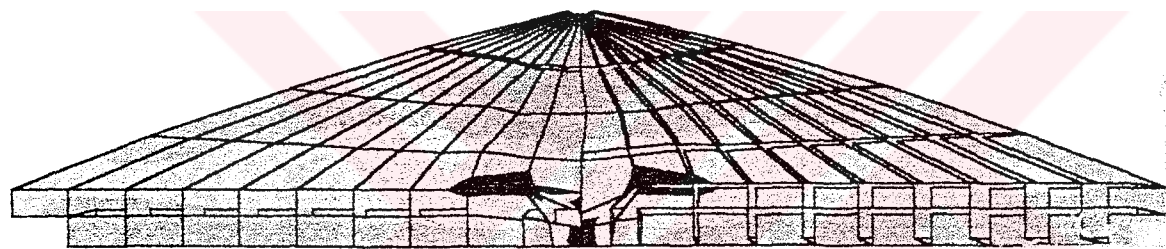


-28.0 -21.0 -14.0 -7.0 0.0 7.0 14.0 21.0 28.0

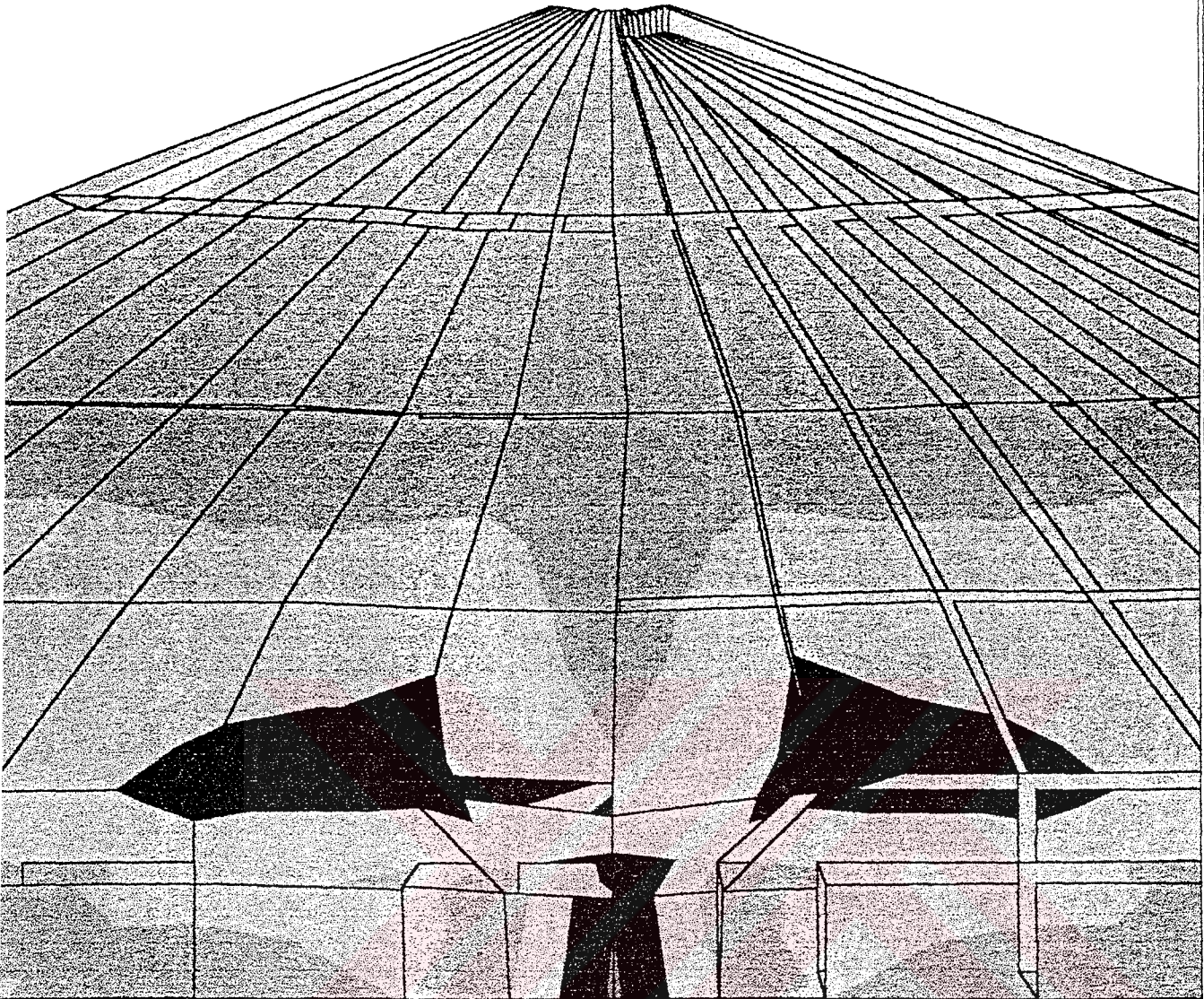


-28,0 -21,0 -14,0 -7,0 0,0 7,0 14,0 21,0 28,0



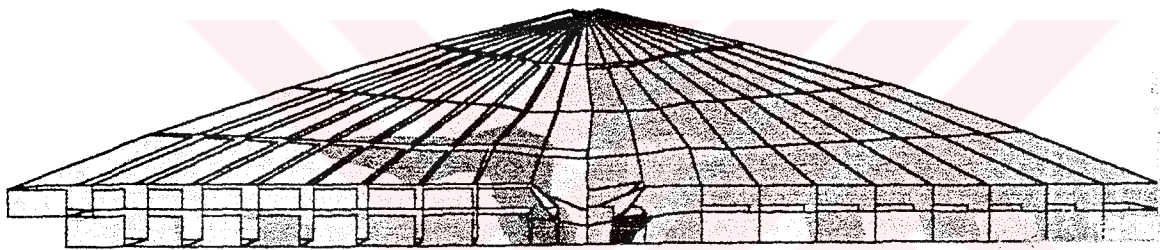


-30.0 -20.0 -10.0 0.0 10.0 20.0 30.0 40.0 50.0

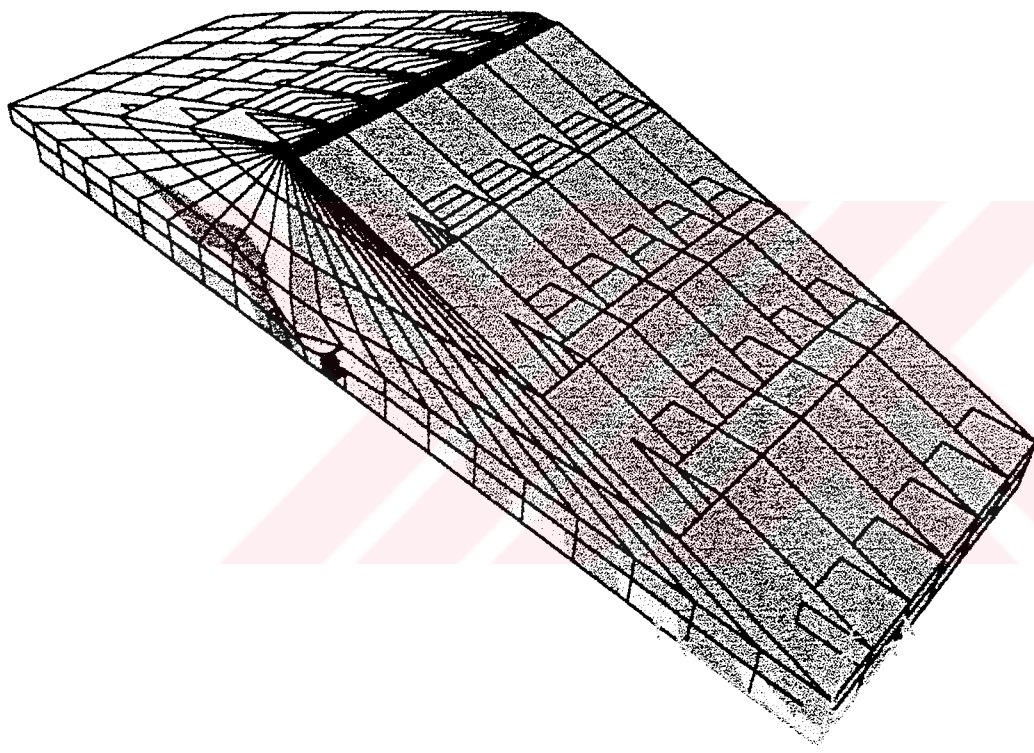


AD

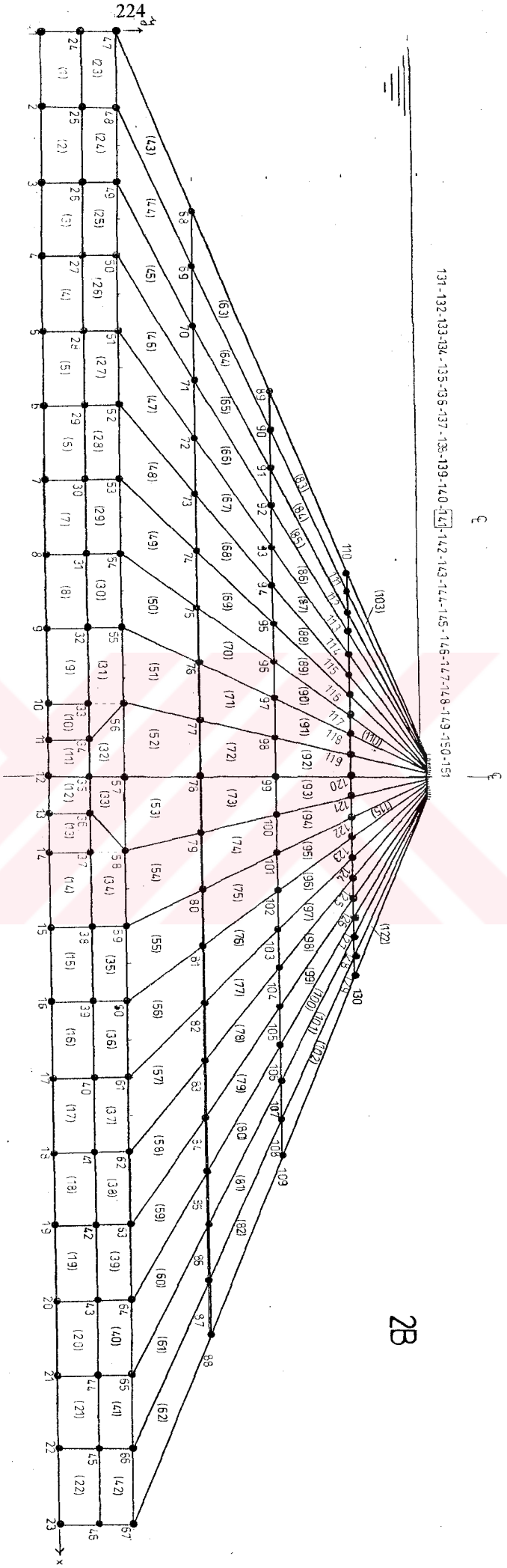
-30,0 -20,0 -10,0 0,0 10,0 20,0 30,0 40,0 50,0



-40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0 10,0 20,0 30,0 40,0



-40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0 10,0 20,0 30,0 40,0

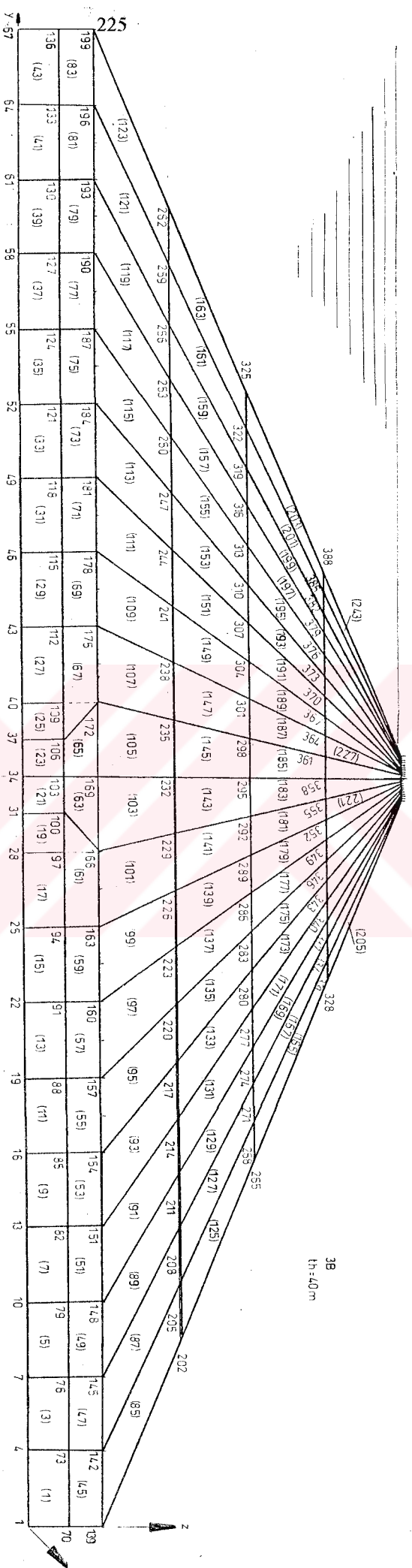


2B

453 son deger

451-448-445-442-439-436-433-430-427-424-421-418-415-412-409-406-403-400-397-394-391

C

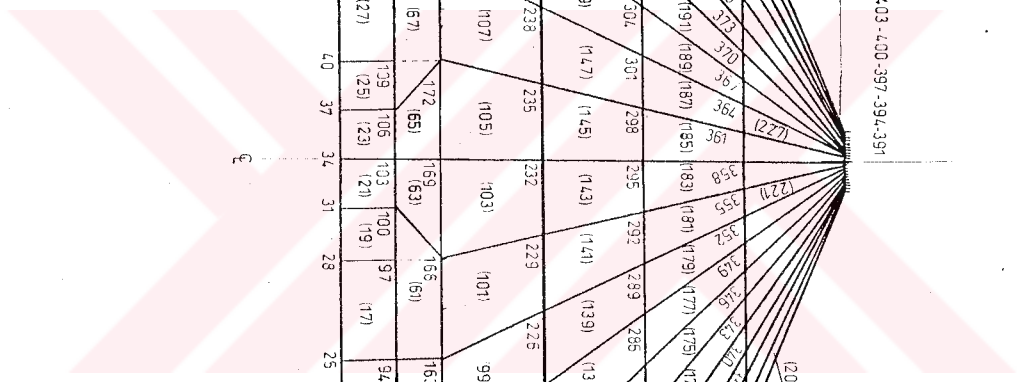


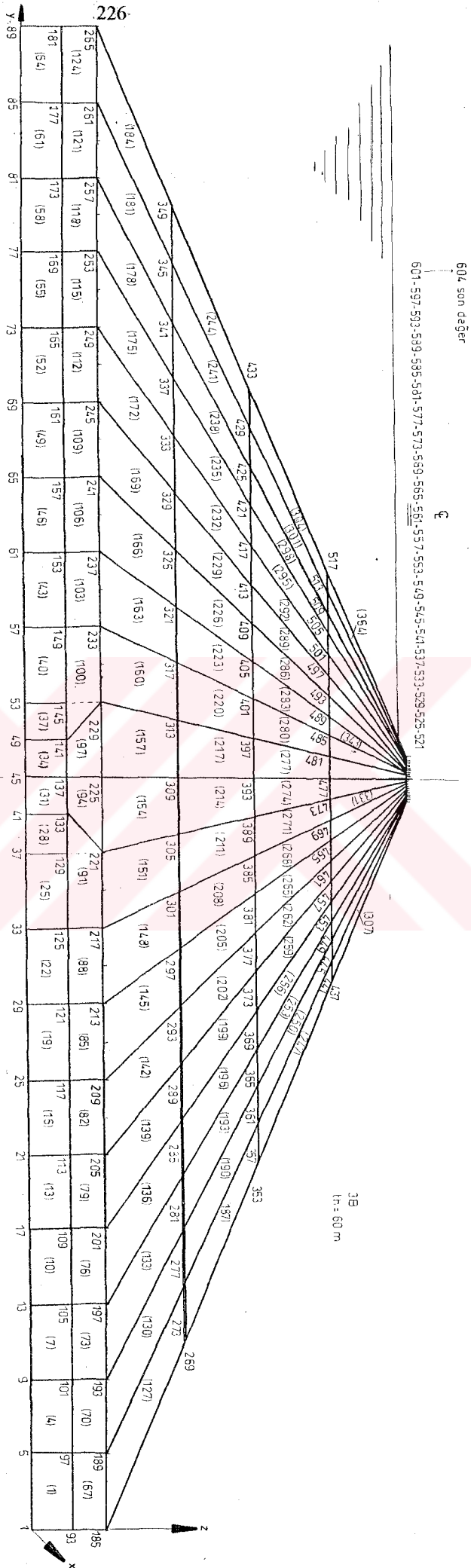
38
1h=40m

225

64 61 58 55 52 49 46 43 40 37 34 31 28 25 22 19 16 13 10 7 4 1

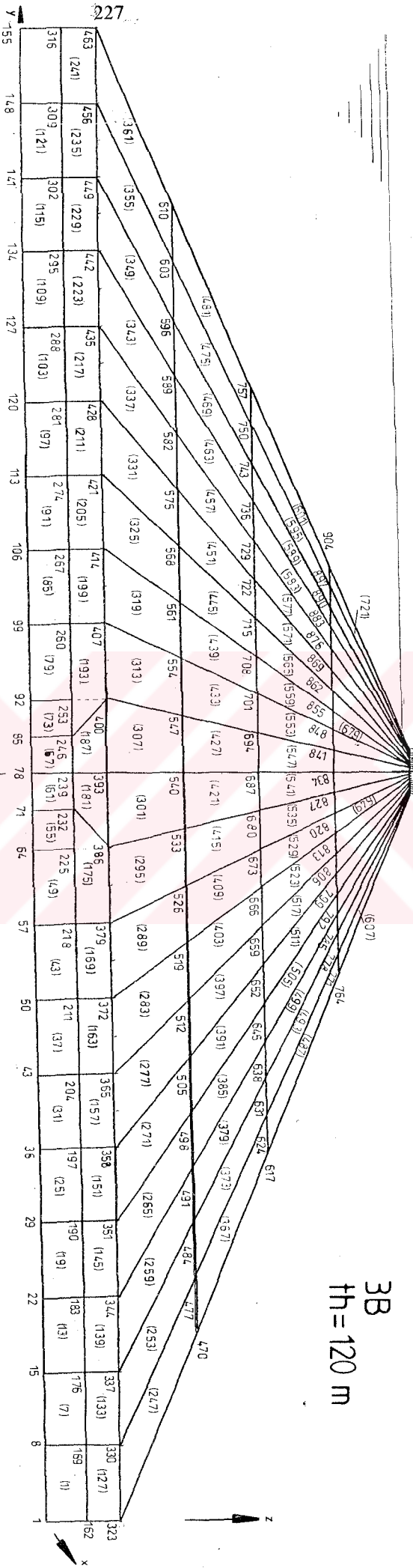
C





1057 som deger
 1051-1044, 1037-1030-1023-1016-1009-1002-995-988-981-974-967-960-953-946-939-932-925-918-911

3B
 th = 120 m



8 ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı.....: Nuri Seçkin KAYIKÇI

Doğum Yeri.....: İstanbul

Doğum Yılı.....: 1971

Medeni Hali.....: Bekâr

Eğitim ve Akademik Durumu :

Lise.....: 1985 (Eylül) – 1988 (Haziran)

Lisans.....: 1989 (Eylül) – 1996 (Şubat)

İşletme Yüksek Lisansı.....: 1998 (Şubat) – 1999 (Şubat)

Yabancı Dil.....: İngilizce

İş deneyimi :

1996-1997.....: Ute Holding, Belek, Bel-Conti Otel ve Tatil
Köyü inşaatı, Antalya.

1997.....: Beytur A.Ş., Sirene otel inşaatı, Belek,
Antalya.

1997.....: Limak İnşaat Şirketi, Lymra Otel İnşaatı,
Çamyuva, Antalya.

2001.....: Otel İnşaatı, Kemer, Antalya.