

**GEOMETRİK TASARIM DEĞİŞTİRGELERİNİN
DERİN YERALTI AÇIKLIKLARINDA YENİLME BÖLGESİNİN
BOYUTLARINA ETKİLERİNİN STATİK VE DİNAMİK KOŞULLARDA
ARAŞTIRILMASI**

Melih GENİŞ

128553

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSTON MERKEZİ**

**ZONGULDAK
Ağustos 2002**

128553

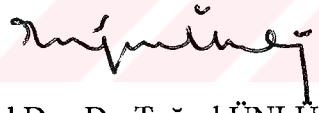
KABUL:

Melih GENİŞ tarafından hazırlanan “GEOMETRİK TASARIM DEĞİŞTİRGELERİNİN DERİN YERALTI AÇIKLIKLARINDA YENİLME BÖLGESİNİN BOYUTLARINA ETKİLERİNİN STATİK VE DİNAMİK KOŞULLARDA ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir. 06.08.2002

Başkan : 
Prof. Dr. Erdal ÜNAL

Üye : 
Prof. Dr. Reşat ULUSAY

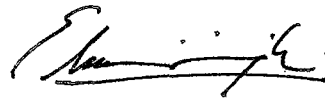
Üye : 
Prof. Dr. Hasan GERÇEK (Tez Danışmanı)

Üye : 
Yrd.Doç.Dr. Tuğrul ÜNLÜ

Üye : 
Yrd.Doç.Dr. Kenan ÇOLAK

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.



Prof. Dr. Etem KİŞİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

**GEOMETRİK TASARIM DEĞİŞTİRGELERİNİN
DERİN YERALTI AÇIKLIKLARINDA YENİLME BÖLGESİNİN
BOYUTLARINA ETKİLERİNİN STATİK VE DİNAMİK KOŞULLARDA
ARAŞTIRILMASI**

Melih GENİŞ

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan GERÇEK

Ağustos 2002, 352 sayfa.

Bir yeraltı açıklığının şekli ve konumu, ikincil gerilmelerden kaynaklanan duraysızlıklarla karşılaşan kaya mühendislerinin sınırlı ama önemli tasarım seçenekleri arasındadır. Eğer proje sınırlamaları açıklık şekli ve konumunu kapsamıyorsa, duraylılık açısından en uygun tasarım seçeneklerinin belirlenmesi mühendislerin başlıca görevleri arasındadır. Ayrıca, sismik açıdan etkin bölgelerde planlanan yeraltı açıklıklarında, duraylılık değerlendirmeleri yalnızca statik koşulları değil, ayrıca dinamik yükleri de göz önünde bulundurmalıdır.

ÖZET (devam ediyor)

Bu tez çalışması, bazı geometrik tasarım değıştirtgelerinin derin yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan yenilme bölgesinin boyutlarına statik ve dinamik koşullardaki etkilerinin araştırılmasıyla ilgilidir.

Önce, ikinci bölümde, yüksek ikincil gerilmelere maruz kalan yeraltı açıklıklarındaki duraysızlıkların değlendirilmesi için ilgili yayınlarda bulunan çeşitli ölçütler ve yaklaşımlar özetlenmiştir.

Sonra, üçüncü bölümde, açıklığın kesit şekli ve genişlik/yükseklik (W/H) oranı gibi bazı geometrik tasarım değıştirtgelerinin duraylılık etkileri araştırılmış ve açıklığın birincil gerilmelere göre uygun konumları değlendirilmiştir. Açıklıklar çevresinde oluşan aşırı gerilme veya yenilme bölgelerinin belirlenmesinde iki-boyutlu gerilme çözümlemeleri kullanılmıştır. Doğrusal-elastik çözümlemelerde bir matematiksel çözüm kullanılırken, elasto-plastik çözümlemelerde de FLAC^{2D} (sonlu farklar gerilme çözümlemesi) programından yararlanılmıştır. Açıklığın uygun konumlandırılmasının belirlenmesi amacıyla iki birincil gerilme alanı göz önünde bulundurulmuştur: anizotropik (üç asal bileşen farklı büyüklüklerde) ve düzlemsel anizotropik (üç asal bileşenden ikisi eşit büyüklükte) gerilme durumları. Çalışmada; değışik W/H oranları olan eliptik, ovaloid, kemer tavanlı ve dikdörtgen açıklıklar karşılaştırılmıştır. Statik analizler sonucunda, incelenen tüm açıklık şekilleri arasında dikdörtgen geometri duraylılık açısından en olumsuz durumu oluşturmuştur. Anizotropik birincil gerilme alanında; düşey birincil gerilme en küçük bileşen olduğunda, açıklığın uzun eksenini en büyük yatay birincil gerilmeye paralel konumlandırılmalıdır. Tersine düşey birincil gerilme en büyük bileşen olduğunda, açıklığın uzun eksenini en küçük yatay birincil gerilmeye paralel

ÖZET (devam ediyor)

konumlandırılmalıdır. Düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında; düşey birincil gerilme en büyük bileşen olduğunda, açıklığın en uygun konumlandırması açıklığın W/H oranı ile birincil gerilmeler oranına bağlıdır.

Dördüncü bölümde, derin yeraltı açıklıklarının dinamik yükler altındaki davranışlarına ilişkin yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Beşinci bölümde, dinamik yükleme değiştirgelerinin, birincil gerilme alanının, ortamın mekanik özelliklerinin derin yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan yenilme bölgesinin alanına olan etkisi araştırılmıştır. İki boyutlu dinamik çözümlemelerde, açıklığın uzun eksenine dik yayılan kesme dalgalarının neden olduğu ilave etkiler değerlendirilmiştir. Dinamik çözümlemeler sonucu; genlikleri aynı olduğu sürece, etkiyen sismik dalga şekillerinin yenilme bölgesinin büyüklüğü üzerinde pek de önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca, incelenen açıklık geometrisinde, dalga yayılma yönü yenilme bölgesinin geometrisini önemli derecede etkilememiştir. Beklendiği gibi, dalga frekansındaki bir azalış veya en büyük arazi ivmesindeki bir artış yenilme bölgesi büyüklüğünü artırmaktadır. Açıklığın birincil gerilmelere göre belirlenen statik koşullardaki en uygun konumları, dinamik yükleme koşullarında da değişmemiştir.

Anahtar Sözcükler: yeraltı açıklıkları; tüneller; açıklık çevresindeki gerilmeler; analitik çözümlemeler; sayısal gerilme analizleri; aşırı gerilme / yenilme bölgesi; dinamik yüklerin etkisi; duraylılık.

Bilim Kodu: 607.01.02

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF GEOMETRICAL DESIGN
PARAMETERS ON THE DIMENSIONS OF FAILURE ZONE
OCCURRING AROUND DEEP UNDERGROUND OPENINGS UNDER
STATIC AND DYNAMIC CONDITIONS**

Melih GENİŞ

**Zonguldak Karaelmas University
Graduate School of Natural Applied Sciences
Department of Mining Engineering**

Thesis Advisor: Prof. Dr. Hasan GERÇEK

August 2002, 352 pages.

The shape and orientation of an underground opening are among the limited but important design alternatives of rock engineers who encounter instabilities due to induced stresses. If the project constraints do not include the shape and orientation of the opening, determination of the optimum design alternatives is among the primary tasks of the engineers. In addition, for underground openings planned in seismically active regions, the evaluation of stability should take into account not only the static conditions but also the dynamic loads.

ABSTRACT (continued)

This thesis research involves the investigation of the effects of some geometrical design parameters on the dimensions of failure zone occurring around deep underground openings under static and dynamic conditions.

Firstly, in the second section, various criteria and approaches existing in the literature have been summarized for the assessment of instabilities of underground openings subjected to high induced stresses.

Then, in the third section, the stability effects of some geometrical design parameters, such as the cross-sectional shape and width-to-height (W/H) ratio of an opening, have been investigated and favorable orientations of the opening with respect to the in situ stress field have been evaluated. Two-dimensional stress analyses have been used for determination of overstressed or yielded regions occurring around the openings. In linear-elastic analyses, a mathematical solution has been used while FLAC^{2D} (finite difference stress analysis) program has been utilized in the elasto-plastic analyses. In order to determine the favorable orientation of the openings, two in-situ stress fields have been considered: anisotropic (three principles components are of different magnitudes) and transversely anisotropic (two of the three principle components are of equal magnitudes) states of stress. In the study; elliptical, ovaloidal, arched-roof and rectangular opening shapes with varying aspect ratios have been compared. The results of the static analyses have shown that among all the opening shapes studied, the rectangular geometry has resulted in the worst stability. In an anisotropic in-situ stress field; when the vertical stress is the minimum component, the longitudinal axis of the opening should be oriented parallel to the

ABSTRACT (continued)

maximum of the horizontal stresses. Conversely, if the vertical stress is the maximum component, the longitudinal axis of the opening should be oriented parallel to the minimum of the horizontal stresses. In transversely anisotropic in-situ stress field; when the vertical in-situ stress is the maximum component, the favorable orientation of the opening depends on the W/H ratio of opening and on the ratio of in-situ stresses field.

In the fourth section, the information related to the studies on the behaviour of deep underground openings subjected to dynamic stresses has been summarized.

In the fifth section; the effects of dynamic loading parameters, in-situ stress field and mechanical properties of the rock mass on the size of the failure zone occurring around a deep underground opening have been investigated. In the two-dimensional dynamic analyses, the additional effects caused by a shear wave, propagating normal to the longitudinal axis of the opening, have been evaluated. It has been observed that, as long as the amplitudes are same, the shapes of the acting seismic wave do not have an important effect on the size of yield zone. Also, for the opening shape studied, the direction of a propagating wave has not greatly affected the geometry of the yield zone. As expected, a decrease in the value of the wave frequency or an increase in the value of the maximum ground acceleration increases the size of the yield zone. The favorable orientations of an underground opening determined under static conditions have not changed under seismic conditions.

Keywords: underground excavations; tunnels; stress around openings; analytical solutions; numerical stress analysis; overstressed / yield zone; influence of dynamic loads; stability.

Science Code: 607.01.02

TEŞEKKÜR

Yazar, tez çalışmalarına yön veren çok değerli görüş ve katkılarından dolayı Prof.Dr. Hasan GERÇEK'e (ZKÜ, Tez Danışmanı); Japonya'daki çalışmaları sırasındaki çok değerli görüş ve katkılarından dolayı Prof.Dr. Ömer AYDAN'a (Tokai Üniversitesi, Shimizu, Japonya); çok değerli katkılarından dolayı Prof.Dr. Reşat ULUSAY'a (HÜ), Prof.Dr. Erdal ÜNAL'a (ODTÜ), Prof.Dr. Yadigar MÜFTÜOĞLU'na (ZKÜ), Prof.Dr. Nuri Ali AKÇIN'a (ZKÜ), Arş.Gör. Ahmet ÖZARSLAN'a (ZKÜ), Yrd.Doç.Dr. Tuğrul ÜNLÜ'ye (ZKÜ), Yrd.Doç.Dr. Dursun SARI'ya (SDÜ), Dr. Murat NURLU'ya (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Deprem Araştırma Dairesi), Dr. Tarou MINATO'ya (Tokai Üniversitesi, Japonya), Ide TOMAHIKO'ya (Tokai Üniversitesi, Japonya), Yrd.Doç.Dr. Olgay YARALI'ya (ZKÜ), Dr. Nergiz ŞAHİN'e (MTA); tez jürisi olarak katkılarından dolayı Yrd.Doç.Dr. Kenan ÇOLAK'a (ZKÜ); Bilgisayar programı kullanımına olanak sağladığı için ODTÜ Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na; Japonya çalışmalarına maddi destek sağlayan Matsumae Uluslararası Vakfı'na (Tokyo, Japonya), Tokai Üniversitesi Deniz İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na (Shimizu, Japonya) ve

daima maddi ve manevi destek oldukları için eşi Berrin GENİŞ'e ve ailesine sonsuz teşekkür borçludur.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxix
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1 KONUNUN ÖNEMİ.....	1
1.2 TEZİN AMACI.....	3
1.3 TEZİN KAPSAMI.....	3
BÖLÜM 2 YERALTI AÇIKLIKLARI ÇEVRESİNDEKİ YENİLME BÖLGELERİ VE DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ.....	6
2.1 GİRİŞ.....	6
2.2 GERİLME DAĞILIMI.....	8
2.3 YENİLME ÖLÇÜTLERİ.....	18
2.4 YENİLME BÖLGESİ.....	20

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

2.5 DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ.....	36
2.5.1 Dairesel Açıklık Geometrisi.....	36
2.5.2 Dairesel Olmayan Açıklık Geometrisi.....	41
2.6 DURAYLILIK ÖLÇÜTLERİ.....	48

BÖLÜM 3 YERALTI AÇIKLIKLARININ STATİK KOŞULLARDA

DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ.....	69
3.1 ÇALIŞMADA İZLENEN YAKLAŞIM.....	69
3.1.1 Kullanılan Gerilme Çözümlemesi Yöntemleri.....	69
3.1.2 Birincil Gerilme Alanı.....	70
3.1.2.1 Anizotropik Birincil Gerilme Durumu.....	74
3.1.2.2 Düzlemsel Anizotropik Birincil Gerilme Durumu.....	77
3.1.3 Yenilme Ölçütü.....	79
3.1.4 Duraylılık İndisleri.....	79
3.1.4.1 Aşırı Gerilme Bölgesi İndisi.....	79
3.1.4.2 Yenilme Bölgesi İndisi.....	80
3.1.5 Açıklık Geometrilere.....	82
3.1.5.1 Kesit Şekilleri.....	82
3.1.5.2 Genişlik/Yükseklik Oranı.....	86
3.2 DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ.....	86
3.2.1 Birincil Gerilme Alanının Duraylılığa Etkisi.....	86
3.2.1.1 Anizotropik Birincil Gerilme Alanının Duraylılığa Etkisi.....	88
3.2.1.2 Düzlemsel Anizotropik Birincil Gerilme Alanının Duraylılığa Etkisi.....	118

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

3.2.2 Açıklık Geometrisinin Duraylılığa Etkisi.....	144
3.2.3 Genel Değerlendirme.....	150

BÖLÜM 4 YERALTI AÇIKLIKLARININ DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI..... 153

4.1 JEOLJİK ORTAMDA SİSMİK DALGA YAYILIMI.....	153
4.1.1 Deprem Büyüklüğü.....	158
4.1.2 Arazi Hareketinin Şiddeti ve Frekansı.....	159
4.1.3 Şiddetli Hareketin Süresi.....	160
4.2 ARAZİ HAREKETİNİN YERALTI YAPILARINA ETKİSİ.....	162
4.2.1 Dalga Yayılımı Yönü Etkisi.....	164
4.2.2 Yeraltı Açıklıkları Çevresindeki Dinamik Gerilmeler.....	168
4.2.3 Yeraltı Yapılarında Oluşan Hasar Türleri.....	171
4.2.3.1 Faylanma.....	172
4.2.3.2 Arazi Yenilmesi.....	172
4.2.3.3 Sarsıntı.....	172
4.3 YERALTI AÇIKLIKLARINDA DEPREM GÖZLEMLERİ VE DİNAMİK ÇÖZÜMLEME.....	173
4.4 SİSMİK TASARIM ÖNERİLERİ VE HASARIN AZALTILMASI.....	197

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 5 YERALTI AÇIKLIKLARININ DİNAMİK KOŞULLARDA

DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ.....	201
5.1 DİNAMİK ÇÖZÜMLEMELER.....	201
5.1.1 Dinamik Yükleme ve Sınır Koşulları.....	202
5.1.1.1 Dinamik Girdi Uygulamaları.....	202
5.1.1.2 Viskoz Sınır.....	204
5.1.1.3 Serbest Alan Sınırı.....	205
5.1.1.4 Üç Boyutlu Yayılma Sönümlemesi.....	205
5.1.2 Dalga Geçişi.....	206
5.2 ÇÖZÜMLEME YAKLAŞIMI.....	206
5.2.1 Birincil Gerilme Alanı.....	206
5.2.2 Açıklık Geometrisi.....	207
5.2.3 Kaya Kütlesinin Dayanımı ve Özellikleri.....	207
5.2.4 Sınır Koşulları ve Dinamik Yükleme.....	207
5.2.5 Duraylılığın Karşılaştırılması.....	215
5.3 DİNAMİK DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ.....	215
5.3.1 Dinamik Girdi Değiştirgelerinin Etkisi.....	217
5.3.1.1 Dalga Şeklinin Etkisi.....	217
5.3.1.2 En Büyük Yer İvmesinin Etkisi.....	233
5.3.1.3 Dalga Frekansının Etkisi.....	259
5.3.1.4 Dalga Yayılma Yönünün Etkisi.....	259
5.3.2 Açıklık Genişlik/Yükseklik Oranı Etkisi.....	263
5.3.3 Kaya Kütlesi Dayanımı ve Deformasyon Modülünün Etkisi.....	269

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

5.3.4 Tartışma ve Yorum.....	278
5.3.4.1 Dinamik Mekanik Özellikler.....	278
5.3.4.2 Deprem Kaynağına Olan Uzaklık.....	283
5.3.5 Genel Değerlendirme.....	283
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	285
6.1 SONUÇLAR.....	285
6.2 ÖNERİLER.....	289
KAYNAKLAR.....	291
BİBLİYOGRAFYA.....	301
EK AÇIKLAMALAR A. HOEK-BROWN YENİLME ÖLÇÜTÜ.....	305
EK AÇIKLAMALAR B. MOHR-COULOMB YENİLME ÖLÇÜTÜ.....	314
EK AÇIKLAMALAR C. FLAC ^{2D} PROGRAMININ TANITILMASI.....	317
EK AÇIKLAMALAR D. SONLU FARKLAR AĞI İÇİN OLUŞTURULAN FISH İŞLEVLERİ.....	321
EK AÇIKLAMALAR E. ÇÖZÜMLEMELERDE KULLANILAN FLAC DOSYALARINA İLİŞKİN ÖRNEKLER.....	345

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Masif elastik kaya kütlesi içindeki yeraltı açıklıklarının tasarım metodolojisi.....	7
2.2 Birincil gerilme alanı ve yeraltı açıklığı çevresindeki ikincil gerilme alanı.....	10
2.3 Dairesel açıklık çevresinde birincil gerilme durumunun sınıflandırılması.....	13
2.4 Çeşitli açıklık geometrilerinde ($W/H=0.5, 1, 2$), açıklığın yan duvarında ve tavanında oluşan teğetsel gerilmelerin birincil gerilme oranına bağlı değişimi	16
2.5 Çözümlemede varsayılan malzeme davranışları.....	21
2.6 Hidrostatik birincil gerilme alanında dairesele açıklık çevresindeki yenilme bölgesi.....	21
2.7 Birincil gerilmeye göre normalleştirilmiş kaya kütlesi dayanımı ile açıklık yarıçapına göre normalleştirilmiş yenilme bölgesi yarıçapı arasındaki ilişki.....	25
2.8 Farklı içsel basınç değerlerinde, birincil gerilmeye göre normalleştirilmiş kaya kütlesi dayanımı ile açıklık yarıçapına göre normalleştirilmiş yenilme bölgesi yarıçapı arasındaki ilişki	25
2.9 Hidrostatik olmayan birincil gerilme alanlarında, dairesele açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi geometrisi.....	28
2.10 Durum incelemeleri esas alınarak, tahkimatsız dairesele açıklık için birincil gerilme durumu ve yenilme şekilleri arasındaki ilişki	33
2.11 Açıklık yüzeyindeki en büyük teğetsel gerilme ve yenilme kalınlığı arasındaki ilişki.....	33
2.12 Durum incelemelerine bağlı yenilme kalınlığı	35
2.13 Çeşitli birincil gerilme oranında daire açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi.....	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No:

Sayfa

2.14	Dairesel açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi	39
2.15	Dairesel açıklık için normalleştirilmiş birincil gerilme ve en büyük yenilme bölgesi kalınlığı arasındaki ilişki	40
2.16	Dairesel açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi üzerine birincil gerilmelerin etkisi.....	42
2.17	Hidrostatik birincil gerilme alanında çeşitli açıklıklarda oluşan yenilme bölgesi geometrisi.....	43
2.18	Hidrostatik birincil gerilme alanında, W/H=0.6 olan dikdörtgen açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi.....	45
2.19	Hidrostatik birincil gerilme alanında, W/H=0.6 olan dikdörtgen açıklığın yan ve tavan duvarlarında oluşan yenilme bölgesinin kalınlığının değişimi.....	46
2.20	Çeşitli birincil gerilme oranında, W/H=1.4 olan elips açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi.....	47
2.21	Güney Afrika'da kare açıklıklar için geliştirilen görgül duraylılık sınıflaması.....	49
2.22	URL'deki deneme galerisinin kazı tamamlandıktan sonraki geometrisi.....	51
2.23	Kare açıklık çevresinde, P_{max}/σ_{ci} değerleri ile aşırı gerilme bölgesi değişimi.....	53
2.24	Hoek-Brown duraylılık sınıflaması için $\sigma_\theta/\sigma_{ci}$ oranının bir fonksiyonu olarak hasar indeksinin tanımlanması.....	55
2.25	Açıklık yüzeyindeki teğetsel ikincil gerilme, RMR ve Q değerleri ile yaklaşık tahkimat önerileri.....	56
2.26	W/H=2 olan açıklık geometrilerinde, aşırı gerilme bölgesi geometrisinin, dayanım değişirgeleri (σ_{ci} , GSI) ile değişimi.....	59
2.27	Aşırı gerilme bölgesi indisinin (IOZ), GSI ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_i=10$).....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No:

Sayfa

2.28	Dikdörtgen açıklıkta, aşırı gerilme bölgesi indisinin (IOZ), kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) ile değişimi ($m_i=10$, $GSI=60$).....	62
2.29	Aşırı gerilme bölgesi geometrisinin açıklık şekli ve W/H oranı ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_i=10$, $GSI=60$).....	63
2.30	W/H=2 olan bir ovaloid açıklık için aşırı gerilme bölgesi geometrisinin birincil gerilmelerin konumu ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_i=10$, $GSI=60$).....	64
2.31	Dikdörtgen açıklıklarda, aşırı gerilme bölgesinin birincil gerilme alanı ve açıklığın W/H oranı ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_i=10$, $GSI=60$) ...	66
2.32	Aşırı gerilme bölgesi indisinin (IOZ), açıklığın W/H oranı ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_i=10$, $GSI=60$).....	67
3.1	Birincil gerilme alanının asal bileşenleri ve açıklığın konumu.....	73
3.2	Anizotropik (yönlere bağlı) birincil gerilme durumlarının oktahedral düzlemde gösterimi ve Hoek-Brown yenilme zarfı.....	76
3.3	Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumlarının oktahedral düzlemde gösterimi ve Hoek-Brown yenilme zarfı ($P_{max}/P_{min}=2$).....	78
3.4	Aşırı gerilme bölgesi indisi (IOZ) ve yenilme bölgesi indisi (IYZ).....	81
3.5	İncelenen açıklık kesit şekilleri.....	83
3.6	Statik çözümleme için kullanılan sonlu farklar ağı ve sınır koşulları ..	84
3.7	Kemer tavanlı kesitlerde W/H oranları.....	87
3.8	Elips, ovaloid ve dikdörtgen açıklık geometrilerinde, yatay ve düşey simetriden dolayı birincil gerilme durumlarına göre aynı çözümler.....	89
3.9	Anizotropik birincil gerilme durumunda, W/H=0.4 olan elips açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.....	90

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.10 Anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan ovaloid açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.....	93
3.11 Anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan dikdörtgen açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.....	96
3.12 Anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan kemer tavanlı açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.....	99
3.13 Anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=2.5$ olan kemer tavanlı açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.....	102
3.14 Elips açıklığının W/H oranı ve anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.....	106
3.15 Ovaloid açıklığının W/H oranı ve anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.....	107
3.16 Dikdörtgen açıklığının W/H oranı ve anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.....	108
3.17 Kemer tavanlı açıklığının W/H oranı ve anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.....	109
3.18 Anizotropik birincil gerilme ve açıklığının tüm çevresinde yenilme oluşmaması durumunda; daire, $W/H=0.6$ olan elips, ovaloid, dikdörtgen açıklık çevresinde yenilme bölgeleri.....	112
3.19 Anizotropik birincil gerilme ve açıklığının tüm çevresinde yenilme oluşmaması durumunda; $W/H=1.66$ ve 0.6 olan kemer tavanlı açıklık çevresinde yenilme bölgeleri.....	115
3.20 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan elips açıklık çevresinde yenilme bölgesi.....	119
3.21 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan ovaloid açıklık çevresinde yenilme bölgesi.....	121
3.22 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan dikdörtgen açıklık çevresinde yenilme bölgesi.....	123
3.23 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda; $W/H=0.4$ olan kemer tavanlı açıklık çevresinde yenilme bölgesi.....	125

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.24 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=2.5$ olan kemer tavanlı açıklık çevresinde yenilme bölgesi.....	127
3.25 Elips açıklığın W/H oranı ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.....	129
3.26 Ovaloid açıklığın W/H oranı ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.....	130
3.27 Dikdörtgen açıklığın W/H oranı ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.....	131
3.28 Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$ ve $P_{max}/P_{min}=2$) olduğu durumda, kemer tavanlı açıklığın W/H oranı ile IYZ değerlerinin değişimi (üç eksenli sıkışma durumu).....	132
3.29 Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_1$ ve $P_{max}/P_{min}=2$) olduğu durumda, kemer tavanlı açıklığın W/H oranı ile IYZ değerlerinin değişimi (üç eksenli uzama durumu).....	132
3.30 Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$ ve $P_{max}/P_{min}=3$) olduğu durumda, kemer tavanlı açıklığın W/H oranı ile IYZ değerlerinin değişimi (üç eksenli sıkışma durumu).....	134
3.31 Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_1$ ve $P_{max}/P_{min}=3$) olduğu durumda, kemer tavanlı açıklığın W/H oranı ile IYZ değerlerinin değişimi (üç eksenli uzama durumu).....	134
3.32 Kemer tavanlı açıklık için, P_{max}/P_{min} oranının artışının W/H oranı ve IYZ değerleri ile değişimi.....	135
3.33 $W/H=3$ olan dikdörtgen açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesine birincil gerilme alanının etkisi.....	138
3.34 Dikdörtgen açıklıklar için birincil gerilmeler oranı (k) ve genişlik yükseklik oranı (W/H) ile IOZ değişimi.....	138
3.35 Dairesel açıklık için farklı düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında yenilme bölgesi ve IYZ değerleri.....	140
3.36 $W/H=0.5$ olan dikdörtgen açıklık için farklı düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında yenilme bölgesi ve IYZ değerleri.....	141

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No:

Sayfa

3.37	W/H=2 olan dikdörtgen açıklık için farklı düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında yenilme bölgesi ve IYZ değerleri.....	142
3.38	Farklı birincil gerilme alanlarında dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri ($\sigma_{cm}=10$ MPa, $\phi=30^\circ$).....	143
3.39	Anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme en küçük bileşen ($P_v=P_3$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi.....	145
3.40	Anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme ortanca bileşen ($P_v=P_2$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi.....	146
3.41	Anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme en büyük bileşen ($P_v=P_1$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi.....	147
3.42	Düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme en küçük bileşen ($P_v=P_3$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi.....	148
3.43	Düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme en büyük bileşen ($P_v=P_1$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi.....	149
3.44	Anizotropik ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, W/H=2.5 olan kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerleri.....	152
4.1	Deprem dalgalarının oluşturduğu arazi hareketleri.....	154
4.2	Yarı elastik ortamda, Poisson oranı ve P, S ve Rayleigh (R) dalgalarının yayılma hızları arasındaki ilişki.....	157
4.3	Arazi ivmesi, peryodu ve yerdeğiştirme arasındaki ilişki.....	161
4.4	İvme değişiminin ± 0.05 g değerleri esas alınarak deprem süresinin belirlenmesi.....	163
4.5	Sismik yükler sonucu yeraltı açıklığında oluşan şekil değişikliği türleri.....	165

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.6 Eksenel birim şekil değişikliğine neden olan cisim dalgaları.....	170
4.7 Eksenel doğrultuda, beton kaplama ve kayacın birim şekil değiştirmesi.....	175
4.8 Açıklık kesit düzleminde, beton kaplama ve kayacın birim şekil değiştirmesi.....	176
4.9 Beton kaplamada oluşan birim şekil değiştirme ile birim şekil değiştirme sonucu oluşan açıklık geometrisi.....	178
4.10 Beton kaplamada oluşan birim şekil değiştirme ile düşey doğrultuda oluşan parçacık hızı arasındaki ilişki.....	179
4.11 Beton kaplamada oluşan birim şekil değiştirme ile yatay doğrultuda oluşan parçacık hızı arasındaki ilişki.....	179
4.12 Depremler için en büyük yer ivmesine göre hasar.....	182
4.13 Depremler için en büyük parçacık hızına göre hasar.....	183
4.14 Derinliğin hasara etkisi.....	187
4.15 Deprem büyüklüğünün hasara etkisi.....	187
4.16 Deprem dış merkezine olan uzaklığın hasara etkisi.....	188
4.17 Yüzeyde tahmin edilen en büyük yer ivmesinin hasara etkisi.....	188
4.18 Tahmin edilen en büyük yer ivmesi ve derinlik ile hasarın ilişkisi.....	190
4.19 Elasto-plastik dinamik çözümleme sonucu dairesel açıklık çevresinde oluşan yerdeğiştirme.....	196
4.20 Çözümlemede kullanılan gerçek ivme kaydı.....	196
4.21 İki tabakalı ortamda oluşturulan kemer tavanlı açıklığın sonlu farklar ağı ve sınır koşulları.....	198
4.22 Dinamik çözümleme sonucu yeryüzünde oluşan en büyük ivmenin ortamın deformasyon modülü ile değişimi.....	198
5.1 Dinamik yükleme ve sınır koşulları.....	203

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No:	Sayfa
5.2	Dinamik çözümlemelerde kullanılan kemer tavanlı açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı ve viskoz sınır..... 209
5.3	Çözümlemede kullanılan dalga şekilleri..... 210
5.4	İvme ve hız değişimi ($f=2$)..... 214
5.5	Modelin alt sınırına uygulanan ve model içine doğru yayılan dinamik yüklemenin genliğindeki azalma..... 216
5.6	Hidrostatik birincil gerilme alanında, dinamik dalga şeklinin dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesine ve IYZ değerlerine etkisi..... 219
5.7	Çözümlemelerde kullanılan gerçek deprem kayıtları..... 221
5.8	Dinamik çözümlemelerde kullanılan gerçek deprem kayıtlarına ilişkin Fourier spektrumları..... 224
5.9	Erzincan depremine ait dalga şekli ve sinüs işlevi ile tanımlanan dalga şekilleri kullanılarak yapılan çözümlemelerin karşılaştırılması.. 228
5.10	Adana-Ceyhan depremine ait dalga şekli ve sinüs işlevi ile tanımlanan dalga şekilleri kullanılarak yapılan çözümlemelerin karşılaştırılması..... 229
5.11	Kocaeli depremine ait dalga şekli ve sinüs işlevi ile tanımlanan dalga şekilleri kullanılarak yapılan çözümlemelerin karşılaştırılması..... 230
5.12	Düzce depremine ait dalga şekli ve sinüs işlevi ile tanımlanan dalga şekilleri kullanılarak yapılan çözümlemelerin karşılaştırılması..... 231
5.13	Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=30$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 235
5.14	Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=30$ MPa ve $P_z=20$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 237

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No:

Sayfa

- 5.15 W/H=1 olan kemer tavanlı açıklığın anizotropik birincil gerilme alanlarında, açıklık tabanındaki en büyük ivme ile IYZ değerleri değişimi..... 239
- 5.16 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=20$ MPa, $P_h=30$ MPa ve $P_z=10$ MPa), W/H=1 olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 241
- 5.17 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=20$ MPa, $P_h=10$ MPa ve $P_z=30$ MPa), W/H=1 olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 243
- 5.18 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=30$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=10$ MPa), W/H=1 olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 245
- 5.19 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=30$ MPa, $P_h=10$ MPa ve $P_z=20$ MPa), W/H=1 olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 247
- 5.20 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=10$ MPa), W/H=1 olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 250
- 5.21 W/H=1 olan kemer tavanlı açıklığın düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında, açıklık tabanındaki en büyük ivme ile IYZ değerleri değişimi..... 252
- 5.22 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=10$ MPa ve $P_z=20$ MPa), W/H=1 olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 253
- 5.23 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=20$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=10$ MPa), W/H=1 olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 255

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No:

Sayfa

- 5.24 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=20$ MPa, $P_h=10$ MPa ve $P_z=20$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi..... 257
- 5.25 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=30$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin dalga frekansı ile değişimi..... 260
- 5.26 $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklığa etkiyen farklı dalga frekanslarında, açıklık tabanındaki en büyük ivmenin IYZ değerleri ile değişimi..... 262
- 5.27 Hidrostatik birincil gerilme alanında, $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklık geometrisinde dalga yayılma yönünün IYZ değerine etkisi..... 264
- 5.28 Farklı W/H oranlarındaki kemer tavanlı açıklığın, açıklık tabanındaki en büyük ivmenin IYZ değerleri ile değişimi..... 265
- 5.29 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=30$ MPa) farklı W/H oranına sahip kemer tavanlı açıklıkta statik ve dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerleri..... 266
- 5.30 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=30$ MPa) $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta statik ve dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin GSI ile değişimi..... 270
- 5.31 $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta farklı GSI değerleri için, açıklık tabanındaki en büyük ivmenin IYZ değerleri ile değişimi..... 272
- 5.32 Hidrostatik birincil gerilme alanında; farklı GSI ve E_m değerlerinde oluşturulan dairesel açıklıkta oluşan IYZ değerlerinin değişimi..... 274
- 5.33 Hidrostatik birincil gerilme durumunda ($P_o=20$ MPa) dairesel açıklıkta statik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin, GSI ve deformasyon modülü ile değişimi..... 275

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No:	Sayfa
5.34 Hidrostatik birincil gerilme durumunda ($P_0=20$ MPa) dairesel açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin, GSI ve deformasyon modülü ile değişimi.....	276
5.35 Bukit Timah graniti için dinamik tek eksenli basınç dayanımının yükleme hızı ile değişimi.....	280
5.36 Bukit Timah graniti için dinamik tek eksenli çekme dayanımı ve dinamik kohezyonun yükleme hızı ile değişimi.....	280
5.37 Bukit Timah granitlerinde yapılan üç eksenli basınç dayanımı deneylerinde yükleme hızının etkisi.....	282
5.38 Dinamik çözümlemelerle incelenebilecek açıklıkların aktif faylara göre durumları.....	282
A.1 Hoek-Brown yenilme ölçütünün asal gerilmeler uzayında tanımlanması.....	307
A.2 Jeolojik tanımlamalara dayalı Jeolojik Dayanım İndeksinin tahmini...	310
A.3 Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre tanımlanan dayanım katsayısının $\tau' - \sigma'$ ve $\sigma_1' - \sigma_3'$ uzaylarında gösterimi.....	313
B.1 Mohr-Coulomb yenilme ölçütünün asal gerilmeler uzayında tanımlanması.....	316
C.1 Temel açık (kesin) hesaplama döngüsü.....	319
D.1 ρ' ve θ değiştirgelerinin tanımlanması.....	323
D.2 Statik çözümleme için elips açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı (W/H=0.4).....	326
D.3 Statik çözümleme için ovaloid açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı (W/H=0.4).....	328
D.4 Statik çözümleme için dikdörtgen açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı (W/H=0.4).....	331
D.5 Statik çözümleme için kemer tavanlı açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı (W/H=0.4).....	334

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No:

Sayfa

- D.6 Dinamik çözümleme için kemer tavanlı açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı ($W/H=1$)..... 336
- D.7 Dinamik çözümlemede sismik dalganın 45° etkidiğı durumlar için kemer tavanlı açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı ($W/H=1$)..... 340



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Kritik sapkınlık değerleri.....	30
2.2 İncelenen açıklıklarda oluşan yenilme bölgesi yarıçapları ve birincil gerilmeler oranı.....	32
2.3 Hindistan'da gözlemlere dayalı geliştirilen görgül duraylılık sınıflaması.....	52
3.1 Dünyanın çeşitli bölgelerinde yapılan birincil gerilme ölçümleri.....	71
3.2 Göz önünde bulundurulan anizotropik birincil gerilme durumları.....	74
3.3 Göz önünde bulundurulan düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumları.....	79
3.4 İncelenen birincil gerilme bileşenleri ve yenilme bölgesi yarıçapları...	144
4.1 Deprem büyüklüklerinin tanımı ve uygulama yerleri.....	159
4.2 Belirli bir açı ile etkiyen sismik dalgaların yeraltı açıklığında oluşturduğu birim şekil değişikliği.....	170
4.3 Shin-Usami tüneline yapılan ölçümler.....	177
4.4 Yeraltı hidroelektrik santrallerinde deprem sırasında insanların hissettikleri etkiler.....	184
4.5 Acil araştırma aşaması için tünel hasarı sınıflaması.....	192
4.6 Chi-Chi depremi sonucu tünellerde oluşan hasarın dağılımı.....	192
4.7 Tünel hasarını etkileyen olası faktörler.....	193
4.8 Sayısal çözümlemelerde kullanılan tabaka özellikleri.....	195
5.1 Uygulanan sismik dalga ve sonlu farklar ağının özellikleri.....	211
5.2 Yeryüzünde oluşan ivmenin açıklığın derinliğine göre değişimi.....	212
5.3 Gerçek deprem kayıtlarına ilişkin özellikler.....	226

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No:</u>	<u>Sayfa</u>
5.4	Çözümlemede kullanılan gerçek deprem kayıtları ve basitleştirilmiş dalga şeklinde açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi indisi..... 227
5.5	Çözümlemede kullanılan kaya kütlesi dayanımı ve deformasyon modülü değerleri..... 273
A.1	Sağlam kayalar için m_i değerleri..... 308
D.1	Sonlu farklar ağı için geliştirilen Fish işlevleri..... 324
D.2	Kemer tavanlı açıklık için geometriyi tanımlamak için kullanılan değiştirgeler..... 325
D.3	Dörtte bir simetrik elips açıklık için geliştirilen Fish işlevi..... 327
D.4	Dörtte bir simetrik ovaloid açıklık için geliştirilen Fish işlevi..... 329
D.5	Dörtte bir simetrik dikdörtgen açıklık için geliştirilen Fish işlevi..... 332
D.6	Yarım simetrik kemer tavanlı açıklık için geliştirilen Fish işlevi..... 335
D.7	Dinamik çözümlemelerde, kemer tavanlı açıklık için geliştirilen Fish işlevi..... 337
D.8	Dinamik çözümlemelerde dalga yayılma yönünün 45° olması durumunda, kemer tavanlı açıklık için geliştirilen Fish işlevi..... 341
E.1	Elips, ovaloid ve dikdörtgen açıklıkların statik çözümlemesi için kullanılan işlemler..... 346
E.2	Kemer tavanlı açıklığın statik çözümlemesi için kullanılan işlemler... 347
E.3	Dinamik çözümleme öncesi yapılan statik çözümleme için kullanılan işlemler..... 348
E.4	Sabit genlikli sinüs işlevinin dinamik girdi olarak kullanıldığı dinamik çözümleme için kullanılan işlemler..... 349
E.5	Artan-azalan genlikli sinüs işlevinin dinamik girdi olarak kullanıldığı dinamik çözümleme için kullanılan işlemler..... 350
E.6	Gerçek deprem dalgasının dinamik girdi olarak kullanıldığı dinamik çözümleme için kullanılan işlemler..... 351

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a_2	=	kemer tavanlı açıklık geometrisini belirleyen katsayı
a_3	=	kemer tavanlı açıklık geometrisini belirleyen katsayı
$a_{\max}$	=	en büyük ivme
$(a_{\max})_g$	=	yeryüzünde oluşan en büyük arazi ivmesi
A	=	açıklık geometrisine bağlı katsayı
A'	=	dalganın en büyük genliği
A_d	=	kaya malzemesi sabiti
A_f	=	aşırı gerilme bölgesi alanı
A_o	=	açıklık kesit alanı
A_y	=	yenilme bölgesi alanı
b_1	=	kemer tavanlı açıklık geometrisini belirleyen katsayı
B	=	açıklık geometrisine bağlı katsayı
c^*	=	kırılmış kaya kütlelerinin kohezyonu
c_d	=	kaya malzemesinin dinamik kohezyonu
c_i	=	açıklık geometrisini belirleyen katsayılar $i=1,3,5,7$
c_m	=	kaya kütlelerinin kohezyonu
C_p	=	P dalgasının yayılma hızı
C_r	=	Rayleigh dalgasının yayılma hızı
C_s	=	S dalgasının yayılma hızı
D	=	yenilme bölgesinin en büyük kalınlığı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

D'	=	açıklık boyutu
D_i	=	hasar indeksi
D_x	=	x- yönündeki en büyük yenilme bölgesi kalınlığı
D_y	=	y- yönündeki en büyük yenilme bölgesi kalınlığı
E_{dyn}	=	kaya kütlelerinin deformasyon modülü
E_{st}	=	kaya malzemesinin statik deformasyon modülü
f	=	dalga frekansı
g	=	yerçekimi ivmesi
$(GK)_s$	=	"kayma"ya göre dayanım faktörü veya güvenlik katsayısı
$(GK)_T$	=	"çekme"ye göre dayanım faktörü veya güvenlik katsayısı
$h(m)$	=	Gauss hipergeometrik serisi
H	=	açıklık yüksekliği
I_1	=	gerilme gereyinin birinci değişmezi
J_2	=	saptırıcı gerilme gereyinin ikinci değişmezi
J_3	=	saptırıcı gerilme gereyinin üçüncü değişmezi
k	=	açıklık kesit düzlemindeki asal birincil gerilmelerin oranı
k_z	=	eksenel birincil gerilmenin düşey birincil gerilmeye oranı
m	=	sapkınlık
m^*	=	kritik sapkınlık
m_b	=	Hoek-Brown yenilme ölçütünde kaya kütlelerinin karakteristiklerine bağlı sabit
m_r	=	Hoek-Brown yenilme ölçütünde kırılmış kaya kütlelerinin karakteristiklerine bağlı sabit
M	=	kaya malzemesi dayanım özellikleri ve birincil gerilme bileşenlerine bağlı katsayı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

M_B	=	cisim dalgası deprem büyüklüğü
M_L	=	yerel deprem büyüklüğü
M_S	=	yüzey dalgası deprem büyüklüğü
M_W	=	moment deprem büyüklüğü
N	=	kaya malzemesi dayanım özellikleri ve birincil gerilme bileşenlerine bağlı katsayı
N_ϕ	=	kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısına bağlı sabit
N_ϕ^*	=	kırılmış kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısına bağlı sabit
P	=	gerilme ölçeği
P'	=	en büyük ve en küçük asal birincil gerilmelerin aritmetik ortalaması
P_0	=	hidrostatik birincil gerilme
P_1	=	en büyük asal birincil gerilme
P_2	=	ortanca asal birincil gerilme
P_3	=	en küçük asal birincil gerilme
P_h	=	yatay asal birincil gerilme
P_i	=	içsel (tahkimat) basınç
P_{max}	=	en büyük birincil gerilme
P_{min}	=	en küçük birincil gerilme
P_v	=	düşey asal birincil gerilme
P_x	=	açıklık kesit düzleminde birincil gerilme alanının yatay bileşeni
P_{xy}	=	xy düzlemindeki kayma birincil gerilmesi
P_y	=	açıklık kesit düzleminde birincil gerilme alanının düşey bileşeni
P_{yz}	=	yz düzlemindeki kayma birincil gerilmesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

P_z	=	eksenel birincil gerilme
P_{zx}	=	zx düzlemindeki kayma birincil gerilmesi
Q	=	tünelcilik niteliği indeksi
r	=	açıklık merkezinden olan uzaklık
R	=	dairesel açıklığın yarıçapı
R_e	=	deprem odak merkezinden olan uzaklık
R_p	=	yenilme bölgesi yarıçapı
$R_{p \max}$	=	en büyük yenilme bölgesi yarıçapı
$R_{p \min}$	=	en küçük yenilme bölgesi yarıçapı
s	=	Hoek-Brown yenilme ölçütünde kaya kütlelerinin karakteristiklerine bağlı sabit
s_r	=	Hoek-Brown yenilme ölçütünde kırılmış kaya kütlelerinin karakteristiklerine bağlı sabit
S'	=	en büyük ve en küçük asal birincil gerilmelerin farkının yarısı
V	=	hız
V_p	=	P dalgasının kayaçta oluşturduğu hız
V_s	=	S dalgasının kayaçta oluşturduğu hız
W	=	açıklık genişliği
x	=	açıklığın bulunduğu z- düzleminin yatay eksen
y	=	açıklığın bulunduğu z- düzleminin düşey eksen
z	=	açıklığın tanımlandığı düzlem
α	=	P'nin yatayla saat gidişi tersi yönünde yaptığı açı
α'	=	dilatasyon değiştirgesi
χ	=	artan-azalan genlikli dalga dalganın dalga şeklini etkileyen değiştirge

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$\Delta \ell$	= en büyük sonlu elemanlar boyutu
ε_l	= eksenel birim şekil değiştirme
ε_g	= arazinin dinamik birim şekil değiştirmesi
ε_n	= normal birim şekil değiştirme
ε_s	= yeraltı yapısının dinamik birim şekil değiştirmesi
ϕ	= kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı
ϕ_i	= kaya malzemesinin statik içsel sürtünme açısı
ϕ^*	= kırılmış kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı
γ	= kesme birim şekil değiştirmesi
η	= yapı ile arazi arasındaki katılık oranının bağlı sabit
φ	= tünel eksenini ile dalga yayılma doğrultusu arasındaki açı
λ	= dalga boyu
λ'	= Lamé sabiti
ν	= Poisson oranı
θ	= açıklık çevresindeki noktanın yatayla saat gidişi tersi yönünde yaptığı açı
θ'	= Lode açısı
ρ	= kaya kütlelerinin yoğunluğu
ρ_i	= kaya malzemesinin yoğunluğu
ρ'	= açıklık yüzeyine paralel koordinat bileşeni
σ'	= etkin gerilme
σ_l	= açıklık kesit düzlemindeki en büyük asal ikincil gerilme
σ_{ld}	= en büyük dinamik asal gerilme

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

σ_3	=	açıklık kesit düzlemindeki en küçük asal ikincil gerilme
σ_1'	=	en büyük asal etkin gerilme
σ_3'	=	en küçük asal etkin gerilme
σ_{cd}	=	dinamik tek eksenli basınç dayanımı
σ_{ci}	=	kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
σ_{cm}	=	kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı
σ_r	=	radyal ikincil gerilme
σ_{tm}	=	kaya kütlelerinin tek eksenli çekme dayanımı
σ_z	=	eksenel ikincil gerilme
σ_{cm}^*	=	kırılmış kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı
σ_θ	=	teğetsel ikincil gerilme
$(\sigma_{max})_p$	=	P dalgasının açıklık çevresinde oluşturduğu en büyük normal gerilme
$(\sigma_{max})_s$	=	S dalgasının açıklık çevresinde oluşturduğu en büyük normal gerilme
τ	=	kayma gerilmesi
τ'	=	etkin kayma gerilmesi
$\tau_{r\theta}$	=	$r\theta$ düzlemindeki kayma ikincil gerilmesi
τ_{zr}	=	zr düzlemindeki kayma ikincil gerilmesi
$\tau_{\theta z}$	=	θz düzlemindeki kayma ikincil gerilmesi
$\tau_{\theta z}$	=	θz düzlemindeki kayma ikincil gerilmesi
$(\tau_{max})_p$	=	P dalgasının açıklık çevresinde oluşturduğu en büyük kayma gerilmesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$(\tau_{\max})_s$	=	S dalgasının açıklık çevresinde oluşturduğu en büyük kayma gerilmesi
ψ	=	artan-azalan genlikli dalganın dalga şeklini etkileyen değiştirge
ϑ	=	artan-azalan genlikli dalganın dalga şeklini etkileyen değiştirge
α	=	Hoek-Brown yenilme ölçütünde kaya kütlelerinin karakteristiklerine bağlı sabit

KISALTMALAR

RMR	=	kaya kütleleri puanı (rock mass rating)
GSI	=	jeolojik dayanım indeksi (geological strength index)
W/H	=	açıklığın genişliğinin yüksekliğine oranı (width-to-height ratio)
URL	=	Yeraltı Araştırma Laboratuvarı (Underground Research Laboratory)
IOZ	=	aşırı gerilme bölgesi indisi (index of overstressed zone)
IYZ	=	yenilme bölgesi indisi (index of yield zone)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 KONUNUN ÖNEMİ

Yeraltı açıklıkları, tarihin ilk çağlarından günümüze değin çok farklı amaçlarla kullanılmıştır. Günümüzde de yeraltı açıklıkları bir çok amaçlar için (madencilik, ulaşım, savunma, atık depolama, yeraltı santralleri, doğal gaz veya petrol depolama vs.) inşa edilmektedir. Yeraltı açıklıkları hizmet verdikleri sürece kendilerinden beklenen duraylılık performansını göstermelidir. Bu çerçevede, yeraltı açıklıklarının duraylılığını etkileyen faktörlerin incelenmesi, kaya mekaniği ve kaya mühendisliği disiplinlerinin en önemli araştırma konularını oluşturmuştur.

Yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan yüksek ikincil gerilmelerin neden olduğu yenilmeler; kaya kütlelerinin mekanik özelliklerine, ortamdaki birincil gerilmelere, yeraltı açıklığının şekline ve birincil gerilmelere göre konumuna bağlıdır. Tasarımcı çoğu zaman bunlardan ilk ikisini olduğu gibi kabullenmek zorundadır. Açıklığın şekli ve konumu mühendislik sınırlamaları arasında değilse, tasarım analizlerinde doğrudan dikkate alınması dahil, tasarımcının kazı sırasında bunlarda uygun değişiklikleri yaparak açıklık çevresindeki olası yenilmeleri en düşük düzeyde tutması beklenir. Günümüz kaya mühendisliğinde, bu amaçla kullanılan tasarım yaklaşımlarının en başında, kapalı tip matematiksel çözümleme yöntemleri ve sayısal gerilme çözümleme yöntemleri gelmektedir. Bilindiği gibi, bu çözümleme yöntemlerinin en yararlı yönlerinden biri de, ikincil gerilmelerden

kaynaklanan duraysızlık bölgelerinin (aşırı gerilme ve/veya yenilme bölgesinin) belirlenmesinin yanısıra, duraysızlığın önlenmesi için gerekli önlemlerin alınmasında tasarımcılara büyük bir olanak sağlamasıdır. Bu amaçla yapılan değiştirgesel (parametrik) çalışmalarda, çeşitli girdi değerlerinin kabul edilebilir en büyük aralıkta değişimleri ve bunların çözümleme sonuçlarına etkileri belirlenir. Bu şekilde, olası çözümlerin de bir aralığı (özellikle alt ve üst sınırları) elde edilerek tahkimat tasarımıyla ilgili karar verme aşamasında yardımcı olabilecek uygulanabilir bilgiler sağlanmaktadır.

Literatürde, yeraltı açıklıklarında ikincil gerilmelerden kaynaklanan duraysızlıkların değerlendirilmesine ilişkin bir çok çalışma bulunmaktadır. Ancak, bunların çoğu özel bir veya bir kaç durumu irdelemekle sınırlanmaktadır. Genelleştirme yapılabilmesi için bazı tasarım değiştirgelerinin geniş bir aralıktaki değişiminin duraylılığa etkisinin karşılaştırmalı olarak irdelenmesi gerekmektedir.

Genelde, yeraltı açıklıklarının duraylılıklarının değerlendirilmesi amacıyla yapılan çözümlemelerde statik koşullar göz önünde bulundurulmaktadır. Ancak sismik etkinliğin yüksek olduğu bazı bölgelerde, yeraltı açıklıklarının yalnızca statik yükler altındaki değil, ayrıca dinamik yükler altındaki duraylılık performansları da önem kazanmaktadır. Özellikle, uzun süre hizmet vermesi amaçlanan açıklıkların (örneğin; yeraltı atık depoları, yeraltı doğal gaz depoları, yeraltı hidroelektrik santrali açıklıkları vb.) tasarımında bu konu göz önünde bulundurulmalıdır. Her ne kadar depreme maruz yeraltı yapılarında oluşan hasarlar derinliğin artışıyla azalmaktaysa da, önemli ve stratejik amaçlarla oluşturulan bu derin (> 400 m) yeraltı açıklıkları için de sismik değerlendirmelerin yapılması gereklidir. Açıklığın oluşturulduğu ortamda daha sonraları oluşabilecek bir dinamik etkinin (deprem gibi) açıklıkta oluşturacağı ilave etkilerin önceden kestirilmesi tasarımcıya önemli

bilgiler sağlayacaktır. Eğer açıklık çevresinde aşırı gerilmelerin oluşması kaçınılmazsa, statik koşullarda oluşan potansiyel yenilme bölgesi geometrisinin, dinamik yükleme sonucu değişimi tespit edilmelidir.

1.2 TEZİN AMACI

Tez çalışmasının başlıca amacı, bir yeraltı açıklığının geometrik büyüklüklerine ve konumuna bağlı tasarım değiştirgelerinin, derin yeraltı açıklıklarında ikincil gerilmelerin neden olduğu duraysızlıklara etkisinin, hem statik hem de dinamik yükleme koşullarında belirlenmesidir. Bu çerçevede; derin yeraltı açıklıklarında duraylılığı etkileyen

1. açıklık kesit şekli ve genişlik/yükseklik (W/H) oranı gibi geometrik değiştirgelerin statik yükleme koşullarındaki etkilerinin araştırılması;
2. açıklığın birincil gerilme alanına göre konumlandırılmasının hem statik hem de dinamik yükleme koşullarında değerlendirilmesi; ve
3. sismik dalga şekli ve frekansı, en büyük yer ivmesi ve dalga yayılma yönü gibi dinamik değiştirgeler ile kaya kütesinin mekanik özelliklerinin dinamik yükleme koşullarındaki etkilerinin incelenmesi

bu tez çalışmasının ana hedeflerini oluşturmaktadır.

1.3 TEZİN KAPSAMI

Tez çalışmasında, geometrik tasarım değiştirgelerinin derin yeraltı açıklıklarının statik ve dinamik duraylılığına etkileri araştırılmış; açıklığın birincil gerilmelere göre en uygun konumlandırması belirlenmeye çalışılmıştır. Tez çalışmaları altı ayrı bölümde sunulmuştur:

İlk bölümde, tez konusunun önemi, tez çalışmasının amacı, hedefleri ve kapsamı açıklanmıştır.

İkinci bölümde; yazar tarafından yapılan geniş kapsamlı bir literatür araştırmasının sonuçları verilmiştir. Öncelikle, yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan gerilme dağılımı ve yenilme ölçütleri ile ilgili bilgiler sunulmuş, özellikle yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan yenilme bölgesi kalınlıklarının tahmin edilmesi ile ilgili kapalı tip çözümler verilmiştir. Daha sonra, birincil gerilme alanının ve açıklık geometrisinin, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi geometrisine etkilerini ortaya koyan çalışmalar özetlenmiştir. Son olarak, açıklık duraylılığının değerlendirmesinde kullanılan ölçütler tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde; yeraltı açıklıklarının statik tasarımı ve duraylılığı konusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Önce, çalışmada izlenen yaklaşım hakkında bilgiler verilmiştir. Sonra, anizotropik (üç asal bileşen birbirlerinden farklı) ve düzlemsel anizotropik (üç asal bileşenden ikisi birbirine eşit) birincil gerilme alanlarında, açıklığın en uygun konumlandırılması seçenekleri, yapılan doğrusal-elastik ve elasto-plastik çözümlemelerle belirlenmiştir. Geometrik tasarım değiştirgelerinden, açıklık kesit şekli ve W/H oranının açıklık duraylılığına etkileri bir dizi değiştirgesel çalışmalarla ortaya konmuştur.

Dördüncü bölümde; yeraltı açıklıklarının dinamik yükler altındaki davranışıyla ilgili literatür bilgileri sunulmuştur. Önce, jeolojik ortamda sismik dalga yayılımı ve depremler ile ilgili temel bilgiler özetlenmiştir. Sonra, derin yeraltı yapılarının dinamik yükler altındaki davranışı incelenmiş, arazi hareketinin derin yeraltı yapılarına etkileri ve derin yeraltı açıklıklarında yapılan deprem gözlemlerine

ilişkin örnekler sunulmuştur. Daha sonra, çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen sismik tahkimat önerileri ve hasarın azaltılması ile ilgili bilgiler özetlenmiştir.

Beşinci bölümde; derin yeraltı açıklıklarına ilişkin yapılan dinamik çözümlemeler ve duraylılık değerlendirmesi sunulmuştur. Önce, dinamik çözümlemeler ile ilgili genel bilgiler verilerek çözümleme yaklaşımı sunulmuştur. Sonra, dinamik yükleme değiştirgelerinden dalga şeklinin, en büyük yer ivmesinin, dalga frekansının ve dalga yayılma yönünün; yeraltı açıklık geometrisinin ve kaya kütlesinin mekanik özelliklerinin açıklığın dinamik duraylılığına etkileri yapılan değiştirgesel çalışmalarla ortaya konmuştur.

Son bölümde ise; çalışmada elde edilen bulgular ve sonuçlar özetlenmiş, bu konuda gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2

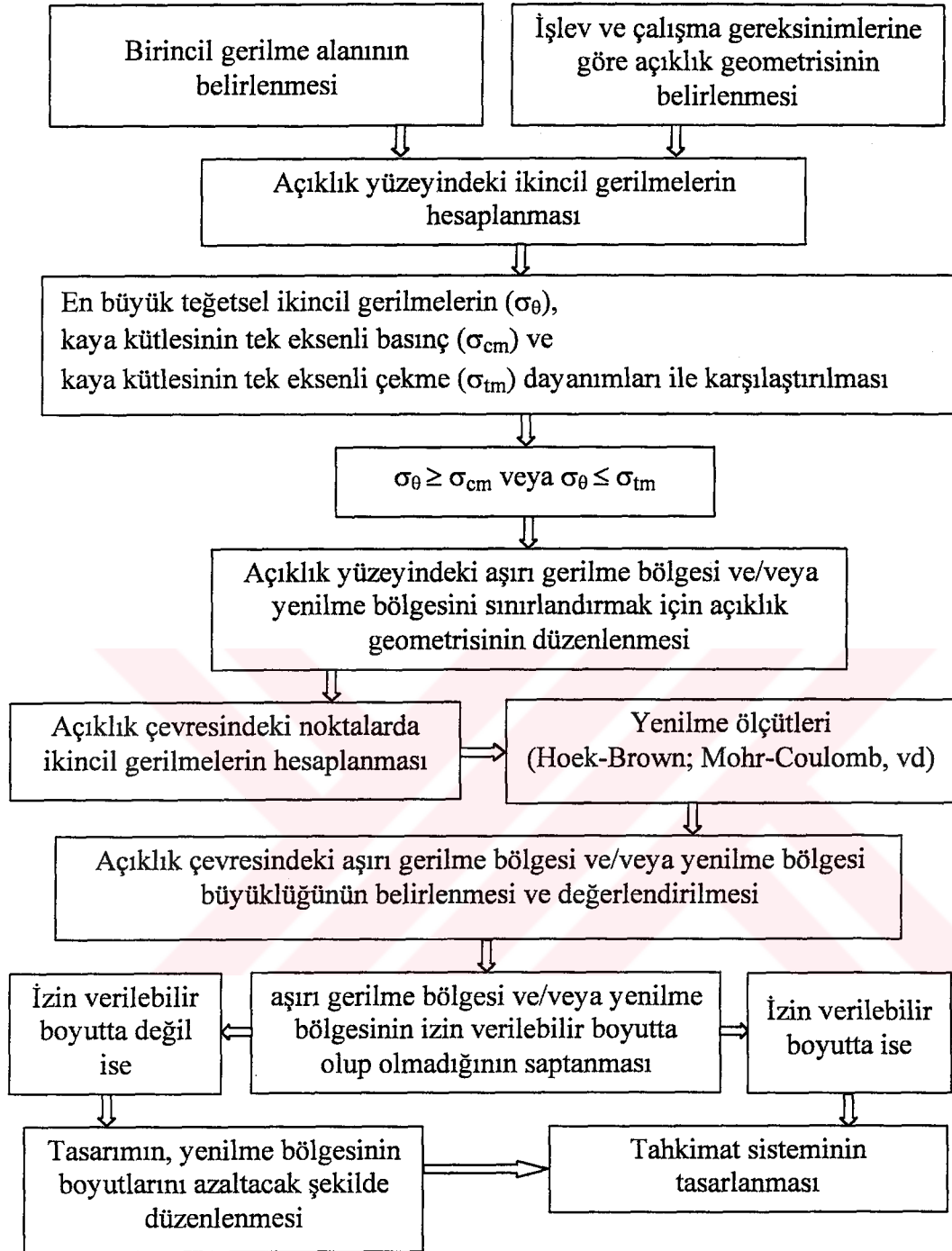
YERALTI AÇIKLIKLARI ÇEVRESİNDEKİ YENİLME BÖLGELERİ VE DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde, tez çalışması sırasında yapılan geniş kapsamlı bir literatür araştırmasının sonuçları verilmektedir. Bu araştırma, yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan ikincil gerilme dağılımları, yenilme ölçütleri, yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan yenilme bölgesinin elde edilmesine ilişkin analitik ve görgül eşitlikler, duraylılık ölçütleri ve tasarım yaklaşımları gibi konuları kapsamaktadır.

2.1 GİRİŞ

Yeraltı açıklıkları, kendilerinden beklenen hizmet süresince duraylıklarını koruyacak şekilde tasarımları yapılmalıdır. Masif elastik kaya kütlelerinde oluşturulan bir yeraltı açıklığının tasarımı kaya mühendisliğinde en basit tasarım problemlerindendir. Tasarımda başlıca iki önemli faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Birincisi, açıklık çevresinde oluşabilecek yenilme potansiyeli yüksek aşırı gerilme bölgesi oluşumunun, ikincisi ise kontrol edilemeyen birim şekil değiştirmelerin önlenmesidir (Brady and Brown, 1993).

Masif elastik kaya kütlelerinde oluşturulacak yeraltı açıklığı tasarım metodolojisi Şekil 2.1’de sunulmuştur (Brady and Brown, 1993). Tasarımda açıklığın yerine getireceği işleve uygun geometrisi (şekli ve boyut) seçilmelidir. Açıklığın konumlandırılması, açıklığın yerine getireceği işlev ve diğer açıklıklarla



Şekil 2.1 Masif elastik kaya kütlesi içindeki yeraltı açıklıklarının tasarım metodolojisi (Brady and Brown'dan [1993] değiştirilerek).

integrasyonu ile belirlenmektedir. Tasarım sürecinde en önemli aşama, açıklık açılmadan önce arazideki birincil gerilme alanının (doğrultu ve büyüklük) belirlenmesidir. Çünkü birincil gerilme bileşenlerinin doğrultu ve büyüklüğü, açıklık çevresindeki oluşacak ikincil gerilme alanının büyüklüğünü etkilemektedir. Açıklık çevresinde oluşan ikincil gerilme alanı ile yenilme ölçütü birlikte değerlendirilerek, açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme ve/veya yenilme bölgesi belirlenmektedir. Belirlenen aşırı gerilme bölgesi ve/veya yenilme bölgesinin alanı izin verilebilir boyutta ise tahkimat sisteminin tasarımı yapılmalıdır. Elde edilen aşırı gerilme bölgesi ve/veya yenilme bölgesinin alanı izin verilebilir boyutların üzerinde ise, tasarım değiştirmelerinde değişiklikler yapılarak aşırı gerilme bölgesinin boyutları azaltılmalıdır. Tasarım sınırlandırmaları arasında değilse açıklık geometrisi ve geçkisi (güzergahı) yeniden seçilerek tahkimat gereksinimleri belirlenmelidir.

2.2 GERİLME DAĞILIMI

Tasarımın önemli aşamalarından biri açıklık yüzeyinde ve çevresinde oluşan gerilmelerin belirlenmesidir. Yeraltı açıklıkları oluşturulmadan önce ortamda birincil gerilmeler mevcuttur. Açıklık oluşturulduktan sonra açıklık çevresindeki gerilme dağılımı değişmektedir. Oluşan yeni gerilme durumu “ikincil gerilme alanı” olarak adlandırılmaktadır. Sonsuz plaka içindeki delik çevresindeki elastik ikincil gerilme dağılımını veren matematiksel çözümler bulunmaktadır. Söz konusu klasik çözümlerin çoğu, basit matematiksel bağıntılar ile tanımlanabilen açıklık geometrileri ile sınırlı kalmıştır. Çözümler içinde en yaygın bilineni, Kirsch (1898) tarafından verilmiştir. Bu çözümle, masif elastik ortamda açılan dairesel açıklık çevresindeki iki boyutlu gerilme dağılımı elde edilmektedir. En genel haliyle birincil gerilmelerin birbirlerinden bağımsız 6 adet bileşeni bulunduğu

zaman, açıklık çevresindeki noktada oluşan ikincil gerilme gereyinin (tansörü) silindirik koordinatlardaki (r, θ) bileşenleri aşağıdaki eşitliklerle verilmektedir (Şekil 2.2) (Gerçek, 1995):

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(P_x + P_y) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} - 4\frac{R^2}{r^2}\right) \left[\frac{1}{2}(P_x - P_y) \cos 2\theta + P_{xy} \sin 2\theta\right] \quad (2.1.a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(P_x + P_y) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \left[\frac{1}{2}(P_x - P_y) \cos 2\theta + P_{xy} \sin 2\theta\right] \quad (2.1.b)$$

$$\sigma_z = P_z - 2\nu \frac{R^2}{r^2} \left[(P_x - P_y) \cos 2\theta + 2P_{xy} \sin 2\theta\right] \quad (2.1.c)$$

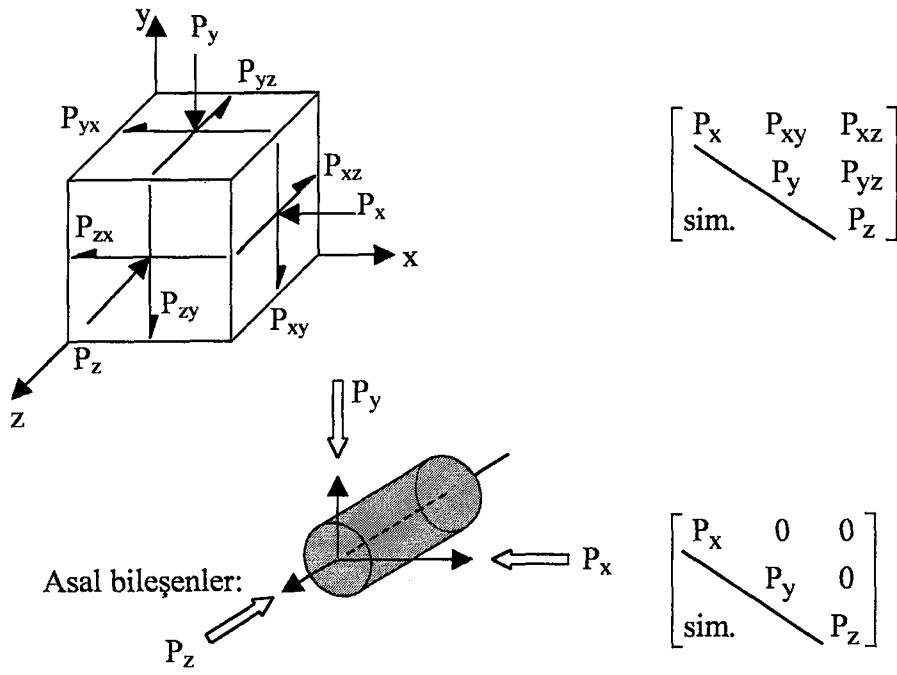
$$\tau_{r\theta} = \left(1 - 3\frac{R^4}{r^4} + 2\frac{R^2}{r^2}\right) \left[P_{xy} \cos 2\theta - \frac{1}{2}(P_x - P_y) \sin 2\theta\right] \quad (2.1.d)$$

$$\tau_{\theta z} = (P_{yz} \cos \theta - P_{xz} \sin \theta) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (2.1.e)$$

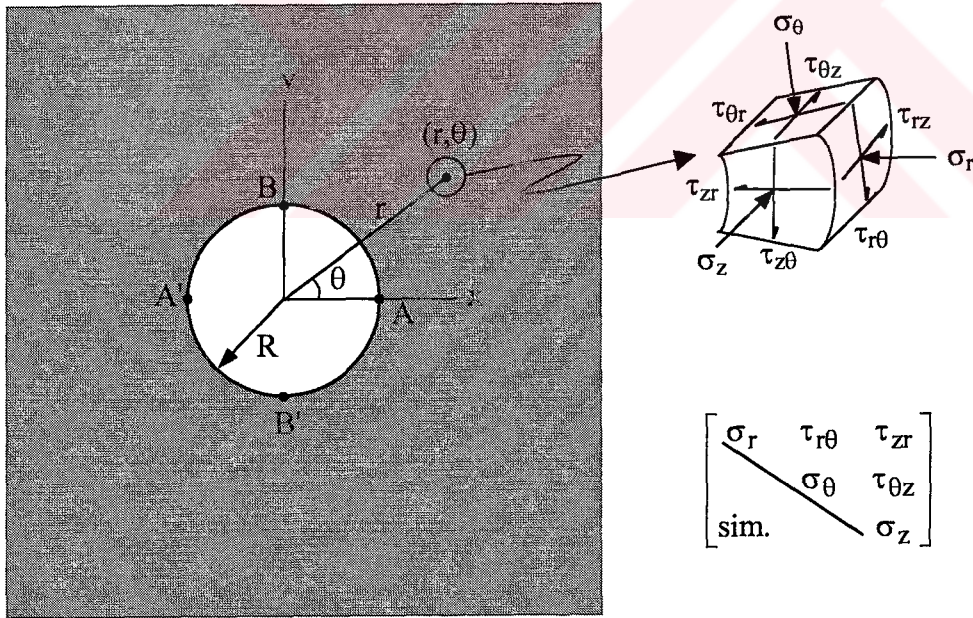
$$\tau_{zr} = (P_{zx} \cos \theta + P_{yz} \sin \theta) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (2.1.f)$$

Burada; P_x (yatay), P_y (düşey), P_z (eksenel), P_{xy} , P_{yz} , P_{zx} (kesme, kayma), birincil gerilme gereyinin dik koordinat sistemindeki bileşenleri; σ_r (radyal), σ_θ (teğetsel), σ_z (eksenel), $\tau_{r\theta}$, $\tau_{\theta z}$, τ_{zr} (kesme), $P(r, \theta)$ noktasındaki ikincil gerilme gereyinin silindirik koordinatlardaki bileşenleri; R , açıklık yarıçapı; r , açıklık merkezinden olan uzaklık; θ , açıklık çevresindeki noktanın yatayla saat gidişi tersi yönünde yaptığı açı ve ν ise Poisson oranıdır.

Yeraltında birincil gerilme gereyinin birbirinden bağımsız tüm bileşenlerinin belirlenmesi güçtür. Bu nedenle, birincil gerilme gereyinin asal bileşenleri tasarımda girdi değiştirgesi olarak daha sık kullanılmaktadır. Ortamın asal birincil gerilme bileşenlerinden, düşey (P_v), yatay (P_h) ve eksenel (P_z) bileşeni bilindiği



a. Birincil gerilme alanı



b. İkincil gerilme alanı

Şekil 2.2 Birincil gerilme alanı ve yeraltı açıklığı çevresindeki ikincil gerilme alanı (Gerçek, 1995).

durumda; açıklık çevresinde oluşacak ikincil gerilme yığılması katsayıları şu şekilde verilmektedir:

$$\frac{\sigma_r}{P_v} = \frac{1}{2} \left[(1+k) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - (1-k) \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (2.2.a)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{P_v} = \frac{1}{2} \left[(1+k) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + (1-k) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (2.2.b)$$

$$\frac{\sigma_z}{P_v} = k_z + 2\nu(1-k) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta \quad (2.2.c)$$

$$\frac{\tau_{r\theta}}{P_v} = \frac{1}{2} (1-k) \left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (2.2.d)$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{zr} = 0 \quad (2.2.e)$$

Burada; k, yatay birincil gerilmenin düşey birincil gerilmeye oranı ($k = P_h/P_v$) ve k_z ise aksenal birincil gerilmenin düşey birincil gerilmeye oranıdır ($k_z = P_z/P_v$).

İkincil gerilme yığılması katsayıları açıklık yüzeyindeki noktalarda ($r = R$);

$$\frac{\sigma_r}{P_v} = 0 \quad (2.3.a)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{P_v} = (1+k) + 2(1-k) \cos 2\theta \quad (2.3.b)$$

$$\frac{\sigma_z}{P_v} = k_z + 2\nu(1-k) \cos 2\theta \quad (2.3.c)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (2.3.d)$$

Yan duvarın orta yüksekliği veya üzengi noktasında (A veya A') (Şekil 2.2),

$$\left(\frac{\sigma_{\theta}}{P_v} \right)_A = 3 - k \quad (2.3.e)$$

$$\left(\frac{\sigma_z}{P_v} \right)_A = k_z + 2v(1 - k) \quad (2.3.f)$$

Tepe (taç) veya taban noktasında (B veya B') (Şekil 2.2),

$$\left(\frac{\sigma_{\theta}}{P_v} \right)_B = 3k - 1 \quad (2.3.g)$$

$$\left(\frac{\sigma_z}{P_v} \right)_B = k_z - 2v(1 - k) \quad (2.3.h)$$

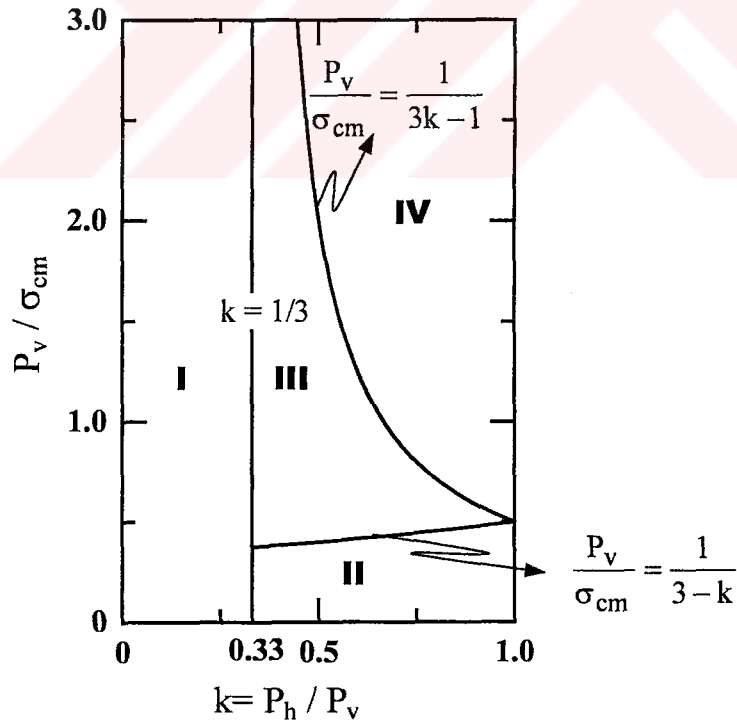
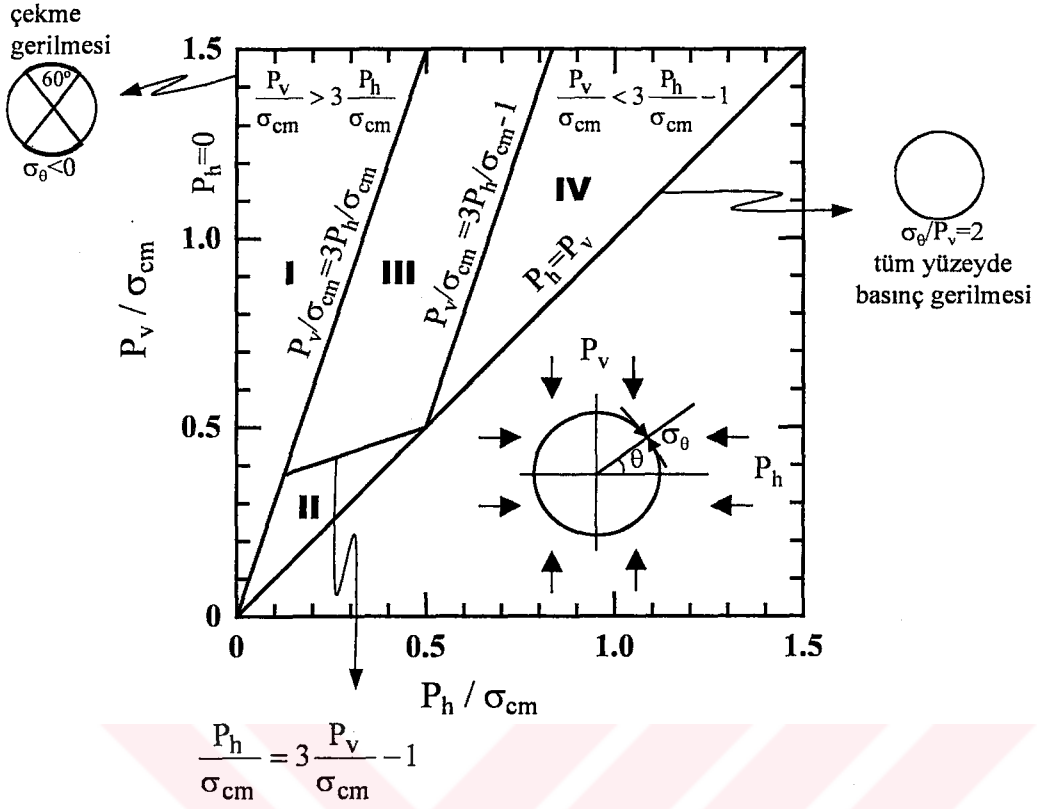
şeklinde verilmektedir. Hidrostatik birincil gerilme alanındaki değerler ($P_v = P_h = P_z$; $k = k_z = 1$) ise aşağıdaki eşitliklerle verilmektedir.

$$\frac{\sigma_r}{P_v} = \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (2.4.a)$$

$$\frac{\sigma_{\theta}}{P_v} = \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (2.4.b)$$

$$\frac{\sigma_z}{P_v} = 1 \quad (2.4.c)$$

Obara et al. (1992), dairesel kesitli bir açıklıkta birincil gerilmelere ve kaya kütlelerinin dayanımına bağlı olarak, olası yenilme şekli ve geometrisi hakkında, tasarımcıya ön bilgi verecek bir sınıflama önermiştir. Bu öneriye göre Şekil 2.3'te dört ayrı bölge tanımlanmış olup, yatay ve düşey birincil gerilmeler kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımına (σ_{cm}) göre normalleştirilmiştir. I no.'lu bölgedeki birincil gerilme alanındaki dairesel açıklığın yüzeyinde bazı bölgelerde



Şekil 2.3 Dairesel açıklık çevresinde birincil gerilme durumunun sınıflandırılması (Obara et al.'dan [1992] değiştirilerek).

çekme gerilmesi oluşmaktadır. Düşey birincil gerilmenin, yatay birincil gerilmenin 3 katından daha büyük olduğu birincil gerilme durumu, I no.'lu bölgeye düşmektedir. Yalnızca düşey birincil gerilmenin etkidiği bir ortamda, merkez açısı 60° olan yay uzunluğunca, dairesel açıklığın tavan ve taban bölgelerinde çekme gerilmesi oluşmaktadır. I no.'lu bölgedeki birincil gerilme durumundan II ve III no.'lu bölgeye yaklaşıldıkça açıklık yüzeyinde oluşan çekme gerilmesi bölgesi azalmaktadır. Buna karşılık II, III ve IV no.'lu bölgelerdeki birincil gerilme alanlarında, açıklığın tüm yüzeyinde basınç gerilmeleri oluşmaktadır. IV no.'lu bölgede açıklığın tüm yüzeyinde oluşan basınç gerilmeleri kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımını aşmaktadır. III no.lu bölgede oluşan basınç gerilmeleri ise açıklığın yüzeyindeki bazı bölgelerde kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımını aşmaktadır. II no.'lu bölgede oluşan basınç gerilmeleri ise kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımından daha düşüktür.

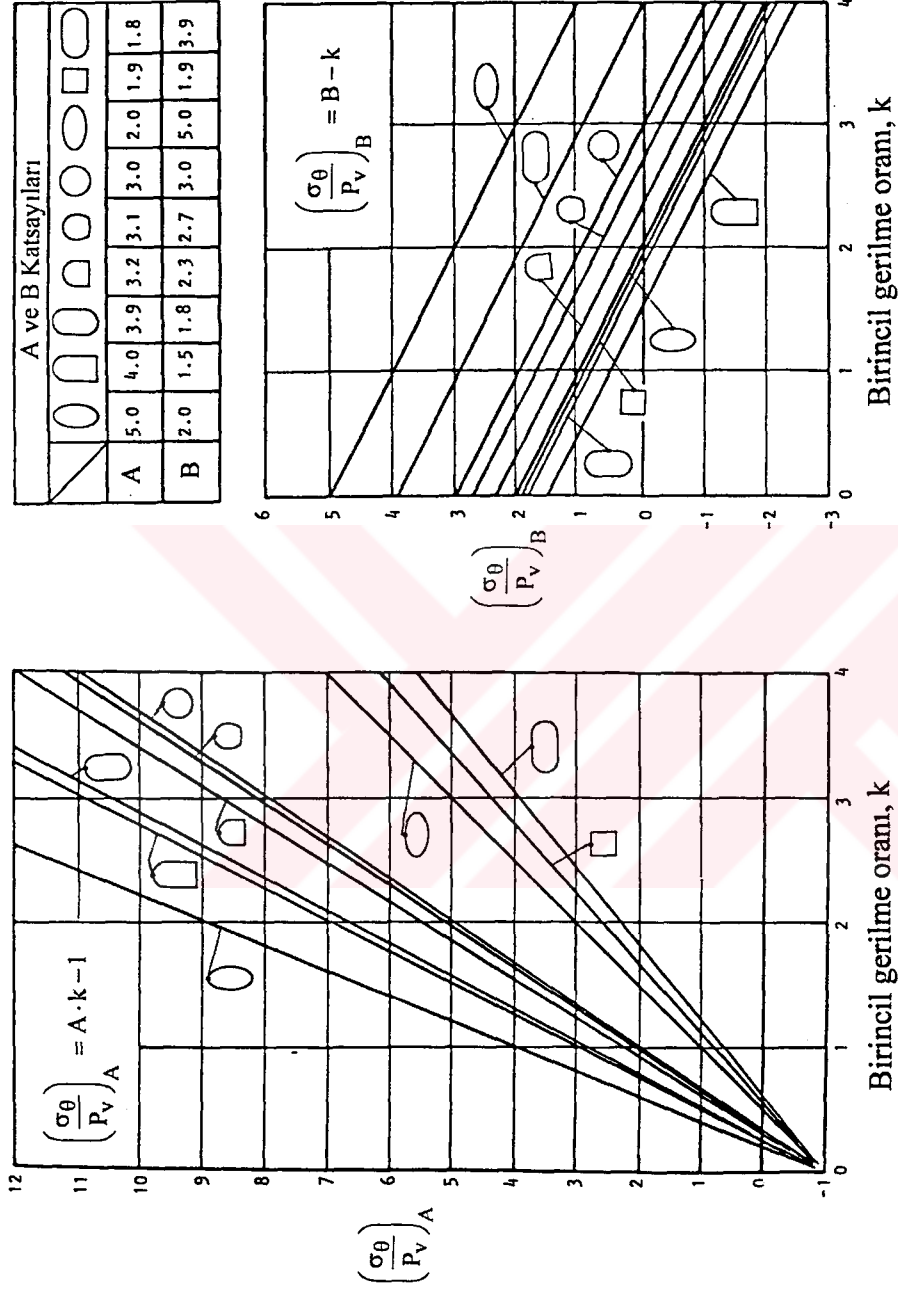
Sonsuz plaka içindeki delik çevresindeki elastik gerilmelerin dağılımını veren klasik çözümler, yeraltı açıklıklarının çevresindeki ikincil gerilmelerin dağılımını inceleyen ilk çalışmalarda Terzaghi ve Richart (1952), Obert et al. (1960) tarafından kullanılmıştır (Gerçek, 1993).

Daire için Kirsch'in (1898) çözümü yanında elips için Inglis'in (1913) ve ovaloid için Greenspan'ın (1944) çözümleri bu klasik çözümlerin en çok bilinen örneklerindendir (Gerçek, 1989). Ayrıca kare için Brock (1958), Savin (1961), Gerçek (1986); dikdörtgen için Heller et al. (1958), Savin (1961), Gerçek (1988); kemer tavanlı tünel için Gerçek'in (1989) çözümleri de mevcuttur (Gerçek'ten, 1993). Bu çözümlerin ayrıntıları Gerçek (1986, 1988, 1989) ve Geniş (1995)'ten elde edilebilir.

Hoek ve Brown (1980) farklı açıklık geometrileri ve birincil gerilme alanlarına bağlı olarak, açıklığın tepe ve yan duvarın orta yüksekliğinde oluşacak teğetsel ikincil gerilmelerin tahmini için önerilerde bulunmuştur. Bu önerilerde; daire, elips, ovaloid, kare ve kemer tavanlı geometrilere sahip yeraltı açıklıkları göz önünde bulundurulmuştur. Farklı birincil gerilme alanları için sınır elemanları yöntemi kullanılarak açıklık çevresindeki ikincil gerilme alanı belirlenmiştir. Açıklığın tepesinin ve yan duvarın orta yüksekliğindeki teğetsel ikincil gerilmeler ile birincil gerilmeler oranı (k) arasındaki ilişki, incelenen açıklık geometrileri için ortaya konulmuştur (Şekil 2.4). İncelenen açıklık geometrilerinin çoğunda açıklığın tepe ve yan duvarların orta yüksekliğinde eğrilik yarıçapı büyük olmaktadır. Eğrilik yarıçapının büyük olduğu bölgelerde, eğrilik yarıçapının küçük olduğu bölgelere göre daha küçük ikincil gerilmeler oluşmasına rağmen, açıklık yüzeyinden uzaklaştıkça birincil gerilmelere yakınsama daha yavaş olmaktadır. Eğrilik yarıçapının küçük olduğu bölgelerde ise daha yüksek ikincil gerilmeler oluşmakta olup hızla birincil gerilmelere yakınsamaktadır. Bu nedenle, eğrilik yarıçapının küçük olduğu bölgelerde oluşan yüksek gerilmelerin açıklığın tüm duraylılığı üzerinde çok önemli etkisi bulunmadığından, açıklığın tepe ve yan duvarların orta yüksekliğindeki noktalarda ikincil gerilmeler göz önünde bulundurulmuştur (Hoek and Brown, 1980).

İncelenen geometriler için açıklık yüzeyindeki teğetsel ikincil gerilme yığılması katsayıları tepe noktası için,

$$\left(\frac{\sigma_{\theta}}{P_v} \right)_A = A \cdot k - 1 \quad (2.5.a)$$



Şekil 2.4 Çeşitli açıklık geometrilerinde ($W/H=0.5, 1, 2$), açıklığın yan duvarında ve tavanında oluşan teğetsel gerilmelerin birincil gerilme oranına bağlı değişimi (Hoek and Brown, 1980).

yan duvarın orta yüksekliği için,

$$\left(\frac{\sigma_{\theta}}{P_v} \right)_B = B - k \quad (2.5.b)$$

olarak verilmektedir (Hoek and Brown, 1980). Burada; A ve B açıklık geometrisine bağlı katsayılar olup, tipik açıklık geometrileri için A ve B değerleri Şekil 2.4’de sunulmuştur.

Birincil gerilme alanında açıklık geometrisinin seçiminde, açıklık çevresinde oluşan ikincil gerilmelerin düzenli dağılımının oluşması sağlanmalıdır. Richards ve Bjorkman (1978) tarafından açıklık çevresinde “harmonik halkalar” şeklinde düzenli gerilmelerin olduğu geometriler tanımlanmıştır. Herhangi bir birincil gerilme alanında oluşturulan yeraltı açıklığı çevresinde eşit gerilmeler oluşturmak için en uygun geometri seçilmelidir. Düzenli ikincil gerilmeler genellikle elips ve ovaloid kesite sahip yeraltı açıklıklarının genişliğinin yüksekliğine oranının (W/H), birincil gerilmeler oranı (k) ile aynı olduğu durumlarda oluşmaktadır. “Harmonik halkalar” kuramının yeraltı açıklığının tasarımında aşağıda verilen iki sınırlaması vardır (Hoek and Brown, 1980):

1. Tasarımcı yeraltı açıklığının seçiminde çok bağımsız olamamaktadır. Örneğin; cevherin yataklanma durumu ve yeraltı açıklığının kullanım amaçlarına göre sınırlayıcı faktörler bulunabilir.
2. Açıklık yüzeyindeki ikincil gerilme değerleri, kaya kütlelerinin dayanımına göre daha düşük olduğunda, açıklığın tüm yüzeyinde eşit gerilmelerin olduğu bir açıklık geometrisi seçilmelidir. Bununla birlikte, açıklığın tüm yüzeyinde eşit gerilmelerin kaya kütlelerinin dayanımından daha yüksek olduğu durumda

açıklığın tüm çevresinde aşırı gerilme veya yenilme bölgesi oluşacaktır. Bu durumda Fairhurst (1976) ve Hoek ve Brown (1980) “harmonik halkalar” kuramının açıklık geometrisi seçimi için uygun olmayacağını belirtmiştir. Buna alternatif olarak; uygun konumlandırma ile açıklık çevresinde oluşan yüksek gerilmelerin eğrilik yarıçapının küçük olduğu bölgelerde oluşturulması sağlanmalıdır. Böylece, eğrilik yarıçapının küçük olduğu bölgelerde oluşan ikincil gerilmeler hızlı bir şekilde birincil gerilmelere yakınsayacağı için açıklık çevresinde oluşacak aşırı gerilme veya yenilme bölgesinin dar bir bölgede oluşması sağlanacaktır.

Buraya kadar olan bölümlerde açıklık çevresindeki elastik ikincil gerilme dağılımı incelenmiştir. Ayrıca, hidrostatik birincil gerilme alanında oluşturulan dairesel ve küresel açıklık çevresindeki elasto-plastik gerilme dağılımını veren matematiksel eşitlikler de geliştirilmiştir. Söz konusu eşitlikler, elastik-kusursuz plastik, elastik-gevrek plastik, elastik-kusursuz kalıcı plastik malzeme davranışlarında ve çeşitli yenilme ölçütleri kullanılarak elde edilmiştir (Ladanyi, 1967; Hoek and Brown, 1980; Aydan et al. 1993; Aydan ve Geniş, 2002).

2.3 YENİLME ÖLÇÜTLERİ

Yeraltı açıklığının oluşturulmasıyla ortamdaki birincil gerilmeler açıklık çevresinde ikincil gerilmelere dönüşmektedir. Açıklık çevresinde oluşan ikincil gerilmelerin ve yenilme ölçütlerinin yardımıyla açıklık çevresindeki aşırı gerilme bölgesi ve/veya yenilme bölgesi tahmin edilmektedir. Kaya yapılarının tasarımında, en yaygın kullanılan yenilme ölçütlerinden ikisi Hoek-Brown (Hoek and Brown, 1980) ve Mohr-Coulomb (Brady and Brown, 1985) yenilme ölçütleridir.

Hoek-Brown yenilme ölçütü, en genel haliyle,

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (2.6)$$

bağıntısıyla verilmektedir (Hoek et al., 1995). Burada; σ_1' ve σ_3' , sırasıyla, en büyük ve en küçük asal etkin gerilmeler; σ_{ci} , sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı; m_b , s ve α da kaya kütlelerinin karakteristiklerine bağlı malzeme sabitleridir. Bu sabitlerin örselenmemiş kaya kütleleri için belirlenmesinde jeolojik dayanım indeksi (GSI: geological strength index) adlı bir büyüklük kullanılmaktadır (Hoek et al., 1995).

Mohr-Coulomb yenilme ölçütü ise,

$$\sigma_1' = \sigma_{cm} + N_\phi \sigma_3' \quad (2.7)$$

şeklinde verilmektedir (Brady and Brown, 1985). Burada; σ_{cm} , kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımıdır. N_ϕ ise,

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2.8)$$

dir. Burada, ϕ , kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısıdır.

Söz konusu ölçütlere ilişkin ayrıntılı bilgiler, Hoek-Brown yenilme ölçütü için Ek Açıklamalar A'da ve Mohr-Coulomb yenilme ölçütü için Ek Açıklamalar B'de sunulmuştur.

2.4 YENİLME BÖLGESİ

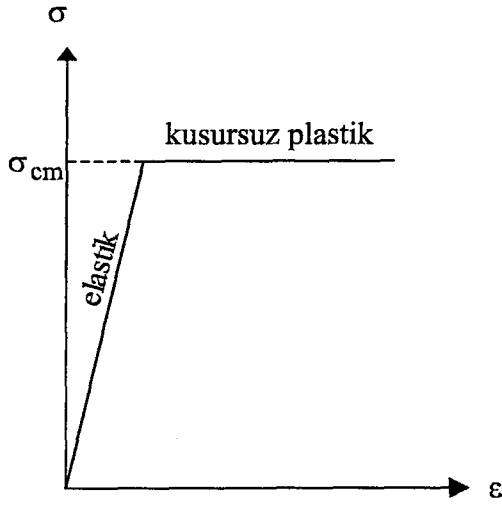
Yeraltı açıklıklarında karşılaşılan duraysızlık problemlerinden biri de ikincil gerilmeler nedeniyle açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleridir. Yenilme bölgeleri, açıklık çevresinde oluşan ikincil gerilmelerin kayacın dayanımını aştığı durumlarda oluşabilir.

Yeraltı açıklıkları çevresindeki kaya kütlelerinin duraylılığının sağlanabilmesi için çoğunlukla tahkimat yapılması zorunludur. Yeraltı açıklığı tahkimat tasarımı açıklık çevresindeki gerilme değişimi kadar yenilme bölgesinin şekli ve boyutlarının da bilinmesini gerektirir (Pan and Chen, 1990).

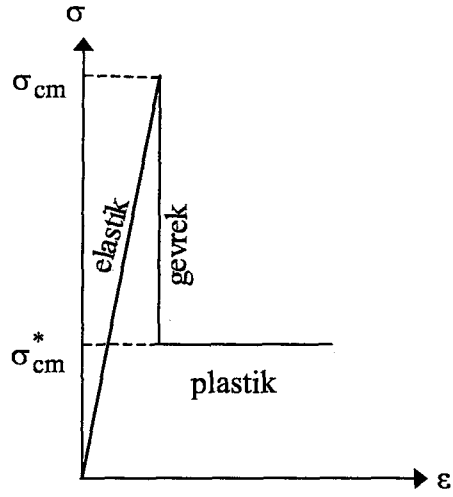
Hidrostatik birincil gerilme alanında ($P_v = P_h = P_0$) açılan ve yarıçapı R olan dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin kalınlığı analitik olarak belirlenebilmektedir. Çözümde ortamın sürekli, türdeş (homojen) ve eşyönlü (izotropik) olduğu varsayılmaktadır. Düzenli içsel basınca (tahkimat basıncı) (P_i) sahip açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinin, Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu ve elastik-kusursuz plastik malzeme davranışı gösterdiği varsayılmıştır (Şekil 2.5.a). Bu durumda, açıklık çevresinde oluşan elastik-plastik bölge sınırının (yenilme bölgesi sınırı) açıklık merkezinden olan uzaklığı (R_p) (Şekil 2.6),

$$\frac{R_p}{R} = \left[\frac{\frac{2 P_0 - \sigma_{cm}}{1 + N_\phi} + \frac{\sigma_{cm}}{N_\phi - 1}}{P_i + \frac{\sigma_{cm}}{N_\phi - 1}} \right]^{\frac{1}{N_\phi - 1}} \quad (2.9)$$

şeklinde verilmektedir (Jaeger and Cook, 1968; Hoek, 1998). Burada, R , dairesel açıklığın yarıçapıdır.

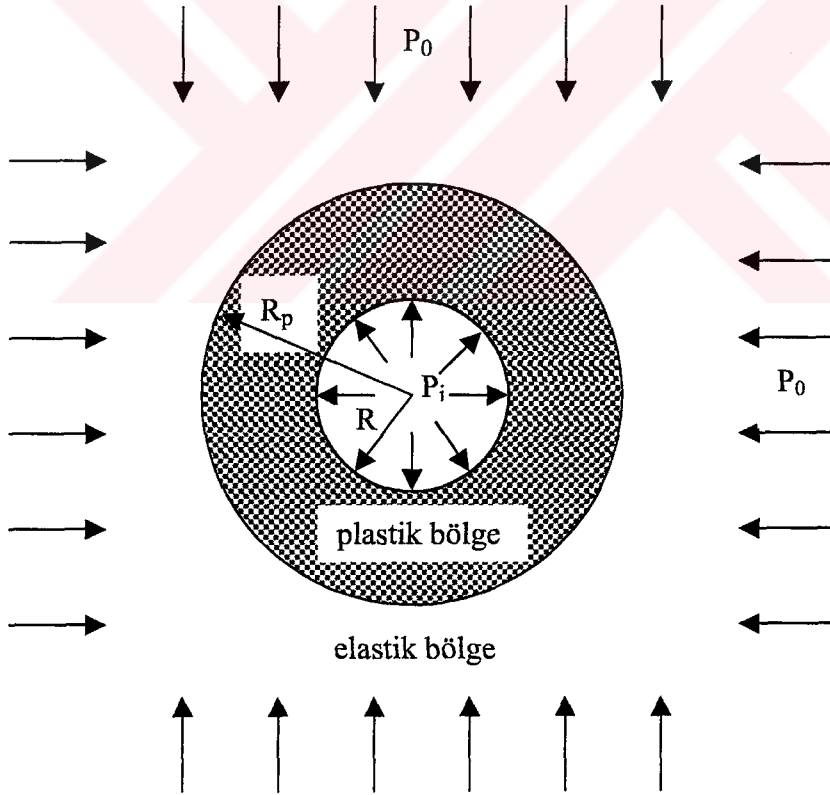


a. Elastik kusursuz plastik



b. Elastik kırılğan plastik

Şekil 2.5 Çözümlemede varsayılan malzeme davranışları.



Şekil 2.6 Hidrostatik birincil gerilme alanında dairesel açıklık çevresindeki yenilme bölgesi.

Diğer bir çözümde ise, açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu ve elastik-gevrek plastik malzeme davranışı gösterdiği varsayılmıştır (Şekil 2.5.b). Bu durumda, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin açıklık merkezinden olan uzaklığı,

$$\frac{R_p}{R} = \left[\frac{\frac{2P_0 - \sigma_{cm}}{1 + N_\phi} + \frac{\sigma_{cm}^*}{N_\phi^* - 1}}{P_i + \frac{\sigma_{cm}^*}{N_\phi^* - 1}} \right]^{\frac{1}{N_\phi^* - 1}} \quad (2.10)$$

şeklinde verilmektedir (Şekil 2.6) (Jaeger and Cook,1968). Burada; σ_{cm}^* , kırılmış kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı olup, kırılmış kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısına bağlı sabiti Eşitlik 2.11’de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$N_\phi^* = \frac{1 + \sin \phi^*}{1 - \sin \phi^*} \quad (2.11)$$

Burada; ϕ^* ise kırılmış kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısıdır. Elastik-kusursuz plastik ve elastik-gevrek plastik malzeme davranışı durumunda yenilme oluşması için içsel basıncın kritik gerilme seviyesinden az olması gerekmektedir. Bu durum,

$$P_i < \frac{2P_0 - \sigma_{cm}}{1 + N_\phi} \quad (2.12)$$

eşitliği ile verilmektedir.

Başka bir çözümde ise, açıklığı çevreleyen kaya kütesinin Hoek-Brown yenilme ölçütüne uyduğu ve elastik-gevrek plastik malzeme davranışı varsayıldığında, yenilme bölgesinin yarıçapı aşağıdaki şekilde verilmektedir (Hoek and Brown, 1980).

$$\frac{R_p}{R} = \exp \left[N - 2 \left(\frac{P_i}{m_r \sigma_{ci}} + \frac{s_r}{m_r^2} \right)^{1/2} \right] \quad (2.13)$$

Burada; m_r ve s_r kırılmış kaya kütesine ait malzeme sabitleri olup N ,

$$N = 2 \left(\frac{P_0 - M \cdot \sigma_{ci}}{m_r \sigma_{ci}} + \frac{s_r}{m_r^2} \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

şeklinde verilmektedir. Burada, M ise,

$$M = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m_b}{4} \right)^2 + \frac{m_b \cdot P_0}{\sigma_{ci}} + s \right]^{1/2} - \frac{m_b}{8} \quad (2.15)$$

eşitliğinden belirlenir. Yenilme bölgesinin oluşması için içsel basıncın aşağıda verilen kritik gerilme seviyesinden daha az olması gerekmektedir (Hoek and Brown, 1980).

$$P_i < P_0 - M \cdot \sigma_{ci} \quad (2.16)$$

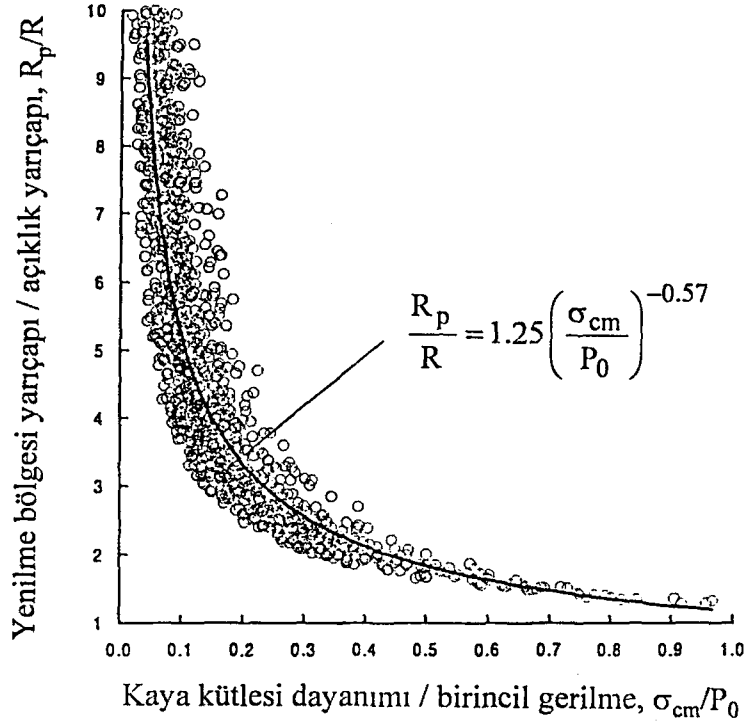
Hoek (2000) hidrostatik birincil gerilme alanında açılan dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin kalınlığını kaya kütesinin dayanımı, birincil gerilme alanı ve içsel tahkimat basıncı ile ilişkisini ortaya koymuştur. Eşitlik 2.9

kullanılarak elde edilen yenilme bölgesinin kalınlığının belirlenmesinde, oldukça eklemlili kaya kütlelerinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu ve elastik-kusursuz plastik malzeme davranışı gösterdiği varsayılmıştır. Çalışmada Hoek-Brown dayanım değiştirgeleri kullanılarak Mohr-Coulomb dayanım değiştirgeleri tahmin edilmiştir. Seçilen girdi değiştirgelerinin düzenli dağılımlarını elde etmek için kullanılan en büyük ve en küçük değerleri; kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı için 1 - 30 MPa, Hoek-Brown malzeme sabiti m_i için 5 - 12, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) için 10 - 35, hidrostatik birincil gerilme (P_0) için 2 - 20 MPa ve dairesel açıklığın yarıçapı (R) için 2 - 8 m olarak seçilmiştir. Her bir değiştirgeye yukarıda belirtilen sınırlar içinde değerler atanarak yaklaşık 2000 adet çözümleme yapılmıştır.

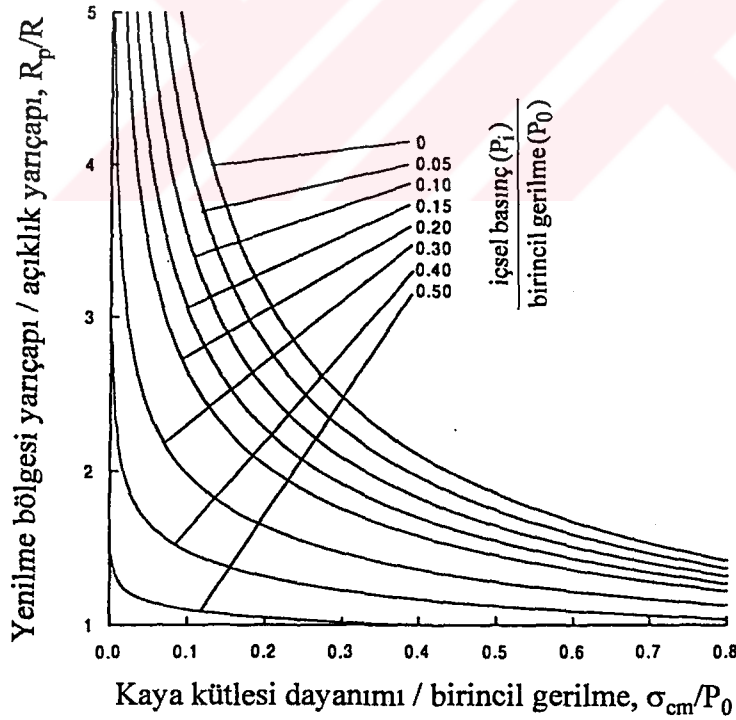
Yapılan çözümlemelerde girdi değiştirgelerinin çok geniş bir aralıktaki durumu incelenmesine rağmen elde edilen sonuçlar çok yakın bir dağılım göstermiştir. Ayrıca yenilme bölgesi kalınlığı ile kaya kütlelerinin dayanımı, birincil gerilme ve açıklığın yarıçapı arasında aşağıdaki ilişki elde edilmiştir (Şekil 2.7). Bu ilişkide içsel basınç sıfır olarak alınmıştır (Hoek, 2000).

$$\frac{R_p}{R} = 1.25 \left(\frac{\sigma_{cm}}{P_0} \right)^{-0.57} \quad (2.17)$$

Kaya kütlelerinin dayanımının birincil gerilme değerinin % 20'sinden daha az olması ($\sigma_{cm}/P_{max} < 0.2$) durumunda yenilme bölgesinin kalınlığı hızlı bir şekilde artmaktadır. Pratik deneyimlere göre, yenilme bölgesinin hızlı artma eğilimine ulaştığı durumlarda açıklığın duraylılığının çok zor kontrol edilebileceği belirtilmektedir (Hoek, 2000).



Şekil 2.7 Birincil gerilmeye göre normalize edilmiş kaya kütlesi dayanımı ile açıklık yarıçapına göre normalize edilmiş yenilme bölgesi yarıçapı arasındaki ilişki (Hoek, 2000).



Şekil 2.8 Farklı içsel basınç değerlerinde, birincil gerilmeye göre normalize edilmiş kaya kütlesi dayanımı ile açıklık yarıçapına göre normalize edilmiş yenilme bölgesi yarıçapı arasındaki ilişki (Hoek, 2000).

Yukarıda verilen eşitlik farklı içsel basınçları da içerecek şekilde aşağıda sunulmuştur. Yenilme bölgesinin kalınlığının içsel basınç, kaya kütlelerinin dayanımı ve birincil gerilme ile nasıl değiştiği Şekil 2.8’de gösterilmiştir (Hoek, 2000).

$$\frac{R_p}{R} = \left(1.25 - 0.625 \frac{P_i}{P_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{P_0} \right)^{(P_i/P_0 - 0.57)} \quad (2.18)$$

Beklendiği gibi, kaya kütlelerinin dayanımının artması, birincil gerilmelerin düşük olması, içsel basıncın yüksek olması duraylılığı olumlu yönde etkilemektedir. Hoek (2000) tarafından, 2.17 ve 2.18 eşitlikleriyle önerilen yenilme bölgesi tahmininin çok kaba ve yanıltıcı sonuç verdiği göz ardı edilmemelidir.

Hidrostatik olmayan birincil gerilme alanında açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin elde edilmesi için elasto-plastik bölge sınırını veren sürekli bir matematiksel işleve ihtiyaç bulunmaktadır. Açıklığı tümünü çevrelemeyen yenilme bölgesi geometrisi, sürekli bir işlevle tanımlanamadığı için, hidrostatik olmayan birincil gerilme alanı için kapalı matematiksel çözüm imkansızdır. Eğer yenilme bölgesi açıklığı tamamen çevreliyorsa ve yenilme bölgesi sürekli bir işlev ile tanımlanabilirse, matematiksel çözüm mümkün olabilmektedir (Gerçek, 2001).

Detournay ve Fairhurst (1982) ve John et al. (1984), hidrostatik olmayan birincil gerilme alanında, dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin geometrisine ve büyüklüğüne birincil gerilmelerin etkisini yarı analitik yöntemle açıklamıştır. Açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu ve kayacın elastik-kusursuz plastik malzeme davranışı gösterdiği varsayılmıştır.

Birincil gerilmelere göre açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin geometrilerinin dört ayrı bölgede incelendiği bir grafikte tanımlanmış ve Şekil 2.9'da sunulmuştur. Şekil 2.9'a göre yatay eksen, en büyük ($P_{\max}$) ve en küçük ($P_{\min}$) birincil gerilmelerin ortalaması (P') ve düşey eksen ise, en büyük birincil gerilmeden en küçük birincil gerilmenin farkının yarısı (S') olarak tanımlanmıştır:

$$P' = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2} \quad (2.19.a)$$

$$S' = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} \quad (2.19.b)$$

Bu eksenler kaya kütesinin tek eksenli basınç dayanımına göre normalleştirilmiştir. Şekil 2.9'da belirtilen 1 no.'lu doğru,

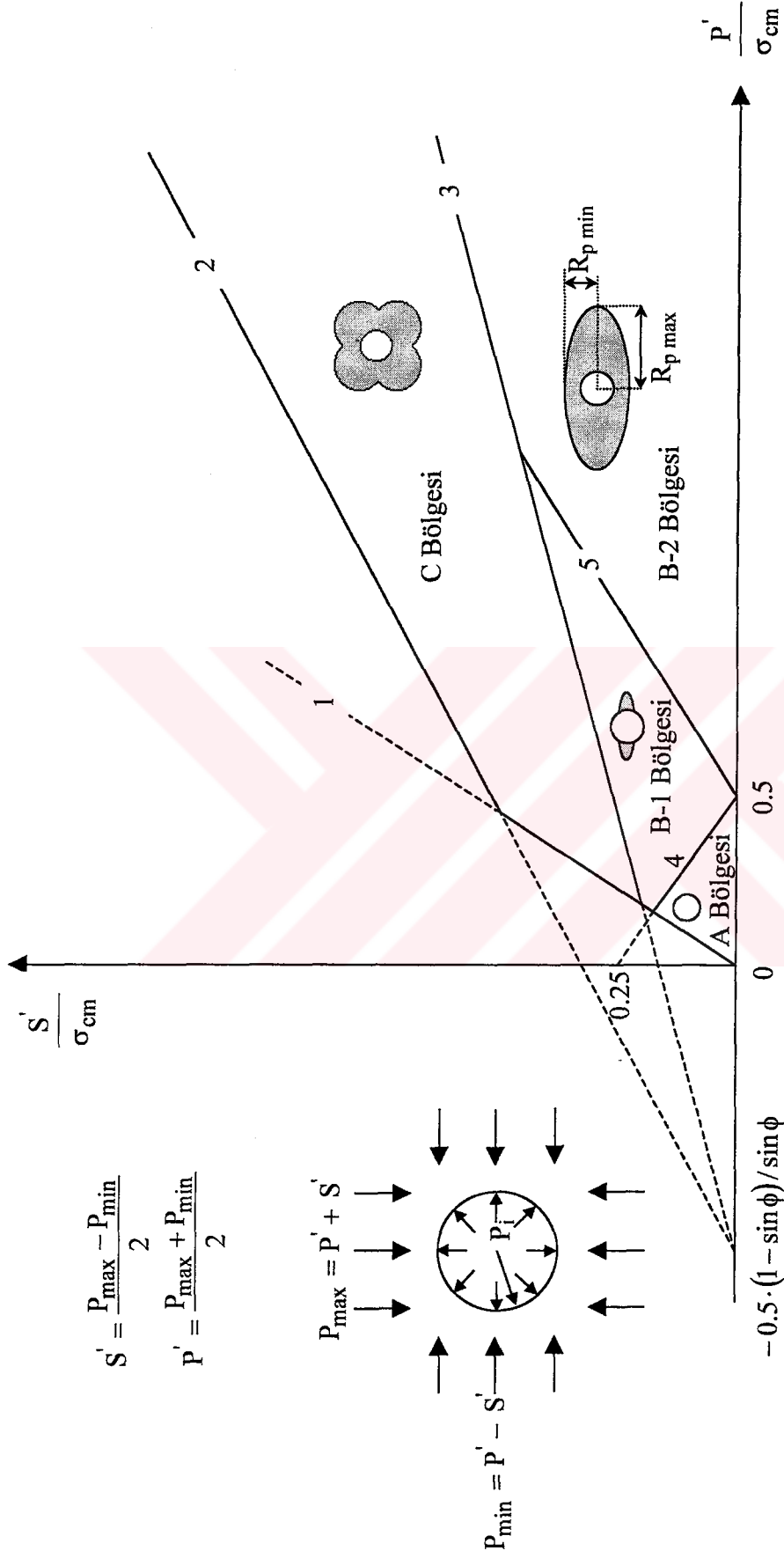
$$\frac{S'}{\sigma_{cm}} = \frac{P'}{\sigma_{cm}} \quad (2.20)$$

2 no.'lu doğru,

$$\frac{S'}{\sigma_{cm}} = 0.5 (1 - \sin\phi) + \sin\phi \left(\frac{P'}{\sigma_{cm}} \right) \quad (2.21)$$

B bölgesi ile C bölgesini ayıran 3 no.'lu doğru,

$$\frac{S'}{\sigma_{cm}} = m * \left[0.5 (1 - \sin\phi) + \sin\phi \left(\frac{P'}{\sigma_{cm}} \right) \right] \quad (2.22)$$



Şekil 2.9 Hidrostatik olmayan birincil gerilme alanlarında, dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi geometrisi (Detournay and Fairhurst'tan [1982] değiştirilerek).

eşitlikleriyle verilmektedir. Burada m^* , kritik sapkınlık (critical obliquity) olup, yukarıdaki eşitlik $m^* \leq 0.5$ olduğu durumlarda geçerlidir. Çeşitli içsel sürtünme açıları için kritik sapkınlık değerleri Çizelge 2.1’de sunulmuştur. A bölgesi ile B-1 bölgesini ayıran 4 no.’lu doğru,

$$\frac{S'}{\sigma_{cm}} = 0.25 - 0.5 \frac{P'}{\sigma_{cm}} \quad (2.23)$$

ve B-1 bölgesi ile B-2 bölgesini ayıran 5 no.’lu doğru da

$$\frac{P'}{\sigma_{cm}} = \frac{0.5 (1-m)^{-2 \sin \phi} h(m)}{\sin \phi} - \frac{1}{N_{\phi} - 1} \quad (2.24.a)$$

$$\frac{S'}{\sigma_{cm}} = 0.5 (1-m)^{-2 \sin \phi} m \cdot h(m) \quad (2.24.b)$$

parametrik eşitlikleriyle tanımlanmaktadır (Detournay and Fairhurst, 1982).

Burada; m , sapkınlık (obliquity) olup,

$$m = \frac{S'}{\sin \phi \left(P' + \frac{\sigma_{cm}}{N_{\phi} - 1} \right)} \quad (2.25)$$

eşitliği ile verilmektedir. Ayrıca, $h(m)$ ise Gauss hipergeometrik serisi olup,

$$h(m) = F \left(-\sin \phi, -\sin \phi, 1, m^2 \right) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\prod_{j=0}^{k-1} (j - \sin \phi)}{k!} m^k \right]^2 \quad (2.26)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Gerçek, 2001). Sapkınlık değeri (m), açıklık çevresinde yenilme bölgesinin şeklinin belirlenmesini kontrol etmektedir. Eğer m sapkınlık değeri kritik sapkınlık değerinden daha az olursa, yenilme bölgesinin şekli ve büyüklüğü P' , S' ve içsel basınç değeri ile elde edilebilmektedir. Eğer sapkınlık değeri kritik sapkınlık değerinden daha büyükse (1 'den az olmak koşuluyla) yenilme bölgesinin büyüklüğü statik olarak belirlenmemektedir. m sapkınlık değeri birincil gerilmelerin hidrostatik koşullardan niceliksel olarak sapmasını belirlemektedir.

Çizelge 2.1 Kritik sapkınlık değerleri (John et al., 1984).

ϕ	0°	10°	20°	30°	40°
m^*	0.414	0.437	0.466	0.500	0.542

Etkiyen birincil gerilmelere bağlı olarak açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi dört ayrı bölümde sınıflandırılabilir (Şekil 2.9) (Detournay and Fairhurst, 1982).

A bölgesinde açıklık çevresinde herhangi bir noktada kayacın dayanımını aşan bir gerilme durumu oluşmadığı için yenilme bölgesi de oluşmamaktadır. Kaya kütlesi doğrusal-elastik davranış göstermektedir.

B-1 bölgesinde açıklık yüzeyini tamamen çevrelemeyecek şekilde yenilme bölgesi oluşmaktadır. Oluşan yenilme bölgesi en büyük asal birincil gerilme doğrultusuna dik olarak gelişmektedir.

B-2 bölgesinde açıklık yüzeyini tamamen çevreleyen elips şeklinde bir yenilme bölgesi oluşmaktadır. Oluşan bu yenilme bölgesinin en büyük ve en küçük yarıçapları aşağıda verilen eşitliklerle elde edilebilmektedir (John et al.,1984; Detournay and Fairhurst, 1987; Detournay and John, 1988).

$$\frac{R_{p \min}}{R} = \left(\frac{R_p}{R} \right) \left(\frac{1+m}{1-m} \right)^{\frac{-(1-\sin \phi)}{2}} \quad (2.27.a)$$

$$\frac{R_{p \max}}{R} = \left(\frac{R_{p \min}}{R} \right) \left(\frac{1+m}{1-m} \right)^{1-\sin \phi} \quad (2.27.b)$$

Burada; R_p/R , Eşitlik 2.9 ile tanımlanmıştır.

C bölgesinde, açıklık yüzeyinin tamamını kapsayan kelebek şeklinde bir yenilme bölgesi oluşmaktadır. Matematiksel çözümlerle yenilme bölgesi belirlenemediğinden, bu bölgede çeşitli sayısal gerilme çözümlemesi yöntemleri kullanılarak analiz yapılmalıdır (John et al.,1984; Detournay and John, 1988). Detournay ve Fairhurst (1982) ve John et al. (1984) tarafından önerilen bu yarı analitik yaklaşım, dairesel açıklık çevresindeki yenilme bölgesinin geometrisi hakkında tasarımcıya herhangi bir çözümleme yapmadan bilgi sunmaktadır.

Martin et al. (1997, 1999) tarafından, açıklık çevresinde yenilme bölgesi geometrisi ve kalınlığının belirlendiği sekiz adet durum incelemesine dayalı gözlemler, yukarıda detayları verilen Detournay ve Fairhurst (1982) tarafından önerilen grafikte ölçeksiz gösterilmiştir. Durum incelemesi yapılan bölgelerdeki birincil gerilme alanı, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ve açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi yarıçapları Çizelge 2.2'de sunulmuştur. Bu durum incelemelerinde; kaya kütesinin basınç dayanımı, kaya malzemesinin

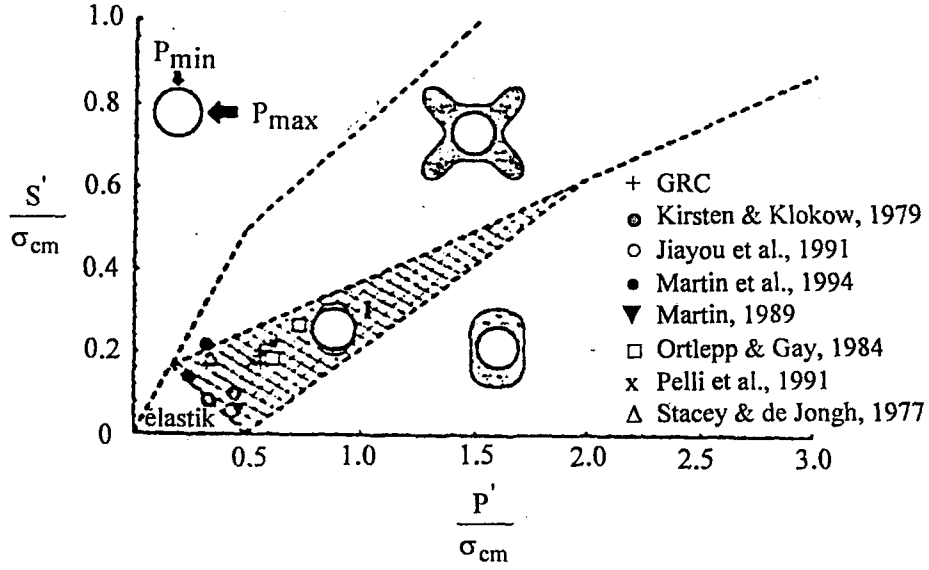
basınç dayanımının yarısı olduğu varsayılmaktadır. İncelenen tüm durumlar, Şekil 2.10'da gösterilen grafikte, açıklığın tüm çevresinde yenilme oluşmadığı B-1 bölgesinde yer almaktadır. Yatay birincil gerilme düşey birincil gerilmeden daha fazla ($k > 1$) olduğu için, açıklıkların tavan veya taban bölgelerinde en büyük teğetsel ikincil gerilmeler ve yenilme bölgesi oluşmaktadır.

Çizelge 2.2 İncelenen açıklıklarda oluşan yenilme bölgesi yarıçapları ve birincil gerilmeler oranı (Martin et al., 1999).

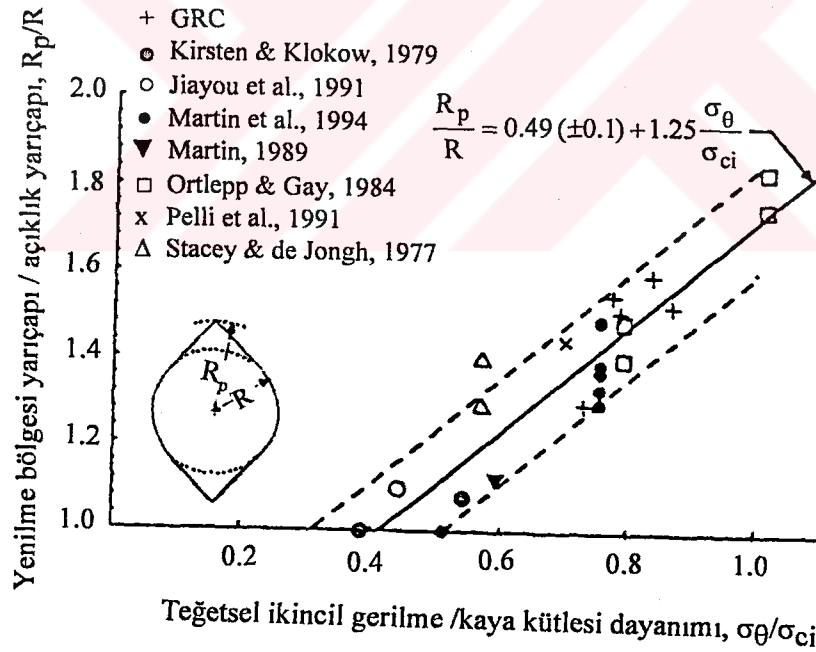
Kaya Türü	R_p/R	k P_{max}/P_{min}	P_{min} (MPa)	σ_{ci} (MPa)	Kaynak
Bloklu andezit (*)	1.3	1.92	15.3	100	GRC (El Teniente Ocağı)
	1.5	2.07	14.8	100	
	1.4	2.03	14.7	100	
	1.5	2.10	16.3	100	
	1.5	2.03	15.4	100	
	1.6	2.09	15.8	100	
Masif kuvarsit (*)	1.8	2.15	65	350	Ortlepp ve Gay (1984)
	1.7	2.15	65	350	
	1.4	1.86	60	350	
	1.5	1.86	60	350	
Tabakalı kuvarsit	1.4	3.39	15.5	250	Stacey ve de Jongh (1977)
	1.3	3.39	15.5	250	
Masif granit	1.5	5.36	11	220	Martin et al. (1994)
	1.4	5.36	11	220	
	1.4	5.36	11	220	
	1.3	5.36	11	220	
	1.3	5.36	11	220	
	1.0	3.70	11	220	
Masif granit	1.1	1.31	40	220	Martin (1989)
Silttaşı-çamurtaşı	1.4	2.0	5	36	Pelli et al. (1991)
Tabakalı kireçtaşı	1.1	1.3	12.1	80	Jiayou et al. (1989)
Tabakalı kuvarsit	1.0	1.69	21	217	Kirsten ve Klokow (1979)
	1.08	1.69	20	151	

(*) Kemer tavanlı açıklık, diğer açıklıklar dairesel kesitte

İncelenen sekiz adet durum incelemesine dayalı olarak Martin et al. (1997, 1999) dairesel açıklık tavanında oluşan en büyük teğetsel gerilme ile yenilme bölgesi yarıçapı arasında aşağıda verilen eşitliği önermiştir:



Şekil 2.10 Durum incelemeleri esas alınarak, tahkimatsız dairesel açıklık için birincil gerilme durumu ve yenilme şekilleri arasındaki ilişki (Detournay and John, 1988; Martin et al., 1997'den).



Şekil 2.11 Açıklık yüzeyindeki maksimum teğetsel gerilme ve yenilme kalınlığı arasındaki ilişki (Martin et al., 1997).

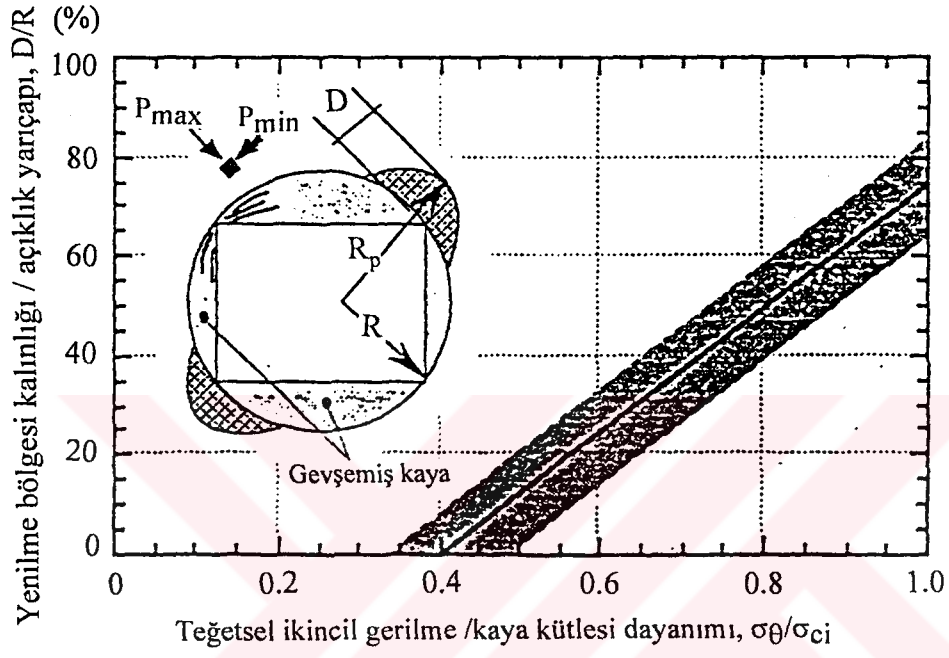
$$\frac{R_p}{R} = 0.49 (\pm 0.1) + 1.25 \frac{\sigma_\theta}{\sigma_{ci}} \quad (2.28)$$

Burada; σ_θ , en büyük teğetsel gerilme olup, $k > 1$ için açıklığın tavan veya tabanında oluşmaktadır. Açıklık tavanında oluşan en büyük teğetsel gerilme değeri, Eşitlik 2.3.g'de $k = P_{\max}/P_{\min}$ ve $P_v = P_{\min}$ yerleştirilerek,

$$\sigma_\theta = 3 P_{\max} - P_{\min} \quad (2.29)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada; $P_{\max}$ ve $P_{\min}$, sırasıyla en büyük ve en küçük asal birincil gerilmelerdir. Şekil 2.11'de yenilme bölgesi yarıçapı açıklığın yarıçapına ve en büyük teğetsel gerilme de, σ_{ci} 'ye göre normalleştirilmiştir. Eşitlik 2.28'e göre $\sigma_\theta/\sigma_{ci}$ yaklaşık 0.49 ± 0.1 değerini aştığında yenilme başlamaktadır (Martin et al., 1997, 1999).

Martin et al. (1996), sert kayaçlarda açılan farklı kesitli (daire, kare, dikdörtgen ve kemer tavanlı) açıklıklar çevresinde yenilme bölgesi kalınlığını araştırmışlardır. Açıklık çevresindeki duraysızlığın $\sigma_\theta/\sigma_{ci}$ değerinin % 40'ı aştığı durumda olduğu gözlemlenmiştir. Yenilme bölgesi yarıçapının açıklık yarıçapına normalleştirilmiş değeri ile en büyük teğetsel gerilmenin (eşdeğer dairesel açıklık yarıçapı R' 'de hesaplanmış) tek eksenli basınç dayanımına normalleştirilmiş değeri ile değişimi Şekil 2.12'de verilmiştir. Örneğin, 6 m genişliğinde dairesel galeri $\sigma_\theta/\sigma_{ci} = 0.8$ durumunda yenilme bölgesi kalınlığı, açıklığın yarıçapının % 40 ve % 60'ı, 1.2 m ve 1.8 m olacaktır. Eğer açıklık dairesel değilse, köşelerde çatlak ilerlemekte ve açıklığın düz tavan ve tabanında üçgen şeklinde yenilme kamaları (baggage) oluşmaktadır. Bu kamalar tahkimata ilave ölü yük olarak etkimektedir. İlave gevşeyen kaya kamalarının kalınlığı düz kenarlı açıklıklar için, açıklık



Şekil 2.12 Durum incelemelerine bağlı yenilme kalınlığı (Kaiser and Tannant, 1997).

genişliği veya yüksekliğinin % 20'si kadardır. $\sigma_\theta/\sigma_{ci} < 0.4$ için yenilme bölgesi kalınlığı oluşmamaktadır (Kaiser and Tannant, 1997).

2.5 DURAYLILIK DEğERLENDİRMESİ

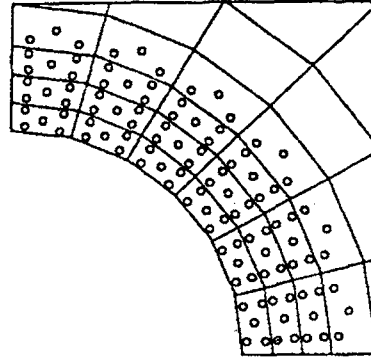
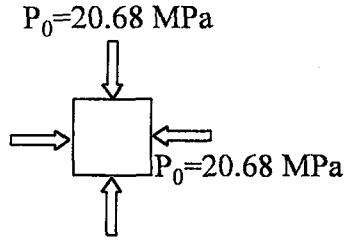
Yeraltı açıklıklarının çevresinde oluşan yenilme bölgeleri ile ilgili çok sayıda yayın mevcuttur. Bunlardan, sonuçları genelleştirmeye izin vermeyecek derecede özel konular ve açıklık geometrileri göz önünde bulundurulmamıştır.

Pan ve Chen (1990), Obara et al. (1992) ve Pan ve Brown (1996) birincil gerilme alanının ve açıklık şeklinin duraylılığa etkisini araştırmışlardır. Bu alışmalar aşağıda özetlenmiştir.

2.5.1 Dairesel Açıklık Geometrisi

Pan ve Chen (1990) tarafından yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan yenilme bölgesinin belirlenmesi için sayısal çözümlerler yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı çözümlerlerde, ortamın Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu ve elastik-kusursuz plastik malzeme davranışı gösterdiği kabul edilmiştir. Çeşitli birincil gerilme oranlarında daire ve elips kesitli açıklıklar gözönünde bulundurulmuştur. Birincil gerilmelerin doğrultuları ile açıklık geometrisinin simetri eksenleri çakışık olduğu için dairesele açıklık geometrisinin dörtte biri için çözümlerler yapılmıştır. Birincil gerilmeler oranının (k) 1.0, 1.5 ve 2.0 olduğu durumlarda dairesele açıklık çevresindeki yenilme bölgeleri şekil 2.13'te sunulmuştur. Çalışmada, deformasyon modülü $E_m = 1930$ MPa, Poisson oranı $\nu = 0.25$, düşey birincil gerilme $P_v = 20.68$ MPa, kaya kütlesinin tek eksenli basıncı dayanımı $\sigma_{cm} = 10.34$ MPa, kaya kütlesinin kohezyonu

**BİRİNCİL GERİLME
ALANI**



a. $k=1.0$

**KAYA KÜTLESİ
ÖZELLİKLERİ**

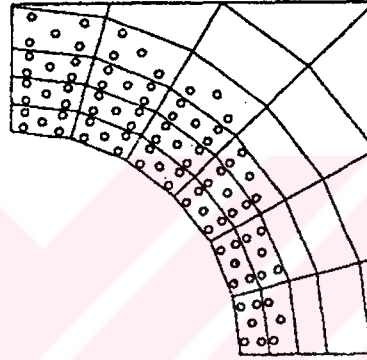
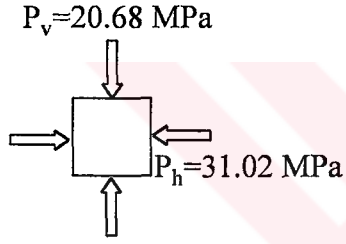
$$\sigma_{cm} = 10.34 \text{ MPa}$$

$$c_m = 2.85 \text{ MPa}$$

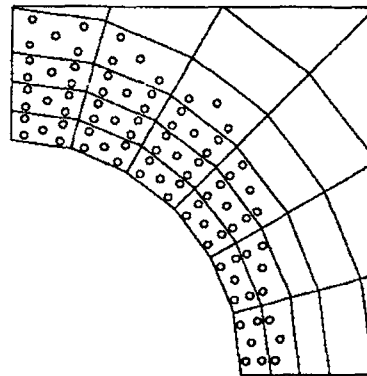
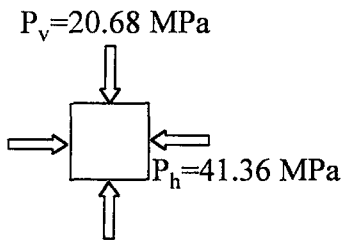
$$\phi = 32.2^\circ$$

$$E_m = 1930 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.25$$



b. $k=1.5$



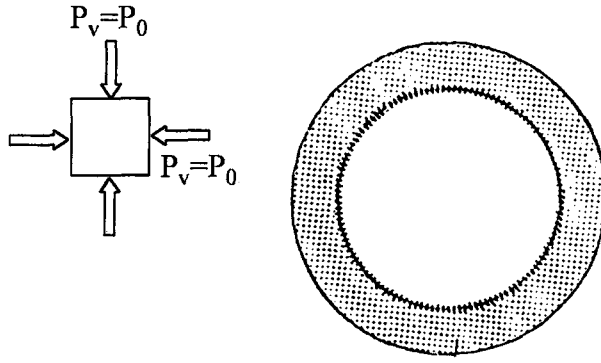
c. $k=2.0$

Şekil 2.13 Çeşitli birincil gerilme oranında daire açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi (Pan and Chen, 1990).

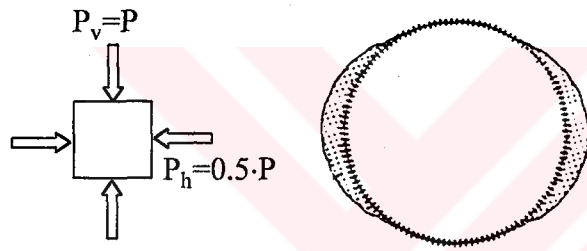
$c_m = 2.85 \text{ MPa}$ ve $\phi = 32.2^\circ$ alınmıştır. Kaya kütlesinde yenilme oluştuğunda ilintili akış kuralı (associated flow rule) varsayılmıştır. Bilindiği gibi, dairesel açıklık için daire şeklinde yenilme bölgesi yalnızca hidrostatik birincil gerilme alanında oluşmaktadır. Hidrostatik olmayan birincil gerilme durumlarında, yenilme bölgesi elips veya elipse yakın bir geometride olmaktadır ve yenilme bölgesi en küçük birincil gerilme doğrultusunda genişlemektedir (Pan and Chen, 1990).

Obara et al. (1992) tarafından yeraltı açıklıkları çevresinde yenilme bölgesinin belirlenmesi için sayısal çözümler yapılmıştır. Sınır elemanları yönteminin kullanıldığı çözümlerlerde, ortamın Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu ve elastik-kusursuz plastik malzeme davranışı gösterdiği kabul edilmiştir. Daire ve dikdörtgen kesitli açıklık geometrilerinde oluşan yenilme bölgelerinin, açıklık yüzeyine dik kalınlıklarının birincil gerilme alanı ile değişimlerini ortaya koymuştur. Hidrostatik birincil gerilme alanında dairesel açıklık çevresindeki yenilme bölgesinin şekli Şekil 2.14.a'da verilmiştir. Aynı birincil gerilmeler oranında ($k = 0.5$) ve $P_v/\sigma_{cm} = 1.4$ ve $P_v/\sigma_{cm} = 2.5$ olan düşey birincil gerilme alanları için yenilme bölgesinin geometrisi Şekil 2.14.b ve Şekil 2.14.c'de görülmektedir. Aynı birincil gerilme oranında, birincil gerilmeler arttıkça yenilme bölgesi de artmaktadır. Dairesel açıklık çevresinde, yenilme bölgesinin kalınlığı ile birincil gerilme alanı arasındaki ilişki Şekil 2.15'te gösterilmektedir. Sınır elemanları ve analitik çözümleme yöntemleri ile elde edilen yenilme bölgesi kalınlıkları oldukça yakın sonuç vermiştir. Yenilme bölgesinin en büyük kalınlığı (D), daha çok en büyük asal birincil gerilmeye bağlıdır ve birincil gerilmelerin oranının etkisi göreceli olarak daha azdır (Obara et al., 1992). Kaya kütlesinin dayanımı arttıkça açıklık çevresindeki yenilme bölgesinin kalınlığı da azalmaktadır.

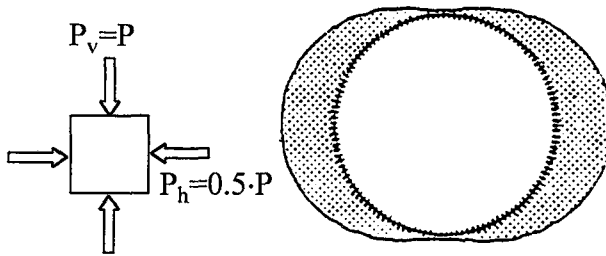
BİRİNCİL GERİLME ALANI



- a. Hidrostatik birincil gerilme alanında oluşan yenilme bölgesi ($k=1$, $P_v/\sigma_{cm}=2.5$ ve $\phi=40^\circ$)

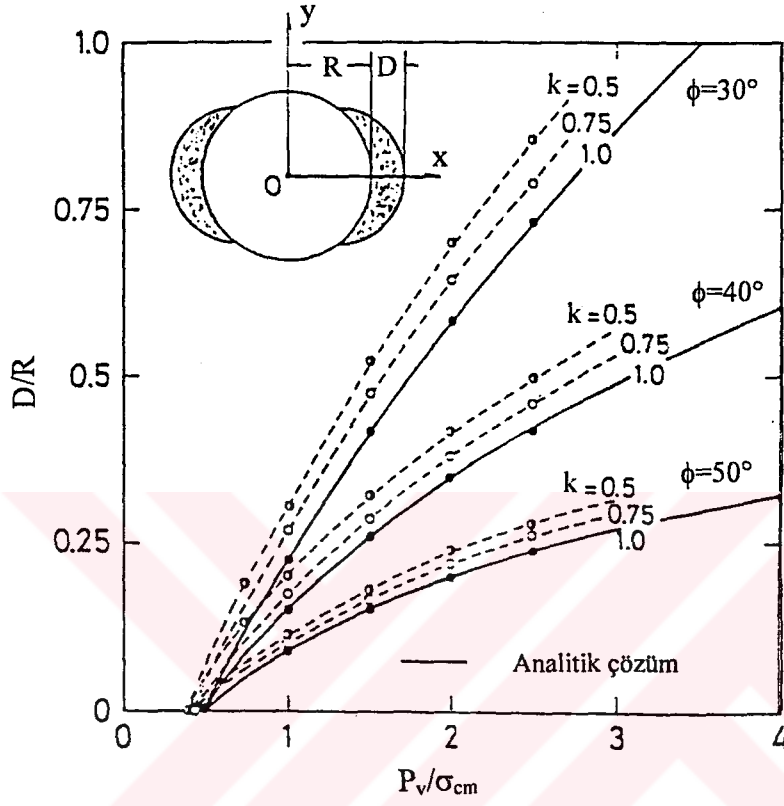


- b. Açıklığı tamamen çevrelemeyen yenilme bölgesi ($k=0.5$, $P_v/\sigma_{cm}=1.4$ ve $\phi=40^\circ$)



- c. Açıklığı tamamen çevreleyen yenilme bölgesi ($k=0.5$, $P_v/\sigma_{cm}=2.5$ ve $\phi=40^\circ$)

Şekil 2.14 Dairesel açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi (Obara et al., 1992).



Şekil 2.15 Dairesel açıklık için normalleştirilmiş birincil gerilme ve en büyük yenilme bölgesi kalınlığı arasındaki ilişki (Obara et al., 1992).

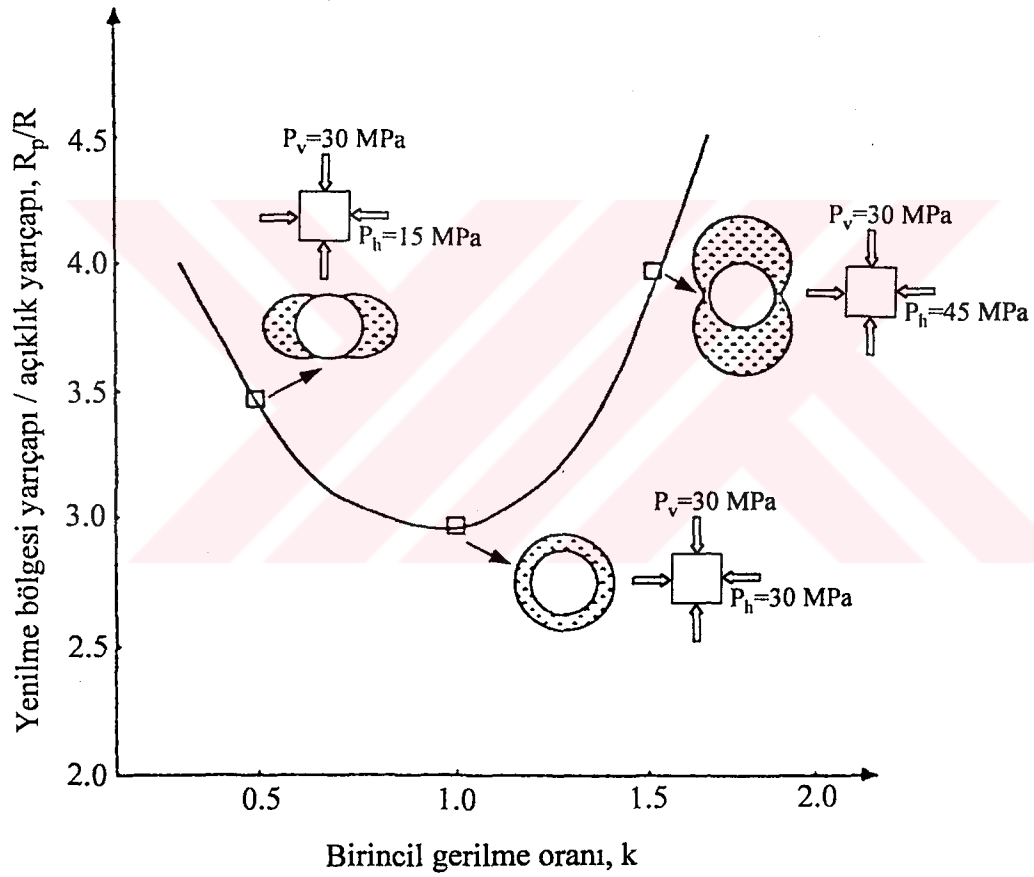
Pan ve Brown (1996) tarafından yeraltı açıklıkları çevresinde yenilme bölgesinin belirlenmesi için sayısal çözümler yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı çözümlerlerde, ortamın Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu ve elastik-gevrek plastik malzeme davranışı gösterdiği kabul edilmiştir. Çözümlerlerde ilintili akış kuralı gözönünde bulundurulmuştur. Dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin kalınlığı ve geometrisi üzerine birincil gerilmelerin etkisi Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Analizlerde düşey birincil gerilme sabit (30 MPa) tutulmuş ve yatay birincil gerilme 15 – 45 MPa arasında değiştirilmiştir. Dayanım değiştiricileri; $\sigma_{ci} = 30$ MPa, $c_m = 8.3$ MPa, $\phi = 32^\circ$, $\sigma_{cm} = 23$ MPa, $c^* = 7.7$ MPa, $\phi^* = 22^\circ$ ve dilatasyon değiştiricisi $\alpha' = 0.15$ alınmıştır. Hidrostatik birincil gerilme alanının, dairesele açıklığın duraylılığı için optimum gerilme koşullarını sağladığı görülmüştür. Hidrostatik olmayan birincil gerilme alanında, aşırı gerilme koşulları dışında açıklığın tüm çevresinde yenilme bölgesi oluşmamaktadır (Pan and Brown, 1996). Sınırlı sayıda birincil gerilme alanları için yapılan çözümleme sonuçları ile elde edilen ve Şekil 2.16'da gösterilen eğrinin, daha farklı birincil gerilme alanlarını da kapsayacak şekilde yeniden düzenlenmesi sonucunda, duraylılık açısından en uygun birincil gerilme alanının değişebileceği göz ardı edilmemelidir.

2.5.2 Dairesel Olmayan Açıklık Geometrisi

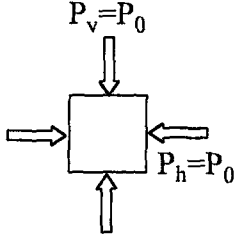
Pan ve Chen (1990) tarafından açıklık geometrisinin yenilme bölgesi üzerindeki etkisini araştırmak için hidrostatik birincil gerilme alanında, daire, elips, dikdörtgen ve kemer tavanlı açıklıklar göz önünde bulundurulmuştur (Şekil 2.17). Dikdörtgen ve kemer tavanlı köşeli açıklıklar için göreceli olarak köşelere yakın kısımlarda daha az kalınlıkta yenilme bölgesi oluşmaktadır (Şekil 2.17.c ve Şekil 2.17.d). Yenilme bölgesinin açıklığın köşelerinde sınırlı oluşmasının nedeni;

KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ

$\sigma_{ci} = 30 \text{ MPa}$	$\sigma_{cm} = 23 \text{ MPa}$
$c_m = 8.3 \text{ MPa}$	$c^* = 7.7 \text{ MPa}$
$\phi = 32^\circ$	$\phi^* = 22^\circ$
	$\alpha' = 0.15$



Şekil 2.16 Dairesel açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi üzerine birincil gerilmelerin etkisi (Pan and Brown, 1996).

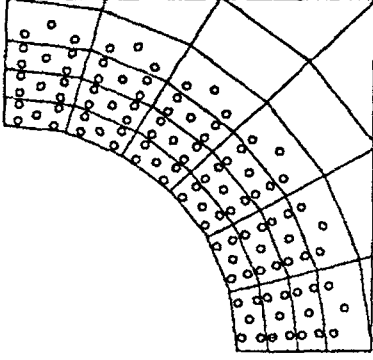


KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ

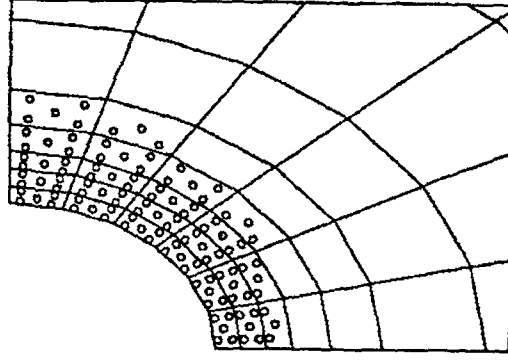
$$\sigma_{cm} = 10.34 \text{ MPa} \quad E_m = 1930 \text{ MPa}$$

$$c_m = 2.85 \text{ MPa} \quad \nu = 0.25$$

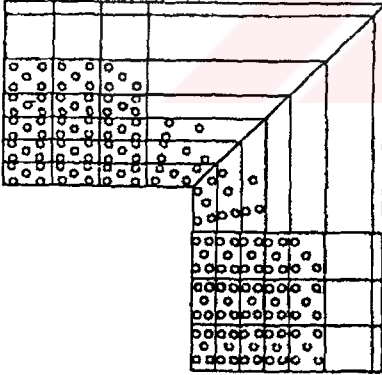
$$\phi = 32.2^\circ$$



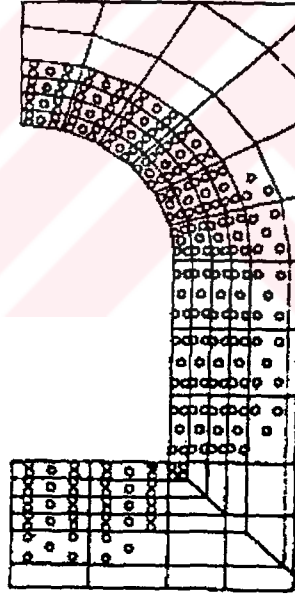
a. Daire kesitli açıklık



b. Elips kesitli açıklık



c. Kare kesitli açıklık



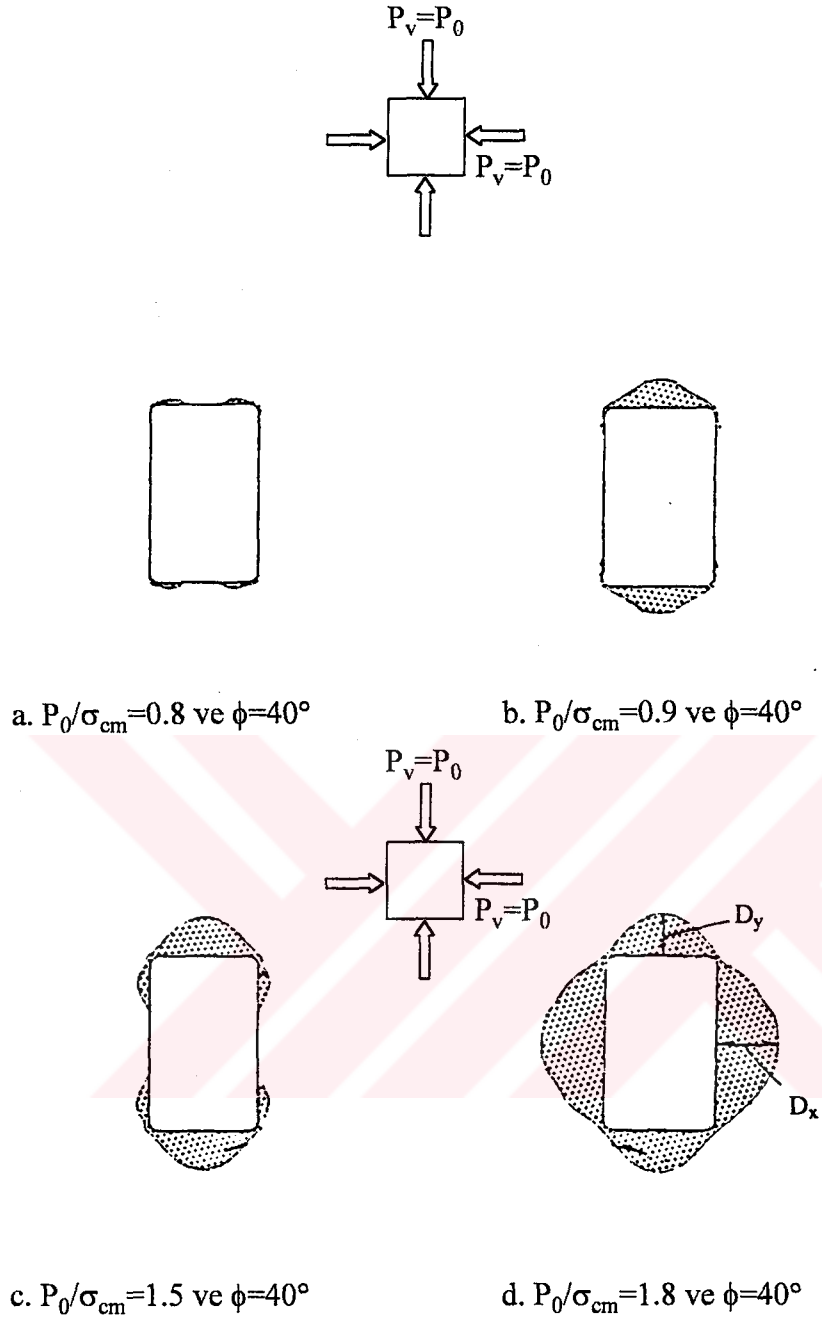
d. Kemer tavanlı kesitli açıklık

Şekil 2.17 Hidrostatik birincil gerilme alanında çeşitli açıklıklarda oluşan yenilme bölgesi geometrisi (Pan and Chen, 1990).

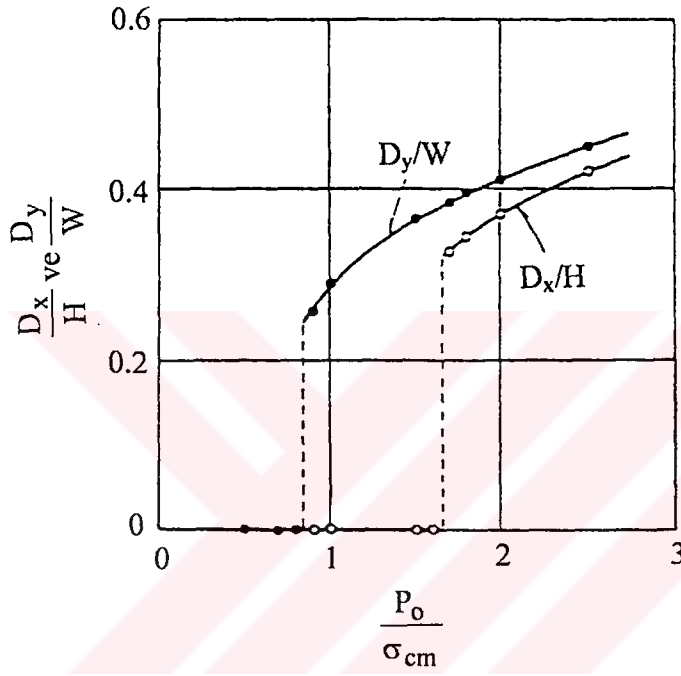
açıklığın eğrilik yarıçapının küçük olduğu bölgelerde yüksek teğetsel ikincil gerilme yığılmaları oluşmakta, bununla birlikte açıklıktan iç kesimlere doğru hızlıca birincil gerilmelere dönüşmektedir. Sonuçta, söz konusu bölgelerde yenilme bölgesi daha sınırlı oluşmaktadır (Şekil 2.17) (Pan and Chen, 1990).

Hidrostatik birincil gerilme alanında oluşturulan ve köşeleri küçük eğrilik yarıçaplarına sahip dikdörtgen açıklık çevresindeki yenilme bölgeleri Şekil 2.18’de sunulmuştur. Hidrostatik birincil gerilme alanında, birincil gerilme bileşeninin büyüklüğü değiştirilmiş ve diğer dayanım özellikleri de sabit tutulmuştur ($\phi = 40^\circ$). Yenilme bölgeleri ilk olarak köşelerde oluşmakta ve birincil gerilmenin artmasıyla açıklık yüzeyi boyunca genişlemektedir. Açıklığın tavan ve yan duvarlarındaki yenilme bölgesinin kalınlığı sırasıyla D_y ve D_x olarak tanımlanmıştır. $W/H = 0.6$ olan dikdörtgen açıklık için, yenilme bölgesinin kalınlıklarının hidrostatik birincil gerilme alanı ile değişimi Şekil 2.19’da gösterilmiştir (Obara et al., 1992). Şekil 2.19’da görüldüğü gibi hidrostatik birincil gerilme alanında, $W/H = 0.6$ olan dikdörtgen açıklığın yan duvarının orta ortasında $P_0/\sigma_{cm} = 1.65$, açıklığın tabanının (veya tavanında) orta noktasında $P_0/\sigma_{cm} = 0.85$ değerlerinde yenilme başlamaktadır. Örneğin, $P_0/\sigma_{cm} = 1.25$ değerinde, açıklığın yan duvarlarında yenilme bölgesi oluşmamakta, açıklığın tavanında ise $0.33 W$ kadar bir yenilme bölgesi oluşmaktadır. $P_0/\sigma_{cm} = 2$ değerinde ise açıklığın yan duvarı ve tavanında sırasıyla $0.37 H$ ve $0.41 W$ kadar yenilme bölgesi oluşmaktadır.

Birincil gerilmeler oranının (k) 0.75 , 1.0 ve 1.5 olduğu durumlarda, $W/H = 1.4$ olan elips kesitli açıklık çevresindeki yenilme bölgeleri Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Elips kesitli açıklıklar için en küçük birincil gerilme doğrultusu, açıklığın kısa eksenine ile çakıştığında yenilme bölgesinin yaklaşık eşit kalınlıkta

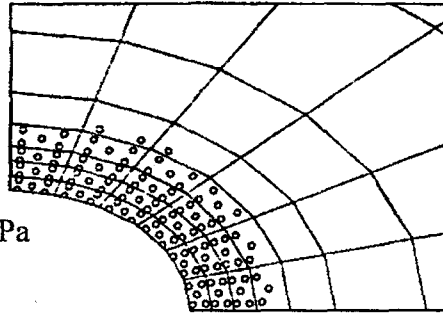
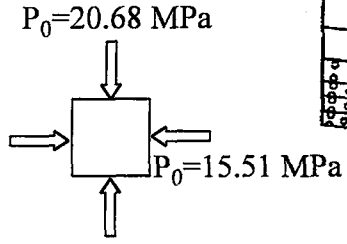


Şekil 2.18 Hidrostatik birincil gerilme alanında $W/H=0.6$ olan dikdörtgen açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi (Obara et al., 1992).

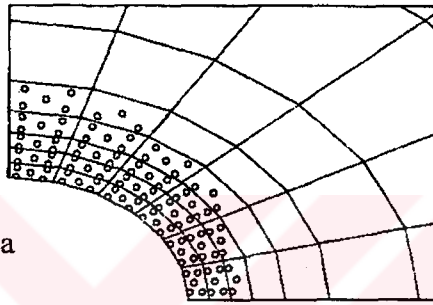
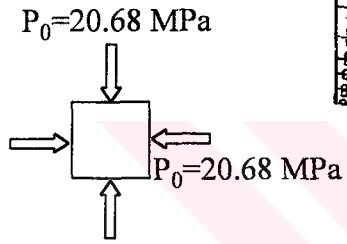


Şekil 2.19 Hidrostatik birincil gerilme alanında, $W/H=0.6$ olan dikdörtgen açıklığın yan ve tavan duvarlarında oluşan yenilme bölgesinin kalınlığının değişimi (Obara et al., 1992).

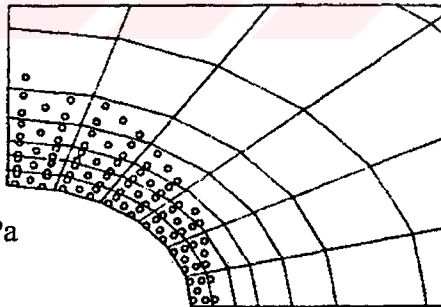
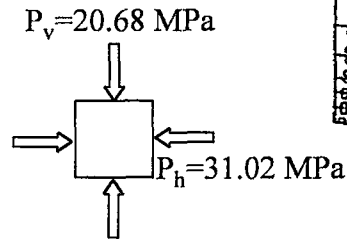
**BİRİNCİL GERİLME
ALANI**



a. $k=0.75$



b. $k=1.0$



c. $k=1.5$

**KAYA KÜTLESİ
ÖZELLİKLERİ**

$$\sigma_{cm} = 10.34 \text{ MPa}$$

$$c_m = 2.85 \text{ MPa}$$

$$\phi = 32.2^\circ$$

$$E_m = 1930 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.25$$

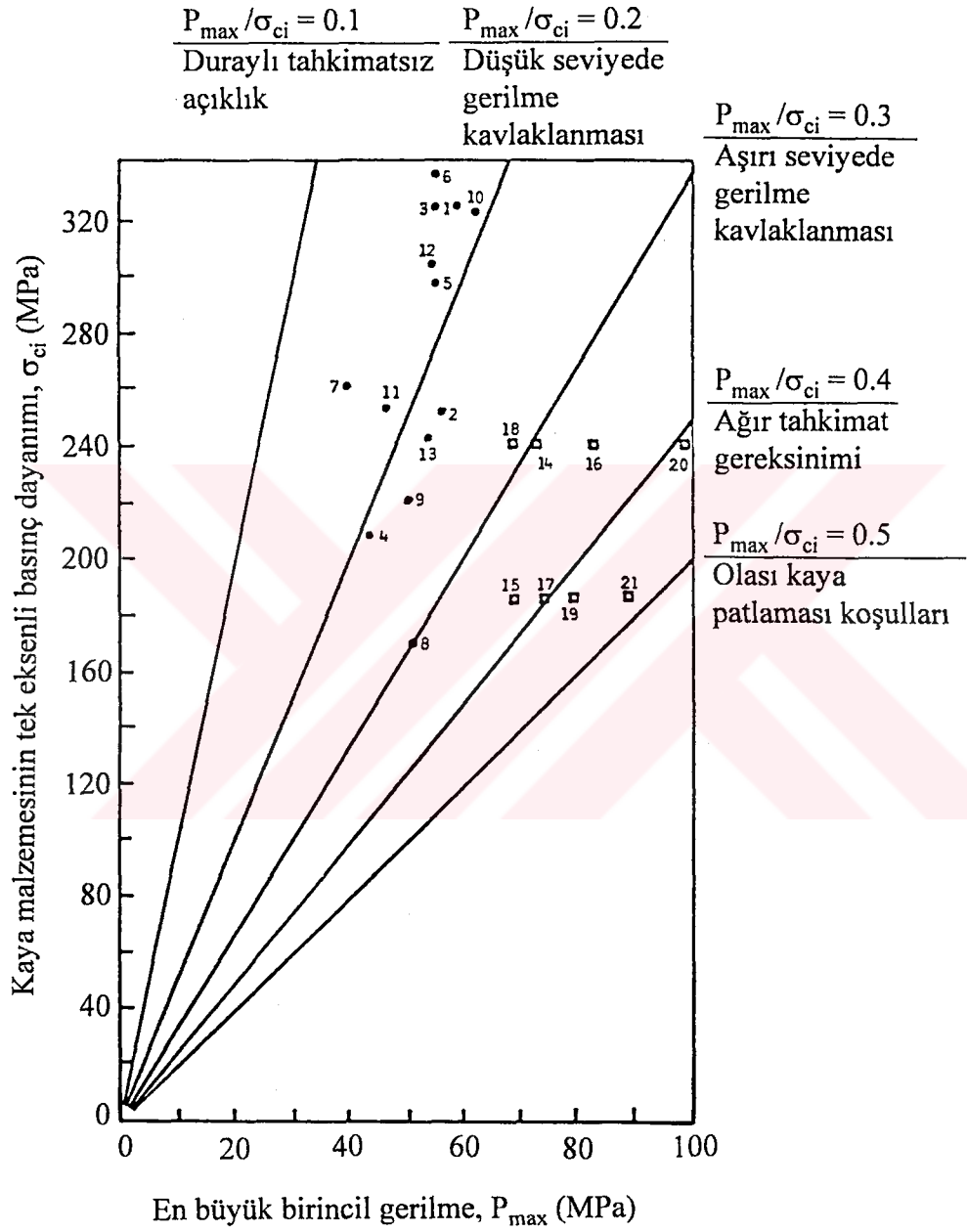
Şekil 2.20 Çeşitli birincil gerilme oranında, $W/H=1.4$ olan elips açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisi (Pan and Chen, 1990).

oluştugu görülmektedir. Diğer taraftan, en küçük asal birincil gerilme doğrultusu açıklığın uzun eksenini ile çakıştığında yenilme bölgesinin yaklaşık eşit kalınlıkta oluşmadığı ve en küçük birincil gerilme doğrultusunda genişlediği açıkça görülmektedir (Pan and Chen, 1990).

2.6 DURAYLILIK ÖLÇÜTLERİ

Wilson (1971) ve Ortlepp et al. (1973) Güney Afrika'daki derin altın madenlerinde, masif kuvars içinde açılan kare kesitli açıklıklarda oluşan yenilme bölgelerini gözlemlemişlerdir. Bu gözlemlerde, derin madenlerde birincil gerilmeler oranı (k) 0.5 olarak kabul edilmiştir (Hoek and Brown, 1980). Hoek ve Brown (1980), kare kesitli açıklıkların duraylılığı ve tahkimat gereksinimlerini sınıflandırmak için bu gözlemleri kullanmışlardır. Bu araştırmacılar, en büyük birincil gerilmenin (P_{max}) kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımına oranının (σ_{ci}) gözönünde bulundurulmasıyla açıklık çevresinde karşılaşılabilecek duraysızlık problemleri için duraylılık sınıflaması geliştirmişlerdir (Şekil 2.21).

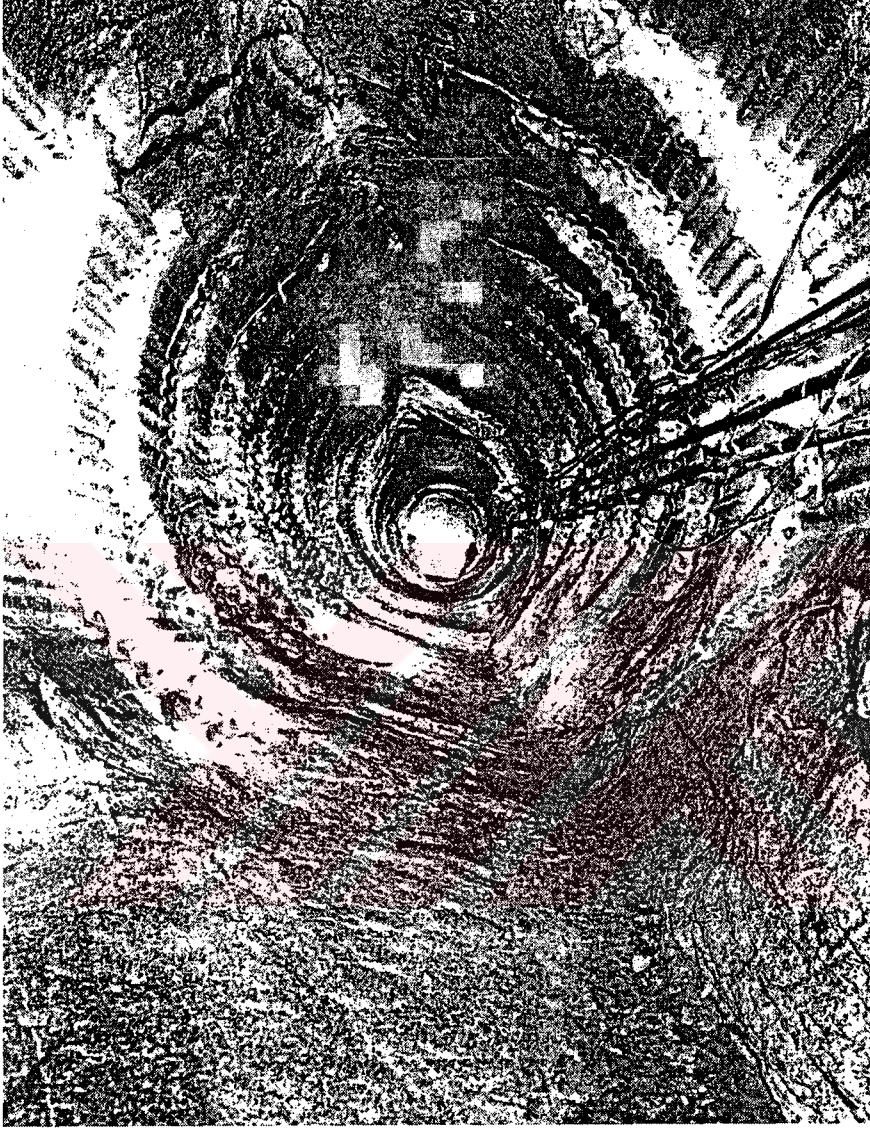
Bu sınıflamaya göre; $P_{max}/\sigma_{ci} \leq 0.1$ olduğunda, kaya kütlesi elastik davranış göstermektedir (Martin and Read, 1996) ve tahkimat gereksinimi bulunmamaktadır. $P_{max}/\sigma_{ci} \approx 0.2$ olduğunda, açıklık çevresinde oluşan gerilme yığılmalarının artmasıyla yüzeye yakın bölgelerde bazı çatlamlar ve düşük seviyede gerilme kavlaklanması oluşmaktadır (Hoek and Brown, 1980). Bu durum açıklığın çevresinde yenilme bölgesi oluşturmaktadır. Çatlamanın neden olduğu hasar, kayacın içsel dayanımını azaltarak kayacı zayıflatmaktadır (Martin and Read, 1996). Hafif bir tahkimat gereksinimi gerekmektedir (Martin et al., 1997). $P_{max}/\sigma_{ci} \approx 0.3$ olduğunda, açıklık çevresinde aşırı seviyede gerilme kavlaklanması gözlenmektedir (Hoek and Brown, 1980). Açıklığa yakın bölgelerde kaya kütlesi



Şekil 2.21 Güney Afrika'da kare açıklıklar için geliştirilen görgül duraylılık sınıflaması (Hoek and Brown, 1980).

oldukça hasar görmekte, kaya kütlesinin yük taşıma kapasitesi aşmakta, ve yenilme bölgesindeki birikimli şekil değiştirme aşırı oluşmaktadır. Bu durum; çatlak kapanması, kaya kütlesinin ayrılmasına (örneğin, kalın dilim şeklinde) öncülük etmektedir. Buna rağmen, ayrılmalar olsa bile, açıklığın şekli sonunda duraylı hale gelmektedir. Komşu açıklıkların oluşturduğu gerilme dağılımı, ısı etkilerin (örneğin, nükleer atıkların oluşturduğu ısı seviyeleri) neden olduğu gerilmeler gibi ilave olumsuz unsurlar olmadıkça açıklık duraylı kalmaktadır. Şekil 2.22’de kazı tamamlandıktan sonra Yeraltı Araştırma Laboratuvarı (Kanada)’ndaki deneme galerisinin duraylı şekli görülmektedir (Martin and Read, 1996). $P_{max}/\sigma_{ci} > 0.4$ olduğunda, açıklığın duraylılığı ağır tahkimat ile sağlanabilmektedir. $P_{max}/\sigma_{ci} > 0.5$ olduğunda, olası kaya patlaması koşulu oluşmaktadır (Hoek and Brown, 1980). Yenilme olgusunun gelişimi hızlı olmakta ve yenilme bölgesinin kalınlığı genişlemektedir. Bu koşullar genellikle yüksek derinlikte oluşmaktadır (Martin and Read, 1996). Açıklığın duraylılığı güçlükle sağlanabilmekte ve aşırı tahkimat gerekmektedir (Martin et al., 1997).

Rajmeny et al. (2002) tarafından Hindistan’da yüksek birincil gerilmelerin hakim olduğu ve arakatlı göçertme yöntemiyle üretim yapılan yeraltı madenlerindeki kılavuzlarda ve sondaj deliklerinde oluşan gerilme kavlaklanmalarını gözlemlenmiştir. En büyük birincil gerilmenin kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımına oranına bağlı bir sınıflama önerilmiştir (Çizelge 2.3). Bu sınıflama, Hoek ve Brown (1980) tarafından önerilen duraylılık sınıflaması ile oldukça benzerdir.



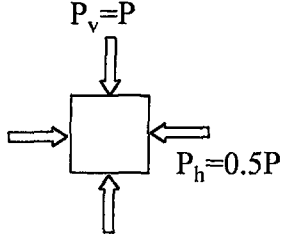
Şekil 2.22 URL'deki deneme galerisinin kazı tamamlandıktan sonraki geometrisi (Martin and Read, 1996).

Çizelge 2.3 Hindistan’da gözlemlere dayalı geliştirilen görgül duraylılık sınıflaması (Rajmeny et al., 2002).

$P_{\max}/\sigma_{ci}$	Sınıflama
0.249 – 0.270	Gerilme kavlaklanması başlangıcı
0.270 – 0.300	Aşırı gerilme kavlaklanması
> 0.300	Çok aşırı gerilme kavlaklanması

Hoek ve Brown (1980) önerdikleri duraylılık sınıflamasında yeralan $P_{\max}/\sigma_{ci}$ değerleri için kare açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesini incelemiştir. Çözümlemelerde sınır elemanları yöntemi kullanılmış olup, kaya kütesinin elastik davranış gösterdiği varsayılmıştır. Hoek-Brown dayanım sabitleri olan $m_b = 7.5$ ve $s = 0.1$ ve ortamın birincil gerilmeler oranı (k) 0.5 olarak alınmıştır. Kare açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgeleri $P_{\max}/\sigma_{ci}$ oranının farklı değerleri için Şekil 2.23’te sunulmuştur. Açıklığın tavan ve taban bölgelerinde küçük bir bölgede çekme gerilmelerinin neden olduğu aşırı gerilme bölgesi oluşmuştur. Bu bölge açıklığın duraylılığını önemli derecede etkilememektedir. $P_{\max}/\sigma_{ci} < 0.2$ değerleri için aşırı gerilme bölgeleri açıklığın köşe bölgelerinde oluşmaktadır. Köşelerde açıklığın eğrilik yarıçapının küçük olması nedeniyle de burada oluşan aşırı gerilme bölgesi küçük bir bölgede oluşmakta ve duraylılık açısından önemli bir sorun oluşturmamaktadır. Buna karşın, $P_{\max}/\sigma_{ci} > 0.2$ değerleri için aşırı gerilme bölgeleri açıklığın yan duvarlarını çevrelemekte ve $P_{\max}/\sigma_{ci}$ oranının artan değerlerinde aşırı gerilme bölgesi büyümektedir (Hoek and Brown, 1980). Yapılan gözlemlerle elastik çözümlemelerden elde edilen bulgular birbirlerini desteklemektedir.

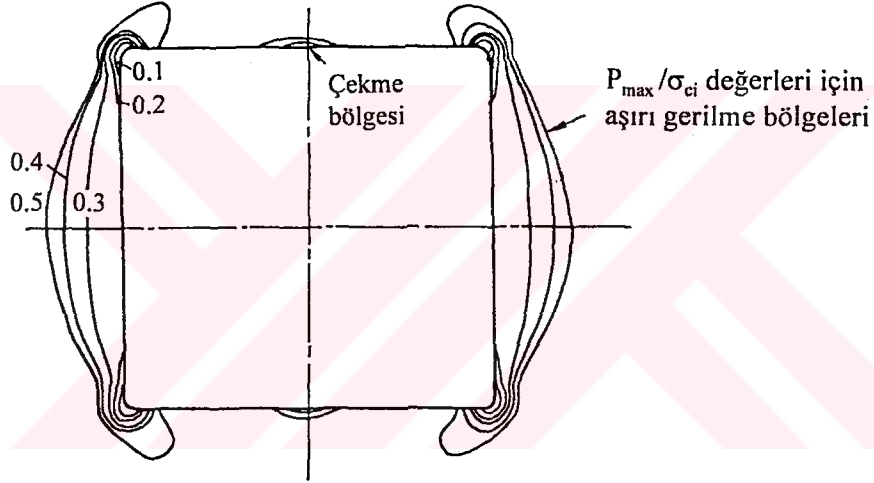
BİRİNCİL GERİLME ALANI



KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ

$$m_b = 7.5$$

$$s = 0.1$$

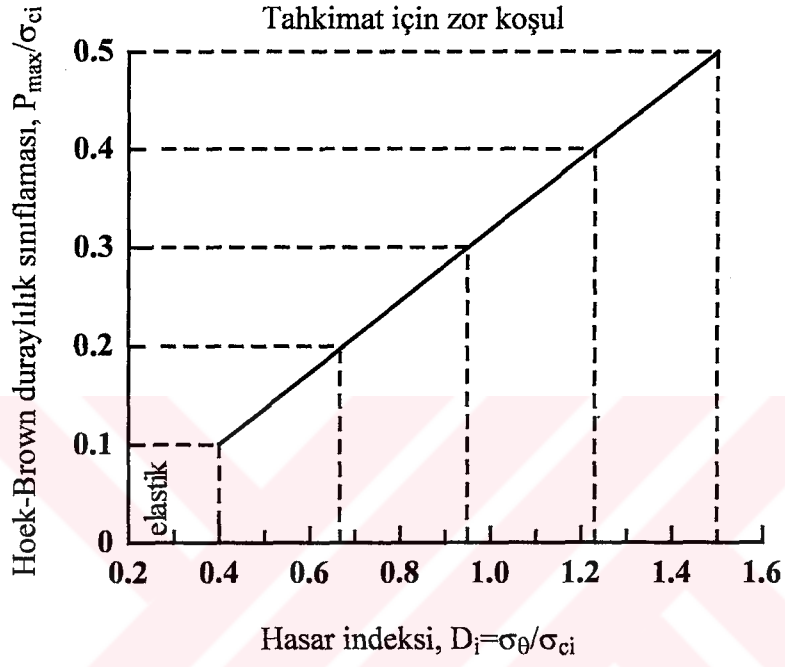


Şekil 2.23 Kare açıklık çevresinde, $P_{\max}/\sigma_{ci}$ değerleri ile aşırı gerilme bölgesi değişimi (Hoek and Brown, 1980).

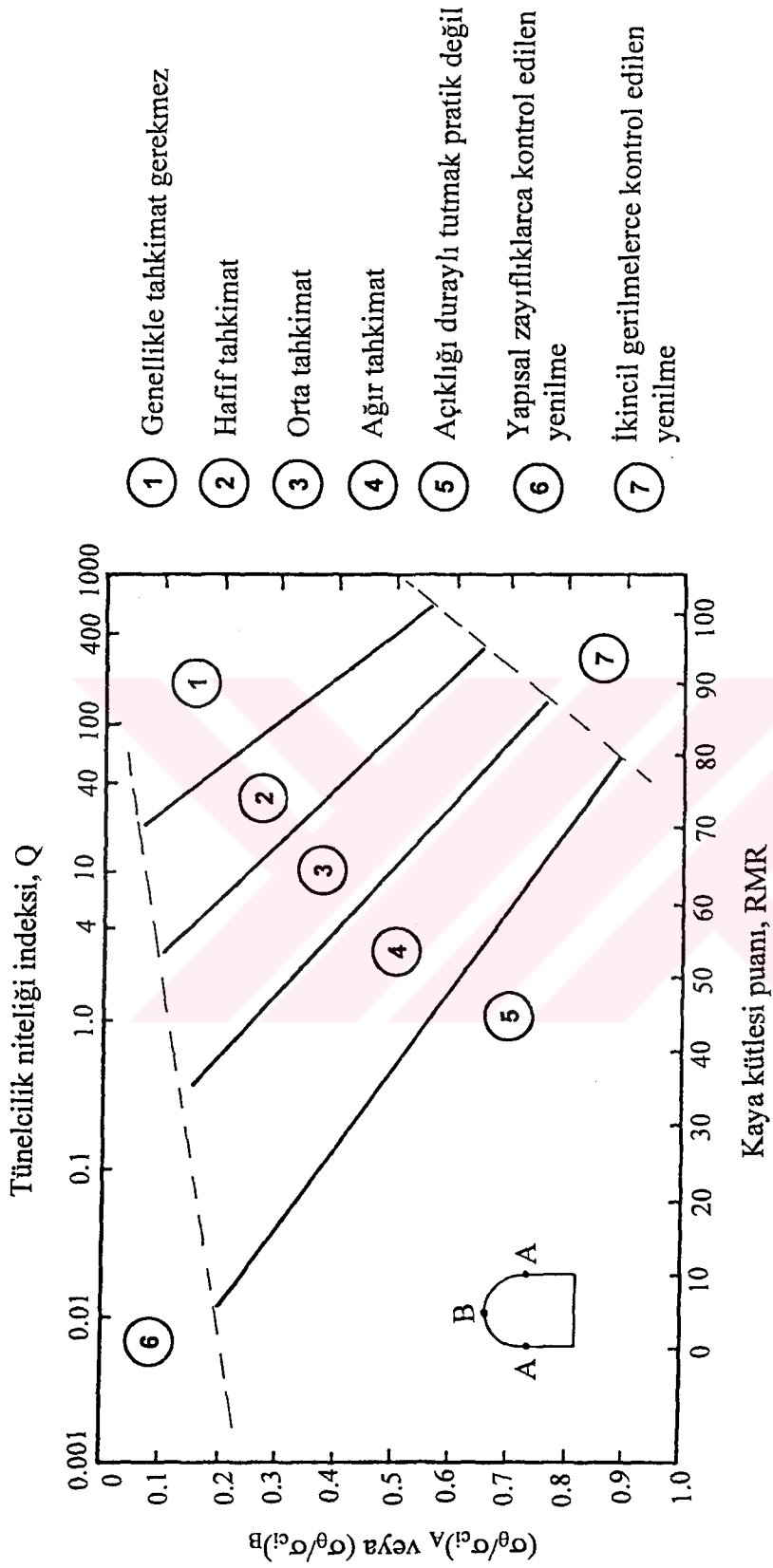
Hoek ve Brown (1980) tarafından önerilen duraylılık sınıflaması, sabit bir birincil gerilmeler oranı ($k = 0.5$) ve kare açıklık geometrisi için geçerli olduğundan diğer açıklık geometrilerine doğrudan dönüştürülememektedir. Bu nedenle Martin et al. (1997) tarafından açıklık yüzeyindeki herhangi bir noktada oluşacak en büyük teğetsel gerilmenin (σ_0) göz önünde bulundurulmasıyla, Şekil 2.21’de açıklanan sınıflamanın dönüşümü Şekil 2.24’de verilmiştir. En büyük teğetsel gerilmenin (σ_0), kaya malzemesinin basınç dayanımına (σ_{ci}) oranı “hasar indeksi (D_i)” olarak adlandırılmaktadır. $D_i \leq 0.4$ olduğunda, kaya kütlelerinin esasen elastik davranış gösterdiği ve herhangi bir yenilme bölgesinin oluşmadığı belirtilmektedir (Martin et al., 1997).

Hoek (1981), kemer tavanlı açıklık geometrisine sahip yeraltı açıklığının tahkimat gereksinimlerini yaklaşık olarak sunan bir grafik önermiştir. Açıklığın yan duvarında veya tavanında oluşan teğetsel ikincil gerilmenin, kaya kütlesi niteliği (Q) ve kaya kütlesi puanının (RMR) bilindiği durumlarda açıklığın tahkimat gereksinimleri 7 ayrı bölge için sunulmuştur. Bu bölgelere ilişkin detaylar Şekil 2.25’te sunulmuştur.

Martin ve Read (1996)’e göre, açıklık kesit düzleminde oluşan asal ikincil gerilmelerin farkının belli bir değerinden sonra açıklık çevresinde çatlamlar oluşmaktadır. Çeşitli masif kayaçlar için belirlenen çatlama başlangıcı gerilme seviyesinin, daire kesitli açıklık çevresinde oluşacak yenilme bölgesinin en büyük kalınlığını iyi tahmin ettiği gözlemlerle ortaya konmuştur. Castro et al. (1996), çatlak başlangıcı gerilme seviyesinin, orta dereceli eklemli kaya kütlelerinde açılan açıklıklarda oluşacak yenilme bölgesinin kalınlığının belirlenmesinde de uygulanabileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 2.24 Hoek-Brown duraylılık sınıflaması için $\sigma_{\theta}/\sigma_{ci}$ oranının bir fonksiyonu olarak hasar indeksinin tanımlanması (Martin et al., 1997).



Şekil 2.25 Açıklık yüzeyindeki teğetsel ikincil gerilme, RMR ve Q değerleri ile yaklaşık tahkimat önerileri (Hoek, 1981; Paşamehmetoğlu ve ark.'dan, 1985).

Gerçek ve Geniş (1995) tarafından farklı birincil gerilme alanları ve geometrilerde açılan yeraltı açıklıkları çevresinde aşırı gerilme bölgelerinin karşılaştırılabilmesi için basit fakat anlamlı bir niceliksel ölçü kullanılmıştır. Aşırı gerilme bölgesi indisi (IOZ: index of overstresses zone) olarak adlandırılan bu büyüklük, basitçe, açıklık çevresindeki aşırı gerilme bölgesi alanının açıklığın kesit alanına oranı olarak adlandırılmıştır.

$$IOZ = \frac{\Sigma A_f}{A_0} \quad (2.30)$$

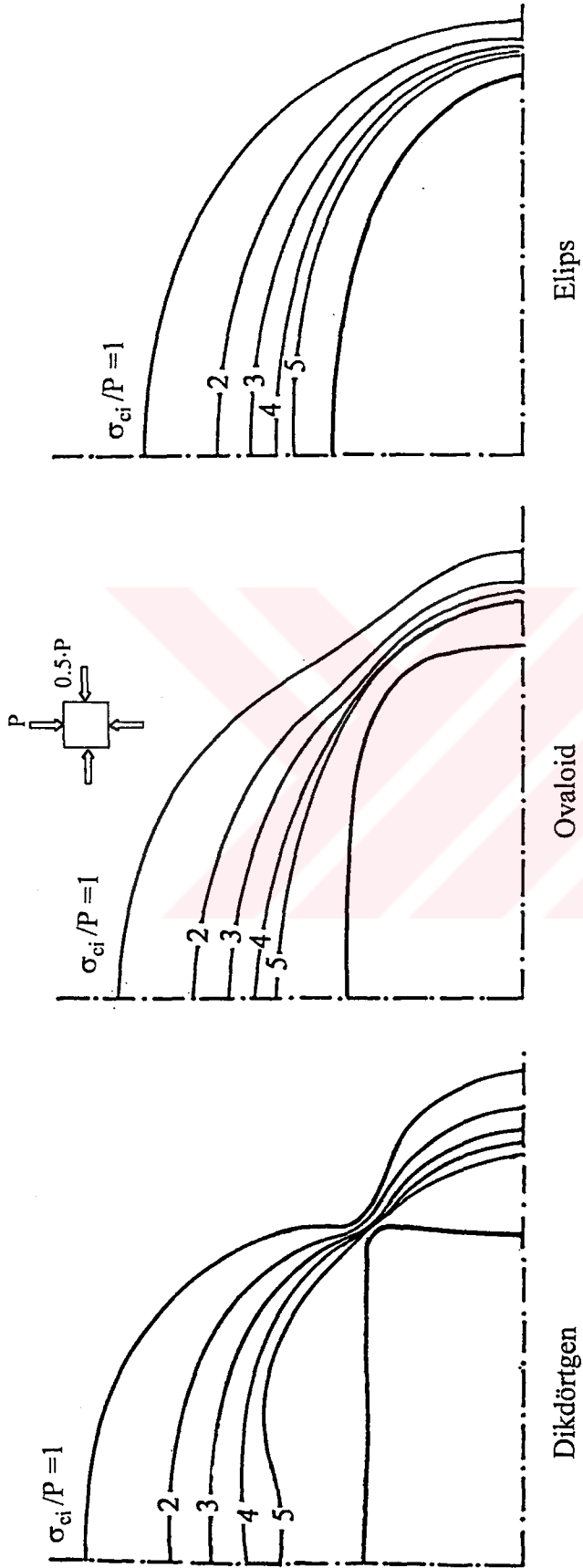
Burada; ΣA_f , aşırı gerilme bölgesinin toplam alanı ve A_0 ise açıklığın kesit alanıdır. Aşırı gerilmeler nedeniyle oluşabilecek duraysızlıkların derecesindeki değişim bir bakıma IOZ değerlerindeki değişimle kendini gösterecektir. Birincil gerilme alanının, kaya kütleline ilişkin dayanım değiştirgelerinin, açıklık geometrisinin IOZ'yi nasıl etkileyeceğine ilişkin çalışmalar Gerçek ve Geniş (1995) ve Geniş (1995) tarafından yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Çözümlemelerde, düzlem elastisitenin karmaşık değişkenler yöntemi ve açıkörür gönderim tekniği kullanılarak elde edilen analitik bir çözüm yöntemi ve Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılmıştır.

Bazı durumlarda, belirli değiştirgelerin IOZ'yi nasıl etkileyeceği kolaylıkla tahmin edilebilmektedir. Örneğin; verilen bir gerilme alanında açılan belirli bir geometrideki yeraltı açıklığı için, kaya kütleline dayanımı (σ_{ci} veya GSI değerleri) arttıkça IOZ değeri azalacaktır (Gerçek ve Geniş, 1995). Söz konusu dayanım değiştirgelerinin değişimi ile aşırı gerilme bölgesinin geometrisinin ne

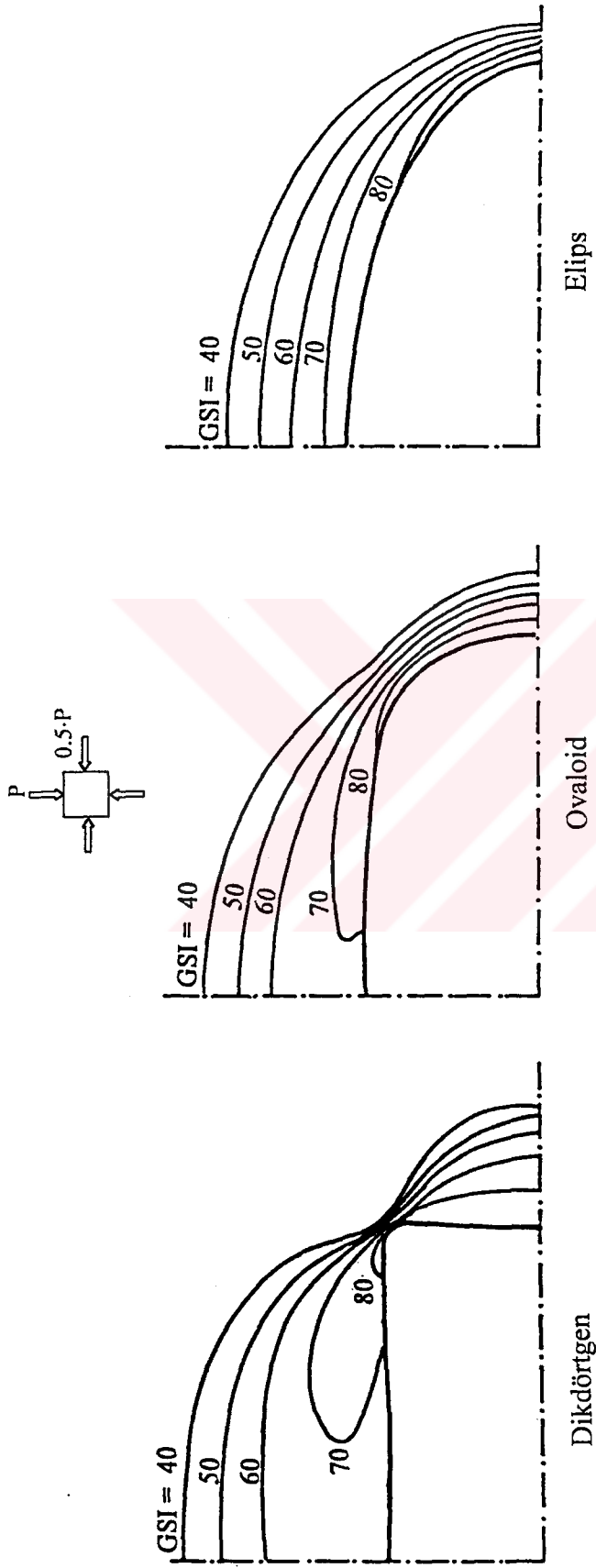
yönde değiştiği Şekil 2.26'da sunulmuştur. Aynı dayanım değiştirgelerine ($m_i = 10$, $\sigma_{ci} = 4P$) ve birincil gerilme alanına ($k = k_z = 0.5$) sahip ortamda açılan, farklı geometriye sahip yeraltı açıklıklarında, GSI değerinin artmasıyla IOZ değeri düzenli olarak azalmaktadır. Bu koşullarda, GSI'nın 80'den büyük değerleri için açıklık çevresinde aşırı gerilme bölgesinin oluşmadığı bulunmuştur. Dikdörtgen kesitli açıklığın W/H oranı arttıkça IOZ değeri artmakta ve aynı W/H oranına sahip açıklıklardan elips kesitli olanı diğerlerine göre daha duraylı olmaktadır (Şekil 2.27). W/H = 2 olan dikdörtgen açıklık kesitinde ve aynı birincil gerilme alanında ($k = k_z = 0.5$), GSI ve σ_{ci} değerinin artmasıyla IOZ değeri düzenli olarak azalmaktadır (Şekil 2.28) (Geniş, 1995).

Açıklık geometrisinin ve birincil gerilme alanının duraylılığı nasıl etkileyeceğini gösteren bir seri değiştirgesel çalışma yapılmıştır. İncelenen tüm durumlarda, belirli değiştirgelere sabit değerler ($k = k_z = 0.5$; $\sigma_{ci} = 4P$; $m_i = 10$; GSI = 60) verilerek IOZ'deki değişimin bunlardan etkilenmesi önlenmiştir. Öncelikle, aşırı gerilme bölgesi geometrisinin, açıklığının şekli ve genişlik yükseklik (W/H) oranıyla değişimi Şekil 2.29'da gösterilmiştir. Açıklığın W/H oranının artması ile IOZ değerleri artmakta ve dikdörtgen açıklıklar için en yüksek değerleri almaktadır. Sonra, W/H = 2 olan ovaloid kesitli bir açıklıkta, birincil gerilme alanının asal bileşenlerinin konumunun (α açısındaki değişimlerin) aşırı gerilme bölgesinin şekli ve büyüklüğüne etkisi araştırılmıştır (Şekil 2.30). Daha sonra, birincil gerilmelerin konumu ile açıklığın W/H oranının dikdörtgen açıklıkların duraylılığına etkisi incelenmiştir. En büyük asal birincil gerilmenin yatay konumlu olması ($\alpha = 0$) durumunda, açıklığın tavan veya taban kısımlarında daha büyük aşırı gerilme bölgesi oluşmaktadır. En büyük asal birincil gerilmenin yatayla 45° açı yapması durumunda, açıklığın tavan veya tabanının belirli kısımlarında aşırı gerilme bölgesi oluşmaktadır. En büyük asal birincil gerilmenin



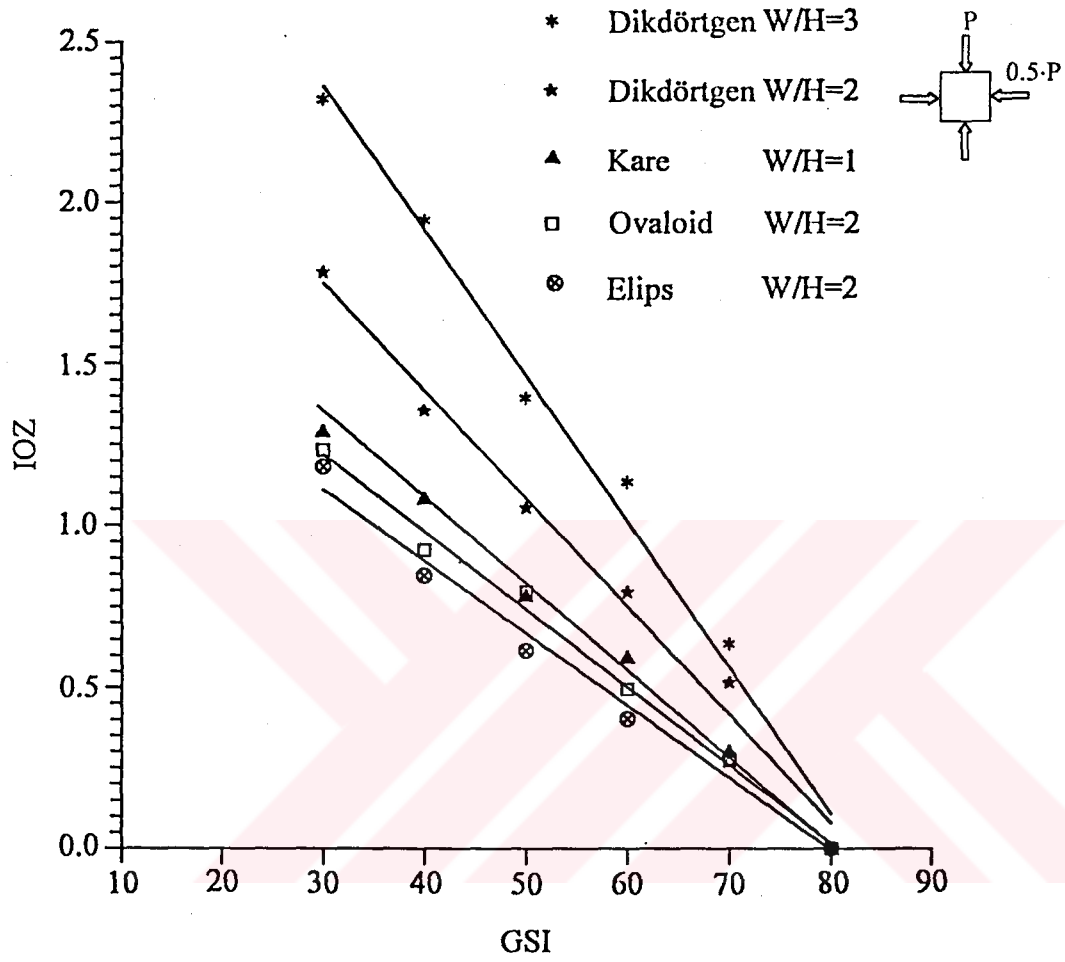
a. σ_{ci} 'nin değişimi

Şekil 2.26 $W/H=2$ olan açıklık geometrilerinde, aşırı gerilme bölgesi geometrisinin, dayanım değerleri (σ_{ci} , GSI) ile değişimi (Geniş, 1995).

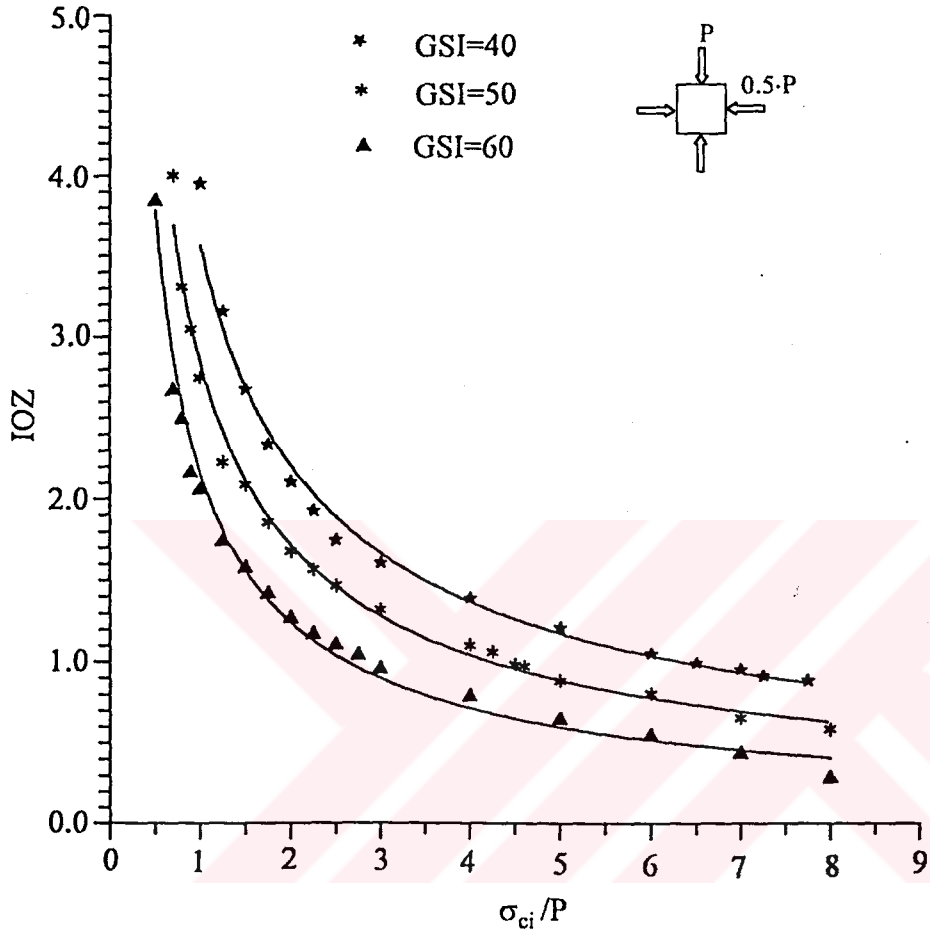


b. GSI değerlerinin değişimi

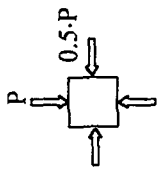
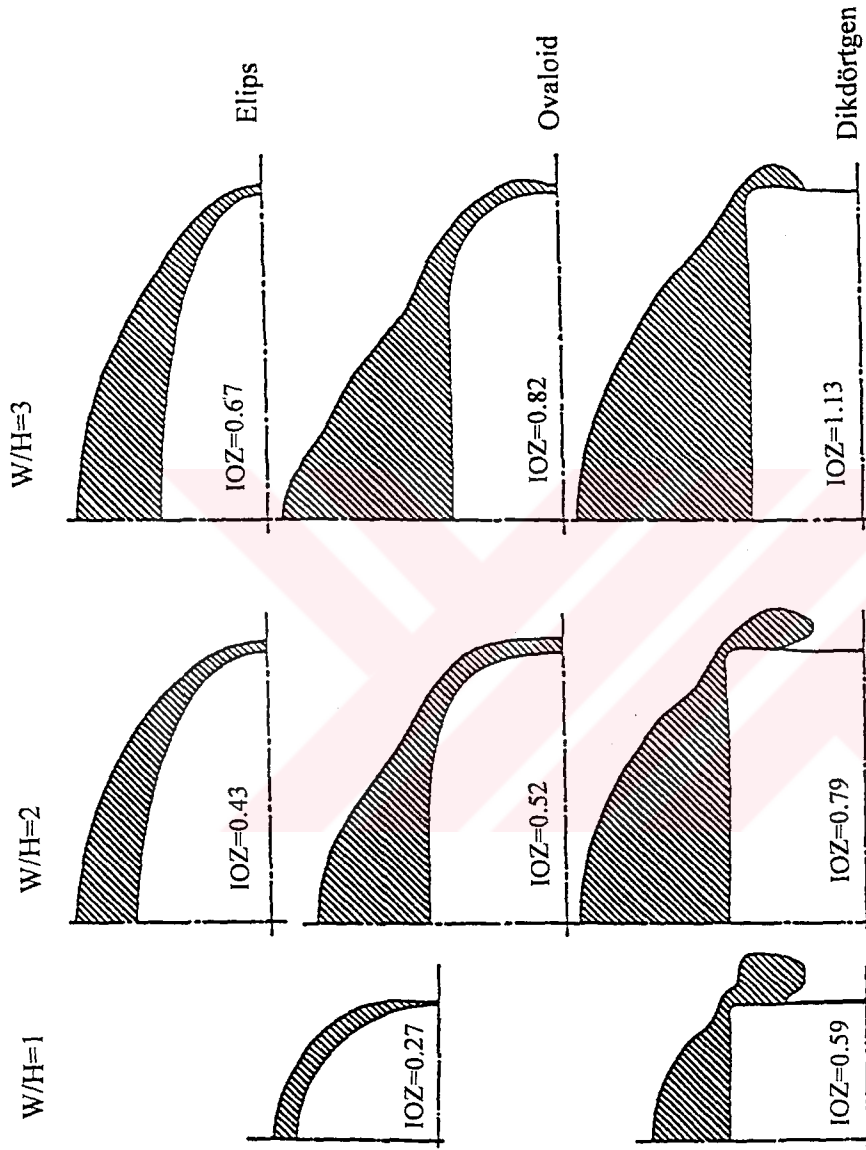
Şekil 2.26 (devam ediyor).



Şekil 2.27 Aşırı gerilme bölgesi indisinin (IOZ), GSI ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_i=10$) (Geniş, 1995).

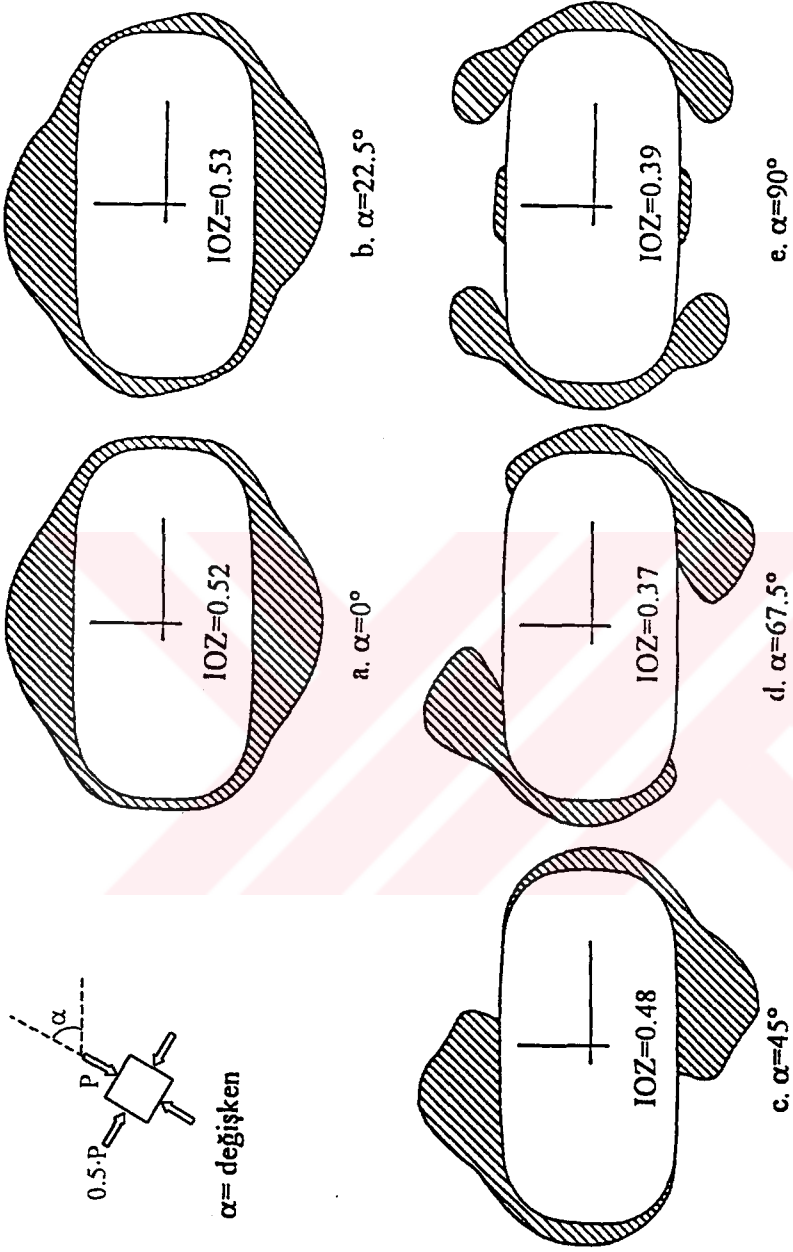


Şekil 2.28 Dikdörtgen açıklıkta, aşırı gerilme bölgesi indisinin (IOZ), kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) ile değişimi ($m_i=10$, GSI=60) (Geniş, 1995).



Şekil 2.29 Aşırı gerilme bölgesi geometrisinin açıklık şekli ve W/H oranı ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_i=10$, $GSI=60$) (Gerçek ve Geniş, 1995).

BİRİNCİL GERİLMELER



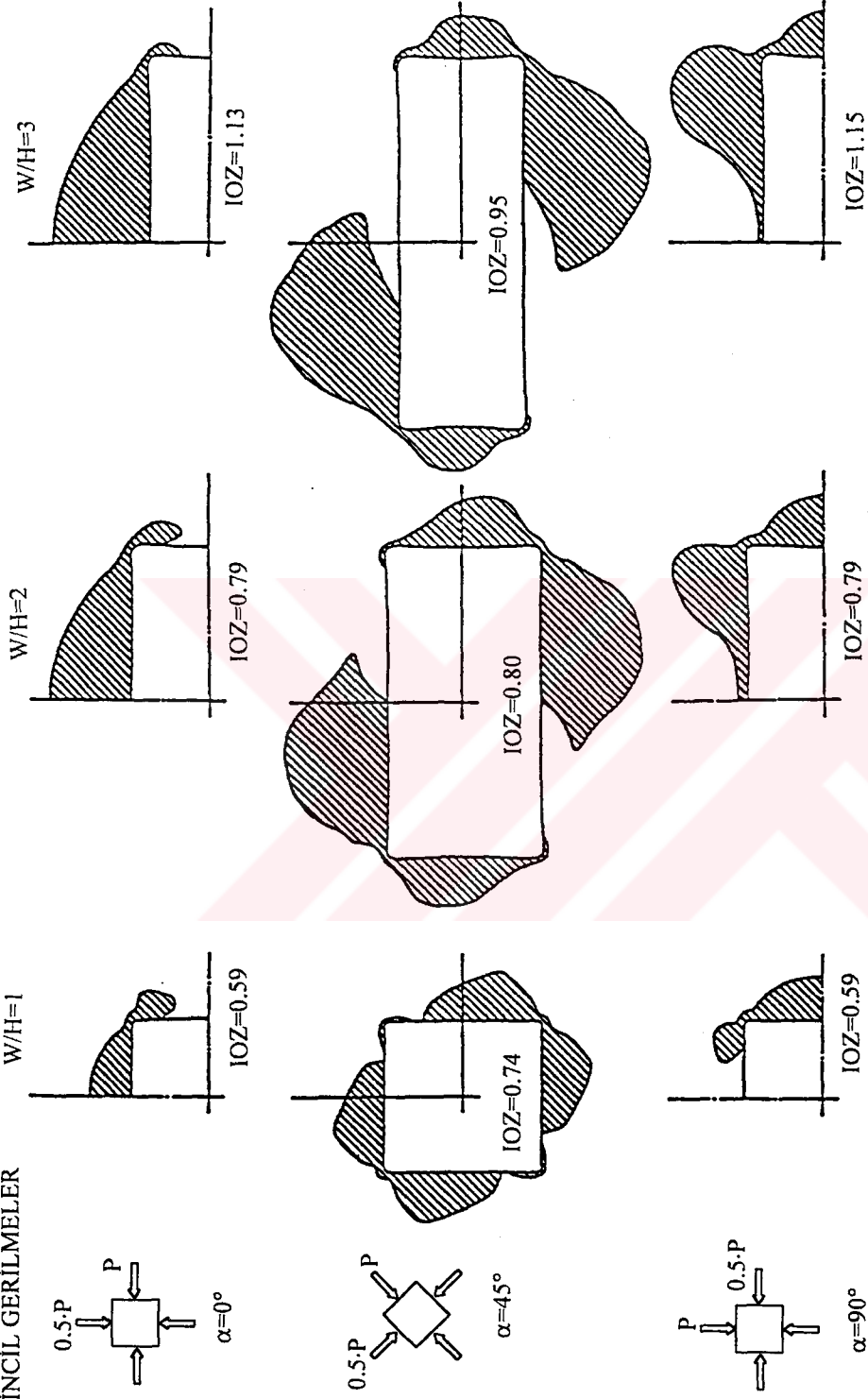
Şekil 2.30 $W/H=2$ olan bir ovaloid açıklık için aşırı gerilme bölgesi geometrisinin birincil gerilmelerin konumu ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_i=10$, $GSI=60$) (Gerçek ve Geniş, 1995).

düşey olması ($\alpha = 90^\circ$) durumunda, açıklığın tavan veya taban bölgelerinde çekme gerilmelerinin neden olduğu az kalınlıkta aşırı gerilme bölgeleri; açıklığın yan duvarlarında da daha büyük aşırı gerilme bölgeleri oluşmuştur (Şekil 2.31). Bütün bunlara ek olarak, belirli değiştirmelerin açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesini ve IOZ değerlerini düzenli olarak artırdığı veya azalttığı gözlenmiştir. Örnek olarak, IOZ'nin açıklığın W/H oranındaki değişimlerden etkilenişi, düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen olduğu durumda elips, ovaloid ve dikdörtgen açıklıklar için Şekil 2.32'de sunulmuştur. Buna göre; seçilen birincil gerilme alanında ve dayanım koşullarında, dikdörtgen açıklık elips ve ovaloid kesitli açıklığa kıyasla daha duraysızdır. Her üç geometride de, W/H oranının 1'den farklı değerlerinde IOZ değerleri artış göstermektedir. W/H = 1 olan açıklıkların IOZ değeri en küçük olmaktadır. İncelenen birincil gerilme alanında, elips ve ovaloid kesitli açıklıklarda W/H oranının 0.75'den daha büyük değerlerinde, IOZ değerleri yaklaşık olarak eşit olmuştur (Geniş, 1995).

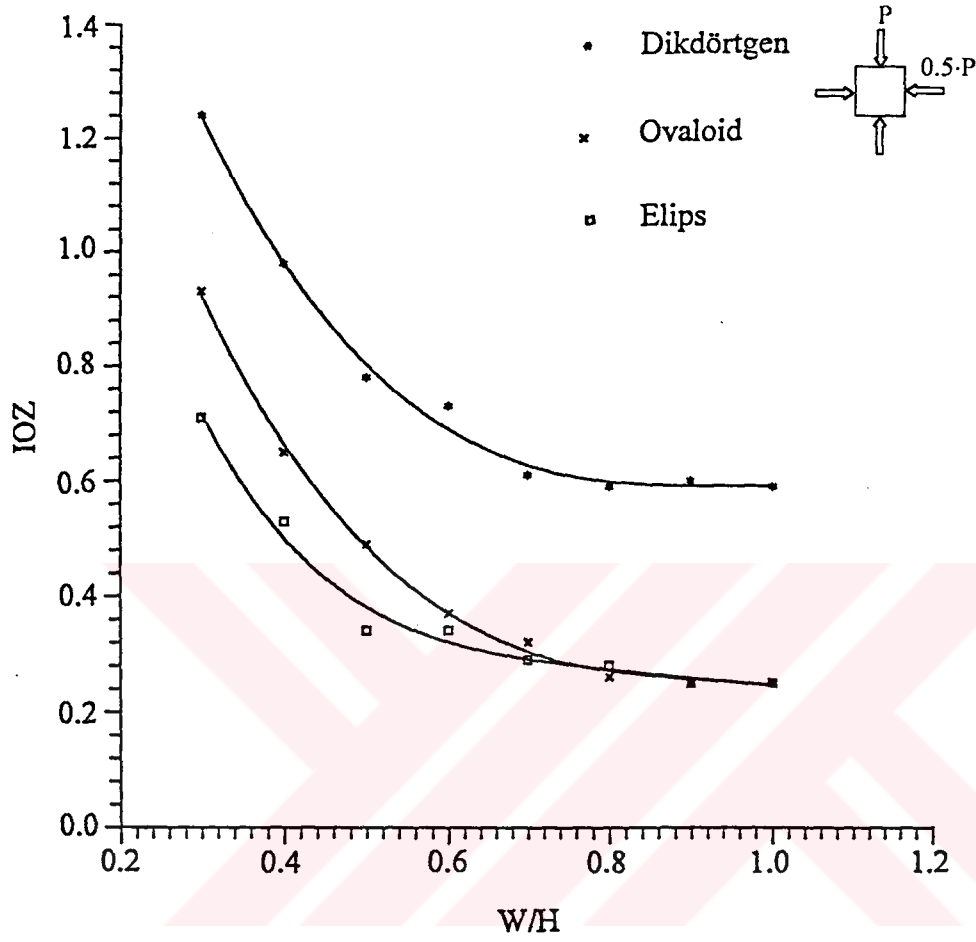
Açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesi alanı ele alınarak hesaplanan IOZ değerleri bir bakıma açıklık çevresindeki aşırı gerilme bölgesinin hacmi hakkında bilgi içermektedir. Bu nedenle tasarımcıya, uygulanacak tahkimat elemanlarının boyutlandırılmasında önemli katkısı olacaktır.

Bu bölümde, ikincil gerilmelerin yeraltı açıklıkları çevresinde oluşturduğu aşırı gerilme ve/veya yenilme bölgesi geometrisi ve büyüklüğüne, kaya kütlelerinin mekanik özelliklerinin ve birincil gerilmelerin etkisini inceleyen çalışmalar sunulmuştur. Ayrıca, duraylılığın değerlendirilmesinde kullanılan bazı ölçütler de tanıtılmıştır.

BİRİNCİL GERİLMELER

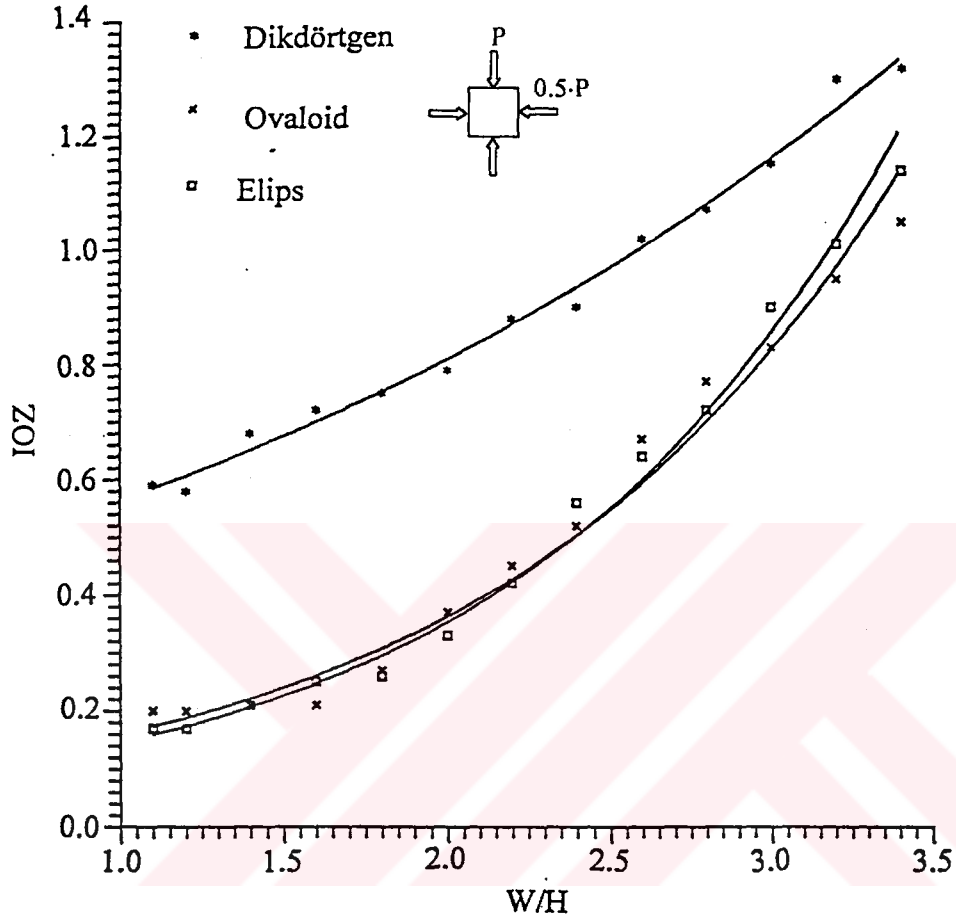


Şekil 2.31 Dikdörtgen açıklıklarda, aşırı gerilme bölgesinin birincil gerilme alanı ve açıklığın W/H oranı ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_1=10$, $GSI=60$) (Gerçek ve Geniş, 1995).



a. $W/H \leq 1$

Şekil 2.32 Aşırı gerilme bölgesi indisinin (IOZ), açıklığın W/H oranı ile değişimi ($\sigma_{ci}/P=4$, $m_i=10$, $GSI=60$) (Geniş, 1995).



b. $W/H > 1$

Şekil 2.32 (devam ediyor).

BÖLÜM 3

YERALTI AÇIKLIKLARININ STATİK KOŞULLARDA DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde, yönlere bağlı birincil gerilme alanının yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkisi araştırılmıştır. Anizotropik ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında, asal bileşenlerinin düşey ve yatay doğrultularda etkidiği durumlarda karşılaşılan ve ikincil gerilmelerin yol açtığı duraysızlık potansiyeli karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Önce çalışmada izlenen yaklaşım sunulmuş olup sonra birincil gerilme alanının ve açıklık geometrisinin duraylılığa etkisi incelenmiştir.

3.1 ÇALIŞMADA İZLENEN YAKLAŞIM

3.1.1 Kullanılan Gerilme Çözümlemesi Yöntemleri

Çalışmada, doğrusal elastik ve elasto-plastik gerilme çözümlemesi kullanılmıştır. Elastik çözümleme için, Gerçek (1993, 1997) tarafından geliştirilen ve iki eksenli birincil gerilme alanında oluşturulan ve dairesel olmayan açıklıklar çevresindeki elastik ikincil gerilmeleri, karmaşık değişkenler kuramını kullanarak oluşturulan cebirsel işlemlere göre veren bir analitik çözüm kullanılmıştır. Söz konusu çözüm Geniş (1995) tarafından, “CLOSOL” adı verilen bir bilgisayar programı haline getirilmiş olup, Aydan (2000) tarafından grafik çizimi ilave edilmiştir. Analitik çözüm, herhangi bir genişlik yükseklik oranına (W/H) sahip elips, ovaloid,

dikdörtgen ve kemer tavanlı açıklık geometrilerinde, düzlem birim şekil değiştirme koşulunda yapılabilmektedir.

Elasto-plastik çözümlemelerde, iki boyutlu açık sonlu farklar (explicit finite difference) yazılımı olan FLAC^{2D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua) paket programı kullanılmıştır (Itasca, 1995). Çözümlemelerde elastik-kusursuz plastik malzeme davranışı esas alınmıştır. FLAC^{2D} programının detayları Ek Açıklamalar C’de sunulmuştur.

3.1.2 Birincil Gerilme Alanı

Birincil (in-situ) gerilme alanının yeraltı açıklıklarının duraylılığı üzerindeki önemli rolü çok iyi bilinmektedir. Bir yeraltı açıklığı çevresinde oluşan ikincil gerilme alanının neden olabileceği aşırı gerilme ya da yenilme bölgesi, birincil gerilme alanına, açıklık geometrisine ve çevre kayacın mekanik özelliklerine bağlıdır. Tasarımcı, seçenekleri arasında olan değişkenlerde olanaklar çerçevesinde düzenlemeler yaparak mevcut koşullardaki en uygun tasarımı gerçekleştirmek zorundadır. Bu bağlamda, açıklık şekli ve konumu tasarım sınırlamaları arasında olmadığı zaman, mevcut birincil gerilme alanına en uygun seçenekleri belirlemek hem kuramcılar hem de uygulayıcıları meşgul eden konular arasındadır (Gerçek ve Geniş, 1998).

Dünyanın çeşitli bölgelerinde yapılan birincil gerilme ölçümü sonuçlarına göre, birincil gerilmelerin asal bileşenlerinin, düşey ve yatay konumlarda olması, birbirinden farklı değerler alması ve büyüklük sıralarının değişiklikler göstermesi oldukça yaygın karşılaşılan bir olgudur (Amadei and Stephansson, 1997; Sheorey et al., 2001). Birincil gerilme alanının yönlere bağlı (anizotropik) özellikte olması

durumunda düşey birincil gerilme bazen en büyük, bazen ortanca ve bazen de en küçük asal birincil gerilme olabilmektedir. Birincil gerilme alanının düzlemsel anizotropik özellikte olması durumunda, iki asal birincil gerilme bileşeni birbirine eşit ve üçüncü bileşenden büyük veya küçük olabilmektedir. Dünyanın çeşitli bölgelerinde yapılan birincil gerilme ölçümlerine ilişkin örnekler Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Genelde, düşey birincil gerilmenin en küçük asal birincil gerilme olduğu bazı bölgelerde (İngiltere, Avustralya vb.) yeraltı açıklığının uzun ekseninin en büyük yatay birincil gerilmeye paralel olacak şekilde konumlandırılmasının duraylılık açısından daha olumlu olacağı kuramsal çalışmalarla olduğu kadar, arazi gözlem ve deneyimleriyle de ortaya konmuştur (Pugh, 1988; Gale, 1991; Siddall and Gale, 1992; Meyer et al., 1999). Bir yeraltı açıklığının şekli ve konumunun, mühendislik sınırlamaları çerçevesinde, mevcut birincil gerilme alanına göre en uygun olacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Çizelge 3.1 Dünyanın çeşitli bölgelerinde yapılan birincil gerilme ölçümleri.

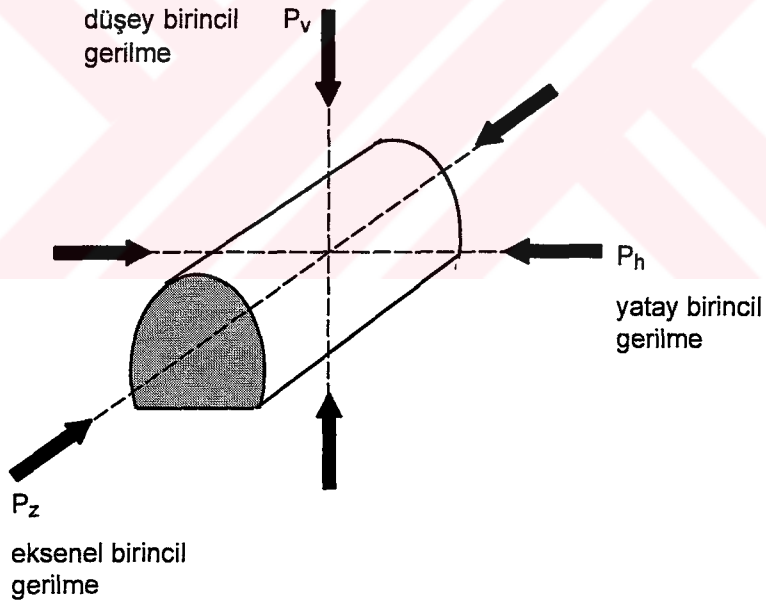
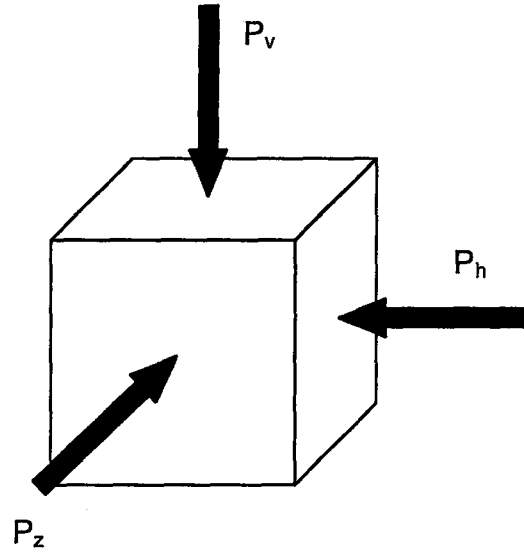
Ölçüm Yeri	Düşey birincil gerilme (MPa)	Yatay birincil gerilmeler (MPa)		Kaynak
Avusturalya (kömür madeni)	14 P (*)	14 P	25 1.79 P	Gale (1991)
İngiltere (Lea Hall madeni)	12.79 1.47 P	8.69 P	17.33 2 P	Farmer (1997)
Hindistan (Koyna)	1.27 P	2.80 2.20 P	4.40 3.46 P	Sheorey et al. (2001)
	4.30 1.44 P	3.40 P	6.20 1.82 P	
Hindistan (bakır madeni)	10.70 1.39 P	7.70 P	12.65 1.64 P	
	8.82 1.12 P	7.88 P	15.00 1.90 P	
Norveç (Kobbelv bölgesi)	5.00 P	15.00 3 P	27.00 5.40 P	Myrvang (1999)

(*) P: gerilme ölçeği katsayısı, en küçük asal bileşen

Yeraltı açıklıklarının oluşturulduğu kaya kütlesinin ortamın mekanik özellikleri ile birincil gerilmelerin doğrultu ve büyüklüğünün belirlenmesi gerekmektedir. Çoğu durumlarda, birincil gerilmelerin ölçümü pahalı ve zaman alıcı olduğu için birincil gerilmelerin tahmini için çeşitli araştırmacıların önerdiği ilişkilerden faydaniılmaktadır. Bununla birlikte, stratejik öneme sahip yeraltı açıklıklarının tasarımımda bu ölçümlerin mutlaka yapılması gerekmektedir. Japonya’da Kaore hidroelektrik santrali açıklığının, planlandığı şekilde kılavuz açıklıkların açılması sırasında, aşırı gerilmelerin neden olduğu duraysızlıklar gözlemlenmiştir. Yapılan birincil gerilme ölçümleri sonucunda, açıklığın daha önceden planlanan doğrultusu, birincil gerilmelerin konumuna göre değiştirilmiştir (Aydan, 2000).

Çözümlemelerde, yeraltı açıklığının oluşturulduğu bölgedeki asal birincil gerilmelerden birinin düşey konumda (P_v), diğerlerinin de yatay konumlarda olduğu varsayılmıştır. Çeşitli düşey birincil gerilme seviyelerinde, yeraltı açıklığının uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel ve dik olduğu konumlar karşılaştırılmıştır. Açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden birine paralel olması, düzlem birim şekil değiştirme (plane strain) çözümlemelerine olanak sağlamıştır. Açıklığın uzun eksenine paralel olan yatay gerilme bileşenine ekstenel birincil gerilme (P_2) adı verilmiştir (Şekil 3.1). Açıklığın düşey simetri eksenine dik konumdaki üçüncü asal bileşen de yatay birincil gerilme (P_h) olarak tanımlanmıştır.

Birincil gerilmelerin büyüklüklerine göre iki gerilme durumu incelenmiştir. Bunlar, anizotropik birincil gerilme durumu ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumudur. Anizotropik birincil gerilme durumunda, birbirine dik konumlu her üç asal gerilmenin büyüklükleri birbirinden farklı değer almaktadır.



Şekil 3.1 Birincil gerilme alanının asal bileşenleri ve açıklığının konumu.

Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, iki gerilme bileşeni aynı büyüklükte olmaktadır.

3.1.2.1 Anizotropik Birincil Gerilme Durumu

Anizotropik birincil gerilme alanını elde etmek için, birincil gerilme alanı büyüklükleri, birbirinden farklı olacak şekilde seçilmiştir:

- P_1 : en büyük asal birincil gerilme, $P_1=3P$
- P_2 : ortanca asal birincil gerilme, $P_2=2P$
- P_3 : en küçük asal birincil gerilme, $P_3=P$

Bu durumda, konum ve büyüklük açısından 6 ayrı birincil gerilme durumu söz konusu olmaktadır. Burada, P yalnızca bir gerilme ölçeği katsayısıdır. Bu durumlar Çizelge 3.2’de sunulmuştur (Gerçek ve Geniş, 1998).

Çizelge 3.2 Göz önünde bulundurulan anizotropik birincil gerilme durumları.

Durum No	En küçük asal birincil gerilme ($P_3=P$)	Ortanca asal birincil gerilme ($P_2=2P$)	En büyük asal birincil gerilme ($P_1=3P$)
I.a	P_v	P_h	P_z
I.b		P_z	P_h
II.a	P_h	P_v	P_z
II.b	P_z		P_h
III.a	P_h	P_z	P_v
III.b	P_z	P_h	

İncelenen tüm birincil gerilme durumları, asal gerilmeler uzayındaki eşyönlü (izotropik) yenilme ölçütleri açısından birbirine eşittir. Bu durumda, birincil gerilme noktaları,

- aynı oktahedral düzlem üzerindedir (Eşitlik 3.1.a),
- hidrostatik gerilme ekseninden eşit uzaklıktadır (Eşitlik 3.1.b) ve
- Lode açısı aynıdır ($\theta' = 0$, saf kesme durumu) (Eşitlik 3.1.c).

$$I_1 = P_v + P_h + P_z = 6P \quad (3.1.a)$$

$$\left[\frac{(P_v - P_h)^2 + (P_h - P_z)^2 + (P_z - P_v)^2}{6} \right]^{1/2} = P \quad (3.1.b)$$

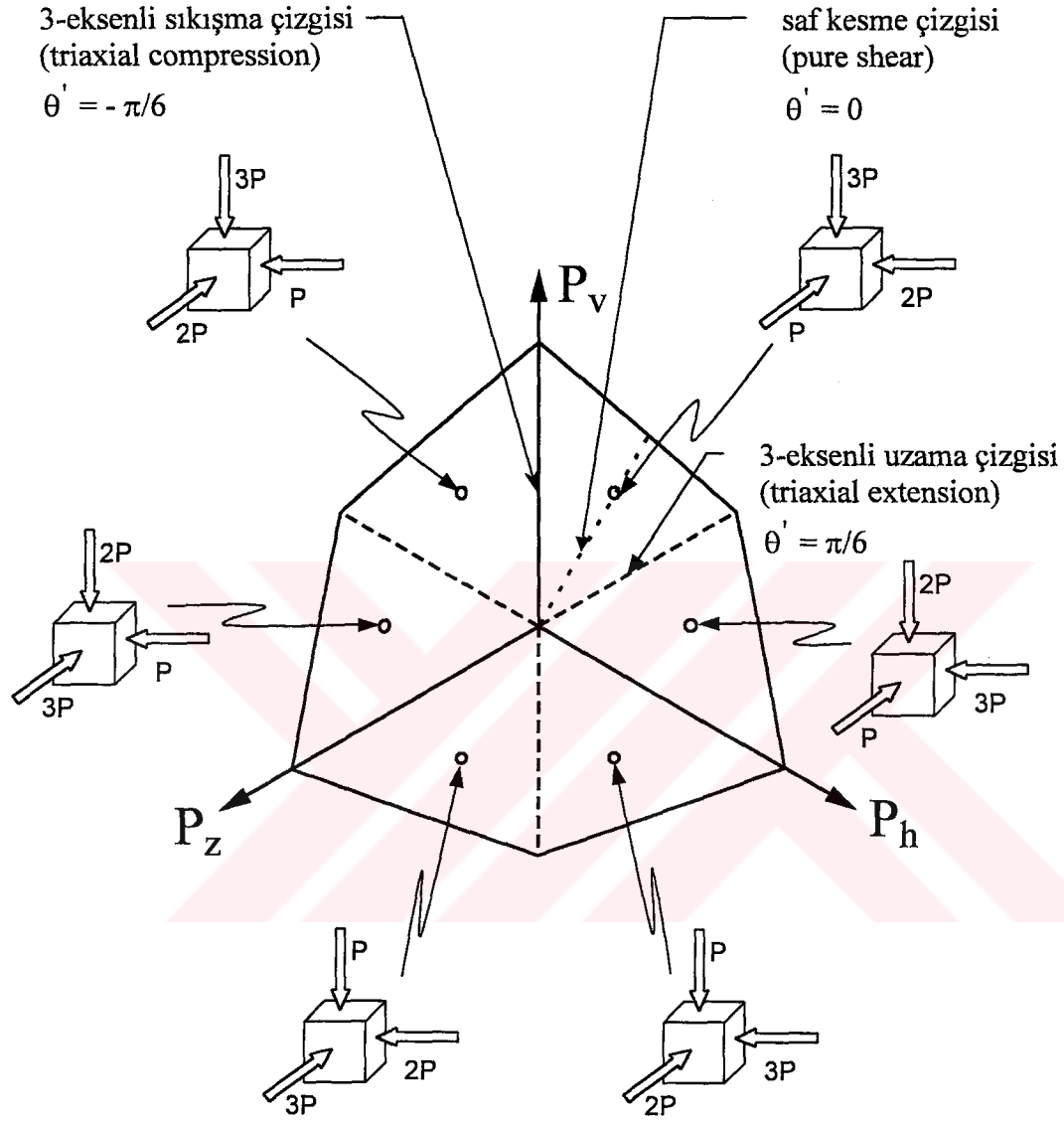
$$\theta' = \frac{1}{3} \arcsin \left(-\frac{3}{2} J_3 \sqrt{\frac{3}{J_2^3}} \right) = 0 \quad (3.1.c)$$

Burada; I_1 , gerilme gereyinin (tansörünün) birinci değişmezi; J_2 ve J_3 , saptırıcı gerilme gereyinin sırasıyla ikinci ve üçüncü değişmezleri ve θ' , Lode açısıdır. J_3 ise,

$$J_3 = (P_v - I_1/3)(P_h - I_1/3)(P_z - I_1/3) \quad (3.1.d)$$

ile hesaplanmaktadır (Gerçek, 1996).

Göz önünde bulundurulan durumları temsil eden noktaların oktahedral düzlemdeki yerleri ve Hoek-Brown yenilme zarfına göre konumları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



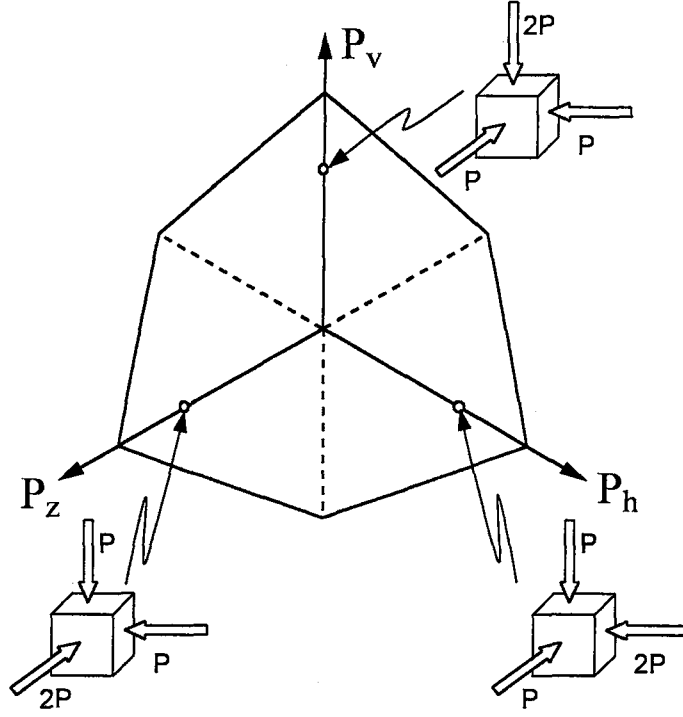
Şekil 3.2 Anizotropik (yönlere bağlı) birincil gerilme durumlarının oktahedral düzlemde gösterimi ve Hoek-Brown yenilme zarfı (Gerçek ve Geniş, 1998).

3.1.2.2 Düzlemsel Anizotropik Birincil Gerilme Durumu

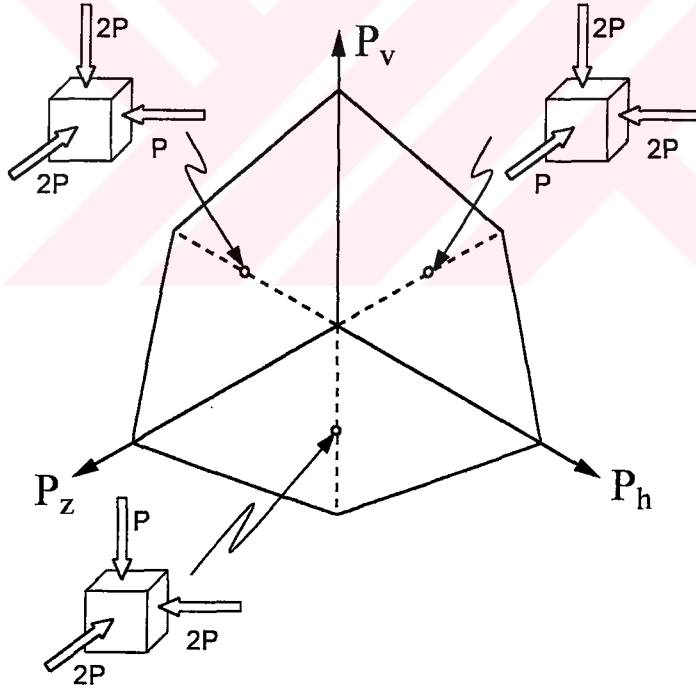
Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, eşit olan iki asal bileşen üçüncü bileşenden küçük ($P_2 = P_3 < P_1$) veya büyük ($P_1 = P_2 > P_3$) olmaktadır. Kaya mekaniğinde bu iki durum sırasıyla “üç eksenli sıkışma” ve “üç eksenli uzama” olarak adlandırılmaktadır. Birincil gerilme alanında anizotropi sağlamak için, en büyük birincil gerilmenin en küçük birincil gerilmeye oranı 2 seçilmiştir ($P_{\max}/P_{\min} = 2$). Böylece, aynı anizotropiklik derecesinde, konum ve büyüklüklere göre 6 ayrı birincil gerilme konumu oluşmaktadır. Göz önünde bulundurulacak durumları temsil eden noktaların oktahedral düzlemdeki yerleri ve Hoek-Brown yenilme zarfına göre konumları Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Bunların ötesinde birincil gerilmelerin iki yatay bileşenin birbirine eşit olduğu durumda ($P_h = P_z$), açıklık için en uygun konumun seçiminde bir problem olmadığı açıktır. Bu nedenle, her bir $P_{\max}/P_{\min}$ değerinde, aşağıda verilen iki durum göz önünde bulundurulmuştur.

- P_v 'nin en küçük bileşen olduğu durum için iki eşdeğer seçenek bulunmaktadır:
 $P_v = P_h = P_z / 2$ ve $P_v = P_z = P_h / 2$ (Şekil 3.3.a),
- P_v 'nin en büyük bileşen olduğu durum için iki eşdeğer seçenek bulunmaktadır:
 $P_v = P_h = 2P_z$ ve $P_v = P_z = 2P_h$ (Şekil 3.3.b).

İncelenen tüm birincil gerilme durumları, asal gerilmeler uzayındaki eşyönlü (izotropik) yenilme ölçütleri açısından birbirine eşittir. Bu durumlar ayrıca Çizelge 3.3'te sunulmuştur.



a. 3-eksenli sıkışma durumu.



b. 3-eksenli uzama durumu.

Şekil 3.3 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumlarının oktahedral düzlemde gösterimi ve Hoek-Brown yenilme zarfı ($P_{max}/P_{min}=2$).

Çizelge 3.3 Göz önünde bulundurulmuş düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumları.

Durum No	En küçük asal birincil gerilme ($P_3=P$)	En büyük asal birincil gerilme ($P_1=2P$)
IV.a	$P_v=P_h$	P_z
IV.b	$P_v=P_z$	P_h
V.a	P_z	$P_v=P_h$
V.b	P_h	$P_v=P_z$

3.1.3 Yenilme Ölçütü

Çözümlemelerde, açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinin Hoek-Brown ve Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu varsayılmıştır. Ölçütlerin ayrıntıları Ek Açıklamalar A ve B’de sunulmuştur.

3.1.4 Duraylılık İndisleri

Literatürde açıklık çevresindeki duraylılık değerlendirmelerinde, yenilme bölgeleri veya aşırı gerilme bölgelerinin kalınlıkları değerlendirilmiştir. Açıklık çevresinde oluşacak bu bölgelerin değerlendirilmesinde daha anlamlı bir büyüklük ile karşılaştırılabilmesi için aşağıdaki indisler önerilmektedir.

3.1.4.1 Aşırı Gerilme Bölgesi İndisi

Doğrusal-elastik çözümleme sonucu açıklık çevresindeki noktalarda radyal (σ_r), teğetsel (σ_θ), eksenel (σ_z) ve kesme ($\tau_{r\theta}$) elastik ikincil gerilme bileşenleri hesaplanmaktadır. Sonra, en büyük (σ_1) ve en küçük (σ_3) asal ikincil gerilmeler elde edilmektedir. Elde edilen asal gerilme bileşenleri ve Hoek-Brown yenilme ölçütünün kullanılmasıyla açıklık çevresindeki noktalarda dayanım katsayıları

bulunmaktadır. Açıklık çevresinde, dayanım katsayısı 1'e eşit olan noktalardan geçen eğri, açıklık çevresindeki aşırı gerilme bölgesini sınırlamaktadır.

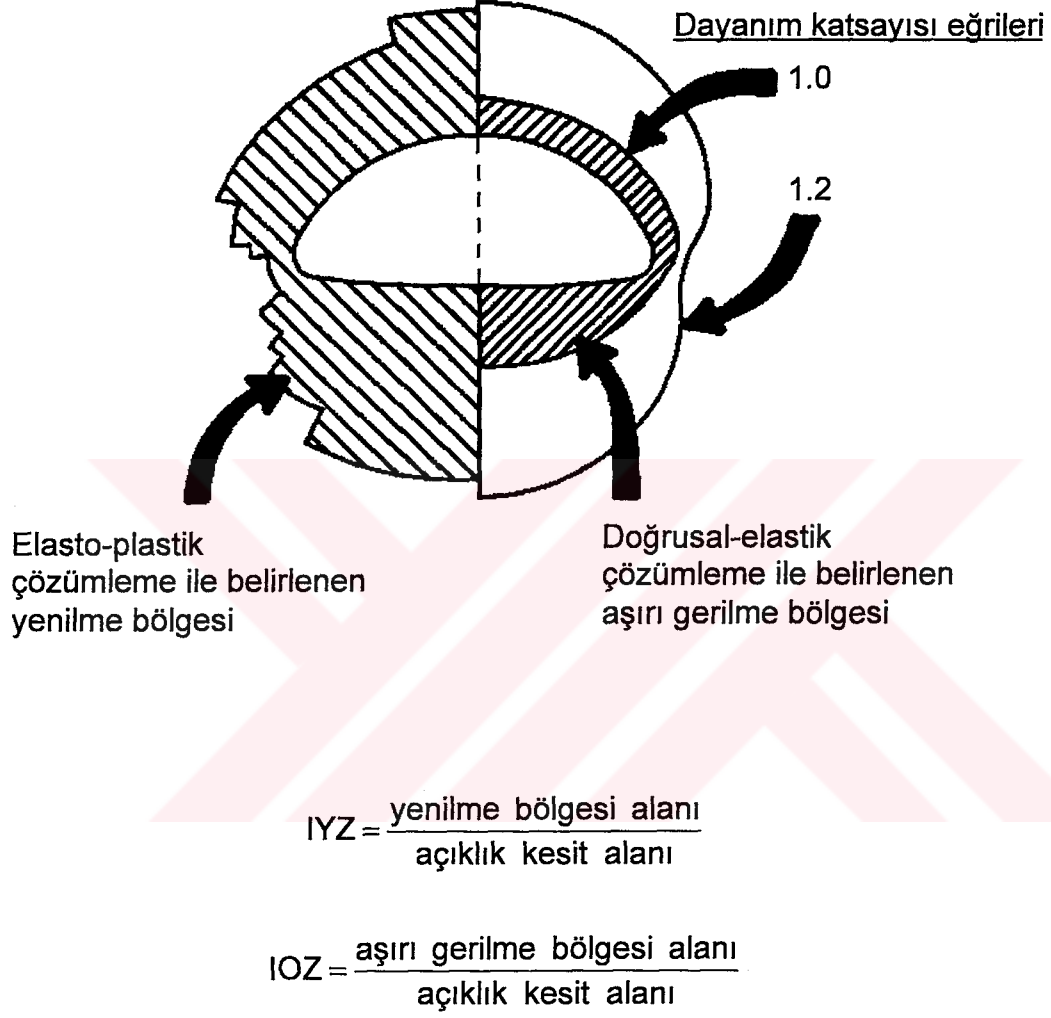
Farklı birincil gerilme alanlarında ve geometrilerinde açılan yeraltı açıklıkları çevresinde aşırı gerilme bölgelerinin karşılaştırılabilmesi için basit fakat anlamlı bir niceliksel ölçü kullanılmıştır. "Aşırı Gerilme Bölgesi İndisi (IOZ: index of overstressed zone)" olarak adlandırılan bu büyüklük, basitçe, açıklık çevresindeki aşırı gerilme bölgesi alanının açıklığın kesit alanına oranı olarak adlandırılmıştır (Gerçek ve Geniş,1995; Geniş,1995):

$$IOZ = \frac{\Sigma A_f}{A_o} \quad (3.2)$$

Burada; ΣA_f , aşırı gerilme bölgesinin toplam alanı ve A_o ise açıklığın kesit alanıdır (Şekil 3.4).

3.1.4.2 Yenilme Bölgesi İndisi

Elasto-plastik çözümleme sonucu, açıklık çevresindeki sınır elemanları ağında oluşan yenilmiş elemanların toplam alanı yenilme bölgesini vermektedir. Aşırı gerilme bölgesi indisine benzer şekilde, farklı birincil gerilme ortamı ve farklı açıklık geometrileri çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla basit bir indis geliştirilmiştir. "Yenilme Bölgesi İndisi (IYZ: index of yield zone)" olarak adlandırılan bu indis, basitçe, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi alanının açıklığın alanına oranı olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.4) (Gerçek ve Geniş, 1998):



Şekil 3.4 Aşırı gerilme bölgesi indisi (IOZ) ve yenilme bölgesi indisi (IYZ) (Gerçek and Geniş, 1999).

$$IYZ = \frac{\Sigma A_y}{A_o} \quad (3.3)$$

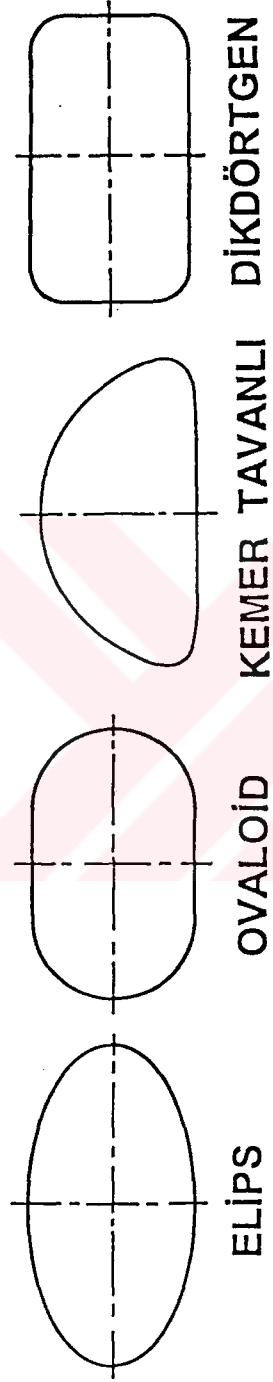
Burada; ΣA_y , yenilme bölgesinin toplam alanıdır. IYZ diğer bir ifade ile yenilme bölgesinin bağıl büyüklüğünün bir ölçüsüdür. Çalışmada, açıklık çevresindeki yenilme bölgesi alanı, aşırı gerilme bölgesi alanı ve açıklığın kesit alanı dijital planimetre ile hassas bir şekilde belirlenmiştir. Bazı durumlarda, belirgin değiştirgelerin IOZ ve IYZ'yi nasıl etkileyeceğine ilişkin çalışmalar sonraki bölümlerde açıklanmıştır.

3.1.5 Açıklık Geometrilere

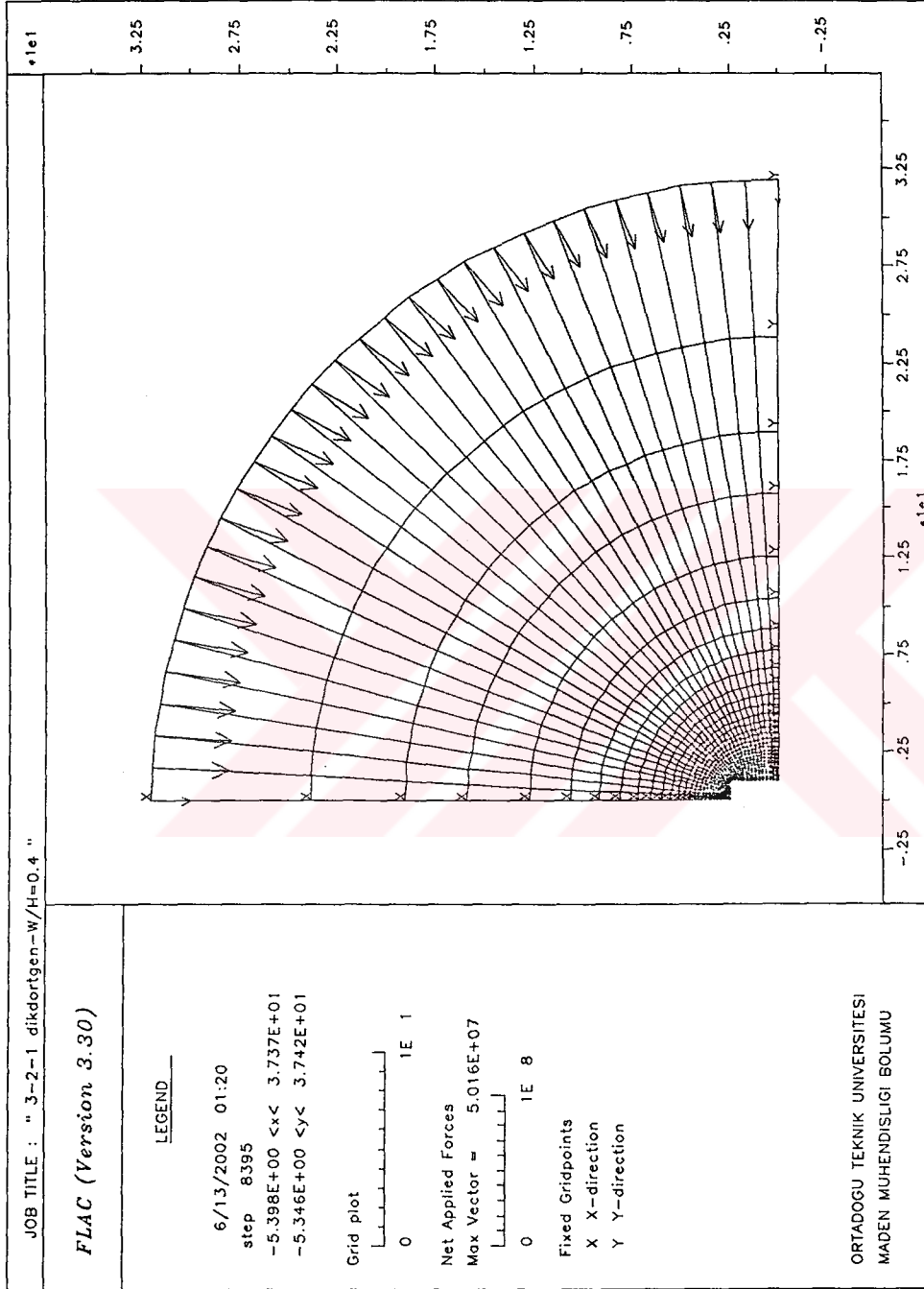
Açıklık geometrilere açısından iki önemli özellik olan, açıklık kesit şekli ve genişlik/yükseklik oranı değiştirge olarak seçilmiştir.

3.1.5.1 Kesit Şekilleri

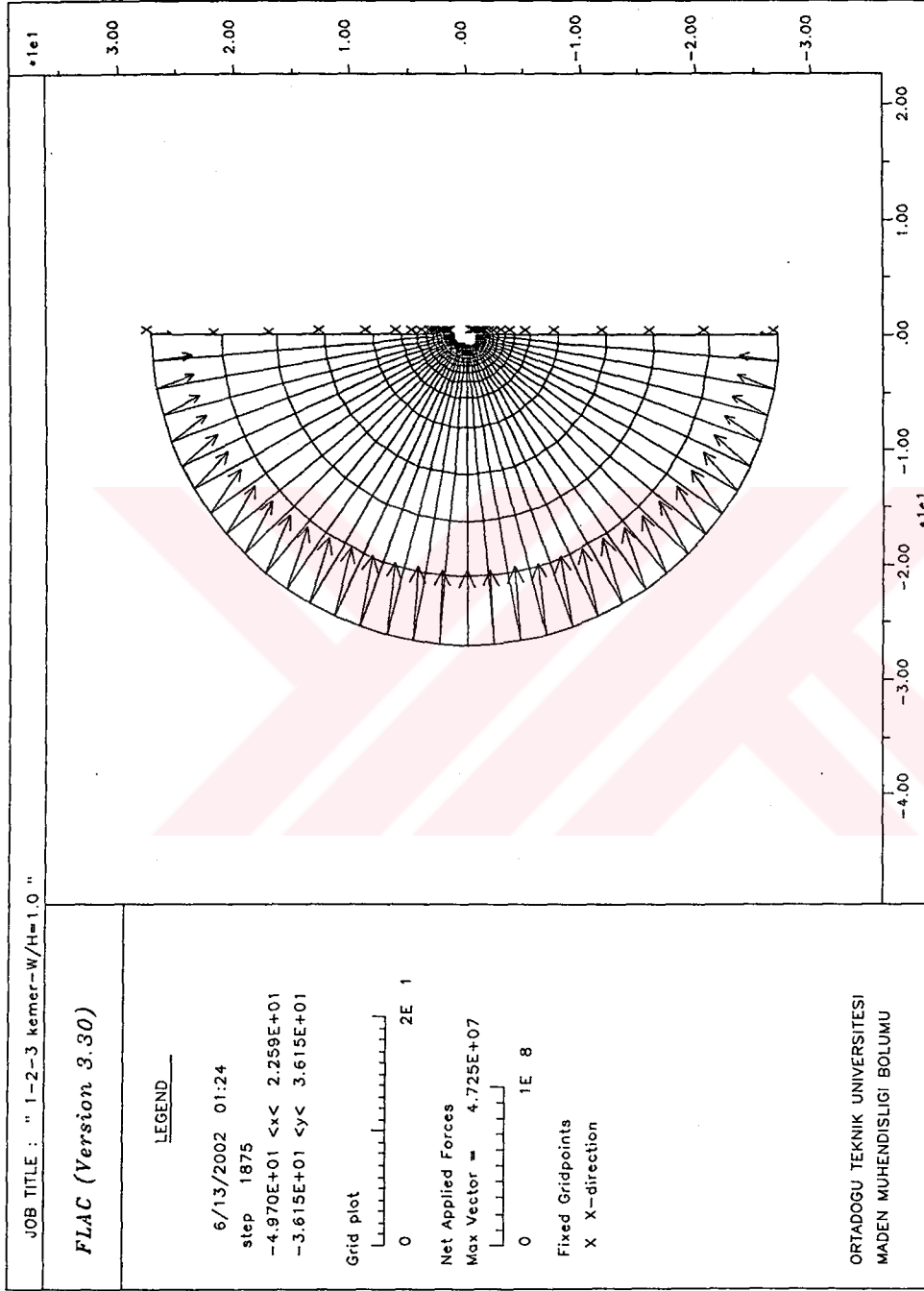
Çalışmada, açıklık kesiti olarak dört farklı şekil göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar; elips, ovaloid, kemer tavanlı ve dikdörtgen kesitlerdir (Şekil 3.5). Bu kesitlerden, yalnızca düşey simetri ekseni olan kemer tavanlı hariç, diğerlerinde iki adet (yatay ve düşey) simetri ekseni vardır. İncelenen kesitlere göre pratik bir şekilde sonlu farklar ağı elde edebilmek için, Gerçek (1988, 1993, 1997) tarafından geliştirilen özel eşitlikler kullanılarak, FLAC^{2D} programında yeni “Fish” işlevleri geliştirilmiştir. Bu sayede açıklık geometrisiyle uyumlu olan sonlu farklar ağı elde edilmiştir (Şekil 3.6). Her açıklık kesit şekli için geliştirilen Fish işlevleri Ek Açıklamalar D’de sunulmuştur.



Şekil 3.5 İncelenen açıklık kesit şekilleri.



a. Dörtte bir açıklık geometrisi
Şekil 3.6 Statik çözümleme için kullanılan sonlu farklar ağı ve sınır koşulları.



b. Yarım açıklık geometrisi
Şekil 3.6 (devam ediyor).

3.1.5.2 Genişlik/Yükseklik Oranı

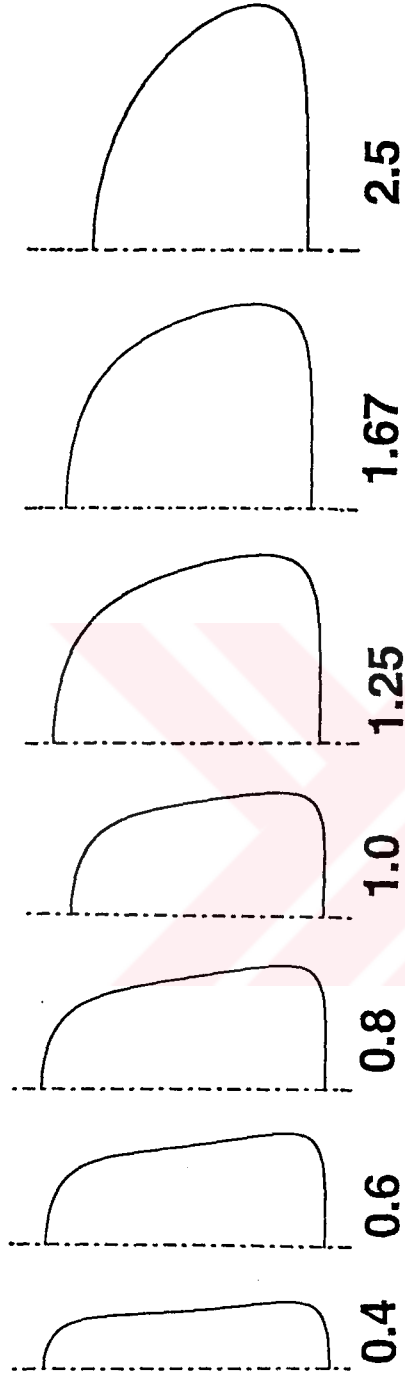
Göz önünde bulundurulan kesit şekillerinden kemer tavanlı için yedi ayrı genişlik/yükseklik (W/H) oranına göre çözümleme yapılmıştır. Bunlar; $W/H = 0.4; 0.6; 0.8; 1.0; 1.25; 1.5; 1.67; 2.0; 2.5$ ve 3.0 'dür. Kemer tavanlı kesitlerde incelenen farklı W/H oranları Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Diğer açıklık kesit şekilleri için $W/H = 0.4; 0.6; 0.8; 1.0; 1.25; 1.67$ ve 2.5 olarak alınmıştır. Burada, $W/H < 1$ olan değerlerin $W/H > 1$ olan değerlerin tersleri olduğu görülebilir. Bu şekilde, hem yatay hem de düşey eksene göre simetri gösteren açıklık kesitlerindeki çözümleme sayısı azaltılabilmektedir.

3.2 DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ

Anizotropik ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında oluşturulan yeraltı açıklıklarının, birincil gerilmelerin doğrultularına göre en uygun konumlandırma seçenekleri tartışılmıştır. Ayrıca açıklık geometrisinin duraylılığa etkisi ortaya konmuştur.

3.2.1 Birincil Gerilme Alanının Duraylılığa Etkisi

Çalışmada seçilen anizotropik birincil gerilme durumları Bölüm 3.1.2'de tanımlanmıştır. Bu çalışmada; kaya kütlelerinin Hoek-Brown yenilme ölçütüne uyduğu durumlarda $\sigma_{ci} = 7.5P$, $m_i = 10$ ve $GSI = 60$ ($m_b = 2.4$; $s = 0.0117$ ve $a = 0.5$) değerleri ve Mohr-Coulomb yenilme ölçütü için $\sigma_{cm} = 4.5P$, $\sigma_{tm} = -1.36P$, $c_m = 1.31P$ ve $\phi = 30^\circ$ kullanılmış; eksenel ikincil gerilmelerin hesabı için gerekli olan, kaya kütlelerinin Poisson oranı da $\nu = 0.25$ olarak alınmıştır. Yapılan elasto-plastik çözümlemelerde; sağlam kaya kütlesi için girdi değiştirgesi olarak elastik



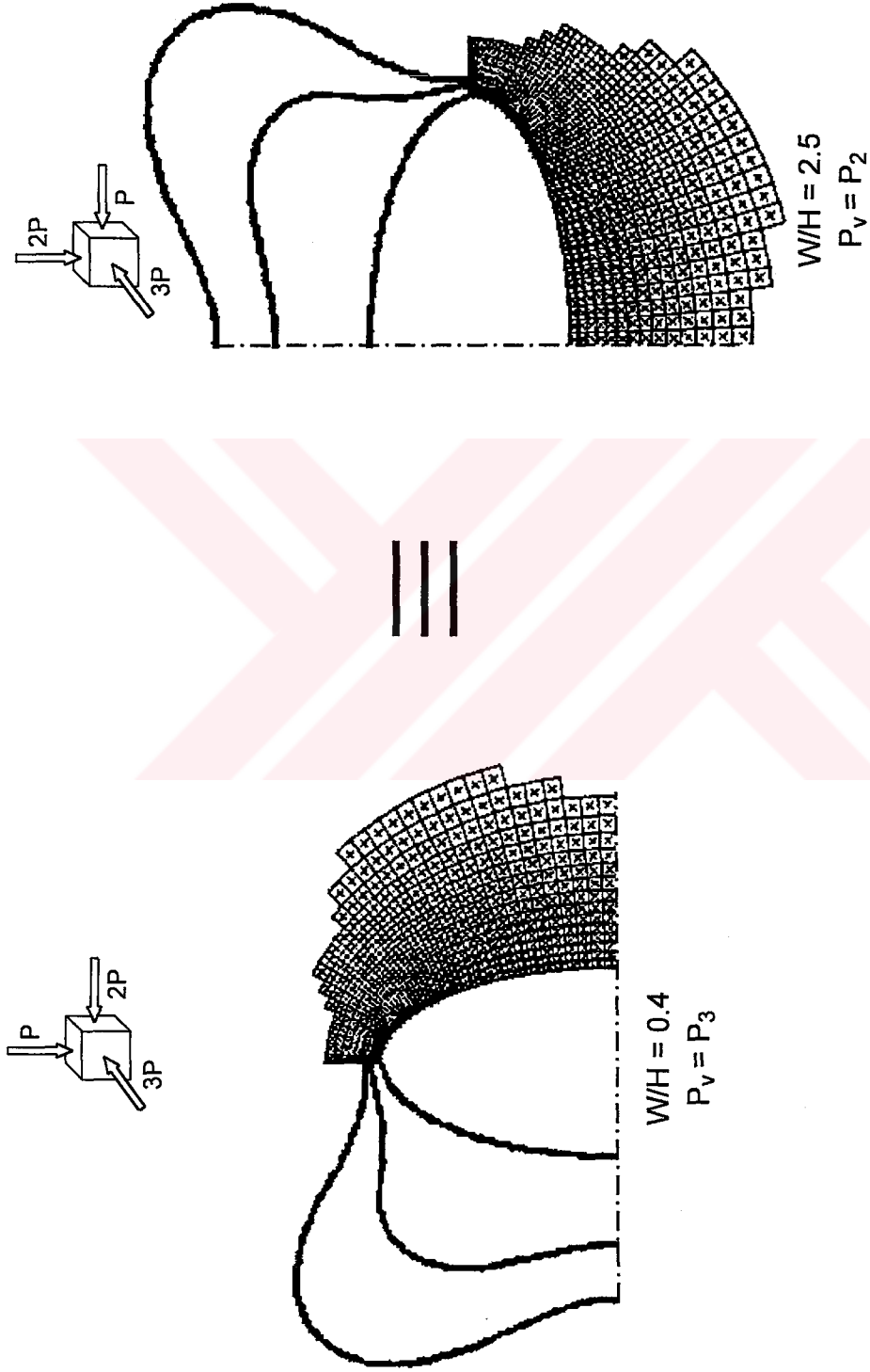
Şekil 3.7 Kemer tavanlı kesitlerde W/H oranları.

çözümlemelerdeki değerler kullanılırken, yenilmiş kaya kütlesi için de Hoek-Brown yenilme ölçütü için $m_r = 1$, $s_r = 0.005$ değerleri alınmış ve dilatasyon değiştirgesinin sıfır olduğu (hacim değişikliğinin olmadığı) varsayılmıştır.

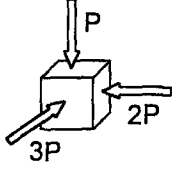
Elips, ovaloid ve dikdörtgen açıklık geometrileri hem yatay yönde hem de düşey yönde simetrik olduğu için çözümlemelerde açıklığın dörtte biri alınmıştır. Bu durum, aynı çözümlemenin W/H oranının çarpmaya göre tersi olan iki açıklık geometrisi için, iki farklı birincil gerilme alanında kullanılabilmesine olanak vermiştir (Şekil 3.8). Bu sayede, yapılan çözümleme sayısında da azalma sağlanmıştır.

3.2.1.1 Anizotropik Birincil Gerilme Alanının Duraylılığa Etkisi

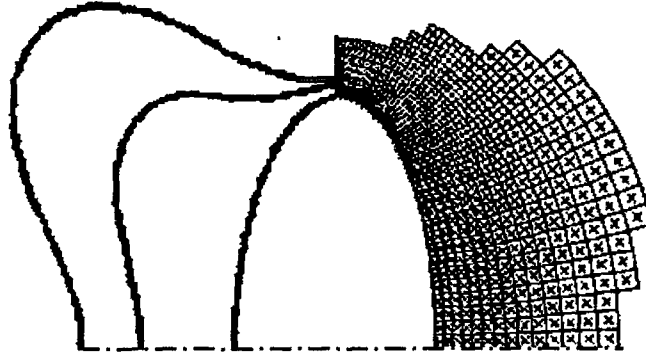
Anizotropik birincil gerilme alanında oluşturulan elips, ovaloid, dikdörtgen ve kemer tavanlı açıklık çevresinde, elastik ve elasto-plastik çözümlemeler yapılarak aşırı gerilme bölgeleri ve yenilme bölgeleri belirlenmiştir (Şekil 3.9-3.13). İncelenen anizotropik birincil gerilme alanlarının tüm durumlarında; elasto-plastik çözümlemelerle kestirilen yenilme bölgesi, doğrusal elastik çözümlemelerin belirlediği aşırı gerilme bölgesinden daha büyüktür (Şekil 3.9-3.13). Elasto-plastik çözümlemelerden elde edilen yenilme bölgesinin büyüklüğü yenilmiş kayacın mekanik özelliklerine bağlı olduğu için bu beklenen bir sonuçtur. Bazı durumlarda; aşırı gerilme bölgesinin şekli, yenilme bölgesinin geometrisini andırmakla birlikte, genellikle ikisi arasında önemli farklar bulunmaktadır. Bunun başlıca nedeni, sayısal yöntemle yapılan elasto-plastik çözümlemelerde, elemanların açıklık çevresindeki düzenine bağlı olarak, yenilen elemanın yük taşıma yeteneğinin azalması sonucu gerilme dağılımının etkilenmesidir.



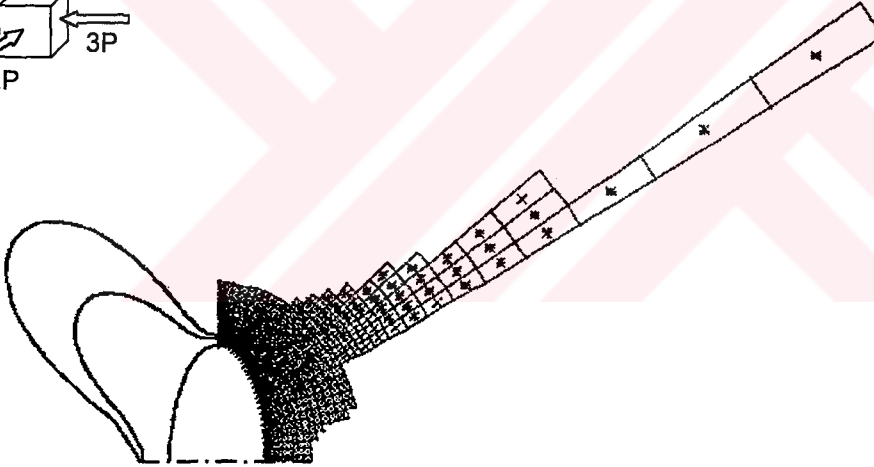
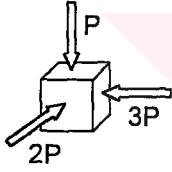
Şekil 3.8 Elips, ovaloid ve dikdörtgen açıklık geometrilerinde, yatay ve düşey simetriden dolayı birincil gerilme durumlarına göre aynı çözümler.



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



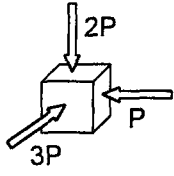
IOZ = 1.68 IYZ = 3.32



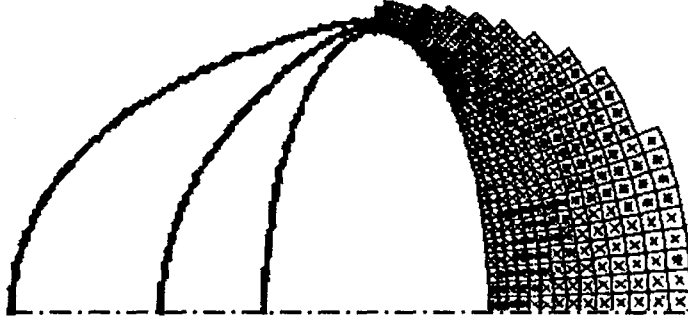
IOZ = 2.92 IYZ = 9.63

a. Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v=P_3$) olduğu durumlar

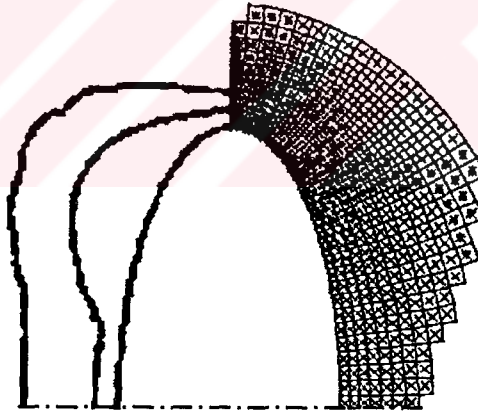
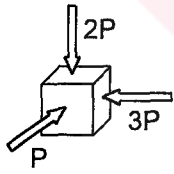
Şekil 3.9 Anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan elips açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $\alpha=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



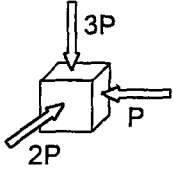
IOZ = 0.88 IYZ = 2.19



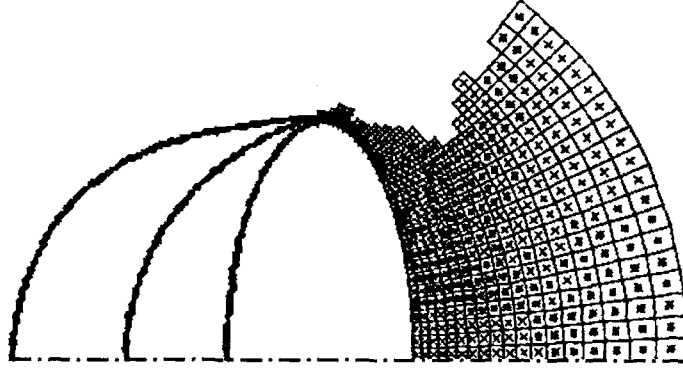
IOZ = 0.72 IYZ = 2.39

b. Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v=P_2$) olduğu durumlar

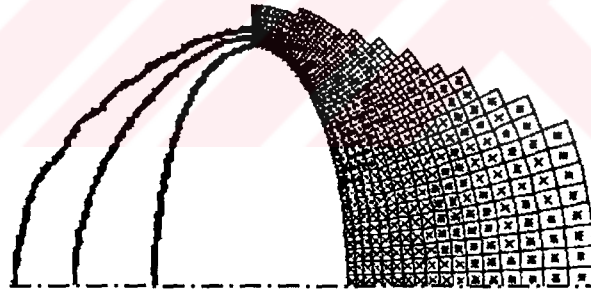
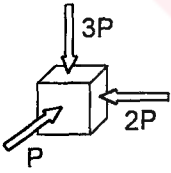
Şekil 3.9 (devam ediyor).



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



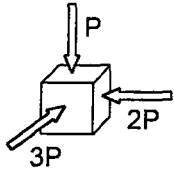
IOZ = 1.04 IYZ = 4.35



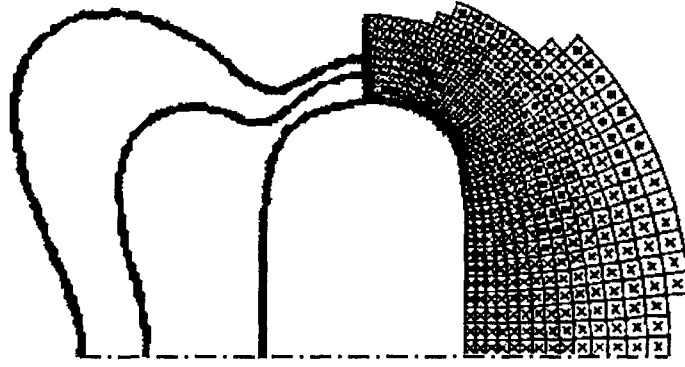
IOZ = 0.80 IYZ = 3.16

c. Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v=P_1$) olduğu durumlar

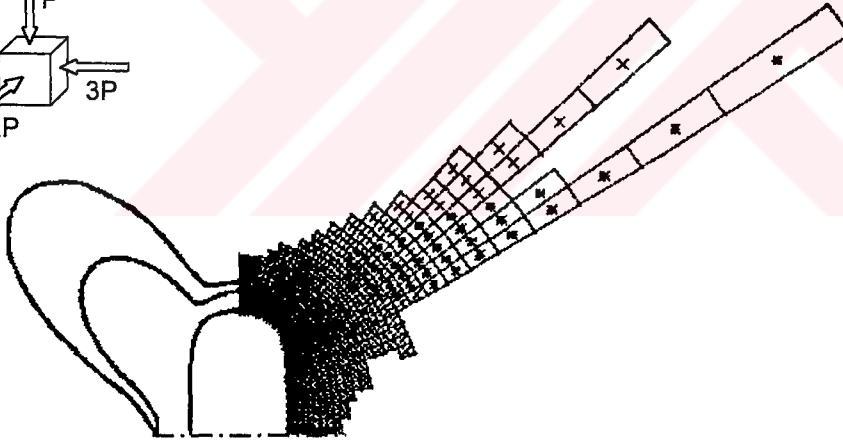
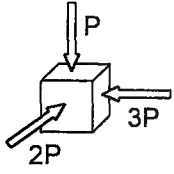
Şekil 3.9 (devam ediyor).



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



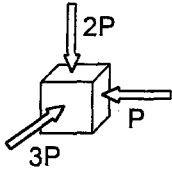
IOZ = 1.40 IYZ = 2.97



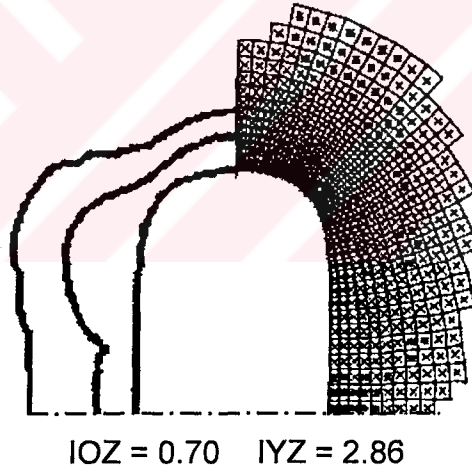
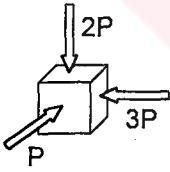
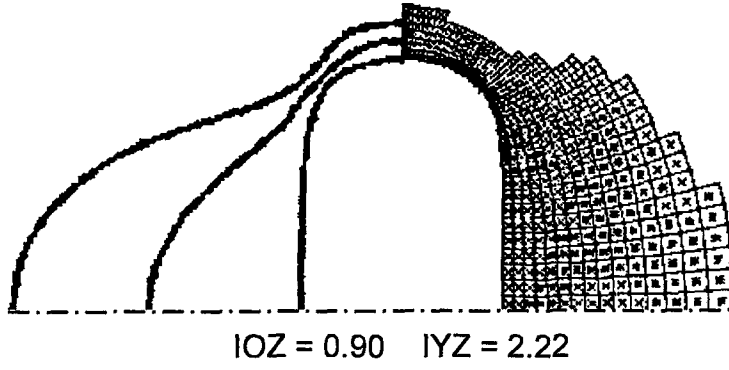
IOZ = 2.43 IYZ = 9.68

a. Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v=P_3$) olduğu durumlar

Şekil 3.10 Anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan ovaloid açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.

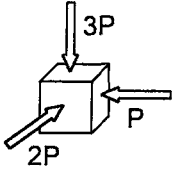


Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

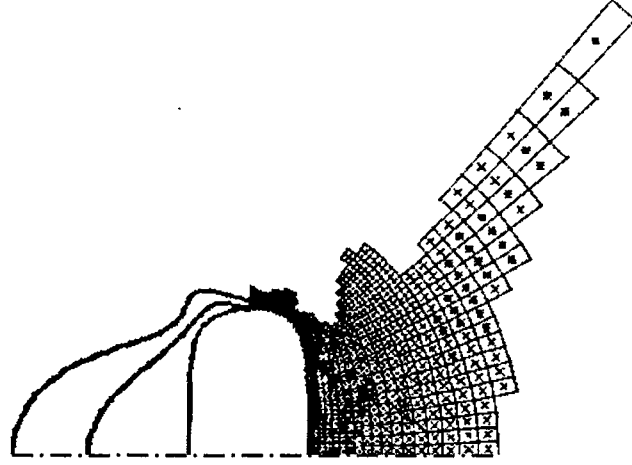


b. Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v=P_2$) olduğu durumlar

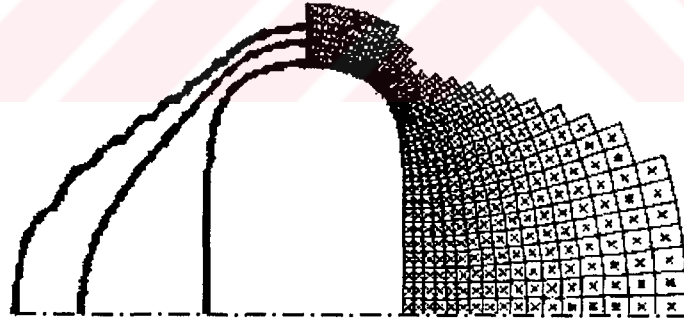
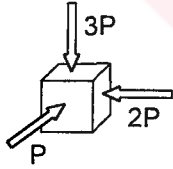
Şekil 3.10 (devam ediyor).



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



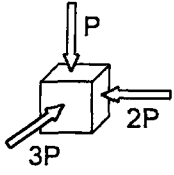
IOZ = 1.03 IYZ = 6.73



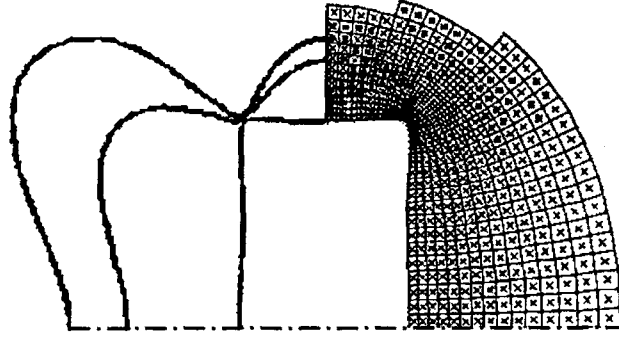
IOZ = 0.80 IYZ = 2.78

c. Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v=P_1$) olduğu durumlar

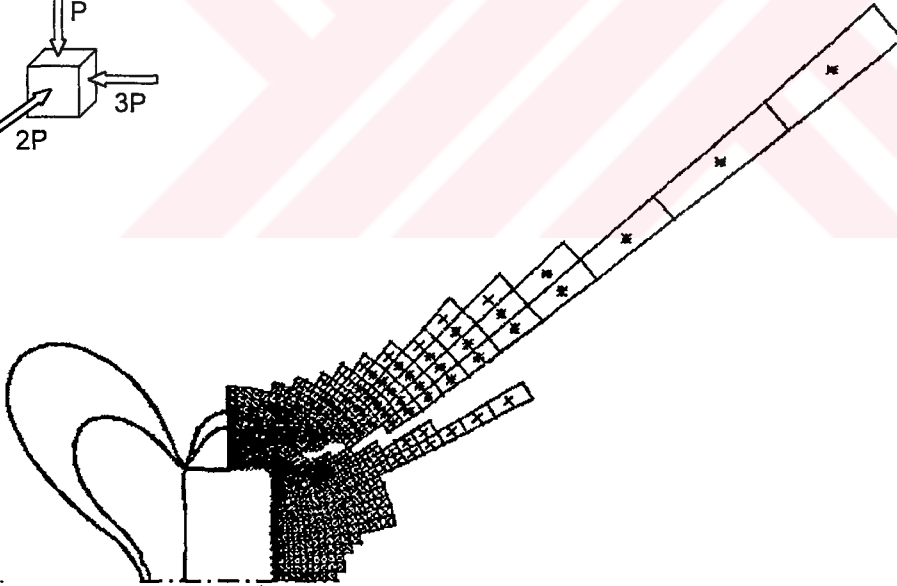
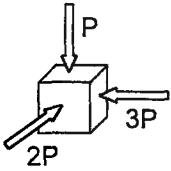
Şekil 3.10 (devam ediyor).



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $\alpha=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



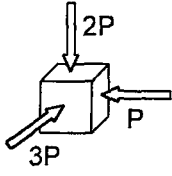
IOZ = 2.18 IYZ = 3.62



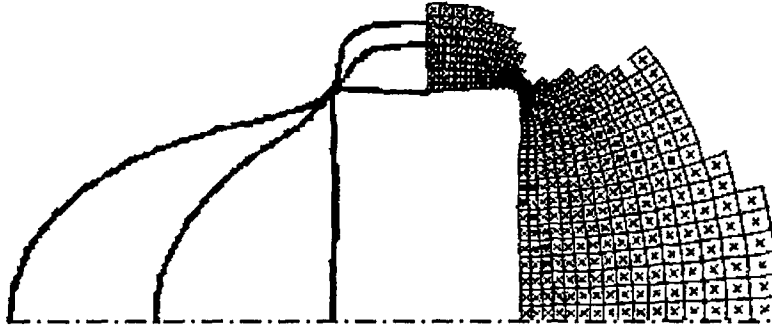
IOZ = 3.11 IYZ = 11.10

a. Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v=P_3$) olduğu durumlar

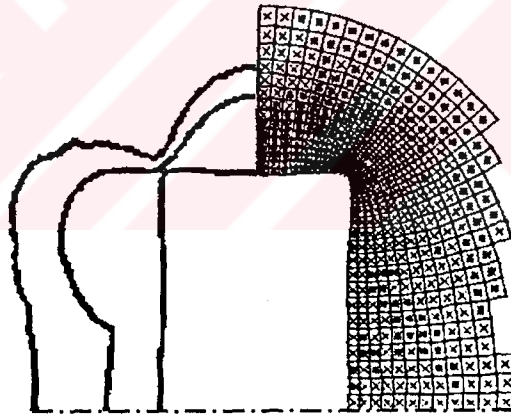
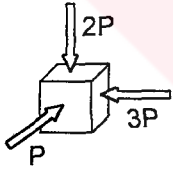
Şekil 3.11 Anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan dikdörtgen açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



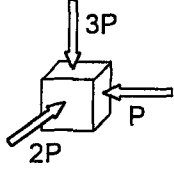
IOZ = 1.68 IYZ = 2.90



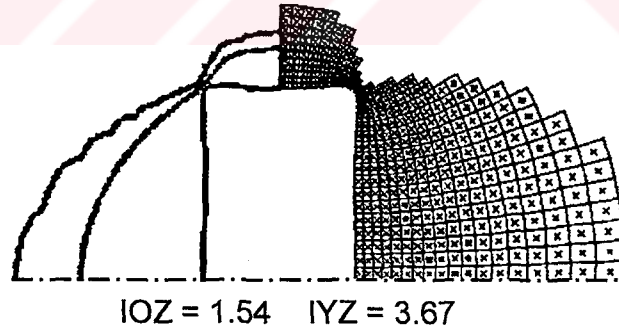
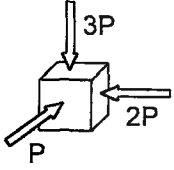
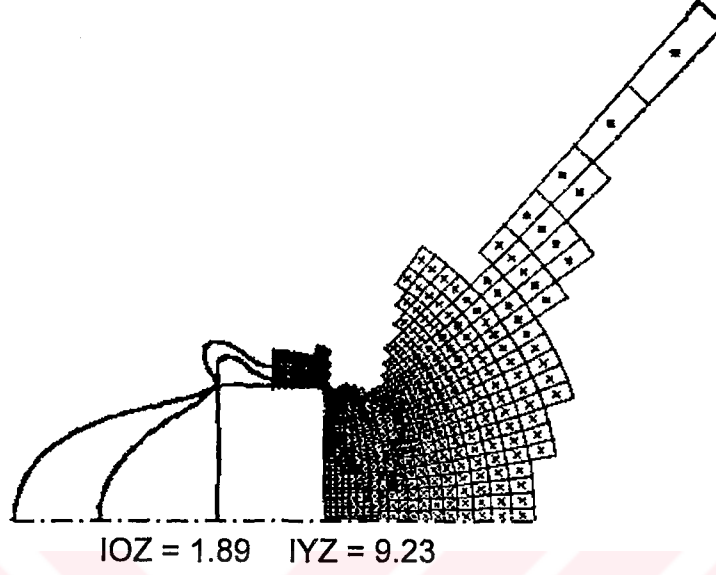
IOZ = 1.25 IYZ = 3.08

b. Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v=P_2$) olduğu durumlar

Şekil 3.11 (devam ediyor).

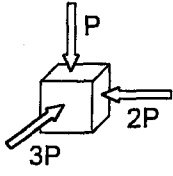


Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

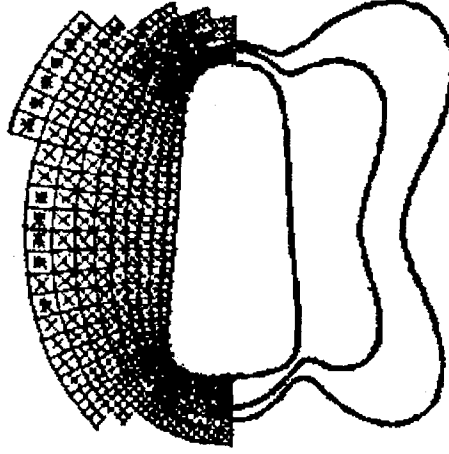


c. Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v=P_1$) olduğu durumlar

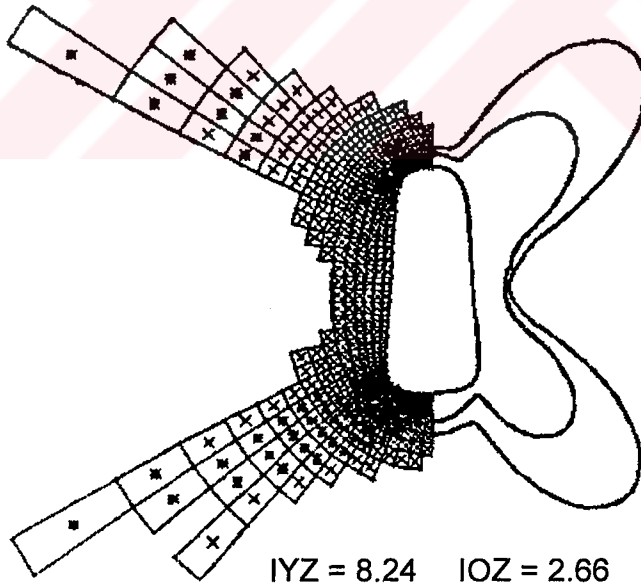
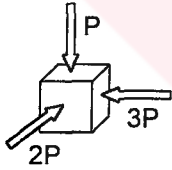
Şekil 3.11 (devam ediyor).



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $\alpha=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



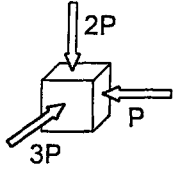
$IYZ = 3.45$ $IOZ = 1.58$



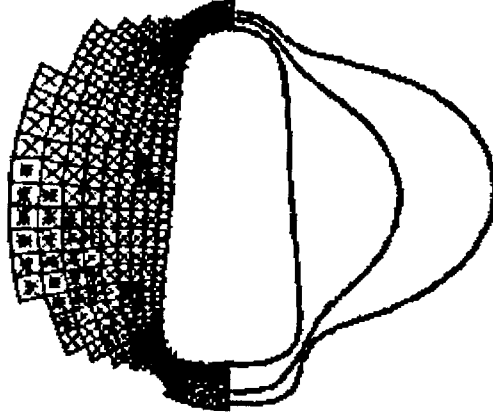
$IYZ = 8.24$ $IOZ = 2.66$

a. Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v=P_3$) olduğu durumlar

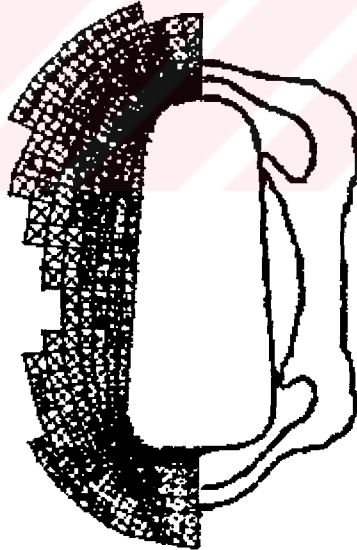
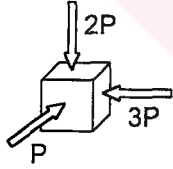
Şekil 3.12 Anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan kemer tavanlı açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



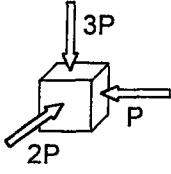
$$IYZ = 2.48 \quad IOZ = 1.12$$



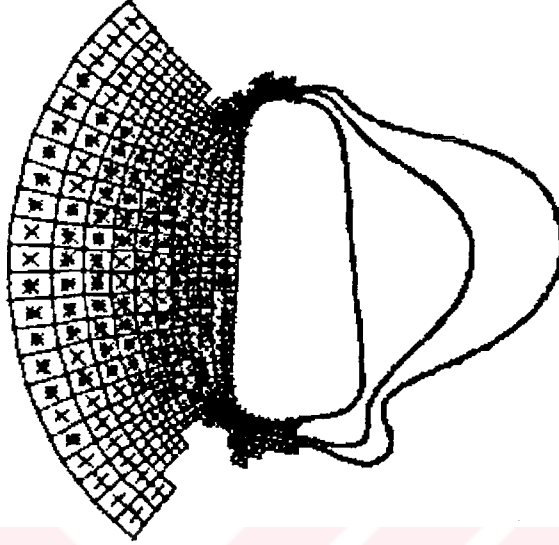
$$IYZ = 2.66 \quad IOZ = 0.58$$

b. Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v=P_2$) olduğu durumlar

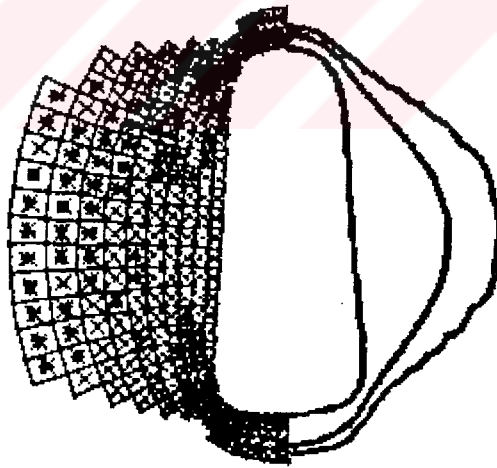
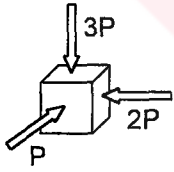
Şekil 3.12 (devam ediyor).



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $\alpha=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



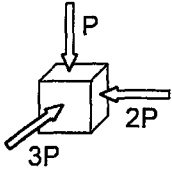
IYZ = 4.79 IOZ = 1.30



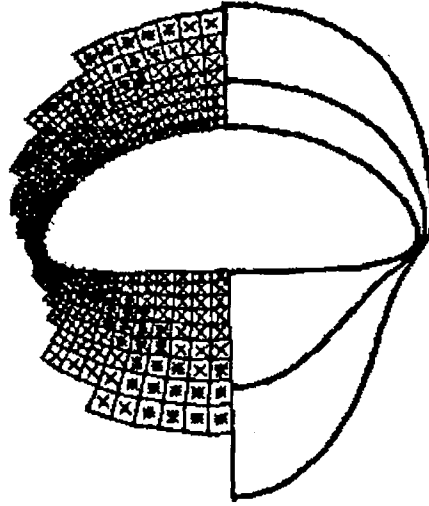
IYZ = 3.00 IOZ = 0.96

c. Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v=P_1$) olduğu durumlar

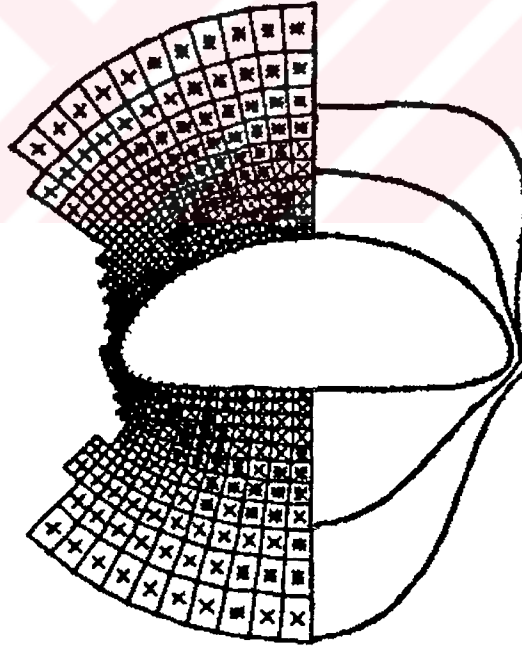
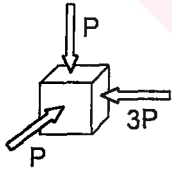
Şekil 3.12 (devam ediyor).



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



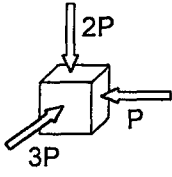
$IYZ = 2.48$ $IOZ = 0.99$



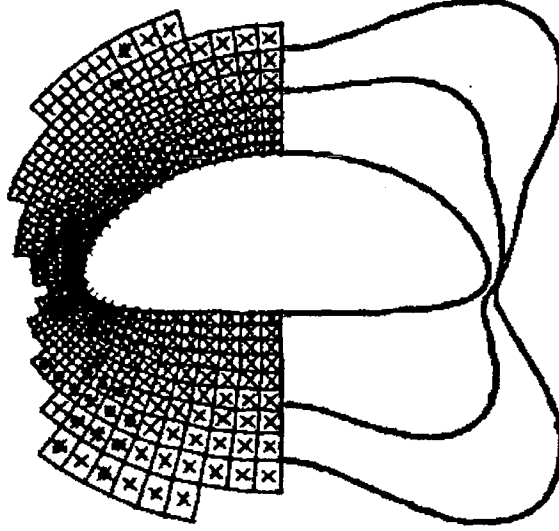
$IYZ = 5.04$ $IOZ = 1.22$

a. Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v=P_3$) olduğu durumlar

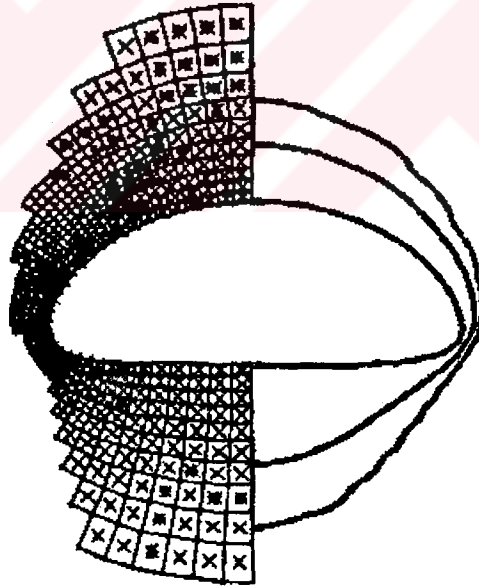
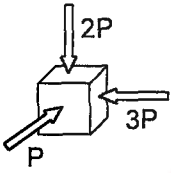
Şekil 3.13 Anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=2.5$ olan kemer tavanlı açıklık çevresinde aşırı gerilme ve yenilme bölgeleri.



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$, $\alpha=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



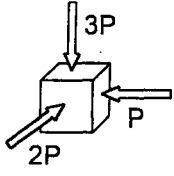
$$IYZ = 3.48 \quad IOZ = 1.68$$



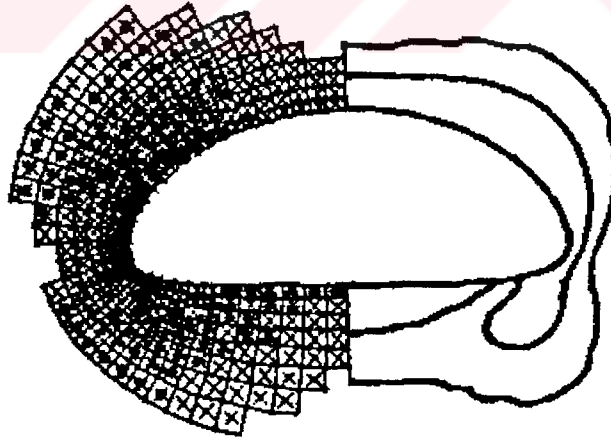
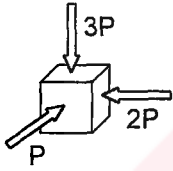
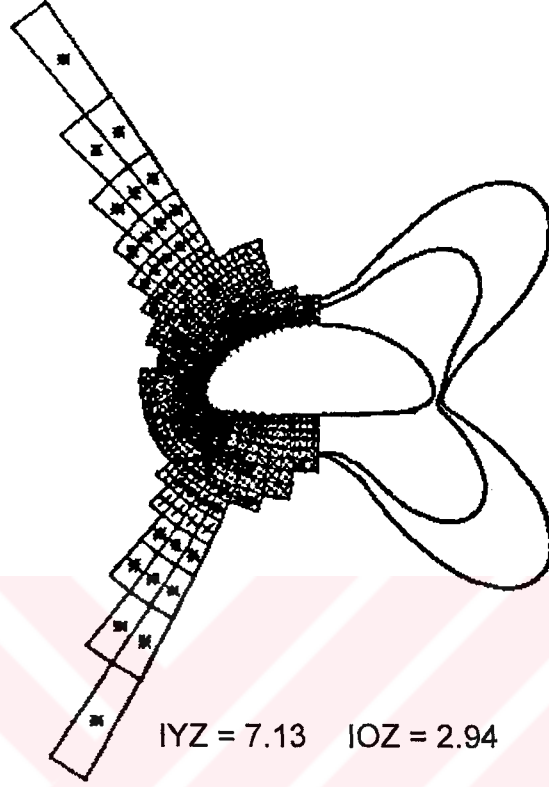
$$IYZ = 3.24 \quad IOZ = 0.87$$

b. Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v=P_2$) olduğu durumlar

Şekil 3.13 (devam ediyor).



Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_f=10$, $GSI=60$, $a=0.5$,
 $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



c. Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v=P_1$) olduğu durumlar

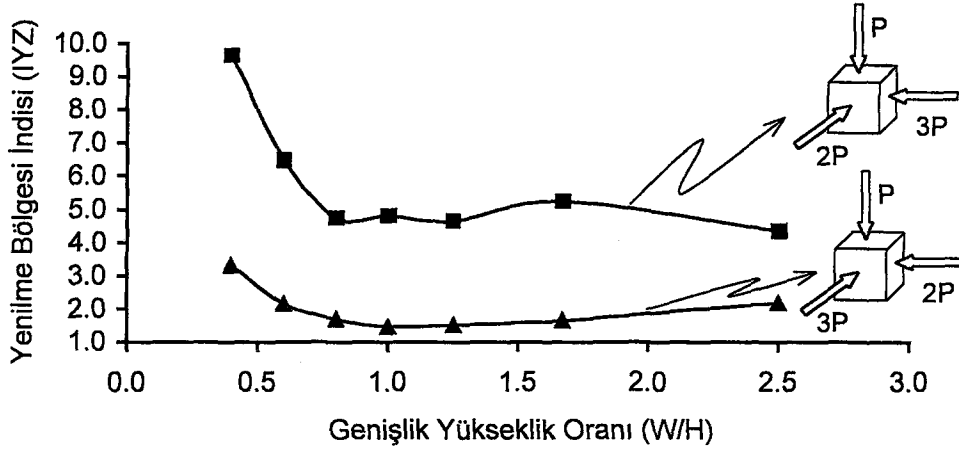
Şekil 3.13 (devam ediyor).

Doğrusal-elastik çözümlerlerde ise, açıklığın yakın çevresindeki gerilmeler ne kadar yüksek olursa olsun yenilme olmayacaktır. Bu durumda, yüksek ikincil gerilmeler açıklıktan uzaklaştıkça birincil gerilmelere yakınsayacaktır. Böylece, açıklık çevresindeki gerilme dağılımı; doğrusal elastik çözümlerlerde açıklık şeklinden, elasto-plastik çözümlerlerde de yenilme bölgesi geometrisinden etkilenmektedir (Gerçek ve Geniş, 1998). Yenilme bölgesi geometrisi ve aşırı gerilme bölgesi geometrisi arasındaki farklılık nedeniyle, doğrusal-elastik çözümlerden elde edilen aşırı gerilme bölgesi yanında dayanım katsayısının 1.2'ye eşit olduğu bölge de ayrıca belirtilmiştir.

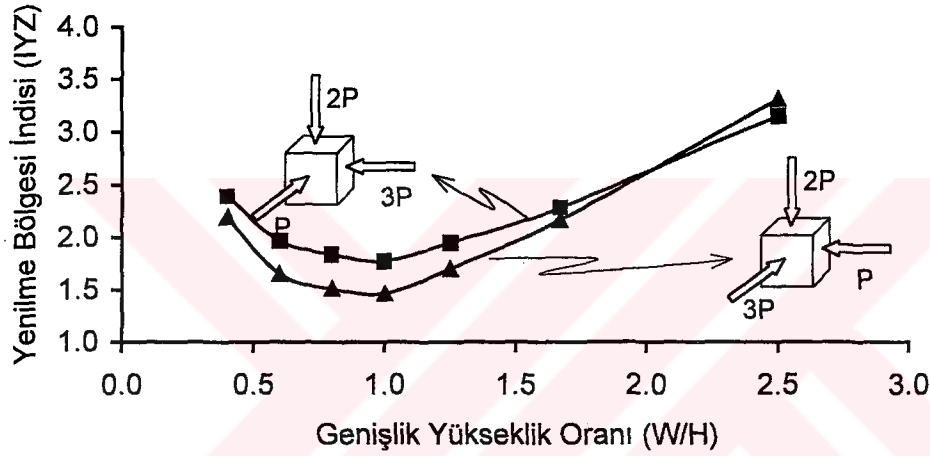
Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v = P_3$) olduğu durumlarda (I.a ve I.b), açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu bir görüntü vermektedir (Gerçek ve Geniş, 1998; Gerçek and Geniş, 1999) (Şekil 3.14.a-3.17.a).

Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v = P_2$) olduğu durumlarda (II.a ve II.b), açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden büyüğünün ya da küçüğünün doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından belirli bir fark yaratmamaktadır (Gerçek ve Geniş, 1998; Gerçek and Geniş, 1999) (Şekil 3.14.b-3.17.b).

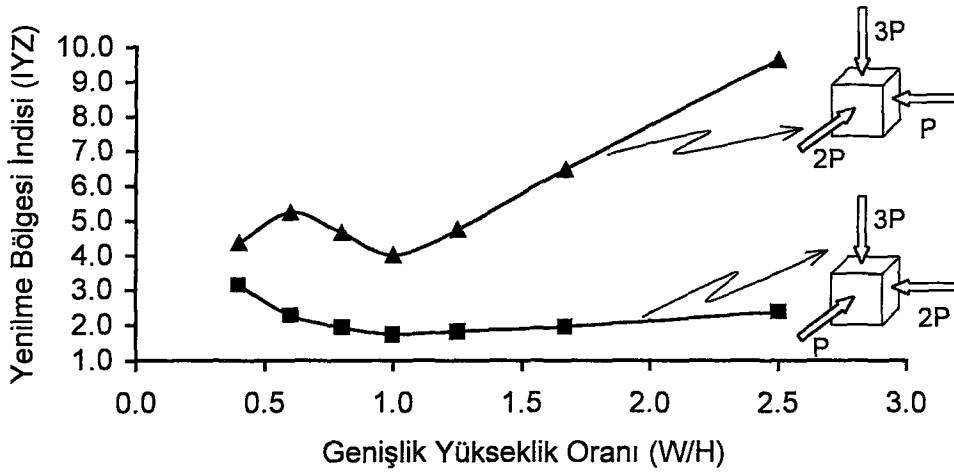
Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v = P_1$) olduğu durumlarda (III.a ve III.b), açıklığın uzun ekseninin en küçük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu bir görüntü vermektedir. Bu, incelenen ilk durumun tam tersi bir sonuçtur (Gerçek ve Geniş, 1998; Gerçek and Geniş, 1999) (Şekil 3.14.c-3.17.c).



a. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v = P_3$) olduğu durum

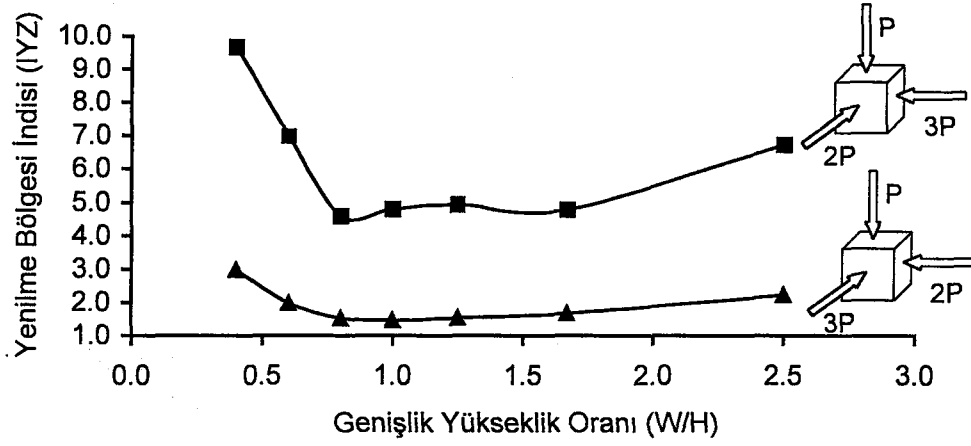


b. Düşey birincil gerilmenin ortanca bileşen ($P_v = P_2$) olduğu durum

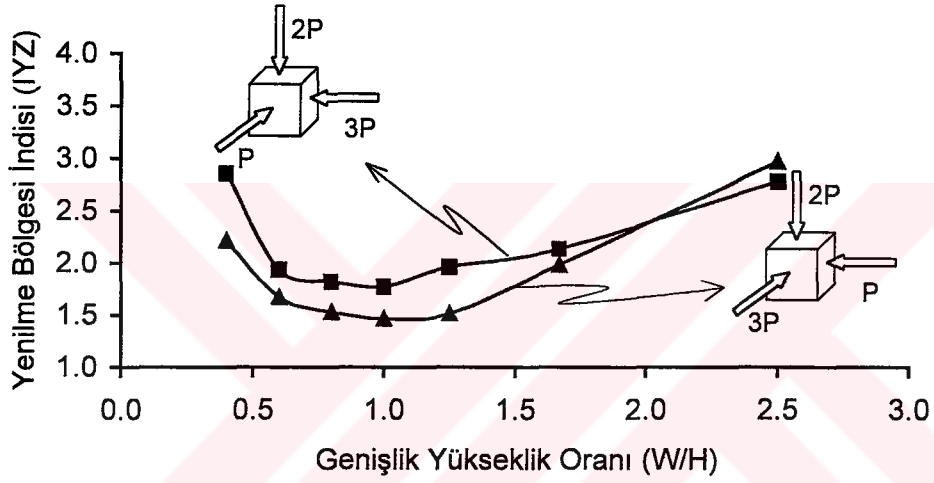


c. Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v = P_1$) olduğu durum

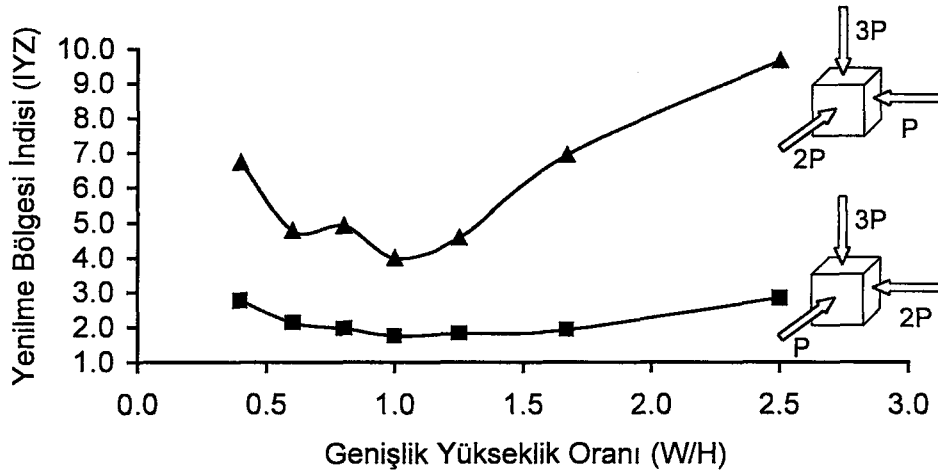
şekil 3.14 Elips açıklığın W/H oranı ve anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.



a. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v = P_3$) olduğu durum

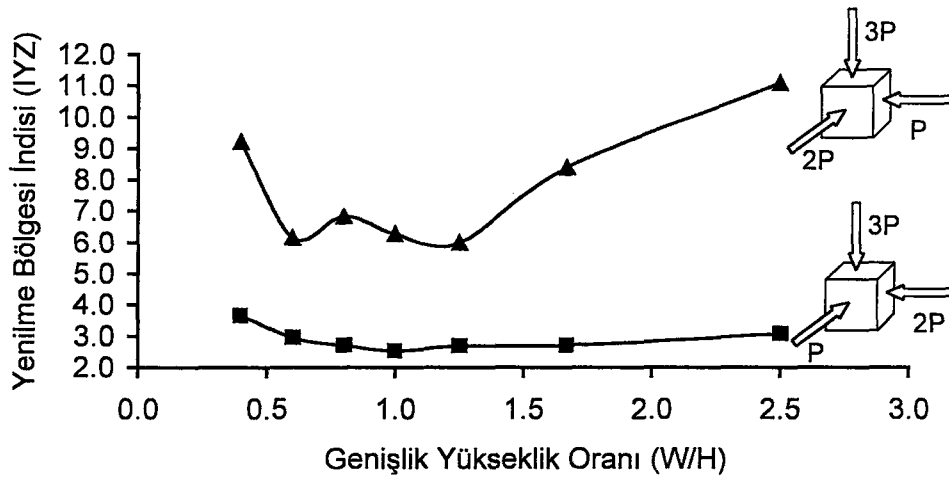
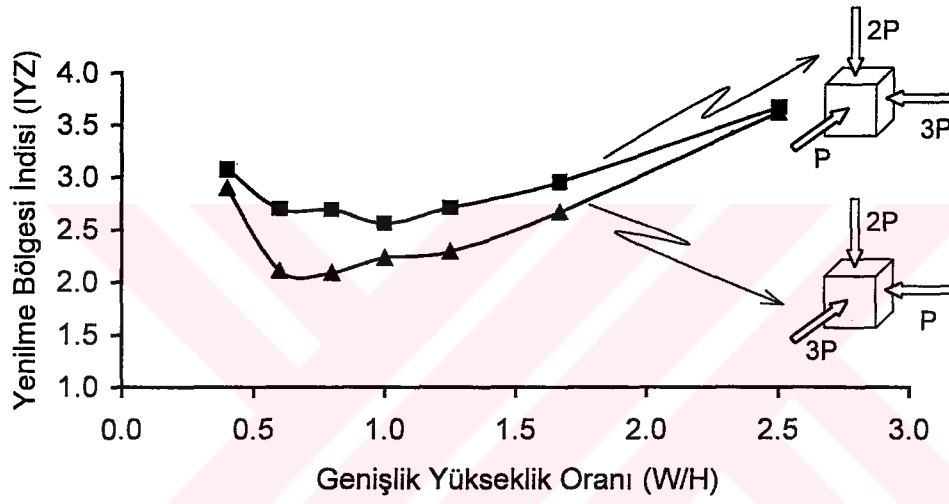
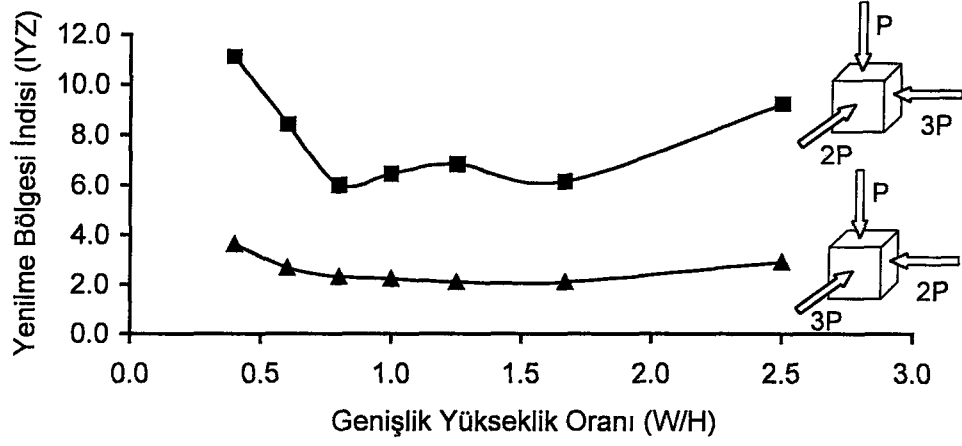


b. Düşey birincil gerilmenin ortanca bileşen ($P_v = P_2$) olduğu durum

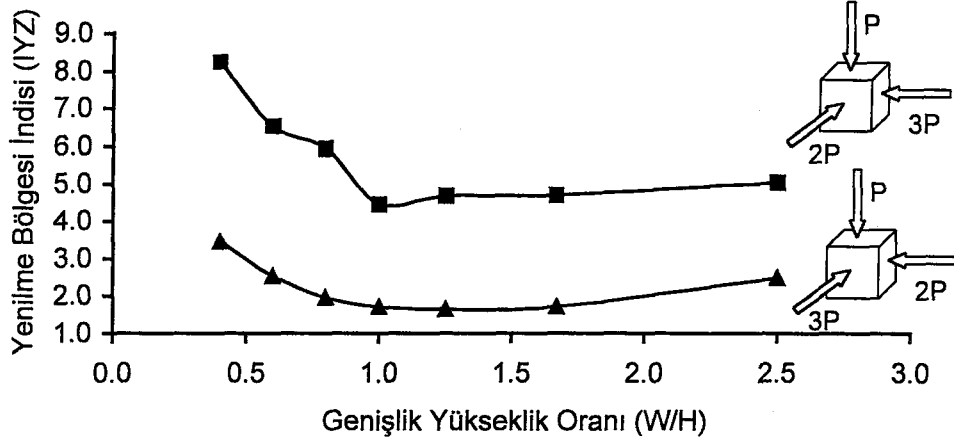


c. Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v = P_1$) olduğu durum

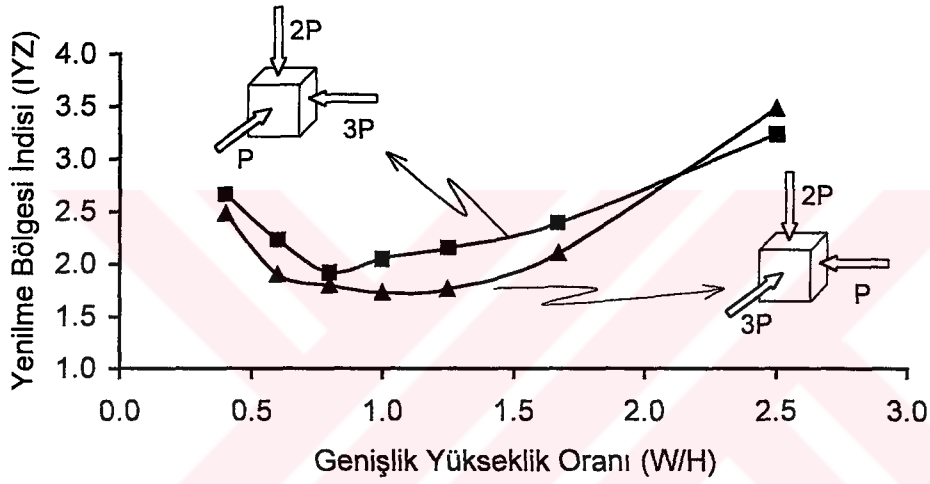
Şekil 3.15 Ovaloid açıklığın W/H oranı ve anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.



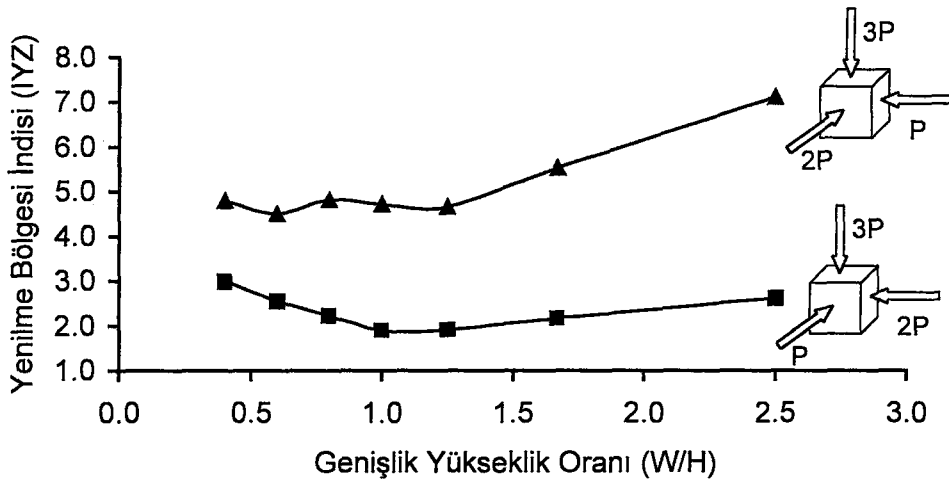
Şekil 3.16 Dikdörtgen açıklığın W/H oranı ve anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.



a. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$) olduğu durum



b. Düşey birincil gerilmenin ortanca bileşen ($P_v=P_2$) olduğu durum



c. Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_1$) olduğu durum

Şekil 3.17 Kemer tavanlı açıklığın W/H oranı ve anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.

Genel olarak karşılaştırılan 6 durum içinde; düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v = P_3$) olduğu durumlarda, açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması ($P_v = P$, $P_h = 2P$, $P_z = 3P$) (I.a) ve düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v = P_1$) olduğu durumlarda da açıklığın uzun ekseninin en küçük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması ($P_v = 3P$, $P_h = 2P$, $P_z = P$) (III.b) duraylılık açısından en uygun seçenekler olmaktadır. Bu iki birincil gerilme durumlarında açıklık çevresinde oluşan IYZ değerleri birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen olduğu durumda, açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması (I.a durumu) literatürde rapor edilen, sıkça karşılaşılan ve uygulaması tavsiye edilen durumdur. Buna karşılık düşey birincil gerilme en büyük asal bileşen olduğunda, açıklığın uzun ekseninin en büyük asal gerilme doğrultusunda konumlandırılması karşılaştırılan durumlar içinde duraylılık açısından en olumsuz durum olmaktadır.

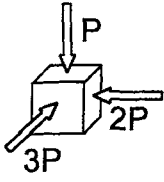
Buraya kadar olan çalışmalarda birincil gerilmeler ve kaya kütlesi dayanımı o şekilde seçilmiştir ki; bütün kesit şekillerinde ve konumlarında, yeraltı açıklığını tamamen çevreleyen ve oldukça geniş olan yenilme bölgeleri oluşmuştur. Bu yaklaşımla, IOZ ve IYZ değerlerinin belirlenmesinde duraysızlıkların karşılaştırılmasında kolaylık sağlanmıştır. Ancak, yenilme bölgesinin kalınlığının daha az olması ya da açıklığın tüm çevresinde yenilme oluşmaması durumunda yukarıda elde edilen bulguların geçerliliği araştırılmıştır. Bu amaçla, anizotropik birincil gerilme alanında ($P_{\max}/P_{\min} = 3$) açıklığı çevreleyen yenilme bölgesi elde edilecek şekilde birincil gerilme ve dayanım parametreleri belirlenerek bir dizi çözümleme yapılmıştır. Bu analizlerde, açıklığı çevreleyen kaya kütlesi elastoplastik davranış göstermekte olup, kaya kütlelerinin dayanımı Mohr-Coulomb yenilme ölçütü ile tanımlanmıştır. Çözümlemede, asal birincil gerilme bileşenleri,

$P_1 = 6.6$ MPa, $P_2 = 4.4$ MPa, $P_3 = 2.2$ MPa; kaya kütlesinin dayanım parametreleri, $\sigma_{cm} = 10$ MPa, $\sigma_{tm} = -3$ MPa, $c_m = 2.88$ MPa ve $\phi = 30^\circ$ alınmıştır. Açıklık geometrisi olarak $W/H = 0.6$ olan elips, ovaloid, dikdörtgen ve $W/H = 0.6$ ve 1.67 olan kemer tavanlı geometri seçilmiştir. Seçilen birincil gerilme bileşenlerinin oluşturacağı 6 durum da yapılan çözümler, Detournay ve Fairhurst (1982)'un birincil gerilme ve kaya kütlesinin dayanımına bağlı dairesel açıklık çevresindeki yenilme bölgelerini sınıflayan abağı ile uyumlu sonuçlar vermiştir.

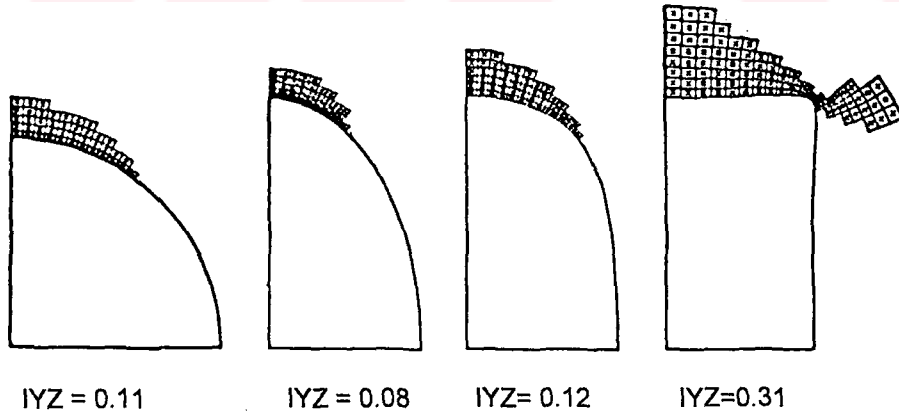
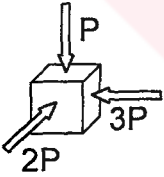
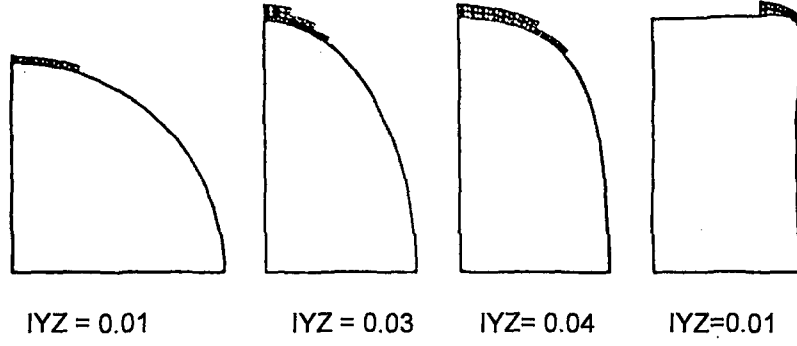
Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v = P_3$) olduğu durumlarda (I.a ve I.b), açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu bir görüntü vermektedir. Ortanca birincil gerilmenin açıklığın uzun eksenine paralel konumlu olduğu durumdaki (I.b) IYZ değerleri, en büyük asal birincil gerilmenin açıklığın uzun eksenine paralel olduğu durumdaki (I.a) IYZ değerlerinden daha belirgin şekilde daha yüksektir. Bu durum açıklığın tüm çevresinde yenilme olduğu durum ile uyum içindedir (Şekil 3.18.a-3.19.a).

Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v = P_2$) olduğu durumlarda (II.a ve II.b), açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumludur (Şekil 3.18.b-3.19.b).

Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v = P_1$) olduğu durumlarda (III.a ve III.b), açıklığın uzun ekseninin en küçük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması durumunda daha az IYZ değerleri oluşmaktadır. Buna rağmen, açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden büyüğünün ya da küçüğünün doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından belirli bir fark yaratmamaktadır (Şekil 3.18.c-3.19.c).

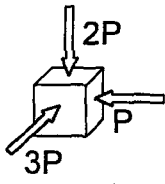


Mohr-Coulomb yenilme ölçütü
 $\sigma_{cm} = 4.5 P$, $c_m = 1.31 P$, $\phi = 30^\circ$
 $\sigma_{tm} = 1.36 P$, $\nu = 0.25$

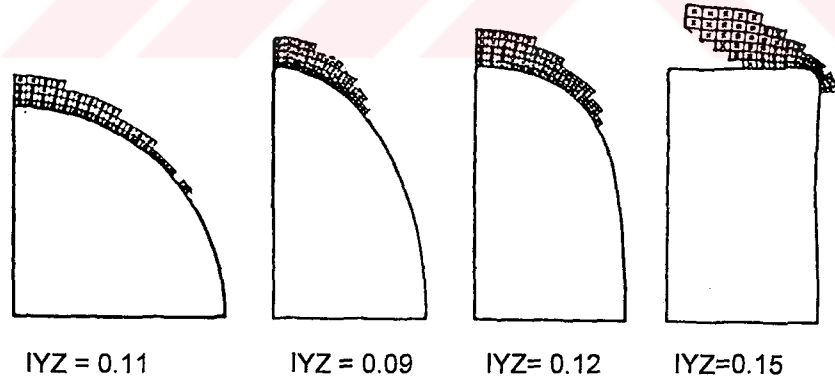
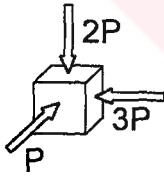
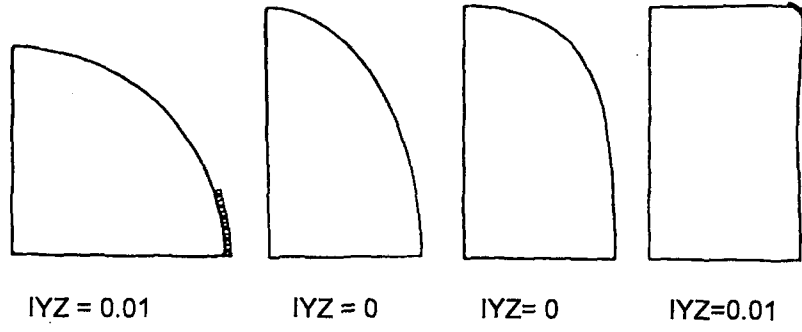


a. Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v = P_3$) olduğu durumlar

Şekil 3.18 Anizotropik birincil gerilme ve açıklığın tüm çevresinde yenilme oluşmaması durumunda; daire, $W/H=0.6$ olan elips, ovaloid, dikdörtgen açıklık çevresinde yenilme bölgeleri.

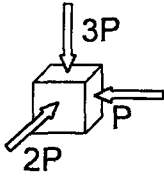


Mohr-Coulomb yenilme ölçütü
 $\sigma_{cm} = 4.5 P$, $c_m = 1.31 P$, $\phi = 30^\circ$
 $\sigma_{tm} = 1.36 P$, $\nu = 0.25$

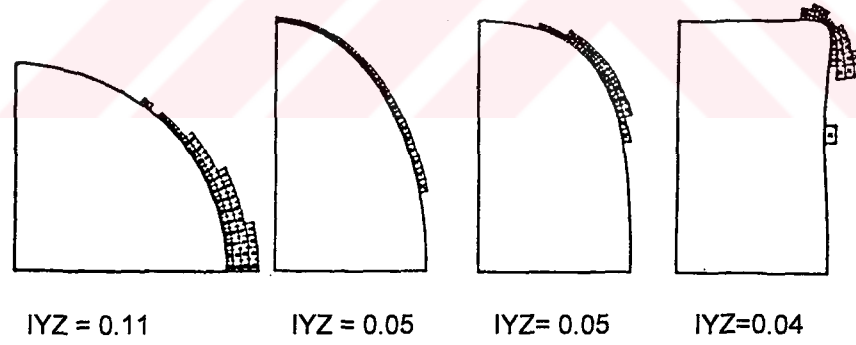
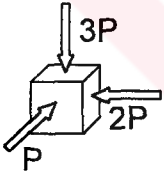
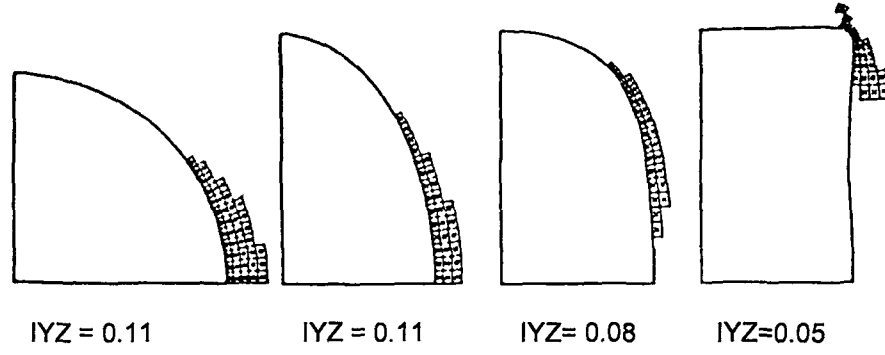


b. Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v = P_2$) olduğu durumlar

Şekil 3.18 (devam ediyor).

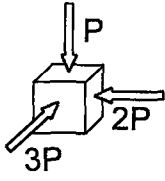


Mohr-Coulomb yenilme ölçütü
 $\sigma_{cm} = 4.5 P$, $c_m = 1.31 P$, $\phi = 30^\circ$
 $\sigma_{tm} = 1.36 P$, $\nu = 0.25$

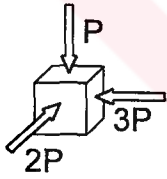
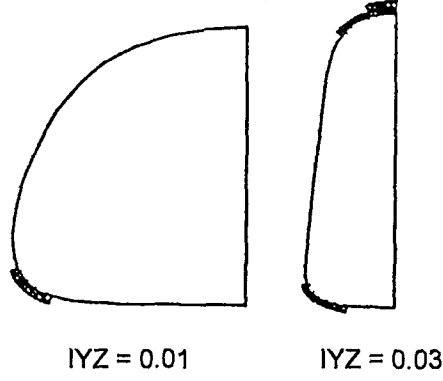


c. Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v = P_1$) olduğu durumlar

Şekil 3.18 (devam ediyor).

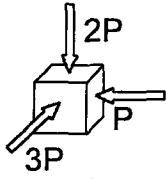


Mohr-Coulomb yenilme ölçütü
 $\sigma_{cm} = 4.5 P$, $c_m = 1.31 P$, $\phi = 30^\circ$
 $\sigma_{tm} = 1.36 P$, $\nu = 0.25$

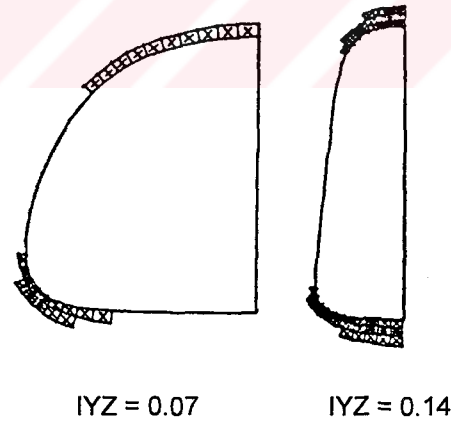
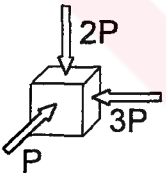
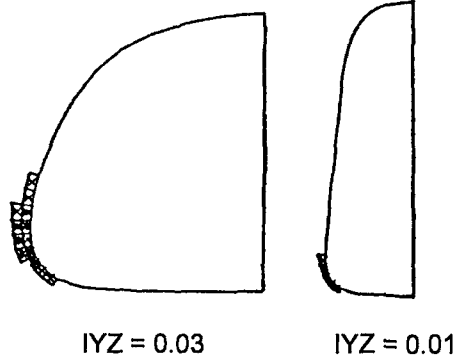


a. Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v = P_3$) olduğu durumlar

Şekil 3.19 Anizotropik birincil gerilme ve açıklığın tüm çevresinde yenilme oluşmaması durumunda; $W/H=1.66$ ve 0.66 olan kemer tavanlı açıklık çevresinde yenilme bölgeleri.

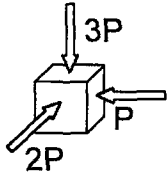


Mohr-Coulomb yenilme ölçütü
 $\sigma_{cm} = 4.5 P$, $c_m = 1.31 P$, $\phi = 30^\circ$
 $\sigma_{tm} = 1.36 P$, $\nu = 0.25$

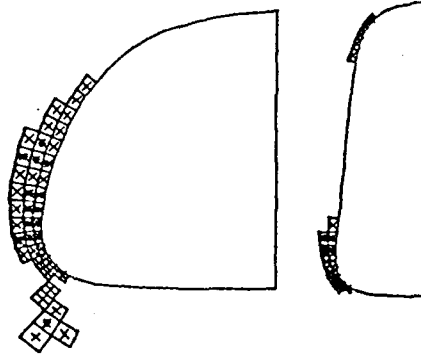


b. Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v = P_2$) olduğu durumlar

Şekil 3.19 (devam ediyor).

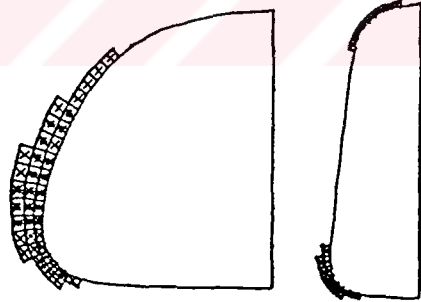
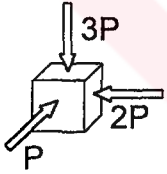


Mohr-Coulomb yenilme ölçütü
 $\sigma_{cm} = 4.5 P$, $c_m = 1.31 P$, $\phi = 30^\circ$
 $\sigma_{tm} = 1.36 P$, $\nu = 0.25$



IYZ = 0.15

IYZ = 0.06



IYZ = 0.12

IYZ = 0.06

c. Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v = P_I$) olduğu durumlar

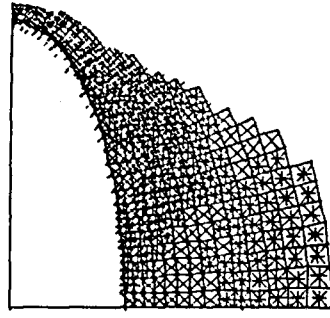
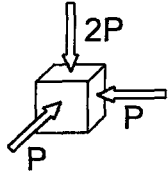
Şekil 3.19 (devam ediyor).

Bu bulgular, yalnızca incelenen birincil gerilme durumunda geçerli olmaktadır. Bu nedenle yukarıda sunulan bulguların geçerliliğini tartışmak için daha farklı birincil gerilme alanları seçilerek değiştirgesel çalışmalar genişletilmiştir.

3.2.1.2 Düzlemsel Anizotropik Birincil Gerilme Alanının Duraylılığa Etkisi

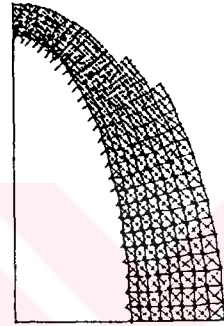
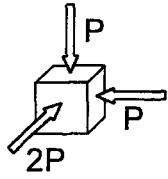
Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v = P_3$) olduğu durumlarda (IV.a ve IV.b), açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu bir görüntü vermektedir (Gerçek et al., 2000) (Şekil 3.20.a-3.27.a, Şekil 3.28). Bu durum incelenen tüm açıklık geometrileri için geçerlidir. Ayrıca literatürde karşılaşılan durumlar ile uyumludur.

Diğer taraftan düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v = P_1$) olduğu durumlarda (V.a ve V.b), açıklığın en uygun konumlandırması, düşük P_{max}/P_{min} oranında daha çok açıklığın W/H oranına bağlı olmaktadır (Gerçek et al., 2000). Örneğin, $P_{max}/P_{min} = 2$ olduğunda, $0.5 < W/H < 1.6$ oranına sahip kemer tavanlı, $0.5 < W/H < 1.5$ oranına sahip elips ve ovaloid, $0.5 < W/H < 2.3$ dikdörtgen açıklık için açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu olmaktadır (Şekil 3.20.b-3.27.b, Şekil 3.29). Yukarıda verilen sınır değerleri dışındaki W/H oranları için açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden küçüğüne paralel konumlandırması daha uygun olmaktadır.

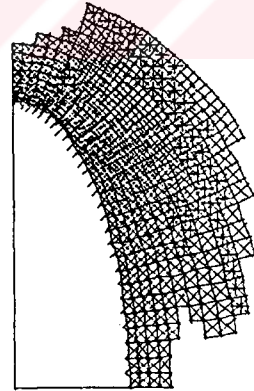
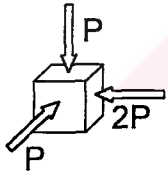


$$IYZ = 1.84$$

Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$,
 $\alpha=0.5$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



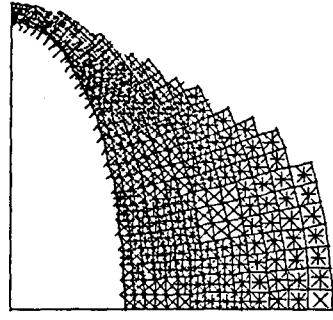
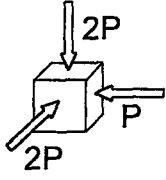
$$IYZ = 1.03$$



$$IYZ = 1.90$$

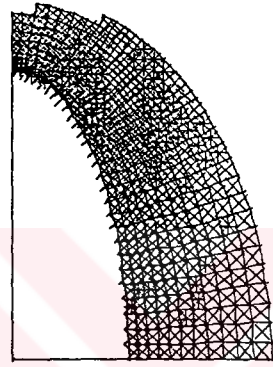
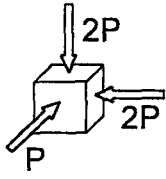
a. Üç eksenli sıkışma durumu

Şekil 3.20 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan elips açıklık çevresinde yenilme bölgesi.

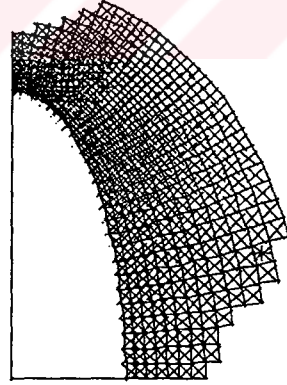
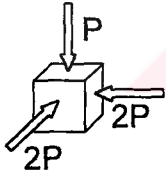


ITYZ = 1.81

Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$,
 $a=0.5$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



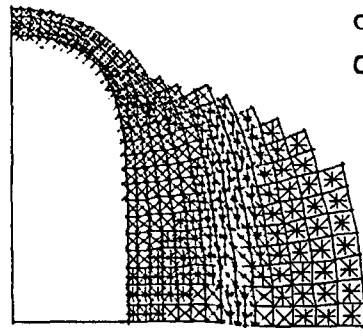
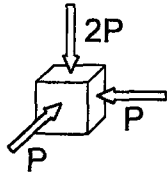
ITYZ = 1.87



ITYZ = 2.23

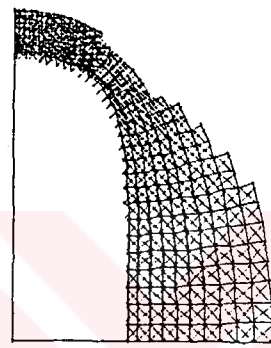
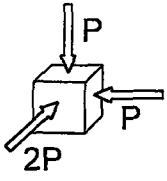
b. Üç eksenli uzama durumu

Şekil 3.20 (devam ediyor).

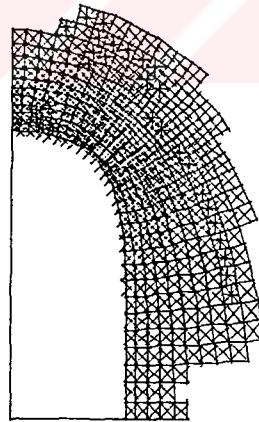
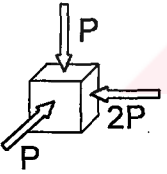


IYZ = 1.70

Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$,
 $\alpha=0.5$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



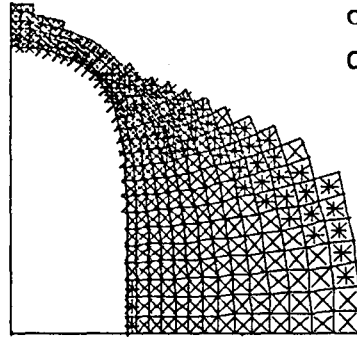
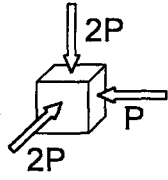
IYZ = 1.14



IYZ = 1.76

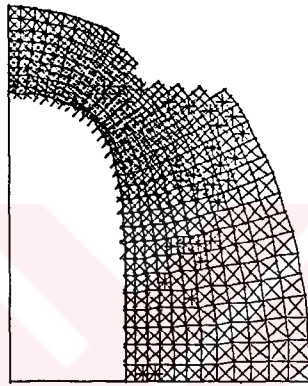
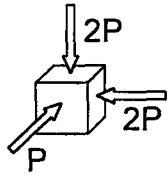
a. Üç eksenli sıkışma durumu

Şekil 3.21 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan ovaloid açıklık çevresinde yenilme bölgesi.

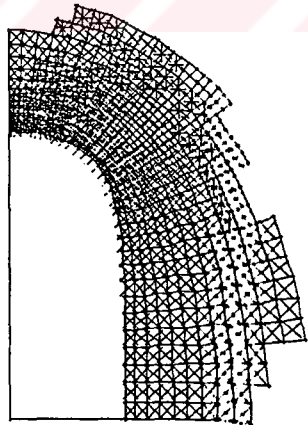
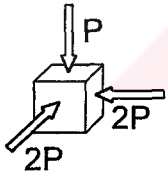


IYZ = 1.76

Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$,
 $\alpha=0.5$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



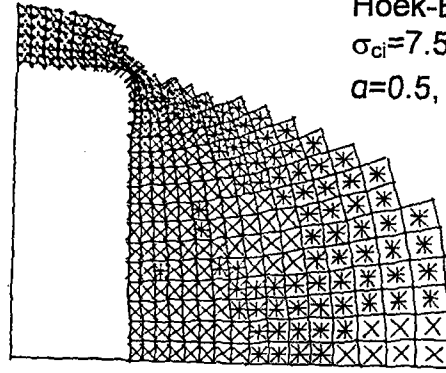
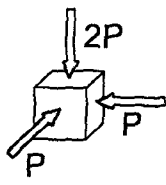
IYZ = 1.89



IYZ = 2.14

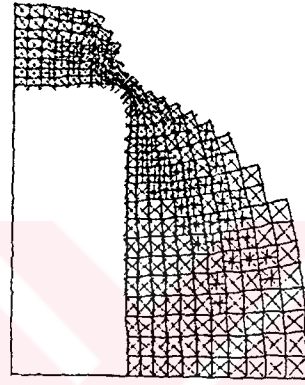
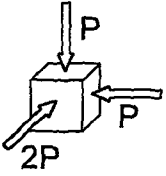
b. Üç eksenli uzama durumu

Şekil 3.21 (devam ediyor).

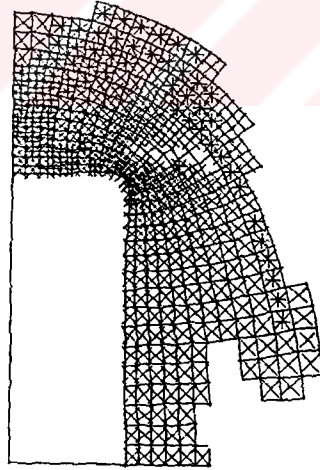
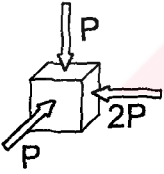


Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$,
 $a=0.5$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $v=0.25$

IYZ = 2.38



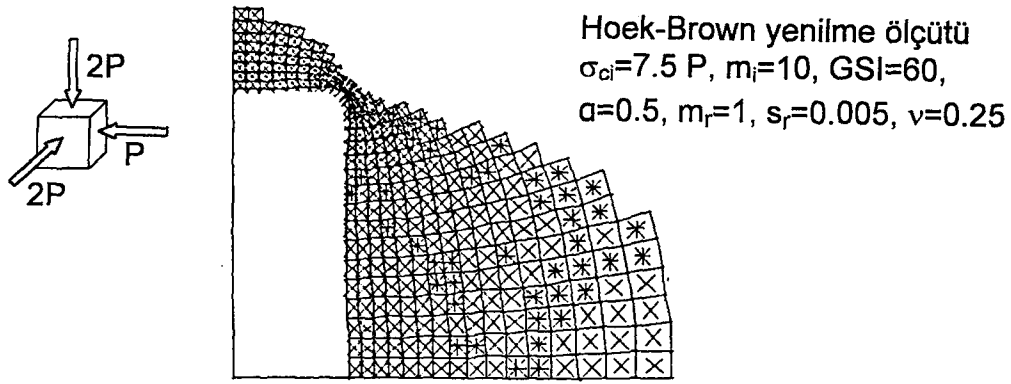
IYZ = 1.45



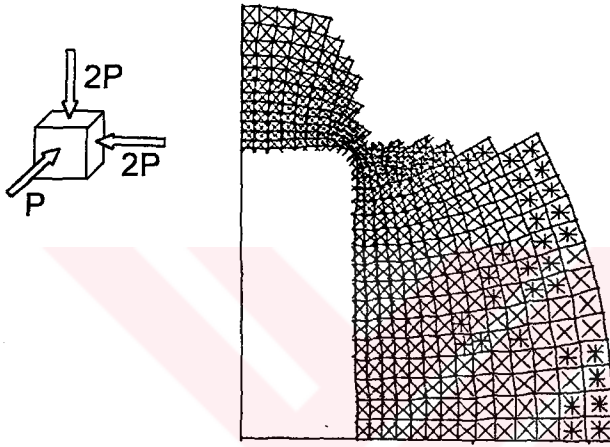
IYZ = 2.20

a. Üç eksenli sıkışma durumu

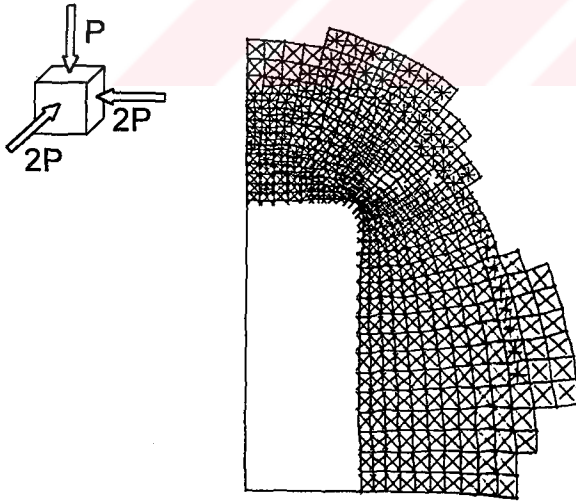
Şekil 3.22 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan dikdörtgen açıklık çevresinde yenilme bölgesi.



IYZ = 2.40



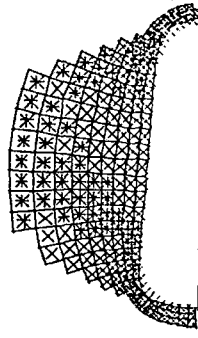
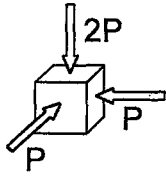
IYZ = 2.53



IYZ = 2.60

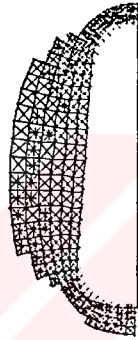
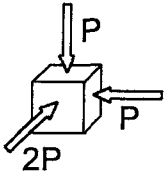
b. Üç eksenli uzama durumu

Şekil 3.22 (devam ediyor).

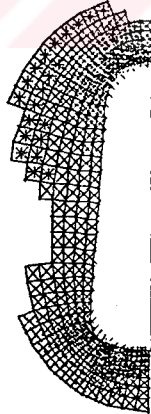
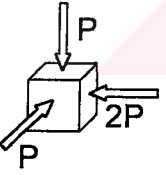


IYZ = 2.03

Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$,
 $\alpha=0.5$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



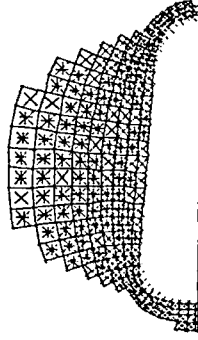
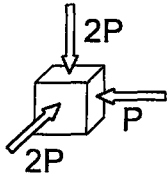
IYZ = 1.28



IYZ = 2.00

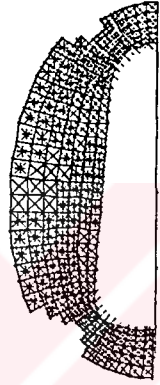
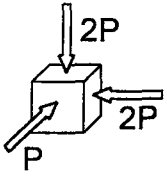
a. Üç eksenli sıkışma durumu

Şekil 3.23 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=0.4$ olan kemer tavanlı açıklık çevresinde yenilme bölgesi.

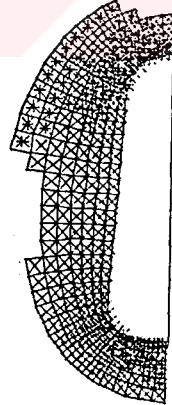
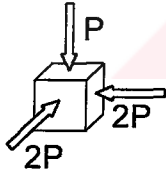


ITYZ = 2.00

Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$,
 $\alpha=0.5$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



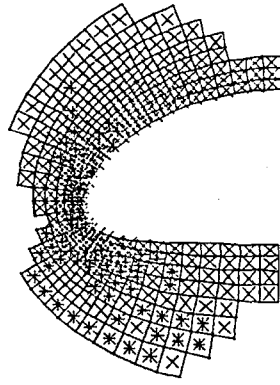
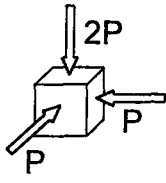
ITYZ = 1.90



ITYZ = 2.28

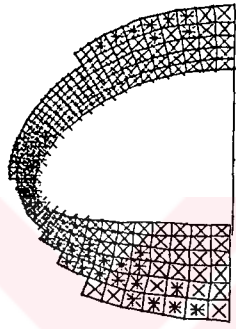
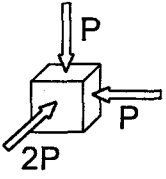
b. Üç eksenli uzama durumu

Şekil 3.23 (devam ediyor).

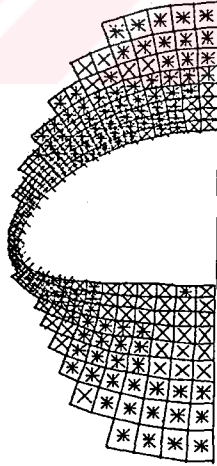
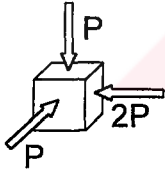


IYZ = 2.22

Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$,
 $\alpha=0.5$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



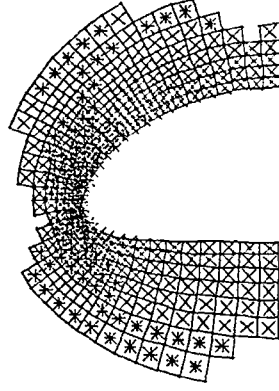
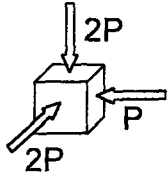
IYZ = 1.22



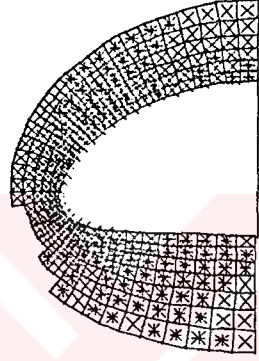
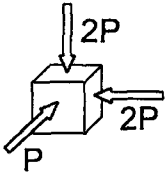
IYZ = 1.98

a. Üç eksenli sıkışma durumu

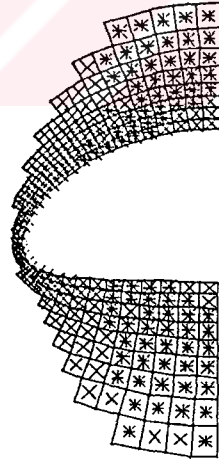
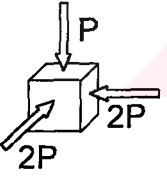
Şekil 3.24 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=2.5$ olan kemer tavanlı açıklık çevresinde yenilme bölgesi.



$$IYZ = 2.34$$



$$IYZ = 1.82$$

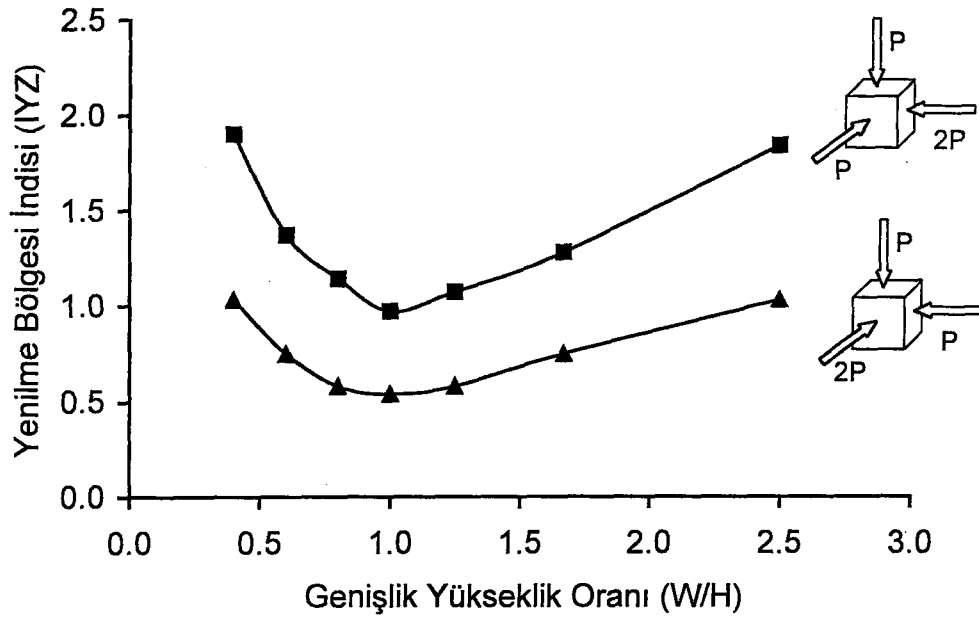


$$IYZ = 2.09$$

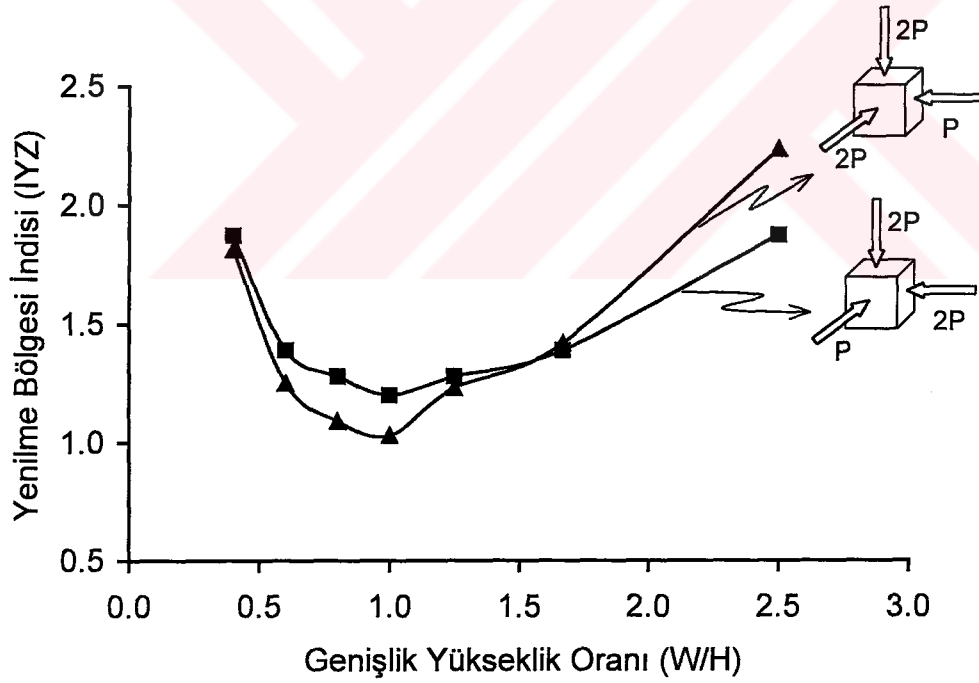
Hoek-Brown yenilme ölçütü
 $\sigma_{ci}=7.5 P$, $m_i=10$, $GSI=60$,
 $a=0.5$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

b. Üç eksenli uzama durumu

Şekil 3.24 (devam ediyor).

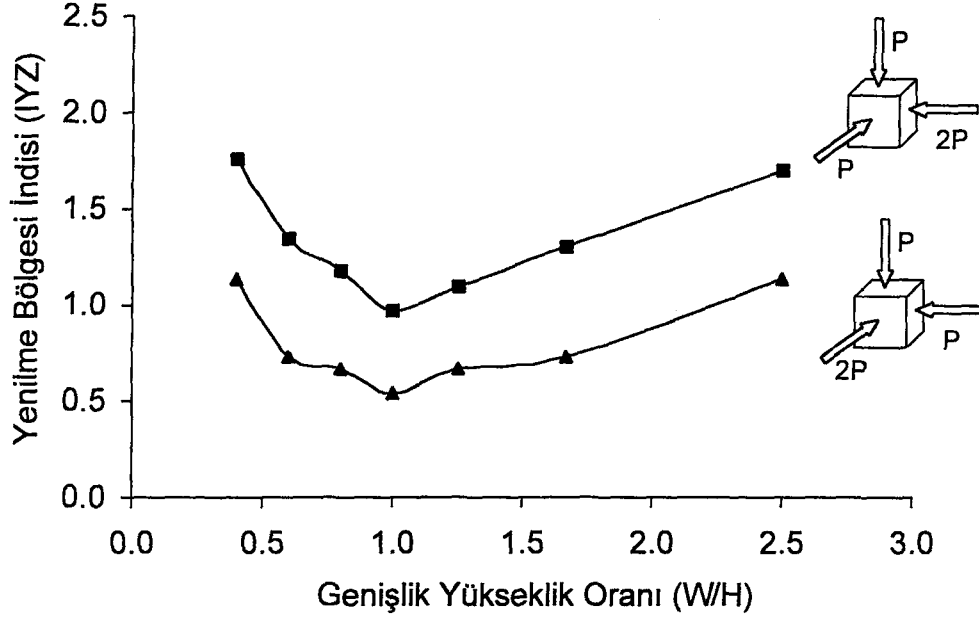


a. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$) olduğu durum

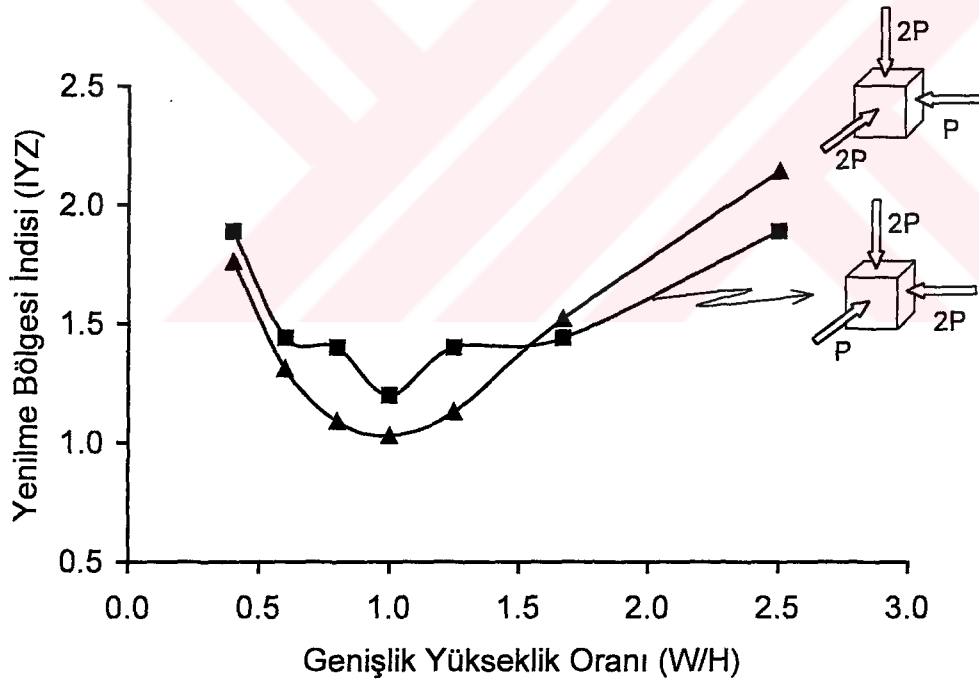


b. Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_1$) olduğu durum

Şekil 3.25 Elips açıklığının W/H oranı ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.

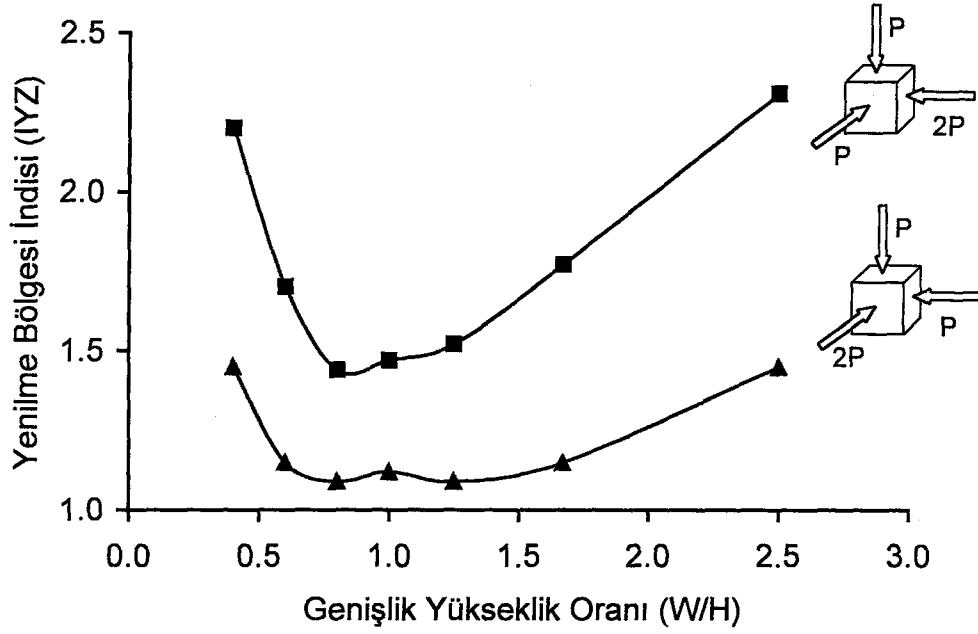


a. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$) olduğu durum

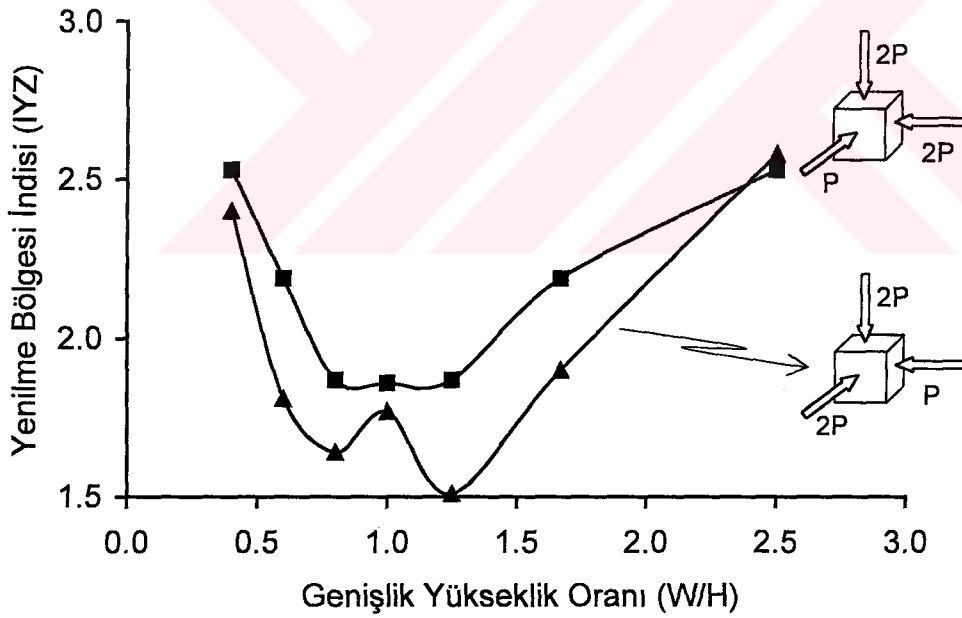


b. Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_1$) olduğu durum

Şekil 3.26 Ovaloid açıklığın W/H oranı ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.

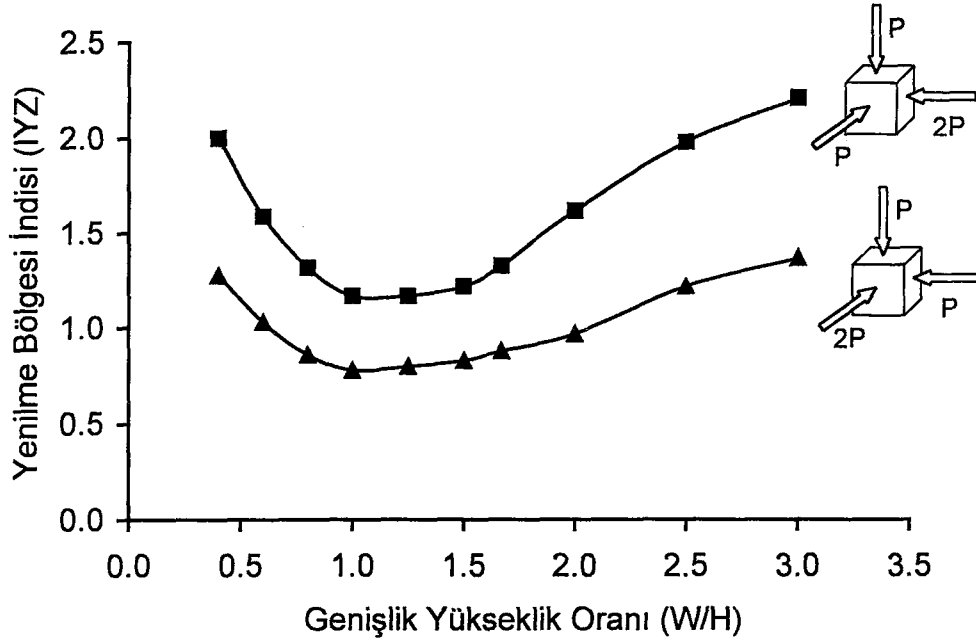


a. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$) olduğu durum

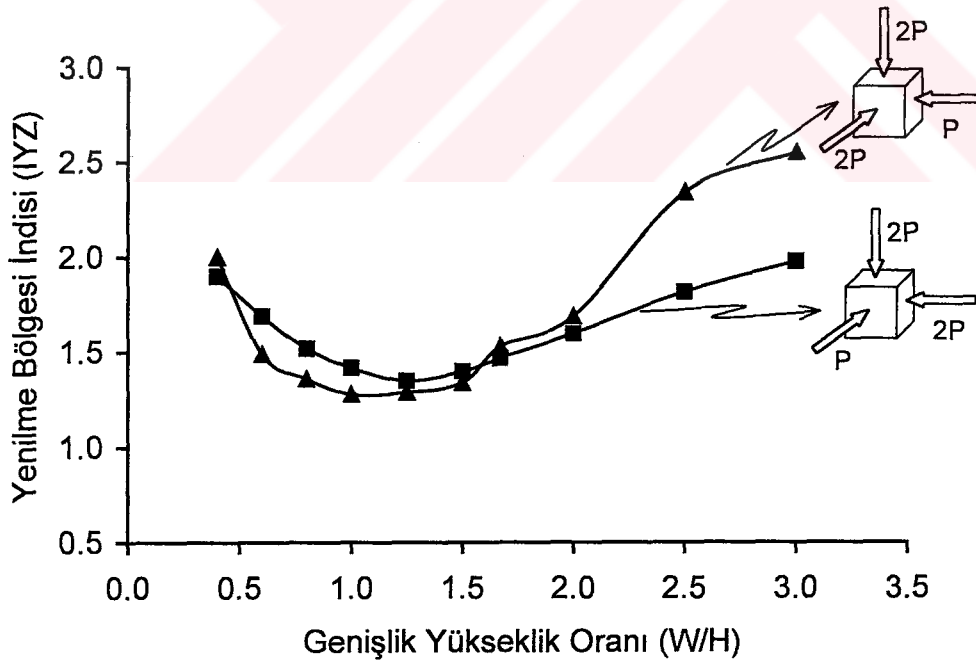


b. Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_1$) olduğu durum

Şekil 3.27 Dikdörtgen açıklığın W/H oranı ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanının, IYZ değerleri ile değişimi.



Şekil 3.28 Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$ ve $P_{\max}/P_{\min}=2$) olduğu durumda, kemer tavanlı açıklığın W/H oranı ile IYZ değerlerinin değişimi (üç eksenli sıkışma durumu) (Gerçek et al.'dan [2000] değiştirilerek).



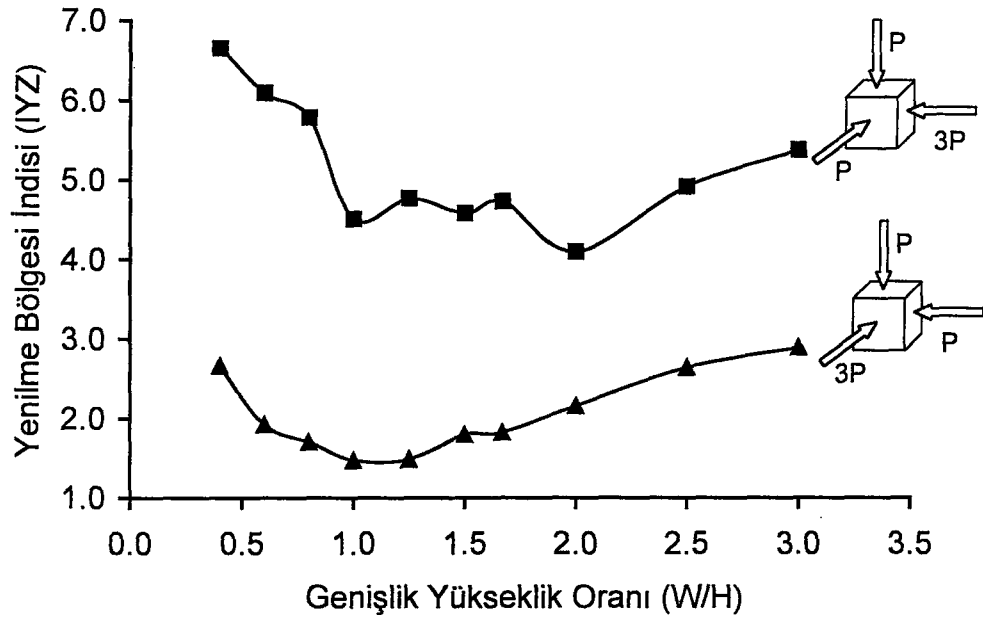
Şekil 3.29 Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_3$ ve $P_{\max}/P_{\min}=2$) olduğu durumda, kemer tavanlı açıklığın W/H oranı ile IYZ değerlerinin değişimi (üç eksenli uzama durumu) (Gerçek et al.'dan [2000] değiştirilerek).

Burada elde edilen karmaşık sonuçlar nedeniyle $P_{\max}/P_{\min}$ oranının farklı değerlerini kapsayacak şekilde çalışma genişletilmiştir. Kemer tavanlı açıklık için, $P_{\max}/P_{\min} = 2.5, 2.7$ ve 3 olacak şekilde değiştirgesel çalışmalar yapılmıştır. Derin yeraltı açıklıklarının oluşturulduğu ortamlarda yapılan ölçümler sonucu, genellikle $P_{\max}/P_{\min} = 3$ 'e kadar olan değerlerinde yoğunlaşma olması nedeniyle değiştirgesel çalışma bu üst sınır değere kadar genişletilmiştir.

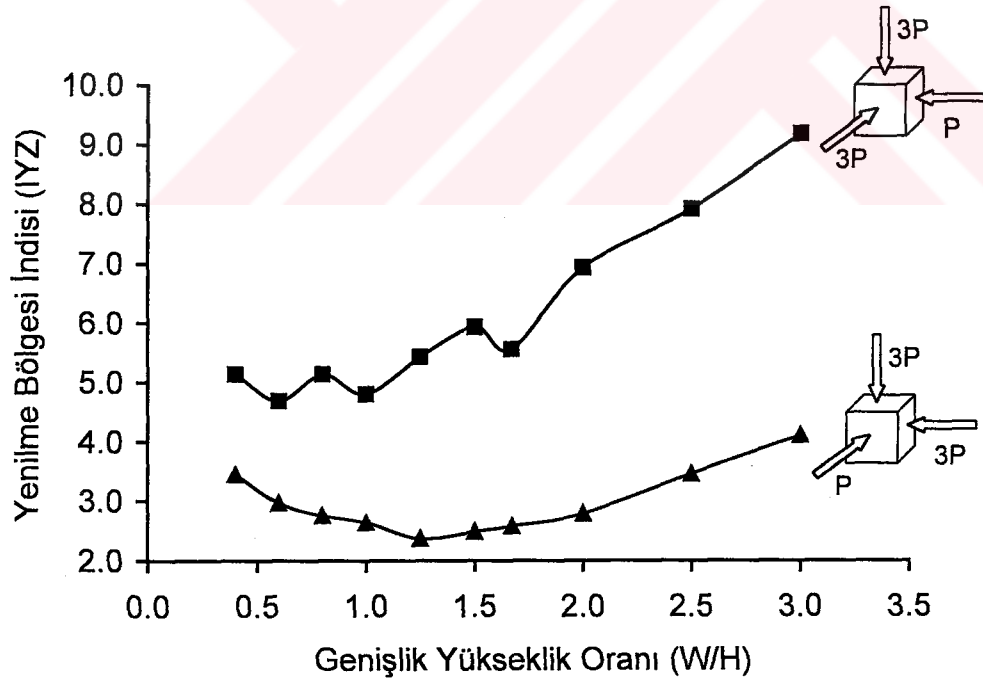
Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme olduğu durumda, farklı $P_{\max}/P_{\min}$ oranlarında da yukarıda belirtilen aynı sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 3.28, Şekil 3.30). Buna karşılık, düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme olması durumunda, $P_{\max}/P_{\min}$ oranının artan değerlerinde, en uygun konumlandırma açıklığın W/H oranından etkilenmemektedir. Kemer tavanlı açıklık geometrisinde, $P_{\max}/P_{\min} > 2.5$ olan değerlerinde, açıklık çevresinde büyük yenilme bölgesi oluşuyorsa, açıklığın en küçük asal gerilmeye paralel konumlandırılması çoğunlukla en iyi seçenek olmaktadır (Şekil 3.31-3.32).

Bu nedenle düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında, açıklığın en uygun konumlandırılmasında yalnızca yatay birincil gerilmeler değil, düşey birincil gerilmeler de etkili olup, hatta W/H oranının bile göz önünde bulundurulması gerekebilmektedir (Gerçek et al., 2000).

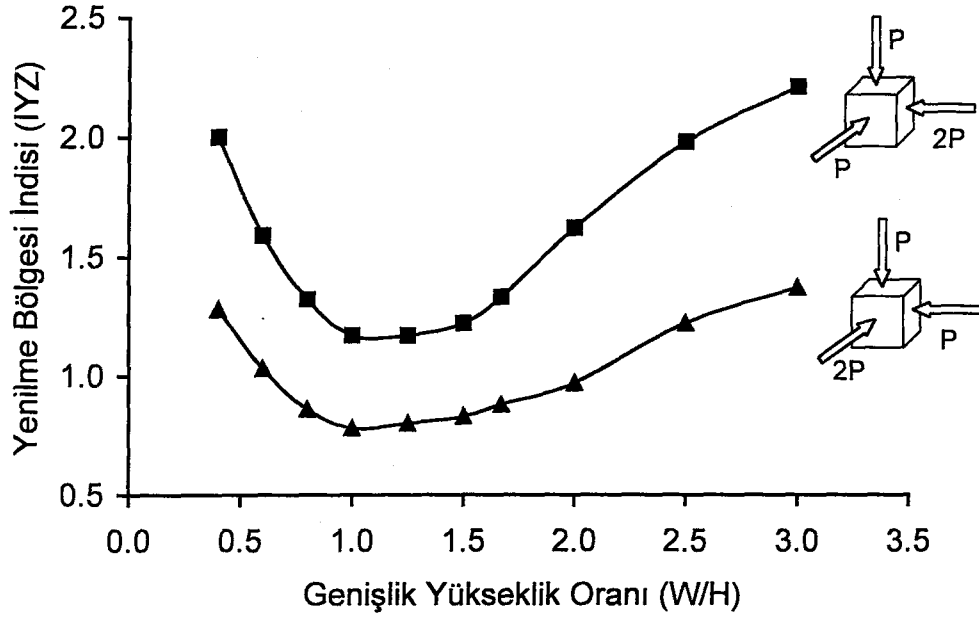
Yatay birincil gerilmenin eksenel birincil gerilmeye eşit olması durumunda ($P_h = P_z$, $k = k_z$), birincil gerilmeler oranının (k), IOZ ve IYZ ile değişimleri araştırılmıştır.



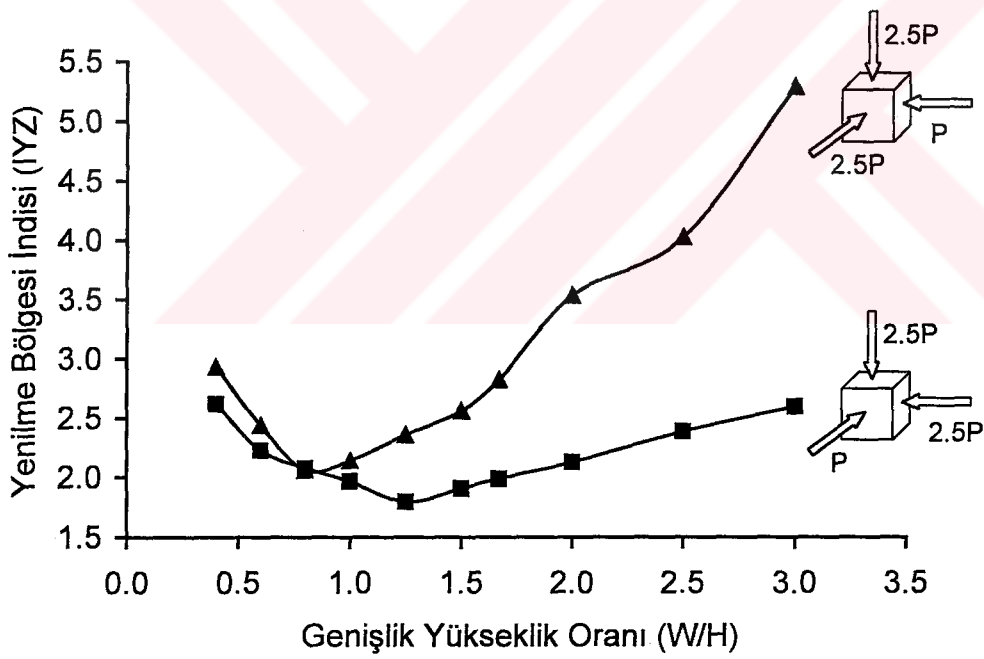
Şekil 3.30 Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$ ve $P_{\max}/P_{\min}=3$) olduğu durumda, kemer tavanlı açıklığın W/H oranı ile IYZ değerlerinin değişimi (üç eksenli sıkışma durumu).



Şekil 3.31 Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_3$ ve $P_{\max}/P_{\min}=3$) olduğu durumda, kemer tavanlı açıklığın W/H oranı ile IYZ değerlerinin değişimi (üç eksenli uzama durumu).

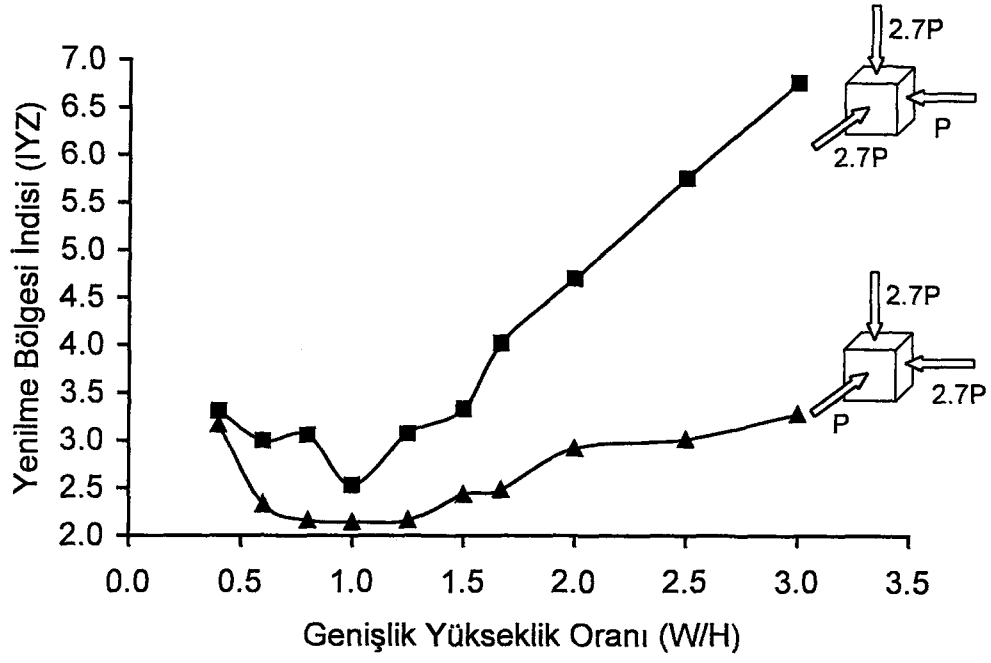


a. $P_{\max}/P_{\min}=2$ olduğu durum

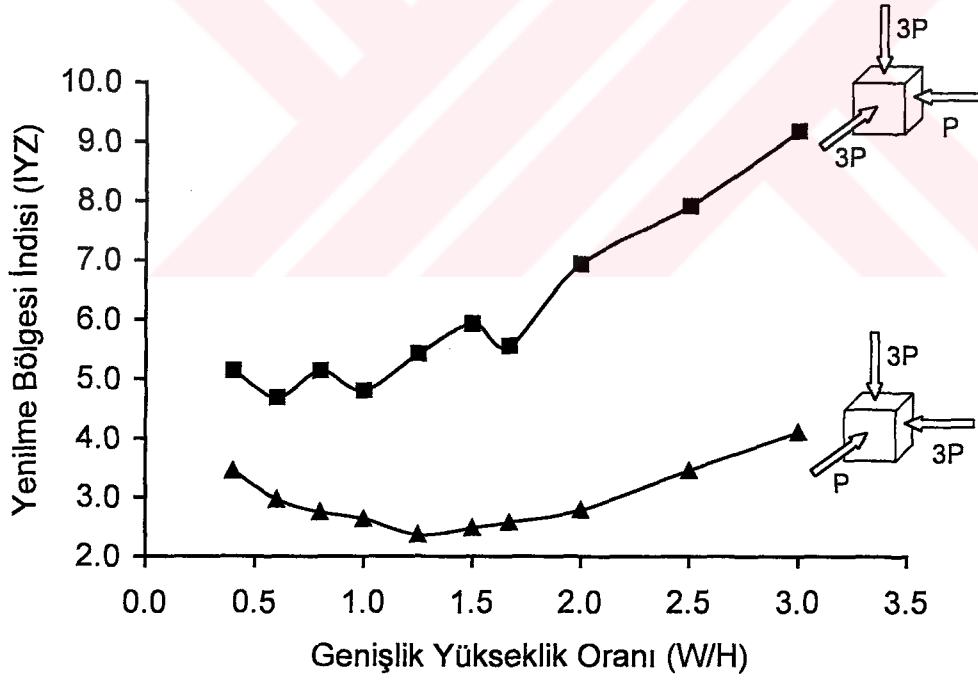


b. $P_{\max}/P_{\min}=2.5$ olduğu durum

Şekil 3.32 Kemer tavanlı açıklık için, $P_{\max}/P_{\min}$ =oranının artışının W/H oranı ve IYZ değerleri ile değişimi (Gerçek et al.'dan [2000] değiştirilerek).



c. $P_{\max}/P_{\min}=2.7$ olduğu durum

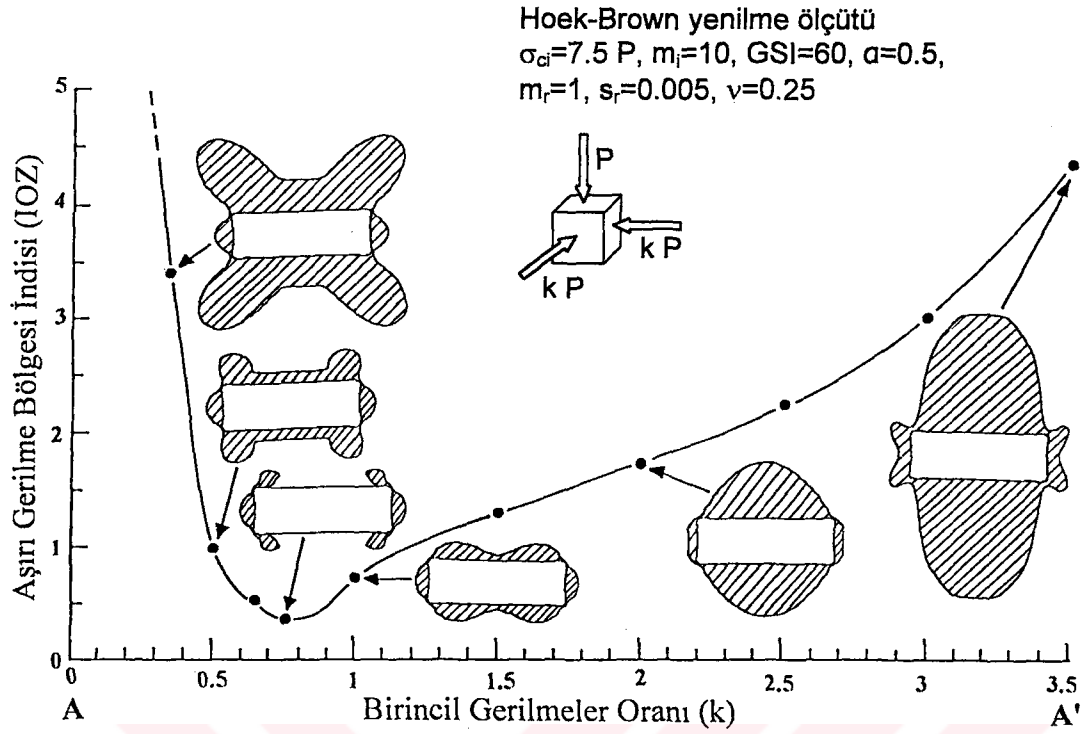


d. $P_{\max}/P_{\min}=3$ olduğu durum

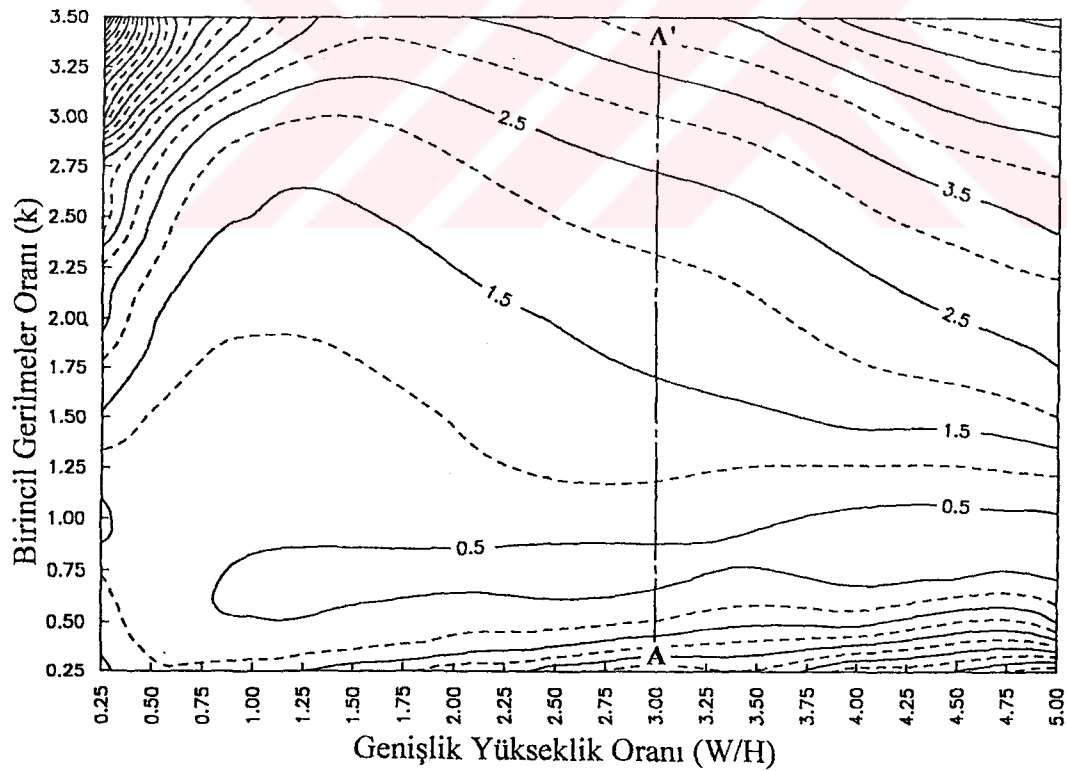
Şekil 3.32 (devam ediyor).

Öncelikle, birincil gerilmeler oranının elastik çözümler ile elde edilen IOZ ile değişimi incelenmiştir. Madencilikte ve atık depolama amacıyla sıkça kullanılan $W/H = 3$ olan dikdörtgen açıklık seçilmiştir. Şekil 3.33'e göre $0.5 < k < 1.3$ değerleri arasında IOZ değerleri düşük, bu sınırlar dışında özellikle yüksektir. Ayrıca, bağımsız iki değişken olarak birincil gerilmeler oranı ve W/H oranının birlikte IOZ'yi ne şekilde etkiledikleri incelenmiştir. Farklı W/H oranları için IOZ değerlerini elde etmek için birincil gerilmeler oranının farklı değerlerinde elastik çözümler yapılmıştır. Sonuçta, $W/H - k$ uzayında eş IOZ değeri eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 3.34). Belirli dayanım değıştirmeleri ($\sigma_{ci} = 3P$, $m_i = 10$ ve $GSI = 70$) için verilen birincil gerilmeler oranında en uygun W/H oranını belirlemek için Şekil 3.34 kullanılabilir. En düşük IOZ değerlerinin sınırladığı alan bir bakıma duraylılığın en iyi olduğu bir vadi görünümündedir. Ayrıca Şekil 3.34'te gösterilen $W/H = 3$ için A-A' kesiti Şekil 3.33'e karşılık geldiği de belirtilmelidir (Gerçek and Geniş, 1996).

Daha sonra, yatay birincil gerilmenin aksel birincil gerilmeye eşit olması durumunda ($P_h = P_z$, $k = k_z$), birincil gerilmeler oranının (k), IYZ ile değişimi araştırılmıştır. Çözümlerinde, birincil gerilme ölçeği katsayısı $P = 9$ MPa; açıklık geometrisi olarak daire, W/H oranları 0.5 ve 2.0 olan dikdörtgen kesit seçilmiştir. Açıklığı çevreleyen kaya kütesinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu ve kayacın elastik kusursuz plastik davranış gösterdiği varsayılmış ve kaya kütesinin dayanım parametreleri, $\sigma_{cm} = 10$ MPa, $\sigma_{tm} = -3$ MPa, $c_m = 2.88$ MPa ve $\phi = 30^\circ$ alınmıştır. İncelenen geometrilerde, düşey birincil gerilmenin yatay birincil gerilmeden büyük olduğu durumlarda ($k < 1$), açıklığın yan duvarlarında daha geniş yenilme bölgesi oluşmaktadır. Düşey birincil gerilmenin yatay birincil gerilmeden daha küçük olduğu durumlarda ($k > 1$), açıklığın tavan ve taban bölgelerinde daha geniş yenilme bölgesi oluşmaktadır.



Şekil 3.33 W/H=3 olan dikdörtgen açıklık çevresinde oluşan aşırı gerilme bölgesine birincil gerilme alanının etkisi (Gerçek and Geniş, 1996).

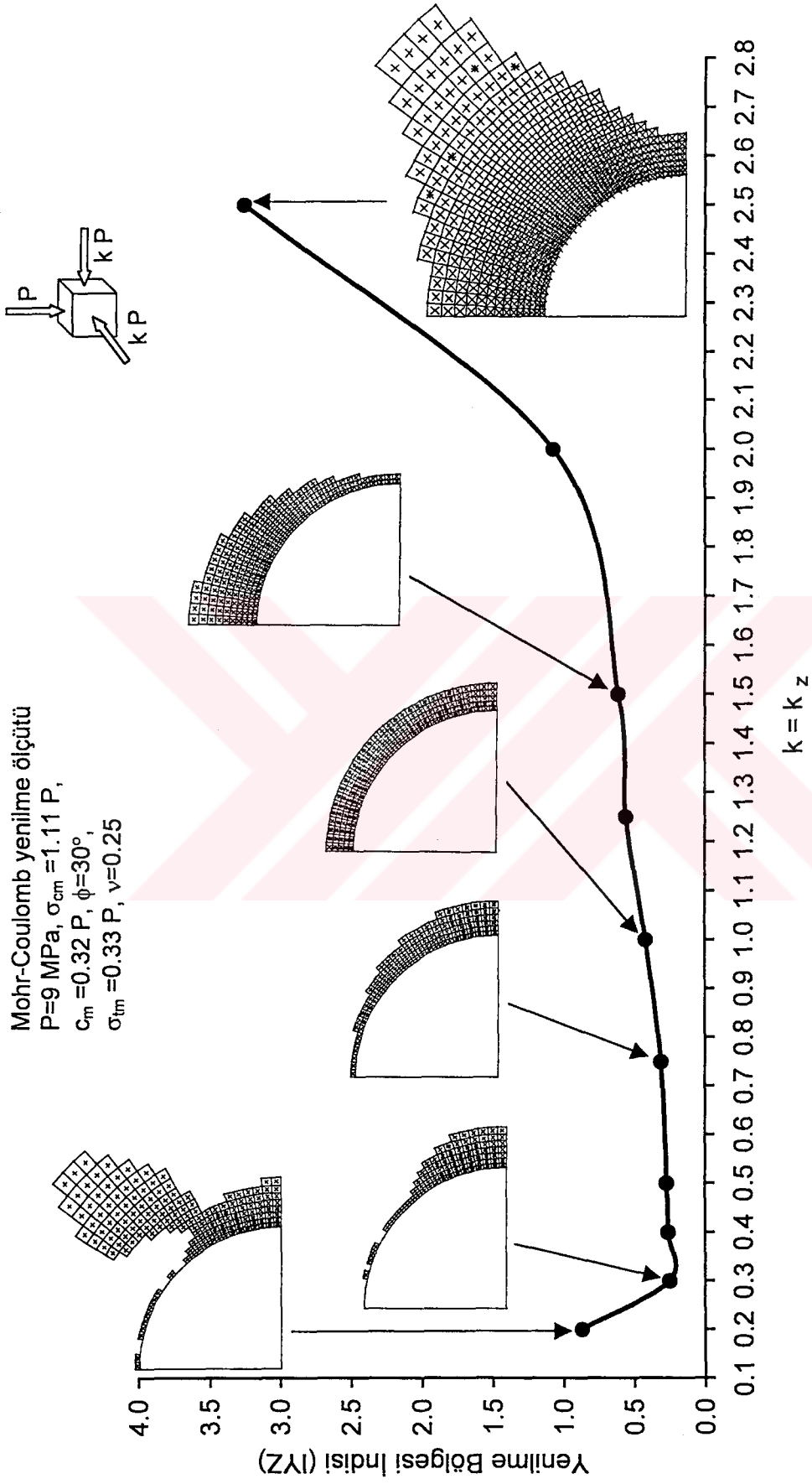


Şekil 3.34 Dikdörtgen açıklıklar için birincil gerilmeler oranı (k) ve genişlik yükseklik oranı (W/H) ile IOZ değişimi (Gerçek and Geniş, 1996).

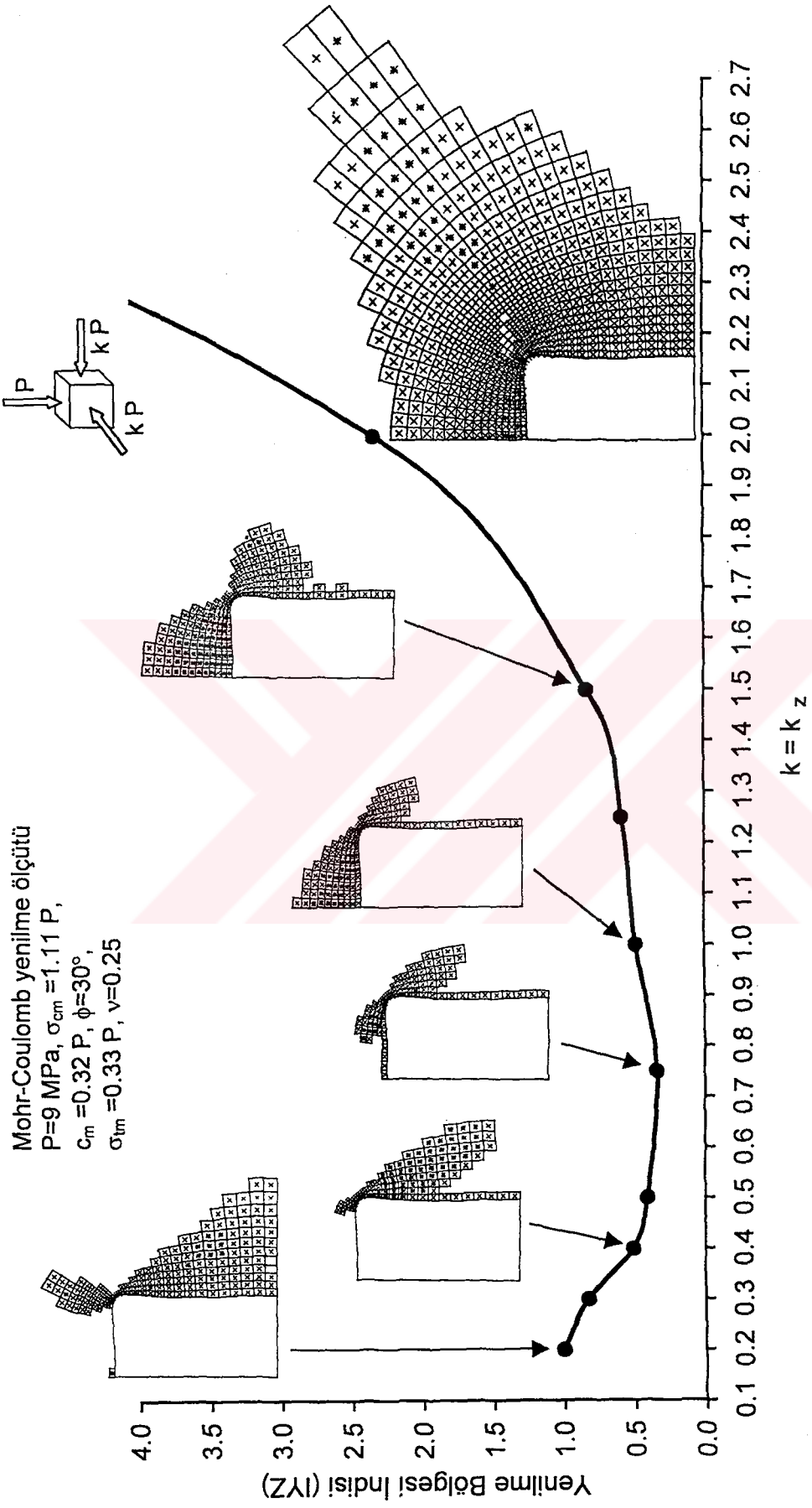
Daire açıklıkta, $0.3 < k < 1.2$; $W/H = 0.5$ olan dikdörtgen açıklıkta $0.4 < k < 1.2$ ve $W/H = 2$ olan dikdörtgen açıklıkta $0.4 < k < 1.0$ değerleri arasında düşük IYZ değerleri elde edilmiştir. Bu sınırlar dışında IYZ yüksek değer almaktadır (Şekil 3.35-3.37).

Detournay and Fairhurst (1982) ve John et. al. (1984) hidrostatik olmayan birincil gerilme alanında, dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi geometrisi ve büyüklüğüne birincil gerilmelerin etkisinin yarı analitik yöntemle açıklanması. Bölüm 2’de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Şekil 2.9’da verilen, birincil gerilme alanına bağlı dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi geometrilerini elde etmek amacı ile bir dizi çözümleme yapılmıştır. Çözümlemelerde; açıklık geometrisi olarak daire ve asal birincil gerilme bileşenlerinden yatay gerilmeler eşit seçilmiştir. Açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu ve kayacın elastik-kusursuz plastik malzeme davranışı gösterdiği varsayılmıştır; kaya kütlelerinin dayanım parametreleri, $\sigma_{cm} = 10$ MPa, $\sigma_{tm} = -3$ MPa, $c_m = 2.88$ MPa ve $\phi = 30^\circ$ alınmıştır. Şekil 2.9’da belirlenen bölgelere ilişkin seçilen birincil gerilme bileşenleri ve B-2 bölgesi için açıklığın yatay ve düşey eksenleri boyunca oluşan yenilme bölgesinin tahmini Çizelge 3.4’te sunulmuştur.

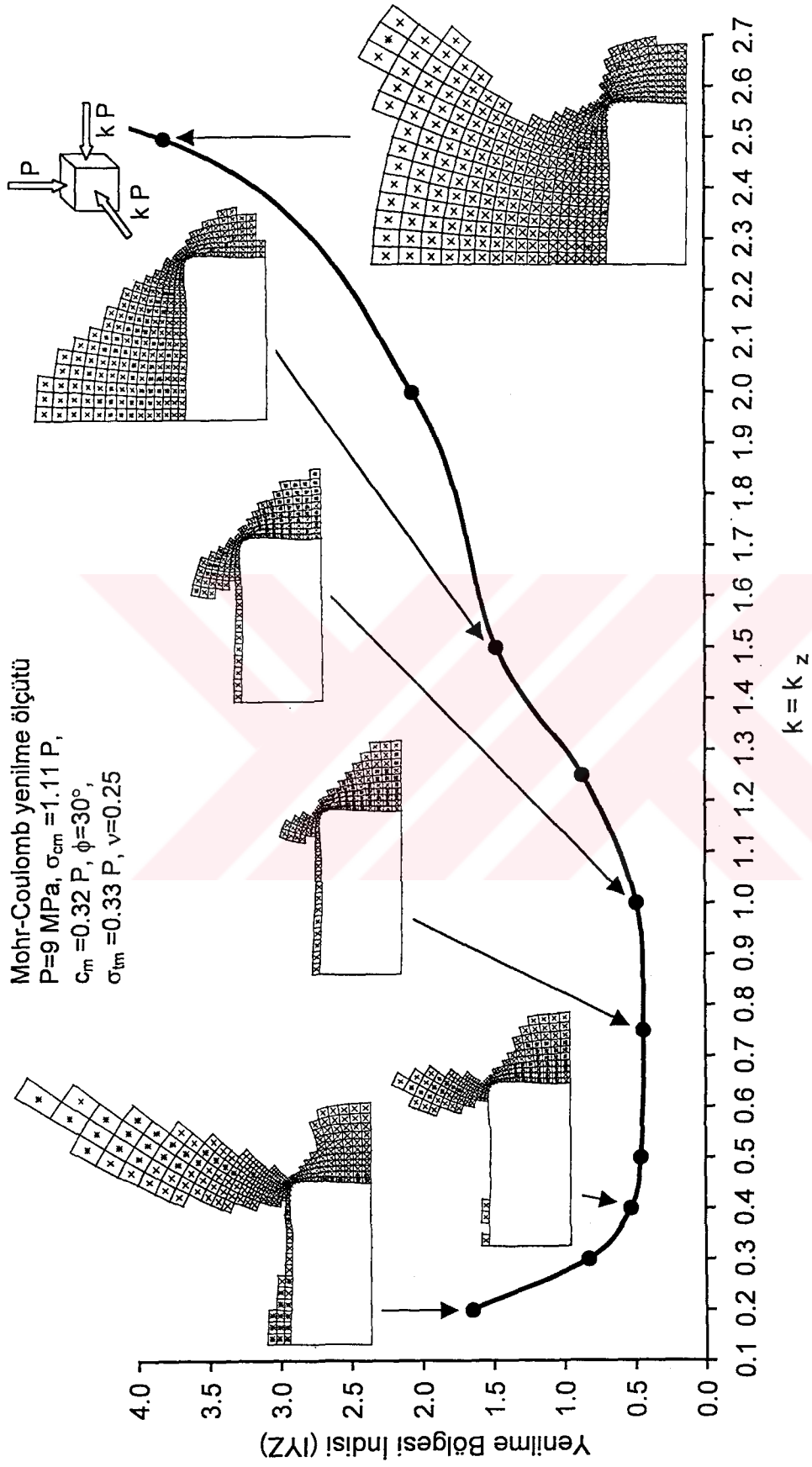
Yapılan çözümleme sonucu elde edilen yenilme bölgelerinin geometrileri Detournay and Fairhurst (1982) tarafından önerilen yenilme bölgesi geometrileri ile çok uyumlu sonuçlar vermiştir. Çözümleme sonucu elde edilen yenilme bölgesi geometrileri Şekil 3.38’de verilmiştir. Şekil 3.38’de gösterilen ve bölgeleri sınırlayan doğruların seçilen dayanım değiştiricilerine (σ_{cm} ve ϕ) göre değişim göstereceği belirtilmelidir. Ayrıca B-2 bölgesindeki birincil gerilme alanında yapılan çözümlemeler sonucu elde edilen yenilme bölgesi kalınlıkları, önerilen



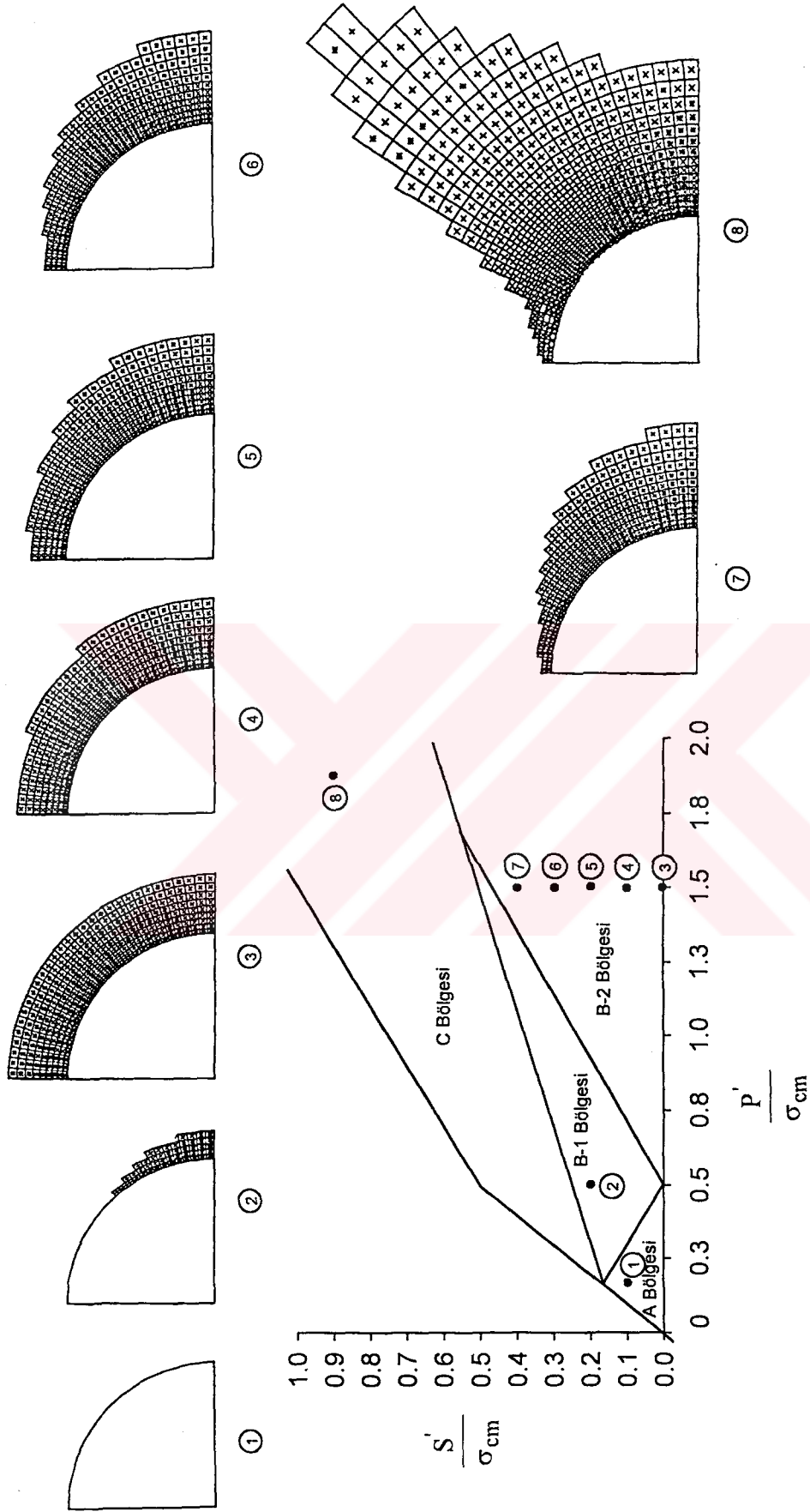
Şekil 3.35 Dairesel açıklık için farklı düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında yenilme bölgesi ve IYZ değerleri.



Şekil 3.36 $W/H=0.5$ olan dikdörtgen açıklık için farklı düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında yenilme bölgesi ve IYZ değerleri.



Şekil 3.37 W/H=2 olan dikdörtgen açıklık için farklı düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında yenilme bölgesi ve IYZ değerleri.



Şekil 3.38 Farklı birincil gerilme alanlarında dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri ($\sigma_{cm} = 10 \text{ MPa}$, $\phi = 30^\circ$).

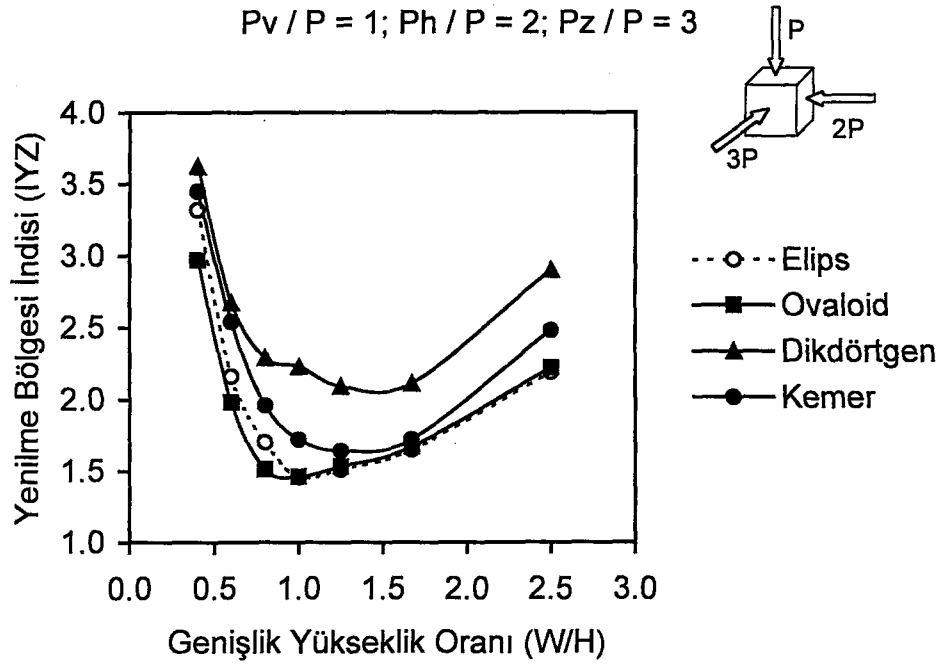
yarı analitik yaklaşımla çok yakın sonuçlar vermiştir. Detournay ve Fairhurst (1982) tarafından önerilen yaklaşımın diğer açıklık geometrilerinde oluşacak yenilme bölgesi geometrisinin şeklinin tahmininde, kaba da olsa, kullanılabilmektedir.

Çizelge 3.4 İncelenen birincil gerilme bileşenleri ve yenilme bölgesi yarıçapları.

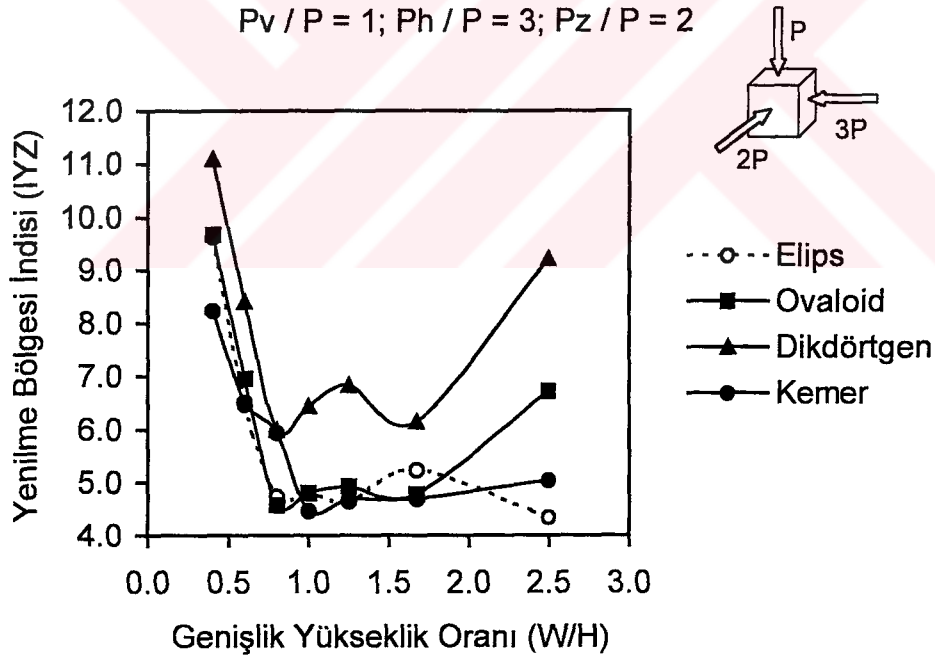
$\frac{P'}{\sigma_{cm}}$	$\frac{S'}{\sigma_{cm}}$	$P_{max}=P_v$ ($P' + S'$) (MPa)	$P_{min}=P_h=P_z$ ($P' - S'$) (MPa)	Sapkınlık m	$\frac{R_{p\ min}}{R}$	$\frac{R_{p\ max}}{R}$	Bölge
1.5	0	15	15	0	1.41	1.41	B-2
1.5	0.1	16	14	0.1	1.35	1.49	B-2
1.5	0.2	17	13	0.2	1.28	1.57	B-2
1.5	0.3	18	12	0.3	1.21	1.65	B-2
1.5	0.4	19	11	0.4	1.14	1.75	B-2
0.5	0.2	7	3	-	-	-	B-1
1.0	0.5	15	5	-	-	-	C
0.2	0.1	3	1	-	-	-	A

3.2.2 Açıklık Geometrisinin Duraylılığa Etkisi

Göz önünde bulundurulan birincil gerilme durumlarından her biri için incelenen açıklık geometrisini kapsayacak şekilde, açıklığın W/H oranı ile IYZ değerlerinin değişimleri anizotropik birincil gerilme alanları için Şekil 3.39-3.41'de; düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanları için de Şekil 3.42-3.43'te sunulmuştur. Bu şekillerin incelenmesiyle ortaya çıkan en belirgin sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

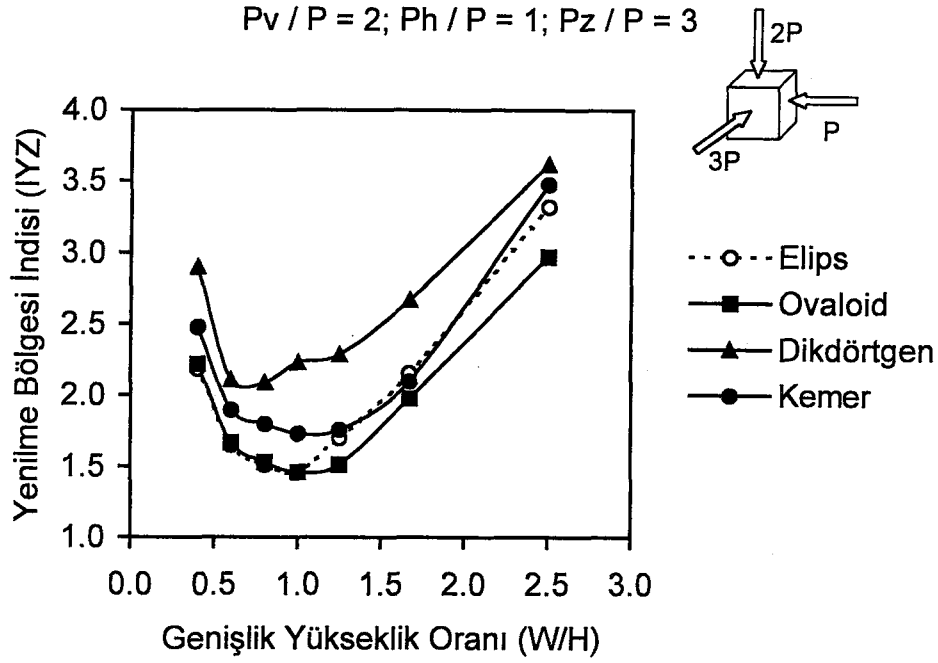


a. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel konumlu

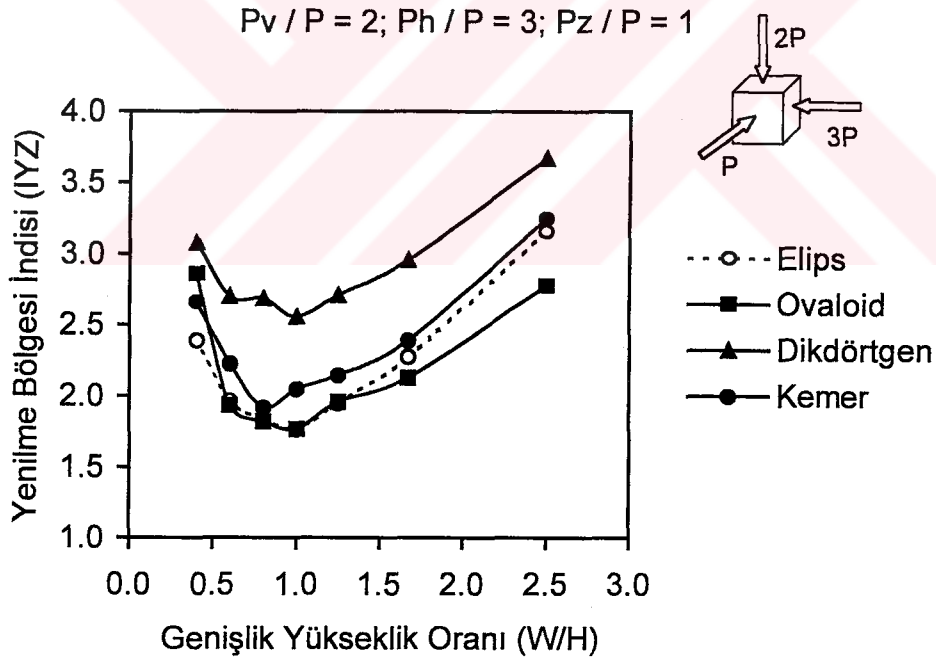


b. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne dik konumlu

Şekil 3.39 Anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme en küçük bileşen ($P_v = P_3$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi (Gerçek ve Geniş, 2000).

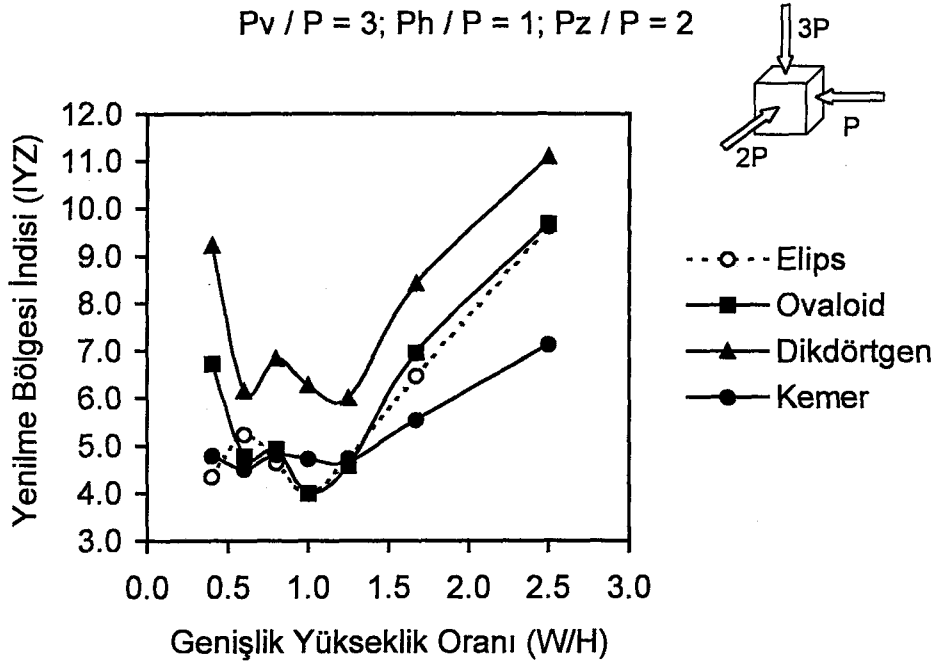


a. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel konumlu

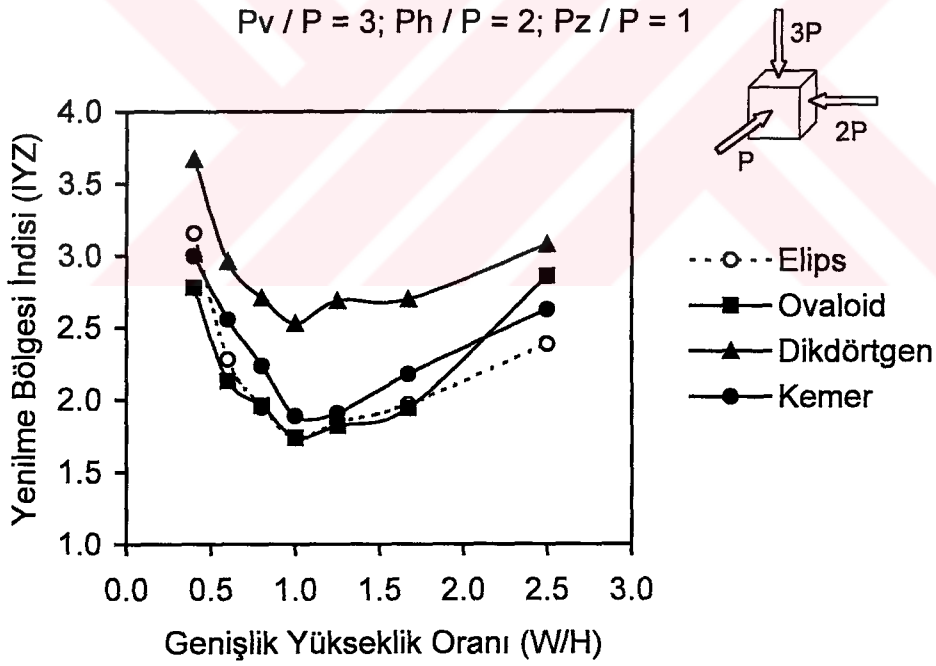


b. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne dik konumlu

Şekil 3.40 Anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme ortanca bileşen ($P_v = P_2$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi (Gerçek ve Geniş, 2000).

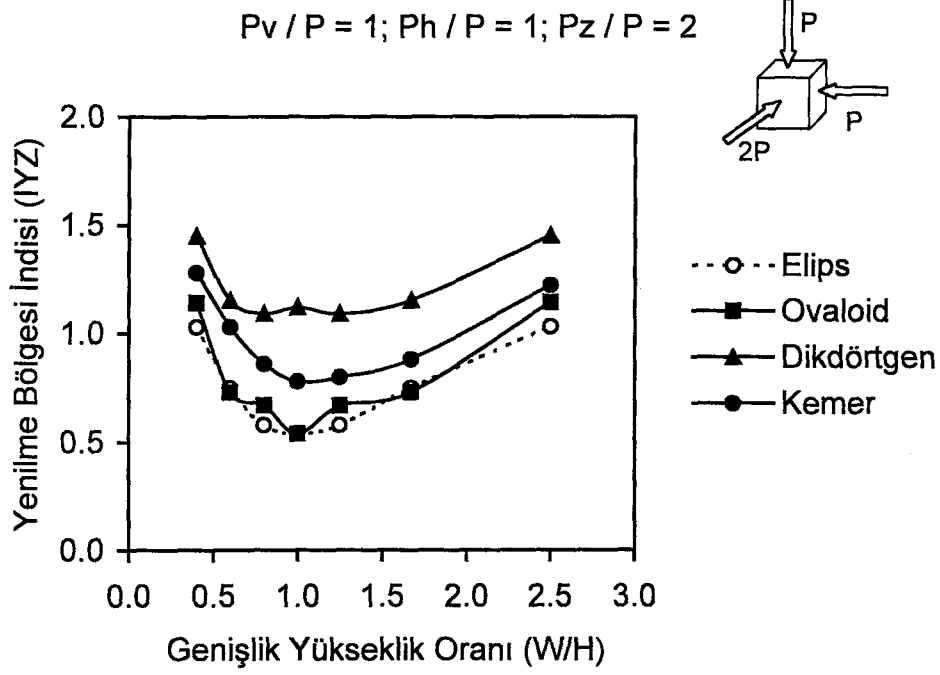


a. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel konumlu

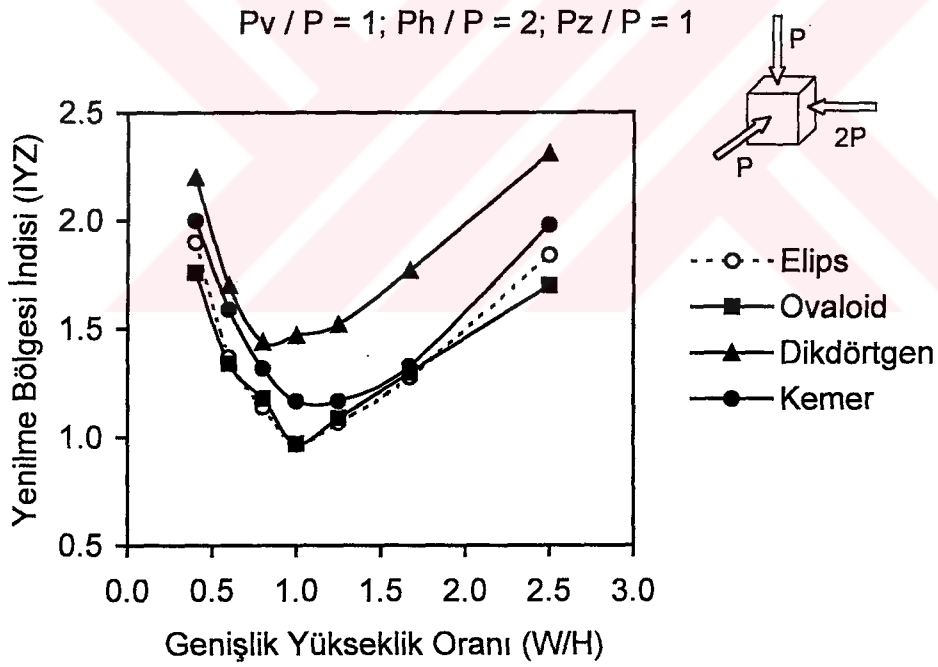


b. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne dik konumlu

Şekil 3.41 Anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme en büyük bileşen ($P_v = P_1$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi (Gerçek ve Geniş, 2000).

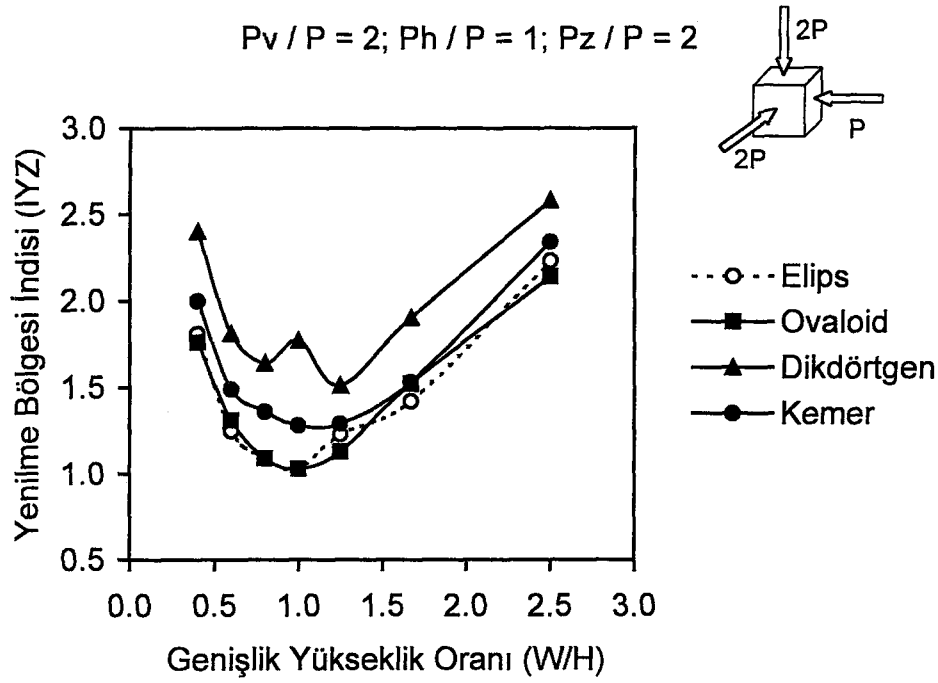


a. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel konumlu

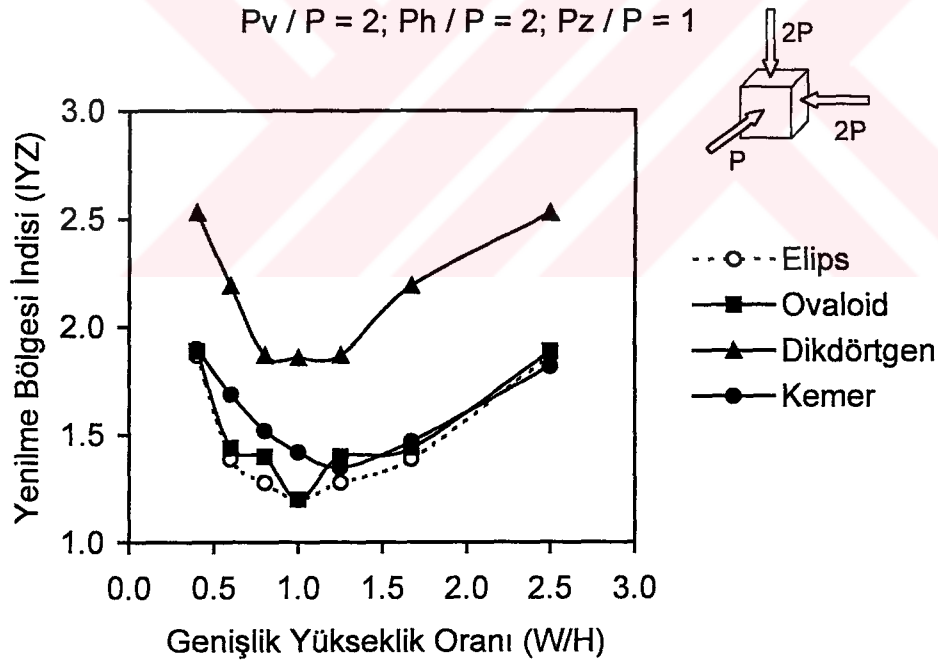


b. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne dik konumlu

Şekil 3.42 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme en küçük bileşen ($P_v=P_3$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi.



a. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel konumlu



b. Açıklığın uzun eksenini yatay birincil gerilmelerden büyüğüne dik konumlu

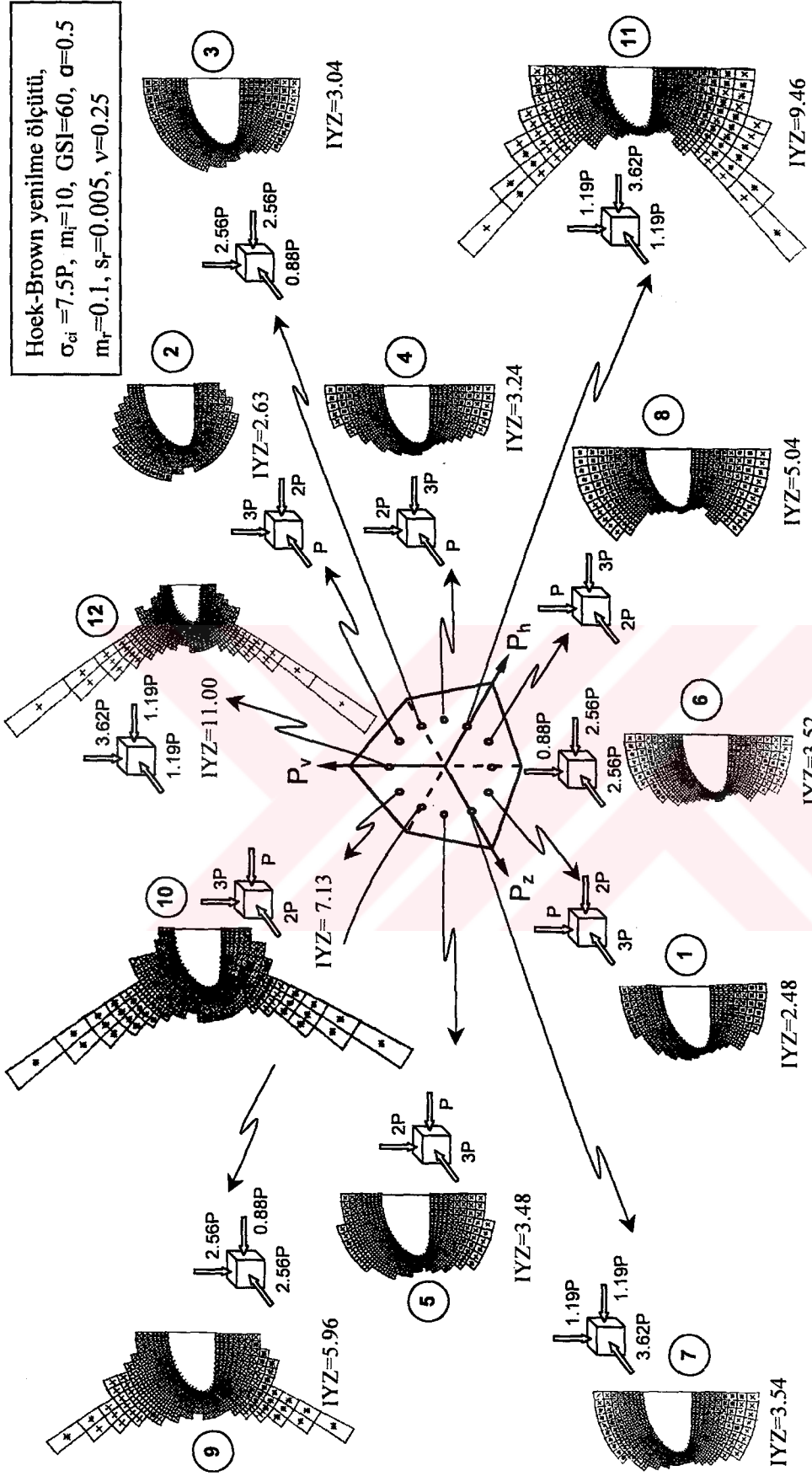
Şekil 3.43 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilme en büyük bileşen ($P_v = P_1$) olduğu durumda, IYZ değerlerinin W/H oranı ile değişimi.

1. İncelenen tüm açıklık şekilleri arasında, duraylılık açısından en kötü sonuçları dikdörtgen kesitli açıklıklar vermiştir. Bu geometrinin olumsuzluğunun nedeni, açıklığın köşelerinin (eğrilik yarıçapının küçük olduğu yerler) olmasından çok düz kenarlarının varlığıdır. Beklendiği gibi, köşelerdeki yenilmeler dar bir bölgeyle sınırlı kalırken, düz kenarların (tavan, taban ve yan duvarlar) arkasındaki yenilme bölgeleri daha geniştir (Gerçek ve Geniş, 2000). Genellikle, W/H oranı 1'den farklı değerlerde ise IYZ değerleri hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Buna rağmen, bazı birincil gerilme durumlarında ve açıklık geometrilerinde, en uygun W/H oranı belirli bir değer arasında da elde edilebilmektedir. Örneğin, düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen olması ve açıklığın uzun ekseninin en büyük birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması durumunda, dikdörtgen açıklık için en uygun W/H oranının 0.5 - 1.75 arasında seçimi duraylılık açısından olumlu olacaktır.
2. Kemer tavanlı ve düz tabanlı kesitler, her zaman olmamakla birlikte, genellikle elips ya da ovaloid kesitlere göre biraz daha olumsuz bir duraylılık görüntüsü vermektedir (Gerçek ve Geniş, 2000).
3. İncelenen tüm birincil gerilme koşullarında ve hemen hemen tüm açıklık şekillerinde en uygun W/H oranı 1'dir.

3.2.3 Genel Değerlendirme

Bu bölümde, yeraltı açıklıklarının birincil gerilmelerin doğrultularına göre duraylılık açısından en uygun konumunun belirlenmesi amacıyla bir dizi değiştirgesel çalışma yapılmıştır. Yukarıda elde edilen bulgular burada tekrarlanmayacaktır. Son olarak, anizotropik ve düzlemsel anizotropik birincil

gerilme alanlarında $W/H = 2.5$ olan kemer tavanlı açıklık geometrisi çevresinde oluşan yenilme bölgesi geometrisi ve IYZ değerleri elde edilmiştir. İncelenen 12 ayrı birincil gerilme durumu, asal gerilmeler uzayındaki eş yönlü yenilme ölçütleri açısından birbirine eşittir. Söz konusu açıklık için anizotropik birincil gerilme alanlarında yapılan çözümlemeleri daha önceden sunulmuştur. İncelenen birincil gerilme durumları ve açıklık çevresinde elde edilen yenilme bölgeleri Şekil 3.44'te gösterilmektedir. Şekil 3.44'te, IYZ değerlerinin en küçüğünden (duraylılık açısından en iyi durum), en büyüğüne (duraylılık açısından en kötü durum) kadar, numara (1'den 12'ye kadar) verilmiştir. Duraylılık açısından en iyi durum; anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen olması ve açıklığın uzun ekseninin en büyük birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması ($P_v = P$, $P_h = 2P$, $P_z = 3P$) ile oluşmuştur. Duraylılık açısından en olumsuz durum ise düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen olması ve yatay gerilmelerin en küçük bileşen olduğu durumda ($P_v = 3.62P$, $P_h = P_z = 1.19P$) oluşmaktadır. Şekil 3.44'te duraylılık açısından verilen sıralama en iyi ve en olumsuz durumlar dışında, farklı açıklık geometrileri ve W/H oranları için değişebilmektedir.



Şekil 3.44 Anizotropik ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda, $W/H=2.5$ olan kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi ve IZY değerleri.

BÖLÜM 4

YERALTI AÇIKLIKLARININ DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

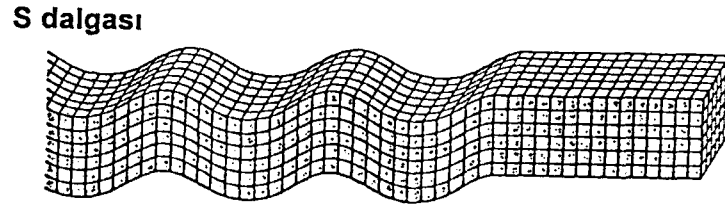
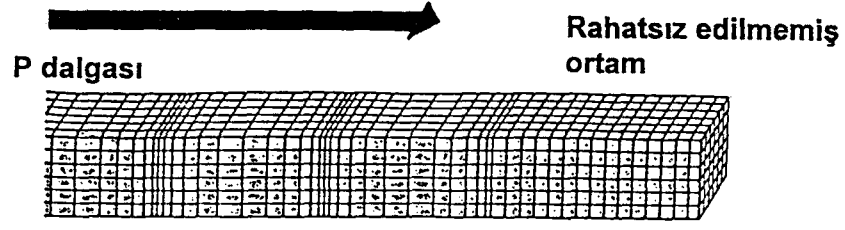
Yeraltı açıklıklarının statik yükler altında gösterecekleri duraylılık performansları yanında, dinamik yükler altındaki davranışları da önem taşımaktadır. Bu bölümde, literatür araştırması sonucu elde edilen bilgiler sunulmaktadır. Öncelikle, sismik dalgaların özellikleri tanıtılmıştır. Daha sonra, arazi hareketinin yeraltı yapılarına etkileri ve yeraltı yapılarında deprem ile oluşan hasarlar ile ilgili bilgiler verilmiştir. Son olarak da, yeraltı açıklıklarının tasarımında, sismik tasarım önerileri ve hasarın azaltılmasına ilişkin bazı bilgiler verilmiştir.

4.1 JEOLJİK ORTAMDA SİSMİK DALGA YAYILIMI

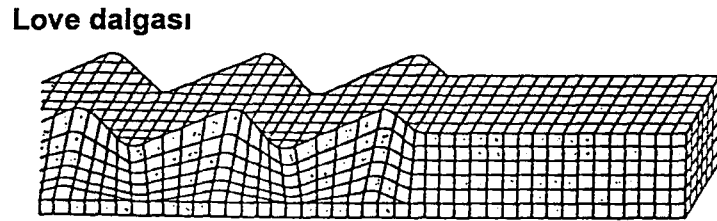
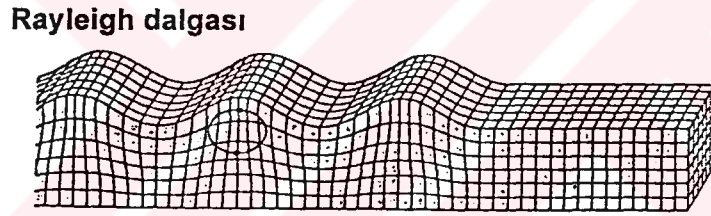
Sismik dalgalar başlıca iki sınıfta toplanabilir. Bunlar;

1. kayaç içerisinde ilerleyen cisim dalgaları,
2. arazi yüzeyine yakın veya yüzeyinde ilerleyen yüzey dalgalarıdır.

Cisim dalgaları, P dalgaları (dilatasyon veya basınç dalgaları) ve S dalgaları (şekil bozucu veya kesme dalgaları) olarak ikiye ayrılırlar. Parçacık hareketi, P dalgasında yayılma doğrultusuna paralel, S dalgasında ise diktir. Bu hareketler Şekil 4.1.a'da gösterilmiştir. Dalgaların yayılma hızları ortamın fiziksel ve



a. Cisim dalgaları



b. Yüzey dalgaları

Şekil 4.1 Deprem dalgalarının oluşturduğu arazi hareketleri (Bolt, 1993).

geometrik özelliklerine bağlıdır. Örneğin; sonsuz, türdeş (homojen), eşyönlü (izotropik) ve elastik bir ortamda P dalga hızı,

$$C_p = \sqrt{\frac{(1-\nu) \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot \rho}} \quad (4.1.a)$$

benzer koşullarda S dalga hızı,

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu) \cdot \rho}} \quad (4.1.b)$$

şeklinde verilmektedir (Brady, 1993). Burada, ρ , ortamın yoğunluğudur. P dalgasının yayılma hızı, yeryüzünde 1.5 - 8 km/s arasındadır. S dalgası genellikle P dalgasının hızının % 60 - % 80'i kadardır (Brady and Brown, 1993).

Yüzey dalgalarının en önemli türleri Rayleigh dalgaları ve Love dalgalarıdır. Çoğunlukla yüzeyde oluşan en yaygın dalga Rayleigh dalgasıdır. Rayleigh dalgasının yayılma hızı (C_r) aşağıda verilen eşitliğin pozitif gerçektir köküdür (Brady, 1993; Brady and Brown, 1993);

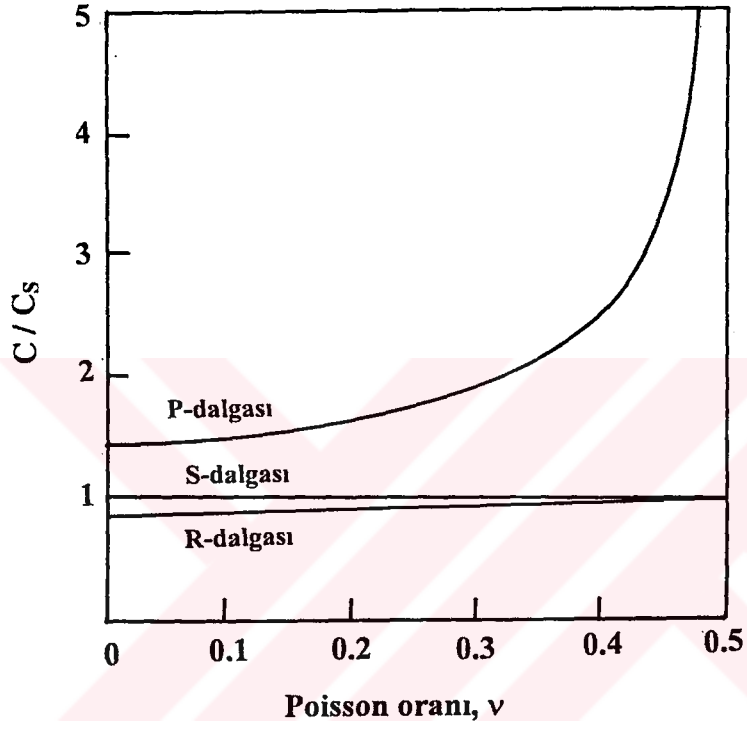
$$4 C_s^3 \cdot [(C_p^2 - C_r^2) (C_s^2 - C_r^2)]^{1/2} = C_p (2C_s^2 - C_r^2)^2 \quad (4.2)$$

$\nu = 0.25$ olduğu durumda Rayleigh dalgasının yayılma hızı (C_r) ile P ve S dalgalarının yayılma hızları arasında aşağıdaki eşitlik geçerlidir (Brady, 1993).

$$C_r = 0.92 C_s = 0.53 C_p \quad (4.3)$$

Rayleigh dalgaları, eliptik ve gittikçe kötüleşen parçacık hareketlerini oluşturmaktadır. Diğer bir ifadeyle parçacık hareketinin yatay ve düşey bileşenleri dalga yayılımı düzleminde oluşmaktadır. Love dalgaları, yatay ve daha çok yayılma doğrultusuna dik doğrultuda parçacık hareketi oluşturmaktadır (Şekil 4.1.b). Rayleigh dalgası yayılımı, yaklaşık S dalgası hızında olmasına rağmen, Love dalgası yayılma hızı, yüzey tabakasındaki ve alt tabakadaki S dalgalarının yayılma hızları arasındaki bir değerde oluşmaktadır. Yarı sonsuz, izotropik, elastik bir ortamda P, S ve Rayleigh dalgalarının göreceli hızları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Love dalgaları türdeş bir ortamda oluşmadıkları için Şekil 4.2’de gösterilmemiştir. Kaynak bölgesinden yayılan sismik dalgalar, geçiş yolu üzerindeki geometri ve malzeme özelliklerinden etkilenmektedir. P ve S dalgaları geçiş yolu boyunca farklı malzeme özelliklerine sahip tabakaların ara yüzeyleriyle karşılaştıklarında yansımakta veya kırılarak yansımaktadır. Bu dalgalar arasındaki farklılık nedeniyle enerji kaynağından çıkan dalgaların genliklerinde bölgesel bir artış veya azalışla sonuçlanabilmektedir. Geçiş yolundaki diğer düzensizlikler (yüzey topoğrafyası, süreksizliklerdeki ve malzeme özelliklerindeki değişimler, vb.) yansıma ve kırılıp yansıma olaylarını büyük bir karmaşıklığa sokmaktadır. Yüzey topoğrafyası ve yüzeye yakın tabakalanma da yüzey dalgalarının özelliklerini etkilemektedir (John and Zahrah, 1987).

Fayların oluşmasında yer kabuğundaki sıkışma ve genişleme kuvvetleri en önemli rolü oynamaktadır. Bu tür kuvvetler kırıklar boyunca kaya kütlelerini hareket ettirmektedir. Ancak kırıklar boyunca kaya kütlelerinin hareket ettirilemediği bazı bölümlerinde yoğun enerji birikimi oluşmaktadır. Yerin derinliklerinde biriken enerjinin açığa çıkması ile oluşan yer sarsıntıları “deprem” olarak adlandırılmaktadır. Biriken enerjinin açığa çıkması sırasında yeni faylar oluşabileceği gibi, var olan faylar da tekrar harekete geçebilmektedir. Depremlerin



Şekil 4.2 Yarı elastik ortamda, Poisson oranı ve P, S ve Rayleigh (R) dalgalarının yayılma hızları arasındaki ilişki (Richart et al., 1970; John and Zahrah, 1987'den).

çoğu yer kabuğunun 25 - 30 km derinliğine kadar olan kısmı içinde oluşmaktadır. Ancak okyanus kabuğunun kırılarak yerin içerisine daldığı yerlerde (yitim zonu) 350 - 400 km'ye kadar olan derinliklerde de deprem odağı oluşabilmektedir (Atabey, 2000).

Depremler oluşumlarına göre; tektonik, volkanik, çöküntü veya yapay depremler şeklinde sınıflandırılabilir. Tektonik depremler yeni fay oluşumu veya mevcut fayların yerdeğiştirmesi ile ilgilidir. Volkanik depremler volkan patlamaları ile oluşmaktadır. Çöküntü depremleri heyelan ve bir açıklığın çökmesi olaylarıyla ilintilidir. Yapay depremler ise kimyasal veya nükleer maddelerin patlatılmasıyla ilintilidir. Tektonik aktivite ile ilgili sismik ölçütler kısaca aşağıda tartışılmıştır. Diğer deprem çeşitleri benzer şekilde arazi hareketlerini elde etmek için sayısallaştırılabilir (Adhya, 1989). Sismik girdi ölçütüne uygun deprem ve arazi hareketi karakteristikleri; deprem boyutu, arazi hareketinin şiddeti, frekans içeriğı ve şiddetli sarsıntının süresidir (John and Zahrah, 1987).

4.1.1 Deprem Büyüklüğü

Mühendislikte depremin ölçüsü tipik olarak onun büyüklüğü ile temsil edilmektedir. Günümüzde bir çok büyüklük ölçekleri kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan büyüklük ölçekleri; yerel büyüklük (Richter büyüklüğü) (M_L), yüzey dalgası büyüklüğü (M_S), cisim dalga büyüklüğü (M_B) ve moment büyüklüğü (M_W)'dür. Bu ölçeklerin tanımı ve kullanım alanları Housner ve Jennings (1982) tarafından verilmiştir (Çizelge 4.1). Moment büyüklüğü, kaynak mekanizmanın fay hareketlerini içerdiği yerlerde oluşan depremlere ve kaya patlamalarına uygulanabilir (Brady, 1993). Deprem büyüklüğü, depremler ile ortaya çıkan enerji, fay ayrılma mesafesi, şiddetli hareketten etkilenen alan ve en büyük fay

yerdeğiştirmesi ile ilişkilidir (John and Zahrah, 1987). Tipik olarak büyüklük, hem gerekircilik (deterministik) hem de olasılık tarzında, genel veya bir bölgeye ait büyüklük ve fay ayrılma mesafesi arasındaki eşitliklerin kullanımıyla tahmin edilebilmektedir (Adhya, 1989).

Çizelge 4.1 Deprem büyüklüklerinin tanımı ve uygulama yerleri (Housner and Jennings, 1982; Adhya, 1989'dan).

Büyükölük	Tanımlama	Uygulama
Yerel (M_L) (Richter)	Sağlam arazi üzerinde ve kaynaktan 100 km uzaklıkta Wood-Anderson sismogramında μ m cinsinden ölçülen en büyük genliğin logaritması	Orta dereceli depremin boyutunu tanımlamada kullanılır. Diğer büyüklük ölçeklerinden, hasar veren arazi hareketleri için oldukça yakın ilişkilidir.
Yüzey dalgası (M_S)	20 s periyotlu yüzey dalgalarının en büyük genliğinin logaritması	Büyük depremlerin boyutunu tanımlamada kullanılır.
Cisim dalgası (M_B)	1 s periyotlu P dalgasının en büyük genliğinin logaritması	Güçlü yüzey dalgaları üretmeyen derin odaklı, büyük depremlerin boyutunu tanımlamada kullanılır.
Moment (M_W)	Sismik moment ile ilgili fay ayrılmasıyla ortaya çıkan toplam elastik birim şekil değiştirme enerjisi ile ilişkili	Farklı fay uzunluklarının çok büyük sismik iki olay arasındaki farkın ayırt edilmesinde kullanılır.

4.1.2 Arazi Hareketinin Şiddeti ve Frekansı

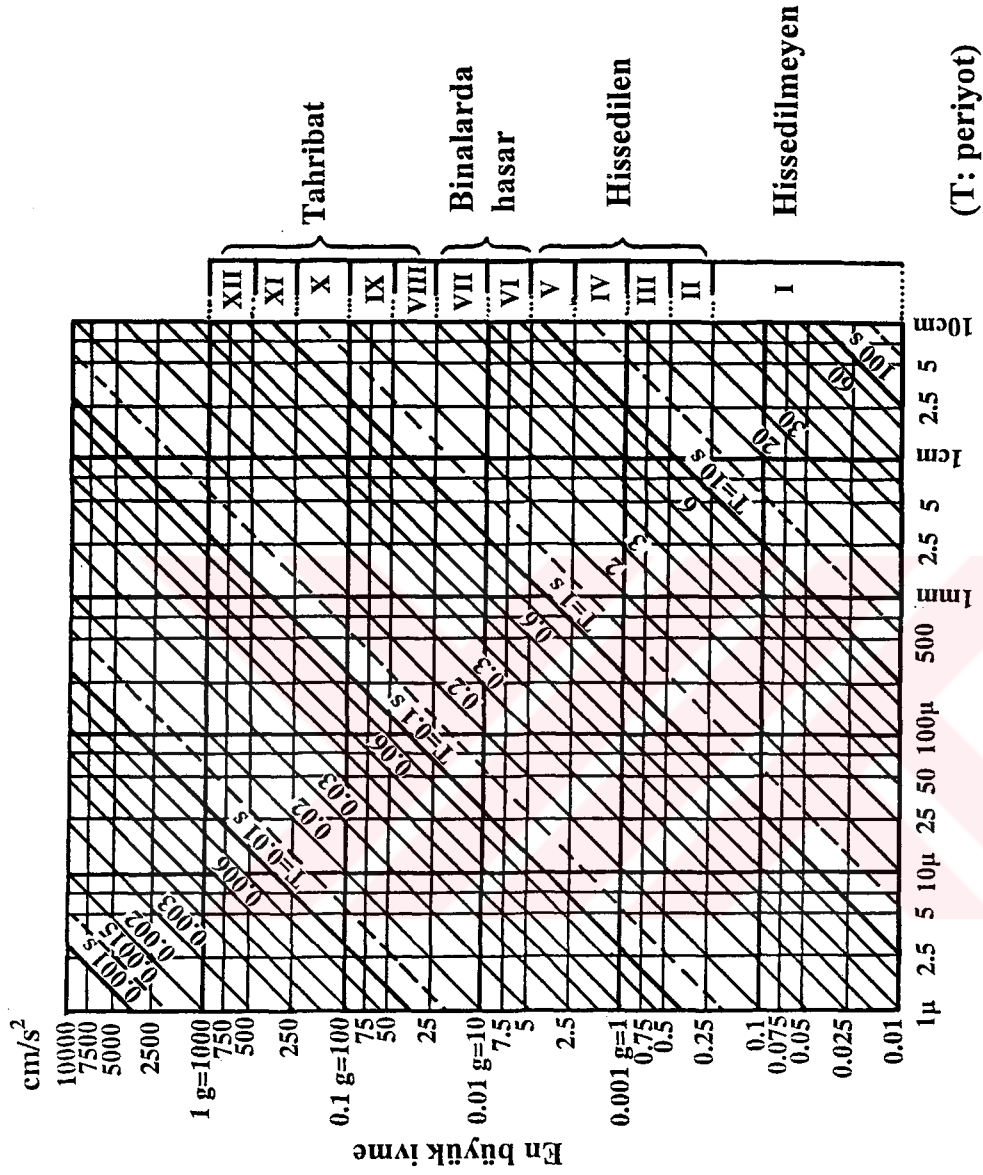
Arazi hareketinin şiddeti niteliksel ve niceliksel ölçümlerle açıklanabilmektedir. Niteliksel ölçümler, gözlenen deprem hareketlerinin insanlar, yapılar ve diğer bileşenler üzerine etkilerine dayanmaktadır. Çeşitli şiddet ölçeklerine örnek; düzenlenmiş Mercalli, Rossi-Forel ve Arias ölçekleri verilebilir. En iyi bilinen

şiddet ölçeği düzenlenmiş Mercalli ölçeğidir. I'den (yalnızca duyarlı aletlerle tespit edilebilir, $M=1-2$) XII'ye (tamamıyla hasar, gözlenen en büyük $M=8.6$) kadar sınıflandırılmıştır (Vladut, 1993). Niceliksel ölçümler zamana bağlı olarak kaydedilen arazi hareketlerinden doğrudan elde edilebilen parametrelere karşılık gelmektedir. En büyük ivme ve en büyük hız deprem tasarımlarında kullanılan deşğırtirgelerden bazılarıdır (Adhya, 1989). Arazi hareketinin frekans içeriğini belirlemek için frekans spektrumu gerekmektedir. Oldukça yaygın kullanılan frekans spektrumları, “tepki sepektrumu” ve “Fourier genlik sepektrumu” dur (Ohsaki, 1976).

Depremlerde, arazi ivmesi, hızı ve yerdeğırtirme değeri büyük ölçüde dalga hareketinin frekansına bağıdır. Yüksek (10 Hz'den büyük) frekanslı dalgalar, düşük frekanslı dalgalara göre, daha yüksek ivme değeri ve daha düşük yerdeğırtirme değeri neden olmaktadır. Düşük frekanslı dalgalar düşük ivme değeri ve göreceli olarak büyük hız ve yerdeğırtirme miktarlarına sahiptir (Bolt, 1993). Şekil 4.3'te düzenli sarsıntının neden olduğı en büyük yer ivmesi, genliğı ve periyodu arasındaki ilişkiler ile Mercalli şiddeti ölçeğı gösterilmiştir. Şekil 4.3'te üç grup doğru kesişmektedir. Yatay doğrular eşit en büyük ivmeleri, düşey doğrular eşit genlikleri ve çapraz doğrular eşit periyotları göstermektedir. Yüksek frekanslı ve çok küçük genlikli depremlerin şiddeti yüksek olmaktadır. Buna karşılık düşük frekanslı depremlerin hasar yapabilmesi için yüksek genliğe sahip olması gerekmektedir (Pamir, 1960).

4.1.3 Şiddetli Hareketin Süresi

Şiddetli hareketin süresi, yapının tepkisini etkilemektedir. Verilen bir arazi hareketi kaydında, şiddetli hareketin süresini sayısallaştırmak için oldukça yaygın



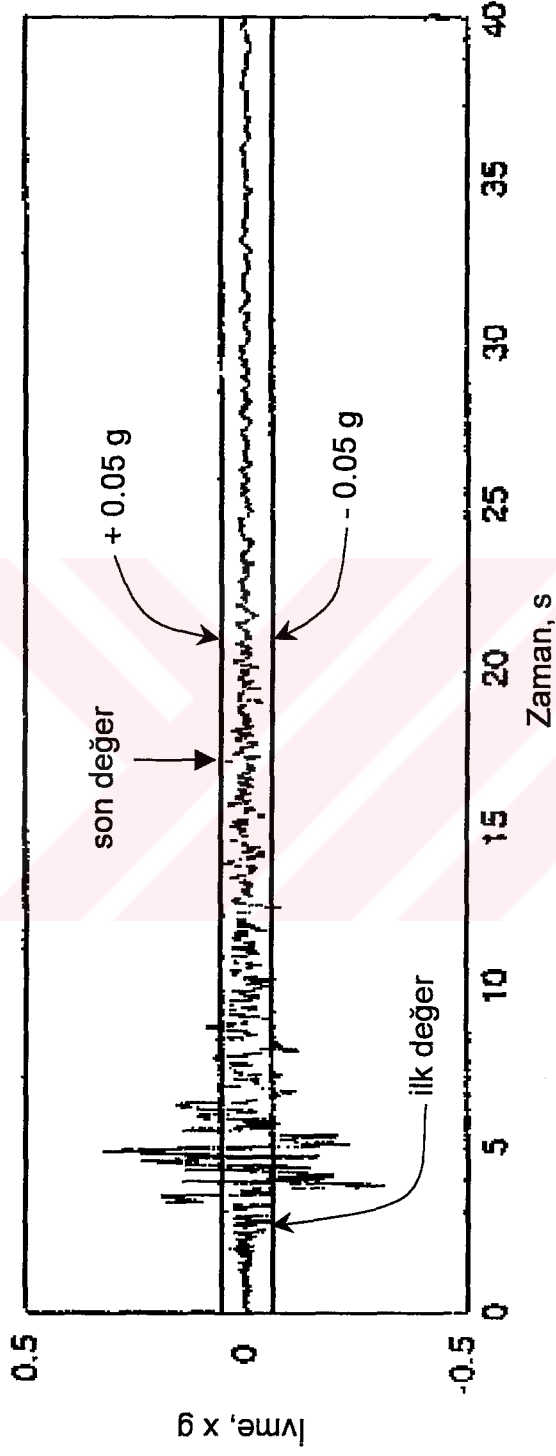
Şekil 4.3 Arazi ivmesi, periyodu ve yerdeğiştirme arasındaki ilişki (Pamir, 1960).

kabul görmüş bir yaklaşım bulunmamaktadır (Adhya, 1989). Buna karşılık, arazi hareketinin süresinin belirlenmesi amacıyla en çok kullanılan iki yaklaşım bulunmaktadır. İlk yaklaşım, ivmenin mutlak genliği yoluyla sürenin belirlenmesidir. İvme değerinin 0.05 g'ye eşit olan ilk ve son genlikleri arasında kalan süre deprem süresi olarak kabul edilmektedir (Şekil 4.4) (Kramer, 1996). Bu yaklaşım, arazi ivmesinin yıkıcı olabileceği gösteren deneyimlere dayanmaktadır. İkinci yaklaşım, ivmenin göreceli genliği ile sürenin belirlenmesidir. Deprem süresi; ivme değerinin $a/2$, $a/3$ veya $a/\exp(1)$ 'e eşit veya daha büyük ilk ve son genlikleri arasında kalan süre şeklinde tanımlanmaktadır (Wang and Law, 1994).

4.2 ARAZİ HAREKETİNİN YERALTI YAPILARINA ETKİSİ

Kayada oluşturulan yeraltı yapıları, zeminde oluşturulan yapılardan oldukça farklılık göstermektedir. Genelde yeterli sağlamlıktaki kaya daha geniş açıklıklara olanak tanımakta ve tahkimat gerektirmemekte veya çok az gerektirmektedir. Dinamik yüklemeler için yenilme hesaplamalarında tünel eksenine dik ve tünel eksenine paralel sismik dalga yayılımları gözönünde bulundurulmalıdır. Tünel eksenine dik dalga yayılımları açıklık çevresindeki gerilmelerde, dinamik gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Analizler, iki boyutlu düzlem birim şekil değiştirme problemi olarak modellenebilmektedir. Tünel eksenine paralel dalga yayılımları eksenlerin açılmasına; kaya düşmelerine neden olabilecek eksenel ve eğrisel birim şekil değiştirmelere neden olmaktadır. Tünel eksenine paralel sismik dalga yayılımları için gerilme analizleri üç boyutlu modelleri gerektirmektedir (Adhya, 1989).

Kaya kütlelerinin sismik veya patlayıcı madde ile oluşan geçici yüklemelerinden dolayı oluşan gerilme dağılımı hem dinamik hem de yalancı statik olabilmektedir.



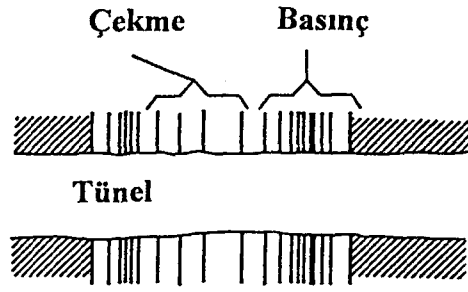
Şekil 4.4 İvme değişiminin ± 0.05 g değerleri esas alınarak deprem süresinin belirlenmesi (Kramer, 1996).

Göz önünde bulundurulacak yükleme tipi gerilme veya hız, dalga boyunun (λ) açıklığın boyutuna (D') oranına (λ/D') bağlıdır. Yükleme süresi kısa olduğunda, λ/D' oranı küçük bir değere karşılık gelmekte ve kazı tepkisi dinamik olmaktadır. Büyük bir λ/D' oranına karşılık gelen göreceli daha uzun süreli yükleme de etkili olarak statik olmaktadır (Brady, 1993).

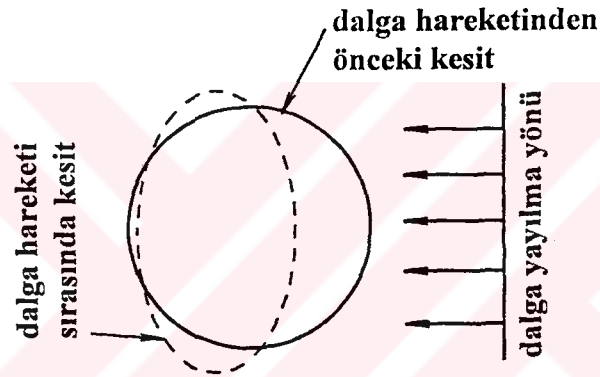
4.2.1 Dalga Yayılımı Yönü Etkisi

Tünelde oluşan eksenel şekil değiştirmelere, tünel eksenine boyunca parçacık hareketi oluşturan sismik dalgalar neden olmaktadır (Hashash et al., 2001). Yeraltı kazılarının uzun eksenine paralel basınç dalgası yayılımı göz önünde bulundurulmuş en basit durumdur. Boyuna basınç ve çekme bölgelerinin tanıtıldığı durum Şekil 4.5.a'da gösterilmiştir. Uygulanan yüklere kayan tepkisi olarak, eksenel gerilmelerin açıklığın kapanma ve genişlemesine neden olmasına rağmen pratik durum için dalga ve yapı arasındaki etkileşim ihmal edilmiştir. Eksenel dalga yayılımına maruz kalan yeraltı yapısı için durum biraz karmaşıktır. Tünel eksenine dik doğrultuda dalga yayılımı durumunda, açıklık kesitinde oluşan şekil değiştirme Şekil 4.5.b'de gösterilmiştir. Şekil 4.5.b'de gösterilen açıklık kesitinin simetrik olmayan şekle dönüşmesi, dalga boyunun tünel çapına göre daha küçük olduğu durumda gözlenmektedir. Karşılaşılan çoğu durumda, dalga boyu uzun olmakta ve şekil değiştirme yaklaşık olarak simetrik oluşmaktadır. Bununla birlikte, yayılma doğrultusundaki birincil gerilmeler ile yayılma doğrultusuna dik birincil gerilmeler eşit olmadığından dolayı, tünelin şekil değişikliğine uğramış kesiti yaklaşık elips şeklinde oluşmaktadır (John and Zahrah, 1987).

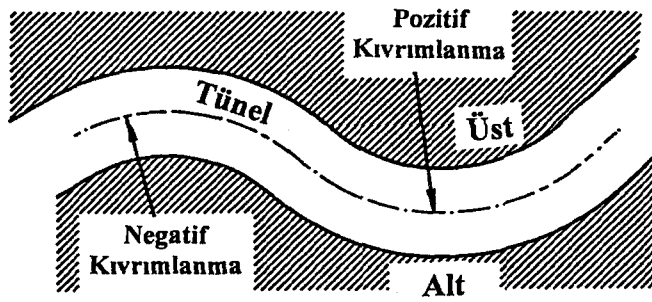
Tünelde oluşan kıvrımlanma türündeki şekil değişikliğine, tünel eksenine dik parçacık hareketi oluşturan sismik dalgalar neden olmaktadır (Hashash et al., 2001).



a. Eksenel şekil değiştirme

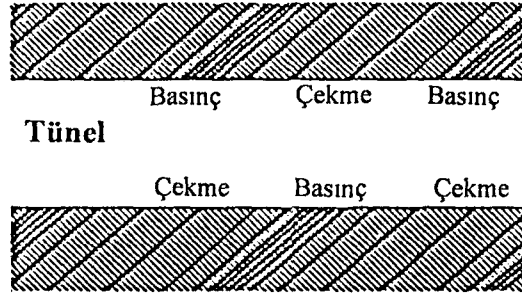


b. Tünel eksenine dik dalga yayılımının oluşturduğu şekil değiştirme

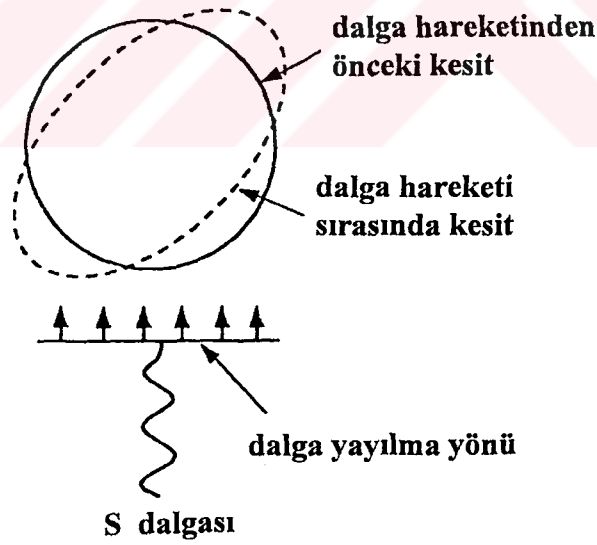


c. Tünel eksenini boyunca kıvrımlanma şeklinde şekil değiştirme

Şekil 4.5 Sismik yükler sonucu yeraltı açıklığında oluşan şekil değişikliği türleri (John and Zahrah, 1987; Hashash et al., 2001).



d. Çapraz dalga yayılımı durumunda oluşan basınç ve çekme bölgeleri



e. Kesme (S) dalgasının tünel eksenine dik yayılması sonucu oluşan şekil değişikliği

Şekil 4.5 (devam ediyor).

Dalga birçok genel durumda Şekil 4.5.c’de gösterilen tarzda yapının kıvrımlanmasına neden olmaktadır. Bu olgu, tünel boyunca değişen basınç ve çekme bölgeleri oluşturmaktadır. Kaya veya zemin kütleğinde, çok esnek kaplamalı yeraltı açıklığının ters taraflarında çekme ve basınç bölgeleri oluşmaktadır. Pozitif kıvrımlanma bölgesinde “üst” olarak işaretlenmiş kesimde çekme, negatif kıvrımlanma bölgesinde “alt” olarak işaretlenmiş kesimde basınç gözlemlenmektedir. Bunun tersine, katı kaplamada “üst” te basınç ve “alt” ta çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Katı kaplama, ortamdaki birim şekil değişikliğini daha fazla karşılamaktadır (John and Zahrah, 1987). Tasarımda genellikle tünel eksenini boyunca oluşan eksenel ve kıvrımlanma şekil değişikliği değerleri göz önünde bulundurulmaktadır. Şekil 4.5.d’de gösterilen açıklık eksenini ile açılacak şekilde etkiyen dalgalar, tünel yapısının farklı kısımlarında çekme veya basınç bölgeleri oluşturmaktadır. Genellikle büyük yerdeğiştirmeler büyük dalga boyları ile ilintili olmasına rağmen, en büyük kıvrımlanma, göreceli olarak küçük yerdeğiştirme genliğine sahip daha kısa dalga boyları ile oluşmaktadır (Kuesel, 1969; Hashash et al.’dan, 2001).

Tünel yapısının ovaloid biçimindeki şekil değişikliği, kesme dalgalarının tünel eksenine dik veya dike yakın etkideği durumlarda oluşmaktadır (Şekil 4.5.e). Bu tür durumlar için, tasarımlarda çapraz doğrultularda oluşan şekil değişikliği değerleri alınması gerekmektedir. Bu tür problemlerin çözümü 2-boyutlu düzlem birim şekil değiştirme koşulunda yapılabilmektedir (Hashash et al., 2001).

Kaya içinde açılan tünellerde depremlerde meydana gelen duraysızlık problemleri genel olarak aşağıdaki faktörlere bağlıdır (Ansal, 1986):

1. Tünelin içinden geçtiği zeminde sıvılaşma veya kaya tabakalarında oluşan blok kaymaları gibi tamamen göçmelere yol açan olaylar,
2. Tünel eksenini üzerinde bir faylanma veya mevcut fayda ötelenme,
3. Yer sarsıntıları.

Yer sarsıntılarının etkisi ilk iki faktöre göre farklıdır. Çünkü ilk iki faktörün meydana getirebileceği duraysızlıkların önceden tahmin edilebilirliği yanında, hasar çok sınırlı bir bölge içinde kalabilmektedir. Buna karşın yer sarsıntılarının yol açabileceği duraysızlıkları önceden belirlemek oldukça zor olmakta ve hasar tünel boyunca çok daha geniş bir bölgeyi etkileyebilmektedir (Ansal, 1986).

Kaya tabakaları üzerinde yapılan çalışmalarda, patlayıcı madde vb. kullanılarak oluşturulan yer sarsıntılarının oluşturduğu davranışlar ve yapısal hasar, parçacık hızına bağlı olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, deprem özelliklerini belirtmek için de kaya tabakalarında oluşan en büyük parçacık hızının değeri bir değiştirge olarak tanımlanabilmektedir. Diğer yandan, deprem mühendisliğinde, depremlerin şiddetini ve oluşan hasarın değişimini incelerken, en büyük yer ivmesi değeri de bir değiştirge olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Ansal, 1986).

4.2.2 Yeraltı Açıklıkları Çevresindeki Dinamik Gerilmeler

Yeraltı açıklıkları oluşturulduktan sonra açıklık çevresinde ikincil gerilme dağılımı oluşmaktadır. Sismik dalgaların neden olduğu dinamik gerilmeler, kayada ve kaplamada mevcut statik gerilme durumuna bağlı olarak üst üste binmektedir (süperpoze olurlar). Statik gerilmelere ilave dinamik yüklemenin neden olduğu basınç gerilmeleri, tünel çevresi boyunca duraysızlıklara neden

olabilmektedir. Açıklık çevresinde statik koşullarda oluşan basınç gerilmeleri, dinamik yüklemekten sonra çekme gerilmelerine dönüşebilmektedir. Bu durum, kayacın eklemlerinin açılmasına kaya saplamalarının gevşemesine ve tünel çevresinde potansiyel kaya düşmelerine neden olabilmektedir (Adhya, 1989).

Newmark (1968) ve Kuesel (1969) tarafından, eşyönlü, türdeş ve elastik bir ortamda tünel eksenine belirli bir açı ile etkiyen harmonik dalganın tünelde oluşturduğu birim şekil değişikliğinin hesaplanması için basit bir yöntem önerilmiştir (Hashash et al., 2001). John ve Zahrah (1987) tarafından Newmark'ın (1968) bu yaklaşımı kullanılarak, P ve S dalgalarının neden olduğu birim şekil değişikliğinin hesaplanması için bazı eşitlikler önerilmiştir (Çizelge 4.2). Açıklıkta birim şekil değişikliğine neden olan sismik dalgalar Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Depremlerin doğasında olan belirsizlikler nedeniyle tasarımda kullanılacak dalga türünün belirlenmesi çok zordur.

Eşyönlü, türdeş ve elastik bir ortamda gerilme-birim şekil değiştirme eşitlikleri kullanılarak sismik etkinin neden olacağı dinamik gerilmeler analitik olarak aşağıdaki eşitlikler ile verilmektedir. P dalgasının açıklık eksenine paralel yayılması durumunda açıklık çevresinde oluşan en büyük normal gerilme,

$$(\sigma_{\max})_p = \frac{E_m(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{V_p}{C_p} \quad (4.4.a)$$

şeklinde verilmektedir (John and Zahrah, 1987). Burada; V_p , P dalgasının kayada oluşturduğu hızdır. P Dalgasının açıklık eksenine 45° açı yapacak şekilde yayılması durumunda oluşan en büyük kesme gerilmesi ise,

Çizelge 4.2 Belirli bir açı ile etkiyen sismik dalgaların yeraltı açıklığında oluşturduğu birim şekil değişikliği (John and Zahrah, 1987).

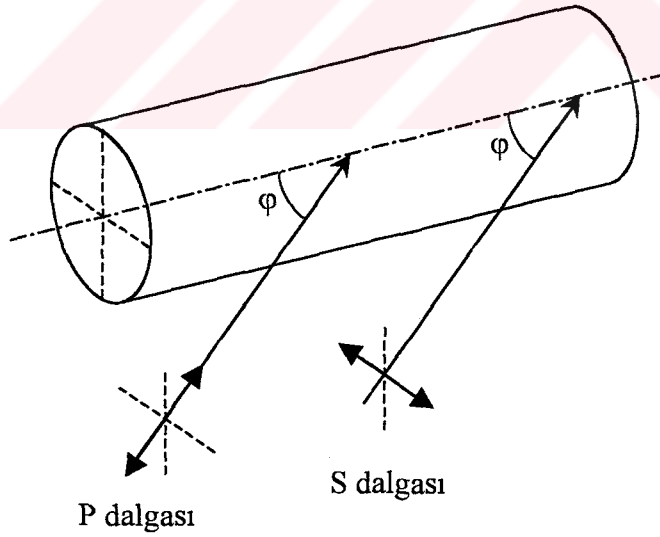
Dalga türü	Eksenel birim şekli değiştirme	Normal birim şekil değiştirme (*)	Kesme birim şekil değiştirme (**)
P	$\epsilon_l = \frac{V_p}{C_p} \cos^2 \varphi$ $\epsilon_{l \max} = \frac{V_p}{C_p} \quad \varphi = 0^\circ$	$\epsilon_n = \frac{V_p}{C_p} \sin^2 \varphi$ $\epsilon_{n \max} = \frac{V_p}{C_p} \quad \varphi = 90^\circ$	$\gamma = \frac{V_p}{C_p} \sin \varphi \cos \varphi$ $\gamma_{\max} = \frac{V_p}{2C_p} \quad \varphi = 45^\circ$
S	$\epsilon_l = \frac{V_s}{C_s} \sin \varphi \cos \varphi$ $\epsilon_{l \max} = \frac{V_s}{2C_s} \quad \varphi = 45^\circ$	$\epsilon_n = \frac{V_s}{C_s} \sin \varphi \cos \varphi$ $\epsilon_{n \max} = \frac{V_s}{2C_s} \quad \varphi = 45^\circ$	$\gamma = \frac{V_s}{C_s} \cos^2 \varphi$ $\gamma_{\max} = \frac{V_s}{C_s} \quad \varphi = 0^\circ$

(*) Normal gerilme: $\sigma_n = \epsilon_n (\lambda' + 2G)$

$\lambda' = E\nu / [(1+\nu)(1-2\nu)]$

(**) Kesme gerilmesi: $\tau = \gamma G$

$G = E / [2(1+\nu)]$



Şekil 4.6 Eksenel birim şekil değişikliğine neden olan cisim dalgaları (Hashash et al., 2001).

$$(\tau_{\max})_p = \frac{E_m}{4(1+\nu)} \cdot \frac{V_p}{C_p} \quad (4.4.b)$$

şeklinde verilmektedir (John and Zahrah, 1987). S dalgasının açıklık eksenine ile 45° açı yapacak şekilde yayılması durumunda açıklık çevresinde oluşan en büyük normal gerilme,

$$(\sigma_{\max})_s = \frac{E_m}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{V_s}{2C_s} \quad (4.5.a)$$

şeklindedir (John and Zahrah, 1987). S Dalgasının açıklık eksenine paralel yayılması durumunda oluşan en büyük kesme gerilmesi,

$$(\tau_{\max})_s = \frac{E_m}{2(1+\nu)} \cdot \frac{V_s}{C_s} \quad (4.5.b)$$

şeklindedir (John and Zahrah, 1987).

Poisson oranının 0.19'a eşit veya daha büyük olduğu ortamlarda, S dalgasının oluşturduğu en büyük normal gerilme, P dalgasının oluşturduğu en büyük normal gerilmeden daha büyük olmaktadır. Bu sonuç, P ve S dalgalarının oluşturduğu parçacık hızlarının birbirine eşit olduğu durumda geçerlidir. En büyük kesme gerilmesini S dalgası oluşturmaktadır (John and Zahrah, 1987).

4.2.3 Yeraltı Yapılarında Oluşan Hasar Türleri

Yeraltı açıklıklarının sismik yükleme altındaki koşullarla ilgili değerlendirmesinde Stevens (1977) ile Owen ve Scholl (1981); faylanma, arazi

yenilmesi ve sarsıntı olarak üç hasar şekli tanımlamışlardır (Brady and Brown, 1993).

4.2.3.1 Faylanma

Kayacın doğrudan kesme birim şekil değiştirmesi sonucu oluşan faylanma, genelde göreceli olarak dar ve sismik olarak etkin aktif fay bölgeleriyle sınırlıdır. Birkaç santimetreden metrelerce değere ulaşan yerdeğiştirmeleri sınırlamak için bir yeraltı yapısı tasarımı yapmak pratik olmamaktadır. Duyarlı bölgelerden kaçınmak veya yerdeğiştirmeleri kabul etmek; hasarı sınırlı tutulması ve onarım yapmayı sağlanması daha uygundur (Adhya, 1989, Erlingsson, 1997). Sismik bir olaydan önce fayın yakınlarındaki elastik ve plastik birim şekil değiştirme birikimine ait bilgiler, tüneldeki hasarın azaltılması için planlamada büyük bir önem taşımaktadır (Erlingsson, 1997).

4.2.3.2 Arazi Yenilmesi

Arazi yenilmesinin neden olduğu hasar kaya veya zemin kaymaları, zeminlerde sıvılaşma, zemin çökmesi ve arazi hareketlerinin diğer etkileri ile ilintilidir. Bu tür hasarlar, tünellerin giriş-çıkış ağızları ve diğer sığ açıklık alanlarında dikkatli araştırmalarla azaltılabilmektedir (Adhya, 1989).

4.2.3.3 Sarsıntı

Tahkimatlı tüneller için sarsıntının neden olduğu hasar, küçük parça şeklinde kopmaları (kavlak düşmeleri), kaplamanın çatlamasını veya yenilmesini içerebilir. Sarsıntı, tüneli çevreleyen zemin veya kaya kütlelerinin dayanımını azaltabilmekte

ve tünel tahkimat sistemi sarsıntıyı takiben ilave yüklere karşı koymak zorunda kalabilmektedir. Bu tür titreşimli hareket, tahkimatsız tüneller için; blok hareketlerine, küçük parça kopmalarına, kaya düşmelerine veya eklemlerin açılmasına neden olabilmektedir. Bir yeraltı yapısının sarsıntıya tepkisi; açıklık şekli, açıklığın derinliği, açıklığı çevreleyen zemin veya kaya kütlesinin özellikleri ve arazi hareketinin yoğunluğundan etkilenmektedir (Adhya, 1989).

4.3 YERALTI AÇIKLIKLARINDA DEPREM GÖZLEMLERİ VE DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Kaya ortamında oluşturulan yeraltı açıklıklarına ilişkin deprem gözlemleri oldukça azdır. Bunun başlıca nedenlerinden biri, yeraltında ölçülen ivme kayıtlarının çok sınırlı olmasıdır. Ayrıca, kayada oluşturulan yeraltı açıklıklarının, yeryüzündeki bir yapıdan çok daha az hasar görmesi böyle bir gereksinimi azaltmıştır.

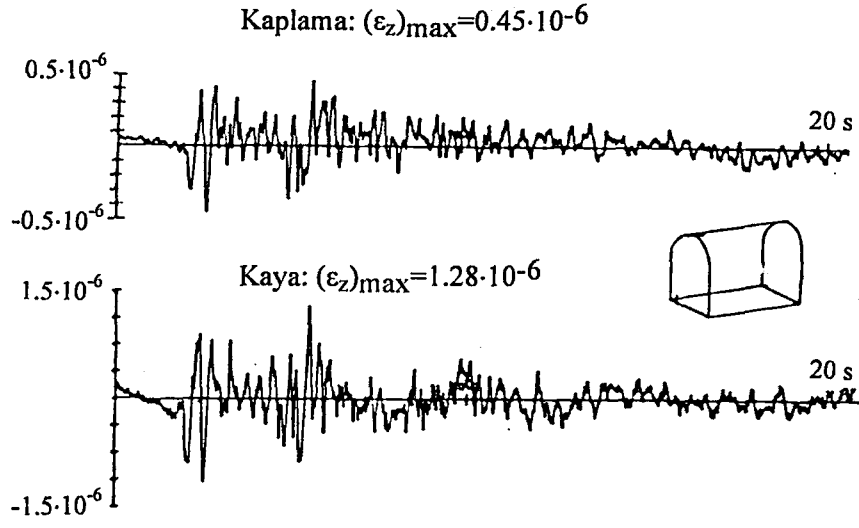
Japonya’da gerçek deprem hareketinin yeraltında ölçümü 1973’ten beri yapılmaktadır. lm cihazı kuyular ve yeraltı yapılarına, genelde yeraltı gözlemleri için tasarlanmış özel sismometreler sondaj kuyularına yerleştirilmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda; onlarca metre derinlikteki yeraltında ölçülmüş ivme değەرlerinin, yeryüzündeki ivmenin $1/2$ ’si ve $1/3$ ’ arasında olduğu; buna karşılık, yeryüzü ve yeraltı yerdeğiştirme miktarları arasında belirgin fark bulunmadığı ortaya çıkarılmıştır. Gözlemlerde genelde yatay hareketin llmesine karşılık düşey hareket ölçülmemiştir (Okamoto, 1973). Bu bölümde, çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deprem gözlemleri kısaca açıklanmıştır.

Hamada et al. (1980) tarafından kesme dalga hızı 2000 m/s olan sleyt içinde açılan bir demiryolu tüneline ölçümler yapılmıştır. Tünelin uzunluğu 4670 m olup, kemer tavanlı kesitin genişliği 4.8 m ve yüksekliği 6.1 m'dir. Ayrıca, tünelin 0.3 m kalınlığında beton kaplama ile tahkimatı yapılmıştır. Tünelin beton kaplamasının iç yüzeyinde dinamik birim şekil değiştirme ve çevre kayacın ivme ölçülmüştür. Ölçüm yapılan tünel bölgesinin örtü kalınlığı yaklaşık 140 m'dir. Yeraltı yapılarının ivmeleri ile çevre kayacın ölçülen ivme benzer bulunmuştur. Benzer şekilde yapıların ve çevre kayacın etkin frekansları da yakın sonuçlar vermiştir (Şekil 4.7 ve 4.8).

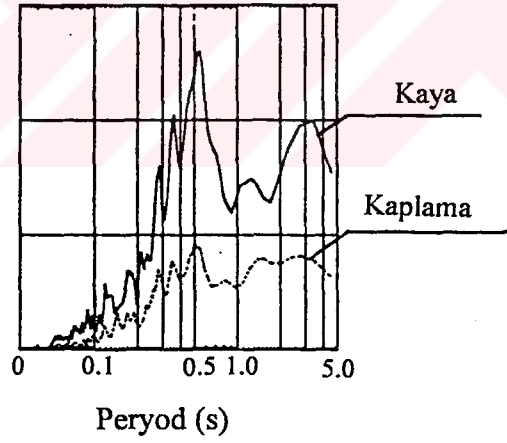
Deprem gözlemlerinden ve sayısal çözümlemelerden deprem süresince yeraltı yapısının dinamik birim şekil değiştirmesi, açıklığı çevreleyen kayacın birim şekil değiştirmesi ile açıklanmıştır. Yeraltı yapısının dinamik birim şekil değiştirmesi şu şekilde belirtilmiştir (Hamada et al., 1980):

$$\epsilon_s = \eta \epsilon_g \quad (4.6)$$

Burada, ϵ_s ve ϵ_g sırasıyla, yeraltı yapısının ve arazinin dinamik birim şekil değiştirmesidir. η ise yapı ile arazi arasındaki katılık oranının bir fonksiyonu olup frekans ortamında sabit olduğu varsayılmıştır. Tünel kaplamasının eksenel doğrultudaki birim şekil değiştirmesi kayacın birim şekil değiştirmesinin yaklaşık % 35'i, tünel kaplamasının yanal (radyal veya çevresel) birim şekil değiştirmesi ise kayacın birim şekil değiştirmesinin yaklaşık % 60'ıdır. Sonuç olarak; deprem gözlemlerine göre kayada açılan tüneline dinamik birim şekil değiştirmesi kayacın birim şekil değiştirmesinin % 60'ı olarak bulunmuştur (Hamada et al., 1980).

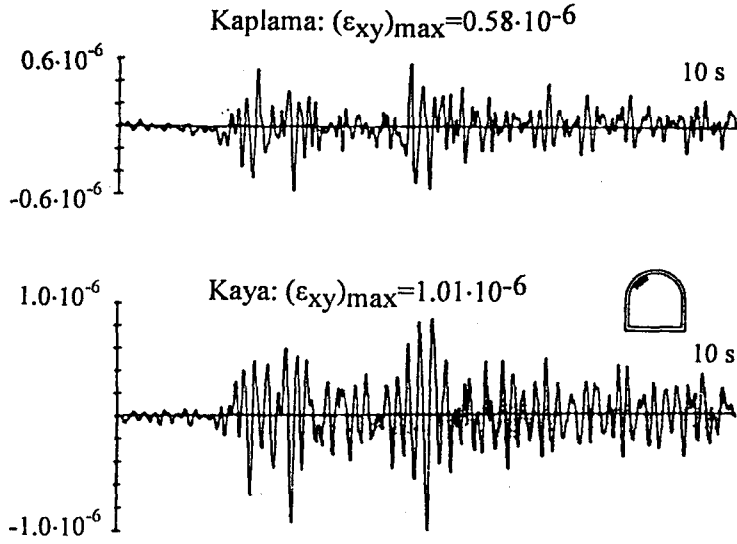


a. Beton kaplama ve kayacın birim şekil değıştirmesi

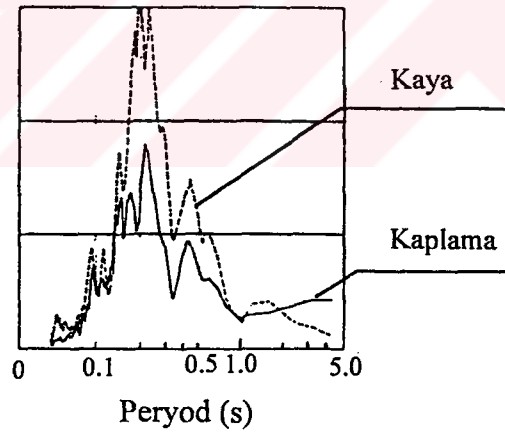


b. Eksenel birim şekil değıştirmenin Fourier spektrumu

Şekil 4.7 Eksenel doğrultuda, beton kaplama ve kayacın birim şekil değıştirmesi (Hamada et al., 1980).



a. Beton kaplama ve kayacın birim şekil değiştirmesi



b. Tünel kesit düzleminde birim şekil değiştirmenin Fourier spektrumu

Şekil 4.8 Açıklık kesit düzleminde, beton kaplama ve kayacın birim şekil değiştirmesi (Hamada et al., 1980).

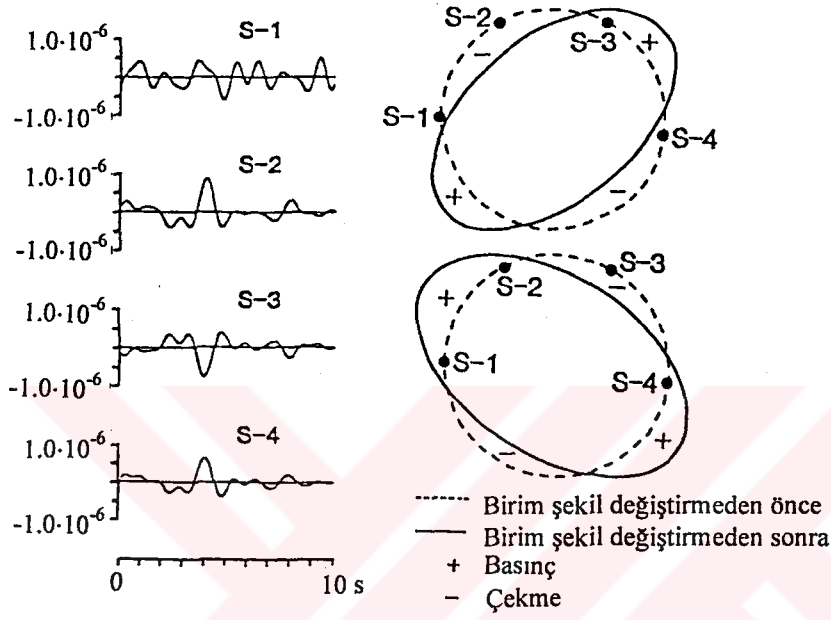
Diğer bir gözlem, Yamaguchi et al. (1987) tarafından Shin-Usami (Japonya) tüneline yapılmıştır. Tek hatlı bir demiryolu tüneli yaklaşık 3000 m uzunlukta, iç çapı 6 m, dairesel kesite sahiptir. Ayrıca, tünelin beton kaplama ile tahkimatı yapılmıştır. Tünelin her iki girişten yaklaşık 1500 m’de bulunan 100 m’lik bölümünde ölçümler yapılmıştır. Bu bölgenin örtü kalınlığı yaklaşık 260 m’dir. Gözlemlenen kesit başlıca bozunmuş bazalt olup, kesme dalga hızı 1100 ile 1600 m/s arasındadır. Ölçümler, biri tünel girişinde olmak üzere, 8 adet ivme ölçer, kaplama betona yerleştirilen 10 adet birim şekil değiştirme ölçer ve kayaç içerisine yerleştirilen 6 adet birim şekil değiştirme ölçer kullanılarak 15 ayrı deprem sırasında kayıtlar yapılmıştır. Deprem boyunca beton kaplamada oluşan birim şekil değişikliği ve açıklığın geometrisi Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

Yamaguchi et al. (1987), gözlemler sonucunda açıklık çevresinde oluşan birim şekil değiştirme ve kayacın parçacık hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu bulmuşlardır (Şekil 4.10 ve 4.11). Çizelge 4.3’te ölçüm sonuçları sunulmuştur.

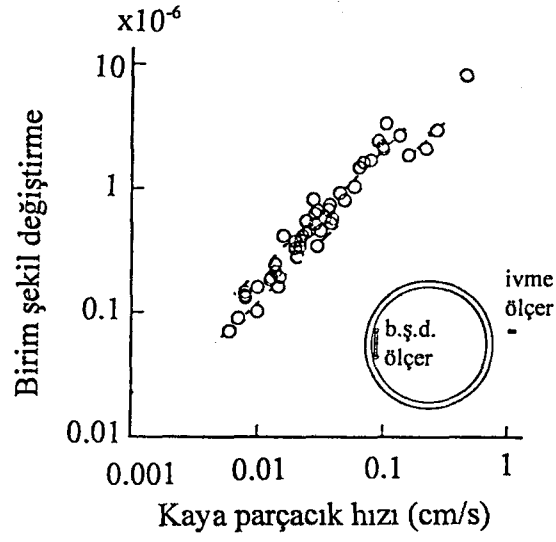
Çizelge 4.3 Shin-Usami tüneline yapılan ölçümler (Yamaguchi et al., 1987).

En Büyük Arazi Hızı (mm/s)	Eksenel Birim Şekil Değiştirme ($\times 10^{-6}$)	Kesme Birim Şekil Değiştirme ($\times 10^{-6}$)
0.01	0.04	0.002
0.1	0.2	0.06
1	2	0.6
10	10	5

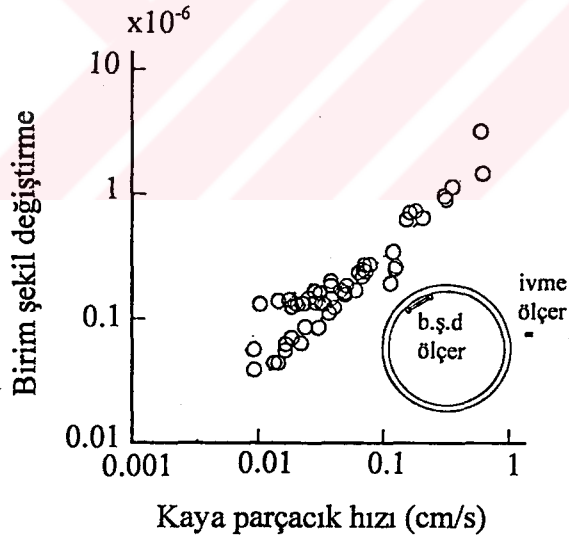
Diğer bir çalışma da, Hamada et al. (1985) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada; Japonya’da büyüklüğü 5.8 olan Miyagiken-Okı depreminin (1978) artçı sarsıntıları sırasında bir demiryolu tünelinin beton kaplamasının iç yüzeyinde



Şekil 4.9 Beton kaplamada oluşan birim şekil değiştirme ile birim şekil değiştirme sonucu oluşan açıklık geometrisi (Yamaguchi et al., 1987).



Şekil 4.10 Beton kaplamada oluşan birim şekil değıştirme ile düşey doğrultuda oluşan parçacık hızı arasındaki ilişki (Yamaguchi et al., 1987).



Şekil 4.11 Beton kaplamada oluşan birim şekil değıştirme ile yatay doğrultuda oluşan parçacık hızı arasındaki ilişki (Yamaguchi et al., 1987).

dinamik birim şekil değiştirmeler ve çevre kayaçta ivmeler kaydedilmiştir. Çevre kaya, kesme dalga hızı 2700 - 3600 m/s olan sert sleyttir. Kemer tavanlı geometriye sahip olan tünelin uzunluğu 4600 m, genişliği 5.4 m ve yüksekliği 6.5 m'dir. Yatay ve düşey doğrultudaki ivme, tünel girişinde ve tünel girişinden yaklaşık 600 m uzaklıkta, 120 m derinlikte kayada ölçülmüştür. Beton kaplamanın iç yüzeyindeki birim şekil değiştirmeler eksenel ve teğetsel doğrultularda ölçülmüştür. En büyük ivme değeri yaklaşık 0.25 m/s² olduğunda, en büyük çapsal birim şekil değiştirme 2.10⁻⁶ - 3.10⁻⁶ ve eksenel birim şekil değiştirme 2.10⁻⁶ ölçülmüştür. Kayıtların değerlendirilmesi sonucunda, tünelin dinamik birim şekil değiştirmesi ile dalga yayılımıyla oluşan kayaç birim şekil değiştirmesi arasında doğrusal bir ilişki olduğu buradaki ölçümlerle de tekrar ortaya konmuştur (Hamada et al., 1985).

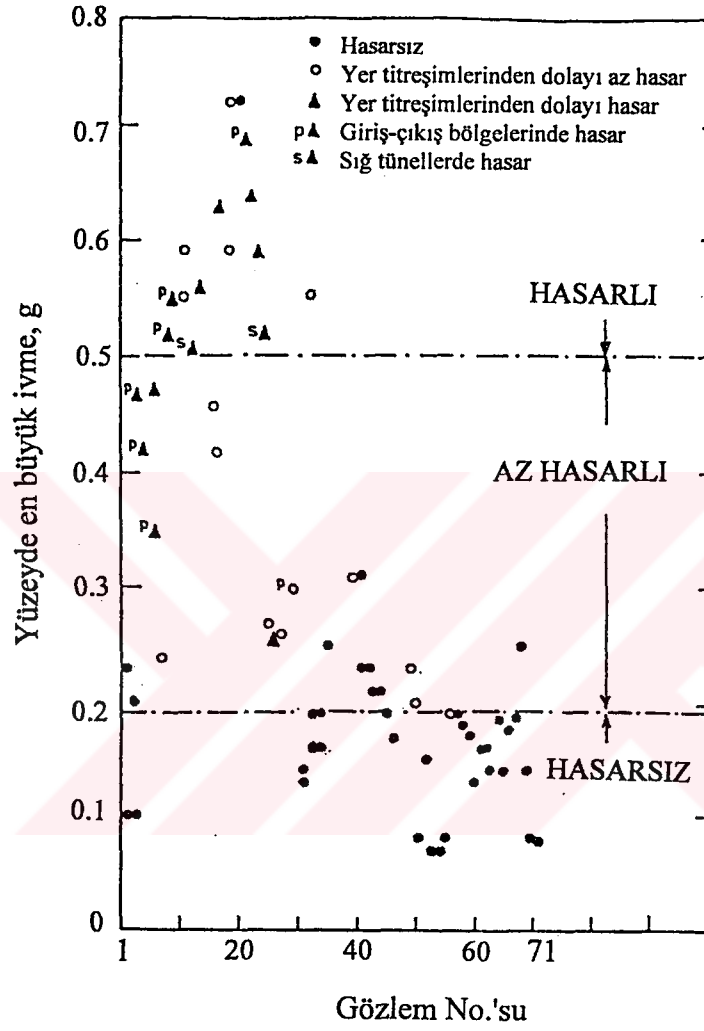
Buraya kadar olan çalışmalarda, ölçümlere dayalı gözlemlere ilişkin sonuçlar sunulmuştur. Dowding ve Rozen (1978), Okamoto (1973), Sharma ve Judd (1991), Wang et al. (2001) deprem nedeniyle oluşan hasarın, en büyük arazi ivmesi, en büyük parçacık hızı, açıklığın oluşturulduğu derinlik, deprem büyüklüğü, dış merkez uzaklığı vb. değiştirgelerle nasıl değiştiğini ve deprem sonrası oluşan hasarın türlerini ortaya koyan çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Dowding ve Rozen (1978), yeraltı açıklıklarında depremden kaynaklanan hasarları sınıflamak için bir yaklaşım önermişlerdir. İncelenen 71 tünel, Richter büyüklüğüne göre 5.8 ile 8.3 arasında değişen 13 değişik depremin etkisi altında kalmıştır (Ansal, 1986). Dowding ve Rozen (1978) arazi hareketlerinden oluşan hasarı üç ayrı seviyede sınıflamışlardır (Brady and Brown, 1993). Bunlar;

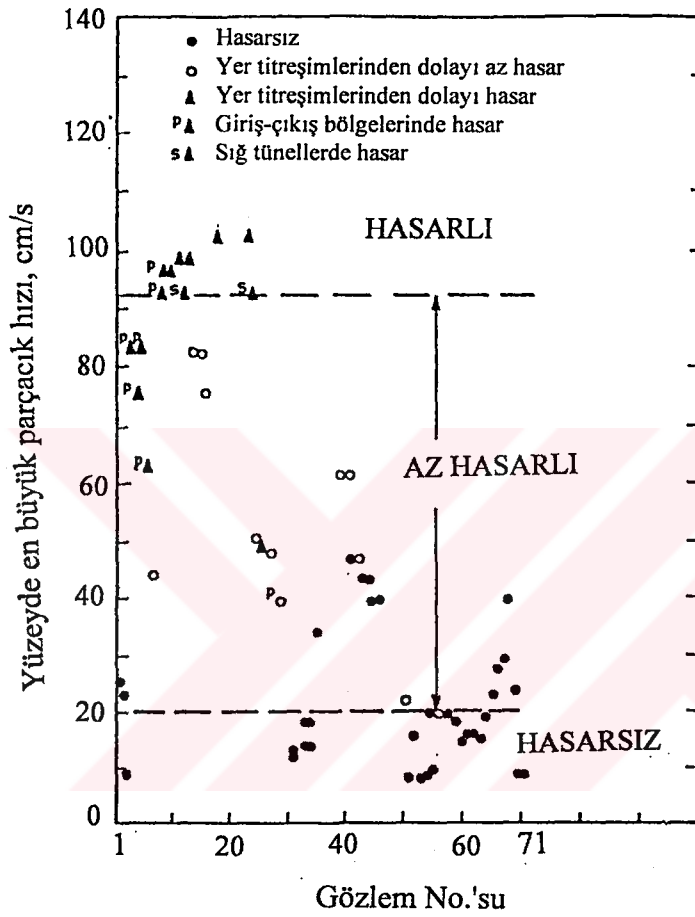
1. hasarsız veya önemsiz hasar; yeni çatlak oluşumu içermekte ve önemsiz kaya düşmeleri;
2. önemli hasar; çok sayıda çatlama içermekte, çok büyük derecede kaya düşmeleri;
3. açıklığın kapanmasıdır.

Dowding ve Rozen (1978), rapor edilen hasar ile en büyük yer ivmesi ve en büyük parçacık hızı arasındaki ilişkiyi de incelemişlerdir. Göz önünde bulundurulan yüzeyde en büyük arazi değiştirgeleri (ivme ve hız) yerinde kaydedilmemiş olup, görgül ilişkilerden elde edilmiştir. Bulgulara göre; en büyük yer ivmesi yaklaşık 0.2 g'den (g: yerçekimi ivmesi) daha az ise, hasar oluşmaması beklenmelidir. Deneyimlere göre 0.2 g ve 0.4 g arasında yalnızca çok az hasar oluşacağı bilinmektedir (şekil 4.12) (John and Zahrah, 1987). McGarr et al. (1981)'e göre en büyük hız, hasarın ilişkilendirildiği en uygun hareket değiştirgesidir. Çünkü bu değiştirge arazi dalgasının oluşturduğu en büyük geçici gerilme ile doğrudan ilişkilendirilebilmektedir. Hızın karesi dinamik birim şekil değiştirme enerjisi ile ilişkilidir (Brady and Brown, 1993). Dowding ve Rozen (1978), yeraltı kazılarının dinamik tasarımında görgül bir tasarım ölçütü olarak önemsiz hasar için 20 cm/s ve önemli hasar yaklaşık 40 cm/s'lik hasar eşik değerlerinin alınabileceğini göstermektedir. En büyük parçacık hızının 20 cm/s'den daha küçük olduğu değerlerde hiç bir hasar gözlenmemiştir (şekil 4.13). Bu değer, kaya içindeki yeraltı yapıları için de geçerlidir (John and Zahrah, 1987).

Diğer bir gözlemden ise, yeraltı hidroelektrik enerji santrallerinde deprem sırasında insanların hissettikleri etkiler Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Okamoto (1973)'ya göre yeraltındaki düşey ivmenin göreceli olarak yatay doğrultudaki ivmeden daha güçlü olduğu savunulmaktadır.



Şekil 4.12 Depremler için en büyük yer ivmesine göre hasar (Dowding and Rozen, 1981; John and Zahrah'dan, 1987).



Şekil 4.13 Depremler için en büyük parçacık hızına göre hasar (Dowding and Rozen, 1981; John and Zahrah'dan, 1987).

Yeraltı yapıları, en çok depremlerin neden olduğu süreksizlik hareketlerinden hasar görmektedir. Bu da, karşılaşılabilecek en kötü durumu oluşturmaktadır.

Çizelge 4.4 Yeraltı hidroelektrik santrallerinde deprem sırasında insanların hissettikleri etkiler (Okamoto, 1973).

Deprem	Tarih	Büyüklik	Yeraltı açıklığı ismi	Kaya tipi	Derinlik (m)	Dış merkez uzaklığı	Deprem hareketi hissi
Kita-Mino	19.08.1961	7.0	Miboro	Kuvars porfir	260	yaklaşık 20 km	güçlü düşey hareket
Koyna	11.12.1967	7.0	Koyna	Bazalt	150	birkaç km	güçlü düşey hareket
Batı Gifu	09.09.1969	7.0	Miboro	Kuvars porfir	260	yaklaşık 30 km	yatay hareket hissedildi düşey hareket hissedilmedi
			Kuzuryu	Sleyt	140	yaklaşık 30 km	orta şiddetli deprem hissi
			Kisenyama	Kumtaşı	300	140 km	deprem hissedilmedi
Higashi-Matsuyama	01.07.1968	6.1	Kinugawa	Liparit	60	100 km	elektiriksel doku hareketinden oluştuğu varsayılan düşey hareket

Derin yeraltı yapılarında, depremler sonucu oluşan büyük hasarlara ilişkin örnekler azdır. Hindistan'daki Koyna yeraltı hidroelektrik santrali, büyük ölçekli bir depremden hafif hasar görmüştür. Bazalt içinde yaklaşık 150 m derinde inşa edilmiştir. Santral, kontrol vana odası (6 x 174 m), türbin odası (16 x 193 m), jeneratör odası (13 x 200 m), transformatör odası (16 x 193 m), bağlantı tünelleri, kuyruk (tailrace) tüneli (2212 m) ve yardımcı açıklıklardan oluşmaktadır. Açıklıktan birkaç km uzaklıkta ve 7.0 büyüklüğünde bir deprem açıklıkta aşağıda sıralanan hafif hasarı oluşturmuştur (Okamoto, 1973):

1. Türbin ve jeneratör odalarının tünellerindeki yan duvarlarda ve tavanda, farklı zamanlarda kaplamaları yapılmış iki bölümün sınırında çatlaklar oluşmuştur.
2. Transformatör odasının alt kısmında bulunan kuyruk tünelinin yan duvarlarında çatlaklar oluşmuştur. Birinci aşamada inşaatı yapılan sektörde çok sayıda oluşan çatlakların nedeninin kayacın dayanımı ile ilgili olduğu düşünülmektedir.
3. Türbin, jeneratör odası ve transformatör odası bağlantı tünelinin yan duvarlarında 1 - 2 mm genişliğinde çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar, beton kaplamada oluşmuş ve kayaca ilerlememiştir. Kaplama ve kaya arasında bir ayrılma görülmemiştir.
4. Transformatör odasının kemer tavanında tünel doğrultusunda çatlak oluşmuştur.

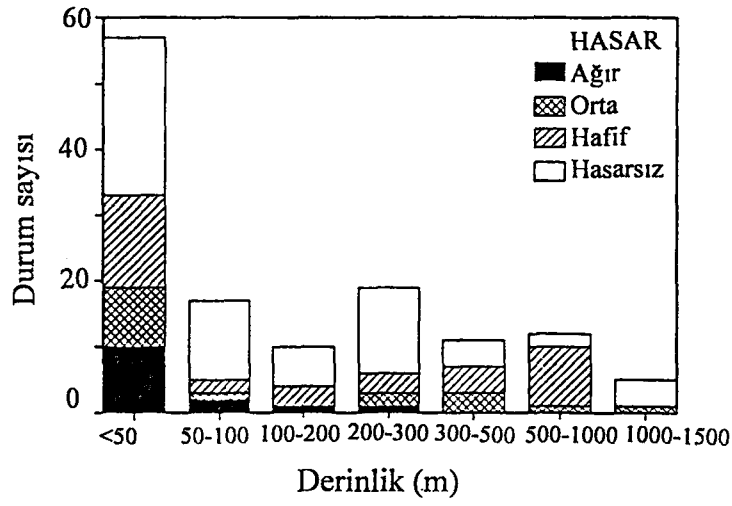
Depremlerin yeraltı açıklıklarında yüzey yapılarına göre daha az hasar verdiğine ilişkin bir örnek Jing-Ming (1980) tarafından verilmiştir. 1976 yılında, Çin'in Tangshan ilinde, 7.8 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir (Krinitzsky et al., 1993). Yaklaşık 242 bin kişinin öldüğü deprem, 20. yüzyılın en yıkıcı depremlerinden biri olmuştur. Depremin dış merkezi, büyük kömür madenlerinin bulunduğu bölgenin güney kısmında oluşmuştur (Lee, 1987; Arıoğlu ve Yılmaz, 2000). Yeraltı açıklıkları yaklaşık 800 m derinlikte bulunmaktadır. Madende, depremden kaynaklanan 1.2 m yatay ve 0.5 m düşey yönde atımlı faylar oluşmuştur. Kaplamalarda hasarlar oluşmuş olup, yeraltında sarsıntı hissedilmiştir (Krinitzsky et al., 1993). Deprem sırasında madende çalışan 10 bin işçinin çok büyük bölümü yeraltından sağlıklı bir biçimde yerüstüne ulaşmıştır. Bu durum, derin yeraltı açıklıklarının yerüstü yapılarına göre daha güvenli olduğuna ilişkin bir örnektir (Arıoğlu ve Yılmaz, 2000).

Sharma ve Judd (1991), depremlerin yeraltı yapılarında oluşturdıkları hasarlara ilişkin çalışma yapmıştır. Bu çalışma, 85 adet depremin yeraltında oluşturduğu etkileri içeren 192 rapordan yararlanılarak hazırlanmıştır. Yeraltı açıklığının duraylılığını etkileyebilecek bazı önemli değiştirgelerin belirlenmesi için veri tabanı oluşturulmuştur. Bu değiştirgeler; tahmini en büyük yüzey ivme değerleri, açıklığın derinliği, kaya kütlesinin türü, tahkimatın türü, açıklığın konumlandırıldığı bölge, depremin büyüklüğü ve dış merkez uzaklığı olarak belirtilmiştir.

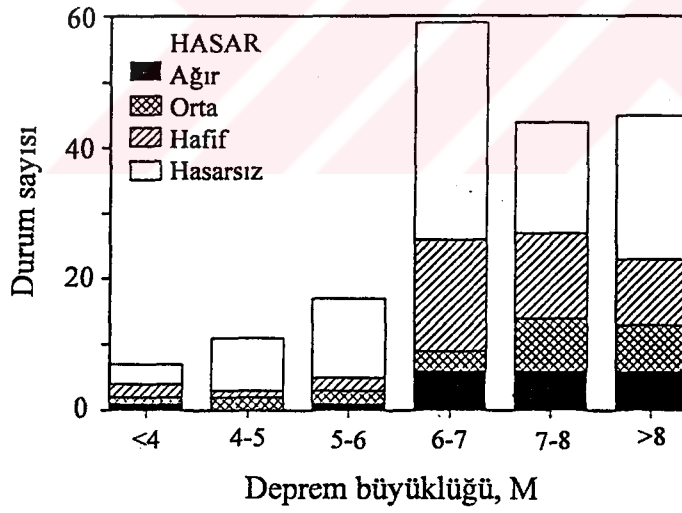
Açıklığın oluşturulduğu derinlik ile oluşan hasar arasında belirgin bir ilişki bulunmaktadır. Yüzeyden derinlere doğru genellikle oluşan hasar azalmaktadır (Jing-Ming, 1985; Sharma and Judd, 1991).

Her derinlik kategorisindeki hasar dağılımları, derinliğin bir fonksiyonu olarak Şekil 4.14'te sunulmaktadır. Genelde, 50 m'den daha derinlerde önemli derecede az hasar oluşmuş ve 300 m'den daha derinlerde ağır hasar oluşmamıştır. Örneğin; 50 m'den daha az derinlikte oluşan hasar, aynı grup içindeki bütün durumların % 58'ini oluşturmaktadır. Veri tabanında, hasarlı 94 rapora dayalı olarak, 50 m'den daha az derinliklerde yeralan hasarlı yeraltı açıklıkları toplam hasarlı yeraltı açıklıklarının % 35'ini oluşturmaktadır (Sharma and Judd, 1991).

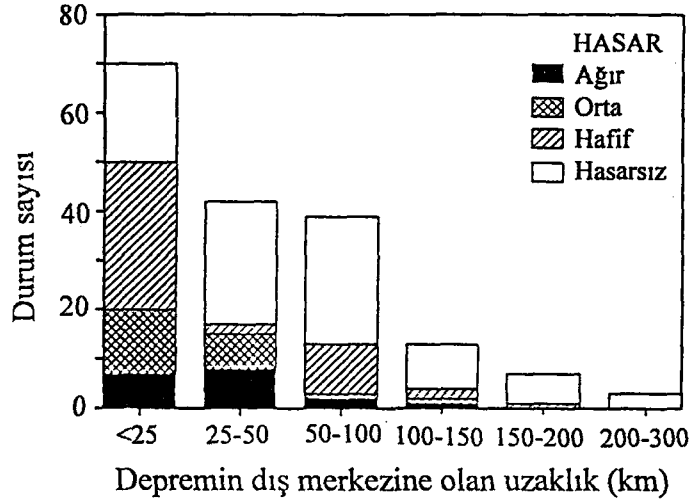
Deprem büyüklüğüne bağlı olarak hasarın dağılımı Şekil 4.15'te verilmiştir. Beklendiği şekilde hasarlı raporların yarısından fazlası, büyüklüğü 7'nin üzerinde oluşan depremler için belirtilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.16'da elde edilen 174 durum için dış merkez uzaklığı ile oluşan hasarın dağılımı sunulmuştur. Burada 25 km'den daha az dış merkez uzaklığı için 70 durum bulunmakta olup, bunların



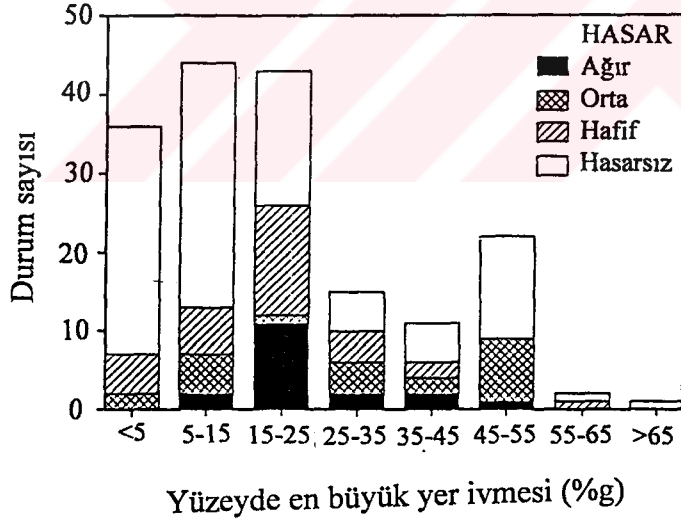
Şekil 4.14 Derinliğin hasara etkisi (Sharma and Judd, 1991).



Şekil 4.15 Deprem büyüklüğünün hasara etkisi (Sharma and Judd, 1991).



Şekil 4.16 Deprem dış merkezine olan uzaklığın hasara etkisi (Sharma and Judd, 1991).

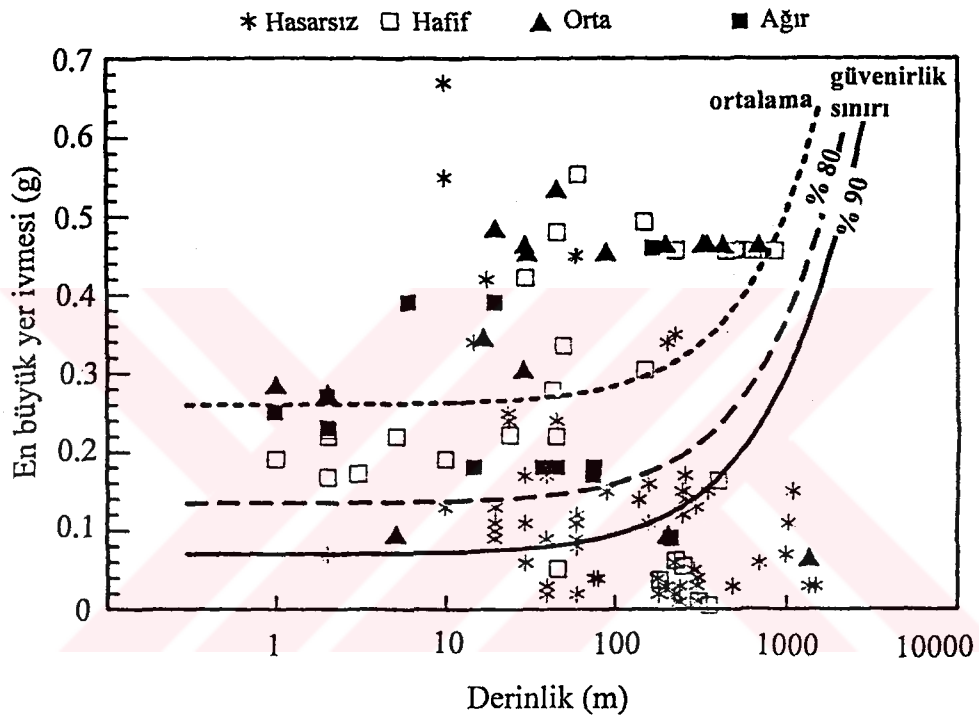


Şekil 4.17 Yüzeyde tahmin edilen en büyük yer ivmesinin hasara etkisi (Sharma and Judd, 1991).

% 71'inde hasar oluşmuştur. Ayrıca, hasarlı durumların yaklaşık % 75'i depremin 50 km'lik dış merkez uzaklığı içinde oluşmuştur (Sharma and Judd, 1991).

Yüzeyde tahmin edilen en büyük yer ivme değerine bağlı olarak hasarın dağılımı Şekil 4.17'de sunulmuştur. Genel olarak en büyük yer ivme değerleri arttıkça oluşan hasar da artmaktadır. 0.15 g'den daha az ivme değerleri için, bu aralıktaki 80 durumdan 20'sinde hasar gözlenmiştir. Yüzeydeki tahmini yer ivmesinin 0.15 g'den daha büyük değerlerinde, hasarlı yeraltı açıklıkları, toplam hasarlı yeraltı açıklıklarının % 79'unu oluşturmaktadır. Bu ivme değeri seviyesinin üstündeki her ivme aralığında hasarlı durumlar % 50'den daha fazladır. 0.15 g görünür eşik ivme değeri, Dowding ve Rozen (1978) tarafından önerilen 0.19 g değeri ile uyumludur (Sharma and Judd, 1991).

Oluşan hasar türleri derinlik ve yüzeyde tahmin edilen en büyük yer ivmesinin bir fonksiyonu olarak Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Bu şekil, tasarımcıya yeraltı açıklığının tam bir dinamik analize gereksinimi olup olmadığına karar vermesinde yardımcı olmaktadır. Örneğin 500 m'den daha derinlerdeki bir yeraltı yapısı için yüzeyde en büyük ivme değerleri % 90 güvenirlikle 0.18 g'den, % 80 güvenirlikle 0.25 g'den daha az ise hasar oluşmayacağı beklenebilir. Tersine, eğer yüzey ivme değeri 0.30 g olarak tasarımda yeralacaksa, % 90 güvenirlikte 700 m'den daha derinde ve % 80 güvenirlikle 1050 m'den daha derinlerde önemli hasar oluşması olası değildir. Depremlerin yeraltı açıklıklarında hasar oluşturmayacağının beklendiği durumlarda karmaşık dinamik analizlerin gereksiz olabileceği göz önünde bulundurulabilir (Sharma and Judd, 1991). Şekil 4.18'den görüleceği gibi hasarın, en büyük yer ivmesi ve derinlik ile değişimi düzenli bir dağılım göstermemektedir. Bu nedenle Şekil 4.18'in kullanımında dikkat edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.18 Tahmin edilen en büyük yer ivmesi ve derinlik ile hasarın ilişkisi (Sharma and Judd, 1991).

Tayvan'da 1999'da, 7.3 büyüklüğünde Chi-Chi depremi meydana gelmiştir. Bu deprem Chelungpu fayının tekrar aktif hale geçmesi sonucu oluşmuştur. Bir çok yeraltı açıklığı bu depremden hasar görmüştür. Bu hasarlar başlıca; çatlama, beton kaplamanın dökülmesi ve çelik tahkimatlarda şekil değiştirme şeklinde oluşmuştur. Wang et al. (2001), bu hasarları etkileyen unsurların belirlenmesinde 57 adet tüneli incelemişlerdir. Bu çalışmada; her tünel için hasar türleri ve derecesi, depremden sonra tünellerin işlevlerini yerine getirebilmesi açısından değerlendirilmiştir. Huang et al. (1999) tarafından önerilen deprem sonrası tünellerin işlevlerini yerine getirebilmesine göre tünel hasarı derecesi sınıflaması Çizelge 4.5'te verilmiştir (Wang et al. 2001).

Tünellerin giriş ve çıkış bölgelerindeki hasarlar, şev duraylılığı ile birlikte değerlendirilmiştir. Basitleştirme amacıyla, benzer hasarları değerlendirme standartları su taşıma tünelleri için de uyarlanmıştır. İncelenen 57 adet tünelden 8 adeti hasarsız olmasına rağmen 49 adeti hasar görmüştür (Çizelge 4.6).

Tünelin geçtiği fay bölgesinde oluşan yerdeğiştirme, tünel kaplamasının kesilmesine neden olarak aşırı hasar oluşturmuştur. Açıklık tavanı veya yan duvarında oluşan hasara göre incelenen 50 tünelden, 5 tünelde (% 10) hasar oluşmamış; 21 tünelde (% 42) hafif hasar; 11 tünelde (% 22) orta hasar ve 13 tünelde (% 26) aşırı hasar oluşmuştur. Açıklık tabanında oluşan hasara göre incelenen 6 tünelden, 3 tünelde (% 50) hasar oluşmamış; 2 tünelde (% 34) hafif hasar ve 1 tünelde (% 16) aşırı hasar oluşmuştur. Tünelin tavan veya yan duvarlarında oluşan hasar sayısı, tünel tabanında oluşan hasar sayısından daha fazla oluşmuştur.

Çizelge 4.5 Acil araştırma aşaması için tünel hasarı sınıflaması (Huang et al., 1999; Wang et al.'dan, 2001).

Hasar seviyesi	Hasar tanımlaması	Trafik durumu
Hasarsız	Görsel olarak hasar yok	Normal trafik akışı
Hafif hasarlı	Görsel olarak az hasar (çatlak genişliği < 3 mm, çatlak boyu < 5 m).	
Orta hasarlı	Dökülme, beton kaplamada çatlama (çatlak genişliği > 3 mm, çatlak boyu > 5 m), zorlanmış tahkimat, parçasal eklemlerde yerdeğiştirme, su sızıntısı	Kontrollü trafik akışı
Aşırı hasarlı	Açıklıkta şev yenilmeleri, ana tünel yapısında çökme, yolda kabarma veya farklı hareketler, su basması, uzun tünellerde havalandırma ve ışıklandırma sistemlerinde hasar, trafiğin tamamen kapanması	Trafiğin kapanması

Çizelge 4.6 Chi-Chi depremi sonucu tünellerde oluşan hasarın dağılımı (Wang et al., 2000; Wang et al'dan., 2001).

Hasar yeri	Değerlendirilen tünel sayısı	Hasar seviyesi	Hasarlı tünel sayısı
Fayda oluşan yerdeğiştirme	1	Hafif	-
		Orta	-
		Aşırı	1
Açıklık yan duvarı veya tavan	50	Hafif	21
		Orta	11
		Aşırı	13
Açıklık tabanı	6	Hafif	2
		Orta	-
		Aşırı	1

Oluşan hasarlar başlıca; kaplamanın fay hareketi ile kesilmesi, kaplamanın çatlaması (tünel eksenine paralel ve dik doğrultuda çatlama, eğimli çatlama) ve açıklık kesit şeklinde bozulma (taban kabarması, aşırı şekil değiştirme) olarak sınıflandırılmıştır. Hasar türleri ile hasarı etkileyen olası faktörler Çizelge 4.7’de sunulmuştur.

Çizelge 4.7 Tünel hasarını etkileyen olası faktörler (Wang et al., 2001).

Olası faktörler	Hasar türleri (*)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Yerdeğiştirmiş fay bölgesi boyunca açıklığın oluşturulması	▽							
Fay, çatlama bölgeleri ve uygun olmayan arazi koşulları boyunca açıklığın oluşturulması				•		▽		
Sert ve yumuşak kayaçların ara yüzeyleri						▽		
Yüzey şevlerine veya giriş-çıkış bölgelerine yakınlık		▽		▽	▽	▽		
Yapım sırasında oluşan göçük gibi olumsuz olaylar			•		•		•	•
Depremden önce oluşan kaplama çatlaması gibi belirtiler			•	•				
Zayıf yapısal düzenlemeler (**)				•	•			
Kaplamanın olmayışı		•						
Güçlendirilmemiş beton kaplama	•	•		•	•	•	•	•
Yüksek yan duvarlar, taban kemerinin olmayışı vs.					•		▽	▽
Kaplama yapısının bozulması			•	•				
Kaplama ile kayaç arasında boşlukların varlığı			▽		•			

(*) Hasar türleri: (1) kaplamanın kesilmesi, (2) tünelin göçmesini etkileyen şev yenilmesi, (3) tünel eksenini boyunca çatlama, (4) tünel kesit düzlemi boyunca çatlama, (5) eğimli çatlama, (6) tüm kesiti kapsayan sürekli çatlama, (7) açıklık tabanında çatlama, (8) kesit bozulması.

(**) Açıklığın iki tarafında özellikle simetrik oluşturulan küçük açıklıkların varlığı.

▽ önemli derecede etkileme, • orta derecede etkileme

Ülkemizde meydana gelen 7.1 büyüklüğündeki 12 Kasım 1999 Düzce depremi ile Bolu tünelleri hasar görmüştür. Bolu’da en büyük yatay yer ivmesi 0.82 g gibi yüksek bir değerde oluşmuştur. Bununla birlikte, Bolu tünellerinde ne kadar ivme

oluştugu tam olarak bilinmemektedir. Merkezleri arasında 30 - 60 m mesafe olan ve 11.5 x 16 m kazı boyutlarına sahip kemer tavanlı bu tünellerin, yaklaşık 3.2 km uzunluğunda açılması planlanmıştır. Açılan kısımlarda en yüksek örtü kalınlığı 170 m'dir. Tünel güzergahı Kuzey Anadolu Fay zoneuyla ilgili tali fayları geçmektedir. Bu deprem, Elmalık girişinden itibaren 300 m uzaklıkta göçüklere neden olmuştur. Bu göçükler iç (son) kaplamanın tamamlanmadığı bölümde oluşmuştur. Tünel geçkisi üzerinde, yeryüzünde bir göçme konisi ve oturmalar belirlenmiştir. Deprem öncesinde, tam kesitte olmak üzere yaklaşık 700 m açılan tünellerin, tünel girişinden itibaren 250 m'lik kısımlarında iç kaplamanın (B30 betonu kalitesinde ve genellikle 60 cm kalınlıkta) tamamlandığı rapor edilmektedir. Bu bölümlerde, kaplamalarda hasar görülmemekle birlikte, tünelin taban betonunda tünel eksenine boyunca çatlaklar oluşmuştur (Bakır ve Yılmaz 2000). Bolu tünellerinin tasarımı için ivme değeri 0.4 g alınmıştır. Fakat, bu deprem ile tünellerde 0.6 g - 0.8 g değerinde ivme oluştuğu tahmin edilmektedir (Ulusay, 2002).

Yeraltı açıklıklarının dinamik tasarımına ilişkin bir çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların büyük bir çoğunluğunda sığ yeraltı açıklıkları incelenmiştir. Bunun başlıca nedenlerinden birisi de derin yeraltı açıklıklarının sığ yeraltı açıklıklarına göre daha az hasar görmesidir. Bu çalışmalardan sonlu farklar çözümleme yöntemini esas alan FLAC^{2D} bilgisayar programının kullanıldığı bir çalışma aşağıda özetlenmiştir. Kirzhner ve Rosenhouse (2000) tarafından sığ derinlikte oluşturulan yeraltı açıklığı çevresinde deprem nedeniyle oluşan birim şekil değişikliği incelenmiştir.

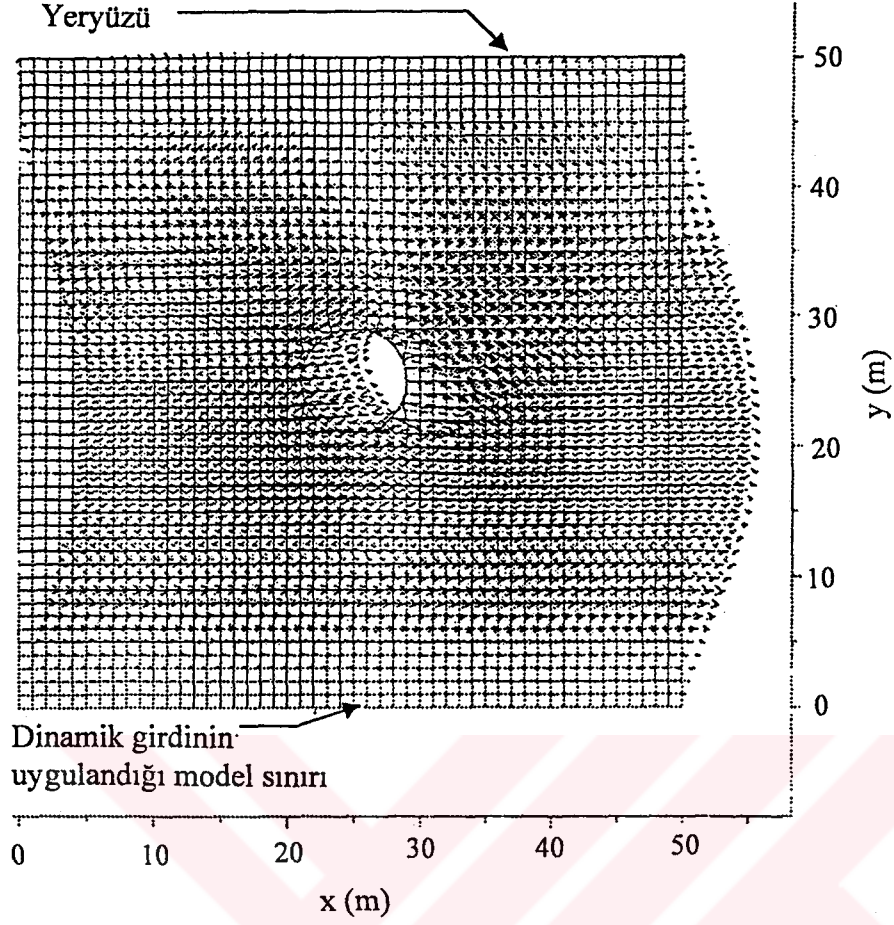
İlk olarak 25 m derinlikte açılan 4 m yarıçaplı daire kesitli açıklık incelenmiştir. 50x50'lik ağ oluşturulmuştur. Dinamik girdi hız olarak aşağıda verilen bir sinüs işlevi ile tanımlanmıştır.

$$V = V_0 \cdot \cos(2\pi f) \quad (4.7)$$

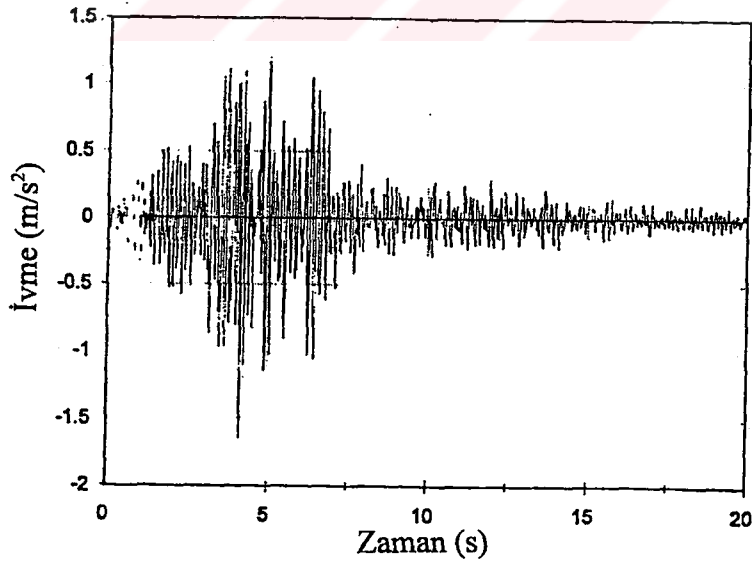
Burada; V_0 , en büyük hız genliği; f ise dalga frekansıdır. $V_0 = 0.1$ m/s kabul edilen dinamik girdi modelin tabanına uygulanmıştır. Uygulanan dinamik dalga, modelin tabanından yeryüzüne doğru yayılmaktadır. Elasto-plastik çözümlemede Mohr-Coulomb yenilme ölçütü seçilmiştir. Kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı $25 - 30^\circ$ ve kohezyon ise yaklaşık olarak $1 - 3$ MPa olarak, dilatasyon değiştirgesi ise 0.05 alınmıştır. Kaya kütlelerinin birim şekil değiştirme ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.8’de sunulmuştur. Çizelge 4.8’de verilen tek tabakalı ortamda açılan açıklık çevresinde oluşan yerdeğiştirme vektörleri büyütülmüş olarak; Şekil 4.19’da gösterilmiştir (Kirzhner and Rosenhouse, 2000). Dairesel açıklık kesitinin dinamik yükleme sırasında, elips şeklinde birim şekil değişikliği oluşmaktadır. Verilen dinamik yükleme sonucu açıklık çevresinde yenilme bölgesi oluşmamıştır. Depreme ait koşulların daha iyi yansıtılabilmesi için gerçek depreme ait ivme kaydı, girdi olarak seçilmiştir. En büyük genliği yaklaşık 1.5 m/s^2 olan ivme kaydı Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Bu deprem dalgası 5 saniye süreyle modele uygulanmıştır. Çözümleme sonucu açıklık çevresinde yenilme bölgesi oluşmamıştır.

Çizelge 4.8 Sayısal çözümlemede kullanılan tabaka özellikleri (Kirzhner and Rosenhouse, 2000).

Ortam türü	Tabaka sayısı	Yoğunluk (kg/m^3)	Young Modülü (MPa)	Poisson oranı
Zayıf kaya kütleleri (GSI=25-30)	1	1700	1550	0.2
Üst Tabaka: Zemin	2	1800	200	0.4
Alt Tabaka: Orta kaya kütleleri (GSI=50-60)		2400	7200	0.3



Şekil 4.19 Elasto-plastik dinamik çözümleme sonucu dairesel açıklık çevresinde oluşan yerdeğiştirme (Kirzhner and Rosenhouse, 2000).



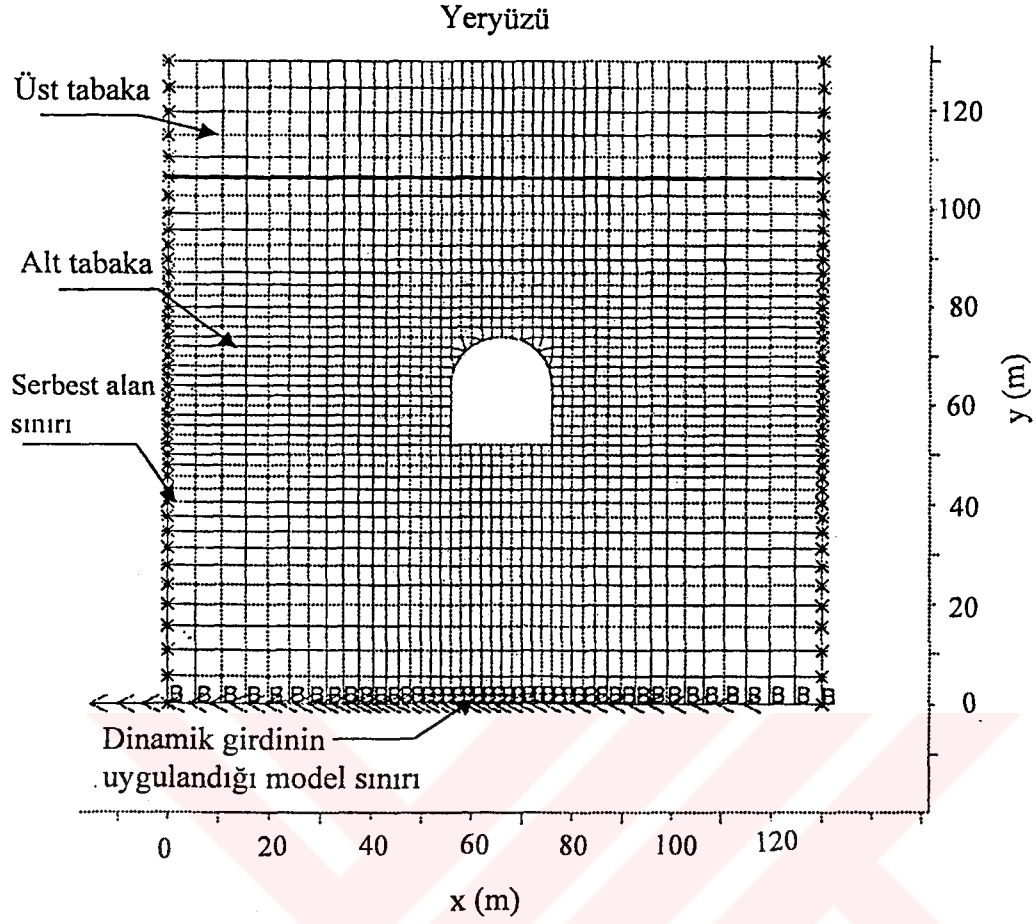
Şekil 4.20 Çözümlemede kullanılan gerçek ivme kaydı (Kirzhner and Rosenhouse, 2000).

Daha sonra yatay iki tabakalı ortamda açılan kemer tavanlı açıklık geometrisi incelenmiştir. Açıklığın genişliği 20 m, yüksekliği ise 22 m olup, yüzeyden 67 m derinlikte yer almaktadır. Üst tabakanın kalınlığı 23.6 m ve alttaki tabakanın kalınlığı ise 106.4 m'dir (Şekil 4.21). Eşitlik 4.7 ile tanımlanan hız, dinamik girdi olarak uygulanmış olup $V_0 = 0.1$ m/s olarak alınmıştır. Sınır koşulu olarak serbest alan sınırı seçilmiştir. Modelin tabanından uygulanan dalga'nın genliğine göre açıklık yüzeyinde ve modelin en üstünde (yeryüzünde) kaydedilen ivmenin genliğinde hafif bir artış olmuştur. Benzer sonuç, Şekil 4.20'de dalga şekli verilen gerçek deprem dalgasının uygulandığı ve iki tabakalı ortamda yapılan çözümlemeden de elde edilmiştir.

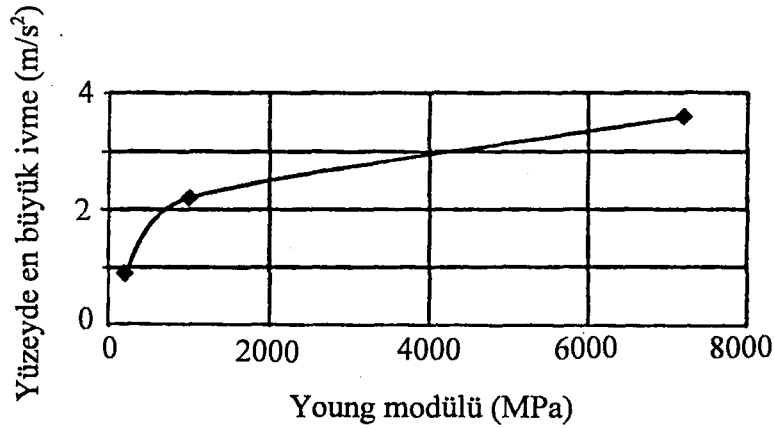
Ayrıca, birim deformasyon modülünün düşük olduğu ortamlarda yeryüzünde daha düşük ivme oluşmaktadır. Bu durum Şekil 4.22'de sunulmuştur.

4.4 SİSMİK TASARIM ÖNERİLERİ VE HASARIN AZALTILMASI

Aktif bir deprem kuşağı üzerinde yer alan ülkemizde yapılmış ve yapılması planlanan her türlü mühendislik yapısında göz önünde bulundurulması gereken en önemli konulardan biri deprem yüklerinin bu yapılarda meydana getireceği ek gerilme ve birim şekil değiştirmelerdir. Yapıların (bina, tünel, baraj vd.) yeterli derecede güvenli olabilmeleri için beklenen deprem yükleri altında nasıl davranacaklarının önceden belirlenmesi gerekmektedir. Tüneller için böyle bir çalışma, tünelin tahkimat elemanlarından çok tünel geçkisinin (güzergahı) seçiminde etkili olacağı açıktır (Ansal, 1986). Yeraltı açıklıklarında örtü kalınlığı arttıkça oluşan hasar azalmaktadır. Hasar, büyüklük ve depremin etkilediği dış merkez uzaklığına bağlı tahmin edilebilen en büyük yatay yer ivmesi ile ilişkilidir (Vladut, 1993).



Şekil 4.21 İki tabakalı ortamda oluşturulan kemer tavanlı açıklığın sonlu farklar ağı ve sınır koşulları (Kirzhner and Rosenhouse, 2000).



Şekil 4.22 Dinamik çözümleme sonucu yeryüzünde oluşan en büyük ivmenin ortamın deformasyon modülü ile değişimi (Kirzhner and Rosenhouse, 2000).

Kaya kütleleri içinde açılan tünellerde kaplama ile çevre kayaç iyi bir şekilde birleştirilmiş ise, kaplamanın serbest titreşimi engellenmiş olur. Ancak bu bağlantının zayıf olması durumunda kaya tabakasında oluşacak titreşimler ile kaplamada oluşacak titreşimler arasında bir faz farkı ortaya çıkabilir. Bu faz farkı tünellerde çökmelere neden olabilmektedir. Kayada ve kaplamada ivme değerlerindeki farklılıklar titreşim frekansına bağlı olmaktadır. Kaya tünellerinin duraylılığı için çok önemli olan yüksek frekanslı deprem titreşimleri mevcut ivme ölçerlerin 20 Hz'den büyük sarsıntıları algılayamaması nedeniyle pek iyi bilinmemektedir. Deprem süresi de kaya içinde açılan tünellerin duraylılığını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Kayalar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, sürenin (döngünün) artmasının bir yorulmaya yol açtığını göstermektedir (Brown and Hudson, 1974; Ansal, 1986'dan).

Her tünelde, sismik yüklerin şiddeti, aktif faya ve depremin odak merkezine uzaklığına göre farklılık göstermektedir. Ayrıca, yüzeye olan uzaklıktan da etkilenmektedir. Sismik dalga, ortamda yayılması sırasında enerjisini kaybetmektedir. Tünel, faya veya dış merkeze yakın mesafede ise daha yüksek sismik kuvvetler oluşmaktadır. Ayrıca sismik dalgalar yeryüzüne ulaştığında, yansıma ve kırılmaya uğrayarak enerji açığa çıkarmaktadır. Böylece yüzeye yakın tünellerin şev yüzeyine yakın bölgelerinde, açığa çıkan bu enerjinin büyük bölümü absorbe (soğurulma) edilmektedir (Wang et al., 2001).

Yüksek dağların altında oluşturulan tünellerin çoğu sert kayaçlarda açılmıştır. Sismik dalgalar sert ve yoğun ortamlarda daha hızlı yayılarak daha az salınıma neden olmaktadır. Sert ortamda açılan tünelde, arazinin tünel yapısından daha sert olması durumunda tüneller arazi ile birlikte şekil değiştirmeye zorlanmakta ve daha az hasar oluşmaktadır. Diğer taraftan, tünel göreceli olarak daha zayıf arazide

oluşturulduğunda daha yüksek miktarda enerji soğurmakta ve daha fazla hasar görmektedir. Yumuşak ve sert kayalar deprem sırasında farklı davranış gösterdikleri için bu kayaların kesişme bölgelerindeki beton kaplamalarda hasar oluşmaktadır (Wang et al., 2001).

Tünel açma sırasında göçme gibi olumsuz olaylar, sismik dalganın geçişi sırasında tünel çevresindeki yenilme bölgesini genişletmekte, kayacı zayıflatmakta ve aşırı titreşimlere neden olmaktadır (Wang et al., 2001).

McClure (1981), ağır ekonomik riskler içeren bir yeraltı yapısı için deprem hasarı potansiyelinin en aza indirilmesi için şu önerileri yapmıştır (Erlingsson, 1997);

1. Kesme dalga hızı 900 m/s'den daha büyük kayada açıklık oluşturulmalıdır,
2. Örtü kalınlığı en az 90 m olmalıdır,
3. Açıklık aktif veya potansiyel aktif fayların hemen civarında yeralmamalıdır.

Bu ölçütlere uyan bir tasarımla oluşturulmuş yeraltı açıklıklarında depremler sırasında önemli hasarlar oluşmayacaktır. Gevşeme davranışı gösteren çevre kayaç, kaya saplaması ve dolgu enjeksiyonu ile yeterince kuvvetlendirildiği sürece, kaplamada oluşan birim şekil değiştirme ile açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinde oluşan birim şekil değiştirme benzer oluşmaktadır. Bu nedenle esneyebilir kaplama, kalın beton kaplamadan daha az hasara uğrayacaktır. Yüksek sismik riske sahip bölgelerdeki yeraltı açıklıklarının tahkimatında, lif ya da çelik hasır ile kuvvetlendirilmiş püskürtme betonlu, ince, esneyebilir kaplamalar ve çevre kayacın katılığını artıracak sistematik kaya saplamalarının kullanılması uygun olacaktır (Erlingsson, 1997).

BÖLÜM 5

YERALTI AÇIKLIKLARININ DİNAMİK KOŞULLARDA DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde, derin yeraltı açıklıklarının (400 m'den fazla derinlikte) dinamik yükler altındaki davranışını incelemek amacıyla yapılan dinamik çözümlemeler verilmiştir. Önce dinamik çözümleme ile ilgili genel bilgiler verilerek çözümleme yaklaşımı sunulmuştur. Sonra, dinamik değiştirgelerin, kaya kütlesinin mekanik özelliklerinin ve yeraltı açıklığı geometrisinin açıklık duraylılığına etkisi yapılan değiştirgesel çalışmalarla ortaya konulmuştur.

5.1 DİNAMİK ÇÖZÜMLELER

Yeraltı açıklıklarının dinamik çözümlemelerinde FLAC^{2D} programı kullanılmıştır. Dinamik çözümlemeler iki boyutlu, düzlem birim deformasyon koşulunda yapılmaktadır. FLAC^{2D} programının dinamik çözümlemesi deprem mühendisliği ve madencilikte kaya patlamaları gibi disiplinlerde kullanılmaktadır. Dinamik analizler oldukça karmaşık olup, sonuçların değerlendirilmesi deneyim gerektirmektedir (Itasca, 1995).

Dinamik analiz için bir FLAC modeli hazırlanırken aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

1. dinamik yükleme ve sınır koşulları,
2. mekanik sönümlenme ve

3. model boyunca dalga geçişi.

5.1.1 Dinamik Yükleme ve Sınır Koşulları

Dinamik girdi; hem model sınırına hem de modelin iç düğüm noktalarına uygulanarak, dış ve iç dinamik yükleme ortamları yaratılabilmektedir. Model sınırında dalga yansımaları viskoz, serbest alan ve üç boyutlu yayılma sönümlemesi sınır koşulları ile en aza indirilmiştir. Dinamik yükleme ve sınır koşulları şekil 5.1’de gösterilmiştir.

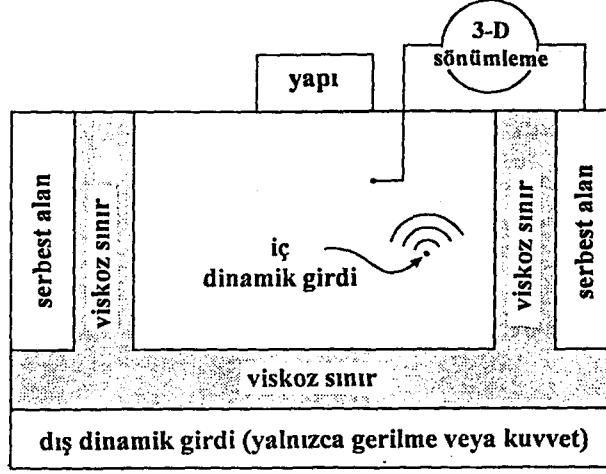
5.1.1.1 Dinamik Girdi Uygulamaları

FLAC^{2D} programında dinamik girdi, aşağıdaki yollardan biri ile modele uygulanabilmektedir. Bunlar;

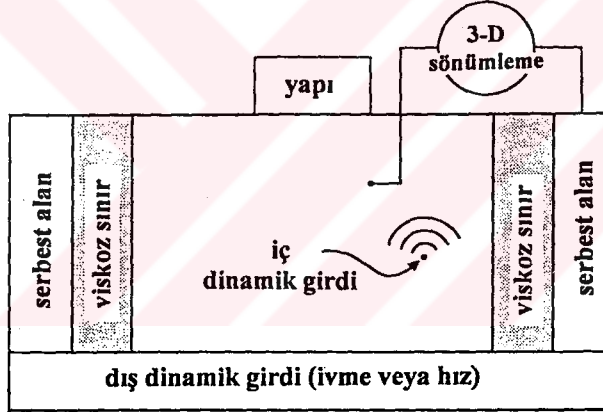
1. ivme-zaman kaydı,
2. hız-zaman kaydı,
3. gerilme-zaman kaydı,
4. kuvvet-zaman kaydıdır.

Dinamik girdi hem modelin x (yatay) ve y (düşey) eksenlerine karşılık gelen x veya y doğrultularında, hem de model sınırına normal veya kesme doğrultularında uygulanabilmektedir.

Model sınırına hız veya ivme girdisi uygulandığında, aynı sınır viskoz sınır koşulu olarak kullanılamamaktadır (şekil 5.1). Bu durumu aşmak için bunun yerine gerilme sınır koşulu uygulanabilmektedir. Başka bir ifadeyle, hız kaydı bir



a. Esnek taban



b. Rijit taban

Şekil 5.1 Dinamik yükleme ve sınır koşulları (Itasca, 1995).

gerilme kaydına dönüştürülerek viskoz sınır uygulanmaktadır. Bir hız dalgası aşağıdaki formül kullanılarak bir gerilme dalgasına dönüştürülebilir.

$$\sigma_n = 2 \rho C_p V_n \quad (5.1.a)$$

veya

$$\tau = 2 \rho C_s V_s \quad (5.1.b)$$

Burada σ_n ve τ sırasıyla uygulanan normal ve kayma gerilmeleri; V_n ve V_s sırasıyla girdi normal ve kesme dalgasının yol açtığı parçacık hızlarıdır (Itasca, 1995). Eşitlik 4.1.a ve 4.1.b ile verilen P ve S dalga hızları düzlem dalga yayılımı durumu için geçerlidir. Eşitlik 5.1.a. ve 5.1.b'deki 2 katsayısı, giren enerjinin yukarı ve aşağı yöne dağılması gerektiği için hesaba alınmaktadır. Bu durumda sınırda elde edilen hız değişimi orijinal hız kayıtlarından farklı olabilmektedir. Çünkü Eşitlik 5.1.a ve 5.1.b tek boyutlu yaklaşımlardır (Itasca, 1995).

5.1.1.2 Viskoz Sınır

Derin yeraltı açıklıklarının, normalde sonsuz bir ortam tarafından çevrelendiği varsayılırken; yüzey ve yüzeye yakın yeraltı yapılarının, yarı sonsuz bir ortamda olduğu varsayılmaktadır. Statik analizlerde, sabit veya elastik sınırlar (örneğin; sınır elemanları yöntemiyle tanımlanan) ilgili bölgeden belli bir mesafede yer alabilirler. Bununla birlikte, dinamik problemlerde bu tür sınır koşulları, dışa doğru yayılan dalgaların modelin içine yansımaya neden olmakta ve gerekli enerjinin yayılımına izin vermemektedir. Geniş bir modelin kullanımı bu sorunu azaltabilmektedir. Çünkü malzeme sönümlemesi, uzaktaki sınırdan yansıyan

dalgalardaki enerjinin çoğunu absorbe etmektedir. Ancak, geniş bir modele ait çözüm, hesaplama işlemini uzatmaktadır. Alternatif yaklaşım, viskoz sınırların kullanımıdır. FLAC^{2D}'da kullanılan viskoz sınır, Lysmer ve Kuhlemeyer (1969) tarafından geliştirilmiştir. Bu model sınırında, dik ve paralel doğrultularda, bağımsız şoklardan kaçınmak için hareketin sönümlenmesi esas alınmaktadır. Yöntem, çoğunlukla sınıra 30°'den daha büyük açıyla yaklaşan cisim dalgalarının soğurulmasında etkili olmaktadır. Daha düşük açılarda veya yüzey dalgalarında enerji soğurulması (mükemmel olmasa da) gerçekleşmektedir. Viskoz sınır koşulları x ve y doğrultusunda veya eğimli sınır boyunca dik ve paralel doğrultularda uygulanabilmektedir (Itasca, 1995).

5.1.1.3 Serbest Alan Sınırı

Baraj gibi yüzey yapılarının sayısal yöntemlerle sismik analizi temele bitişik malzeme bölgesinin ayrımını gerektirmektedir. Sismik girdi, normalde alt malzemeden yukarıya doğru düzlem dalga yayılımı sergilemektedir (Itasca, 1995). Ancak, bu çalışmada incelenen problemlerde bu tür bir sınır bulunmamaktadır.

5.1.1.4 Üç Boyutlu Yayılma Sönümlemesi

Modellenen bölgenin yüzeyinde yer alan titreşimli yapı, çözümleme düzleminde ve dışında bir dağılım yaratmaktadır. Düzlemde yayılan enerji viskoz sınır tarafından önemli derecede soğurulmakta ancak üç boyutlu sistem içinde enerji düzlem dışında da yayılmaktadır (Itasca, 1995). Benzer şekilde, çalışmada incelenen durumlarda bu tür bir sınır koşulu bulunmamaktadır.

5.1.2 Dalga Geçişi

Dinamik bir analizde modelleme koşullarının bir işlevi olarak, yayılan dalgada bozulma oluşabilmektedir. Girdi dalgasının frekans içeriği ve sismik dalga hızı özellikleri dalga yayılımının doğruluğunu etkilemektedir. Kuhlemeyer ve Lysmer (1973), bir model boyunca dalga yayılımının nasıl doğru olacağını göstermiştir. En büyük eleman boyutu $\Delta\ell$, girdi dalgasının en yüksek frekans bileşimi ile ilgili dalga boyunun yaklaşık 1/10'u veya 1/8'inden daha küçük olmalıdır. Başka bir ifade ile en büyük ağ boyutunun 10 katı dalga boyu ile hesaplanacak frekansın ($f = C_s/\lambda = C_s/10\Delta\ell$), girdi dalgasının frekansından büyük olması gerekmektedir.

$$\Delta\ell \leq \lambda / 10 \quad (5.2)$$

Burada, λ ; en yüksek frekansla ilintili dalga boyudur (Itasca, 1995).

5.2 ÇÖZÜMLEME YAKLAŞIMI

Dinamik çözümlemelerde, göz önünde bulundurulanan birincil gerilme alanı, açıklık geometrisi, kaya kütlelerinin mekanik özellikleri, sınır koşulları ve dinamik yükleme değişirgelerine ilişkin bilgiler sunulmaktadır.

5.2.1 Birincil Gerilme Alanı

Birincil gerilmelerin büyüklüklerine göre üç ayrı gerilme durumu incelenmiştir: Bunlar hidrostatik, anizotropik ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumlarıdır. Bu durumların detayları Bölüm 3'te sunulduğu için burada yinelenmeyecektir. Çözümlemelerde hidrostatik birincil gerilme durumu için

$P_0 = 20$ MPa; anizotropik birincil gerilme durumu için $P_1 = 30$ MPa, $P_2 = 20$ MPa ve $P_3 = 10$ MPa; düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumu için de $P_1 = 20$ MPa ve $P_3 = 10$ MPa olarak seçilmiştir. Anizotropik birincil gerilme durumu için büyüklük açısından 6 ayrı birincil gerilme durumu incelenmiştir. Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumu için de büyüklük açısından 4 ayrı birincil gerilme durumu incelenmiştir.

5.2.2 Açıklık Geometrisi

Açıklık kesiti olarak daire ve kemer tavanlı açıklık şekli seçilmiştir. Kemer tavanlı açıklık için W/H oranı 1.0, 2.0 ve 3.0 seçilmiştir.

5.2.3 Kaya Kütlesinin Dayanımı ve Özellikleri

Kaya kütlesinin dayanımı Hoek-Brown yenilme ölçütü ile tanımlanmıştır. Hoek-Brown yenilme ölçütü ile tanımlanan kaya kütlesinin dayanım parametrelerinden $\sigma_{ci} = 75$ MPa, $m_i = 10$ ve GSI = 30, 40, 50, 60, 70 ve 80 alınmış; dilatasyon değiştirgesinin sıfır olduğu varsayılmıştır. Kaya kütlesinin elastik özelliklerinden Poisson oranı ise $\nu = 0.25$ alınmış; ayrıca, birim hacim ağırlığı da 25 kN/m^3 olarak seçilmiştir.

5.2.4 Sınır Koşulları ve Dinamik Yükleme

Açıklığın oluşturulduğu modelde kullanılacak sınır koşulu olarak yeraltı açıklıklarının dinamik çözümlemesinde kullanılabilecek “viskoz sınır koşulu” seçilmiştir. Bu sınır koşulu model içine yayılan dalgaların model sınırından geri

dönmesini (yansımaları) en aza indirmektedir. Şekil 5.2’de dinamik çözümlemede kullanılan sonlu farklar ağı (mesh) ve viskoz sınır gösterilmiştir.

Dinamik analizlerde kullanılan girdi dalga şekli olarak,

1. sabit genlikli sinüs işlevi,
2. artan-azalan genlikli sinüs işlevi ve
3. gerçek depremlere ait dalga kaydı kullanılmıştır.

Basit sinüs fonksiyonu aşağıdaki eşitlik ile tanımlanabilmektedir:

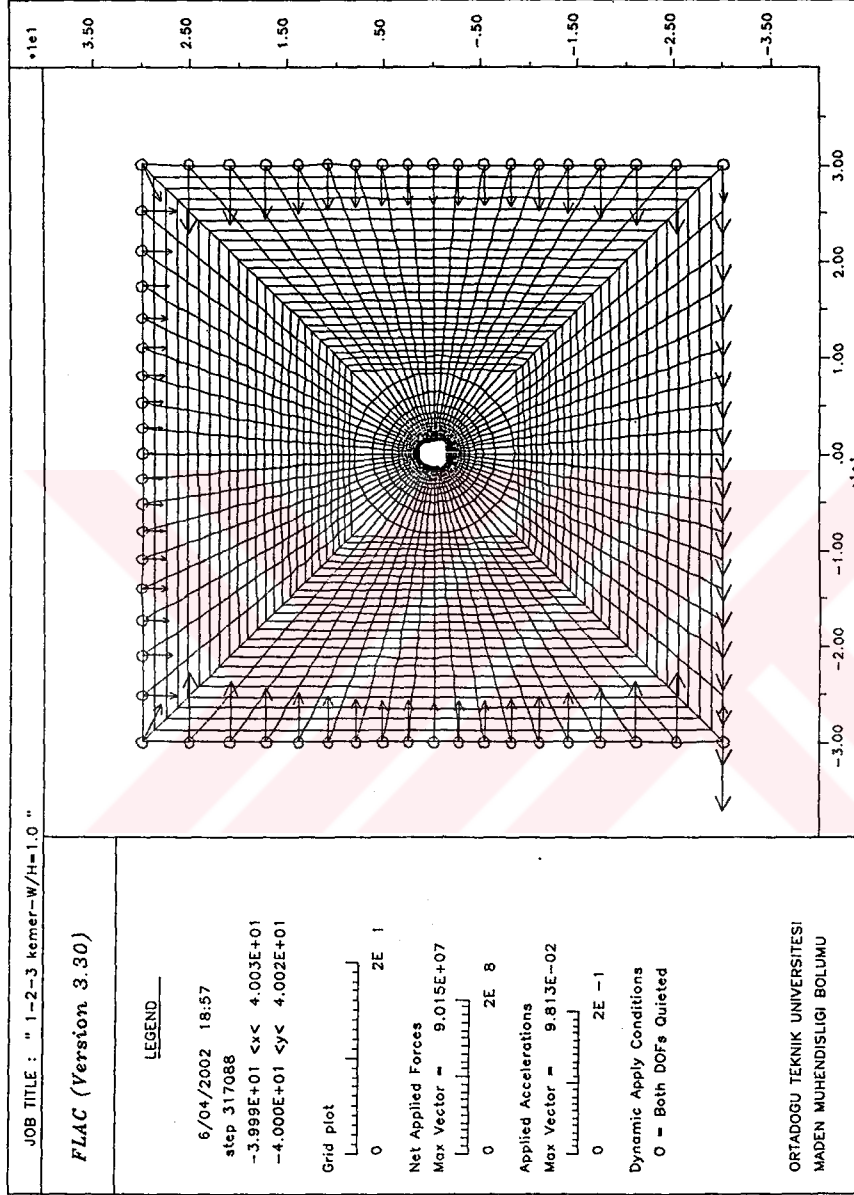
$$y(t) = A' \sin(2\pi ft) \quad (5.3)$$

Burada; A' , dalganın en büyük genliği; f , dalga frekansıdır. Dalga şekli Şekil 5.3.a’da gösterilmektedir. Artan-azalan genlikli sinüs işlevi ise,

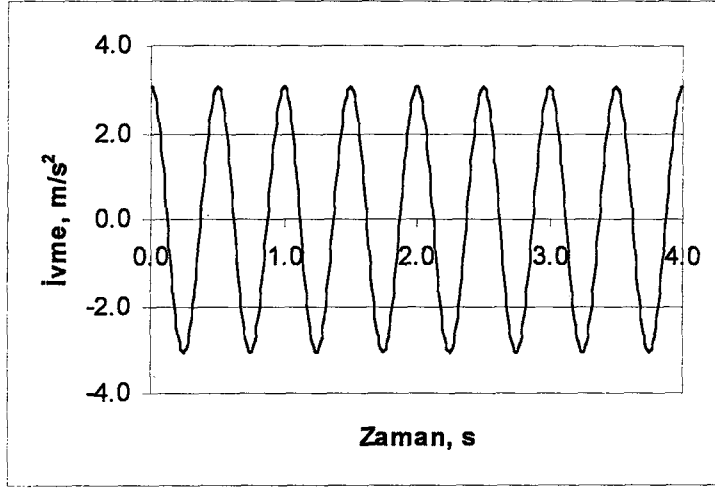
$$y(t) = \sqrt{\chi e^{-\vartheta t} \cdot t^\psi} \sin(2\pi ft) \quad (5.4)$$

ifadesiyle verilmektedir (Itasca, 1995). Burada; χ , ϑ ve ψ dalga şeklini etkileyen değiştirgelerdir. Bu değiştirgelerden ϑ arttıkça dalganın genliği ve süresi azalmakta, χ arttıkça dalga genliği artmakta ve ψ arttıkça dalganın başlangıç noktası orijinden uzaklaşmaktadır. Eşitlik 5.4 ile tanımlanan dalga şekli Şekil 5.3.b’de gösterilmektedir. Burada $\vartheta = 3$, $\chi = 200$, $\psi = 2.45$ ve $f = 2$ Hz alınmıştır. Gerçek bir depreme ait ivme kaydı da Şekil 5.3.c’de gösterilmektedir.

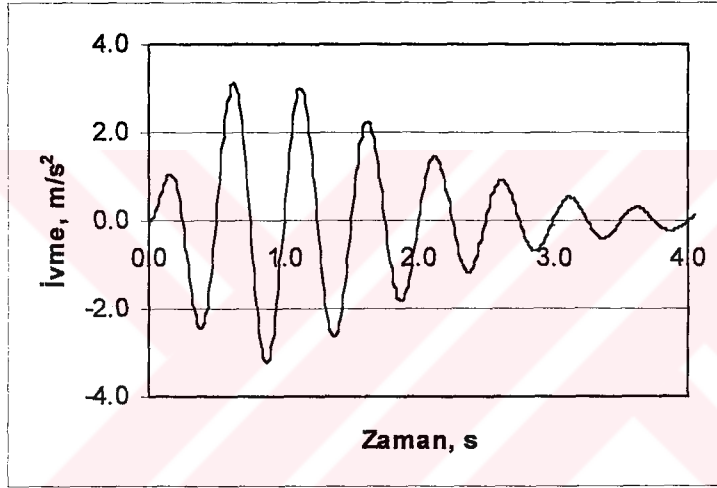
Çözümlemelerde bilgisayar kapasitesi ve hesaplama zamanı göz önünde bulundurularak, sisteme mekanik bir sönümler uygulanmamıştır.



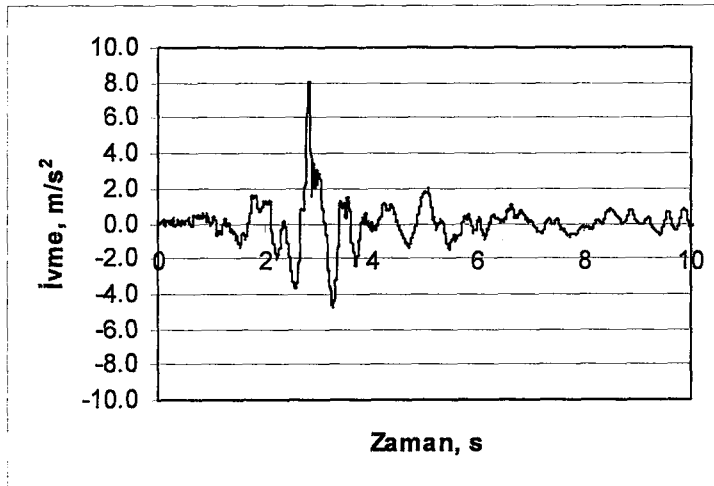
Şekil 5.2 Dinamik çözümlemelerde kullanılan kemer tavanlı açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı ve viskoz sınır.



a. Sabit genlikli sinüs işlevi



b. Artan-azalan genlikli sinüs işlevi



c. Gerçek deprem kaydı (1999 Düzce depremi, Bolu kaydı)

Şekil 5.3 Çözümlemede kullanılan dalga şekilleri.

Dalga'nın model içinde doğru yayılabilmesi için; oluşturulan sonlu farklar ağının en büyük boyutunun 10 katından daha uzun dalga boyuna sahip sismik dalga uygulanmıştır. Uygulanan sismik dalga özellikleri ile sonlu farklar ağının boyutlarına ilişkin bilgiler Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 Uygulanan sismik dalga ve sonlu farklar ağının özellikleri.

Açıklık şekli ve boyutu (W/H)	En büyük sonlu farklar ağı boyutu, $\Delta\ell$ (m)	$10\Delta\ell$	Uygulanan Dalga Özellikleri		
			E_m (GPa) C_s (m/s)	f	λ (m) (C_s / f)
Kemer Tavanlı W/H=1	5.7	57	10 1265	0.9	1406
				1.0	1265
				1.5	843
				2.0	633
				3.0	422
Kemer Tavanlı W/H=2	7.7	77	10 1265	1.5	843
Kemer Tavanlı W/H=3	9.6	96			
Daire	9.7	97	27.4 2093	0.92	2275
				0.93	2251
				1.00	2093
				1.92	1090
	5.7	57	48.7 2791	1.5	1860
			27.4 2093		1395
			15.4 1569		1046
			8.7 1177		785
			4.9 882		588
			2.7 662		441

En büyük yer ivmesi değerleri ile deprem büyüklüğü, odak mesafesi vb. değiştirmeler, bölgesel veya genel durumlar için ilişki kurulabilecek görgül eşitlikler ve abaklar mevcuttur. Türkiye için Aydan et al. (1998) tarafından aşağıdaki görgül eşitlik önerilmiştir:

$$(a_{\max})_g = 2.8 \left(e^{0.9 M_s} \cdot e^{-0.025 R_e} - 1 \right) \quad (5.5)$$

Burada; $(a_{\max})_g$, yeryüzünde oluşan en büyük arazi ivmesi ($\text{gal} = \text{cm/s}^2$) ve R_e , incelenen bölgenin deprem odağından uzaklığı (km)'dır. En büyük yer ivmesi değeri, deprem mühendisliğinde önemli bir tasarım değiştirgesi olarak kullanılmaktadır (Dowding and Rozen, 1978; John and Zahrah, 1987; Krinitzsky, 1993). Bu nedenle, çözümlemelerde girdi değiştirgesi olarak ivme değişimi kullanılmıştır. Yüzeyde oluşan ivme ve deprem şiddeti yeraltında daha az oluşmaktadır (Lee, 1987). Power et al. (1996) tarafından önerilen yeraltında oluşan ivmenin açıklığın derinliğine göre değişimi, yumuşak zeminler için Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Yeryüzünde oluşan ivmenin açıklığın derinliğine göre değişimi (Power et al., 1996; Hashash et al.'dan, 2001).

Tünel derinliği (m)	Tünelde oluşan ivmenin yeryüzünde oluşan ivmeye oranı
≤ 6	1.0
6 – 15	0.9
15 – 30	0.8
> 30	0.7

Ayrıca en büyük yer ivme değeri, en büyük hız değeri ile kolaylıkla tanımlanabilmektedir. Eşitlik 5.6.a'da hız değişimi tanımlanmıştır.

$$V(t) = V_{\max} \sin(2\pi ft) \quad (5.6.a)$$

Burada $V_{\max}$, en büyük arazi hızıdır. Bu eşitliğin zamana göre birinci türevi ivmeyi vermektedir.

$$a(t) = 2\pi f V_{\max} \cos(2\pi ft) \quad (5.6.b)$$

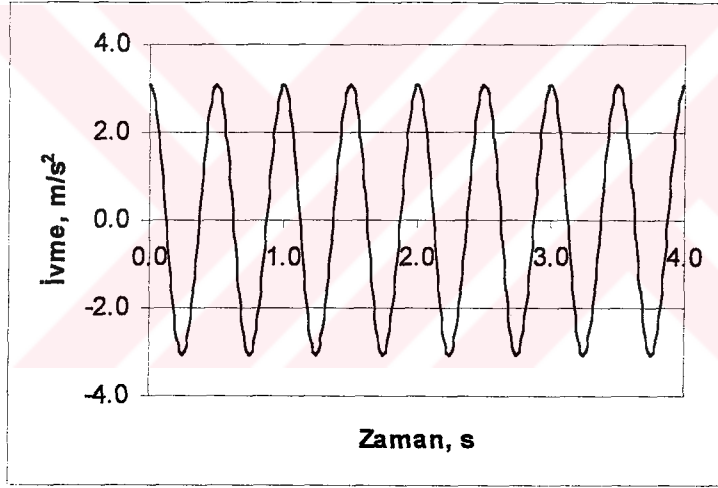
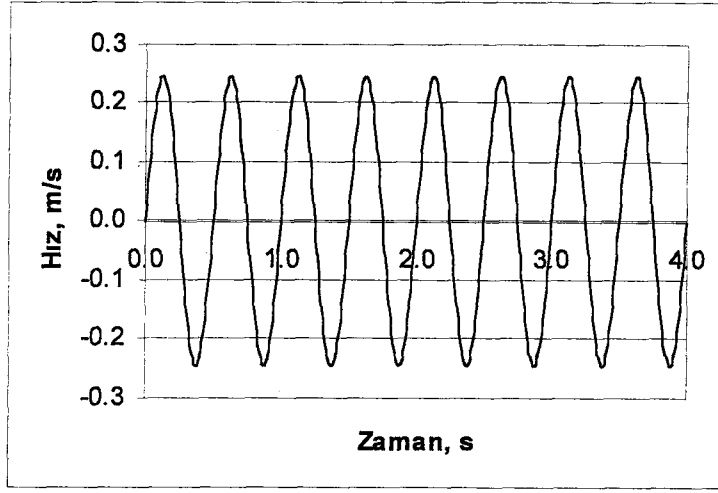
Eşitlik 5.6.b'de en büyük yer ivmesi,

$$a_{\max} = 2\pi f V_{\max} \quad (5.6.c)$$

eşitliği ile elde edilebilir. Örneğin, frekansı 2 Hz ve en büyük ivme değeri 3.08 m/s^2 olan bir arazideki en büyük hız değeri 0.24 m/s 'dir (Şekil 5.4). Söz konusu dinamik yüklemenin yaratacağı hız, yerdeğiştirme değerleri ve deprem şiddeti Şekil 4.3'te verilen abaktan da ayrıca elde edilebilmektedir.

Belirli bir deprem büyüklüğünü tanımlayabilecek ivme veya hız değeri değişimi, yukarıda değinilen dalga şekillerinden biri ile tanımlanmıştır. Tanımlanan bu sismik dalga, modelin tabanı boyunca uygulanmaktadır. Bu dalga düşey yönde ilerlerken, arazide yatay yönde titreşime neden olmaktadır (kesme dalgası). Modelde dinamik girdinin uygulandığı sınır hem x doğrultusunda (yatay) hem de y doğrultusunda (düşey) otomatik olarak sabitlenmektedir. Bu da modelin dönmesini (rijit cisim hareketini) engellemektedir.

Oluşturulan modelin önce birincil gerilmeler altında ve düzlem birim şekil değiştirme koşulunda statik çözümlemesi yapılmaktadır. Sonra, statik çözümlemesi yapılan modele dinamik yükleme uygulanmaktadır. Sonsuz ortamda,



Şekil 5.4 İvme ve hız değişimi ($f=2$).

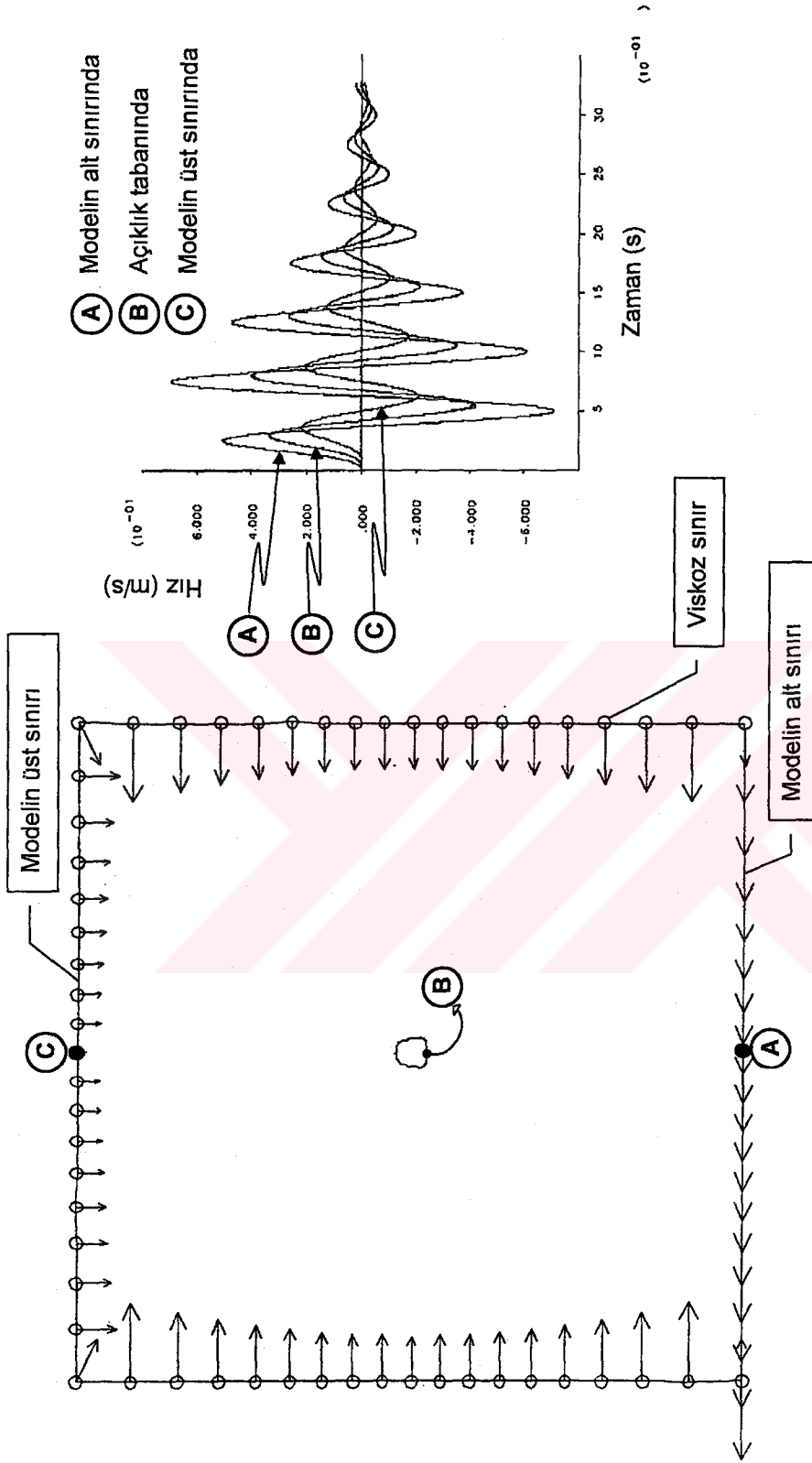
modelin tabanına uygulanan dinamik girdi frekans içeriği bozulmadan, modelin içinde (aşağıdan yukarıya) yayılırken genliği azalmaktadır (Şekil 5.5). Açıklığın duraylılığının değerlendirilmesinde, açıklık tabanında oluşan ivmenin en büyük genliği tasarım değiştirgesi olarak kabul edilmiştir.

5.2.5 Duraylılığın Karşılaştırılması

Yeraltı açıklıklarının dinamik yüklemelere maruz kalması sonucu, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi artma eğilimindedir. Duraylılığın değerlendirilmesinde yenilme bölgesi büyüklüğünde oluşan değişim esas alınmıştır. Bu amaçla; hem statik hem de dinamik yüklemeler sonucunda açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin büyüklüklerini karşılaştırma amacıyla geliştirilmiş olan “yenilme bölgesi indisi (IYZ)” kullanılmıştır. Bu indisin ayrıntıları Bölüm 3’de sunulmuştur.

5.3 DİNAMİK DURAYLILIK DEĞERLENDİRMESİ

Yeraltı açıklıklarının duraylılığının değerlendirilmesinde; derin yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkiyen sismik dalga şekli ve frekansı, en büyük yer ivmesi ve dalga yayılma yönü gibi dinamik değiştirgeler ile kaya kütesinin mekanik özelliklerinin dinamik yükleme koşullarındaki etkileri incelenmiştir. Birincil gerilmelere göre en uygun konumlandırma değerlendirilmiştir. Çalışmada, önce statik çözümleme yapılmış ve açıklık çevresindeki yenilme bölgesi belirlenerek IYZ değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra çeşitli girdi değiştirgeleri kullanılarak dinamik çözümlemeler yapılmış ve her bir durum için ayrı ayrı IYZ değerleri hesaplanmıştır. Son olarak, statik ve dinamik çözümlemelerden elde



Şekil 5.5 Modelin alt sınırına uygulanan ve model içine doğru yayılan dinamik yüklemenin genişliğindeki azalma.

edilen IYZ değerleri karşılaştırılarak, tasarım değiştirgelerinin duraylılığı ne şekilde değiştirdiği irdelenmiştir.

5.3.1 Dinamik Girdi Değiştirgelerinin Etkisi

Çalışmanın bu kısmında, önce, dinamik girdi değiştirgelerinden dalga şeklinin, en büyük ivmenin, frekansın ve dalga yayılma yönünün etkisi araştırılmıştır.

5.3.1.1 Dalga şeklinin Etkisi

Açıklığa etkiyen dinamik dalganın şeklinin açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin geometrisine ve IYZ değerlerine etkisi incelenmiştir. Çözümlemelerde hidrostatik birincil gerilme alanında yer alan dairesel bir açıklık incelenmiştir. Bu yaklaşımda amaç, açıklık geometrisinin ve birincil gerilme alanının açıklık çevresindeki yenilme bölgesinin geometrisi üzerindeki etkilerini en aza indirmektedir. şöyle ki; hidrostatik birincil gerilme alanındaki dairesel açıklık çevresinde statik yüklemeler sonucunda meydana gelen yenilme bölgesinin de sınırlarının dairesel olduğu bilinmektedir. Dinamik çözümlemelerden elde edilecek yenilme bölgesinin,

- kalınlığının statik çözümlemelerdeki kalınlıktan farklılığı,
- şeklinin daireselden farklılığı

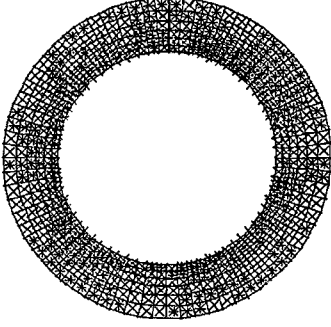
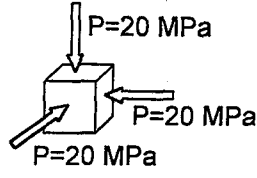
dinamik yüklemenin etkisiyle oluşacaktır. Böylece dinamik değiştirgelerin etkisi statik değiştirgelerin etkisinden ayrıtlanabilecektir.

Açıklık tabanında aynı en büyük ivme değerini veren farklı dalga şekilleri modele uygulanmış ve elde edilen yenilme bölgeleri ve IYZ değerleri karşılaştırılmıştır. Dalga şekilleri olarak Eşitlik 5.3 ile verilen sabit genlikli sinüs işlevi, Eşitlik 5.4 ile verilen artan-azalan genlikli sinüs işlevi, modelin alt yüzeyine x doğrultusu boyunca ivme değerleri olarak uygulanmıştır.

Açıklık tabanında oluşan aynı en büyük ivme değerlerinde, dalga şeklinin basit sinüs işlevi veya artan-azalan sinüs işlevi ile tanımlanmasının, açıklık çevresindeki yenilme bölgesi geometrisini ve IYZ değerlerini pek fazla değiştirmedeği belirlenmiştir (Şekil 5.6). Örneğin, açıklık tabanında oluşan en büyük ivmenin 0.66 g olduğu; dalga şeklinin artan-azalan genlikli sinüs işlevi olarak tanımlandığı durumda $IZY = 3.02$; dalga şeklinin sabit genlikli sinüs işlevi olarak tanımlandığı durumda da $IZY = 3.05$ gibi çok yakın değerler elde edilmiştir.

Dinamik çözümlemelerde, ayrıca depremlere ait ivme kayıtları da kullanılmıştır. Gerçek kayıtların kullanıldığı çözümleme sonuçlarıyla basitleştirilmiş dalga şekillerinin kullanıldığı çözümleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Başka bir ifadeyle, basitleştirilmiş dalga şekilleriyle gerçek deprem kayıtlarının ne kadar tanımlanabileceği ortaya konmuştur.

Çözümlemelerde, Erzincan (1993), Adana-Ceyhan (1998), Kocaeli (1999) ve Düzce (1999) depremlerine ilişkin sayısal kayıtlar dinamik girdi olarak kullanılmıştır (DAD, 2001; EERC, 2002). Bu depremler, ülkemizde yıkıcı etki yapmıştır. Ayrıca Düzce depremi de, az karşılaşılan yüksek ivme oluşturmuş bir depremdir. Bu depremlere ilişkin deprem kayıtları Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Deprem dalgalarının tanımlanmasında en önemli değişirgeler, dalganın en büyük



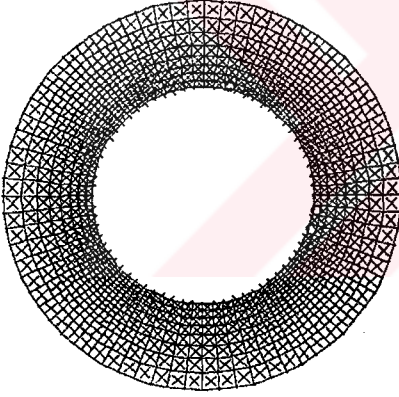
STATİK ÇÖZÜMLEME

Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

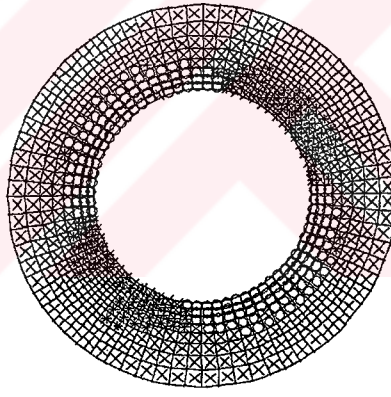
DINAMİK ÇÖZÜMLEME

$f=1.5$, $E_m=15.4$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³

a. Statik durum, IYZ=1.28

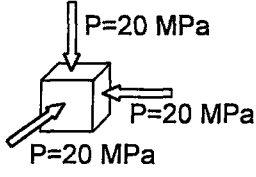


b. Artan-azalan genlikli dalga,
 $a_{max}=0.44$ g, IYZ=2.27



c. Sabit genlikli (sinüs işlevi) dalga,
 $a_{max}=0.45$ g, IYZ=2.27

Şekil 5.6 Hidrostatik birincil gerilme alanında, dinamik dalga şeklinin dairesel açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesine ve IYZ değerlerine etkisi.

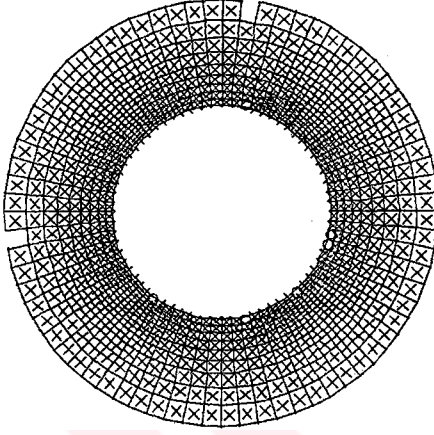


STATİK ÇÖZÜMLEME

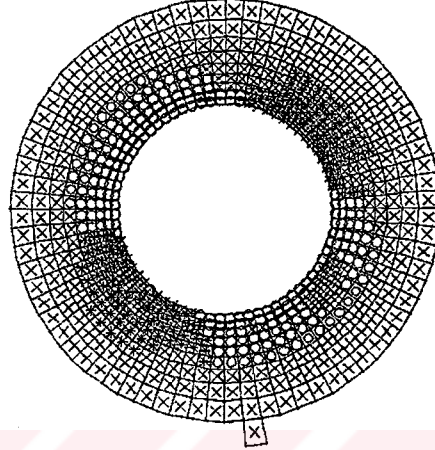
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
 $GSI=60$, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

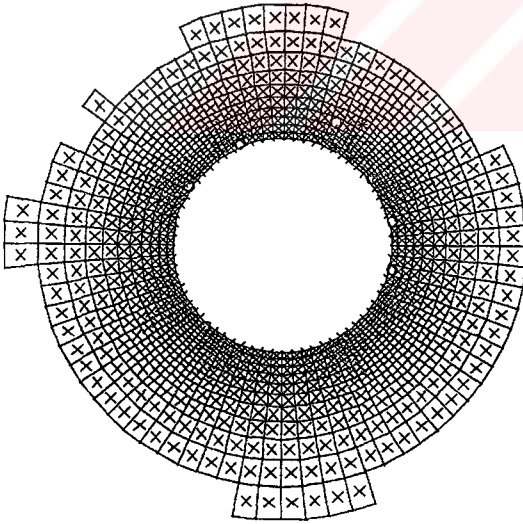
$f=1.5$, $E_m=15.4$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



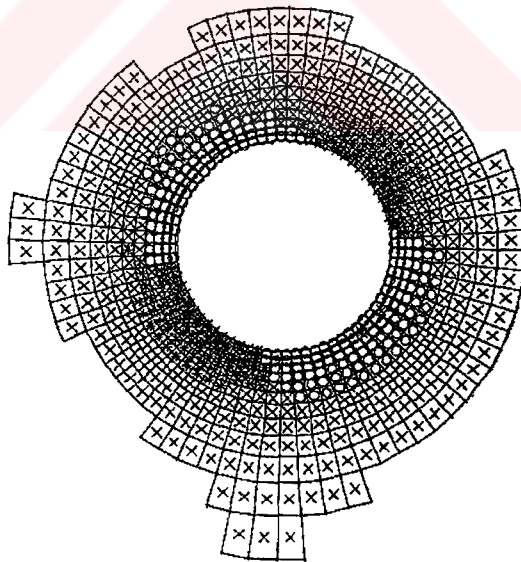
d. Artan-azalan genlikli dalga,
 $a_{max}=0.66$ g, IYZ=3.02



e. Sabit genlikli (sinüs işlevi) dalga,
 $a_{max}=0.66$ g, IYZ=3.05

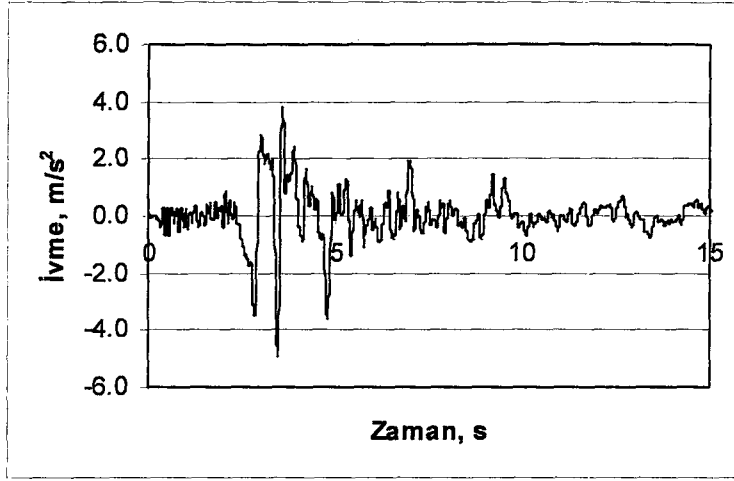


f. Artan-azalan genlikli dalga,
 $a_{max}=0.85$ g, IYZ=4.00

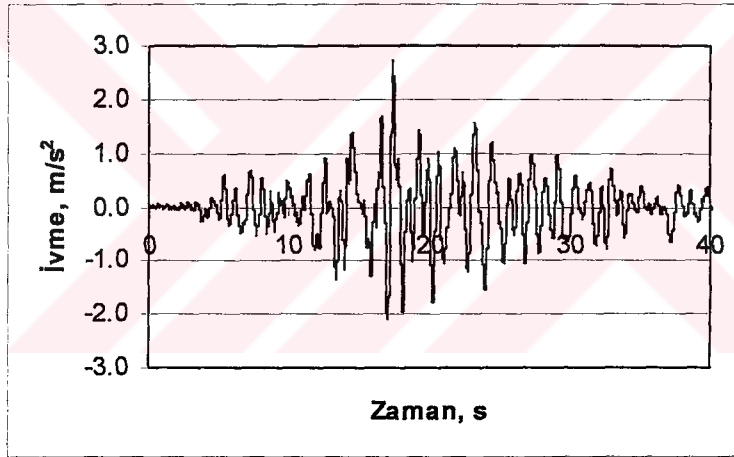


g. Sabit genlikli (sinüs işlevi) dalga,
 $a_{max}=0.87$ g, IYZ=4.12

Şekil 5.6 (devam ediyor).

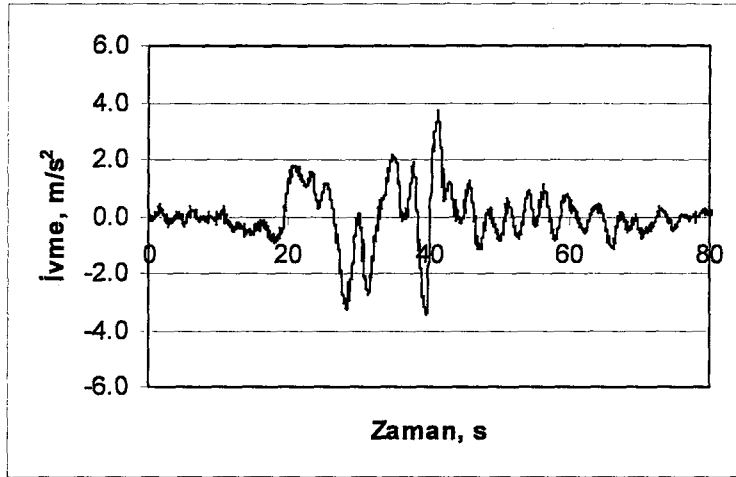


a. Erzincan depremi (13.03.1992), Erzincan kaydı, $a_{\max} = 4.92 \text{ m/s}^2$

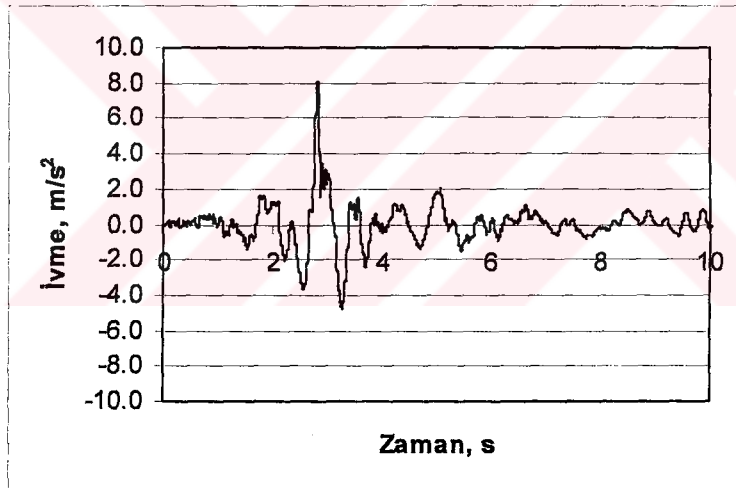


b. Adana-Ceyhan depremi (27.06.1998), Ceyhan kaydı, $a_{\max} = 2.71 \text{ m/s}^2$

Şekil 5.7 Çözümlemelerde kullanılan gerçek deprem kayıtları (DAD, 2001; EERC, 2002).



c. Kocaeli depremi (17.08.1999), Düzce kaydı, $a_{\max} = 3.76 \text{ m/s}^2$

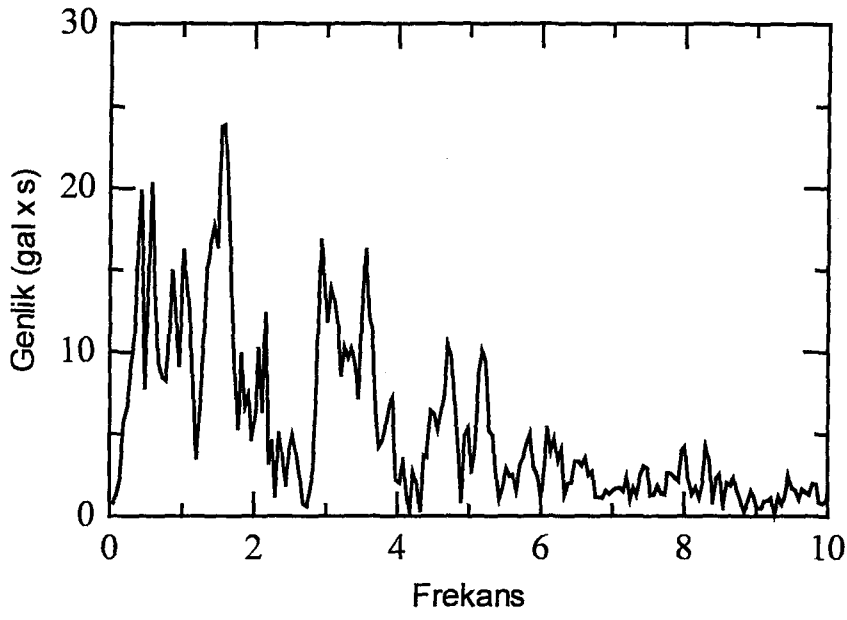


d. Düzce depremi (12.11.1999), Bolu kaydı, $a_{\max} = 8.06 \text{ m/s}^2$

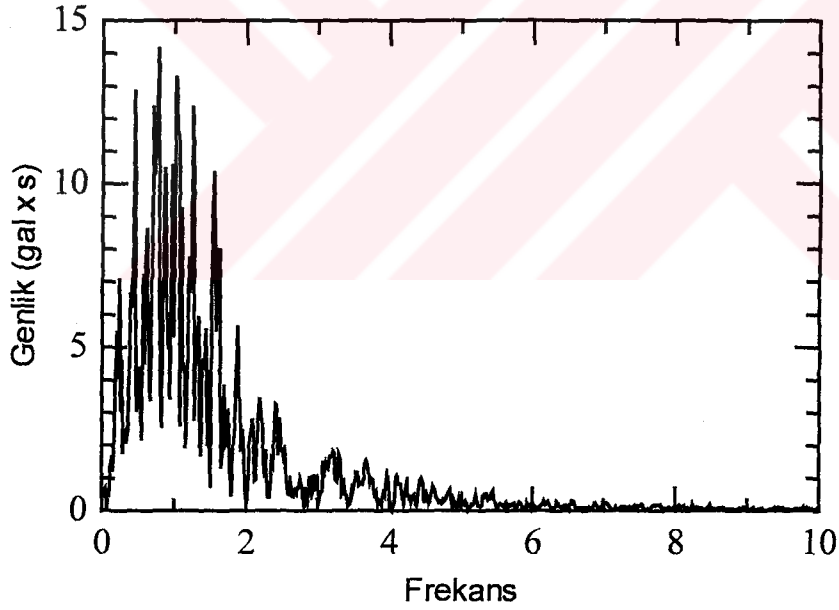
Şekil 5.7 (devam ediyor).

genliği, frekans ı ve sũresi olmaktadır. Fakat deprem dalgalarının ilk incelenmesinde, bu değiştirgelerden yalnızca en bũyũk genlik ve sũre hakkında bilgi sağlanmasına rağmen frekans iğeriği hakkında bilgi sağlanamamaktadır (Ohsaki, 1976). Bu amaçla deprem dalgasının etkin frekansı hakkında bilgi elde etmek için Fourier spektrumları hesaplanmıştır. Fourier spektrumu, gerçek deprem dalgalarının hangi frekans bileşenlerini iğerdiğini, hangi bileşenin genliğinin en bũyũk olduğunu gũstermek açısından yararlı olmaktadır. Ȗzellikle bũyũk genlikli bir bileşen bulunması halinde bu bileşenin etkin olduğu sũylenir. Bũyle bir dalga bileşeninin frekansına ya da periyoduna etkin frekans veya etkin periyot denir (Ohsaki, 1976). Deprem dalgasının etkin frekansı belli bir değer olarak tanımlanabileceği gibi, belli bir değer aralığında da tanımlanabilmektedir. Ȗzũmllemede kullanılan depremlere ait sayısal ivme kayıtlarına ilişkin Fourier spektrumlarının hesaplanmasında, Aydan (2000) tarafından geliştirilen bir bilgisayar programı kullanılmıştır. İncelenen deprem kayıtlarına ilişkin Fourier spektrumları şekil 5.8’de, bu depremlere ilişkin Ȗzellikler ise Ȗizelge 5.3’te sunulmuştur.

Dalga şekli olarak artan-azalan genlikli ve sabit genlikli sinũs işlevleri ile tanımlanan dalgaların, gerçek bir deprem dalgasının oluşturacağı dinamik etkiyi ne kadar tanımlayabileceği araştırılmıştır. Gerçek deprem dalgasının, modele uygulandığı durumlarda Ȗnemli tasarım değiştirgelerinden olan frekans ayrıca tanımlanmamaktadır. Bu nedenle basitleştirilmiş dalga şekillerinin kullanıldığı dalganın frekans iğeriğinin doğru belirlenmesi Ȗnemli olmaktadır. Daha Ȗnce bahsedildiği gibi, deprem dalgasının etkin frekansının ne olacağı Fourier spektrumları ile tahmin edilebilmektedir. Bazı durumlarda etkin frekans belirli bir değer aralığında tahmin edilebilmektedir. Ȗrneđin, Erzincan depreminin etkin frekansının 0.9-1.6 arasında oluştuğu belirlenmiştir. Basitleştirilmiş dalganın

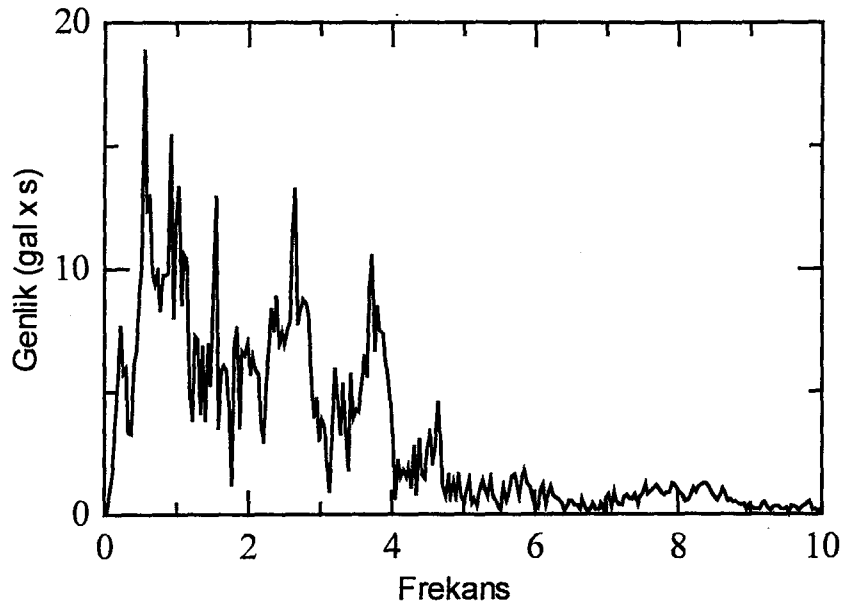


a. Erzincan depremi, Erzincan kaydı

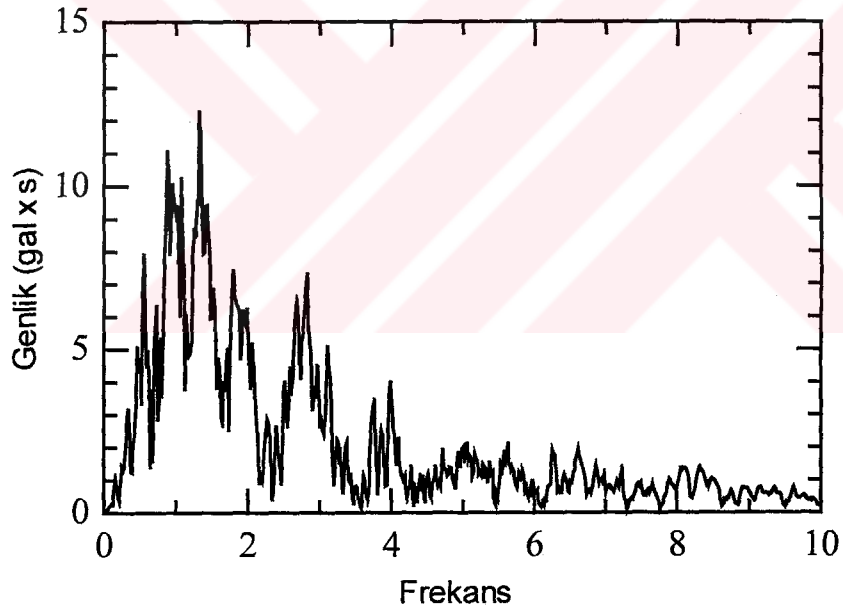


b. Adana-Ceyhan depremi, Ceyhan kaydı

Şekil 5.8 Dinamik çözümlemelerde kullanılan gerçek deprem kayıtlarına ilişkin Fourier spektrumları.



c. Kocaeli depremi, Düzce kaydı



d. Düzce depremi, Bolu kaydı

Şekil 5.8 (devam ediyor).

frekansının tahmin edilmesinde, deprem dalgasının en büyük ivme, en büyük hız değerleri ile ivme ve hız arasındaki matematiksel eşitlikler kullanılmıştır. Bu şekilde yapılan frekans tespitinin kaba ama pratik bir yaklaşım olduğu belirtilmelidir. Çözümlmelerde kullanılan bu frekans değerleri Çizelge 5.4'te sunulmuştur. Düzce depremi dışında, elde edilen frekans değerleri, Fourier spektrumu ile bulunan etkin frekans aralığının içinde yer almıştır. Bunun nedeni olarak, Düzce depremi Bolu kaydının, toprak zeminde ölçülmesi ve sıvılaşmanın gözlenmesi olabilir.

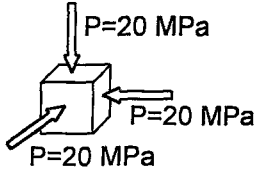
Çizelge 5.3 Gerçek deprem kayıtlarına ilişkin özellikler.

Deprem	Kayıt yeri Doğrultu (Kayıt yeri zemin özellği)	En büyük ivme (m/s^2)	En büyük hız (m/s)	Etkin frekans (Fourier Spektrumu)
Erzincan (13.03.1992)	Erzincan Meteo-roloji İstasyonu E-W (Toprak zemin)	4.92 (0.50 g)	0.85	0.9 - 1.6
Ceyhan (27.06.1998)	Ceyhan E-W	2.71 (0.28 g)	0.47	0.5 - 1.3
Gölcük (17.08.1999)	Düzce E-W (Toprak zemin)	3.76 (0.38 g)	0.60	0.8 - 1.1
Düzce (12.11.1999)	Bolu E-W (Toprak zemin)	8.06 (0.82 g)	0.67	0.7 - 1.5

Çizelge 5.4 Çözümlemede kullanılan gerçek deprem kayıtları ve basitleştirilmiş dalga şeklinde açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi indisi.

Dalga Şekli	Modelin alt sınırına uygulanan en büyük ivme (m/s ²)	Açıklık tabanında oluşan en büyük ivme (m/s ²)	frekans	IYZ
Erzincan depremi	4.92=0.50 g	3.45=0.35 g	----	1.67
Sabit genlikli	4.84=0.49 g	3.50=0.36 g	0.93	1.70
Artan-azalan genlikli	4.94=0.49 g	3.55=0.36 g	0.93	1.67
Ceyhan depremi	2.71=0.28 g	2.27=0.23 g	----	1.26
Sabit genlikli	3.20=0.33 g	2.35=0.24 g	0.92	1.24
Artan-azalan genlikli	3.20=0.33 g	2.35=0.24 g	0.92	1.25
Gölcük depremi	3.76=0.38 g	2.89=0.30 g	----	1.36
Sabit genlikli	4.00=0.41 g	2.89=0.30 g	1.0	1.36
Artan-azalan genlikli	4.12=0.42 g	2.89=0.30 g	1.0	1.36
Düzce depremi	8.06=0.82 g	5.54=0.56 g	----	1.26
Sabit genlikli	8.82=0.90 g	5.54=0.56 g	1.92	1.22
Artan-azalan genlikli	9.14=0.93 g	5.54=0.56 g	1.92	1.22

Tüm incelemelerde hidrostatik birincil gerilme alanında 5 m çapındaki bir dairesel açıklık incelenmiştir. Açıklığın tabanında aynı en büyük ivme değerlerini veren farklı dalga şekillerine sahip dinamik yükleme, modelin alt sınırı boyunca uygulanmıştır. Gerçek deprem dalgası ve basitleştirilmiş dalga şekillerinin esas alındığı çözümleme sonucu açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri ve IYZ değerleri çok yakın sonuçlar vermiştir (Şekil 5.9-5.12). İncelenen depremlere ilişkin kayıtlar yeryüzünde kaydedilmiş olup buradaki çözümlemelerde ise, modelin alt sınırı boyunca uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu depremlerin yeraltındaki açıklıkta yaptığı etkinin gerçek sonuçları olarak algılanmamalıdır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, açıklık tabanındaki en büyük ivme değerleri tasarım değiştirgesi olarak ele alınmıştır. Bu depremlerin açıklık tabanında oluşturduğu en büyük ivme değerleri Çizelge 5.4'te sunulmuştur.

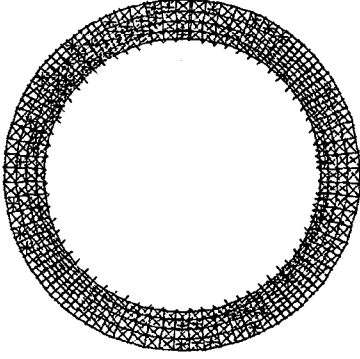


STATİK ÇÖZÜMLEME

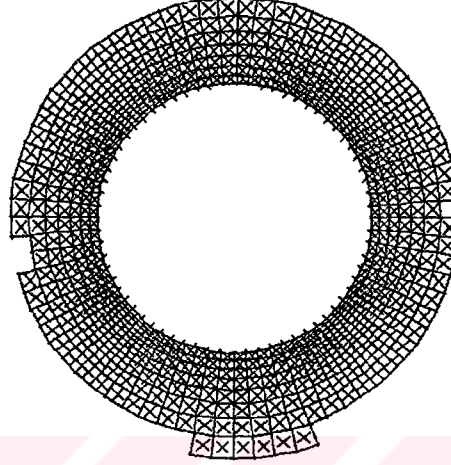
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
 $GSI=70$, $m_i=10$, $m_r=2.23$, $s_r=0.00143$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

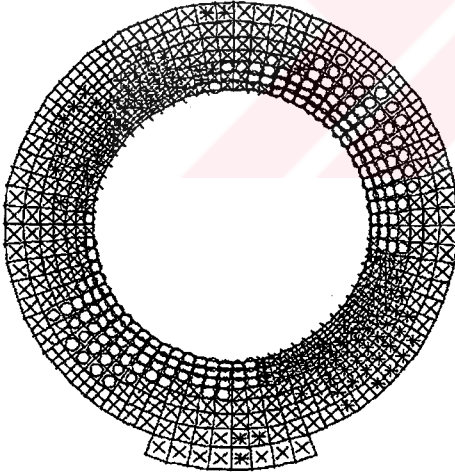
$f=0.93$, $E_m=27.4$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



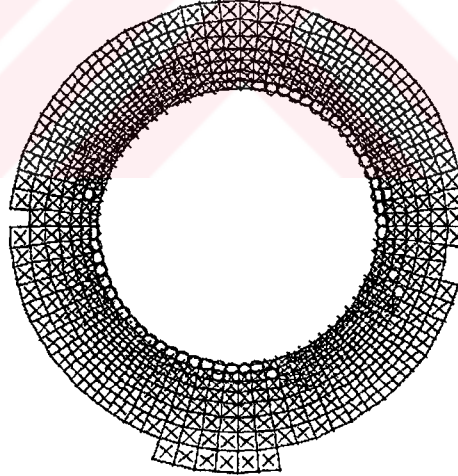
a. Statik durum, $IYZ=0.66$



b. Deprem dalgası, $a_{max}=0.35$ g,
 $IYZ=1.67$

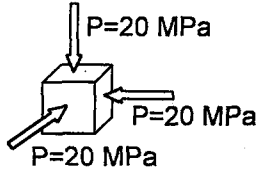


c. Sabit genlikli dalga,
 $a_{max}=0.36$ g, $IYZ=1.70$



d. Artan-azalan genlikli dalga,
 $a_{max}=0.36$ g, $IYZ=1.67$

Şekil 5.9 Erzincan depremine ait dalga şekli ve sinüs işlevi ile tanımlanan dalga şekilleri kullanılarak yapılan çözümlemelerin karşılaştırılması.

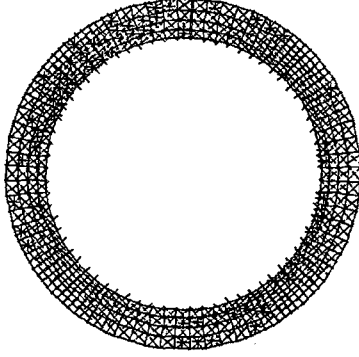


STATİK ÇÖZÜMLEME

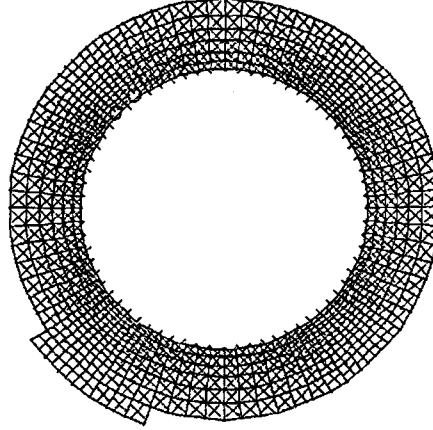
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=70, $m_i=10$, $m_r=2.23$, $s_r=0.00143$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

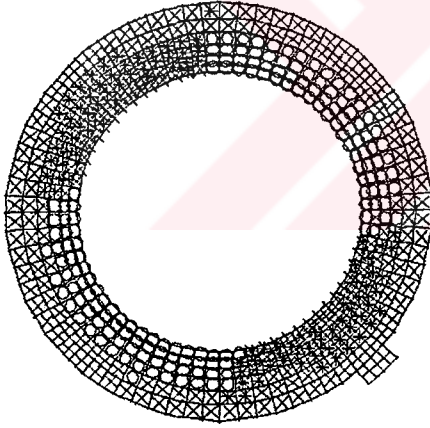
$f=0.92$, $E_m=27.4$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



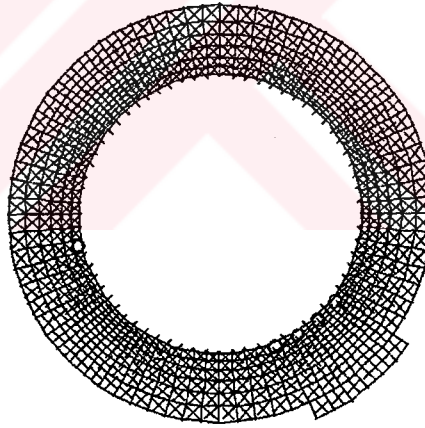
a. Statik durum, IYZ=0.66



b. Deprem dalgası, $a_{max}=0.23$ g,
IYZ=1.26

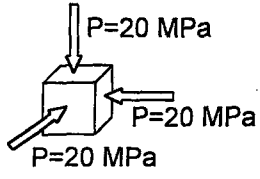


c. Sabit genlikli dalga,
 $a_{max}=0.24$ g, IYZ=1.24



d. Artan-azalan genlikli dalga,
 $a_{max}=0.24$ g, IYZ=1.25

Şekil 5.10 Adana-Ceyhan depremine ait dalga şekli ve sinüs işlevi ile tanımlanan dalga şekilleri kullanılarak yapılan çözümlerinin karşılaştırılması.

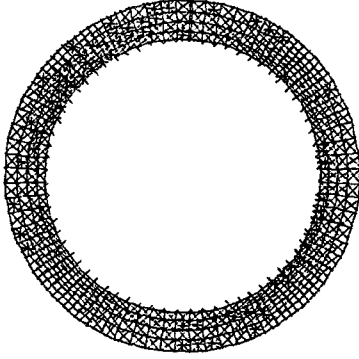


STATİK ÇÖZÜMLEME

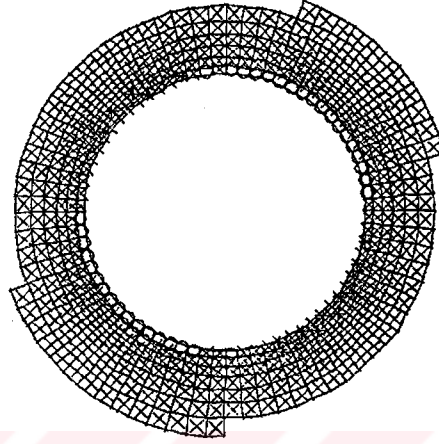
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=70, $m_i=10$, $m_r=2.23$, $s_r=0.00143$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

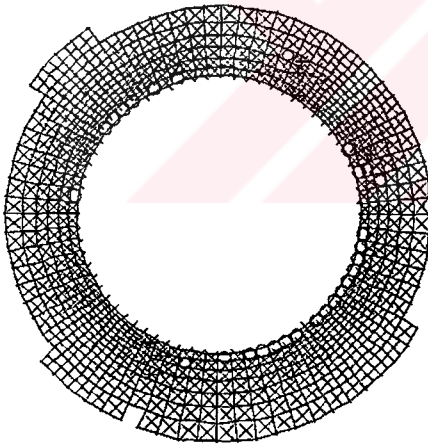
$f=1.0$, $E_m=27.4$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



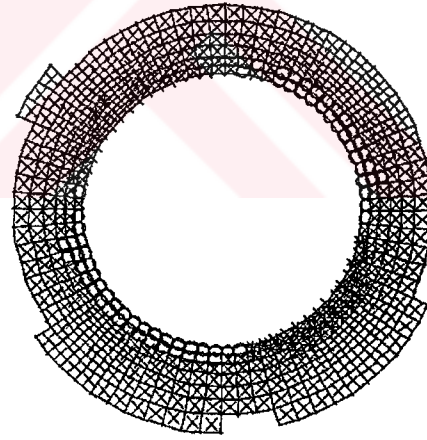
a. Statik durum, IYZ=0.66



b. Deprem dalgası, $a_{max}=0.30$ g,
IYZ=1.36

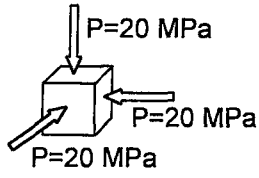


c. Sabit genlikli dalga,
 $a_{max}=0.30$ g, IYZ=1.36



d. Artan-azalan genlikli dalga,
 $a_{max}=0.30$ g, IYZ=1.36

Şekil 5.11 Kocaeli depremine ait dalga şekli ve sinüs işlevi ile tanımlanan dalga şekilleri kullanılarak yapılan çözümlemelerin karşılaştırılması.

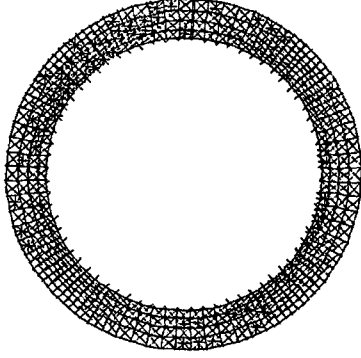


STATİK ÇÖZÜMLEME

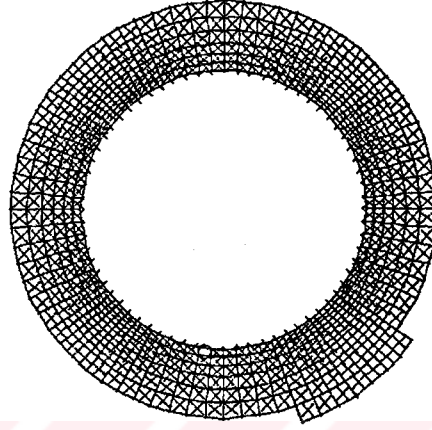
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=70, $m_i=10$, $m_r=2.23$, $s_r=0.00143$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

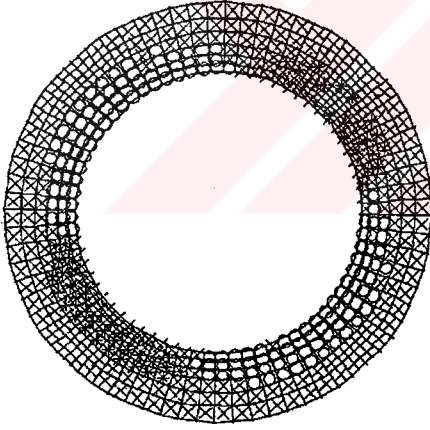
$f=1.92$, $E_m=27.4$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



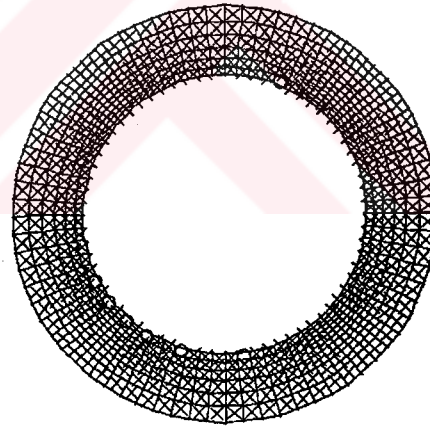
a. Statik durum, IYZ=0.66



b. Deprem dalgası, $a_{max}=0.56$ g,
IYZ=1.26



c. Sabit genlikli dalga,
 $a_{max}=0.56$ g, IYZ=1.22



d. Artan-azalan genlikli dalga,
 $a_{max}=0.56$ g, IYZ=1.22

Şekil 5.12 Düzce depremine ait dalga şekli ve sinüs işlevi ile tanımlanan dalga şekilleri kullanılarak yapılan çözümlemelerin karşılaştırılması.

İncelenen gerçek deprem dalgalarının yeraltı açıklığı tabanında oluşturduğu en büyük ivme değerlerine göre yapılan değerlendirmede, en büyük ivme değerine sahip deprem dalgasının açıklık çevresinde daha büyük yenilme bölgesi oluşturması beklenmemelidir. Ayrıca deprem dalgasının sahip olduğu etkin frekansının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunun en çarpıcı örneği, Düzce deprem kaydı ile yapılan çözümlemede görülmektedir. Düzce deprem dalgasının kullanıldığı durumda açıklık tabanında oluşan en büyük ivme değeri 0.56 g olmuştur. Düzce depremi kaydı, incelenen diğer deprem dalgaları içinde en büyük ivme değerine sahip olmasına karşın, açıklık çevresindeki oluşturduğu yenilme bölgesi büyüklüğü ve IYZ değeri daha küçüktür. Örneğin; Düzce depremi kaydının kullanıldığı durumda açıklık tabanında oluşan ivme 0.56 g ve $IZY = 1.26$ oluşmasına rağmen, Erzincan depremi kaydının kullanılmasında ise ivme 0.35 g ve $IZY = 1.67$ elde edilmiştir. Çünkü, Düzce depreminin sahip olduğu etkin frekans diğer depremilerin frekansına göre daha yüksektir. Deprem dalgalarının yeraltında yaptığı etkinin incelenmesinde; hem en büyük genlik değerlerinin hem de frekans değerinin birlikte göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Deprem dalgasının uygulanmasıyla birlikte açıklık çevresinde çekme ve basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Bu gerilmeler açıklığa etkiyen dalga o andaki değerine göre değişmektedir. Açıklık çevresindeki en büyük gerilme, dalga o andaki büyük genliğinin etkidiği durumda oluşmaktadır. Açıklığa etkiyen dalga o andaki büyük genliğinde, dalga yayılma doğrultusu ile 45° açı yapan doğrultuda en büyük basınç veya çekme gerilmeleri oluşmaktadır (Okamoto, 1973; John and Zahrah, 1987). Bu çalışmada, incelenen deprem dalgalarından sabit genlikli sinüs işlevi ile tanımlanan dalga şeklinde, açıklık çevresinde çekme bölgeleri olduğu görülmektedir. Dalga, modelin alt sınırına uygulandığı için aşağıdan yukarıya

doğru yayılmıştır. Çözümlemeye dalganın en büyük genliğine üçüncü defa ulaşıldığı sırada son verildiğinden Şekil 5.9.b-5.12.b'de görüldüğü gibi çekme gerilmeleri düşey yönde ilerleyen dalganın doğrultusuyla 45° açı yapacak doğrultuda yoğunlaşmıştır. Çözümleme sırasında dalganın, herhangi bir çözümleme zamanındaki genliğine göre açıklık çevresinde oluşan yenilme türleri değişim göstermektedir. Artan-azalan genlikli dalganın uygulandığı durumda zamana bağlı dalga genliği giderek azaldığı için, açıklık çevresinde oluşan çekme ve basınç gerilmeleri de giderek azalmaktadır. Dinamik çözümlemeler sonucu oluşan yenilme bölgesi uygulanan dalganın en büyük genliğine ulaştığı duruma kadar artmaktadır. Dalganın en büyük genliğine ulaştıktan sonra dalganın daha az genliklerle uygulanması yenilme bölgesini değiştirmemektedir.

Basitleştirilmiş dalga şekillerinin kullanıldığı durumlarda elde edilen yenilme bölgesi, gerçek deprem kayıtlarının kullanıldığı durumlarda belirlenen yenilme bölgesi ile çok yakın sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, daha sonraki aşamalarda, dalga şekli olarak artan-azalan genlikli sinüs işlevinin kullanılmasına karar verilmiştir.

5.3.1.2 En Büyük Yer İvmesinin Etkisi

Bu bölümde, en büyük yer ivmesinin değişiminin yeraltı açıklığının duraylılığını ne şekilde etkilediği incelenmiştir. Genişliği yüksekliğine eşit ($W/H = 1$) olan kemer tavanlı açıklık, anizotropik ve düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında oluşturulmuştur. Bu açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinin dayanımı Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre tanımlanmıştır. Açıklığı çevreleyen kaya malzemesi için $\sigma_{ci} = 75$ MPa, $m_i = 10$, $GSI = 60$ ($m_b = 0.24$, $s = 0.0117$ ve $a = 0.5$); kırılmış kaya kütlelerine ait değerler ise $m_r = 1$ ve $s_r = 0.005$ alınmış ve kaya

kütlesinin deformasyon modülü 10 GPa olarak seçilmiştir. Eşitlik 4.1 kullanılarak ortamdaki P dalgası yayılma hızı $C_p = 2190$ m/s ve S dalgası yayılma hızı $C_s = 1265$ m/s olarak bulunmuştur. Çözümlemelerde, modelin tabanı boyunca artan-azalan genlikli sinüs işlevi uygulanmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi, bu dalga arazide yatay yönde titreşime neden olmaktadır. Dalga'nın frekansı ($f = 2$ Hz) aynı kalmak koşuluyla en büyük ivme değerleri değiştirilmiştir. Tüm durumlarda, en büyük ivme değeri artışı ile açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değeri artmıştır. Şekil 5.13-5.14'te yenilme bölgesi geometrisi değişimi ve Şekil 5.15'te IYZ değerlerinin değişimi sunulmuştur.

Anizotropik Birincil Gerilme Alanı

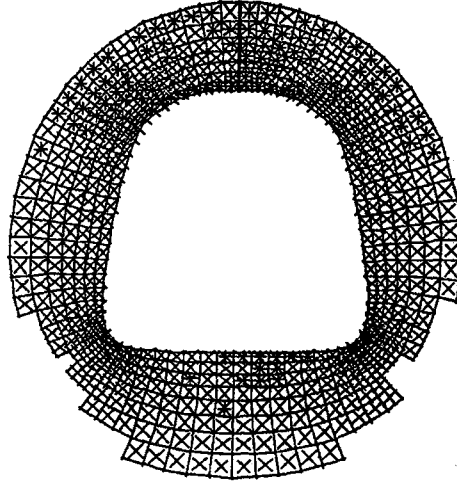
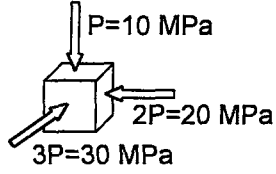
Anizotropik birincil gerilme alanında; düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v = P_3$) olduğu durumlarda, açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu bir görüntü vermektedir (Gerçek ve Geniş, 1998). Bu durum, dünyanın çeşitli yörelerinde yapılan gözlemlerle rapor edilmiş ve statik çözümlemelerle de Bölüm 3'te doğrulanmıştır. Statik durumda elde edilen bu bulgu, açıklığa etkiyen dinamik yüklemelerden sonra değişmemiştir (Şekil 5.13 ve 5.14). Açıklığın uzun ekseninin en küçük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması durumunda (duraylılık açısından olumsuz konumlandırma), en büyük ivmenin 0.4 g'den büyük değerlerinde ($a_{max} > 0.4$ g) IYZ değerlerindeki artış ön plana çıkmaktadır (Şekil 5.15.a).

STATİK ÇÖZÜMLEME

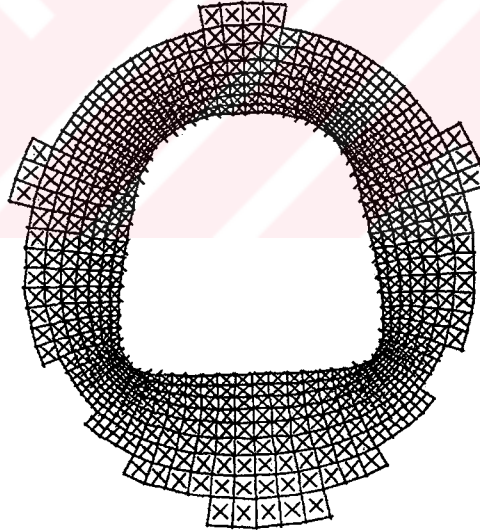
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=1.72



b. $a_{max} = 0.22$ g, IYZ=1.94

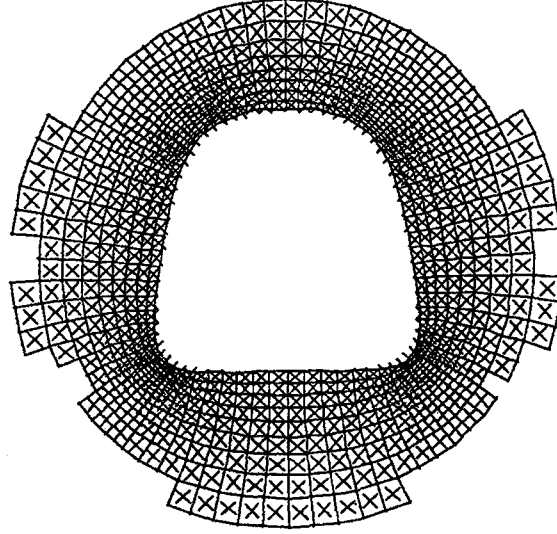
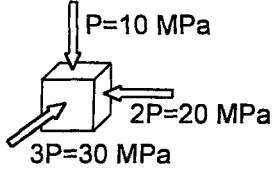
Şekil 5.13 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=30$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

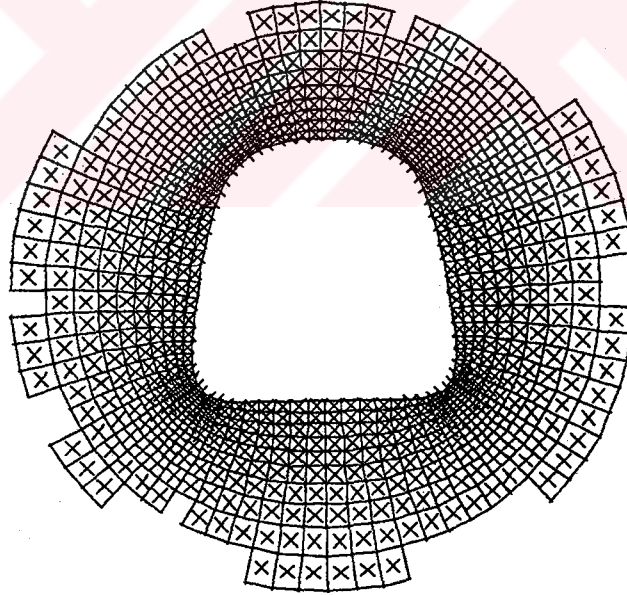
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{\max} = 0.53$ g , IYZ=2.57



d. $a_{\max} = 0.73$ g , IYZ=3.51

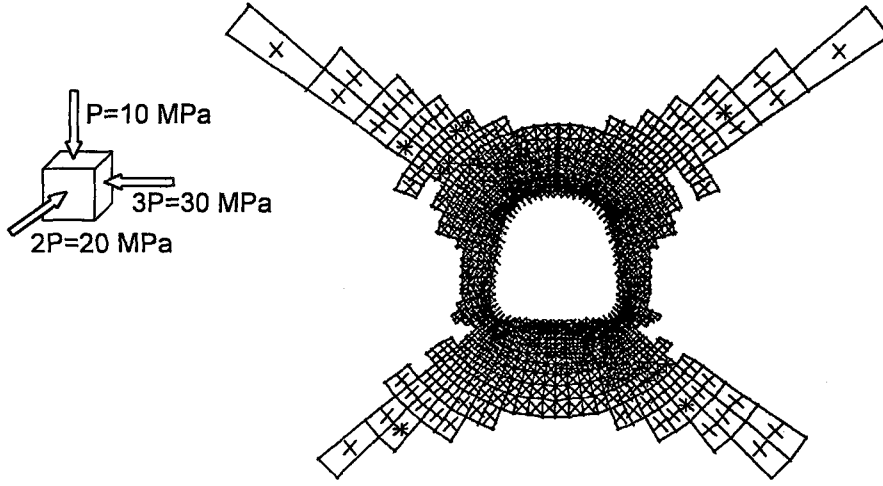
Şekil 5.13 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

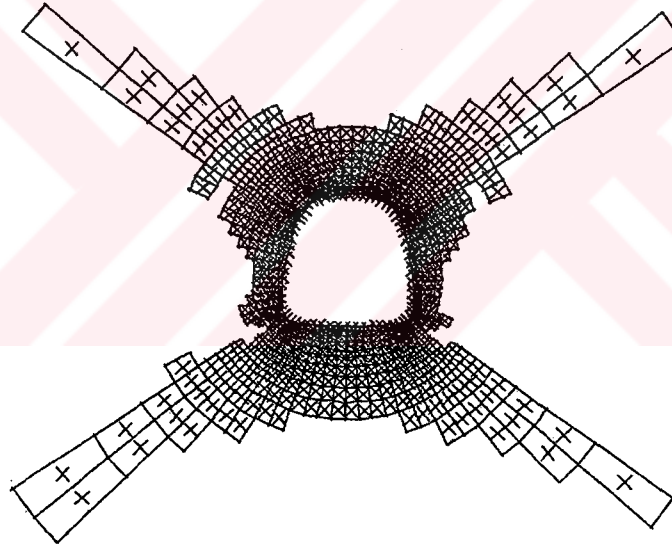
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DINAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=5.92



b. $a_{max} = 0.22$ g , IYZ=6.58

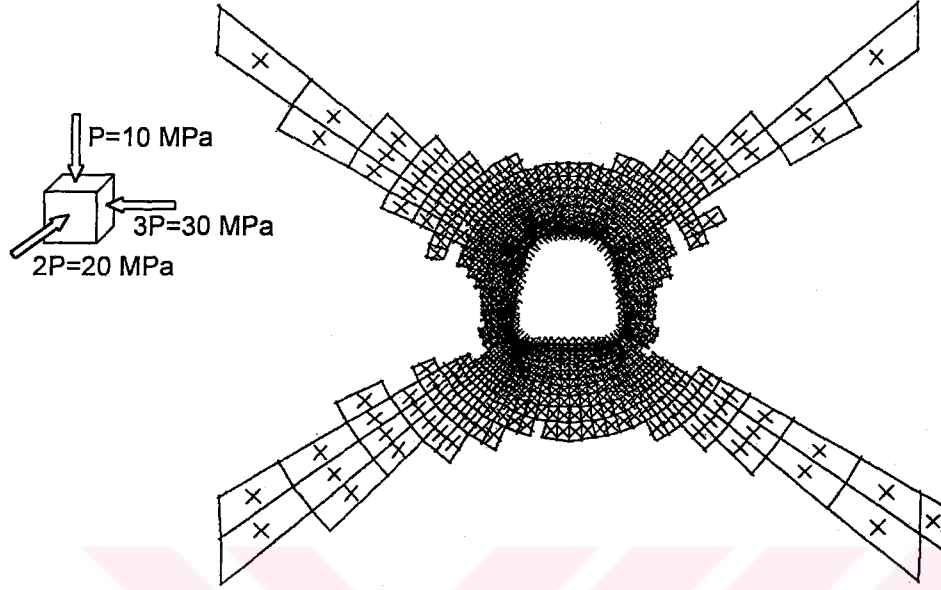
Şekil 5.14 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=30$ MPa ve $P_z=20$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

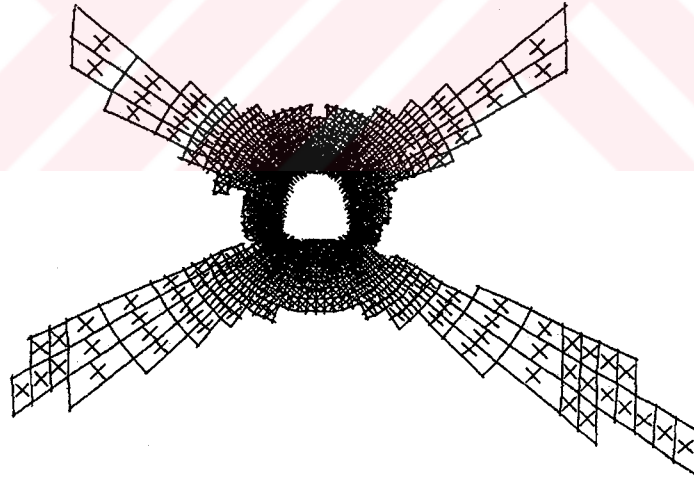
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{max} = 0.53$ g, IYZ=11.60



d. $a_{max} = 0.73$ g, IYZ=18.00

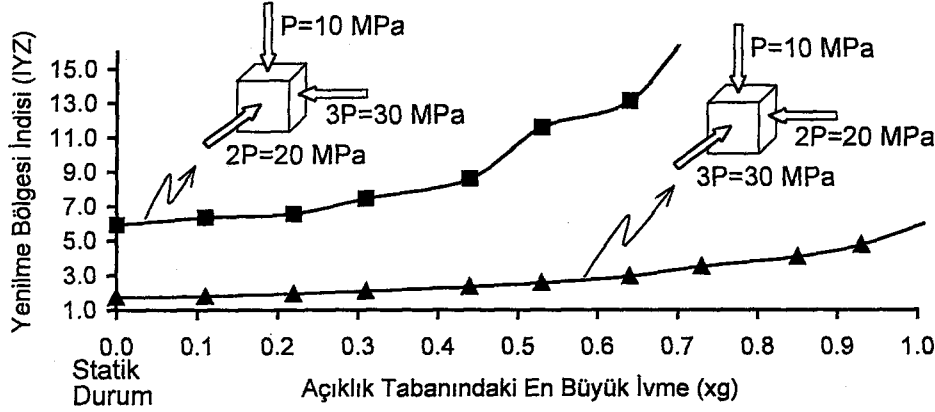
Şekil 5.14 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

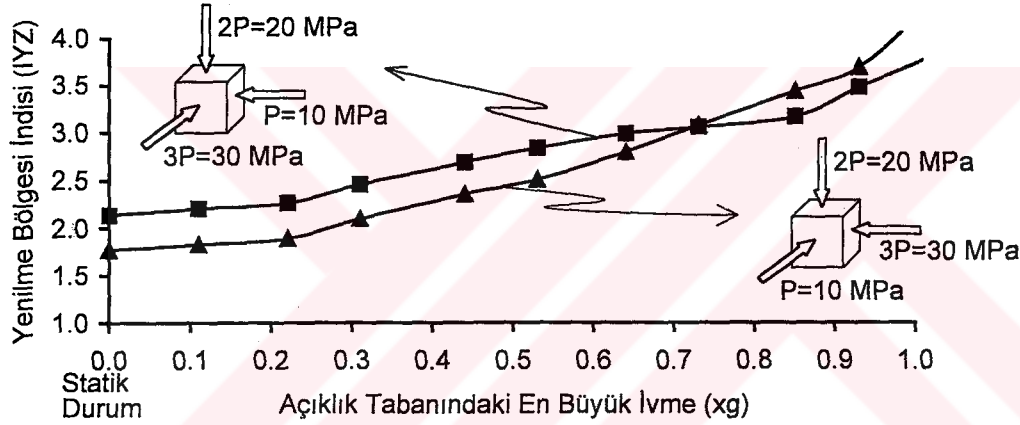
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

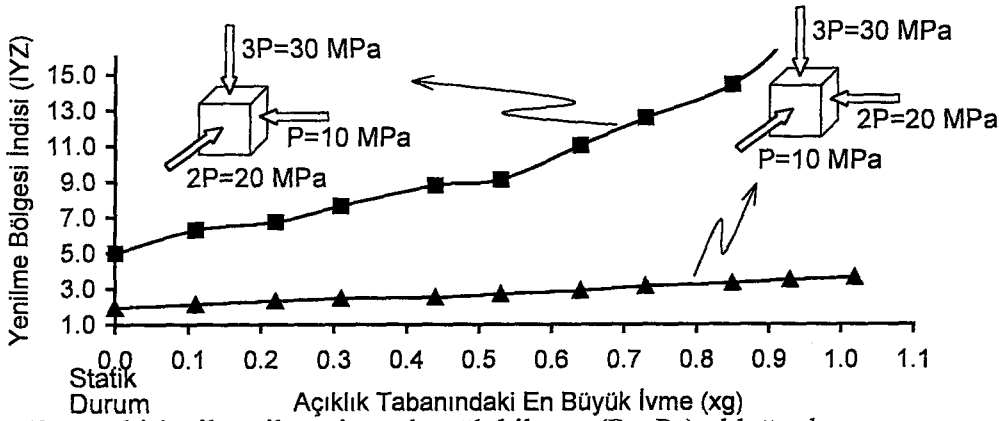
Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$) olduğu durum



b. Düşey birincil gerilmenin ortanca bileşen ($P_v=P_2$) olduğu durum



c. Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_1$) olduğu durum

Şekil 5.15 W/H=1 olan kemer tavanlı açıklığın anizotropik birincil gerilme alanlarında, açıklık tabanındaki en büyük ivme ile IYZ değerleri değişimi.

Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme ($P_v = P_2$) olduğu durumlarda, açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden büyüğüne ya da küçüğüne paralel konumlandırılması duraylılık açısından belirgin bir farklılık yaratmamaktadır (Gerçek ve Geniş, 1998). Açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmeden büyüğüne veya küçüğüne paralel olduğu durumlarda, dinamik yüklemenin artışı ile yenilme bölgesindeki ve IYZ değerlerindeki artış benzer olmuştur. Bu nedenle, dinamik yükleme koşullarında da statik durumda elde edilen bu bulgu geçerli olmaktadır (Şekil 5.16 ve 5.17). İncelenen durum için $a_{max} < 0.7$ g olduğu zaman, açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden küçüğüne paralel olacak şekilde konumlandırılması duraylılık için daha olumlu olmaktadır (Şekil 5.15.b).

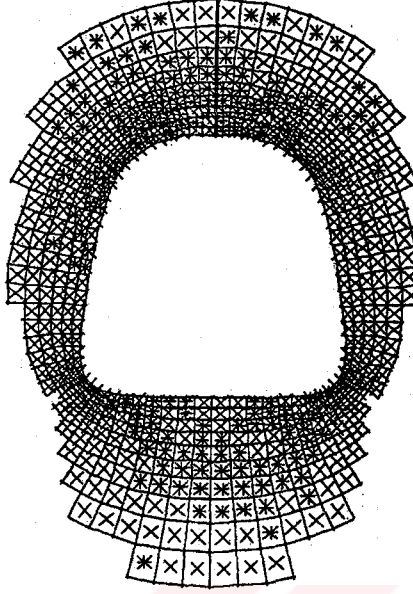
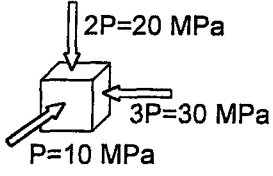
Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v = P_1$) olduğu durumlarda, açıklığın uzun ekseninin en küçük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu bir görüntü vermektedir. Bu, incelenen ilk durumun tam tersi bir sonuçtur (Gerçek ve Geniş, 1998). Statik durumda elde edilen bu bulgu, açıklığa etkiyen dinamik yüklemeden sonra da değişmemiştir (Şekil 5.18 ve 5.19). Açıklığın uzun ekseninin en küçük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması durumunda, dinamik yüklemeden sonra IYZ değerlerindeki artış daha az oluşmaktadır. Açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması durumunda (duraylılık açısından olumsuz konumlandırma), $a_{max} > 0.5$ g değerlerinde, statik duruma göre yenilme bölgesi büyüklüğü ve IYZ değerlerindeki artış belirginleşmektedir (Şekil 5.15.c).

STATİK ÇÖZÜMLEME

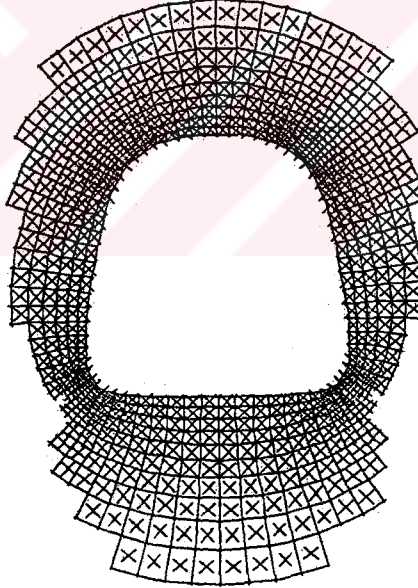
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DINAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=2.14



b. $a_{max} = 0.22$ g , IYZ=2.27

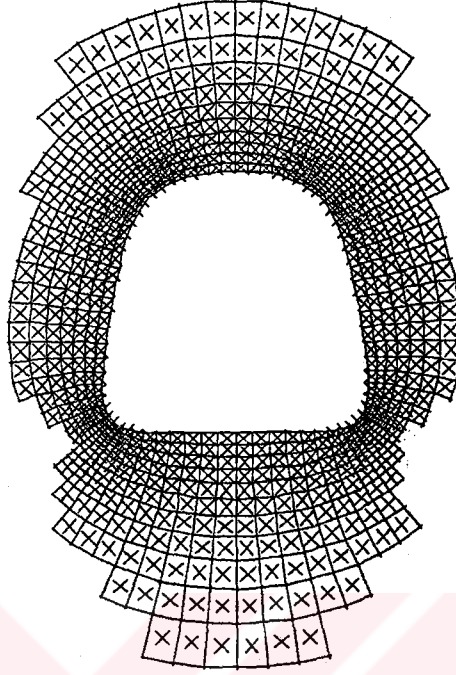
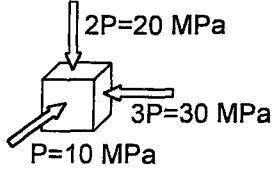
Şekil 5.16 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=20$ MPa, $P_h=30$ MPa ve $P_z=10$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

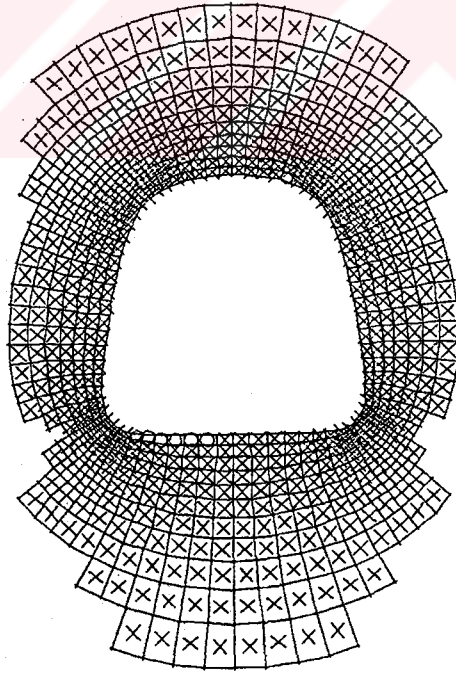
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{\max} = 0.53$ g , IYZ=2.84



d. $a_{\max} = 0.73$ g , IYZ=3.06

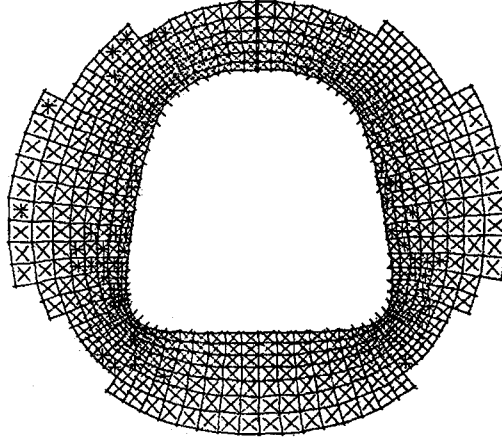
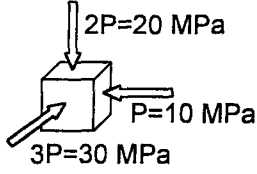
Şekil 5.16 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

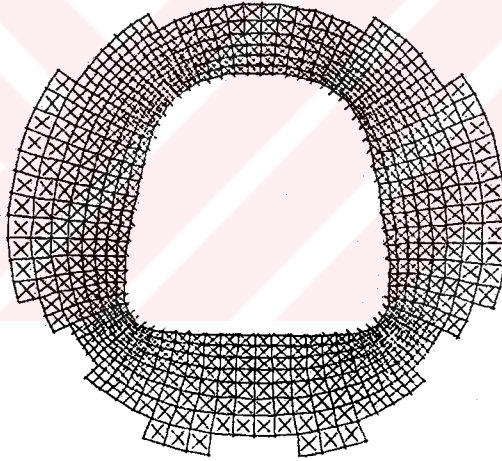
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=1.77



b. $a_{max} = 0.22$ g , IYZ=1.89

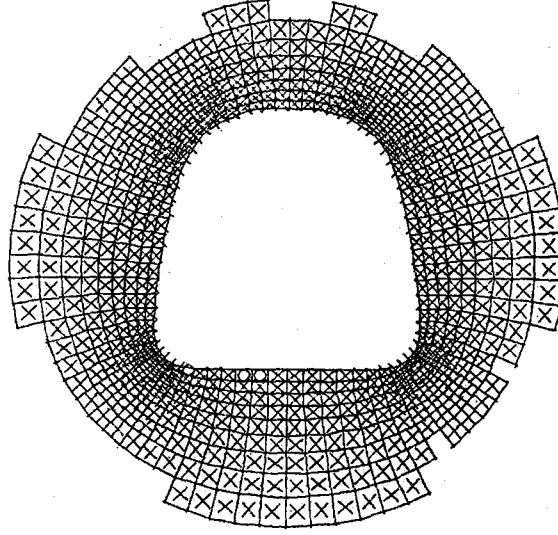
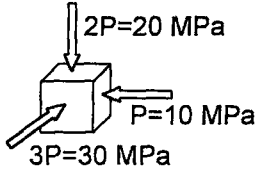
Şekil 5.17 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=20$ MPa, $P_h=10$ MPa ve $P_z=30$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

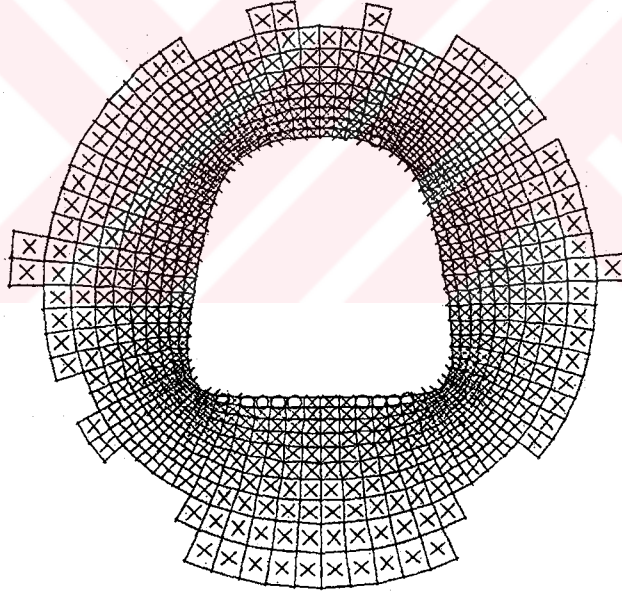
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_f=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{max} = 0.53$ g , IYZ=2.51



d. $a_{max} = 0.73$ g , IYZ=3.08

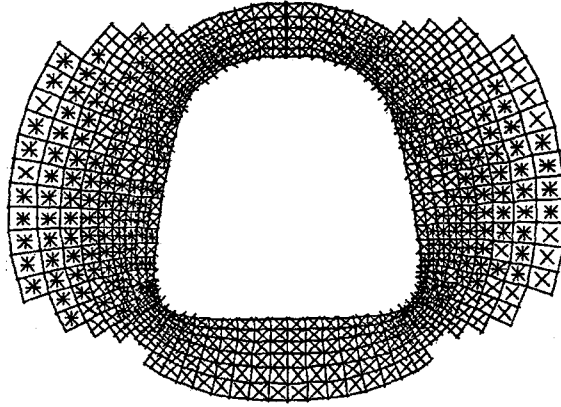
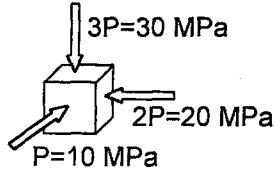
Şekil 5.17 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

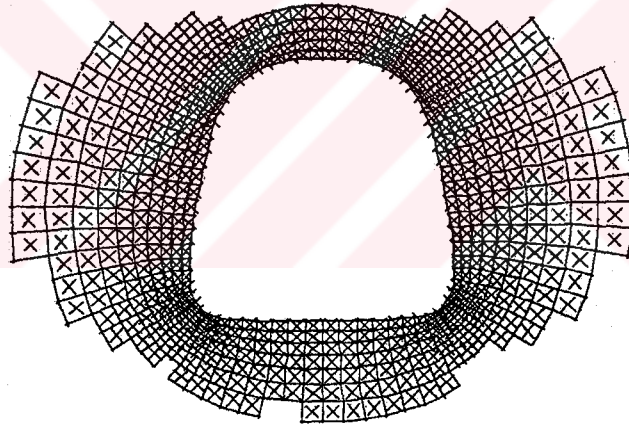
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=1.93



b. $a_{max} = 0.22$ g , IYZ=2.32

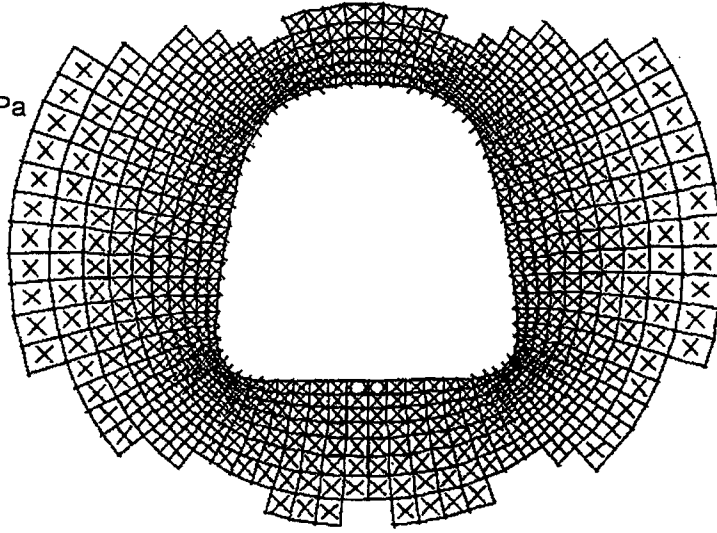
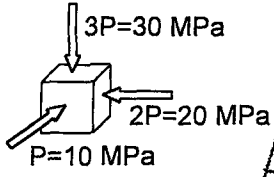
Şekil 5.18 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=30$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=10$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

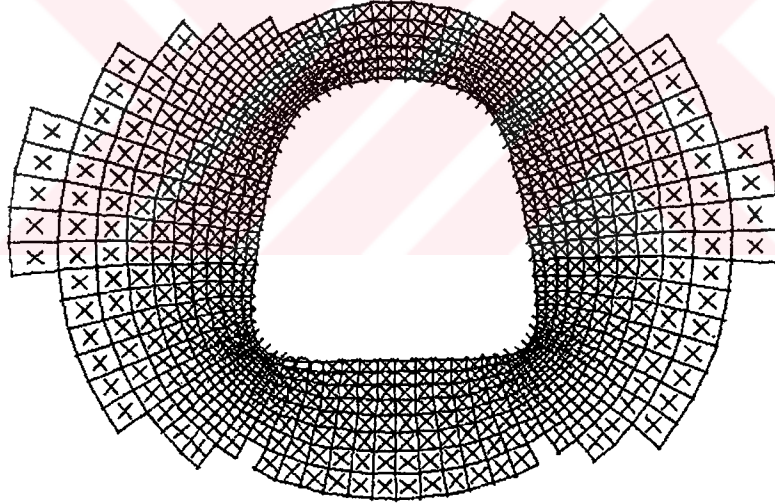
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DINAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{max} = 0.53$ g, IYZ=2.70



d. $a_{max} = 0.73$ g, IYZ=3.13

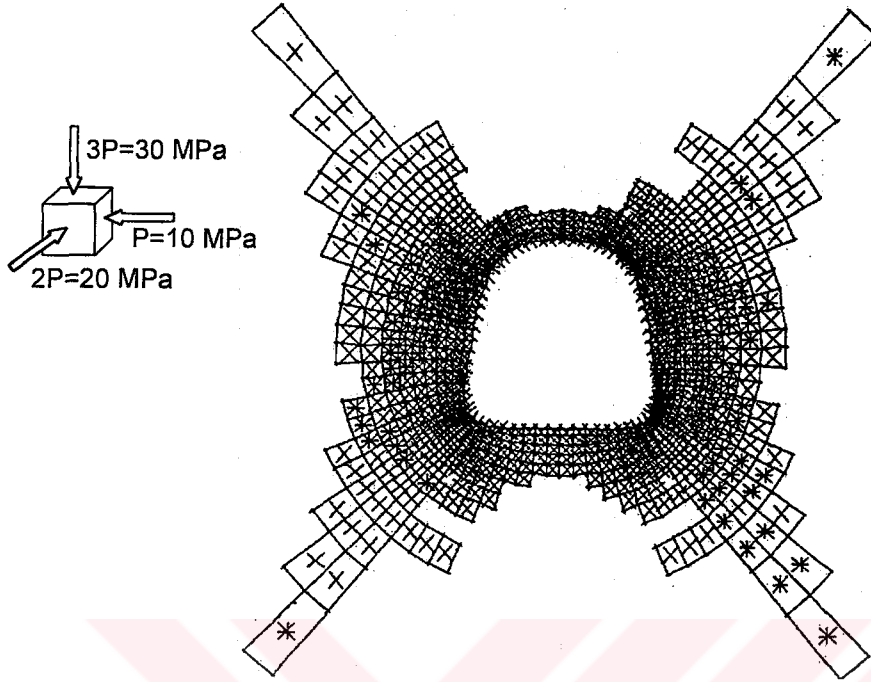
Şekil 5.18 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

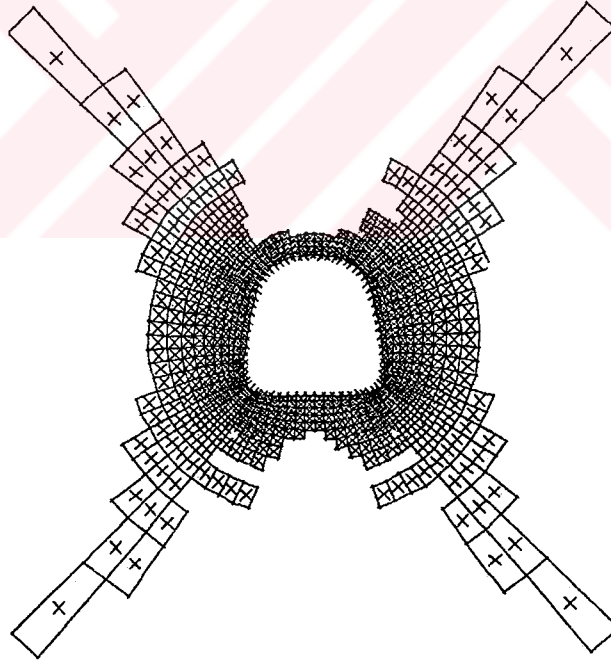
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=5.00



b. $a_{max} = 0.22$ g, IYZ=6.75

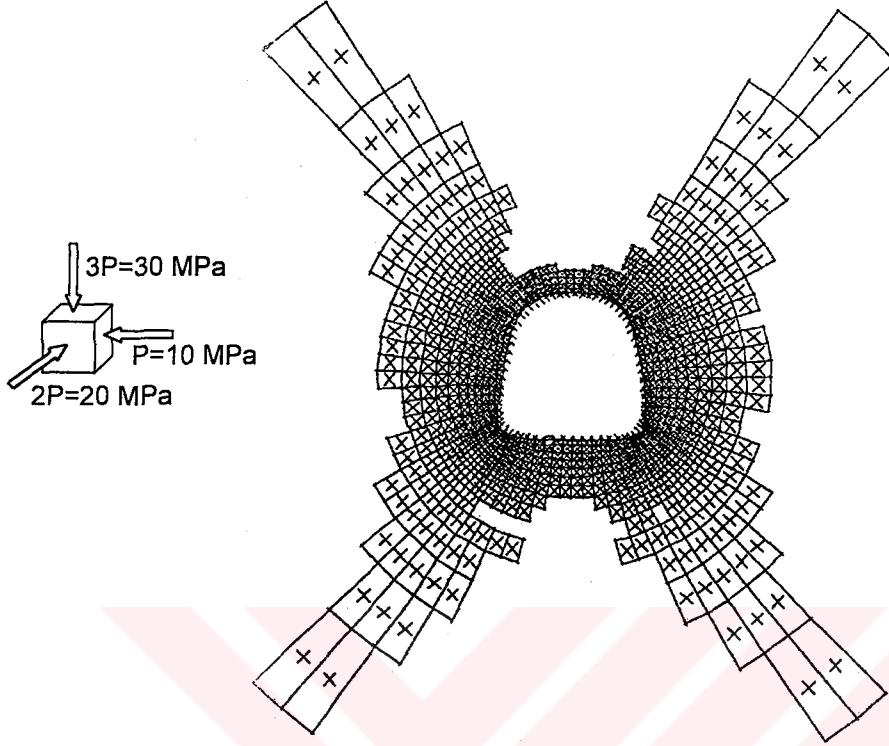
Şekil 5.19 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=30$ MPa, $P_h=10$ MPa ve $P_z=20$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

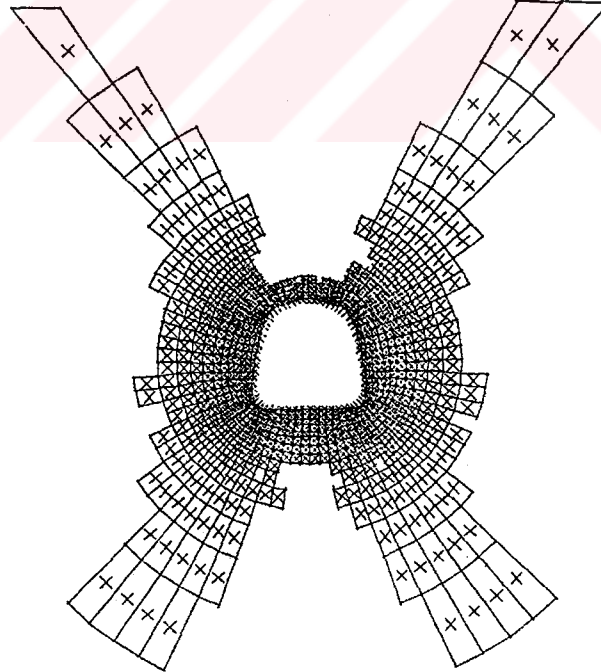
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{\max} = 0.53$ g , IYZ=9.13



d. $a_{\max} = 0.73$ g , IYZ=12.58

Şekil 5.19 (devam ediyor).

Düzlemsel Anizotropik Birincil Gerilme Alanı

Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda; düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilme ($P_v = P_3$) (üç eksenli sıkışma) olduğu durumlarda, açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu bir görüntü vermektedir (Gerçek et al., 2000). Statik durumda elde edilen bu bulgu, açıklığa etkiyen dinamik yüklemeden sonra değişmemiştir (Şekil 5.20 ve 5.22). İncelenen durum için, açıklığın uzun ekseninin en küçük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması durumunda (duraylılık açısından olumsuz konumlandırma), $a_{max} > 0.85$ g dinamik yükleme değerlerinde, statik duruma göre yenilme bölgesi büyüklüğü ve IYZ değerlerindeki artış belirginleşmektedir (Şekil 5.21.a).

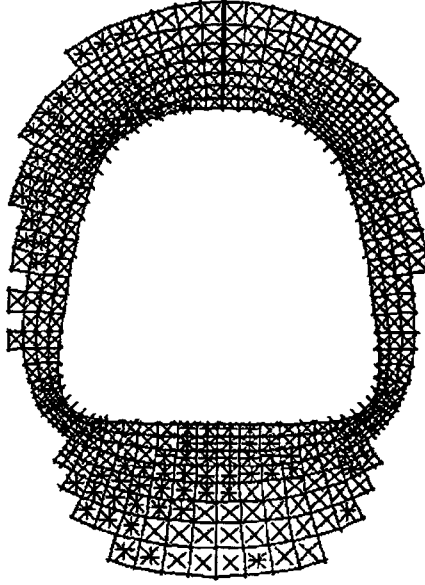
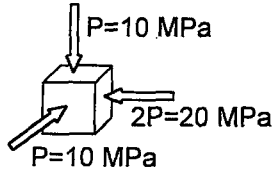
Diğer taraftan düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilme ($P_v = P_1$) (üç eksenli uzama) olduğu durumlarda, kemer tavanlı açıklığın en uygun konumlandırılması, düşük P_{max}/P_{min} oranında daha çok açıklığın W/H oranına bağlı olmaktadır (Gerçek et al., 2000). Statik durumda yapılan çözümleme sonucu elde edilen en uygun konumlandırma seçeneği, genellikle dinamik yükleme sonucu oluşacak durum için de geçerli olmaktadır. Örneğin; $W/H = 1$ ve $P_{max}/P_{min} = 2$ için statik durumda, açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması daha olumlu bir görüntü vermektedir (Şekil 3.29). Statik durumda elde edilen bu bulgu, açıklığa etkiyen dinamik yüklemeden sonra değişmemiştir (Şekil 5.23 ve 5.24). İncelenen her iki konumlandırmada, yenilme bölgesi büyüklüğü ve IYZ değerlerindeki artış düzenli olmuştur (Şekil 5.21.b).

STATİK ÇÖZÜMLEME

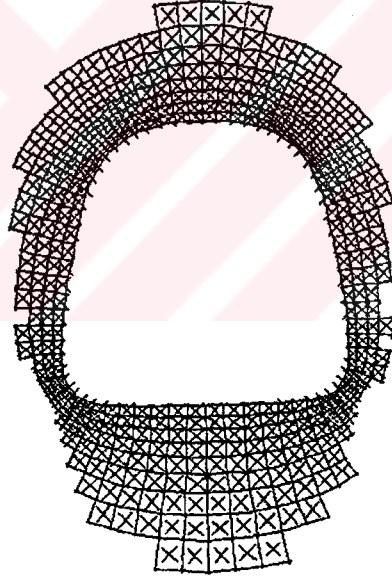
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=1.19



b. $a_{max} = 0.22$ g, IYZ=1.36

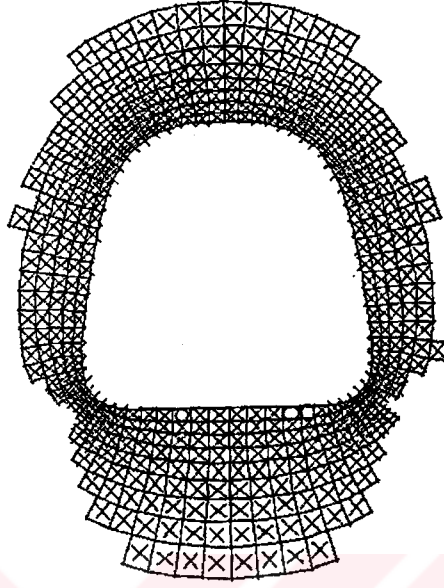
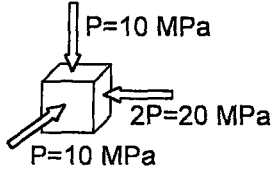
Şekil 5.20 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=10$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

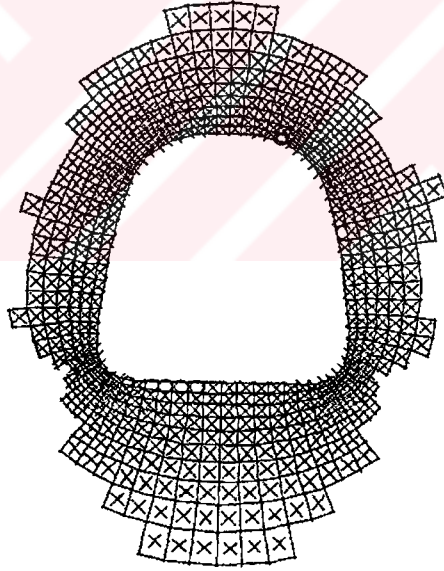
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{max} = 0.53$ g , IYZ=1.64



d. $a_{max} = 0.73$ g , IYZ=2.04

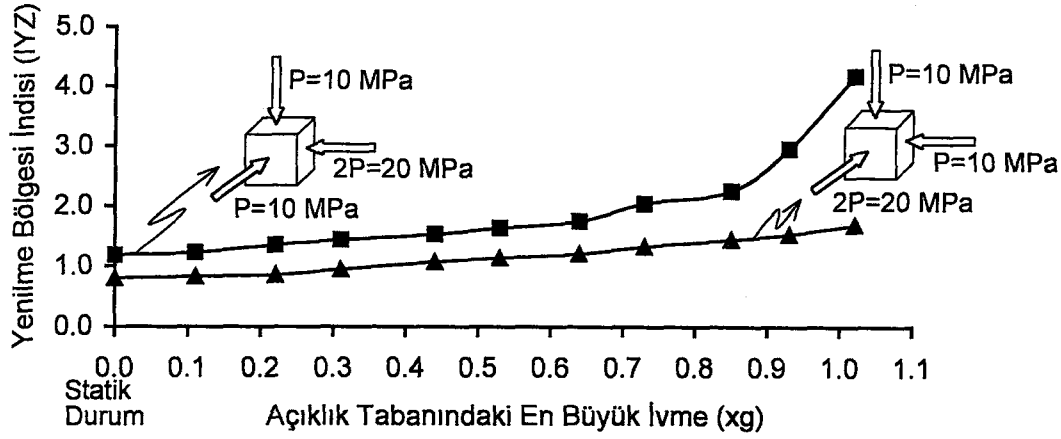
Şekil 5.20 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

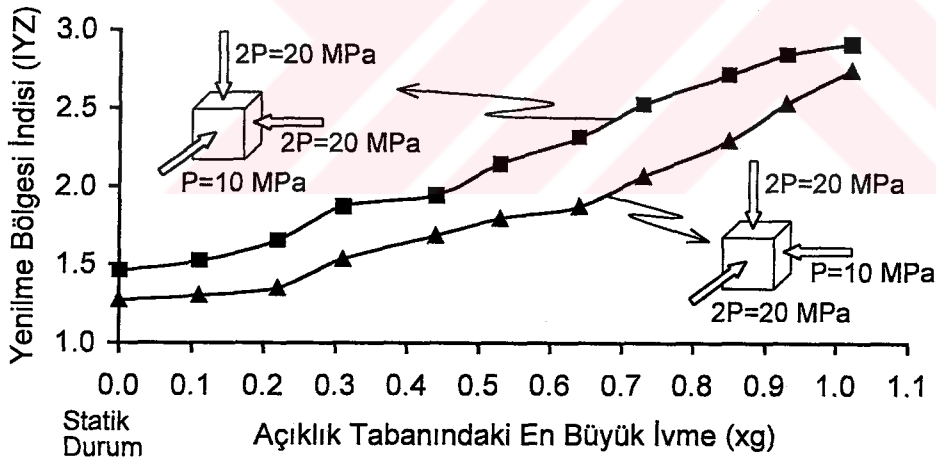
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DINAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen ($P_v=P_3$) olduğu durum



b. Düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen ($P_v=P_1$) olduğu durum

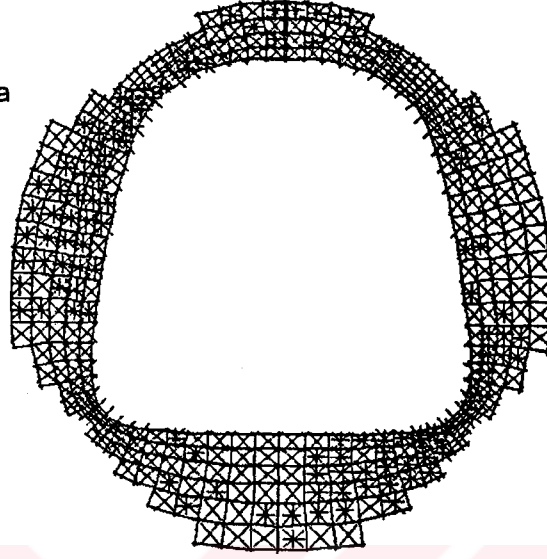
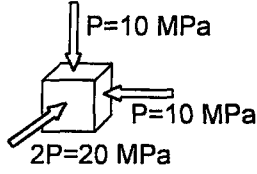
Şekil 5.21 W/H=1 olan kemer tavanlı açıklığın düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanlarında, açıklık tabanındaki en büyük ivme ile IYZ değerleri değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

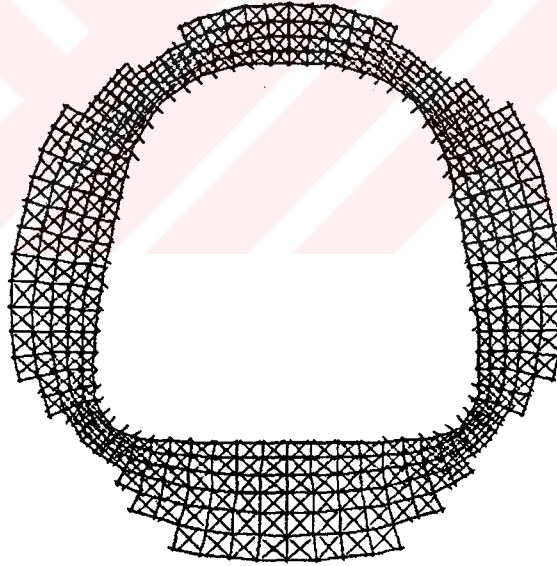
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=0.80



b. $a_{max} = 0.22$ g, IYZ=0.86

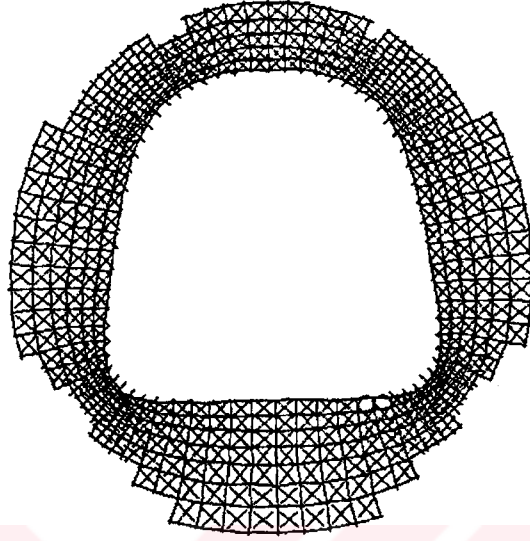
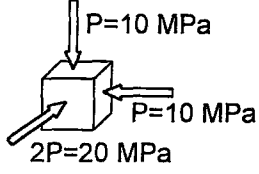
Şekil 5.22 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=10$ MPa ve $P_z=20$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

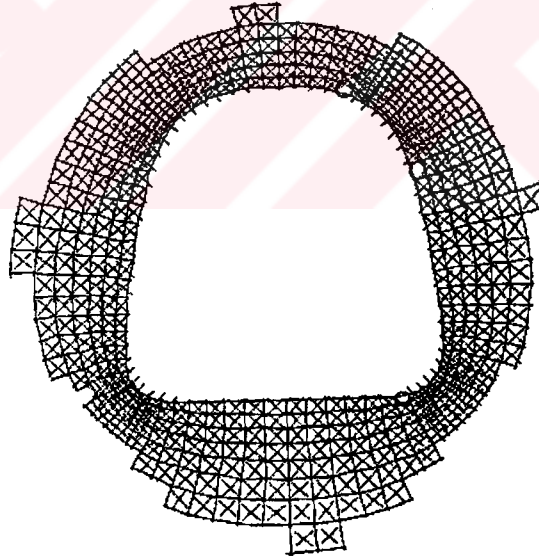
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{\max} = 0.53$ g , IYZ=1.14



d. $a_{\max} = 0.73$ g , IYZ=1.33

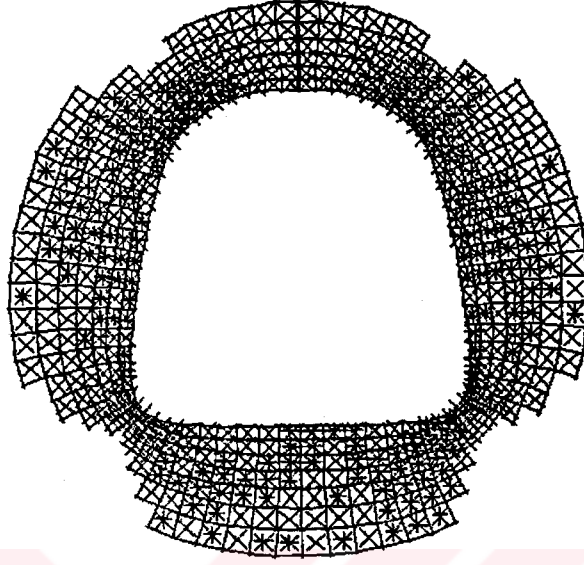
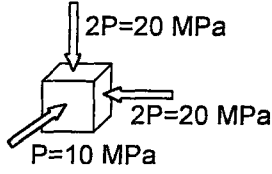
Şekil 5.22 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

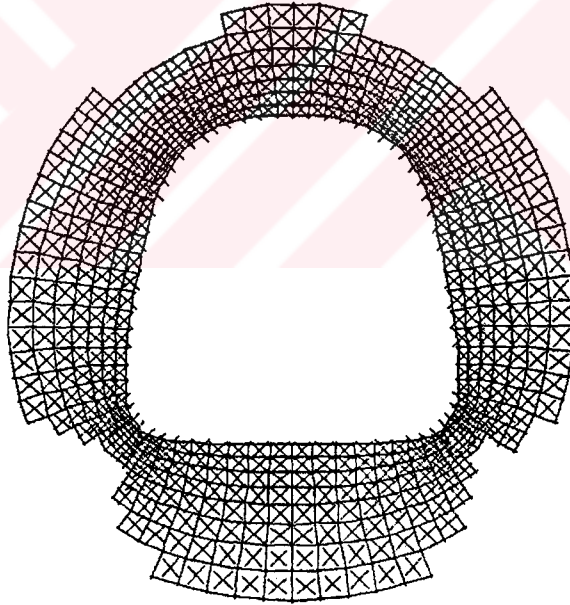
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=1.45



b. $a_{max} = 0.22$ g, IYZ=1.65

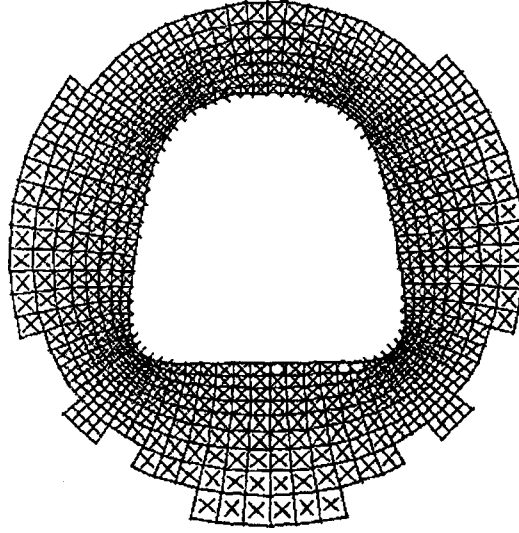
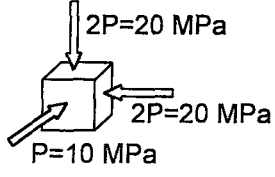
Şekil 5.23 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=20$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=10$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

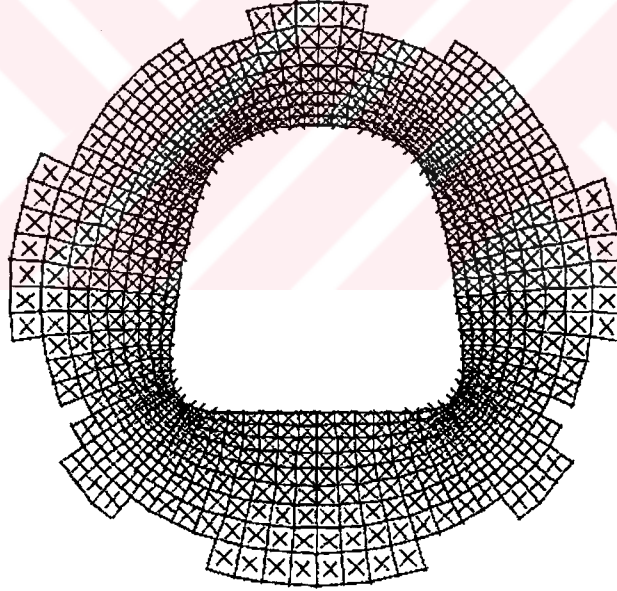
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{max} = 0.53$ g , IYZ=2.14



d. $a_{max} = 0.73$ g , IYZ=2.52

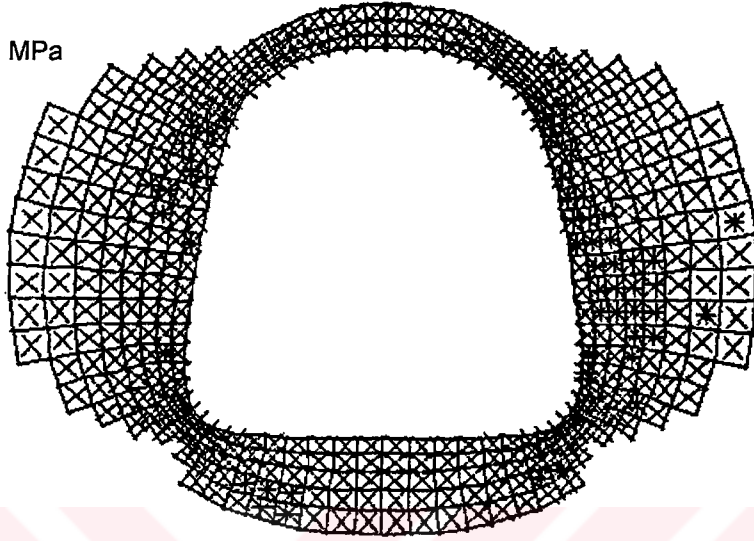
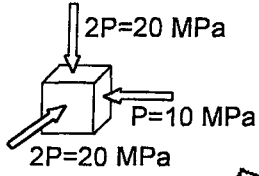
Şekil 5.23 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

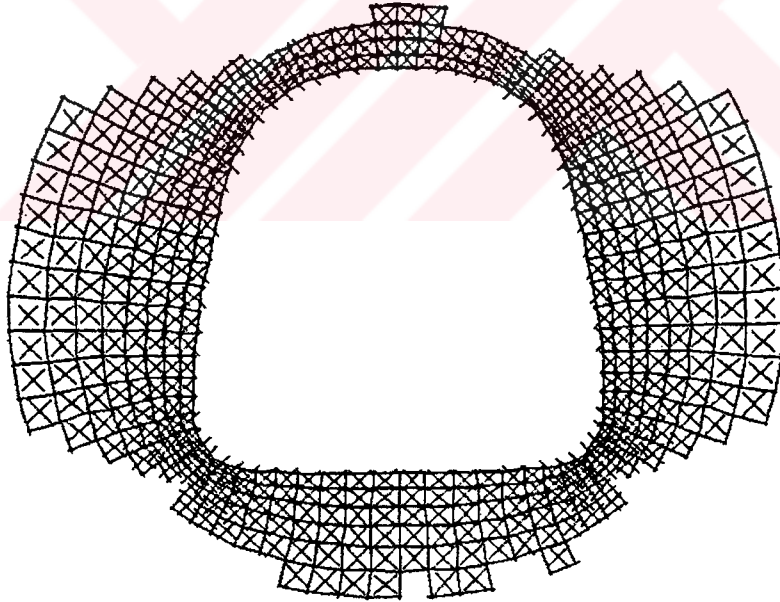
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. Statik durum, IYZ=1.27



b. $a_{max} = 0.22$ g, IYZ=1.35

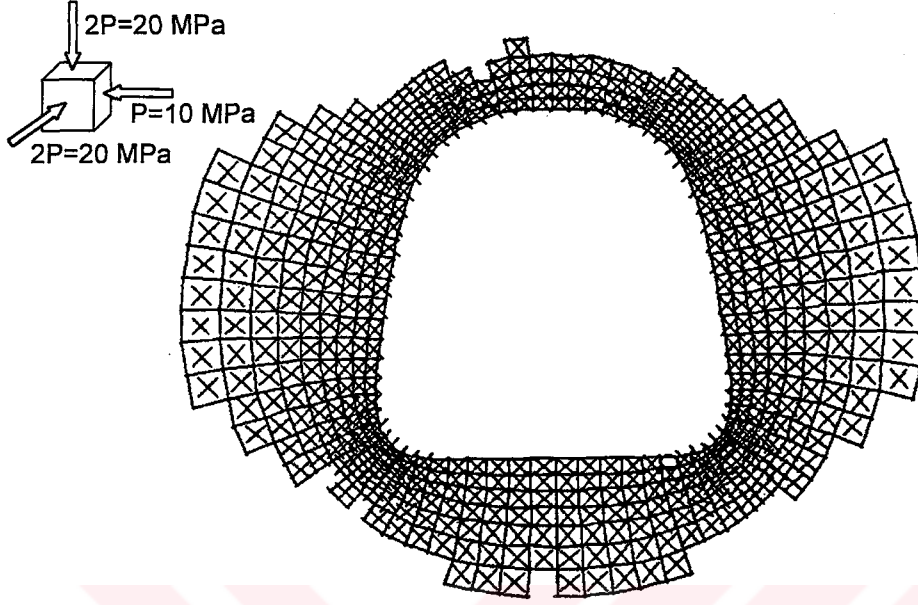
Şekil 5.24 Düzlemsel anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=20$ MPa, $P_h=10$ MPa ve $P_z=20$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin açıklık tabanındaki en büyük ivme ile değişimi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

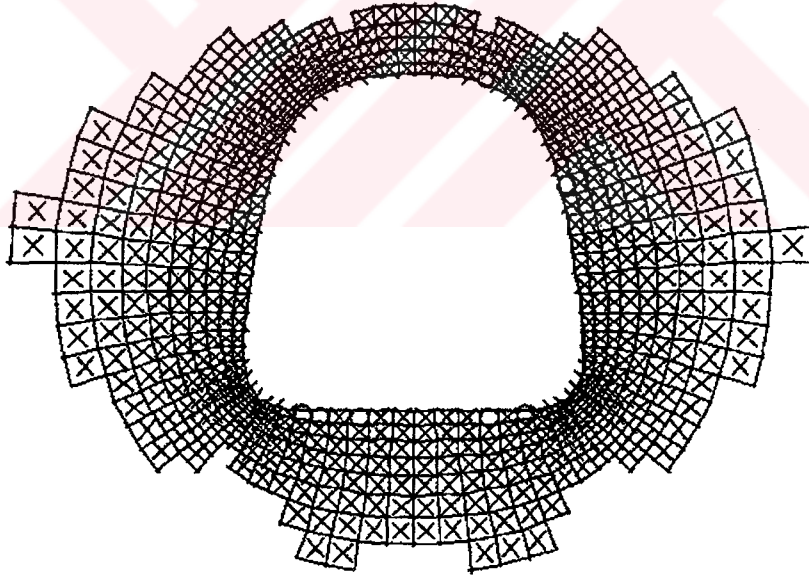
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



c. $a_{\max} = 0.53$ g, IYZ=1.79



d. $a_{\max} = 0.73$ g, IYZ=2.06

Şekil 5.24 (devam ediyor).

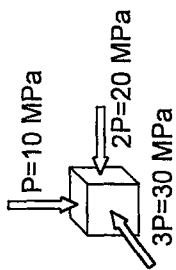
5.3.1.3 Dalga Frekansının Etkisi

Anizotropik birincil gerilme alanında, $W/H = 1$ olan kemer tavanlı açıklığa etkiyen dalganın frekans değişiminin duraylılığa etkisi araştırılmıştır. Aynı en büyük ivme değerlerinde; dalga frekansının azalması, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin genişliğini ve IYZ değerlerini artırmıştır (Şekil 5.25). Çünkü frekansın azalması arazinin yerdeğiştirme miktarını artırmaktadır. Deprem enerjisi, düşük frekans veya uzun periyotlarda daha fazla oluşmaktadır (Krinitzsky et al., 1993). Bu nedenle dalga frekansının azalması açıklık çevresinde yenilme bölgesinin artmasına neden olmuştur. Düşük frekans değerlerinde, en büyük ivmenin artmasıyla açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerindeki değişim belirgin şekilde hızla artmaktadır. Frekans arttıkça, dinamik çözümleme sonucu hesaplanan IYZ değeri, statik çözümleme sonucu elde edilen IYZ değerine yakınsamaktadır. Dalga frekansının değişiminin IYZ değerlerine etkisi Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Açıklık tabanında 0.35 g değerinde bir ivmenin, frekansı 0.9 olduğunda IYZ'de oluşan değişim statik duruma göre yaklaşık % 370 olurken, frekans 3.0 olduğunda bu değişim sadece % 30 olmuştur.

5.3.1.4 Dalga Yayılma Yönünün Etkisi

Açıklığa etkiyen dalga yönünün farklı durumlarında, açıklık tabanında oluşan en büyük ivme ile IYZ değerlerinin değişimi incelenmiştir. Hidrostatik birincil gerilme alanında, $W/H = 1$ olan kemer tavanlı açıklık incelenmiştir. Dalganın yayılma yönünün etkisini araştırmak için yeraltı açıklığına,

- yalnızca alttan,

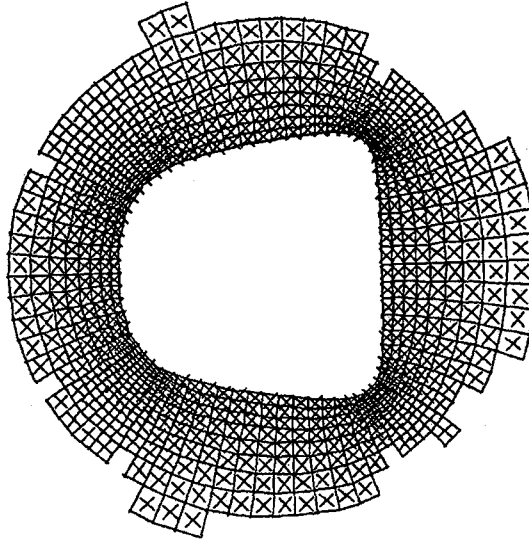
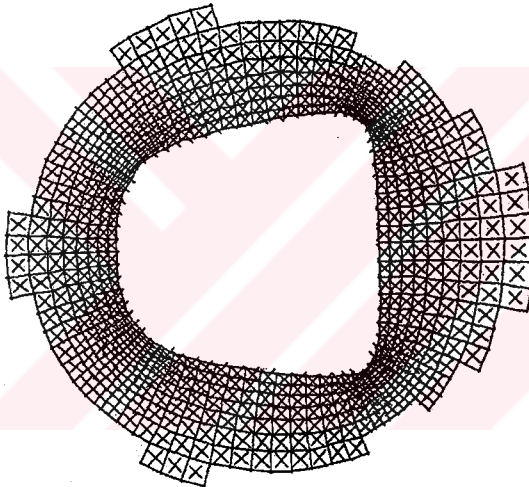
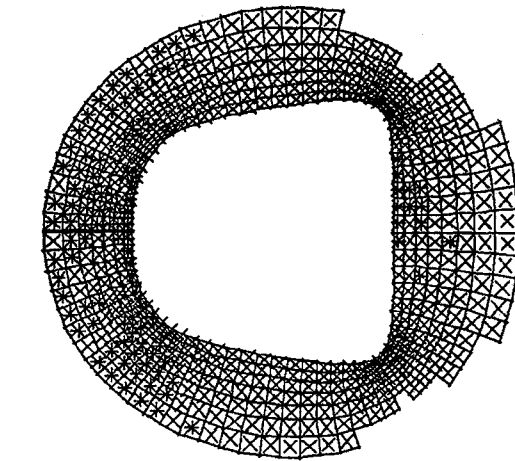


STATİK ÇÖZÜMLEME

Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³

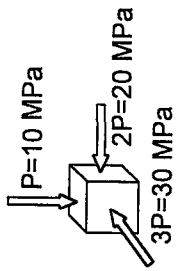


a. Statik durum, IYZ=1.72

b. $f=3$, $a_{max}=0.40$ g, IYZ=1.96

c. $f=2$, $a_{max}=0.44$ g, IYZ=2.36

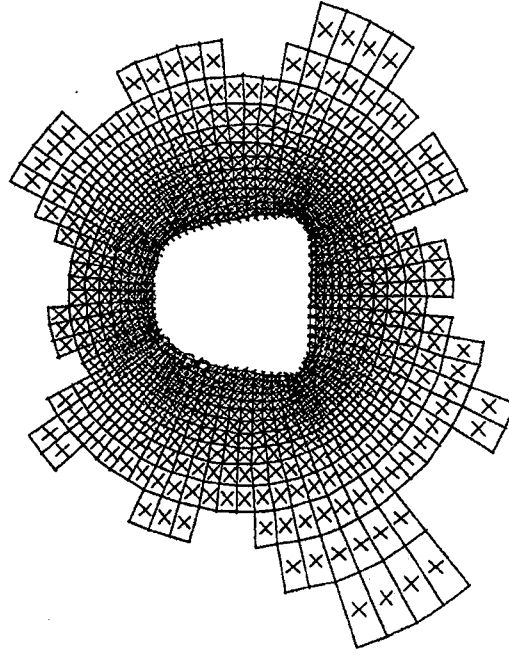
Şekil 5.25 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=30$ MPa), $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta dinamik yüklenme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin dalga frekansı ile değişimi.



STATİK ÇÖZÜMLEME

Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME
Artan-azalan genlikli dalga,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



d. $f=1.5$, $a_{max}=0.41$ g, IYZ=2.89

e. $f=1.0$, $a_{max}=0.38$ g, IYZ=5.72

f. $f=0.9$, $a_{max}=0.38$ g, IYZ=7.56

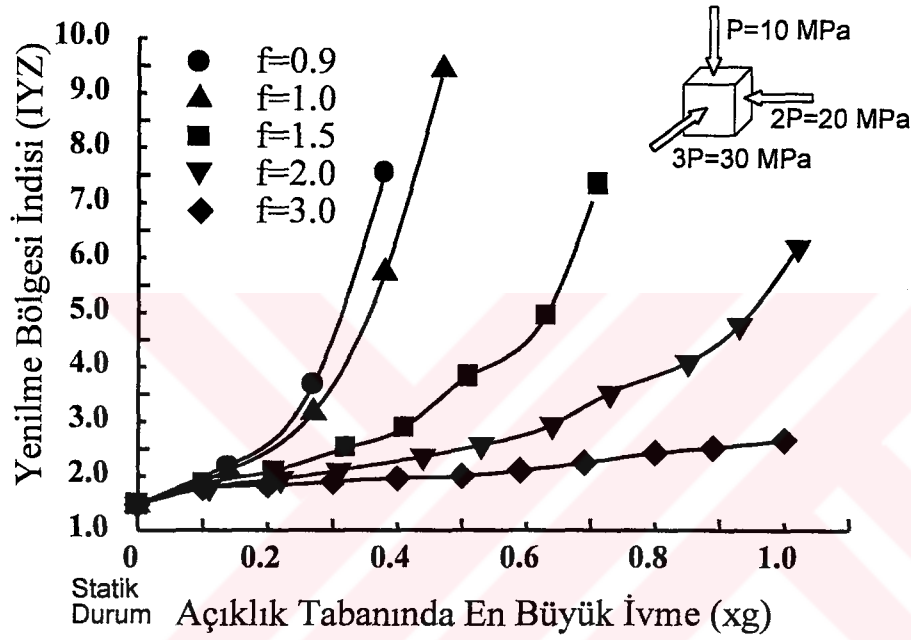
Şekil 5.25 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



Şekil 5.26 W/H=1 olan kemer tavanlı açıklığa etkiyen farklı dalga frekanslarında, açıklık tabanındaki en büyük ivmenin IYZ değerleri ile değişimi.

- aşağıdan yukarıya doğru 45° eğimle ve
- yalnızca yandan

dalga yayılımları uygulanmıştır. Dinamik girdinin alttan uygulanması arazide yatay titreşimlere, yandan uygulanması da düşey doğrultuda titreşimlere neden olmuştur. Dalga yayılma yönünün değişmesi, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi büyüklüğünde ve IYZ değerlerinde önemli bir farklılık oluşturmamıştır (Şekil 5.27). Bu durumun açıklığın eksenler oranının $W/H = 1$ olmasıyla ilgili olabileceği düşünülebilir. Dalga yayılma yönünün farklı W/H oranlarında incelenmesi gerekebilir.

5.3.2 Açıklık Genişlik/Yükseklik Oranı Etkisi

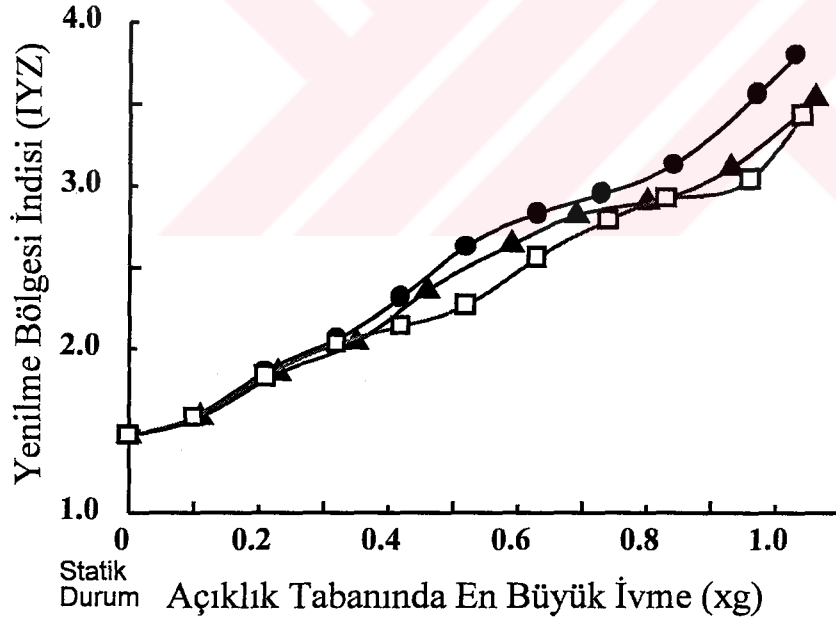
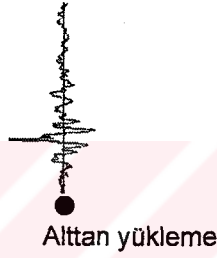
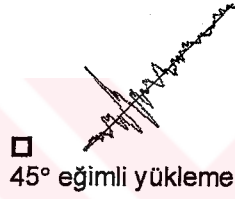
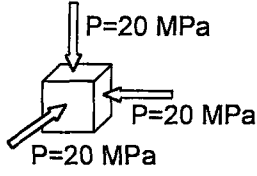
Açıklık tabanında oluşan en büyük ivme ile IYZ değerlerinin değişimi, açıklığın farklı W/H oranları için incelenmiştir. Çalışmada, anizotropik birincil gerilme alanında oluşturulan $W/H = 1, 2, 3$ olan kemer tavanlı açıklık geometrisi incelenmiştir. Dinamik yüklemenin artan değerlerinde W/H oranına bağlı olarak elde edilen yenilme bölgesi indisindeki değişim Şekil 5.28’de sunulmuştur. Statik çözümlemelerde W/H oranı 1’e yakın olan açıklık geometrileri duraylılık açısından daha olumlu sonuç vermektedir. Bu durum, açıklık tabanındaki en büyük ivmenin 0.3 g değerine kadar geçerli olmaktadır. Daha yüksek ivme değerlerinde, duraylılık açısından en uygun W/H oranı seçimi değişmektedir. Örneğin, 0.7 g gibi yüksek ivme değerinde $W/H = 1$ olan kemer tavanlı açıklıkta, $W/H = 2$ ve 3 olan açıklığa göre daha fazla yenilme bölgesi oluşmaktadır (Şekil 5.29). Ayrıca dinamik yükleme büyüklüğü arttıkça IYZ’deki değişim $W/H = 1$ için $a_{max} > 0.6$ g değerlerinde; $W/H = 2$ için $a_{max} > 0.8$ g değerlerinde ve $W/H = 3$ için $a_{max} > 0.9$ g değerlerinde daha hızlı olmuştur. Statik çözümleme

STATİK ÇÖZÜMLEME

Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=1.5$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



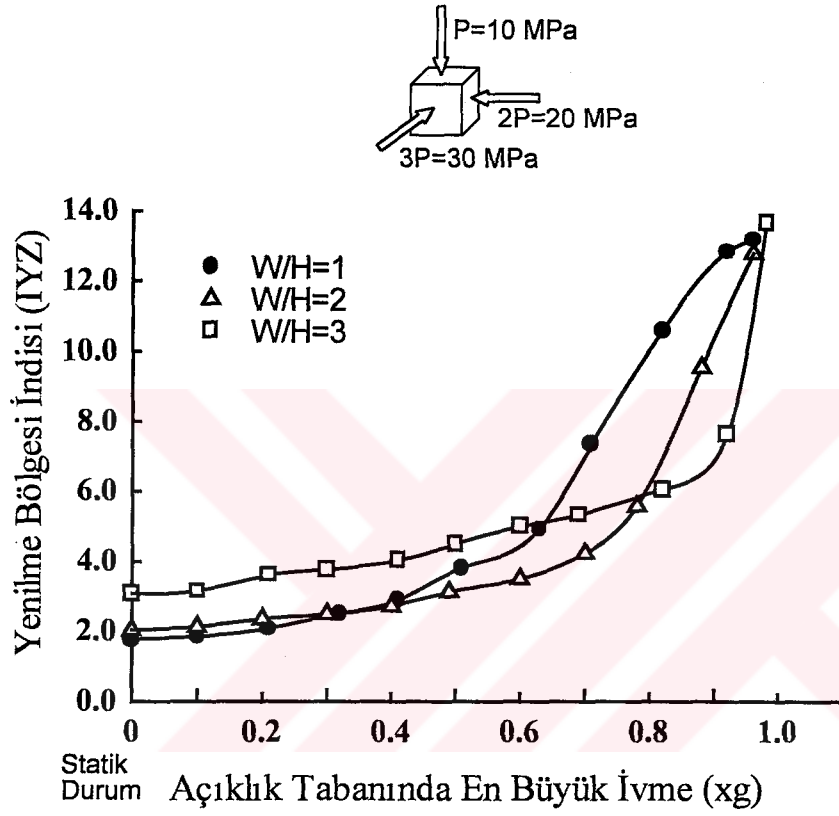
Şekil 5.27 Hidrostatik birincil gerilme alanında, $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklık geometrisinde dalga yayılma yönünün IYZ değerine etkisi.

STATİK ÇÖZÜMLEME

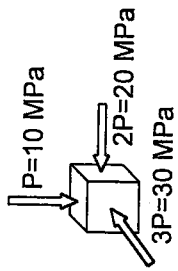
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=1.5$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



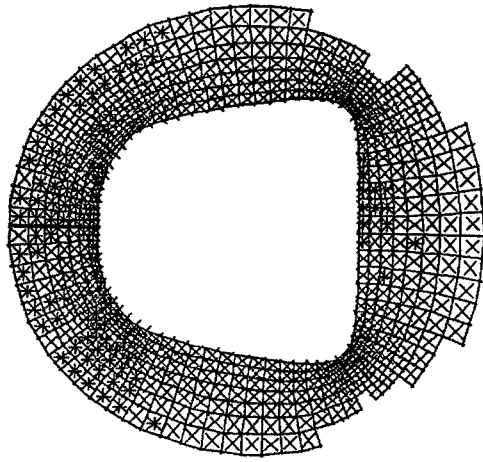
Şekil 5.28 Farklı W/H oranlarındaki kemer tavanlı açıklığın, açıklık tabanındaki en büyük ivmenin IYZ değerleri ile değişimi.



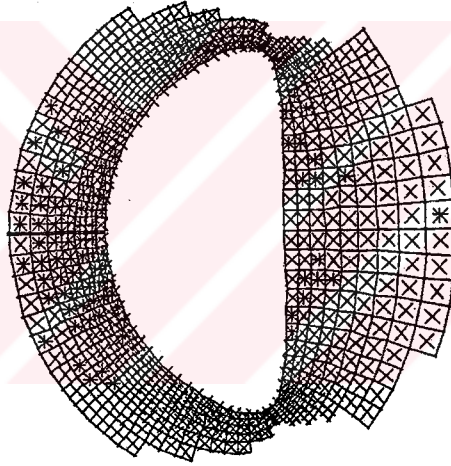
STATİK ÇÖZÜMLEME

Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_f=1$, $s_f=0.005$, $\nu=0.25$

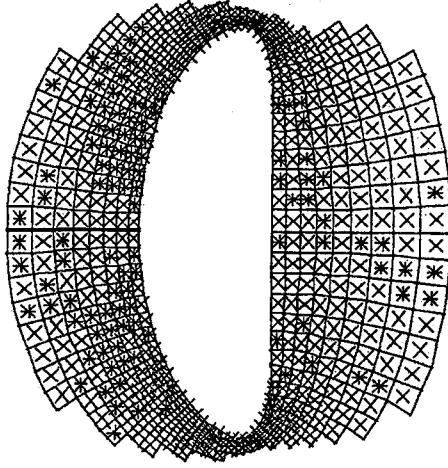
DINAMİK ÇÖZÜMLEME
Artan-azalan genlikli dalga, $f=1.5$
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. $W/H=1$, Statik durum, $IYZ=1.72$

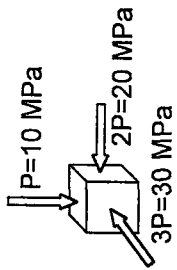


b. $W/H=2$, Statik durum, $IYZ=2.04$



c. $W/H=3$, Statik durum, $IYZ=3.08$

Şekil 5.29 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=30$ MPa) farklı W/H oranına sahip kemer tavanlı açıklıkta statik ve dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerleri.

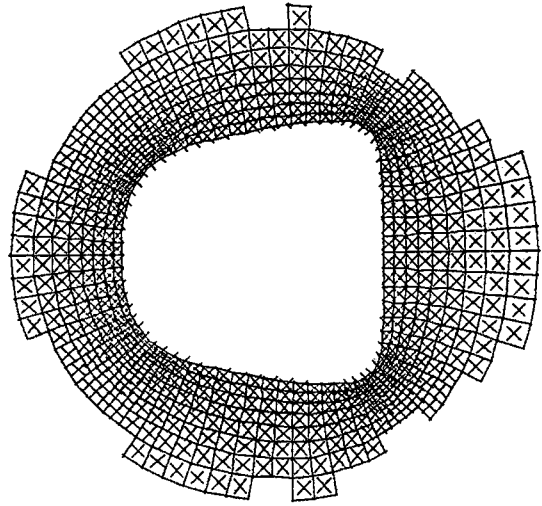


STATİK ÇÖZÜMLEME

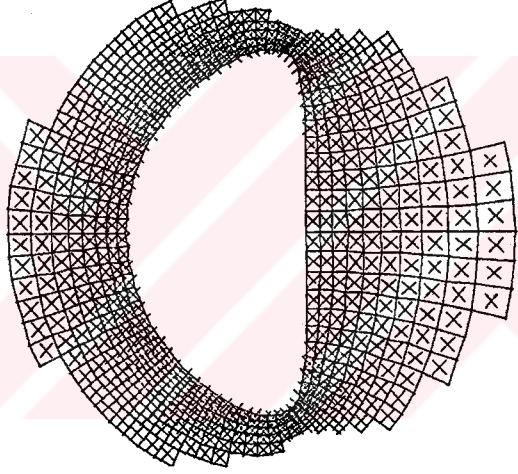
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
GSI=60, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_i=0.005$, $\nu=0.25$

DINAMİK ÇÖZÜMLEME

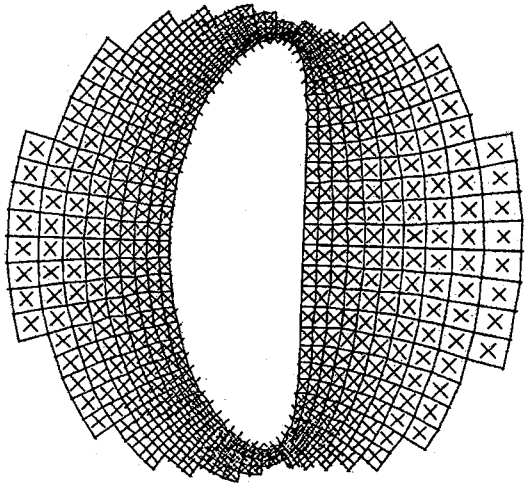
Artan-azalan genlikli dalga, $f=1.5$
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



d. $W/H=1$, $a_{max}=0.21$ g, $IYZ=2.09$

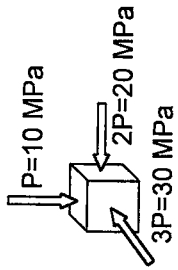


e. $W/H=2$, $a_{max}=0.20$ g, $IYZ=2.36$



f. $W/H=3$, $a_{max}=0.21$ g, $IYZ=3.61$

Şekil 5.29 (devam ediyor).

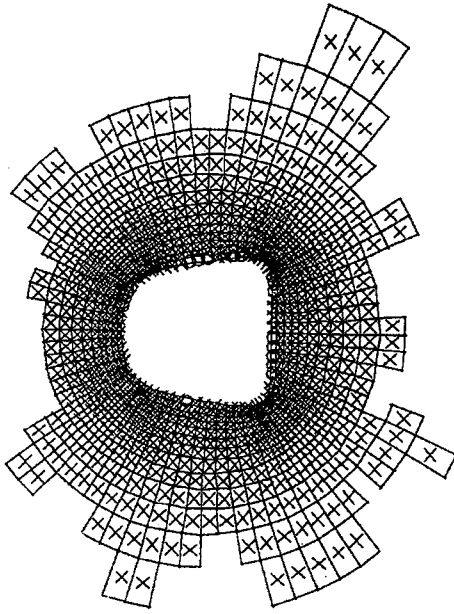


STATİK ÇÖZÜMLEME

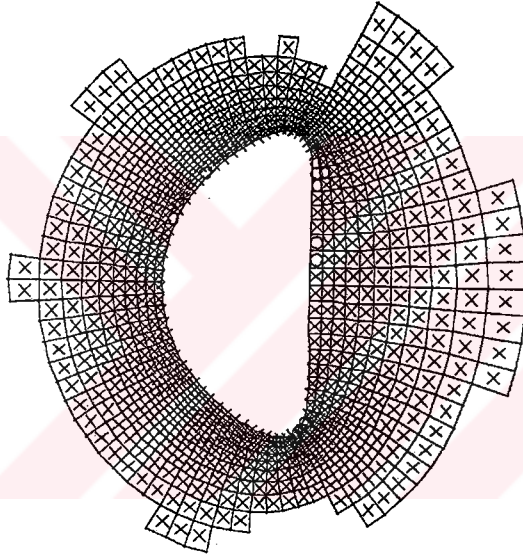
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
 $GSI=60$, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

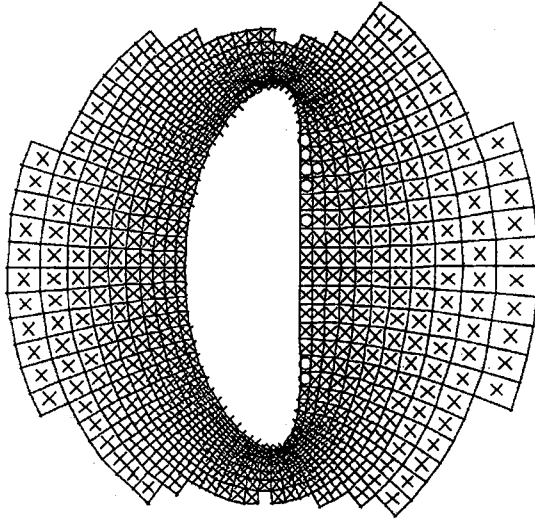
Artan-azalan genlikli dalga, $f=1.5$
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



g. $W/H=1$, $a_{max}=0.71$ g, $IYZ=7.35$



h. $W/H=2$, $a_{max}=0.70$ g, $IYZ=4.23$



i. $W/H=3$, $a_{max}=0.69$ g, $IYZ=5.33$

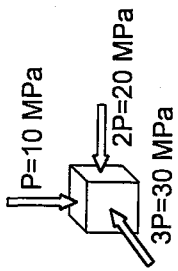
Şekil 5.29 (devam ediyor).

sonucu, açıklığın W/H oranının 1'e yakın olması duraylılık açısından en uygun seçenek olmasına rağmen; dinamik yüklemeye maruz kalacak açıklıklar için en uygun W/H oranının seçimi, etkiyecek dinamik yüklemenin büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca çok yüksek ivme değerlerinde açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin büyük olması W/H oranının etkisini ortadan kaldırmaktadır.

5.3.3 Kaya Kütlesi Dayanımı ve Deformasyon Modülünün Etkisi

Kaya kütlesinin dayanımı ile ilgili değiştirgelerden biri olan GSI'nın farklı değerlerinde, açıklık tabanında oluşan en büyük ivme ile IYZ değerlerinin değişimi incelenmiştir. Yine, anizotropik birincil gerilme alanında oluşturulan $W/H = 1$ olan kemer tavanlı açıklık göz önünde bulundurulmuştur. Bilindiği gibi, statik çözümlemelerde düşük GSI değerlerinde, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi daha geniş ve IYZ daha yüksek elde edilmektedir (Şekil 5.30). Daha düşük GSI değerlerine sahip ortamda açılan açıklıkta, etkiyen dinamik yüklemenden sonra oluşan IYZ değerleri daha yüksek olmaktadır. İvmenin artmasıyla, IYZ değerlerindeki artış düşük GSI değerlerinde daha fazla oluşmaktadır. Örneğin; GSI = 50 olan kaya kütlesi içinde açılan açıklık tabanında oluşan en büyük ivmenin 0.2 g'den büyük değerlerinde IYZ'deki artış çok hızlı olmaktadır. Açıklık tabanında oluşan en büyük ivmenin 0.64 g olduğu durumda oluşan IYZ değeri statik duruma göre % 109 artmasına rağmen, aynı ivme değerinde GSI = 80 olan ortamda IYZ değerindeki bu artış ancak % 22 olmaktadır (Şekil 5.31).

Buraya kadar, yalnızca GSI değerlerindeki değişimin etkisi incelenmiştir. Ayrıca, kaya kütlesinin deformasyon modülünün GSI ile birlikte değişimi, farklı dinamik

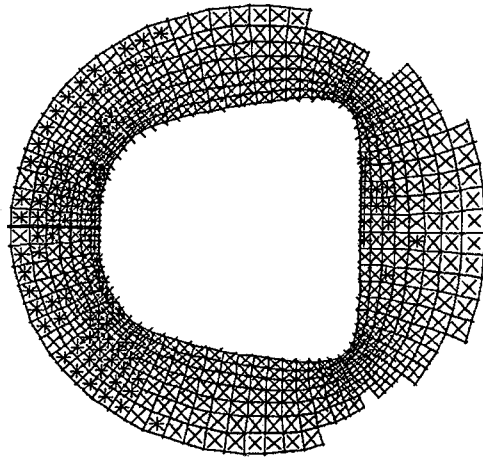


STATİK ÇÖZÜMLEME

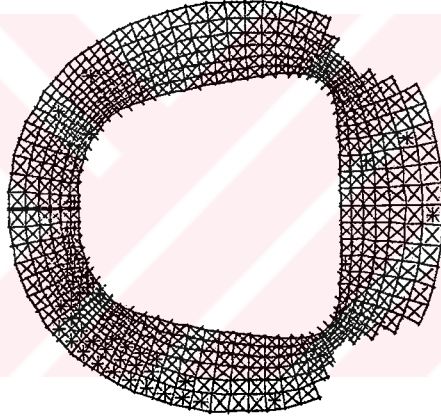
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_i=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

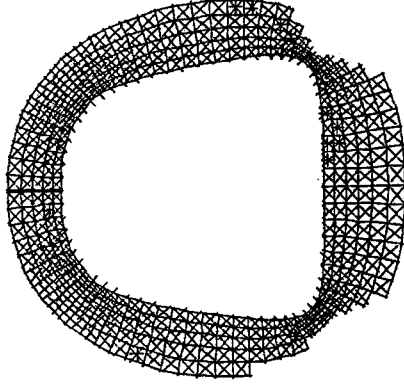
Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



a. GSI=60, Statik durum, IYZ=1.72

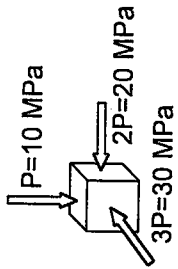


b. GSI=70, Statik durum, IYZ=1.31



c. GSI=80, Statik durum, IYZ=0.96

Şekil 5.30 Anizotropik birincil gerilme durumunda ($P_v=10$ MPa, $P_h=20$ MPa ve $P_z=30$ MPa) $W/H=1$ olan kemer tavanlı açıklıkta statik ve dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin GSI ile değişimi.

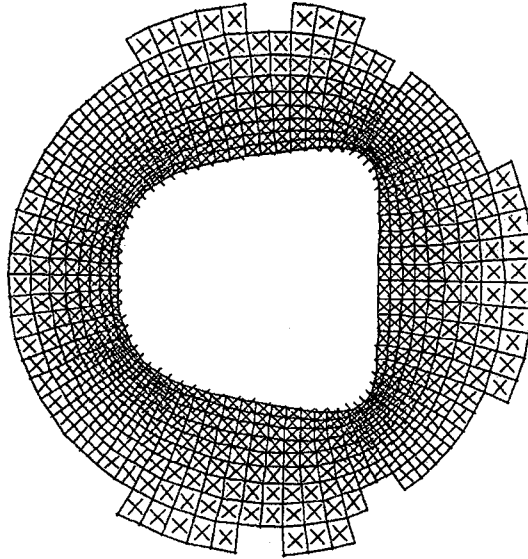


STATİK ÇÖZÜMLEME

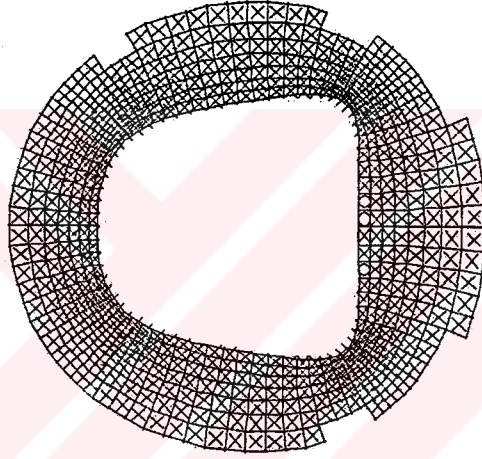
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{cl}=75$ MPa, $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

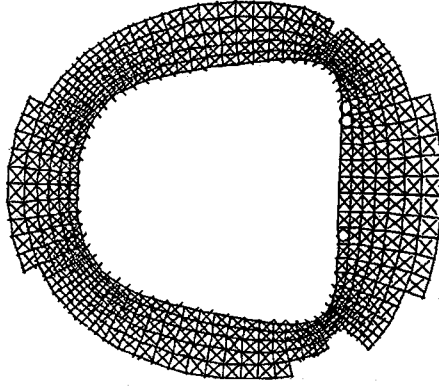
Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



d. GSI=60, $a_{max}=0.53$ g, IYZ=2.57



e. GSI=70, $a_{max}=0.53$ g, IYZ=1.77



f. GSI=80, $a_{max}=0.53$ g, IYZ=1.14

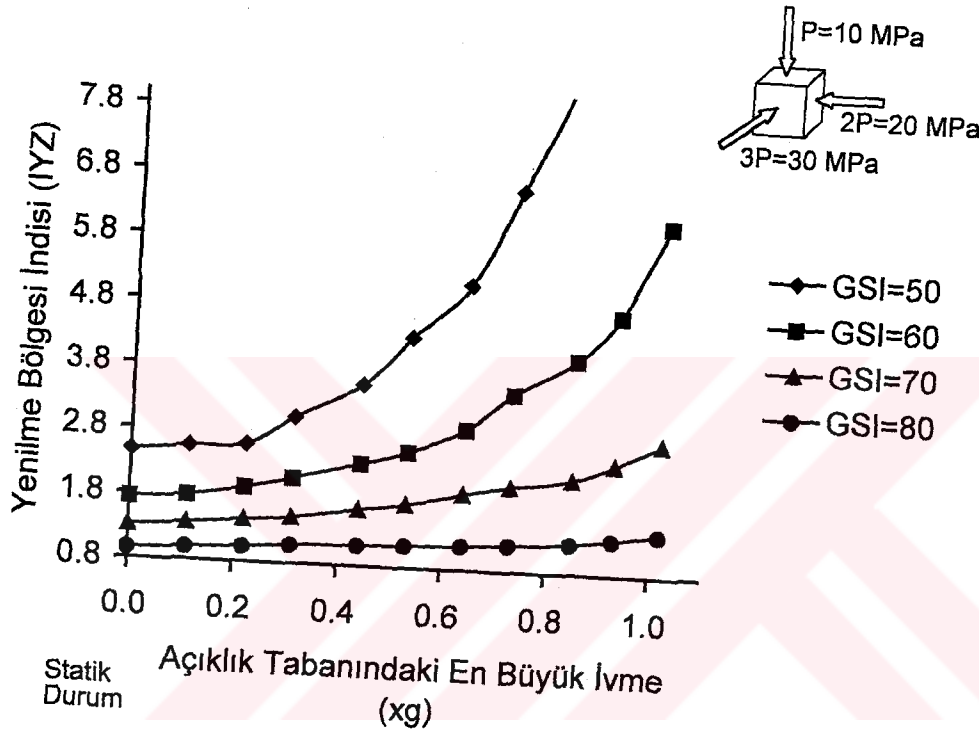
Şekil 5.30 (devam ediyor).

STATİK ÇÖZÜMLEME

Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
 $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga, $f=2$,
 $E_m=10$ GPa, $\rho=2500$ kg/m³



Şekil 5.31 W/H=1 olan kemer tavanlı açıklıkta farklı GSI değerleri için, açıklık tabanındaki en büyük ivmenin IYZ değerleri ile değişimi.

yükleme koşullarında da incelenmiştir. Farklı GSI değerleri için kaya kütlelerinin deformasyon modülünün bulunmasında Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen aşağıdaki görgül eşitlik kullanılmıştır.

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{[(GSI-10)/40]} \quad (5.7)$$

Burada; E_m 'nin birimi GPa ve σ_{ci} 'nin de MPa'dır. Bu eşitliğe göre, kaya kütlelerinin GSI değeri arttıkça kaya kütlelerine ait deformasyon modülü de artmaktadır. Çözümlemelerde, $GSI = 30 - 80$ arasında değişen kaya kütlesi incelenmiştir. Hidrostatik birincil gerilme alanında oluşturulan dairesel açıklığın yer aldığı modele alttan dinamik yükleme uygulanmıştır. Çözümlemede kullanılan Hoek-Brown dayanım değiştiricileri ve kaya kütlelerinin deformasyon modülü değerleri Çizelge 5.5'te sunulmuştur.

Çizelge 5.5 Çözümlemede kullanılan kaya kütlesi dayanımı ve deformasyon modülü değerleri.

GSI	E_m (GPa)	m_b	s	m_r (*)	s_r (*)	C_s (m/s)
80	48.7	4.90	0.1084	3.18	0.00434	2791
70	27.4	3.43	0.0357	2.23	0.00143	2093
60	15.4	2.40	0.0117	1.56	0.00047	1596
50	8.7	1.68	0.0039	1.09	0.00016	1177
40	4.9	1.17	0.0013	0.76	0.00005	882
30	2.7	0.82	0.0004	0.53	0.00002	662

(*) Yenilmiş kaya kütlelerine ait dayanım değiştiricileri olan m_r ve s_r 'in belirlenmesinde Ribacchi (2000)'nin önerilerine göre $m_r = 0.65 m_b$ ve $s_r = 0.04 s$ eşitlikleri kullanılmıştır.

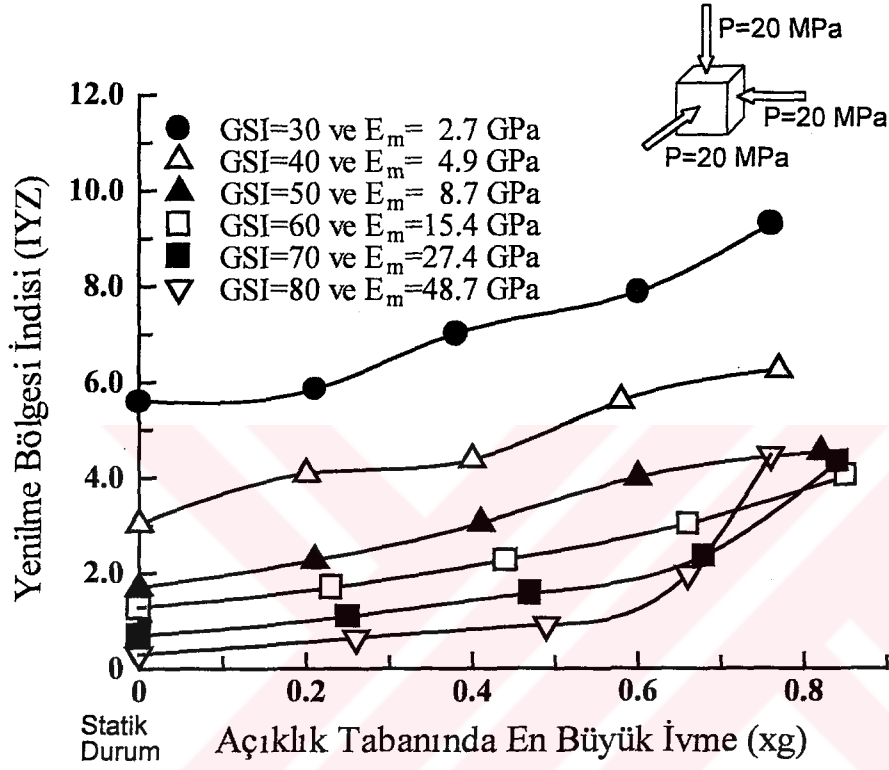
Beklendiği gibi, statik çözümlemelerde, GSI ve deformasyon modülünün düşük değerlerinde daha yüksek IYZ değerleri ve yenilme bölgeleri elde edilmiştir (Şekil 5.32-5.33). Dinamik yüklemekten sonra bu durum belirli ivme değerine kadar değişmemektedir (Şekil 5.34). Yüksek GSI değerlerinde; belli bir ivme

STATİK ÇÖZÜMLEME

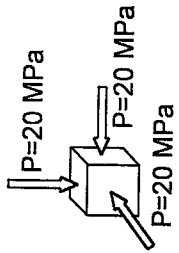
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
 $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

Artan-azalan genlikli dalga,
 $f=1.5$, $\rho=2500$ kg/m³

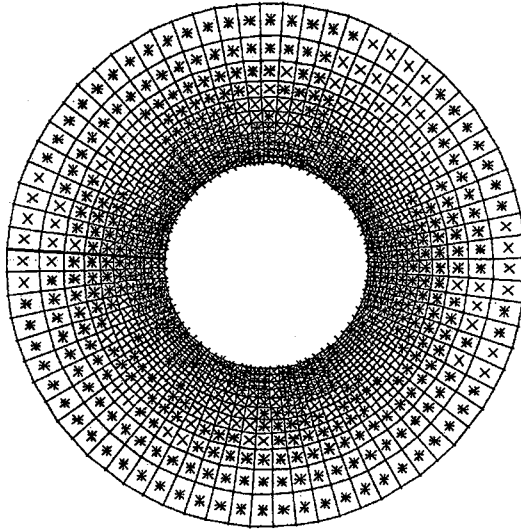


Şekil 5.32 Hidrostatik birincil gerilme alanında; farklı GSI ve E_m değerlerinde oluşturulan dairesel açıklıkta oluşan IYZ değerlerinin değişimi.

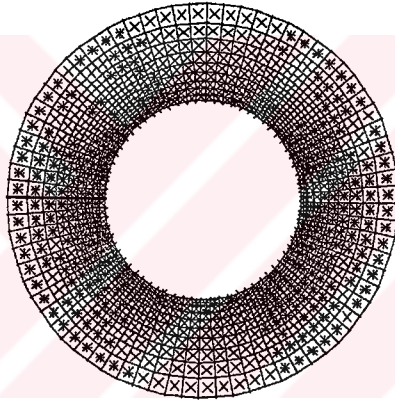


STATİK ÇÖZÜMLEME

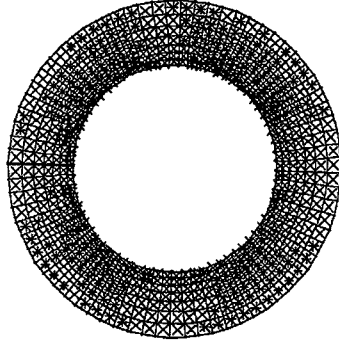
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
 $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$



a. GSI=30, $E_m=2.74$ GPa, IYZ=5.60

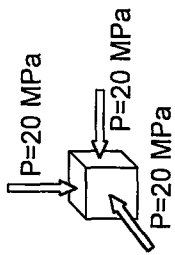


b. GSI=40, $E_m=4.87$ GPa, IYZ=3.04



c. GSI=50, $E_m=8.66$ g, IYZ=1.70

Şekil 5.33 Hidrostatik birincil gerilme durumunda ($P_0=20$ MPa) dairesel açıklıkta statik yüklenme sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin, GSI ve deformasyon modülü ile değişimi.

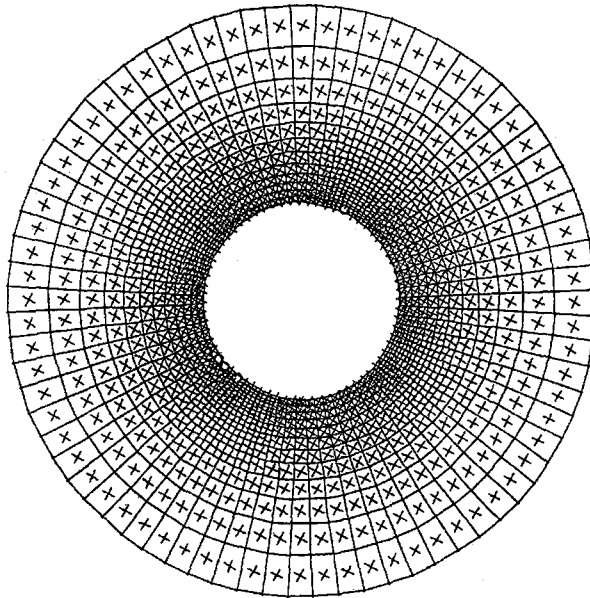


STATİK ÇÖZÜMLEME

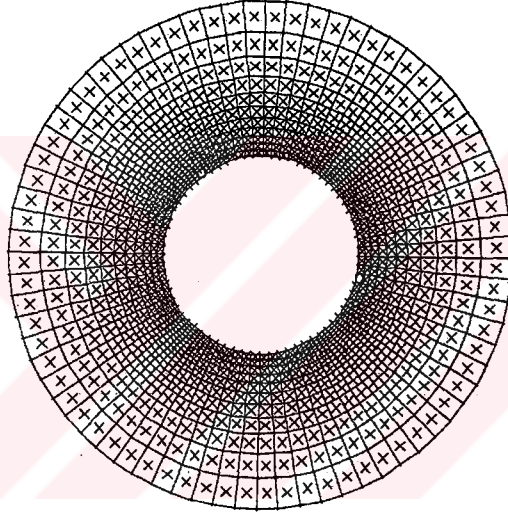
Hoek-Brown yenilme ölçütü, $\sigma_{ci}=75$ MPa,
 $m_i=10$, $m_r=1$, $s_r=0.005$, $\nu=0.25$

DİNAMİK ÇÖZÜMLEME

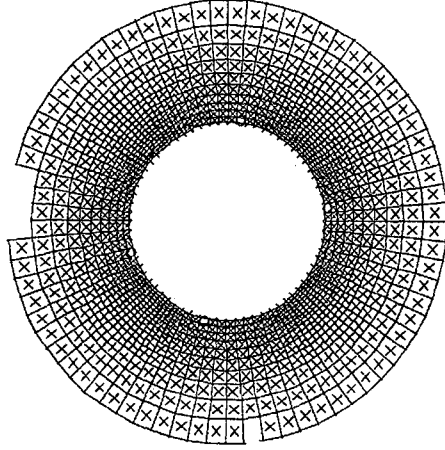
Artan-azalan genlikli dalga, $f=1.5$
 $\rho=2500$ kg/m³



a. GSI=30, $E_m=2.74$ GPa, $a_{max}=0.53$ g,
 IYZ=7.87



b. GSI=40, $E_m=4.87$ GPa, $a_{max}=0.58$ g,
 IYZ=5.59



c. GSI=50, $E_m=8.66$ GPa, $a_{max}=0.60$ g,
 IYZ=3.99

Şekil 5.34 Hidrostatik birincil gerilme durumunda ($P_0=20$ MPa) dairesel açıklıkta dinamik yüklemeye sonucu oluşan yenilme bölgesi ve IYZ değerlerinin, GSI ve deformasyon modülü ile değişimi.

değerinden sonra IYZ'deki değişim daha hızlı olmaktadır. Şekil 5.32'den görüleceği gibi IYZ'deki değişim $GSI \geq 80$ için, $a_{max} > 0.6$ g değerlerinde; ve $GSI = 70$ için de $a_{max} > 0.7$ g değerlerinde hızla artmaktadır. Çok yüksek ivme değerlerinde ($a_{max} > 0.7$ g) kaya kütlelerinin GSI ve deformasyon modülünün yüksek olduğu durumlarda duraylılık açısından daha olumsuz bir görüntü oluşmaktadır. Örneğin; açıklık tabanındaki en büyük ivmenin 0.75 g olduğu durumda $GSI = 80$ için $IYZ = 4.00$, $GSI = 70$ için $IYZ = 3.00$ oluşmuştur. Bu incelemede, ortamdaki GSI değerinin artmasıyla deformasyon modülü de artırılmıştır. Açıklık çevresinde oluşan dinamik gerilmeler, etkiyen sismik dalganın en büyük genliğinin ve ortamın deformasyon modülünün artmasıyla artmaktadır (John and Zahrah, 1987). Yüksek ivme değerlerinde, $GSI = 80$ ve $E_m = 48.7$ GPa olan ortamda oluşan dinamik gerilmeler, $GSI = 70$ ve $E_m = 27.4$ GPa olan ortamında oluşan dinamik gerilmelere göre daha geniş bir bölgede yenilme bölgesi oluşturmuştur. Deformasyon modülünün artmasıyla ortamda oluşan dinamik gerilmeler artarken, yüksek GSI değerlerinde ortamın dayanım özellikleri de iyileşmektedir.

Kaya kütlelerinin GSI değeri ile deformasyon modülünün birlikte değiştiği daha gerçekçi bir durumda; açıklık tabanında oluşan en büyük ivmenin 0.6 g - 0.7 g ivme değerlerine kadar, düşük GSI ve deformasyon modülü değerlerine sahip ortamda oluşturulan açıklık çevresinde, yenilme bölgesi ve IYZ değerleri daha büyük oluşmaktadır (Şekil 5.33). Gerçek deprem gözlemlerinde en büyük ivmenin 0.6 g - 0.7 g gibi yüksek değerde olması az karşılaşılan bir durumdur.

5.3.4 Tartışma ve Yorum

Dinamik çözümlemelerde göz ardı edilen bazı hususlar ile ilgili olarak aşağıdaki tartışmaların yapılmasına gereksinim duyulmuştur.

5.3.4.1 Dinamik Mekanik Özellikler

Çözümlemelerde, kaya kütesine ait statik deformasyon modülü bir tasarım değiştirgesi olarak kullanılmıştır. Bilindiği gibi, çok farklı türde kaya malzemesi üzerinde yapılan deneyler, dinamik deformasyon modülünün genellikle statik deformasyon modülünden daha yüksek değerlerde olduğunu göstermiştir (Bieniawski, 1984; Eissa and Kazi, 1988; Price et al., 1994). Eissa ve Kazi (1988), kaya malzemesinin statik ve dinamik deformasyon modülü arasında çeşitli kayaç türlerini içeren 76 adet veri kullanarak aşağıdaki görgül eşitliği önermiştir:

$$\log E_{st} = 0.02 + 0.77 \log (\rho_i E_{dyn}) \quad (r = 0.96) \quad (5.7)$$

Burada; E_{st} (GPa), statik deformasyon modülü; E_{dyn} (GPa), dinamik deformasyon modülü ve ρ_i (g/cm³) ise kaya malzemesinin yoğunluğudur.

Kaya malzemesinde statik ve dinamik deformasyon modülleri arasında görgül bir ilişki bulunmasına rağmen, kaya kütleleri için benzer bir ilişki henüz geliştirilmemiştir. Bu nedenle, çalışmada kaya kütesine ait dinamik deformasyon modülü bir tasarım değiştirgesi olarak kullanılamamıştır.

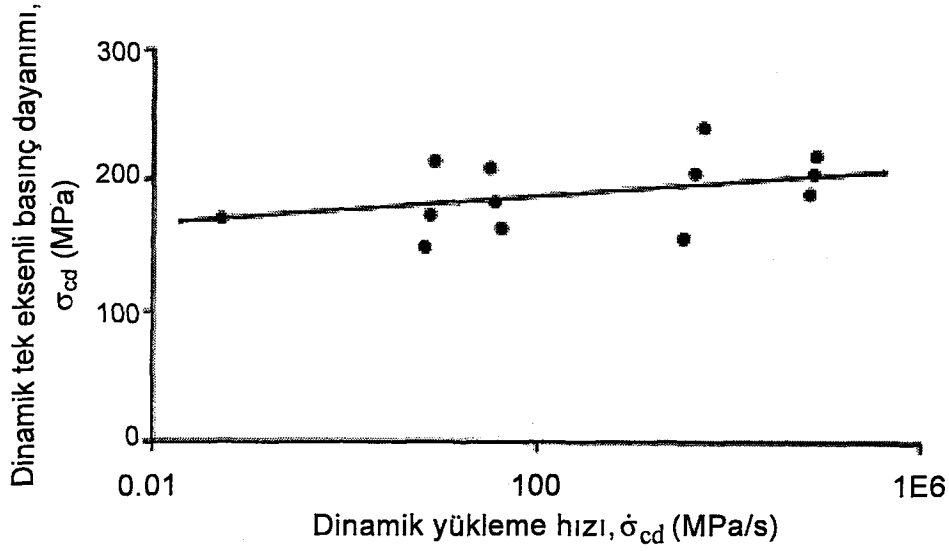
Süreksizlikler içeren kaya kütlelerinin modellendiği deneysel çalışmalarda; eklemlili örneklerin deformasyon modülünün, dinamik yüklemenin frekansı ile

arttığı, dinamik dayanımın yükleme periyodunun artışı ile azaldığı ve plastik şekil değiştirmenin yükleme periyodu ile arttığı belirlenmiştir (Li et al., 2001). Ancak, söz konusu çalışmalar başlangıç aşamasında olup, evrensel olarak kabul gören bağıntılar geliştirilememiştir. Bu nedenle çalışmada kaya kütlesinin statik deformasyon modülünün frekans değişiminden etkilenmediği kabul edilmiştir.

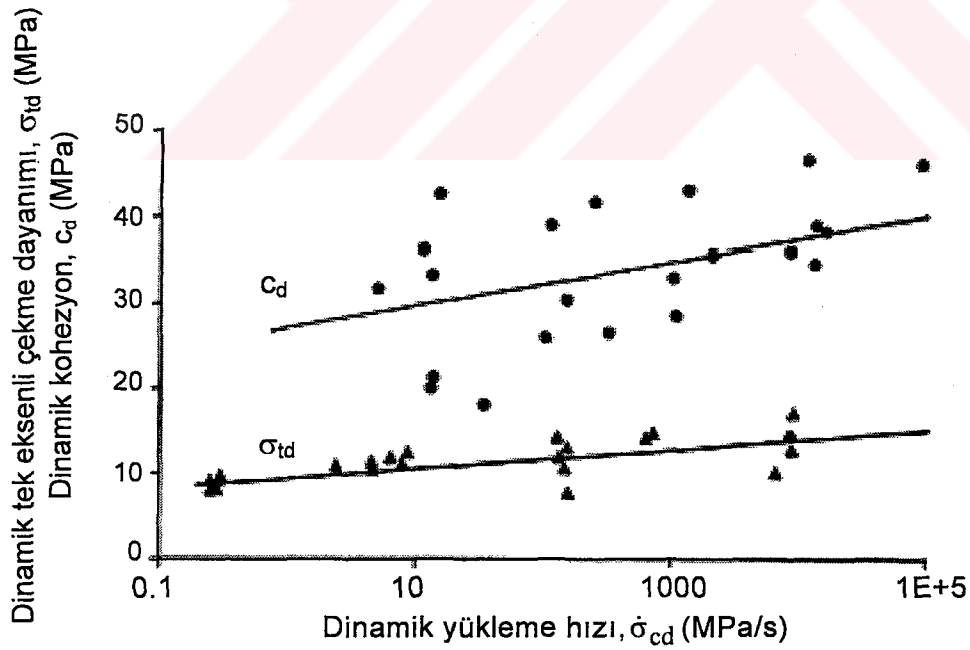
Ayrıca, dinamik çözümlerde, statik koşullarda belirlenen kaya kütlesinin dayanımı ve yenilme ölçütü kullanılmıştır. Ancak, jeolojik malzemelerin gerilme altındaki davranışı yükleme hızına bağlı olduğu için, dinamik yükler altındaki dayanımı ve elastik özellikleri statik yüklemelerden dolayı farklılık göstermektedir. Zhao (2000) tarafından kaya malzemesi üzerinde yapılan deneylerde, dinamik tek eksenli basınç dayanımının statik tek eksenli basınç dayanımından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu araştırmacı tarafından kırılğan (gevrek) kaya malzemesi için,

$$\sigma_{cd} = A_d \log (\dot{\sigma}_{cd} / \dot{\sigma}_{ci}) + \sigma_{ci} \quad (5.8)$$

şeklinde bir ilişki verilmektedir. Burada; σ_{cd} , dinamik tek eksenli basınç dayanımı (MPa), $\dot{\sigma}_{cd}$, dinamik yükleme hızı (MPa/s), $\dot{\sigma}_{ci}$, statik yükleme hızı (yaklaşık olarak 0.05 MPa/s) ve A_d , kaya malzemesi sabitidir. Bukit Timah graniti için $A_d = 11.9$ ve çimento harcı için $A_d = 4.9$ 'dur (Zhao, 2000). Daha farklı kaya türleri için A_d değerleri henüz belirlenmemiştir. Dinamik yükleme hızı ile tek eksenli basınç dayanımı değişimi Şekil 5.35'te ve dinamik tek eksenli çekme dayanımı ve kohezyon ile değişimi Şekil 5.36'da verilmiştir. Şekil 5.35'e göre; yükleme hızının artmasıyla kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımının değişimi pek de önemli derecede olmamaktadır.



Şekil 5.35 Bukit Timah graniti için dinamik tek eksenli basınç dayanımının yükleme hızı ile değişimi (Zhao, 2000).



Şekil 5.36 Bukit Timah graniti için dinamik tek eksenli çekme dayanımı ve dinamik kohezyonun yükleme hızı ile değişimi (Zhao, 2000).

Dinamik yükler altındaki kaya malzemesi için Mohr-Coulomb yenilme ölçütü,

$$\sigma_{1d} = \sigma_{cd} + \frac{1 + \sin \phi_i}{1 - \sin \phi_i} \sigma_3 \quad (5.9)$$

şeklinde verilmektedir (Zhao, 2000). Burada, σ_{1d} , en büyük dinamik asal gerilme; σ_{cd} , kaya malzemesinin dinamik tek eksenli basınç dayanımı ve ϕ_i , kaya malzemesinin statik içsel sürtünme açısıdır. Kaya malzemesinin dinamik kohezyonu ise,

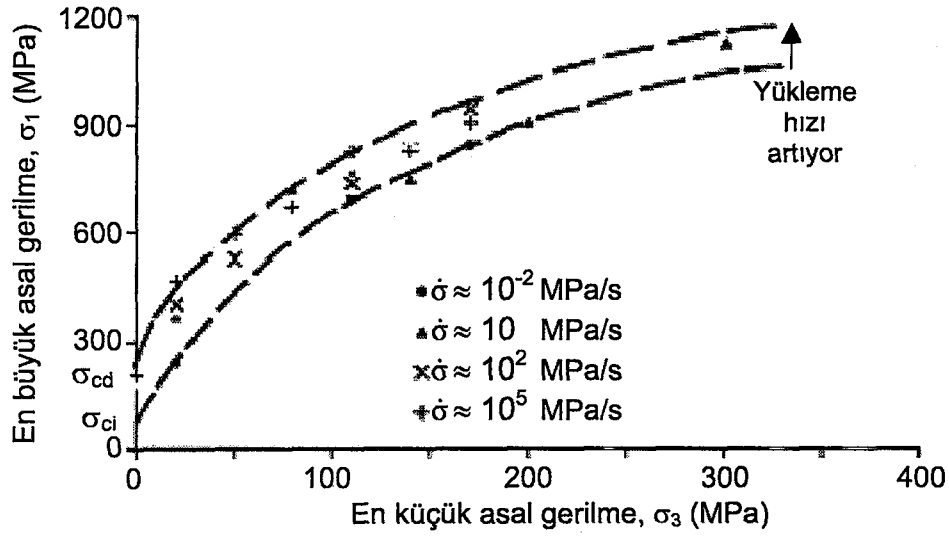
$$c_d = \sigma_{cd} \frac{(1 - \sin \phi_i)}{2 \cos \phi_i} \quad (5.10)$$

şeklindedir. Deneyler sonucunda kaya malzemesinin içsel sürtünme açısının farklı yükleme hızları ile önemli derecede değişmediği belirlenmiştir (Zhao, 2000). Bu ölçütün yalnızca düşük yanal basınçlarda geçerli olduğu belirtilmektedir.

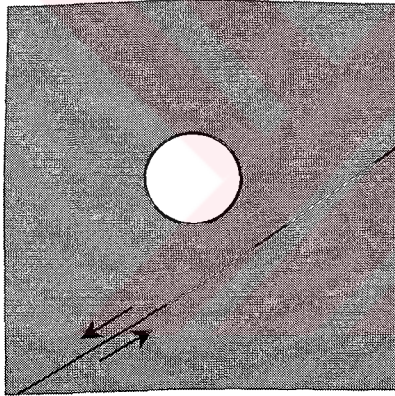
Dinamik yükler altındaki kaya malzemesi için Hoek-Brown yenilme ölçütü,

$$\sigma_{1d} = \sigma_3 + \sigma_{cd} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{cd}} + 1.0 \right)^{0.5} \quad (5.11)$$

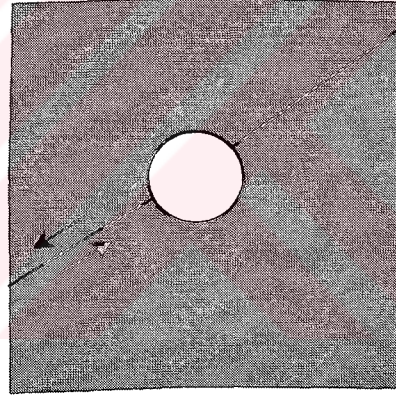
şeklinde verilmektedir (Zhao, 2000). Zhao'ya (2000) göre, kaya malzemesine ait m_i değeri yükleme hızının değişiminden fazla etkilenmemektedir (Şekil 5.37). Bu nedenle, dinamik yükleme koşulları için kaya malzemesinin yenilme ölçütünün tanımlanması için m_i , σ_{cd} ve A_d değerlerinin belirlenmesi yeterli olmaktadır. Burada önerilen yenilme ölçütlerinin sınırlı sayıda kaya türünde tanımlanması ve veri eksikliği dinamik ölçütler nedeniyle bu çalışmada kullanılmamıştır. Burada



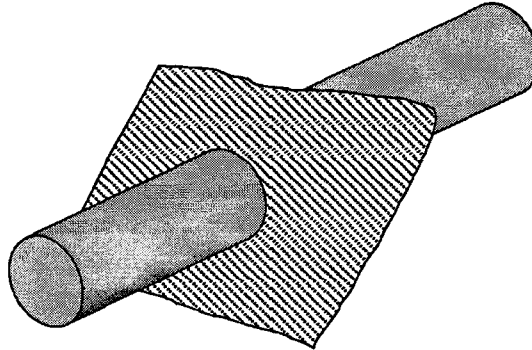
Şekil 5.37 Bukit Timah granitlerinde yapılan üç eksenli basınç dayanımı deneylerinde yüklem hızının etkisi (Zhao, 2000).



a. Aktif faya yakın uzaklıkta



b. Açıklığı kesen aktif fay



c. Açıklığı kısa bir bölgede kesen aktif fay

Şekil 5.38 Dinamik çözümlemelerle incelenebilecek açıklıkların aktif faylara göre durumları.

önerilen ölçütlerin çok farklı kayaç türleri için de kullanım alanı bulduktan sonra ileride yapılacak çalışmalarda kullanılması daha anlamlı ve faydalı olacaktır.

5.3.4.2 Deprem Kaynağına Uzaklık

Bu çalışmada, incelenen yeraltı açıklıklarına etki eden dinamik kaynağın oldukça uzak olduğu varsayılmıştır. Dinamik etkinin yeraltı açıklığı çevresinde oluşturduğu ilave duraysızlık problemleri, yenilme bölgesinin büyüklüğü açısından incelenmiştir. Bilindiği gibi, yeraltı açıklıklarının sismik açıdan aktif fayları kesmesi ya da çok yakın olması durumu da dinamik duraylılık açısından ilginç olabilmektedir (Şekil 5.38). Ancak, bu tür bir çalışmada, dinamik çözümlemelerde kullanılan değiştirge sayısı artacaktır. Örneğin; aktif fayın açıklığa olan uzaklığı, konumu ve fay yerdeğiştirmesiyle ilgili karakteristik özellikler, açıklığın tavan veya taban bloğunda bulunması vb. unsurlar bu kapsamda düşünülebilir.

5.3.5 Genel Değerlendirme

Bu çalışmada, uzak bir kaynaktan tünel eksenine dik yayılan kesme dalgalarının yeraltında oluşturduğu dinamik etkiler, düzlem birim şekil değiştirme koşulunda incelenmiştir. Derin yeraltı açıklıklarında dinamik yükleme sonucu oluşan yenilme bölgesindeki artış araştırılmıştır. Bu kapsamda, dinamik yükleme değiştirgelerinden en büyük arazi ivmesi değişimi, dalga şeklinin, dalga frekansının ve dalga yayılma yönünün etkisi incelenmiştir. Ayrıca, açıklık geometrisi ve kaya kütlelerinin özelliklerinin dinamik yükleme sonucu açıklık duraylılığına etkisi de araştırılmıştır.

Ayrıca, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçların, anizotropik özellikteki (örneğin, tabakalı ortamlarda) ortamlarda geçerli olmayabileceğinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.



BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 SONUÇLAR

Bu çalışmada; statik yükleme koşullarında, derin yeraltı açıklıklarında duraylılığı etkileyen açıklık kesit şekli, W/H oranı gibi geometrik değiştirgelerin etkileri araştırılmıştır. Yeraltı açıklıklarının birincil gerilmelerin doğrultularına göre duraylılık açısından en uygun konumunun belirlenmesine çalışılmıştır. Ayrıca, derin (> 400 m) yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkileyen sismik dalga şekli ve frekansı, en büyük yer ivmesi ve dalga yayılma yönü gibi dinamik değiştirgeler ile kaya kütlesi mekanik özelliklerinin dinamik yükleme koşullarında duraylılığa etkileri incelenmiştir.

Tez çalışması sonucunda elde edilen başlıca bulgular aşağıda sıralanmıştır. Statik çözümlemelerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Asal bileşenlerin birbirlerinden farklı olduğu anizotropik birincil gerilme alanında;
 - a. Düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen olduğu durumda, açıklığın uzun ekseninin en büyük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması; literatürde rapor edilen, sıkça karşılaşılan ve uygulamada önerilen bir durumdur. Yapılan çözümlemelerle de benzer sonuca ulaşılmıştır.

- b. Buna karşın, düşey birincil gerilmenin en büyük asal bileşen olduğu durumda, açıklığın uzun ekseninin en küçük asal gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu olmaktadır.
- c. Düşey birincil gerilmenin ortanca asal gerilme olduğu durumlarda, eksenel birincil gerilmenin yatay birincil gerilmelerin büyüğü ya da küçüğü olması duraylılık açısından önemli derecede bir farklılık yaratmamaktadır.
2. Asal bileşenlerden ikisinin eşit olduğu düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında;
- a. Düşey birincil gerilmenin en küçük asal gerilmelerden biri olduğu durumlarda, açıklığın uzun ekseninin yatay birincil gerilmelerden büyüğüne paralel konumlandırılması duraylılık açısından daha olumlu bir görüntü vermektedir.
- b. Düşey birincil gerilmenin en büyük asal gerilmelerden biri olduğu durumlarda ise açıklığın en uygun konumlandırılması açıklığın W/H oranı ile birincil gerilmelerin oranına bağlıdır. Düşük $P_{\max}/P_{\min}$ oranlarında birincil gerilmelere göre en uygun konumlandırma, açıklığın W/H oranına bağlı olarak değişmektedir. Buna karşın, yüksek $P_{\max}/P_{\min}$ oranlarında, W/H oranından bağımsız olarak, açıklığın uzun ekseninin en küçük asal birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması duraylılık açısından en olumlu bir görüntü vermektedir.
3. Asal gerilmeler uzayındaki eş yönlü yenilme ölçütleri açısından birbirine eşit olan anizotropik ve düzlemsel anizotropik 12 ayrı birincil gerilme durumu incelenerek duraylılık açısından karşılaştırılmıştır. $W/H = 2$ olan kemer tavanlı açıklık için duraylılık açısından en iyi durum; anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilmenin en küçük bileşen olması ve açıklığın uzun ekseninin en büyük birincil gerilme doğrultusunda konumlandırılması ($P_v = P$, $P_h = 2P$, $P_z = 3P$) ile oluşmuştur. Duraylılık açısından en olumsuz durum ise

düzlemsel anizotropik birincil gerilme alanında, düşey birincil gerilmenin en büyük bileşen olması, yatay gerilmelerin eşit ve en küçük bileşen olduğu durumda ($P_v = 3.62P$, $P_h = P_z = 1.19P$) oluşmaktadır.

4. İncelenen tüm açıklık şekilleri arasında, duraylılık açısından en kötü sonuçları dikdörtgen kesitli açıklıklar vermiştir. Kemer tavanlı ve düz tabanlı kesitler, her zaman olmamakla birlikte, genellikle elips ya da ovaloid kesitlere göre biraz daha olumsuz bir duraylılık görüntüsü vermektedir.
5. İncelenen tüm açıklık şekilleri ve göz önünde bulundurulan gerilme koşullarında duraylılık açısından en olumlu durumlar genellikle, açıklığın W/H oranının 1'e yakın değerleri için elde edilmiştir. Buna rağmen bazı birincil gerilme durumlarında ve açıklık geometrilerinde, en uygun W/H oranı belirli bir değer arasında da elde edilebilmektedir.

Dinamik çözümlemelerden elde edilen sonuçlar da aşağıda özetlenmiştir:

1. Açıklık tabanında oluşan aynı en büyük ivme değerlerinde, dalga şeklinin sabit genlikli sinüs işlevi veya artan-azalan genlikli sinüs işlevi olması, açıklık çevresindeki yenilme bölgesinin büyüklüğünü pek fazla değiştirmedeği belirlenmiştir. Ayrıca bu sonuç, gerçek deprem kayıtlarının kullanıldığı durumlarda da elde edilmiştir. Buna göre, sismik çözümlemelerde gerçek deprem kayıtları yerine eşdeğer büyüklükteki basitleştirilmiş dalga şekillerinin kullanılabileceği anlaşılmıştır.
2. Doğal olarak, yeraltı açıklığına etkiyen dinamik yükleme büyüklüğünün (dalga genliğinin) artması, açıklık çevresindeki yenilme bölgesinin genişliğini artırmaktadır. Statik koşullarda, anizotropik birincil gerilme alanında, duraylılık açısından en uygun konumlandırma durumlarında; etki eden dinamik yükleme ile açıklıkta oluşan yenilme bölgesi büyüklüğü ve IYZ

değerlerindeki değişim (artış) daha az olmaktadır. Düşük GSI değerlerine sahip ortamda açılan açıklıkta, etkiyen dinamik yükleme ile oluşan IYZ değerleri daha yüksek olmaktadır. İvmenin artmasıyla, IYZ değerlerindeki artış düşük GSI değerlerinde daha fazla olmaktadır.

3. Statik koşullardaki bir yeraltı açıklığının birincil gerilmelere göre en uygun konumları, dinamik yükleme durumlarında da değişmemektedir.
4. En büyük ivme değeri sabit kalırken, yalnızca dalga frekansının değişiminin incelendiği durumda, dalga frekansının azalması ile açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin büyüklüğü artmaktadır.
6. Genişliği yüksekliğine eşit olan bir yeraltı açıklığında; dalga yayılma yönünün yalnızca alttan, aşağıdan yukarıya doğru 45° eğimle ve yalnızca yandan olması, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi büyüklüğünde önemli bir farklılık oluşturmamıştır.
7. Statik çözümlemelerde, açıklığın W/H oranının 1'e yakın olması duraylılık açısından en uygun seçenek olmasına rağmen; dinamik yüklemeye maruz açıklıklar için en uygun W/H oranı, etkiyen dalganın genliğine bağlı olmaktadır. Ancak, yenilme bölgesi çok geniş olduğu zaman, açıklığın W/H oranının etkisi kaybolmaktadır.

6.2 ÖNERİLER

Tez çalışmasında ele alınan konularla ilgili ileride yapılabilecek bazı çalışmalara ilişkin öneriler aşağıda sunulmuştur:

1. Dünyanın bazı bölgelerinde yapılan ölçümler çok yüksek derecede anizotropik olan birincil gerilme durumlarını ortaya çıkarmıştır (örneğin; Norveç'in Kobblev bölgesinde $P_{\max}/P_{\min} > 5$). Bu çalışmanın söz konusu değerleri de içerecek şekilde genişletilmesi gerekmektedir.
2. Dalga yayılma yönünün yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkisi, farklı açıklık geometrileri ve W/H oranlarını içerecek şekilde belirlenmelidir.
3. Yeraltı açıklıklarının duraylılığının karşılaştırılmasında yararlanılan IYZ değerleri kullanılarak, duraylılık sınıflaması ve tahkimat önerisi veren bir çalışma yapılmalıdır.
4. Ülkemizde ve dünyada sığ yeraltı açıklıklarından daha fazla yararlanma gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Sismik açıdan yüksek etkinliğe sahip olan bölgelerde oluşturulan sığ yeraltı açıklıklarının (örneğin, yamaçlara yakın sığ tüneller vb.) duraylılığının da statik ve dinamik koşullar altındaki değişimi değiştirgesel çalışmalarla incelenmelidir.
5. Bir yeraltı açıklığı çevresinde yer alan sismik açıdan etkin bir fayın hareketi sonucu oluşacak etkiler de araştırılmalıdır.
6. Kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin dinamik yükler altında değişimi hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. Kaya mekaniği disiplininde bu özelliklerin saptanmasına yönelik çalışmalar daha yoğun bir şekilde yapılmalıdır.

7. Uzun süre hizmet vermesi planlanan yeraltı açıklıklarının belirli bölgelerine ivme ölçerler yerleştirilerek kayıtlar yapılmalıdır. Böylece yeraltı açıklıklarında, oluşan depremler sırasında maruz kaldıkları sismik hareketlerle ilgili bilgi birikimi sağlanacaktır.



KAYNAKLAR

- Adhya, K.K.** (1989) Underground structures through seismic zones. *Underground Structures Design and Instrumentation* (ed. Sinha). Developments in Geotechnical Engineering 59A, Elsevier, Amsterdam.
- Amadei, B. and Stephansson, O.** (1997) *Rock Stress and Its Measurement*. Chapman & Hall, London, p.489.
- Ansal, A.** (1986) Tünellerde deprem yüklerinin etkisi. *Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, DSİ, Adana, 16 s.
- Arioğlu, E. ve Yılmaz, A.O.** (2000) *Çözümlü Problemlerle Yeraltı Mühendislik Yapılarına Deprem Etkileri*. TMMOB MMO İstanbul Şubesi, İstanbul, 110 s.
- Atabey, E.** (2000) *Deprem*. MTA Yayınları Eğitim Serisi, No.34, Ankara, 60 s.
- Aydan, Ö.** (2000) Kişisel Görüşme.
- Aydan, Ö., Akagi, T. and Kawamoto, T.** (1993) The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 26, No.2 , pp.137-163.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., Sönmez, H. and Tuncay, E.** (1998) *A Site Investigation of Adana-Ceyhan Earthquake of June 27, 1998*. Turkish Earthquake Foundation, TDV/DR 006-30, 131 p.
- Aydan, Ö. ve Geniş, M.** (2002) Silindirik ve küresel açıklıklar çevresindeki gerilme ve birim deformasyon alanlarının belirlenmesi için birleştirilmiş analitik çözüm. *Kaya Mekaniği Dergisi*, TUKMD, Ankara, (yayımlanacak).
- Bakır, S. ve Yılmaz, T.** (2000) Geoteknik gözlem ve değerlendirmeler. *Marmara ve Düzce Depremleri Mühendislik Raporları*, Bölüm 5, <http://www.metu.edu.tr/home/wwweerc/reports/marmara.pdf>

- Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J.** (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 189-239.
- Bieniawski, Z.T.** (1976) Rock mass classification in rock engineering. *Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering*, Balkema, Cape Town, Vol. 1, pp. 97-106.
- Bieniawski, Z.T.** (1984) *Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling*. A.A. Balkema, Rotterdam, 270 p.
- Bieniawski, Z.T.** (1989) *Engineering Rock Mass Classifications*, Wiley, New York.
- Bolt A.B.** (1993) *Eartquakes*. Revised and Expanded Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 331 p.
- Brady, B.H.G.** (1993) Dynamic behaviour of rock. *Comp. Rock Engineering*. (ed. Hudson), Vol.1. Fundamentals, Pergaman Press, London, pp.611-624.
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T.** (1985) *Rock Mechanics for Underground Mining*. Chapman and Hall, London., p.557.
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T.** (1993) *Rock Mechanics for Underground Mining*. Chapman and Hall, London., p.557.
- Castro, L.A.M., McCreath, D.R. and Oliver, P.** (1996) Rockmass damage initiation around the Sudbury neutrino observatory cavern. *Rock Mechanics* (eds. Aubertin, Hassani and Mitri), A.A.Balkema, Rotterdam, pp.1589-1595.
- DAD** (2001) Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, <http://www.deprem.gov.tr/>
- Detournay, E. and Fairhurst, C.** (1982) Generalization of the ground reaction curve concept. *Proc. 23rd US Symp. on Rock Mech. - Issues in Rock Mechanics*. (eds. R.E. Goodman and F.E. Heuze), AIME, New York, pp.924-933.
- Detournay, E., and Fairhurst, C.** (1987) Two-dimensional elastoplastic analysis of a long, cylindrical cavity under non-hydrostatic loading. *Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol.24, No.4, pp.197-211.

- Detournay, E. and John, C.M.** (1988) Design charts for a deep circular tunnel under non-uniform loading. *Rock Mechanics and Rock Eng.*, Vol.21, No.2, pp.119-137.
- Diederichs, M.S. and McCreath, D.R.** (1994) Assesment of near-field rock mass fracturing around a potential nuclear fuel waste repository in the Canadien shield. *Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci. & Geo. Abstr.*, Vol.31, No.5, pp. 457-470.
- EERC** (2002) ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, http://www.metu.edu.tr/home/wwwweerc/dmam_fr1.html
- Eissa, E.A. and Kazi, A.** (1988) Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci. & Geo. Abstr.*, Vol.25, No.6, pp. 479-482.
- Erlingsson, S.** (1997) Seismic design of subsea tunnels. *Int. Symp. on Rock Support - Applied Solutions for Underground Structures* (eds. E. Broch, A. Myrang and G. Stjern), Lillehammer, pp.804-811.
- Farmer, I.W.** (1997) Regional in-situ stresses in mine design. *Trans. Instn Min. Metall. (Sect. A: Min. industry)*, Vol. 106, pp. A95-A99.
- Gale, W.J.** (1991) Strata control utilizing rock reinforcement techniques and stress control methods in Australian coal mines. *The Mining Engineer*, Vol. 150, No. 352, pp. 247-253.
- Geniş, M.** (1995) *Dairesel Olmayan Yeraltı Açıklıklarında Duraylılığın Analitik Çözümlerle Değerlendirilmesi*, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Müh. Tezi, 146 s.
- Geniş, M. ve Gerçek, H.** (2000) Yeraltı Açıklıklarının Dinamik Tasarımı. *V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu* (eds. S. Saraç, L. Gündüz ve R. Altındağ), TUKMD, Isparta, s.65-72.
- Gerçek, H.** (1986) Yeraltı açıklıklarının yüzeyinde oluşan gerilmelerin hesaplanması için bazı pratik yaklaşımlar. *I. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, Ankara, s. 33-60.
- Gerçek, H.** (1988) Calculation of elastic boundary stresses for rectangular underground openings. *Mining Science and Technology*, Vol.7, pp. 173-182.

- Gerçek, H.** (1989) Kemer tavanlı bir tünelde elastik yüzey gerilmelerinin hesaplanması. *Türkiye 11. Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı*, TMMOB MMO, Ankara, s. 273-283.
- Gerçek, H.** (1991) Tahkimat Ders Notları (yayınlanmamış), HÜ Müh. Fak., Maden Müh. Böl., Zonguldak.
- Gerçek, H.** (1993) Qualitative prediction of failures around non-circular openings. *Proc. Int. Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering* (eds. A.G. Paşamehmetoğlu et al.), A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 727-732.
- Gerçek, H.** (1995) Yeraltı Açıklıklarının Tasarımı (yayınlanmamış), ZKÜ Müh. Fak., Maden Müh. Böl., Zonguldak.
- Gerçek, H.** (1996) Hoek-Brown yenilme ölçütünün gelişimi. *3. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TUKMD, Ankara, s.251-262.
- Gerçek, H.** (1997) An elastic solution for stresses around tunnels with conventional shapes. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 34, No. 3-4, Paper No. 096, 10 pp.
- Gerçek, H.** (2001) Kişisel görüşme. Zonguldak.
- Gerçek, H. and Geniş, M.** (1996) A comparative study of the effect of in situ stress field on the stability of underground openings. *Proceedings EUROCK'96 ISRM Symposium on Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 2, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 869-874.
- Gerçek, H. and Geniş, M.** (1999) Effect of anisotropic in situ stress field on the stability of underground openings. *Proc. of the 9th International Congress on Rock Mechanics* (eds. G. Vouille and P. Berest), ISRM, A.A. Balkema, Rotterdam, pp.367-370.
- Gerçek, H. ve Geniş, M.** (1995) Dairesel Olmayan Yeraltı Açıklıklarında Duraylılığın Karşılaştırmalı Bir İncelemesi. *Türkiye 14. Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı*, TMMOB MMO, Ankara, s.43-48.
- Gerçek, H. ve Geniş, M.** (1998) Yönlere bağlı birincil gerilme alanının yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkisi. *4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TUKMD, Zonguldak, s.235-246.

- Gerçek, H. ve Geniş, M.** (2000) Geometrik tasarım değiştirgelerinin yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkisi. *V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu* (eds. S. Saraç, L. Gündüz ve R. Altındağ), TUKMD, Isparta, s.73-79.
- Gerçek, H., Geniş, M. and Özarslan A.** (2000) Effect of transversely anisotropic in situ stresses on the stability of underground openings. *14. Nationales Symposium für Felsmechanik und Tunnelbau-EUROCK 2000*, DGGT/ISRM, Aachen, pp. 483-488.
- Greenspan, M.** (1944) Effect of a small hole on the stresses in a uniformly loaded plate. *Q.J. Appl. Math.* Vol. 2, pp. 60-71.
- Hamada, M., Yokoyama, M. and Sugihara, Y.** (1980) Earthquake observation of underground structure and aseismic design. *Proc. of the Seventh World Conference on Earthquake Eng.*, İstanbul, Vol.6, pp.485-492.
- Hamada, M., Kitahara, M., Nakagawa, K. and Muranishi, Y.** (1985) Earthquake observations and BIE analysis on dynamic behavior of rock cavern. *5th Int. Con. on Numerical Methods in Geomechanics* (eds. T. Kawamoto and Y. Ichikawa), A.A.Balkema, Rotterdam, Vol.2, pp.1525-1532.
- Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B. and Yao, J.I.** (2001) Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol.16, pp.247-293.
- Hoek, E.** (1998) Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design. *Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.35, No.1, pp. 63-68.
- Hoek, E.** (1999) Putting numbers to geology-an engineer's viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vo.32, pp. 1-19.
- Hoek, E.** (2000) *Rock Engineering*. Course Notes, <http://www.roscience.com/roc/Hoek/Hoeknotes2000.htm>, 313 p.
- Hoek, E. and Brown, E.T.** (1980) *Underground Excavations in Rock*. IMM, London.
- Hoek, E. and Brown, E.T.** (1988) The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. *Proc. 15th Canadian Rock Mechanics Symp.- In Rock Eng. for Underground Excavations* (ed. Curran), Toronto, pp. 31-38.

- Hoek, E., Wood, D. and Shah, S.** (1992) A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses. *Proc. Rock Characterisation EUROCK'92* (ed. Hudson), ISRM, London, pp.209-214.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F.** (1995) *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Hoek, E. and Brown, E.T.** (1997) Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 34, No.8, pp.1165-1186.
- Itasca** (1995) *FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua (Version 3.3)*. Vols. I-IV, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W.** (1968) *Fundamentals of Rock Mechanics*. Chapman and Hall, London, p.593.
- John, C.M. and Zahrah, T.F.** (1987) Aseismic design of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol.2, No.2, pp.165-197.
- John, C.M., Detournay, E. and Fairhurst, C.** (1984) Design charts for a deep circular tunnel under non-hydrostatic loading. *Proc. 25th US Symp. on Rock Mech. - Rock Mech. in Productivity and Protection*. (eds. C.H. Dowding and M.M. Singh), AIME, New York, pp.849-856.
- Kaiser, P.K. and Tannant, D.D.** (1997) Use of shotcrete to control rockmass failure. *Int. Symp. on Rock Support - Applied Solutions for Underground Structures* (eds. E. Broch, A. Myranger and G. Stjern), Lillehammer, pp. 580-594.
- Kirsch, G.** (1898) Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre. *Zeit. Ver. Deut. Ing. J.*, Vol.42, pp. 797-807.
- Kirzhner, F. and Rosenhouse, G.** (2000) Numerical analysis of tunnel dynamic response earth motions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol.15, No.3, pp.249-258.
- Kramer, S.L.** (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, 526 p.
- Krinitzsky, E.L., Gould, J.P. and Edinger, P.H.** (1993) *Fundamentals of Earthquake-Resistant Construction*. John Wiley & Sons, 299 p.

- Ladanyi, B.** (1967) Expansion of cavities in brittle media. *Int. Journal of Rock Mech. & Min. Sci.*, No.4, pp. 301-328.
- Lee, C.F.** (1987) Performance of underground coal mines during the 1976 Tangshan earthquake. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol.2, No.2, pp.199-202.
- Li, N., Chen, W., Zhang, P. and Swoboda, G.** (2001) The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading. *Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.38, pp. 1071-1079.
- Marinos, P. and Hoek, E.** (2001) Estimating the geological properties of heterogeneous rock masses such as flyash. *Bull. Eng. Geol. Env.*, Springer Verlag, Vol.60, pp. 85-92.
- Martin, C.D., Martino, J.B. and Dzik, E.J.** (1994) Comparison of borehole breakouts from laboratory and field tests. *EUROCK'94 Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 183-190.
- Martin, C.D. and Read, R.S.** (1996) AECL's mine-by experiment: a test tunnel in brittle rock. *Rock Mechanics* (eds. Aubertin, Hassani and Mitri), A.A.Balkema, Rotterdam, pp.13-24.
- Martin, C.D., McCreath, D.R. and Stochmal, M.** (1997) Estimating support demand-loads caused by stress-induced failure around tunnels. *Int. Symp. on Rock Support - Applied Solutions for Underground Structures* (eds. E. Broch, A. Myrvang and G. Stjern), Lillehammer, pp.235-248.
- Martin, C.D., Kaiser, P.K. and McCreath, D.R.** (1999) Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Can. Geotech. J.*, Vol.36, pp.136-151.
- Meyer, L.H.I, Stead, D. and Coggan, J.S.** (1999) Three dimensional modelling of the effects of high horizontal stress on underground excavation stability. *Proc. of the 9th International Congress on Rock Mechanics* (eds. G. Vouille and P. Berest), ISRM, A.A. Balkema, Rotterdam, pp.411-416.
- Myrvang, A.M.** (1999) Surface indicators of high, near surface rock stresses. *Proc. of the 9th International Congress on Rock Mechanics* (eds. G. Vouille and P. Berest), ISRM, A.A. Balkema, Rotterdam, pp.1167-1170.

- Obara, Y., Nakayama, T., Sugawara, K., Aoki, T. and Jang, H.K.** (1992) Determination of plastic regions around underground openings by a coupled boundary element characteristics method. *Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.16, pp.701-716.
- Obert, L., Duvall, W.I. and Merrill, R.H.** (1960) Design of underground openings in competent rock. *U.S. Bur. Mines Bull.* 587.
- Ohsaki, Y.** (1976) *Deprem Dalgasının Spektral Analizine Giriş*, çev. M. İpek, TMMOB İnşaat Müh. Odası İstanbul Şubesi, Doyuran Matbaası, İstanbul, 332 s.
- Okamoto, S.** (1973) *Introduction to Earthquake Engineering*, University of Tokyo Press, Tokyo.
- Pamir, H.N.** (1960) *Dinamik Jeoloji II İç Olaylar*. İ.Ü. Fen Fakültesi Yayınları, No.39, İstanbul, 491 s.
- Pan, X.D. and Brown, E.T.** (1996) Influence of axial stress and dilatancy on rock tunnel stability. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.2, pp.139-146.
- Pan, Y.W. and Chen, Y.M.** (1990) Plastic zones and characteristics-line families for openings in elasto-plastic rock mass. *Rock Mechanics and Rock Eng.*, Vol.23, pp.275-292.
- Paşamehmetoğlu, A.G. ve ark.** (1985) *Gelik İşletmesi Kömür ve Kayalarının Kaya Mekaniği ve Dizayn Parametrelerinin Çıkartılmasının Araştırılması*, ODTÜ ve HÜZMF.
- Price, R.H., Boyd, P.J., Noel, J.S. and Martin, R.J.** (1994) Relation between static and dynamic rock properties in welded and nonwelded tuff. *Rock Mechanics* (eds. Nelson & Laubach), A.A. Balkema, Rotterdam, pp.505-512.
- Pugh, W.L.** (1988) Strata control and roof bolting in Western Area. *The Mining Engineer*, Vol. 147, June, pp. 584-593.
- Rajmeny, P.K., Singh, U.K. and Sinha, B.K.P.** (2002) Predicting rock failure around boreholes and drives adjacent to stopes in Indian mines in high stress regions. *Int. Journal of Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.39, pp.151-164.

- Ribacci, R.** (2000) Mechanical tests on pervasively jointed rock material: insight into rock mass behaviour. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 33, No.4 , pp.243-266.
- Savin, G.N.** (1961) *Stress Concentration Around Holes*, trans. E. Gross, Pergamon, Oxford.
- Sharma, S. and Judd, W.R.** (1991) Underground opening damage from erartquakes. *Engineering Geology*, Elsevier, Vol.30, pp.263-276.
- Sheorey, P.R., Mohan, G.M. and Sinha, A.** (2001) Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress. *Int. Journal of Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.38, pp.1211-1216.
- Siddall, R.G. and Gale, W.** (1992) Strata control - a new science for an old problem. *Trans. Instn Min. Metall. (Sect. A: Min. industry)*, Vol. 101, pp. A1-A12.
- Terzaghi, K. and Richart, R.E.** (1952) Stresses in rock about cavities, *Géotechnique*, Vol.3, pp. 57-90.
- Ulusay, R.** (2002) Kişisel Görüşme.
- Ulusay R. ve Sönmez, H.** (2002) *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*. TMMOB Jeoloji Müh. Odası Yayınları, No.60, Ankara, 243 s.
- Vladut, T.** (1993) Man-made induced seismicity. *Comp. Rock Engineering. (ed. Hudson)*, Vol.5. Surface and Underground Project Case Histories, Pergaman Press, London, pp.583-604.
- Wang, J.G.Z.Q. and Law, K.T.** (1994) *Siting in Earthquake Zones*. A.A. Balkema, Rotterdam, 113 p.
- Wang, W.L., Wang, T.T., Su, J.J., Lin, C.H., Seng, C.R. and Huang, T.H.** (2001) Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol.16, pp.133-150.
- Yamaguchi, Y., Tsujita, M. and Wakita, K.** (1987) Seismic behaviour of a rock tunnel. *6th ISRM Congress on Rock Mechanics*, Montreal, pp.1325-1328.

Zhao, J. (2000) Applicability of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria to the dynamic strength of brittle rock. *Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.37, pp. 1115-1121.



BİBLİYOGRAFYA

- Brock, J.S.** (1958) The stresses around square holes with rounded corners. *Journal of Ship Research*, Vol.2, pp. 357-368.
- Brown, E.T. and Hudson, J.A.** (1974) Fatigue failure characteristics of some models of jointed rock. *Earthquake Eng. Struc. Dyn.*, Vol.2, pp.379-386.
- Coulomb, C.A.** (1776) Essai sur une application des règles de maximis et minimis a quelque problèmes de statique, relatifs a l'architecture. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, L'Académie Royale de Sciences, Vol.7, pp. 343-382.
- Dowding, C.H. and Rozen, A.** (1978) Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *ASCE J. of Geotech. Eng. Div.* 104(GT2), pp.175-191.
- Fairhurst, C.** (1976) The application of mechanics to rock engineering. *Proc. Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, Vol.2, pp.1-22.
- Heller, S.R., Brock, J.S. and Bart, R.** (1958) The stresses around a rectangular opening with rounded corners in a uniformly loaded plate. *Proc. 3rd U.S. Nat. Congr. Applied Mechanics*, ASME, New York, pp. 357-368.
- Hoek, E.** (1981) Basic geotechnical design of large openings at depth. *Proc. of Rapid Excavation & Tunnelling Conf.*, AIME, New York, Vol.1, p.101-109.
- Housner, G.W. and Jennings, P.C.** (1982) *Earthquakes Design Criteria*. EERI Monograph Series, Berkeley, 140 p.
- Huang, T.H., Ho, T.Y., Chang, C.T., Yao, X.L., Chang, Q.D. and Lee, H.C.** (1999) Quick investigation and assessment on tunnel structures after earthquake, and the relevant reinforced methods (in Chinese). *Report for the Public Construction Commission*, Taipei.
- Inglis, C.E.** (1913) Stresses in a plate due to presence of cracks and sharp corners. *Trans. Inst. Naval Arch.*, Vol.55, pp. 219-230.

- Jiayou, L., Lihui, D., Chengjie, Z. and Zebin, W.** (1989) The brittle failure of rock around underground openings. *Proc. of the Conf. on Rock Mech. and Rock Physics at Great Depth*, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol.2, pp.567-574.
- Jing-Ming, W.** (1980) Distribution of underground seismic intensity in the epicentral area of the 1976 Tangshan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, Vol.2, pp.314-320.
- Jing-Ming, W.** (1985) The distribution of earthquake damage to underground facilities during the 1976 Tang-Shan earthquake. *Earthquake Spectra*, EERI, Vol.1, No.4, pp.741-758.
- Kirsten, H.A.D. and Klokow, J.W.** (1979) Control of fracturing in mine rock passes. *Proc. of the 4th ISRM Congress on Rock Mechanics*, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.203-210.
- Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J.** (1973) Finite element method accuracy for wave propagation problems. *J. Soil Mech. & Foundations*, ASCE, 99(SM5), pp.421-427.
- Kuesel, T.R.** (1969) Earthquake design criteria for subways. *J. of Struct. Div.*, ASCE ST6, pp.1213-1231.
- Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L.** (1969) Finite dynamic model for infinite media. *Journal of Eng. Mech.*, No.95(EM4), pp.859-877.
- Martin, C.D.** (1989) Failure observation and in situ stress domains at the Underground Research Laboratory. *Proc. of the Conf. on Rock Mech. and Rock Physics at Great Depth*, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol.2, pp.719-726.
- Martin, C.D., Kaiser, P.K. and Alcott, J.M.** (1996) Predicting the depth of stress-induced failure around underground openings. *Int. Proc. 49th Canadian Geo. Conference*, Vol.1, pp.105-114.
- McClure, C.R.** (1981) Damage to underground structures during earthquakes workshop on seismic performance of underground facilities, Georgia.
- McGair, A., Green, R.W.E. and Spottiswoode, S.M.** (1981) Strong ground motion of mine tremors: Some implications for near-source ground motion parameters. *Bull. Seis. Soc. America*, Vol.71, No.1, pp.295-319.

- Newmark, N.M.** (1968) Problems in wave propagation in soil and rock. *Proc. of the Int. Symp. on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*, New Mexico.
- Ortlepp, W.D. and Gay, N.C.** (1994) Performance of an experimental tunnel subjected to stresses ranging from 50 MPa to 230 MPa. *Proc. of the ISRM Symp.: Design and Performance of Underground Excavations*, British Geotechnical Society, London, pp.337-346.
- Ortlepp, W.D., More O'Ferral, R.C. and Wilson, J.W.** (1973) *Support Methods in Tunnels*. South African Association of Mine Managers, Circular No. 2/73, pp.1-19.
- Owen, G.N. and Scholl, R.G.** (1981) Earthquake engineering of large underground structures. FHNA/ro-80,195, U.S. Dept. of Transportation, Washington D.C., pp.171-174.
- Pelli, F., Kaiser, P.K. and Morgenstern, N.R.** (1991) An interpretation of ground movements recorded during construction of the Donkin-Morien tunnel. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.28, No.2, pp.239-254.
- Power, M.S., Rosidi, D. and Kaneshiro, J.** (1996) Strawman: screening, evaluation, and retrofit design of tunnels. Report drafts, National Center for Earthquake Engineering Research, New York.
- Richards, R. and Bjorkman, G.S.** (1978) Optimum shapes for unlined tunnels and cavities. *Engineering Geology*, Vol.12, No.2, pp.171-179.
- Richart, F. et.al.** (1970) *Vibrations soils and foundations*. Englewood Cliffs. NJ.
- Serafim, J.L. and Preria, J.P.** (1983) Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski. *Proc. Int. Sym. on Eng. Geol. and Underground Constr.*, LNEC, Lisbon, Vol.1, pp.33-42.
- Stacey, T.R. and de Jongh, C.L.** (1977) Stress fracturing around a deep-level bored tunnel. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp.124-133.
- Stevens, P.R.** (1977) *Review of Effects of Earthquakes on Underground Mines*. US Geological Survey, Open File Report, pp.77-313.

Wang, W.L., Wang, T.T., Su, J.J., Lin, C.H., Seng, C.R. and Huang, T.H.
(2000) The seismic hazards and the rehabilitation of the tunnels in central Taiwan after Chi-Chi Earthquake. *Sino-Geotechnics*, No.81, pp.85-96.

Wilson, J.W. (1971) *The Design and Support of Underground Excavations in Deep Level, Hard Rock Mines*. Ph.D. Thesis, University of the Witwatersrand.



EK AÇIKLAMALAR A

HOEK-BROWN YENİLME ÖLÇÜTÜ

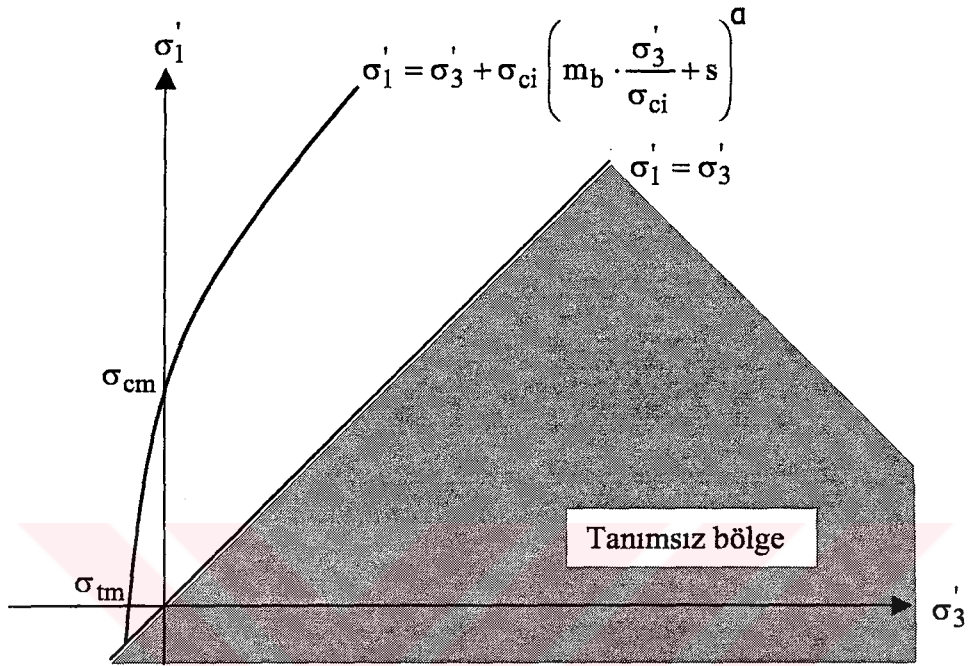
Hoek ve Brown kayanın yenilmesi ile ilgili görgül bir ölçütü ilk defa 1980'de önermişlerdir (Hoek and Brown, 1980) ve zamanla söz konusu ölçütte bazı değişiklikler yapılmıştır (Hoek and Brown, 1988; Hoek et al., 1992, 1995). Söz konusu ölçüt, masif ve üçten fazla eklem sistemi içeren kaya kütlesi ortamlarında kullanılabilmektedir (Hoek, 1988). Seksenli yılların kaya mekaniğindeki en önemli gelişmelerinden biri olan bu ölçüt, en genel haliyle,

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (A.1)$$

bağıntısıyla verilmektedir (Hoek et al., 1995). Burada; σ'_1 ve σ'_3 , sırasıyla, en büyük ve en küçük asal etkin gerilmeler; σ_{ci} , sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı; m_b , s ve α da kaya kütlesinin niteliğine bağlı olan sabitlerdir. Bu sabitlerin kaya kütleleri için belirlenmesinde jeolojik dayanım indeksi (GSI: geological strength index) adlı bir büyüklük kullanılmaktadır (Hoek et al., 1995). Hoek-Brown yenilme ölçütünün iki-boyutlu asal gerilmeler uzayındaki durumu Şekil A.1'de gösterilmiştir. Kaya kütlesine ait m_b sabitinin tahmini için,

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad (A.2)$$

bağıntısı önerilmiştir. Burada m_i , sağlam laboratuvar örnekleri üzerinde yapılan dayanım deneylerine ait verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesiyle elde edilen bir malzeme sabitidir. Çeşitli kaya tipleri için m_i değerleri Çizelge A.1'de sunulmuştur. Diğer iki sabitin belirlenmesi için de aşağıdaki görgül bağıntılar önerilmektedir. $GSI > 25$ için,



Şekil A.1 Hoek-Brown yenilme ölçütünün asal gerilmeler uzayında tanımlanması.

Çizelge A.1 Sağlam kayalar için m_i değerleri (Hoek et al., 1995; Marinos and Hoek, 2001).

Kaya tipi	Sınıf	Grup	Doku			
			İri	Orta	İnce	Çok ince
TORTUL	Kırıntılı		Konglomeralar (**)	Kumtaşı 17 ± 4	Silttaşı 7 ± 2	Kiltaşı 4 ± 2
			Breşler (**)			Marn (7 ± 2)
			— Şeyl (6 ± 2) — — Grovak (18 ± 3) —			
	Kırıntılı olmayan	Organik	—— Tebeşir 7 ± 2 —— —— Kömür (8-21) ——			
		Karbonatlar	Kristalleşmiş kireçtaşları (12 ± 3)	Sparitik kireçtaşları (10 ± 2)	Mikritik kireçtaşları (9 ± 2)	Dolomit (9 ± 3)
		Evaporitler		Jips 8 ± 2	Anhidrit 12 ± 2	
METAMORFİK	Yapraklanma olmayan		Mermer 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4)	Kuvarsit 20 ± 3	
	Hafif yapraklanma gösteren		Migmatit (29 ± 3)	Amfibolit 26 ± 6	Gnays 28 ± 5	
	Yapraklanmış (*)			Şist 12 ± 3	Fillit (7 ± 3)	Sleyt 7 ± 4
MAĞMATİK	Derinlik	Açık	Granit 32 ± 3	Diyorit 25 ± 5		
			Granodiorit (29 ± 3)			
		Koyu	Gabro 27 ± 3	Dolerit (16 ± 5)		
	Yarı derinlik		Porfirler (20 ± 5)		Diyabaz (15 ± 5)	Peridotit (25 ± 5)
	Volkanik	Lav		Riyolit (25 ± 5)	Dasit (25 ± 3)	Obsidyen (19)
			Andezit 25 ± 5	Bazalt (25 ± 5)		
	Kırıntılı	Aglomera (19 ± 3)	Breş (19 ± 5)	Tüf (13 ± 5)		

(*) Bu değerler tabakalanma veya yapraklanma düzlemine dik doğrultuda test edilen sağlam kaya örnekleri içindir. Zayıflık düzlemi boyunca yenilme oluştuğunda m_i değerleri önemli derecede farklılık gösterebilir.

(**) Konglomera ve breş için m_i değerleri, çimento malzemesi ve çimentolanma derecesine bağlı olarak çok geniş aralıkta değere sahiptir. İnce taneli kayaların değerinden kumtaşlarının sahip olduğu değerlere kadar değişebilir.

Tahmini değerler parantez içinde verilmiştir. Her kayaç için belirtilen değer aralıkları, tane ve kristal yapısının kilitlenme derecesine bağlı olup yüksek değerler, sıkı kilitlenme ve daha yüksek kohezyon özelliklerini belirtmektedir.

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad (A.3.a)$$

$$\alpha = 0.5 \quad (A.3.b)$$

GSI $\leq$ 25 için,

$$s = 0 \quad (A.3.c)$$

$$\alpha = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (A.3.d)$$

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan GSI değeri ilk önerildiği yıllarda Bieniawski'nin (1976, 1989) Jeomekanik Sınıflama Sistemi'ndeki kaya kütlesi puanı (RMR: rock mass rating) ya da Barton et al.'in (1974) tünelcilik niteliği indeksi (Q: tunnelling quality index) kullanılarak bulunabiliyordu (Hoek et al., 1995).

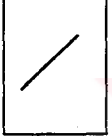
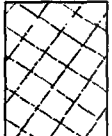
Ancak, daha sonra Hoek ve Brown (1997), RMR ve Q sınıflama sistemlerinden bağımsız olarak, GSI'ni bir sınıflama sistemi olarak öngörmüşlerdir. Söz konusu sınıflama sistemi kaya kütlesinin yapısı ve süreksizlik yüzeylerinin kalitesine bağlı olarak GSI değerlerinin tahminine olanak sağlamaktadır. En son haliyle GSI sınıflama sistemi Şekil A.2'de sunulmuştur.

Kaya kütleleri için m_b ve s sabitleri bilindiği zaman da eklemli kaya kütlesine ait tek eksenli çekme ve tek eksenli basınç dayanımları (Hoek and Brown; 1980, 1988); GSI $>$ 25 için,

$$\sigma_{tm} = 0.5 \cdot \sigma_{ci} \cdot \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad (A.4.a)$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \sqrt{s} \quad (A.4.b)$$

Şekil A.2 Jeolojik tanımlamalara dayalı Jeolojik Dayanım İndeksinin tahmini (Hoek, 1999).

JEOLOJİK DAYANIM İNDEKSİ (GSI)		YÜZEY KOŞULLARI					
Kaya kütlelerinin yapısı ve süreksizliklerin yüzey koşulları göz önünde bulundurularak bu çizenekten uygun bir kutucuğu seçin. Konturları kullanarak ortalama bir GSI değeri kestirin. Çok hassas olmaya çalışmayın; GSI=38 yerine, GSI=35-40 aralığının belirtilmesi daha gerçekçidir. Hoek-Brown ölçütü yalnızca kaya blokları veya parçalarının boyutunun açıklık boyutuna kıyasla daha küçük olduğu kaya kütlelerine uygulanabilir. Ortamdaki blokların boyutu yeraltı açıklığı boyutunun yaklaşık dörtte birinden büyükse, yenilme bireysel blok hareketleriyle oluşabilir ve bu durumda Hoek-Brown Ölçütü kullanılmamalıdır.		YÜZEY KOŞULLARI ÇOK İYİ Çok pürüzlü, taze ayrılmamış yüzeyler İYİ Pürüzlü, hafifçe ayrılmış, lekeli yüzeyler ORTA Düzgün, orta derecede ayrılmış ve bozunmuş yüzeyler ZAYIF Kaygan, köşeli parçalı, dolgu çok ayrılmış yüzeyler ÇOK ZAYIF Kaygan, yumuşak kil dolgu çok ayrılmış yüzeyler					
KAYA YAPISI		AZALAN YÜZEY KALİTESİ →					
	SAĞLAM VEYA MASİF - Sağlam, çatlaksız kaya malzemesi veya geniş aralıklı çok az sayıda süreksizlik içeren masif kaya kütlesi.	90 80 70 60 50 40 30 20 10 5 UYGULANAMAZ					
	BLOKLU - Birbirine dik üç süreksizlik takımının oluşturduğu kübik bloklar içeren, çok iyi kilitlenmemiş ve örselenmemiş kaya kütlesi.						
	ÇOK BLOKLU - Dört veya daha fazla süreksizlik takımının oluşturduğu çok yüzeyli ve köşeli bloklar içeren, kenetlenmiş ve kısmen örselenmiş kaya kütlesi	90 80 70 60 50 40 30 20 10 5 UYGULANAMAZ					
	BLOKLU/RAHATSIZ EDİLMİŞ - birbirini kesen bir çok süreksizlik takımının oluşturduğu, köşeli bloklar içeren kıvrımlanmış ve/veya faylanmış kaya kütlesi.						
	DAĞILMIŞ - Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının karışımından oluşan, zayıfça kenetlenmiş ve aşırı derecede kırılmış kaya kütlesi.	90 80 70 60 50 40 30 20 10 5 UYGULANAMAZ					
	YAPRAKLANMIŞ/İNCE TABAKALANMIŞ - Kıvrımlanmaya ve tektonik olarak kesme hareketlerine maruz kalmış, yapraklanmış kaya kütlesi. Diğer süreksizlik takımlarına kıyasla daha egemen olan ince tabakalanma, kaya kütleindeki bloklanmayı önler.						

ve $GSI \leq 25$ için,

$$\sigma_{tm} = 0 \quad (A.4.c)$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (A.4.d)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

Hoek ve Brown (1997), kaya kütlelerinin yerindeki deformasyon modülünün kestirimi için Serafim and Pereria (1983) tarafından önerilen görgül eşitliği, GSI değerlerini de içerecek şekilde sunmuştur:

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \quad \sigma_{ci} < 100 \text{ MPa} \quad (A.5)$$

Burada; E_m (GPa) ve σ_{ci} (MPa)'dır.

Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre başlıca iki tip yenilme şekli (modu) söz konusudur. En küçük asal etkin gerilme $\sigma_3' < \sigma_{tm}$ olduğu zaman, kayanın çekme yenilmesine uğrayacağı varsayılmakta olup bu durumun herhangi bir noktadaki "çekme" ye göre güvenlik katsayısı,

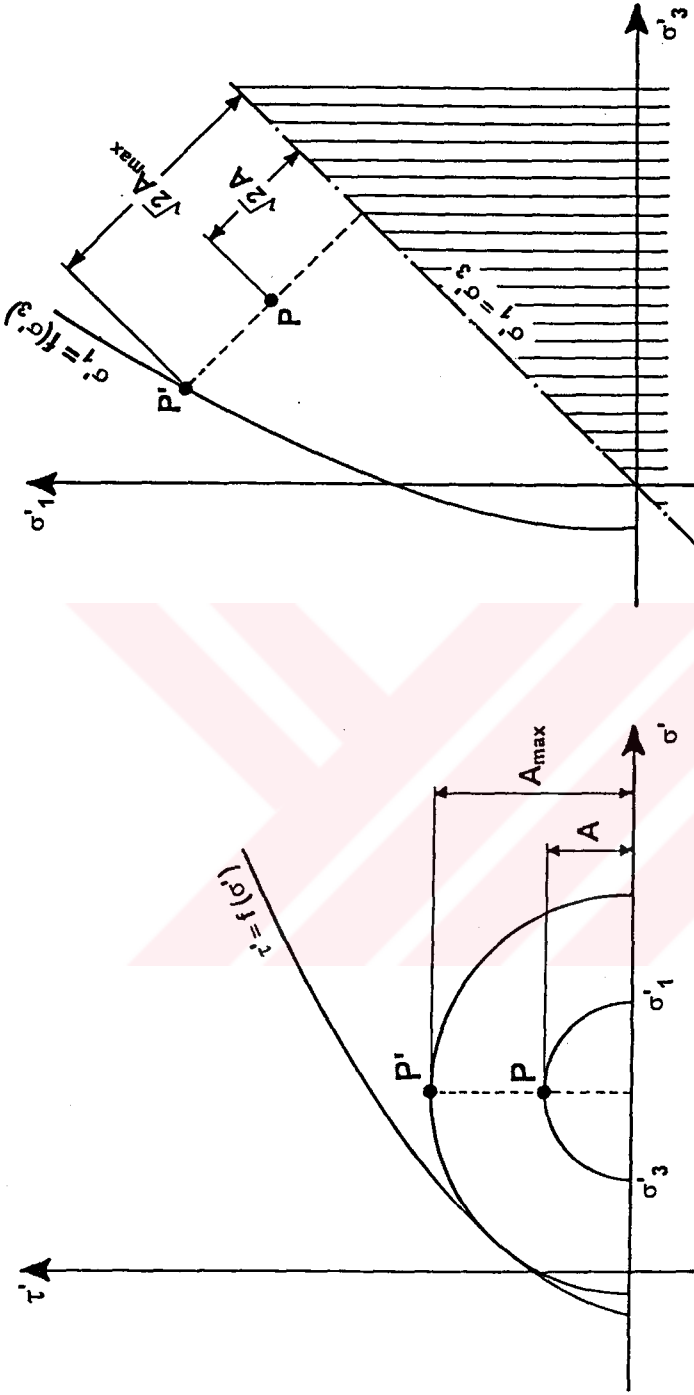
$$(GK)_T = \sigma_{tm} / \sigma_3' \quad (A.6.a)$$

olmaktadır. Öte yandan; $\sigma_3' > \sigma_{tm}$ olduğu zaman da kayanın kayma ya da kesme yenilmesine uğrayacağı varsayılmıştır. Buna göre, bir noktadaki "kayma" ya da "kesme" ye karşı güvenlik katsayısı veya dayanım katsayısı ($\alpha = 0.5$ için) da,

$$(GK)_s = 0.25 \{ -m_b \sigma_{ci} + [(m_b \sigma_{ci})^2 + 8 m_b \sigma_{ci} (\sigma_1' + \sigma_3') + 16 s \sigma_{ci}^2]^{1/2} \} / (\sigma_1' - \sigma_3') \quad (A.6.b)$$

ile verilmektedir (Geniş 1995; Gerçek ve Geniş, 1998). Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılarak belirlenen dayanım katsayısının $\tau' - \sigma'$ ve $\sigma_1' - \sigma_3'$ uzaylarında gösterimi Şekil A.3'te verilmiştir. A.6.b eşitliğı ile verilen dayanım katsayısı A_{max}/A 'ya eşittir. Söz konusu dayanım katsayısına göre; bir noktanın etkiyen gerilme durumundan yenilme durumuna geçişte izlediğı rotası (stress path), P noktasından P' noktasına doğru olmaktadır (Şekil A.3). Noktanın gerilmeler uzayında izlediğı varsayılan bu rotanın, açıklık yüzeyi çevresindeki durumu daha gerçekçi olarak temsil ettiğı ileri sürölmektedir (Diederichs and McCreath, 1994).

Hoek-Brown yenilme ölçütünün gelişimi ile ilgili detaylı bilgiler için Gerçek (1996) ve Ulusay ve Sönmez (2002)'e başvurulabilir.



$$\text{Dayanım Katsayısı} = A_{\max} / A$$

Şekil A.3 Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre tanımlanan dayanım katsayısının $\tau - \sigma'$ ve $\sigma'_1 - \sigma'_3$ uzaylarında gösterimi (Diederichs and McCreath'den [1994] değiştirilerek).

EK AÇIKLAMALAR B

MOHR-COULOMB YENİLME ÖLÇÜTÜ

Coulomb (1776), kesme gerilmesinin yol açacağı bir kırılmaya malzemenin kohezyonu ve olası kırılma yüzeyine etkiyen normal gerilmenin bir sabitle karşı koyacağını belirtmiştir (Gerçek, 1991);

$$\tau' = c_m + \sigma' \tan \phi \quad (B.1)$$

Burada, τ' , etkin kayma gerilmesi; σ' , etkin gerilme, c_m , kaya kütlelerinin kohezyonu ϕ ise kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısıdır. Farklı yanal gerilme değerleri için kaya kütlelerinde yenilme oluşması için gerekli eksenel gerilme değeri Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre şu şekilde ifade edilmektedir (Jaeger and Cook, 1968).

$$\sigma_1' = \sigma_{cm} + N_\phi \sigma_3' \quad (B.2)$$

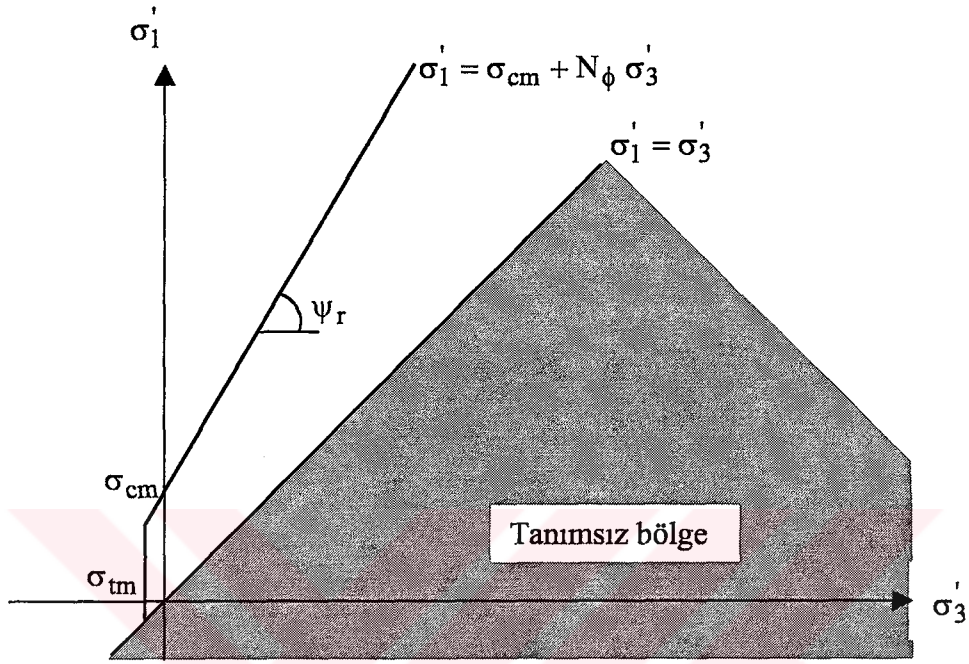
Burada; σ_1' ve σ_3' , sırasıyla, en büyük ve en küçük asal etkin gerilmeler; σ_{cm} , kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımıdır. N_ϕ ise,

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (B.3)$$

dir. Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmaktadır.

$$\sigma_{cm} = \frac{2 c_m \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (B.4)$$

Mohr-Coulomb yenilme ölçütünün asal gerilmeler uzayındaki şekli Şekil B.1'de verilmiştir.



Şekil B.1 Mohr-Coulomb yenilme ölçütünün asal gerilmeler uzayında tanımlanması.

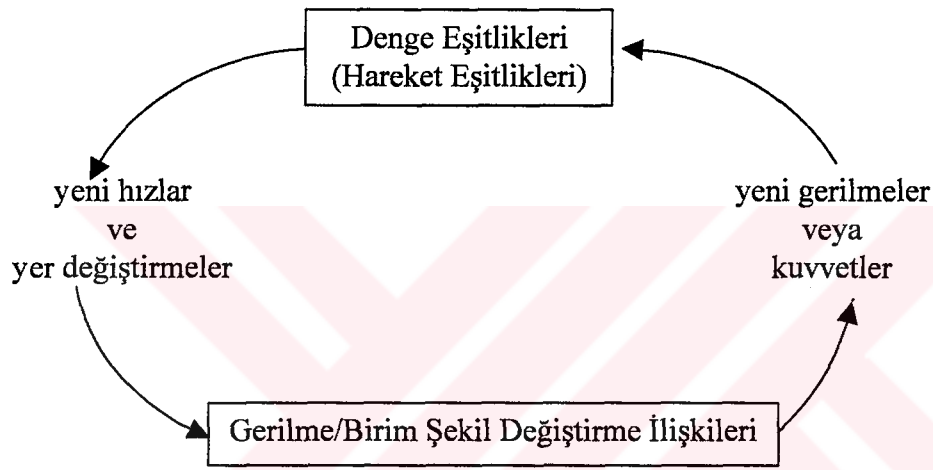
EK AÇIKLAMALAR C

FLAC^{2D} PROGRAMININ TANITILMASI

FLAC^{2D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua), sonlu farklar yöntemini kullanan iki boyutlu mühendislik mekaniği problemlerinin modellendiği bir paket programdır. Tez çalışmasında FLAC^{2D} programının 3.30 sürümü kullanılmıştır. Bu programın üç boyutlu çözümleri yapabilen sürümü (FLAC^{3D}) de mevcuttur. FLAC^{2D} ilk olarak, jeoteknik ve maden mühendisliği problemleri için geliştirilmiştir. Daha sonra inşaat ve makine mühendisliği disiplininin çok geniş alanlarında da bir tasarım aracı olmuştur. Açıklığın (yapının) çevrelediği ortam, açıklığın şekli ile uyumlu olacak şekilde, kullanıcı tarafından oluşturulan sonlu farklar ağındaki elemanlar ile temsil edilmektedir. Her bir eleman, uygulanan kuvvetlere veya yüzey sınırlandırmalarına göre tanımlanan doğrusal veya doğrusal olmayan gerilme-birim şekil değiştirme kuralına bağlı davranmaktadır (Itasca, 1995).

Sonlu farklar yöntemi, birbirine bağlantılı bir çok elemandan oluşan sürekli ortam olarak modellenmektedir. FLAC^{2D} programında oluşturulan genel hesaplama aşaması Şekil C.1'de gösterilmiştir. Bu işlemde önce, gerilmeler veya kuvvetlerden yeni yerdeğiştirme ve hızları elde etmek için hareket eşitlikleri kullanılmaktadır. Sonra, hızlardan birim şekil değiştirme hızları ve birim şekil değiştirme hızlarından yeni gerilmeler hesaplanmaktadır. Çevrim etrafındaki her döngü bir zaman adımını almaktadır. Her bir düğüm noktasında hareket eşitliğinin çözümü zamana bağlı olarak her hareket için tekrarlanmaktadır (Itasca, 1995).

Açık (kesin) çözüm yönteminde zaman adımı küçük olmaktadır. Bu durum statik çözümler için diğer yöntemlere göre çözümleme zamanını arttırabilmektedir. Matris çözümüne gereksinim olmadığından dolayı hafıza gereksinimini en aza indirmektedir. Ayrıca büyük yerdeğiştirme ve birim şekil değiştirme çözümleri kolaylıkla yapılabilir. Her bir zaman adımında oluşan



Şekil C.1 Temel açık (kesin) hesaplama döngüsü (Itasca, 1995).

yerdeğiştirme miktarı koordinatlara ilave edilmektedir. Böylece ağ, kendisini temsil eden malzeme ile hareket etmekte ve şekil değiştirmektedir. Bu “Langrangian” formülü olarak adlandırılmaktadır. Tersine, “Eulerian” formülünde, malzeme sabit bir ağa göre hareket etmektedir. Her bir düğüm noktasındaki hareket eşitliğinin çözümü zamana bağlı olarak tekrarlanmaktadır. Modelin zamana bağlı davranışını görmek mümkün olmaktadır (Itasca, 1995).

FLAC^{2D} programında “FLACish (Fish)” olarak adlandırılan, kullanıcıya yeni değişken ve fonksiyonları tanımlamaya olanak sağlayan bir programlama dili de sunulmuştur. FLAC^{2D}, aşağıda sıralanan özel bazı sečeneklere de sahiptir (Itasca, 1995):

1. Kayma ve/veya ayrılma oluşabilecek belirgin düzlemlerin modellemesini yapabilmek için ara yüzey elemanları,
2. yeraltı suyu ve konsolidasyon modelleri,
3. düzlem birim şekil değiştirme (plane strain), düzlem gerilme (plane stress) ve eksenel simetri (axisymmetric) problem türleri,
4. yapısal tahkimat elemanları (tünel kaplaması veya kaya saplamaları gibi) için yapısal eleman modelleri,
5. tam dinamik analiz,
6. visko-elastik (sünme) modelleri,
7. ısı modelleri.

EK AÇIKLAMALAR D

SONLU FARKLAR AĞI İÇİN OLUŞTURULAN FISH İŞLEVLERİ

Sonlu farklar ağının elde edilmesi için FLAC^{2D} programı içerisinde tanımlanabilen "Fish işlevi" oluşturulmuştur. Statik ve dinamik çözümlemelerdeki farklı açıklık geometrileri için ayrı ayrı Fish işlevleri geliştirilmiştir.

Açıklığın ve çevresindeki sonlu farklar ağının oluşturulmasında aşağıda verilen parametrik eşitlikler kullanılarak, z-düzleminde, açıklık yüzeyi ile uyumlu eğrisel-dikey koordinat ağları elde edilmiştir. Elips, ovaloid ve dikdörtgen açıklık geometrileri için bu eşitlikler

$$x = (c_1 \rho' + 1/\rho') \cos \theta + c_3 \rho'^3 \cos 3\theta + c_5 \rho'^5 \cos 5\theta + c_7 \rho'^7 \cos 7\theta \quad (D.1.a)$$

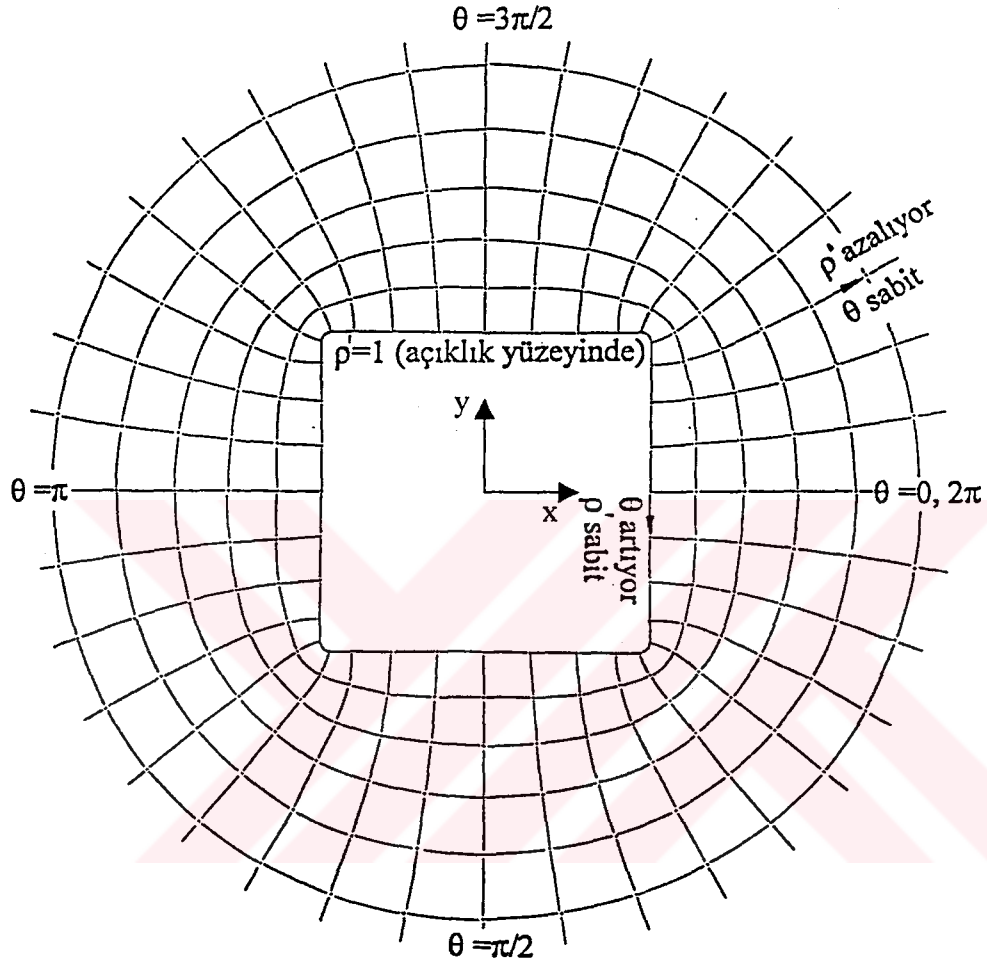
$$y = (c_1 \rho' - 1/\rho') \sin \theta + c_3 \rho'^3 \sin 3\theta + c_5 \rho'^5 \sin 5\theta + c_7 \rho'^7 \sin 7\theta \quad (D.1.b)$$

şeklinde verilmektedir (Gerçek, 1993). Kemer tavanlı açıklık geometrileri için ise eşitlikler

$$x = (1/\rho') \cos \theta - b_1 \rho' \sin \theta + a_2 \rho'^2 (\cos 2\theta - \sin 2\theta) + a_3 \rho'^3 \cos 3\theta \quad (D.1.c)$$

$$y = (-1/\rho') \sin \theta + b_1 \rho' \cos \theta + a_2 \rho'^2 (\cos 2\theta + \sin 2\theta) + a_3 \rho'^3 \sin 3\theta \quad (D.1.d)$$

şeklindedir (Gerçek, 1997). Burada ρ' , açıklık yüzeyine paralel koordinat bileşeni; θ da açıklık yüzeyine dik koordinat bileşeni olup $c_1, c_3, c_5, c_7, b_1, a_2$ ve a_3 açıklık geometrisini belirleyen katsayılarıdır. Elips, ovaloid ve dikdörtgen açıklık için bu katsayılar, W/H oranı ile hesaplanabilmektedir. Bu konu ile ilgili detaylı bilgiler Gerçek (1993, 1997) ve Geniş'ten (1995) elde edilebilir. Açıklık yüzeyinin koordinatlarını elde etmek için $\rho'=1$ alınmalıdır. Açıklıktan uzaklaştıkça ρ' azalmaktadır (Şekil D.1). Statik çözümlemelerde elips, ovaloid ve dikdörtgen geometrilerin, yatay ve düşey simetrileri bulunduğu dörtte biri; kemer tavanlı geometrilerin yalnızca düşey simetrileri bulunduğu yarı için sonlu farklar



Şekil D.1 ρ' ve θ değiştirgelerinin tanımlanması.

ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan Fish işlevlerine ilişkin özellikler Çizelge D.1’de sunulmuştur.

Çizelge D.1 Sonlu farklar ağı için geliştirilen Fish işlevleri.

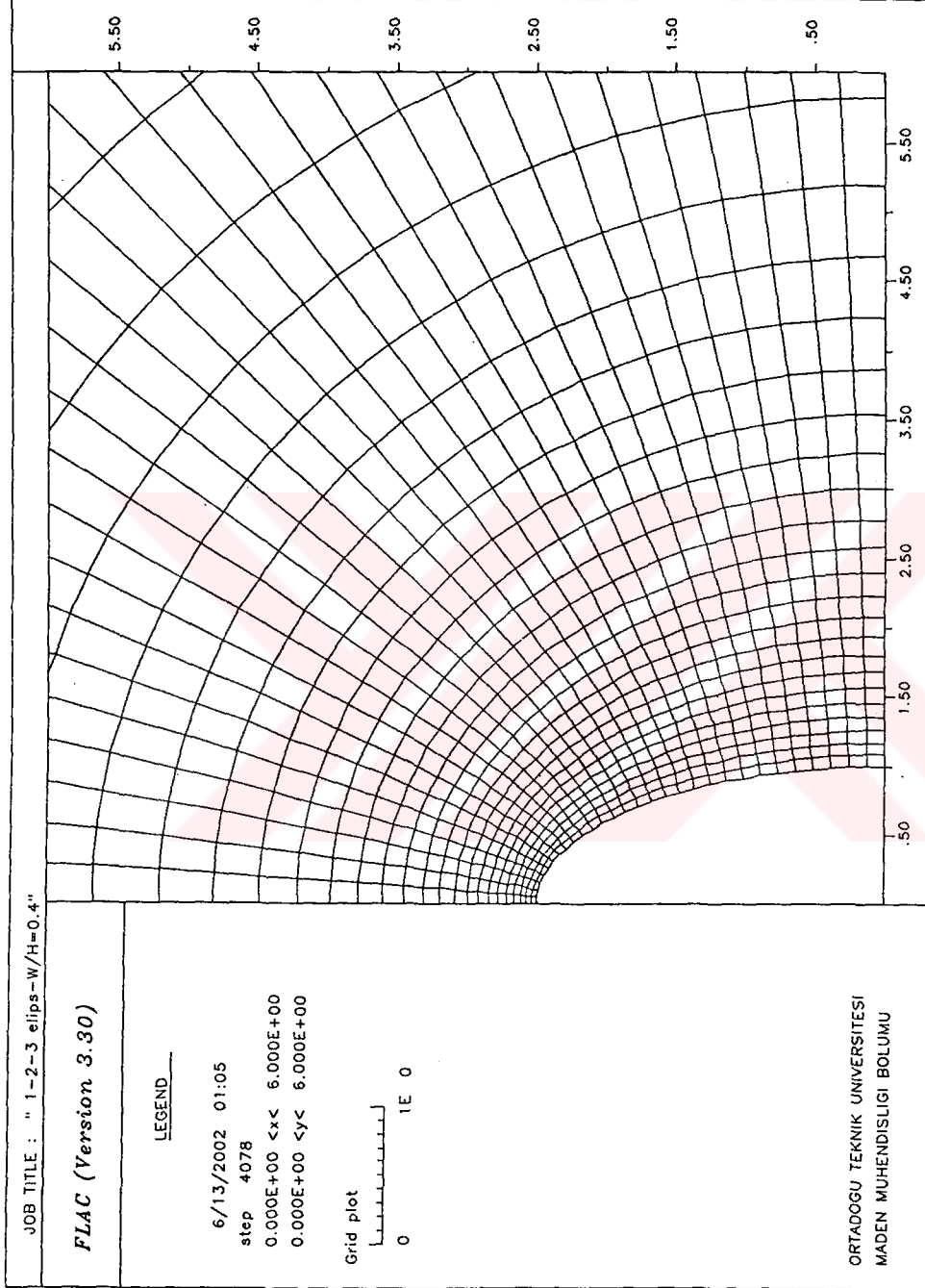
Dosya adı	Açıklama	Girdi Değiştiricileri	
ELIPS.FIS	Dörtte bir elips açıklık ağı	WH AZ	Genişlik yükseklik oranı Artış
OVAL.FIS	Dörtte bir ovaloid açıklık ağı		
RECT.FIS	Dörtte bir dikdörtgen açıklık ağı		
ARCH_LEF.FIS	Yarım kemer tavanlı açıklık ağı	B1 A2 A5 AZ	b ₁ a ₂ a ₃ Artış
KTDYN.FIS	Dinamik çözümleme için model sınırının yatay ve düşey doğrultuda doğru olduğu, kemer tavanlı açıklık ağı. Bu işlev, kemer tavanlı açıklığın tanımlandığı fish ile HOLE.FIS dosyalarının birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.	B1 A2 A5 AZ RMIN RMUL RATIO	b ₁ a ₂ a ₃ Artış Ortalama açıklık yarıçapı Açıklığın orta noktasından model sınırına olan uzaklığının, ortalama açıklık yarıçapına oranı Artış
KTEDYN:FIS	Dinamik çözümleme için kullanılan kemer tavanlı açıklığa sismik dalganın 45° açı yapacak şekilde etkimesi için oluşturulmuştur.		

Çözümlemelerde kullanılan kemer tavanlı açıklık geometrileri için açıklık geometrisini belirleyen katsayılar Çizelge D.2’de verilmiştir.

Çizelge D.2 Kemer tavanlı açıklık için geometriyi tanımlamak için kullanılan değiştirgeler

b_1	a_2	a_3	W/H
-0.430	0.045	0.085	0.40
-0.270	0.060	0.090	0.60
-0.135	0.070	0.085	0.80
-0.020	0.065	0.080	1.00
0.090	0.070	0.060	1.25
0.180	0.080	0.045	1.50
0.230	0.070	0.050	1.67
0.315	0.090	0.025	2.00
0.420	0.070	0.020	2.50
0.490	0.065	0.020	3.00

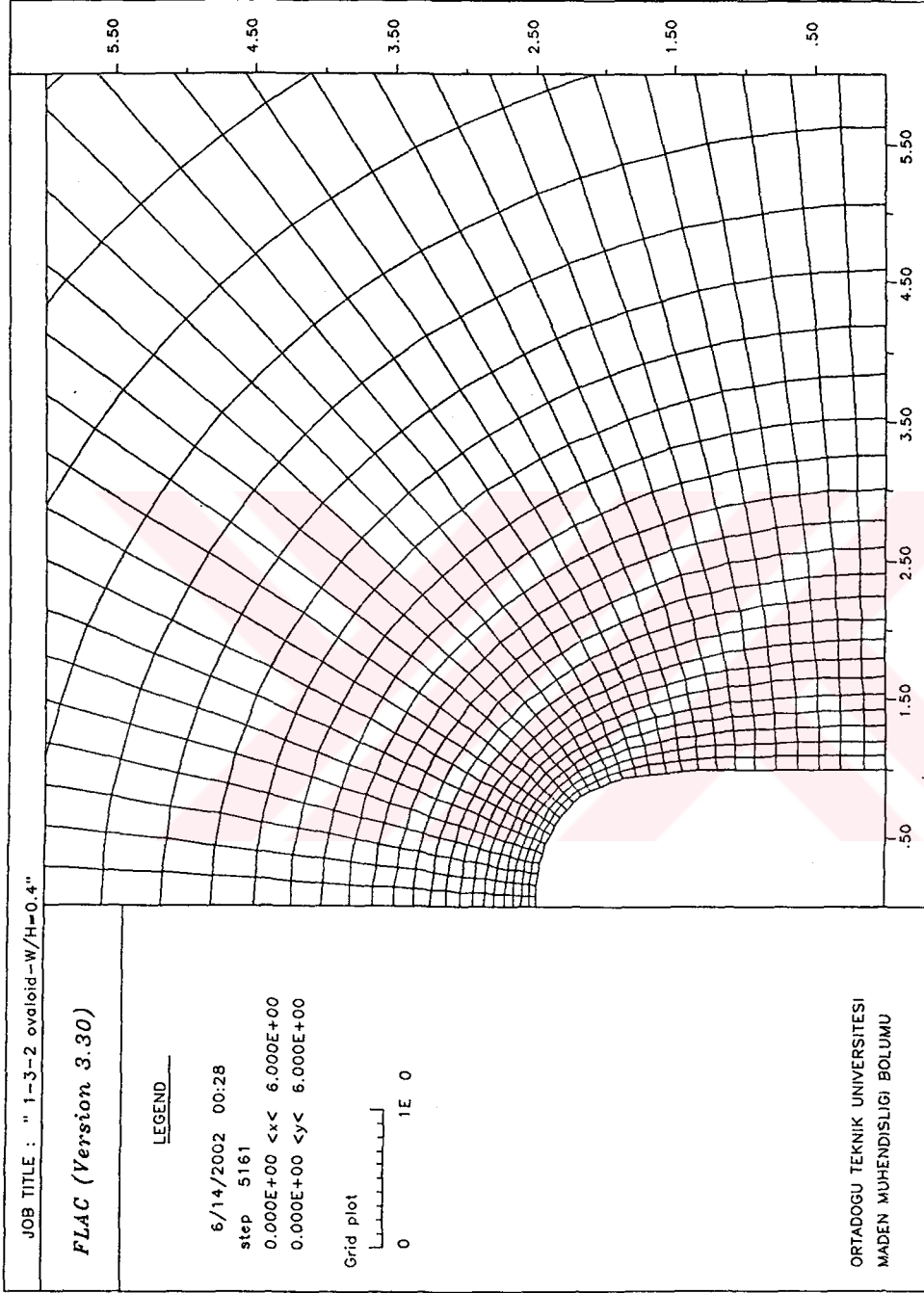
Dairesel açıklık geometrisi elde etmek için ELIPS.FIS ya da OVAL.FIS işlevleri; kare açıklık geometrisi için de RECT.FIS kullanılarak, WH=1 alınmalıdır. Sonlu farklar ağının oluşturulması amacıyla geliştirilen Fish işlevleri aşağıda verilmiştir. Ayrıca, statik ve dinamik çözümlemelerde kullanılan elips, ovaloid, dikdörtgen ve kemer tavanlı açıklık geometrileri için elde edilen sonlu farklar ağıları Şekil D.2-Şekil D.7’de ve Fish işlevleri ise Çizelge D.3-D.8’de verilmiştir.



Şekil D.2 Statik çözümleme için elips açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı ($W/H=0.4$).

Çizelge D.3 Dörtte bir simetrik elips açıklık için geliştirilen Fish işlevi.

```
; Çeyrek simetrik ELIPS ağı 11.02.1998 "ELIPS.FIS"
; WH ve AZ değişkenler
; WH = Açıklığın genişlik/yükseklik oranı
; AZ = Açıklığa paralel meshi tanımlayan değişken
; Not: Uygun ağ oluşturmak için;
;   1. grid sayılarını eşit alınız
;   2. AZ'yi hesaplamak için: i yönündeki grid sayısının bir fazlası olan
;      sayının tersini alın ve bulduğunuz rakamı aşağıdaki şekilde yuvarlatın:
;      0.049 - 0.05 gibi
;      0.0909 - 0.09 gibi
;      0.1666 - 0.17 gibi
;
def elips
d1=(wh-1.)/(wh+1)
d3=0
d5=0
d7=0
ro=1.+az
az2=pi/2/(jgp-1)
loop i (1,jgp)
  if i<=jgp-3 then
    ro=ro-az
  else
    ro=ro-az/1.5
  endif
  t=2*pi+az2
  loop j (1,jgp)
    t=t-az2
xxx=(d1*ro+1./ro)*cos(t)+d3*ro^3*cos(3.*t)+d5*ro^5*cos(5.*t)+d7*ro^7*
cos(7.*t)
yyy=(d1*ro-1./ro)*sin(t)+d3*ro^3*sin(3.*t)+d5*ro^5*sin(5.*t)+d7*ro^7*
sin(7.*t)
    if i=1 then
      if j=1 then
        sof=1./xxx
      end_if
    end_if
    x(i,j)=sof*xxx
    y(i,j)=sof*yyy
  end_loop
end_loop
end
return
```



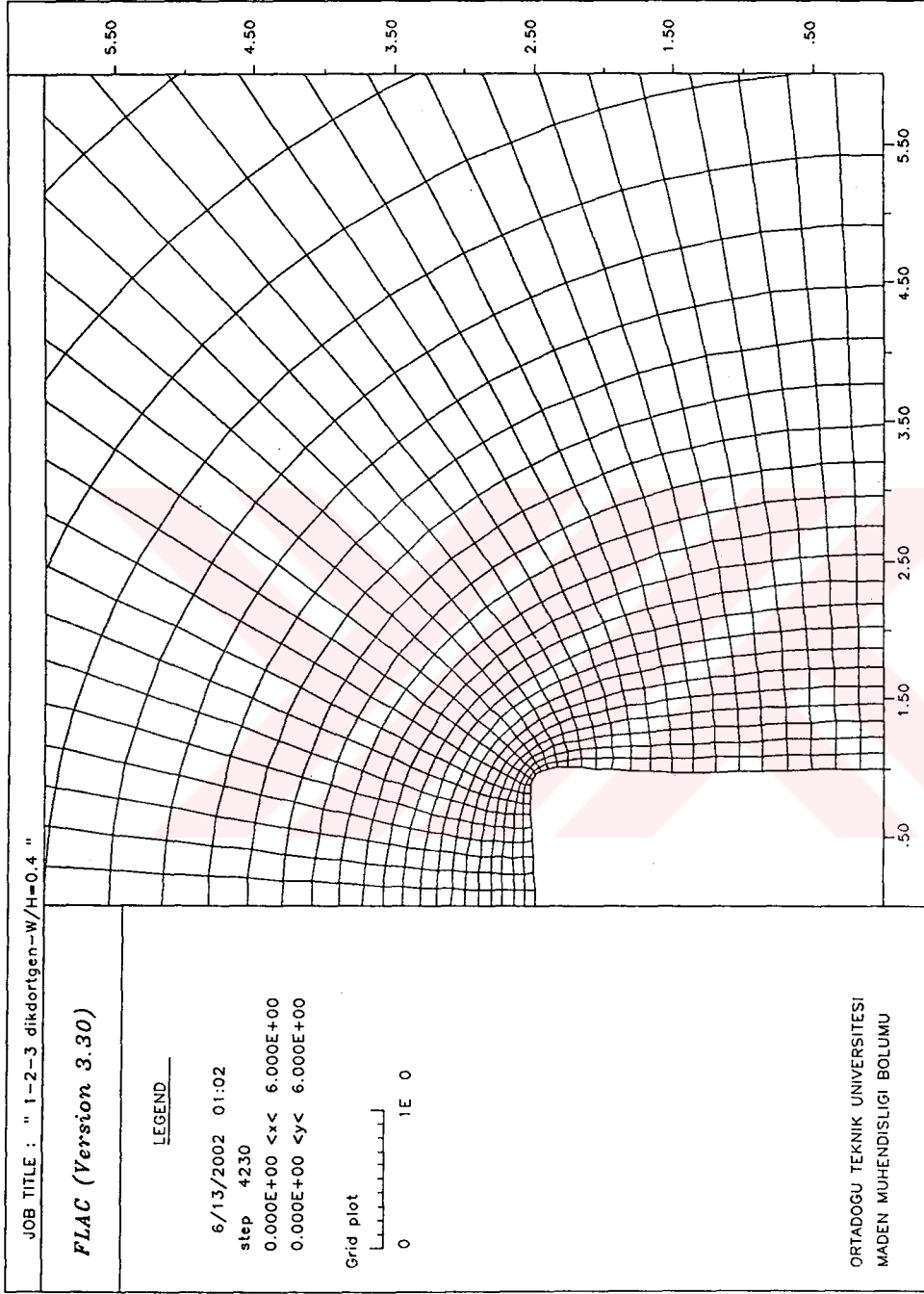
Şekil D.3 Statik çözümleme için ovaloid açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı ($W/H=0.4$).

Çizelge D.4 Dörtte bir simetrik ovaloid açıklık için geliştirilen Fish işlevi.

```
; Çeyrek simetrik OVALOİD ağı 11.02.1998 "OVAL.FIS"
; WH ve AZ değişkenler
; WH = Açıklığın genişlik/yükseklik oranı
; AZ = Açıklığa paralel meshi tanımlayan değişken
; Not: Uygun ağ oluşturmak için;
;   1. grid sayılarını eşit alınız
;   2. AZ'yi hesaplamak için: i yönündeki grid sayısının bir fazlası olan
;       sayının tersini alın ve bulduğunuz rakamı aşağıdaki şekilde yuvarlatın:
;       0.049 - 0.05 gibi
;       0.0909 - 0.09 gibi
;       0.1666 - 0.17 gibi
;
def oval
if WH<1. then
    WH1=1./WH
else
    WH1=WH
end_if
if WH1<4.1 then
    RU=.02*WH1^2-.164*WH1+.145
else
    RU=-.191
end_if
IF WH=1. then
    RU=0.
end_if
if WH>=1. then
    P=WH1-RU
    QU=1.-RU
else
    P=1.-RU
    QU=WH1-RU
end_if
d1=(P-QU)/(P+QU)
d3=2.*RU/(P+QU)
d5=0.
d7=0.
ro=1.+az
az2=pi/2/(jgp-1)
loop i (1,igp)
    if i<=igp-3 then
        ro=ro-az
```


Çizelge D.4 (devam ediyor).

```
else
    ro=ro-az/1.5
endif
t=2*pi+az2
loop j (1,jgp)
    t=t-az2
    xxx=(d1*ro+1./ro)*cos(t)+d3*ro^3*cos(3.*t)+d5*ro^5*cos(5.*t)+d7*ro^7*
    cos(7.*t)
    yyy=(d1*ro-1./ro)*sin(t)+d3*ro^3*sin(3.*t)+d5*ro^5*sin(5.*t)+d7*ro^7*
    sin(7.*t)
    if i=1 then
        if j=1 then
            sof=1./xxx
        end_if
    end_if
    x(i,j)=sof*xxx
    y(i,j)=sof*yyy
end_loop
end_loop
end
return
```



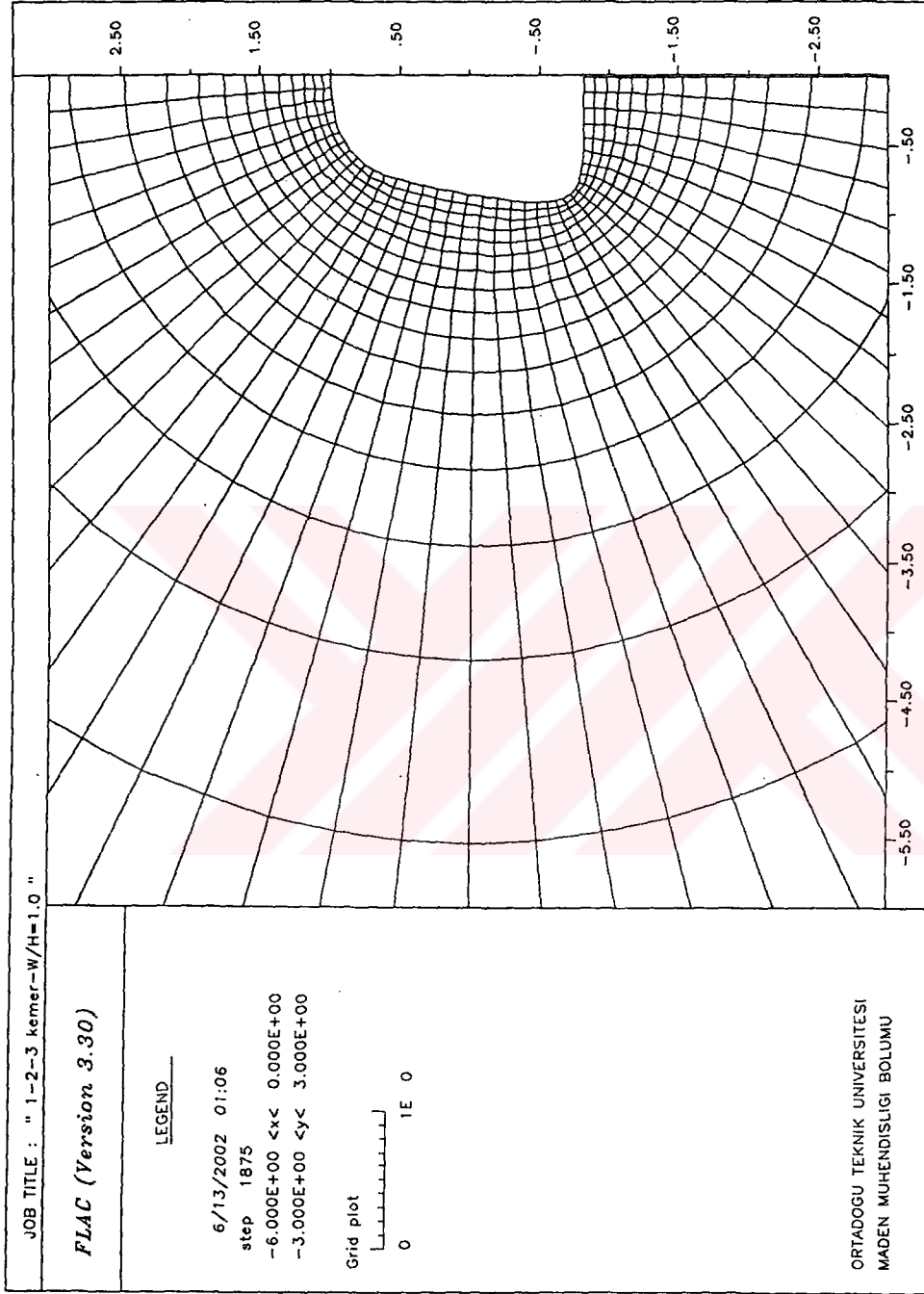
Şekil D.4 Statik çözümleme için dikdörtgen açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı ($W/H=0.4$).

Çizelge D.5 Dörtte bir simetrik dikdörtgen açıklık için geliştirilen Fish işlevi.

```
; Çeyrek simetrik DİKDÖRTGEN ağı 11.02.1998 "RECT.FIS"
; WH ve AZ değişkenler
; WH = Açıklığın genişlik/yükseklik oranı
; AZ = Açıklığa paralel meshi tanımlayan değişken
; Not:Uygun ağ oluşturmak için;
; 1. grid sayılarını eşit alınız
; 2. AZ'yi hesaplamak için: i yönündeki grid sayısının bir fazlası olan
; sayının tersini alın ve bulduğunuz rakamı aşağıdaki şekilde yuvarlatın:
; 0.049 - 0.05 gibi
; 0.0909 - 0.09 gibi
; 0.1666 - 0.17 gibi
;def rect
if WH=1 then
  LA=.25
  d1=COS(2.*LA*PI)
  d3=(d1^2-1.)/6.
  d5=d1*(d1^2-1.)/10.
  d7=(5.*d1^2-1.)*(d1^2-1.)/56.
else
  DD=1./3
  if WH>=1. then
    WH1=WH
  else
    WH1=1./WH
  end_if
  P3=1.12*(1.+WH1)/(1.-WH1)
  P2=2/3.
  P1=9.*P3
  P0=143./15
  Q2=-P2
  Q1=P1*P3-P0*4.
  Q0=4.*P2*P0-P1^2-P3^2*P0
  R1=(3.*Q1-Q2^2)/9.
  R2=(9.*Q1*Q2-27.*Q0-2.*Q2^3)/54.
  U101=R2+SQRT(R1^3+R2^2)
  U102=R2-SQRT(R1^3+R2^2)
  if U101>0. then
    K1=1.
  else
    K1=-1.
  end_if
  IF U102>0. THEN
    K2=1.
```

Çizelge D.5 (devam ediyor).

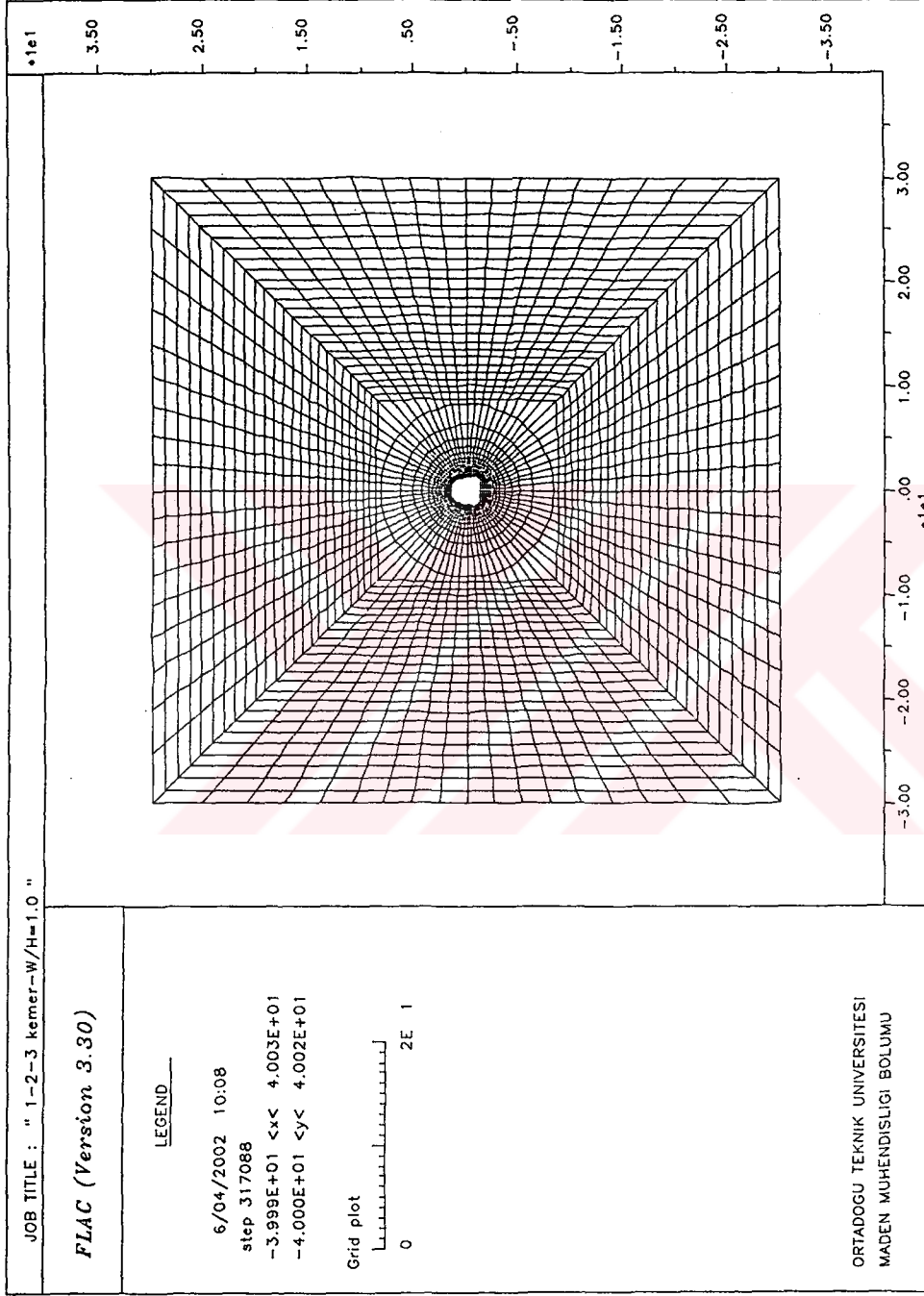
```
else
    K2=-1.
end_if
U11=K1*(ABS(U101))^DD+K2*(ABS(U102))^DD-Q2/3.
S1=SQRT(P3^2/4.+U11-P2)
S2=SQRT(U11^2/4.-P0)
d1=-(P3/2.-S1+SQRT((P3/2.-S1)^2-4.*(U11/2.-S2)))/2.
if WH>=1. then
    d3=(d1^2-1.)/6.
    d5=d1*(d1^2-1.)/10.
    d7=(5.*d1^2-1.)*(d1^2-1.)/56.
else
    LA=ATAN(SQRT(1.-d1^2)/d1)/2./PI
    LA=.5-LA
    d1=COS(2.*LA*PI)
    d3=(d1^2-1.)/6.
    d5=d1*(d1^2-1.)/10.
    d7=(5.*d1^2-1.)*(d1^2-1.)/56.
end_if
end_if
ro=1.+az
az2=pi/2/(jgp-1)
loop i (1,igp)
    if i<=igp-3 then
        ro=ro-az
    else
        ro=ro-az/1.5
    endif
    t=2*pi+az2
    loop j (1,jgp)
        t=t-az2
        xxx=(d1*ro+1./ro)*cos(t)+d3*ro^3*cos(3.*t)+d5*ro^5*cos(5.*t)+d7*ro^7*cos(7.*t)
        yyy=(d1*ro-1./ro)*sin(t)+d3*ro^3*sin(3.*t)+d5*ro^5*sin(5.*t)+d7*ro^7*sin(7.*t)
        if i=1 then
            if j=1 then
                sof=1./xxx
            end_if
        end_if
        x(i,j)=sof*xxx
        y(i,j)=sof*yyy
    end_loop
end_loop
end
return
```



Şekil D.5 Statik çözümleme için kemer tavanlı açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı ($W/H=1$).

Çizelge D.6 Yarım simetrik kemer tavanlı açıklık için geliştirilen Fish işlevi.

```
; KEMER TAVANLI açıklığın sol yarım ağı 15.04.1998 "ARCH_LEF.FIS"
; b1, a2 ve a3 (a5) değişkenler
; b1,a2,a3 = Açıklığın şeklini kontrol eden katsayılar (Bkz. Gerçek,1997)
; AZ = Açıklığa paralel meshi tanımlayan değişken
;
def gercek
nnn=0
nm=1.7
ro=1.+az
az2=pi/(jgp-1)
loop i (1,jgp)
  if i<=jgp-4 then
    ro=ro-az
  else
    nnn=nnn+.8
    ro=ro-az/(nm*nnn)
  endif
  t=-3.*pi/4.+az2
  loop j (1,jgp)
    t=t-az2
    xxx=(b1*ro+1./ro)*(cos(t)-sin(t))+2*a2*ro^2*cos(2*t)+
    a5*ro^3*(sin(3*t)+cos(3*t))
    yyy=(b1*ro-1./ro)*(cos(t)+sin(t))+2*a2*ro^2*sin(2*t)+
    a5*ro^3*(sin(3*t)-cos(3*t))
    if i=1 then
      if j=1 then
        sof=1./yyy
      end_if
    end_if
    x(i,j)=sof*xxx
    y(i,j)=sof*yyy
  end_loop
end_loop
end
return
```



Şekil D.6 Dinamik çözümleme için kemer tavanlı açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı ($W/H=1$).

Çizelge D.7 Dinamik çözümlemelerde, kemer tavanlı açıklık için geliştirilen Fish işlevi.

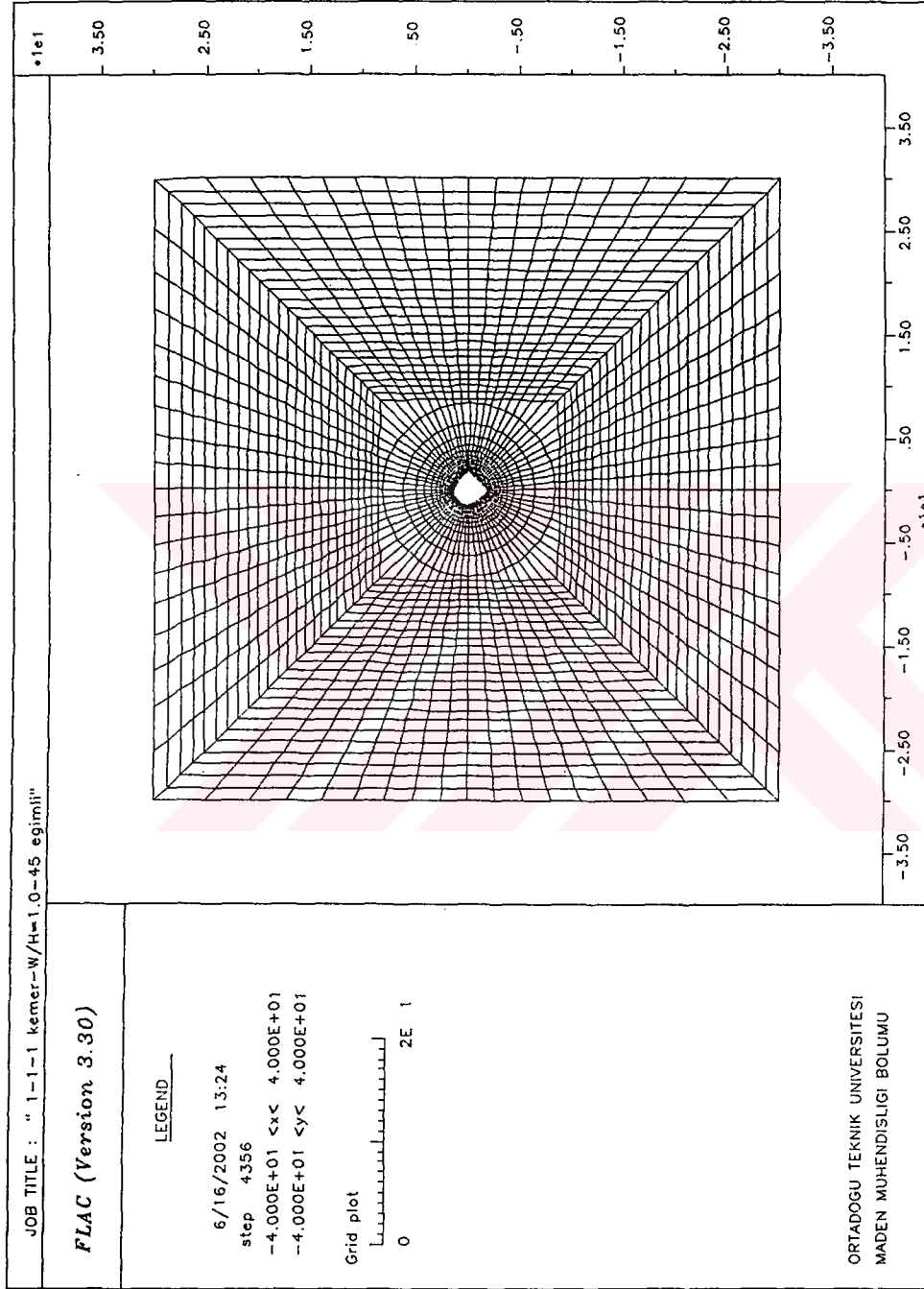
```
; KEMER TAVANLI açıklığın ağı (dinamik) 11.01.99 "KTDYN.FIS"
; b1, a2 ve a3 (a5) değişkenler
; b1,a2,a3 = Açıklığın şeklini kontrol eden katsayılar (Bkz. Gerçek,1997)
; AZ = Açıklığa paralel meshi tanımlayan değişken
;
def gercek
figp=igp
fjgp=jgp
nnn=0
nn=1.7
ro=1.+az
az2=2*pi/(jgp-1)
loop i (1,igp-25)
  if i<=igp-4 then
    ro=ro-az
  else
    nnn=nnn+.8
    ro=ro-az/(nn*nnn)
  endif
  t=-3.*pi/4.+az2
  loop j (1,jgp)
    t=t-az2
    xxx=(b1*ro+1./ro)*(cos(t)-
sin(t))+2*a2*ro^2*cos(2*t)+a5*ro^3*(sin(3*t)+cos(3*t))
    yyy=(b1*ro-1./ro)*(cos(t)+sin(t))+2*a2*ro^2*sin(2*t)+a5*ro^3*(sin(3*t)-
cos(3*t))
    if i=1 then
      if j=1 then
        sof=1.5/yyy
      end_if
    end_if
    x(i,j)=sof*xxx
    y(i,j)=sof*yyy
  end_loop
end_loop
; HOLE.FIS
; her ağ noktası is ALFA and RO kutupsal koordinatlar ile tanımlanmıştır
; RMAXIT = Her ALFA değeri için açıklık merkezinden olan en büyük
uzaklık
; RMIN = ortalama açıklık yarıçapı
; RATIO = artış
;
loop i (igp-24,igp)
```


Çizelge D.7 (devam ediyor).

```
loop j (1,jgp)
  alfa=(j-1)*2*pi/(jgp-1)
  if alfa >= 0*pi then
    if alfa < .25*pi then
      rmaxit=rmin*rmul/cos(alfa)
      aa=1
    end_if
  end_if
  if alfa >= .25*pi then
    if alfa < .5*pi then
      rmaxit=rmin*rmul/sin(alfa)
      aa=1
    end_if
  end_if
  if alfa >= .5*pi then
    if alfa < .75*pi then
      rmaxit=rmin*rmul/sin(pi-alfa)
      aa=2
    end_if
  end_if
  if alfa >= .75*pi then
    if alfa < pi then
      rmaxit=rmin*rmul/cos(pi-alfa)
      aa=2
    end_if
  end_if
  if alfa >= pi then
    if alfa < 1.25*pi then
      rmaxit=rmin*rmul/cos(alfa-pi)
      aa=3
    end_if
  end_if
  if alfa >= 1.25*pi then
    if alfa < 1.5*pi then
      rmaxit=rmin*rmul/sin(alfa-pi)
      aa=3
    end_if
  end_if
  if alfa >= 1.5*pi then
    if alfa < 1.75*pi then
      rmaxit=rmin*rmul/cos(alfa-1.5*pi)
      aa=4
    end_if
  end_if
```

Çizelge D.7 (devam ediyor).

```
end_if
if alfa >= 1.75*pi then
    rmaxit=rmin*rmul/sin(alfa-1.5*pi)
    aa=4
endif
;-----
if aa=1 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=-ro*sin(alfa)
    y(i,j)=ro*cos(alfa)
end_if
if aa=2 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=-ro*sin(pi-alfa)
    y(i,j)=-ro*cos(pi-alfa)
end_if
if aa=3 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=ro*sin(alfa-pi)
    y(i,j)=-ro*cos(alfa-pi)
end_if
if aa=4 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=ro*cos(alfa-1.5*pi)
    y(i,j)=ro*sin(alfa-1.5*pi)
end_if
end_loop
end_loop
command
    attach aside from 1,1 to figp,1 bside from 1, fjgp to figp,fjgp
end_command
end
return
```



Şekil D.7 Dinamik çözümlemelerde sismik dalganın 45° etkidiği durumlar için kemer tavanlı açıklık geometrisine ait sonlu farklar ağı (W/H=1).

Çizelge D.8 Dinamik çözümlemelerde dalga yayılma yönünün 45° olması durumunda, kemer tavanlı açıklık için geliştirilen Fish işlevi.

```
; KEMER TAVANLI açıklık (dinamik) eğimli 25.02.02 "KTEDYN.FIS"
; b1, a2 ve a3 (a5) değişkenler
; b1,a2,a3 = Açıklığın şeklini kontrol eden katsayılar (Bkz. Gerçek,1997)
; AZ = Açıklığa paralel meshi tanımlayan değişken
;
def gercek
figp=igp
fjgp=jgp
nnn=0
nn=1.7
ro=1.+az
az2=2*pi/(jgp-1)
loop i (1,igp-25)
  if i<=igp-4 then
    ro=ro-az
  else
    nnn=nnn+.8
    ro=ro-az/(nn*nnn)
  endif
  t=-3.*pi/4.+az2
  loop j (1,jgp)
    t=t-az2
xxx=1./ro*cos(t)-b1*ro*sin(t)+a2*ro^2*(cos(2*t)-sin(2*t))+a5*ro^3*cos(3*t)
yyy=-
1./ro*sin(t)+b1*ro*cos(t)+a2*ro^2*(cos(2*t)+sin(2*t))+a5*ro^3*sin(3*t)
    if i=1 then
      if j=1 then
        sof=1.061/yyy
      end_if
    end_if
    x(i,j)=sof*xxx
    y(i,j)=sof*yyy
  end_loop
end_loop
; HOLE.FIS
; her ağ noktası is ALFA and RO kutupsal koordinatlar ile tanımlanmıştır
; RMAXIT = Her ALFA değeri için açıklık merkezinden olan en büyük
uzaklık
; RMIN = ortalama açıklık yarıçapı
; RATIO = artış
;
loop i (igp-24,igp)
  loop j (1,jgp)
```

Çizelge D.8 (devam ediyor).

```
alfa=(j-1)*2*pi/(jgp-1)
if alfa >= 0*pi then
  if alfa < .25*pi then
    rmaxit=rmin*rmul/cos(.25*pi-alfa)
    aa=1
  end_if
end_if
if alfa >= .25*pi then
  if alfa < .5*pi then
    rmaxit=rmin*rmul/cos(alfa-.25*pi)
    aa=2
  end_if
end_if
if alfa >= .5*pi then
  if alfa < .75*pi then
    rmaxit=rmin*rmul/cos(.75*pi-alfa)
    aa=3
  end_if
end_if
if alfa >= .75*pi then
  if alfa < pi then
    rmaxit=rmin*rmul/cos(alfa-.75*pi)
    aa=4
  end_if
end_if
if alfa >= pi then
  if alfa < 1.25*pi then
    rmaxit=rmin*rmul/cos(1.25*pi-alfa)
    aa=5
  end_if
end_if
if alfa >= 1.25*pi then
  if alfa < 1.5*pi then
    rmaxit=rmin*rmul/cos(alfa-1.25*pi)
    aa=6
  end_if
end_if
if alfa >= 1.5*pi then
  if alfa < 1.75*pi then
    rmaxit=rmin*rmul/cos(1.75*pi-alfa)
    aa=7
  end_if
end_if
```

Çizelge D.8 (devam ediyor).

```
if alfa >= 1.75*pi then
    rmaxit=rmin*rmul/cos(alfa-1.75*pi)
    aa=8
endif
;-----
if aa=1 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=-ro*cos(.25*pi-alfa)
    y(i,j)=ro*sin(.25*pi-alfa)
end_if
if aa=2 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=-ro*cos(alfa-.25*pi)
    y(i,j)=-ro*sin(alfa-.25*pi)
end_if
if aa=3 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=-ro*sin(.75*pi-alfa)
    y(i,j)=-ro*cos(.75*pi-alfa)
end_if
if aa=4 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=ro*sin(alfa-.75*pi)
    y(i,j)=-ro*cos(alfa-.75*pi)
end_if
if aa=5 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=ro*cos(1.25*pi-alfa)
    y(i,j)=-ro*sin(1.25*pi-alfa)
end_if
if aa=6 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=ro*cos(alfa-1.25*pi)
    y(i,j)=ro*sin(alfa-1.25*pi)
end_if
if aa=7 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=ro*sin(1.75*pi-alfa)
    y(i,j)=ro*cos(1.75*pi-alfa)
end_if
if aa=8 then
    ro=rmin+(rmaxit-rmin)*(ratio^(i-1)-1)/(ratio^(igp-1)-1)
    x(i,j)=-ro*sin(alfa-1.75*pi)
```

Çizelge D.8 (devam ediyor).

```
        y(i,j)=ro*cos(alfa-1.75*pi)
    end_if
end_loop
end_loop
command
    attach aside from 1,1 to figp,1 bside from 1, fjgp to figp,fjgp
end_command
end
return
```

EK AÇIKLAMALAR E

ÇÖZÜMLEMELERDE KULLANILAN FLAC DOSYALARINA İLİŞKİN ÖRNEKLER

FLAC^{2D} programında hem statik hem de dinamik çözümlerlerde kullanılan işlemler Çizelge E.1-E.7’de sunulmuştur.

Çizelge E.1 Elips, ovaloid ve dikdörtgen açıklıkların statik çözümlemesi için kullanılan işlemler.

```
title
" 1-2-3 dikdortgen-W/H=0.8 "
grid 30 30 'sonlu farklar ağının düğüm noktalarının tanımlanması
model mohr 'Mohr-Coluomb ölçütünün tanımlanması
call rect.fis 'açıklık geometrisine ilişkin Fish işlevinin kullanılması
set wh=0.8 az=0.0323 'açıklığın genişlik yükseklik oranı ve artış
rect
prop shear 4e9 bulk 6.66e9 den 2500 'kaya kütesine ilişkin kesme modülü,
                                     hacim modülü ve yoğunluk
fix x j=31 'yan sınır x doğrultusunda sabitleniyor
fix y j=1 'alt sınır y doğrultusunda sabitleniyor
ini sxx=-20e6 syy=-10e6 szz=-30e6
app sxx=-20e6 syy=-10e6 i=31 'Yatay, düşey ve eksenel birincil
                               gerilmeler tanımlanıyor.
history unbal 'dengelenmemiş kuvvetlerin kaydedilmesi
history ydisp i 1 j 31 'i=1 ve j=31 düğüm noktasında (açıklık tavanında)
                        y yönündeki yerdeğiştirmelerin kaydedilmesi
history yvelocity i 1 j 31 'i=1 ve j=31 düğüm noktasında y yönündeki
                            hızın kaydedilmesi
history sxx i 1 j 31 'i=1 ve j=31 düğüm noktasında yatay gerilmenin
                     kaydedilmesi
history syy i 1 j 31 'i=1 ve j=31 düğüm noktasında düşey gerilmenin
                     kaydedilmesi
window 0 20 0 20 'ekran ve çıktı görüntüsünün boyutları
call hoek.fis 'Mohr-Coulomb dayanım değiştirmelerinden Hoek-Brown
              dayanım değiştirmelerinin hesaplanması
set sc=75e6 mmi=2.3965 sssi=0.0117 mmm=1.0 sssr=0.005 'kaya
               malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ve Hoek-Brown
               malzeme sabitlerinden mb, s, mr ve sr tanımlanması
set mess on echo on
set ns=5 nsup=2400 'her 5 adımda Mohr-Colulomb dayanım
                   değiştirmelerinin güncelleştirilmesi
supsolve
save c:\flac\c123.sav 'çözümlemenin kaydedilmesi
end
```

Çizelge E.2 Kemer tavanlı açıklığın statik çözümlemesi için kullanılan işlemler.

```
title  
" 1-2-3 kemer-W/H=1.0 "  
grid 20 36  
model mohr  
call arch_lef.fis  
set b1=-0.02 a2=0.065 a5=0.08 az=0.055  
gercek  
prop shear 4e9 bulk 6.66e9 den 2500  
fix x j=37  
fix x j=1  
ini sxx=-20e6 sy=-10e6 szz=-30e6  
apply sxx=-20e6 sy=-10e6 i=21  
history un  
history xvel i 1 j 30  
history yvel  
history yd i 1 j 1  
history xd i 1 j 30  
history sxx i 1 j 1  
history sy i 1 j 1  
wi -6 0 -3 3  
call hoek.fis  
set sc=75e6 mmi=2.3965 sssi=0.0117 mmr=1.0 sssr=0.005  
set mess on echo on  
set ns=5 nsup=2400  
supsolve  
save p123.sav  
end
```

Çizelge E.3 Dinamik çözümleme öncesi yapılan statik çözümleme için kullanılan işlemler.

```
title
" 1-2-3 kemer-W/H=1.0 "
config dynamic 'dinamik çözümlemenin tanımlanması'
gr 40 72
model mohr
call c:\flac\ktdyn.fis
set b1=-0.02 a2=0.065 a5=0.08 az=0.055 rmin=1 rmul=30 ratio 1.03
gercek
prop shear 4e9 bulk 6.66e9 den 2500
ini sxx=-20e6 sy=-10e6 szz=-30e6
app sxx=-20e6 sy=-10e6 i=41
history unba
history yd i 1 j 1
history xd i 1 j 30
history sxx i 1 j 1
history sy i 1 j 1
wi -8 8 -8 8
call c:\flac\hoek.fis
set sc=75e6 mmi=2.3965 sssi=0.0117 mmr=1.0 sssr=0.005
set mess on echo on
set ns=5 nsup=2400
set dyn off
supsolve
save c:\flac\dp123.sav
end
```

Çizelge E.4 Sabit genlikli sinüs işlevinin dinamik girdi olarak kullanıldığı dinamik çözümleme için kullanılan işlemler.

```
; do493.dat amax=13,11 'dosya ile ilgili açıklayıcı ek bilgiler
restore c:\flac\do111_4.sav 'statik çözümlemesi yapılan dosyanın
                               yüklenmesi
apply xquiet yquiet i 41 ' oluşturulan ağın dış sınırının viskoz sınır olarak
                               tanımlanması
;dinamik girdinin tanımlanması
def acc_p
  freq=1.5      ' dalga frekansı
  amak=13.11    ' en büyük ivme
  acc_p=amak*cos(2.0*pi*freq*dytime) 'uygulanacak ivmenin zamana
                                          bağlı tanımlanması
end
;ivmenin modelin alt sınırına x doğrultusunda uygulanması
apply xacc 1 his acc_p j=28 46 i 41
apply yacc 0.0 j=28 46 i 41 ' y doğrultusunda ivmenin oluşmasını önler
set large ' büyük yerdeğiştirmelerin oluşumuna olanak sağlar
set dyn on ' dinamik çözümlemenin tanımlanması
set clock 100000000 step 100000000 'hesaplama zamanı ve artış
set dytime=0 ' dinamik zamanın sıfırlanması
ini xvel=0 yvel=0 xdis=0 ydis=0 ' daha önceki çözümlemelerde oluşan hız
                               ve yerdeğiştirmelerin sıfırlanması
hist reset ' statik çözümlemelerde kaydedilen bazı değiştirge değerlerinin
                               silinmesi
hist dytime ' dinamik zamanın kaydedilmesi
hist xvel i=41 j=37 'x doğrultusundaki hız değerinin kaydedilmesi
hist yvel i=1 j=1
hist xvel i=1 j=1
hist xvel i=41 j=1
wi -5 5 -5 5
solve dytime 2.5 ' 2.5 s için dalganın uygulanması
save c:\flac\do493.sav
return
```

Çizelge E.5 Artan-azalan genlikli sinüs işlevinin dinamik girdi olarak kullanıldığı dinamik çözümleme için kullanılan işlemler.

```
; dp476.dat amax=8.85
rest c:\flac\dp123.sav
apply xquiet yquiet i 41
;
;-----
;FISH function to generate input wave
;-----
def acc_p
  freq=2
;-----
  alfa=4
  beta=3100
  gamma=2.5
  dytim=dytime
  acc_p=sqrt(beta*exp(-alfa*dytim)*dytim^gamma)*sin(2*pi*freq*dytim)
end
;-----
;ivmenin modelin alt sınırına x doğrultusunda uygulanması
;-----
apply xacc 1 his acc_p j=28 46 i 41
apply yacc 0.0 j=28 46 i 41
set large
set dynamic on
set clock 100000000 step 100000000
set dytime=0
ini xvel=0 yvel=0 xdis=0 ydis=0
hist reset
hist dytime
hist xacc i=41 j=37
hist xvel i=41 j=37
hist xvel i=1 j=1
hist xacc i=1 j=1
hist xvel i 41 j 1
wi -5 5 -5 5
solve dytime 2.5
save c:\flac\dp476.sav
return
```

Çizelge E.6 Gerçek deprem dalgasının dinamik girdi olarak kullanıldığı dinamik
çözümleme için kullanılan işlemler.

```
; duzce.dat amax=8.05
rest c:\flac\dol11_7.sav
apply xquiet yquiet i 41
history reset
history read c:\flac\duzce.his 'sayısal deprem kaydının (ivme) bulunduğu
                               dosyanın okunması'
history write 1 table 1 'okunan bu dosyanın bir çizelgeye yazdırılması'
;
ca c:\flac\tabdel.fis
ca c:\flac\int.fis
;
set int_in 1 int_out 2 'ivme kaydından hız kaydının elde edilmesi'
integrate
;
plot hold table 1 line 2 line 'ivme ve hız kaydının ekranda görüntülenmesi'
;-----
;ivmenin modelin alt sınırına x doğrultusunda uygulanması
;-----
apply xacc 1 his table 1 j=28 46 i 41
apply yacc 0.0 j=28 46 i 41
set large
set dynamic on
set clock 100000000 step 100000000
set dytime=0
ini xvel=0 yvel=0 xdis=0 ydis=0
history dytime
history xvel i=41 j=37
history xvel i=1 j=1
history xacc i=1 j=1
history yvel i 1 j 1
history yacc i 1 j 1
history xvel i 23 j 1
wi -8 8 -8 8
solve dytime 8.0
save c:\flac\duzce.sav
return
```

ÖZGEÇMİŞ

Melih GENİŞ 1971'de Zonguldak'ta doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Zonguldak Mehmet Çelikel Lisesi'nden mezun olduktan sonra 1988 yılında Hacettepe Üniversitesi Zonguldak Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'ne girdi; 1992'de Üniversite Birincisi olarak mezun oldu; aynı yıl Zonguldak Karaelmas Üniversitesi (ZKÜ) Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans programını, 1995 yılında tamamlayarak Yüksek Mühendis ünvanını kazandı; ardından, 1995 yılında aynı anabilim dalında doktora programına başladı; bu arada, Haziran-Eylül 2000 ayları arasında, Matsumae Uluslararası Vakfı (MIF) bursunu kazanarak, Japonya'da Tokai Üniversitesi Deniz-İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırmalar yaptı. Melih GENİŞ, 1993 yılından bu yana ZKÜ Maden Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır; kaya mekaniği konularıyla ilgili, 6'sı yurtdışı ve 5'i de yurtiçi bilimsel toplantılarda sunulmuş toplam 11 adet bildirisi bulunmaktadır.