

**ZONGULDAK HAVZASI
KÖMÜR ÇEVRE KAYAÇLARININ
DAYANIM VE DEFORMASYON ANİZOTROPİSİNİN İNCELENMESİ**

Kenan ÇOLAK

78979

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

ZONGULDAK

Eylül 1998

78979

Kabul:

Kenan ÇOLAK tarafından hazırlanan “ZONGULDAK HAVZASI KÖMÜR ÇEVRE KAYAÇLARININ DAYANIM VE DEFORMASYON ANİZOTROPİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 28.8.1998

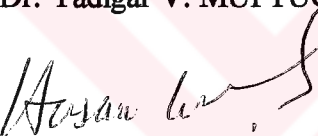
Başkan:


Prof. Dr. Abdürrahim ÖZGENOĞLU

Üye :


Prof. Dr. Yadigar V. MÜFTÜOĞLU

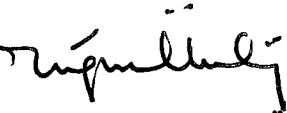
Üye :


Prof. Dr. Hasan GERÇEK

Üye :


Doç. Dr. Nuri A. AKÇİN

Üye :


Yrd. Doç. Dr. Tuğrul ÜNLÜ

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.



Prof. Dr. Erdoğan YİĞİT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

ZONGULDAK HAVZASI

**KÖMÜR ÇEVRE KAYAÇLARININ DAYANIM VE DEFORMASYON
ANİZOTROPİSİNİN İNCELENMESİ**

Kenan ÇOLAK

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yedigir V. MÜFTÜOĞLU

Eylül 1998, 214 sayfa.

Bu çalışmada, Zonguldak taşkömür havzasında karşılaşılan kömür çevre kayaçlarının dayanım ve deformasyon özelliklerinin yönsel değişimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Kömür çevre kayaçlarını oluşturan kumtaşı, silttaşı ve kiltası birimlerinden alınan blok şeklindeki örnekler, ZEDEm laboratuvarına getirilerek, burada amaca uygun olarak yönlü karot örnekleri alınmıştır. Böylece kayaç birimlerinin, 0°, 30°, 45° 60° ve 90°'lik konum açılarında örnekler hazırlanarak, standart dayanım ve deformasyon deneyleri yapılmıştır.

ÖZET (devam ediyor)

Bu deneylerden, kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı, nokta yükü dayanımı, deformabilite ve sismik hız özelliklerindeki anizotropiklik belirlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre; kömür çevre kayaçlarında, tek eksenli basınç dayanımı özellikle 30°'lik konum açısında (uygulanan gerilme ile tabakalanma düzlemi arasındaki açı) önemli miktarda azalmaktadır. Bu durum üç eksenli basınç dayanımı deneylerinde de kendini göstermektedir. $\sigma_{c90}/\sigma_{c30}$ oranına göre tanımlanan dayanım anizotropisinin etkisi, yanal basıncın artması ile düşmektedir.

Kumtaşlarında çekme dayanımı üzerinde anizotropinin etkisi önemli görülmemektedir. Ancak silttaşı ve kilttaşlarında, konum açısının 0°'den 90°'ye doğru değişmesi halinde çekme dayanımında da belirli bir değişim görülmektedir.

Düşük yanal basınç seviyelerinde yapılan üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları, Hoek-Brown ve Bieniawski yenilme ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Buna göre, Hoek-Brown ölçütündeki 'm' sabiti, ve Bieniawski ölçütündeki 'A' sabiti konum açısı ile belirgin bir şekilde değişmektedir.

Deformabilite deneylerinde elde edilen sonuçlara göre, tabakalanmaya paralel konumda ölçülen Young modülü ile tabakalanmaya dik konumda ölçülen Young modülü arasında bir miktar farklılık vardır. Fakat incelenen kayaçlar genel olarak deformasyon açısından düşük anizotropik olarak tanımlanmışlardır.

Deneylerde elde edilen ölçümlerle belirlenen G_2 (bağımsız rijitlik modülü) değerleri değişik araştırmacıların önerdikleri görgül bağıntılarla hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığında, düşük anizotropi durumunda sonuçların birbirine

ÖZET (devam ediyor)

oldukça yakın, daha yüksek anizotropi durumunda ise farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Dolaylı çekme dayanımında kullanılan standart deney örneğinin merkezinde oluşan gerilmelerdeki değişim, FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) gerilme analizi bilgisayar programı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmanın bu kısmında değişik anizotropiklik derecesi ve konum açılarında yapılan çözümler, özellikle orta ve yüksek dayanım anizotropisine sahip kayalarda, dolaylı çekme dayanımı deneyi ile elde edilen sonuçların, kayaların çekme dayanımını temsil etmediğini göstermiştir.

FLAC çözümleri ile, kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin ve ikincil gerilme dağılımlarının, hem konum açısı hem de anizotropiklik derecesi ile değiştiği ortaya konmuştur.

Sonuç olarak, Zonguldak taşkömür havzasındaki kumtaşlarının dayanım ve deformasyon açısından düşük anizotropiklik derecesinde olduğunu söylemek mümkündür. Fakat siltaşı ve kilitaşlarında anizotropikliğin daha yüksek olduğu ve tasarımlarda anizotropik etkinin dikkate alınması gerektiği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Anizotropi, dayanım, deformasyon, yenilme ölçütü, kömür çevre kayaları.

Bilim Kodu: 607.01.02

ABSTRACT

Ph.D.Thesis

**A STUDY ON THE STRENGTH AND DEFORMATION
ANISOTROPY OF COAL MEASURE ROCKS
AT ZONGULDAK BASIN**

Kenan ÇOLAK

Zonguldak Karaelmas University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mining Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Yadigar V. MÜFTÜOĞLU

September 1998, 214 pages.

In this study, determination of the directional variation of strength and deformation properties of coal measure rocks encountered in the Zonguldak hardcoal basin was aimed.

Block samples taken from sandstone, siltstone and claystone units which compose coal measure rocks, brought to the ZEDEM Laboratory and here oriented core samples were recovered for the desired purposes. Consequently, samples were prepared at 0°, 30°, 45°, 60° and 90° orientation angles from the rock units and standart strength and deformation test were carried out.

ABSTRACT (continued)

From these tests, the anisotropy of uniaxial compressive, indirect tensile, triaxial compressive, point load strength and deformability and seismic wave velocity properties were defined.

According to the results derived from this study; for coal measure rocks, uniaxial compressive strength decreases significantly, especially at 30° orientation angle (the angle between applied pressure and bedding plane). This is also valid for the triaxial strength tests. The effect of strength anisotropy defined as the ratio of $\sigma_{c90}/\sigma_{c30}$ decreases with the increasing confining pressure.

The effect of anisotropy on the indirect tensile strength of sandstones is insignificant. Yet, for the siltstone and claystones, a well defined effect of anisotropy on the tensile strength was observed while the position angle varied from 0° to 90°.

The results of triaxial compressive strength tests with low confining pressure levels were evaluated by using the Hoek-Brown and Bieniawski's failure criteria. The constant "m" in the Hoek-Brown criterion and constant "A" in the Bieniawski criterion vary in a well defined manner with the position angle.

According to the results of deformability tests, there is a difference between the Young's modulus measured parallel and perpendicular to the bedding planes. However, the rocks studied were generally defined as of low anisotropy from the view point of deformation.

Comparing the values of G_2 (independent modulus of rigidity) obtained from the test results with those calculated by using the empirical equations suggested by different researches, the results were fairly close for the low anisotropy cases and were different for the high anisotropy cases.

ABSTRACT (continued)

The variation of stresses occurring in the centre of a standard test sample used in the indirect tensile strength tests was determined by using FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) computer programme for stress analysis. In this section of study, the analysis carried out for the different anisotropy and position angles have shown that, particularly, for the rocks having medium and high strength anisotropy, the results derived from the indirect tensile strength do not represent the tensile strength of the rocks.

The FLAC analyses have indicated that the failure zones and distribution of induced stresses occurring around an arched roof opening vary with both orientation angle and degree of anisotropy.

For the conclusion, it is possible to claim that the sandstones of Zonguldak hardcoal basin represent low anisotropy with regard to strength and deformation. However, the degree of anisotropy is considerably high for the siltstones and claystones and, therefore, the anisotropic effect should be considered for the design in these rock units.

Key words: Anisotropy, strength, deformation, failure criterion, coal measure rocks.

Science Code: 607.01.02

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım esnasında yaptıkları katkı ve yönlendirmelerden dolayı, öncelikle sayın hocam Prof. Dr. Yadiğar MÜFTÜOĞLU'na ve sayın hocam Prof. Dr. Hasan GERÇEK'e şükranlarımı sunarım.

Tez savunması sınavı jürisinde yer almayı kabul ederek gösterdikleri ilgi ve katkılar nedeni ile jüri başkanı ve üyelerine...

En zor çalışma günlerimi ve daha bir çok şeyi benimle paylaşan can dostum Erol ARAT'a ...

Yine çalışmalarım esnasında bana her türlü yardımı yapan ve benimle bilgisini paylaşan bir başka değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Tuğrul ÜNLÜ'ye...

Petrografik değerlendirmeleri yapan Araştırma Görevlileri Şenol YÜCEL ve Gürkan BACAK'a...

Ayrıca, TTK'daki çalışmalarım esnasında yardımcı olan sayın Jeo. Yük. Müh. Ali BALTAŞ'a ve diğer TTK mensuplarına...

Ve çok değerli laboratuvar teknisyenimiz Ali ÇETİN'e teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
 BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	 1
 BÖLÜM 2 TORTUL KAYAÇLARIN OLUŞUMU VE PETROGRAFİSİ.....	 5
2.1 TORTUL KAYAÇLARIN OLUŞUM EVRELERİ.....	5
2.1.1 Ayrışma.....	6
2.1.2 Çökelme.....	6
2.1.3 Taşlaşma (Diyajenez).....	7
2.1.4 Yeniden Şekillenme (Epijenez).....	8
2.2 TORTUL KAYAÇLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	8
2.2.1 Renk.....	8
2.2.2 Doku.....	9
2.2.3. Yapı.....	13
2.3 PETROGRAFİK ÇALIŞMALAR.....	14

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3 TORTUL KAYAÇLARIN DAYANIM ANİZOTROPİSİ.....	21
3.1 TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI.....	23
3.1.1 Anizotropik Kayaçlarda Tek Eksenli Basınç Dayanımı.....	23
3.1.2 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyleri.....	27
3.2 DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI.....	34
3.2.1 Anizotropik Kayaçlarda Dolaylı Çekme Dayanımı.....	38
3.2.2 Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyleri.....	42
3.3 ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI.....	49
3.3.1 Anizotropik Kayaçlarda Üç Eksenli Basınç Dayanımı.....	51
3.3.2 Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyleri.....	55
3.4 NOKTA-YÜK DAYANIMI.....	74
3.4.1 Nokta Yük Dayanımı Anizotropisi.....	75
3.4.2 Nokta-Yük Dayanımı Deneyleri.....	77
BÖLÜM 4 TORTUL KAYAÇLARIN DEFORMASYON ANİZOTROPİSİ.....	82
4.1 GERİLME BİRİM DEFORMASYON İLİŞKİSİ.....	83
4.2 ELASTİK ÖZELLİKLERİN ANİZOTROPİSİ.....	90
4.3 STATİK DEFORMASYON DENEYLERİ.....	92

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5 TORTUL KAYAÇLARIN DİNAMİK ÖZELLİK ANİZOTROPİSİ.....	100
5.1 SİSMİK DALGA HIZLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	102
5.2 DALGA HIZI ANİZOTROPİSİ.....	103
5.3 STATİK VE DİNAMİK ELASTİK SABİTLER ARASINDAKİ İLİŞKİ.....	104
5.4 DİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ.....	107
BÖLÜM 6 YENİLME ÖLÇÜTLERİ.....	113
6.1 ANİZOTROPİK YENİLME ÖLÇÜTLERİ.....	114
6.1.1 Mohr Gösterimi.....	114
6.1.2 Coulomb Yenilme Ölçütü.....	116
6.1.3 Hoek-Brown Yenilme Ölçütü.....	118
6.1.4 Bieniawski Yenilme Ölçütü.....	122
6.1.5 Ramamurthy ve Arkadaşlarının Ölçütü.....	124
6.2 DENEYSEL VERİLERE HOEK-BROWN ÖLÇÜTÜNÜN UYARLANMASI.....	126
6.3 DENEY VERİLERİNE BIENIAWSKI YENİLME ÖLÇÜTÜNÜN UYARLANMASI.....	137
BÖLÜM 7 DAYANIM VE DEFORMASYON ANİZOTROPİSİNİN SAYISAL UYGULAMARI.....	145
7.1 DİSK ÖRNEĞİ ÜZERİNDE OLUŞAN GERİLMELER VE PLASTİK DEFORMASYONLAR.....	146
7.1.1 Elastik Model ile Gerilme Analizi.....	147

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
7.1.2 Düzlemsel İzotropik Model ile Gerilme Analizi.....	147
7.1.3 Plastik Model ile Deformasyon Analizi.....	150
7.2 KEMER TAVANLI AÇIKLIK ÇEVRESİNDE OLUŞAN GERİLME VE YENİLME BÖLGESİNİN ANİZOTROPİ İLE DEĞİŞİMİ.....	159
7.2.1 Kemer Tavanlı Açıklık Çevresinde Oluşan Yenilme Bölgesi.....	160
7.2.2 Kemer Tavanlı Açıklık Çevresinde Oluşan Gerilmeler.....	165
BÖLÜM 8 SONUÇLAR.....	169
KAYNAKLAR.....	176
BİBLİYOGRAFYA.....	181
EKLER DİZİNİ.....	183
EK AÇIKLAMALAR A.....	184
EK AÇIKLAMALAR B.....	186
EK AÇIKLAMALAR C.....	202
EK AÇIKLAMALAR D.....	204
ÖZGEÇMİŞ.....	214

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No.</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Tanelerin yuvarlaklık derecelerinin tanımı.....	12
2.2	Tortul kayaçların mineralojik yapısı.....	16
2.3	Kayaç yapıcı minerallerde gözlenen mikro çatlakları gösteren ince kesit fotoğrafı.....	18
3.1	Konum açısının (β) tanımı.....	24
3.2	Kaya malzemesinde gözlenen anizotropi modelleri ve bu modeller için yenilme zarfları.....	24
3.3	Kayaçlarda gözlenen anizotropi tipleri.....	25
3.4	Tek eksenli basınç dayanımının konum açısı ile değişimi.....	29
3.5	Kumtaşlarında gözlenen yenilme şekilleri.....	33
3.6	Silttaşlarında gözlenen yenilme şekilleri.....	34
3.7	Dolaylı çekme dayanımı deney aleti.....	35
3.8	Disk örneğinin çapsal yükleme durumu.....	35
3.9	Dolaylı çekme dayanımı deneyinde disk örneğinde oluşan gerilmelerin dağılımı.....	36
3.10	Konum açısı ile çekme dayanımının değişimi.....	39
3.11	Serpantinli şist örneklerinde çekme dayanımının β' ile değişimi....	40
3.12	Fillitlerde basınç dayanımı/çekme dayanımı oranının β' ile değişimi.	41
3.13	Brezilya deneyinde β' açısının tanımı.....	43
3.14	Kayaçların çekme dayanımının β' ile değişimi.....	47
3.15	Kıltaşı ve silttaşlarında yapılan çekme dayanımı deneylerinde gözlenen yenilme şekilleri.....	48
3.16	I. tip olarak adlandırılan üç eksenli basınç dayanımı deneyi.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No.</u>	<u>Sayfa</u>
3.17 Yenilme anındaki asal gerilme farkının konum açısı ile değişimi..	52
3.18 Yanal basıncın eksenel gerilme üzerindeki etkisi.....	53
3.19 Attewell ve Sandford'a göre σ_1 'in β ile değişimi.....	53
3.20 Ramamurthy ve arkadaşlarına göre σ_1 'in β ile değişimi.....	54
3.21 Ramamurthy ve arkadaşlarına göre kohezyonun β ile değişimi.....	54
3.22 Paris killerinde oluşturulan anizotropik örneklerde yan al basıncın dayanım üzerindeki etkisi.....	55
3.23 Acenta damarı tavan taşında elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	58
3.24 Acılık damarı taban taşında elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	59
3.25 Büyük damarı tavan taşında elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	60
3.26 Çay damarı taban taşında elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	61
3.27 Domuzcu damarı taban II (kumtaşı) taşında elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	62
3.28 Domuzcu damarı Tb I taşında elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	63
3.29 Sulu damarı tavan taşında elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	64
3.30 Nasufoğlu damarı tavan taşında elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	65
3.31 Üç eksenli basınç dayanımı deneyi düzeneği.....	66
3.32 Yanal basınç birimi.....	66
3.33 Kayaçlarda elde edilen kohezyon değerlerinin β ile değişimi	69
3.34 Acenta damarı tavan taşında yan al basıncın eksenel gerilme üzerindeki etkisi.....	70
3.35 Acılık damarı taban taşında yan al basıncın eksenel gerilme üzerindeki etkisi.....	71

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No.</u>		<u>Sayfa</u>
3.36	Çay damarı taban taşında yanal basıncın eksenel gerilme üzerindeki etkisi.....	71
3.37	Domuzcu damarı tavan II taşında yanal basıncın eksenel gerilme üzerindeki etkisi.....	72
3.38	Domuzcu damarı tb I taşında yanal basıncın eksenel gerilme üzerindeki etkisi.....	72
3.39	Büyük damar tavan taşında yanal basıncın anizotropi üzerine etkisi.....	73
4.1	Düzlemsel izotropik kayaçlarda elastik sabitlerin tanımı.....	87
4.2	Statik deformabilite deneylerinde kullanılan deformasyon ceketini....	92
4.3	Çapsal birim deformasyonların ölçümü sırasında deformasyon ölçerlerin konumu.....	93
5.1	Sismik hız ölçümünde kullanılan düzeneğin şematik gösterimi.....	101
5.2	Dinamik özelliklerin ölçümünde kullanılan sismik analiz seti.....	108
5.3	Statik ve Dinamik Young modülleri arasındaki ilişki.....	112
6.1	Gerilmelerin Mohr dairesi ile gösterilimi.....	115
6.2	Mohr-Coulomb yenilme zarfında çekme dayanımının gösterimi.....	117
6.3	Bieniawski ölçütünün değişik kayaçlarda uygulaması.....	123
6.4	Acenta damarı tavan taşı verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.....	126
6.5	Acılık damarı taban taşı verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.....	127
6.6	Büyük damarı tavan taşı verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.....	128
6.7	Çay damarı taban taşı verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.....	129
6.8	Domuzcu damarı taban taşı II verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.....	130
6.9	Domuzcu damarı taban taşı I verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.....	131

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No.</u>		<u>Sayfa</u>
6.10	Nasuvoğlu damarı tavan taşı verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.....	132
6.11	Sulu damarı tavan taşı verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.....	133
6.12	Kumtaşlarından elde edilen verilere Bieniawski yenilme ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.....	137
6.13	Değişik kumtaşlarında Bieniawski yenilme ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.....	139
6.14	Acenta damarı tavan taşı verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.....	140
6.15	Acılık damarı tavan taşı verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.....	141
6.16	Büyük damarı tavan taşı verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.....	142
6.17	Çay damarı tavan taşı verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.....	143
6.18	Domuzcu damarı tavan II taşı verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.....	144
7.1	Disk şekilli örnek için oluşturulan ağ.....	146
7.2	Elastik analizlere göre disk örneğinde oluşan asal gerilmelerin dağılımı	148
7.3	Düzenli eklem modeline göre $\beta=0^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli.....	152
7.4	Düzenli eklem modeline göre $\beta=30^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli.....	154
7.5	Düzenli eklem modeline göre $\beta=45^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli.....	155
7.6	Düzenli eklem modeline göre $\beta=60^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli.....	156

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No.</u>		<u>Sayfa</u>
7.7	Düzenli eklem modeline göre $\beta=90^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı yenilme şekli.....	157
7.8	Bray tarafından analitik yolla elde edilen gerilme dağılımları.....	158
7.9	Kemer tavanlı açıklık çözümlemelerinde kullanılan ağ.....	160
7.10	Coulomb modeline göre, kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri.....	161
7.11	Düzenli eklem modeline göre $\beta=0^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.....	162
7.12	Düzenli eklem modeline göre $\beta=30^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.....	162
7.13	Düzenli eklem modeline göre $\beta=45^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.....	163
7.14	Düzenli eklem modeline göre $\beta=60^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.....	163
7.15	Düzenli eklem modeline göre $\beta=90^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.....	164
7.16	Kemer tavanlı açıklık çevresinde, elastik çözümleme ile elde edilen en büyük ve en küçük ikincil gerilmelerin dağılımı.....	166

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No.</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Tortulların tane boyutlarına göre adlandırılması.....	10
2.2	ISRM tarafından önerilen kayaç tanımlaması.....	10
2.3	Tortul kayaçlarda kalınlıklara göre tabakaların tanımlanması.....	13
2.4	Çalışmada incelenen kumtaşlarının petrografik değerlendirme sonuçları.....	17
2.5	Çalışmaya konu olan kayaçların litolojik tanımlaması.....	19
2.6	Kumtaşlarında tanelerin küresellik değerlendirmesi.....	20
3.1	Kayaçların anizotropi oranına göre sınıflaması.....	26
3.2	Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	28
3.3	Kayaçların anizotropi oranları ve anizotropi dereceleri.....	32
3.4	Dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları düzeltme katsayıları....	44
3.5	Brezilya çekme dayanımı deney sonuçları.....	45
3.6	Deneylerde elde edilen üç eksenli basınç dayanımı değerleri.....	57
3.7	Deney verilerinin istatistiksel değerlendirilmesiyle elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri.....	68
3.8	Yapraklanma durumu ve nokta-yük anizotropisine göre kayaçların tanımlaması.....	77
3.9	Kayaçların Nokta-yük dayanımı deney sonuçları.....	78
3.10	Kayaçların nokta-yük dayanım anizotropileri	80
3.11	Kayaçların σ_c ve I_s anizotropisi açısından karşılaştırılması.....	81
4.1	Borecki vd.'ne göre deformasyon anizotropikliği tanımı.....	91
4.2	Kayaçlarda ölçülen Young modülleri.....	94
4.3	Kayaçlarda ölçülen Poisson oranları.....	95
4.4	Kayaçların deformasyon anizotropisine göre tanımlaması.....	97
4.5	Ölçülen ve değişik araştırmacılar tarafından yapılan önerilere göre hesaplanan bağımsız rijitlik modülü G_2 'nin karşılaştırılması.....	98

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No.</u>		<u>Sayfa</u>
4.6	Hesaplanan ve ölçülen v_2 ile v_3 değerleri.....	99
5.1	Sismik deney sonuçları ve hesaplanan dinamik elastik sabitler...	109
6.1	Değişik yaklaşımlara göre elde edilen c ve ϕ değerlerinin karşılaştırması.....	121
6.2	Hoek-Brown yenilme ölçütündeki ' m_i ' ve ' σ_c ' parametresinin değişik kayaçlarda ve β değerlerinde aldığı değerler.....	135
7.1	Disk örneğinin merkezinde oluşan gerilmeler.....	149



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	= Bieniawski yenilme ölçütündeki sabit
B	= Ramamurthy ve arkadaşlarının ölçütündeki katsayı
b_i	= Yenilme zarfının düşüğü eksenini kestiğı nokta
c	= kohezyon
c_i	= anlık kohezyon
D	= Brezilya deneyindeki örnek çapı
E	= Young modülü
E_β	= β konumunda elde edilen Young modülü
E_1	= Tabakalanmaya paralel alınan örnekte elde edilen Young modülü
E_2	= Tabakalanmaya dik alınan örnekte elde edilen Young modülü
E_{din}	= Dinamik Young modülü
E_{st}	= Statik Young modülü
E_t	= Teğetsel Young modülü
F	= Brazilya deneyinde uygulanan yük
F_e	= Feldispat
G	= Rijitlik modülü
G_1	= Tabakalanmaya dik yöndeki rijitlik modülü
G_2	= Tabakalanmaya paralel yöndeki rijitlik modülü
H	= Ramamurthy vd.'lerinin ölçütündeki katsayı
I_a	= Nokta yük anizotropisi değeri
I_s	= Nokta yük dayanımı değeri
$I_{s(50)}$	= 50 mm çapındaki örnekte elde edilen nokta yük dayanımı
$I_{s(50)\perp}$	= 50 mm çapındaki örnekte tabakalanmaya dik yönde elde edilen nokta yük dayanımı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$I_{s(50) //}$	= 50 mm çapındaki örnekte tabakalanmaya paralel yönde elde edilen nokta yük dayanımı
k	= Bieniawski yenilme ölçütündeki sabit
K_a	= Kayaç parçası
k_E	= Deformasyon anizotropisi
m	= Hoek-Brown yenilme ölçütündeki malzeme sabiti
M_i	= Mika
m_i	= Yenilme zarfının eğimi
P	= Brazilya deneyinde yaya uygulanan basınç
q	= Dolaylı çekme dayanımında uygulanan basınç ile merkezde oluşan gerilme arasındaki ilişkiyi veren katsayı
Q	= Kuvars
s	= Hoek-Brown yenilme ölçütündeki malzeme sabiti
t	= Brazilya deneyindeki örnek kalınlığı
V_{ave}	= Ortalama P dalgası hızı
V_{max}	= En yüksek P dalgası hızı
V_{min}	= En düşük P dalgası hızı
V_p	= P dalgası hızı
V_s	= S dalgası hızı
α	= Brazilya deneyinde basınç uygulanan yayın merkezi gören açısal değeri
β	= Yenilmeye neden olan gerilmenin tabakalanma düzlemi ile yaptığı açı
β'	= Çekme dayanımı deneyinde yenilmeye neden olan gerilmenin tabakalanma düzlemi ile yaptığı açı
γ	= Kayma birim deformasyonu
ε	= Normal birim deformasyon
ϕ	= İçsel sürtüne açısı
ϕ_i	= Anlık içsel sürtünme açısı
σ	= Normal gerilme
σ_1	= En büyük asal gerilme
σ_2	= Ortanca asal gerilme

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

σ_3	= En küçük asal gerilme
σ_c	= Tek eksenli basınç dayanımı
$\sigma_{c\beta}$	= β açısında elde edilen tek eksenli basınç dayanımı
σ_{cmax}	= En büyük tek eksenli basınç dayanımı
σ_{cmin}	= En düşük tek eksenli basınç dayanımı
σ_t	= Çekme dayanımı
σ_x	= x yönündeki normal gerilme
σ_y	= y yönündeki normal gerilme
σ_z	= z yönündeki normal gerilme
ν	= Poisson oranı
ν_1	= Tabakalanmaya paralel yapılan yükleme durumunda, tabakalanma yönündeki b.d.'ların yükleme yönündeki b.d.'lara oranı
ν_2	= Tabakalanmaya dik yapılan yükleme durumunda, elde edilen Poisson oranı
ν_3	= Tabakalanmaya paralel yapılan yükleme durumunda, tabakalanmaya dik yöndeki b.d.'ların yükleme yönündeki b.d.'lara oranı
ν_{din}	= Dinamik Poisson oranı
ν_{st}	= Statik Poisson oranı
ν_t	= Teğetsel Poisson oranı

KISALTMALAR

FLAC	= Fast Lagrangian Analysis of Continua
ISRM	= International Society of Rock Mechanics
ZEDEM	= Zonguldak Endüstri Destekleme Merkezi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yaklaşık 16 km kalınlığındaki yer kabuğunun % 95'ini magmatik ve metamorfik kayaların oluşturduğu söylenebilir. Fakat yeryüzünde açığa çıkmış olan kayaların % 75'i tortul kayadır (West, 1995). Bu nedenle bir çok mühendis, diğer kayalardan çok tortul kayalarla ilgilenmekte ve projelerin bir çoğu tortul kayaç ortamında gerçekleştirilmektedir.

Yeraltında yapılan nükleer ve kimyasal atık depoları, enerji santralleri, sivil savunma amaçlı boşluklar, ulaşım tünelleri ve madenlerin çıkarılması gibi, kaya kütlesi içindeki her türlü mühendislik çalışmasında, emniyet ve ekonomikliği sağlamak için ayrıntılı bir saha çalışması yapılarak, jeomekanik koşulların tanımlanmasının yapılması gerekir. Bu tanımlama, kaya kütlesinin davranışını tahmin etmeye yönelik olarak, kaya malzemesinin yapı ve dokusu ile ilgili özellikleri ve kaya kütlesinin yapısı, süreksizliklerin özellikleri, ısı-nem-boşluk sızısı gibi çevre koşulları ve gerilme durumu gibi faktörlerle ilgilidir. Fakat doğada karşılaşılan hemen hemen bütün malzemelerin pek çok özellik açısından anizotropik oldukları da bilinmektedir. Bu nedenle, proje aşamasında malzemenin davranışı belirlenirken sahip olduğu özellikler açısından anizotropi dikkate alınmalıdır.

Anizotropinin önemli olduğu başlıca mühendislik faaliyetleri şu şekilde sıralanabilir (Amadei, 1996):

- yeraltı kazılarının (tünel, kuyu vs.) duraylılığı,
- yerüstü kazılarının (şev, basamak, yarma vs.) duraylılığı,

- delme-patlatma işleri,
- temellerin duraylılığı,
- petrol, doğal gaz ve yeraltı suyu akışı ve kirliliğin yayılımı,
- sondaj kuyusunun deformasyonu ve yenilme,
- çatlama ve çatlak yayılımı.

Kaya ortamında iki türlü anizotropiden söz edilebilir. Bunlardan birincisi ve daha etkili olanı şüphesiz süreksizliklerin neden olduğu kaya kütlelerindeki anizotropidir. İkincisi ise kayaçların oluşumları esnasında kazandıkları ve kayayı oluşturan malzemenin dizilimi sonucu oluşan bünyesel anizotropidir. Hangi tür anizotropinin belirleyici olduğu ise çalışmanın boyutları ile ilgilidir.

Şimdiye kadar süreksizliklerin neden olduğu anizotropi üzerinde değişik araştırmacıların yaptığı çalışmalar literatürde mevcuttur. Bir kısım araştırmacı da (Ramamurthy et al., 1993; Nasser et al., 1996) fillit ve şeyl gibi yüksek derecede anizotropiye sahip kayaçlar üzerinde çalışmıştır. Fakat bu çalışmanın da konusunu oluşturan ve nispeten düşük şiddette anizotropiye sahip kumtaşı ve silttaşı türü tortul kayaçların dayanım ve deformasyon özelliklerinin yönsel değişimi pek fazla irdelenmemiştir.

Anizotropik özellik gösteren ortamlarda yapılan çalışmalarda, tasarım parametrelerinin gerçeğe yakın olarak belirlenmesi, projenin uygulanması aşamasında olası sürprizleri en aza indireceğinden, hem emniyet hem de ekonomiklik açısından çok önemli olmaktadır. Bu nedenle Zonguldak Havzasında yapılan madencilik faaliyetleri sırasında her zaman karşılaşılan kayaçların hem mühendislik özelliklerinin tam bir tanımlamasının yapılması hem de bu özelliklerdeki anizotropiyi belirlemek amacı ile yapılan bu çalışmada, kömür çevre kayaçlarını oluşturan kumtaşı, silttaşı ve kiltası türü tortul kayaçların tabakalanmaya göre değişik yönlerdeki dayanım, deformasyon ve sonik özellikleri araştırılmıştır. Böylece tortul kayaçlardaki anizotropinin derecesi belirlenmeye çalışılırken aynı zamanda da bu kayaçları tanımlamaya yönelik bir çok dayanım ve deformasyon özellikleri de belirlenmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde, tortul kayaçların oluşumu hakkında literatürde yer alan bilgiler derlenmiş ve tortul kayaçların genel özellikleri verildikten sonra bu tür kayaçlarda karşılaşılan bünyesel anizotropinin nedenleri ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Daha sonra çalışmaya konu olan kumtaşı örnekleri üzerinde yapılan petrografik incelemelerin sonuçları verilmiştir.

Üçüncü bölümde, kayaçların dayanım anizotropisi ele alınmış ve literatürde mevcut olan bilgiler verildikten sonra, kayaçlar üzerinde yapılan tek eksenli basınç dayanımı, Brezilya (dolaylı çekme dayanımı) deneyi, üç eksenli basınç dayanımı ve nokta yük dayanımı deney sonuçları sunulmuştur.

Dördüncü bölüm, kayaçlar üzerinde statik deformasyon özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan, deformabilite deneylerini içermektedir. Çalışmanın bu aşamasında tabakalanmaya göre farklı doğrultulardaki Young modülleri ve Poisson oranları ölçülerek, kayaçların anizotropik deformasyon davranışını tanımlayan elastik sabitler elde edilmiştir. Özellikle bağımsız kayma sabiti (G_2) belirlenerek literatürde yer alan ve değişik araştırmacıların önerdiği, görgül (ampririk) bağıntıların uyumluluğu araştırılmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümü, dinamik elastik sabitler ve sismik hızlardaki anizotropiyi belirlemeye yönelik olarak yapılan sonik hız ölçümlerini kapsamaktadır.

Çalışmanın altıncı bölümünde ise, Hoek-Brown ve Bieniawski tarafından önerilmiş olan yenilme ölçütleri, üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilmiş olan verilere uyarlanmıştır. Böylece, Hoek-Brown yenilme ölçütündeki 'm' parametresi ile Bieniawski yenilme ölçütündeki 'A' katsayısının değeri, Zonguldak Havzasındaki tortul kayaçlar için elde edilerek, konum açısı ile değişimleri araştırılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında ise FLAC kullanılarak, Brezilya (dolaylı çekme dayanımı) deneyinde kullanılan disk şeklindeki örnek üzerinde oluşan gerilmeler ve yenilme bölgeleri araştırılmıştır. Bu amaçla, gerilme çözümlemelerinde, elastik ve düzlemsel izotropik model, yenilme bölgesinin belirlenmesinde ise düzenli eklem (ubiquitous joint) modeli olmak üzere iki ayrı model üzerinde çalışılmıştır.

Çalışmanın bu aşamasında ayrıca, yeraltında düzenli gelişmiş eklemlerin olduğu varsayılan bir ortamda oluşturulan, kemer tavanlı bir açıklık çevresinde oluşan gerilmeler ve yenilme bölgelerindeki değişimler de araştırılmıştır. Bu aşamada gerilme çözümlemeleri için yine elastik model ve düzlemsel izotropik model kullanılırken, yenilme bölgelerini belirlemek için ise Coulomb ve düzenli eklem modeli kullanılmıştır. Böylece, anizotropiklik derecesi ve konumunun değişiminin, oluşan gerilmeler ve yenilme bölgeleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

BÖLÜM 2

TORTUL KAYAÇLARIN OLUŞUMU VE PETROGRAFİSİ

Yeryüzündeki kayaçların % 75'ini oluşturan tortul kayaçlar (West, 1995), yer yüzeyinde veya yüzeye yakın kesimlerde tortulların birikmesi ve taşlaşması sonucunda ya da normal yüzey sıcaklığında çözeltiden çökelme yoluyla oluşurlar.

Tortul kayaçların en önemli özelliklerinden biri tabakalı oluşlarıdır. Tabakalardan her biri çökelme sırasındaki koşulları, kaynak malzemenin niteliğini, taşınma biçimini ve çoğu durumda çökelme esnasındaki biyolojik yapıyı yansıtır.

2.1 TORTUL KAYAÇLARIN OLUŞUM EVRELERİ

Tortul kayaçlar, kırıntılı ve kimyasal kökenli olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Bu çalışmanın konusunu oluşturan kırıntılı tortul kayaçların oluşumu çok uzun ve karmaşık bir gelişme göstermesine rağmen birbirinden farklı olayların olduğu dört oluşum evresi aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- a. Ayrışma
- b. Çökelme
- c. Taşlaşma (diyajenez)
- d. Yeniden oluşum (epijenez)

2.1.1 Ayrışma

Yer kabuğunu oluşturan kayaçların hava, su veya canlıların oluşturduğu fiziksel ve kimyasal etkileri sonucunda bozulup, dağılmaları aşaması “ayrışma” evresini oluşturur. Etmenlerin fiziksel etkileri sonucunda oluşan ayrışma, parçalanma şeklinde olmaktadır. Bu da genellikle büyük ısı değişikliği, donma ve erimeler, atmosferik koşullardaki değişim ve organizmaların bazı faaliyetleri sonucunda meydana gelir. Elementlerin kimyasal etkileri sonucunda ise kayaçalarda oluşan bozulma, çözülme şeklinde olmaktadır (Abdüsselamoğlu, 1982).

2.1.2 Çökelme

Ayrışma sonucu ortaya çıkan ürünlerin, yer çekimi, su, rüzgar ve buzullar gibi etmenlerle taşınması ve taşıma etmenlerinin ortadan kalktığı yerlerde depolanmasına “çökelme” denir. Su, çökelmede en aktif etmendir. Parçacıkların aşınması, taşınması ve çökmesi su akımına bağlı olarak gelişir. Tortul kayaçları meydana getiren maddeler taşınırken, taneler, kolloidler ve eriyikler halinde olabilmektedirler.

Ayrışma sonucunda oluşan maddelerin taşınması esnasında görülen mineralojik seçilme, aşınma ve sınıflama gibi olaylarda, taşınan maddenin litolojik ve mineralojik özellikleriyle, taşıma etmenlerinin özellikleri etkilidir.

Çok ince kum, silt ve kil bileşenleri akıntılarla süspansiyon halinde taşındıklarından fiziksel yönden çok az bir şekil değişimine uğrarlar. Daha büyük olan ve sürüklenen bileşenlerde tersi durum söz konusudur. Bu bileşenlerden, ağır ve sertliği az olan taneler, uzun mesafelere taşınarak sürtünme ile köşeliliklerini kaybederek yuvarlaklaşır ve daha küçük bir şekil kazanır. Bu nedenle, bileşenlerin gösterdikleri şekiller ve yuvarlaklılık derecesi, taşınmanın uzaklık ve cinsini belirten önemli bir faktör olarak ortaya çıkar.

Sularda asıltı (süspansiyon) halinde olan elemanların iri olanları doğal olarak daha çabuk çökelirken, nispeten küçük olanları ise daha yavaş çökelirler. Bu gelişmenin sonucunda elemanlar kütleleri ve ağırlıkları ile orantılı olarak bir düşey sıralanış kazanırlar. Tanelerin büyüklük ve ağırlıkları alttan üste doğru azalır. Böylece taneler arasında düşey yönde bir sınıflama oluşur. Göl ve deniz gibi ortamlarda, kıyidan açık bölgelere doğru yatay olarak, boyuta göre yanal bir sıralanma daha görülür. İri elemanlar kıyıya yakın yerlerde görülürken, ince olanlar da derece derece açık bölgeye doğru sıralanırlar. Bu şekilde olan sınıflamaya da yatay dereceli sınıflama denir (Abdüsselamoğlu, 1982).

2.1.3 Taşlaşma (Diyajenez)

Tortullar, ilk çökme yerlerinde su ile hemen hemen doygun (% 80-90) çamur veya kırıntı malzeme yığını halinde bulunurlar. Bu nedenle malzemenin elemanları ayırık durumdadır. Bu tortulların bir takım fiziksel ve kimyasal olaylar sonunda, sağlam kayaç haline dönüşmeleri olayına “taşlaşma” adı verilir. Taşlaşma esnasında tortulların sertleşmesi ve yeni minerallerin oluşması, farklı olaylar sonucunda olmaktadır.

Bu olayların birincisi sıkışmadır. Bu aşamada tortul, üzerine gelen yeni tortulların ağırlığı altında sıkışır. Su ile hemen hemen doygun halde olan çamur, sıkışma ile suyunu kaybeder, gözenekliliği azalır ve kolloidler birbirine daha çok yaklaşarak yapışır. Sıkışma esnasında su kaybı % 90 civarındadır.

Sıkışma sonrasında gelişen olay çimentolanmadır. Kaba, kırıntılı tortullar sıkışsalar dahi yine de taneler arasında boşluklar kalır. Bu boşluklarda kalan sıvılarda veya dışarıdan gelerek bu boşluklara yerleşen sıvılarda, ikincil kristaller oluşarak bu boşlukları doldurur. Böylece, ilk elemanlar birbirine bağlanmış olur. Bu olaya çimentolanma denir.

Kayaçların doku aralıklarında bulunan eriyikler tarafından, daha önce oluşmuş bulunan kristaller eritilir ve tekrar kristallenme olur. Bu olayın yinelenerek devam etmesi sonucunda kristaller giderek büyür ve boşluklar tamamen kapanır. Böylece kayaç daha sağlam bir yapı kazanmış olur. Yeniden kristallenme adı verilen bu olay oluşumun üçüncü aşamasıdır.

Taşlaşmanın son aşamasında, kayacın doku aralıklarında bulunan eriyiklerle, boşluklardaki eriyikler, kayacın bünyesine tesir eder, yerleşir ve kayacın yeni bir görünüş kazanmasına neden olur. Bu olay metasomatoz olarak adlandırılır (Abdüsselamoğlu, 1982).

2.1.4 Yeniden Şekillenme (Epijenez)

Kayaçların bulundukları yerde daha derinlere gömülmesi ve yeni şartlarda mineralojik yapı ve dokularının değişime uğraması olayı, “yeniden şekillenme” olarak tanımlanır. Yüksek basınç ve sıcaklık altında epijeneze uğrayan kayaçlar daha çok sertleşir ve yoğunluk kazanır. Çimentolu kayaçlarda ise doğal çimento yeniden kristallenir fakat kayaçların mineralojik bileşimlerinde fazla bir değişiklik olmaz (Abdüsselamoğlu, 1982).

2.2 TORTUL KAYAÇLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

Doğada var olan tortul kayaçlar sahip oldukları bazı özellikler açısından farklılıklar gösterirler. Tortul kayaçları tanımlamakta kullanılan bu özellikler renk, doku ve yapı olarak tanımlanırlar.

2.2.1 Renk

Tortul kayacın renkliliği herşeyden önce bileşimine bağlı bir özelliktir. Az bir miktar renk verici madde, kayacın bütün rengini değiştirmeye yeterli olabilir. Nemli iklimlerde kayaçların koyu renkli, kurak iklimlerde ise açık renkli oldukları

bilinmektedir. Kayacı oluşturan elemanların boyutlarının küçülmesi de rengin koyulaşmasına neden olabilir. Renklenmeye neden olan maddeler, çökelme veya diyajenez esnasında kayacı etkilemiş ise bunlara sedimantolojik veya diyajenetik renkler denir. Bu gibi renkler katmanlaşmaya bağlı olan ilk renklerdir ve katmanları belirlemeye yardımcı olurlar. Kayaçların ayrışma döneminde ortaya çıkan renkler ise düzensiz lekeler halinde ve çatlaklar boyunca oluşur (Abdüsselamoğlu, 1982).

2.2.2 Doku

En temel doku özelliği tane boyutudur. Tortulların tane boyutuna göre adlandırılması Çizelge 2.1’de verilmiştir. Hem ortalama hem de kaya içindeki dağılım olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Tane boyutunu tanımlamak ilk bakışta kolay değildir. Küre şeklindeki bir tanede boyu tanımlamak için çap ve hacim kullanılabilir fakat düzensiz şekilli tane için açık bir boyut tanımlaması yapılamamaktadır. Bir tanenin en uzun, ortanca ve en kısa boyutunun çarpımı ile tane hacmini elde etmek en iyi yöntemdir. Standart yöntem olarak ortalama tane boyu kullanılmaktadır (Blatt, 1982).

Ortalama tane boyu bulunurken hesaplanan standart sapma, kayaç içindeki tane çeşitlenmesi (sorting) olarak adlandırılır ve farklı sedimantasyon koşullarında değişiklik gösterir (Blatt, 1982).

Tane boyutu dağılımının tipi genellikle çarpılma olarak kullanılır. Çoğu tane boyut dağılımı simetriktir. Yani, ortalamadan aynı miktar küçük olan her boyuttaki tane sayısı kadar, ortalamadan aynı miktar büyük olan her boyutta aynı sayıda tane var demektir. Bazı durumlarda tane boyut dağılımı çarpık olabilmektedir. Örneğin tortulların % 80’i çakıl boyutunda % 20’si ince taneli kum boyutunda ise bu dağılım pozitif yönde çarpık demektir. Eğer tortulların

Çizelge 2.1 Tortulların tane boyutuna göre adlandırılması (Blatt, 1982).

Tanımı	Tane Boyutu (mm)
Çakıl	2 - 4096
Çok Kaba Kum	1 - 2
Kaba Kum	0.5 - 1
Orta Kum	0.25 - 0.5
İnce Kum	0.125 - 0.25
Çok İnce Kum	0.062 - 0.125
Kaba Silt	0.031 - 0.062
Orta Silt	0.016 - 0.031
İnce Silt	0.008 - 0.016
Çok İnce Silt	0.004 - 0.008
Kil	< 0.004

% 80'i ince taneli kum boyutunda, % 20'si de çakıl boyutunda ise, bu durumda dağılım negatif yönde çarpık demektir (Blatt, 1982).

Tane boyutuna göre uluslararası kaya mekaniği derneği (ISRM) tarafından, kayaların sınıflandırılması için önerilen boyut aralıkları Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Doku tanımlamasında tane boyu kadar tanenin şekli de önemli olmaktadır. Konglomera ve kumtaşlarında tane şekli küreselden, çubuk ve diske kadar belirgin şekilde değişim gösterir. Tane şekli, mostrada veya el örneği üzerinde yapılan küresellik ve yuvarlaklık değerlendirmesi ile belirlenebilir.

Küresellik, tane bir birine dik üç yönde ölçülen boyutların farklılaşmasına göre yapılır. Eğer eksenler üzerinde yapılan ölçümler birbirine eşit ise tane küreseldir.

Eğer iki boyut, üçüncü boyuttan belirgin şekilde büyük ise, tane disk şekilli veya düzlemseldir. Eğer iki boyut, belirgin şekilde üçüncüden küçük ise bu durumda tane çubuk şeklindedir (Blatt, 1982).

Çizelge 2.2 ISRM (1981) tarafından önerilen kayaç tanımlaması

Kayaç tipi	Tane boyutu aralığı (mm)
Konglomera	> 2
Kumtaşı	0.06 - 2
Silttaşı	0.002 - 0.06
Kiltaşı	< 0.002

Tanelerin yuvarlaklığı; tane boyutu, sertlik, taşınma ve depolanma koşullarının etkisi altında oluşur. Genel bir kural olarak 5-10 mm'den daha büyük olan taneler hemen hemen her zaman yuvarlaktır. 0.1-5 mm arası boyutta olan taneler, yuvarlak olabileceği gibi köşeli de olabilirler. 0.1 mm'den daha küçük olan taneler ise hemen hemen her zaman köşelidir. Yuvarlaklık taşınma esnasında tanelerin birbirleri ile çarpışmaları sonucu gelişir. 5-10 mm'den büyük olan taneler taşınma esnasında suların dibinde kayarak veya yuvarlanarak taşınır. Bu esnada tanelerin köşeleri kırılır ve hızla kaybolur. 0.1-5 mm boyutlu taneler ise ya suların dibinde sürüklenme veya sekerek hareket etme eğilimindedir. Sekerek hareket etme durumunda taneler taşınma sürelerinin büyük kısmında diğer parçalar ile temas etmeden suların ortasında yer alır. Bunun sonucunda da yuvarlaklaşma daha fazla bir zaman alır (Blatt, 1982).

Tane yuvarlaklığı ince kesitler yardımıyla daha hassas olarak belirlenir. Yuvarlaklılığı değerlendirmek için ise kullanılan yöntem, standart fotoğraflarla (Şekil 2.1) tane görünüşünü karşılaştırmaktır.



Şekil 2.1 Tanelerin yuvarlaklık derecelerinin tanımı (Powers, 1953)

2.2.3 Yapı

En yaygın olarak görülen yapı tabakalanmadır. Bu tür yapılarda kaya içindeki birbirine komşu olan kayalar, paralel süreksizliklerle bir birinden ayrılmaktadır. Mostrada hem dış görünüşü ile hem de iç özellikleri ile tanımlanabilir. Tabakanmayı tanımlamak için yaygın olarak kullanılan kalınlıklar Çizelge 2.3'te sunulmuştur.

Çizelge 2.3 Tortul kayalarda kalınlıklarına göre tabakaların tanımlanması
(Ingram, 1954; Blatt'tan, 1982).

Tanım	Kalınlık
Çok Kalın Tabaka	> 100 cm
Kalın Tabaka	30 - 100 cm
Orta Tabaka	10 - 30 cm
İnce Tabaka	3 - 10 cm
Çok İnce Tabaka	1 - 3 cm
Kalın Lamineli	0.3 - 1 cm
İnce Lamineli	< 0.3 cm

Tabakalanma yüzeyleri genellikle dokuların farklılaşması ile belirlenir. Tabakalanma yüzeylerinin varlığı depolanma koşullarında değişimle açıklanmaya çalışılmaktadır. Suyun kimyasındaki veya sıcaklığındaki değişim veya taşıma suyunun akış hızındaki değişim bu tabakalanmanın nedeni olabilmektedir (Blatt, 1982).

Tortul kayalarda en sık görülen yapılar, dereceli ve çapraz tabakalanma gösteren yapılardır. Dereceli tabakalanma gösteren yapılar, tabandan tavana doğru tane boyutunda bir derecelenmenin görüldüğü kırıntılı tortul tabakalarıdır. Normal

olarak tabanda en kaba, üstte ise en ince taneler bulunur. Tabakaların kalınlıkları bir kaç milimetreden bir kaç metreye kadar olabilir (Blatt, 1982).

Çeşitli tortulların çökmesi sırasında oluşumların eğim ve doğrultularının değişimiyle meydana gelen yapı çapraz tabakalanmadır. Daha çok çalkantılı ortamlarda oluşur. Birincil ve ikincil olarak oluşabilirler. Birincil olanlar çökme esnasında oluşurken ikincil olanlar istiflenmeden sonraki tektonik hareketlerle oluşurlar (Blatt, 1982).

Tortul kayaçlarda gözlenen yapılar, kayaç özelliklerinin yöne bağlı değişimine neden olmaktadır. Özellikle yapraklanma gösteren kayaçlarda, her türlü mühendislik özelliklerinde gözlenen anizotropik davranış, değişik araştırmacılar tarafından araştırılmıştır.

2.3 PETROGRAFİK ÇALIŞMALAR

Çalışmanın bu kısmında, Zonguldak Havzasında halen üretim yapılmakta olan, Karadon, Üzülmaz ve Kozlu Müessesesi ocaklarından değişik yerlerden alınan örneklerin ayrıntılı petrografik tanımlaması yapılmıştır. Örnekleme yerleri EK AÇIKLAMALAR A'da tanımlanmıştır.

Bu amaçla, ilk olarak örneklerden rasgele seçilen parçalardan ince kesitler hazırlanmıştır. İnce kesitlerin, aynı karottan hem yatay hem de düşey yönde alınmasına dikkat edilmiştir. Bu şekilde, yatay ve düşey yöndeki tane şekli değişimi ve yönlenmesinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bloklar üzerinde gözle yapılan incelemelerde, Acenta Tv. I ve II, Acılık Tb., Büyük Tv., Çay Tb., Çay Tv. ve Domuzcu Tb. II olarak adlandırılan kayaçların kumtaşı, Domuzcu Tb. I taşının kıltaşı, Nasufoğlu Tv. ve Sulu Tv. taşlarının ise silttaşı oldukları anlaşılmıştır. Yine gözle yapılan incelemelerde, Çay Tv. taşı dışında kalan kumtaşlarında tabakalanmanın izleri belirgin olarak saptanmıştır.

Çay Tv. taşında ise tabakalanmayı gösteren herhangi bir ize rastlanmamıştır. Bu kayaç tamamen homojen olarak görülmüştür.

Yine gözle yapılan incelemede, Domuzcu Tb. I, Sulu Tv. ve Nasufoğlu Tv. taşının siyaha yakın, koyu bir renkte olduğu ve belirgin şekilde yapraklanma gösterdiği ve Domuzcu Tb. I taşı örneklerinin bu düzlemlerden kolayca ayrıldığı, bu düzlemler içinde fosil izlerinin olduğu belirlenmiştir. Sulu Tv. ve Nasufoğlu Tv. taşlarında yapılan incelemelerde ise, belirgin yapraklanma gösterdiği ancak bu düzlemlerden ayrılmasının kolay olmadığı belirlenmiş ve silttaşı olarak tanımlanmıştır.

İnce kesitler üzerinde yapılan incelemelerde kumtaşlarının genel özelliklerinin aşağıdaki şekilde olduğu belirlenmiştir;

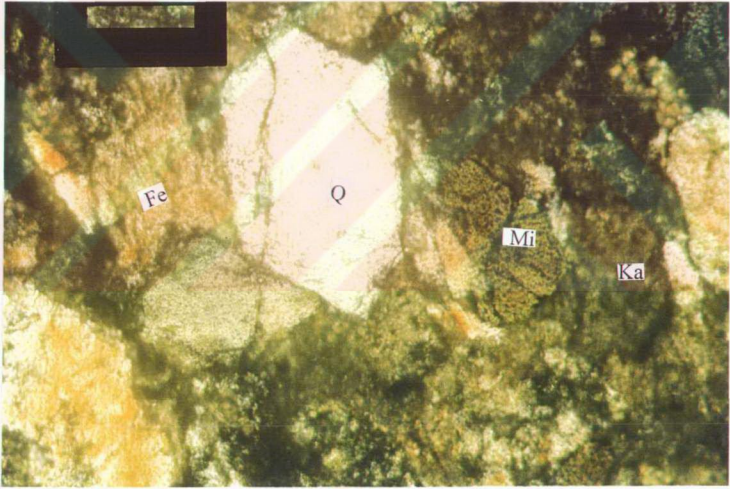
Mineralojik açıdan incelendiğinde, kuvars, kayaç parçalarından sonra en önemli bileşendir. Baskın olarak kuvvetli yanıp sönmeli poligonal şekilli, düzgün yanıp sönmeli (volkanik kökenli) tek taneler, yarı bileşik ve sülfür dokanaklı, kuvvetli yanıp sönmeli bileşik taneli (polikristalin) şeklinde metamorfik kuvars türleri baskındır. Ortaklas ve mikroklin (potasyumlu feldispat) az da olsa görülmektedir. Plajiolazlar, çoğunlukla serisitleşmiş ve albit ikizlenmeleri şeklinde görülmektedir. İleri derecede alterasyon ve kloritleşmenin görüldüğü ince-uzun pullar şeklindeki biotitler bazen oksitleşmeye ileri derecede maruz kalmışlardır.

Temel yapı bileşenleri olan kayaç parçaları şu şekilde sınıflanabilir. Metamorfik kayaç parçacıkları; kuvarsfillit, mikafillit, sleyt türü düşük dereceli metamorfik kayaç türleri; metakumtaşı, metasilttaşı, metacort gibi çok düşük metamorfik kayaç türleri, milonitik halinde dinomo (basınç etkisinin fazla, sıcaklık etkisinin düşük olduğu) metamorfizma ürünleri ve klorit şist, biyotit şist ve gnays taneleri halinde ileri derecede metamorfik kayaç parçaları şeklindedir.

Yoğun olarak asit volkanik, az miktarda andezitik ve traki-andezitik kayaç parçaları volkanik kayaç parçalarını oluşturmaktadır.

İnce kumtaşı, şeyl, çört gibi sedimanter kayaç parçaları ise sedimanter kökenli kayaç parçalarını oluşturmaktadır. Ayrıca demiroksit ve kömür parçalarına da rastlanmaktadır.

İnce kesitlerden elde edilen bilgilere göre, litik ve yarı litik aranit olarak adlandırılan kayaçların mineralojik bileşimi Çizelge 2.4’de sunulmuştur. Buna göre çalışmada incelenen kumtaşları, % 25-40 Kuvars, % 5-25 plajiyoklas ve potasyumlu feldispat, % 15-35 Biotit-klorit-muskovit, % 20-30 volkanik kayaç parçaları, % 15-25 metamorfik kayaç parçaları, % 5-15 sedimanter kayaç parçaları, % 3-5 çört ve % 2-5 çimento maddesi içermektedir. Şekil 2.2’de kumtaşlarının mineralojik yapısını gösteren bir fotoğraf sunulmuştur.



Şekil 2.2 Tortul kayaçların mineralojik yapısını gösteren bir ince kesit fotoğrafı

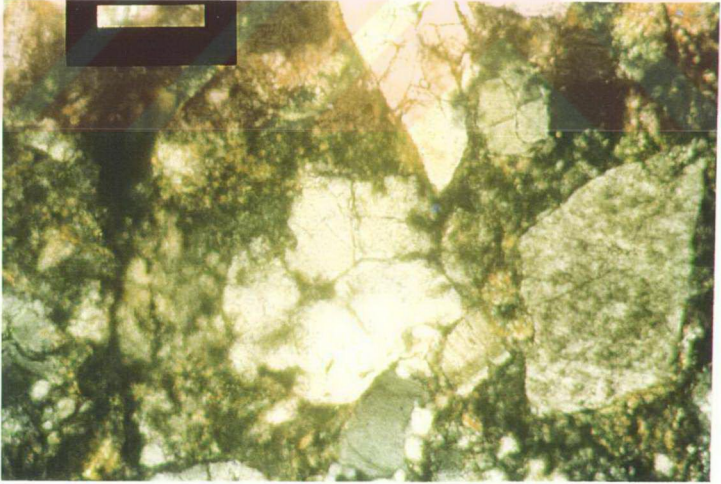
Çizelge 2. 4 Çalışmada incelenen kumtaşlarının petrografik değerlendirme sonuçları.

Alındığı yer	Mineralojik Bileşim (%)				Tane Boyutu Dağılımı (%)				Küresellik	Çimento
	Kuvars	Feldispat	Mika	Kayaç Parçası	Çok ince tane (0.06-0.12 mm)	İnce tane (0.12-0.5 mm)	Orta tane (0.5-1.0 mm)	Kaba tane (1.0-2.0 mm)		
Acenta Tv.	33.5	5.8	36.2	24.5	6.7	32.2	42.4	18.7.	Düşük	Silis
Acılık Tb.	24.0	25.0	23.0	29.0	3.2	37.2	51.6	8.0	Düşük	Yal. Matriks*
Büyük Tv.	42.0	9.6	25.6	22.8	--	19.0	72.7	8.3	Düşük	Silis
Çay Tb.	37.8	11.4	36.2	14.6	2.3	36.6	32.4	28.7	Düşük	Silis
Çay Tv.	34.5	19.1	17.9	28.5	--	14.5	61.0	24.5	Düşük	Silis
Domuzcu Tv	28.7	26.5	14.2	30.6	2.6	16.1	62.1	19.2	Düşük	Yal. Matriks*

*: kayaç parçalarından türeyen ince kırıntılı malzeme

Dokusal açıdan ise ince kesitlerde bağıl olarak yumuşak olan şeyl ve mikro fillit gibi tanelerin ileri derecedeki sıkışma ile ilksel şekillerini büyük ölçüde yitirdikleri ve sert taneler arasında gözeneklerin şeklini alarak yalancı matriks oluşturdıkları gözlenmektedir. Ayrıca tane sınırları, konkav-konveks ve sutur dokanak şeklindedir. Uzun ve nokta dokanaklar görülmemektedir. Bu da, kayaçların hızlı ve derin gömülme sonucu basınç erimeleriyle birincil gözenekliliğin hemen hemen yok olduğunu ve yalancı matriksin geliştiğini göstermektedir. Ayrıca birincil çimentonun % 2-5 oranında bulunması da bu olayın bir sonucudur.

Gerek hızlı gömülme ve gerekse minerallerin yer değiştirmeleri tanelerin ilksel şekillerini büyük ölçüde tanınmaz hale getirmiştir. Bu nedenle tanelerin birincil şekil ve yuvarlaklılık dereceleri üzerinde kesin bir görüş bildirilmesi mümkün olmamaktadır. Gömülmenin çok etkin olması tanelerin kırılmasına ve çatlamlarına neden olmuştur (Şekil 2.3). Bu da diyajenezin etkisinin çok fazla olduğunu bir göstergesidir.



Şekil 2.3 Kayaç yapıcı minerallerde gözlenen mikro çatlakları gösteren ince kesit fotoğrafı.

Tanelerde, diyajenez sonrası oluşan ikincil mikro çatlaklarda bir yönlenme yoktur ve tamamen rasgele konumlanmıştır. İnce kesitlerde yapılan mikroskopik incelemelere göre, kayaçların litolojik tanımlamaları Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5 Çalışmaya konu olan kayaçların litolojik tanımlaması.

Kayacın ait olduğu yer	Kayaçın Litolojisi	Tane Boyutu
Acenta Tv I	Kumtaşı	İnce-Orta Taneli
Acenta Tv. II	Kumtaşı	İnce-Orta Taneli
Acılık Tb.	Kumtaşı	İnce-Orta Taneli
Büyük Tv.	Kumtaşı	Orta Taneli
Çay Tb.	Kumtaşı	İnce Taneli
Çay Tv.	Kumtaşı	Orta Taneli
Domuzcu Tb. II	Kumtaşı	Orta Taneli
Domuzcu Tb. I	Kiltaşı	
Nasufoğlu Tv.	Silttaşı	
Sulu Tv.	Silttaşı	

Kumtaşı örneklerinden tabakalanmaya paralel ve dik olarak alınıp hazırlanan ince kesitlerde yapılan petrografik incelemelerde, tanelerde her hangi bir yönlenme ve şekil değişikliğine rastlanmamıştır. Bu nedenle kumtaşlarındaki anizotropiye tabakalanmanın neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Tabakalanmaya dik ve paralel olarak hazırlanan ince kesitlerde belirlenen tane yuvarlaklığı ve küresellik değerlendirmesi Çizelge 2.6’da sunulmuştur. Bu değerlendirme, ince kesitlerde, mikroskop altında ölçülen en kısa ve en uzun boyutun oranlanması ile yapılmıştır (Krumbein and Sloss, 1963. Buzkan’dan 1998).

Çizelge 2.6 Kumtaşlarında tanelerin küresellik değeriendirilmesi.

Alındığı yer	Tabakalanmaya göre durumu	Küresellik tanımı			
		> 0.9	0.9 - 0.7	0.7 - 0.5	< 0.5
Acenta tv.	Dik	6.3	35.9	37.1	20.7
	Paralel	4.6	28.5	38.4	18.5
Acılık tb.	Dik	3.8	12.7	36.3	47.2
	Paralel	4.0	23.8	47.7	24.5
Büyük tv.	Dik	1.9	34.6	35.9	27.6
	Paralel	3.9	34.6	36.6	24.9
Çay tb.	Dik	5.0	23.6	49.1	22.3
	Paralel	0	40.9	44.9	14.2
Çay tv.	Dik	4.8	37.5	37.5	20.2
	Paralel	4.0	29.1	39.1	17.8
Domuzcu tb. II	Dik	2.9	26.2	42.4	18.5
	Paralel	1.1	28.3	46.0	24.6

BÖLÜM 3

TORTUL KAYAÇLARIN DAYANIM ANİZOTROPİSİ

Mekanik özelliklerinin ölçümü, kayanın içinde veya üzerinde yapılacak olan her türlü mühendislik yapısının kazısında, yol açma işlemlerinde, yüzey madenciliği ve yeraltı kazılarında, gerilmeler altındaki kayanın davranışının tahmini için esas olan bilgilerin elde edilmesini sağlar. En çok ilgilenilen mekanik özellikler dayanım özellikleridir. Bu özellikler tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, kayma dayanımı ve üç eksenli basınç dayanımıdır.

Kayanın karakterizasyonu ilk bakışta görüldenden daha karmaşık ve işlenmesi zor olan bir konudur. Bu konu, sadece deneylerdeki boy-çap oranı ile ilgili değildir. Doğal olarak oluşmuş ve milyonlarca yıldır mevcut olan kaya kütlesinin tanımlanması ile ilgilidir (Hudson, 1993).

Kaya kütlesi hakkında tam olarak bilmek istenilen nedir? Özel mühendislik amaçları için hangi bilgilere ihtiyaç vardır? O bilgiyi ölçmek gerçekten mümkün müdür? Kaya tanımlama yöntemi farklı kaya kütlelerinde uygulanabilir mi? Bu tür sorular kaya mekaniğinde her zaman söz konusu olmaktadır (Hudson, 1993).

Kaya mekaniği ile ilgili bir problemde ilk gereksinim, malzeme özellikleri ve malzemeye etkiyen kuvvetler hakkındaki bilgilerdir. Bazı durumlarda malzemeye uygulanan kuvvetler hakkında bilgiye ihtiyaç duyulurken, yeni bir kaya şevinin oluşturulması gibi bazı durumlarda da yükün kaldırılıp uzaklaştırılması şeklinde uygulamalar düşünülebilir.

Bir kaya mühendisliği probleminde ilk olarak konunun amacı ve sınırlamaları gibi sınırlarının çizilmesi gerekir. Sonra proje amacına göre, hangi kaya özelliklerine ihtiyaç duyulduğu, hangi deney yöntemlerinin kullanılacağı ve sahanın nasıl karakterize edileceğine karar verilmelidir. Kayalardaki mikroçatlakların varlığı radyoaktif maddelerin depolanması ile kesin olarak ilgili olduğu halde, otoyol kaya şevleri için çok önemli değildir. İhtiyaç duyulan malzeme özellikleri ve bilgi düzeyi projenin amaçları ile değişmektedir (Hudson, 1993).

Kayanın dayanımı üzerine yapılan laboratuvar deneyleri genellikle, çatlaksız kaya silindirleri üzerinde yapılır ve bu deneylerde tabakalaşmanın konumuna dikkat edilir. Tabakalı örneklerin deneyi genellikle tabakalaşmaya dik ve paralel konumlandırılmış örnekler üzerinde yapılır.

Sondaj karotlarından hazırlanmış silindirik örnekler üzerinde yapılan deneylerde, elde edilen sonuçların yorumlanmasına dikkat edilmelidir. Gözlenen davranış, kayanın bileşimine, yapısına ve örnek durumuna bağlıdır. Benzer mineraloji için tek eksenli basınç dayanımı, artan porozite, artan ayrışma derecesi ve mikro çatlakların artmasına bağlı olarak azalacaktır. Bu etkiler nedeniyle aynı jeolojik isme sahip kaya örneklerinin tek eksenli basınç dayanımlarının geniş bir aralıkta değişeceği bilinmektedir. Bu nedenle, kumtaşının tek eksenli basınç dayanımı, tane boyutu, yoğunluğu, taneler arasındaki çimento maddesinin yapısı ve kayanın daha önce maruz kaldığı basınç ve sıcaklık seviyesine bağlı olarak değişir. Fakat yine de kayanın jeolojik ismi, onun mekanik davranışı hakkında bazı bilgiler verir. Örneğin sleyt, anizotropik davranışa neden olan klivaj düzlemleri içerirken, kuvarsit daha sert ve gevrekler. Bu gibi özellikler kaya için tipik bazı değerler verse bile, yalnız jeolojik tanımlama ile mekanik özellikleri tahmin etmek doğru olmaz (Brady and Brown, 1985).

Sağlam kaya, dayanım ve deformasyon açısından nadiren izotropik olmaktadır. Genel olarak sağlam magmatik kayalar, tortul ve metamorfik kayalardan daha izotropiktirler. Tortul kayalar, depolanma esnasında farklı tabakalarda farklı

mineral kompozisyonunun gelişimine de bağlı olarak gelişen özellikler nedeniyle izotropik veya anizotropik olurlar. Metamorfik kayalar oluşumlarına bağlı olarak daha şiddetli anizotropi gösterirler (Ramamurthy, 1993).

3.1 TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI

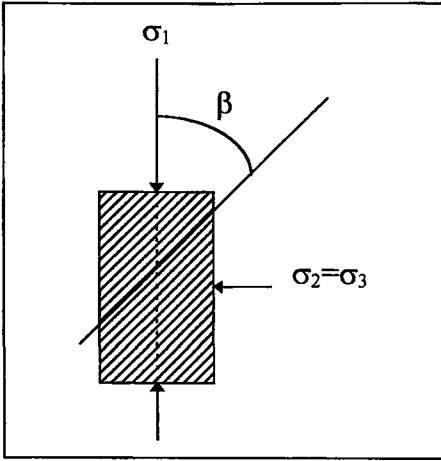
Kaya mekaniği araştırmalarında en yaygın olarak kullanılan ve kayayı değerlendirmek amacıyla yapılan en hızlı ve ucuz laboratuvar deneyi olan tek eksenli basınç dayanımı deneyi, bu araştırmada da öncelikli olarak ele alınmıştır. Bu deney sonuçları kullanılarak araştırılan kayalardaki anizotropinin tipi ve derecesi belirlenmiştir.

3.1.1 Anizotropik Kayalarda Tek Eksenli Basınç Dayanımı

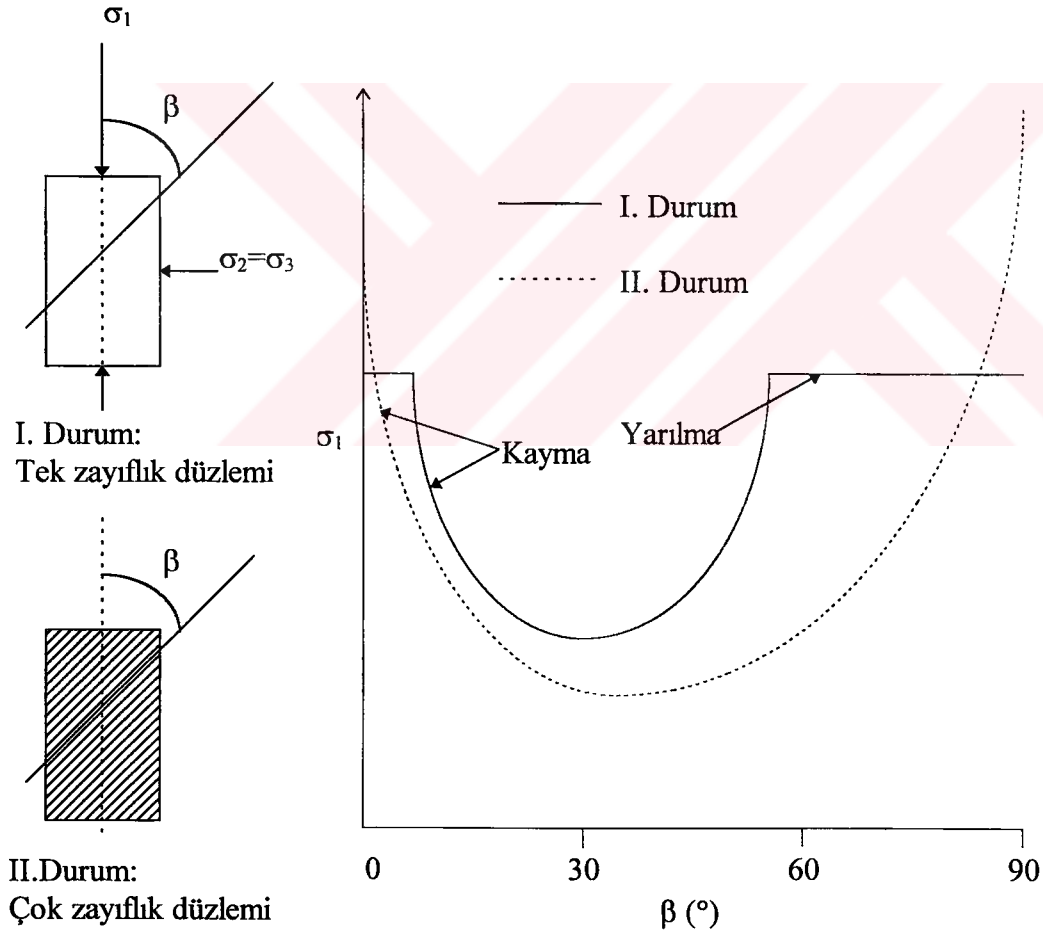
Kayalar hiçbir süreksizlik içermeseler bile, oluşumları esnasında kazandıkları özelliklere bağlı olarak anizotropik olabilirler. Bu anizotropiyi tanımlamak için dayanımın, konum açısına göre değişimi gözlenmeye çalışılır. Konum açısı (β), anizotropi düzleminin düşey ile yaptığı açı olarak tanımlanır (Şekil 3.1). Kayaların gerilmeler altındaki davranışı, bünyesel yapılarına bağlı olmaktadır. Şekil 3.2'den de görülebileceği gibi, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı zarfı, tek bir yenilme düzlemi ve çoklu yenilme düzlemi durumları için farklı olmaktadır.

Burada, silindirik şeklindeki örnek üzerinde etkili olan σ_1 , eksenel gerilme, σ_2 ve σ_3 ise yanıl basın olup, sırası ile en yüksek, ortanca ve en düşük asal gerilmelerdir.

Konum açısı ile tek eksenli basınç dayanımı arasında çizilen eğrinin şekli, basınç dayanımı anizotropisinin doğasını tanımlar (Ramamurthy et al, 1993). Bu eğrinin şekli değerlendirilerek maksimum ve minimum basınç dayanımlarının değerleri ve kritik konum açıları belirlenebilir. Basınç dayanımı ve konum açısı arasında çizilen eğrinin şekline göre üç tip anizotropiden söz edilebilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.1 Konum açısının (β) tanımı (Ramamurthy et al., 1985).



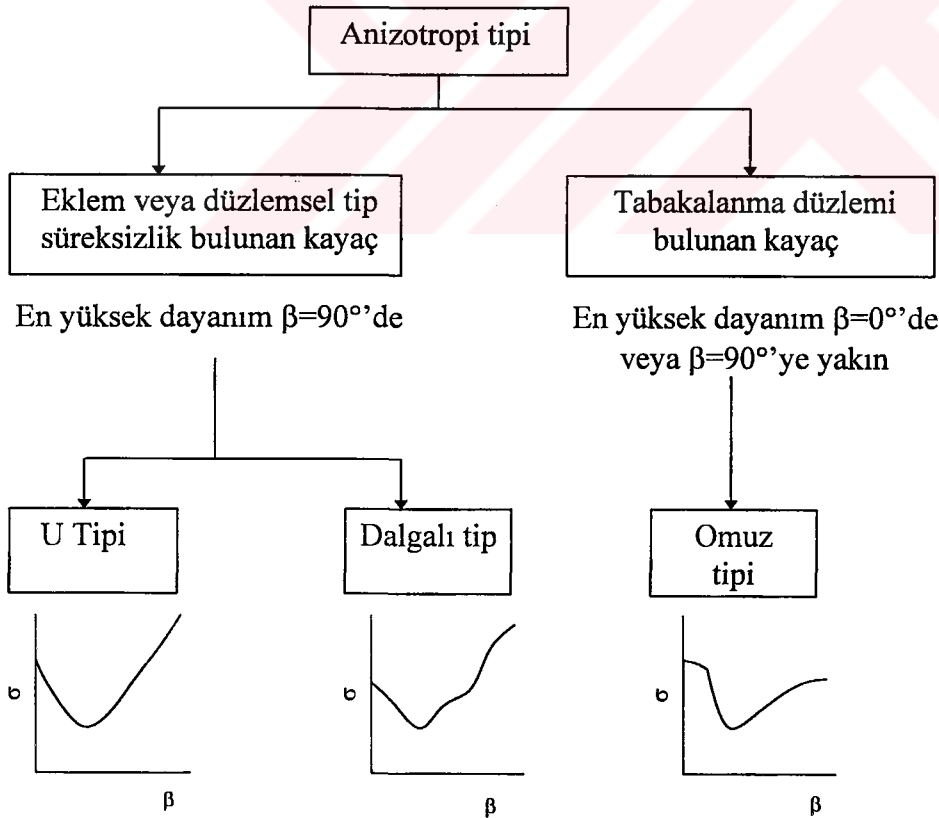
Şekil 3.2 Kaya malzemesinde gözlenen anizotropi modelleri ve bu modeller için yenilme zarfları (Ramamurthy et al., 1993)

Bunlar;

- a. U tipi dayanım anizotropisi,
- b. omuz tipi dayanım anizotropisi ve
- c. dalgalı tip dayanım anizotropisi'dir.

U tipi anizotropide, tek eksenli basınç dayanımının en yüksek (σ_{cmax}) değeri, β 'nın 0° veya 90° olduğu açılarda elde edilirken, en düşük (σ_{cmin}) olduğu değer ise yaklaşık olarak 30° 'de elde edilir. Bu tip anizotropi yapraklanma gösteren sleyt türü kayalarda yaygın olarak görülür (Ramamurthy, 1993).

Omuz tipi anizotropide, daha çok şeyl ve kumtaşı türü kayalarda, β 'nın düşük ve yüksek değerlerinde dayanımın hemen hemen sabit kaldığı görülür. Bu kayalarda σ_{cmin} değeri β 'nın 15° ile 30° arasında olduğu durumda ortaya çıkar (Ramamurthy, 1993).



Şekil 3.3 Kayalarda gözlenen anizotropi tipleri (Ramamurthy, 1993).

Dalgalı tip anizotropi diatomit ve kömür gibi veya tuğla duvar yapısındaki çok sayıda süreksizlik içeren kayalarda görülmektedir. σ_{cmax} , β 'nın 90° olduğu, σ_{cmin} ise β 'nin 30° olduğu durumda görülür (Ramamurthy, 1993).

Anizotropinin tanımlanmasında kullanılan diğer yöntem anizotropi oranıdır. Anizotropi oranı, $0^\circ - 90^\circ$ arasında değişik konum açılarında elde edilen tek eksenli basınç dayanımı değerlerinden, 90° 'deki basınç dayanımının (σ_{c90}), elde edilen en düşük basınç dayanımına (σ_{cmin}) oranlanması ile belirlenir. Bu değere göre kayalar izotropiklik ile çok yüksek anizotropi arasında sınıflandırılırlar (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Kayaların anizotropi oranına göre sınıflaması (Ramamurthy, 1993).

Anizotropi Oranı	Anizotropi Tanımı	Örnek Kaya Tipi
1.0 - 1.1	İzotropik	Kumtaşı
1.1 - 2.0	Düşük Anizotropi	
2.0 - 4.0	Orta Anizotropi	Şeyl
4.0 - 6.0	Yüksek Anizotropi	Sleyt ve fillit
> 6.0	Çok Yüksek Anizotropi	

Anizotropik kayaların değişik konum açlarındaki dayanım değerlerini belirlemek amacıyla, bazı ölçütler önerilmiştir. Bu amaçla Jaeger (1979) yanal basınçların söz konusu olduğu durum için Coulomb yenilme ölçütünü aşağıdaki gibi tekrar yazmıştır.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2(c + \sigma_3 \tan \phi)}{(1 - \tan \phi \tan \beta) \sin 2\beta} \quad (1)$$

Bu eşitlikte; σ_1 = en yüksek asal gerilme (Pa); σ_3 = yanal basınç (Pa); c, kohezyon (Pa) ve ϕ de malzemenin içsel sürtünme açısıdır.

Tek eksenli basınç dayanımının tahmini için yukarıdaki eşitlikte σ_3 yerine 0 konulursa;

$$\sigma_1 = \frac{2c}{(1 - \tan \phi \tan \beta) \sin 2\beta} \quad (2)$$

elde edilir. Ancak bu eşitliğin kullanılabilmesi için her bir β konumunda üç eksenli deneyler yapılarak c ve ϕ değerlerinin belirlenmesi gerekir.

Bir tek zayıflık düzlemine sahip sleyt ve fillit gibi U tipi anizotropi gösteren kayalar için Ramamurthy ve arkadaşları (1993) aşağıdaki eşitliği önermişlerdir.

$$\sigma_c = B - H[\cos 2(\beta_{\min} - \beta)] \quad (3)$$

Bu eşitlikte B ve H sabit sayılar olup, 0° , 30° ve 90° konum açılarındaki tek eksenli basınç dayanımı değerleri belirlendikten sonra, 0° ve 30° 'deki değerlerden B sabiti, 30° ve 90° değerlerinden de H sabiti hesaplanır.

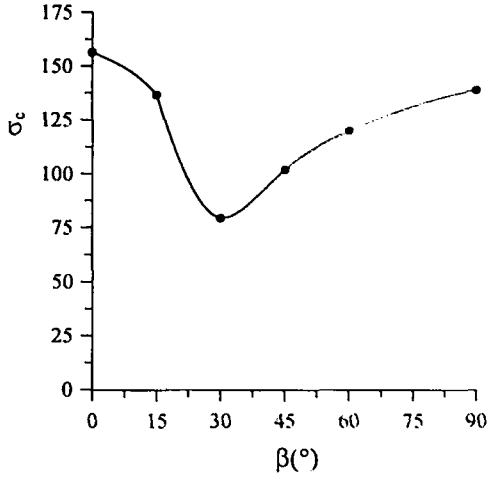
3.1.2 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyleri

Zonguldak Endüstri Destekleme Merkezi (ZEDEM) Uygulamalı Kaya Mekaniği Laboratuvarında dikkatli bir şekilde hazırlanan, yaklaşık olarak 2:1 yükseklik-çap oranına sahip en az 5 adet örnek, tek eksenli yük altında kırılmıştır. Yapılan deney sayısı 263 olup, bunlardan 41 tanesi değişik nedenlerle geçersiz kabul edilerek değerlendirmeye alınmamıştır. Deney sonuçları Çizelge 3.2'de sunulmuştur. Bu deney sonuçlarına göre kumtaşları ve siltaşlarının anizotropi tipleri Şekil 3.4'de sunulduğu gibi elde edilmiştir.

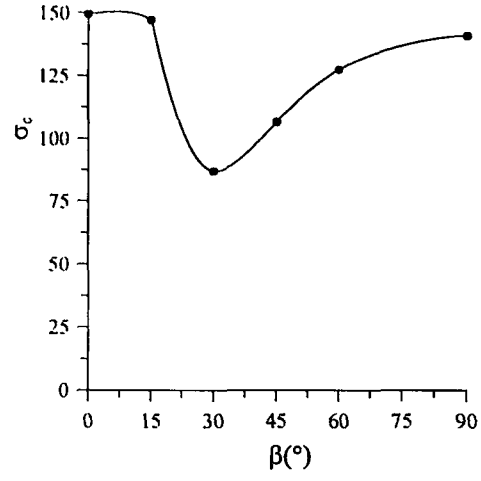
Çizelge 3.2'de verilen deney sonuçlarından $\sigma_{c90}/\sigma_{c\min}$ oranları hesaplanarak, kayalarda tek eksenli basınç dayanımı anizotropisinin derecesi belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 3.3'de topluca sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Tek eksenli basınç dayanımı (MPa) deney sonuçları.

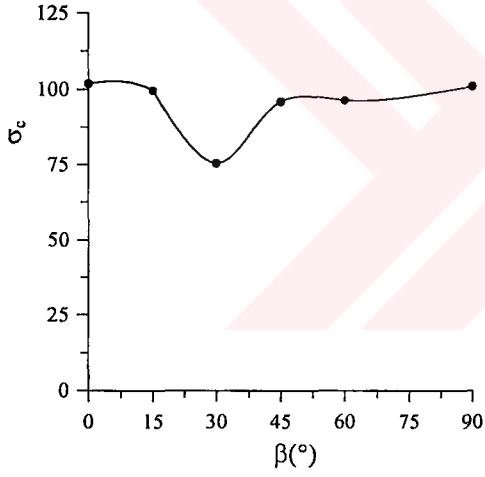
Kayaç Tanımı		Konum Açısı (β)					
Alındığı Yer	Kayaç Türü	0°	15°	30°	45°	60°	90°
Acenta Tv. I	Kumtaşı	156.5±30.8	154.0±18.1	79.4±8.3	101.9±5.9	120.0±11.5	138.9±27.5
Acılık Tb.	Kumtaşı	149.4±7.3	147.2±18.8	86.8±10.3	106.6±7.4	127.4±8.9	141.0±9.1
Büyük Tv.	Kumtaşı	101.9±9.7	99.6±9.55	75.4±8.5	95.9±5.4	96.3±9.7	101.0±10.1
Çay Tv	Kumtaşı	121.3±9.8	--	126.0±7.7	145.2±21.8	145.3±18.2	144.4±21.8
Çay Tb	Kumtaşı	143.8±11.3	111.5±15.6	85.2±4.8	101.4±4.5	118.5±4.8	131.0±13.3
Domuzcu Tb. II	Kumtaşı	135.8±16.3	135.5±1.0	114.7±10.1	108.0±8.7	127.5±11.3	132.7±8.7
Domuzcu Tb. I	Kiltaşı	38.5±7.2	--	14.5±5.6	18.6±4.7	31.6±2.3	44.1±6.9
Nasufoglu Tv	Silttaşı	72.7±5.8	--	36.3±4.9	51.0±11.2	60.2±5.2	70.6±5.3
Sulu Tv	Silttaşı	85.5±12.1	--	44.0±7.6	47.8±12.4	60.3±8.0	101.2±17.0



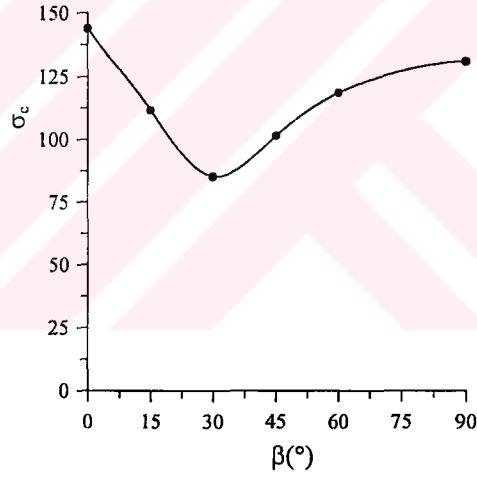
a. Acenta damarı Tv. Taşı I (kumtaşı)



b. Acılık damarı Tb. Taşı (kumtaşı)

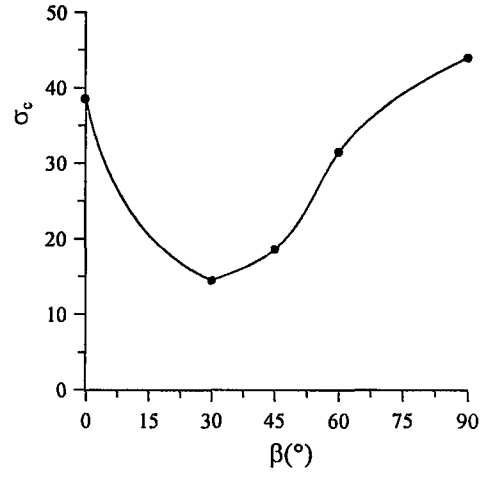
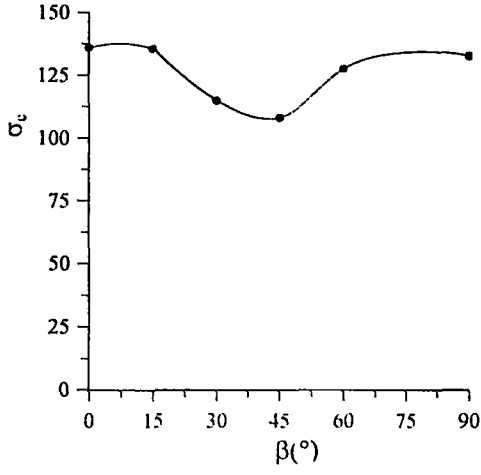


c. Büyük damar Tv. Taşı (kumtaşı)



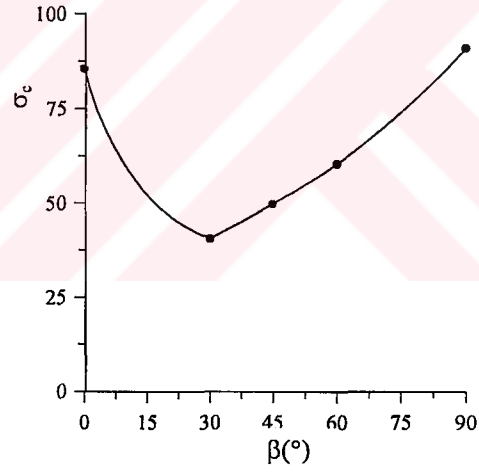
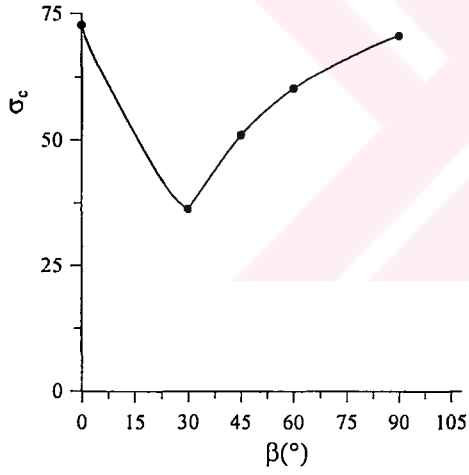
d. Çay damarı Tb. Taşı (kumtaşı)

Şekil 3.4 Tek eksenli basınç dayanımının konum açısı ile değişimi.



e. Domuzcu damarı Tb. II Taşı (kumtaşı)

f. Domuzcu damarı Tb. I (kiltası)



g. Nasufoğlu Damarı Tv. (silttaşı)

h. Sulu damarı Tv. Taşı (silttaşı)

Şekil 3.4 (devam ediyor).

Şekil 3.4'ten de görülebileceği gibi kumtaşlarında 'omuz tipi' anizotropi, silttaşlarında ise, daha çok 'U tipi' anizotropi vardır. Tek eksenli basınç dayanımı, ölçülen konum açıları arasında genellikle 30°'de en düşük değeri almaktadır. En yüksek değere ulaştığı β değeri ise, kumtaşlarında bazen 0° bazen de 90°'de, silttaşlarında ise genellikle 90°'de görülmektedir.

Çizelge 3.3'de sunulan verilere göre, kumtaşlarının anizotropi oranı, 1.15 ile 1.75 arasında değişmektedir. Kumtaşları için ortalama değer olarak 1.5 verilebilir. Ancak burada, anizotropi oranının belirlenmesinde σ_{c90} ve σ_{cmin} kullanılmıştır. σ_{c90} 'ın kullanılmasının nedeni, laboratuvarda yapılan çalışmalarda karotların tabakalanmaya dik olarak alınarak tek eksenli deneylerinin bu konumda yapılması ve dolayısı ile değerlendirmelerde σ_{c90} 'ın kullanılıyor olmasıdır. Bu durum, σ_c 'nin genellikle 90°'de maksimum yapmasından kaynaklanmaktadır. Fakat bazı kayalarda bu her zaman geçerli olmamaktadır. Burada yapılan çalışmalarda maksimum σ_c genellikle 0°'de elde edilmiştir. Hesaplama, σ_{c90} yerine σ_{cmax} kullanılırsa, elde edilen anizotropi oranı değerlerinde, bazı kayalarda % 10' kadar değişim olmaktadır (Çizelge 3.3). Buradaki değişimler, anizotropiklik derecesinin düşük olması nedeni ile çok büyük önem taşımamaktadır. Fakat, anizotropi derecesinin yüksek olması durumunda önemli farklılıklar olabileceği düşünülerek, σ_{cmax} 'un kullanılması yararlı olabilir.

Çizelge 3.3'deki değerlere göre, kumtaşlarının anizotropi derecelerinin, düşük olduğu görülmektedir. Bu çalışmadaki en yüksek anizotropi oranı, 3.04 ile Domuzcu Tb. I taşına ait kiltası örneğinde elde edilmiştir, bu kayaç orta derecede anizotropiktir. Çalışmada değerlendirilen iki silttaşında ise anizotropi oranı 2.0 ve 2.3 olarak bulunmuştur. Bu değerler, silttaşlarında kiltaslarındaki kadar kuvvetli anizotropinin olmadığını ortaya koymaktadır. Kiltasları ve silttaşlarının, genel olarak orta derecede anizotropik oldukları söylenebilir. Zira σ_{cmax} 'lar incelendiğinde silttaşlarının dayanımlarının bazı kumtaşlarına yakın olduğu görülmektedir. Bu kayalar, ISRM tarafından yapılan sınıflamaya göre "yüksek dayanım" sınıfına girmektedirler.

Çizelge 3.3 Kayaçların anizotropi oranları ve anizotropi dereceleri.

Kayaçın alındığı yer	Kayaçın Türü	Anizotropi oranı		Anizotropi derecesi
		$\sigma_{c90}/\sigma_{cmin}$	$\sigma_{cmax}/\sigma_{cmin}$	
Acenta Tv. I	Kumtaşı (İnce taneli)	1.75	1.97	Düşük Anizotropi
Acılık Tb.	Kumtaşı (İnce taneli)	1.62	1.72	Düşük Anizotropi
Büyük Tv.	Kumtaşı (Orta taneli)	1.34	1.35	Düşük Anizotropi
Çay Tb.	Kumtaşı (İnce taneli)	1.15	1.15	Düşük Anizotropi
Çay Tv.	Kumtaşı (Kaba taneli)	1.54	1.69	Düşük Anizotropi
Domuzcu Tb. II	Kumtaşı (Orta taneli)	1.23	1.29	Düşük Anizotropi
Domuzcu Tb. I	Kiltaşı	3.04	3.04	Orta Anizotropi
Nasufoglu Tv.	Silttaşı	1.94	2.00	Orta Anizotropi
Sulu Tv.	Silttaşı	2.3	2.3	Orta Anizotropi

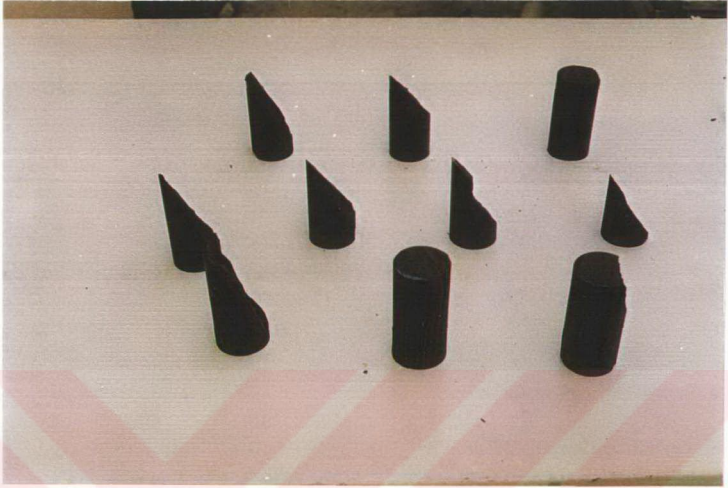
* $\sigma_{cmax}/\sigma_{cmin}$ değerine göre

Yenilme tipi açısından incelendiğinde; genel olarak kumtaşılarının, alt ve üst yüzeylerinin hemen kenarından başlayan ve karotu boydan boya kesen bir kayma düzlemi boyunca yenildiği söylenebilir (Şekil 3.5). Bu kayma düzleminin açısı tabakalanmadan tamamen bağımsız olmuştur. Çok ender olarak, tabakalanma düzlemi boyunca kayma gözlenmiştir.

Kiltaşıları ile silttaşında gözlenen yenilme tipi ise, β 'nın 0° ve 90° 'den farklı olduğu durumlarda, yapraklanma düzlemi boyunca kayma şeklinde olmuştur. Tabakalanmaya paralel ($\beta=0$) olarak alınan örneklerde, alt ve üst yüzeyler arasında meydana gelen çekme çatlakları boyunca yenilme gözlenmiştir. Tabakalanmaya dik olarak hazırlanan örneklerde ise yenilme, kumtaşılarında olduğu gibi, bir kayma yenilmesi şeklinde olmuştur (Şekil 3.6).



Şekil 3.5. Kumtaşılarında gözlenen yenilme şekilleri.

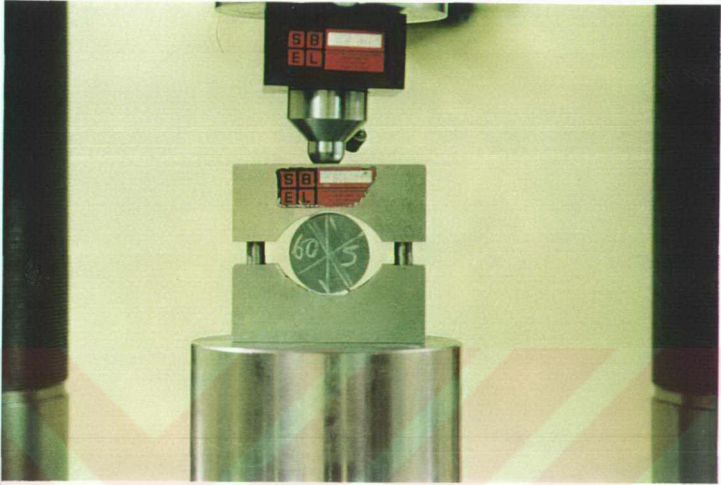


Şekil 3.6 Silttaşlarında gözlenen yenilme şekilleri.

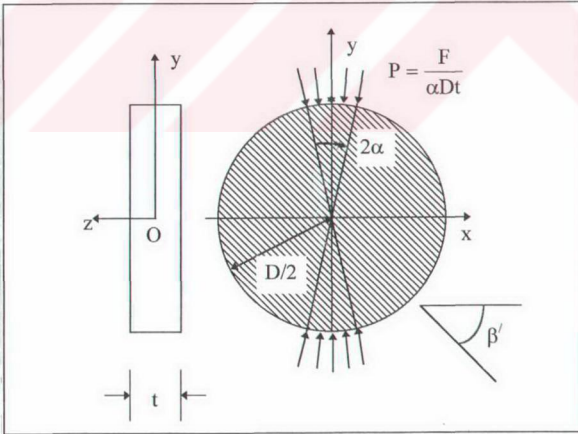
3.2 DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI

Kayaçların çekme dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan en yaygın yöntem Brezilya yöntemi olarak bilinen dolaylı çekme dayanımı deneyidir. Bu yöntemin tercih edilmesinin en önemli nedenleri, örnek hazırlamanın kolay olması, deney aletinin basit olması ve deney sonuçlarının tekrarlanabilir olmasıdır. Malzemelerin çoğu, oluşan çekme veya kayma gerilmelerinin, malzemenin karakteristik değerini aşması sonucu yenilmesine rağmen özellikle kayaçların dayanımı, tek eksenli basınç dayanımı ile temsil edilir. Fakat çekme dayanımı birçok pratik uygulamada ilgi gösterilen ve ihtiyaç duyulan bir parametredir.

ISRM (1977a) tarafından standart deneylerden biri olarak, dolaylı çekme dayanımı (Brezilya) yöntemi önerilmektedir. Bu yöntem için önerilen deney aleti Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu yöntemde, disk şeklindeki örnek üzerine, alt ve üst başlıklar arasında kalan düşey çap boyunca yük uygulanmaktadır (Şekil 3.8).

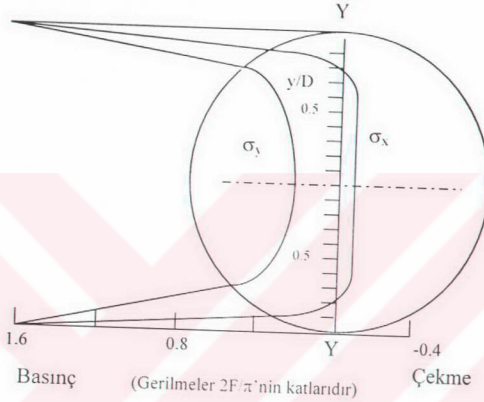


Şekil 3.7. Dolaylı çekme dayanımı deney aleti.



Şekil 3.8 Disk örneğinin çapsal yükleme durumu.

Önerilen deney aleti bu yükün, merkezi gören 10° açığa sahip bir yay boyunca uygulanmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Uygulanan bu yük teorik olarak, örneğin orta kısmında, düşey çapa dik yönde çekme gerilmesi oluşturmaktadır. Deney esnasında disk örneğinde düşey çap boyunca oluşan gerilmeler Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Dolaylı çekme dayanımı deneyinde disk örneğinde oluşan gerilmelerin dağılımı (Hondros, 1959; Hudson'dan, 1969).

Diskin çevre yüzünde merkezi gören 10° 'lik bir yay boyunca yük uygulandığında, diskten orta noktasında oluşan en büyük çekme gerilmesi, kayacın yenilmesine neden olmaktadır. Yenilmeye neden olan çekme gerilmesinin büyüklüğü Eşitlik 4 (Hudson, 1969) yardımı ile hesaplanabilir. Ancak bu noktada aynı zamanda düşey konumda basınç gerilmeleri de bulunmaktadır. Bu nedenle deney, saf çekme deneyi olmamaktadır.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi D t} \quad (4)$$

Burada; σ_t , çekme dayanımı (MPa); F, uygulanan maksimum yük (N); D, örnek çapı (mm) ve t, örnek kalınlığıdır (mm).

Hondros (1959), disk şeklindeki elastik-izotropik bir malzemeye F yükü uygulandığında disk yüzeyinde oluşan basıncın Eşitlik 5 yardımı ile belirlenebileceğini göstermiştir (Hudson'dan, 1969).

$$P = \frac{F}{\alpha D t} \quad (5)$$

Bu basıncın belirlenmesi sonucunda, diskin merkezinde oluşacak düşey konumlu basınç ve yatay konumlu çekme gerilmeleri de sırası ile Eşitlik 6 ve 7'den hesaplanabilir (Hondros'dan, 1959).

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi} (\sin 2\alpha - \alpha) \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi} (\sin 2\alpha + \alpha) \quad (7)$$

Burada α , radyan cinsinden olmaktadır.

Dolaylı çekme dayanımı deney aletine uygun olarak, 2α , 10° alındığında, disk şeklindeki örneğin merkezinde oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin oranı (σ_x/σ_y), 3.02 olarak elde edilmektedir.

Ancak, anizotropi gösteren kayalarda, çekme dayanımının hesaplanması için Eşitlik 5'in kullanılmasının doğru olmayacağı açıktır. Bu amaçla, Eşitlik 7 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$\sigma_y = q \cdot P \quad (8)$$

Burada q , elastik izotropik koşullarda $2\alpha=10^\circ$ için, değeri 0.08277 olan ve anizotropi koşullarına göre değeri değişen bir sayıdır.

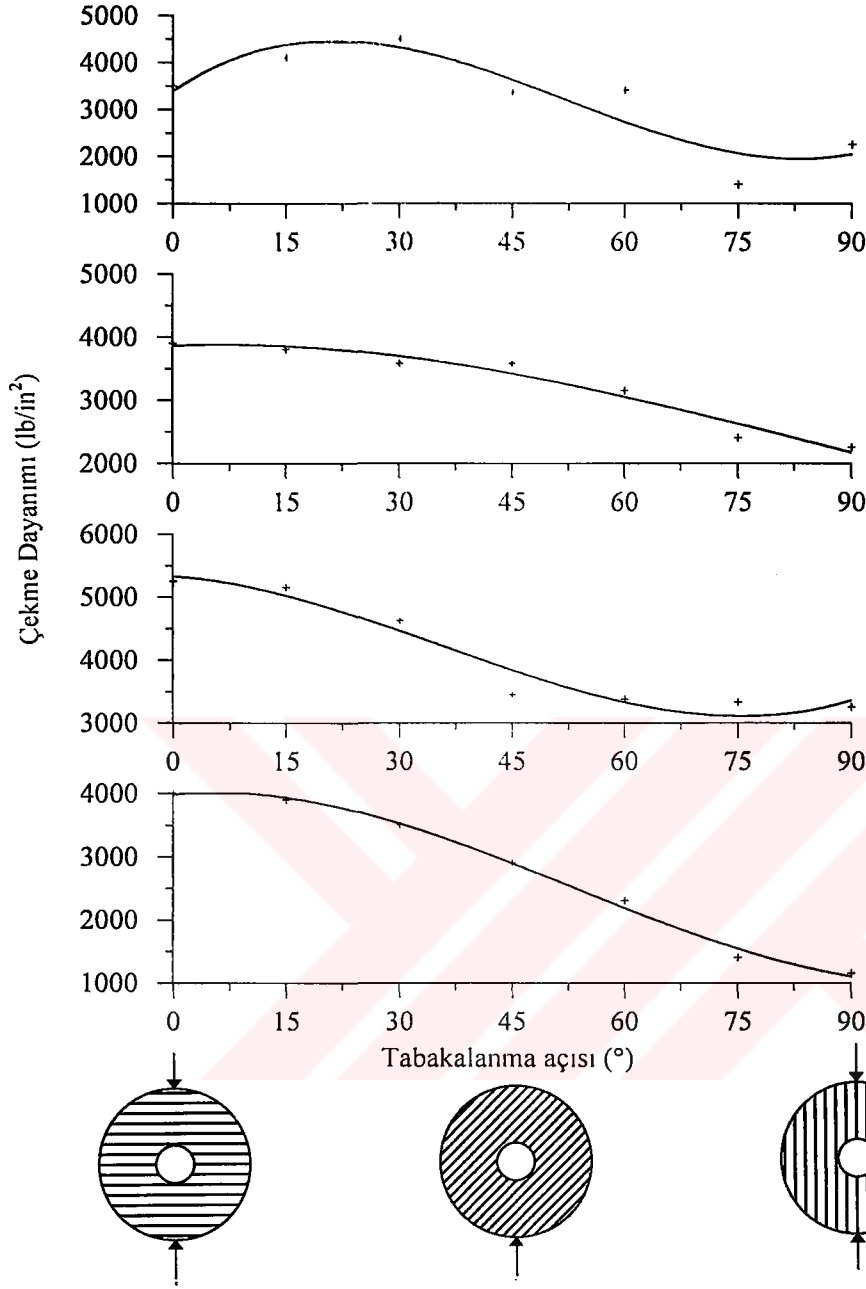
Kaya mekaniğinde dolaylı çekme dayanımı yönteminin, dayanımı yüksek olan kayalarda kullanılabileceği görüşü yaygındır (Pells, 1993).

Dolaylı çekme dayanımı yönteminin doğrudan yöntemle göre avantajları vardır. Bunların bazıları; kullanılan örnek boyunun kısa olması sayesinde kısa karotlar üzerinde uygulanabilir olması, örnek hazırlamanın kolay olması ve deney aletinin çok basit olmasıdır . Ayrıca, tek eksenli basınç dayanımı ile dolaylı çekme dayanımı arasında farklı kayaç türleri için ilişkiler kurulabilir (Pells,1993).

3.2.1 Anizotropik Kayalarda Dolaylı Çekme Dayanımı

Dolaylı çekme dayanımı yöntemin uygulanmasında araştırmacıların ilgi gösterdiği en önemli konu anizotropik özellik gösteren kayaçların yenilme davranışdır. Bu konu, yöntemin bir sınırlaması olarak ortaya atılmış ve bir çok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bu çalışmaların sonuçlarına göre, dolaylı çekme yönteminin yumuşak kayaçlardan çok sert kayaçlarda kullanılabileceği şeklinde görüş oluşmuştur (Pells, 1993). Hoek (1977) çekme dayanımının, tek eksenli basınç dayanımının %15'inden daha büyük olması durumunda dolaylı yöntemin uygulanamayacağını ileri sürmüştür (Pells'den, 1993). Pells (1993), tek eksenli çekme dayanımı 5 MPa'dan daha büyük olan kayalarda bu yöntemin kullanılabileceğini belirtmiştir.

Hobbs (1964), ortası delikli diskler üzerinde yaptığı çalışmalarda, yapraklanmanın (laminasyon) çekme dayanımı üzerindeki etkisini de araştırmıştır. Bu çalışmada 0° 'den 90° 'ye kadar 15° 'lik artışlarla değişik açılarda örnekler hazırlanmış ve test edilmiştir. Silttaşları ve çamurtaşları üzerinde yapılan deney sonuçları maksimum çekme dayanımının genellikle 0° 'de, minimum çekme dayanımın ise 90° 'de elde edildiğini göstermiştir (Şekil 3.10).

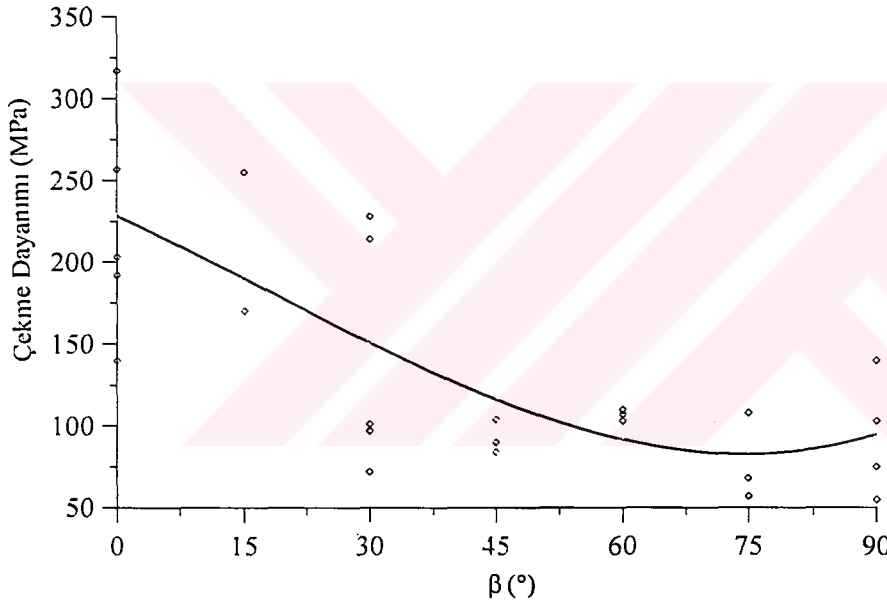


Şekil 3.10 Konum açısı ile çekme dayanımının değişimi (Hobbs, 1964).

Barla ve Innaurato (1973) düzlemsel izotropi gösteren granodioritik gnays ve serpantinli sişt örnekleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda, anizotropi düzleminin konumu ile dolaylı çekme dayanımı deney sonuçlarını ilişkilendirmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmanın deney sonuçlarına göre, dolaylı çekme dayanımının hesaplandığı görgül bağıntıdaki $2/\pi$ (0.6366) değerinin, β ile değiştiğini göstermişlerdir. Buna göre E_1/E_2 değeri 1.12 olan

kayaçlarda, bu değer β' 'nin 0° 'den 90° 'ye doğru değişmesi durumunda sırasıyla 0.634 ile 0.590 arasında değer almaktadır.

Bu çalışmada ayrıca, her iki tip kayaçta çekme dayanımının konum açısına bağlı olduğu ve minimum değerlerin, şistlerde 60° gnayslarda ise 75° 'de elde edildiği belirtilmiştir (Şekil 3.11). Fakat iki kayacın yenilme davranışının farklı olduğu görülmüştür. Gnays örnekleri, yük uygulanan çap boyunca yenilirken, şist örnekleri tabakalanma düzlemleri boyunca yenilmektedir. Şistlerde karşılaşılan bu yenilme durumu, çekme dayanımının hesaplanmasında kullanılan formülün bu durumda kullanılamayacağı kuşkusunu ortaya çıkarmıştır.



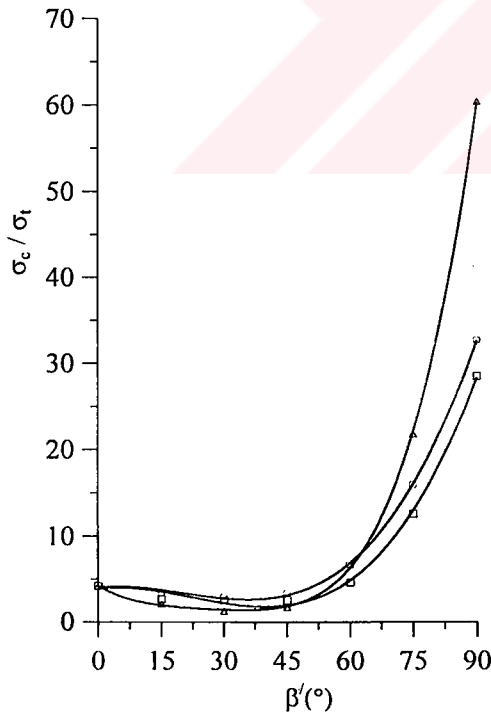
Şekil 3.11 Serpantinli şist örneklerinde çekme dayanımının β' ile değişimi (Barla and Innaurato, 1973).

Orr (1981), tek zayıflık düzlemi içeren kayaçlar üzerinde yaptığı tek eksenli çekme dayanımı deney sonuçlarına göre, bu düzlem üzerindeki çekme dayanımının $\beta=45^\circ-\phi/2$ 'de minimum olduğunu belirtmiştir. Yine bu çalışmada, mevcut düzlem üzerindeki çekme dayanımının Eşitlik 9'a uygun olarak değiştiği belirtilmiştir.

$$\sigma_t = \frac{c_{eklem}}{\sin 2\beta (1 + \cot \beta \tan \phi)} \quad (9)$$

Burada; c_{eklem} , eklemin kohezyonu (Pa), β' ise, eklemin yatay ile yaptığı açıdır.

Ramamurthy vd. (1993) fillitler üzerinde yaptıkları çalışmalarda β' ile çekme dayanımının değişimini inceledikleri çalışmalarında, maksimum çekme dayanımının $\beta'=0^\circ$ 'de ve minimum çekme dayanımının ise $\beta'=90^\circ$ 'de elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, basınç dayanımı ile çekme dayanımı oranının (σ_c/σ_t) β' ile değişiminin ilginç olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.12). Bu ilişkiye göre β' , 60° 'den 90° 'ye doğru artarken σ_c/σ_t oranında hızlı bir artma gözlenmektedir. Bu artış miktarı kayaçların anizotropiklik oranı ile artma eğilimindedir. Bu nedenle Ramamurthy ve arkadaşları σ_{c0}/σ_{t90} oranının, kayaçlardaki dayanım anizotropisinin bir göstergesi olabileceğini ileri sürmüşlerdir



Şekil 3.12 Fillitlerde basınç dayanımı/çekme dayanımı oranının β' ile değişimi (Ramamurthy et al, 1993).

Hwong ve Nihei (1995), düzlemsel izotropi gösteren dolomit, kumtaşı ve kireçtaşları üzerinde yaptıkları çalışmalarda, Brezilya çekme dayanımı deneylerinde elde ettikleri sonuçlara dayanarak, dolomit ve kireçtaşlarında dayanım anizotropisi görülmediğini fakat, kumtaşlarında sonuçların farklı olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlara göre, tabakalanmaya paralel yükleme yapılması durumunda, tabakalanmaya dik yükleme yapılması durumunda elde edilenden yaklaşık % 30 daha düşük bir değer elde edilmektedir.

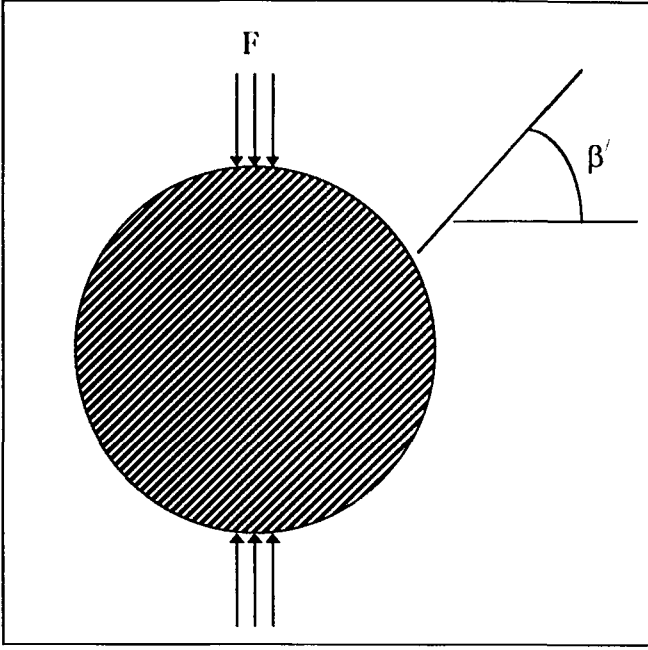
Chen vd. (1996), belirgin olarak tabakalanma düzlemleri içeren kumtaşı ve şeyl üzerinde yaptıkları çalışmalarda izotropik kayaçlar için geçerli olan, çekme dayanımının hesaplanmasında kullanılan eşitliğin anizotropik kayaçlarda geçerli olamayacağını belirtmişlerdir. Bu araştırmacılara göre düzlemsel izotropik ve ortotropik kayaçlarda aşağıdaki eşitlik geçerlidir.

$$\sigma_t = q \frac{F}{\pi D t} \quad (10)$$

Buradaki q , beş elastik sabite bağlı olarak açıklanan gerilme yığılması katsayısı olarak tanımlanmaktadır. $\alpha=0^\circ$ için, kaya izotropik olduğunda veya örnekler düzlemsel izotropi düzlemine paralel olarak kesildiğinde q , 2 değerini almaktadır. Araştırmacılar kumtaşlarında yaptıkları çalışmalarda, en büyük çekme dayanımını $\beta'=0^\circ$ 'de gösteren kayaçlarda, 0° 'den 90° 'ye doğru değişik konum açıları için bu değer 2.050 ile 1.898 arasında değiştiğini bulmuşlardır.

3.2.2 Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyleri

Daha önce sözü edilen yerlerden alınarak hazırlanan örnekler üzerinde, dolaylı çekme dayanımı deneyi yapılmıştır. Bu deneylerde anizotropi düzleminin konumundaki (β' : anizotropi düzleminin yatay ile yaptığı açı) (Şekil 3.13) değişimin çekme dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlandığından, anizotropi düzlemi dikkate alınarak örnekler deney aletine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.13 Brezilya deneyinde β açısının tanımı.

Deney için yaklaşık 2.0-3.0 cm kalınlıktaki disk şeklindeki örnekler, yan yüzeylerine uygulanan kaba düzeltme işleminden sonra dolaylı çekme dayanımı deneyinde kullanılmışlardır. Deneylerde 5 ile 8 arası örnek test edilerek ortalama dolaylı çekme dayanımı değeri, Eşitlik 4 kullanılarak belirlenmiştir.

Bu deney sonuçlarında iki durum ayırt edilmektedir. Birincisinde deneyde beklenen yenilme şekline uygun olarak, iki yükleme noktasından geçen düzlem boyunca yenilmedir. Bu tip yenilme kumtaşlarında bütün konum açılarında, silttaşlarında ise yalnızca 0° ve 90° 'lik konum açılarında açıkça görülmüştür. Ancak muhtemel yenilme düzleminin tabakalanma düzlemine paralel olarak oluştuğu silttaşlarında, 0° ve 90° 'den farklı bütün konum açılarında, yenilme düzlemi yükleme noktalarından geçmemektedir. Bu durumda sonuçların tam olarak kayaların dolaylı çekme dayanımını temsil etmeyeceği açıktır.

Zayıf tabakalanma düzlemleri içeren silttaşlarında, 0° ve 90° 'den farklı açılarla yükleme yapıldığında, örnekler, bu düzlemler boyunca meydana gelen kayma

sonucu yenilmektedir. Elde edilen değer kaya malzemesinin minimum dayanımını temsil etmektedir. Bu özelliği ile anizotropinin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Ancak dolaylı çekme dayanımı değeri olarak yorumlamamak gerekir.

Bu olumsuzluğu gidermek amacı ile kayaçların dolaylı çekme dayanımlarının düzeltilmiş değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun için, FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) (ITASCA, 1995), sayısal gerilme analizi programı kullanılarak çözümlmeler yapılmıştır. Her bir kayaç için laboratuvar çalışmalarında belirlenen özellikler kullanılarak, Eşitlik 8’de verilen q katsayısı 0°, 30°, 45°, 60° ve 90° için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu analizde, kayaçlar için düzlemsel izotropi modeli kullanılmıştır. Böylece elde edilen katsayılar yardımı ile düzeltilmiş çekme dayanımı verileri elde edilmiştir. Dolaylı çekme dayanımı verilerini düzeltmek için kullanılan katsayılar Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları düzeltme katsayıları.

Alındığı Yer	Kayaç Türü	$\beta' (^{\circ})$				
		0	30	45	60	90
Acenta tv	Kumtaşı	0.1633	0.1752	0.1764	0.1614	0.1277
Acılık tb	Kumtaşı	0.1662	0.1687	0.1705	0.1615	0.099
Büyük tv	Kumtaşı	0.1601	0.1755	0.1759	0.1629	0.1309
Çay tb	Kumtaşı	0.1575	0.1638	0.1666	0.1598	0.1447
Domuzcu tb II	Kumtaşı	0.1617	0.1627	0.1623	0.1597	0.1604
Domuzcu tb I	Kiltaşı	0.1619	0.1767	0.1822	0.1571	0.1224
Nasufoğlu tv	Siltaşı	0.1597	0.1703	0.1733	0.1340	0.1418

Yapılan dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları ile düzeltilmiş değerler Çizelge 3.5’de sunulmuştur. Bu değerleri belirlemek amacı ile yapılan toplam deney sayısı 252’dir.

Çizelge 3.5 Brezilya çekme dayanımı (MPa) deney sonuçları.

		Konum Açısı (β')									
Alındığı Yer	Kayaç Türü	0°		30°		45°		60°		90°	
		σ_t	σ_t^*	σ_t	σ_t^*	σ_t	σ_t^*	σ_t	σ_t^*	σ_t	σ_t^*
Acenta Tv	Kumtaşı	10.9±0.	10.7±0.	13.1±0.	13.7±0.	12.2±0.	12.9±0.	13.1±1.	12.1±2.	11.2±1.2	8.6±0.9
Acılık Tb	Kumtaşı	11.0±1.	10.5±1.	10.4±0.	10.5±0.	8.0±1.5	8.2±1.5	6.4±1.5	6.2±1.4	7.2±0.6	6.2±0.5
Büyük Tv	Kumtaşı	6.5±0.4	6.2±0.4	5.5±0.6	5.8±0.6	6.0±0.5	6.3±0.5	6.6±0.9	5.8±0.4	4.7±.5	3.7±0.4
Çay Tb	Kumtaşı	10.6±1.	10.0±1.	9.3±0.2	9.1±0.4	10.4±0.	10.4±0.	9.3±1.2	9.1±0.9	8.5±0.4	7.4±0.4
Domuzcu Tb II	Kumtaşı	9.7±1.2	9.4±1.1	9.0±0.2	8.8±0.2	10.4±0.	10.1±0.	9.0±0.9	8.6±0.8	8.9±0.7	8.4±0.7
Sulu Tb II	Kumtaşı	14.7±1.	--	14.5±2.	--	12.5±1.	--	10.8±1.	--	7.9±1.2	--
Domuzcu Tb I	Kiltaşı	8.7±1.4	8.5±1.3	5.0±1.1	5.3±1.2	4.5±0.9	4.9±0.9	3.9±0.4	3.8±0.3	4.5±0.7	3.2±0.5
Sulu Tv.	Silttaşı	10.0±1.	--	9.0±1.2	--	8.9±0.5	--	6.3±0.8	--	6.8±1.3	--
Sulu Tb. I	Kiltaşı	11.1±0.	--	10.0±1.	--	6.0±1.5	--	4.1±0.7	--	5.5±1.2	--
Nasufoglu Tv	Silttaşı	9.6±1.0	8.5±1.0	7.3±1.2	7.5±0.6	5.2±0.6	5.4±0.6	4.1±1.4	4.0±1.2	5.6±0.9	4.5±0.8

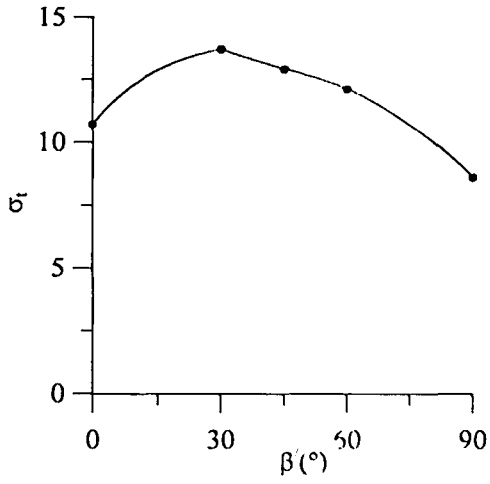
* : FLAC analizi sonucunda hesaplanan düzeltilmiş çekme dayanımı değerleri

Çizelge 3.5’de sunulan verilere göre, Eşitlik 4 kullanılarak elde edilen değerler ile düzeltilmiş değerler arasında, özellikle $\beta=60^\circ$ ve 90° ’de önemli derecede farklılıklar vardır. Bu fark, anizotropi oranına bağlı olarak % 28’e kadar çıkabilmektedir. Örneğin, en yüksek tek eksenli basınç dayanımı anizotropisi gösteren, Domuzcu tb I taşında (kıltaşı) fark, % 28.8 olmaktadır. Nasufoğlu tv taşında (silttaşı) fark % 20’ye yakındır. Kumtaşlarında ise, % 20’nin üzerinde değişimler görülebilmektedir. Bu değerler, $\beta=60^\circ$ ve 90° için farklılığın önemli boyutlarda olduğunu göstermektedir. β ’nın diğer değerlerinde ise, farklar çok önemli çıkmamaktadır. Yine de, sonuçlar, anizotropik kayalarda Eşitlik 4’ün kullanımında dikkatli olunması gerektiğini göstermiştir.

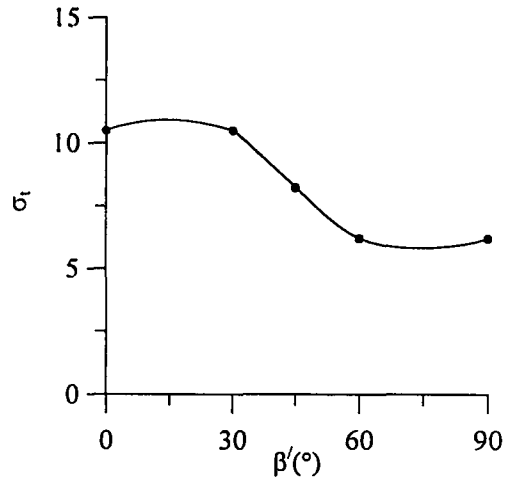
Değişik kayalarda elde edilen, düzeltilmiş çekme dayanımı verilerinin β' ile değişimi, Şekil 3.14’de sunulmuştur. Kumtaşlarına ait değişimler incelendiğinde, genel olarak en yüksek çekme dayanımın $\beta'=0^\circ$ ’de, en düşük çekme dayanımın ise $\beta'=90^\circ$ ’de elde edildiği görülür. Diğer β' değerleri için çekme dayanımın değişimi düzensiz olmaktadır.

Kıltaşı ve silttaşlarında elde edilen sonuçlar ise, daha önce değinilen diğer araştırmacıların sonuçları ile uyumlu çıkmıştır. Bu tür kayalarda en yüksek değer $\beta'=0^\circ$ ’de elde edilirken, en düşük değer $\beta'=60^\circ$ ile 75° arasında elde edilmiştir.

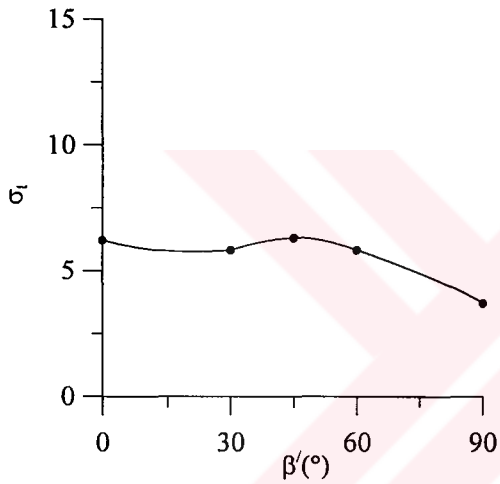
Deneyler esnasında elde edilen yenilme şekilleri açısından değişik kayaç türleri için farklı durumlar gözlenmiştir. Kumtaşlarında, deney örnekleri genel olarak yükleme başlıkları arasındaki çap boyunca yenilme göstermiştir. Kıltaşı ve silttaşlarında ise durum tamamen farklı olmaktadır. Bu tür kayalar genel özellik olarak belirgin anizotropi düzlemleri içerdiklerinden, β' ’nın 0° ve 90° ’den farklı oldukları durumlarda çoğu zaman, bu düzlemler boyunca yenilmişlerdir. $\beta'=0^\circ$ ’de, genellikle anizotropi düzlemlerini dik olarak keserek, $\beta'=90^\circ$ ’de ise, anizotropi düzlemlerine paralel olarak yenilmişlerdir. Kıltaşı ve silttaşlarının yenilme şekilleri Şekil 3.15’de gösterilmiştir.



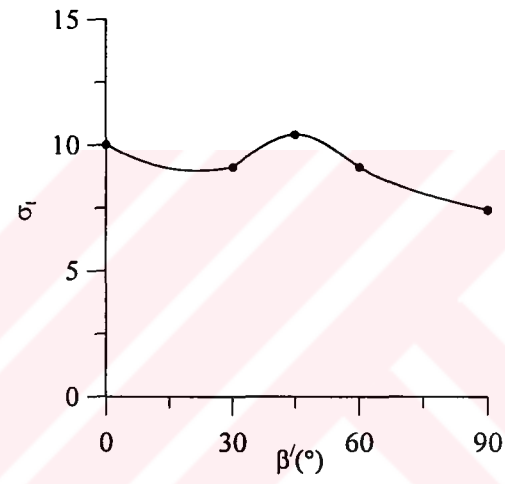
a. Acenta Tv. taşı (kumtaşı)



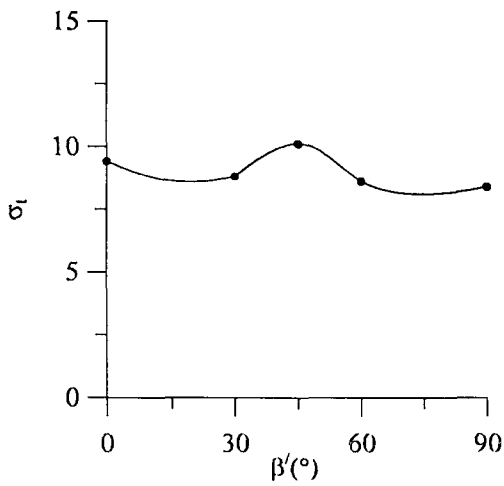
b. Acılık Tv. taşı (kumtaşı)



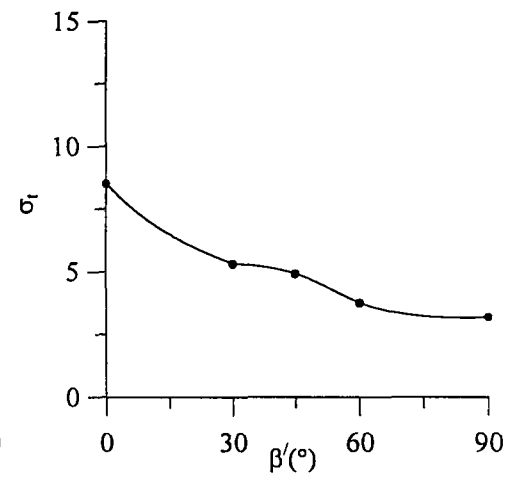
c. Büyük Tv. taşı (kumtaşı)



d. Çay Tb. taşı (kumtaşı)

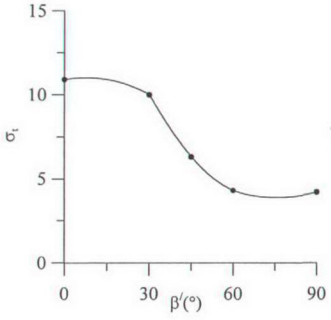


e. Domuzcu Tb. II taşı (kumtaşı)

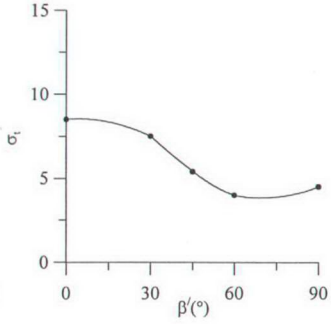


f. Domuzcu Tb. I taşı (kıltaşı)

Şekil 3.14 Kayaçların çekme dayanımının β' ile değişimi.



g. Sulu Tv. taşı (silttaşı)



h. Nasufoğlu Tv. taşı (silttaşı)

Şekil 3.14 (devam ediyor).



Şekil 3.15 Kiltası ve silttaşlarında yapılan çekme dayanımı deneylerinde gözlenen yenilme şekilleri.

3.3 ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI

Üç eksenli deneyler, üç boyutlu gerilme koşullarında kaya davranışını tanımlamak amacıyla yapılır. Böylece kaya malzemesinin dayanım ve yenilme karakteristiği belirlenebilir. Son zamanlarda kayalarda akma davranışının araştırılması, dayanım üzerine sıcaklığın etkisinin belirlenmesi ve derin sondaj kuyularının çevresindeki kayaların dayanım ve deformasyon davranışını belirlemeye yönelik amaçlarla üç eksenli basınç dayanımına olan ilgi artmıştır (Elliot, 1993).

Üç eksenli deneyler ya sağlam kaya malzemesi veya süreksizlik içeren örnekler üzerinde, belirli bir birim deformasyon hızında yapılabilir. Yanal basınçların değişik durumları düşünülebilir. Laboratuvar koşullarında uygulanan en basit ve en yaygın yöntem, düzgün silindirik örneğin yanal yüzeyine eşit yanal basınç ve alt-üst yüzeylerine de eksenel gerilmelerin uygulandığı yöntemidir. Bu tip deney üç eksenli deney olarak adlandırılır ve bazı avantajları vardır (Elliott, 1993).

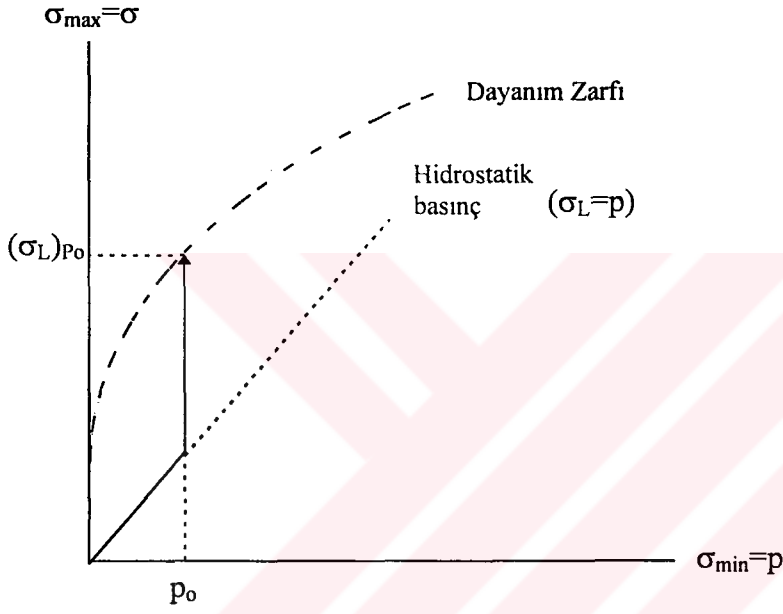
- Örnek hazırlama işleri kolay ve ucuzdur.
- Eksenel simetri vardır.
- Gerilmelerin uygulanması ve birim deformasyonların ölçülmesi kolaydır.
- Hidrolik yükleme koşullarında örneği koruma kolaylığı vardır.
- Uygulanan gerilmeler üç doğrultudaki asal gerilmelerdir.

Ortanca asal gerilmenin (σ_2) dayanım üzerine etkisini belirlemek için yapılan araştırmalarda, her üç yöndeki gerilmelerin birbirinden bağımsız olarak değiştirilebildiği ve gerçek üç eksenli deney olarak adlandırılan, diğer tip üç eksenli deney kullanılır olmuştur. Bu tip deneye çok eksenli deney de denmektedir.

Yine bu deneyin kalın cidarlı silindirik, ince cidarlı silindirik veya kübik örnek kullanımı gibi değişik uygulamaları vardır (Elliott, 1993).

Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin I. tip, II. tip ve III. tip olarak adlandırılan farklı uygulama şekilleri mevcuttur.

Bu çalışmada kullanılan, I. Tip veya “ayrı tip” olarak adlandırılan yöntemdir. Bu yöntemde, yanal basınç (p) belirli bir seviyeye (p_0) kadar (eksenel gerilme yanal basınca eşit olacak şekilde) eksenel gerilme (σ_L) ile birlikte artırılmakta ve yanal basınç bu seviyede sabitlenirken eksenel gerilme artırılarak malzemenin yenilmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde en az üç örnek üzerinde deney tekrarlandıktan sonra malzemenin maksimum dayanım zarfı elde edilmektedir (Şekil 3. 16).



Şekil 3.16 I. tip olarak adlandırılan üç eksenli basınç dayanımı deneyi (ISRM, 1977c)

Üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları, malzemenin görünür kohezyonun ve içsel sürtünme açısının belirlenmesinde de kullanılabilir. Bu amaçla, yanal basınç eksenel dayanım arasında çizilen doğrusal eğrinin eğimi (m) ve düşey eksen kestiği değer (b) kullanılır. Bu değerler geçerli oldukları yanal basınç aralıklarında kullanılır.

Dayanım zarfını oluşturan doğru parçasının genel denklemi;

$$\sigma_{\max} = m_i \sigma_{\min} + b_i \quad (11)$$

veya

$$\sigma_L = m_i p + b_i \quad (12)$$

şeklindedir. Burada: $\sigma_{\max}$ ve $\sigma_{\min}$ sırası ile, deneyde elde edilen eksenel dayanım ve uygulanan yanal basınçtır.

Malzemenin içsel sürtünme açısı aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$\phi_i = \arcsin \frac{m_i - 1}{m_i + 1} \quad (13)$$

Görünür kohezyonunun hesaplanmasında kullanılan eşitlik ise aşağıdaki gibidir.

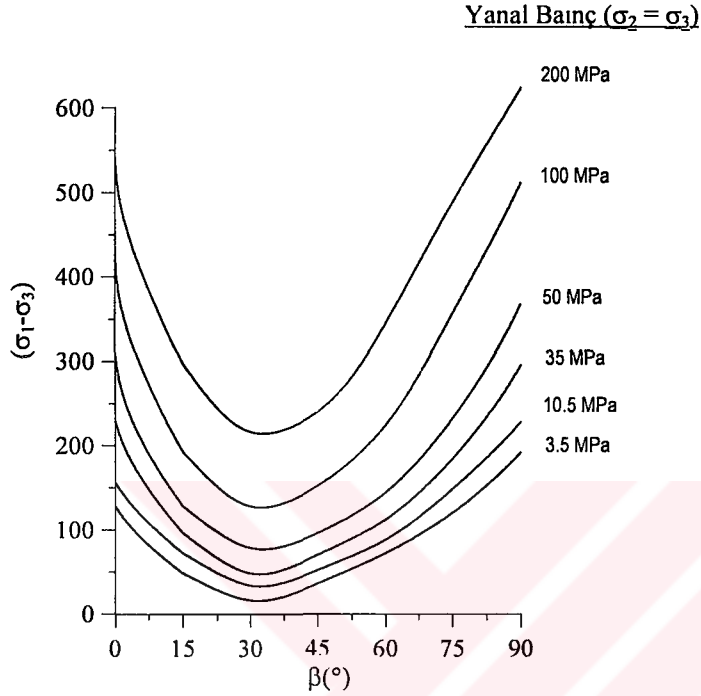
$$c_i = b_i \frac{1 - \sin \phi_i}{2 \cos \phi_i} \quad (14)$$

3.3.1 Anizotropik Kayaçlarda Üç Eksenli Basınç Dayanımı

Kayaçların üç eksenli basınç koşullarında, anizotropinin ve yanal basıncın dayanıma etkisini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur.

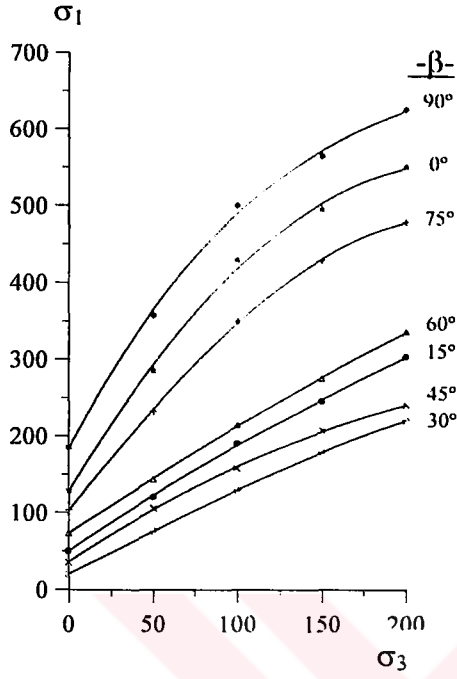
Bu araştırmalardan biri Donath (1964) tarafından yapılmıştır. Sleytler üzerinde yapılan bu çalışmada, 3.5 ile 200 MPa arasındaki yanal basınç seviyelerinde ($\sigma_2 = \sigma_3$) deneyler yapılmıştır. Bu çalışma sonucuna göre, $\sigma_{1-90}/\sigma_{1-30}$ olarak tanımlanan anizotropi oranı, 3.5 MPa yanal basınçta 10:1 iken bu oran 200 MPa yanal basınçta yaklaşık 3.5:1' düşmektedir. Bu durum anizotropi etkisinin yüksek yanal basınçlarda azaldığının bir göstergesi olmaktadır (Şekil 3.17). Yine bu çalışmada, yanal basınç ile parabolik değişim gösteren ($\sigma_1 - \sigma_3$), 200 MPa yanal basıncın üzerinde belirgin şekilde yataya doğru dönmektedir. Bu durum, yanal

basıncındaki artış ile dayanım artışının azaldığını ve yanal basıncın dayanım üzerindeki etkisinin, belirli bir seviyeden sonra düştüğünü göstermektedir (Şekil 3.18).

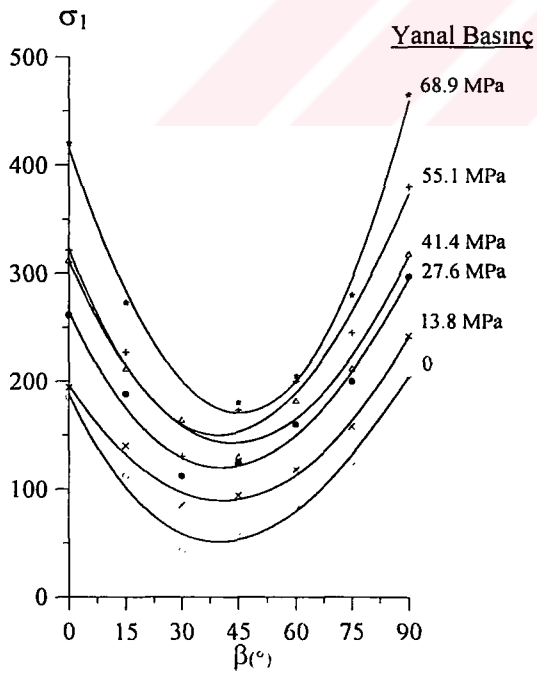


Şekil 3.17 Yenilme anındaki asal gerilme farkının konum açısı ile değişimi (Donath, 1964).

Attewell ve Sandford (1974), sleytler üzerinde yaptıkları üç eksenli basınç dayanımı çalışmalarına dayanarak; en düşük dayanımın $\beta=30^\circ$ 'de elde edildiğini ve artan yanal basınçlarla hem dayanım artışının yavaşladığını hem de dayanım anizotropisinin azaldığını belirtmişlerdir (Şekil 3.19). Ayrıca kohezyon ve içsel sürtünme parametrelerinin de β ile parabolik olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir.

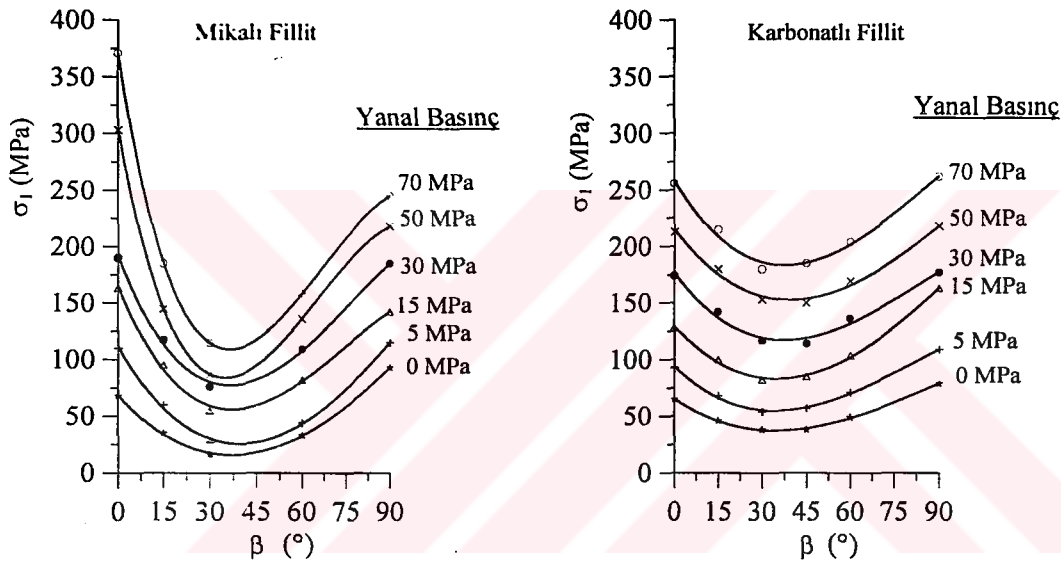


Şekil 3.18 Yanal basıncın eksenel dayanım üzerindeki etkisi (Donath, 1964).

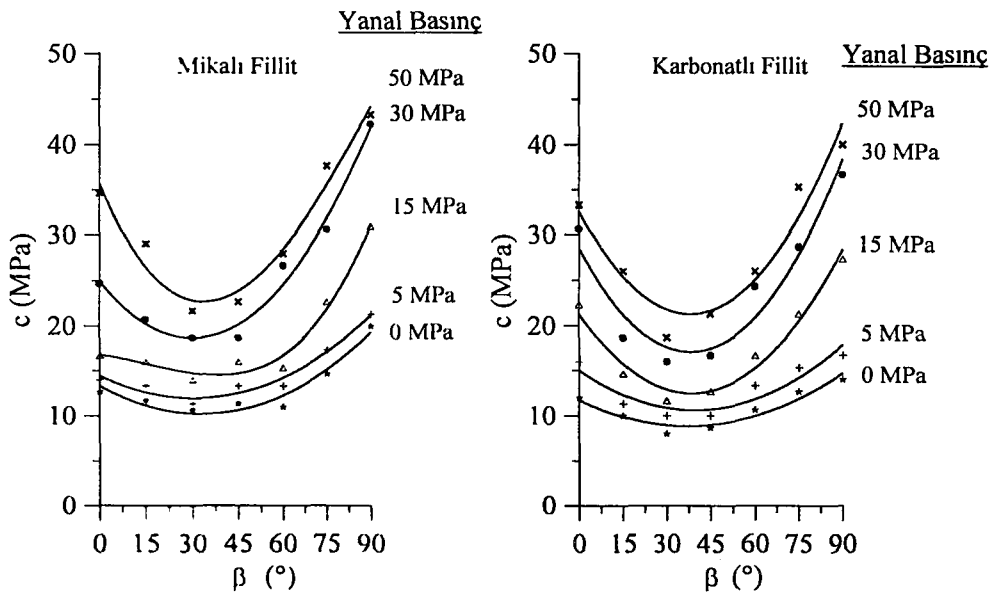


Şekil 3.19 Attewell ve Sandford'a (1974) göre σ_1 'in β ile değişimi.

Ramamurthy vd. (1993), fillitler üzerinde yaptıkları çalışmalarda, yanal basınçların artması ile, anizotropinin dayanım üzerindeki etkisinin azalacağını belirtmişlerdir (Şekil 3.20). Burada tek eksenli basınç durumunda, $\sigma_{c90}/\sigma_{c30}$ oranı 4.17 iken, yanal basıncın 70 MPa'a çıkarılması durumunda bu oran 3.45'e düşmektedir. Yine bu çalışmalarında Ramamurthy vd., kohezyonun konum açısı ile değişiminin, anizotropi eğrisinin şekline benzediğini ve en büyük değer $\beta=90^\circ$ 'de, en küçük değer ise $\beta=30^\circ$ 'de elde edildiğini göstermişlerdir (Şekil 3.21)

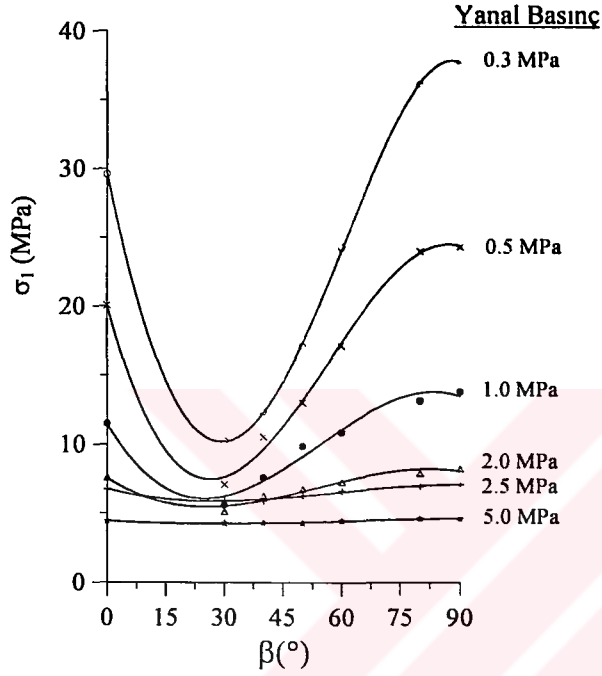


Şekil 3.20 Ramamurthy vd. göre σ_1 'in β ile değişimi (Ramamurthy et al., 1993).



Şekil 3.21 Ramamurthy vd. göre kohezyonun β ile değişimi (Ramamurthy et al., 1993).

Bir başka çalışmada Ramamurthy ve Arora (1994), kendilerinin oluşturdukları (induced) anizotropik Paris kili örnekleri üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada 0.3 MPa ile 7.0 MPa arasındaki yanal basınç seviyelerinde yaptıkları üç eksenli basınç dayanımı deneylerinde, 2.5 MPa yanal basınçtan sonra, kayaçların basınç dayanımının değişmediğini belirlemişlerdir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 Paris kili örneklerinde oluşturulan anizotropik örneklerde yanal basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Ramamurthy and Arora, 1994).

3.3.2 Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyleri

Bu bölümde 0°, 30°, 45°, 60° ve 90° konum açıları hazırlanan örnekler üzerinde üç eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılarak, yanal basıncın anizotropi üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Her bir konum açısında en az 3, çoğu durumda ise 4 farklı yanal basınç seviyesinde eksenel dayanım belirlenmiştir.

İlk üç eksenli deneyler Domuzcu damarı taban taşından alınan kiltası örnekleri üzerinde yapılmıştır. Bu deneylerde yanal basınçlar en yüksek 22 MPa'ya kadar çıkartılmıştır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi esnasında, yanal basıncın yaklaşık 10 MPa olduğu durumda; σ_1 - σ_3 uzayında çizilen yenilme zarfının

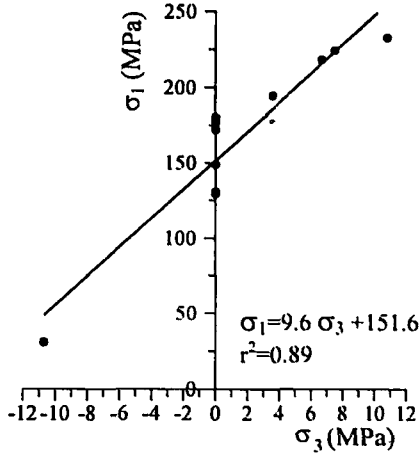
düzleşmeye başladığı görüldüğünden daha sonra yapılan deneylerde yanal basınç en fazla 12 MPa'a kadar artırılmıştır. Fakat bu yanal basınç seviyeleri, yanal basıncın anizotropi üzerindeki etkisini tanımlamak için yeterli olmadığından, en son alınan Büyük damarı tavanına ait kumtaşında yapılan deneylerde yanal basınç 30 MPa'a kadar çıkarılmıştır.

Deneyler yapılırken ilk olarak, örnek basınç hücresine yerleştirilip yağ ile doldurulduktan sonra, pres altına yerleştirilmiş ve 6 MPa civarında ön eksenel basınç uygulandıktan sonra istenilen seviyede yanal basınç verilmiştir. Bu esnada uygulanan ön yük yaklaşık 15MPa'a kadar yükselmiştir. Bu aşamadan sonra yaklaşık 0.6 MPa/s hız ile yükleme yapılarak örneklerin yenilmesi sağlanmış ve yenilme anında bilgisayarın tespit ettiği maksimum yanal basınç ve eksenel yük değerleri kaydedilmiştir. Üç eksenli deney sonuçları Çizelge 3.6'da verilmiştir. Çizelge 3.6'da sunulan verilere, daha önceki bölümlerde verilmiş olan tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı verileri de katılarak σ_3 'e göre σ_1 'in değişimini gösteren eğriler elde edilmiş ve Şekil 3.23-30'da sunulmuştur.

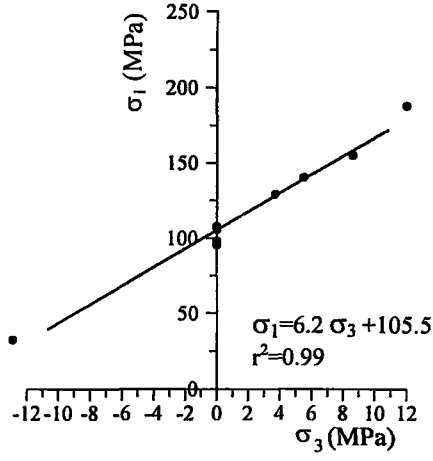
ZEDEM Uygulamalı Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan, yanal basınç ünitesinde (Şekil 3.31 ve 3.32), yanal basıncın hassas olarak ayarlanması ve deney boyunca sabit tutulması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle her kayaç ve her β durumu için aynı yanal basınç seviyelerinde deneylerin tekrarlanması mümkün olmamıştır. Bu durum, yanal basıncın, eksenel gerilme üzerindeki etkisini değerlendirmek ve farklı β 'lar için karşılaştırma yapmayı güçleştirmiştir. Bu nedenle, birbirine yakın olan yanal basınçları aynı seviyeye getirmek amacı ile, deney sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilerek doğrusal regresyon analizi yapılarak, doğru eşitlikleri belirlenmiş ve bu eşitlikler yardımıyla, her bir kayaç ve β için; 0, 3, 6, 9 ve 12 MPa yanal basınçtaki eksenel gerilmeler hesaplanmıştır. Bu aşamada σ_3 ile σ_1 arasında yapılan regresyon analizinde en yüksek uyumu veren (r^2) ilişkinin bir çok durumda ikinci derece polinom şeklinde olduğu ancak doğrusal ilişkinin de oldukça yüksek uyum sağladığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.6 Deneylerde elde edilen üç eksenli basınç dayanımı değerleri (MPa).

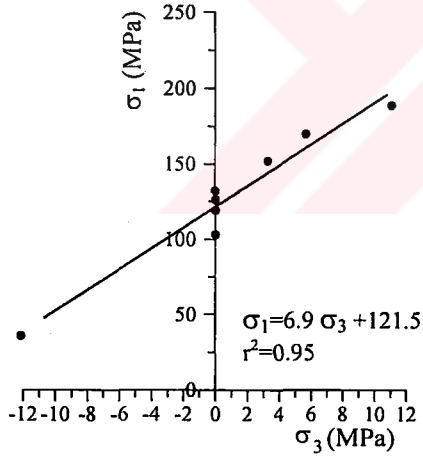
Alındığı Yer	Konum Açısı (β , °)									
	0		30		45		60		90	
	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1
ACENTA Tv (Kumtaşı)	3.6	194.6	--	--	3.7	129.8	3.3	152.2	3.0	171.8
	6.7	218.1	--	--	5.5	140.5	5.7	169.9	5.8	185.5
	7.5	224.3	--	--	8.6	155.4	11.1	188.8	7.4	192.4
	10.8	232.7	--	--	12.0	188.1	--	--	10.7	215.0
ACILIK Tb (Kumtaşı)	3.3	188.0	3.2	111.2	3.3	138.3	3.8	151.8	3.5	174.0
	4.8	205.2	5.1	145.0	6.9	161.5	7.0	173.6	7.4	193.4
	7.5	225.4	7.8	168.0	8.5	191.5	8.3	184.1	10.0	220.3
	10.2	252.6	11.7	192.0	11.3	202.4	10.1	194.4	--	--
BÜYÜK Tv (Kumtaşı)	5.6	129.4	6.2	129.0	5.5	126.8	5.5	129.5	5.7	125.8
	9.6	172.4	10.1	162.8	10.5	152.9	10.5	161.7	6.0	129.1
	18.1	204.6	13.0	166.9	21.0	177.4	20.2	215.4	10.2	162.2
	25.7	216.9	19.7	208.2	30.8	240.8	30.4	255.2	20.4	214.9
	29.8	273.5	30.2	239.9	--	--	--	--	29.8	249.7
ÇAY Tb (Kumtaşı)	2.9	150.4	6.8	129.5	3.2	151.1	--	--	3.3	155.9
	5.9	207.6	9.5	140.3	7.8	180.7	--	--	4.7	193.8
	7.3	217.3	11.2	186.1	12.4	234.2	--	--	6.3	201.4
	12.4	251.1	--	--	--	--	--	--	9.2	216.7
DOMUZCU Tb II (Kumtaşı)	4.4	165.7	4.1	158.9	4.8	144.6	3.8	151.7	4.8	156.5
	8.6	202.2	8.1	185.1	9.5	175.1	7.0	170.9	6.4	164.8
	12.2	225.3	11.0	206.1	13.5	195.5	9.0	194.4	8.1	208.5
	--	--	--	--	--	--	--	--	11.5	215.6
DOMUZCU Tb I (Kıltaşı)	6.6	72.0	4.0	28.0	3.9	38.7	4.8	44.4	6.3	81.6
	11.0	83.3	6.9	45.0	6.7	59.4	6.0	58.6	8.0	91.6
	16.4	108.4	8.9	52.0	12.7	71.2	11.7	81.3	13.6	109.2
	22.0	131.6	14.4	62.7	17.5	75.8	19.2	92.8	22.4	124.3
NASUFOĞLU Tv (Siltaşı)	4.1	91.2	3.0	42.3	--	--	2.8	71.0	3.7	83.2
	6.9	107.4	5.5	62.8	--	--	5.3	92.0	6.2	98.5
	11.2	122.3	8.0	70.0	--	--	7.7	106.0	9.5	118.2
	--	--	--	--	--	--	11.0	112.0	--	--
SULU Tv (Siltaşı)	3.2	124.5	3.1	51.7	3.2	65.5	3.2	74.9	5.6	139.2
	5.2	135.5	8.3	62.1	5.2	82.0	8.2	91.4	8.3	147.4
	9.0	162.3	11.0	95.6	9.0	104.6	12.2	112.0	11.5	178.6



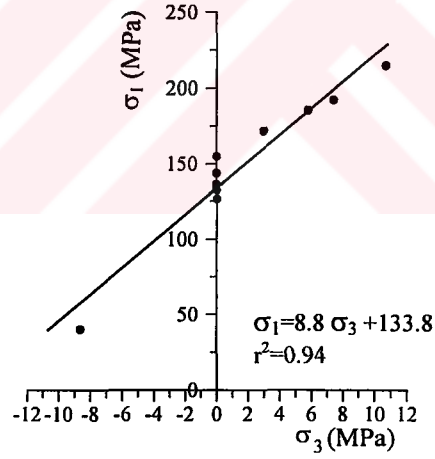
a. $\beta=0^\circ$ 'deki sonuçlar



b. $\beta=45^\circ$ 'deki sonuçlar

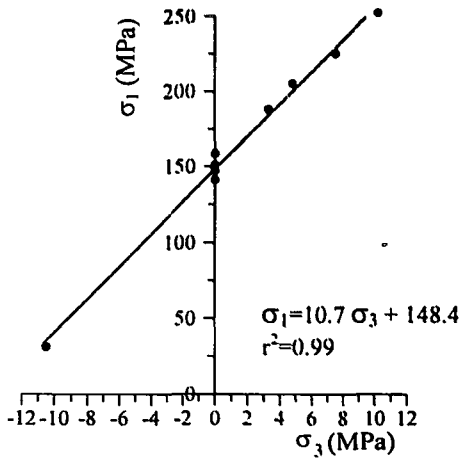


c. $\beta=60^\circ$ 'deki sonuçlar

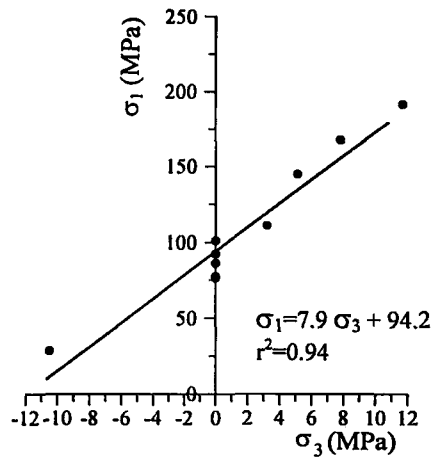


d. $\beta=90^\circ$ 'deki sonuçlar

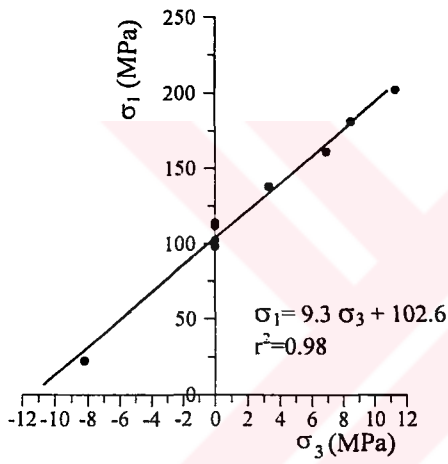
Şekil 3.23 Acenta damarı tavan taşında (kumtaşı) elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.



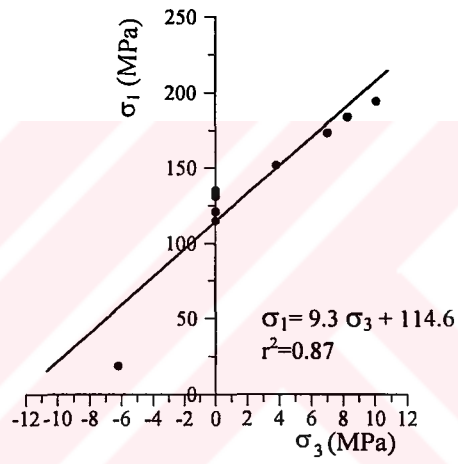
a. $\beta=0^\circ$ 'deki sonuçlar



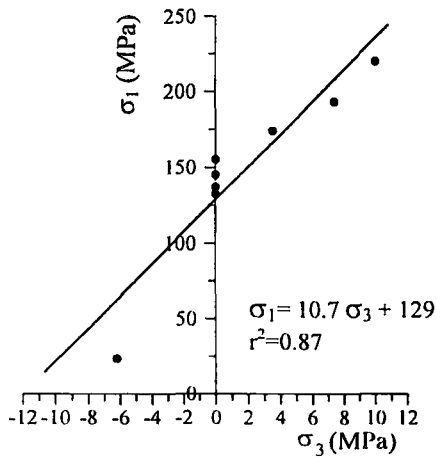
b. $\beta=30^\circ$ 'deki sonuçlar



c. $\beta=45^\circ$ 'deki sonuçlar

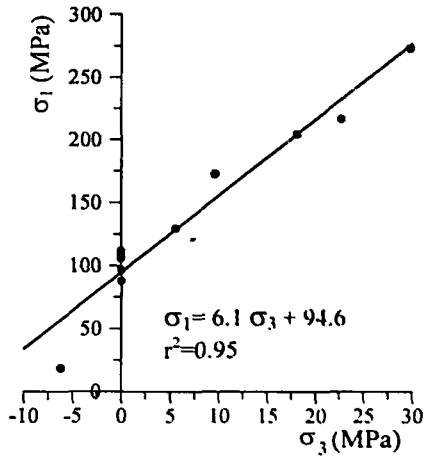


d. $\beta=60^\circ$ 'deki sonuçlar

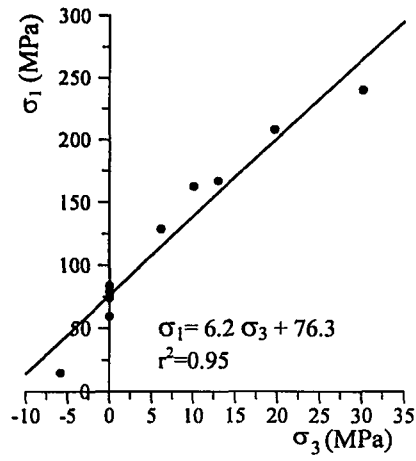


e. $\beta=90^\circ$ 'deki sonuçlar

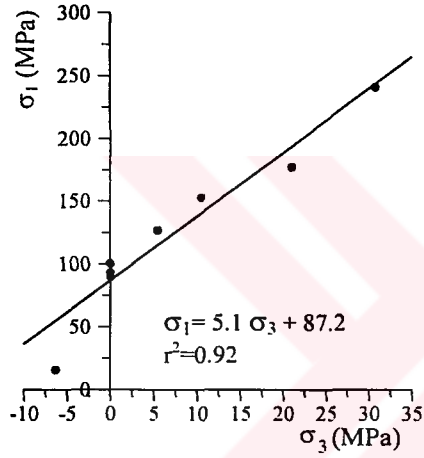
Şekil 3.24 Acılık damarı taban taşında (kumtaşı) elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.



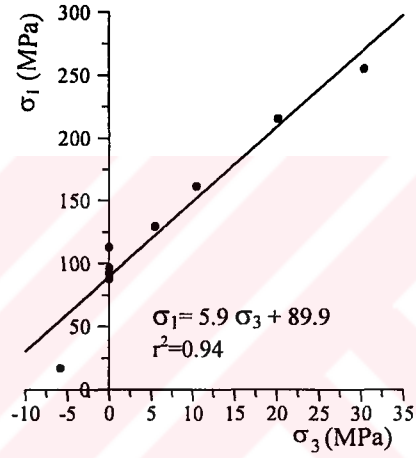
a. $\beta = 0^\circ$ 'deki sonuçlar



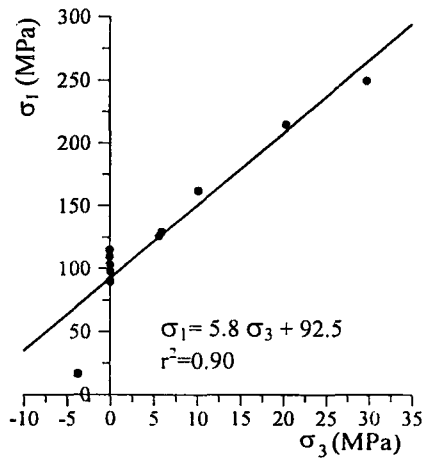
b. $\beta = 30^\circ$ 'deki sonuçlar



c. $\beta = 45^\circ$ 'deki sonuçlar

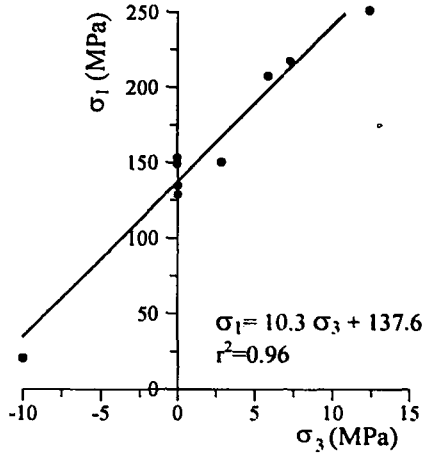


d. $\beta = 60^\circ$ 'deki sonuçlar

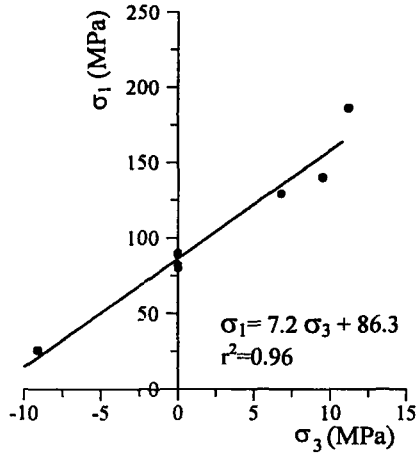


e. $\beta = 90^\circ$ 'deki sonuçlar

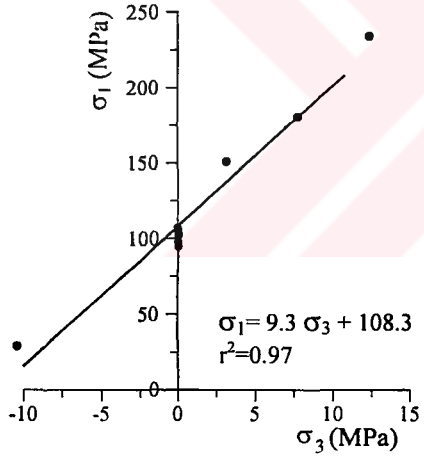
Şekil 3.25 Büyük damar tavan taşında (kumtaşı) elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.



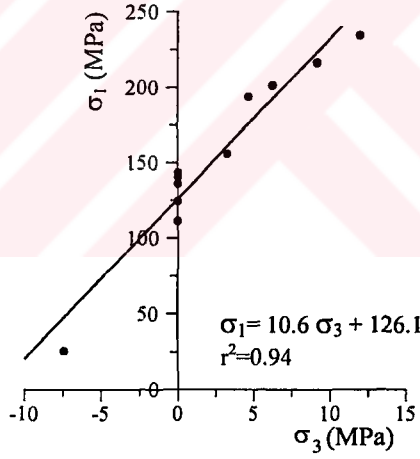
a. $\beta=0^\circ$ 'deki sonuçlar



b. $\beta=30^\circ$ 'deki sonuçlar

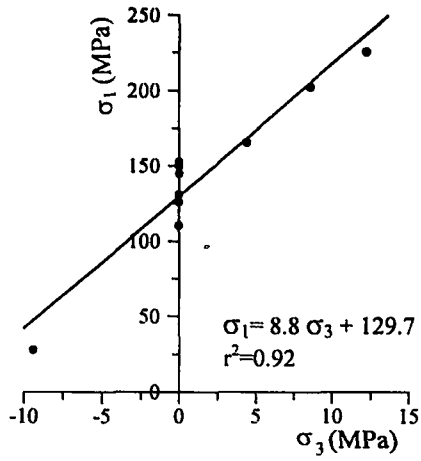


c. $\beta=45^\circ$ 'deki sonuçlar

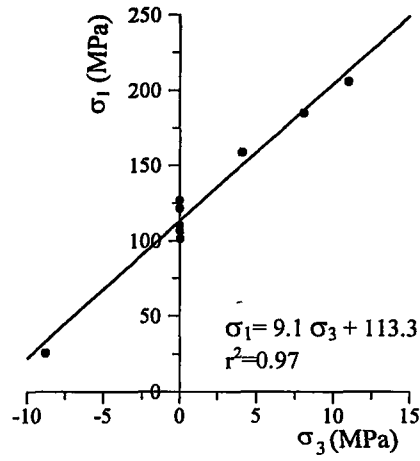


d. $\beta=90^\circ$ 'deki sonuçlar

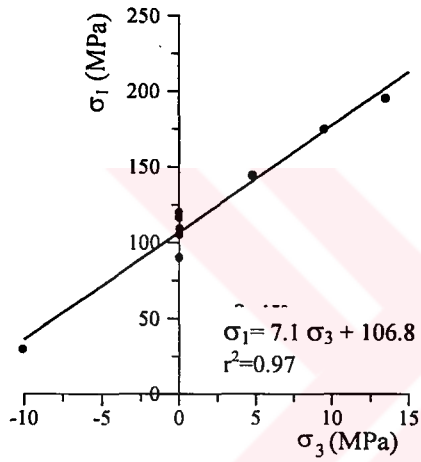
Şekil 3.26 Çay damarı taban taşında (kumtaşı) elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.



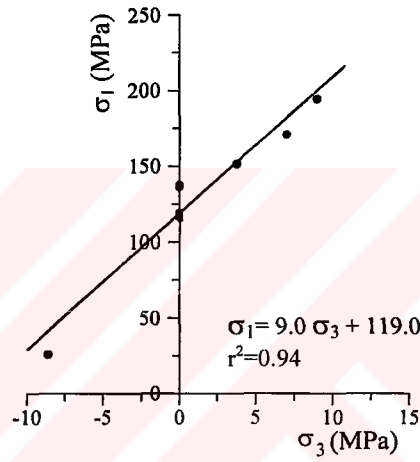
a. $\beta=0^\circ$ 'deki sonuçlar



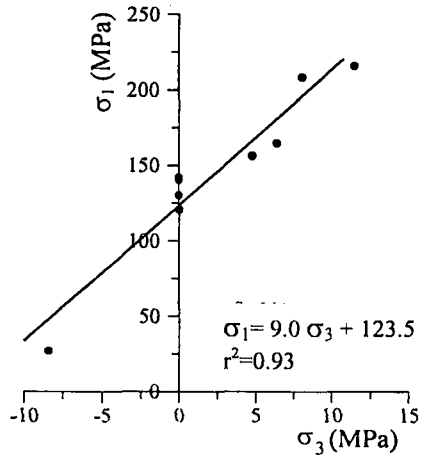
b. $\beta=30^\circ$ 'deki sonuçlar



c. $\beta=45^\circ$ 'deki sonuçlar

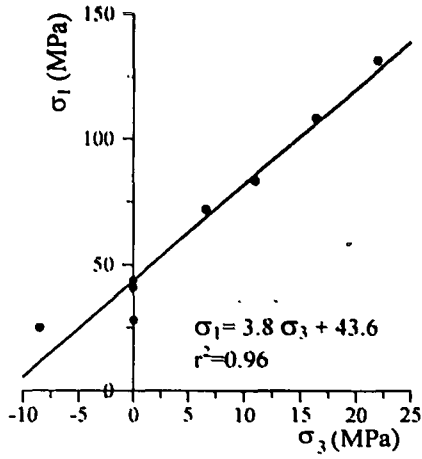


d. $\beta=60^\circ$ 'deki sonuçlar

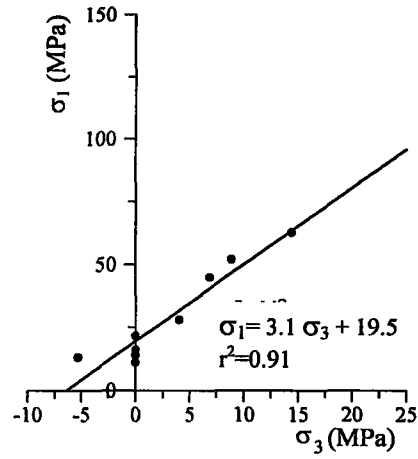


e. $\beta=90^\circ$ 'deki sonuçlar

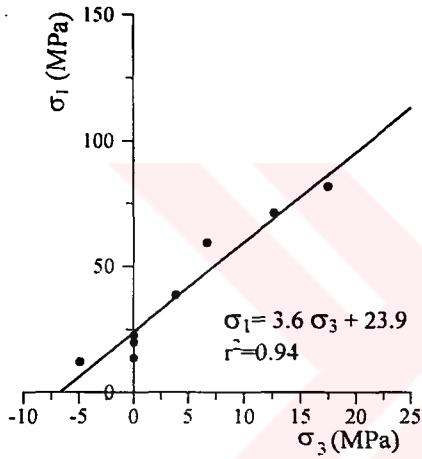
Şekil 3.27 Domuzcu damarı taban II (kumtaşı) taşında elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.



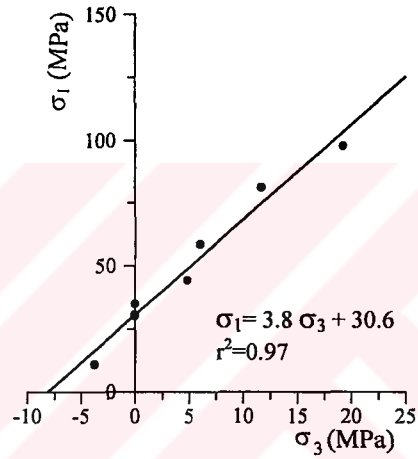
a. $\beta=0^\circ$ 'deki sonuçlar



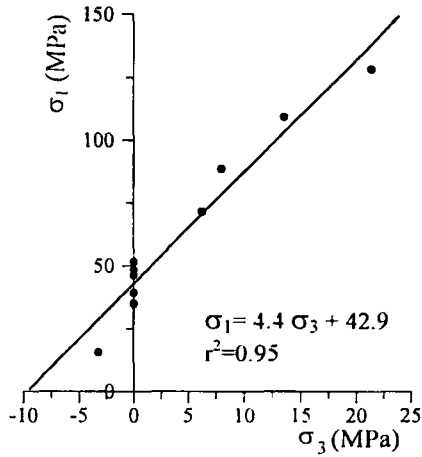
b. $\beta=30^\circ$ 'deki sonuçlar



c. $\beta=45^\circ$ 'deki sonuçlar

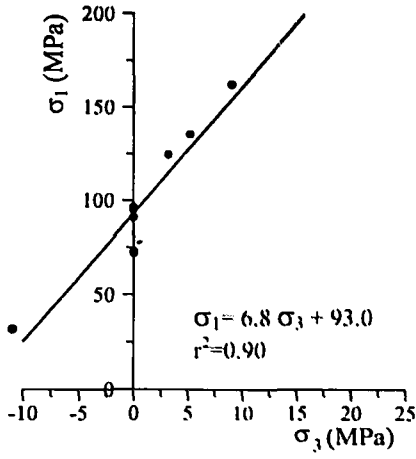


d. $\beta=60^\circ$ 'deki sonuçlar

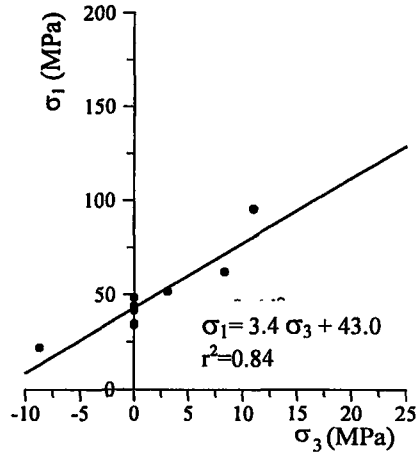


e. $\beta=90^\circ$ 'deki sonuçlar

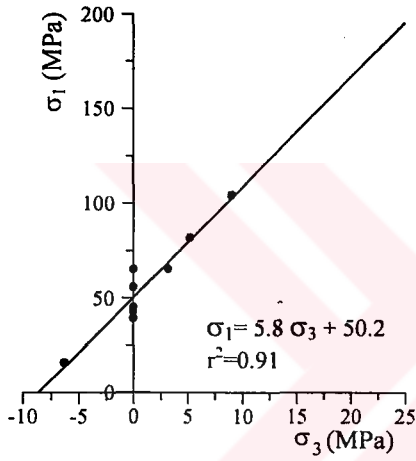
Şekil 3.28 Domuzcu damarı Tb I taşında (kiltası) elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.



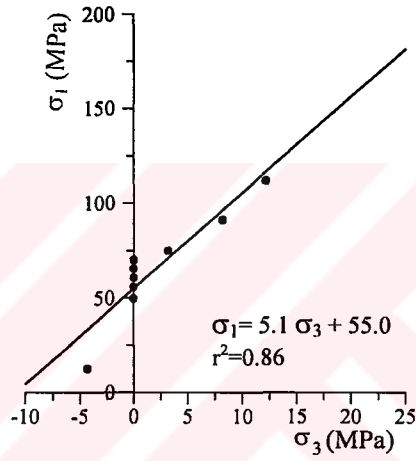
a. $\beta=0^\circ$ 'deki sonuçlar



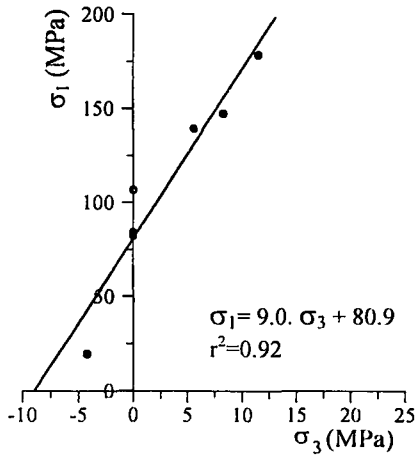
b. $\beta=30^\circ$ 'deki sonuçlar



c. $\beta=45^\circ$ 'deki sonuçlar

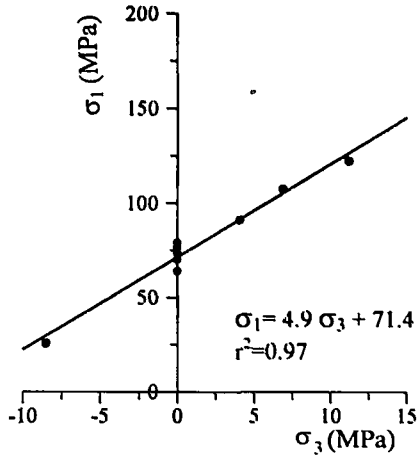


d. $\beta=60^\circ$ 'deki sonuçlar

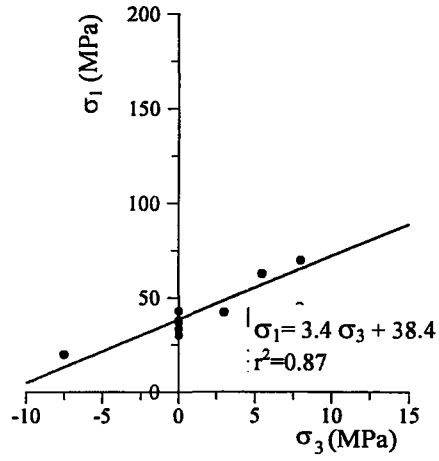


e. $\beta=90^\circ$ 'deki sonuçlar

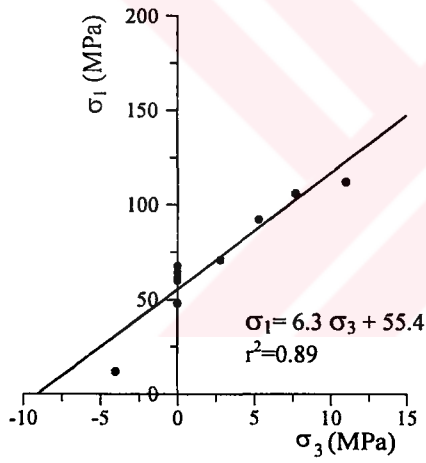
Şekil 3.29 Sulu damarı tavan taşında (silttaşı) elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.



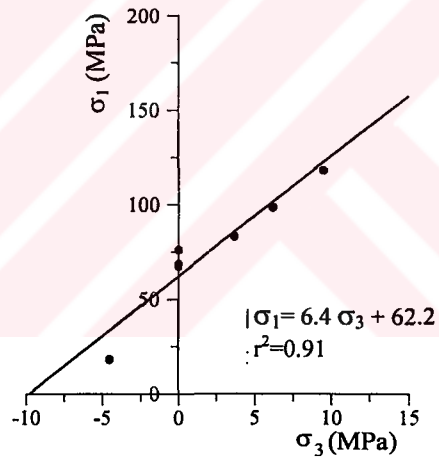
a. $\beta=0^\circ$ 'deki sonuçlar



b. $\beta=30^\circ$ 'deki sonuçlar



c. $\beta=60^\circ$ 'deki sonuçlar



d. $\beta=90^\circ$ 'deki sonuçlar

Şekil 3.30 Nasufoğlu damarı tavan taşında (silttaşı) elde edilen üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.



Şekil 3.31 Üç eksenli basınç dayanımı deneyi düzeneği.



Şekil 3.32 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinde kullanılan yanıl basınç pompası.

Yukarıda sunulan çizelge ve grafikler incelendiğinde, σ_3 ile σ_1 arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu görülebilir.

$$\sigma_1 = a \sigma_3 + c \quad (15)$$

Bu ilişki klasik Coulomb yenilme ölçütü biçimindedir.

Bu çalışmada incelenen kayaçların kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri, üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilen verilere, doğrusal regresyon uygulanarak bulunan m_i (doğrunun eğimi) ve b_i (doğrunun düşey eksenini kestiği nokta) değerlerinden, sırasıyla Eşitlik 9 ve 10 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.7).

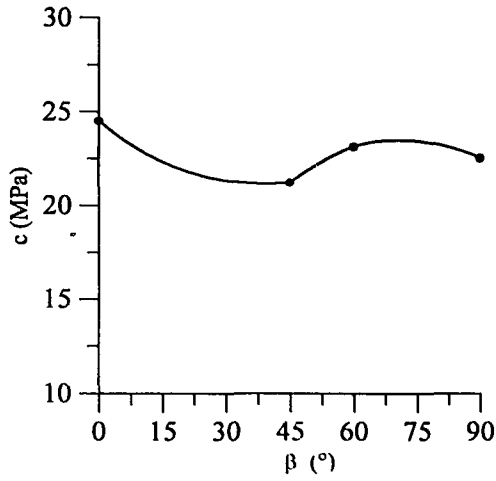
Düşük anizotropiye sahip olan kumtaşlarının içsel sürtünme açısı 50° civarında elde edilmiştir. Bu kayaçların içsel sürtünme açısında β ile önemli bir değişim görülmemektedir. Kumtaşlarına göre daha yüksek anizotropik olan kiltaşının içsel sürtünme açısı yaklaşık 35° civarında elde edilmiştir. Siltaşlarında ise β ile bir miktar değişim olduğu görülmekle birlikte ortalama değer olarak 45° alınabilir.

Kumtaşlarının $\beta=0^\circ$ ve 90° 'deki kohezyonu için ortalama değer olarak 25 MPa verilebilir. Kiltaşının kohezyonunda ise β ile önemli miktarda değişim olmaktadır. $\beta=0^\circ$ ve 90° 'de kohezyon 10 MPa olarak bulunurken, diğer β 'larda 5.6 ile 8 MPa arasında elde edilmiştir. En düşük değer $\beta=30^\circ$ durumunda görülmüştür.

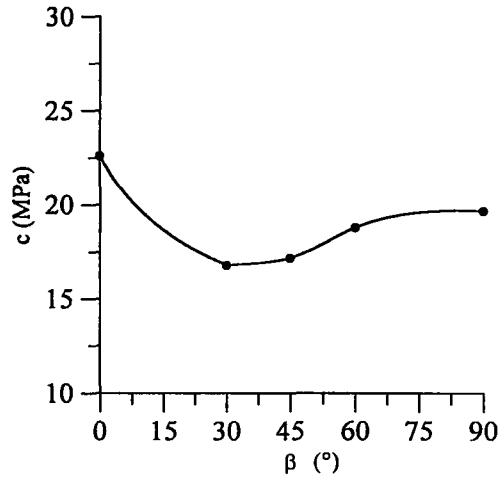
Değişik kayaçlar için β açısı ile kohezyondaki değişim Şekil 3.32'de sunulmuştur. Bu şekilden de görülebileceği gibi kohezyondaki değişim tek eksenli basınç dayanımındaki değişim gibi olmaktadır. En düşük değer yaklaşık 30° 'de elde edilmektedir. Siltaşlarındaki durum biraz değişik olmaktadır. Bu tür kayaçalarda en yüksek değer 0° 'de elde edilmekte fakat diğer β 'larda çok önemli bir değişiklik gözlenmemektedir. Bu durum her iki siltaşı örneğinde de yaklaşık aynıdır.

Çizelge 3.7 Deney verilerinin istatistiksel değerlendirmesiyle elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri

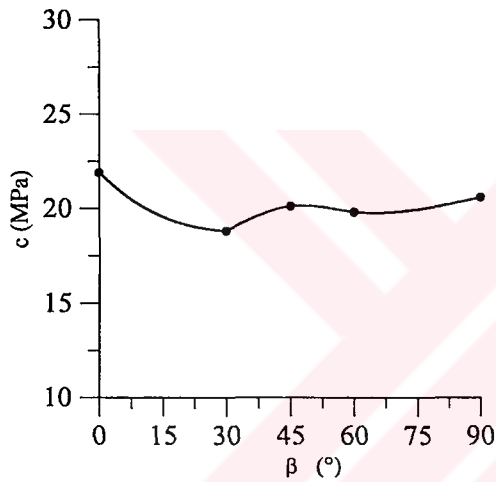
Alındığı Yer	$\beta (^{\circ})$	Eğim (m_i)	σ_c (MPa) b_i	İçsel Sürtünme Açısı $\phi (^{\circ})$	Kohezyon c (MPa)
ACENTA Tv (Kumtaşı)	0	9.60	151.6	54.2	24.5
	45	6.17	105.5	46.1	21.2
	60	6.90	121.5	48.3	23.1
	90	8.82	133.8	52.8	22.5
ACILIK Tb (Kumtaşı)	0	10.75	148.4	56.1	22.6
	30	7.90	94.2	50.8	16.8
	45	9.07	103.9	53.3	17.2
	60	9.28	114.6	53.7	18.8
	90	10.72	129.0	56.0	19.7
BÜYÜK Tv (Kumtaşı)	0	6.08	94.6	45.8	19.2
	30	6.25	76.3	46.4	15.3
	45	5.08	87.2	42.1	19.3
	60	5.94	89.9	45.4	18.4
	90	5.76	92.5	44.8	19.3
ÇAY Tb (Kumtaşı)	0	10.30	137.6	55.4	21.4
	30	7.18	86.3	49.1	16.1
	45	9.26	108.3	53.6	17.8
	90	10.58	126.1	55.8	19.4
DOMUZCU Tb II (Kumtaşı)	0	8.78	129.7	52.7	21.9
	30	9.11	113.3	53.3	18.8
	45	7.05	106.8	48.7	20.1
	60	8.99	119.0	53.1	19.8
	90	8.97	123.5	53.1	20.6
NASUFOĞLU Tv (Silttaşı)	0	4.91	71.4	41.4	16.1
	30	3.36	38.4	32.8	10.5
	60	6.13	55.4	46.0	11.2
	90	6.35	62.2	46.7	12.3
DOMUZCU Tb I (Kilttaşı)	0	3.82	43.6	35.8	11.2
	30	3.05	19.5	30.4	5.6
	45	3.57	23.9	34.2	6.3
	60	3.78	30.6	35.6	7.9
	90	4.44	42.9	39.2	10.2
SULU Tv (Silttaşı)	0	6.80	93.0	48.0	17.8
	30	3.44	43.0	33.3	11.6
	45	5.83	50.2	45.0	10.4
	60	5.06	55.0	42.1	12.2
	90	9.03	80.9	53.2	13.5



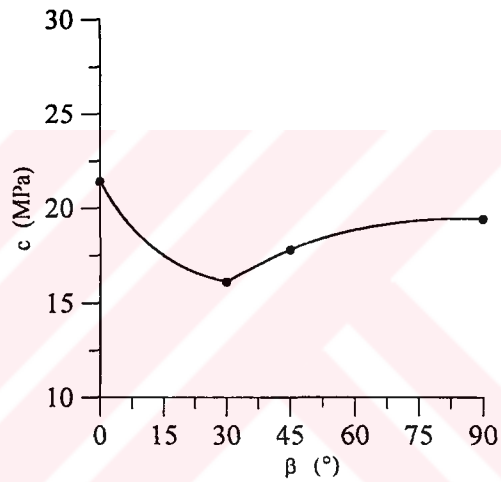
a. Acenta damarı tv taşı (kumtaşı)



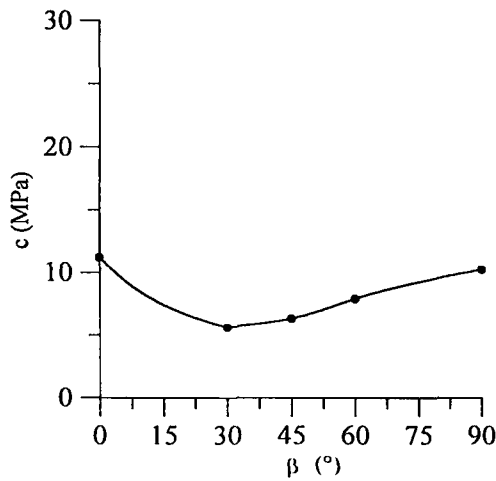
b. Acılık damarı tb taşı (kumtaşı)



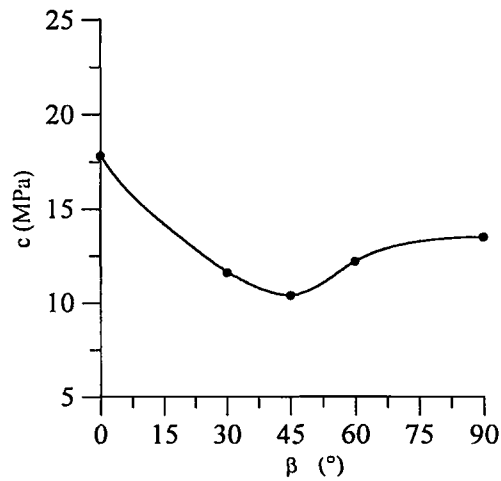
c. Çay damarı tb taşı (kumtaşı)



d. Domuzcu damarı tb II taşı (kumtaşı)



e. Domuzcu damarı tb I taşı (kilttaşı)

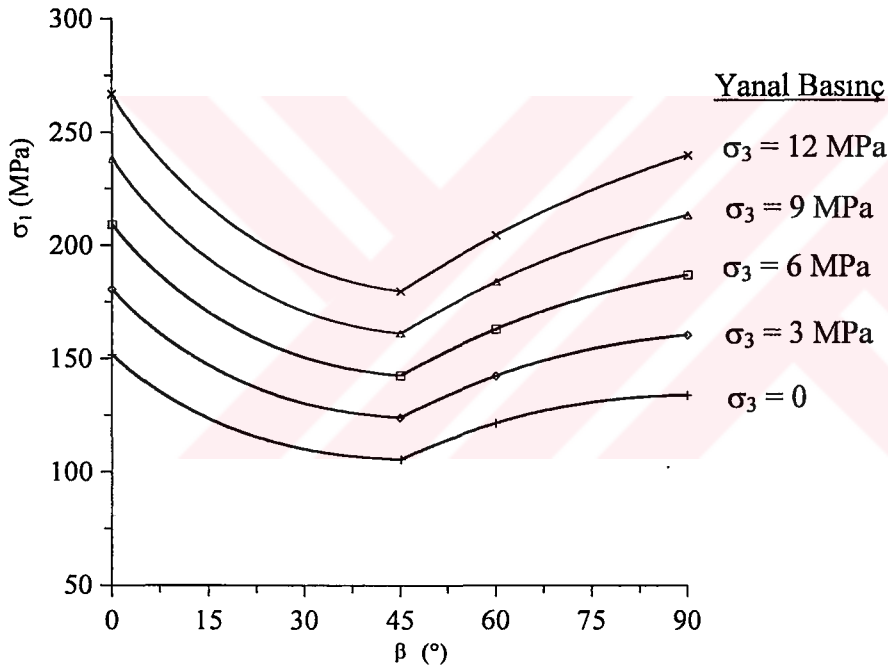


f. Sulu damarı tv taşı (silttaşı)

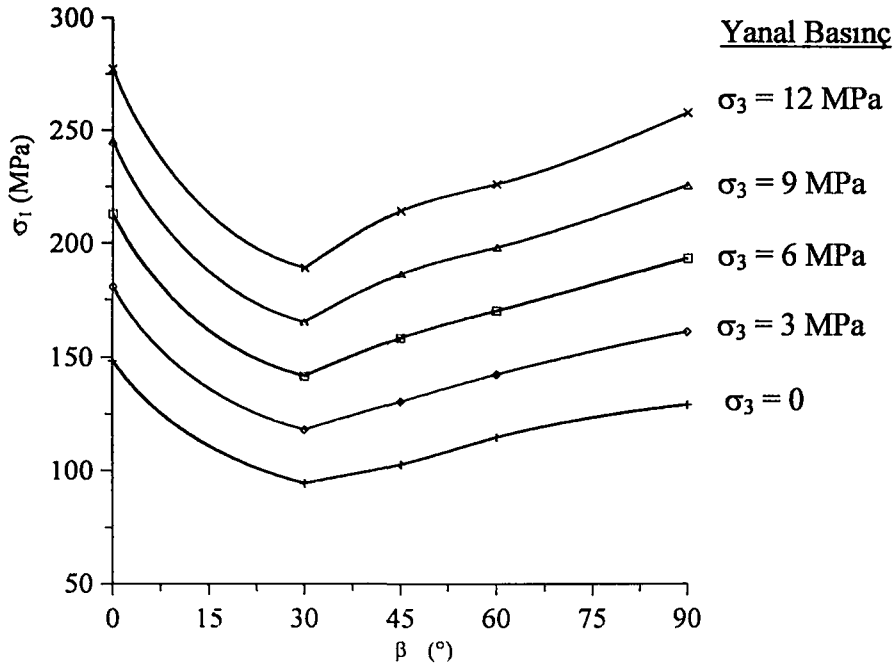
Şekil 3.33 Kayaçlarda elde edilen kohezyon değerlerinin β ile değişimi.

Eksenel gerilme üzerine yanal basıncın etkisini araştırmak amacı ile deneylerden elde edilen verilere en yüksek ilişki katsayısını veren eğri uyarlama ile elde edilen eşitlikler kullanılarak, aynı yanal basınç seviyesinde farklı β 'lardaki eksenel gerilmeler hesap yolu ile elde edilerek, Şekil 3.33-37'de sunulan grafikler elde edilmiştir.

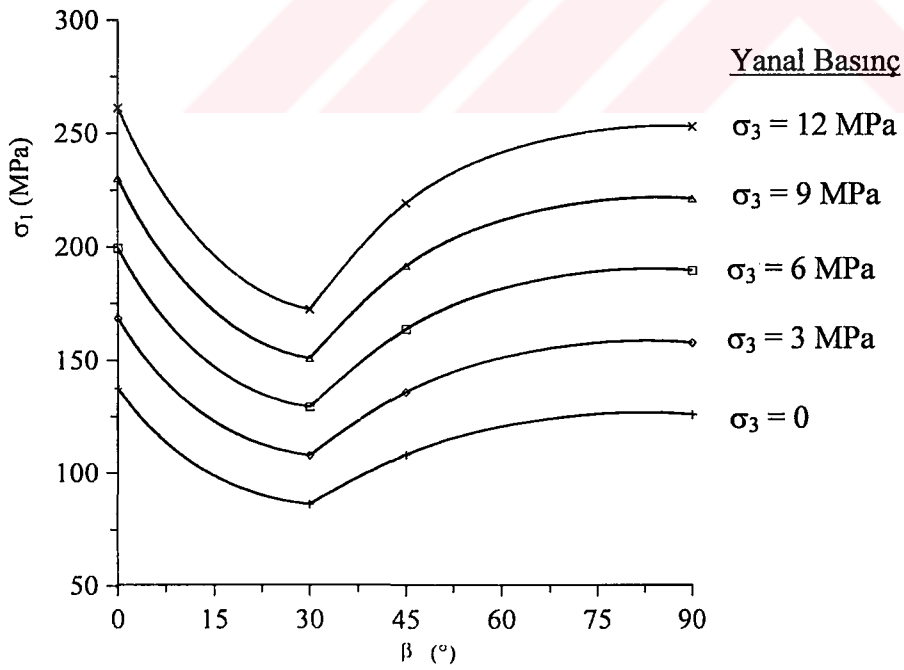
Bu şekiller incelendiğinde, yanal basıncın artması ile eğrilerin bir birlerine yaklaştıkları açıkça görülmektedir. Bu durum, artan yanal basınç ile eksenel dayanım artışının azaldığının bir göstergesi olmaktadır.



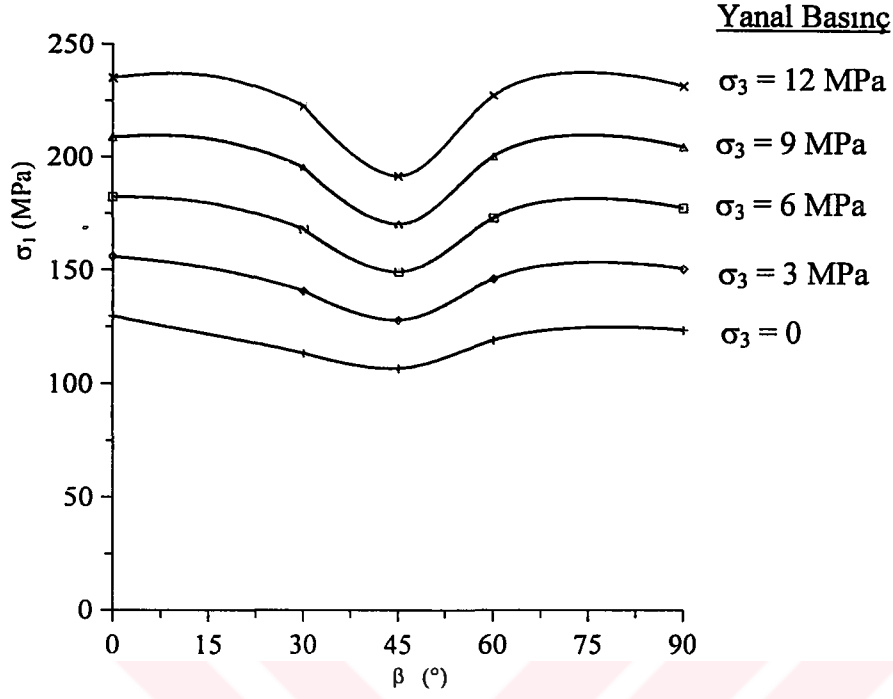
Şekil 3.34 Acenta damarı tavan taşında (kumtaşı) yanal basınç ile eksenel dayanımın değişimi



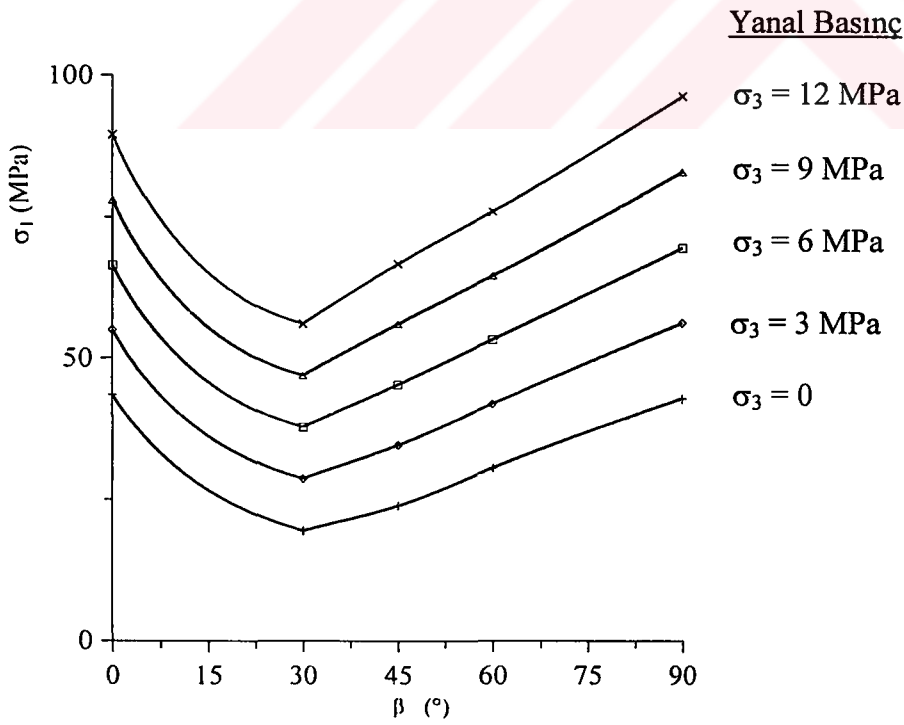
Şekil 3.35 Acılık damarı taban taşında (kumtaşı) yanal basınç ile eksenel dayanımın değişimi



Şekil 3.36 Çay damarı taban taşında (kumtaşı) yanal basınç ile eksenel dayanımın değişimi



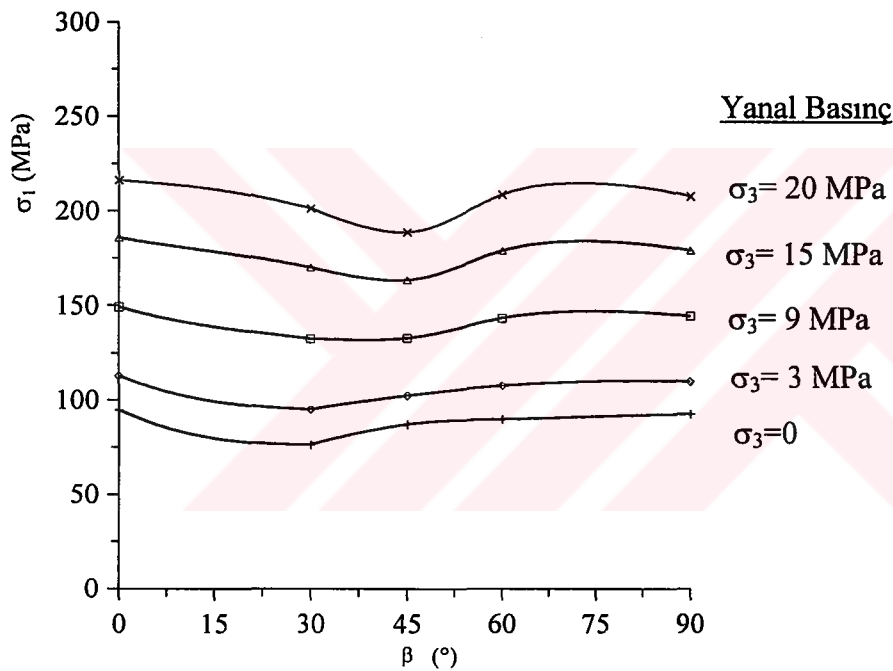
Şekil 3.37 Domuzcu damarı tavan II taşında (kumtaşı) yanal basınç ile eksenel dayanımın değişimi.



Şekil 3.38 Domuzcu damarı tb I taşında (kıltaşı) yanal basınç ile eksenel dayanımın değişimi.

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde, yanal basıncın artması ile eksenel dayanımda belirli bir artışın olduğu fakat yanal basıncın bir seviyesinden sonra, eksenel dayanımdaki artış miktarının azalmakta olduğu görülmektedir. Bu durum, $\sigma_3=0$ ve $\sigma_3=20$ MPa'daki eğrilerin birbirine yaklaşması şeklinde kendini göstermektedir.

Deneylerin yapıldığı yanal basınç seviyeleri için, yanal basıncın anizotropi üzerinde etkisi belirlemek için, diğerlerine göre daha yüksek yanal basınçlarda test edilen Büyük damara ait tavan taşındaki sonuçlar ise Şekil 3.39'da sunulmuştur.



Şekil 3.39 Büyük damar tavan taşı (kumtaşı) yanal basıncın anizotropi üzerine etkisi.

Yukarıdaki sunulan grafikte, yanal basıncın 0'dan 25 MPa'a artması ile anizotropi oranı, 1.28'den 1.13'e düşmektedir. Bu sonuç yanal basıncın artması ile, kayaların anizotropikliğinin azaldığını göstermektedir.

3.4 NOKTA-YÜK DAYANIMI

Broch ve Franklin (1972), Guidicini vd. (1973) ve Bieniawski (1975) tarafından yapılan yayınlar, kaya malzemesinin dayanım sınıflamasında nokta-yük dayanımı deneyine olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle Broch ve Franklin (1972) tarafından yapılan ayrıntılı çalışmalar, söz konusu deneyin ISRM tarafından standart yöntemler kapsamına alınmasını sağlamıştır (Bieniawski, 1975).

Nokta-yük dayanım indeksi, kaya malzemesinin dayanımının belirlenmesinde bir kolaylık sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Uygulanması kolay ve ucuz olan bir yöntemdir. Deney sonuçları, tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı ile ilişkilendirilebilir.

Nokta yük dayanım değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (Brook, 1993).

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (16)$$

Burada; I_s , nokta-yük dayanım değeri (MPa), P , uygulanan yük (kN), D_e , eşdeğer karot çapı (mm)'dir.

Çapsal deneyler için eşdeğer karot çapı, $D_e^2 = D^2$ 'dir. Eksenel deneyler için ise,

$$D_e^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (17)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada A , platenlerin değme noktaları arasından geçen en küçük kesitin alanıdır.

I_s değeri çapsal deneylerde D 'nin, eksenel deneylerde ise D_e 'nin bir fonksiyonu olarak değişir. Bu nedenle gerçek nokta-yük dayanım değerini elde etmek için boyut düzeltmesi yapılması gerekir. Böylece elde edilen düzeltilmiş nokta-yük dayanım indeksi değeri ($I_{s(50)}$), çapı 50 mm olan örnek üzerinde yapılan çapsal yükleme deneyinde elde edilen I_s değeri gibi tanımlanır.

$I_{s(50)}$ değerinin elde edilmesinde aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45} \cdot I_s \quad (18)$$

3.4.1 Nokta Yük Dayanımı Anizotropisi

Nokta-yük dayanım anizotropisini belirlemek amacıyla, kayaçların maksimum ve minimum dayanımlarının elde edildiği konumlardaki değerler dikkate alınır. Bu amaç için, tabakalanma düzlemine dik olarak alınan karot şeklindeki örnekler daha uygun olmaktadır. Genellikle önce çapsal olarak test edilen örneklerden çıkan parçalar üzerinde eksenel deneyler yapılır. Böylece hem tabakalanmaya dik hem de tabakalanmaya paralel deneyler yapılmış olur. Zira tecrübeler en büyük dayanım değerlerinin tabakalanmaya dik en düşük dayanım değerlerinin de tabakalanmaya paralel konumlarda elde edildiğini göstermiştir.

Eksenel ve çapsal olarak yapılan deney sonuçlarının düzeltilmesinden sonra birbirine oranlanması nokta-yük dayanım anizotropisini verir.

$$I_{a(50)} = \frac{I_{s(50)\perp}}{I_{s(50)\parallel}} \quad (19)$$

Burada;

$I_{s(50)L}$, tabakalanma düzlemine dik doğrultuda belirlenen ortalama standart nokta-yük dayanımı,

$I_{s(50)H}$, tabakalanma düzlemine paralel doğrultuda belirlenen ortalama standart nokta-yük dayanımıdır.

Nokta-yük dayanım anizotropisi değerine göre kayalar aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

$I_{a(50)} > 1$ ise anizotropik

$I_{a(50)} \cong 1$ ise yarı izotropik

$I_{a(50)} = 1$ ise izotropik

Tsidzi (1990), yapraklanma gösteren kayalar üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda; metamorfik kayaların nokta-yük dayanımı ile yapraklanma derecesinin yakından ilişkili olduğunu belirtmiş ve kayaların yapraklanma indeksini (F_i) aşağıdaki ilişki ile açıklamıştır.

$$F_i = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n M_i S_i \quad (20)$$

burada; M , kayacı oluşturan mineralin yüzdesi, S , tek tek minerallerin şekil faktörü olup, uzunluk/genişlik oranı olarak belirlenmektedir.

Tsidzi (1990)'ye göre nokta-yük anizotropisi ile yapraklanma indeksi arasında aşağıdaki ilişki vardır.

$$I_a = 0.7 F_i^{0.75} \quad r^2 = 0.88 \quad (21)$$

Bu çalışmanın sonucunda Tsidzi (1990) kayaları yapraklanma ve nokta-yük anizotropisine göre Çizelge 3.8'de sunulduğu şekilde sınıflamıştır.

Çizelge 3.8 Yapraklanma durumu ile nokta-yük anizotropisine göre kayaçların tanımlaması (Tsidzi, 1990).

Yapraklanma Durumu	Dayanım Anizotropisi $I_{a(50)}$	Tanımlama
Çok Güçlü Yapraklanma	>3.5	Çok Yüksek Anizotropi
Güçlü Yapraklanma	3.5-2.5	Yüksek Anizotropi
Orta Yapraklanma	2.5-1.5	Orta derecede Anizotropi
Zayıf Yapraklanma	1.5-1.1	Zayıf Anizotropi
Çok Zayıf veya Yapraklanma yok	<1.1	Yarı izotropik

Bu çizelge nokta yük dayanımı 3.5 ile 13 MPa arasında olan kayaçlarda yapılan çalışmalarla oluşturulmuştur. Dolayısı ile geniş bir aralıkta geçerlidir.

Yukarıdaki sınıflama, anizotropi derecesini dört ayrı sınıfa ayırması nedeniyle daha detaylı görülmektedir. Kayaçların nokta-yük dayanım anizotropisi ile basınç dayanımı anizotropisi arasında bir ilişki kurulabilirse, nokta-yük deneyi ile kayaç dayanımını değerlendirmek daha kolay ve güvenilir olacaktır.

3.4.2 Nokta-Yük Dayanımı Deneyleri

Kayaçların nokta-yük anizotropisini belirlemek amacıyla, Acenta tv., Acılık tb., Büyük tv., Çay tb., Çay tv., Domuzcu tb II, Domuzcu tb. I, Sulu tv. ve Nasufoğlu tv. taşlarından örnekleme yapılmıştır. Alınan örneklerden Nasufoğlu tv taşı bir kıltaşı diğeri silttaşı olmak üzere iki farklı birim belirlenmiş ve her ikisi için de nokta yük deneyi yapılmıştır.

Yukarıda belirtilen kömür damarlarından alınan bloklardan elde edilen karot şeklindeki örnekler üzerinde, eksenel ve çapsal olarak nokta-yük deneyleri yapılmıştır. Örneklerin çapları yaklaşık 53 mm, boyları ise 20 mm ile 45 mm

arasında değişmektedir. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler Çizelge 3.9'da sunulmuştur.

Çizelge 3.9 Kayaçların nokta-yük dayanımı deney sonuçları.

Alındığı Yer	$I_{s50\perp}$ (MPa)	$I_{s50//}$ (MPa)
Acenta Tv. (kumtaşı)	4.27 ± 0.61	2.68 ± 0.31
Acılık Tb. (kumtaşı)	7.86 ± 0.86	6.27 ± 0.79
Büyük Tv. (kumtaşı)	5.21 ± 0.72	4.41 ± 0.92
Çay Tb. (kumtaşı)	6.06 ± 0.88	4.70 ± 0.72
Çay Tv. (kumtaşı)	7.20 ± 0.77	6.39 ± 0.79
Domuzcu Tb.II (kumtaşı)	5.88 ± 0.39	5.81 ± 0.60
Domuzcu Tb.I (kıltaşı)	5.20 ± 0.45	1.49 ± 0.43
Nasufoglu Tv. (kıltaşı)	5.38 ± 0.54	2.00 ± 0.47
Nasufoglu Tv. (silttaşı)	5.98 ± 1.25	2.23 ± 0.37
Sulu Tv. (silttaşı)	6.17 ± 0.85	1.96 ± 0.27

Deneyler, bazı kumtaşlarında çapsal deneyler esnasında uygun olmayan kırılma tipleri görülmüştür. Bunlar özellikle dayanımı daha yüksek olan kayaçlarda ortaya çıkmıştır. Yine deneyler esnasında, eksenel deneylerde yüksekliği fazla olan örneklerde geçersiz kırılma tipleri gözlenmiştir.

Kıltaşı ve silttaşlarında ise; çapsal deneyler esnasında gözlenen yenilme, tam olarak yapraklanma düzleminde, düşük yük seviyelerinde ayrılma şeklinde olmuştur. Eksenel deneylerde karşılaşılan durum ise, geçerli kabul edilen deneylerde, laminasyon düzlemlerini dik kesecek şekilde oluşan yenilme şekilleridir. Bazı deneylerde, yapraklanma düzlemlerinden ayrılmaların olduğu da gözlenmiştir. Bu tür deneyler geçersiz kabul edilmiştir.

Bütün kayaçlarda uygulanan her iki tip deneyde de genellikle 8-10 adet geçerli sonuç alınacak kadar deney yapılmıştır.

Çizelge 3.8’da sunulan veriler anizotropi açısından irdelendiğinde kumtaşlarında eksenel ve çapsal sonuçların birbirine yakın olduğu, kiltası ve silttaşlarında ise iki değer arasındaki farklılığın belirgin olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışma sonuçları, daha önceki bölümlerde verilen (Tsidzi’ye [1990] göre) nokta yük anizotropisi açısından değerlendirildiğinde (Çizelge 3.10); Kumtaşlarından, Domuzcu Tv II taşının 1.01 değeri ile yarı izotropik olduğu ve tabakalanma etkisinin hiç olmadığı veya çok az olduğu, Acenta Tv. taşının 1.59 değeri ile orta derecede anizotropik ve orta tabakalanmaya sahip olduğu, diğer kumtaşları Büyük tv., Çay tv. ve Tb taşlarında 1.13 ile 1.29 arasında değiştiği, bunlarında zayıf anizotropik olduğu anlaşılmaktadır.

Kiltaları ve silttaşlarında ise, 2.51 ile 3.49 arasında değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, bu tip kayaçlarda yüksek anizotropi ve güçlü yapraklanma etkisi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Tek eksenli basınç ve nokta yük dayanım anizotropisi sonuçları karşılaştırıldığında genel olarak; Ramamurthy vd.’nin (1993) tek eksenli basınç dayanımı anizotropi sınıflamasına göre düşük anizotropiye sahip olan kumtaşlarının, Tsidzi’nin (1990) nokta yükü anizotropisi sınıflamasına göre zayıf anizotropik olarak tanımlamak mümkündür. Yine tek eksenli basınç dayanımı anizotropisine göre orta anizotropik olarak tanımlanan kiltası ve silttaşlarının, nokta-yük dayanımı açısından yüksek anizotropiye sahip olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada siltası ve kiltası örneklerinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; çalışmanın daha önceki bölümlerinde de belirtildiği gibi, belirgin şekilde yapraklanma gösteren Domuzcu damarı tabanına ait kiltası örneğinde ortaya çıkan anizotropiklik derecesi ile, nispeten daha sağlam olan ve

Çizelge 3.10 Kayaçların nokta-yük dayanım anizotropileri ($I_{a(50)}$).

Alındığı Yer	$I_{s50\perp} / I_{s50\parallel}$	Anizotropi Tanımı
Acenta tv (kumtaşı)	1.59	Orta Anizotropi
Acılık tb (kumtaşı)	1.25	Zayıf Anizotropi
Büyük tv (kumtaşı)	1.18	Zayıf Anizotropi
Çay tb (kumtaşı)	1.29	Zayıf Anizotropi
Çay tv (kumtaşı)	1.13	Zayıf Anizotropi
Domuzcu tb II (kumtaşı)	1.01	Yarı İzotropik
Domuzcu tb I (kıltaşı)	3.49	Yüksek Anizotropi
Nasufoglu (kıltaşı)	2.69	Yüksek Anizotropi
Nasufoglu (silttaşı)	2.51	Yüksek Anizotropi
Sulu tv (silttaşı)	3.15	Yüksek Anizotropi

daha düşük sayısal değer veren (2.51 ve 2.69) Nasufoglu damarına ait tavan kayaçların aynı anizotropi sınıfında değerlendirilmesi, Tsidzi'nin sınıflamasında sınıflama aralığının fazla geniş olabileceği izlenimi uyandırmaktadır. Bu nedenle nokta yük anizotropisi sınıflamasındaki aralıkların gözden geçirilmesi gerektiğini söylemek mümkündür.

Tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yük dayanımı açısından yapılan anizotropiklik tanımlamaları Çizelge 3.11'de birlikte verilmiştir. Bu çizelgeden de görülebileceği gibi, anizotropiklik tanımlamasında ki sınıflama arasında bir uyum vardır. Nokta yük anizotropisine göre zayıf anizotropik olan kayaçlar, tek eksenli basınç dayanımı anizotropisi açısından düşük anizotropik olarak tanımlanmaktadırlar. Bu durumda; tek eksenli basınç anizotropisini tanımlamak amacı ile, nokta yük anizotropisi tanımlamasının kullanılması uygun görülmektedir.

Çizelge 3.11 Kayaçların σ_c ve I_s anizotropisi açısından karşılaştırılması

Kayacın Alındığı Yer	σ_c 'ye göre Anizotropiklik		$I_{a(50)}$ 'ye göre Anizotropiklik	
Acenta tv (kumtaşı)	1.97	Düşük Anizotropi	1.59	Orta Anizotropi
Acılık tb (kumtaşı)	1.72	Düşük Anizotropi	1.25	Zayıf Anizotropi
Büyük tv (kumtaşı)	1.35	Düşük Anizotropi	1.18	Zayıf Anizotropi
Çay tb (kumtaşı)	1.15	Düşük Anizotropi	1.29	Zayıf Anizotropi
Çay tv (kumtaşı)	1.69	Düşük Anizotropi	1.13	Zayıf Anizotropi
Domuzcu tbII (kumtaşı)	1.29	Düşük Anizotropi	1.01	Yarı İzotropik
Domuzcu tb I (kıltaşı)	3.04	Orta Anizotropi	3.49	Yüksek Anizotropi
Nasufoglu (silttaşı)	2.00	Orta Anizotropi	2.51	Yüksek Anizotropi
Sulu tv (silttaşı)	2.30	Orta Anizotropi	3.15	Yüksek Anizotropi

BÖLÜM 4

TORTUL KAYAÇLARIN DEFORMASYON ANİZOTROPİSİ

Deformabilite, yük uygulanması veya uygulanan yükün kaldırılması halinde cismin göstermiş olduğu şekil değişimi davranışdır. Bu davranış boyutların uzaması veya kısılması şeklinde olabileceği gibi, cismi oluşturan birim elemanların yüzeylerinin açılarının değişimi olarak ortaya çıkan şekil değiştirme şeklinde de olabilir. Bu deformasyonlar sırasıyla normal birim deformasyon (ϵ) ve kayma birim deformasyonudur (γ).

Kayadaki birim deformasyonlar çok küçük yenilme riski olduğunda dahi önemlidir. Çünkü bölgesel olarak meydana gelen blok hareketleri yapı içindeki gerilmelerde değişikliğe neden olur.

Kayaçlarda deformasyonların hesaplanmasının gerekli olduğu birçok durum vardır. Örneğin basınç tünellerinde, basınç altında tünel kaplamasının genişlemesi ile basınç düştüğü zaman oluşan daralmaların büyüklüğü bilinmelidir. Bu arada tünelin açıldığı kayanın deformasyon özellikleri de önemli olmaktadır. Bu durum kemer şekilli barajlarda, baraj duvarlarının dayandırıldığı yerlerdeki kayalar için de önemlidir. Bu örneklerdeki gibi kayaya büyük miktarda itki kuvvetleri uygulayan diğer mühendislik yapılarında da deformasyonlar önemli olmaktadır.

Hemen hemen bütün mühendislik yapıları bir dereceye kadar elastik özelliğe sahiptir. Uygulanan yükler belirli sınırlar içinde iken kaldırılırsa, malzemede oluşan deformasyonlar da kalkar ve malzeme eski haline dönerse bu tür davranış elastik davranış olarak tanımlanır. Yük tamamen kaldırıldığı halde malzemede bir

miktar deformasyon olduğu görüldüyorsa, bu tür davranış da elastik olmayan davranış olarak adlandırılır.

Kayaçlarda, etkiyen gerilme ile meydana gelen birim deformasyonlar arasında ilişki vardır. Bu ilişki Hooke kanunu (Wittke'den, 1990) ile tanımlanmıştır.

4.1 GERİLME BİRİM DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Elastik simetri elemanlarından herhangi birinin bulunmadığı anizotropik bir cisim için, kartezyen koordinatlarda genelleştirilmiş Hooke kanunu aşağıdaki gibi yazılabilir (Wittke, 1990).

$$\varepsilon_x = \alpha_{11}\sigma_x + \alpha_{12}\sigma_y + \alpha_{13}\sigma_z + \alpha_{14}\tau_{xy} + \alpha_{15}\tau_{yz} + \alpha_{16}\tau_{zx} \quad (22.a)$$

$$\varepsilon_y = \alpha_{21}\sigma_x + \alpha_{22}\sigma_y + \alpha_{23}\sigma_z + \alpha_{24}\tau_{xy} + \alpha_{25}\tau_{yz} + \alpha_{26}\tau_{zx} \quad (22.b)$$

$$\varepsilon_z = \alpha_{31}\sigma_x + \alpha_{32}\sigma_y + \alpha_{33}\sigma_z + \alpha_{34}\tau_{xy} + \alpha_{35}\tau_{yz} + \alpha_{36}\tau_{zx} \quad (22.c)$$

$$\gamma_{yz} = \alpha_{41}\sigma_x + \alpha_{42}\sigma_y + \alpha_{43}\sigma_z + \alpha_{44}\tau_{xy} + \alpha_{45}\tau_{yz} + \alpha_{46}\tau_{zx} \quad (22.d)$$

$$\gamma_{zx} = \alpha_{51}\sigma_x + \alpha_{52}\sigma_y + \alpha_{53}\sigma_z + \alpha_{54}\tau_{xy} + \alpha_{55}\tau_{yz} + \alpha_{56}\tau_{zx} \quad (22.e)$$

$$\gamma_{xy} = \alpha_{61}\sigma_x + \alpha_{62}\sigma_y + \alpha_{63}\sigma_z + \alpha_{64}\tau_{xy} + \alpha_{65}\tau_{yz} + \alpha_{66}\tau_{zx} \quad (22.f)$$

Bu eşitliklerdeki α_{ij} katsayıları elastik sabitlerle tanımlanmaktadır. Gerilme bileşenleri için yukarıdaki eşitlikler yeniden düzenlenebilir (Wittke, 1990).

$$\sigma_x = A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{13}\varepsilon_z + A_{14}\gamma_{xy} + A_{15}\gamma_{yz} + A_{16}\gamma_{zx} \quad (23.a)$$

$$\sigma_y = A_{21}\varepsilon_x + A_{22}\varepsilon_y + A_{23}\varepsilon_z + A_{24}\gamma_{xy} + A_{25}\gamma_{yz} + A_{26}\gamma_{zx} \quad (23.b)$$

$$\sigma_z = A_{31}\varepsilon_x + A_{32}\varepsilon_y + A_{33}\varepsilon_z + A_{34}\gamma_{xy} + A_{35}\gamma_{yz} + A_{36}\gamma_{zx} \quad (23.c)$$

$$\tau_{zx} = A_{41}\epsilon_x + A_{42}\epsilon_y + A_{43}\epsilon_z + A_{44}\gamma_{xy} + A_{45}\gamma_{yz} + A_{46}\gamma_{zx} \quad (23.d)$$

$$\tau_{zy} = A_{51}\epsilon_x + A_{52}\epsilon_y + A_{53}\epsilon_z + A_{54}\gamma_{xy} + A_{55}\gamma_{yz} + A_{56}\gamma_{zx} \quad (23.e)$$

$$\tau_{xy} = A_{61}\epsilon_x + A_{62}\epsilon_y + A_{63}\epsilon_z + A_{64}\gamma_{xy} + A_{65}\gamma_{yz} + A_{66}\gamma_{zx} \quad (23.f)$$

Bu eşitliklerin içerdiği 36 adet katsayının 21 tanesi bağımsız sabitler ile belirlenir.

Tam simetrinin geçerli olduğu izotropik bir cisimde elastik özellikler bütün yönlerde aynıdır. Cismin içinden geçen her düzlem bir elastik simetri düzlemidir. Elastik sabitlerin sayısının yalnızca iki olduğu bu durumda, gerilme-birim deformasyon ilişkisini tanımlayan eşitlikler aşağıdaki gibi düzenlenebilir (Wittke, 1990).

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \right] \quad (24.a)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z) \right] \quad (24.b)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \right] \quad (24.c)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \quad (24.d)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz} \quad (24.e)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad (24.f)$$

Burada, E ve ν , sırasıyla Young modülü ve poisson oranıdır. $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ olup, rijitlik modülü olarak adlandırılır.

İzotropik bir cisim içinde rasgele konumlandırılmış bir koordinat sistemine göre (x,y,z) gerilmeler veya birim deformasyonlar Hooke kanununa göre Eşitlik 25'deki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} \left[(1-\nu)\epsilon_x + \nu\epsilon_y + \nu\epsilon_z \right] \quad (25.a)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} \left[\nu\epsilon_x + (1-\nu)\epsilon_y + \nu\epsilon_z \right] \quad (25.b)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} \left[\nu\epsilon_x + \nu\epsilon_y + (1-\nu)\epsilon_z \right] \quad (25.c)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} \quad (25.d)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yz} \quad (25.e)$$

$$\tau_{zx} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{zx} \quad (25.f)$$

Cisim herhangi bir noktasından geçen bir eksen etrafında döndürüldüğünde, bu eksene dik düzlemler içinde cismin sahip olduğu özellikler her yönde aynı kalıyor ve yalnız bu eksen boyunca değişiyorsa, bu tür cisimler düzlemsel izotropik (transversal isotropy) olarak adlandırılırlar. Bu tür cisimler için genelleştirilmiş Hooke kanununa göre gerilme ile birim deformasyonlar arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir (Wittke, 1990).

$$\epsilon_x = \frac{1}{E_1} (\sigma_x - \nu_1 \sigma_y) - \frac{\nu_2}{E_2} \sigma_z \quad (26.a)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E_1} (\sigma_y - \nu_1 \sigma_x) - \frac{\nu_2}{E_2} \sigma_z \quad (26.b)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu_2}{E_1}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{E_2}\sigma_z \quad (26.c)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G_2}\tau_{yz} \quad (26.d)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G_2}\tau_{xz} \quad (26.e)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G_1}\tau_{xy} \quad (26.f)$$

Bu tür davranış 5 adet bağımsız elastik sabit ile tanımlanır. Bunlar izotropi düzlemine paralel ve dik durumda bulunan E_1 ve E_2 , izotropi düzlemindeki rijitlik modülü G_2 ile Poisson oranları ν_1 ve ν_2 'dir (Şekil 4.1). Elastik sabitlerin tanımlaması aşağıdaki gibi yapılabilir.

E_1 : izotropi düzlemine paralel yükleme durumunda hesaplanan Young modülü,

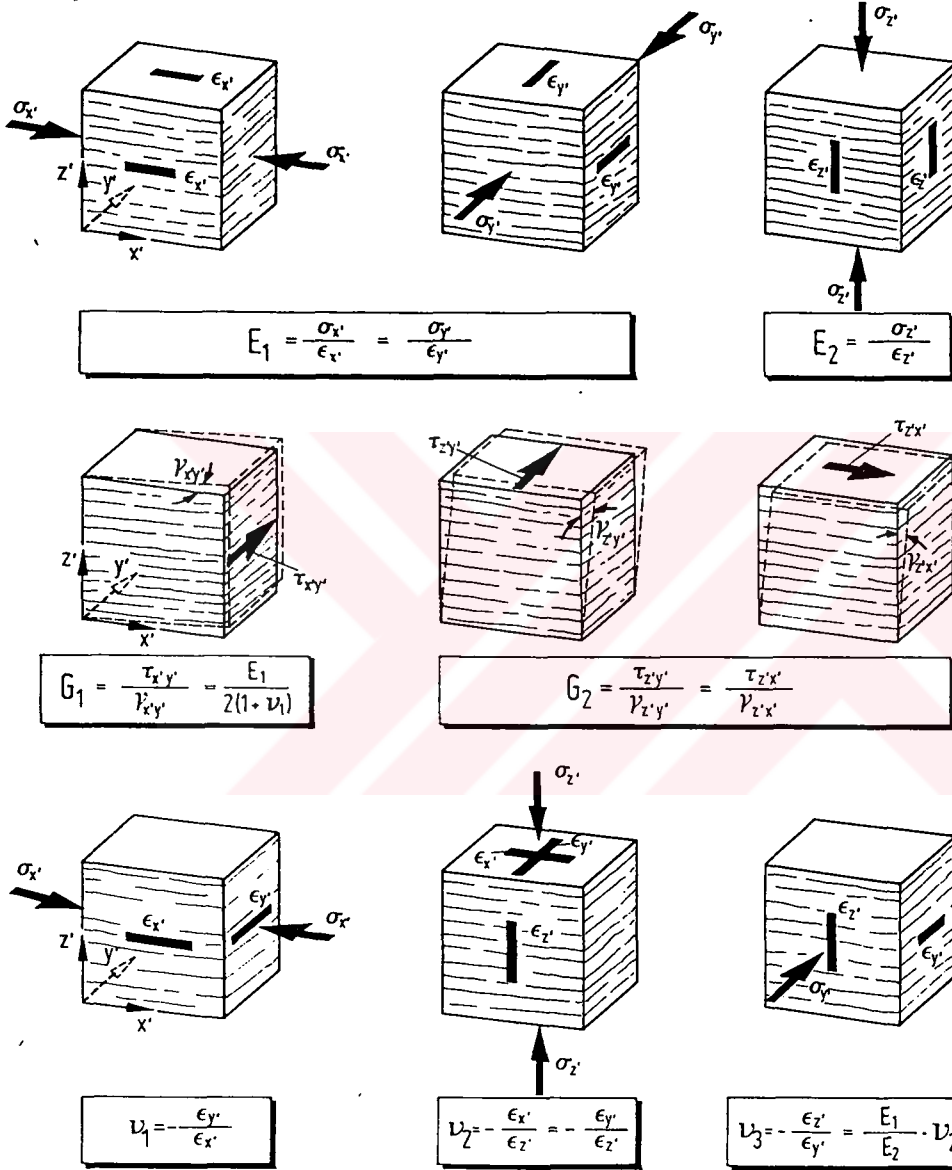
E_2 : izotropi düzlemine dik yükleme durumunda hesaplanan Young modülü,

ν_1 : izotropi düzlemine paralel yönde yük etkimesi durumunda, izotropi düzlemine paralel yöndeki çapsal birim deformasyonların, eksenel birim deformasyonlara oranlanması ile elde edilen Poisson oranı,

ν_2 : izotropi düzlemine dik yönde yük etkimesi durumunda, ölçülen çapsal birim deformasyonların, eksenel birim deformasyonlara oranlanması ile elde edilen Poisson oranı,

G_2 : izotropi düzlemine dik düzlemdeki rijitlik modülü,

G_1 : izotropi düzlemi içindeki rijitlik modülüdür.



Şekil 4.1 Düzlemsel izotropik kayaçlarda elastik sabitlerin tanımı

Düzlemsel yapı gösteren sağlam kayanın davranışı doğrusal izotropik olarak kabul edilemez. Çünkü bu tür kayalar, düzlemlere dik doğrultuda paralel yöndekinden daha büyük sıkışma gösterirler.

Elastisite teorisi, düzlemsel izotropi durumunda Poisson oranı için üst sınır koymaz. Fakat sınırlayıcı bir etki, enerji durumundan çıkartılabilir (Wittke, 1990). Buna göre;

$$2\nu_2\nu_3 < 1 - \nu_1 \quad (27)$$

$$\nu_3 = \frac{E_1}{E_2} \cdot \nu_2 \quad (28)$$

Sağlam kaya örnekleri üzerinde yapılan deney sonuçları ν_1 ve ν_2 'nin her zaman 0.5'den küçük olduğunu fakat ν_3 'ün bazı durumlarda 0.5'den büyük olabileceğini göstermiştir. ν_3 için üst sınır olarak 0.5 kabul edilirse ν_2 için de aşağıdaki koşul söz konusu olabilir (Wittke, 1990):

$$\nu_2 \leq \frac{1}{2} \frac{E_2}{E_1} \quad (29)$$

Deneyssel olarak G_2 'nin belirlenmesi zor olduğundan bu elastik sabiti, diğer elastik sabitleri kullanarak açıklamak için bazı araştırmalar yapılmıştır. Kiehl (1980), bağımsız rijitlik modülü (G_2) için üst sınır olarak aşağıdaki eşitliği ileri sürmüştür (Wittke'den, 1990).

$$G_2 \leq \frac{E_2}{2 \left[\nu_2(1 + \nu_1) + \sqrt{\left(\frac{E_2}{E_1} - \nu_2^2 \right) (1 - \nu_1^2)} \right]} \quad (30)$$

Bu konuda Barden (1963) aşağıdaki ilişkiyi önermiştir (Wittke'den, 1990).

$$G_2 \cong \frac{E_2}{1 + \frac{E_2}{E_1} + 2\nu_2} \quad (31)$$

Batugin ve Nirenburg (1972), fillit, arduvaz, kumtaşı, kalker, granit vb. kayalar üzerinde yaptıkları deneylerde bağımsız rijitlik modülünün aşağıdaki bağıntı ile yaklaşık olarak %10 hata ile hesaplanabileceğini öne sürmüşlerdir (Kwasniewski'den, 1983).

$$G_2 \cong \frac{E_1 E_2}{E_1 + (1 + 2\nu_2) E_2} \quad (32)$$

Ayrıca, 0° ve 90° açılarından farklı herhangi bir konum açısındaki Young modülü (E_β) bilinirse, bağımsız rijitlik modülü aşağıdaki eşitlikten de bulunabilir (Wittke, 1990).

$$E_\beta = \left[\frac{\cos^4 \beta}{E_1} + \frac{\sin^4 \beta}{E_2} + \left(\frac{1}{G_2} - \frac{2\nu_2}{E_2} \right) \cos^2 \beta \sin^2 \beta \right]^{-1} \quad (33)$$

$$G_2 = \frac{1}{\frac{1}{E_\beta \sin^2 \beta \cos^2 \beta} + \frac{2\nu_2}{E_2} - \frac{\cos^2 \beta}{E_1 \sin^2 \beta} - \frac{\sin^2 \beta}{E_2 \cos^2 \beta}} \quad (34)$$

4.2 ANİZOTROPİK ELASTİK SABİTLER

Düzlemsel izotropik cisimlerin elastik sabitlerindeki anizotropinin derecesi (k_E) genellikle Eşitlik 35 ve 36 yardımıyla belirlenir (Kwasniewski, 1983):

$$k_E = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} \quad (35)$$

veya

$$k'_E = \frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} \quad (36)$$

Kayaçların elastik anizotropilerini belirlemek amacıyla Eşitlik 36 daha sık kullanılır. Çünkü kayaçlarda $E_{\parallel} > E_{\perp}$ durumuna daha sık rastlanmaktadır. Bu durumda 1'den daha büyük değerler elde edilir.

k_E katsayısını belirlemek, düzlemsel izotropik kayaçlarda elastik anizotropinin derecesini tam olarak tahmin etmek için yeterli değildir. Lekhnitski (1962) elastik anizotropiyi tanımlamak için Young modülü ve Poisson oranının kullanıldığı aşağıdaki eşitlikleri önermiştir (Kwasniewski'den, 1983).

$$n = \sqrt{2k + m} \quad (37)$$

Düzlemsel izotropi için,

$$k^2 = \frac{E_1 / E_2 - \nu_2^2}{1 - \nu_1^2} \quad (38)$$

$$l = \left(\frac{G_1}{G_2} \right)^{1/2} \quad (39)$$

$$o = \frac{E_1 / G_2 - 2\nu_2(1 + \nu_1)}{1 - \nu_1^2} \quad (40)$$

$$n = (2k + m)^{1/2} \quad (41)$$

İzotropik malzemelerde, $k=1$, $l=1$, $o=2$ ve $n=2$ olması gerekir.

n parametresine göre Borecki vd. (1979) deformasyon anizotropisi sınıflamasını Çizelge 4.1'deki gibi yapmışlardır (Kwasniewski'den, 1983).

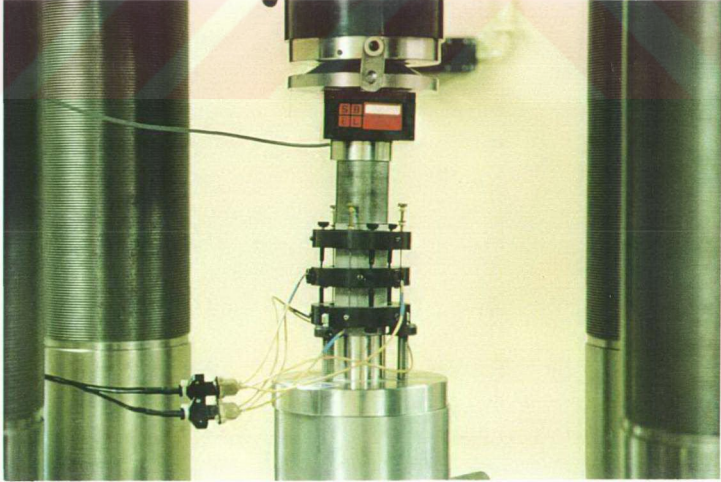
Çizelge 4.1 Borecki vd. (1979) göre deformasyon anizotropikliği tanımı (Kwasniewski'den, 1983).

n	Anizotropi tanımı
$n \leq 2.1$	Yarı izotropik
$2.1 < n \leq 2.5$	Zayıf anizotropik
$2.5 < n \leq 3.0$	Orta anizotropik
$n > 3.0$	Kuvvetli anizotropik

4.3 STATİK DEFORMASYON DENEYLERİ

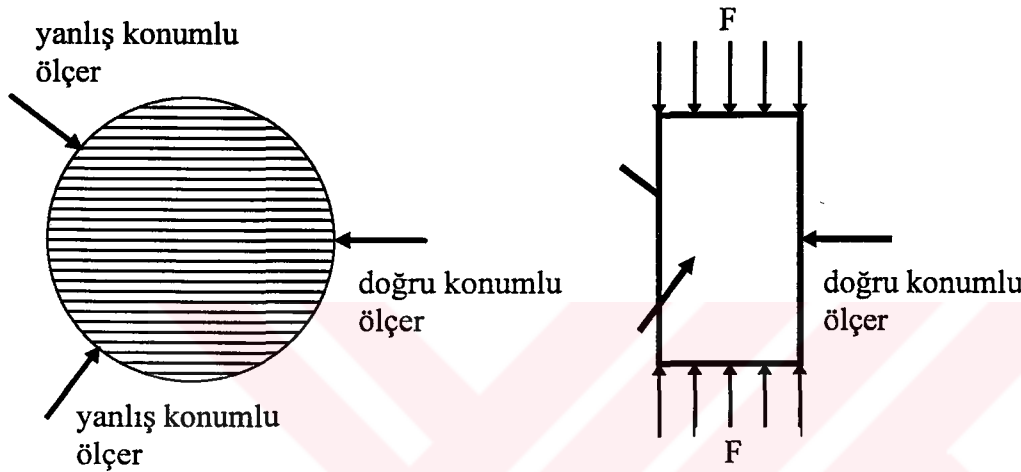
Çalışmada incelenen kayaçların statik yükler altındaki davranışını belirlemek ve anizotropi düzleminin konumunun değişimi ile deformasyon özelliklerindeki değişimleri belirlemek amacıyla 0° , 30° , 45° , 60° ve 90° konum açılarında hazırlanan örnekler üzerinde çalışılmıştır.

Şekil 4.2’de gösterilen deformasyon ceketi sistemine uygun olarak deformasyon deneylerinin yapılabilmesi için, ilk olarak deneye hazırlanan örneklerden 3 tanesi test edilerek, örneklerin ortalama tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir. Daha sonra deformasyon ölçerler dikkatli bir şekilde anizotropi düzlemine göre konumlandırılarak, önceden belirlenen tek eksenli basınç dayanımının yaklaşık % 70-75 seviyelerine kadar yüklenmiş ve bu esnada örnekte meydana gelen eksenel ve çapsal yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Kaydedilen bu veriler kullanılarak, kayaçların, tek eksenli basınç dayanımlarının % 50’sindeki teğetsel Young modülü ve Poisson oranı hesaplanmıştır.



Şekil 4.2 Statik deformabilite deneylerinde kullanılan deformasyon ceketi.

β 'nın 0° 'den farklı olduğu durumlarda, çapsal deformasyon ölçerlerin anizotropi düzlemine göre konumu önemli olmamaktadır. Fakat v_1 ve v_3 'ün ölçülmesi sırasında, sistemin yapısı gereği, deformasyon ölçerlerin yalnız bir tanesi anizotropi düzlemine dik veya paralel olarak konumlandırılabilir. Diğer iki deformasyon ölçer, anizotropi düzlemi ile 90° 'den farklı açı yapmakta ve bu nedenle aynı örnek üzerinde eş zamanlı olarak, anizotropi düzlemine dik ve paralel yönde oluşan deformasyonları ölçmek mümkün olmamaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Çapsal birim deformasyonların ölçülmesi sırasında deformasyon ölçerlerin konumu

Ayrıca sistemin olumsuzluklarından diğeri de, deformasyon ölçerlerin yalnız bir tanesinin istenilen şekilde konumlandırılabilmesidir ki bu da ISRM tarafından önerilen aynı anda en az iki noktadan ölçü alınması önerisine uymamaktadır. Bu çalışmada kayaçların v_1 ve v_3 'ünü belirlemek için aynı birime ait en az üç ayrı örnek üzerinde deneyler tekrarlanarak elde edilen sonuçların ortalaması kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre hesaplanan elastik sabitler Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

Kayaçların deformasyon özelliklerini belirlemek amacıyla, toplam 213 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerin 49 adeti, elde edilen sonuçların uyumsuzluğu, hazırlanan örneğin farklı özellikte olması veya deney esnasında fark edilen hazırlama hataları nedeni ile geçersiz kabul edilmiştir.

Çizelge 4.2 Kayaçlarda ölçülen Young modülleri (E, GPa).

Alındığı Yer	Deney Sayısı		Young Modülü (GPa)				
	Geçerli	Geçersiz	E ₁	E ₂	E ₃₀	E ₄₅	E ₆₀
Acenta tv (kumtaşı)	18	5	48.8±2.0	30.0±3.4	---	30.5±1.4	25.1±2.7
Acılık tb (kumtaşı)	16	2	38.7±3.1	31.6±1.8	32.1±2.4	34.4±1.5	35.2±1.6
Büyük tv (kumtaşı)	19	19	27.4±3.6	19.0±4.3	21.0±4.7	18.5±3.7	17.4±3.1
Çay tb (kumtaşı)	18	6	51.1±3.4	47.4±2.5	35.2±2.4	38.2±1.4	39.6±2.7
Çay tv Kumtaşı	24	1	36.0±2.3	36.4±5.0	35.2±2.3	38.3±2.8	38.5±2.7
Domuzcu tb II (kumtaşı)	20	7	36.2±1.9	33.5±1.2	34.2±2.4	33.2±1.9	31.4±1.4
Domuzcu tb I (kıltaşı)	22	3	12.2±2.0	7.3±0.6	6.0±0.7	7.9±0.9	6.9±1.1
Nasufoglu tv (silttaşı)	14	6	27.5±2.6	21.7±1.9	20.1±2.0	---	---
Sulu tv (silttaşı)	13	--	40.5±2.3	26.0±0.6	---	29.9±1.8	---

Çizelge 4.3 Kayaçlarda ölçülen Poisson oranları (ν)

Alındığı Yer	ν_1	ν_2	ν_3
Acenta tv (kumtaşı)	0.241±0.026	0.299±0.026	0.339±0.023
Acılık tb (kumtaşı)	0.208±0.038	0.292±0.046	0.363±0.002
Büyük tv (kumtaşı)	0.217±0.029	0.322±0.012	0.364±0.031
Çay tb (kumtaşı)	0.173±0.026	0.274±0.004	0.411±0.055
Çay tv (kumtaşı)	0.263±0.035	0.243±0.028	0.393±0.025
Domuzcu tb II (kumtaşı)	0.261±0.115	0.283±0.020	0.325±0.024
Domuzcu tb I (kiltası)	0.281±0.027	0.363±0.032	0.482±0.020
Nasufoglu tv (silttaşı)	0.231±0.013	0.287±0.020	0.515±0.062
Sulu tv (silttaşı)	0.218±0.046	0.318±0.028	0.364±0.040

β 'nın 30°, 45° ve 60° olduğu durumlarda ölçülen Young modülü değerleri, kumtaşlarında Acenta damarı tavan taşı dışındakilerde genellikle birbirine yakın çıkmaktadır.

Domuzcu taban I taşında, en düşük Young modülü değeri elde edilmiştir zira, bu kayaç, dokusal olarak diğer kayaçlardan belirgin şekilde farklıdır.

Çizelge 4.3'de sunulan sonuçlara göre; Çay damarı tavan taşına ait kumtaşı ve Domuzcu damarı taban taşına ait kiltası verileri dışındaki örneklerde Poisson oranı verileri $\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$ şeklinde sıralanmaktadır. Bu sonuç normaldir, çünkü, tabakalanmaya paralel yönde yapılan yüklemede, tabakalanmaya dik yönde oluşan deformasyonlar en büyük değere ulaşırken, tabakalaşmaya paralel yönde ise en düşük değerde olmaktadır. Bu yükleme esnasında yükleme yönüne paralel yöndeki

eksenel birim deformasyonlar da, tabakalanmaya dik yönde yapılan yüklemelelerde oluşan deformasyonlardan oldukça düşük olmaktadır. Bu nedenle v_3 en büyük, v_1 ise en düşük çıkmaktadır.

Sağlam kayalar üzerinde yapılan laboratuvar çalışmalarından elde edilen bilgiler v_1 ve v_2 'nin her zaman 0.5'den küçük olduğunu fakat v_3 'ün 0.5 civarında nadiren de 0.5'den büyük olabileceğini göstermiştir (Wittke, 1990). Çizelge 4.3'den görülebileceği gibi, Nasufoğlu damarı tavan taşında v_3 , 0.515 değerine ulaşmaktadır. Domuzcu taban I taşında da 0.482 değerine ulaşmaktadır.

Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi, düzlemsel izotropi gösteren kayalarda gerilme-birim deformasyon ilişkilerini veren Hooke kanununu tanımlamak için 5 bağımsız elastik sabitin belirlenmesi gerekmektedir. Bunların dört tanesi yukarıdaki çizelgelerde verilmiştir. Beşinci bağımsız elastik sabit olan rijitlik modülü (G_2)'nü belirlemek bu durumda mümkün olabilmektedir. Burada bağımsız rijitlik modülünü belirlemek için Eşitlik 34 kullanılmıştır.

Kayaçların deformasyon anizotropisini tanımlamak amacıyla daha önceki bölümde sunulan Borecki vd. (1979) tarafından önerilen sınıflama kullanılmıştır. Bu sınıflamaya (Çizelge 4.1) göre yapılan deformasyon anizotropisi sınıflamasında; Büyük damarı tavan taşı 2.03 değeri ile yarı izotropik, Acılık damarı taban taşı, Çay damarı taban taşı, Domuzcu damarı taban taşı II ve Nasufoğlu tavan taşı ve Sulu damarı tavan taşı 2.1 ile 2.5 arasında değer almaktadır ve 'zayıf anizotropik' olarak tanımlanmaktadır. Acenta damarı tavan taşı ile Domuzcu damarı taban taşı I ise 2.5 ile 3.0 arasında değer almakta ve orta anizotropik olarak tanımlanmaktadır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 Kayaçların deformasyon anizotropisine göre tanımlaması.

Alındığı Yer	k	m	n	Anizotropi Tanımı
Acenta Tv.	1.28	4.67	2.69	Orta anizotropik
Acılık Tb.	1.09	2.66	2.20	Zayıf anizotropik
Büyük Tv.	1.18	2.72	2.25	Zayıf anizotropik
Çay Tb.	1.02	3.84	2.42	Zayıf anizotropik
Çay Tv.	1.0	1.95	1.99	İzotropik
Domuzcu Tb II	1.04	2.36	2.11	Zayıf anizotropik
Domuzcu Tb. I	1.29	5.61	2.86	Orta anizotropik
Nasufoğlu Tv.	1.06	3.67	2.41	Zayıf anizotropik
Sulu Tv.	1.24	3.24	2.39	Zayıf anizotropik

Değişik araştırmacıların önerilerine göre hesaplanan G_2 değerleri ile Eşitlik 34 kullanılarak hesaplanan G_2 değerlerinin karşılaştırması Çizelge 4.5’de yapılmıştır. Bu çizelgeden de görülebileceği gibi, her üç araştırmacının da önermiş oldukları bağıntılar birbirleri ile uyumlu sonuç vermektedir. Hesaplanan G_2 değerleri ile ölçülmüş olan değerler de genellikle birbirine yakın çıkmıştır. Bu çalışmada özellikle Poisson oranının belirlenmesinde bazı zaaflar olmasına rağmen ulaşılan sonuçların uyumluluğu, deneysel hataların önemli olmadığını ortaya koymaktadır.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar, kumtaşlarında bağımsız rijitlik modülü G_2 ’nin 9 ile 13 GPa arasında değiştiğini ve ortalama bir değer olarak 10-11 GPa alınabileceğini göstermiştir.

Yapılan çalışma, kumtaşlarına göre daha kuvvetli anizotropiye sahip olan, kıltaşı ve silttaşı gibi kayaçlarda, G_2 ’nin değeri için bir genelleme yapılamayacağını ancak araştırmacılar tarafından önerilen ilişkilerin düşük anizotropiye sahip kayaçlarda kullanılabileceğini göstermiştir.

Çizelge 4.5 Ölçülen ve değişik araştırmacılar tarafından yapılan önerilere göre hesaplanan bağımsız rijitlik modülü G_2 'nin karşılaştırılması.

Alındığı yer	Ölçülen bağımsız elastik sabit		Hesaplanan bağımsız rijitlik modülü (G_2) (GPa)		
	Deney sayısı	G_2 (GPa) (Eşitlik 34)	Kiehl (1980) (Eşitlik 30)	Barden (1963) (Eşitlik 31)	Batugin ve Nirenburg (1972) (Eşitlik 32)
Acenta tv (kumtaşı)	6	9.5±1.2	14.0	13.6	15.1
Acılık tb (kumtaşı)	9	11.9±1.3	13.3	13.2	13.8
Büyük tv (kumtaşı)	7	7.3±2.4	8.3	8.1	8.9
Çay tb (kumtaşı)	7	11.7±1.6	19.3	19.1	19.5
Çay tv (kumtaşı)	13	14.8±3.6	14.6	14.6	14.5
Domuzcu tb II (Kumtaşı)	8	12.5±1.5	13.5	13.4	13.7
Domuzcu tb I (kıltaşı)	8	2.0±0.7	3.3	3.1	3.6
Nasufoglu tv (silttaşı)	3	6.0±1.0	9.3	9.2	9.7
Sulu tv (silttaşı)	4	10.5±1.4	11.8	11.4	12.7

Bu çalışmada deneylerden elde edilen Poisson oranları ile, teorik olarak Eşitlik 28 kullanılarak elde edilen v_3 değeri ve Eşitlik 29 kullanılarak, v_2 için üst sınır olarak hesaplanan değerler Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Bu çizelgeden de görüleceği gibi, v_2 değerleri için, kumtaşlarında elde edilen sonuçlar genel olarak birbiri ile uyumlu olmaktadır. Yalnız araştırmada test edilen tek kıltaşı örneği olan Domuzcu Tb I taşına ait örnekte uyumsuzluk görülmektedir. v_3 değerlerinde ise uyumsuzluk görülmektedir. Bu uyumsuzluğun nedeni, Eşitlik 28'de kullanılan E_1 , E_2 ve v_2 'nin deneysel olarak ölçülmesindeki deneysel hataların, v_3 'ün hesaplanmasında bir arada etkimesi olabilir.

Bu durum, deneylerde kullanılan deformasyon ceketinin bazı olumsuz taraflarına rağmen, elde edilen sonuçların güvenilir olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Çizelge 4.6 Ölçülen ve hesaplanan v_2 ile v_3 değerleri

Alındığı yer	Kayaç Türü	v_2		v_3	
		Ölçülen	Eşitlik 29	Ölçülen	Eşitlik 28
Acenta Tv.	Kumtaşı	0.299	0.307	0.339	0.460
Acılık Tb.	Kumtaşı	0.292	0.408	0.363	0.358
Büyük Tv.	Kumtaşı	0.322	0.347	0.364	0.464
Çay Tb.	Kumtaşı	0.274	0.464	0.411	0.298
Çay Tv.	Kumtaşı	0.243	0.506	0.393	0.240
Domuzcu Tb. II	Kumtaşı	0.283	0.463	0.325	0.306
Domuzcu Tb. I	Kıltaşı	0.363	0.299	0.482	0.607
Nasifoğlu Tv	Silttaşı	0.287	0.394	0.515	0.364
Sulu Tv.	Silttaşı	0.318	0.321	0.364	0.488

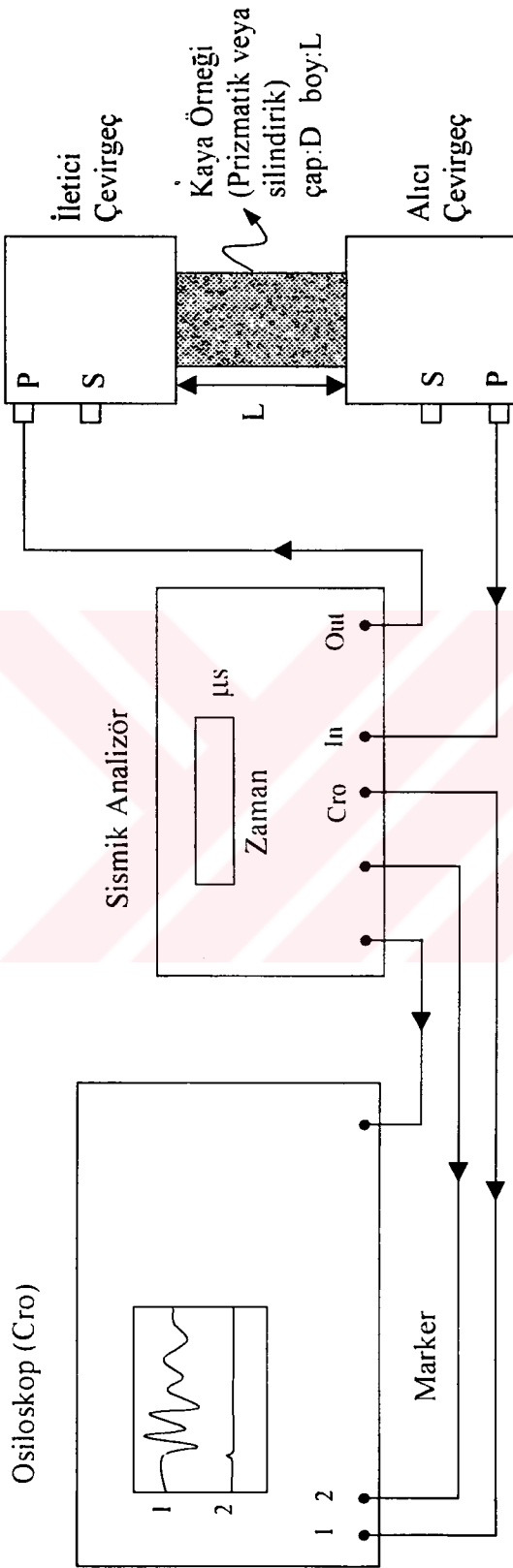
BÖLÜM 5

TORTUL KAYAÇLARIN DİNAMİK ÖZELLİK ANİZOTROPİSİ

Sismik dalga hızı ile ilgili yöntemler (dinamik yöntemler), mineral aramaları, madencilik çalışmaları, atık depolamalarında saha araştırmaları ve her türlü mühendislik uygulamalarında giderek artan bir öneme sahiptir. Kaya örneklerinde basınç (V_p) ve kesme (V_s) dalga hızlarının doğru bir şekilde ölçülmesine dayanan dinamik yöntemler, elastik sabitlerinin belirlenmesinde hızlı bir yöntem olarak kabul görmüştür. Dalga hızları, kayanın basınç ve kesme kuvvetlerine karşı koyma yeteneğine ve bu dolayısıyla elastisite modülüne bağlıdır. Bir çok durumda kaya malzemesinde oluşan düşük birim deformasyonlardaki elastik modüller önem kazanır. Küçük birim deformasyonların oluşturulmasında sonik dalgaların kullanımı oldukça kolay bir yöntemdir. Bu şekilde elde edilen elastik sabitler, dinamik sabitler olarak adlandırılırlar.

Dalga hızlarının belirlenmesinde iki farklı yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan birincisinde, doğrudan P ve S dalgalarının belirli boydaki kaya örneği içinden geçiş zamanı ölçülerek, dalga hızları hesaplanmaktadır (Şekil 5.1).

İkinci yöntemde ise, boy-çap oranı en az 10 olan bir çubukta meydana gelen salınım frekansı ölçülerek dalga hızları hesaplanmaktadır. İkinci yöntemde frekansın çok hassas bir şekilde ölçülmesi mümkün olduğundan sonuçlar daha doğru olmaktadır (Siggins, 1993). Sismik ölçümler sonucunda elde edilen verilerin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için dalgaların ortam içinde yayılımını etkileyen faktörlerin bilinmesi gerekir.



Şekil 5.1 Sismik hız ölçümlerinde kullanılan düzenğin şematik gösterimi.

5.1 SİSMİK DALGA HIZLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Kayaç içinde sismik dalgalarının yayılım hızının ölçümü daha çok petrol mühendisliğinde, litoloji ve porozite tayininde kullanılmakla birlikte, diğer mühendislik amaçları için de kullanılmaktadır. Örneğin laboratuvar ve arazide elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilmesi ile kaya kütlelerinin çatlaklanma durumu belirlenebilmektedir.

Araştırmada elde edilen sonuçların doğru değerlendirilebilmesi için sismik dalgalarının yayılım hızını etkileyen faktörlerin bilinmesi gerekir. Genellikle basınç dalgası hızının kayanın nem içeriğinin artması ile arttığı, kesme dalgası hızının ise hemen hemen etkilenmeden kaldığı belirlenmiştir (McDowell, 1993).

Gerilme ile dalga hızının değişimi, yeraltı kazıları için önemli olmaktadır. Genellikle dalga hızları, gerilmenin belirli bir dereceye kadar çıkması halinde belirgin bir artış göstermektedirler. Kaya içerisinde mevcut olan çatlakların tamamen kapanmasından sonra gerilme artışının sürmesi halinde, dalga hızlardaki artışın daha az olduğu belirlenmiştir (McDowell, 1993). Wu vd. (1991) yaptıkları çalışmada, eksenel gerilmenin 0'dan 20 MPa'a çıkması durumunda yükleme yönüne paralel yönde ölçülen P dalga hızının yaklaşık %30 arttığını ve daha sonra hızın sabitlendiğini belirtmişlerdir.

Johnston ve Christensen (1993), V_p/V_s oranının, kumtaşlarının porozite ve boşluk oranının bir göstergesi olarak önem taşıdığını belirtmektedirler. Yine bu araştırmacılar, dalga hızlarının kayaçların kil içeriğinden ve boşluklarda yer alan sıvının uyguladığı basınçtan da önemli derecede etkilendiğini belirtmişlerdir.

Tütüncü ve arkadaşları (1994) da yaptıkları çalışmalarda kil içeriği artarken P dalga hızının S dalga hızından daha az etkilendiğini ve V_p/V_s oranı artarken, P ve S dalga hızlarının azaldığını belirtmişlerdir.

5.2 DALGA HIZI ANİZOTROPİSİ

Birçok tortul kayaç sismik açıdan anizotropiktir. Bu durum mikroyapı, ince boyutlu tabakalanmanın varlığı ve mikro çatlakların birlikte neden oldukları bir durumdur (Mukerji and Mavko, 1994). Daha önce yapılan çalışmalarda kayaç içinde mikroçatlakların varlığının, hidrostatik olmayan gerilme koşullarında, sismik anizotropiye neden olacağı belirlenmiştir (Nur, 1971; Mukerji ve Mavko'dan, 1994). Cole (1976), değişik tortul kayaçlarda yaptığı çalışmalarda, birbirine dik üç yönde maksimum ve minimum hızları belirlemiş ve bütün durumlarda en düşük değerlerin tabakalanmaya dik yönde elde edildiğini ve bu nedenle düzlemsel izotropinin var olduğunu belirtmiştir. Mukerji ve Mavko (1994), kaya malzemesi içinde yer alan taneciklerin bir biri ile temas etmediği yerlerde oluşan boşlukların birer çatlak gibi değerlendirileceği ve bu çatlakların konumu ile içerdiği sıvının sismik anizotropiye neden olacağını ifade etmişlerdir.

Daha önce yapılan çalışmalar, şeyldeki hız anizotropisinin beş elastik sabit ile tanımlanan düzlemsel izotropik durum olduğunu ve S dalgalarındaki anizotropinin P dalgalarındakinden daha önemli olduğunu göstermiştir (King et al., 1994). King vd.'ne (1994) göre; şeyllerde, kayacı oluşturan tanelerin belirli bir dizilimi sözkonusu olmasına rağmen, şeyllerle aynı mineral bileşimine sahip olan çamurtaşı ve kilaşlarında rasgele dizilim söz konusu olduğu için bu tür kayaçlarda dalga hızı anizotropisi beklenmemekte veya en azından şeyldeki kadar büyük olmamaktadır.

Wu vd.'nin (1991) kumtaşları üzerinde yaptıkları çalışmalarda, gerilmelerin olmadığı bir durumda, birbirine dik üç yönde P ve S dalga hızlarını ölçmüşler ve P dalgası hızındaki değişimin en fazla % 3.9, S dalgası hızındaki değişimin ise en fazla % 7.3 olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar ortalama P dalga hızını 2.83 km/s, ortalama S dalga hızını ise 1.87 km/s olarak ölçmüşler ve aradaki oranın izotropik bir kayaç için geçerli olan değerde olduğunu belirtmişlerdir. İzotropik bir

kayaçta P dalga hızı ile S dalga hızı arasında aşağıdaki eşitlikle verilen ilişki vardır (Wu et al., 1991).

$$S < \frac{P}{\sqrt{2}} \quad (42)$$

Remi ve arkadaşları (1994) dalga hızlarına göre anizotropiyi (A_v) tanımlamak için aşağıdaki ilişkiyi önermişlerdir.

$$A_v = (V_{\max} - V_{\min}) / V_{\text{ave}} \quad (43)$$

Buradaki, $V_{\max}$, $V_{\min}$, V_{ave} , sırasıyla, ölçülen maksimum, minimum ve ortalama P dalgası hızı değeridir.

Cole (1976), kayaçlarda hız anizotropisini değerlendirmek için, üç yönde ölçülen hız değerlerinden, en büyük ve en küçük olan değerlerin, ortalama değer ile student t testi kullanılarak karşılaştırılmasını önermiştir.

Müftüoğlu (1983), İngiltere kömür açık işletmelerindeki çevre kayaçlarının kazılabilirliğini araştırdığı çalışmalarında, hız indeksini belirlemek amacıyla sismik ölçümler yapmış ve hız anizotropisini de belirlemiştir. Bu çalışmada ince taneli kumtaşlarında, tabakalanmaya paralel yöndeki P dalgası hızı 3000-3600 m/h arasında, tabakalanmaya dik yönde ise 2500-3500 km/h arasında ölçmüştür. Orta ve kaba taneli kumtaşlarında ise hızlar ince taneli kumtaşlarına göre biraz düşük elde edilmiştir. Müftüoğlu (1983), kömür çevre kayaçlarını oluşturan kumtaşları için hız anizotropisinin ortalama % 13 olduğunu belirtmiştir.

5.3 STATİK VE DİNAMİK ELASTİK SABİTLER ARASINDAKİ İLİŞKİ

Kayaçlarda yapılan dalga hızı ölçümleri, kayaçların bir çok kütle ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi yanında, elastik sabitlerini belirlemek amacı ile de yaygın olarak kullanılmaktadır. Dinamik araştırmaların maliyetinin statik

deneylere göre oldukça düşük olması, bu tür çalışmaların kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

Bu şekilde elde edilen veriler yardımı ile kayaçların diğer özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yaygın olarak yapılmaktadır. Özellikle sismik dalga hızı ile gözeneklilik, yoğunluk, kaya çatlaklılık durumu ve nem içeriği arasında ilişkiler kurulmuştur. Benzer şekilde, sismik dalga hızlarından elde edilen verilerle, kayaçlar için karakteristik değer olan dinamik elastik sabitlerin belirlenmesine yönelik çalışmalar da yapılmıştır (King, 1983)

P ve S dalga hızlarından Young modülü ve rijitlik modülünü belirlemek için , elastik teoriden aşağıdaki ilişkiler kurulmuştur (Kolsky, 1963).

$$E_{\text{din}} = V_s^2 \rho \frac{3(V_p / V_s)^2 - 4}{(V_p / V_s)^2 - 1} \quad (44)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (45)$$

Ayrıca Poisson oranı da Eşitlik 46'daki gibi belirlenebilir (Siggins, 1993).

$$\nu_{\text{din}} = \frac{1}{2} \frac{(V_p / V_s)^2 - 2}{(V_p / V_s)^2 - 1} \quad (46)$$

Yukarıdaki ilişkilerde ρ , yerinde yoğunluk olup birimi de kg/m^3 'tür. Bu ilişkiler sonsuz ortamda geçerlidir (Kolsky, 1963). Ancak, ISRM (1977b) yukarıdaki bağıntıların laboratuvar örneklerinde kullanılabilmesi için gerekli koşulları belirlemiştir. Buna göre bağıntıların kullanılabilmesi için; “örneğin ortalama tane boyutu < kullanılan dalga boyu < örneğin en küçük boyutu” koşulunun sağlanması yeterli olmaktadır.

Mühendislik çalışmaları için daha önemli görülen statik elastik sabitlerin, dinamik elastik sabitler yardımı ile hesaplanmasına yönelik çalışmalar halen yapılmaktadır. Bu güne kadar yapılan çalışmalara göre, klasik statik deneylerden elde edilen Young modülü ile dinamik deneylerden elde edilen Young modülü değeri arasında

önemli bir farklılığın (dinamik modül statik modülden % 30 daha büyük) olduğu belirlenmiştir (Siggins, 1993).

Eissa ve Kazi (1988) yaptıkları çalışmalarda Eşitlik 44'ü kullanarak belirledikleri dinamik Young modülü ile ölçümlerle belirledikleri statik Young modülü arasında 0.96'lık ilişki katsayısına sahip olan aşağıdaki ilişkiyi geliştirmişlerdir.

$$\log_{10} E_{st} = 0.02 + 0.77 \log_{10} (\rho E_{din}) \quad (47)$$

Bu ilişkide; E_{st} ve E_{din} GPa biriminde, ρ ise g/cm^3 boyutundadır.

King (1983), 174 adet magmatik ve metamorfik kayaç örneğinden elde ettiği sonuçlara göre, statik Young modülü ile dinamik Young modülü arasında aşağıda verilen ilişkinin olduğunu ileri sürmüştür. Bu eşitlikte ilişki katsayı 0.9'dur ($r^2 = 0.82$).

$$E_{st} = 1.263 E_{din} - 29.5 \quad (48)$$

Yukarıdaki ilişkide, E_{st} ve E_{din} 'nin birimi GPa'dır.

Kuru kayaçlar üzerinde yapılan çalışmalarda, statik elastik modül, dinamik elastik modülden genellikle daha düşük olmaktadır. Bunun nedeni kayaç içinde bulunan mikroçatlakların, statik ölçümler esnasında birim deformasyonları daha çok etkilemesidir. Mikroçatlak oluşumunun düşük olduğu yerlerde, statik modül dinamik modül değerine yaklaşır (King, 1983). Martin ve Haupt da (1994) düşük gözenekli granit örneklerinde, statik ve dinamik modül değerleri arasındaki farklılığın birim deformasyonlara bağlı olduğunu ve düşük birim deformasyonlarda eşitlendiklerini ifade etmişlerdir. Yale ve Jamieson (1994), dinamik modülün statik modülden %15 ile %70 arasında daha büyük olduğunu, statik ve dinamik modüller arasında iyi bir ilişkinin varlığını belirtmişlerdir. Bu

araştırmacılara göre, kayaç litolojisine bağlı olarak 0.68 ve 0.79 gibi iki faktör kullanılarak dinamik ve statik modüller arasında dönüşüm yapmak mümkündür.

Yale ve Jameison (1994), statik ve dinamik Poisson oranları arasındaki değişimi de incelemişler ve kuru örneklerde elde ettikleri değerlere göre, statik Poisson oranını 0.15 ile 0.35 arasında bulurken dinamik Poisson oranının ise 0.2 ile 0.25 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Yaş örneklerde ise statik değerler 0.15 ile 0.35 arasında dağılırken dinamik değerler 0.2 ile 0.3 arasında çıkmıştır.

5.4 DİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ

Kayaçların sismik özelliklerini belirlemek amacıyla, deneylerde 200 kHz ve 1 MHz frekansta P ve S dalgası üreticisi kullanılmıştır. Çalışmada dayanım ve deformasyon özelliklerin belirlenmesi amacıyla hazırlanan karot şeklindeki örneklerin boyu 0.01 mm hassasiyette ölçülmüş ve örnek sismik dalga üreticisi ile alıcısı arasına yerleştirilmiştir. P ve S dalgalarının, boyu belirli olan örnek üzerinden geçiş süresi sismik alıcı ve osiloskop (Şekil 5.2) yardımı ile belirlenmiş ve buradan P ve S dalgalarının kayaç içindeki yayılım hızları hesaplanmıştır.

Kullanılan P dalgasının dalga boyu, 3200 m/s'lik en düşük ve 5200 m/s'lik en yüksek dalga hızları için sırasıyla, 1.6 cm ve 2.6 cm arasında, S dalgasında ise 1950 m/s'lik en düşük ve 2800 m/s'lik en yüksek dalga hızlarında, sırasıyla 1 cm ve 1.4 cm arasında olmaktadır. 1 MHz'lik üreticide, en küçük ve en yüksek dalga boyları sırası ile 0.2 cm ve 0.52 cm arasında olmaktadır. Bu durum ISRM (1977b) tarafından önerilen koşulun deneylerde sağlandığını ve dinamik elastik sabitlerin hesaplanmasında Eşitlik 44 ve 46'nın kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Acenta tv., Acılık tb., Büyük tv., Çay tb., Çay tv., Domuzcu tb. II'ye ait kumtaşları ile Domuzcu tb. I'den alınan kilaşı ve Nasufoğlu tv. taşına ait siltaşları üzerinde



Şekil 5.2 Dinamik özelliklerin ölçümünde kullanılan sismik ölçüm seti.

yapılan sismik deney sonuçları ile bu sonuçlarda elde edilen dinamik elastik sabitler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Bu özellikleri belirlemek amacı ile; Acenta tv taşında 54, Acılık tb taşında 21, Büyük tv taşında 42, Çay tb taşında 72, Çay tv taşında 26, Domuzcu Tb II taşında 28, Domuzcu Tb I taşında 23, Nasufoğlu tv taşında 29 adet olmak üzere toplam 295 karot örneği üzerinde ölçüm yapılmıştır.

Ayrıca dinamik elastik özelliklerin hesaplanmasında kullanılan yoğunluğun belirlenmesinde hacim ölçme aleti ile 0.1 g hassasiyetli elektronik tartım cihazı kullanılmıştır. Hacim ölçme aletinin hassasiyeti 0.1 cm^3 ’tür. Kayaçların yoğunluğunu belirlemek için, kayaçlardan alınan yaklaşık 30 g ağırlığındaki en az 7 kayaç parçasında hacim tayini yapılarak ortalama yoğunluk belirlenmiştir. Yoğunluk tayini amacı ile toplam 65 adet ölçüm yapılmıştır.

Çizelge 5.1 Sismik deney sonuçları ve hesaplanan dinamik elastik sabitler

Alındığı yer	Litoloji	β	n*	d (kg/m ³)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	E _{din} (GPa)	ν_{din}
Acenta Tv.	Kumtaşı	0	6	2685±51	5161±201	2785±32	53,0	0,295
		45	10		3871±161	2405±97	36,2	0,186
		60	10		4017±177	2470±76	38,5	0,196
		90	10		4241±170	2498±41	40,7	0,234
Acılık Tb.	Kumtaşı	0	4	2784±27	4694±240	2693±27	48,9	0,254
		30	4		4180±210	2598±95	42,9	0,185
		45	4		4445±53	2663±120	46,4	0,220
		60	3		4307±381	2469±210	41,1	0,255
		90	3		4208±399	2596±170	43,2	0,193
Büyük Tv.	Kumtaşı	0	8	2584±68	3645±84	2320±43	32,3	0,159
		30	10		3464±80	2232±45	29,5	0,145
		45	7		3352±48	2160±150	27,6	0,145
		60	5		3247±322	2133±127	26,3	0,120
		90	12		3437±307	2261±102	29,6	0,119
Çay Tb.	Kumtaşı	0	11	2556±26	5030±156	2773±74	50,4	0,281
		30	7		4265±110	2644±51	42,5	0,187
		45	12		4061±188	2613±125	40,0	0,147
		60	8		4261±110	2696±41	43,3	0,166
		90	15		4484±51	2530±26	41,4	0,266

* : yapılan ölçüm sayısı

Çizelge 5.1 (Devam ediyor)

Alındığı yer	Litoloji	β	n*	d (kg/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	E _{din} (GPa)	ν_{din}
Çay Tv.	Kumtaşı	0	3		4015±38	2274±25	34.0	0.264
		30	4		4014±52	2412±59	36.8	0.217
		45	4	2600±13	4605±198	2505±100	42.1	0.290
		60	3		4783±302	2418±100	40.4	0.328
		90	4		4488±476	2146±82	32.4	0.352
Domuzcu Tb. II	Kumtaşı	30	5		4130±210	2390±78	38.4	0.248
		45	5		4100±42	2392±44	38.2	0.242
		60	5	2690±7	4162±126	2390±25	38.5	0.254
		90	5		3839±92	2361±48	35.9	0.196
Domuzcu Tb. I	Kilitaşı	0	6		4202±177	2225±117	35.5	0.305
		30	4		3853±96	1956±100	27.9	0.326
		45	4	2748±22	3735±51	2199±88	32.8	0.234
		60	5		3893±28	2132±247	32.1	0.286
		90	4		3609±194	2080±222	29.8	0.251
Nasufoglu Tv.	Silttaşı	0	11		4484±73	2853±31	51.0	0.160
		30	10		4321±139	2808±73	48.3	0.134
		60	5	2700±19	4032±209	2614±105	42.0	0.137
		90	3		3762±409	2436±235	36.5	0.139

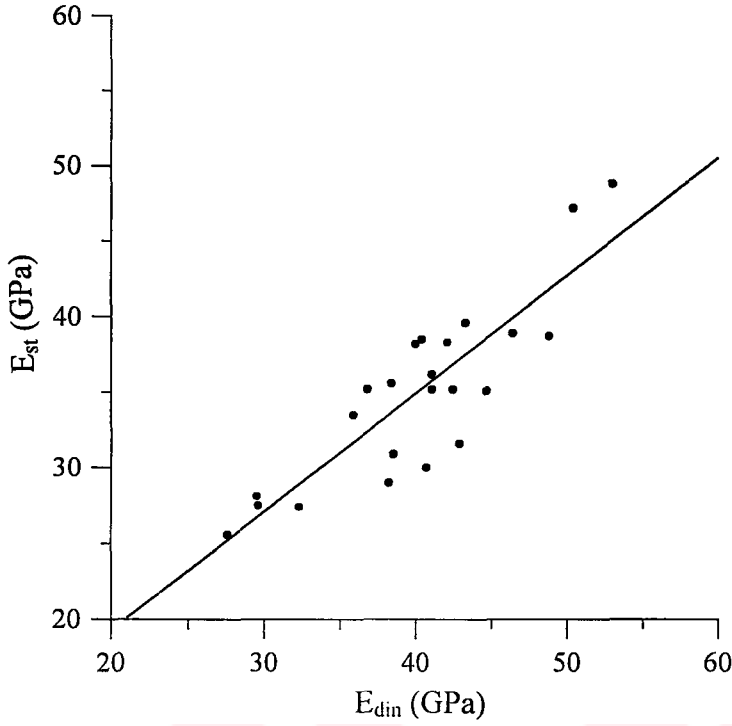
Bu sonuçlara göre; P dalgasının hızı, kumtaşlarında 3200 m/s ile 5200 m/s arasında değişmektedir. Genel olarak β 'nın 0° 'den 90° 'ye doğru artması ile dalga hızında da belirgin şekilde azalma olmaktadır. P dalga hızı, bazen 30° ve 45° 'de bazen de 60° 'de minimum olmaktadır. $\beta=0^\circ$ 'de her zaman en yüksek değere ulaşmaktadır. Çay tv taşında daha önce sözü edildiği gibi tabakalanmanın izleri görülmediğinden sonuçların değişimi rasgele olmaktadır. Nasufoğlu damarı tavan taşı olan silttaşı ve Domuzcu Tb. I taşındaki kiltası üzerinde yapılan ölçümler, bu kayalarda, P dalgası hızlarının 3700 m/s ile 4500 m/s arasında olduğunu ve endüyük değerin $\beta=90^\circ$ 'de elde edildiğini göstermiştir. $\beta=0^\circ$ 'deki değer ile $\beta=90^\circ$ 'deki değer arasındaki değişim yaklaşık %15 kadar olabilmektedir.

S dalgası hızları, kumtaşlarında 2100 m/s ile 2800 m/s arasında, kiltalarında 1950 m/s ile 2200 m/s arasında ve silttaşında ise 2400 m/s ile 2850 m/s arasında değişmektedir. Hız, her zaman $\beta=0^\circ$ 'de en yüksek olmaktadır. S dalgası hızlarındaki değişim de P dalgalarındakine benzemektedir.

P dalgası hızları, hız anizotropisi açısından değerlendirildiğinde; kumtaşlarında yaklaşık % 10, kil ve silttaşlarında ise yaklaşık % 15 olarak görülmektedir. S dalga hızlarındaki anizotropi ise kumtaşlarında % 2 ile % 10 arasında değişim göstermektedir. Bu durum, P dalgalarının, S dalgalarına göre tabakalanmaya daha duyarlı olduğunu ve etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Dinamik elastik sabitlerdeki değişim incelendiğinde, E_{din} ve v_{din} 'in, β 'nın 30° ve 45° değerlerinde bazen de 60° olduğu durumlarda en düşük olduğu görülmektedir. Genellikle, $\beta=0^\circ$ 'de her iki sabit en yüksek değere ulaşmaktadır.

Statik ve dinamik elastik sabitler arasındaki ilişki incelendiğinde; E_{st} 'in, E_{din} 'ten genellikle daha düşük, v_{st} 'in ise v_{din} 'ten yüksek değerler aldığı görülmektedir. E_{st} ile E_{din} değişimi Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



Şekil.5.3 Statik ve Dinamik Young modülleri arasındaki ilişki

E_{din} ile E_{st} arasında Eşitlik 49'da verilen ve 0.74 ilişki katsayısına sahip birinci dereceden bir ilişki kurulmuştur. Bu ilişki E_{din} 'in 25 ile 55 GPa arasındaki değerleri için geçerlidir. Bu ilişki çok iyi olmamakla birlikte ilk değerlendirme ve pratik amaçlar için kullanılabilecek bir ilişkidir.

$$E_{st} = 0.78E_{din} + 3.65 \quad (49)$$

Dinamik Poisson oranlarındaki değişim, statik Poisson oranındaki değişim ile ters bir durum göstermektedir. Dinamik Poisson oranının, $\beta=0^\circ$ 'de, $\beta=90^\circ$ 'den daha yüksek olduğu, ara değerlerde ise birbirine yakın ve $\beta=0^\circ$ ile $\beta=90^\circ$ arasında elde edilen değerlerden daha düşük olmaktadır.

BÖLÜM 6

YENİLME ÖLÇÜTLERİ

Kaya, deformasyon davranışı ve fiziksel şekline göre karmaşık bir konudur. Çünkü, bir kazı etrafındaki kaya her zaman zayıflık düzlemi olarak adlandırılan eklemler, faylar, kayma zonları, ve tabakalanma düzlemleri ile kesilmiş durumdadır. Yeraltı yapılarının kazı tasarımı ve duraylılığının güvenilir bir şekilde sağlanabilmesi için, yeraltı gerilme analizleri ve yenilme ölçütleri gereklidir. Kaya davranışını tanımlamak için gerilme ve birim deformasyon olarak adlandırılan iki parametrenin tanımlaması yapılır. Gerilmeleri tanımlamak için formüle edilmiş yenilme ölçütleri yaygın olarak kabul görmüştür. Kayanın, etkisinde kaldığı en yüksek gerilme onun dayanımı olarak tanımlanmıştır. Bütün görgül (ampirik) yenilme ölçütleri dayanım yenilmesini tanımlar. Bunun birincil nedeni, gerilmelerin deney makinasından doğrudan elde edilebiliyor olmasıdır. Ayrıca yenilme esnasındaki birim deformasyonların sınır değerini tanımlamak, yenilme esnasındaki gerilmeyi tanımlamaktan her zaman daha zordur (Sheorey, 1997).

Laboratuvar çalışmaları için, uygun boyuttaki kaya kütlesi örneğini bulmak zor olduğundan, çalışmalar genellikle kaya malzemesi olarak bilinen ve hiç bir süreksizlik içermeyen örnekler üzerinde yapılmaktadır. Bunun sonucunda da, elde edilen veriler ancak kaya malzemesini temsil edebilmektedir. Halbuki, kaya kütlesinin dayanımının, kaya malzemesine göre çok daha düşük olduğu bilinmektedir.

Bugüne kadar önerilen yenilme ölçütlerinin bir kısmı, kaya sınıflama sistemlerinin esas alındığı uygun düzeltmelerle kaya kütlesini temsil edebilecek şekle dönüştürülmüştür (Bieniawski, 1974; Hoek and Brown, 1980; Ramamurthy et al.,

1993). Böyle düzeltmeler, kaya kütlesinin çok sayıda eklem veya eklem seti içermesi durumunda geçerli olmaktadır. Eğer kaya çok az eklem içeriyorsa veya fay gibi çok önemli bir zayıflık düzlemi kazı tarafından kesiliyorsa bu durumda kayanın anizotropik davranışı için özel çalışma yapmak gerekir (Sheorey, 1997).

Bir yenilme ölçütü, tanımlandığı uzayda yenilme yüzeyinin sınırlarını tanımlar. Asal gerilmeler uzayında σ_1 , σ_2 , σ_3 asal gerilmelerine sahip olan herhangi bir nokta, bu yüzeyin içine veya dışına düşebilir. Eğer nokta, yüzeyin üzerine veya dışına düşerse yenilme olacaktır. Asal gerilmeler arasında tanımlanan ilişki, ancak laboratuvar çalışmaları ile belirlenir. Deney setindeki sınırlamalar nedeniyle, yenilme ölçütleri genellikle iki boyutlu olarak tanımlanır.

$$\sigma_1 = f(\sigma_3) \quad (50)$$

Bunlardan σ_1 , yenilme anındaki en büyük asal gerilmeyi, σ_3 ise en küçük asal gerilmeyi tanımlar.

6.1 ANİZOTROPİK YENİLME ÖLÇÜTLERİ

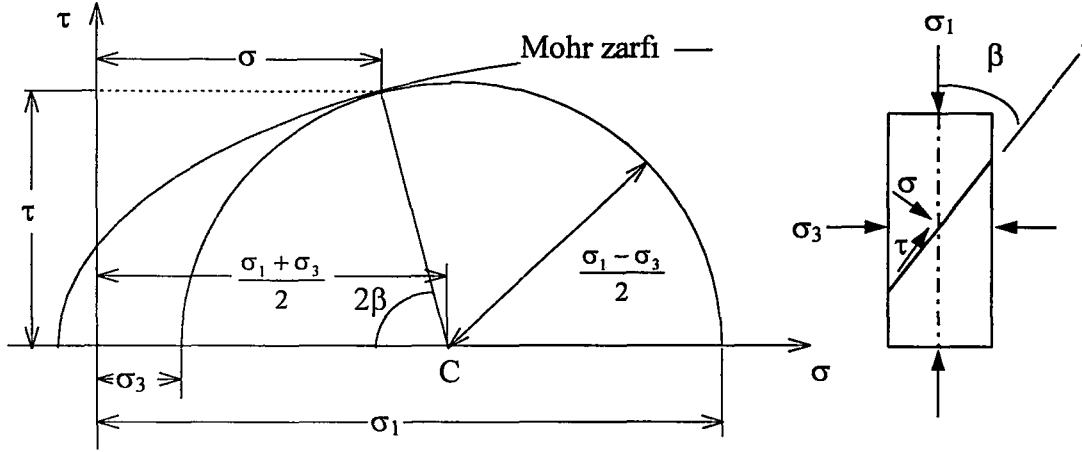
Değişik araştırmacılar yaptıkları araştırmalar sonucunda kayaçların yenilmesini tahmin etmeye yönelik görgül ilişkiler geliştirme çabası içindedirler. Yenilme ölçütü olarak adlandırılan bu ilişkilerin bazıları aşağıda sunulmuştur.

6.1.1 Mohr Gösterimi

Mohr, bir düzlem boyunca kayma yenilmesi meydana geldiği zaman, bu düzlemdeki normal (σ) ve kayma (τ) gerilmelerinin, malzemenin karakteristiği ile ilgili bir fonksiyon ile ilişkili olduğunu ileri sürmüştür (Jaeger and Cook, 1979).

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (51)$$

Bu fonksiyon doğrusal bir ilişkiyi temsil eder. Birbirinden farklı üç birincil gerilme varsa, σ ve τ 'nin değerleri yine Mohr gösterimi ile bulunabilir (Şekil 6.1). Bulunan σ ve τ değerleri çizilen zarfın altında yer alırsa yenilme olmaz.



Şekil 6.1 Gerilmelerin Mohr dairesi ile gösterilimi (Sheorey, 1997).

Şekil 6.1'deki gibi yatay eksen, σ_1 - σ_3 bir çap olarak düşünülür ve C merkezli çizilen dairenin Mohr zarfına teğet olduğu koşullarda yenilme olur. Buradan, ortanca biricil gerilme (σ_2)'nin yenilme üzerine etkisi olmadığı ve kayma çatlağının σ_2 'nin yönünden geçtiği sonuçları çıkartılabilir (Jaeger and Cook, 1979).

σ_1 ve σ_3 birincil gerilmelerin etkisindeki bir kaya örneğinde, yenilme düzlemi üzerindeki normal ve kayma gerilmeleri aşağıdaki eşitliklerle tanımlanabilir (Sheorey, 1997).

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta \quad (52)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \quad (53)$$

Burada β , σ_1 ile yenilme düzlemi arasındaki açıdır.

Her σ_1 - σ_3 çifti için çizilen dairelere teğet geçirilecek olursa, malzemenin yenilme zarfı tanımlanmış olur. Böylece, birincil gerilmelere göre tanımlanan yenilme ölçütü, $(\sigma-\tau)$ koordinatlarında bir Mohr zarfı ile temsil edilebilir (Şekil 6.1). Şekildeki bu gösterimlerden aşağıdaki tanımlamalar yapılabilir.

- Asal gerilme koordinatlarında, düşey ve yatay eksenlerle yenilme zarfının kesişim noktaları, sırasıyla tek eksenli basınç ve çekme dayanımıdır.
- Mohr zarfına göre, τ ve σ 'nın kesim noktaları, sırasıyla, kayma ya da kohezyon ($\sigma = 0$) ve tek eksenli çekme dayanımıdır.
- $\sigma = 0$ noktasında Mohr zarfının eğimi içsel sürtünme katsayısını verir ($\mu_0 = \tan \phi_0$), burada ϕ_0 , içsel sürtünme açısıdır. Bu açı zarf boyunca değişir.

6.1.2 Coulomb Yenilme Ölçütü

Mohr-Coulomb ölçütü olarak da bilinen ve 1773'de Coulomb tarafından ortaya atılan bu ölçüt 'kayma veya kesme gerilmesinin yol açacağı bir yenilmeye, malzemenin kohezyonu ve muhtemel yenilme yüzeyine etkiyen normal gerilmenin bir sabitle çarpımı karşı koyar' şeklinde ifade edilebilir ve aşağıdaki eşitlikle gösterilebilir.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (54)$$

Bu ölçüt bir çok jeolojik malzemeye uygulanabilmektedir. Fakat ölçüt genel üç eksenli kaya davranışında geçerli değildir (Sheorey, 1997).

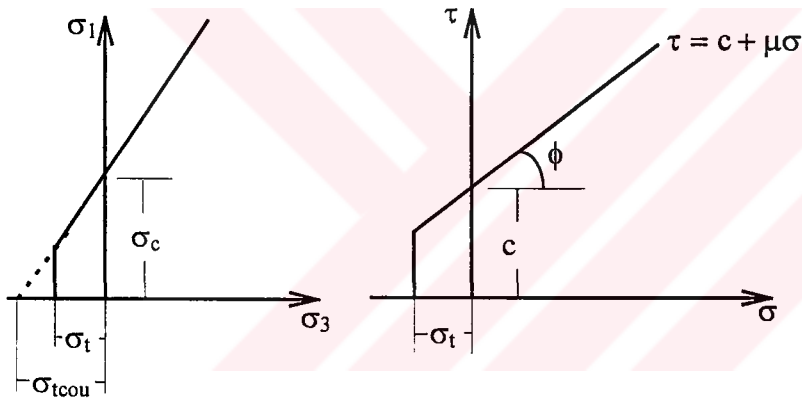
Yenilme anında etkiyen asal gerilmeler arasındaki ilişki Coulomb ölçütüne göre doğrusaldır. Malzemenin kohezyonu (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) bilinirse bu bağıntı;

$$\sigma_{\max} = 2c \cos \phi + \sigma_{\min} \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} \quad (55)$$

şeklinde yazılabilir. Kohezyonu ve içsel sürtünme açısı bilinen bir malzeme için Coulomb ölçütünün ön gördüğü tek eksenli çekme dayanımı ise,

$$(\sigma_t)_{\text{Coulomb}} = -2c \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (56)$$

olur. Ancak bu ölçütün ön gördüğü çekme dayanımı, laboratuvar koşullarında yapılan deneylerden elde edilen dayanımlara kıyasla çok yüksek olduğu için uygulamalarda dayanım zarfı, deneylerden elde edilen dayanıma göre düzeltilir. Literatürde ‘tension cut-off’ adı verilen bu düzeltme Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Mohr-Coulomb yenilme zarfında çekme dayanımının gösterimi

Kaya malzemesine ait Coulomb dayanım zarfı, üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçların doğrusal regresyon modeli ile değerlendirilmesinden elde edilebilir. Ancak kayanın dayanımı ile ilgili araştırmalar, dayanım zarfının genellikle doğrusal olmadığını ortaya koymuştur. Bu nedenle farklı yanal basınç aralıklarında farklı dayanım eşitlikleri kullanılarak düzenlemeler yapılmaktadır.

6.1.3 Hoek- Brown Yenilme Ölçütü

İlk kez 1980 yılında önerilen Hoek-Brown yenilme ölçütü, günümüze kadar bir çok araştırmacı tarafından kabul görmüş ve hem yeraltı hem de yerüstü kaya yapılarının duraylılığı ile ilgi çözümlemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ölçüt aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (57)$$

Burada m ve s parametreleri malzeme için sabit sayılardır. σ_c , süreksizlik içermeyen malzemenin (50 mm çapında, 100 mm boyunda) tek eksenli basınç dayanımıdır (MPa). Kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımı, yukarıdaki eşitlikte σ_3 yerine 0 konularak bulunabilir. Aynı şekilde σ_1 yerine 0 konularak, kaya kütlesinin tek eksenli çekme dayanımı da bulunabilir

$$\sigma_{cküt} = \sqrt{s \cdot \sigma_c} \quad (58)$$

$$\sigma_{tküt} = \frac{\sigma_c}{2} \left(m - \sqrt{m^2 + 4s} \right) \quad (59)$$

Hoek ve Brown tarafından önerilen bu ölçüt, sağlam kaya ve kaya kütlesi için kullanılabildiği gibi anizotropik kaya malzemesi için de kullanılabileceği belirtilmiştir (Hoek and Brown, 1980).

Yeraltı kazılarının stabilitesi veya şev stabilitesi hesaplamaları için geçerli olan analizlerin çoğunluğu Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre yapılmaktadır. Bu nedenle, Hoek-Brown yenilme ölçütü ile tanımlanan yenilme zarfının teğetinden Mohr-Coulomb ölçütüne uygun bir kohezyon ve içsel sürtünme açısının hesaplanabilmesi için, etkin normal gerilme (σ_n) ve etkin olan en küçük asal gerilmeye göre Eşitlik 60-64'de verilen hesaplamalar önerilmiştir (Hoek, 1990).

Buna göre; malzemeye ait ‘m’ ve ‘ σ_c ’ değerinin bilinmesi durumunda, herhangi bir en büyük asal gerilme (σ_n) için, kayma gerilmesi Eşitlik 66 ile belirlenir.

$$\tau = (\cot \phi_i - \cos \phi_i) \frac{m \sigma_c}{8} \quad (60)$$

Bu eşitlikteki ϕ_i , malzemenin anlık içsel sürtünme açısıdır ve Eşitlik 61 ile bulunabilir.

$$\phi_i = \arctan \frac{1}{\sqrt{4h \cos^2 \theta - 1}} \quad (61)$$

Bu eşitlikteki h ve θ ’nın değerleri ise Eşitlik 62 ve 63 kullanılarak hesaplanır.

$$h = 1 + \frac{16(m \sigma_n + s \sigma_c)}{3 m^2 \sigma_c} \quad (62)$$

$$\theta = \frac{1}{3} (90 + \arctan \frac{1}{\sqrt{h^3 - 1}}) \quad (63)$$

Malzemeye etkiyen σ_n normal gerilmesinde, etkiyen kayma gerilmesi τ bulunduğunda, malzemenin kohezyonu da Eşitlik 64 ile bulunabilir.

$$c_i = \tau - \sigma_n \tan \phi_i \quad (64)$$

Malzemeye etkiyen en küçük asal gerilmenin (σ_3) seçilen her hangi bir değeri için en büyük asal gerilme Hoek-Brown ölçütü ile bulunabilir (Eşitlik 57). Bu durumda malzemeye etkiyen normal gerilme Eşitlik 65’den, kayma gerilmesi de Eşitlik 66’dan belirlenebilir.

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2} m \sigma_c} \quad (65)$$

$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{1 + \frac{m \sigma_c}{2(\sigma_1 - \sigma_3)}} \quad (66)$$

Normal ve kayma gerilmeleri belirlendiğinde, malzemenin kohezyonu Eşitlik 64 ile bulunurken içsel sürtünme açısı da Eşitlik 67 ile bulunur.

$$\phi_i = 90 - \arcsin\left(\frac{2\tau}{(\sigma_1 - \sigma_3)}\right) \quad (67)$$

Hoek-Brown yenilme ölçütünden kohezyon ve içsel sürtünme katsayısının hesaplanması için Shorey (1997) aşağıdaki eşitlikleri önermiştir.

$$q = \frac{8}{m\sigma_c} \sigma' + \frac{4}{m} (m^2 + 4s)^{0.5} - 2.5 \quad (68)$$

$$P = \sin \phi' = \frac{q}{1.5} \cos \left[\frac{1}{3} \cos^{-1} \left(1 - \frac{6.75}{q} \right) + 240^\circ \right] + \frac{q}{3} \quad (69)$$

$$\tau' = \frac{m\sigma_c}{8} \left[\frac{(1-P)(1-P^2)^{0.5}}{P} \right] \quad (70)$$

$$\phi' = \sin^{-1}(P) \quad (71)$$

Burada; m, Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre belirlenen değer, s ise kaya malzemesi için 1'dir.

Eşitlik 68'deki σ' , c ve ϕ 'nin hesaplanmak istendiği durumdaki normal gerilmedir. Bu değer sıfır alınarak hesaplamalar yapılır ise, kayacın normal gerilme durumundaki c ve ϕ değerleri elde edilir.

Hoek (1990) ve Shorey'in (1997) önerilerine göre ayrı ayrı hesaplanan c ve ϕ değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Her iki durumda da elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu oldukları bu çizelgeden açıkça görülmektedir.

Çizelge 6.1 Değişik yaklaşımlara göre elde edilen c ve ϕ değerlerinin karşılaştırması

Alındığı Yer	β (°)	Coulomb'a göre		Shorey'e göre		Hoek'a göre	
		ϕ (°)	c (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)
ACENTA Tv (Kumtaşı)	0	54.2	24.5	59.6	25.0	59.7	24.6
	45	46.1	21.2	54.4	19.9	54.5	19.7
	60	48.3	23.1	54.9	22.6	55.0	22.4
	90	52.8	22.5	59.4	21.9	59.5	21.6
ACILIK Tb (Kumtaşı)	0	56.1	22.6	61.7	23.0	61.9	22.6
	30	50.8	16.8	59.8	15.5	60.0	15.2
	45	53.3	17.2	60.9	16.7	61.0	16.4
	60	53.7	18.8	59.9	19.0	60.0	18.7
	90	56.0	19.7	61.9	19.9	62.1	19.5
BÜYÜK Tv (Kumtaşı)	0	45.8	19.2	59.3	15.6	59.4	15.3
	30	46.4	15.3	60.4	12.4	60.5	12.2
	45	42.1	19.3	55.2	16.3	55.3	16.1
	60	45.4	18.4	58.9	15.1	59.0	14.8
	90	44.8	19.3	58.4	15.4	58.5	15.2
ÇAY Tb (Kumtaşı)	0	55.4	21.4	61.5	21.6	61.7	21.2
	30	49.1	16.1	58.3	14.9	58.5	14.7
	45	53.6	17.8	62.4	16.4	62.6	16.1
	90	55.8	19.4	63.0	18.8	63.2	18.4
DOMUZCU Tb II (Kumtaşı)	0	52.7	21.9	59.4	21.5	59.6	21.1
	30	53.3	18.8	60.6	18.1	60.8	17.7
	45	48.7	20.1	57.0	19.0	57.1	18.7
	60	53.1	19.8	58.7	20.3	58.8	20.0
	90	53.1	20.6	59.9	20.2	60.1	19.9
NASUFOĞLU Tv (Silttaşı)	0	41.4	16.1	50.5	14.7	50.5	14.6
	30	32.8	10.5	45.5	8.6	45.4	8.7
	60	46.0	11.2	55.6	10.3	55.7	10.2
	90	46.7	12.3	55.2	11.7	55.3	11.6
DOMUZCU Tb I (Kilttaşı)	0	35.8	11.2	51.6	8.6	51.7	8.5
	30	30.4	5.6	47.1	4.2	47.1	4.2
	45	34.2	6.3	50.0	5.1	50.1	5.1
	60	35.6	7.9	51.4	6.1	51.5	6.1
	90	39.2	10.2	54.1	8.1	54.2	8.0
SULU Tv (Silttaşı)	0	48.0	17.8	56.2	16.8	56.5	16.5
	30	33.3	11.6	47.3	9.3	47.3	9.3
	45	45.0	10.4	54.9	9.5	55.0	9.4
	60	42.1	12.2	51.6	11.3	51.7	11.2
	90	53.2	13.5	62.0	12.8	62.2	12.5

6.1.4 Bieniawski Yenilme Ölçütü

Bieniawski (1974), yenilme ölçütü geliştirmedeki amacı, σ_1 ve σ_3 değerlerinden yola çıkarak, malzemenin kohezyon ve içsel sürtünme verilerinin bulunabileceği, dayanım zarfını elde etmek olarak açıklamaktadır.

Bieniawski (1974), Murrel (1965)'in (Bieniawski'den, 1974) Eşitlik 72'de verilen ölçütünün kayanın üç eksenli dayanımını tahmin etmek için çok uygun olduğunu belirtmiş ve eşitliği normalleştirerek, 1. ölçüt olarak önermiştir (Eşitlik 73).

$$\sigma_1 = F \sigma_3^A + \sigma_c \quad (72)$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = A \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^k + 1 \quad (73)$$

Burada k ve A, sabit katsayılardır. Bieniawski (1974), bu ölçütün, üzerinde çalıştığı beş tür kayaç için çok iyi uyum sağladığını belirtmiştir. Bu araştırmada kumtaşları için, k katsayısının değeri 0.75 ve A katsayısının değeri de 4.0 olarak önerilmiştir (şekil 6.3).

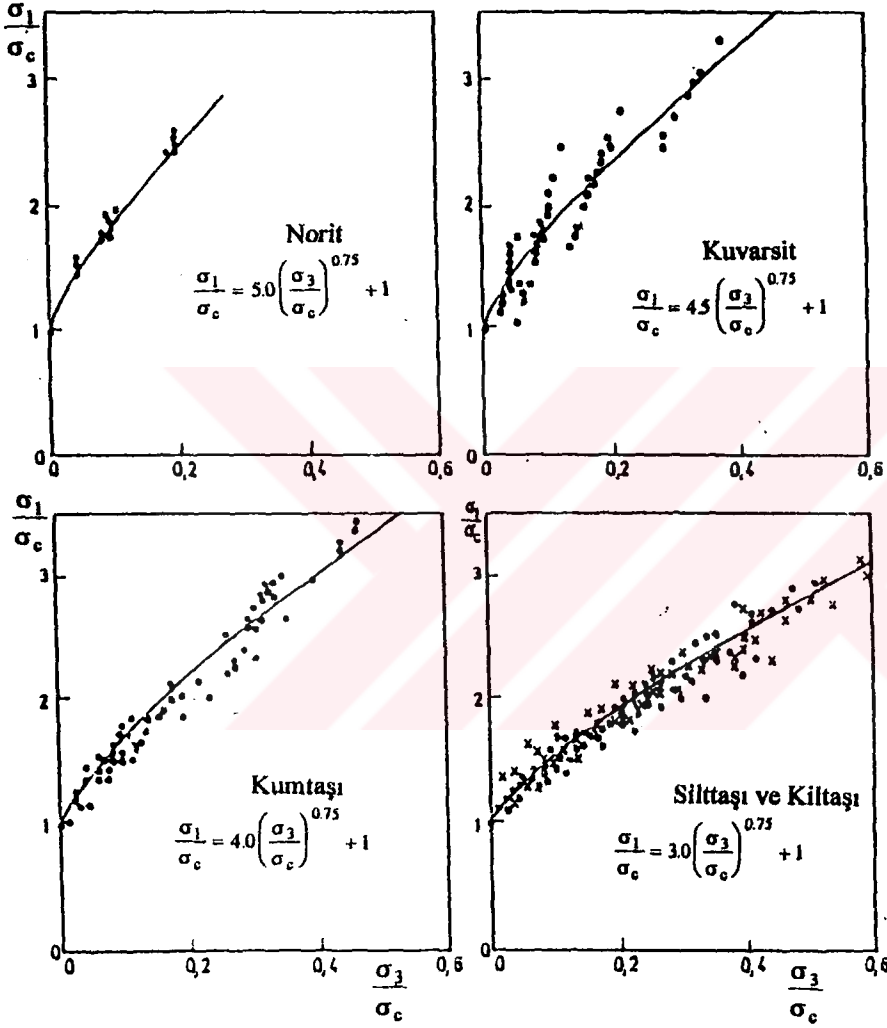
Bieniawski (1974), Hoek (1968)'un önermiş olduğu görgül ölçütü de (Eşitlik 74), Eşitlik 75'deki gibi yeniden yazarak 2. ölçüt olarak önermiştir.

$$\frac{\tau_m - \tau_0}{\sigma_c} = B \left[\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right]^C \quad (74)$$

$$\frac{\tau_m}{\sigma_c} = B \left[\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right]^C + 0.1 \quad (75)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, τ_m ve σ_m sırasıyla en büyük kayma ve normal gerilme; B ve C ise birer sabit katsayıdır.

Bieniawski (1974), yukarıda önermiş olduğu her iki ölçütü de 412 veri üzerinde denemiş ve değişik kaya birimleri için B ve C katsayılarını da belirlemiştir. Buna göre kumtaşılarında B katsayısı 0.75, C katsayısı ise 0.90 olmaktadır.



Şekil 6.3 Bieniawski ölçütünün değişik kayalarda uygulaması (Bieniawski, 1974).

6.1.5 Ramamurthy ve Arkadaşlarının Ölçütü

Ramamurthy ve arkadaşları (1993) sağlam kayanın kayma dayanımını doğrusal olmayan şekilde tanımlamak amacıyla Coulomb yenilme ölçütünü geliştirmişlerdir.

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} = B_i \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3} \right)^{\alpha_i} \quad (76)$$

Burada α_i , $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3}$ ve $\frac{\sigma_c}{\sigma_3}$ arasında çizilen eğrinin eğimidir.

B_i , $\frac{\sigma_c}{\sigma_3} = 1$ olduğu zaman $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3}$, e eşit olan bir sabittir. B_i 'nin değeri 1.8 ile 3.0 arasında değişmektedir.

α_i ve B_i 'nin değerleri, kaya için σ_c 'nin % 5'inden daha büyük yanal basınçta yapılan iki adet üç eksenli deneyden tahmin edilebilir. Yukarıdaki eşitlik düktil bölgede ve gevrek bölgenin büyük bir kısmında uygulanabilir. σ_3 'ün değeri % 5 σ_c 'den daha küçük olduğunda dayanım daha düşük tahmin edilmektedir.

Çekme dayanımını tahmin etmek için önerilen aşağıdaki eşitlik sağlam kayada daha iyi tahminler vermektedir.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3 + |\sigma_t|} = B \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3} + |\sigma_t| \right)^{\alpha} \quad (77)$$

Burada, α çoğu kayaç için 0.67 olan bir sabittir. α ve β 'nin değerleri yukarıda açıklandığı gibi bulunabilir. Deneylerin yapılamaması durumunda B'nin değeri aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$B = 1.3 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right)^{1/3} \quad (78)$$

Anizotropik ve eklemli kaya için dayanım ölçütü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3} = B_j \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_3} \right)^{\alpha_j} \quad (79)$$

Buradaki α_j ve B_j 'nin değerleri aşağıdaki eşitliklerden bulunabilir.

$$\frac{\alpha_j}{\alpha_{90}} = \left(\frac{\alpha_{cj}}{\alpha_{c90}} \right)^{1-\alpha_{90}} \quad (80)$$

$$\frac{B_j}{B_{90}} = \left(\frac{\alpha_{90}}{\alpha_j} \right)^{0.5} \quad (81)$$

Herhangi bir β konumundaki σ_{cj} 'nin değeri 0° , 30° ve 90° 'deki tek eksenli basınç dayanımlarından aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunabilir.

$$\sigma_{cj} = B - H [\cos 2(\beta_m - \beta)] \quad (82)$$

Böylece istenilen konum açısındaki dayanım zarfı oluşturulabilir.

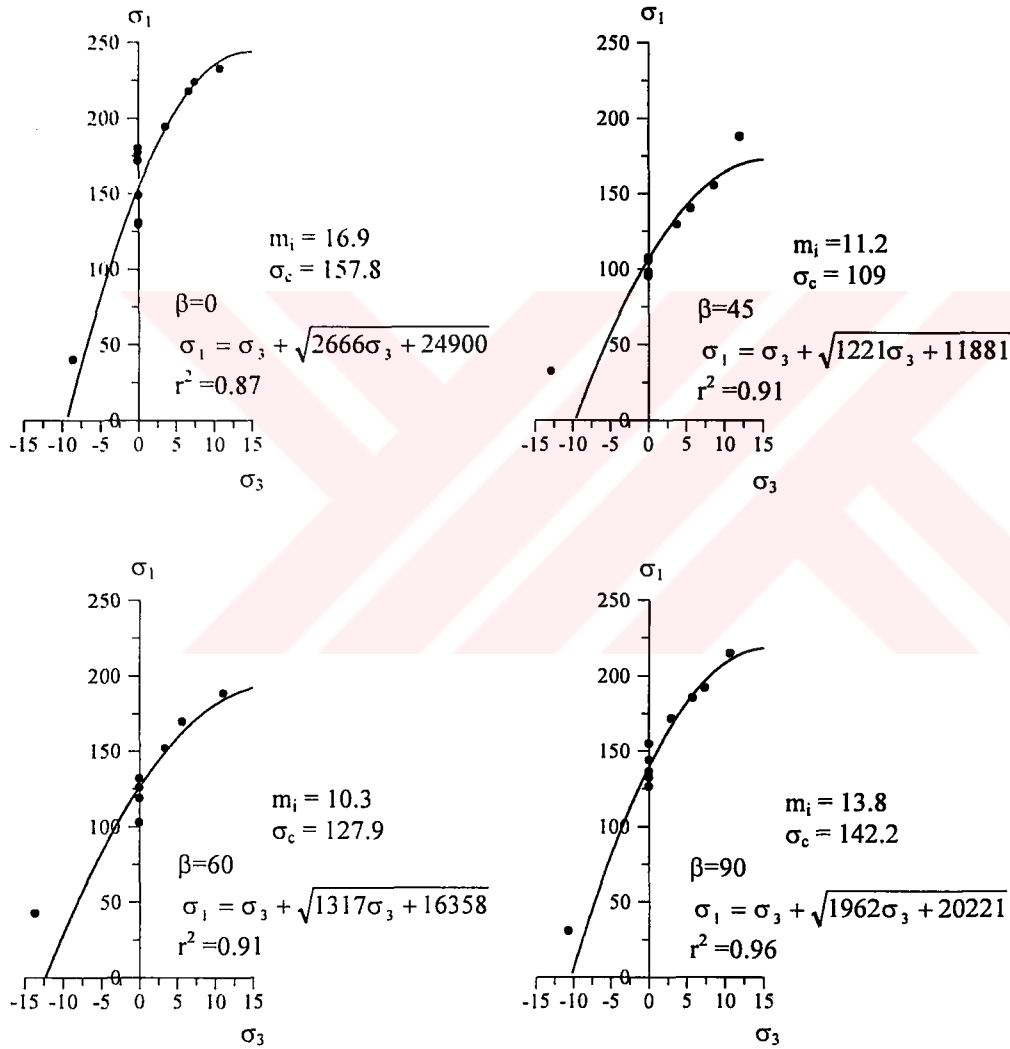
Eklemli kayalar için σ_{cj} ve B_j RMR ile ilişkilendirilebilir.

$$\sigma_{cj} = \sigma_{ci} \exp[(RMR - 100) / 18.75] \quad (83)$$

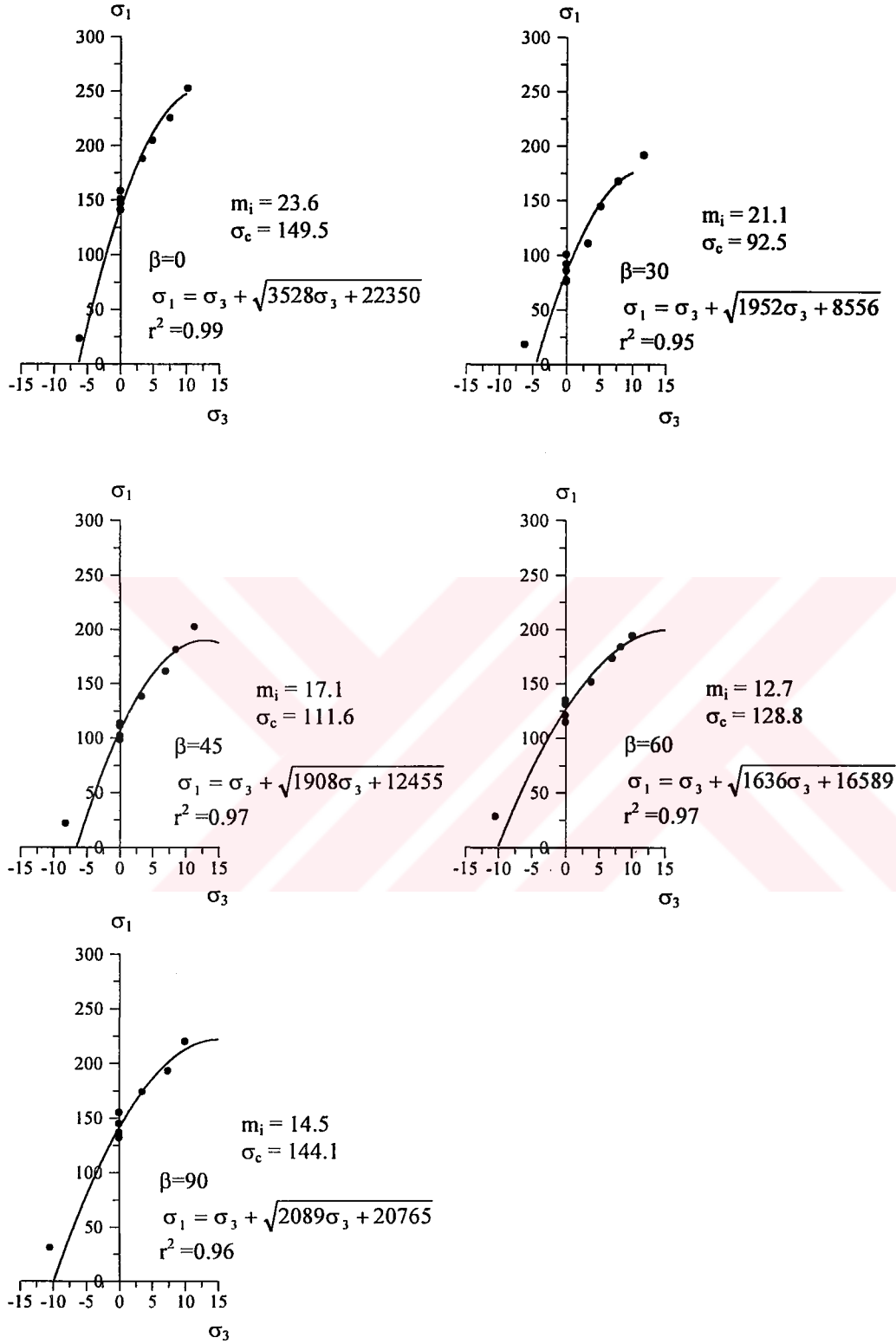
$$B_j = B_i \exp[(RMR - 100) / 75.5] \quad (84)$$

6.2 DENEYSEL VERİLERE HOEK-BROWN ÖLÇÜTÜNÜN UYARLANMASI

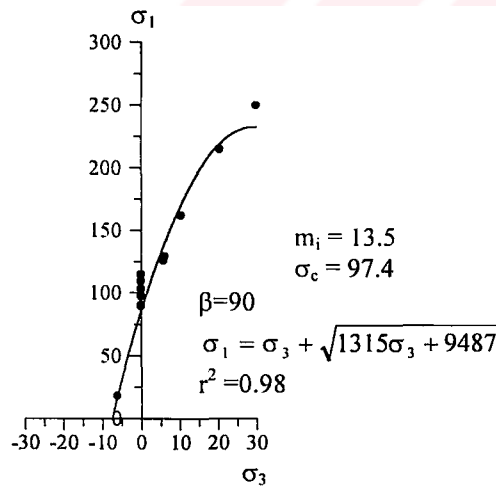
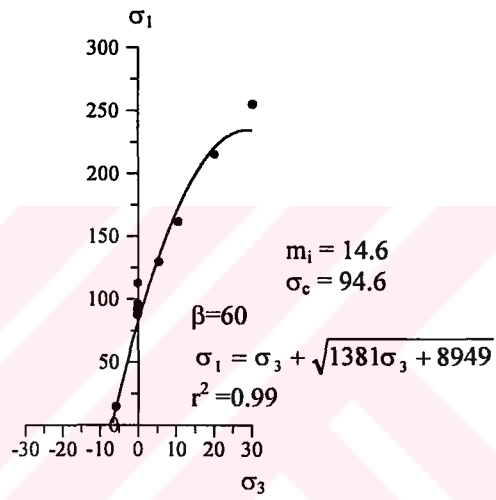
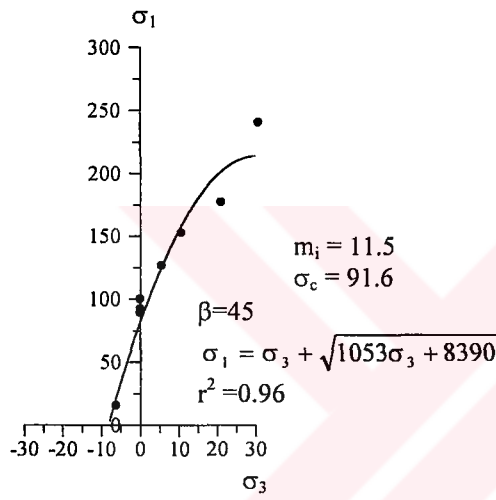
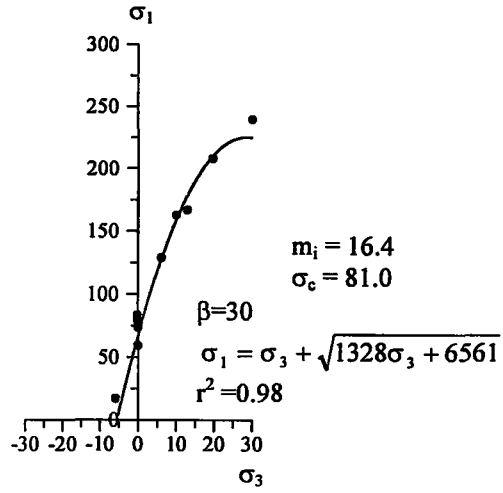
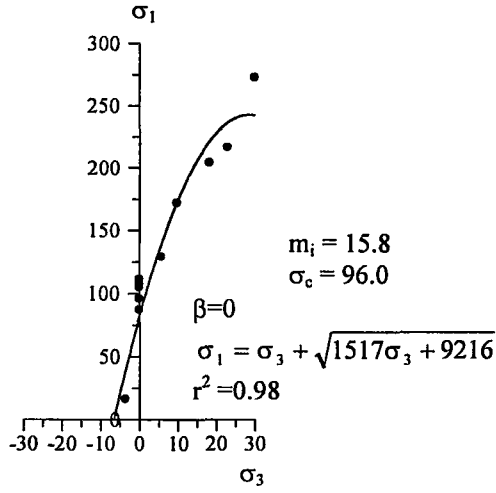
Yukarıda sunulan verilere, araştırmacılar tarafından en fazla tercih edilen Hoek-Brown yenilme ölçütü uyarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur (Şekil 6.4-11).



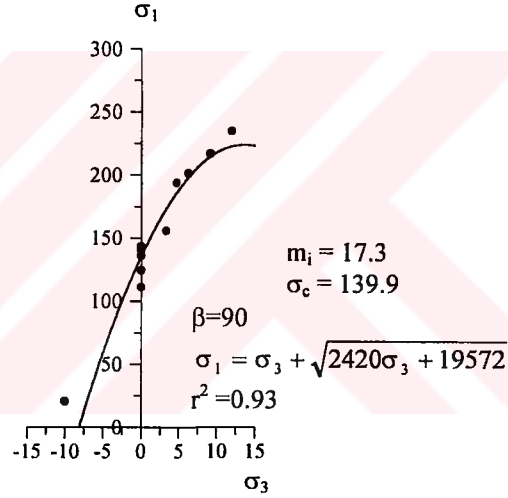
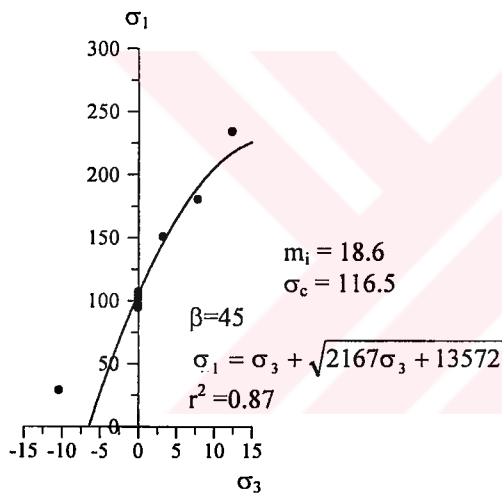
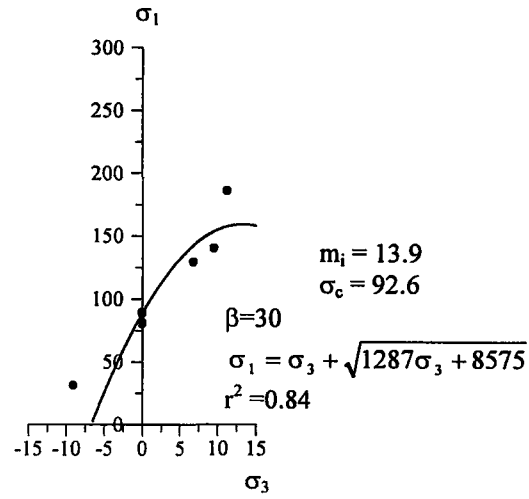
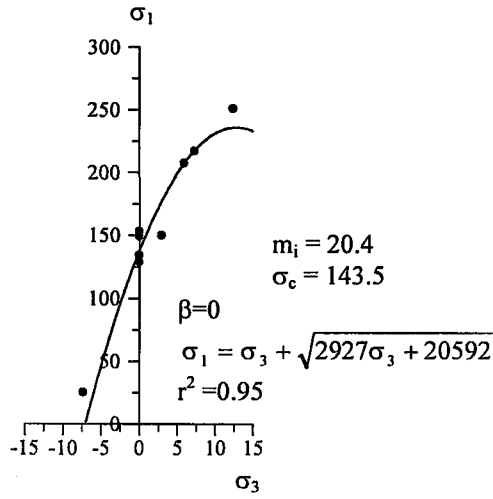
Şekil 6.4 Acenta damarlı tavan taşı (kumtaşı) verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.



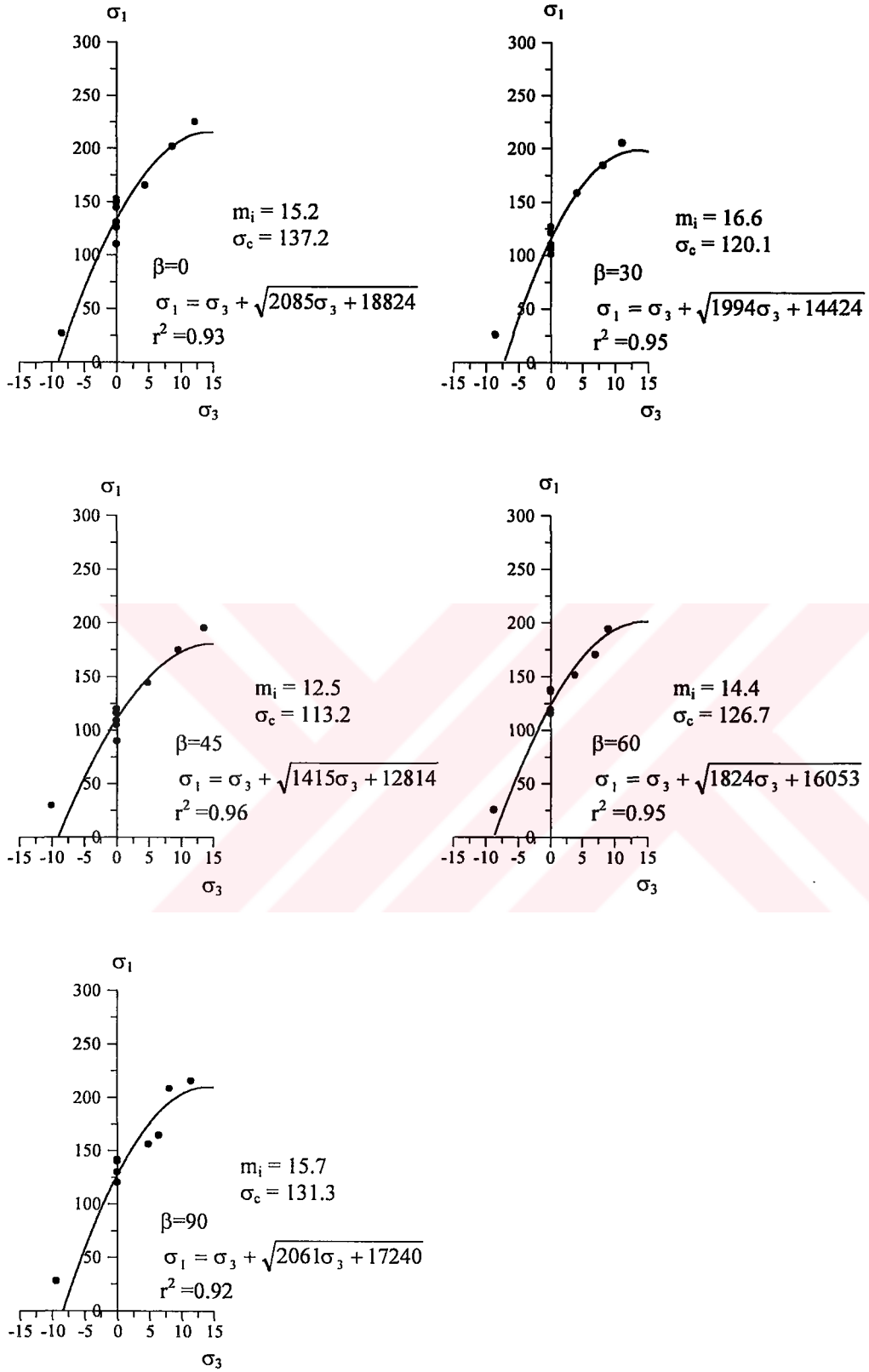
Şekil 6.5 Açılık damarı taban taşı (kumtaşı) verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.



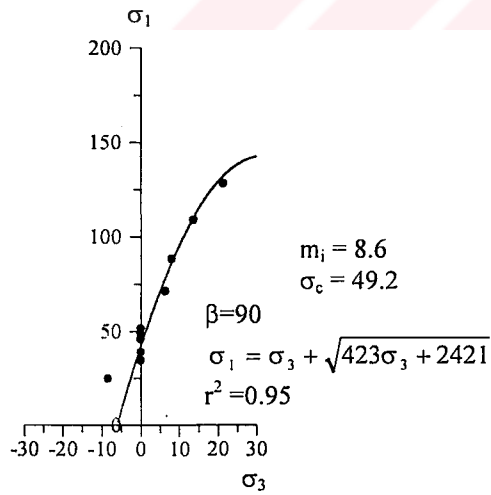
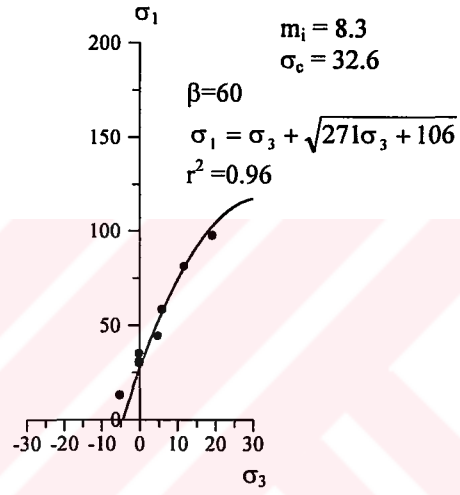
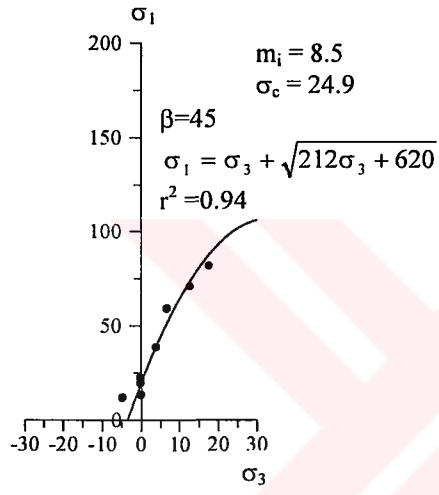
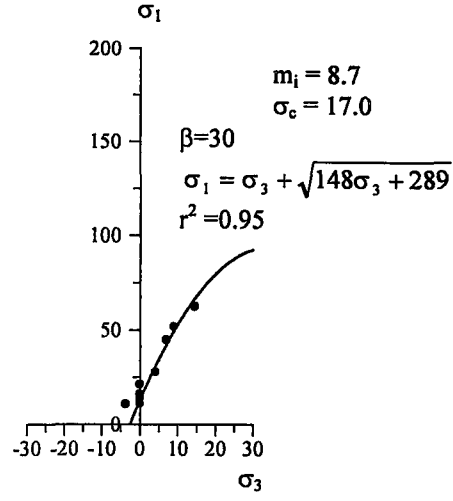
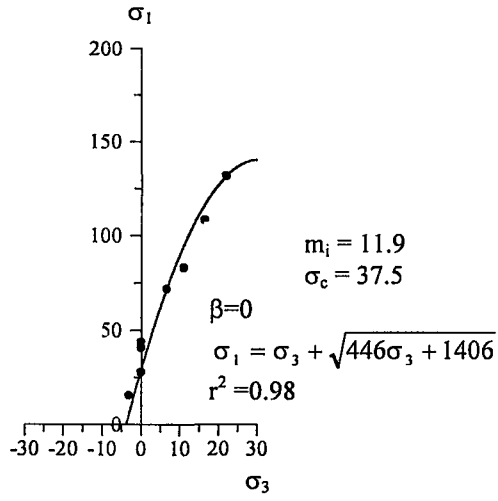
Şekil 6.6 Büyük damar tavan taşı (kumtaşı) verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.



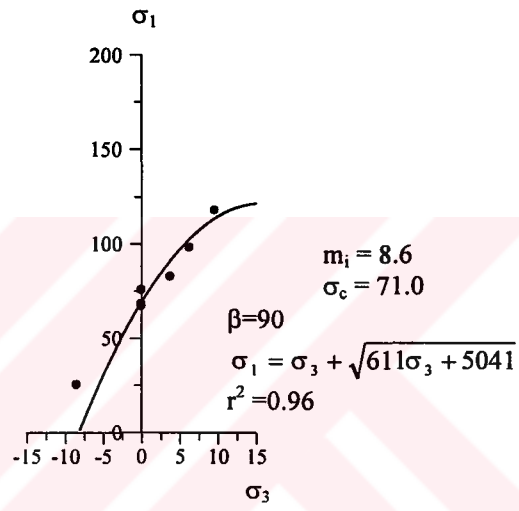
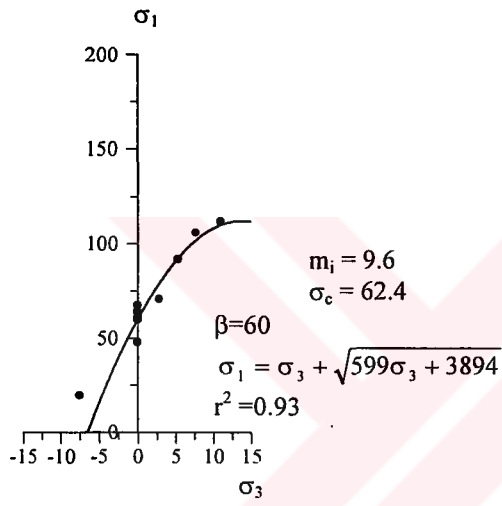
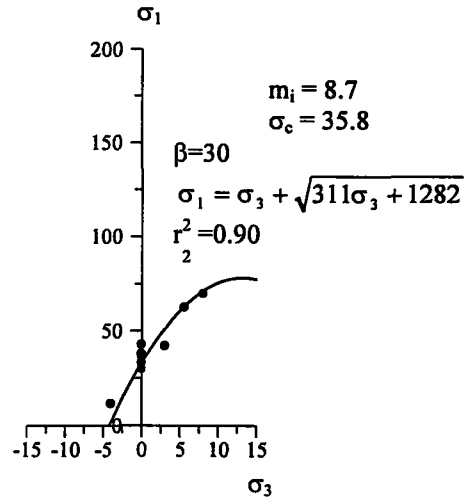
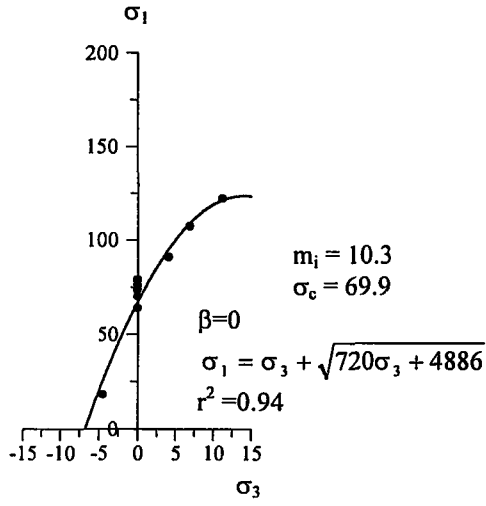
Şekil 6.7 Çay damarı taban taşı (kumtaşı) verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.



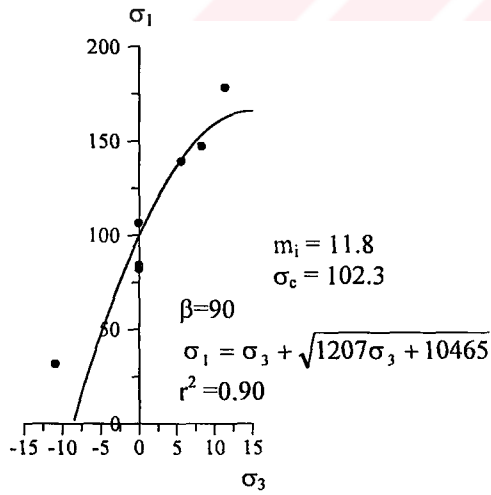
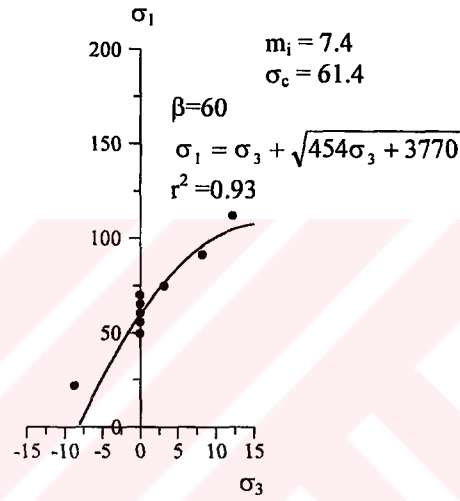
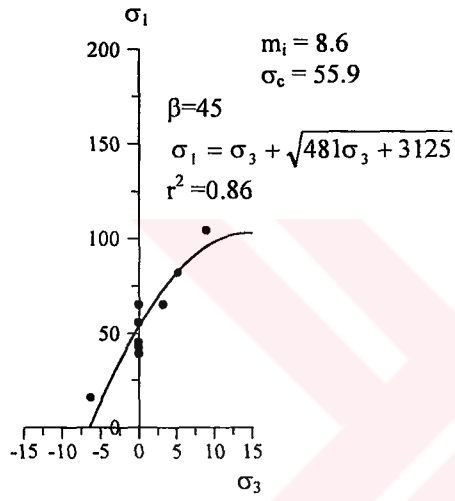
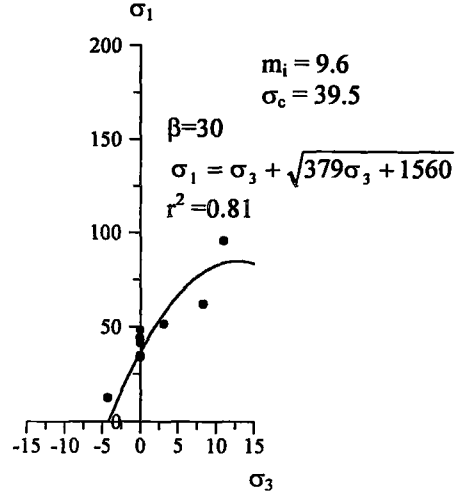
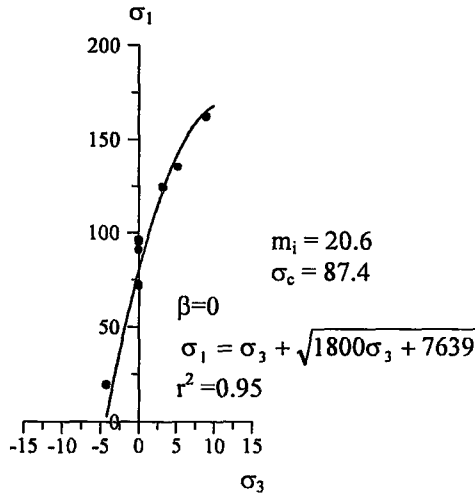
Şekil 6.8 Domuzcu damarı taban taşı II (kumtaşı) verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.



Şekil 6.9 Domuzcu damarı taban taşı I (kıltaşı) verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.



Şekil 6.10 Nasufoğlu damarı tavan taşı (silttaşı) verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.



Şekil 6.11 Sulu damarı tavan taşı (silttaşı) verileri için Hoek-Brown ölçütüne göre çizilen yenilme zarfı.

Hoek-Brown yenilme ölçütünün verilere uyumluluğu incelendiğinde ilişki katsayısı r^2 'nin, genel olarak 0.95 gibi yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bu ilişki oldukça yüksek bir uyumluluğu temsil etmektedir.

Hoek-Brown yenilme ölçütünün uygulanmasında iki durum incelenmiştir. Birincisi çekme dayanımı verilerinin kullanılması durumunda 'm' parametresindeki değişimi değerlendirmek ikincisi ise, anizotropikliğin değerlendirilmesi amacına yöneliktir.

Çizelge 6.2'de sunulan 'm' değerleri incelendiğinde, çekme dayanımı verilerinin kullanılıp kullanılmaması durumuna bağlı olarak bir değişim olduğu görülmektedir. Çekme dayanımı verilerinin kullanılmaması 'm' değerlerini belirgin şekilde artırmaktadır. Kumtaşlarında, σ_c/σ_t oranı 12'nin üzerinde olması durumunda, genel olarak 'm' değerleri her iki durum için de yaklaşık olarak aynı kalmaktadır. Her bir kayaca ait veri grupları kendi aralarında değerlendirildiğinde, σ_c/σ_t oranı artarken, çekme verilerinin dahil edilmesi halinde 'm' değeri düşmektedir.

Hoek ve arkadaşları, m'in değerini sağlam kumtaşı örnekleri için 19, silttaşı için ise 9 olarak önermiştir (Hoek et al., 1995). Gerçek ve Müftüoğlu (1993), Zonguldak bölgesi kömür çevre kayaçlarında yaptıkları çalışmada, kumtaşlarında 'm' değerinin 7.4 ile 25.5 arasında değiştiğini, ortalama değer olarak 13.4 değerinin alınabileceğini belirtmişlerdir.

Burada yapılan çalışmada, kumtaşlarında, β 'nın 0° ve 90° olduğu durumda 'm' değerleri, çekme dayanımı verilerinin kullanılması durumunda 15 ile 24 arasında değişmektedir. Ortalama değer olarak 17 elde edilmiştir. Çekme dayanımı verilerinin kullanılmaması durumunda bu değer, 13 ile 23 arasında değişmektedir. β 'nın diğer değerlerinde ise, en düşük 10.4 değeri elde edilmiştir. 'm' değerindeki değişim miktarı, σ_c/σ_t oranındaki değişime benzemektedir.

Çizelge 6.2 Hoek-Brown yenilme ölçütündeki ' m_i ' ve ' σ_c ' parametresinin değişik kayalarda ve β değerlerinde aldığı değerler.

Alındığı Yer	β	Çekme Day. Verileri Dahil		Çekme Day. Verileri Hariç	
		m_i	σ_c	m_i	σ_c
ACENTA Tv (Kumtaşı)	0	16.90	157.8	16.0	159.3
	45	11.20	109.0	15.7	100.6
	60	10.30	127.9	13.4	122.9
	90	13.80	142.2	14.8	140.5
ACILIK Tb (kumtaşı)	0	23.60	149.5	23.5	149.7
	30	21.10	92.5	25.4	86.1
	45	17.10	111.6	21.4	105.9
	60	12.70	128.8	13.6	127.2
	90	14.50	144.1	16.1	141.7
BÜYÜK Tv (kumtaşı)	0	15.80	96.0	14.9	99.4
	30	16.40	81.0	16.9	79.6
	45	11.50	91.6	10.8	94.3
	60	14.60	94.6	14.4	95.6
	90	13.50	97.4	13.2	98.5
ÇAY Tb (kumtaşı)	0	20.40	143.5	21.4	141.8
	30	13.90	92.6	20.1	79.5
	45	18.60	116.5	29.4	101.6
	90	17.30	139.9	21.2	132.9
DOMUZCU Tb II (kumtaşı)	0	15.20	137.2	16.0	135.9
	30	16.60	120.1	19.6	115.5
	45	12.50	113.2	14.7	108.9
	60	14.40	126.7	14.3	126.8
	90	15.70	131.3	16.1	130.7
NASUFOĞLU Tv (silttaşı)	0	10.30	69.9	8.9	72.4
	30	8.70	35.8	10.7	32.6
	60	9.60	62.4	11.2	59.6
	90	8.60	71.0	10.9	66.3
DOMUZCU Tb I (kiltası)	0	11.90	37.5	14.7	32.0
	30	8.70	17.0	10.5	14.9
	45	8.50	24.9	8.7	24.8
	60	8.30	32.6	10.0	29.1
	90	8.60	49.2	10.0	46.1
SULU Tv (silttaşı)	0	20.60	87.4	19.7	89.2
	30	9.60	39.5	11.6	35.7
	45	8.60	55.9	16.7	45.3
	60	7.40	61.4	8.4	59.0
	90	11.80	102.3	18.1	89.7

Hoek-Brown yenilme ölçütünün Büyük damarı tavan taşına ait veriler dışındaki kumtaşlarına ait diğer verilere uygulanması durumunda, 'm' parametresinin değerleri; $\beta=0^\circ$ 'de 15.6, $\beta=90^\circ$ 'de 15 olarak elde edilmektedir. β 'nın diğer değerlerinde ise $\beta=90^\circ$ 'deki değere göre %10-15 arasında bir azalma görülmektedir. Çalışmaya konu olan kumtaşlarının düşük anizotropi gösterdiği dikkate alınacak olursa; daha yüksek derecede anizotropi gösteren kayalarda değişim daha büyük olabilecektir. Bu durumda Hoek-Brown yenilme ölçütünün kullanımında anizotropinin de dikkate alınması gerektiği açıktır.

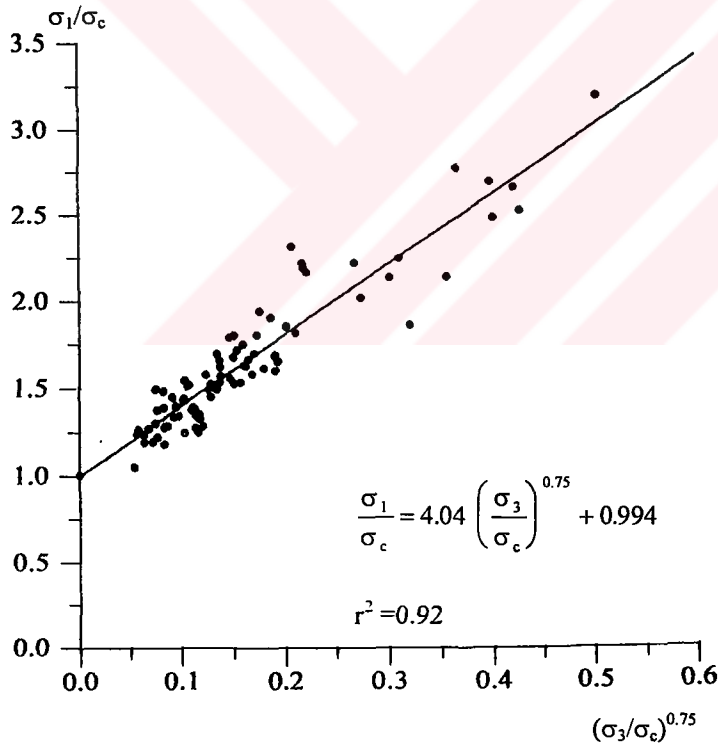
Hoek ve arkadaşları (Hoek et al., 1995), silttaşı örneklerinde 'm' değerini 9 olarak önermişlerdir. Gerçek ve Müftüoğlu (1996) ise bu değeri 7.4 (3.9 - 9.1) olarak bulmuşlardır. Burada yapılan çalışmada, β 'nın 0 ve 90° 'deki değerlerinde ortalama olarak 10 (7 - 13) değeri elde edilmektedir. Bu kayalarda, anizotropinin etkisi daha belirgin olduğundan, β 'nın diğer değerlerinde elde edilen 'm' değerleri yaklaşık olarak % 50'ye yakın bir değişim gözlenmektedir.

Bu çalışmada test edilen tek kiltası örneğinde, 'm' değeri ortalama 9 olarak elde edilmiştir. Bu değer $\beta=0^\circ$ ve 90° 'de geçerlidir. $\beta=30^\circ$ 'de en düşük 'm' değeri elde edilmiştir. Bu değer ise 7.2'dir. Hoek ve arkadaşlarının kiltası için önerdikleri değer 4'tür (Hoek et al, 1995).

6.3 DENEY VERİLERİNE BIENIAWSKI YENİLME ÖLÇÜTÜNÜN UYARLANMASI

Çalışmada, üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarına Bieniawski (1974) tarafından önerilen ve Eşitlik 73’de verilen 1 nolu yenilme ölçütü uyarlanmıştır. Burada yapılan çalışmada, Bieniawski tarafından kumtaşıları için önerilen, ‘k’ katsayısı için 0.75 değerleri alınarak deneylerden elde edilen verilerle σ_1/σ_c ’ye karşılık hesaplama ile elde edilen $(\sigma_3/\sigma_c)^{0.75}$ değerleri kullanılarak, A katsayısının değişimi incelenmiştir.

Burada önce, tüm kumtaşılarında elde edilen değerler litolojik farklılık ve β değişimi düşünülmeden birleştirilerek kumtaşıları için bir ‘A’ katsayısı elde edilmiştir (Şekil 6.12).



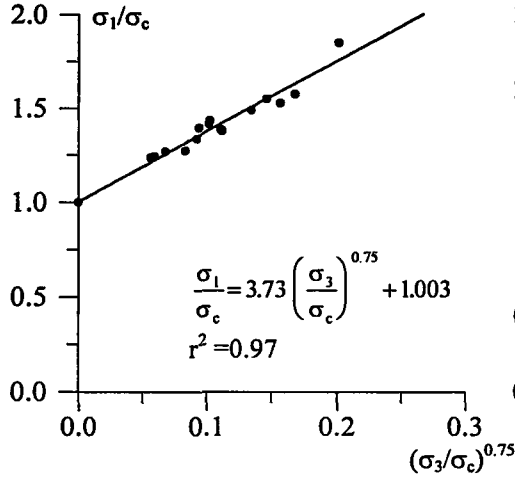
Şekil 6.12 Kumtaşılarında elde edilen verilere, Bieniawski yenilme ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.

Bu değerlendirmeye göre, kumtaşları için bulunan değer 4.04'dr. Bieniawski (1974), kumtaşları için bu değeri 4 olarak önermiştir. Gerçek ve Müftüoğlu (1993) Zonguldak havzası kumtaşları için bu değerin 2.7 ile 5.4 arasında değiştiğini belirterek, ortalama değer olarak 3.8'i önermişlerdir.

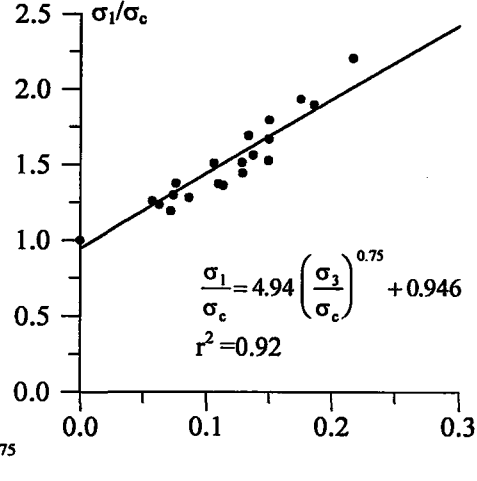
Çalışmada daha sonra herbir kayaç ayrı ayrı ele alınarak değerlendirilmişlerdir (şekil 6.13). Bu değerlendirmede, 'A' katsayısının değerinin, 3.7 ile 5.09 arasında değiştiği gözlenmiştir.

'A' katsayısının konum açısı ile değişimini belirlemek için yapılan çalışmada ise; $\beta=0^\circ$ ve 90° 'de A'nın değerinin yaklaşık aynı olduğu ve 'A' katsayısının β ile değişiminde, β ile σ_c arasında değişiminin tersi bir durumun olduğu görülmektedir. Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde σ_c 'nin yüksek olduğu β değerlerinde 'A' değeri düşük, σ_c 'nin düşük olduğu β değerlerinde ise 'A' değeri yüksek elde edilmiştir (şekil 6.14-18).

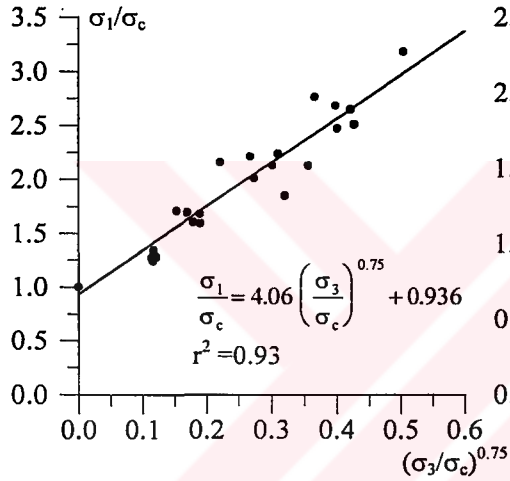
Bu sonuçlara göre, Bieniawski yenilme ölçütündeki A katsayısının değeri, β değeri ile değişim göstermektedir. Bu durumda, tek bir A katsayısının bütün β değerlerinde kullanılması % 25'e kadar ulaşan hatalı sonuçlara neden olabilmektedir.



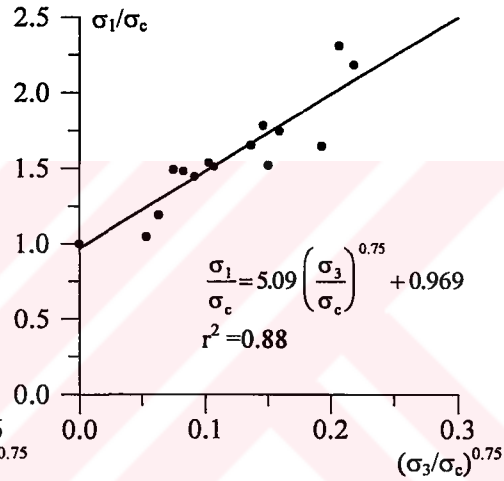
a. Acenta damarı tavan taşı



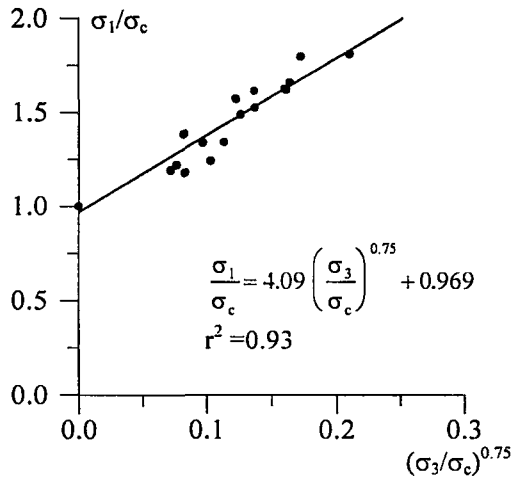
b. Acılık damarı taban taşı



c. Büyük damarı tavan taşı

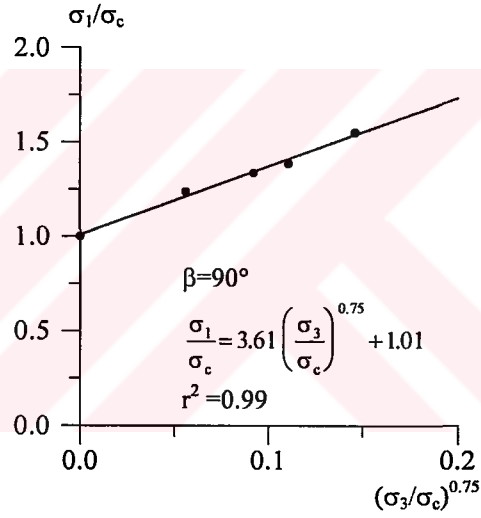
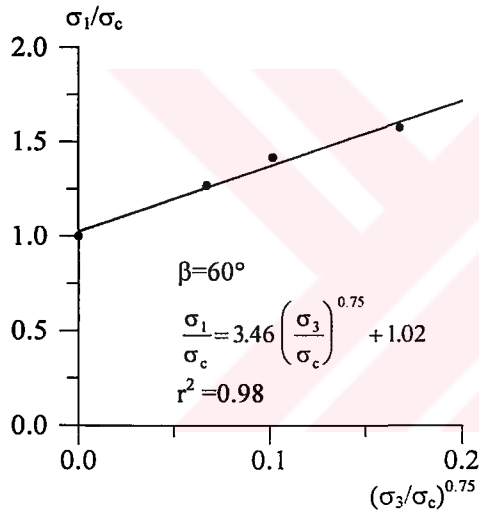
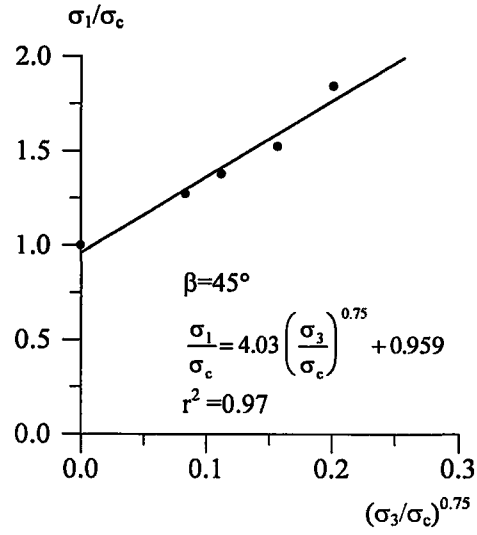
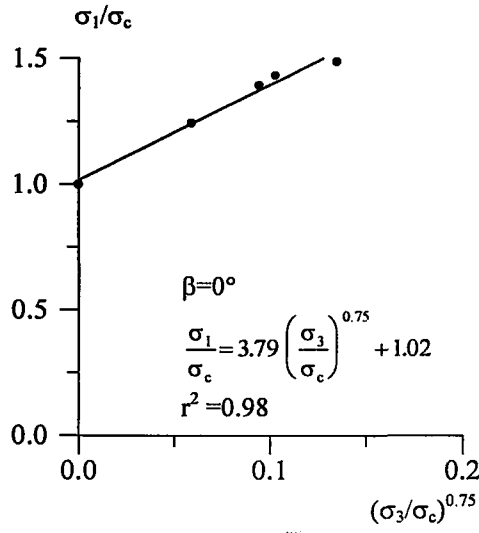


d. Çay damarı taban taşı

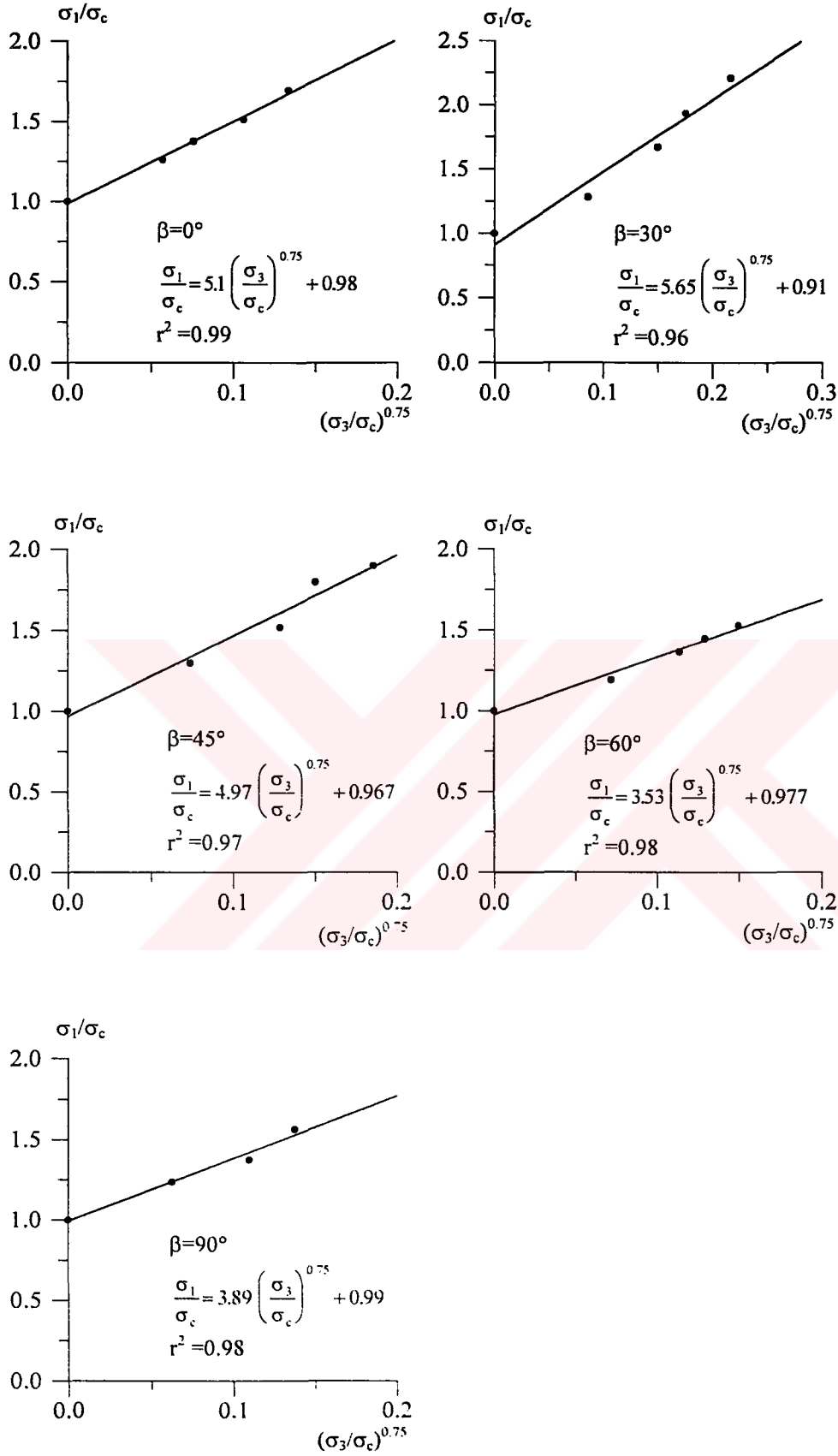


e. Domuzcu damarı taban II taşı

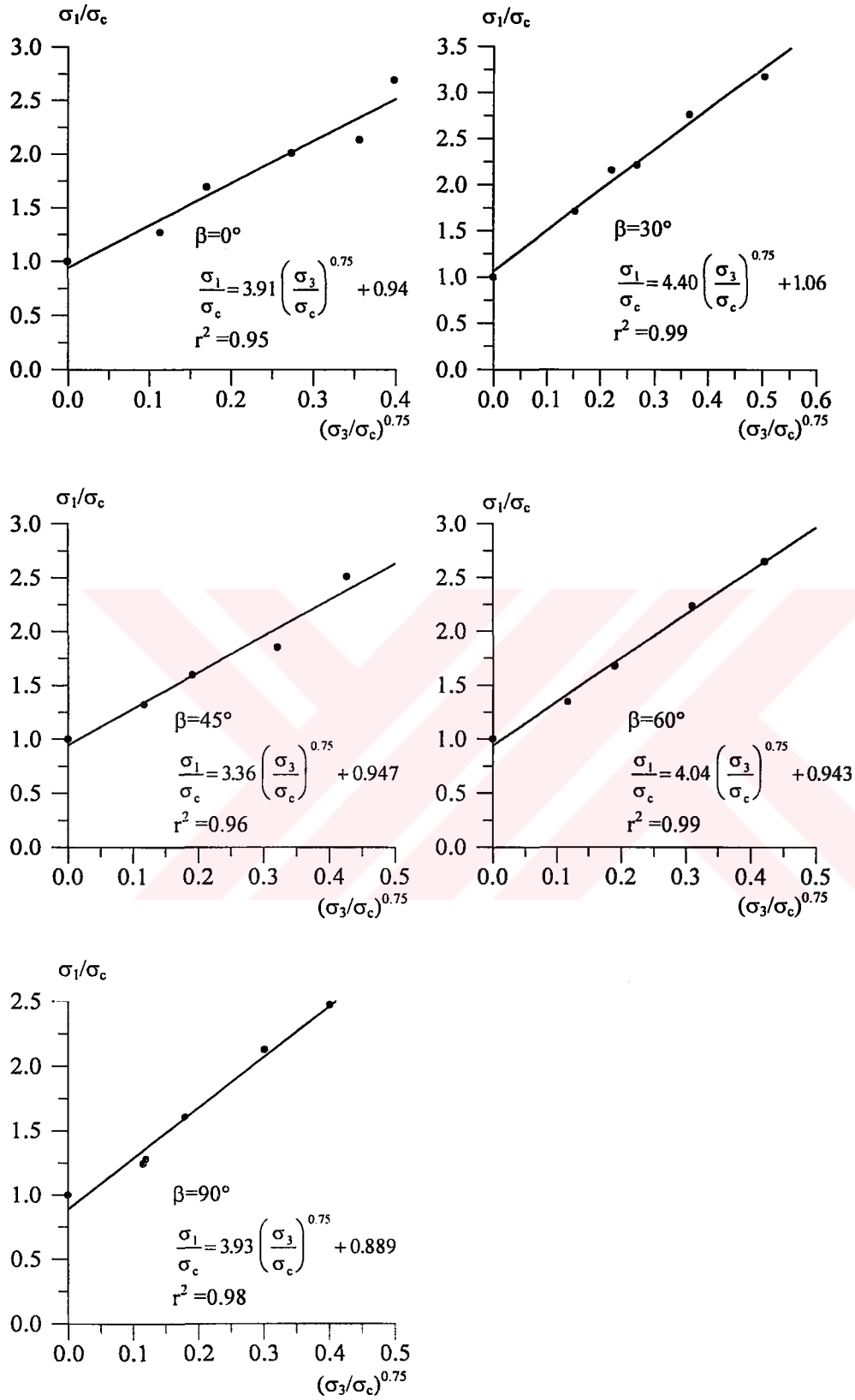
Şekil 6.13 Değişik kumtaşlarında Bieniawski yenilme ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.



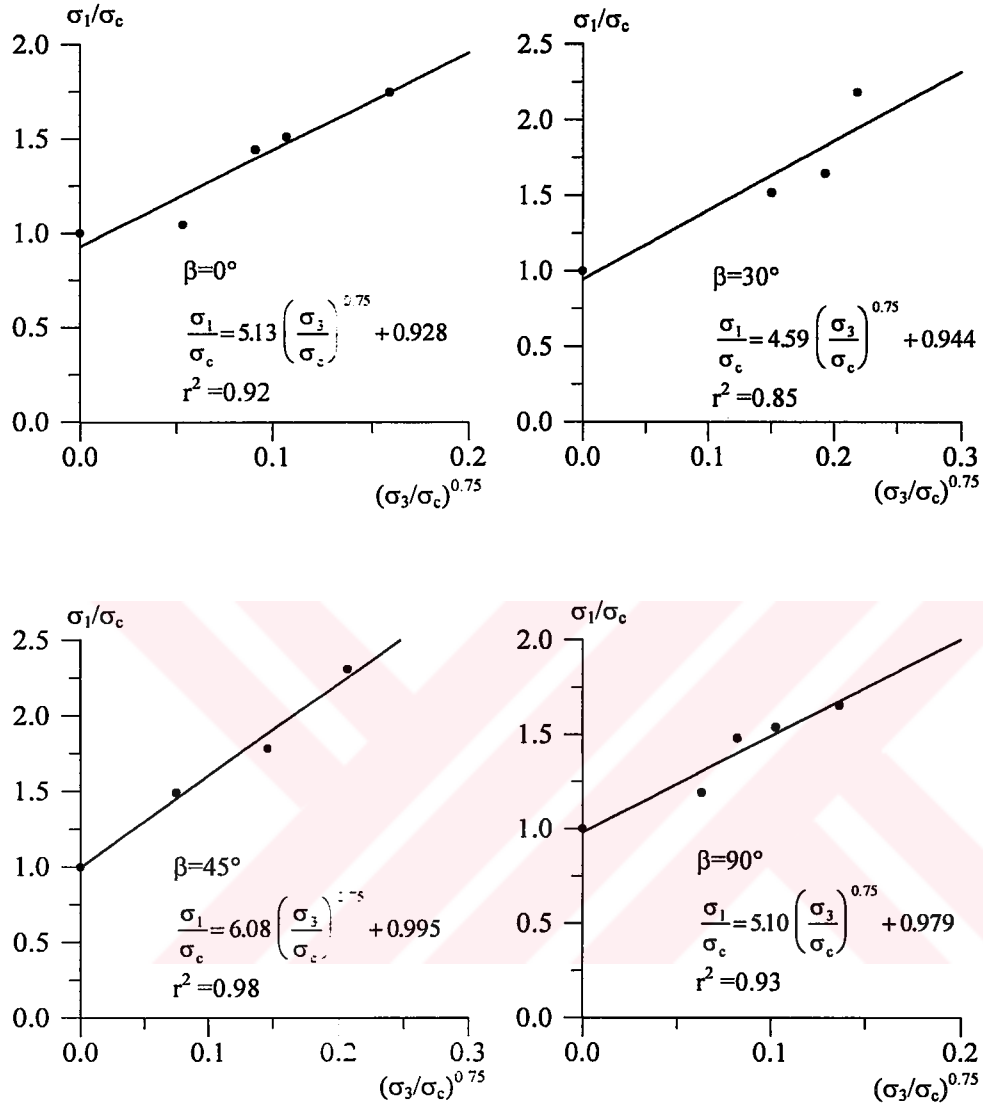
Şekil 6.14 Acenta damarı tavan taşı (kumtaşı) verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.



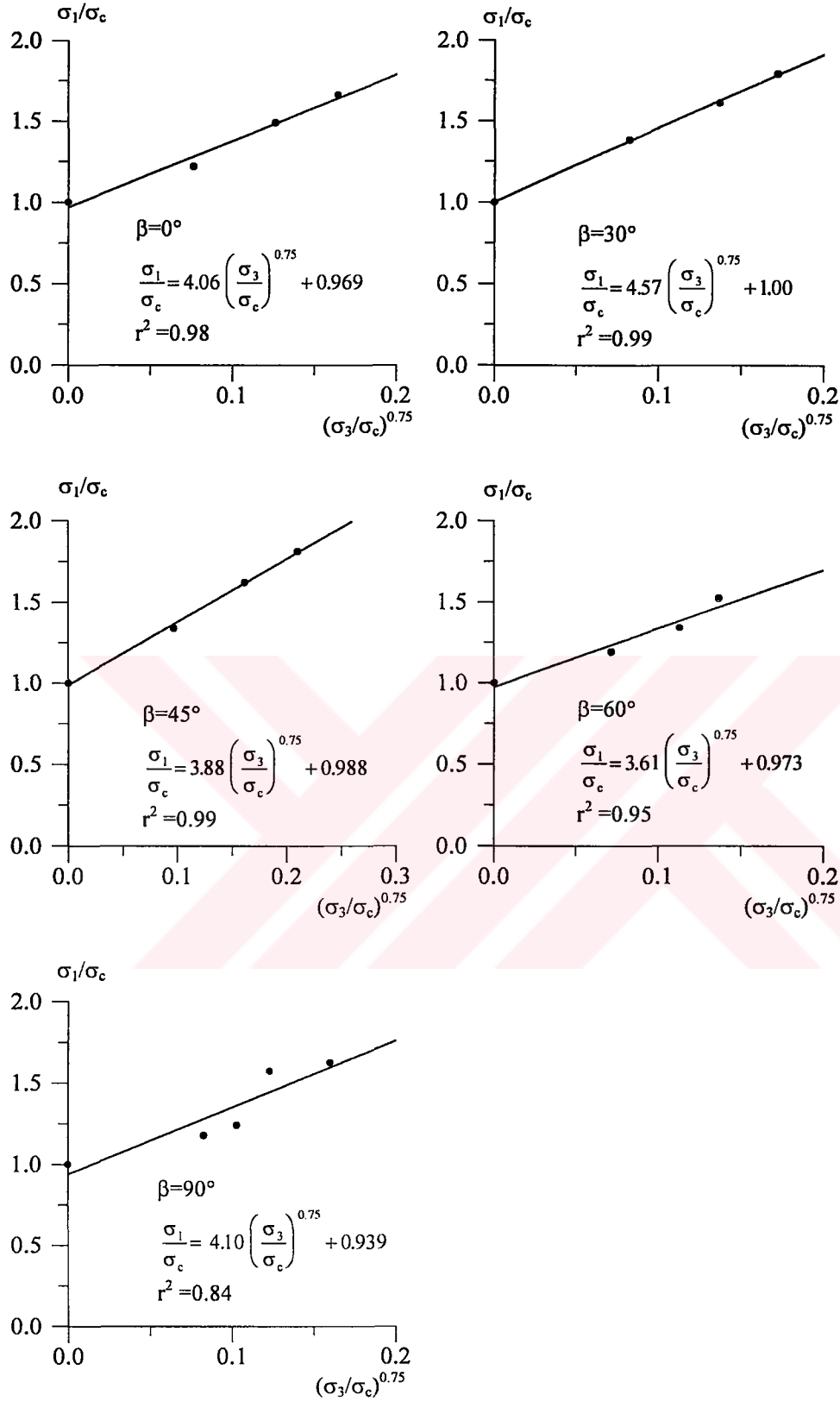
Şekil 6.15 Açılık damarı taban taşı (kumtaşı) verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.



Şekil 6.16 Büyük damar tavan taşı (kumtaşı) verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı



Şekil 6.17 Çay damarı taban taşı (kumtaşı) verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.



Şekil 6.18 Domuzcu damarı tavan II taşı (kumtaşı) verilerine Bieniawski ölçütüne göre çizilen dayanım zarfı.

BÖLÜM 7

DAYANIM VE DEFORMASYON ANİZOTROPİSİNİN

SAYISAL UYGULAMALARI

Çalışmanın bu bölümünde, disk şeklindeki örnek ve kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan gerilme ve yenilme bölgelerinin anizotropiklik derecesi ve konum açısına göre değişimi incelenmiştir.

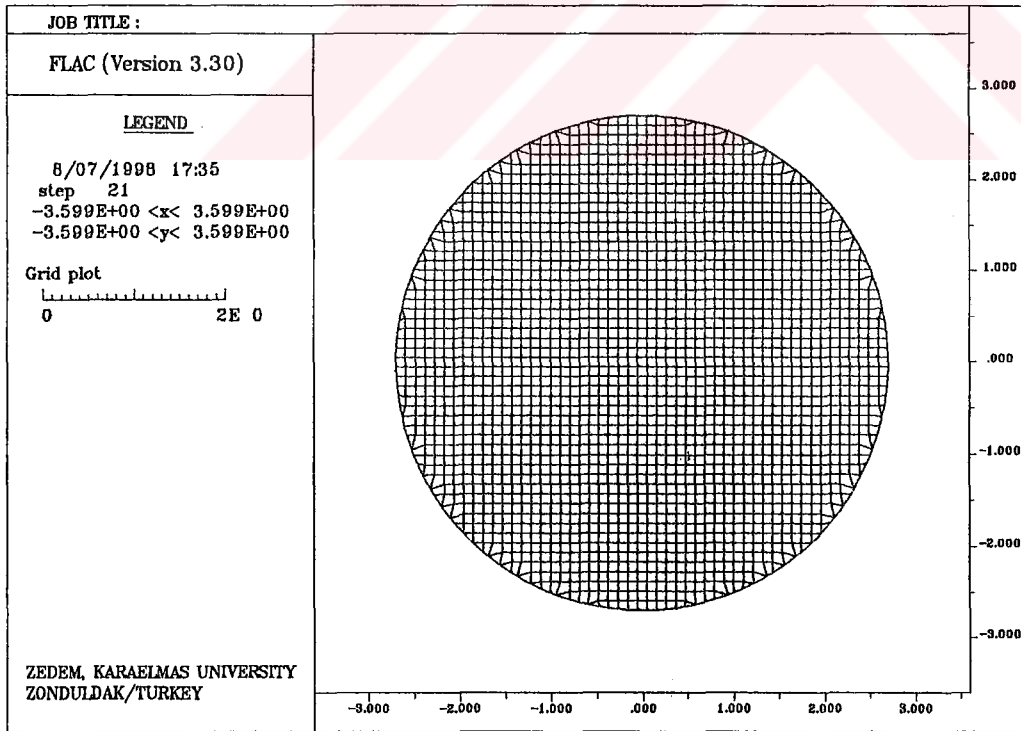
Dolaylı çekme dayanımı deneyinde kullanılan disk şeklindeki bir örnekte oluşan gerilmeler, elastik-izotropik model ile belirlendikten sonra, anizotropiklik derecesi ile gerilme değişimlerini belirlemek için düzlemsel izotropik model kullanılmıştır. Ayrıca disk örneğinde oluşan yenilme şeklini belirlemek amacı ile düzenli eklem (ubiquitous joint) modeli ile çözümler yapılmıştır. Böylece, anizotropi düzleminin konumunun değişimi ile oluşan yenilme şekli ve yeri incelenmiştir.

Daha sonra, hidrostatik birincil gerilme ortamında oluşturulan, kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan ikincil gerilmeler elastik çözümleme ile belirlendikten sonra, anizotropinin, gerilmeler üzerine etkisini belirlemek amacı ile düzlemsel izotropik model ile çözümler tekrarlanmıştır. Bu tür açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri, önce Coulomb modeli ile sonra da düzenli eklem modeli ile incelenmiştir. Böylece hem iki modelle elde edilen çözümler karşılaştırılmış, hem de anizotropi düzleminin konumunun değişimi ile yenilme bölgesinin büyüklüğünün ve konumunun değişimi incelenmiştir.

7.1 DİSK ÖRNEĞİ ÜZERİNDE OLUŞAN GERİLMELER VE PLASTİK DEFORMASYONLAR

Çalışmanın bu kısmı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, disk örneği üzerinde oluşan gerilmelerin, anizotropiklik derecesi ve konum açısı ile değişimi araştırılmıştır. Bu amaçla elastik model ve düzlemsel izotropik model kullanılmıştır. İkinci aşamada ise disk örneğinde oluşan plastik deformasyonlar, düzenli eklem modeli kullanılarak incelenmiştir.

Dolaylı çekme dayanımı deneyinde kullanılan, 54 mm çapındaki disk şeklindeki örnekte, hem merkezde oluşan gerilmelerin büyüklüğünü hem de gerilmelerin dağılımını belirlemek amacı ile, alt ve üstteki tepe noktalarından, merkezi gören yaklaşık 10°'lik bir yay boyunca basınç uygulanmıştır. Çözümleme için 51x51'lik bir ağ oluşturulmuştur (Şekil 7.1).



Şekil 7.1 Disk şekilli örnek için oluşturulan ağ.

7.1.1 Elastik Model ile Gerilme Analizi

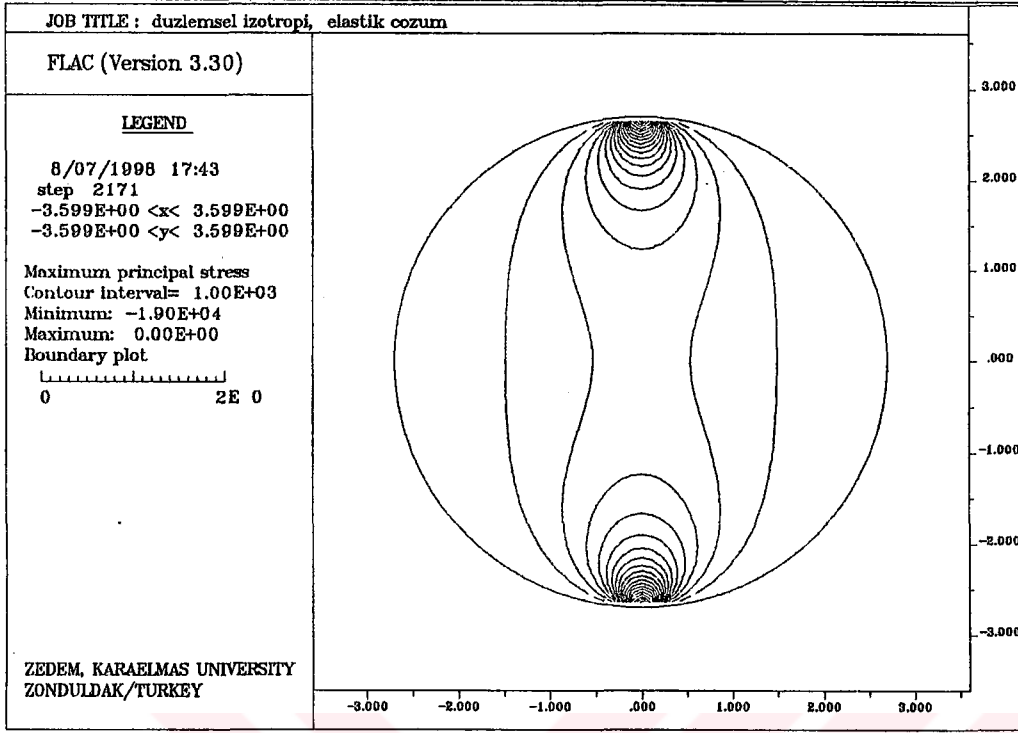
Çözümlemede kayaç malzemesinin dayanım parametreleri, Young modülü 10 GPa, Poisson oranı 0.3 alınmış ve kayma modülü de 3.85 GPa olarak hesaplanmıştır. Bu koşullarda disk örneği üzerinde oluşan en büyük (σ_1) ve en küçük (σ_3) asal gerilmeler, Şekil 7.2'deki gibi elde edilmiştir.

Bu analiz sonuçlarına göre, gerilmeler hem yatay hem de düşey eksene göre simetri göstermektedirler. Örnek yüzeyine 20 MPa'lık basınç uygulanması durumunda, disk örneğinin alt ve üstteki yükleme yerlerine yakın bölgelerde yüksek basınç gerilmeleri meydana gelirken, örneğin merkezinde 2.24 MPa'lık σ_1 (basınç gerilmesi) ve 0.74 MPa'lık σ_3 (çekme gerilmesi) oluşturmaktadır. Elastik çözümlemede disk örneğinin merkezinde elde edilen σ_1/σ_3 oranı 3.027'dir.

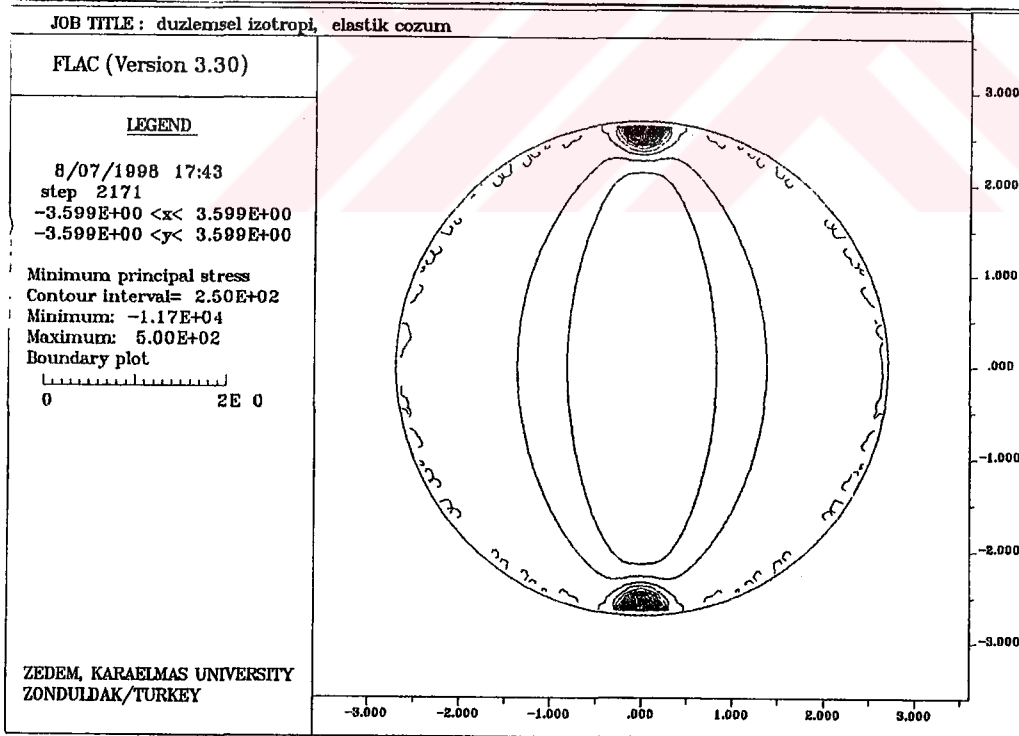
7.1.2 Düzlemsel İzotropik Model ile Gerilme Analizi

Anizotropiklik derecesinin, gerilme dağılımları ve büyüklükleri üzerindeki etkisini belirlemek amacı ile kullanılan bu modelde, üç farklı E_1/E_2 oranı kullanılmıştır. Ayrıca her bir anizotropiklik oranında, anizotropi düzleminin yatay ile yapığı açı 0° , 30° , 45° , 60° ve 90° olacak şekilde değiştirilerek çözümlemeler tekrarlanmıştır. Böylece anizotropi düzleminin konumunun gerilmeler üzerindeki etkisi de belirlenmiştir.

Kayaç örneğinin dayanım parametreleri, $E_2=10$ GPa, $\nu_1=0.25$ ve $\nu_2=0.3$ olarak seçilmiştir. Seçilen bu değerlere göre G_2 , 3.84 olarak hesaplanmıştır. E_1 'in değeri ise 12.5, 25.0 ve 50.0 GPa alınarak, anizotropiklik derecesinin sırası ile 1.25, 2.5 ve 5.0 olması sağlanmıştır.



a. En büyük asal gerilmelerin (σ_1) dağılımı



b. En küçük asal gerilmelerin (σ_2) dağılımı

Şekil 7.2 Elastik analizlere göre disk örneğinde oluşan asal gerilmelerin dağılımı.

Çözümleme sonuçlarına göre, her bir anizotropiklik derecesi ve konum açısında, örnek merkezinde elde edilen σ_1 ve σ_3 değerleri Çizelge 7.1’de, gerilmelerin dağılımı ise EK AÇIKLAMALAR B’de sunulmuştur.

Çizelge 7.1 Disk örneğinin merkezinde oluşan gerilmeler

β (°)	$E_1/E_2=1.25$			$E_1/E_2=2.5$			$E_1/E_2=5.0$		
	σ_1^*	σ_3^*	σ_1/σ_3	σ_1	σ_3	σ_1/σ_3	σ_1	σ_3	σ_1/σ_3
0	2.21	0.75	2.95	2.14	0.74	2.89	2.22	0.69	3.22
30	2.13	0.78	2.73	1.93	0.85	2.27	1.82	0.88	2.07
45	2.13	0.78	2.73	1.91	0.87	2.20	1.71	0.96	1.78
60	2.23	0.74	3.01	2.11	0.77	2.74	1.86	0.87	2.14
90	2.49	0.66	3.77	3.25	0.48	6.77	4.26	0.35	12.17

*: gerilmelerin birimi MPa’dır.

Çözümlemelerde ilk olarak, düşük anizotropiklik derecesi ($E_1/E_2=1.25$) için çözümler elde edilmiştir. $\beta=0^\circ$ ve $\beta=90^\circ$ ’de elde edilen sonuçlar elastik izotropik model çözümlerine benzerlik göstermektedir. Burada da hem yatay hem de düşey eksene göre simetri görülmektedir.

$\beta=0^\circ$ ’de örneğin merkezinde oluşan gerilmelerdeki değişim miktarı oldukça düşüktür. Bu durumda merkezde elde edilen gerilemeler, σ_1 ’in 2.21 ve σ_3 ’ün de 0.75 MPa olduğunu göstermiştir. $\beta=30^\circ$ ve 45° durumlarında, hem gerilme dağılımı hem de merkezde oluşan gerilmelerin büyüklüğü açısından fark yoktur. Fakat, bu iki durumda elde edilen gerilme oranları diğerlerine göre az da olsa düşüktür. $\beta=60^\circ$ durumunda gerilme dağılımları simetriden sapma göstermektedir. Bu durumda merkezde oluşan gerilmelerin oranında bir değişim görülmektedir. Gerilme oranları açısından değişim gösteren diğer durum ise

$\beta=90^\circ$ olduğu konumdur. Bu durumda gerilme oranı 3.25'e çıkmaktadır. 1.25'lik anizotropi oranında en düşük çekme gerilmesi $\beta=90^\circ$ konumunda elde edilmiştir.

E_1/E_2 oranının 2.5 ve 5.0 olması durumunda, en düşük σ_1/σ_3 oranı $\beta=45^\circ$ 'de, en yüksek oran ise $\beta=90^\circ$ 'de elde edilmektedir. Oranlar anizotropikliğin artması ile büyümektedir. Yine, $\beta=30^\circ$, 45° ve 60° 'de simetriden sapmalar vardır ve bu sapma miktarı da anizotropi oranı ile artmaktadır.

EK AÇIKLAMALAR B'de sunulan şekiller ve Çizelge 7.1'de verilen değerler, anizotropi düzleminin konumundaki değişimin, disk şeklindeki örneğin merkezinde oluşan gerilmelerin büyüklüğünü ve oluşan gerilmelerin dağılımını değiştirdiğini göstermektedir. Anizotropikliğin artması ile gerilmelerdeki değişim daha fazla hissedilmektedir.

Yapılan çözümler anizotropik kayaçların çekme dayanımının belirlenmesinde, dolaylı çekme dayanımı deneyinin kullanılmasında dikkatli olunması gerektiğini ve sonuçların değerlendirilmesinde anizotropi oranına göre düzeltme yapılmasının yerinde olacağını göstermiştir.

7.1.3 Plastik Model ile Deformasyon Analizi

Alt ve üst noktalarından düşey çap boyunca sıkıştırılan disk şeklindeki örnekte meydana gelen yenilme şeklini belirlemek amacı ile düzenli eklem modeli kullanılmıştır.

Bu çözümlerde, her bir konum açısında, disk örneğine farklı seviyelerde basınç uygulanmıştır. Bunun nedeni bazı konum açılarında yüksek gerilmelerde yenilme oluşurken, bazı konum açılarında ise çok daha düşük gerilme seviyelerinde yenilme oluşmasıdır. Örnek üzerinde yenilme oluşması durumunda, gerilme dağılımını belirlemek mümkün olmadığı için, her bir konumda yenilme

başlangıcını belirleyecek kadar gerilme uygulanmıştır. Böylece örnek içindeki gerilme dağılımı belirlendikten sonra, uygulanan basınç seviyesi artırılarak yenilme oluşması sağlanmıştır. Çözümlmelerde kullanılan diğer giriş verileri aşağıdaki gibidir.

Kayaç için;

$$G = 8.3 \text{ GPa}, K = 11 \text{ GPa}, d = 2600 \text{ kg/m}^3, \phi_{(\text{kayaç})} = 35^\circ,$$

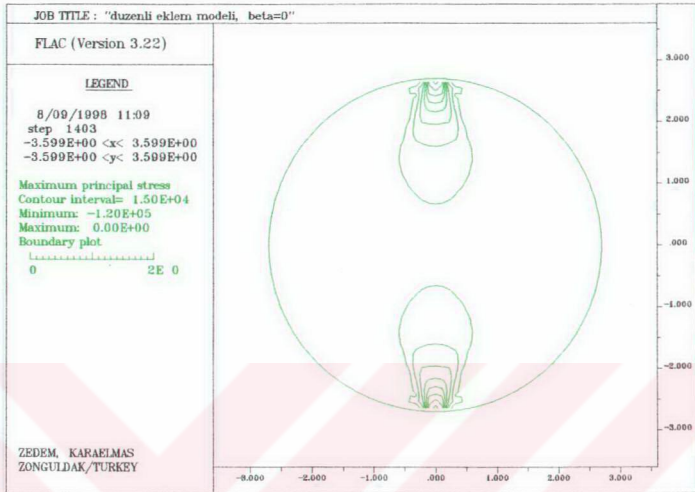
$$c_{(\text{kayaç})} = 15 \text{ MPa}, \sigma_{t(\text{kayaç})} = 10 \text{ MPa},$$

Eklem için;

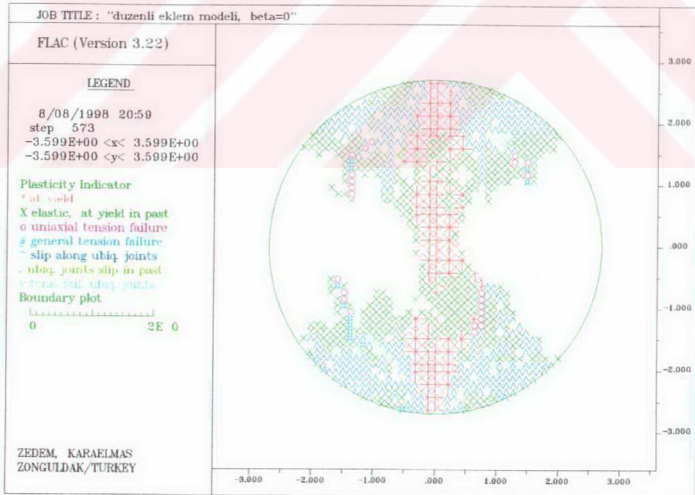
$$\phi_{(\text{eklem})} = 25^\circ, c_{(\text{eklem})} = 4 \text{ MPa}, \sigma_{t(\text{eklem})} = 2 \text{ MPa}$$

Bu model ile, kayaç içinde meydana gelen yenilme bölgesi ve en yüksek asal gerilmenin, anizotropi düzleminin konumu ile değişimi belirlenmiştir. Bu çözümlmeye göre;

Uygulanan basınç seviyesinde, $\beta=0^\circ$ olması durumunda düşük gerilme seviyelerinde kayaçta yalnızca yükleme yerlerinde elastik deformasyonlar oluşurken uygulanan gerilmenin arttırılması ile örnek içinde, düşey çap boyunca yenilme hattı oluşmaktadır. Yenilme öncesinde örnekte oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli Şekil 7.3.a ve b' gösterilmiştir.. Şekil 7.3.a'ya göre, örnekte oluşan en büyük asal gerilme dağılımı simetri göstermektedir. Şekil 7.3.b'de gösterildiği gibi, yenilme şekli ise, yükleme noktalarına yakın bölgede ezilme ve bu noktaların içeriye doğru batması sonucunda, eklemler üzerinde dışa doğru kayma hareketi oluşmaktadır. Örneğin ortasında ise, gerilmeler etkisi ile tabakalanmaya dik sıkışma sonucu oluşan yenilme, yükleme noktaları arasında meydana gelmektedir.



a. En büyük asal gerilme dağılımı



b. Yenilme şekli

Şekil 7.3 Düzenli eklem modeline göre $\beta=0^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli.

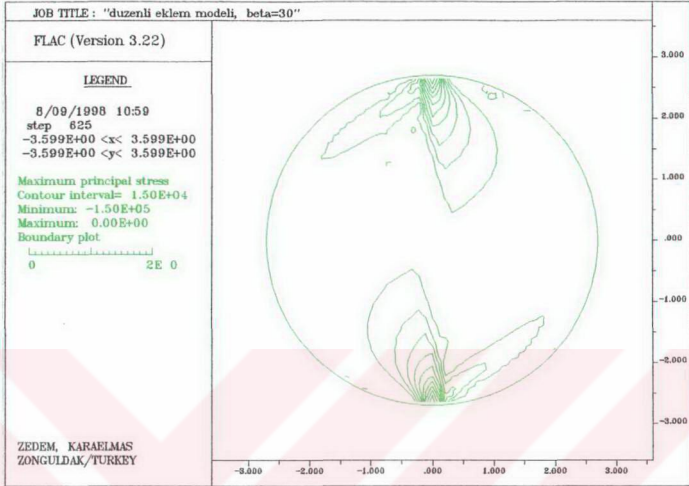
β 'nın 30° olması durumunda, basınç gerilmeleri, anizotropi düzleminin normali yönünde artmaktadır. Tabakalanmaya paralel yönde ise daha daha kısa mesafede gerilmeler sıfıra düşmektedir (Şekil 7.4.a). Örneğin merkezine yakın bölgelerde oluşan küçük çaplı eklem üzerinde kayma hareketleri, yenilmenin eklem boyunca oluşması için yeterli olmamaktadır. Çünkü, eklemlere dik yönde oluşan yüksek gerilmeler, bu hareketin ilerlemesini sınırlamaktadır. Böylece örneğin yenilmesi, bölgesel olarak oluşan eklem üzerinde kayma hareketlerinin düşey olarak birleşmesi sonucunda, düşey çap boyunca olmaktadır (Şekil 7.4.b).

β 'nın 45° olması durumunda, tabakalanmaya hem dik hem de paralel yönde yaklaşık aynı büyüklükte gerilmeler oluşmaktadır. Bu durumda yenilme bölgesinin genişliği artmakta fakat yenilme yine $\beta=30^\circ$ 'deki gibi olmaktadır. (Şekil 7.5.a ve b).

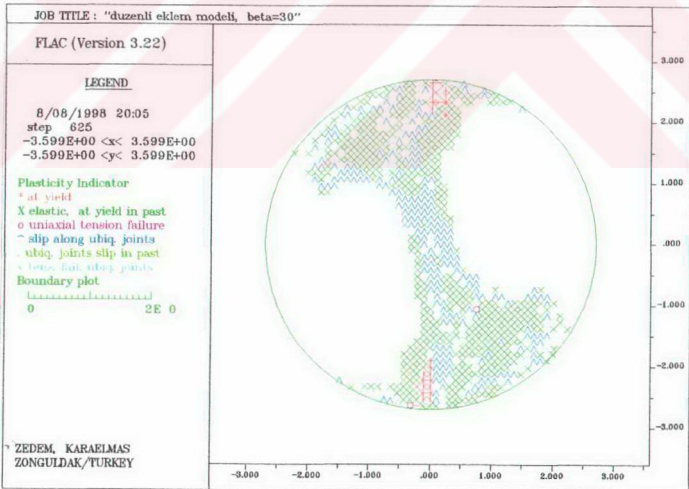
β 'nın 60° olduğu durumda, basınç gerilmeleri, tabakalanmaya paralel yönde artma göstermekte ve eklem üzerinde kayma hareketinin olduğu bölgenin genişliği daha da artmaktadır. Bu konumda oluşan gerilmelerin yönü, yenilmenin eklem üzerinde kayma şeklinde oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 7.6.a ve b).

$\beta=90^\circ$ olması durumunda ise, uygulanan gerilme seviyesine bağlı olarak, yenilme, örneğin düşey çapı boyunca gelişmektedir. Alt ve üst yükleme yerlerinde başlayarak bir miktar eklem üzerinde kayma oluştuğundan sonra, örneğin merkezi çevresinde, eklemlerde çekme yenilmesi oluşmaktadır. Bu konumda örnekte oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli Şekil 7.7 a ve b'de gösterilmiştir.

Çözümlemelerde elde edilen, β 'nın değişimine göre gerilme dağılımının değişimi, Bray (1977) tarafından, düzlemsel izotropinin olduğu yarı sonsuz bir ortamda, noktasal yükün oluşturduğu elastik gerilme dağılımları analitik yolla elde edilmiştir (Şekil 7.8) (Goodman'dan, 1989). Bray'in (1977) çözümü elastik yarı sonsuz ortam için olmasına rağmen, disk şeklindeki, sınırlı bir ortam için yapılan plastik çözümlerden elde edilen sonuçlar bir biri ile oldukça uyumlu çıkmıştır.

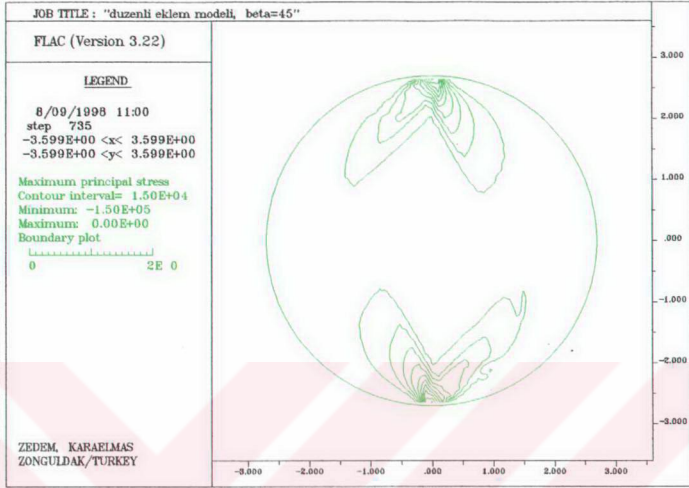


a. En büyük asal gerilme dağılımı

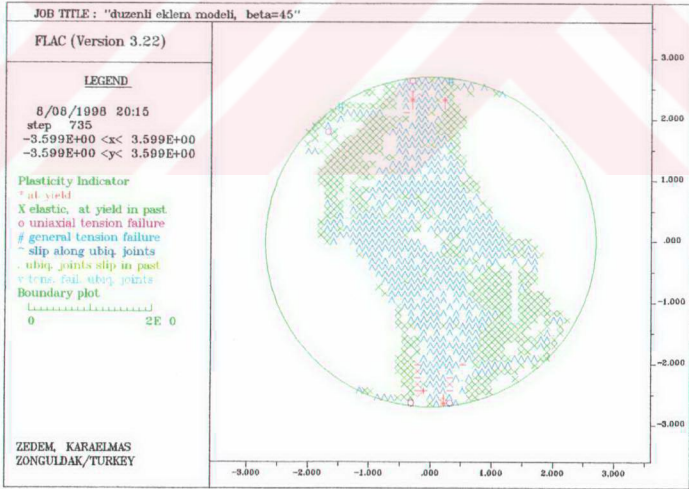


b. Yenilme şekli

Şekil 7.4 Düzenli eklem modeline göre $\beta=30^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli.

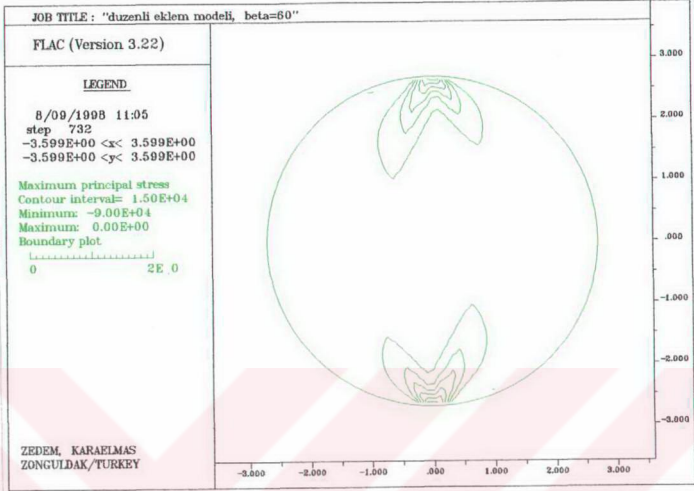


a. En büyük asal gerilme dağılımı

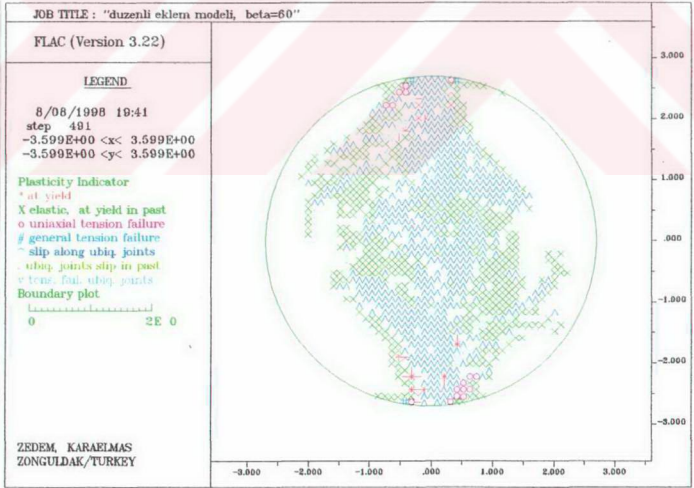


b. Yenilme şekli

Şekil 7.5 Düzenli eklem modeline göre $\beta=45^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli.

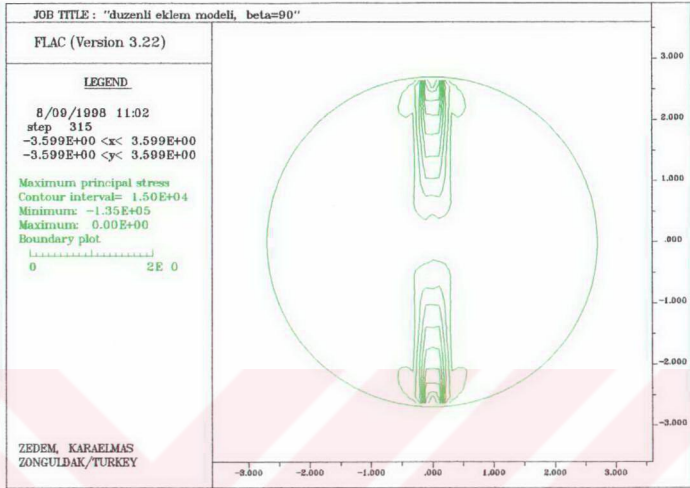


a. En büyük asal gerilme dağılımı

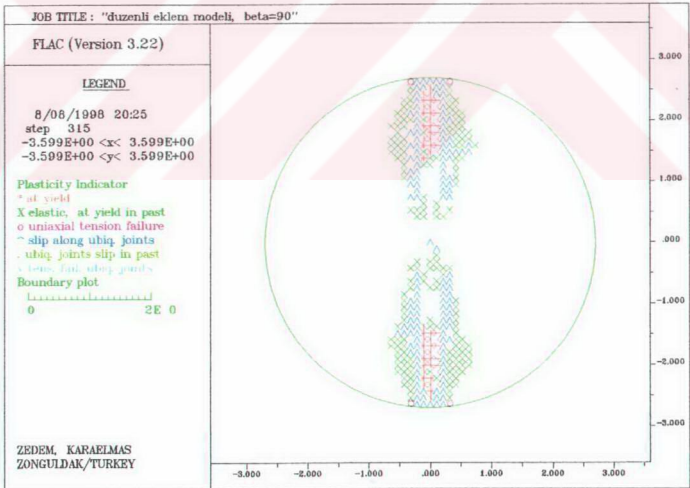


b. Yenilme şekli

Şekil 7.6 Düzenli eklem modeline göre $\beta=60^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli.

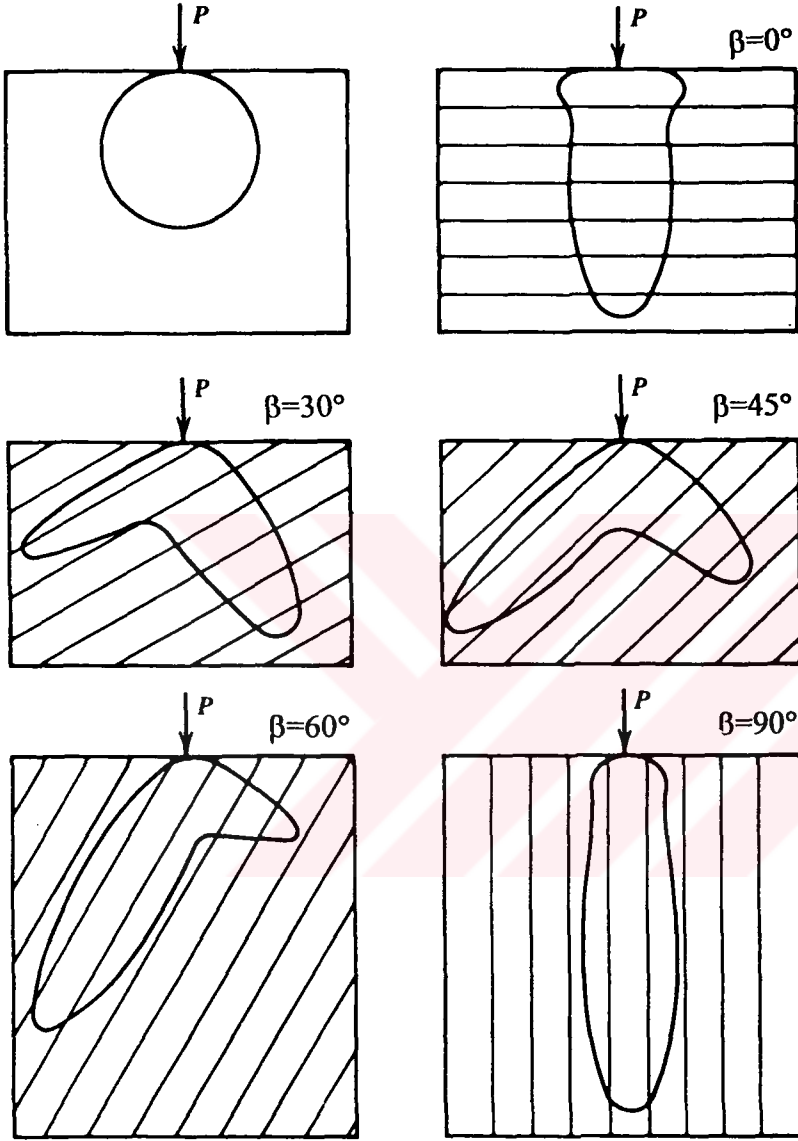


a. En büyük asal gerilme dağılımı



b. Yenilme şekli

Şekil 7.7 Düzenli eklem modeline göre $\beta=90^\circ$ durumunda oluşan gerilme dağılımı ve yenilme şekli.



Şekil 7.8 Bray (1977) tarafında analitik yolla elde edilen gerilme dağılımları.

7.2 KEMER TAVANLI AÇIKLIK ÇEVRESİNDE OLUŞAN GERİLME VE YENİLME BÖLGESİNİN ANİZOTROPİ İLE DEĞİŞİMİ

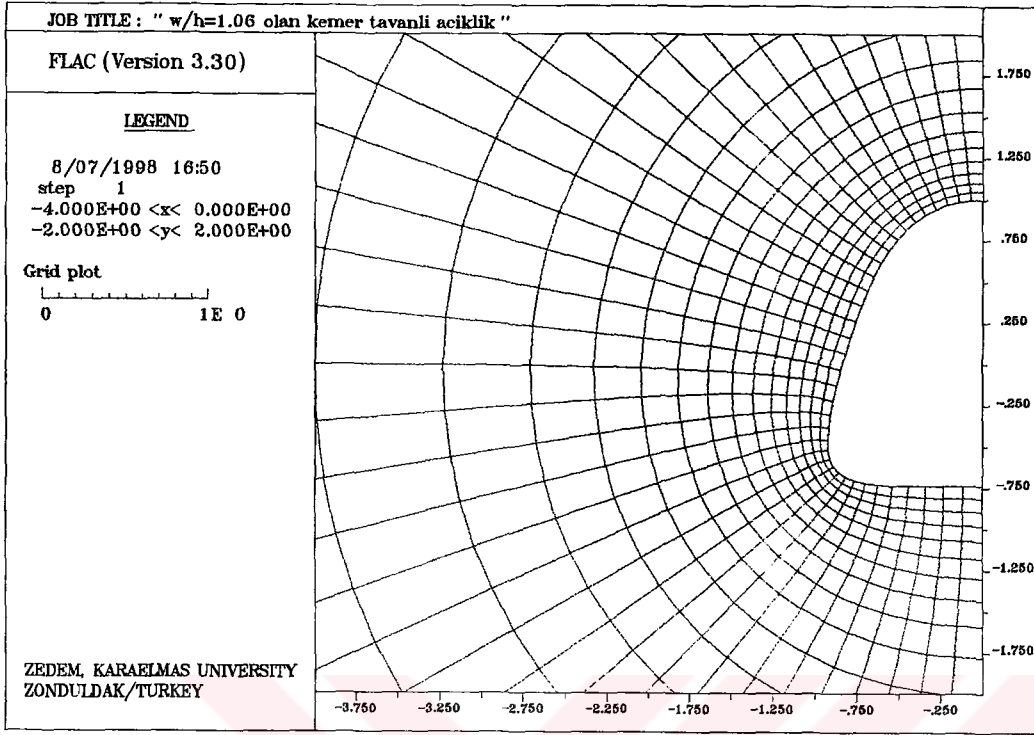
Çalışmanın bu bölümünde, birincil gerilmelerin büyüklüğü 50 MPa olan hidrostatik gerilme ortamında açılan, genişlik (W)/yükseklik (H) oranı 1.06 olan kemer tavanlı açıklık incelenmiştir. Çözümlemeler açıklık çevresindeki ikincil gerilmelerin ve yenilme bölgelerinin, anizotropiklik derecesi ve konum ile değişiminin belirlenmesi amacı ile yapılmıştır.

Modellerde kullanılan kaya kütesine ait özellikler, daha önceki bölümlerde sunulmuş olan Sulu damarına ait tavan taşından alınan örneklerden belirlenen malzeme özelliklerinden, EK AÇIKLAMALAR C’de açıklanan ve Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen dönüşüm yöntemi ile elde edilmiştir. Bu dönüşüm için kaya kütesinin jeolojik dayanım indeksi (GSI) 60 olarak alınmıştır.

Kaya malzemesi üzerinde yapılan deneylerde elde edilen en yüksek değerler, kaya kütesinin dayanım özellikleri belirlenirken, elde edilen en düşük değerler ise eklemlerin dayanım parametreleri belirlenirken kullanılmıştır.

Hesaplama sonucunda, kaya kütesinin kohezyonu 3.72 MPa, içsel sürtünme açısı ise 37.4° olarak elde edilmiştir. Kayma modülü 7.73 GPa, Bulk modülü 8.47 ve çekme dayanımı da 0.32 MPa olarak hesaplanmıştır (EK AÇIKLAMALAR C). Eklemlerin kohezyonu 2.44 MPa, içsel sürtünme açısı 26.5° ve çekme dayanımı da 0.30 MPa olarak belirlenmiştir.

Kemer tavanlı açıklık için yapılan çözümlemelerde kullanılan sonlu farklar ağı Şekil 7.9’da gösterilmiştir (Gerçek, 1997).

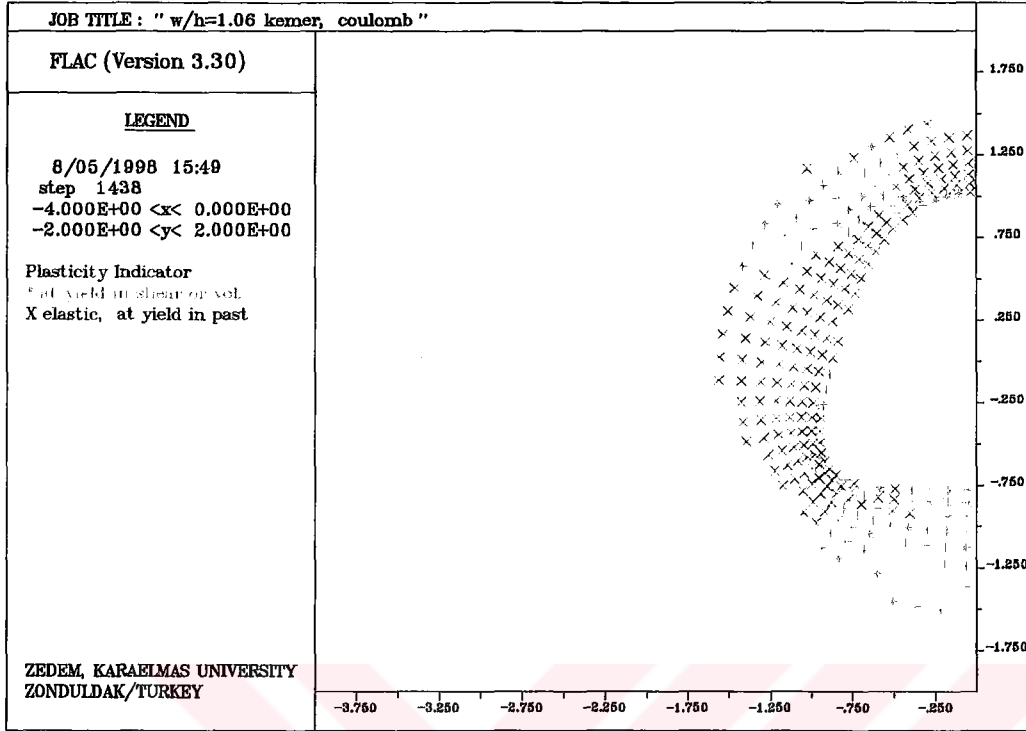


Şekil 7.9 Kemer tavanlı açıklık çözümlemelerinde kullanılan ağ.

7.2.1 Kemer Tavanlı Açıklık Çevresinde Oluşan Yenilme Bölgesi

Kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin belirlemek amacıyla, Coulomb modeli ile düzenli eklem modeli çözümlemelerde ayrı ayrı kullanılmıştır.

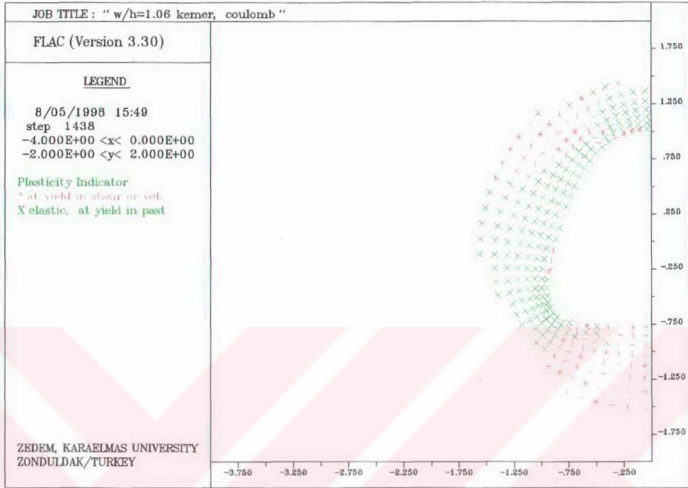
Yukarıda belirtilen veriler kullanılarak, Coulomb modeli ile elde edilen yenilme bölgesi Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Bu modele göre, kemer tavanlı açıklığın özellikle taban bölgesi ile tavana yakın yerlerde kayma yenilmesi meydana gelirken, yan duvarlarında ve tavanda elastik yenilmeler oluşmaktadır. Eğrilik yarıçapı küçük olan bölgelerdeki yenilme bölgesinin genişliği, açıklık yüksekliğinin $\frac{1}{4}$ 'ü, diğer bölgelerdeki hem elastik hemde plastik yenilme bölgelerinin genişliği ise $\frac{1}{2}$ 'si kadardır.



Şekil 7.10 Coulomb modeline göre, kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri.

Düzenli eklem modelinde, anizotropi düzleminin konumunun yenilme üzerindeki etkisini belirlemek amacı ile 0° , 30° , 45° , 60° ve 90° 'lik konum açılarında çözümleme yapılmıştır (Şekil 7.11-15).

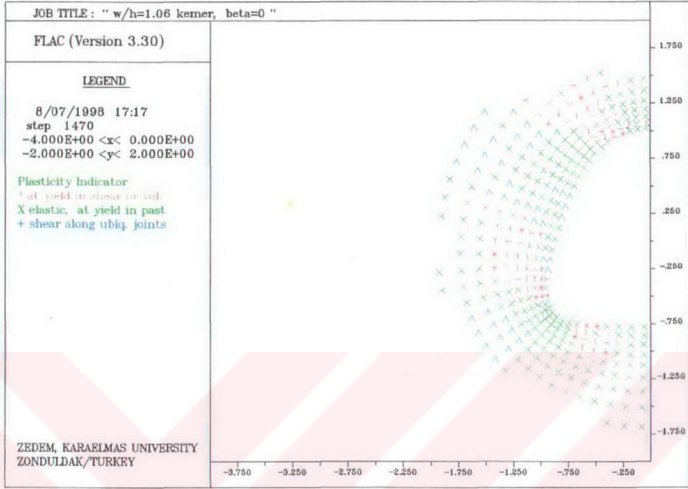
$\beta=0^\circ$ 'de; tavan ve taban bölgesinde elastik yenilme oluşurken, eğrilik yarıçapı küçük olan bölgelerin yanlarında kayma yenilmeleri görülmektedir. Yan duvarın ortalarında eklem üzerinde bir kayma hareketi oluşmaktadır. Eğrilik yarıçapı düşük olan köşe ve tavan bölgelerinde elastik yenilmeler görülmektedir. Yenilme bölgesinin genişliği özellikle yan duvarlarda, Coulomb modeli ile elde edilen genişliğin yaklaşık 1.5 katı kadardır.



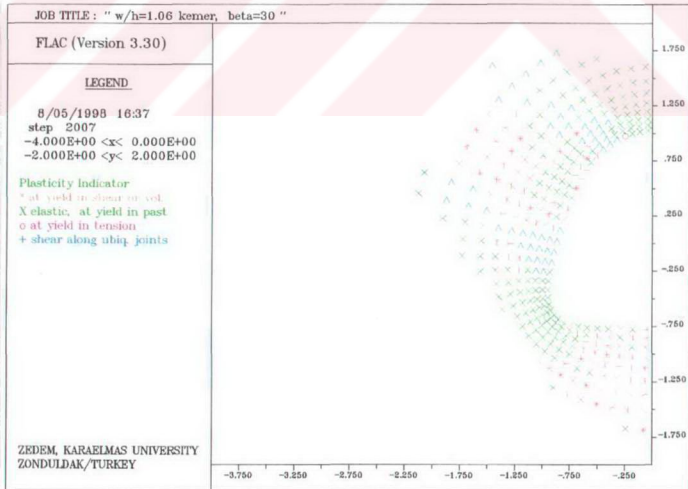
Şekil 7.10 Coulomb modeline göre, kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri.

Düzenli eklem modelinde, anizotropi düzleminin konumunun yenilme üzerindeki etkisini belirlemek amacı ile 0° , 30° , 45° , 60° ve 90° ’lik konum açılarında çözümleme yapılmıştır (Şekil 7.11-15).

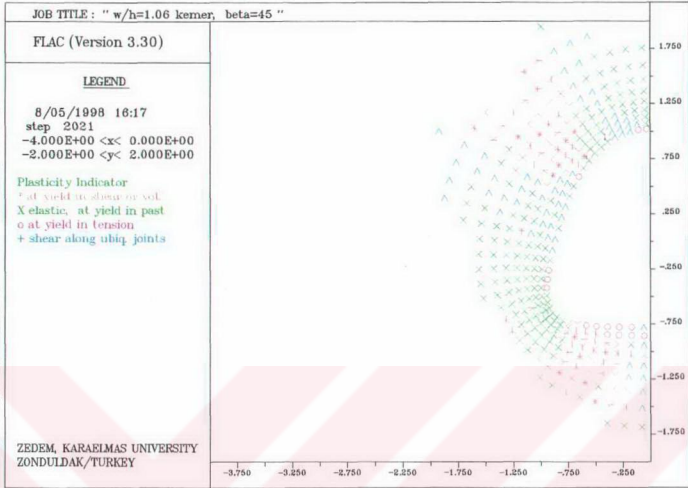
$\beta=0^\circ$ ’de; tavan ve taban bölgesinde elastik yenilme oluşurken, eğrilik yarıçapı küçük olan bölgelerin yanlarında kayma yenilmeleri görülmektedir. Yan duvarın ortalarında eklem üzerinde bir kayma hareketi oluşmaktadır. Eğrilik yarıçapı düşük olan köşe ve tavan bölgelerinde elastik yenilmeler görülmektedir. Yenilme bölgesinin genişliği özellikle yan duvarlarda, Coulomb modeli ile elde edilen genişliğin yaklaşık 1.5 katı kadardır.



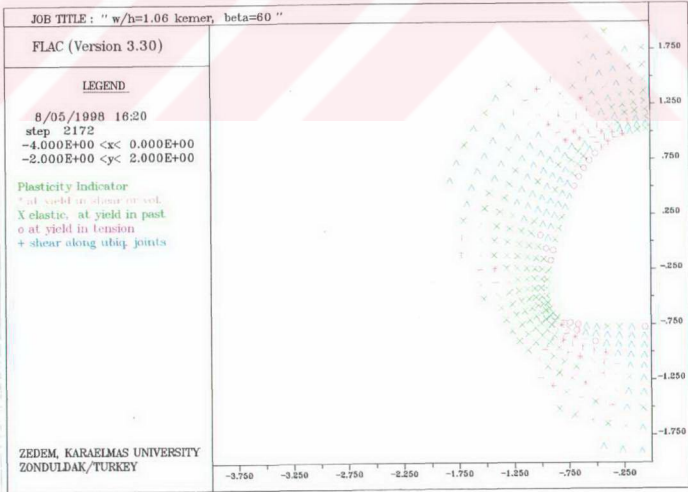
Şekil 7.11 Düzenli eklem modeline göre $\beta=0^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.



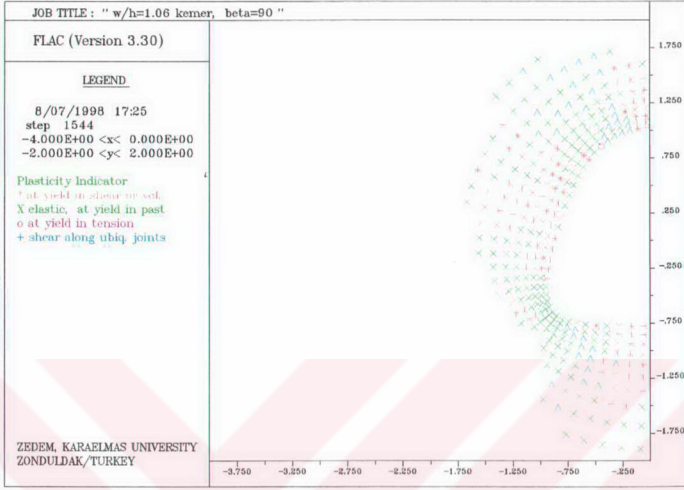
Şekil 7.12 Düzenli eklem modeline göre $\beta=30^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.



Şekil 7.13 Düzenli eklem modeline göre $\beta=45^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.



Şekil 7.14 Düzenli eklem modeline göre $\beta=60^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.



Şekil 7.15 Düzenli eklem modeline göre $\beta=90^\circ$ 'de kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi.

$\beta=30^\circ$ 'de elde edilen yenilme bölgesinin genişliği, yan duvarlarda, $\beta=0^\circ$ 'deki kadardır. Ancak bu konumda, eğrilik yarıçapı düşük olan köşe bölgesinde oluşan elastik yenilme bölgesinin genişliği azalmıştır. Tabanda kayma yenilmesi olurken, yan duvarlarda ise, orta bölgede kayma şeklinde yenilme, tavan ve tabana yakın yerlerde ise eklem üzerinde kayma hareketi şeklinde yenilme oluşmaktadır.

$\beta=45^\circ$ 'de, oluşan yenilme bölgesi $\beta=30^\circ$ 'dekine benzemektedir. Bu konumda kayma yenilmesi bölgesi tavana doğru yaklaşmaktadır. Tavanda elastik yenilme, tabanda ise, açıklık yüzeyinde çekme yenilmesi, iç bölgelerde ise kayma yenilmesi ve eklem üzerinde kayma hareketi şeklinde yenilme oluşmaktadır.

$\beta=60^\circ$ 'de, yenilme bölgesi tavan daha çok yaklaşmıştır. Tabanda, orta noktaya doğru eklem üzerinde kayma hareketi olurken köşe bölgesine yaklaştıkça çekme ve iç bölgelerde de kayma yenilmesi gözlenmektedir. Tabandaki yenilme bölgesinin genişliğinde artma vardır.

$\beta=90^\circ$ ’de, tavanda kayma yenilmesi oluşurken yan duvara doğru gelindikçe eklem üzerinde kayma hareketi şeklinde yenilme oluşmaktadır. Yan duvarın ortasında ve tabanda ise orta bölgede kayma yenilmesi görülmektedir. Bu durumda oluşan yenilme bölgesinin genişliği tabanda artarken eğrilik yarıçapı düşük olan yerlerde daha dardır.

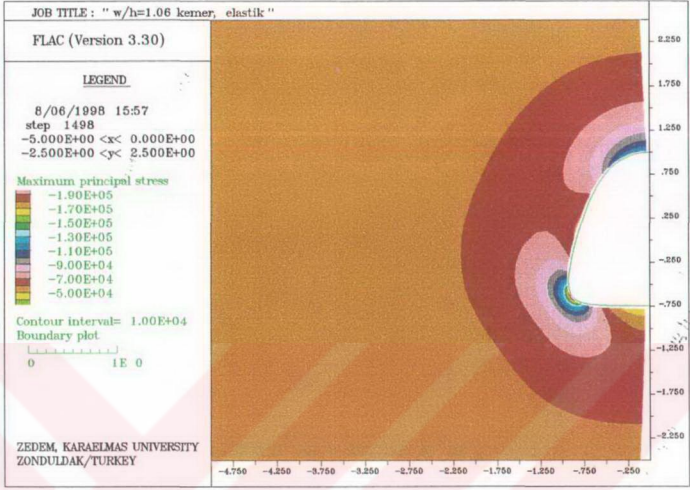
Bu çözümlere göre, uygulanan iki yöntemin sonuçları, hem yenilme bölgesinin genişliği hemde yerleri açısından farklılık göstermektedir. Ayrıca düzenli eklem modeli ile yapılan çözümler, anizotropi düzleminin konumunun değişimi ile, hem yenilme bölgesinin genişliğinde hem de yenilme bölgesinin yerinin değiştiği görülmektedir.

Düzenli eklem modelinde, $\beta=45^\circ$ ve $\beta=60^\circ$ olduğu durumlarda, çekme yenilmeleri ile birlikte yoğun olarak eklem üzerinde kayma hareketi görülmektedir. Bu nedenle, Düzlemsel izotropik ortamlarda yenilme için β ’nın 45° ve 60° olması durumları ilginç olmaktadır.

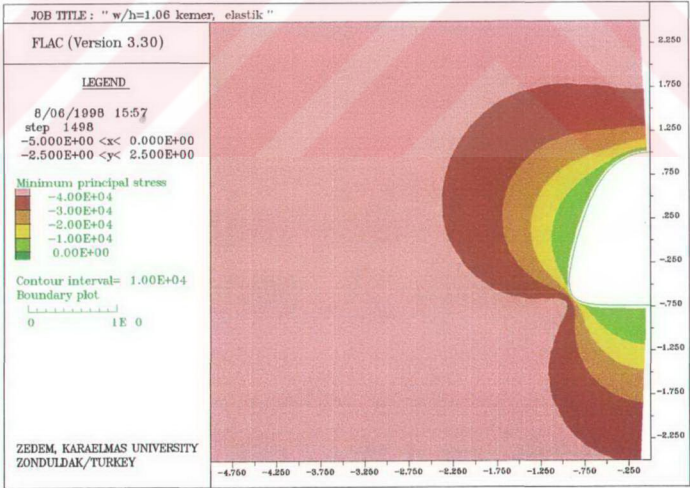
7.2.2 Kemer Tavanlı Açıklık Çevresinde Oluşan Gerilmeler

Bölüm 7.2.1’de belirtilen kaya kütlesi içinde açılan kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan ikincil gerilmeler, önce elastik izotropik sonra da düzlemsel izotropik model ile belirlenmiştir. Burada, ortamdaki birincil gerilmeler 50 MPa olarak alınmıştır.

Elastik çözümlerde elde edilen sonuçlara göre, özellikle eğrilik yarıçapı düşük olan bölgelerde ikincil gerilmeler oldukça yüksektir. Köşe bölgesinde, en büyük ikincil gerilme 190 MPa, en küçük ikincil gerilme ise 10-20 MPa arasındadır. Ancak köşe bölgesinde en küçük ikincil gerilmeler hızla artmakta ve birincil gerilmelere ulaşmaktadır. En büyük ikincil gerilmeler ise yaklaşık olarak açıklık yüksekliğinin 4/5’i kadar uzaklıkta birincil gerilmelere dönüşmektedir (Şekil 7.16.a ve b).



a. En büyük ikincil gerilmelerin dağılımı



b. En küçük ikincil gerilmelerin dağılımı

Şekil 7.16 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, elastik çözümleme ile elde edilen en büyük ve en küçük ikincil gerilmelerin dağılımı.

Düzlemsel izotropik modelde çözümlemesi yapılan değişik β ve E_1/E_2 oranları için sonuçlar değişim göstermektedir (EK AÇIKLAMALAR D).

Anizotropikliğin, gerilme dağılımları üzerindeki etkisi aşağıdaki gibi açıklanabilir.

E_1/E_2 oranı 1.25 olması durumunda, $\beta=0^\circ$ durumunda elde edilen çözümler elastik çözümlerin aynısıdır. $\beta=30^\circ$ ve 90° durumunda ise en küçük ikincil gerilmeler aynı olurken, en büyük ikincil gerilmelerde bir miktar azalma olmaktadır. Hem en büyük hem de en küçük ikincil gerilmeler, elastik çözümde elde edilene yakın bir mesafede birincil gerilmelere dönüşmektedirler. Bu mesafe açıklığın yüksekliğinin $2/3$ 'ü kadardır.

E_1/E_2 oranı 2.5 olması durumunda, $\beta=0^\circ$ durumunda en büyük ikincil gerilmenin değeri 190 MPa olurken, $\beta=30^\circ$ ve 90° durumunda 170 MPa'a düşmektedir. $\beta=30^\circ$ 'de tabandaki en büyük ikincil gerilmelerde bir miktar artma olmaktadır. Her üç durumda da açıklıktan aynı mesafe uzaklıkta en büyük ikincil gerilme birincil gerilmelere dönüşmektedir. En küçük ikincil gerilmeler, $\beta=30^\circ$ 'de tavanda bir miktar artarken, diğer bölgelerde aynı kalmaktadır.

E_1/E_2 oranı 3.5 olduğunda, en büyük ikincil gerilmeler eğrilik yarıçapı küçük olan bölgelerde, $\beta=30^\circ$ 'de en düşük değeri almaktadır. Bu konumda σ_1 160 MPa olurken, $\beta=30^\circ$ 'de 190 MPa, $\beta=90^\circ$ 'de ise 170 MPa olmaktadır. $\beta=30^\circ$ 'de tabanda oluşan en büyük ikincil gerilmelerde belirgin bir azalma vardır. Her üç konumda da, ikincil gerilmeler yaklaşık aynı mesafede birincil gerilmelere dönüşmektedir. En küçük ikincil gerilmeler, $\beta=90^\circ$ durumunda özellikle yan duvarda artış gösterirken $\beta=30^\circ$ 'de ise tavanda artmaktadır.

Konum açısının etkisi ise aşağıdaki gibi olmaktadır. $\beta=0^\circ$ 'de; anizotropinin artması ile en büyük ikincil gerilmelerin büyüklüğünde ve dağılımında önemli bir

değişim olmamaktadır. En küçük ikincil gerilmeler ise artan anizotropiklik ile bir miktar azalmakta ve açıklık yüzeyinden daha uzak mesafede birincil gerilmelere ulaşmaktadır.

$\beta=30^\circ$ 'de; en büyük ikincil gerilmelerin dağılımı değişmezken, büyüklüğü artan anizotropiklik ile azalmaktadır. En küçük ikincil gerilmeler bu konumda, artan anizotropiklik ile, tavanda ve tabanın ortasında artarken, yan duvarlarda azalmaktadır.

$\beta=90^\circ$ 'de; anizotropikliğin artması ile, en büyük ikincil gerilme dağılımı hemen hemen aynı kalırken, büyüklüğünde azalma olmaktadır. En küçük ikincil gerilme ise, artan anizotropiklik ile tabanda ve yan duvarlarda azalırken, köşe bölgesinde artmaktadır.

İki ayrı model kullanılarak yapılan çözümlemeler, düzlemsel izotropik ortamda düzenli eklem modelinin daha açık sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu model ile yapılan çözümlemelere göre: β 'nın 0° ve 90° olduğu durumlarda, anizotropinin şiddetinin artmasının, gerilme dağılımını fazla etkilememektedir. $\beta=30^\circ$ olması durumunda ise anizotropi şiddetinin artması, en büyük ikincil gerilmeyi bir miktar düşürmektedir.

Bu çözümlemeden elde edilen sonuçlara göre, gerilme dağılımı ve büyüklükleri üzerinde, β 'nın değişiminin daha önemli olduğunu söylemek mümkündür.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmaya konu olan Zonguldak Havzası kömür çevre kayaçlarından Acenta damarı tavan taşı, Acılık damarı taban taşı, Büyük damar tavan taşı, Çay damarı taban ve tavan taşı ile Domuzcu damarı taban II taşı örnekleri kumtaşı, Nasufoğlu tavan ve Sulu damarı tavan taşı silttaşı ve Domuzcu damarı taban I taşı örneği ise kiltası litolojisindedir.

Bu kayaçlar üzerinde yapılan yaklaşık 1500 değişik deneyden elde edilen sonuçlar ve konu ile ilgili bazı öneriler şu şekilde özetlenebilir:

Örneklerden hazırlanan ince kesitler üzerinde yapılan petrografik değerlendirmelere göre, kumtaşları litik ve yarı litik aranit olarak adlandırılabilirler. Bu kayaçların, oluşumları esnasında meydana gelen ileri derecedeki sıkışma sonrasında, kayaç yapıcı minerallerde ikincil mikro çatlaklar oluşmuş ve bu mineraller ilksel şekillerini kaybederek köşeli ve yarı köşeli bir şekil almışlardır. Tabakalanmaya dik ve paralel olarak hazırlanan ince kesitlerde farklılık gözlenmemiştir.

Kumtaşlarında yapılan tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarına göre; en yüksek dayanım değeri $\beta=0^\circ$ 'de, en düşük dayanım değeri ise $\beta=30^\circ$ 'de elde edilmiştir. Bu nedenle, anizotropi tanımlaması yapılırken σ_{c90} değeri değil, σ_{cmax} değerinin kullanılması daha gerçekçi sonuç verebilir.

Kiltası ve silttaşlarında, en yüksek dayanım değerinin $\beta=90^\circ$ 'de elde edildiği söylenebilir.

U tipi anizotropi gösteren kumtaşları, genel olarak düşük anizotropikliğe sahiptir. Omuz tipi anizotropi gösteren diğer kayaç birimleri ise orta derecede anizotropiktir.

Kayaçlar üzerinde yapılan dolaylı çekme dayanımı deney sonuçlarına göre; çekme dayanımının β' ile değişimi incelendiğinde, kumtaşlarında en yüksek çekme dayanımı değerinin $\beta'=0^\circ$ 'de, en düşük değer ise $\beta'=90^\circ$ 'de elde edildiği görülmüştür. Kumtaşlarında, diğer β' değerlerindeki çekme dayanımının değişimi düzensizdir. Kilitaşı ve siltaşılarında ise en yüksek değer $\beta'=0^\circ$ 'de elde edilirken en düşük değer genellikle, $\beta'=60^\circ$ 'de elde edilmiştir.

Kayaçların dolaylı çekme dayanımının hesaplanmasında kullanılan $\sigma_t = 2F/\pi DL$ eşitliği anizotropik kayaçlarda, yanıltıcı sonuçlar verdiği bilinmektedir. FLAC programı kullanılarak yapılan çözümlemelerde elde edilen bazı sonuçlar, eşitlikten hesaplanan değer ile düzeltilmiş değer arasında % 30'a yakın farklılıkların olabileceğini göstermiştir. Bu durum görünüşte izotropik olan fakat çalışma sonuçlarına göre orta derecede anizotropik bir kayaç olan kumtaşı örneğinde $\beta'=90^\circ$ 'de görülmüştür. Düşük anizotropik kayaçlarda farklılığın az olmasına rağmen, orta ve yüksek anizotropiye sahip olan kayaçlarda çekme dayanımının belirlenmesinde sonuçların düzeltilmesi gerekmektedir.

En yüksek 30 MPa yanal basınç seviyesine kadar değişik seviyelerde yapılan üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları, σ_1 'in β ile değişiminin $\sigma_c - \beta$ değişimine benzediğini göstermiştir. Ancak artan yanal basınç ile anizotropinin etkisinin azaldığı görülmüştür.

Yapılan çalışmada kullanılan yanal basınç aralığında üç eksenli deney sonuçlarına uygulanabilecek en iyi ölçüt, Coulomb ölçütü olarak görülmüştür. Çünkü, genel eğilim olarak düşük yanal basınç seviyelerinde, eksenel dayanım ile yanal basınç arasında doğrusal bir ilişki görülmektedir. Bu nedenle dayanım parametreleri olan

kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Coulomb ölçütüne göre hesaplanmıştır. Sonuçlar, kohezyonun $\beta=0^\circ$ 'de en yüksek değerini aldığını göstermektedir. Büyük damarı dışındaki kumtaşı örneklerinde kohezyon $\beta=0^\circ$ 'de 21 ile 24 MPa arasında değişirken, $\beta=90^\circ$ 'de 19 ile 22 MPa arasında olmaktadır. İki durum arasında % 10 - 15'lik bir fark oluşmaktadır. Kumtaşlarında $\beta=0^\circ$ ve 90° için ortalama değer olarak 20-21 MPa alınabilir. β 'nın diğer değerlerinde kohezyonun değişimi, σ_c - β değişimine benzemektedir.

Kiltaşı örneğinin kohezyonu $\beta=0^\circ$ ve 90° 'de sırasıyla 11 ve 10 MPa, $\beta=30^\circ$ 'de ise 5.6 MPa'dır. Bu kayaç, test edilen örnekler içinde en yüksek anizotropiye sahiptir. Bu durum β ile kohezyonun değişiminde de kendini göstermiştir.

Silttaşlarının kohezyonu $\beta=0^\circ$ ve 90° 'de aykırılık göstermiştir. Kohezyon $\beta=0^\circ$ 'de 16-18 MPa iken $\beta=90^\circ$ 'de 12-13.5 MPa değerlerini almıştır. β 'nın diğer değerlerinde sonuçlar $\beta=90^\circ$ 'dekine yakındır.

Değişik kayaç cinslerinde ölçülen içsel sürtünme açısı değerlerinin, genel olarak $\beta=30^\circ$ 'deki değer dışında, kumtaşlarında 52° ile 55° arasında (Büyük damar hariç), silttaşlarında 40° ile 50° arasında, kiltasında ise 35° civarında olduğu söylenebilir. $\beta=30^\circ$ 'de içsel sürtünme açısında, % 10 ile 20 arasında azalma görülmüştür.

Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre elde edilen malzeme sabitleri 'm' ve 's' ($s=1$) değerlerine göre Shorey ve Hoek tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak hesaplanan kohezyon değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Coulomb ölçütüne göre elde edilen kohezyon değerleri ise bu değerlerden bazı durumlarda % 30 kadar farklılık gösterebilmektedir.

Yine bu çalışmada çok yaygın olarak kullanılan Hoek-Brown ölçütündeki 'm' parametresinin belirlenmesinde, çekme dayanımı verilerinin kullanılması veya

kullanılmaması durumunda, σ_c/σ_t oranına bağlı olan bir değişim olduğu belirlenmiştir. σ_c/σ_t oranının 12'den büyük olduğu durumlarda, çekme dayanımı verilerinin “ m_i ” değerleri üzerinde etkisi olmamaktadır. Kumtaşlarında, çekme dayanımı verilerinin kullanılması durumunda ‘ m_i ’ değeri 15 ile 24 arasında değişirken, çekme dayanımı verilerinin kullanılmaması durumunda 13 ile 23 arasında değişmektedir. Aynı örnek için % 50’ye varan değişimler söz konusudur. Bu değişim σ_c/σ_t oranındaki değişime uygundur.

Hoek-Brown yenilme ölçütündeki “ m_i ” dayanım parametresinin β ile değişim gösterdiği ortaya konmuştur. Bu bulgu, söz konusu ölçütün anizotropik kaya melzemesine uygulanacak (değişik “ m_i ” parametrelerini içerecek) şekilde geliştirilebileceğini çağrıştırmaktadır.

Bieniawski yenilme ölçütündeki ‘A’ katsayısının değeri, ‘k’ katsayısı 0.75 olarak alındığında kumtaşlarında 4.04 olarak elde edilmiştir. Bu değer farklı kumtaşları için 3.7 ile 5.1 arasında değiştiği gözlenmiştir. ‘k’ katsayısı 0.75 olarak alındığında A katsayısı, β ile bir miktar değişim göstermektedir. Bu değişim σ_c ’nin düştüğü β değerinde artma, σ_c ’nin arttığı β değerinde ise azalma şeklinde genellenebilir. $\beta=0^\circ$ ve 90° ’de değerler yaklaşık aynıdır.

Nokta-yük dayanım anizotropisi açısından; kumtaşları genel olarak zayıf anizotropikliğe sahiptirler. Tek eksenli basınç dayanımına göre, diğerleri ile aynı değerlendirilen Acenta tavan taşı ve Domuzcu taban II taşı örnekleri, nokta-yük anizotropisi açısından farklı sınıfta yer almışlardır, sırasıyla orta anizotropik ve yarı izotropiktirler.

Basınç dayanımı anizotropisi ile nokta-yük dayanımı anizotropisi sınıflamaları genel olarak birbirleri ile uyumlu olmaktadır. Basınç dayanımına göre düşük anizotropik olan kayalar, nokta-yük anizotropisine göre zayıf anizotropik olarak tanımlanmaktadır. Aynı şekilde basınç dayanımına göre orta anizotropik olan kayalar, nokta-yük anizotropisine göre yüksek anizotropik olarak

tanımlanmaktadır. Bu sonuçlara göre, basınç dayanımı anizotropisini belirlemek için, nokta-yük dayanımı anizotropisi kullanılabilir.

Statik deformasyon deney sonuçlarına göre; tabakalanmaya paralel ölçülen Young modülü (E_1), her zaman en büyük değeri almıştır. β 'nın 0° 'den farklı olan diğer değerlerindeki Young modülleri birbirine oldukça yakın elde edilmiştir.

Poisson oranı değerleri ise, diğer β değerlerine göre $\beta=0^\circ$ 'de en düşük değeri almıştır. Ölçülen Poisson oranları arasında ν_3 , en yüksek değeri almaktadır. Bazı durumlarda bu değer 0.5'e ulaşmaktadır.

Deformasyon anizotropisine göre, kumtaşları genel olarak zayıf anizotropik olarak tanımlanabilirler. Kiltası örneği orta anizotropik ve siltası örnekleri de zayıf anizotropik olarak tanımlanabilirler.

Kumtaşlarında anizotropiyi tanımlamak için yapılan çalışmalarda, dayanım ve deformasyon anizotropisinde bir uyumluluk görülmektedir. Dayanım açısından düşük anizotropik olan kumtaşları, deformasyon açısından da zayıf anizotropik olarak tanımlanmaktadır.

Fakat kiltası ve siltası için aynı uyumluluk yoktur. Bu kayalarda dayanım açısından orta anizotropik olarak tanımlanan siltası, deformasyon açısından yine zayıf anizotropik olarak tanımlanmışlardır. Bunun nedeni, siltasında görülen tabakalanmanın, dayanım üzerindeki etkisinin deformasyonlara etkisinden daha fazla olmasıdır. Çünkü dayanım anizotropisi tanımlanırken, bu tabakalanmanın etkisinin en fazla hissedildiği konum açısı değerlendirilirken, deformasyon anizotropisi tanımlamasında tabakalanmaya dik ve paralel konumda yapılan ölçümler değerlendirilmektedir.

Değişik araştırmacıların önerdikleri görgül eşitlikler kullanılarak hesaplanan G_2 değerleri, deneylerden ölçülerek bulunan değerler ile karşılaştırıldıklarında, orta

derecede anizotropik olan Acenta tavan taşı ile Domuzcu taban taşı örnekleri dışındaki örneklerde birbirleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum görgül eşitliklerin, düşük anizotropik kayalarda yeterli, orta ve daha yüksek deformasyon anizotropisine sahip kayalarda ise yetersiz olabileceği sorusunu ortaya çıkartmıştır.

Karot örnekleri üzerinde yapılan sismik ölçümlerde; en yüksek hız değerinin $\beta=0^\circ$ 'de elde edildiği kumtaşlarında, P dalgalarının yayılma hızı 3200 m/s ile 5200 m/s çıkmıştır. Kumtaşlarında gözlenen deformasyon anizotropisi derecesine uygun olarak, β ile P dalga hızı değişmektedir. Orta derecede deformasyon anizotropisine sahip olan Acenta tavan taşında $\beta=45^\circ$ olduğunda ölçülen hız, 3871 m/s'dir. $\beta=0^\circ$ 'deki değer ile $\beta=45^\circ$ 'deki değer arasındaki değişim % 20'den fazladır.

2100 m/s ile 2800 m/s arasında ölçülen, S dalgası hızlarında β ile önemli bir değişim gözlenmemektedir. Bu durum P dalgalarının tabakalanmaya daha duyarlı olduğunu göstermektedir.

Statik ve dinamik elastik sabitler arasında, $E_{st} < E_{din}$ ve $v_{st} > v_{din}$ ilişkisi her zaman vardır.

Disk şeklinde bir örnek üzerinde yapılan FLAC analizleri, disk merkezinde oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin hem anizotropiklik derecesi hem de konum açısındaki değişime bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu durumda elastik çözümlemeye göre 3 olarak alınan σ_1/σ_3 oranı düşük anizotropi durumunda; $\beta=0^\circ$ 'de 2.95 olurken $\beta=30^\circ$ ve 45° 'de 2.73 $\beta=90^\circ$ 'de ise 3.77 olmaktadır. Anizotropikliğin artması ile bu oranlarda önemli boyutlarda değişim görülmektedir. Bu durumda, anizotropik kayalarda çekme dayanımının, dolaylı çekme dayanımı yöntemi ile belirlenmesinde büyük sakıncalar söz konusu olmaktadır.

Yine aynı örnek üzerinde, tabakalı yapı gösterdiği kabul edilerek yapılan model çözümlemelerine göre; $\beta=0^\circ$ olduğunda (β , anizotropi düzleminin yatay ile yaptığı açı), yenilme yükleme noktaları arasında normal bir yenilme olurken, $\beta=90^\circ$ durumunda, örneğin merkezinde eklemler oluşan çekme yenilmesi ile oluşmaktadır. $\beta=30^\circ$ ve 45° 'de örneğin orta kısmında, eklem üzerinde kayma şeklinde başlayan yenilme, yükleme noktaları arasındaki yenilmeye dönüşmektedir. $\beta=60^\circ$ 'de ise yenilme tamamen eklem üzerinde kayma şeklinde olmaktadır.

Kemer tavanlı açıklık çevresinde oluşan gerilmelerin anizotropiklik ve konum açısına göre değişimini belirlemek amacı ile yapılan çözümlemelerde, anizotropikliğin artması ile özellikle $\beta=30^\circ$ 'de (β , anizotropi düzleminin düşey ile yaptığı açı) σ_1 'in büyüklüğü azalmaktadır. Bu konumda σ_3 ise, artan anizotropiklik ile tavan ve tabanda artarken yan duvarlarda azalmaktadır. $\beta=0^\circ$ 'de anizotropikliğin artışının en büyük asal gerilme üzerinde önemli bir etkisi görülmezken, $\beta=90^\circ$ 'de bir miktar düşme olmaktadır.

İki ayrı modelle yapılan yenilme çözümlemesinde, Coulomb modeline göre tavan ve tabanda kayma yenilmeleri, yan duvarlarda ise elastik yenilmeler oluşmaktadır. Düzenli eklem modelinde ise, oluşan yenilme bölgesinin genişliği ve yeri konum açısı ile değişim göstermektedir.

Bu çalışma, sağlam kayaç örnekleri üzerinde, farklı bölgelerden ve farklı derinliklerden alınan örnekler üzerinde yapılmıştır. Araştırmada, derinlik farkından kaynaklanan değişimler dikkate alınmamıştır. Bundan sonra yapılacak bir çalışmada, özellikle derinliğin neden olduğu anizotropikliğin araştırılması ilginç olabilir. Ayrıca, kaya kütlelerinde eklemlerin neden olduğu anizotropikliğin araştırılması, hiç şüphe yokki, çalışma ortamının tanımlanmasında çok değerli sonuçlara ulaşılmasına neden olabilir. Yine bu çalışmada incelenmeye çalışılan kiltası ve silttaşları üzerinde daha çok örnekle yapılacak değerlendirmeler, bu tür kayalarındaki anizotropikliğin tanımlanmasında önemli olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdüsselamoğlu, M. Ş.** (1982) *Tortul Kayaç Petrografisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 221 s.
- Amadei, B.** (1996) Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock, , *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 33, No. 3, pp. 293-325.
- Attewell, P.T. and Sandford, M.R.** (1974) Intrinsic shear strength of a brittle-anisotropic Rock-I, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 11, pp. 423-430.
- Barla, G. and Innaurato, N.** (1973) Indirect tensile testing of anisotropic rocks, *Rock Mechanics*, Springer Verlag, V. 5, pp. 215-230.
- Bieniawski, Z. T.** (1974) Estimating the strength of rock materials, *J.S.Afr. Inst. Civil Eng.*, Vol. 74, pp. 312-320.
- Bieniawski, Z.T.** (1975) The point-load test in geotechnical practice, *Engineering Geology*, Vol. 9, pp. 1-11.
- Blatt, H.** (1982) *Sedimentary Petrology*, W.H. Freeman and Company, San Francisco, p. 567.
- Brady, B. H. G. and Brown E.T.** (1985) *Rock Mechanics For Underground Mining*, George Allen & Unwil Australia Pty Ltd., North Sydney, Australia, 527 p.
- Broch, E. and Franklin, J.A.** (1972) The point load strength test, , *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 9, pp. 669-697.
- Brook, N.** (1993) The measurement and estimation of basic rock strength, *Comprehensive Rock Engineering*, (edt. J.A. Hudson), Vol. 3, Chapter 2, pp. 41-66.
- Buzkan, İ.** (1998) Sedimenter kayaçlar, Z.K.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü Ders notu .
- Chen, C., Pan, E. and Amadei, B.** (1996) Evaluation of properties of anisotropic rocks using Brazilian tests, *Rock Mechanics*, Balkema, Rotterdam, pp.1651-1658.

- Cole, D.I.** (1976) Velocity/porosity relationships in limestones from the portland group of Southern England, *Geoexploration*, Vol. 14, pp. 37-50.
- Donath, F.A.** (1964) Strength variation and deformational behavior in anisotropic rock, *In State of Stress in the Earth's Crust*, (edt. W.R. Judd), pp. 280-297, Elsevier, Amsterdam.
- Eissa, E.A. and Kazi, A.** (1988) Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks, Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 25, pp. 479-482.
- Elliot, G.M.** (1993) Triaxial testing for rock strength, *Comprehensive Rock Engineering*, (ed. J.A. Hudson), Vol. 3, Chapter 4, pp. 87-104.
- ITASCA** (1995) FLAC Itasca Consulting Group, Version 3.3, Minnesota, USA,
- 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. 96, p. 708.
- Gerçek, H ve Müftüoğlu Y.V.** (1993) Failure characteristics of coal measure rocks, *Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering* (edt. Paşamehmetoğlu et al), Balkema, Rotterdam, pp. 329-334.
- Goodman, R. E.** (1989) *Introduction to Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, U.S., 562 p.
- Hobbs, D.W.** (1964) The tensile strength of rock, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, Vol. 1, pp. 385-396.
- Hoek, E.** (1968) Brittle failure of rock, *Rock Mechanics in Engineering Practice*, (edt. Stagg and Zienkiewicz), John Wiley and Sons, London, pp. 99-124
- Hoek, E. and Brown, E.T.** (1980) *Underground Excavation in Rock*, The Ins. Of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E. and Brown, E.T.** (1997) *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 34, No. 8, pp. 1165-1986.
- Hoek, E.** (1990) Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 27, No. 3, pp. 227-229.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F.** (1995) *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, A.A Balkema/Rotterdam/ Brookfield, 207 p.

- Hudson, J.A.** (1969) Tensile strength and the ring test, *Int. J. Rock Mech. Sci.*, Vol. 6, pp. 91-97
- Hudson, J.A.** (1993) Rock properties, testing methods and site characterization, *Comprehensive Rock Engineering*, (edt. J.A. Hudson), Vol. 3, Chapter 1, pp. 1-39.
- Hwong T.K. and Nihei K.T.** (1995) Developing seismic and strength tests to determine construction stone durability in infrastructure projects, *Rock Mechanics*, (edt. Daemen&Schultz), Balkema, Rotterdam, pp. 367-371.
- ISRM** (1981) Basic geotechnical description of rock masses, *ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests*, Vol 18, pp. 85-110.
- ISRM** (1977a) Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests*, Document no. 8
- ISRM** (1977b) Suggested methods for determining sound velocity, *ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests*, Document no. 8
- ISRM** (1983) Suggested methods for determining triaxial strength of rock materials in triaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 6, pp. 283-290.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W** (1979) *Fundamentals of Rock Mechanics*, Third Edition, Chapter 4, London, Chapman and Hall, 593 p.
- Johnston, J.E. and Christensen, N.I.** (1993) Compressional to shear velocity ratios in sedimentary rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 30, pp. 751-754.
- King, M.S.** (1983) Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian Shield, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, pp. 237-241.
- King, M.S., Andrea, M. and Khanshir, M.S.** (1994) Velocity anisotropy of carboniferous mudstones, Technical Note. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 31, pp. 261-263.
- Kolsky, H.** (1963) *Stress Waves in Solids*, Dover Publications, 213 p.
- Kwasniewski, M.A.** (1983) Anisotropy of elasticity of rocks and its effect on the magnitude and distribution of stress around underground openings. *8 th Plenary Scientific Session*, Int. Bureau of Strata Mechanics, Essen, pp. 5-37.

- Lade, P.V.** (1993) Rock strength criteria: The theories and the evidence, *Comprehensive Rock Engineering*, (edt. J.A. Hudson), Vol. 1, Chapter 11, pp. 255-284.
- Martin, R.J. and Haupt, R.W.** (1994) Static and dynamic elastic moduli in granite: The effect of strain amplitude, *Rock Mechanics*, pp. 473-480.
- McDowell, P.W.** (1993) Seismic investigation for rock engineering, *Comprehensive Rock Engineering*, (edt. J.A. Hudson), Vol. 3, Chapter 25, pp. 619-633.
- Mukerji, T. and Mavko G.** (1994) Pore fluid effects on seismic velocity in anisotropic rocks, *Geophysics*, Vol. 59, No. 2, pp. 233-244.
- Müftüoğlu, Y.V.** (1983) A study of factors affecting diggability in British surface coal mines, Ph.D. Thesis. The Univ. of Nottingham, 322 p.
- Nasseri, M.H., Rao, K.S. and Ramamurthy, T.** (1996) Prediction of anisotropic responses of strength and deformation of schists, *Eurock'96*, (edt. Barla), Balkema, Rotterdam, pp. 25-32.
- Orr, D.M.F.** (1981) Single plane of weakness theory applied in tensile stress field, Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 18, pp. 529-530.
- Pells, P.J.N.** (1993) Uniaxial strength Testing, *Comprehensive Rock Engineering*, (ed. J.A. Hudson), Vol. 3, pp. 67-85.
- Powers, M.C.** (1953) A new roundness scale for sedimentary particles, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 23, No. 2 pp. 117-119.
- Ramamurthy, T.** (1993) Strength and modulus responses of anisotropic rocks, *Comprehensive Rock Engineering*, (edt. J.A. Hudson), Vol. 1, Chapter 24, pp. 313-329.
- Ramamurthy, T., Rao, V. G. and Singh, J.** (1993) Engineering behaviour of phyllites, *Engineering Geology*, Vol. 33, pp. 209-225.
- Ramamurthy, T and Arora, V.K.** (1994) Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 31, pp. 9-22.
- Remi, J.M., Bellanger, M. and Homand-Etienne, F.** (1994) Laboratory velocities and attenuation of P-waves in limestones during freeze-thaw cycles, *Geophysics*, Vol. 59, No. 2, pp. 245-251.

- Siggins, A.F.** (1993) Dynamic elastic tests for rock engineering, *Comprehensive Rock Engineering*, (edt. J.A. Hudson), Vol. 3, Chapter 24, pp. 601-618.
- Sheorey, P.R.** (1997) *Emprical Rock Failure Criteria*, A.A. Balkema, Rotterdam, 176 p.
- Tsidzi, K.E.N.** (1990) The influence of foliation on point load strength anisotropy of foliated rocks, *Engineering Geology*, Vol. 29, pp. 49-58.
- Tutuncu, A.N., Podio, A.L. and Sharma, M.M.** (1994) An experimental investigation of factor influencing compressional -and shear- wave velocities and attenuations in tight gas sandstones, *Geophysics*, Vol. 59, No. 1, pp. 77-86.
- West, T. R.** (1995) *Geology Applied to Engineering*, Simon/Schuster Company, New Jersey.
- Wittke, W.** (1990) *Rock Mechanics: Theory and Applications with Case Histories*, Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg, Germany, p. 1076.
- Wu, B., King, M.S. and Hudson, J.A.** (1991) Stress-induced ultrasonic wave velocity anisotropy in a sandstone, Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 1, pp. 101-107.
- Yale, D.P. and Jamieson W.H. Jr.** (1994) Static and dynamic mechanical properties of carbonates, *Rock Mechanics*, pp. 463-471.

BİBLİYOGRAFYA

- Barden, L.** (1963) Stress and displacements in a cross-anisotropic soil, *Geotechnique*, Vol. 13, pp. 198-210.
- Batugin, S. A. and Nirenburg R.K.** (1972) Priblizhennaya zavisimost mezhdu uprugimi konstantami gornyx porod i parametry anizotropii, *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, 8, pp. 7-11.
- Borecki, M., Kwasniewski, M., Oleksy, S., Pacha, J., Guzik, J., Berszakiewicz, Z. and Tegzsajchan, C.** (1979) Anizotropia sprężystości piaskowca i czterech ilowców z warstw rudzkich, *Siodlowych i Porebskich z Kopalni Moszczenica*, Prace Instytutu Projektowania, Budowy Kopalni i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej, 3.4, 115.
- Bray, J.** (1977) yayınlanmamış notlar.
- Guidicini, G., Nieble, C.M. and Cordines A.T.** (1973) Analysis of point load test as a method for preliminary geotechnical classification of rocks, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, Vol. 7, pp. 37-52.
- Hoek, E.** (1977) Rock mechanics laboratory testing in the context of a consulting engineering organisation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 14, pp. 93-101.
- Hondros, G.** (1959) *Aust. J. Appl. Sci.* Vol. 10, (3), pp. 243-268.
- Ingram, R. L.** (1954) *Geol. Soc. Amer. Bul.*
- Kiehl, J.R.** (1980) Bestimmung elastischer Kennwerte von anisotropem geschiefertem Gebirge aus den Ergebnissen von Bohrlochaufweitungsversuchen. In. *Proc. 4th Nat. Rock Mech. Symp.*, Aachen.
- Krumbein, W.C. and Sloss, L.L.** (1963) Stratigraphy and sedimentation, Chap. 5, p. 150.
- Lehknitski, S.G.** (1962) Teoreticheskoye issledovaniye naprazheniy v uprugom anizotropnom massive vblizi podzemnoy vyrabotki ellipticheskogo secheniya, *Trudy VNIMI* 45, 155-179.

- Murrell, S.A.F.** (1965) The effect of triaxial stress systems on the strength of rock at atmospheric temperatures, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, Vol. 10, pp. 231-281.
- Müller, O.** (1930) Untersuchungen an karbongesteinen zur klarung von gebirgsdruckragen, *Glückauf*, 66, pp. 1601-1612 ; 1646-1652.
- Nur, A.** (1971) Effect of stress on velocity anisotropy in rocks, *J. Geophys. Res.*, V. 76, pp. 2022-2034.
- Price, N.J.** (1958) A study of rock properties in conditions of triaxial stress, *In Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials* (Edt. W.H. Walton), pp. 106-122, Butterworths, London.



EKLER AÇIKLAMALAR DİZİNİ

EK AÇIKLAMALAR A	ÖRNEKLERİN ALINDIĞI YERLER
EK AÇIKLAMALAR B	DİSK ŞEKLİLİ ÖRNEKTE OLUŞAN ASAL GERİLMELERİN DAĞILIMI
EK AÇIKLAMALAR C	KAYA KÜTLESİNİN DAYANIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN HOEK VE BROWN TARAFINDAN ÖNERİLEN DÖNÜŞÜM EŞİTLİKLERİ
EK AÇIKLAMALAR D	KEMER TAVANLI AÇIKLIK ÇEVRESİNDE OLUŞAN İKİNCİL GERİLME DAĞILIMLARI

EK AÇIKLAMALAR A
ÖRNEKLERİN ALINDIĞI YERLER

Çalışmada incelenen kayaçların alındığı yerler aşağıdaki gibidir.

ACENTA DAMARI Tv. : Kozlu Müessesesi İncirharmanı İşletmesi
-425 Katı, Lağımdan.

ACILIK DAMARI Tb. : Karadon Müessesesi Kilimli İşletmesi
-360 Katı, Lağımdan

BÜYÜK DAMARI Tv. : Kozlu Müessesesi İncirharmanı İşletmesi
-425 Katı, Lağımdan.

ÇAY DAMARI Tv. : Karadon Müessesesi Kilimli İşletmesi
-360 Katı, Lağımdan

ÇAY DAMARI Tb. : Karadon Müessesesi Kilimli İşletmesi
-360 Katı, Lağımdan

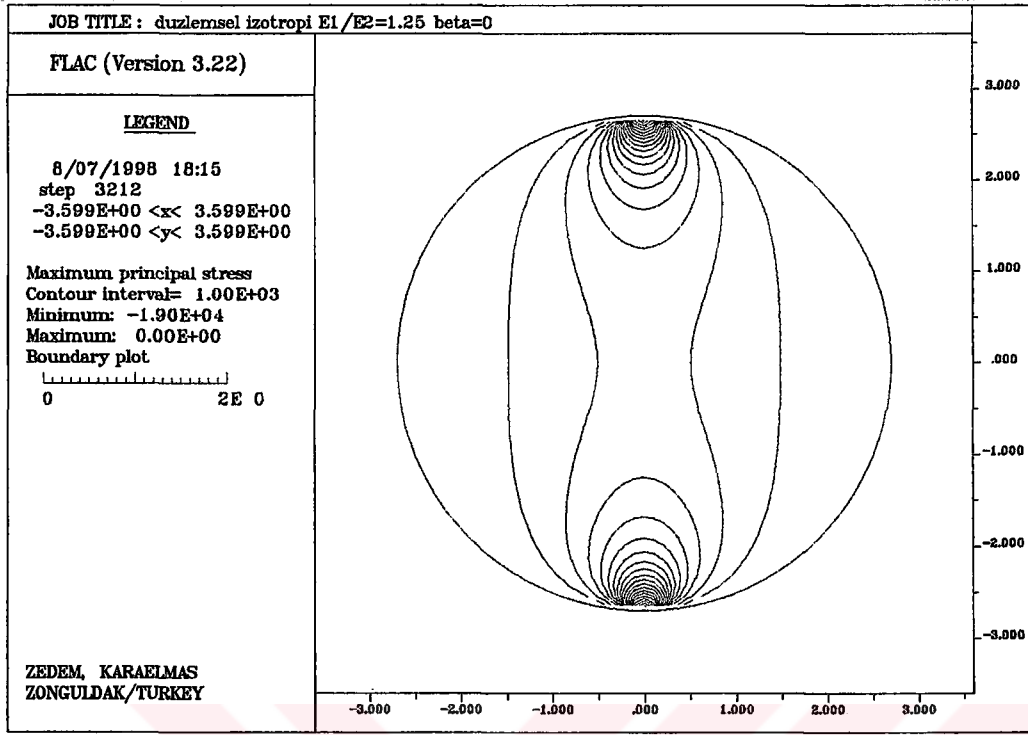
DOMUZCU Tb. (Kumtaşı) : Karadon Müessesesi Kilimli İşletmesi
+ 83 Katı, Rekuptan

DOMUZCU Tb. (Kiltaşı) : Karadon Müessesesi Kilimli İşletmesi
± 0 Katı, Taban yolundan, yalancı tavan taşı

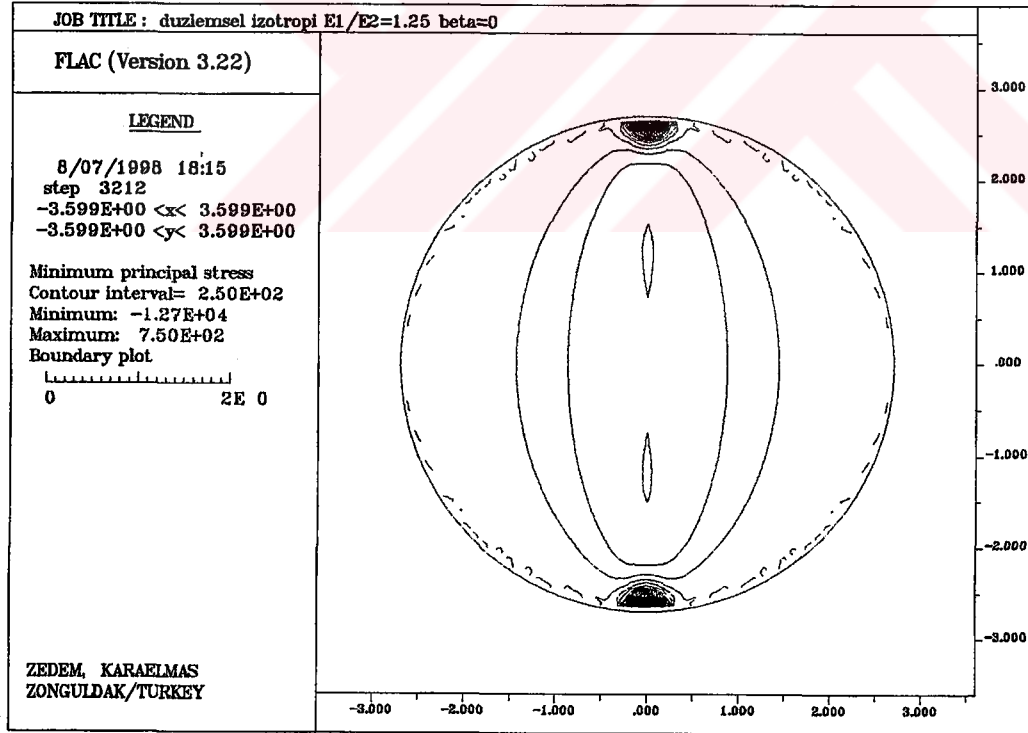
SULU DAMARI Tv. : Üzülmaz Müessesesi Asma İşletmesi
+ 140 Katı, Taban yolundan, Yalancı tavan taşı

NASUFOĞLU DAMARI Tv.: Üzülmaz Müessesesi Asma İşletmesi
+ 140 Katı, Taban yolundan, Yalancı tavan taşı

EK AÇIKLAMALAR B
DİSK ŞEKLİ ÖRNEKTE OLUŞAN ASAL GERİLMELERİN DAĞILIMI

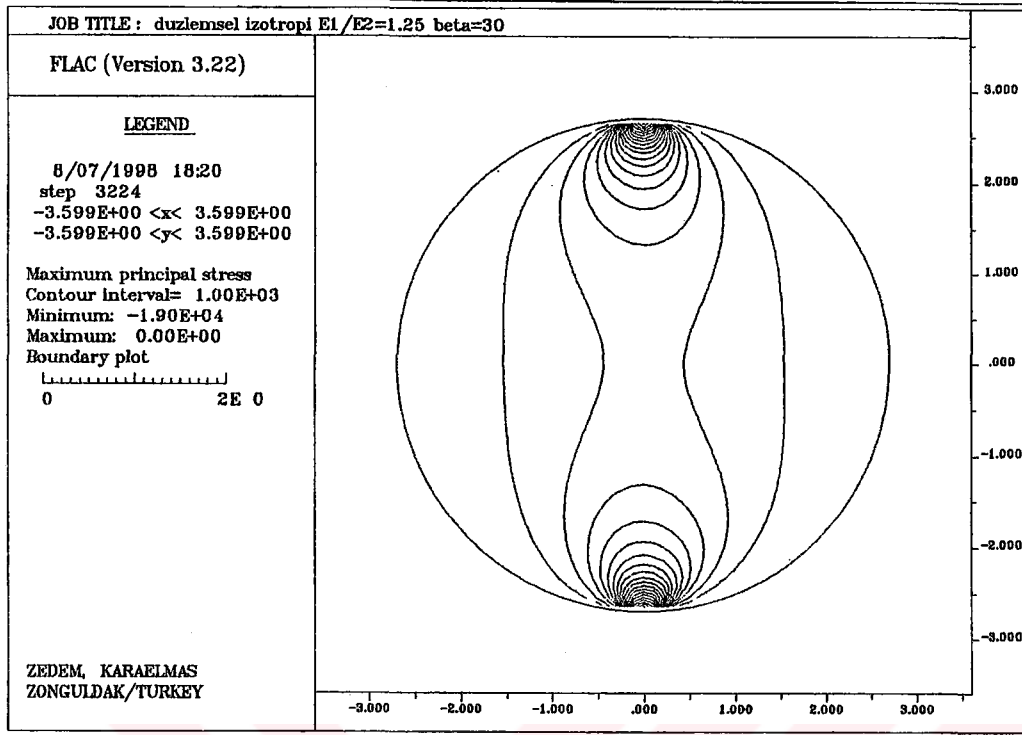


a. En büyük asal gerilme dağılımı

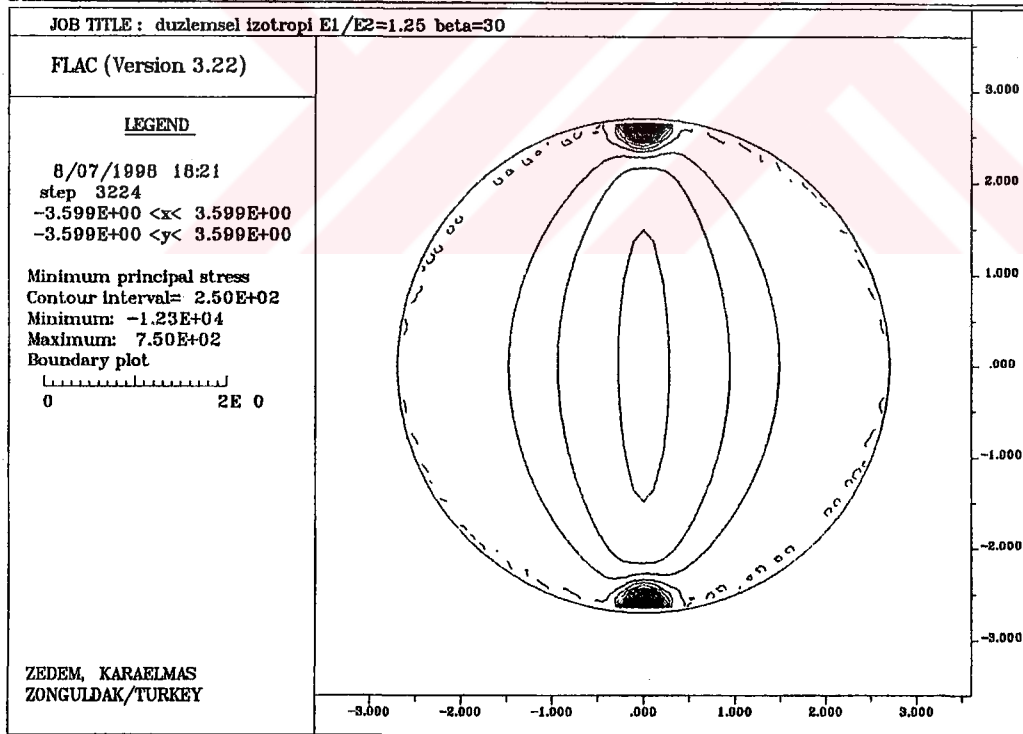


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.1 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=1.25$ ve $\beta=0^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

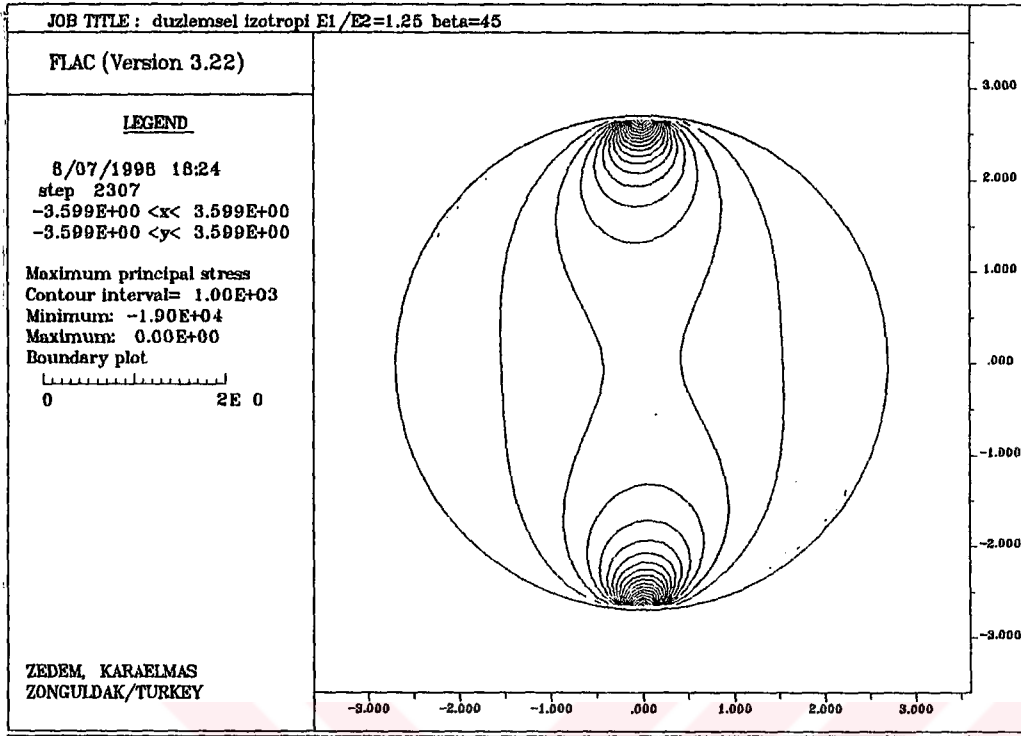


a. En büyük asal gerilme dağılımı

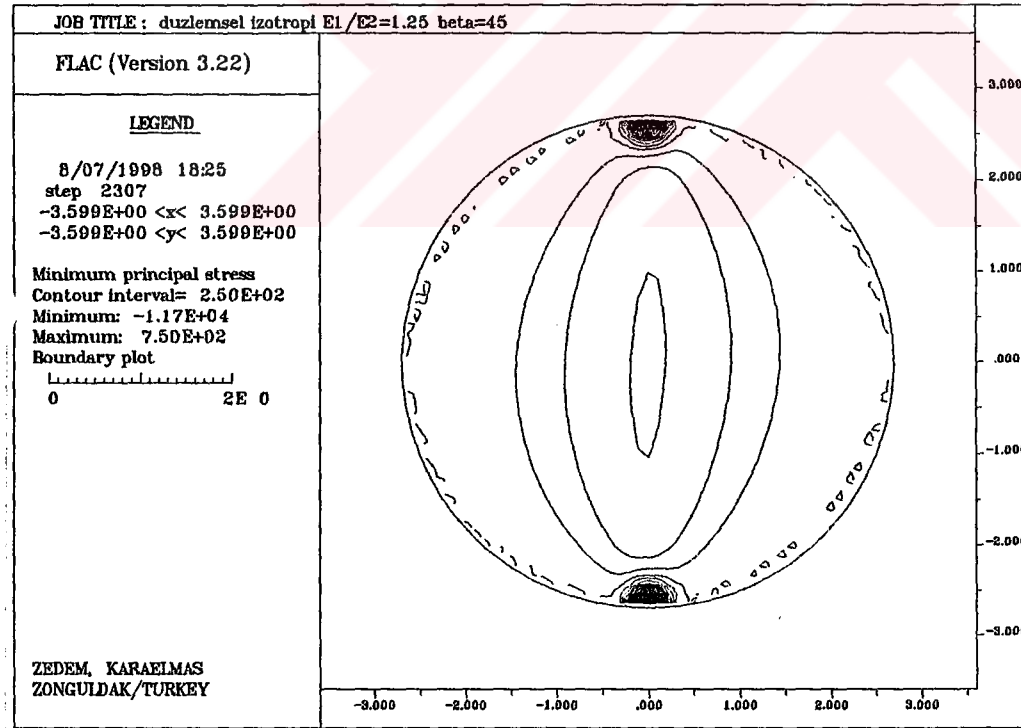


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.2 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=1.25$ ve $\beta=30^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

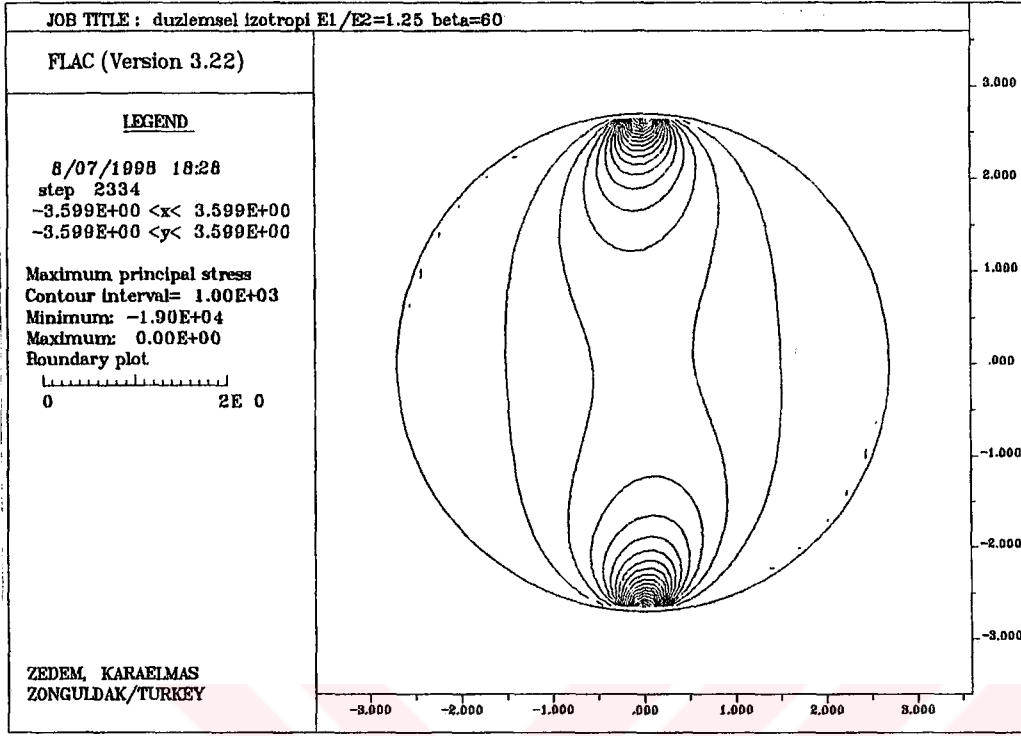


a. En büyük asal gerilme dağılımı

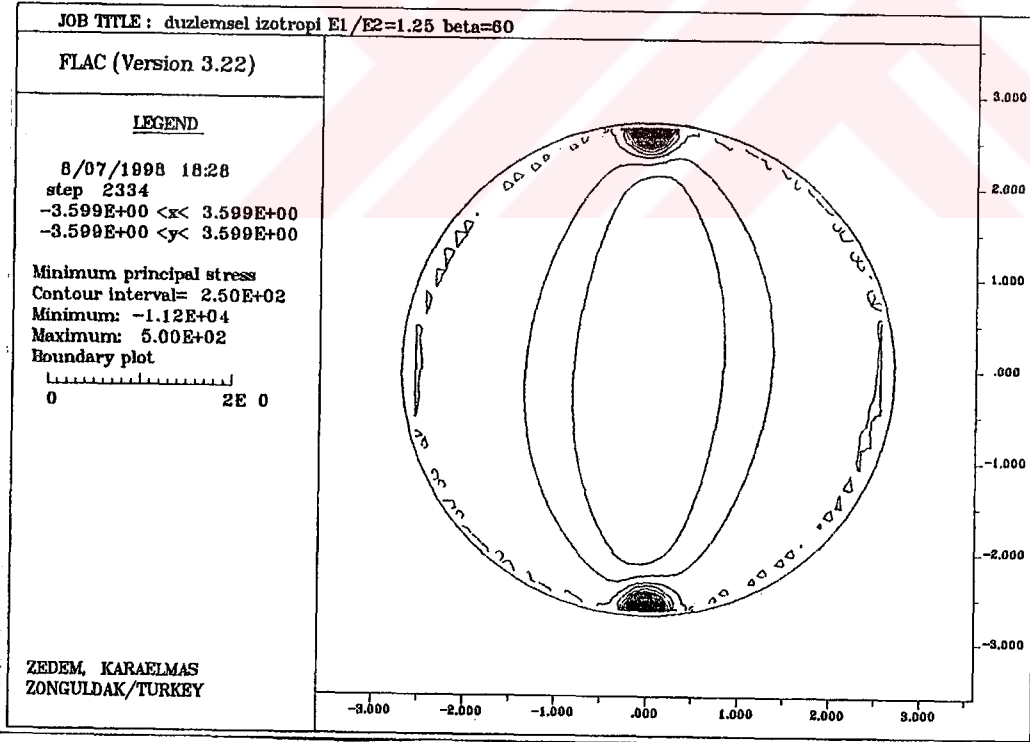


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.3 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=1.25$ ve $\beta=45^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

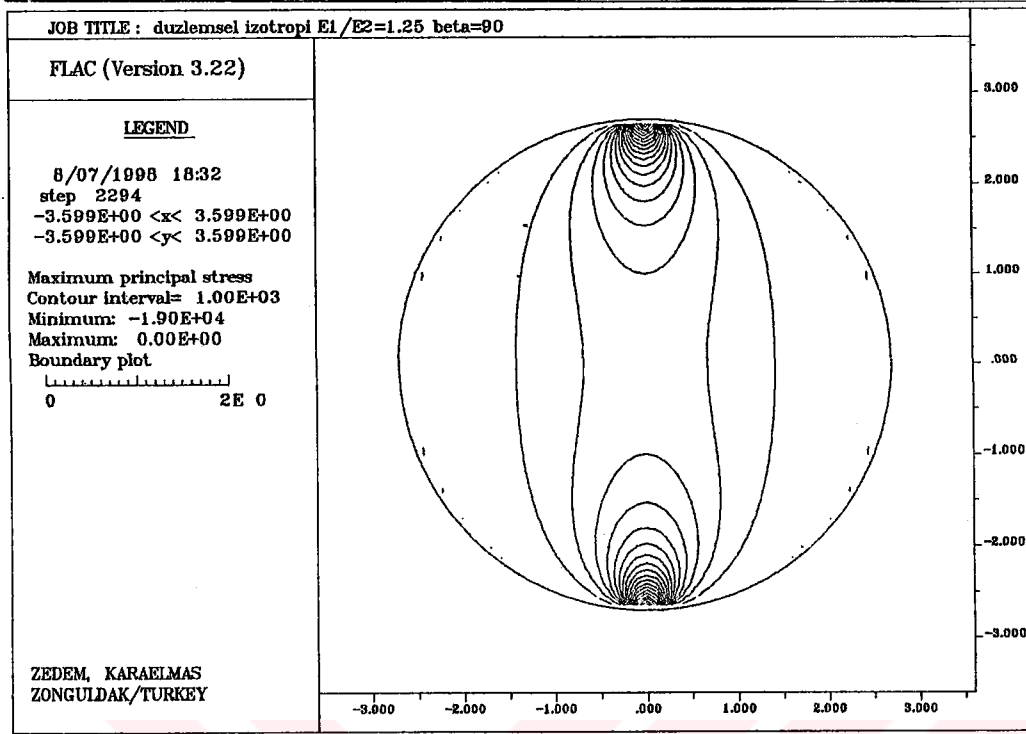


a. En büyük asal gerilme dağılımı

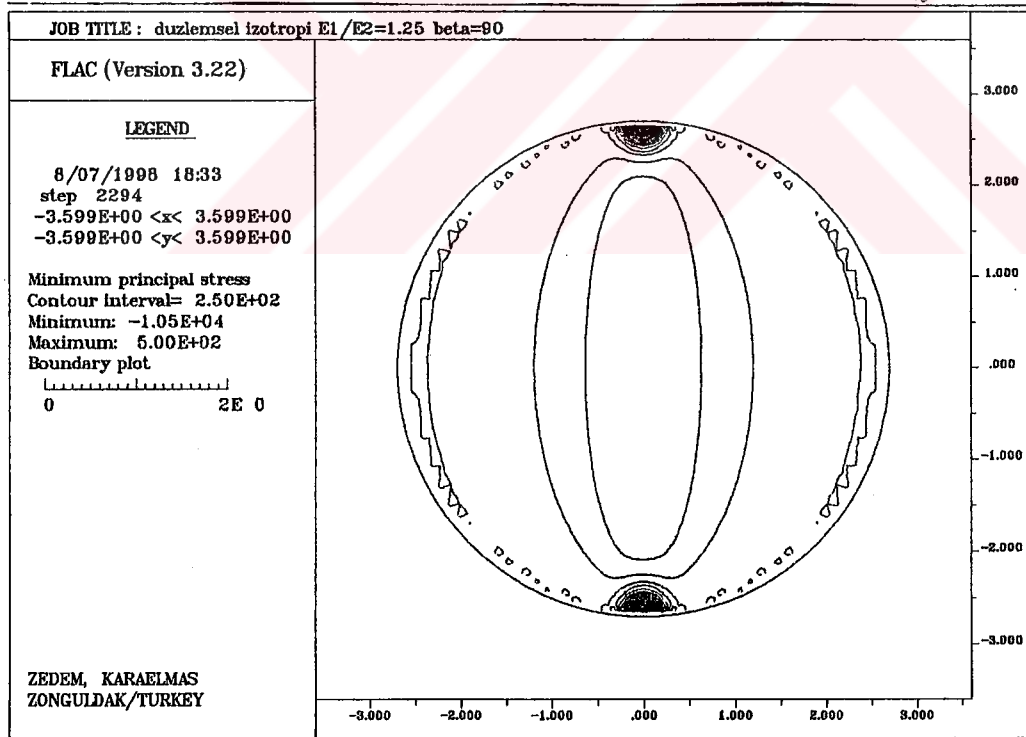


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.4 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=1.25$ ve $\beta=60^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

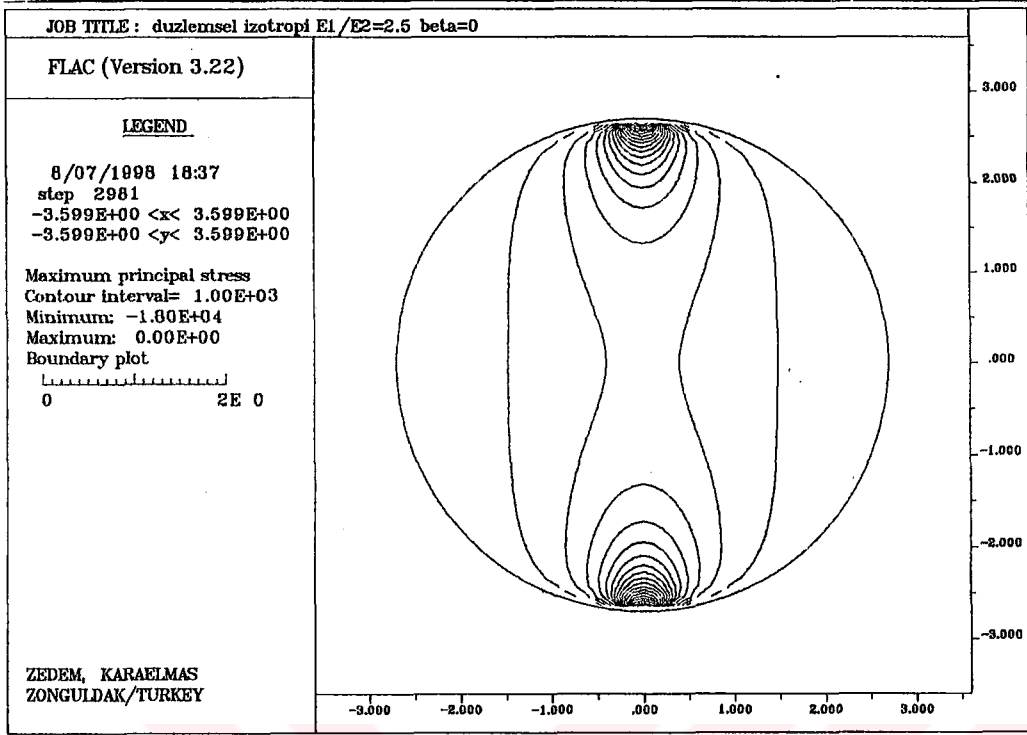


a. En büyük asal gerilme dağılımı

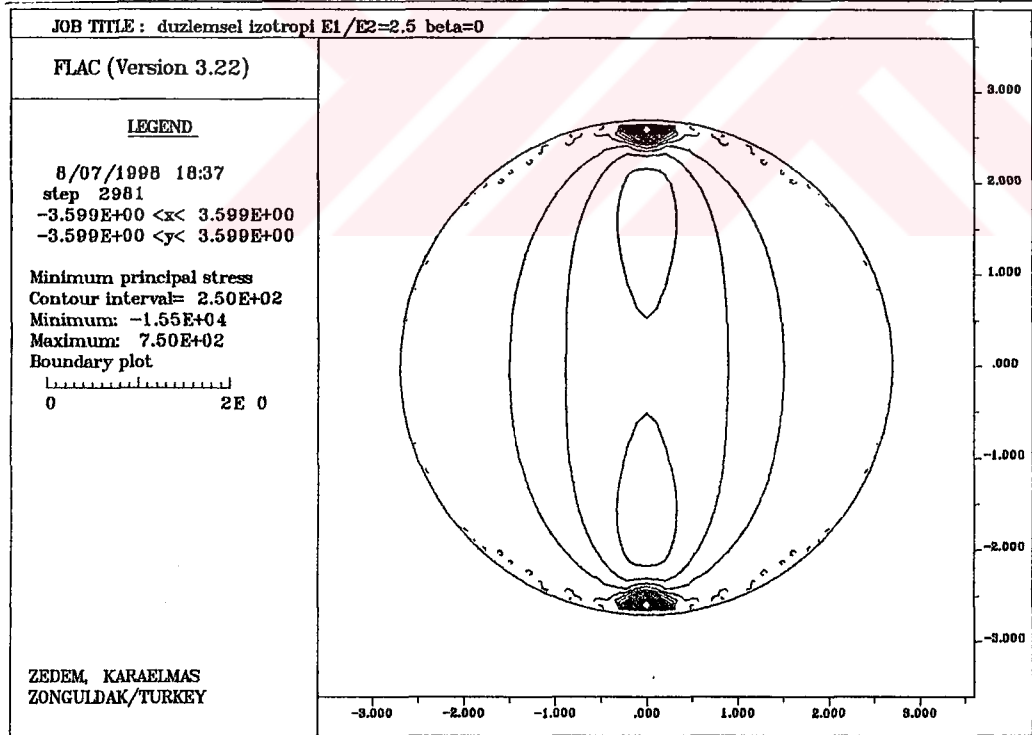


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.5 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=1.25$ ve $\beta=90^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

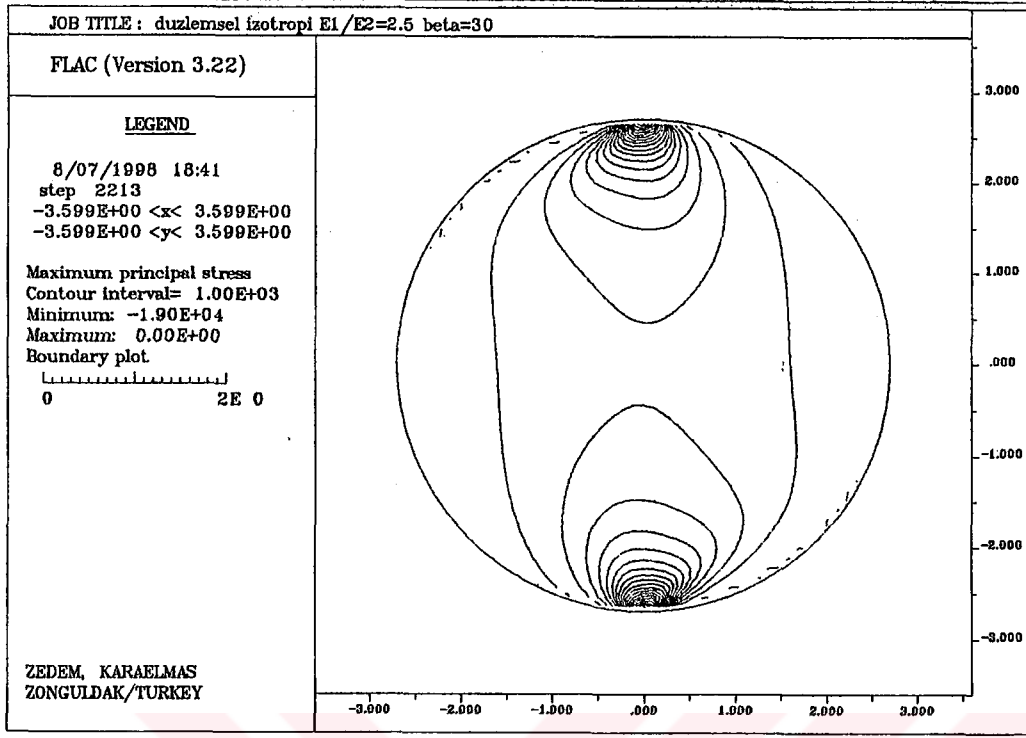


a. En büyük asal gerilme dağılımı

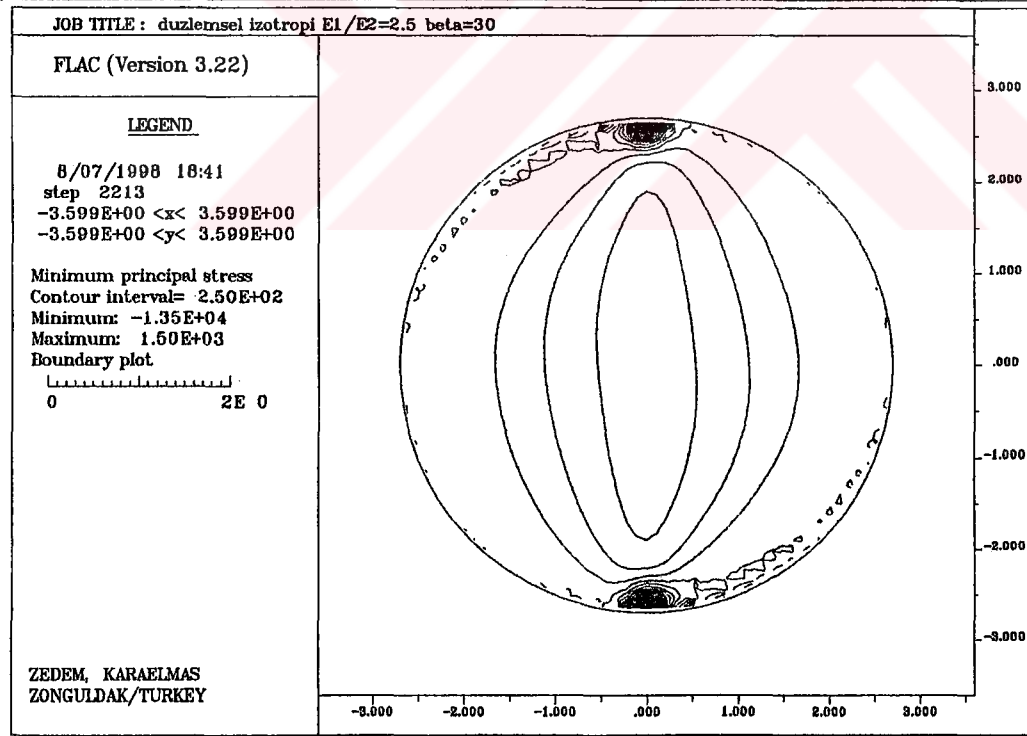


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.6 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=2.5$ ve $\beta=0^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

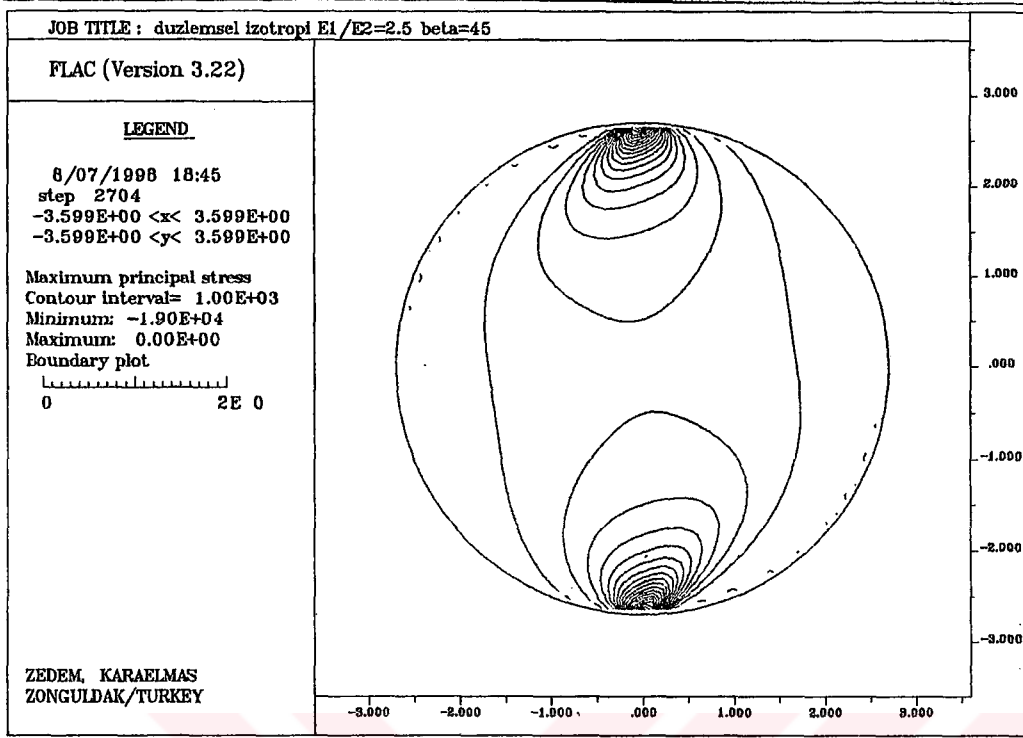


a. En büyük asal gerilme dağılımı

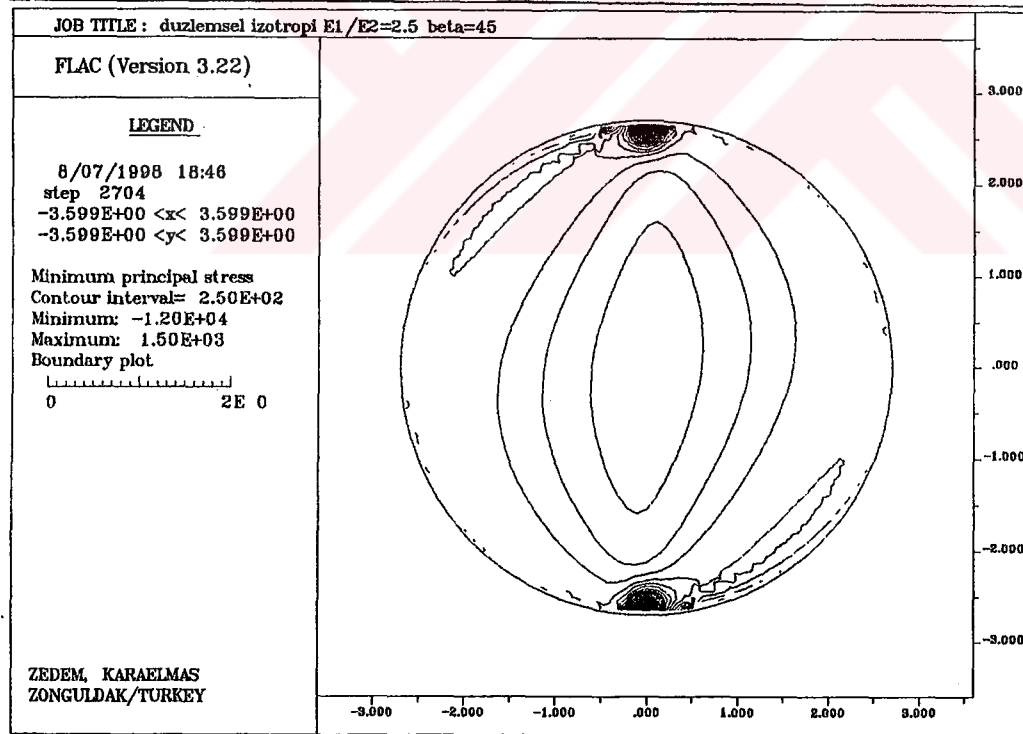


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.7 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=2.5$ ve $\beta=30^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

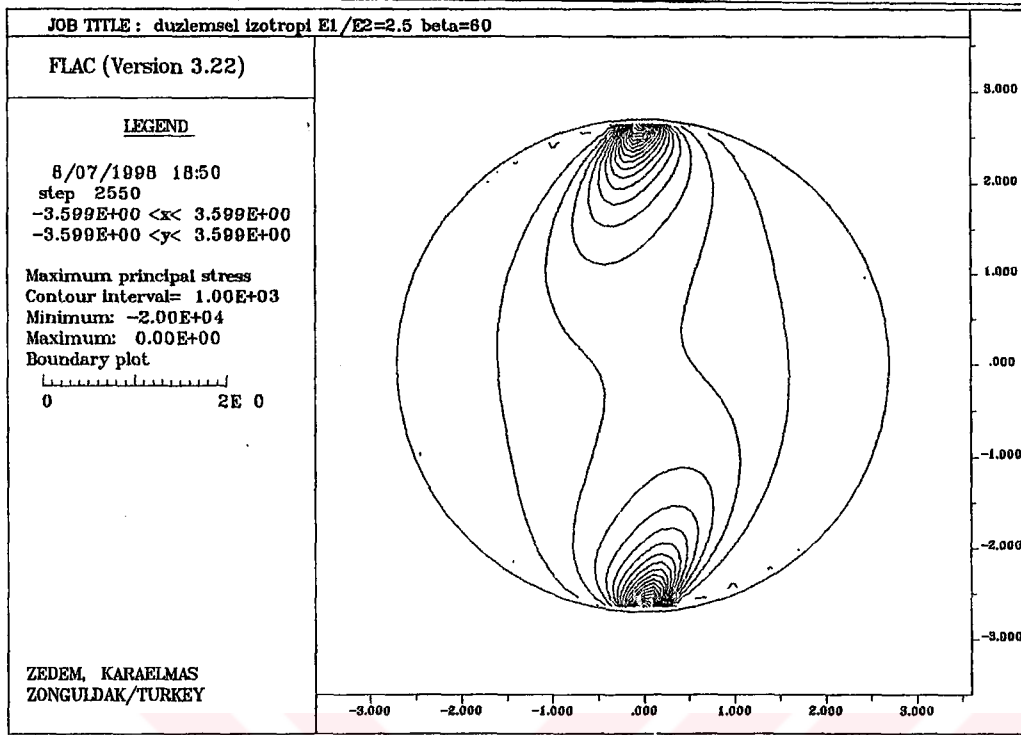


a. En büyük asal gerilme dağılımı

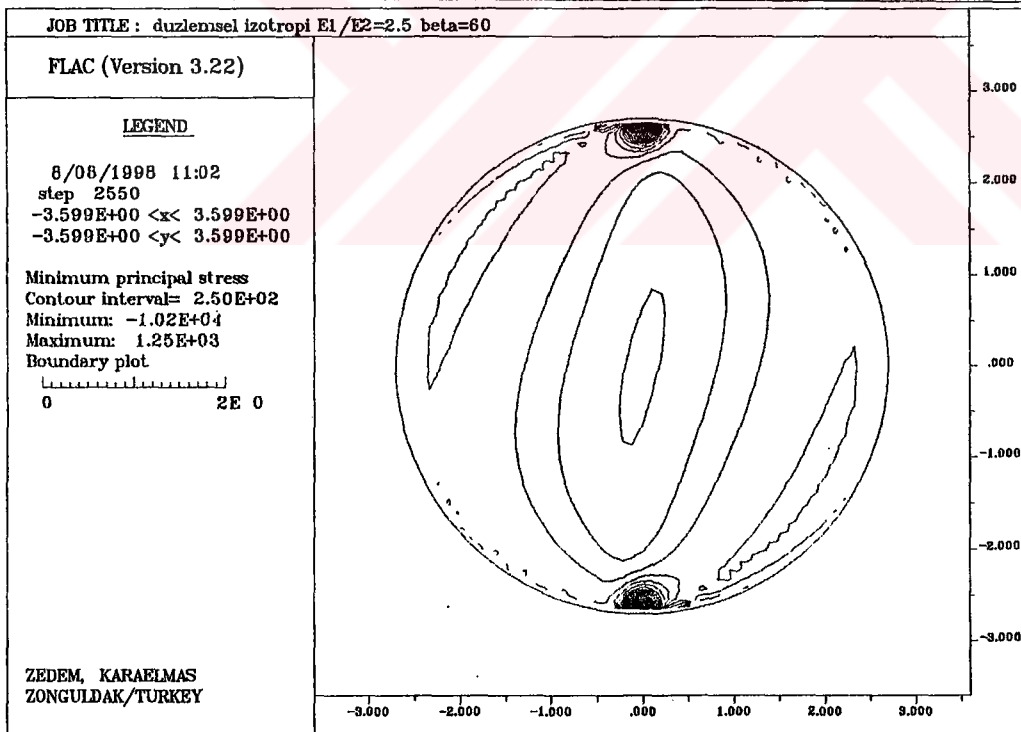


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.8 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=2.5$ ve $\beta=45^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

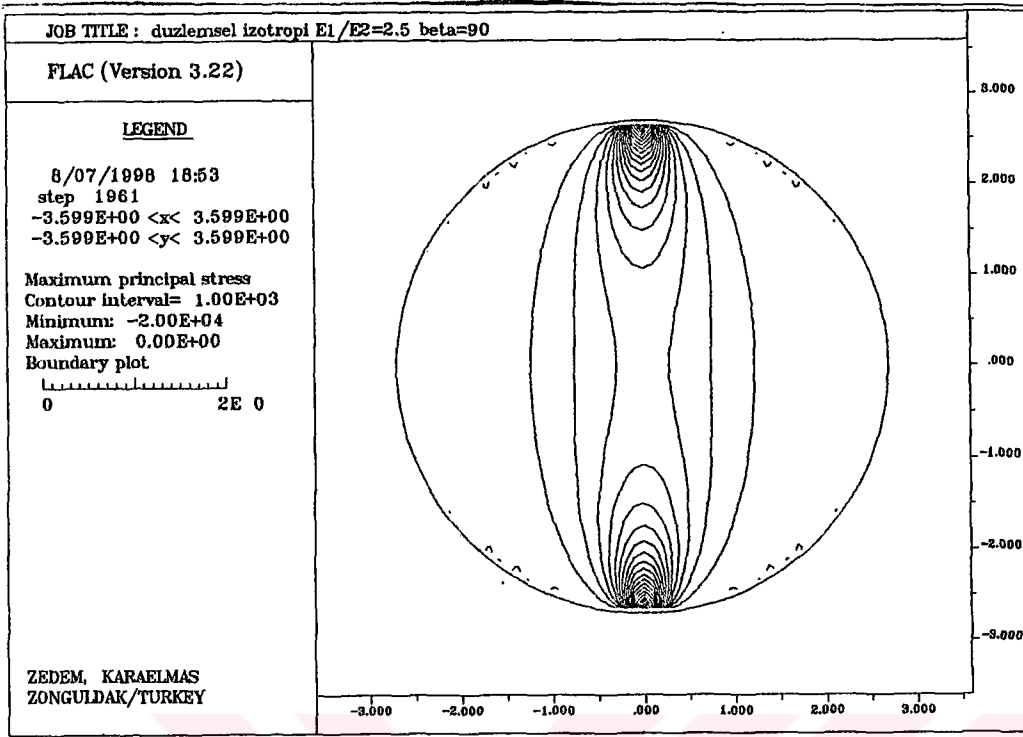


a. En büyük asal gerilme dağılımı

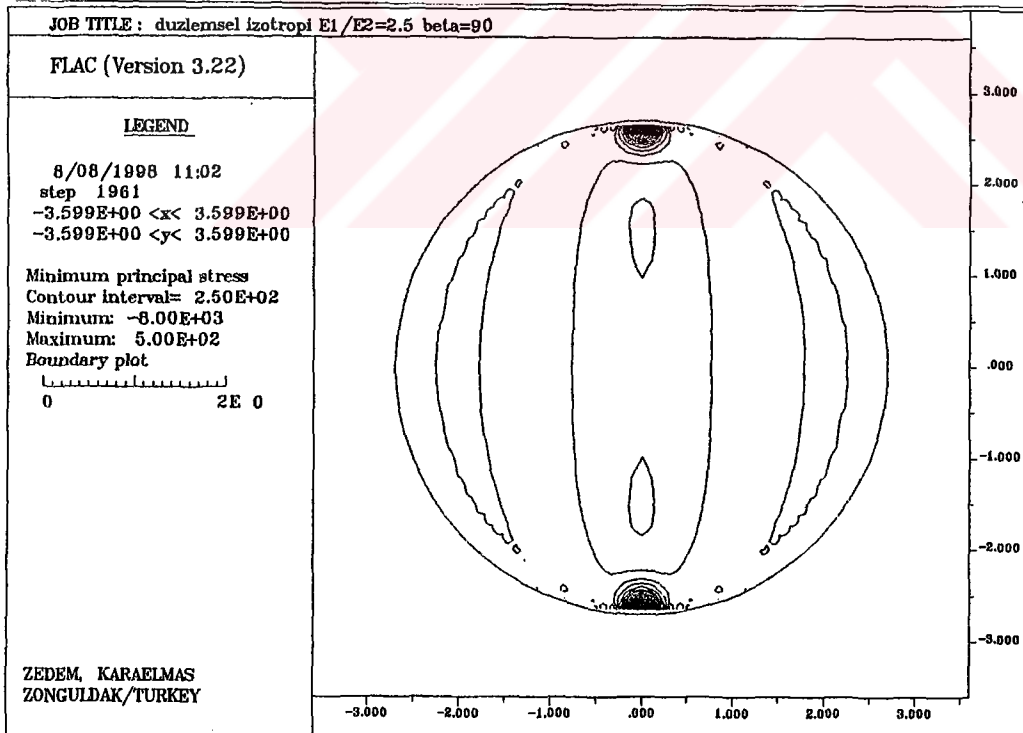


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.9 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=2.5$ ve $\beta=60^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

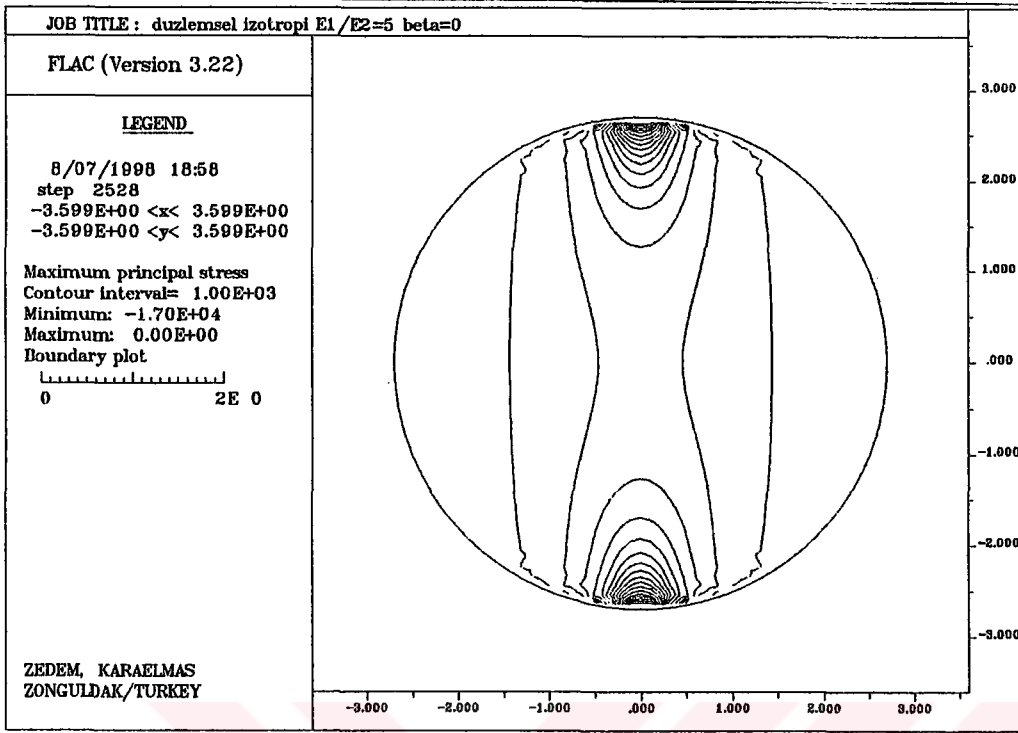


a. En büyük asal gerilme dağılımı

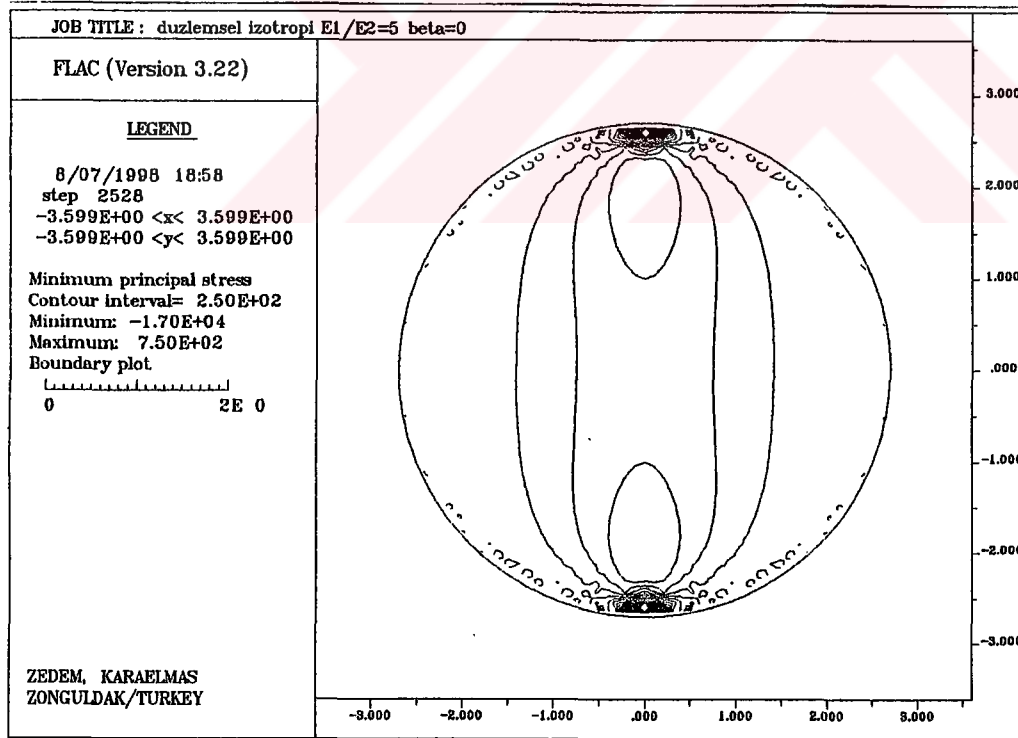


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.10 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=2.5$ ve $\beta=90^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

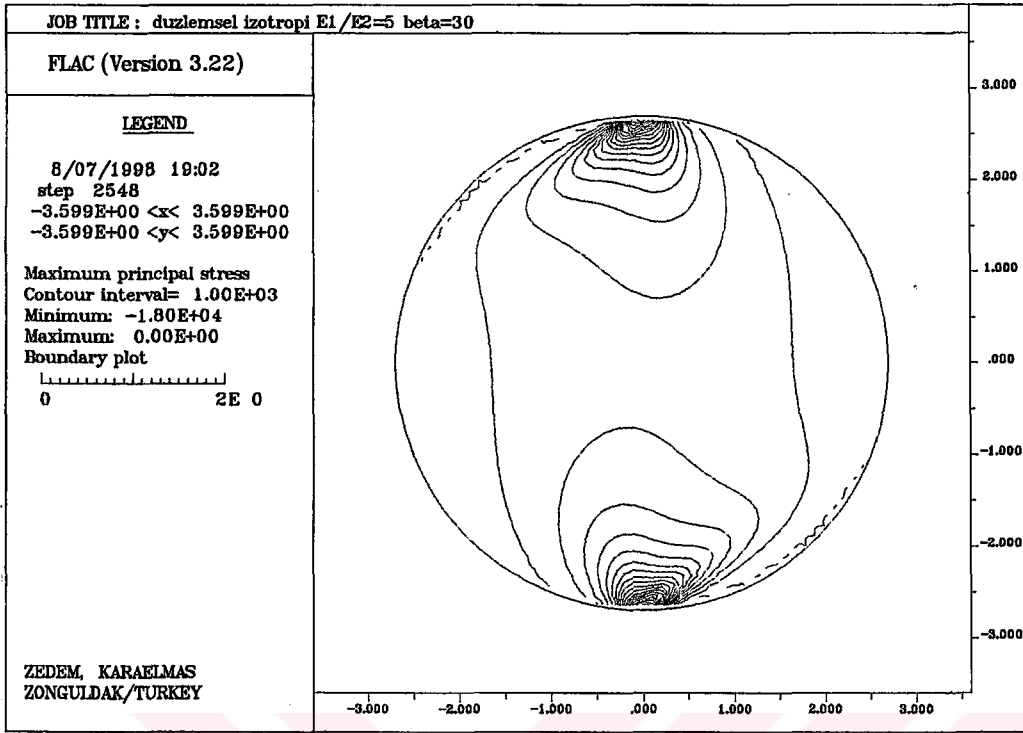


a. En büyük asal gerilme dağılımı

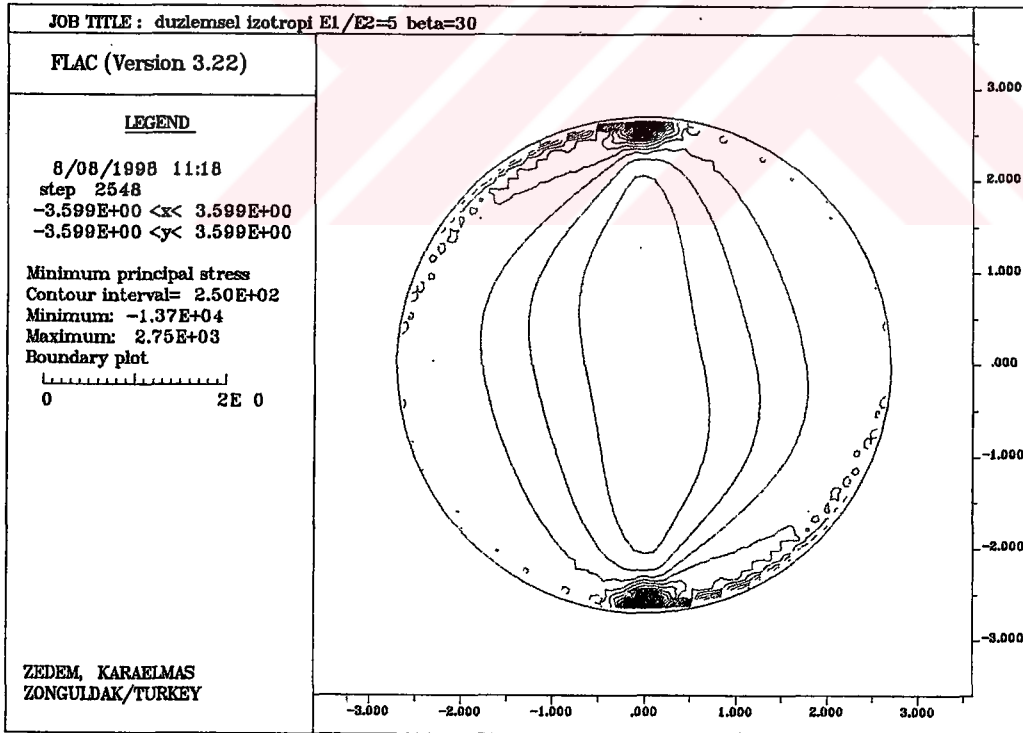


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.11 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=5.0$ ve $\beta=0^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

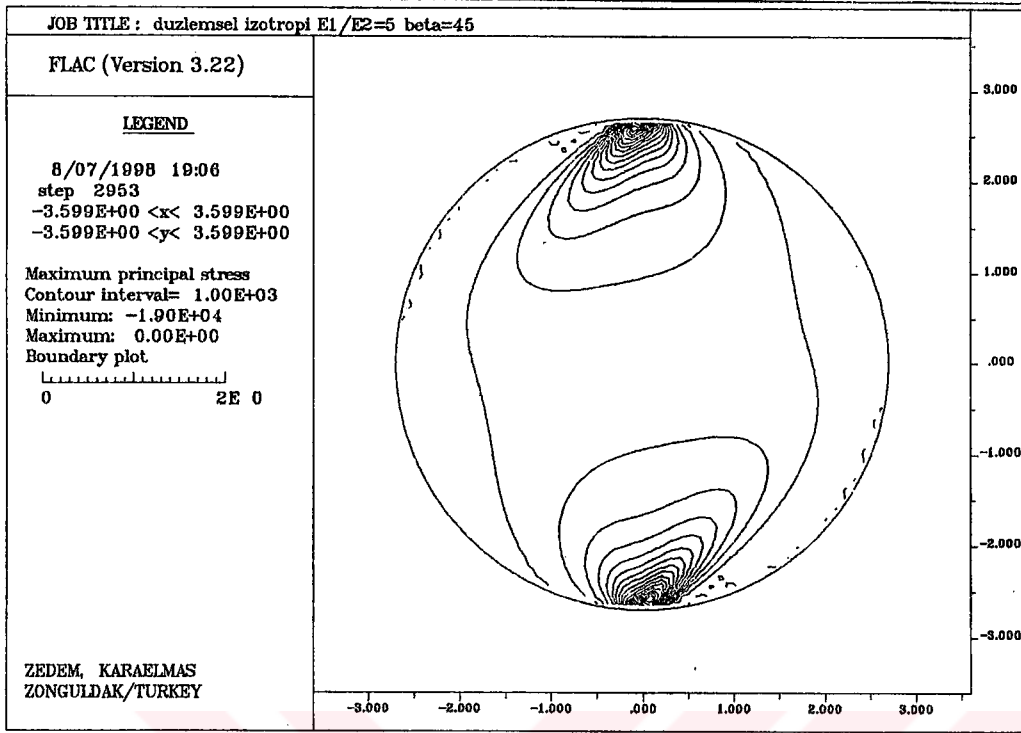


a. En büyük asal gerilme dağılımı

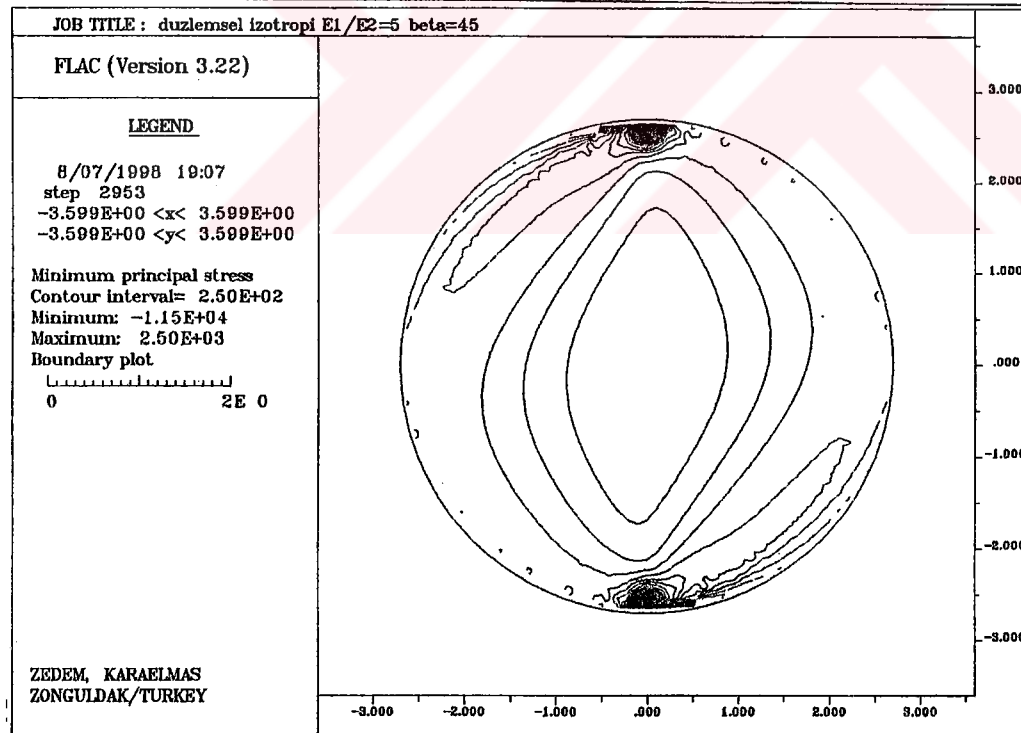


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.12 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=5.0$ ve $\beta=30^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

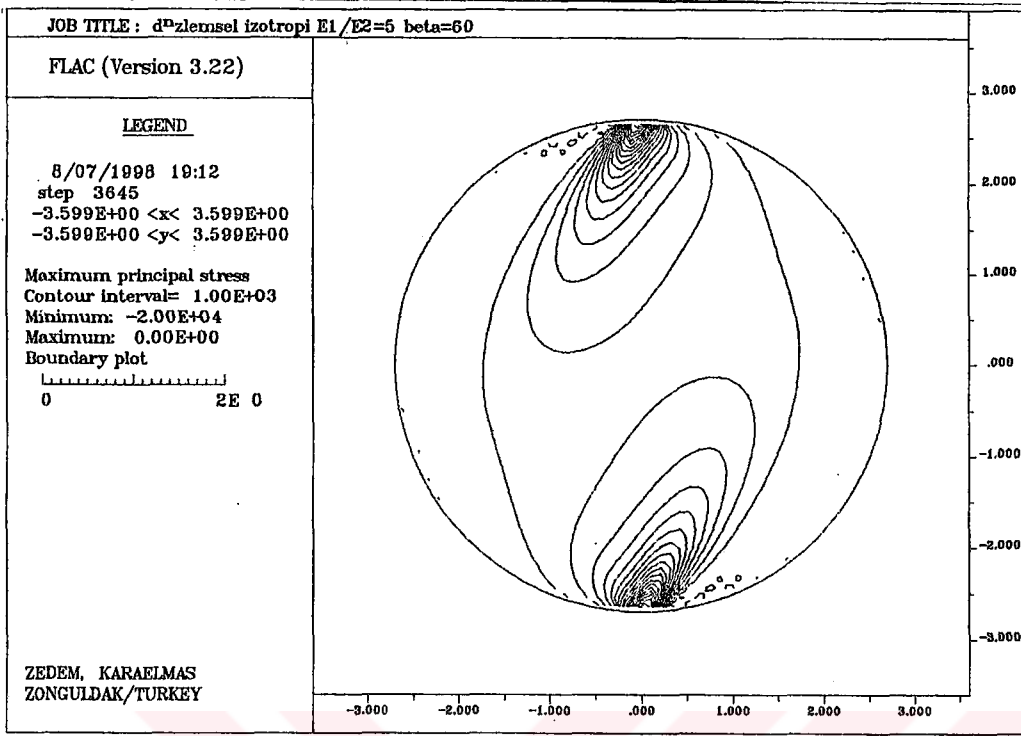


a. En büyük asal gerilme dağılımı

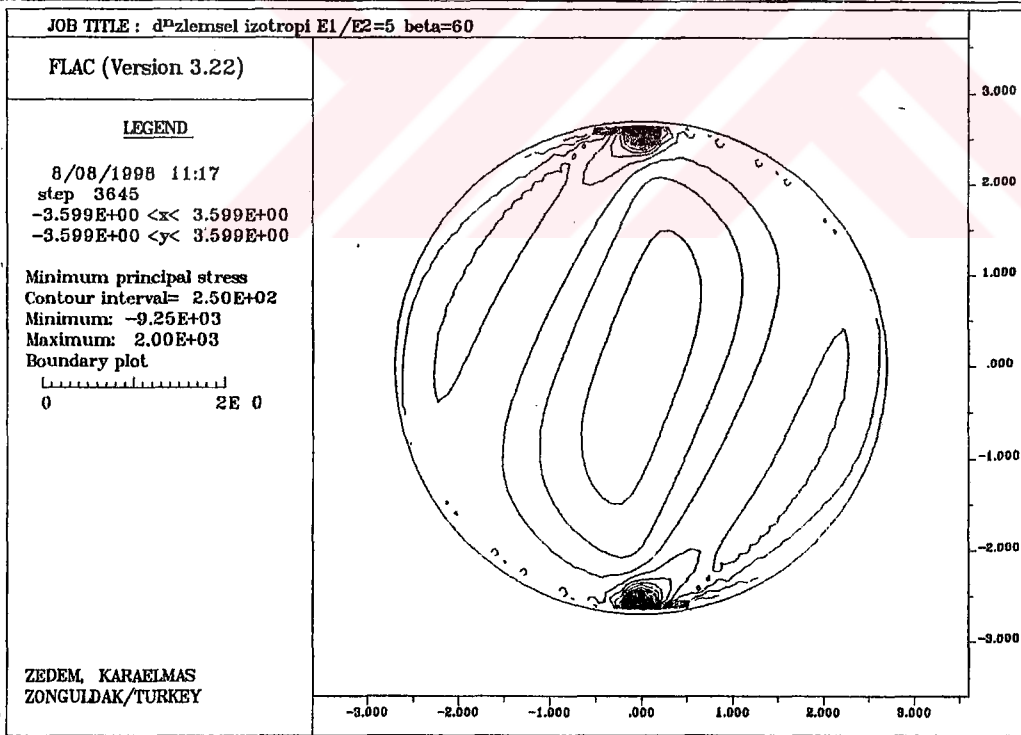


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.13 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=5.0$ ve $\beta=45^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

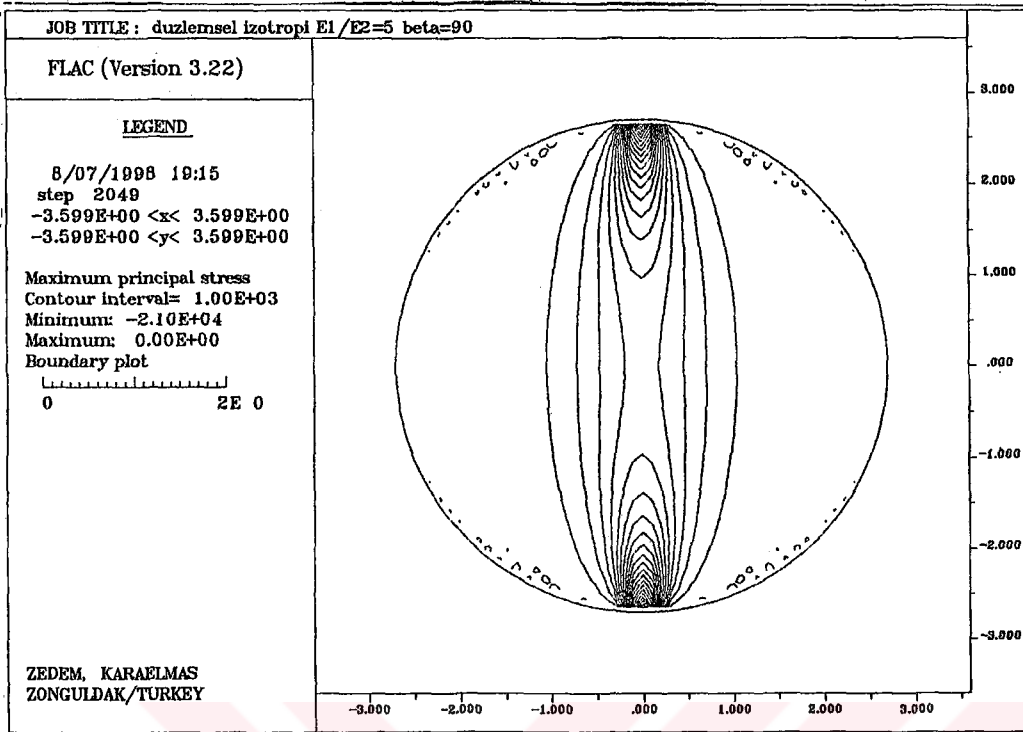


a. En büyük asal gerilme dağılımı

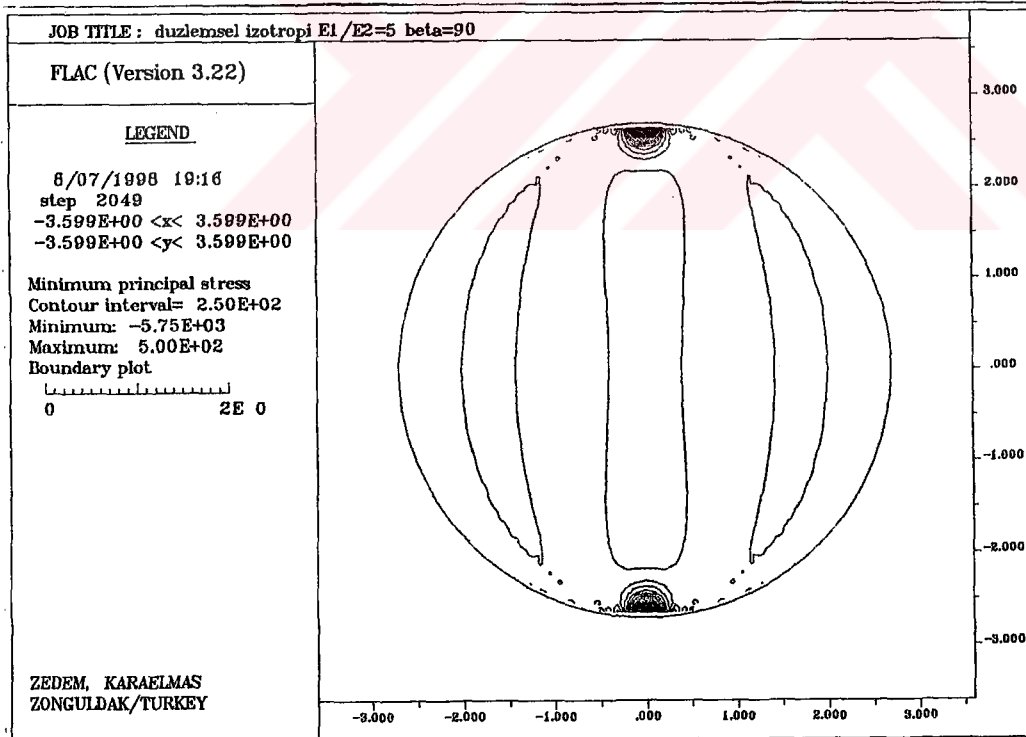


b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.14 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=5.0$ ve $\beta=60^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.



a. En büyük asal gerilme dağılımı



b. En küçük asal gerilme dağılımı

Şekil B.15 Disk şekilli örnekte, $E_1/E_2=5.0$ ve $\beta=90^\circ$ durumunda oluşan asal gerilmeler.

EK AÇIKLAMALAR C

**KAYA KÜTLESİNİN DAYANIM PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ İÇİN HOEK VE BROWN TARAFINDAN ÖNERİLEN
DÖNÜŞÜM EŞİTLİKLERİ**

Kaya malzemesine ait dayanım parametrelerinden, kaya kütlesine ait olan dayanım parametrelerini hesaplamak için Hoek ve Brown (1997) aşağıdaki dönüşüm eşitliklerini önermişlerdir.

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28}\right)}$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9}\right)} \quad GSI > 25 \text{ için}$$

$$E = 1000.10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_{ci}}{2^n}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left[\left(\left(\frac{m_b \cdot \sigma_3}{\sigma_{ci}} \right) + s \right)^a \right] \quad a=0.5 \quad (GSI > 25)$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} = 1 + \left(\frac{m_b \cdot \sigma_{ci}}{2 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)} \right) \quad (GSI > 25)$$

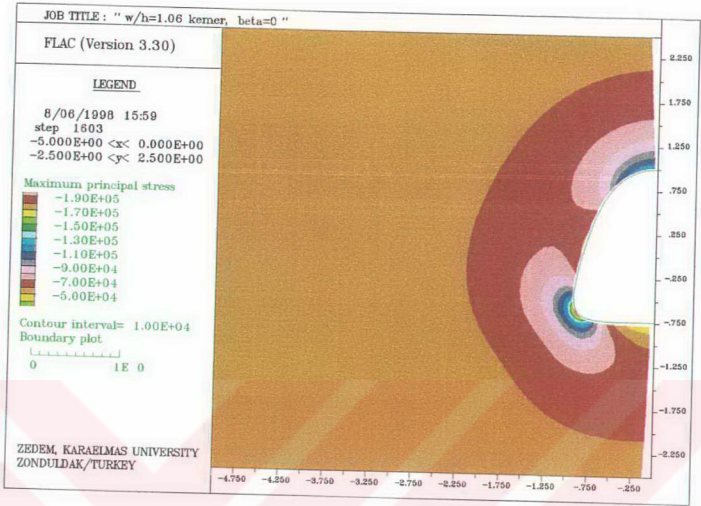
$$\sigma_n = \sigma_3 + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3}} \right)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sqrt{\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3}}$$

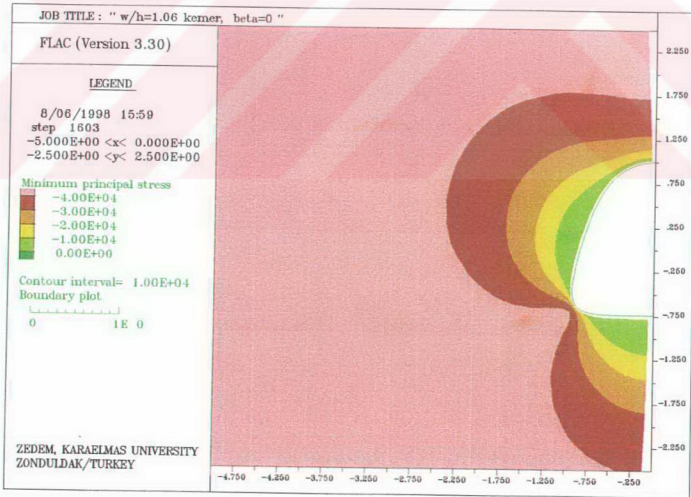
Yukarıdaki işlemler, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımının % 25'ine kadar olan yanal basınç aralığında değişik değerler için tekrarlanır (Hoek and Brown, 1997) Böylece elde edilen (σ_n, τ) değerlerine doğrusal regresyon uygulanarak, kaya kütlesinin ϕ ve c değerleri elde edilebilir.

EK AÇIKLAMALAR D

KEMER TAVANLI AÇIKLIK ÇEVRESİNDE OLUŞAN İKİNCİL GERİLME DAĞILIMLARI

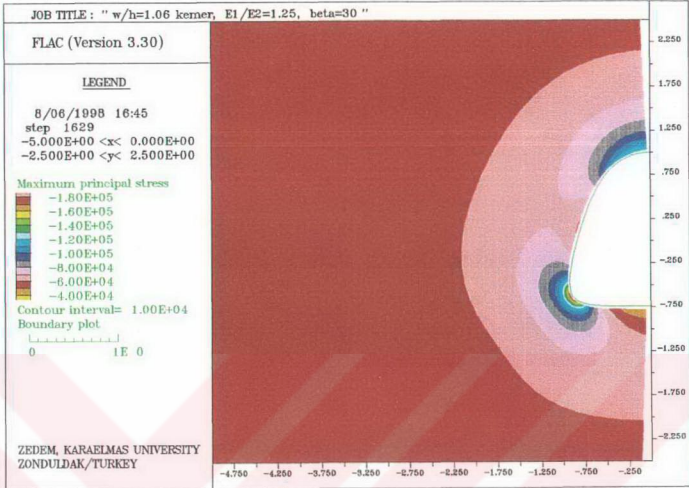


a. En büyük ikincil gerilme dağılımı

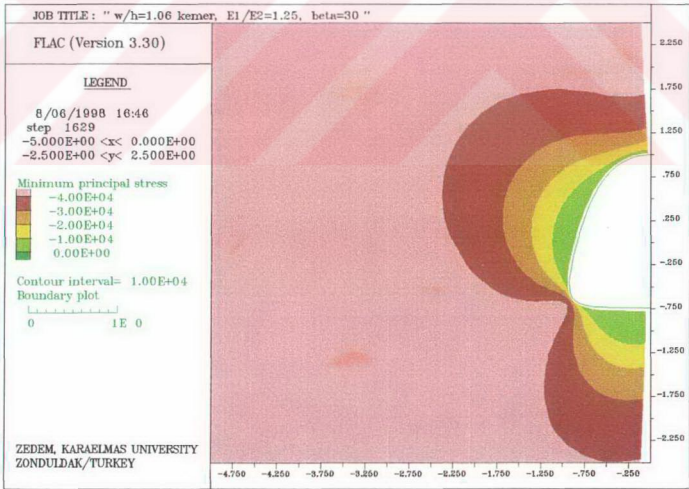


b. En küçük ikincil gerilme dağılımı

Şekil D.1 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, $E_1/E_2=1.25$ ve $\beta=0^\circ$ durumunda oluşan en büyük ve en küçük ikincil gerilme dağılımı.

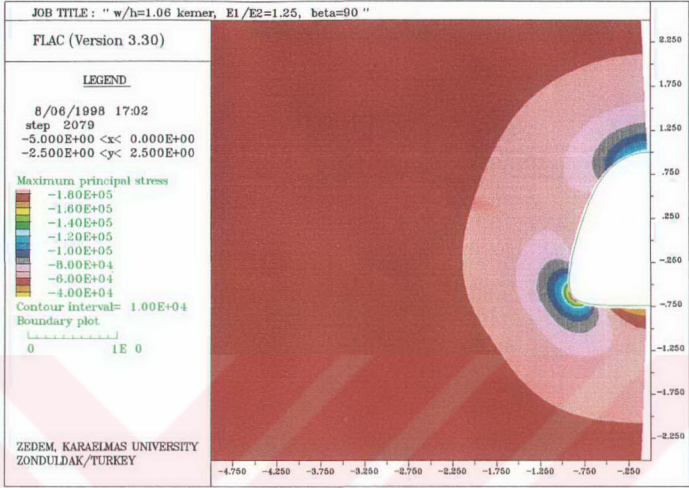


a. En büyük ikincil gerilme dağılımı

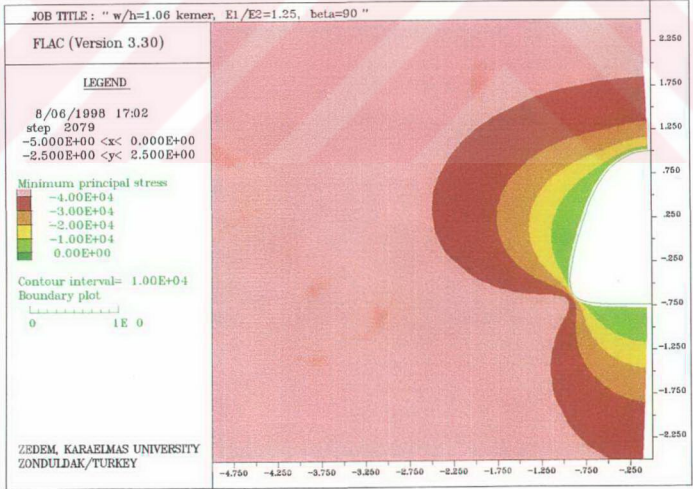


b. En küçük ikincil gerilme dağılımı

Şekil D.2 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, $E_1/E_2=1.25$ ve $\beta=30^\circ$ durumunda oluşan en büyük ve en küçük ikincil gerilme dağılımı.

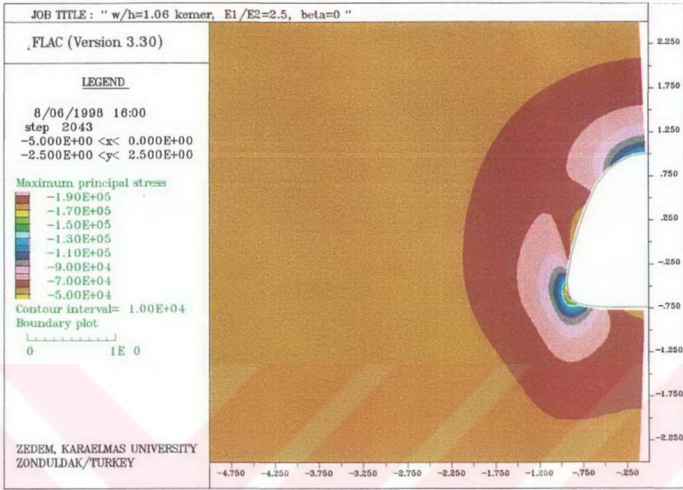


a. En büyük ikincil gerilme dağılımı

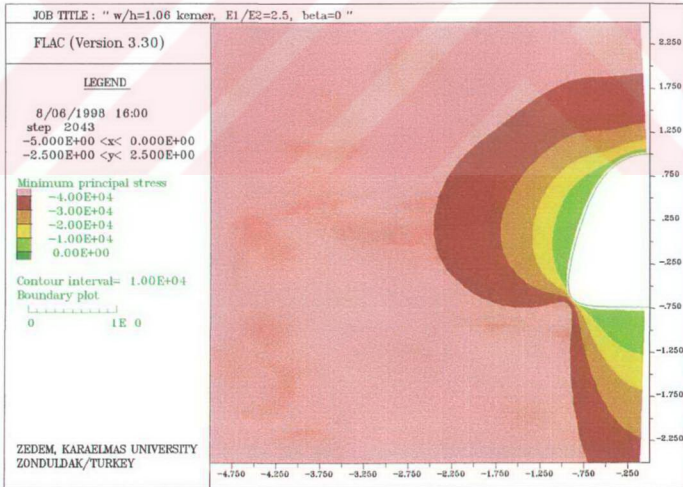


b. En küçük ikincil gerilme dağılımı

Şekil D.3 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, $E_1/E_2=1.25$ ve $\beta=90^\circ$ durumunda oluşan en büyük ve en küçük ikincil gerilme dağılımı.

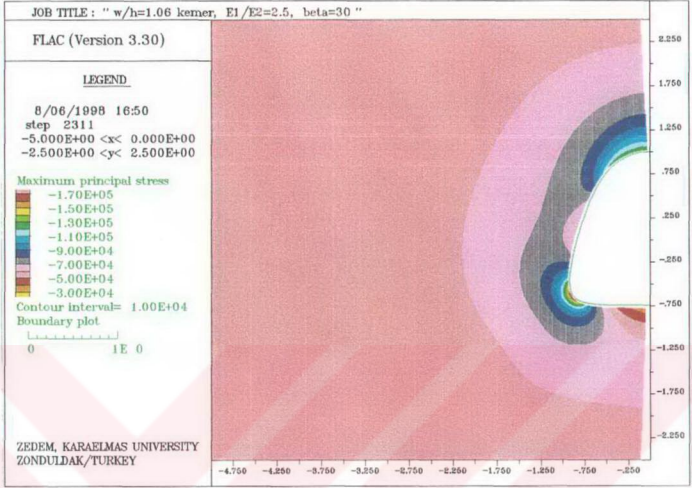


a. En büyük ikincil gerilme dağılımı

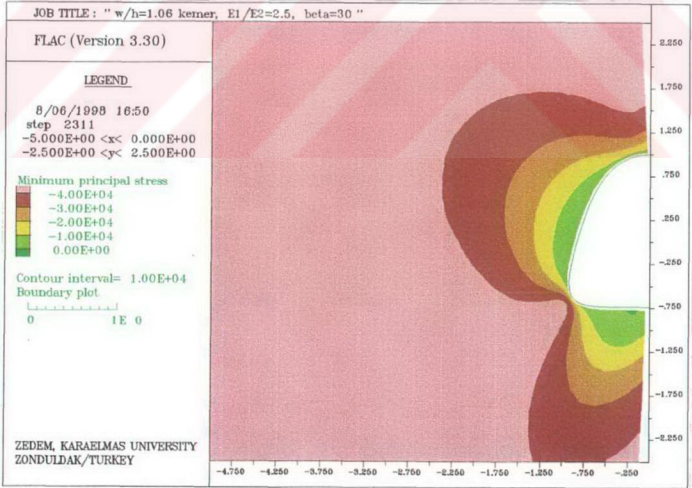


b. En küçük ikincil gerilme dağılımı

Şekil D.4 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, $E_1/E_2=2.5$ ve $\beta=0^\circ$ durumunda oluşan en büyük ve en küçük ikincil gerilme dağılımı.

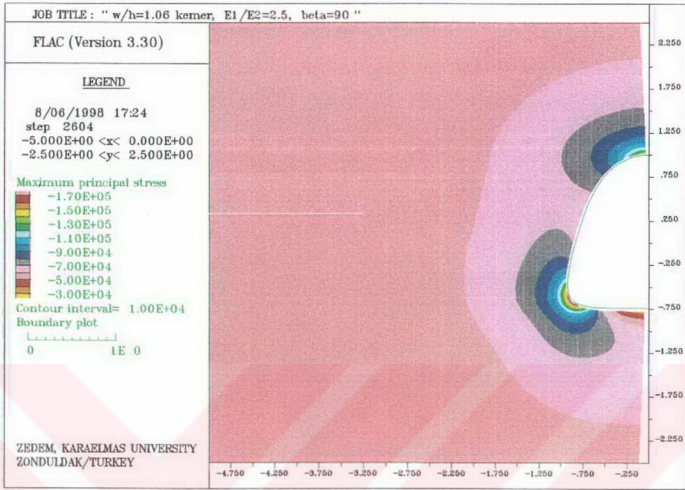


a. En büyük ikincil gerilme dağılımı

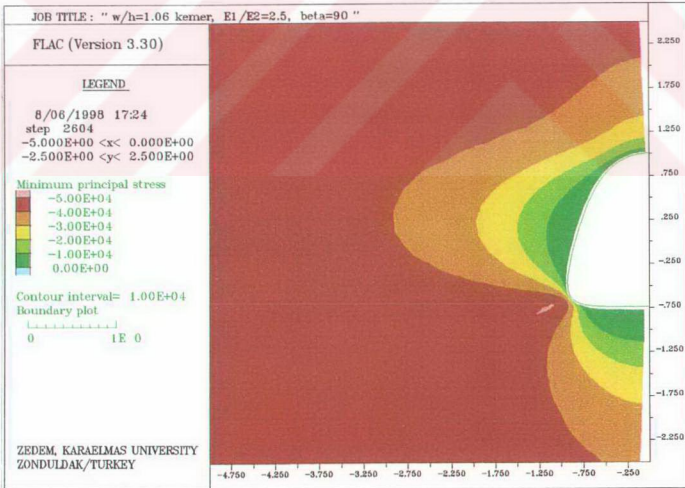


b. En küçük ikincil gerilme dağılımı

Şekil D.5 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, $E_1/E_2=2.5$ ve $\beta=30^\circ$ durumunda oluşan en büyük ve en küçük ikincil gerilme dağılımı.

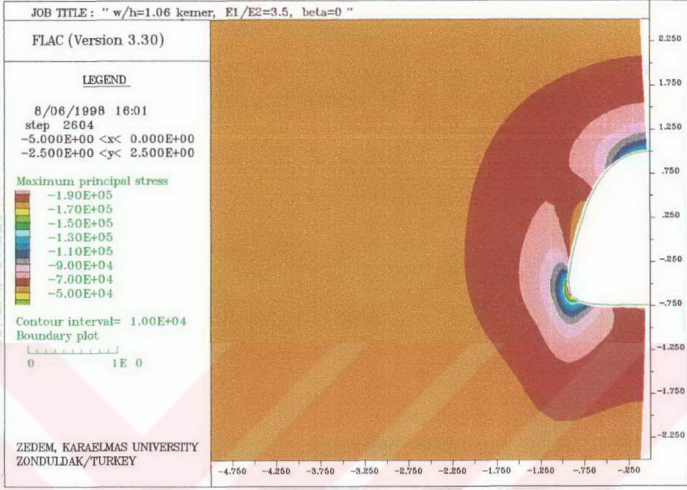


a. En büyük ikincil gerilme dağılımı

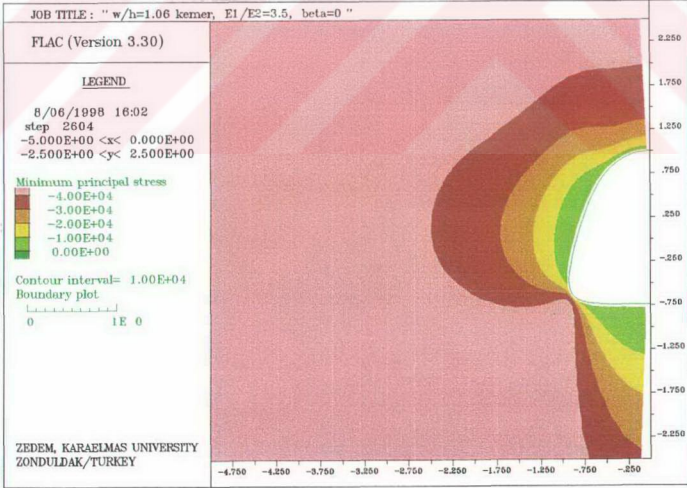


b. En küçük ikincil gerilme dağılımı

Şekil D.6 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, $E_1/E_2=2.5$ ve $\beta=90^\circ$ durumunda oluşan en büyük ve en küçük ikincil gerilme dağılımı

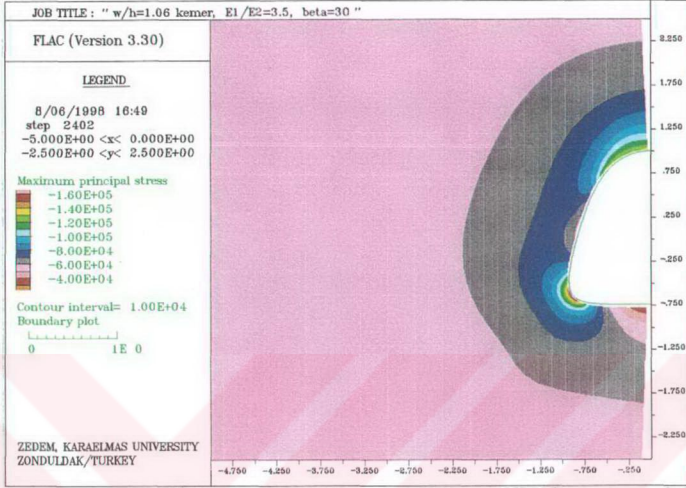


a. En büyük ikincil gerilme dağılımı

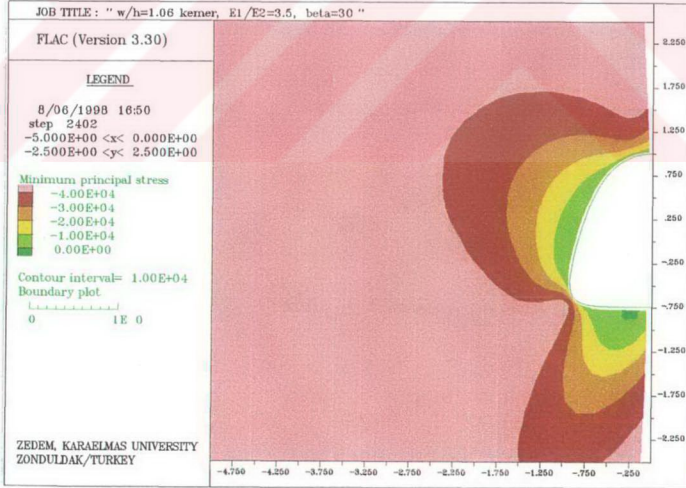


b. En küçük ikincil gerilme dağılımı

Şekil D.7 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, $E_1/E_2=3.5$ ve $\beta=0^\circ$ durumunda oluşan en büyük ve en küçük ikincil gerilme dağılımı.

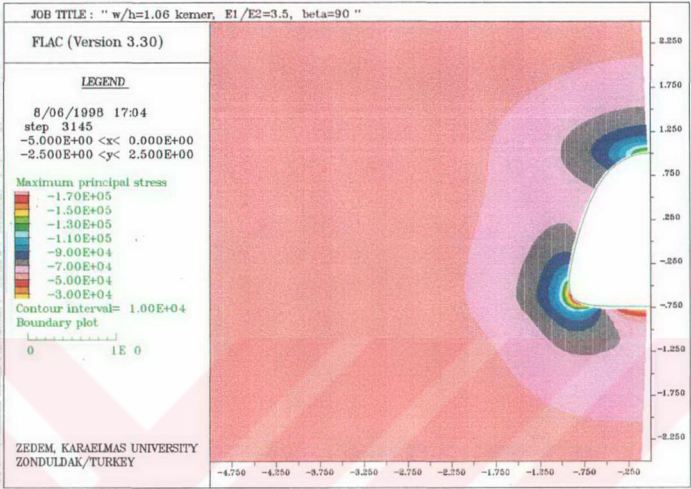


a. En büyük ikincil gerilme dağılımı

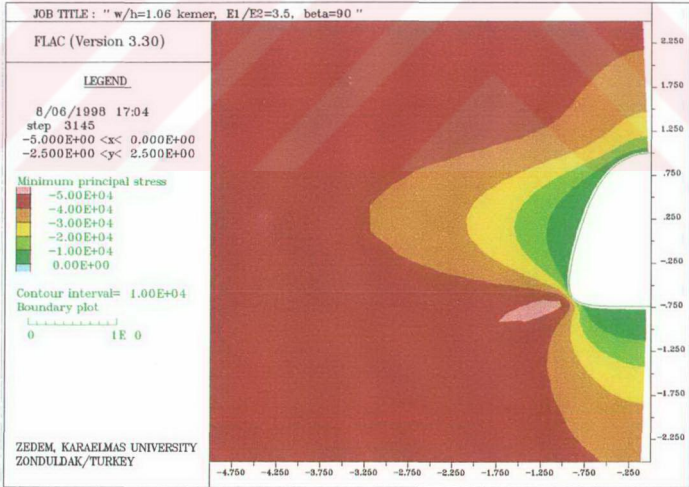


b. En küçük ikincil gerilme dağılımı

Şekil D.8 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, E₁/E₂=3.5 ve β=30° durumunda oluşan en büyük ve en küçük ikincil gerilme dağılımı.



a. En büyük ikincil gerilme dağılımı



b. En küçük ikincil gerilme dağılımı

Şekil D.9 Kemer tavanlı açıklık çevresinde, $E_1/E_2=3.5$ ve $\beta=90^\circ$ durumunda oluşan en büyük ve en küçük ikincil gerilme dağılımı.

ÖZGEÇMİŞ

Kenan Çolak 1962'de Zonguldak'ta doğdu; ilk ve orta öğrenimini Kozlu'da tamamladı. Zonguldak Mehmet Çelikel Lisesi'nden 1979'da mezun olduktan sonra, 1981 yılında girdiği Hacettepe Üniversitesi Zonguldak Mühendislik fakültesinden 1985 yılında mezun oldu. Aynı yıl H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans eğitime başlayan Kenan Çolak, 1986 yılında Zonguldak Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen , 1990 yılında girdiği ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim dalında doktora programını sürdürmektedir.

