

**KALEM UÇLU KESKİLERLE KAYAÇ KESME MEKANİZMASININ
ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLENMESİ**

Okan SU

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

**ZONGULDAK
Ocak 2010**

KABUL:

Okan SU tarafından hazırlanan "KALEM UÇLU KESKİLERLE KAYAÇ KESME MEKANİZMASININ ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLENMESİ" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 18 / 01 / 2010

Başkan: Prof. Dr. Nuh BİLGİN (İTÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hasan GERÇEK (ZKÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Nuri Ali AKÇIN (ZKÜ)
(Tez Danışmanı)

.....

Üye : Doç. Dr. Hanifi ÇOPUR (İTÜ)

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Olgay YARALI (ZKÜ)

.....

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. 10/02/2010

Prof. Dr. Kemal BÜYÜKGÜZEL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Okan SU

ÖZET

Doktora Tezi

KALEM UÇLU KESKİLERLE KAYAÇ KESME MEKANİZMASININ ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLENMESİ

Okan SU

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nuri Ali AKÇIN

Ocak 2010, 207 sayfa

Yeraltında veya yerüstünde kullanılacak bir kazı makinasından en yüksek performansın sağlanması, o makinanın kazı yapacağı zemin koşullarına uygun olarak seçimine bağlıdır. Bu noktada formasyonun özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklere bağlı olarak makina performansının önceden tahmin edilmesiyle doğru makina seçimi yapılabilir.

Kazı makinalarının ağırlıkları ve güçleri arasında bir ilişki vardır. Bir makinanın ağırlığı arttıkça uygulayacağı gücüde artmaktadır. Böylece sert kayaçların kazısı da mümkün olmaktadır. Bu yüzden kazı makinasının çalışacağı formasyonun mekanik, kazılabilirlik ve aşındırıcılık özelliklerinin önceden belirlenmesi gerekir. Bunun yanı sıra kayacın çevresel faktörleri de göz önüne alınır. Bu süreç aynı zamanda bir tünel projesinin ilk yatırımlarını belirler. Kazı makinasının kesici kafasına monte edilen keski üzerinde rol oynayan kesme kuvvetleri kayacın kazılabilirliğinin belirlenmesinde en önemli etkenlerdir.

ÖZET (devam ediyor)

Bu kuvvetler çeşitli araştırmacıların ortaya koyduğu teorik bağıntılar veya laboratuvarda yürütülen kayaç kesme deneylerinden belirlenebilmektedir. Bunun yanı sıra ilerleyen teknoloji ile birlikte bilgisayar ortamında hazırlanmış çeşitli yazılımlar veya sayısal yöntemlerden yararlanarak keski üzerinde rol oynayan kesme kuvvetleri daha kolay, daha ucuz ve daha kısa zamanda tahmin edilebilmektedir.

Bu çalışmada; sayısal modelleme yöntemlerinden ayırık elemanlar yöntemini kullanarak modelleme yapmaya olanak sağlayan “Particle Flow Code in 3 Dimensions (PFC^{3D})” isimli programdan yararlanarak kayaç kesme mekanizmaları modellenmiştir. PFC^{3D} birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan bir programdır. PFC^{3D},de en temel elemanlar küresel tanecikler, duvarlar ve bu bileşenler arasında depolanan bağlardır. Bağların belirli bir normal ve kayma dayanımları vardır. Sayısal modelleme sırasında tanecikler arasındaki temas kuvvetleri bağ dayanımını aştığında tanecikler birbirinden kopar ve numunenin yenildiği varsayılır.

Kayaç kesme mekanizmalarını PFC^{3D},de modellemek üzere; ilk olarak 3, 6 ve 9 mm kesme derinliğinde kullanılacak sanal örnekler modellenmiştir. Ancak, kesme derinliklerinin çok düşük ve numune boyutlarının çok büyük olması PFC^{3D},de numune hazırlama işlemini zorlaştırmıştır. Bu yüzden, boyutlandırılmış tanecikler kullanılarak 30*30*15 mm (d=3 mm), 56*30*28 mm (d=6 mm) ve 82*30*41 mm (d=9 mm) ebatlarında numuneler hazırlanmıştır. Numunelerde; en büyük tanecik yarıçapının en küçük tanecik yarıçapına oranı 1,2 ve tanecikler arası gözeneklilik oranı %35 kabul edilmiştir. Tanecikler arasında hem temas ve hem de paralel bağlar kullanılmıştır. Numunelerin hepsi tek eksenli basınç dayanımı deneyinin PFC^{3D},de modellenmesiyle mikro özellikleri kalibre edilmiştir.

Numune hazırlama işlemini takiben laboratuvarda uygulanan kesme parametrelerine göre kalem ucu tipi keski örnek üzerine uygun şekilde konumlandırılmış ve 0,3 m/s hızla sabit olarak 20 mm kesme mesafesi boyunca hareket ettirilmiştir. Keskinin numune üzerindeki hareketi sırasında keski üzerinde rol oynayan normal ve kesme kuvvetleri kayıt edilmiş, mikro-çatlaklar izlenmiş, keski etrafındaki kırıntı oluşumu ve keski-kayaç arası etkileşim gözlemlenmiştir. Buna göre, ortalama ve maksimum kesme kuvvetleri belirlenmiştir. Ayrıca;

ÖZET (devam ediyor)

modelleme çalışmaları sonrası keski etrafında toplanan kazı hacminin hesaplanmasıyla, keski tarafından tüketilen spesifik enerji tespit edilmiştir.

3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde yürütülen modelleme çalışmaları sonucunda, kumtaşı-1 kayacı ortalama kesme kuvveti değerlerinin 0,37-3,18 kN, kumtaşı-2 kayacının 0,58-5,41 kN, kumtaşı-3 için 0,19-2,17 kN ve kireçtaşı kayacının 0,26-2,80 kN arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu sonuçların kayaç kesme mekanizmalarından elde edilen sonuçlara yakın çıktığı, laboratuvar sonuçlarıyla arasında belirgin bir fark olduğu görülmüştür. Ancak, sayısal modelleme, laboratuvar ve kesme mekanizmalarından elde edilen sonuçlar arasında yüksek korelasyon katsayısına sahip anlamlı ilişkilerin olduğu istatistiksel olarak ortaya konmuştur. Laboratuvar ve modelleme sonuçlarının farklı çıkmasının en temel nedenleri laboratuvar da kullanılan konik keskinin mükemmel konik olmaması, kayaç içerisindeki gerilme dağılımları ve kesme koşullarıdır.

Diğer taraftan; 3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde yürütülen modelleme çalışmalarından spesifik enerji değerlerinin kumtaşı-1 kayacı için 10,27-11,22 kWh/m³, kumtaşı-2 için 20,13-22,42 kWh/m³, kumtaşı-3 için 6,00-8,38 kWh/m³ ve kireçtaşı kayacının da 9,08-11,25 kWh/m³ arasında değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlar laboratuvar da 3 ve 6 mm'lik kesme derinliklerinde hesaplanan spesifik enerji değerleri ile modelleme çalışmalarından elde edilen değerlerin birbirlerinden farklı olduğunu göstermiştir. Ancak, PFC^{3D}'de 9 mm kesme derinliklerinde hesaplanan spesifik enerji değerlerinin laboratuvar da hesaplanan değerlerle oldukça uyumlu olduğu görülmüş ve bu uyum istatistiksel olarak regresyon analizleriyle de desteklenmiştir. Bu yüzden PFC^{3D}'de yapılacak sayısal modelleme çalışmalarının mümkün olduğunca yüksek kesme derinliklerinde yürütülmesinin daha anlamlı olacağı kanaatine varılmıştır.

Bu sonuçlar ışığında en yüksek kesme kuvveti ve spesifik enerji değerleri hem laboratuvar hem de PFC^{3D}'de kumtaşı-2 kayacından elde edilmiştir.

Ayrıca, parametrik çalışmalar yapılarak kesme hızının kesme kuvvetleri üzerinde etkisi araştırılmıştır. 0,3 ve 0,5 m/s hızda yürütülen modelleme çalışmaları sonuçlarının çok fazla değişmediği ortaya konmuştur.

ÖZET (devam ediyor)

Bununla birlikte, üç farklı kesme açısında (-7° , 0° , 7°) modelleme çalışmaları tekrar yürütülmüştür. Bu bağlamda düşük kesme derinliklerinde kesme açısı arttıkça kesme kuvvetleri ve spesifik enerjinin arttığı ve normal kuvvetlerin kesme kuvvetlerinden daha yüksek çıktığı belirlenmiştir.

Kayaç kesme mekanizmaları kayacın mekanik özellikleriyle yakından ilişkilidir. Bu bağlamda tanecikler arasında meydana gelen yenilme türleri ya da bir başka deyişle mikro-çatlakların ilerlemesi incelendiğinde, PFC^{3D}'de örneğin basınç dayanımının etkisiyle yenildiği görülmüştür. Bu yenilme türünün en temel nedeninin kayacın mikro özelliklerinin kalibre edilmesinde kullanılan bağ türüdür.

Anahtar Sözcükler: Kalem ucu tipi keski, Doğrusal kazı seti, Keski kuvvetleri, Spesifik enerji, Particle Flow Code in 3 Dimensions (PFC^{3D}), Ayırık elemanlar yöntemi, Kayaç kesme mekanizması

Bilim Kodu: 607.01.03

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELLING OF ROCK CUTTING MECHNANISM WITH CONICAL BITS

Okan SU

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

Thesis Advisor: Prof. Nuri Ali AKÇIN

January 2010, 207 pages

Obtaining the maximum performance of a cutting machine that will operate in both underground and on the surface relies on the appropriate selection of the machine depending on the ground conditions where it will work. In this point, a machine can be selected properly by defining the properties of the formation and predicting the performance of the machine based on these properties.

There is a relation between the weight and the power of cutting machines. As the weight of the machine increases, the power increases as well. This makes excavation of hard rock possible. For that reason, mechanical, cuttability and abrasivity properties of the formation, where the machine will work, should be determined in advance. Besides, the environmental factors around the rock should also be taken into consideration. At the same time, this process determines the initial investments of a tunnel project. The cutting forces acting on the pick, mounted on the cutter of a cutting machine, are the dominant factors in determining the rock cuttability.

ABSTRACT (continued)

These forces can be determined via theoretical equations introduced by various researchers and rock cutting tests performed in the laboratory. Furthermore, by utilization of softwares developed with the advance in technology or numerical methods, the forces acting on the pick has been being predicted in an easier and cheaper way at a shorter time.

In this study, the rock cutting mechanisms were modeled by using the “Particle Flow Code in 3 Dimensions (PFC^{3D})” program that allows to use the distinct element method in numerical modeling methods. PFC^{3D} is a program widely used in many engineering branches. The fundamental entities in PFC^{3D} are the spherical particles, walls and the bonds installed between these entities. The bonds have certain normal and shear strengths. In the course of numerical modeling, if the contact forces between particles exceed the corresponding strength of the bond then the particles are broken off and consequently it is assumed that the specimen failed.

In order to model the rock cutting mechanisms in PFC^{3D}, artificial specimens, having the cutting depths of 3, 6, and 9 mm, were initially modeled. However, lower cutting depths and larger specimen dimensions caused some issues during the specimen preparation process in PFC^{3D}. Therefore, the specimens having dimensions of 30*30*15 mm (d=3 mm), 56*30*28 mm (d=6 mm), and 82*30*41 mm (d=9 mm) were prepared by using graded particles. In the specimens, the ratio of largest particle to smallest particle was chosen as 1.2 and the porosity between the particles was assumed as 35%. Both contact and parallel bonds were installed between the particles. Micro properties of the entire specimens were calibrated by modeling the uniaxial compressive strength test in PFC^{3D}.

Following the specimen preparation process, the point attack pick was appropriately positioned on the specimen and constantly moved through a cutting distance of 20 mm with a velocity of 0.3 m/s according to the cutting parameters applied in the laboratory. Normal and cutting forces that have effects on the pick were recorded, micro cracks were traced, chip formation around the cutter and interaction between the rock and pick were monitored during the movement of the pick on the specimen. Accordingly, the mean and maximum cutting forces were obtained. In addition, after the modeling studies the specific energy consumed by the pick was determined by calculating the excavated volume around cutter.

ABSTRACT (continued)

As a result of the modeling studies performed at 3, 6 and 9 mm of cutting depths, it was determined that mean cutting force differs between 0.37 and 3.18 kN for sandstone-1, 0.58 and 5.41 kN for sandstone-2, 0.19 and 2.17 kN for sandstone-3, 0.26 and 2.80 kN for limestone. It was found out that these are very close to the results obtained from rock cutting mechanisms and there is a clear difference between laboratory and numerical modeling results. However, it was statistically proved that there are very compatible association between laboratory and modeling studied in addition to the cutting mechanisms with high correlation coefficients. The main reasons of the difference between laboratory and modeling studies are the imperfect conical shape of the pick used in laboratory experiments, the stress distribution in the rock structure as well as the cutting conditions.

In the other hand, it was observed at 3, 6 and 9 mm of cutting depths that the specific energy values vary between 10.27 and 11.22 kWh/m³ for sandstone-1, 20.13 and 22.42 for sandstone-2, 6.00 and 8.38 for sandstone-3 and 9.08 and 11.25 for limestone. These results showed that the calculated specific energy values obtained in the laboratory at 3 and 6 mm of cutting depths and the ones obtained from modeling studies are different from each other. However, it was seen that the specific energy values found at 9 mm of cutting depth in PFC^{3D} are closely related with the laboratory studies and this relation was supported with the regression analyses. Therefore, it was decided that the numerical modeling studies should be performed at cutting depths as high as possible.

As a result of these outcomes, the highest cutting force and specific energy values were obtained from sandstone-2 both in laboratory and PFC^{3D}.

Furthermore, the effect of cutting speed on cutting forces was investigated in parametric studies. It was proven that the results of modeling studies carried out at 0.3 and 0.5 m/s of cutting speeds did not vary too much.

Besides, the modeling studies were repeated at three different rake angles (-7°, 0°, 7°). In this context, it was determined that the cutting forces and specific energy increase as the rake angle increases at lower cutting depths and the increase in the normal forces is higher than the increase in the cutting forces.

ABSTRACT (continued)

Rock cutting mechanisms are closely related with mechanical properties of rock. In this sense, through the investigation of the failure types, i.e. micro-crack propagation occurring between particles, it was observed that the specimen in PFC^{3D} failed due to the effect of compressive strength. The main reason of this fail type is the bond type used during the calibration of micro properties of rock.

Key Words: Point attack pick, Linear cutting set, Cutting force, Specific energy, Particle Flow Code in 3 Dimensions (PFC^{3D}), Discrete element method, Rock cutting mechanism.

Science Code : 607.01.03

TEŞEKKÜR

Yazar, Doktora tez çalışmaları boyunca katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen, maddi ve manevi destek sağlayan danışmanı Prof. Dr. Nuri Ali AKÇIN'a (ZKÜ) sonsuz teşekkürlerini sunar.

Doktora tez çalışmaları sırasında karşılaşılan birtakım sorunların üstesinden gelinmesinde yol gösteren Prof. Dr. Hasan GERÇEK'e (ZKÜ); kazı mekaniği alanında değerli fikirlerini paylaşarak gerekli yönlendirmelerde bulunan Prof. Dr. Nuh BİLGİN (İTÜ) ve Doç. Dr. Hanifi ÇOPUR'a (İTÜ); tez çalışmalarının ilk dönemlerinde PFC^{3D}'nin kullanımına olanak sağlayan Prof. Dr. P.H.S.W. KULATILAKE'a (Arizona Üniversitesi); modelleme çalışmaları sırasında karşılaşılan sorunların üstesinden gelmek için oluşturduğu tartışma ortamları ve önemli fikir alışverişi destekleriyle Dr. Lothar te KAMP (Itasca Consultants GmbH) ve Dr. Marco CAMUSSO'ya (Itasca Consultants GmbH); modelleme çalışmaları için gerekli verileri sağlayan Dr. Kebire KEL'e (MTA), İTÜ'de bulunan Doğrusal Kesme Seti'nde yürütülen bazı deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Cemal BALCI (İTÜ) ve Arş. Gör. Deniz TÜMAÇ'a (İTÜ); CSM (Colorado School of Mines)'da bulunan Doğrusal Kesme Seti'nde çeşitli incelemeler ve araştırmalarla birlikte deneysel çalışmaları gözlemlemesine olanak sağlayan Prof. Dr. Levent ÖZDEMİR (CSM) ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇIĞLA'ya (CSM); doktora tez çalışmaları süresince özverili desteğini hiçbir zaman esirgemeyen vefakâr arkadaşı Arş. Gör. İlknur EROL'a (ZKÜ); Arizona Üniversitesi'nde yürütülen modelleme çalışmaları süresince her zaman manevi destek sağlayan arkadaşları Umur YENAL ve M. Emin DENİZ'e; gerek modelleme çalışmaları ve gerekse tez yazım aşamasında her türlü maddi ve manevi destek sağlayan ailesine teşekkürü bir borç bilir.

Ayrıca, tez çalışmaları süresince maddi destek sağlayan TÜBİTAK ve ZKÜ Bilimsel Araştırma Projesi Başkanlığı'na çok teşekkür eder.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR.....	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxix
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....	xxxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxxv
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 KAYAÇ KESME MEKANİZMALARI VE PERFORMANS TAHMİN YÖNTEMLERİ.....	7
2.1 KAYAÇ ÇATLAMA TÜRLERİ.....	8
2.2 KAMA TİPİ KESKİLER İÇİN GELİŞTİRİLEN KESME TEORİLERİ.....	9
2.2.1 Merchant'ın Kesme Teorisi.....	10
2.2.2 Evans'ın Kesme Teorisi	11
2.2.3 Nishimatsu'nun Kesme Teorisi	12
2.2.4 Roxborough'un Kesme Teorisi	13
2.2.5 Göktan'ın Evans Kesme Teorisi Üzerindeki Uyarlaması	14
2.3 KALEM UÇLU KESKİLER İÇİN GELİŞTİRİLEN KESME TEORİLERİ	14
2.3.1 Evans'ın Kesme Teorisi	15
2.3.2 Ranman'ın Kesme Teorisi.....	16
2.3.3 Göktan'ın Evans Kesme Teorisi Üzerindeki Uyarlaması (Kalem Uçlu Keski).....	18
2.3.4 Roxborough ve Liu'nun Evans Kesme Teorisi Üzerindeki Uyarlaması	19

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.4 KAYAÇ KESME SETLERİ.....	19
2.4.1 Tam (bire-bir ölçekli) Boyutlu Doğrusal Kesme Deney Seti.....	20
2.4.2 Küçük Boyutlu Kesme Deney Seti.....	23
2.5 SAYISAL YÖNTEMLERLE KAYAÇ KESME MEKANİZMALARININ MODELLENMESİ	23
2.5.1 PFC ^{2D} ve FLAC ile Yapılan Modelleme Çalışmaları.....	24
2.5.2 Diğer Sayısal Yöntem ve Programlarla Yapılan Modelleme Çalışmaları	29
2.6 KAZI MAKİNASI PERFORMANSININ ÖNCEDEN KESTİRİMİ.....	34
2.6.1 Tam Boyutlu Kesme Seti	36
2.6.2 Küçük Ölçekli Kesme Seti.....	36
2.6.3 Görgül Bağıntılar	37
2.6.4 NTNU Modelleri	38
2.6.4.1 Kırılgenlik Deneyi (S ₂₀).....	38
2.6.4.2 Sievers'ın Minyatür Delme Deneyi (SJ)	39
2.6.4.3 Norveç Aşınma Deneyi	39
2.6.4.4 NTNU Modellerinden Yararlanılarak Kazı Makinası Performans Değerlendirmesi	41
BÖLÜM 3 PFC ^{3D} PROGRAMI VE ÇALIŞMA TEORİSİ.....	45
3.1 PFC ^{3D} TANECİK-AKIŞ MODELİ.....	46
3.2 PFC ^{3D} 'NİN HESAPLAMA DÖNGÜSÜ	47
3.2.1 Kuvvet – Yerdeğiştirme Kanunu.....	48
3.2.2 Hareketin Kanunu	51
3.3 TEMAS OLUŞUM MODELLERİ	52
3.3.1 Temas-katılık Modeli.....	52
3.3.2 Kayma Modeli	52
3.3.3 Bağ Modelleri.....	53
3.3.3.1 Temas Bağ Modeli	54
3.3.3.2 Paralel Bağ Modeli.....	55
3.4 PFC ^{3D} 'DE BASİT BİR MODELİN HAZIRLANMASI	56

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.4.1 Taneciklerin Hazırlanması	56
3.4.2 Duvarların Oluşturulması ve Sınır Koşulların Belirlenmesi	56
3.4.3 Malzeme Özellikleri	57
3.4.4 Yükleme	57
3.4.5 Çözümleme	57
3.4.6 Sonuçların Yorumlanması	58
3.5 PFC ^{3D} ’DE NUMUNE HAZIRLAMA	58
3.5.1 Tanecik Topluluğunun Oluşturulması	58
3.5.2 İzotropik Gerilme Yükleneşi	61
3.5.3 Yüzen Taneciklerin (Floater) Kaldırılması	62
3.5.4 En Son Numunenin Elde Edilmesi	63
3.6 BİR NUMUNENİN MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ	63
 BÖLÜM 4 DENEYSEL VE ANALİTİK ÇALIŞMALAR	 65
4.1 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI	65
4.2 ANALİTİK ÇALIŞMALAR	68
 BÖLÜM 5 SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI İÇİN SANAL ÖRNEK HAZIRLAMA VE MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ ..	 71
5.1 BOYUTLANDIRILMIŞ TANECİKLERDEN OLUŞAN NUMUNENİN HAZIRLANMA TEORİSİ	 71
5.1.1 3 mm Kesme Derinliğinde Kesme Deneyi Modellemek Üzere Numune Hazırlama	 73
5.1.2 6 mm Kesme Derinliğinde Kesme Deneyi Modellemek Üzere Numune Hazırlama	 81
5.1.3 9 mm Kesme Derinliğinde Kesme Deneyi Modellemek Üzere Numune Hazırlama	 82
5.2 KUMTAŞI-1 KAYACI MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ ...	83

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

5.2.1 3 mm Kesme Derinliği İçin Hazırlanan Numunenin Mikro Özelliklerinin Kalibre Edilmesi	84
5.2.1.1 Prizmatik Numunenin Hazırlanması	85
5.2.1.2 Numunenin Deneye Hazır Hale Getirilmesi.....	86
5.2.1.3 Modelleme Sonuçları	87
5.2.2 6 mm Kesme Derinliği İçin Hazırlanan Numunenin Mikro Özelliklerinin Kalibre Edilmesi	91
5.2.3 9 mm Kesme Derinliği İçin Hazırlanan Numunenin Mikro Özelliklerinin Kalibre Edilmesi	94
5.3 KUMTAŞI-2 KAYACI MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ...	98
5.4 KUMTAŞI-3 KAYACI MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ...	100
5.5 KİREÇTAŞI KAYACI MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ....	101
 BÖLÜM 6 SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	 103
6.1 MODELLEME KOŞULLARININ BELİRLENMESİ	104
6.1.1 Uygun Tanecik Boyutunun Belirlenmesi.....	104
6.1.2 Sınır Koşulların Araştırılması	105
6.1.3 Kalem Uçlu Keskinin Modellenmesi.....	107
6.1.4 Normal ve Kesme Kuvvet Grafiklerinin Çizilmesi	107
6.1.5 Spesifik Enerjinin Hesaplanması.....	108
6.2 BAĞIMSIZ KESME DENEYİNİN TEORİSİ VE MODELLEME SONUÇLARI	108
6.2.1 3 mm Kesme Derinliği İçin Modelleme Sonuçları.....	109
6.2.2 6 mm Kesme Derinliği İçin Modelleme Sonuçları.....	113
6.2.3 9 mm Kesme Derinliği İçin Modelleme Sonuçları.....	115
6.3 MODELLEME ÇALIŞMALARI SONUCU KAYAÇTAN KOPAN KIRINTI VE OLUŞAN MİKRO-ÇATLAKLARIN GÖZLEMLENMESİ	117
6.4 PARAMETRİK ÇALIŞMALAR.....	126
 BÖLÜM 7 SAYISAL MODELLEME SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ...	 129

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
7.1 KESKİ KUVVETLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER KARŞILAŞTIRILMASI ..	132
7.1.1 Ortalama Kuvvet Değerleri Arasındaki İlişkiler	133
7.1.2 Maksimum Kuvvet Değerleri Arasındaki İlişkiler	136
7.2 SPESİFİK ENERJİ DEĞERLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER	141
7.3 KESKİ KUVVETLERİ İLE KAYACIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER.....	147
7.4 PARAMETRİK ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	150
7.4.1 Kesme Hızının Etkisi	150
7.4.2 Kesme Açısının Etkisi.....	152
 BÖLÜM 8 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	 161
8.1 SONUÇLAR.....	162
8.2 ÖNERİLER.....	164
 KAYNAKLAR	 167
BİBLİYOGRAFYA	173
EK AÇIKLAMALAR A. KAYAÇLARIN MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRASYONU SONUCU ÇİZİLEN GRAFİKLER.....	175
EK AÇIKLAMALAR B. KAYAÇ KESME MEKANİZMALARININ PFC ^{3D} ,DE MODELLENMESİ SONUCU ÇİZİLEN KESME KUVVETİ GRAFİKLERİ	185
EK AÇIKLAMALAR C. KAYAÇ KESME MEKANİZMALARININ PFC ^{3D} ,DE MODELLENMESİ SONUCU OLUŞAN MİKRO-ÇATLAK SAYILARININ GÖSTERİLMESİ.....	195
ÖZGEÇMİŞ	207

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Keskilere etkiyen kuvvetlerin bileşenleri.....	2
1.2 Tez çalışması boyunca izlenen akış planı	5
2.1 Kalem uçlu bir keskinin kesme mesafesi.....	8
2.2 Çatlak ilerleme türleri	9
2.3 Kama tipi keski için kesme geometrisi	10
2.4 Dikey (ortogonal) kesme durumunda oluşan kuvvetler.....	10
2.5 Evans'ın çekme çatlağı modeli.....	11
2.6 Kayaç kesme sırasında oluşan gerilme dağılımları ve kesme kuvvetleri	13
2.7 Kalem uçlu keski için kesme geometrisi.....	15
2.8 İçsel basınçlar altındaki boşluk	15
2.9 Kayaç kırıntısının genel geometrisi	16
2.10 Kayaçtaki küçük ve büyük çatlaklar arası mesafelere göre kesme kuvveti eğrisi örnekleri	17
2.11 Kesme kuvvetlerine bağlı olarak çizilen Poisson dağılımı	18
2.12 İTÜ'de kullanılan tam boyutlu kesme seti	20
2.13 CSM'de kullanılan tam boyutlu kesme seti	21
2.14 Kesme setine yerleştirilen bir keski üzerinde etkin olan kesme parametreleri	21
2.15 Bağımsız (etkileşimsiz) kesme türü.....	22
2.16 Bağımlı (etkileşimli) kesme türü	22
2.17 Yenilme modu şekilleri.....	24
2.18 Keski üzerinde düşey (F_Y) ve yatay (F_X) yönde oluşan kesme kuvveti grafikleri....	25
2.19 Kesme deneyini modellemek üzere hazırlanan örnek	26
2.20 25 mm kesme mesafesinden sonra örnekte oluşan kırıntıların görünümü.....	26
2.21 PFC ^{2D} 'de oluşturulan kayaç kesme modeli.....	28
2.22 FLAC ^{2D} 'de oluşturulan kesme modeli.....	28
2.23 Bıçak ile toprak arasındaki etkileşimin genel görünümü.....	29
2.24 Dört farklı bıçağın 25 mm kesme derinliğinde modelleme sonuçları	29
2.25 Kayaç kesme modellemesinde 0.0065 s'de oluşan yenilme türü.....	30

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.26 Kayaç kesme modellemesinde kesme kuvvetinin zamana karşı olan değişimi.....	30
2.27 Kayacın kesilmesiyle meydana gelen kırıntı oluşumu.....	31
2.28 Kesme işleminden elde edilen model çıktıları.....	31
2.29 75° kesme açısında çatlak ilerleme doğrultusu	32
2.30 Kayaç kesme işleminin sayısal modellemesi.....	32
2.31 Keski yerdeğiştirmesinin aşama aşama gösterilmesi	33
2.32 Isı transfer modeli.....	34
2.33 Kazı performansını etkileyen temel parametreler	35
2.34 Kırılgenlik testinde kullanılan deney aleti.....	38
2.35 Sievers'in minyatür delme deney aleti	39
2.36 Norveç aşınma deneyi için kullanılan cihaz	40
2.37 DRI'nın tahmin edilmesinde kullanılan abak	41
2.38 BWI'nın tahmin edilmesinde kullanılan abak	42
3.1 PFC ^{3D} 'de hesaplama döngüsü	47
3.2 Tanecik-tanecik arasındaki temasın genel gösterimi.....	49
3.3 Tanecik-duvar arasındaki temasın genel gösterimi	49
3.4 Kaya malzemesi ince kesiti.....	53
3.5 Taneciklerin bağlanma modelleri	54
3.6 PFC ^{3D} 'de temas bağ kullanılarak hazırlanmış bir örnek kesiti	54
3.7 Paralel bağın silindir şekilli çimentolu malzeme gibi gösterilmesi.....	55
3.8 PFC ^{3D} 'de paralel bağ kullanılarak hazırlanmış bir örnek kesiti.....	55
3.9 Birinci aşama sonrası numunenin genel görünümü.....	61
3.10 Bir numunede yüzen taneciklerin gösterilmesi	62
5.1 Numune dış çerçevesinin genel görünümü	74
5.2 Silindirik duvarların genel görünümü.....	74
5.3 Silindir yarıçapına göre değişen tanecik yarıçaplarının gösterilmesi.....	76
5.4 Silindirik duvarlar arasındaki taneciklerin genel görünümü.....	76
5.5 Silindirik duvarlar kaldırıldıktan sonra oluşan örneğin genel görünümü	77
5.6 Ortalama dengesiz kuvvetin çevrimle olan ilişkisi.....	77
5.7 Ortalama temas kuvvetinin çevrimle olan ilişkisi	78
5.8 Tanecikler üzerindeki hız vektörleri.....	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
5.9 İzotropik gerilmenin taneciklere yüklenmesi	79
5.10 Yüzen taneciklerin (floater) ortadan kaldırılması	79
5.11 3 mm kesme derinliği için hazırlanan numunenin genel görünümü	80
5.12 Silindir yarıçapına bağlı olarak değişen tanecik yarıçaplarının gösterilmesi	81
5.13 6 mm kesme derinliği için hazırlanan numunenin genel görünümü	82
5.14 Silindir yarıçapına bağlı olarak değişen tanecik yarıçaplarının gösterilmesi	83
5.15 9 mm kesme derinliği için hazırlanan numunenin genel görünümü	83
5.16 11*22*11 mm boyutlarındaki prizmatik numunenin genel görünümü	85
5.17 11*22*11 mm boyutlarındaki numunenin ve yükleme başlıklarını modelleme öncesi genel görünümü	86
5.18 Birim deformasyon ölçerler	87
5.19 11*22*11 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	89
5.20 11*22*11 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	89
5.21 17*34*17 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	92
5.22 17*34*17 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	93
5.23 23*46*23 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	96
5.24 23*46*23 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	96
6.1 Modelleme başlangıcında keskiyle etkileşim halindeki tanecikler	105
6.2 Sınır taneciklerinin görünümü	106
6.3 Silindir yarıçapının gösterilmesi	106
6.4 3 mm kesme derinliğinde modelleme öncesi keskinin numune üzerindeki görünümü	109
6.5 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	110
6.6 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	110
6.7 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-zaman grafiği	111

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
6.8 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-zaman grafiği	112
6.9 6 mm kesme derinliğinde çizilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.....	114
6.10 6 mm kesme derinliğinde çizilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	114
6.11 9 mm kesme derinliğinde çizilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	116
6.12 9 mm kesme derinliğinde çizilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	116
6.13 Modelleme sonrası keskinin kayaç üzerindeki genel görünümü	118
6.14 Kayaçta oluşan mikro ve makro çatlaklar	118
6.15 Kumtaşı-1 kayacında (d=3 mm) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları ..	120
6.16 Kumtaşı-1 kayacında (d=3 mm) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları	120
6.17 d=3 mm için yenilme türüne bağlı olarak yapılan karşılaştırma grafikleri	122
6.18 d=6 mm için yenilme türüne bağlı olarak yapılan karşılaştırma grafikleri	122
6.19 d=9 mm için yenilme türüne bağlı olarak yapılan karşılaştırma grafikleri	123
6.20 Keski-kayaç arasındaki etkileşimin gösterilmesi (kumtaşı-1, d=3 mm)	123
6.21 Kesme sonrası oluşan kırıntıların önden görünümü (kumtaşı-1, d=3 mm).....	124
6.22 Kesme sonrası oluşan kırıntıların yandan görünümü (kumtaşı-1, d=3 mm)	124
6.23 Kumtaşı-1 kayacının 6 mm kesme derinliğinde oluşan kırıntılarının önden görünümü	125
6.24 Kumtaşı-1 kayacının 6 mm kesme derinliğinde oluşan kırıntılarının yandan görünümü	125
6.25 Kumtaşı-1 kayacının 9 mm kesme derinliğinde oluşan kırıntılarının önden görünümü	126
6.26 Kumtaşı-1 kayacının 9 mm kesme derinliğinde oluşan kırıntılarının yandan görünümü	126
6.27 Farklı kesme açılarına sahip kalem ucu tipi keskinin kayaç üzerindeki görünümleri	127
7.1 Kumtaşı-1 kayacından elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	131
7.2 Kumtaşı-2 kayacından elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	131
7.3 Kumtaşı-3 kayacından elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	131
7.4 Kireçtaşı kayacından elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	132
7.5 Kesme derinliğine bağlı olarak değişen kesme kuvvet grafikleri	133

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
7.6 Ortalama normal kuvvet açısından laboratuvar ve modelleme çalışmaları arasındaki ilişki	134
7.7 Ortalama kesme kuvveti açısından laboratuvar ve modelleme çalışmaları arasındaki ilişki	134
7.8 Laboratuvar çalışmaları ile sayısal modelleme çalışmaları arasındaki ilişkiler	137
7.9 Evans'ın kesme teorisi ile modelleme çalışmaları arasındaki ilişkiler	137
7.10 Göktan'ın kesme teorisi ile modelleme çalışmaları arasındaki ilişkiler.....	138
7.11 Roxborough ve Liu'nun kesme teorisi ile modelleme çalışmaları arasındaki ilişkiler	138
7.12 Kumtaşı-1 kayacına ait spesifik enerji değişim grafikleri	142
7.13 Kumtaşı-2 kayacına ait spesifik enerji değişim grafikleri	142
7.14 Kumtaşı-3 kayacına ait spesifik enerji değişim grafikleri	143
7.15 Kireçtaşı kayacına ait spesifik enerji değişim grafikleri	143
7.16 Laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmaları arasında spesifik enerji açısından elde edilen ilişki	144
7.17 9 mm kesme derinliğinde laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmaları arasında spesifik enerji açısından elde edilen ilişki.....	144
7.18 Sökülme açısına bağlı olarak kazı yapılan bölge	145
7.19 3 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli basınç dayanımıyla olan ilişkisi.....	147
7.20 3 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli çekme dayanımıyla olan ilişkisi	147
7.21 6 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli basınç dayanımıyla olan ilişkisi.....	148
7.22 6 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli çekme dayanımıyla olan ilişkisi	148
7.23 9 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli basınç dayanımıyla olan ilişkisi.....	149
7.24 9 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli çekme dayanımıyla olan ilişkisi	149
7.25 Farklı kesme hızlarında kesme kuvvetlerindeki değişimi gösteren grafik	151

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
7.26 Farklı kesme hızlarında ortalama kesme kuvvetleri arasındaki ilişki	151
7.27 Farklı kesme hızlarında spesifik enerji değerleri arasındaki ilişki.....	152
7.28 Kumtaşı-1 kayacının kesme kuvvetleri ile kesme açısı arasındaki ilişki	153
7.29 Kumtaşı-2 kayacının kesme kuvvetleri ile kesme açısı arasındaki ilişki	154
7.30 Kumtaşı-3 kayacının kesme kuvvetleri ile kesme açısı arasındaki ilişki	154
7.31 Kireçtaşı kayacının kesme kuvvetleri ile kesme açısı arasındaki ilişki.....	155
7.32 Kumtaşı-1 kayacının kesme açısı ve spesifik enerji arasındaki ilişkisi.....	156
7.33 Kumtaşı-2 kayacının kesme açısı ve spesifik enerji arasındaki ilişkisi.....	157
7.34 Kumtaşı-3 kayacının kesme açısı ve spesifik enerji arasındaki ilişkisi.....	157
7.35 Kireçtaşı kayacının kesme açısı ve spesifik enerji arasındaki ilişkisi	158
A.1 Kumtaşı-2 kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	176
A.2 Kumtaşı-2 kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	176
A.3 Kumtaşı-2 kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	177
A.4 Kumtaşı-2 kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	177
A.5 Kumtaşı-2 kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	178
A.6 Kumtaşı-2 kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	178
A.7 Kumtaşı-3 kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	179
A.8 Kumtaşı-3 kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	179
A.9 Kumtaşı-3 kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	180
A.10 Kumtaşı-3 kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	180

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
A.11 Kumtaşı-3 kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	181
A.12 Kumtaşı-3 kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	181
A.13 Kireçtaşı kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	182
A.14 Kireçtaşı kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	182
A.15 Kireçtaşı kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	183
A.16 Kireçtaşı kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	183
A.17 Kireçtaşı kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	184
A.18 Kireçtaşı kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği	184
B.1 Kumtaşı-2 kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	186
B.2 Kumtaşı-2 kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	186
B.3 Kumtaşı-2 kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	187
B.4 Kumtaşı-2 kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	187
B.5 Kumtaşı-2 kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	188
B.6 Kumtaşı-2 kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	188
B.7 Kumtaşı-3 kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	189

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
B.8 Kumtaşı-3 kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.....	189
B.9 Kumtaşı-3 kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.....	190
B.10 Kumtaşı-3 kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	190
B.11 Kumtaşı-3 kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	191
B.12 Kumtaşı-3 kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	191
B.13 Kireçtaşı kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	192
B.14 Kireçtaşı kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	192
B.15 Kireçtaşı kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	193
B.16 Kireçtaşı kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	193
B.17 Kireçtaşı kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği	194
B.18 Kireçtaşı kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği	194
C.1 Kumtaşı-1 kayacında (6 mm kesme derinliği) normal gerilmeyeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	196
C.2 Kumtaşı-1 kayacında (6 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	196
C.3 Kumtaşı-1 kayacında (9 mm kesme derinliği) normal gerilmeyeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	197
C.4 Kumtaşı-1 kayacında (9 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	197

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
C.5 Kumtaşı-2 kayacında (3 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	198
C.6 Kumtaşı-2 kayacında (3 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	198
C.7 Kumtaşı-2 kayacında (6 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	199
C.8 Kumtaşı-2 kayacında (6 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	199
C.9 Kumtaşı-2 kayacında (9 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	200
C.10 Kumtaşı-2 kayacında (9 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	200
C.11 Kumtaşı-3 kayacında (3 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	201
C.12 Kumtaşı-3 kayacında (3 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	201
C.13 Kumtaşı-3 kayacında (6 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	202
C.14 Kumtaşı-3 kayacında (6 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	202
C.15 Kumtaşı-3 kayacında (9 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	203
C.16 Kumtaşı-3 kayacında (9 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	203
C.17 Kireçtaşı kayacında (3 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	204
C.18 Kireçtaşı kayacında (3 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	204
C.19 Kireçtaşı kayacında (6 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	205

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
C.20 Kireçtaşı kayacında (6 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	205
C.21 Kireçtaşı kayacında (9 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	206
C.22 Kireçtaşı kayacında (9 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.....	206

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Hesaplanan ve ölçülen ortalama kesme kuvvet değerlerinin mukayesesi	16
2.2 Orta ağırlıktaki kollu galeri açma makinasının seçim kriterleri.....	36
2.3 Ağır tip kollu galeri açma makinasının seçim kriterleri	37
2.4 DRI, BWI ve CLI değerlerine göre delinebilirlik/kazılabilirlik sınıflaması	43
3.1 Numune hazırlama sürecini kontrol eden parametreler	59
3.2 Temas bağlı malzemeyi tanımlayan mikro özellikler.....	59
3.3 Paralel bağlı malzemeyi tanımlayan mikro özellikler	60
3.4 Bağımsız malzemeyi tanımlayan mikro özellikler	60
4.1 ZTH'sı kömür çevre kayaçlarının petrografik değerlendirme sonuçları	66
4.2 Kömür çevre kayaçlarının dayanım ve deformasyon özellikleri.....	67
4.3 Bağımsız kesme deneyi sonuçları	67
4.4 Kesme teorilerinden elde edilen maksimum kesme kuvvet değerleri (simetrik kesme koşulları).....	69
4.5 Kesme teorisi ve laboratuvardan elde edilen maksimum kesme kuvvet değerleri (asimetrik kesme koşulları)	70
5.1 % 35 gözeneklilik oranıyla 3, 6 ve 9 mm kesme derinlikleri için hazırlanan numunelerden bazılarının özellikleri	72
5.2 3 mm kesme derinliğinde hazırlanan numunede kullanılan yarıçap aralıkları.....	75
5.3 6 mm kesme derinliğinde hazırlanan numunede kullanılan yarıçap aralıkları.....	81
5.4 9 mm kesme derinliğinde hazırlanan numunede kullanılan yarıçap aralıkları.....	82
5.5 1 no'lu bölgedeki tanecik aralığı için 11*22*11 mm boyutlarındaki numunede elde edilen mikro özellikler.....	88
5.6 Eksenel gerilme–eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme–yanal birim şekil değiştirme grafiklerinde elde edilen veriler	90
5.7 0,25-0,30 mm yarıçaplı taneciklerden oluşturulan numune ve laboratuvarda elde edilen mekanik özellikler	90
5.8 Tüm bölgelerdeki tanecik topluluklarının mekanik davranışları	90

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
5.9 1 no'lu silindirdeki tanecik aralığı için 17*34*17 mm boyutlarındaki numunede elde edilen mikro özellikler.....	91
5.10 Eksenel gerilme–eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme–yanal birim şekil değiştirme grafiğinin orta noktasından (%50) elde edilen veriler	93
5.11 0,40-0,48 mm yarıçaplı taneciklerden oluşturulan numune ve laboratuvarda elde edilen mekanik özellikler	94
5.12 Tüm bölgelerdeki taneciklerin mekanik davranışları.....	94
5.13 1 no'lu silindirdeki tanecik aralığına göre kumtaşı kayacının mikro özellikleri	95
5.14 Eksenel gerilme–eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme–yanal birim şekil değiştirme grafiğinin orta noktasından (%50) elde edilen veriler	97
5.15 0,55-0,66 mm yarıçaplı taneciklerden oluşturulan numune ve laboratuvarda elde edilen mekanik özellikler	97
5.16 Numune içerisindeki taneciklerin mekanik davranışları	98
5.17 Tek eksenli basınç dayanımı deneyin modellenmesi için hazırlanan numunelerde uygulanan geometrik parametreler	98
5.18 Kumtaşı-2 kayacının tüm kesme derinliklerinde kullanılan mikro özellikler	99
5.19 0,55-0,66 mm yarıçaplı taneciklerden oluşturulan numune ve laboratuvarda elde edilen mekanik özellikler	99
5.20 Kumtaşı-3 kayacının tüm kesme derinliklerinde kullanılan mikro özellikler.....	100
5.21 Kumtaşı-3 kayacının modelleme çalışmaları sonucu elde edilen makro özellikleri	101
5.22 Kireçtaşı kayacının tüm kesme derinliklerinde kullanılan mikro özellikler.....	102
5.23 Kireçtaşı kayacının modelleme çalışmaları sonucu elde edilen makro özellikleri ..	102
6.1 Kesme derinliğine bağlı olarak seçilen tanecik yarıçapları	105
6.2 Modelleme ve laboratuvarda uygulanan kesme parametreleri.....	107
6.3 Modelleme çalışmalarından zamana bağlı olarak elde edilen veri sayıları	112
6.4 3 mm kesme derinliğinde belirlenen maksimum normal ve kesme kuvvet değerleri	113
6.5 3 mm kesme derinliğinde hesaplanan ortalama ve maksimum kuvvet değerleri.....	113
6.6 6 mm kesme derinliğinde belirlenen maksimum normal ve kesme kuvvet değerleri	115
6.7 9 mm kesme derinliğinde belirlenen maksimum normal ve maksimum kesme kuvvet değerleri	117
6.8 Kumtaşı-2, kumtaşı-3 ve kireçtaşı kayaçlarının spesifik enerjilerinin hesaplanması.	117

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
6.9 Bağ ve yenilme türüne göre oluşan mikro-çatlak sayıları	119
6.10 Mikro-çatlak sayılarını gösteren grafiklerde kullanılan değişkenler	119
6.11 Temas ve paralel bağların yenilmesiyle oluşan çatlak sayıları.....	121
7.1 Dört kayaç türü üzerinde yürütülen sayısal modelleme çalışmalarının sonuçları.....	129
7.2 Maksimum kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi	130
7.3 Ortalama normal ve kesme kuvvetlerinin t testi sonuçları.....	135
7.4 Ortalama normal ve kesme kuvvetlerinin F (ANOVA) testi sonuçları	135
7.5 Bağımsız gruplarda t testi sonuçları	136
7.6 Sayısal modelleme, teorik bağıntılar ve laboratuvar çalışmalardan elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin t testi sonuçları	139
7.7 Sayısal modelleme, teorik bağıntılar ve laboratuvar çalışmalardan elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin F (ANOVA) testi sonuçları.....	139
7.8 Maksimum kesme kuvvetleriyle bağımsız gruplarda yapılan t testi sonuçları	141
7.9 Laboratuvar ve PFC ^{3D} ,den hesaplanan spesifik enerji değerleri.....	141
7.10 Sayısal modelleme ve laboratuvar çalışmalardan elde edilen spesifik enerji değerlerinin t testinden belirlenen sonuçları	145
7.11 Sayısal modelleme ve laboratuvar çalışmalardan elde edilen spesifik enerji değerlerinin F (ANOVA) testi sonuçları.....	146
7.12 Kesme hızına bağlı olarak değişen ortalama kesme kuvvetleri	150
7.13 PFC ^{3D} ,de farklı kesme açılarında elde edilen keski kuvvetleri	153
7.14 PFC ^{3D} ,de farklı kesme açılarında elde edilen spesifik enerji değerleri.....	156

EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
A Kayaçların Mikro Özelliklerinin Kalibrasyonu Sonucu Çizilen Grafikler	175
B Kayaç Kesme Mekanizmalarının PFC ^{3D} 'de Modellenmesi Sonucu Çizilen Kesme Kuvveti Grafikleri	185
C Kayaç Kesme Mekanizmalarının PFC ^{3D} 'de Modellenmesi Sonucu Oluşan Mikro-çatlak Sayılarının Gösterilmesi	195

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AV	:	Norveç aşınma değeri
AVS	:	çelik uçtaki aşınma değeri
BWI	:	uç aşınma indeksi
CLI	:	keski ömrü indeksi
d	:	kesme derinliği
DRI	:	delme oranı indeksi
E	:	Young modülü
FC	:	ortalama kesme kuvveti
FC'	:	en yüksek kesme kuvveti
FN	:	ortalama normal kuvvet
FN'	:	en yüksek normal kuvvet
K^n	:	tanecik normal katılığı
k^s	:	tanecik kayma katılığı
n_i	:	birim normal vektör
PB	:	paralel bağ
Q	:	kesilen kayacın hacmi
R	:	tanecik yarıçapı
s	:	keskiler arası mesafe
SE	:	spesifik enerji
SJ	:	Sievers'in minyatür delme değeri
TB	:	temas bağ
U^n	:	taneciklerin birbiri üzerine binme mesafesi
v	:	kesme hızı
w	:	keski genişliği
σ_c	:	tek eksenli basınç dayanımı
σ_t	:	tek eksenli çekme dayanımı
α	:	kesme açısı
ϕ	:	keski açısı

Ψ : kayaç ve keski arasındaki sürtünme açısı
 ν : Poisson oranı

KISALTMALAR

CIMNE : International Center for Numerical Methods in Engineering
CSM : Colorado School of Mines
DEM : Discrete Element Method
FLAC : Fast Lagrangian Analysis of Continua
İTÜ : İstanbul Teknik Üniversitesi
NTNU : Norwegian University of Science and Technology
PFC^{3D} : Particle Flow Code in 3 Dimensions
TTK : Türkiye Taşkömürü Kurumu
ZTH : Zonguldak Taşkömürü Havzası

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kazı, kayaçların içerisinde farklı amaçlara yönelik açıklık oluşturulması için yapılan çalışmalar olup fiziksel ve jeolojik koşullardan etkilenen karmaşık bir süreçtir. Madencilik ve inşaat sektöründe gerek hazırlık-üretim ve gerekse de nakliyat amaçlı galeri, tünel, vb. kazılar yapılmaktadır. Bu kazılar oldukça fazla zaman ve ağır işçilik gerektiren işlerdir.

Kazı işleri; el aletleri, makina veya patlayıcı madde ile yapılabilir. Galeri veya tüneller açmak için madencilik ve tünelcilikte yapılan kazıların hızlı ve emniyetli bir şekilde yürütülebilmesi mekanize tünel açma sistemleriyle (makinayla) başarılı bir şekilde sağlanabilir. Bu sayede hem randımanlar artar ve hem de daha ekonomik kazı yapma olanağı ortaya çıkar. Mekanize kazıda ilk kullanılan potkopaç makinalarından başlayarak günümüze kadar çok hızlı gelişen bir kazı makinası teknolojisi vardır. Özellikle kömür madenciliğinde yılda kilometrelerce galerilerin açıldığı ve artan nüfusla birlikte genişleyen ulaşım ve metro tünelleri göz önüne alındığında bu makinaların kullanımının ne kadar büyük bir ihtiyaç olduğu ortaya çıkmaktadır.

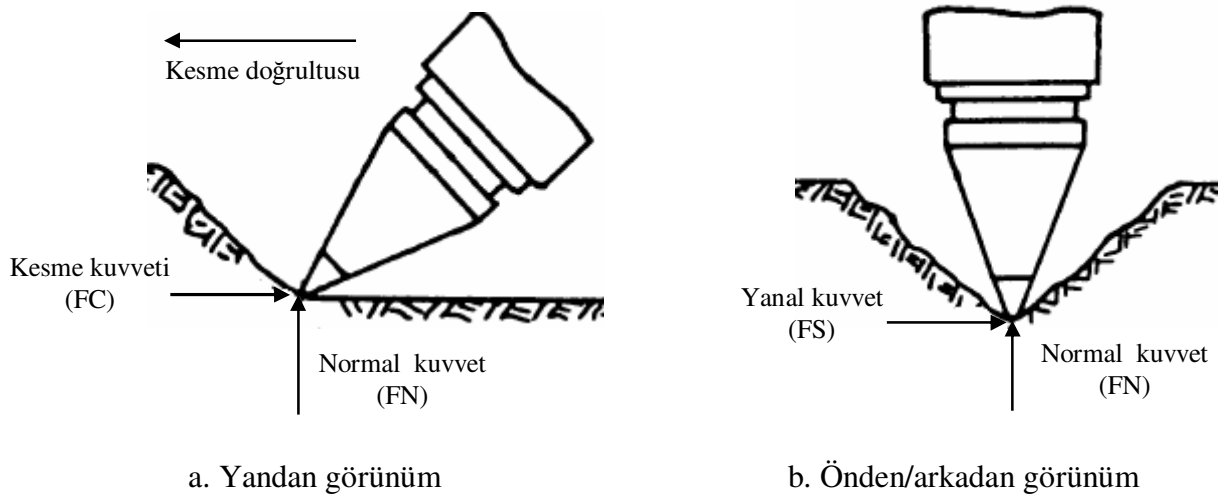
Kazı işine başlamadan önce kayacın fiziksel, mekanik ve jeolojik özelliklerine göre uygun bir makina seçimi yapılır. Bu makinanın seçimi ve performansının önceden tahmin edilmesi, mekanize tünel açma işinin en önemli aşamasıdır. Makinaların satın alınması, kurulması ve çalışılacak sahaya getirilmesi oldukça pahalı ve yatırım gerektiren işler olduğu için makina seçiminin dikkatli ve özenli bir şekilde yapılması gerekir. Bu amaçla laboratuvarında bir dizi deney yapılarak kayacın kazılabilirliği belirlenir ve uygun bir keski tipi belirlenerek makina seçimine geçiş yapılır.

Mekanize kazı makinaları temel olarak kesici bir kafa, makina ana gövdesi ve pasa toplama ünitelerinden oluşmaktadır. Makinanın kullanılacağı formasyona uygun olarak farklı kesici

kafalar bulunmaktadır. Bunlar, kullanılan keski türü ve kesici kafanın geometrisine göre birbirlerinden ayırt edilirler. Makinanın itme gücüyle birlikte kesici kafa üzerindeki keski basıncı, çekme ve kayma gerilmeleriyle kayacı parçalarlar ve yerinden kopartırlar. Günümüzde makina güçlerindeki artış, bu makinelerin oldukça sert (tek eksenli basınç dayanımı 200 MPa'a kadar) formasyonlarda dahi kazı yapmalarını mümkün hale getirmiştir.

Bir kazı makinasında keskinin kayaca batmasıyla birlikte, kayacın içerisinde aşırı yüksek gerilmelerden dolayı keski ucu altında ezilmiş bir bölge oluşur. Bu gerilmeler ezilmiş bölgede basınç ve çekme çatlaklarının başlamasına ve kaya kütlesi içerisinde doğru ilerlemesine neden olur. Ezilmiş bölgedeki gerilmeler çok yüksek olduğunda bir veya daha fazla sayıda çatlak bir diğer keskinin neden olduğu çatlakla doğru ilerler. Böylece keski etrafında bir rahatlatma bölgesi oluşur (Pickering et al. 2006). Keski bu bölgedeki kayacın parçacıklarını ve kırıntılarını yerinden çıkartır. Bu süreç boyunca keski üzerinde bir takım kuvvetler meydana gelir. Kazı bölgesinden çıkan kırıntıların boyutları bu kuvvetlerin büyüklüğünü belirler. Keskinin kayaca batmasıyla birlikte keski üzerinde rol oynayan kuvvetler yükselmeye başlar ve kırıntı yerinden koptuğu an hızlı bir şekilde en düşük değere düşer. Daha sonra, yeni bir kırıntı oluşuncaya kadar düzgün olarak yükselmeye devam eder. Eğer oluşan kırıntıların boyutları çok büyükse yüksek kuvvetler, çok küçükse de düşük kuvvetler harcanır (Ranman 1985).

Bu kuvvetler Şekil 1.1'de gösterildiği üzere birbirine dik üç farklı yönde etki ederler. Bunlar; kesme doğrultusunda etkiyen kesme kuvveti (FC), kesme doğrultusuna dik yönde etkiyen normal kuvvet (FN) ve FC ile FN'nin bulunduğu düzleme dik olarak etkiyen yanal kuvvettir (FS) (Tiryaki ve Hekimoğlu 1998).



Şekil 1.1 Keskilere etkiyen kuvvetlerin bileşenleri (Tiryaki ve Hekimoğlu 1998).

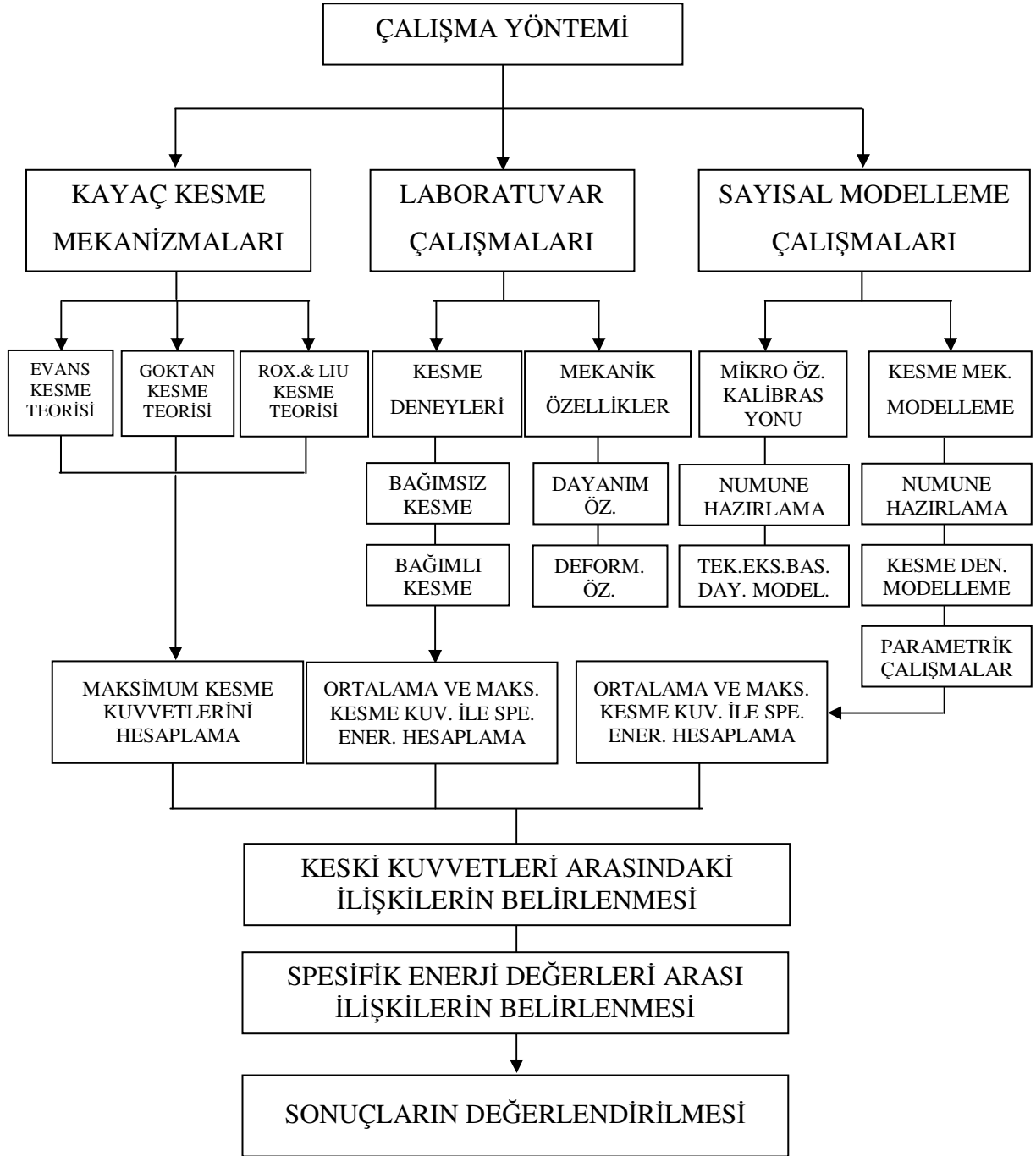
Bir kazı makinasından yüksek verim ve randıman elde edebilmek, kesici kafasının ihtiyacı olan gücü belirlemek ve optimum ilerleme hızlarını doğru tahmin edebilmek için bu kuvvetlerin kesin ve doğru bir şekilde hesaplanması gerekir. Böylece kaya birimine uygun bir kazı makinası seçimi de oldukça kolay olacaktır.

Keski üzerinde rol oynayan kuvvetlerden kesme doğrultusunda etkiyen kesme kuvveti (FC) geçmişten günümüze kadar çeşitli araştırmacıların ortaya koyduğu kayaç kesme kuramlarıyla tahmin edilebilir. Ayrıca, laboratuvarla doğrusal kesme setinde yürütülen bağımlı (etkileşimli) ve bağımsız (etkileşimsiz) kesme deneylerinden de belirlenmektedir. Bunun yanı sıra, ilerleyen teknolojiyle birlikte geliştirilen çeşitli bilgisayar programları veya sayısal yöntemler de kullanılmaktadır.

Kuramsal yöntemlerle hesaplanan kesme kuvvetleri uygulamada belirlenen değerlerden farklı çıkabilmektedir. Bunun temel nedenleri; kayacın petrografik ve anizotropik doğası, bünyesindeki gerilme dağılımları, keski geometrisi, uygulanan kesme parametreleri ve kesme koşullarındandır. Laboratuvarla yürütülen deneysel çalışmalarda gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmektedir. Sayısal yöntemlerle geliştirilen programlardan elde edilen kesme kuvvetleri ise daha kısa zamanda ve daha hızlı bir tahmin yapma olanağı sağlamaktadır. Günümüzde bu amaçla kullanılan çok çeşitli bilgisayar programları vardır. Particle Flow Code in 3 Dimensions (3-Boyutlu Tane Akış Yazılımı, PFC^{3D}) bu programlar arasında yaygın olarak kullanılan güçlü bir modelleme aracıdır. PFC^{3D} sayısal çözümleme yöntemlerinden ayrık elemanlar yöntemini kullanarak modelleme yapmaya olanak sağlar. Bu sayede kayaç bünyesinde bulunan gözenekler, çatlaklar, eklemler, süreksizlikler vb. bütün yapısal özellikler göz önüne alınabilir. Yani, modelleme yapılan ortam sürekli değildir.

Bu çalışma kapsamında; dört değişik kayacın (kumtaşı-1, kumtaşı-2, kumtaşı-3, kireçtaşı) üç farklı kesme derinliğinde (3, 6 ve 9 mm) bir konik keski ile etkileşimsiz olarak kesilmesi işlemleri PFC^{3D} ile sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal modellerin sonuçlarının İTÜ Maden Mekanizasyonu ve Kazı Teknolojisi Laboratuvarları'nda yapılan deneysel sonuçlarla ilişkisi istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu bağlamda ilk bölümde kayaç kesme işleminin önemi ve kesme sırasında keski üzerinde oluşan kuvvetler tanıtılmıştır. İkinci bölümde; kayaç kesme mekanizmaları ve bir kazı makinasının performansının tahmin edilmesi için geliştirilmiş yöntemler sunulmuştur. Üçüncü bölümde; PFC^{3D} programındaki tanecikler arası etkileşimin teorisi verilmiş, bir model hazırlanması için gerekli adımlar anlatılmış ve sanal bir örneğin

mikro özelliklerinin kalibre edilme yöntemi verilmiştir. Dördüncü bölümde; kalem ucu tipi bir keskiyle yapılan kesme deneyleri ve çeşitli araştırmacıların geliştirdiği bağıntılardan yararlanarak maksimum kesme kuvvet hesaplamaları yapılmıştır. Beşinci bölümde; sayısal modelleme çalışmaları için gerekli numune hazırlama teknikleri verilmiş, 3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde kullanılan yapay numunelerin geometrileri, tanecik boyut dağılımları ve kalibrasyon sonucu elde edilen mikro özellikleri sunulmuştur. Altıncı bölümde; kayaç kesme deneyinin sayısal modellenmesi sonucu elde edilen kuvvet grafikleri, kırıntı ve mikro-çatlak oluşumları incelenmiştir. Yedinci bölümde; öncelikle sayısal modelleme sonuçlarının genel bir değerlendirmesi yapılmış, daha sonra keski kuvvetleri ve spesifik enerji değerlerinin deneysel ve teorik çalışmalarla olan ilişkileri araştırılmıştır. Ayrıca, bu ilişkiler istatistiksel olarak yapılan regresyon analizleriyle desteklenmiştir. Sekizinci bölümde de tüm çalışmaların sonuçları verilmiş ve öneriler sunulmuştur. Doktora tez çalışması boyunca izlenen akış planı Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Tez çalışması boyunca izlenen akış planı.

BÖLÜM 2

KAYAÇ KESME MEKANİZMALARI VE PERFORMANS TAHMİN YÖNTEMLERİ

Kayaç kesme mekanizmaları 1862 yılında İngiliz kömür havzasında kullanılmak üzere geliştirilen makinalarla gündeme gelmiştir. 1950’li yılların başlarında çok az ülkede keski üzerindeki kesme kuvvetleriyle ilgili deneysel çalışmalar başlamıştır. 1950’li yılların sonlarında birkaç araştırmacı keski açısı, kesme hızı ve aşırı basıncın, keski kuvvetleri üzerindeki etkilerini tartışmaya başlamıştır. 1960’lı yıllardan itibaren İngiltere’deki Maden Araştırma ve Geliştirme Kurumu (MRDE) kömür kesme üzerinde laboratuvar deneyleri yürütmeye başlamıştır (Nishimatsu 1993). Daha sonra birçok araştırmacı tarafından farklı kayaç kesme teorileri (mekanizmalar) geliştirilmiş ve kuramsal modeller olarak literatürde yer almıştır. Bu modellerde; kayacın basınç, çekme ve kesme dayanımları ile içsel sürtünme açıları dikkate alınarak kayaç ile keski arasındaki etkileşim iki veya üç boyutlu olarak incelenmektedir.

Kayaç kesme mekanizmaları veya laboratuvar çalışmalarından belirlenen kesme kuvvetleriyle kayacın kazılabilirliği hakkında bir fikir sahibi olunur. Böylece bir kazı makinasının performansı da tahmin edilebilir.

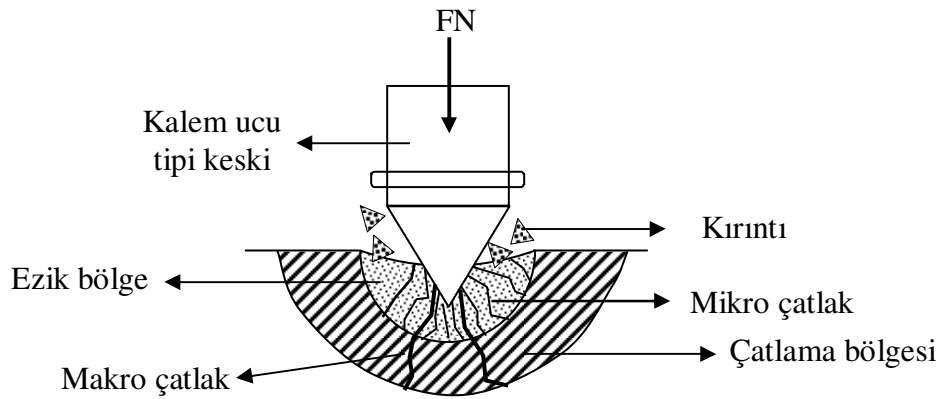
Yeraltında çalışan bir kazı makinası performansının önceden tahmin edilmesi ve buna bağlı olarak uygun bir makina seçimi madencilik ve tünelcilikte uygulanmakta olan en temel süreçlerdendir. Kayacın yumuşak veya sert olmasına göre seçilecek makinanın ağırlığı ve gücü önem kazanır. Keskiler, çeşitli kesme parametrelerine göre kesici kafa üzerinde konumlandırılırlar. Bu konumlandırma ne kadar doğru yapılırsa, makinada o kadar az titreşim ve toz oluşur. Ayrıca, kayacın aşındırıcılığı, petrografik özellikleri ve mekanik (dayanım, deformasyon ve indeks) özelliklerinin de performans ve makina seçimi üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Dolayısıyla bir makina seçimi yapılırken birçok parametre göz önünde bulundurulur ve bu parametrelere bağlı olarak kayacın kazılabilirliği belirlenir. Tüm bu

aşamalar sistematik ve programlı bir laboratuvar çalışmasıyla kazı makinası seçiminde önemli bir başarı sağlayacaktır.

Bu bölümde; öncelikle kazı mekaniğinde önemli rol oynayan kayaç çatlama türleri tanıtılmıştır. Daha sonra, çeşitli araştırmacıların kama ve kalem ucu tipi keski için geliştirdiği kayaç kesme teorileri verilmiştir. Bunun yanında; laboratuvar şartlarında bir keski üzerinde rol oynayan kuvvetleri ölçmek için kullanılan küçük ve büyük ölçekli doğrusal kesme setlerine değinilmiştir. Ayrıca, sayısal modelleme yöntemleri veya çeşitli bilgisayar programları yardımıyla kayaç kesme işleminin modellenmesine yönelik yapılan çalışmalar verilmiştir. En son olarak, bir kazı makinasının performansının önceden kestirimine yönelik geliştirilen yöntemler tanıtılmıştır.

2.1 KAYAÇ ÇATLAMA TÜRLERİ

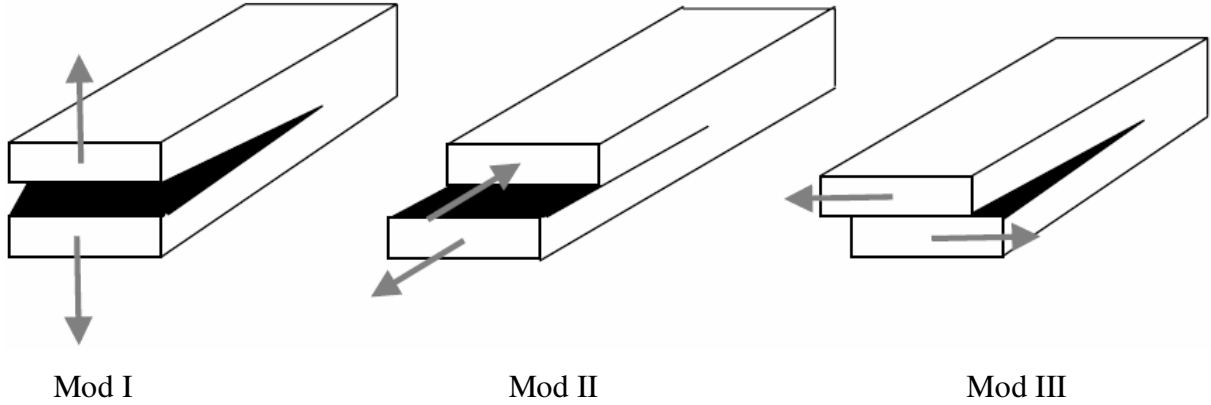
Bir keskinin kayaca battığı noktada, keski etrafında meydana gelen yüksek gerilmelerden dolayı ezik bir bölge oluşturur. Keskinin hareketi ile birlikte keski etrafında mikro çatlaklar ilerlemeye başlar. Bu çatlaklar birleşerek makro çatlakları oluşturur ve keski etrafında bir rahatlama (çatlama) bölgesi meydana gelir. Bu rahatlamayla birlikte ana kayadan kırıntılar kopar (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Kalem uçlu bir keskinin kesme mesafesi (Whittaker et al. 1992).

Keskinin kayaç üzerinde hareketi sırasında, gerilme dağılımlarına bağlı olarak ilerleyen çatlaklar kayacın yenilmesine neden olur. Kazı sırasında kayacın bünyesinde oluşan bu çatlaklar, çatlak mekaniğinde tanımlanan 3 farklı türde ilerlemektedir (Şekil 2.2). Keskinin kayaç üzerindeki pozisyonuna göre çatlak ilerleme modları değişmektedir.

- Mod I; açılma (yada çekme) modu olarak tanımlanır ve çatlak ucu normal gerilmelere maruz kalır. Çatlak ucu karşılıklı yüzeyleri birbirine ters yönde hareket ederler.
- Mod II; kayma (makaslama) modudur ve yüzeyler ters yönde yanlara doğru birbirini üzerinde kayarak hareket ederler.
- Mod III; yırtılma modu olarak tanımlanır. Çatlak düzlem dışı bir kayma gerilmesine maruz kalır. Yüzeyler çatlak ucu çizgisine paralel olarak hareket ederler (Whittaker et al. 1992).



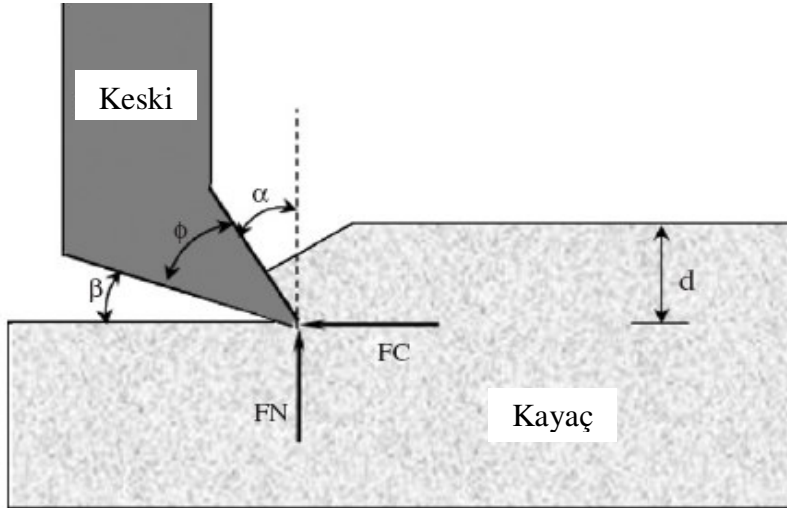
Şekil 2.2 Çatlak ilerleme türleri (Park 2006).

Her çatlak modu farklı bir gerilme alanına karşılık gelir. Çatlak modları tek tek ya da herhangi iki tanesinin birleşimiyle karışık modu oluştururlar. Mod I çoğu durumda karşılaşılan, analiz ve uygulaması en kolay olan çatlak modudur. Çatlak mekaniğindeki birçok çalışma Mod I üzerinde yoğunlaşmıştır (Whittaker et al. 1992, Park 2006).

2.2 KAMA TİPİ KESKİLER İÇİN GELİŞTİRİLEN KESME TEORİLERİ

Teknolojik açıdan kayaç kesme teorileri; kayaç özellikleri, keski geometrisi ve çeşitli parametrelerin analitik işlevi olarak keski kuvvetlerinin kestirimi için kullanılır. Bu koşulu elde etmek üzere her kuram kayacın yenilme ölçütü hakkında uygun varsayımlar ve bilgi birikimi gerektirir (Nishimatsu 1993).

Kama tipi bir keskinin genel görünümü Şekil 2.3'te gösterilmiş ve bu tür keski için geliştirilmiş olan kesme teorileri aşağıda verilmiştir.

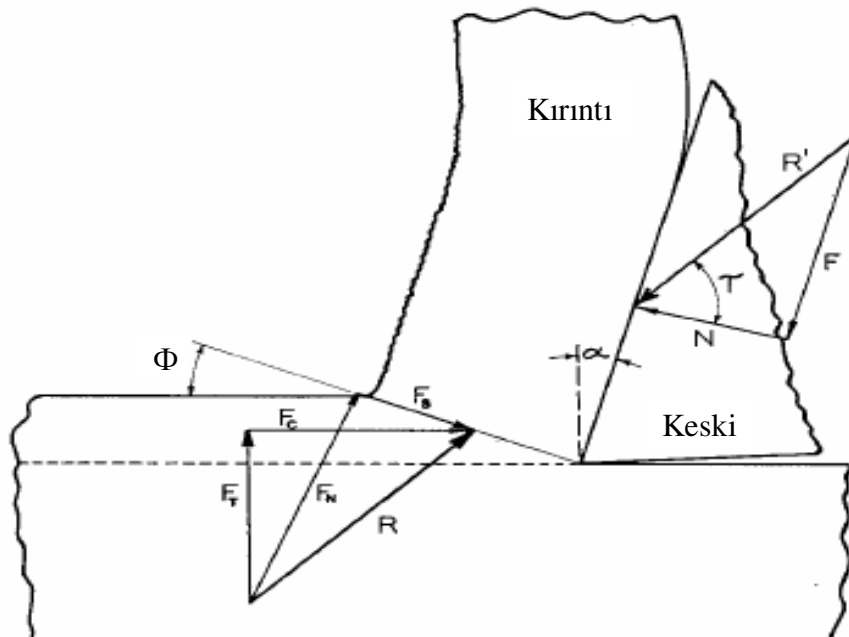


Şekil 2.3 Kama tipi keski için kesme geometrisi (Yılmaz et al. 2007).

Burada; α ; kesme açısı ($^{\circ}$), ϕ ; keski açısı ($^{\circ}$), β ; temizleme açısı ($^{\circ}$), FN ; ortalama normal kuvvet (kN), FC ; ortalama kesme kuvveti (kN)'dir.

2.2.1 Merchant'ın Kesme Teorisi

Kama tipi keski için yapılan ilk araştırma Merchant (1945) tarafından negatif ve pozitif kesme açısına sahip tungsten karbit uçlarla metal kesme sırasında oluşan kırıntının geometri ve kuvvet sistemlerinin analizi için yapılmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Dikey (ortogonal) kesme durumunda oluşan kuvvetler (Merchant 1945).

Yenilmeye neden olan gerilme keskinin ucundan başlayıp numunenin üst yüzeyine doğru uzayan bir makaslama düzlemi boyunca oluşur ve buna göre elde edilen kesme kuvveti Eşitlik 2.1'den bulunur (Nishimatsu 1993).

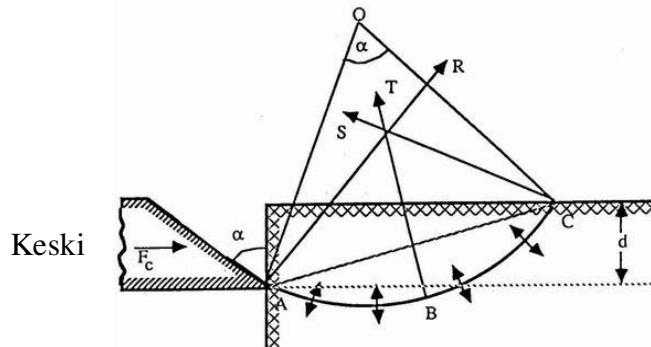
$$FC' = \tau \cdot w \cdot d \cdot \frac{\cos (\psi - \alpha)}{\sin \Phi \cdot \cos (\Phi + \psi - \alpha)} \quad (2.1)$$

Burada; FC' = ortalama pik (en yüksek) kesme kuvveti,
 τ = kayacın kesme dayanımı,
 w = keski genişliği,
 d = kesme derinliği,
 Ψ = keski-kayaç arasındaki sürtünme açısı,
 α = kesme açısı,
 Φ = makaslama açısı'dır.

2.2.2 Evans'ın Kesme Teorisi

İlk kaya kesme teorileri, İngiliz Ulusal Kömür İdaresi'nde (NCB) Evans tarafından ortaya atılmıştır. Evans (1962), keski tarafından harcanan kesme kuvvetlerini; kesme karakteristiklerinden (kesme açısı, keski genişliği, kesme derinliği) ve kömürün dayanım karakteristiğinden (çekme dayanımı) hesaplar.

Kayacın çekme dayanımı ile yenilmesine dayanan kesme teorisine göre kayaç ile keski arasındaki sürtünme katsayısı göz önüne alındığında kömür ve orta sert kayaçlarda gerçeğe yakın değerler verdiği görülmüştür (Bilgin 1989). Şekil 2.5'te görüldüğü gibi belirli kesme derinliği (d) ve kesme açısı (α) ile kayaca batırılan keski, ABC yayı boyunca kayaçta bir çekme çatlağı oluşturmaktadır. Daha sonra, keski üzerinde oluşan maksimum kesme kuvveti (FC') Eşitlik 2.2'den hesaplanmaktadır (Whittaker et al. 1992).



Şekil 2.5 Evans'ın çekme çatlağı modeli (Evans 1962, Whittaker et al. 1992).

$$FC' = \frac{2 \cdot \sigma_t \cdot d \cdot w \cdot \sin \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)}{1 - \sin \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)} \quad (2.2)$$

Burada; σ_t = kayacın tek eksenli çekme dayanımı'dır.

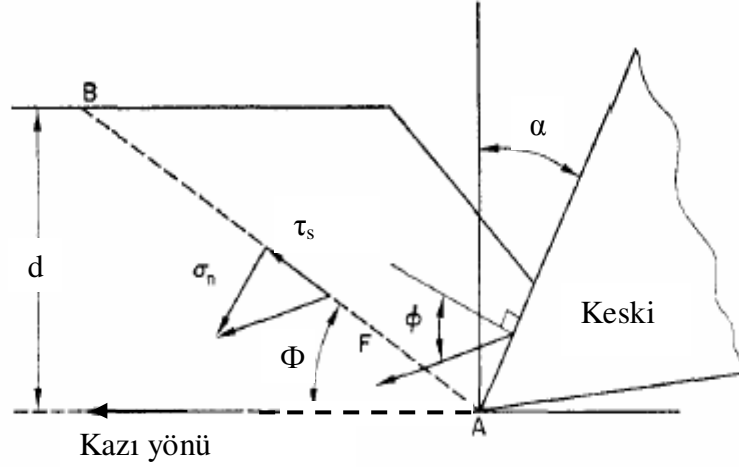
Evans ve Pomeroy (1966), teorik olarak elde ettikleri bu eşitliği deneysel çalışmalarla kıyaslamışlardır. Bu amaçla aşağıda verilen kısıtlamalara zaman zaman dikkat çekilmiştir :

- Bazı zeminlerde 2 boyutlu uygulamalar yapılmıştır.
- Teorik çalışmalarda keskinin farklı atak (dalma) açılarında malzemenin düzenli (uniform) değişen özellikleriyle ilgilenilmiş, dolayısıyla çatlaklar, yataklanma düzlemleri ve diğer zayıflıkların etkisi ihmal edilmiştir.
- Pratikte kullanılan keski, kesme hattı boyunca simetrik değildir ve daha çok metal kesmede kullanılan keskilere benzemektedirler. Bu nedenle asimetric durumlarda keski ilerlemiş olsa bile bazen uç açısının yarısının alındığı kabul edilmiştir.

Ayrıca, Merchant ve Evans'ın kesme teorileri arasında da mukayese yapılmış ve Evans'ın çekme dayanımına dayalı çekme teorisinde keski açısına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde daha hızlı bir artış olduğu ortaya çıkmıştır (Evans and Pomeroy 1966).

2.2.3 Nishimatsu'nun Kesme Teorisi

Nishimatsu (1972), kama tipi bir keskiyle, keski genişliğinin kesme derinliğinden çok daha büyük olduğunu varsayarak, kayaç kesme mekaniğini iki boyutlu bir problem haline indirmiştir. Şekil 2.6'da gösterildiği üzere kayaç üzerinde AB düzlem hattı boyunca gerilme dağılımı oluşturduğu varsayılmıştır. Bu gerilmeler öncelikle A noktasında keskinin ucunda toplandığı ve A noktasından B noktasına doğru gidildikçe bileşke gerilmenin azaldığı varsayılmıştır.



Şekil 2.6 Kayaç kesme sırasında oluşan gerilme dağılımları ve kesme kuvvetleri (Nishimatsu 1972).

Burada σ_n ; normal gerilme, τ_s ; kayma gerilmesi'dir.

Nishimatsu (1972) yaptığı araştırmalar ve bazı varsayımlar sonucunda Eşitlik 2.3'te verilen kayaç kesme bağıntısını elde etmiştir.

$$FC' = \frac{2}{n+1} \cdot \tau \cdot d \cdot \frac{\cos(\omega)}{1 - \sin(\omega - \alpha + \psi)} \quad (2.3)$$

Burada; n= gerilme dağılım çarpanı,
 ω = kayacın içsel sürtünme açısı'dır.

Daha sonra bu bağıntının doğruluğunu kanıtlamak üzere, farklı kesme açıları altında birkaç farklı ortogonal keski türüyle kesme deneyleri yürütmüştür. Buna göre; sürtünme açısının kesme açısına bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, gerilme dağılım çarpanı, teoride olduğu gibi örneğin mekanik özelliklerine bağımlı olmayıp, sadece kesme açısına bağlıdır. Bunun yanında keski üzerindeki kırılma yüzeyi kırılma bölgelerinde önemli olup, pratikte keski kuvvetlerinin hesaplanmasında ihmal edilmemelidir (Nishimatsu 1972) .

2.2.4 Roxborough'un Kesme Teorisi

Roxborough (1973), Evans'ın kayaç kesme teorisi üzerinde çalışmış ve birtakım uyarlamalar yapmıştır. Kömürden farklı kayaçlar üzerinde daha geniş bir alanda aynı sonuçların elde edildiğini göstermiştir.

Ayrıca, bir keski kayacı keserken keskinin her iki yanında belirli miktarda parça koptuğunu ortaya koymuştur. Keskinin daha derinlere girdikçe, keski etrafındaki parça miktarları da artmaktadır. Kopan parçaların boyutları her ne kadar düzensiz şekiller oluştursa da, kazı hacminden yola çıkarak ortalama bir sökülme (patlama) açısını hesaplamak mümkün olmuştur. Roxborough (1973), tüm kesme derinliklerinde sökülme açısının sabit kaldığını göz önüne alarak, spesifik enerjinin kazı verimi üzerindeki etkisini de araştırmış ve Eşitlik 2.4'te verilen bağıntıyı geliştirilmiştir.

$$SE = \frac{FC'}{w \cdot d + d^2 \cdot \tan \theta} \quad (2.4)$$

Burada; SE= spesifik enerji,
FC'= ortalama pik kesme kuvveti,
θ= sökülme (patlama) açısı'dır.

2.2.5 Gökten'in Evans Kesme Teorisi Üzerindeki Uyarlaması

Kama tipi keski için bulunan tüm bu teoriler sonucu, kayaç kesme işleminin sayısal çözümlemesinin oldukça karmaşık olduğu ve bazen problem üzerinde yapılan sadeleştirmeler nedeniyle doğru olmayan tahminlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Böyle durumlarda yarı-analitik veya görgül kestirim modellerinin kullanımı yaygın bir pratik yöntemdir. Bu bağlamda Gökten (1995) tarafından Eşitlik 2.5'te verilen yarı-analitik bir model geliştirilmiştir. Bu model, tek eksenli basınç dayanımı yaklaşık 80-180 MPa arasındaki kayaçların kazısında kullanılan kama tipi keski üzerinde rol oynayan kesme kuvvetlerini tahmin etmek üzere geliştirmiştir. Ayrıca Eşitlik 2.5'te $A = 0,80 - 0,01 \cdot (\sigma_c / \sigma_t)$ olarak alınmıştır. (Yılmaz et al.'dan 2007).

$$FC' = \frac{A \cdot \sigma_c \cdot d \cdot w}{\sin (90 - \alpha) + \cos (90 - \alpha)} \quad (2.5)$$

Burada; σ_c = kayacın tek eksenli basınç dayanımı'dır.

2.3 KALEM UÇLU KESKİLER İÇİN GELİŞTİRİLEN KESME TEORİLERİ

Galeri açma makinaları, kesici yükleyiciler ve sürekli kazıcılarda yaygın olarak kullanılan kalem uçlu keski kama tipi keskilere göre biraz daha sert kayaçlarda kullanılırlar. Keskinin ucu tungsten karbit, gövdesi de sertleştirilmiş çelikten yapılır. Keski sapının silindirik olması nedeniyle keski yuvası içinde rahatça dönebilmekte, böylece keski aşınması (körlenme)

2.3.1 Evans'ın Kesme Teorisi

A schematic diagram of a circular hole of radius a in a plate under tension. The plate is represented by a horizontal line at the top. A vertical dashed line represents the center of the hole. The distance from the top edge to the center of the hole is labeled d . The hole is a circle with radius a , indicated by a horizontal double-headed arrow at the bottom. The angle between the vertical dashed line and the boundary of the hole is labeled ϕ . Arrows radiate from the hole, representing the stress field.

15

Evans'a (1984) göre kayacı koparmak için gereken kesme kuvveti Eşitlik 2.6'dan hesaplanmaktadır.

$$FC' = \frac{16 \cdot \pi}{\cos^2(\phi/2)} \cdot \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right) \cdot \sigma_t \cdot d^2 \quad (2.6)$$

Burada; ϕ = keski açısı'dır.

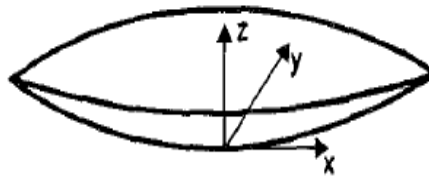
Evans (1984), teoride elde ettiği bu eşitliği Hurt ve Evans (1981)'in Grindleford kumtaşları için verdiği sayısal değerlerden yararlanarak bir mukayese yapmıştır. Buna göre kumtaşı kayacının tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) 45 MPa, tek eksenli çekme dayanımı (σ_t) 2,9 MPa, keski açısının yarısı 38° alınmıştır. Farklı kesme derinliklerinde elde ettiği ortalama kesme kuvveti ve deneysel çalışmalardan ölçülen kesme kuvvetleri arasındaki mukayese Çizelge 2.1'de verilmiştir. Sonuç olarak, hesaplanan ve ölçülen kuvvet değerlerinin hemen hemen birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.1 Hesaplanan ve ölçülen ortalama pik kesme kuvvet değerlerinin mukayesesi (Evans 1984).

Kesme derinliği (mm)	Hesaplanan pik kesme kuvveti (kN)	Ölçülen ortalama pik kesme kuvveti (kN)
25	9,4	11
17,5	4,6	6,5
10	1,5	4

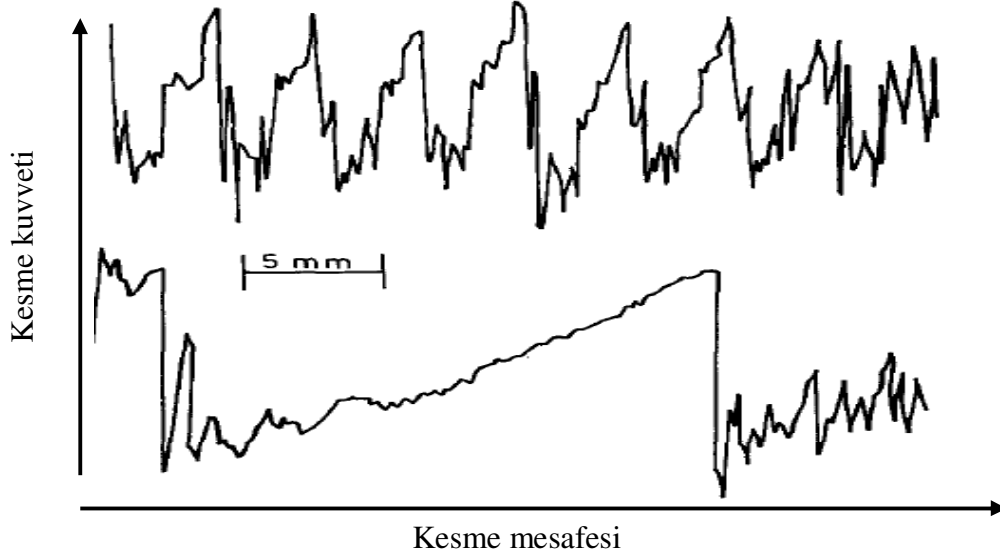
2.3.2 Ranman'ın Kesme Teorisi

Ranman (1985), kesme sırasında meydana gelen kayaç parçalarının (kırıntı) geometrisi üzerinde durmuştur. Kırıntının şekli her zaman aynı olmamakla birlikte, kırıntının boyu kesme derinliği ve keskiler arası mesafeye göre sınırlandırılmaktadır. Kesme sonucu ortaya çıkan parçayı tanımlamak için kırıntı koordinat sistemine yerleştirilir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Kayaç kırıntısının genel geometrisi (Ranman 1985).

Kırıntının küçük veya büyük boyutlu olması kesme kuvvetlerindeki değişim ile ilişkilidir ve kırıntının boyu kayaç kesme sırasında oluşan pik kesme kuvvetleri arasındaki zamana bağlıdır. Kayaçın her bir kırıntısının tamamen kopma anları (veya kazılma mesafeleri) arasındaki zaman, kayaçın kesme kuvvetlerine bağlı olarak ölçölmüştür (Şekil 2.10).



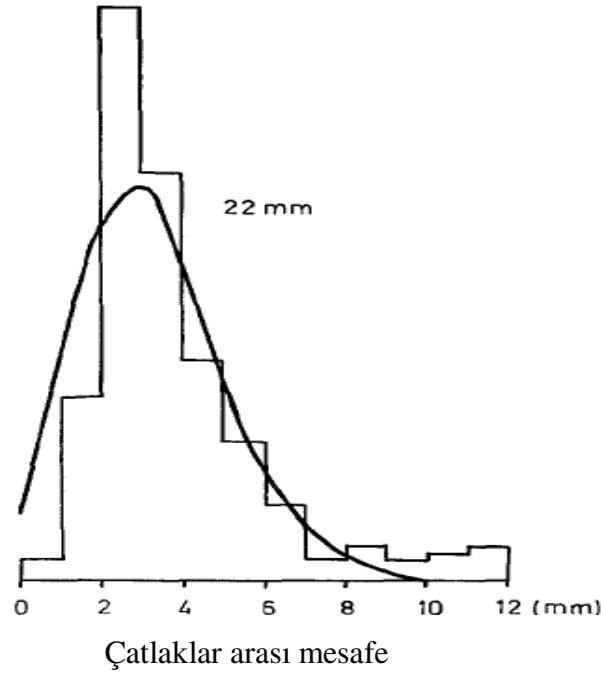
Şekil 2.10 Kayaçtaki küçük ve büyük çatlaklar arası mesafelere göre kesme kuvveti eğrisi örnekleri (Ranman 1985).

Ranman (1985) kesme kuvvetlerinin pik yaptığı noktalar arası mesafelerin Poisson dağılımına göre bir eğri oluşturduğunu görmüştür (Şekil 2.11). Daha sonra, yaptığı gözlemler sonucu, meydana gelen Poisson dağılım eğrisinin doğru olduğunu varsayarak, basitleştirilmiş bir enerji modeli ortaya çıkarmıştır. Bu modele göre harcanan enerji ile kesme kuvveti arasındaki ilişki Eşitlik 2.7'deki gibi ifade edilmiştir. Burada; maksimum kesme kuvvetinin ortalama kesme kuvvetinin 3 katı olduğu varsayılmıştır (Eşitlik 2.8).

$$E = L_t \cdot \frac{FC'}{2} \quad (2.7)$$

$$FC = \frac{FC'}{3} \quad (2.8)$$

Burada; E= enerji,
L_t= toplam kesme mesafesi'dir.



Şekil 2.11 Kesme kuvvetlerine bağlı olarak çizilen Poisson dağılımı (Ranman 1985).

2.3.3 Göktan'ın Evans Kesme Teorisi Üzerindeki Uyarlaması (Kalem Uçlu Keski)

Göktan (1997), Evans'ın kalem uçlu keski için geliştirdiği teorideki bazı eksiklikleri gidermeye çalışmıştır. Bu bağlamda Evans'ın orijinal teorisindeki tahmin eşitliğini tekrar düzenlemiştir. Buna göre; kayacın çekme dayanımı, kesme derinliği, uç açısının yarısı ve kayaç-keski arasındaki sürtünme açısını kullanarak Eşitlik 2.9'dan kesme kuvvetlerini tahmin etmiştir.

$$FC' = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma_t \cdot d^2 \cdot \sin^2(\phi / 2 + \psi)}{\cos(\phi / 2 + \psi)} \quad (2.9)$$

Bu eşitlikle;

- Evans kesme teorisindeki eksikliklerden bir tanesi (keski açısı sıfır olduğunda, kesme kuvveti de sıfır olmaz) giderilmiştir.
- kayacın tek eksenli basınç dayanımı ortadan kaldırılmış, kesme kuvveti sadece kayacın mekanik özelliklerinden çekme dayanımına bağlı kalmıştır (Göktan 1997).

Ayrıca, elde edilen tüm bu bulgular Bilgin et al. (1997) tarafından anhidrit, jips ve selestit mineralleri üzerinde yürütülen kesme deney sonuçlarıyla mukayese edilmiştir. Sonuç olarak Eşitlik 2.9'dan elde edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasında iyi uyum gösteren anlamlı ilişkiler olduğu ortaya çıkmıştır.

2.3.4 Roxborough ve Liu'nun Evans Kesme Teorisi Üzerindeki Uyarlaması

Roxborough ve Liu (1995), Evans'ın kalem uçlu keski için geliştirdiği kesme teorisini değiştirmiş ve Eşitlik 2.10'da sunulan bağıntıyı geliştirmişlerdir. Bu bağıntıdan hesaplanan maksimum kesme kuvveti değerlerini Gosford kumtaşlarına ($\sigma_t = 3$ MPa, $\sigma_c = 42$ MPa) uyarlamışlar ve Çizelge 2.1'de verilen 10, 17,5 ve 25 mm kesme derinliklerinde yürütülen deney sonuçlarıyla uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır. Bağıntıda belirtilen kayaç-keski arası sürtünme açısı çelik bir keski ve düz bir yüzey için (Ψ) 16° alınmıştır (Roxborough and Liu 1995).

$$FC' = \frac{16 \cdot \pi \cdot \sigma_c \cdot d^2 \cdot \sigma_t^2}{\left[2 \cdot \sigma_t + \frac{\sigma_c \cdot \cos(\phi / 2)}{\left(\frac{1 + \tan \psi}{\tan(\phi / 2)} \right)} \right]^2} \quad (2.10)$$

2.4 KAYAÇ KESME SETLERİ

Kama ve kalem uçlu keski için ortaya çıkarılmış olan tüm bu kesme teorileri literatürde oldukça fazla atıf almış ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teoriler arasında en iyi anlaşılır ve kabul edilmiş yöntemler Evans'ın (1962) kama ve Evans'ın (1984) kalem uçlu keski ile Nishimatsu'nun (1972) kama tipi keski için geliştirdiği teorilerdir (Bilgin et al. 2006).

Ancak, tüm bu teorilerde genellikle keskinin aşınmamış ve yeni olduğu farz edilmiştir. Keskinin kazı sırasında belirli bir süreden sonra aşınmaya başladığı ve daha fazla kuvvet harcadığı göz önüne alındığında, tüm bu teorik formüller bazen yetersiz kalabilmektedir.

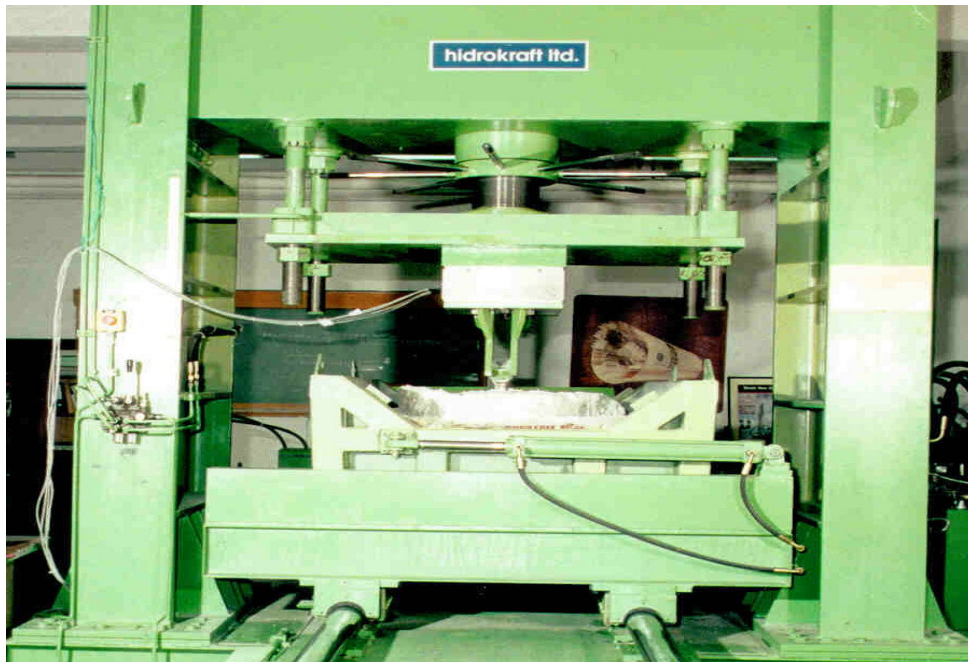
Üretici firmalar tarafından üretilen kama tipi keski genişliklerinin tam V şekilli olmadığı veya konik keski için uçlarının tam konik olmayıp hafif yuvarlak olması nedeniyle, teorik hesaplamalarla deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların her zaman bire bir örtüşmediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, kayacın karmaşık olan petrografik, mineralojik ve

anizotropik doğası bu teorik yöntemlerden elde edilen tahminlerin her zaman doğru ve kesin sonuç ortaya çıkarmadığını göstermiştir (Bilgin et al. 2006).

Tüm bu sebeplerle birlikte artık günümüzde uygulaması kaçınılmaz olan laboratuvar küçük (small scale) ve bire-bir ölçekli (full scale) kesme deneylerinden faydalanılmaktadır. Bu deney yöntemleri sayesinde keski kuvvetleri ölçülerek belirlenmektedir. Ayrıca, kayacın kazılabilirliği, kazı makinasının performans tahmini, net ilerleme hızı, spesifik enerji değerleri de kolayca hesaplanabilmektedir. Her iki deney yöntemi de İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü'ndeki, Kazı Teknolojileri ve Maden Makineleri Laboratuvarları'nda bulunmaktadır.

2.4.1 Tam (bire-bir ölçekli) Boyutlu Doğrusal Kesme Deney Seti

Tam boyutlu kesme deney seti; farklı kesme koşulları altında kayacın kazılabilirliğini belirlemek, en uygun kesici kafa tasarımı yapmak, kazı makinalarının performansını önceden tahmin etmek amacıyla geliştirilmiş bir deney setidir. Hazırlık ve üretim amaçlı hazırlanan kazı projelerinde, tünel ve metrolarda uygulanması kaçınılmaz olan deney setidir. Ayrıca, dünyada sadece birkaç araştırma merkezinde bulunmaktadır (Bilgin and Balcı 2000). Şekil 2.12'de İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) ve Şekil 2.13'te Colorado School of Mines'da (CSM) bulunan deney setlerinin resimleri verilmiştir.

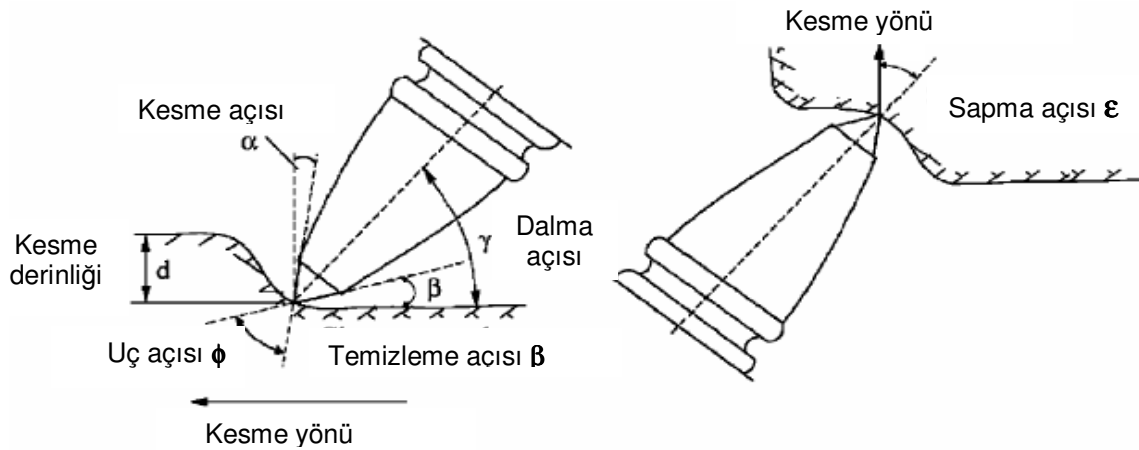


Şekil 2.12 İTÜ'de kullanılan tam boyutlu kesme seti.



Şekil 2.13 CSM’de kullanılan tam boyutlu kesme seti.

İTÜ’de bulunan deney setinde maksimum 1*1*0,6 m boyutlarındaki büyük kayaç örnekleri üzerinde kesme deneyleri yürütülmektedir. Deney sırasında Şekil 2.14’te gösterilen farklı kesme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvveti, normal kuvvet ve yanıl kuvvet değeri kayıtlı edilir. Ayrıca, keski tarafından kazılan pasa hacmine göre spesifik enerji değeri hesaplanmaktadır.

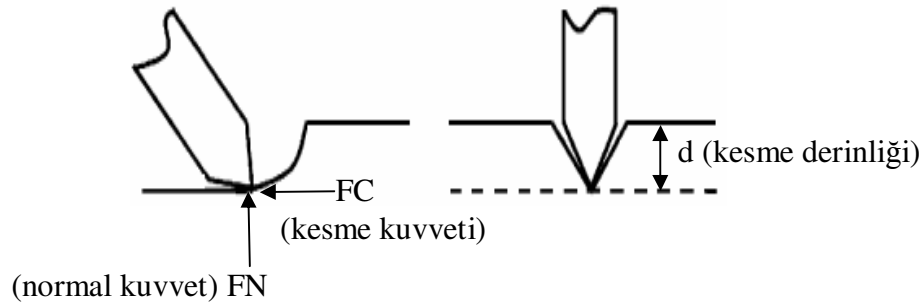


Şekil 2.14 Kesme setine yerleştirilen bir keski üzerinde etkin olan kesme parametreleri (Bilgin et al. 2006).

Kesme setinin bağımsız değişkenleri, kayaç türü, kesme derinliği ve keski arası mesafe gibi parametrelerden oluşmaktadır. Buna karşın, bağımlı değişkenler ortalama ve maksimum kesme kuvveti, verim ve spesifik enerji gibi parametrelerdir. Bu setlerde yapılan kesme

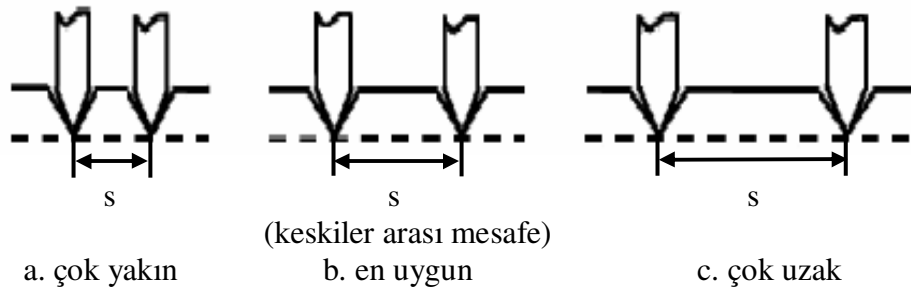
deneyleri hem uzun bir süreç gerektirmekte ve hem de pahalıya mal olmaktadır. Ayrıca, deneyler sırasında iri kaya bloklarından örnek hazırlanması da oldukça zor olmaktadır. Bu yönleri kesme deney setinin en büyük dezavantajlarını oluşturmaktadır (Balcı and Bilgin 2007).

Tam boyutlu doğrusal kesme setinde bağımsız (yardımsız, etkileşimsiz) ve bağımlı (yardımlı, etkileşimli) kesme olmak üzere iki tür kesme modu uygulanmaktadır. Öncelikle Şekil 2.15'te gösterilen bağımsız kesme türünde farklı kesme derinliklerinde deneysel çalışmalar yürütülerek, optimum kesme derinliğinde (d_{opt}) düşey ve yatay kesme kuvvetleri kayıt edilir.



Şekil 2.15 Bağımsız (etkileşimsiz) kesme türü (Balcı and Bilgin 2007).

Daha sonra Şekil 2.16'da gösterilen bağımlı kesme modunda ise keskinler arası mesafe (s) parametresine bağlı olarak deneysel çalışmalar aynı örnek üzerinde tekrar yürütülür. Burada keskinler arası etkileşim incelenir. Keskinler eğer birbirlerine çok yakın olursa (Şekil 2.16.a) kayadaki aşırı kırılma nedeniyle verimli bir kesme oluşmaz. Bununla birlikte, eğer keskinler birbirlerine çok uzak olursa (Şekil 2.16.c) kesme hatlarındaki çekme çatlakları birbirlerine ulaşmazlar ve çok yüksek spesifik enerji değerleri elde edilir. Bu yüzden deneysel çalışmalar sonucunda keskinler arası optimum mesafenin (s_{opt}) olduğu nokta (Şekil 2.16.b) belirlenir. Optimum noktalarda elde edilen kesme kuvvetlerine bağlı olarak minimum spesifik enerji değerleri elde edilir (Balcı and Bilgin 2007).



Şekil 2.16 Bağımlı (etkileşimli) kesme türü (Balcı and Bilgin 2007).

2.4.2 Küçük Boyutlu Kesme Deney Seti

Küçük ölçekli kazı seti ile performans tahmini ilk olarak McFeat ve Fowell (1977, 1979) tarafından tartışılmıştır. Bu yöntem; arazide ve laboratuvarında birçok kayaç üzerinde yapılan deneyler ve gözlemler sonucunda oluşturulmuş ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Tunçdemir 2002, Kel 2003).

Küçük ölçekli kesme setinde 18 kW'lık elektrik motoruyla tahrik edilen bir planya makinası ve bu makina üzerinde 30*40*50 cm sınır boyutlarında numune yerleştirme sehpası vardır. Deney esnasında, kayaç numunesi planyanın sehpasına sabitlenir ve aşağı-yukarı, sola-sağa hareket ettirilerek kesme derinliği, keskiler arası mesafe gibi parametrelerin etkileri incelenebilir (Balcı ve Bilgin 2005). Deneyin en büyük avantajı numune hazırlamadaki kolaylıktır.

Deney yöntemine göre, 7,6 cm çapındaki karot örneği veya 20*10*10 cm boyutunda küçük kaya numuneleri bir planya makinesinde sehpa oturtulur. Kesme açısı -5° , keski genişliği 12,7 mm, temizleme açısı 5° , kesme derinliği 5 mm olan bir kama uçlu keski ile kesme deneyi yürütülür. Üç yönde kesme, dikey ve yanal kuvvetler bir dinamometre kullanılarak kaydedilir. Daha sonra birim hacimdeki (1 m^3) kayacı kesmek için gerekli enerji olarak tanımlanan spesifik enerji MJ/m^3 veya kWh/m^3 olarak bulunur (Eşitlik 2.11). İndeks değerler olarak sınıflandırılan test sonuçları daha önceden toplanmış arazi performans verilerine göre değerlendirilirler (Çopur et al. 2001).

$$SE = \frac{FC}{Q} \quad (2.11)$$

Burada; SE= spesifik enerji (kWh/m^3),
FC= ortalama kesme kuvveti (kN),
Q= birim kesme mesafesindeki kazı hacmi (m^3/km)'dir.

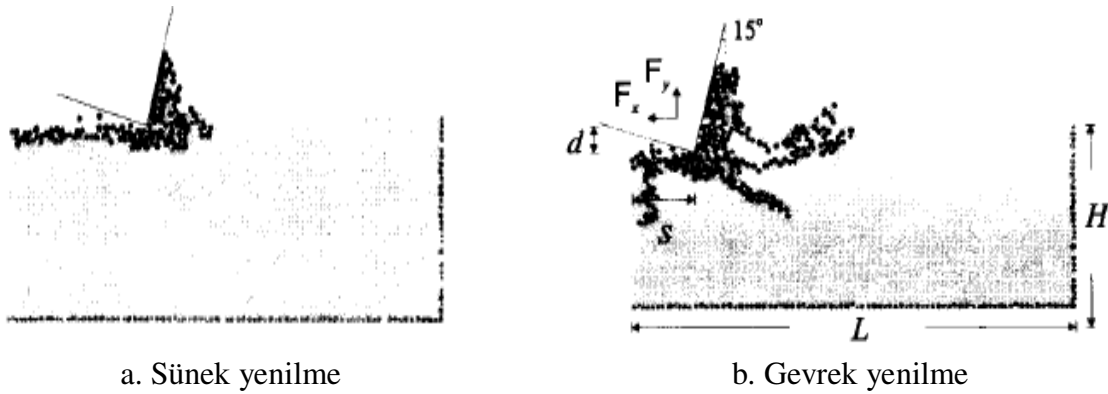
2.5 SAYISAL YÖNTEMLERLE KAYAÇ KESME MEKANİZMALARININ MODELLENMESİ

Geçmişten günümüze kadar kayaç kesme mekanizmalarını modellemek üzere birtakım çalışmalar yürütülmüştür. Bu bağlamda PFC^{2D}'de bazı modeller oluşturulmuş, ancak üç boyutlu ortamda hiçbir çalışma yapılmamıştır.

Kayaç kesme işleminin modellenmesiyle ilgili kullanılan farklı programlarla çeşitli modeller oluşturulmuş ve keski üzerine etkiyen kuvvetler tahmin edilmiştir (Su and Akçın 2009a). Bu amaçla yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

2.5.1 PFC^{2D} ve FLAC ile Yapılan Modelleme Çalışmaları

Huang et al. (1999) laboratuvarında farklı kesme derinliklerinde kesme deneyleri yürütmüşler ve örnek üzerinde oluşan iki tür yenilme şekli (sünek ve kırılğan) incelemişlerdir. Daha sonra kesme derinliğiyle ilişkili olan bu yenilme türlerini bilgisayar ortamında ortaya koymak ve ayrıca kesme kuvvetlerinin büyüklüğü ile malzeme özelliklerinin kesme derinliği üzerindeki etkilerini araştırmak üzere Particle Flow Code in 2 Dimensions'da (PFC^{2D}) sayısal olarak modelleme yapılmıştır. Modelleme sonucu elde edile yenilme türleri Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



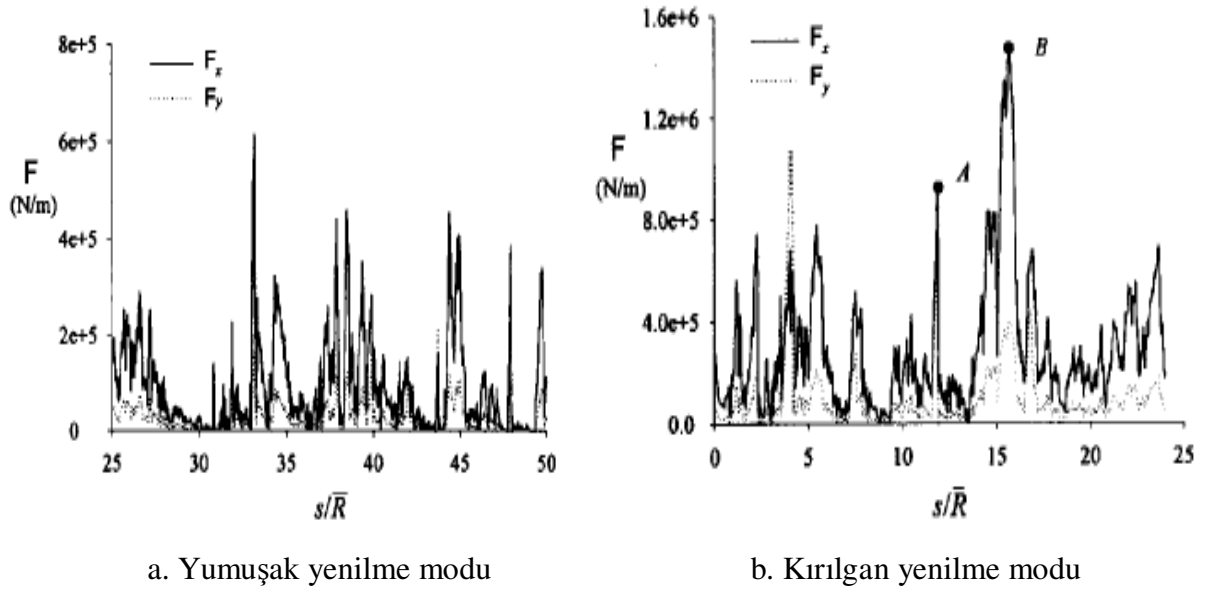
Şekil 2.17 Yenilme modu şekilleri (Huang 1999, Huang et al. 1999).

Burada; F_x ; Kesme kuvveti, F_y ; normal kuvvet, d ; kesme derinliği, s ; kesme mesafesi, L ; örneğin eni, H ; örneğin boyu'dur.

Şekil 2.17.a'da görüldüğü üzere sünek (duktil) yenilme küçük kesme mesafelerinde oluşmakta ve tanecikler arası bağlar keski ucunun hemen yanında kopmaktadır. Bu durumda hem çekme ve hem de kayma mikro çatlakları gözlemlenmiştir. Fakat bu çatlakların birleşmesi söz konusu değildir. Kayaçta meydana gelen hasar tanecik boyunun 2-3 katı kadardır. Bununla birlikte Şekil 2.17.b'de nispeten daha büyük kesme derinliklerinde meydana gelen gevrek (brittle) yenilme modu gösterilmiştir. Bu yenilme modu da kesme sonucu oluşan kırıntıların (chip) ve mikro çatlakların birleşmesiyle tanımlanmıştır. Kesme işleminin ilk aşamasında keski ucunun yanındaki kırılma bölgesinde çatlaklar oluşmaya

başlamış ve daha sonra ya sabit bir şekilde aşağıya doğru ya da serbest yüzeye doğru ilerlemiştir. Kayaçta meydana gelen hasar tanecik boyunun 8 katı kadardır.

Yumuşak ve kırılğan yenilme modlarında kesme mesafesine bağlı olarak keski kuvvetlerinin değişimi de Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Keski üzerinde düşey (F_y) ve yatay (F_x) yönde oluşan kesme kuvveti grafikleri (Huang et al. 1999).

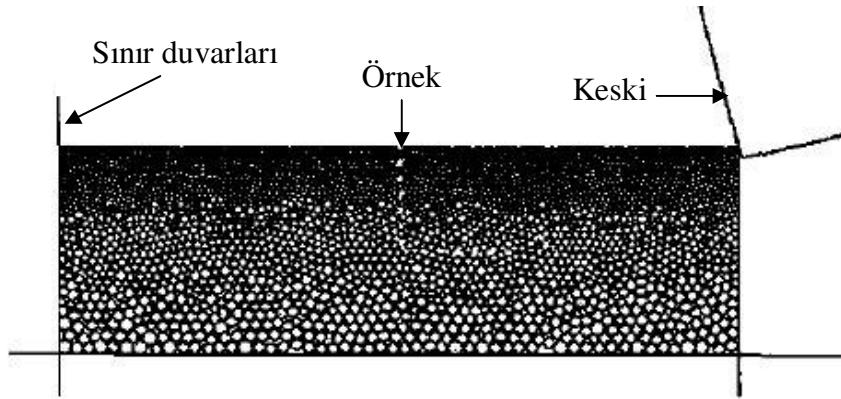
Burada; s ; kesme mesafesi, $\bar{R}$ ortalama tanecik yarıçapı'dır.

Kayaç kesme deneyinin 2 boyutlu modellenmesinden sonra, sünek moddan kolay kırılan (kırılğan) moda geçişte kayacın kesilmesinin kesme derinliğine bağlı olduğu ve keski üzerine etkileyen düşey (F_y) ve yatay (F_x) kuvvet değerlerinin daha güvenilir olması için kesme mesafelerinin uzun tutulması gerektiği sonuçlarına varılmıştır (Huang et al. 1999).

Bir diğer araştırmacı, Kaitkay (2002); PDC (Polycrystalline Diamond Compact) uçlarla deneysel çalışmalar yürütmüştür ve aynı deney yöntemini PFC^{2D}'de modellemiştir. Bu bağlamda; yeraltında sert kayaç içerisinde yapılan kazı sırasında dışarıdan uygulanan hidrostatik basıncın, uç etrafında oluşturduğu kırıntılar ve keski kuvvetleriyle olan etkisi araştırılmıştır. Modellemeler iki farklı (-15° , -25°) kesme açısı, 0, 3,44 ve 34,4 MPa sınır basıncı, 1 m/s kesme hızı, 0,4 ve 0,8 mm kesme derinliği gibi farklı koşullar altında yürütülmüştür. Çalışmalar sonucunda; Kaitkay (2002) tüm bu parametrelerin birbirleriyle olan

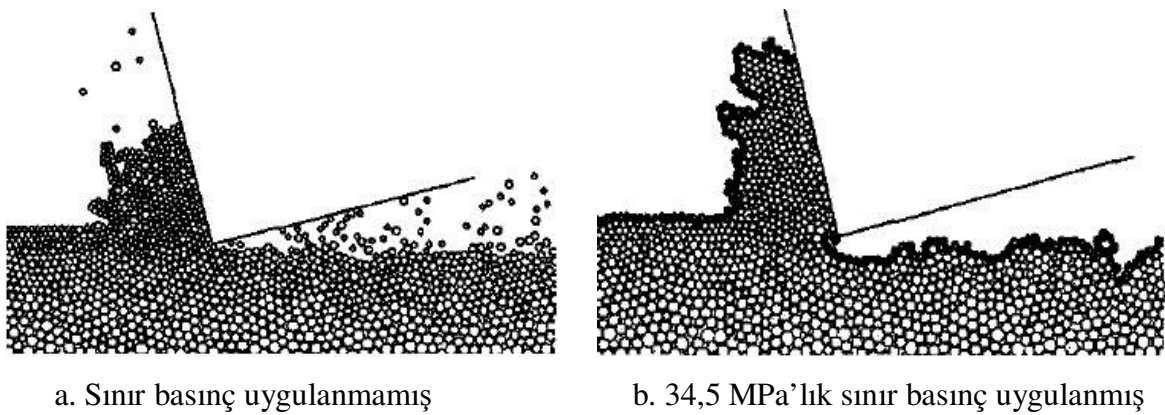
etkileşimini incelemiş ve ayrıca tanecik sürtünme katsayısı, en küçük tanecik yarıçapı, taneciklerin dönmesi gibi çeşitli faktörlerin etkisini gözlemlemiştir.

Yine Lei ve Kaitkay (2003) yaptıkları bir diğer çalışmada PDC uç üzerinde rol oynayan hidrostatik basıncın etkisini laboratuvar ve modelleme sonuçları arasında yaptıkları mukayese ile ortaya koymuşlardır. Bu bağlamda öncelikle iki eksenli basınç dayanımı deney yöntemiyle örneğin mikro özelliklerini kalibre etmişlerdir. Daha sonra, Şekil 2.19’da görüldüğü üzere yarıçapları 0,1-1 mm arasında değişen, 50 mm genişlik ve 16 mm yükseklikteki bir örnek hazırlamışlardır.



Şekil 2.19 Kesme deneyini modellemek üzere hazırlanan örnek (Lei and Kaitkay 2003).

Örnek üzerine sınır basıncı uygulamak için PFC^{2D}’de özel bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem ile 0, 3,5 ve 34,5 MPa’lık sınır basınçları uygulanmış ve 25 mm’lik kesme mesafesinde kesme deneyleri yürütülmüştür (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 25 mm kesme mesafesinden sonra örnekte oluşan kırıntıların görünümü (Lei and Kaitkay 2003).

Şekil 2.20.a’da görüldüğü üzere numune üzerine sınır basıncı uygulanmadığında (0 MPa) tanecikler örnek üzerinden uçmuşlardır. Ayrıca, keski önünde küçük kırıntı oluşumlarıyla

büyük çatlaklar görülmüştür. Buna karşın, Şekil 2.20.b'deki gösterildiği gibi üst yüzeye sınır basıncı uygulandığında keski önünde yoğun bir kırıntı (chip) oluşmuştur. Kazılan yüzeyin altında ve kırıntıların içerisinde hiçbir büyük çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.

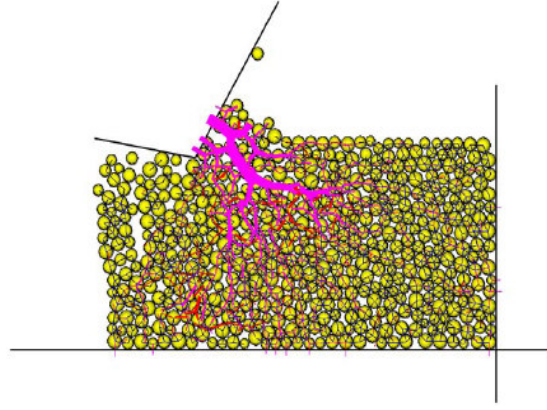
Lei ve Kaitkay (2003) bulguları sonucunda sınır basıncıyla birlikte kesme kuvvetlerinde de bir artış görülmüştür. Bu artış doğrusal olmamakla birlikte keskiler üzerindeki gerçek kuvvet, itme kuvvetinin yaklaşık iki katı olduğu görülmüştür. Ayrıca, ortalama kesme kuvvetinin laboratuvar sonuçları ve modelleme tahminleri arasında uygun ilişkiler bulunmuştur. Sonuç olarak, yürütülen sayısal analizlerin yeraltında kullanılan delici uçların tasarımında önemli rol oynayabileceği tespit edilmiştir.

Stavropoulou (2006) mermer örnekleri üzerinde helezoni şekilli uçlarla dönerek delme deneyleri yürütmüştür. Uçların bir yüzeyi 30° 'lik kesme açısı ve 10° 'lik temizleme açısına sahiptir. 0,03-0,55 mm/dev hızıyla dönen bu uçlarla 54 mm çap ve 20 mm kalınlıktaki mermer örnekleri üzerinde sabit bir kesme derinliğine kadar delme deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri sonucunda ucun bir yüzeyinde rol oynayan düşey ve yatay kuvvetlerin her bir devirdeki delme mesafesiyle grafiklerini çizilmiştir. Daha sonra, helezonik ucun bir keski gibi görünen yüzeyinin kuvvet-yerdeğiştirme davranışın kesme derinliğiyle olan değişimini araştırmak üzere hem sürekli (FLAC^{2D}), hem de süreksiz kodlarda (PFC^{2D}) kayaç kesme deneyleri modellenmiş ve ilgili kuvvet grafikleri çizilmiştir.

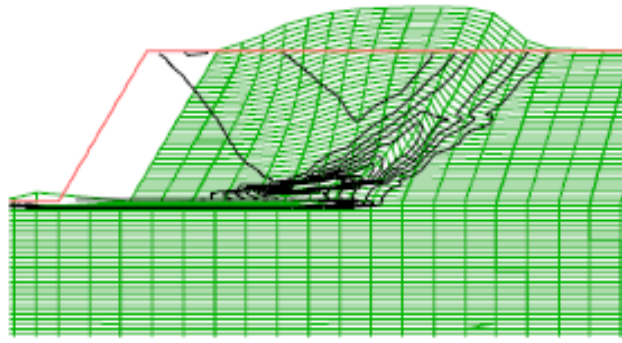
Bu bağlamda ilk olarak 540 adet tanecikten oluşan dikdörtgen bir örnek hazırlanmış ve örneğin mikro özellikleri kalibre edilmiştir. Bunun yanında 30° kesme açısı ve 10° temizleme açısında iki parça (duvar) köşelerinden birleştirilerek bir keski meydana getirilmiştir. Şekil 2.21'de gösterildiği üzere keski sağa doğru sabit hızla hareket ettirilmesi sırasında,

- keskide düşey ve yatay yönde oluşan kuvvetler,
- mikro çatlakların yönelimi, dağılımı ve konumlarıyla gösterilen hasar, mikro çatlakların birleşerek makro çatlak haline dönüşmesi,
- tanecikli model içerisindeki kuvvet dağılımı, taneciklerin birbirleriyle temasından doğan basıncı kuvvetleri ve ayrıca bağ malzemesinde rol oynayan basıncı, kayma ve çekme kuvvetleri gözlemlenmiştir.

FLAC^{2D}'de hazırlanan aynı kesme modeli Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



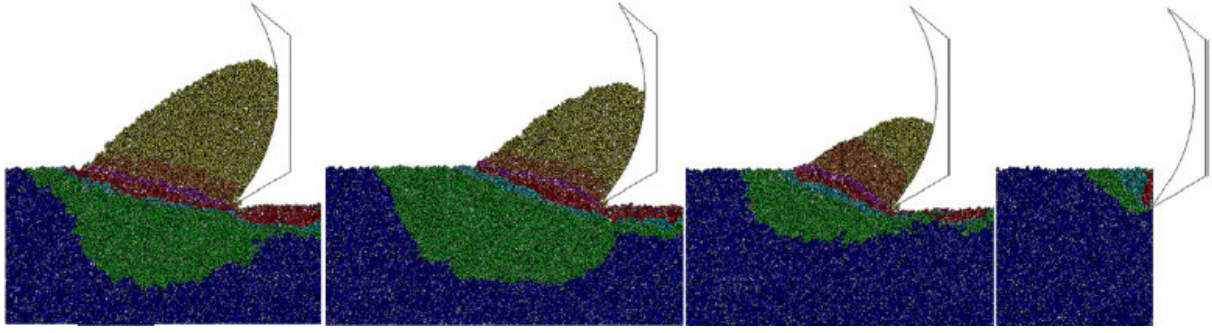
Şekil 2.21 PFC^{2D}'de oluşturulan kayaç kesme modeli (Stavropoulou 2006).



Şekil 2.22 FLAC^{2D}'de oluşturulan kesme modeli (Stavropoulou 2006).

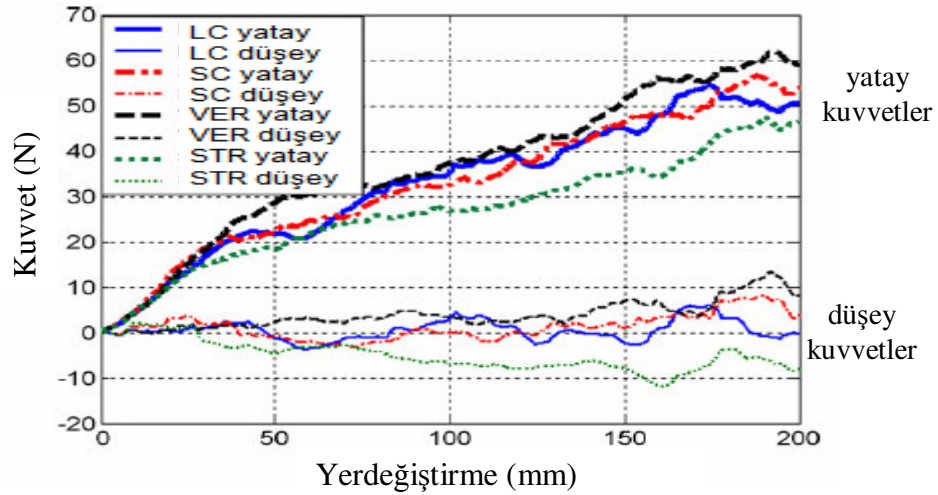
Sonuç olarak, birbirinden bağımsız olarak yürütülen sürekli ve süreksiz modelleme çalışmalarının laboratuvar çalışmalarıyla iyi bir uyum sağladığı görülmüştür (Stavropoulou 2006).

Shmulevich et al. (2007), toprak sürme için kullanılan bir bıçak ile toprak arasındaki etkileşimi PFC^{2D} programı ile modellemişlerdir. Burada; toprak ve bıçak arasındaki etkileşim, kayaç kesme mekanizmalarındaki keski ve kayaç arasındaki etkileşime benzemektedir. Bu amaçla dört farklı bıçak türünün (LC, SC, VER ve STR tipi) toprak üzerindeki davranışı hem laboratuvarda incelenmiş ve hem de sayısal modellemesi yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları 0,5*0,2*0,3 m boyutlarındaki bir kutu içerisindeki bir bıçağın 2 mm/s'lik yatay bir hız ve 25 mm'lik kesme derinliğinde, sayısal modelleme çalışmaları ise 20 mm/s kesme hızında ve 25-35 mm'lik kesme derinliklerinde yürütülmüştür. Buna göre modelleme çalışmalarının genel görünümü Şekil 2.23 ve elde edilen kuvvet değerlerinin bıçağın yerdeğiştirmesiyle olan değişim grafiği Şekil 2.24'te verilmiştir.



Yerdeğş. : 0,253 m Yerdeğş. : 0,168 m Yerdeğş. : 0,087 m Yerdeğş. : 0 m

Şekil 2.23 Bıçak ile toprak arasındaki etkileşimin genel görünümü (Shmulevich et al. 2007).



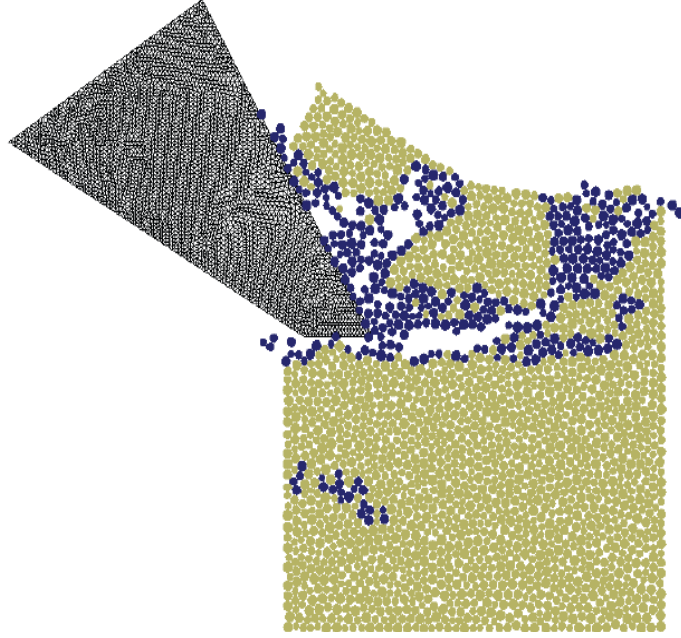
Şekil 2.24 Dört farklı bıçağın 25 mm kesme derinliğinde modelleme sonuçları (Shmulevich et al. 2007).

Shmulevich et al. (2007) bulgularına göre laboratuvar ve modelleme sonuçları arasında çok iyi ilişkiler elde edilmiştir. Modelleme sonuçlarından, bıçağın hareketi süresince bıçaklar üzerinde uygulanan yatay kuvvetlerin bıçak önünde kümelenen toprağın etkisiyle artış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, bıçak ucunun altından akan toprağın bıçağa uygulanan düşey kuvveti etkileyebileceği görülmüştür.

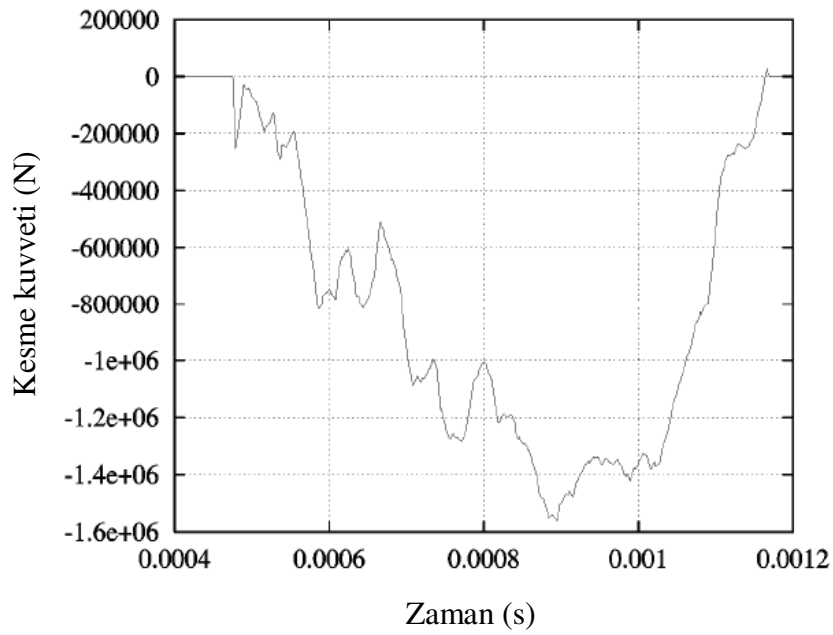
2.5.2 Diğer Sayısal Yöntem ve Programlarla Yapılan Modelleme Çalışmaları

Rojek (2007), 109*109 mm boyutlarında hazırlanmış kumtaşı örneği üzerine rijit bir keski konumlandırarak kayaç kesme işlemini modellemiştir. Modelleme çalışmaları İspanya'daki Mühendislikteki Sayısal Yöntemler Uluslararası Merkezi'nde (CIMNE) geliştirilmiş olan Simpac bilgisayar programı ile yürütülmüştür. Ayrık elemanlar yöntemi ile çalışan Simpac, PFC^{3D}'de olduğu gibi tanecik topluluğundan yararlanarak modelleme yapmaya olanak

sağlamaktadır. Kesme deneyinin modellenmesinde 30 mm'lik kesme derinliği, 30°'lik kesme açısı ve 4 m/s'lik kesme hızı uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda 0.0065 s'de oluşan kırıntılar Şekil 2.25'te ve buna karşılık gözlemlenen 0.8 N'luk kesme kuvveti Şekil 2.26'da gösterilmiştir (Rojek 2007).

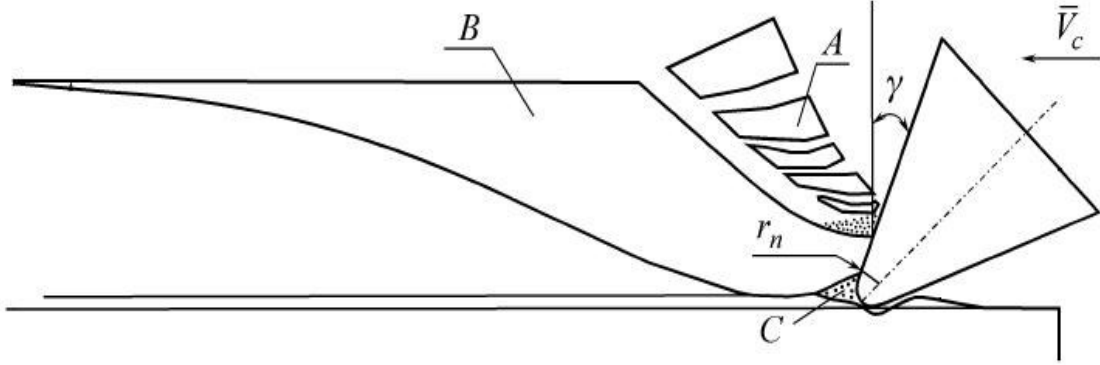


Şekil 2.25 Kayaç kesme modellemesinde 0.0065 s'de oluşan yenilme türü (Rojek 2007).



Şekil 2.26 Kayaç kesme modellemesinde kesme kuvvetinin zamana karşı olan değişimi (Rojek 2007).

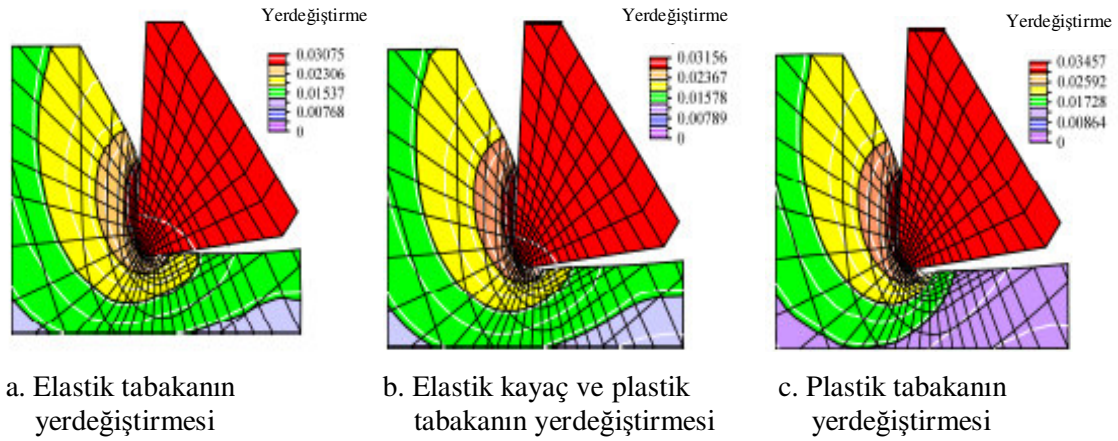
Jonak ve Podgorski (2001) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çalışan MES-Algor programıyla Şekil 2.27’de gösterilen kayaç kesme işlemini modellemişlerdir. Kesme işlemi için 12 mm kalınlığında (kesme derinliği) tabaka, 1,5 mm uç yarıçaplı aşınmış keski, 5°’lik temizleme ve kesme açısı, 80°’lik keski açısı kullanılmıştır. Modelleme sırasında keski etrafında oluşan kırılma tabakaları incelemişlerdir.



Şekil 2.27 Kayaç kesilmesiyle meydana gelen kırıntı oluşumu (Jonak and Podgorski 2001).

Burada; A; en küçük kırıntı oluşum bölgesi, B; ana kırıntı oluşum bölgesi, C; ezilmiş malzeme bölgesi.

Modelleme sonucu keski etrafında oluşan elastik ve plastik tabakalar ile keskinin yer değiştirmesi Şekil 2.28’de gösterilmiştir.

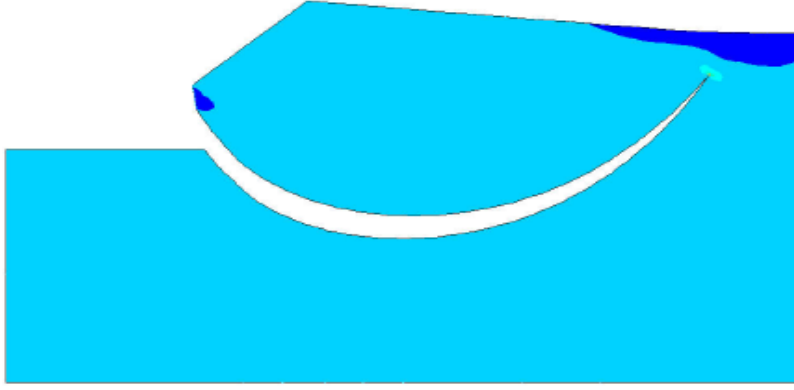


Şekil 2.28 Kesme işleminden elde edilen model çıktıları (Jonak and Podgorski 2001).

Bu sonuçlara göre; Şekil 2.27’de verilen kesme şekli için en uygun ve yakın çıktı Şekil 2.28.a’da verilendir.

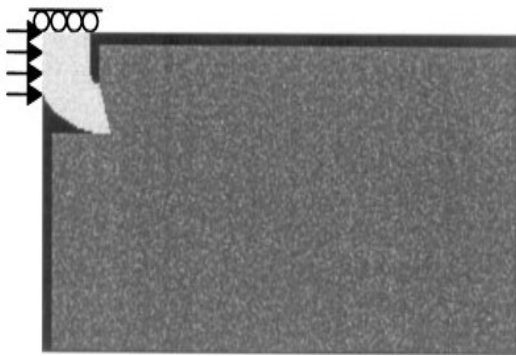
Shenghua (2004), sonlu elemanlar yöntemiyle geliştirilmiş olan ANSYS programını kullanarak kayaç kesme sırasında oluşan çatlak yüzeyleri ve keski-kayaç arasındaki sürtünmeyi modellemiştir. Bu amaçla çatlak ilerleme doğrultusu ve gerekli kuvvetler bazı

kırılma ölçütleriyle belirlenmiştir. Kama tipi keskiyle kırılma mekaniği ilkelerinden yararlanılarak birkaç modelleme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalarda iri kırıntı oluşumları gösterilmiştir (Şekil 2.29). Ayrıca, kesme sırasında değişen kesme parametreleri, keski geometrisi, sürtünme ve çatlakların etkisi incelenmiştir.

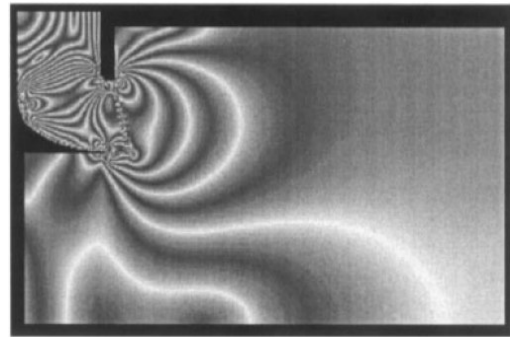


Şekil 2.29 75° kesme açısında çatlak ilerleme doğrultusu (Shenghua 2004).

Liu (2002) ve Liu et al. (2002) homojen (türdeş) ve heterojen kayalar üzerinde kayacın yenilme mekanizması ve çatlak ilerlemesini gözlemek üzere kayaç kesme işlemini R-T^{2D} (Rock and Tool Interaction) programında modellemiştir. Şekil 2.30.a'da gösterildiği üzere keski kayaya 0,005 mm/s hızla batırılmaktadır. Buna göre keskinin ucundan başlayarak keskinin yerdeğiştirmesiyle aynı yönlü olan 45°'lik çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 2.30.b). Keskideki yerdeğiştirmeye bağlı olarak çekme gerilmesiyle meydana gelen çatlaklar ve bu çatlakların ilerlemesi Şekil 2.31'de gösterilmiştir.

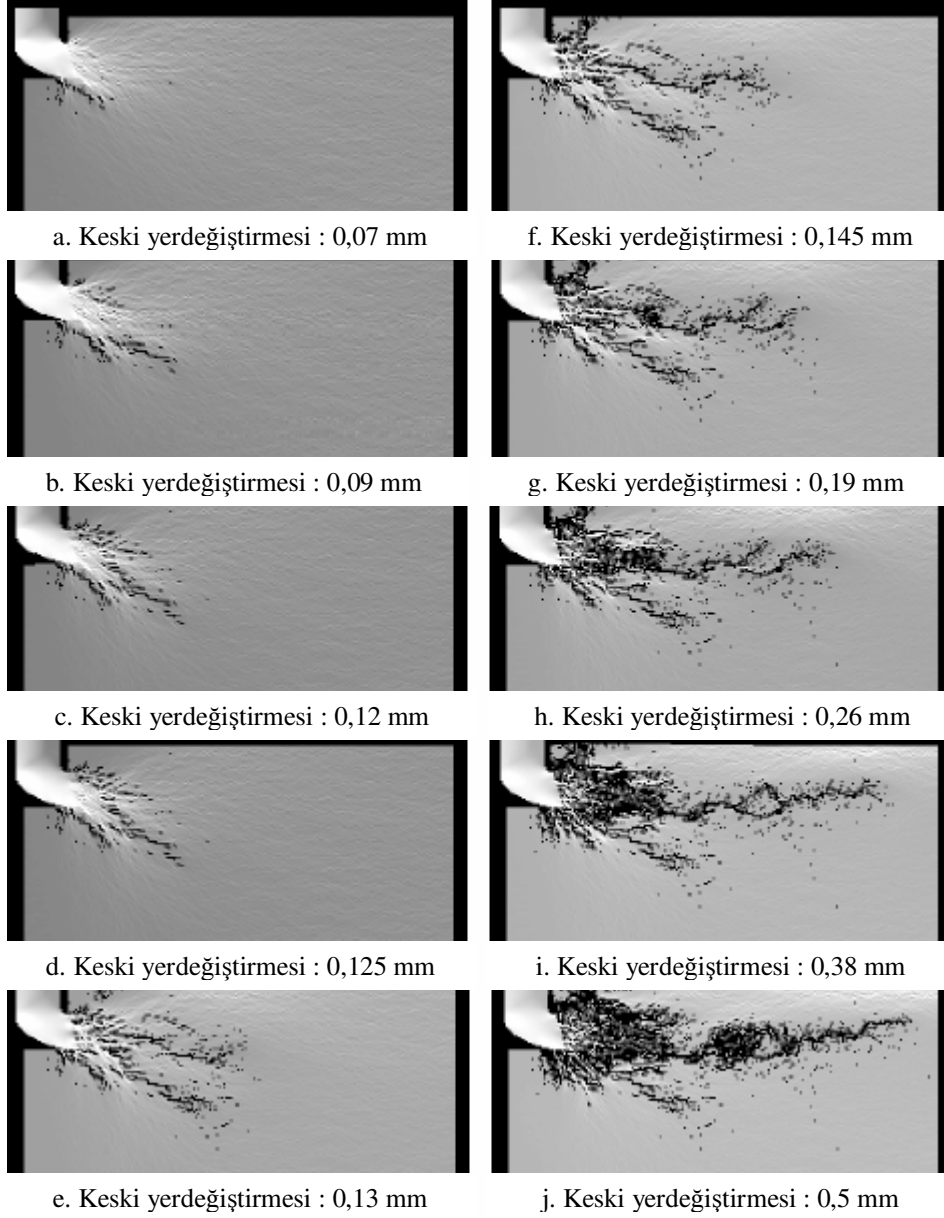


a. Keskinin kayaya batma anı



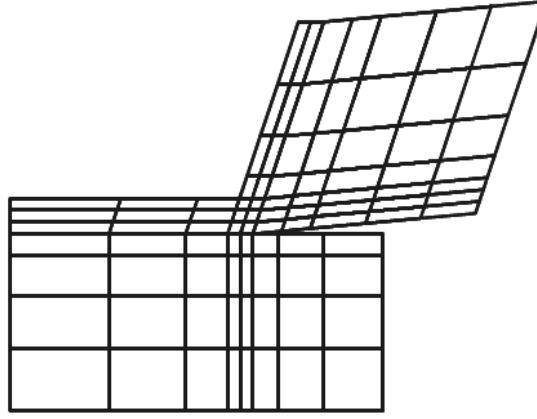
b. Kesme sırasında oluşan gerilme dağılımı

Şekil 2.30 Kayaç kesme işleminin sayısal modellemesi (Liu et al. 2002).



şekil 2.31 Keski yerdeğiştirmesinin aşama aşama gösterilmesi (Liu 2002).

Loui ve Karanam (2005) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak özel bir program hazırlamışlar ve bu programda kazı süresince keskiye ısı artışını önceden tahmin etmek üzere ısı transfer modeli geliştirmişlerdir (şekil 2.32). Buna göre, modelleme sırasında keski-kayaç ara yüzünde gelişen sürtünme kuvvetleri ve keski hızının sıcaklık üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Bu amaçla; -10° 'lik kesme açısı, 0,16 m/s kesme hızı ve 4 mm kesme derinliēinde kesme deneyleri yürütmüşler ve deneyler sırasında keskinin sıcaklıēı llmştr.



Şekil 2.32 Isı transfer modelin (Loui and Karanam 2005).

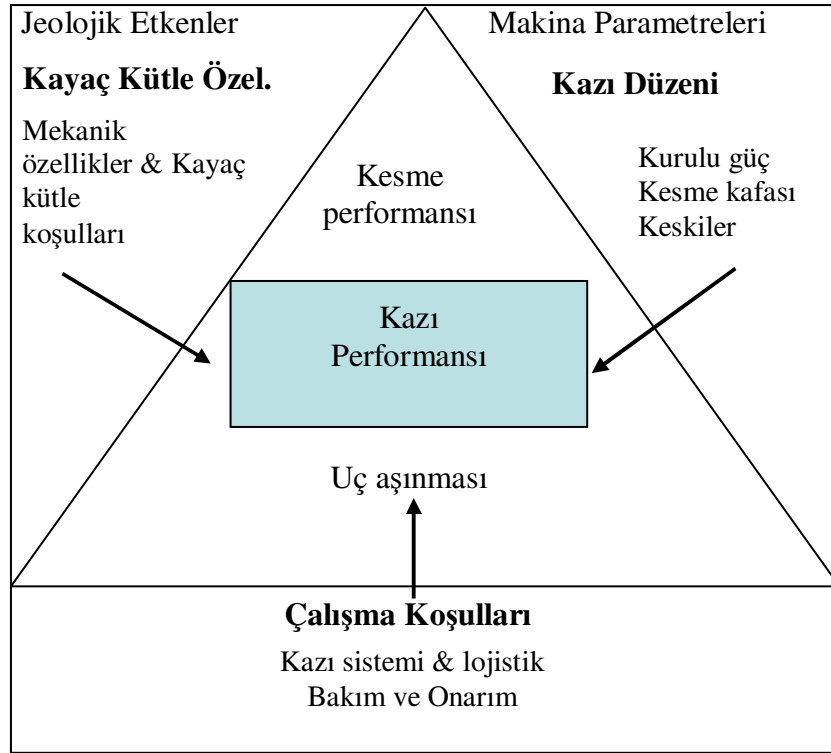
Modelleme çalışmaları sonucunda keskinin kayaca batmasıyla ısının hızla arttığı ve birkaç dakika içinde dengelendiği görülmüştür. Aynı süreç laboratuvar çalışmalarıyla da desteklenmiştir. Ayrıca, sayısal modelden elde edilen sonuçlar sürtünme kuvveti ve kesme hızı gibi kesme parametrelerinin kayaç-keski ara yüzündeki ısı artışını direk etkilediğini ispat etmiştir (Loui and Karanam 2005).

2.6 KAZI MAKİNASI PERFORMANSININ ÖNCEDEN KESTİRİMİ

Yeraltında kullanılan mekanize kazı sistemlerinin temel amacı; minimum insan gücünden yararlanarak en kısa zamanda en fazla üretim ve ilerleme miktarını elde etmektir. Bu süreçte çevre kayaç mümkün olduğunca az örselenerek kazı işlemi güvenli ve emniyetli bir şekilde yürütülmelidir. Ayrıca, gerek keski tüketimi ve gerekse de işçilik maliyetleri minimum seviyede tutularak kazının ekonomik olması da temel hedefler arasında olmalıdır. Bu koşulların sağlanması kazı öncesi yapılacak zemin ve fizibilite etütleriyle birlikte araştırılır.

Makina yeraltına monte edilmeden önce kayaç tüm özellikleriyle tanınır. Zemin koşulları, çevre su geliri, faylar ve çatlaklar incelenir. Böylece, kazı makinasının çalışması için uygun koşullar ve gerekli tüm veriler elde edilir. Thuro ve Plinninger (1999)'e göre bir kazı makinasının performansını etkileyen temel faktörler Şekil 2.33'te gösterilmiştir. Kazı performansını parametrelerinden ilki kurulu güç, kesici kafa tipi ve keski tipinden oluşan makinaya bağlı parametrelerdir. Ayrıca, jeolojik parametreler ve çalışma koşulları da kesme performansı ve uç aşınmasını etkilemektedir. Tüm bu parametrelerle birlikte; kazının ekonomik olarak devam etmesi ve makina yeraltında çalışmaya başladıktan sonra istenilen

performansın elde edilebilmesi için uygun bir makina seçimi yapılmaz. Bu amaçla da makina yeraltına monte edilmeden önce laboratuvar şartlarında performansı tahmin edilir.



Şekil 2.33 Kazı performansını etkileyen temel parametreler (Thuro and Plininnger 1999).

Performans kestirimi için ilk aşamada kazı makinasının net kazı miktarı (m^3/h) ve spesifik enerji değerleri hesaplanır. Ayrıca, uç tüketimi, kayacın aşındırıcılığının belirlenmesi, makinadan faydalanma oranları, ilerleme hızı, batma hızı (kuyu açma makinalarında) da kazı performans kestiriminde önemli bir rol oynamaktadır. Tüm bu parametrelerle birlikte tüm sistemin performansı ve güvenilirliği de ikinci aşamada göz önüne alınır (Breeds and Conway 1992).

Bir kazı makinasının performansının önceden tahmin edilmesi için farklı yöntemler vardır. Bu yöntemler; küçük ölçekli kesme deneyleri, tam boyutlu kesme deneyleri ve görgül yaklaşımlardan oluşur. Ayrıca, arazide gerçek bir makinadan yararlanılarak da performans kestirimi yapılabilir (Tunçdemir ve Bilgin 2002).

Laboratuvarda kayaç kesme setlerinde yürütülen deneysel çalışmaların yanı sıra Norveç Teknoloji Enstitüsü'nün geliştirdiği bazı yaklaşımlar ile de bir kazı makinasının performansı tahmin edilmektedir.

2.6.1 Tam Boyutlu Kesme Seti

2.4.1 no'lu Bölüm'de değinildiği üzere tam boyutlu kesme setlerinde bire-bir ölçekli gerçek kesimler kullanılarak oldukça büyük bloklar üzerinde kesme deneyleri yürütülür. Deneyler sırasında farklı kesme derinliği ve kesimler arası mesafelere göre kesme, normal ve yanıl kuvvetler kayıt edilir. Ayrıca, spesifik enerji değeri hesaplanır. Daha sonra Eşitlik 2.12'den makinanın net kazı miktarı hesaplanarak performans tahmini yapılır (Eskikaya et al. 1998).

$$ICR = K \cdot \frac{P}{SE_{opt}} \quad (2.12)$$

Burada; ICR= net kazı miktarı (m³/h),
K= enerji transfer oranı (0,8-0,9),
P= kazı makinasının kesme gücü (kW)'dür.
SE_{opt} = optimum spesifik enerji (kWh/m³)

Eskikaya vd. (1998) bu eşitliği kısmi cepheli kazı makinalarında, Bilgin et al. (1999a,b) da tam cephe kazı makinalarının performanslarının önceden tahminlerinde uygulamış ve gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

2.6.2 Küçük Ölçekli Kesme Seti

Bölüm 2.4.2'de belirtildiği üzere, karot örneği veya 20*10*10 cm boyutlarındaki prizmatik örnekler üzerinde yürütülen kesme deneyleri sonucunda, keski üzerinde rol oynayan üç yöndeki kuvvetler bir dinamometre ile kayıt edilir. Ortalama kesme kuvvetinin (FC) birim kesme mesafesinden elde edilen kazı hacmine bölünmesiyle spesifik enerji değeri hesaplanır. Bu değere göre orta veya ağır tip galeri açma makinası için performans değerlendirme sınıflaması yapılmış ve sonuçlar Çizelge 2.2-2.3'te sunulmuştur (Bilgin et al. 1997).

Çizelge 2.2 Orta ağırlıktaki kollu galeri açma makinasının seçim kriterleri (McFeat and Fowell 1979, Bilgin et al. 1997).

Spesifik Enerji (kWh/m ³) (MJ/m ³)		Tanımlama
> 6	> 20	Uygun değil.
6-4	20-15	Düşük kazı performansı ve aşırı uç aşınması beklenir.
4-2	15-8	Orta seviyede kazı performansı ve 9-13 m ³ /h ilerleme hızı beklenir.
< 2	< 8	Mükemmel kazı performansı ve 12-20m ³ /h ilerleme hızı elde edilebilir.

Çizelge 2.3 Ağır tip kollu galeri açma makinasının seçim kriterleri (McFeat and Fowell 1979, Bilgin et al. 1997).

Spesifik Enerji (kWh/m ³) (MJ/m ³)	Tanımlama
> 9 > 32	Keski sarfiyatının yüksek olması beklendiği için, kazılması oldukça zordur. Formasyon ince tabakalar halinde ise kesilebilir.
9-7 32-25	Masif kayada düşük kazı performansı ve 9-11 m ³ /h ilerleme hızı elde edilebilir.
7-5 25-17	Orta seviyede kazı performansı ve 12-13 m ³ /h ilerleme hızı beklenir.
< 5 < 17	Mükemmel kazı performansı ve 12-30m ³ /h ilerleme hızı elde edilebilir.

2.6.3 Görgül Bağıntılar

Kazı makinasının performansının tahmin edilmesine yönelik teoride karşılaşılan bazı sıkıntılardan dolayı görgül bağıntılar da geliştirilmiştir. Bu formüller geçmişte açılmış tünellerden elde edilen deneyimler ve verilerin istatistikî analizlerinin yorumlanmasından ortaya çıkarılmıştır.

Kollu galeri açma makinaları ve hidrolik kırıcılar için bir takım eşitlikler geliştirilmiştir. Bu bağlamda öncelikle kayacın tek eksenli basınç dayanımı (σ_c , MPa) ve kayaç kalite göstergesi (RQD, %) değerlerinden yararlanarak Eşitlik 2.13'te verilen kayaç kazılabilirlik indeksi (RMCI) bulunmaktadır (Bilgin et al. 1996).

$$RMCI = \sigma_c \cdot (RQD / 100)^{2/3} \quad (2.13)$$

Daha sonra kol eksenli dönme eksenine paralel ve kol eksenli dönme eksenine dik olan galeri açma makinalarının net kazı miktarı Eşitlik 2.14'ten ve hidrolik kırıcıların net kazı miktarı da Eşitlik 2.15'ten bulunabilir.

$$ICR = 0,28 \cdot P \cdot (0,974)^{RMCI} \quad (2.14)$$

$$ICR = 4,24 \cdot P \cdot (RMCI)^{-0,567} \quad (2.15)$$

Burada; RMCI= kayaç kazılabilirlik indeksi,
P= kazı makinasının gücü (HP)'dür.

Yukarıda verilen bağıntılarda, performans tahmininin basit olması bir avantaj gibi gözükse de zayıf yönleri de bulunmaktadır. Çok sert formasyonlarda çalışan makinalar az olduğu için veri

toplamakta oldukça zorlaşmaktadır. Bu nedenle ancak yumuşak ve orta sert formasyonda çalışan makinaların uygulanmasında daha yaygın olarak kullanılabilir.

2.6.4 NTNU Modelleri

1960'lı yıllarda darbeli deliciler ile delinen kayaçların delinebilirliğini değerlendirmek üzere NTNU (Norwegian University of Science and Technology) laboratuvarlarında NTNU/SINTEF delinebilirlik deney yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem aşağıda belirtilen deney yöntemlerini kapsamaktadır ve deney sonuçlarında elde edilen veriler birlikte değerlendirilerek tünel açma makinalarının performans tahmini veya maliyet analizleri yapılmaktadır (Dahl et al. 2007).

2.6.4.1 Kırılgenlik Deneyi (S₂₀)

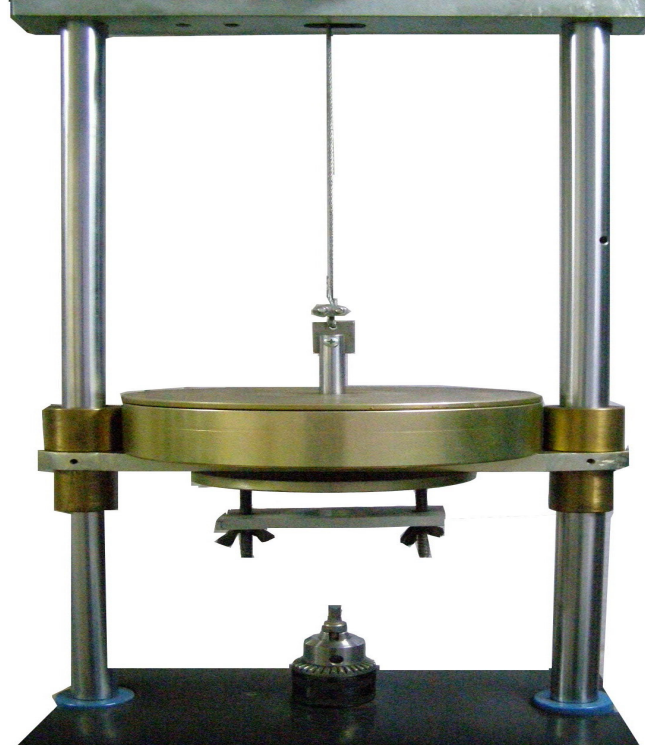
Darbeye karşı dayanımı belirlemek için uygulanan bir deneydir (Blindheim and Bruland 1998). Kayaç önce çeneli kırıcıdan geçirilerek malzeme kırılır. -16 mm/+11,2 mm elek aralığındaki malzemeden 500 gr'a karşılık gelen örnek hacmi bir havan içine konulur. Şekil 2.34'te gösterilen deney aletindeki 14 kg ağırlığındaki çekiç, ortalama 25 cm yükseklikten 20 defa düşürülür. Darbeyle havan içinde kırılan malzeme 11,2 mm'lik elekten elenir. Elek altında kalan malzeme miktarının, deneyin başında havan içine konulan malzemeye ağırlıkça (%) oranıdır. 3-5 kere tekrarlanan deneylerin ortalaması kayacın kırılgenlik değerini verir (Yaralı vd. 2008).



Şekil 2.34 Kırılgenlik testinde kullanılan deney aleti.

2.6.4.2 Sievers'in Minyatür Delme Deneyi (SJ)

Sievers'in minyatür delme deneyi (SJ) yüzey sertliği ile batmaya veya öğütmeye karşı dayanımı belirlemek üzere geliştirilmiş bir deney aletidir (Şekil 2.35) (Blindheim and Bruland 1998).



Şekil 2.35 Sievers'in minyatür delme deney aleti.

Bu deney 8,5 mm genişlik ve 110°'lik açığa sahip minyatür bir tungsten karbür uçla yürütülür. Deney için hazırlanan örnek 20 kg'lık ağırlık altına sıkıştırılır ve minyatür uç 180 dev/dk hızla 200 devir döndürülür. Daha sonra numune içerisinde açılan delik boyu bir elektronik mikrometre veya kumpasla ölçülür ve 1/10 mm'lik ölçekte SJ indeks değerine dönüştürülür. Deney aynı kayaç üzerinde 4-8 defa tekrarlanır ve ortalaması o örneğin SJ değeri olarak kabul edilir (Dahl 2003, Yaralı vd. 2008).

2.6.4.3 Norveç Aşınma Deneyi

Norveç aşınma deneyi; 10 mm genişliğinde ve 30 mm boyundaki tungsten karbür bir ucun, kırılmış kayaç parçaları üzerinde zamana bağlı olarak oluşan aşınmasının ölçülmesi esasına dayanır (Dahl et al. 2007). Aşınma, uçtaki ağırlık kaybına göre belirlenir.

Deney yöntemine göre, 1 mm'den küçük boyuta indirgenmiş kayaç parçacıkları 10 kg ağırlıkla yüklenmiş tungsten karbür bir ucun altından geçer. 20 dev/dk hızla dönen bir tabla üzerine 80 gr/dk hızla beslenen kayaç parçacıkları, 5 dk boyunca uca sürtünerek döndürülür (Şekil 2.36). Deney sonucunda uçta meydana gelen ağırlık kaybı (miligram cinsinden) aşınma miktarını (AV) gösterir (Yaralı vd. 2008).



Şekil 2.36 Norveç aşınma deneyi için kullanılan cihaz.

Norveç aşınma deneyi aynı zamanda; TBM'lerde (Tunnel Boring Machine) kullanılan disk tipi keskinin çelik halkalarındaki aşınma miktarını belirlemek amacıyla da uygulanmaktadır. Deney yönteminde; tungsten karbür uç yerine çelikten imal edilmiş uçlar kullanılmaktadır. 20 devirden (1 dk) sonra deney tamamlanır ve çelik uçta meydana gelen ağırlık kaybı (miligram cinsinden) AVS değerini verir.

Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde 2100 adet örnek üzerinde tungsten karbür ve çelik uç kullanılarak aşınma deneyleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılarak istatistikî olarak değerlendirilmiştir. Daha sonra Eşitlik 2.16'da verilen bağıntı elde edilmiştir (Dahl 2003, Akçın vd. 2009).

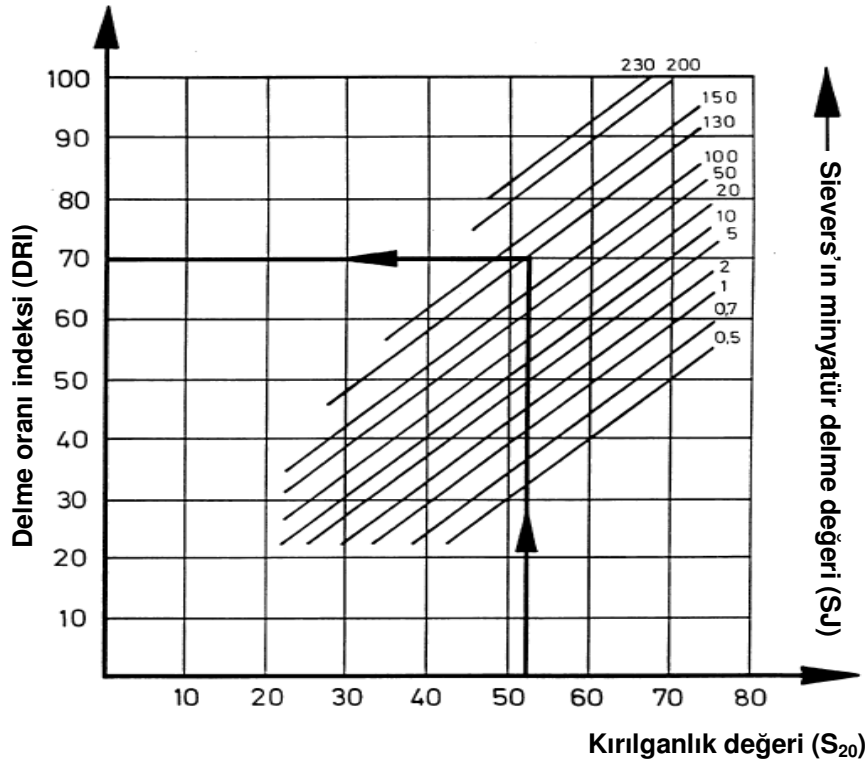
$$AVS = 1,781 \cdot (AV)^{0,779} \quad (2.16)$$

Burada; AVS= Çelik uçtaki ağırlık kaybı (mg),
AV= Tungsten karbür ucun aşınma miktarı (mg) dır.

2.6.4.4 NTNU Modellerinden Yararlanılarak Kazı Makinası Performans Değerlendirmesi

NTNU modelleri alışlagelmiş klasik performans tahmin yöntemlerinden biraz farklı olarak Norveç'lilerin tünelcilik alanında geliştirdiği bir yöntemdir. Bu yöntemler uzun yıllar boyunca Norveç'te bulunan tünellerden alınan verilerin laboratuvar çalışmalarıyla ilişkilendirilmesi sonucunda geliştirilmiştir. Bu modeller; elde edilen veriler ve tecrübeler ışığında güncellenmeye devam etmektedir. Halen, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mekanizasyonu Araştırma Laboratuvarları'nda da bu deneyler yapılmaktadır.

Yeraltında kullanılacak bir kazı makinasının performansını önceden tahmin etmek için bu deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birlikte yorumlanırlar. Bu amaçla öncelikle Şekil 2.37'de verilen abak kullanılarak delme oranı indeksi (DRI) belirlenir. Bu abak üzerindeki yatay ekseninde yer alan kırılgenlik değeri (S_{20}) ile sağ düşey eksenindeki SJ değerinin grafik üzerinde kesiştirilmesiyle DRI değeri tahmin edilir.



Şekil 2.37 DRI'nın tahmin edilmesinde kullanılan abak (Blindheim and Bruland 1998).

DRI; kayacın yüzey sertliği için düzeltilmiş kırılgenlik değeri olarak tanımlanabilir (Dahl et al. 2007). 1943 yılında İsviçre'de N. Von Matern ve A. Hjelmer tarafından geliştirilmiş ve bu

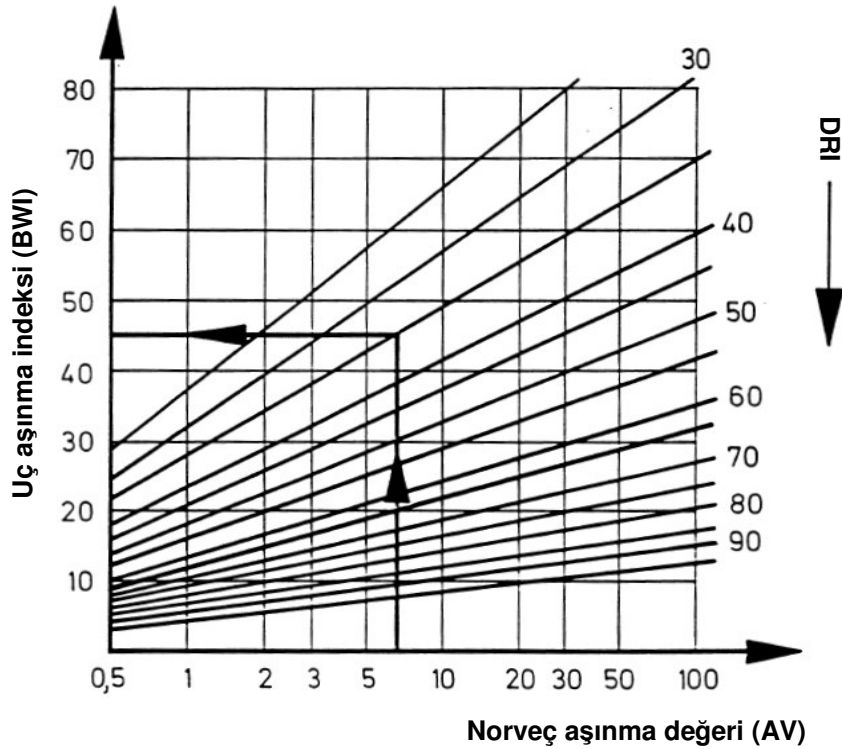
deney yöntemi birkaç değişiklikten sonra standart hale gelmiştir. 1950’li yılların sonundan itibaren kayaçların delinebilirliklerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır (Dahl 2003, Yaralı 2007).

DRI’nın yanı sıra SJ deneyi ve çelik uçla yapılan aşınma deney sonuçları birlikte değerlendirilerek Eşitlik 2.17’den keski ömrü indeks değeri belirlenir.

$$CLI = 13,84 \cdot \left(\frac{SJ}{AVS} \right)^{0,3487} \quad (2.17)$$

Burada, CLI= Keski ömrü indeksi,
SJ=Sievers’in minyatür delme değeri’dir.

DRI ve CLI değerleri bir kazı makinası performansını önceden tahmin etmek üzere birlikte kullanılan indeks değerleridir. Ayrıca, kazı makinasının kesici kafasına yerleştirilen keskilerdeki aşınma miktarı da tahmin edilmektedir. Bu amaçla; AV ve DRI değerleri Şekil 2.38’de verilen abak üzerinde kesiştirilerek uç aşınma indeksi (BWI) belirlenir. Bununla birlikte; kayacın kuvars içeriğinin sıcaklık analiziyle belirlenmesiyle ilave bir parametre olarak uç aşınma indeksinin tahmin edilmesinde kullanılabilir (Blindheim and Bruland 1998). Elde edilen delme oranı indeksi, uç aşınma indeksleri ve keski ömrü indeksi Çizelge 2.4’te verilen sınıflamaya göre değerlendirilerek delinebilirlik (kazılabilirlik) belirlenir.



Şekil 2.38 BWI’nın tahmin edilmesinde kullanılan abak (Blindheim and Bruland 1998).

Çizelge 2.4 DRI, BWI ve CLI değerlerine göre delinebilirlik/kazılabilirlik sınıflaması (Dahl 2003, Akçın vd. 2009).

Sınıf	DRI	BWI	CLI
Oldukça düşük	≤ 25	≤ 10	< 5
Çok düşük	26-32	11-20	5,0-5,9
Düşük	33-42	21-30	6,0-7,9
Orta	43-57	31-44	8,0-14,9
Yüksek	58-69	45-55	15-34
Çok yüksek	70-82	56-69	35-74
Oldukça yüksek	≥ 83	≥ 70	≥ 75

BÖLÜM 3

PFC^{3D} PROGRAMI VE ÇALIŞMA TEORİSİ

PFC^{3D} (Particle Flow Code in 3 Dimensions); Cundall ve Strack (1979) tarafından geliştirilen ayırık elemanlar yöntemiyle küresel tanecikler arasındaki etkileşim ve hareketi üç boyutlu ortamda modelleyen bir programdır. Bu programda yeraltı ve yerüstünde karşılaşılan çeşitli kaya mekaniği problemleri ve kayacın gerilme-birim şekil değiştirme davranışı sergilediği laboratuvar deneylerini modellemek mümkündür. Bu yüzden; madencilik, zemin mekaniği, inşaat ve jeoloji gibi birçok mühendislik dallarında yaygın olarak kullanılabilir.

PFC^{3D}'de en temel elemanlar; küresel tanecikler ve duvarlardır. Küresel tanecikler belirli bir dayanımı olan bağlarla birbirine bağlanırlar ve arzu edilen gözenekliliğe göre duvarlar arasında sıkıştırılırlar. Böylece bir tanecik topluluğu oluşturulur. Bu tanecik topluluğu laboratuvarında kullanılan bir örneği veya sağlam kaya malzemesini temsil eder. Tanecik topluluğun duvarlarına veya istenen taneciklerine hız verilebilir. Harici kuvvetler veya yerçekimi ivmesi uygulanabilir. Amaç, uygulanan hız ve kuvvetler ışığında tanecik topluluğunun dinamik davranışını modellemektir (Su ve Akçın 2009b). Potyondy ve Cundall'a (2004) göre, herhangi bir gerilme altındaki tanecik topluluğunun temas kuvvetleri ve yerdeğiştirme hareketleri, her bir taneciğin hareketinin izleri ile bulunur. Bu hareketler, dışarıdan uygulanan kuvvetlerin neden olduğu rahatsızlıkların tanecik sistemi boyunca yayılmasından meydana gelir.

PFC^{3D}; statik veya dinamik modda çalıştırılabilir. Bünyesinde bulunan FISH programlama dili kullanıcıya yeni değişkenler ve fonksiyonlar tanımlamasına olanak sağlar. Programın bazı özellikleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir :

- Tanecikler üzerinde oluşturulacak yükleme; yerçekimi veya duvarların hareket ettirilmesi ile yapılabilir.

- Duvarlara ötelenme veya döndürme hızları verilebilir. Her bir duvardaki kuvvet ve momentler kayıt edilebilir ve programın herhangi bir anında çıktı olarak alınabilir.
- Hazırlanan programın çalışma süresi otomatik olarak hesaplanır ve modeldeki taneciklerin katılıklarına göre artabilir veya azalabilir.
- Programın herhangi bir aşamasında tanecik ve duvar eklenebilir veya çıkartılabilir. Ayrıca, taneciklerin yarıçapı programın herhangi bir noktasında değiştirilebilir.
- Programda tanımlanan parametrelerin zaman ile değişimi izlenebilir ve grafik olarak çizilebilir (ITASCA 2006).

3.1 PFC^{3D}'DE TANECİK-AKIŞ MODELİ

PFC^{3D}'de genel bir tanecik akış modeli, rastgele taneciklerden bir araya gelmiş olan bir sistemin mekanik davranışının benzetişimini yapar. Burada “tanecik” terimi, sınırlı boyuttaki boşluktan oluşan bir kütleli gösterir. Model, birbirinden bağımsız olarak yer değiştirebilen, sadece temas noktalarında veya tanecikler arasındaki ara yüzlerde etkileşim gösteren ayırık taneciklerden meydana gelir. Eğer taneciklerin katı (rijit) oldukları ve birbirine dokunma davranışları yumuşak temas yaklaşımı kullanılarak tanımlanırsa; böyle bir sistemin mekanik davranışı, her bir taneciğin hareketi ve her bir temas noktasında rol oynayan tanecikler arası kuvvetler vasıtasıyla açıklanır. Newton'un hareket kanunları da bu tanecikler arasındaki hareket ve kuvvetlerin ilişkisini gösterir. Kuvvetler statik dengede veya taneciklerin akışına sebep olacak şekilde olabilirler.

Daha karmaşık davranışlar, yine taneciklerin temas noktalarında birbirlerine bağlanmasıyla modellenebilir. Herhangi bir bağdaki tanecikler arası kuvvet bağ dayanımını aştığında, o bağ yenilir. Bu durumda tanecikler arasında çekme kuvveti gelişir. Böylece birbirine bağlı durumda bulunan bu bloklar ve hatta bunların daha küçük parçacıklara ayrılmasını sağlayan çatlaklar da modellenebilir.

PFC^{3D} aşağıda sunulan varsayımlardan yola çıkarak tanecik-akış modelini oluşturur :

- Tanecikler, rijit kütleler gibi ele alınabilir.
- Temas noktaları neredeyse gözden kaybolacak kadar küçük alanlarda (örneğin, bir noktada) meydana gelir.

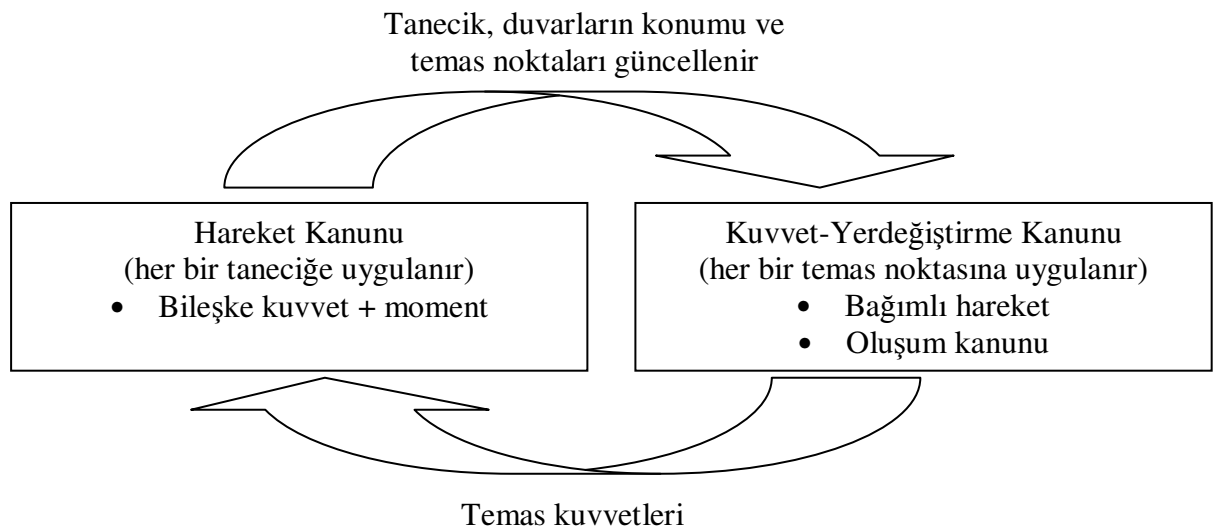
- Temas noktalarındaki davranış; rijit taneciklerin birbirleri üzerine binmesine izin verildiği yumuşak-temas yaklaşımıdır.
- Taneciklerin birbirleri üzerine binme miktarı kuvvet-yerdeğiştirme kanunuyla açıklanan temas kuvvetiyle ilişkilidir. Ayrıca; taneciklerin birbiri üzerine binmesi tanecik boyutuna da bağlıdır.
- Bağlar tanecikler arasındaki temas noktalarında bulunur.
- Bütün tanecikler küreseldirler. Bununla birlikte çeşitli tanecik kümeleri de yaratılabilir.

PFC^{3D} geleneksel tanecik-akış uygulamalarının yanında, sınır ve birincil koşulları önceden tanımlanan katıların analizinde de uygulanabilir.

Küresel taneciklerden başka, PFC^{3D} modelleri “duvar”lar da içerir. Duvarlar; sıkıştırma ve sınırlama amacıyla tanecik topluluklarının sınır koşullarına hız uygulanmasını sağlar. Tanecikler ve duvarlar, temas noktalarında meydana gelen kuvvetler aracılığıyla etkileşim gösterirler. Ayrıca temas noktaları ya tanecik-tanecik ya da tanecik-duvar arasında oluşur, duvar-duvar arasında oluşmaz (ITASCA 2006).

3.2 PFC^{3D}'NİN HESAPLAMA DÖNGÜSÜ

PFC^{3D}'de hesaplama döngüsü; her bir taneciğe hareket kanunu, her bir temas noktasında kuvvet-yer değıştirme kanunu ve duvar konumlarının güncellenmesinin tekrarlanmış olarak gerektiren zaman-adımlama algoritmasıdır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 PFC^{3D}'de hesaplama döngüsü (ITASCA 2006).

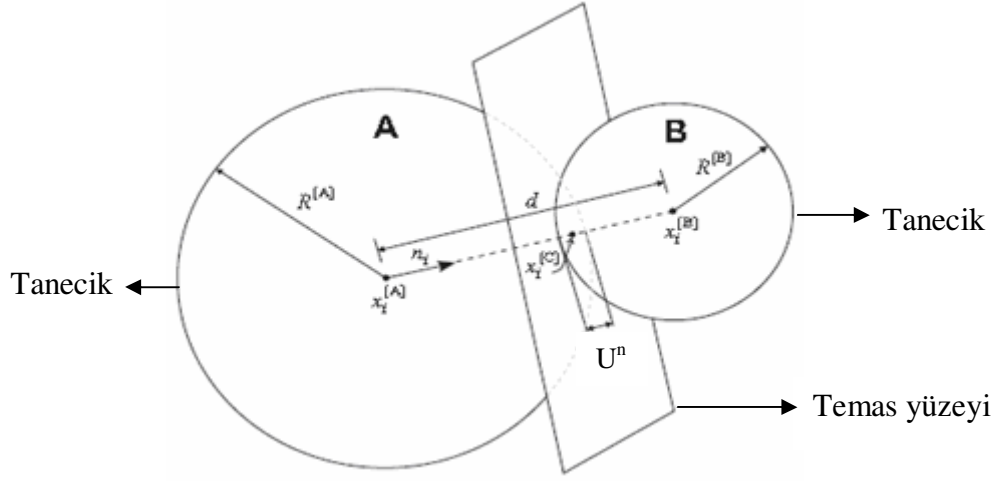
Döngünün başlangıcında, koordinatları belirlenen bir tanecik ve duvardan yola çıkarak temas noktaları ayarlanır. Daha sonra, iki büyüklük (tanecik-tanecik veya tanecik-duvar) arasındaki bağımlı harekete göre ortaya çıkan temas kuvvetlerini güncellemek için her bir temas noktasında kuvvet-yer değiştirme kanunu uygulanır. Temas kuvvetleri sonucu oluşan bileşke kuvvet ve momente bağlı olarak her bir taneciğin konum ve hızını güncellemek için hareket kanunu uygulanır. Ayrıca, duvar hızlarına göre duvar konumları da güncellenir. Tüm bu süreç birbirine paralel olarak üç boyutlu ortamda devam eder (ITASCA 2006).

3.2.1 Kuvvet - Yerdeğiştirme Kanunu

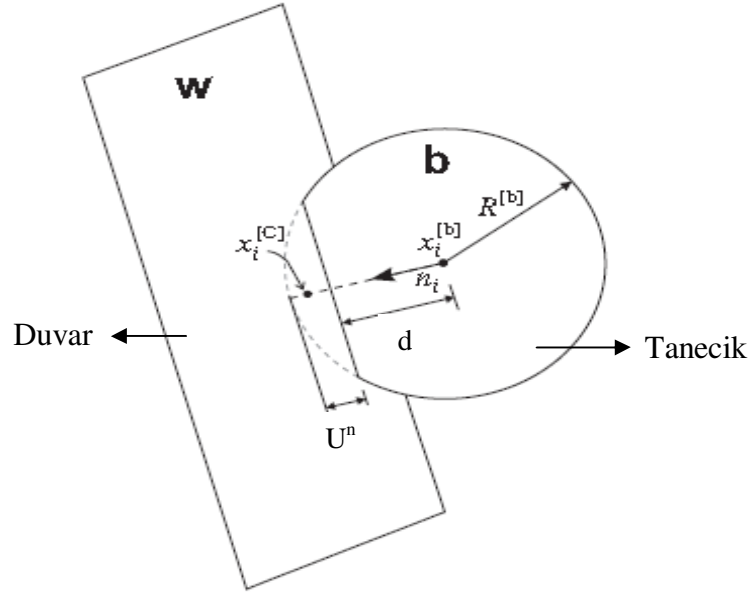
Kuvvet-yer değiştirme kanunu; temas halindeki iki büyüklük (tanecik-tanecik veya tanecik-duvar) ve bunlar üzerinde rol oynayan temas kuvvetleri arasındaki bağımlı yer değiştirmeye ilişkilidir. Bu temas kuvveti hem tanecik-tanecik, hem de tanecik-duvarın birbiriyle temas ettiği noktada meydana gelir.

Kuvvet-yer değiştirme kanunu Şekil 3.2’de gösterilen birim normal vektörü (n_i) tarafından tanımlanan temas yüzeyindeki ($x_i^{[c]}$) temas noktasında oluşur. Normal vektör; tanecik-tanecik temasında iki büyüklüğün merkezleri arasındaki hat boyunca, tanecik-duvar temasında ise tanecik merkezi ve duvar arasındaki en kısa mesafede tanımlanan hat boyunca yönlendirilir (Şekil 3.2-3.3). Temas kuvveti; normal vektör yönündeki normal bileşene ve temas düzleminde rol oynayan kayma bileşenlerine ayrılır. Kuvvetin bu iki bileşeni, bağımlı yer değiştirmenin temas noktalarındaki normal ve kayma katılıklarına karşılık gelen bileşenlerdir.

Kuvvet-yer değiştirme ilişkisi hem tanecik-tanecik hem de tanecik-duvar temasları için tanımlanır. Şekil 3.2’de A ve B tanecikleri arasındaki tanecik-tanecik teması, Şekil 3.3’te de b (ball) ve w (wall) harfleriyle gösterilmiş olan tanecik-duvar teması verilmiştir (ITASCA 2006).



Şekil 3.2 Tanecik-tanecik arasındaki temasın genel gösterimi (ITASCA 2006).



Şekil 3.3 Tanecik-duvar arasındaki temasın genel gösterimi (ITASCA 2006).

Burada; R ; tanecik yarıçapı, x ; tanecik merkezi koordinatları, d ; merkezler arası mesafe, U^n ; birbirine binme mesafesidir.

Birbiri üzerine binme mesafesi olan U^n , normal yöndeki temas yer değiştirmesi olarak tanımlanır ve Eşitlik 3.1'den hesaplanır. Ayrıca temas noktasının konumu Eşitlik 3.2'den bulunabilir.

$$U^n = \begin{cases} R^{[A]} + R^{[B]} - d, & (\text{tanecik-tanecik}) \\ R^{[B]} - d, & (\text{tanecik-duvar}) \end{cases} \quad (3.1)$$

Burada; d = taneciklerin merkezleri veya tanecik merkeziyle duvar arasındaki mesafe'dir.

$$x_i^{[C]} = \left\{ \begin{array}{ll} x_i^{[A]} + \left(R^{[A]} - \frac{1}{2} U^n \right) n_i, & \text{(tanecik-tanecik)} \\ x_i^{[B]} + \left(R^{[B]} - \frac{1}{2} U^n \right) n_i, & \text{(tanecik-duvar)} \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

Temas yüzeyinde oluşan temas kuvvet vektörü (F_i), Eşitlik 3.3'te gösterildiği gibi normal ve kayma bileşenlerine ayrılır.

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (3.3)$$

Burada; F_i^n ve F_i^s sırasıyla temas noktasında etkiyen kuvvetin normal ve kayma bileşen vektörleridir.

Normal temas kuvvet vektörü (F_i^n) Eşitlik 3.4 ve kayma temas vektörü (F_i^s) Eşitlik 3.5 yardımıyla hesaplanabilir.

$$F_i^n = K^n U^n n_i \quad (3.4)$$

$$\Delta F_i^s = -k^s \Delta U_i^s \quad (3.5)$$

Burada; K^n = temas noktasındaki normal katılık (kuvvet/yer değiştirme),
 k^s = temas noktasındaki kayma katılığı'dır (kuvvet/yer değiştirme).

Normal katılık (K^n) kiriş modülü olup toplam yer değiştirme ve kuvvetlerle ilişkilidir. Buna karşın (k^s) teğet modülü olup yer değiştirme ve kuvvetlerdeki artış ile ilişkilidir. Bu iki değer sırasıyla Eşitlik 3.6 ve Eşitlik 3.7'den hesaplanabilir.

$$K^n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \quad (3.6)$$

$$k^s = \frac{k_s^{[A]} k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \quad (3.7)$$

3.2.2 Hareket Kanunu

Tek bir rijit taneciğin hareketi; tanecik üzerinde rol oynayan bileşke kuvvet ve moment vektörlerine göre belirlenir ve tanecik üzerindeki bir noktanın ötelenme (translational) ve dönme (rotational) hareketleriyle tanımlanabilir. Ötelenme hareketi konum (x_i), hız ($\dot{x}_i$) ve ivme ($\ddot{x}_i$); taneciğin dönme hareketi de açısal hız (ω_i) ve açısal ivme ($\dot{\omega}_i$) aracılığıyla tanımlanır.

Hareket bağıntıları iki vektör eşitliğiyle açıklanabilir. Birincisi, bileşke kuvvet ve dönme hareketi, diğeri de bileşke moment ve öteleme hareketiyle ilişkilidir. Dönme hareketinin vektörel şekli Eşitlik 3.8’de ve ötelenme hareketinin ise Eşitlik 3.9’da verilmiştir.

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (\text{Dönme hareketi}) \quad (3.8)$$

Burada; F_i = bileşke kuvvet (i numaralı temas noktasında tanecik üzerine dışarıdan uygulanan kuvvetlerin toplamı),
 m = taneciklerin toplam kütlesi,
 g_i = yerçekimi ivme vektörü’dür.

$$M_i = I \dot{\omega}_i = \left(\frac{2}{5} m R^2 \right) \dot{\omega}_i \quad (\text{Öteleme hareketi}) \quad (3.9)$$

Burada; M_i = i numaralı tanecik üzerindeki bileşke moment’tir.

Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11 ($t \pm \Delta t/2$) zamanındaki öteleme ve dönme ivmelerini verir.

$$\ddot{x}^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} \left(\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} \right) \quad (3.10)$$

$$\dot{\omega}^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} \left(\omega_i^{(t+\Delta t/2)} - \omega_i^{(t-\Delta t/2)} \right) \quad (3.11)$$

Bu eşitlikler; Eşitlik 3.8 ve Eşitlik 3.9’daki yerine koyulur ve ($t+\Delta t/2$) zamanı sonundaki hızlar belirlenir. Buna göre de her bir tanecik merkezinin konumunu güncelleştirmek için gerekli olan hızlar Eşitlik 3.12’den bulunur.

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \quad (3.12)$$

3.3 TEMAS OLUŞUM MODELLERİ

Tanecikler temas noktalarında geliştirdikleri kuvvetler boyunca kendi aralarında veya duvarlarla etkileşim halindedirler. Bu etkileşim “temas” terimi ile ifade edilir. İki tanecik arasındaki bağımlı hareket bir kuvvet oluşmasına neden olur ve buna tanecikler temas halindedir denir.

Temas oluşum modelleri, temas noktasında meydana gelen fiziksel davranışı tanımlar. Her ne kadar bir tanecik topluluğu doğrusal olmayan karmaşık davranışlar sergileyebilse de, bu davranış PFC^{3D}’de bulunan basit temas modelleriyle elde edilir. Bu modeller üç kısımdan oluşur. Bunlar; temas-katılık modeli, kayma ve bağlanma modelleridir.

3.3.1 Temas-katılık Modeli

Temas-katılık modeli temas kuvvetleri ve bağımlı yer değiştirme arasında elastik bir ilişki sağlar. Temas katılıklarının normal ve kayma bileşenleri, Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5’te de verildiği gibi normal ve kayma yönlerindeki kuvvet ve bağımlı yer değiştirmeye ilişkilidir.

Temas-katılık modelleri doğrusal (linear) model ve basitleştirilmiş Hertz-Mindlin modeli olmak üzere iki çeşittir. Doğrusal modelde, kuvvet ve yer değiştirmeler sabit katılık değerleriyle doğrusal olarak ilişkilidir. Buna karşın Hertz-Mindlin modelinde aradaki ilişki doğrusal değildir (ITASCA 2006).

3.3.2 Kayma Modeli

Bu model çekme yönünde normal dayanım sağlamaz ve kesme kuvvetini sınırlayarak büyüklükler (tanecik veya duvar) arasında kayma oluşmasını sağlar. Büyüklükler arasında bir bağ var olmadığı sürece daima aktiftir.

Kayma modeli, temas noktasındaki sürtünme katsayısı (μ) ile tanımlanır. Normal dayanımın olmama kriteri Eşitlik 3.1’de verilen üst üste binme mesafesinin sıfırdan küçük veya sıfıra eşit olup olmadığının kontrol edilmesiyle belirlenebilir. Eğer bu koşul sağlanıyorsa hem normal hem de kayma kuvvetleri sıfır olur. Bu durumda temas noktasındaki kayma koşulu Eşitlik

3.13'te verilen maksimum kayma temas kuvvetinin hesaplanmasıyla belirlenir (ITASCA 2006).

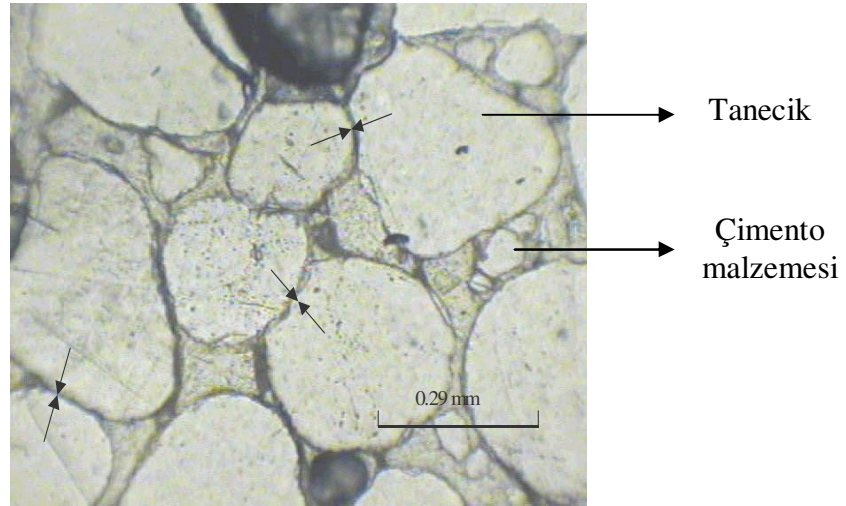
$$F_{\max}^s = \mu \cdot |F_i^n| \quad (3.13)$$

Burada; $F_{\max}^s$ = maksimum kayma kuvveti,
 μ = tanecikler arası sürtünme katsayısı,
 F_i^n = normal temas kuvvetidir.

Eğer $|F_i^s| > |F_{\max}^s|$ olduğu durumda kayma oluşmaz, ancak F_i^s değeri $F_{\max}^s$ 'a eşit alınarak kayma oluşması sağlanabilir.

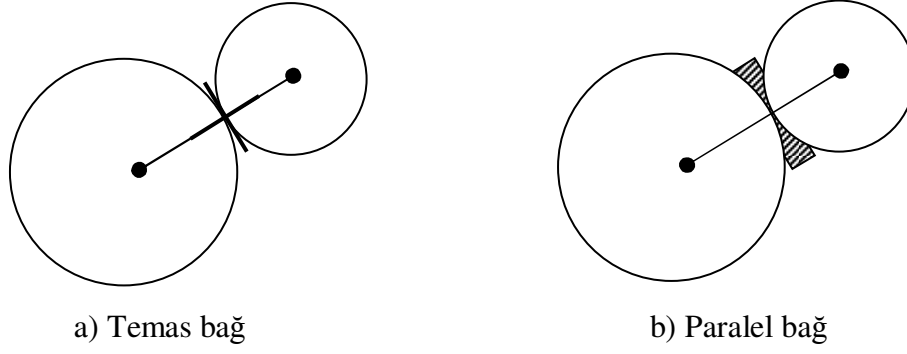
3.3.3 Bağ Modelleri

PFC^{3D}'de tanecikler temas noktalarında birbirleriyle bağ oluştururlar. Bağlar iki taneciği birbirine bağlayan bir çeşit çimento (yapışkan) gibi düşünülebilir. Şekil 3.4'te bir kaya malzemesinden alınmış ince kesit üzerinde tanecik ve bu tanecikleri birbirine bağlayan çimento malzemesi gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Kaya malzemesi ince kesiti.

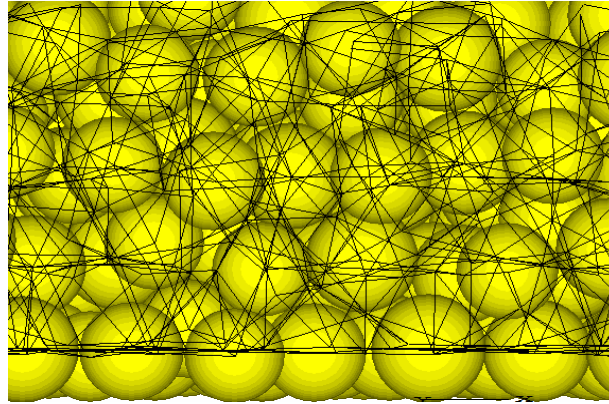
PFC^{3D}'de temas ve paralel bağ olmak üzere iki çeşit bağ türü vardır (Şekil 3.5). Temas bağ gözle görülmeyecek kadar küçük bir noktada rol oynar. Buna karşın, paralel bağ tanecikler arasında dairesel kesitli sınırlı bir alanda rol oynamaktadır.



Şekil 3.5 Taneciklerin bağlanma modelleri (ITASCA 2006).

3.3.3.1 Temas Bağ Modeli

Temas bađı iki taneciđin birbiriyle temas ettiđi bir noktada normal ve kayma katılık deđerlerine sahip bir çift elastik yay gibi dűşűnűlebilir. Bir temas bađının olduđu durumda, tanecikler arasında kayma oluřabilir. PFC^{3D}'de temas bađla oluřturulmuř bir űrnekten alınmıř ince kesit Şekil 3.6'da gűsterilmiřtir.

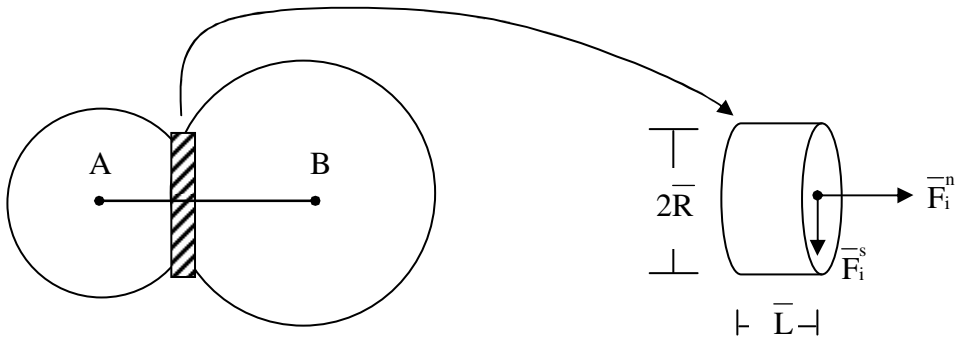


Şekil 3.6 PFC^{3D}'de temas bađ kullanılarak hazırlanmıř bir űrnek kesiti.

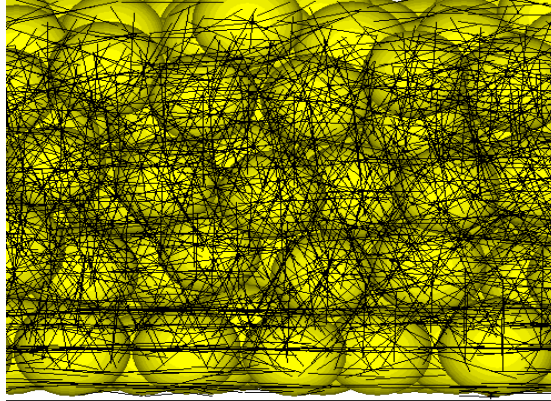
Temas bađ; normal temas bađ dayanımı (F_c^n , kuvvet) ve kayma temas bađ dayanımı (F_c^s , kuvvet) olmak űzere iki parametreden oluřmaktadır. Çekme yűnűndeki normal temas kuvvetinin bűyűklűđű, normal temas bađ dayanımına eřit olur veya ařarsa bađ yenilmiř olur ve bűylece hem normal hem de kayma temas kuvvetleri sıfır olur. Bunun yanında normal kuvvetin basınç ve kayma kuvvetinin sűrtűnme sınırını ařmaması kořuluyla; kayma temas kuvveti, kayma temas bađ dayanımına eřit olur veya ařarsa bađ yine yenilmiř olur.

3.3.3.2 Paralel Bağ Modeli

Paralel bağ; iki tanecik arasında sınırlı miktarda depolanan çimentolu malzemenin davranışını tanımlar. Bu bağlar yukarıda anlatılan kayma veya temas bağ modelleriyle aynı şekilde tanecikler arasında elastik etkileşim kurar. Bu yüzden paralel bağın olduğu durumda tanecikler arasında kaymaya izin verilmez. İki tanecik arasında çimento malzemesi gibi gösterilen paralel bağ Şekil 3.7’de verilmiştir (ITASCA 2006). Ayrıca, PFC^{3D}’de paralel bağ kullanılarak hazırlanmış bir örnekten alınan ince kesit Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Paralel bağın silindir şekilli çimentolu malzeme gibi gösterilmesi (ITASCA 2006).



Şekil 3.8 PFC^{3D}’de paralel bağ kullanılarak hazırlanmış bir örnek kesiti.

Paralel bağ, iki taneciğin birbiriyle temas ettiği dairesel bir temas yüzeyinin ortasındaki bir noktada normal ve kayma katılık değerlerine sahip bir çift elastik yay gibi düşünülebilir. Temas noktasındaki bağımlı hareket, paralel bağ katılıklarının bir sonucu olarak bağ içerisinde kuvvet ve momentlere sebep olur. Bu kuvvet ve momentler bağ malzemesinin dış çerçevesinde rol oynayan maksimum normal ve kayma gerilmeleriyle ilişkili olabilir. Bu gerilemelerin herhangi birine karşılık gelen bağ dayanımının aşılması halinde bağ yenilir.

Paralel bağ; normal ve kayma katılıkları ($\bar{k}^n$ ve $\bar{k}^s$, gerilme/yer değiştirme), normal ve kayma dayanımı ($\bar{\sigma}_c$ ve $\bar{\tau}_c$, gerilme) ve bağ yarıçapı ($\bar{R}$) parametreleriyle tanımlanır.

3.4 PFC^{3D}'DE BASİT BİR MODELİN HAZIRLANMASI

Yeraltı açıklıklarının, formasyon üzerinde yapılan kazıların veya laboratuvarda uygulanan mekanik bir deneyin PFC^{3D} ile sayısal olarak modellenmesi ya da tasarlanması için uygulanan genel yaklaşım şöyledir :

Öncelikle modellenecek sistem fiziksel olarak tasarlanır ve kavramsal bir görüntüsü yaratılır. Daha sonra tanecik (Ball) ve duvar (Wall) oluşturma komutları ile model oluşturulur. Geometri, jeolojik yapı (faylar, eklemler, yataklanma düzlemleri, vb.), malzeme davranışı ve dışarıdan uygulanacak yüklemenin türü gibi modelin analizi için gerekli parametreler girilir. Program defalarca çalıştırılır. Elde edilen sonuçlar kayıt edilir, gerekli hesaplamalar yapılır. En son aşamada ise tüm veriler yorumlanmak üzere incelenir.

Yukarıda verilen yaklaşıma göre PFC^{3D}'de bir model oluşturulması ve bu modelin çözümlenmesi başlıca aşağıdaki bölümlerden oluşur.

3.4.1 Taneciklerin Hazırlanması

Tanecikler, koordinat sisteminden yararlanarak belirli bir alanda oluşturulur. Taneciklerin merkezleri ve temas noktaları x, y, z pozisyon vektörleri ile tanımlanır. Taneciklerin oluşturulması için “BALL” veya “GENERATE” komutları kullanılır. Ball komutuyla tek bir tanecik oluşturulur ve çevresindeki diğer nesnelerden bağımsız olarak istenilen noktaya yerleştirilebilir. Böylece, taneciklerin üst üste binmesine izin verilebilir. Generate komutu ise aynı anda birden fazla sayıda tanecik oluşturmak için kullanılır. Fakat, taneciklerin konumları diğer nesnelerden etkilenir. Bu yüzden taneciklerin üst üste binmesine izin verilmez.

3.4.2 Duvarların Oluşturulması ve Sınır Koşulların Belirlenmesi

PFC^{3D}'de duvarlar “WALL” komutu ile tanımlanırlar. PFC^{3D}'de bir tanecik topluluğu oluşturulduktan sonra sınır koşulları iki şekilde belirlenebilir. İlk yöntemde; tanecikler

duvarlar arasında sıkıştırılmıştır. Duvarlar bir sınır elemanı gibi rol oynamaktadırlar. Sabit bir hızda hareket ettirilebilir ve tepki kuvvetleri izlenebilir. Fakat, duvarlara direk kuvvet uygulanması mümkün değildir. Diğer yöntemde ise duvarlarla temas halinde olan tanecikler bir tabaka veya düzlem şeklinde belirlenirler. Bunlara sınır tanecikleri denir. İstenilen duvarların silinmesi ve sınırdaki taneciklerin kontrol edilmesi ile sınır koşullar belirlenebilir.

3.4.3 Malzeme Özellikleri

Programda hem tanecikler, hem de tanecikler arasındaki temas bağlarının tanımlanması için “PROPERTY” komutu kullanılır. Seçilen özelliklerin bir modele atanması her ne kadar kolay olsa da, genellikle bu özelliklerin belirlenmesi ve gerçek malzeme özelliklerini yansıtmaları oldukça zordur. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi sürekli modeller için, elastiklik modülü veya dayanım değerleri gibi malzeme özellikleri laboratuarda yapılan deneylerden direkt olarak elde edilebilir. Bununla birlikte, PFC^{3D} daha farklı bir yapıda çalışır ve malzemenin mikro bileşenlerinden yola çıkarak malzeme davranışı belirlenir.

3.4.4 Yükleme

PFC^{3D}'de yükleme; pasif ve aktif olmak üzere 2 kategoriye ayrılır. Pasif yüklemede model içerisinde yapılan değişikliklerle yüklerin transfer edilmesi gibi düşünülebilir (örneğin; bir yeraltı açıklığının oluşturulması). Yerçekimi yüklemesi de yine pasif yükleme kategorisi altında sayılabilir. Aktif yükleme ise dışarıdan (external) kuvvet veya hız uygulandığında geçerli olur.

Duvarlar, taneciklerin dayanımından bağımsız olarak verilen hızda hareket ettirilmesiyle veya bir servo-mekanizma ile yükleme yaptırılabilir. Ayrıca; duvarlarla temas halindeki sınır taneciklerinin kontrol edilmesiyle de yükleme yapılabilir.

3.4.5 Çözümleme

PFC^{3D}'de oluşturulan bir modelin çözümlemesi statik ve dinamik olarak iki kategoride incelenir. Program ilk olarak statik modda başlatılır ve kayaç denge haline gelinceye kadar da bu modda çalışması gereklidir. Daha sonra dinamik çözümlemeye geçilebilir. Statik çözümleme sırasında sistem ya dengeye ulaşır yada yenilmeye başlar. Dinamik bir problem

için problemdeki parametrelerin zaman ile değişiminin incelenmesi ile çözüm oluşturur. Çözümleme “CYCLE” ve “STEP” komutları ile gerçekleştirilir.

3.4.6 Sonuçların Yorumlanması

PFC^{3D}'nin sayısal modelleme yöntemlerinden süreksiz modelleme tekniğiyle (DEM) çalışması ve doğrusal olmayan bir sistemi modellemesinden dolayı; problemlerin çözümlenmesi ve sonuçların yorumlanması sürekli yöntemlere göre çok daha zordur.

Sayısal modelin denge halinde (duraylı) olması veya olmaması durumlarını değerlendirmek için çeşitli yöntemler oluşturulmasıyla sonuçlar yorumlanabilir.

3.5 PFC^{3D}'DE NUMUNE HAZIRLAMA

Laboratuvarda yürütülen herhangi bir deneyi PFC^{3D}'de modellemek üzere numune hazırlanması gerekebilir. Bu işlem ana hatlarıyla 4 aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, tanecikler bir araya getirilir ve altı adet duvar arasında sıkıştırılarak tanecik topluluğu oluşturulur. Daha sonra, tüm bu taneciklere izotropik gerilme yüklenir. Yüzen tanecikler (floater) ortadan kaldırılır. Son olarak da, denge halindeki nihai örnek elde edilir.

3.5.1 Tanecik Topluluğunun Oluşturulması

Yarıçapları önceden tanımlanmış olan tanecikler altı kenarlı bir numune içerisine dağıtılarak PFC^{3D}'de bir tanecik topluluğu oluşturulur. Daha sonra tanecikler arasına temas veya paralel bağ yüklenerek sanal örnek (numune) hazırlanır.

Numune hazırlama sırasında ilk adım olarak Çizelge 3.1'de verilen parametreler tanımlanır. Daha sonra, malzemenin dayanımı ve diğer fiziksel özelliklerini gösteren mikro özellikler girilir. Temas bağlı bir numune hazırlamak için gerekli mikro özellikler Çizelge 3.2'de ve paralel bağlı malzeme hazırlama için gerekli mikro özellikler Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Her iki tür bağ dayanımına ihtiyaç olduğunda hem Çizelge 3.2 ve hem de Çizelge 3.3'teki mikro özelliklerden yararlanılır. Bazı durumlarda da sadece geometrik ve fiziksel şekil önemli olup herhangi bir bağ yüklemeye gerek kalmayabilir. Böyle bir durumda da sadece Çizelge 3.4'teki parametrelerden yararlanılır.

Çizelge 3.1 Numune hazırlama sürecini kontrol eden parametreler.

Parametre	Tanımı
h	Numunenin yüksekliği (m)
w	Numunenin genişliği (m)
d	Numunenin boyu (m)
R_{min}	Minimum tanecik boyutu (m)
R_{max} / R_{min}	Tanecik boyu oranı
β	Duvar katılık katsayısı
σ_o	İzotropik gerilme (Pa)
N_f	Temas etmeyen en küçük temas nokta sayısı
n_f/N	Temas etmeyen yüzen tanecik oranı

Çizelge 3.2 Temas bağlı malzemeyi tanımlayan mikro özellikler.

Parametre	Tanımı
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
E_c	Tanecik-tanecik arası temas modülü (Pa)
k_n/k_s	Tanecik katılık oranı
μ	Tanecikler arası sürtünme katsayısı
σ_c (ort.)	Temas bağı normal dayanımı (Pa)
σ_c (std. sap.)	Temas bağ normal dayanımının standart sapması (Pa)
τ_c (ort.)	Temas bağı kayma dayanımı (Pa)
τ_c (std. sap.)	Temas bağ kayma dayanımının standart sapması (Pa)

Çizelgelerde verilen tanecikler arası temas modülü (E_c) Eşitlik 3.14'te yerine konularak taneciklerin normal katılıkları (k_n) hesaplanır. Elde edilen değer tanecik katılık oranına bölünerek kayma katılıkları (k_s) belirlenir. Taneciklerin normal katılık değerleri Çizelge 3.1'de verilen duvar katılık katsayısı (β) ile çarpılarak duvarlara ait katılık değerleri bulunur. Son olarak tüm bu hesaplanan değerler tanecik ve duvarlara atanarak numunenin denge haline gelmesi beklenir.

$$k_n = 4.0 * E_c * \bar{R} \quad (3.14)$$

Burada; k_n ; taneciklerin normal katılıkları, $\bar{R}$; ortalama tanecik yarıçapı'dır.

Çizelge 3.3 Paralel bağlı malzemeyi tanımlayan mikro özellikler.

Parametre	Tanımı
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
E_c	Tanecik-tanecik arası temas modülü (Pa)
k_n / k_s	Tanecik katılık oranı
$\bar{\lambda}$	Paralel bağ yarıçap katsayısı
$\bar{E}_c$	Paralel bağ modülü
μ	Tanecikler arası sürtünme katsayısı
$\bar{k}_n / \bar{k}_s$	Paralel bağ normal katılığının kayma katılığına oranı
$\bar{\sigma}_c$ (ort.)	Paralel bağ normal dayanımı (Pa)
$\bar{\sigma}_c$ (std. sap.)	Paralel bağ normal dayanımının standart sapması (Pa)
$\bar{\tau}_c$ (ort.)	Paralel bağ kayma dayanımı (Pa)
$\bar{\tau}_c$ (std. sap.)	Paralel bağ kayma dayanımının standart sapması (Pa)

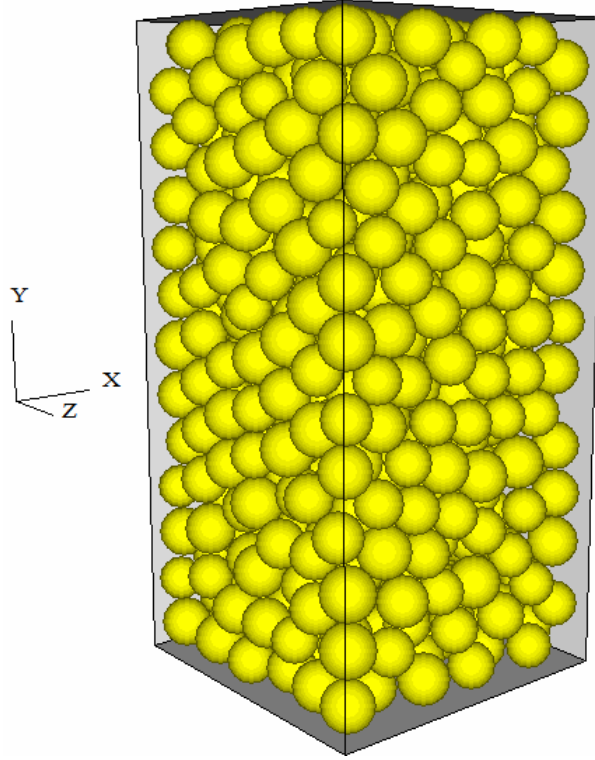
Çizelge 3.4 Bağımsız malzemeyi tanımlayan mikro özellikler.

Parametre	Tanımı
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
n	Gözeneklilik
E_c	Tanecik-tanecik arası temas modülü (Pa)
k_n/k_s	Tanecik katılık oranı
μ	Tanecikler arası sürtünme katsayısı

Numunenin denge haline gelmesi, PFC^{3D} bünyesinde tanımlanmış olan ortalama dengesiz kuvvet (mean unbalanced force) ve ortalama temas kuvveti (mean contact force) grafiklerine göre gözlemlenir (ITASCA 2006). Bu kuvvetlerin azalarak sifıra doğru yaklaşması, numunenin denge haline geldiğini gösterir. Fakat model içerisinde bu değerler hiçbir zaman sıfır olmazlar. Eğer sıfır olursa da tanecikler arasında bir yenilme veya bazı noktalarda tanecik akışı olduğunu gösterir. Bu yüzden numune oluşturulurken ortalama dengesiz kuvvet ve ortalama temas kuvvet grafiklerinin sürekli gözlemlenmesi faydalı olur. Ayrıca, numune oluşturulduktan sonra taneciklerin hız vektörlerinin çizilmesi ve bu vektörlerin çok küçük

boyutlarda olduğunun incelenmesiyle de tanecik topluluğunun denge haline gelip gelmediği gözlemlenebilir (ITASCA 2006).

Tüm bu parametreler ve değerler ışığında denge haline gelmiş örnek bir numunenin genel görünümü Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Birinci aşama sonrası numunenin genel görünümü.

3.5.2 İzotropik Gerilme Yüklenmesi

İzotropik gerilme; numune üzerinde üç yönde oluşan gerilmelerin (σ_x , σ_y , ve σ_z) ortalamasıdır. Tanecikler arasında bağ olduğu durumlarda uygulanır. Eğer tanecikler arasında herhangi bir bağ dayanımı yüklenmeyecekse, o zaman programın çalışması sırasında izotropik gerilme yüklemeye gerek yoktur.

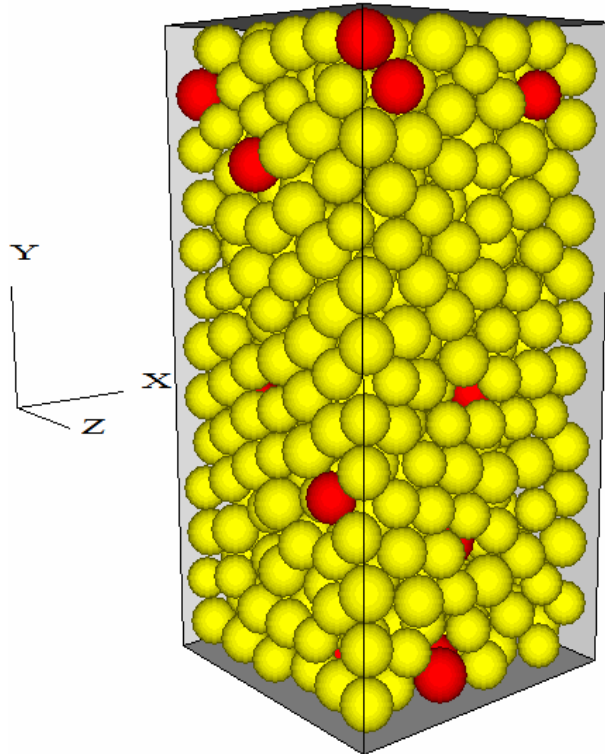
İzotropik gerilme basınç dayanımına bağımlı olarak çok düşük bir değer alınır ve genellikle tek eksenli basınç dayanımı değerinin %1’i kadardır (ITASCA 2006).

3.5.3 Yüzen Taneciklerin (Floater) Kaldırılması

Numune fiziksel olarak tanımlanıp izotropik gerilme uygulandıktan sonra, üçüncü aşamada yüzen taneciklerin (floater) ortadan kaldırılması istenir. Bir taneciğin etrafındaki taneciklerle oluşturduğu temas noktası 3'ten az ise o taneciğe yüzen tanecik denir.

Yüzen tanecikler genellikle paralelyüzlü duvarlar arasında rastgele sıkışır ve tüm taneciklerin en fazla %10'u kadardır. Tanecikler arasında bağ dayanımı yüklenmeyecekse, program bünyesinde yüzen tanecikleri ortadan kaldırmaya gerek yoktur.

Yüzen tanecikler yok etmek için PFC^{3D}'de hazırlanan bir fonksiyonla her taneciğin etrafındaki temas noktaları kontrol edilir. Temas noktası 3'ten az olduğunda o tanecik yüzen tanecik olarak işaretlenir ve PFC^{3D}'de hazırlanan bir fonksiyonla silinir. Silinen taneciğin etrafındaki diğer taneciklerin yarıçapları artırılarak meydana gelen boşluk kapatılır. Şekil 3.10'da verilen örnek bir numune üzerinde yüzen tanecikler farklı renkte gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Bir numune de yüzen taneciklerin gösterilmesi.

3.5.4 En Son Numunenin Elde Edilmesi

Yukarıda bahsedilen tüm aşamalardan sonra Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te değinilen mikro özellikler ile standart sapma değerleri tanecik ve duvarlara yüklenir. Ancak, bu özellikler haricen yapılan sayısal modelleme çalışmaların sonuçlarından elde edilir. Eğer bağırsız tanecik topluluğı oluşturulacaksa Çizelge 3.4'teki sürtünme katsayısı tanecikler arasına atanır.

3.6 BİR NUMUNENİN MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ

Laboratuvarda kullanılan örneklerin mekanik davranışı Uluslararası Kaya Mekanik Derneğı (ISRM) standartlarına göre belirlenen dayanım ve deformasyon özelliklerinden elde edilmektedir. PFC^{3D}'de hazırlanan bir numunenin (tanecik topluluğunun) mekanik özellikleri laboratuvardakiyle aynı ya da çok yakın değerler olması gerekir. Bu sayede modellemeden elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlarla kıyaslanabilir. Bu da program bünyesinde tanımlanan mikro özelliklerle sağlanır.

Sayısal analiz yöntemlerinden sürekli yöntemlerin uygulandığı modellerde kayacın dayanım ve deformasyon özellikleri laboratuvardan elde edilen sonuçlar ışığında direkt program içerisinde kullanılabilir. Fakat süresiz yöntemin uygulandığı PFC^{3D}'de malzemenin bu özellikleri mikro özellikleriyle tanımlanmaktadır (Potyondy and Cundall 2004). Dolayısıyla PFC^{3D}'de bir model oluşturmada önce kayacın mikro özellikleri laboratuvar deney sonuçları ile kalibre edilir.

Kayacın mikro özellikleri laboratuvar şartlarında (üç eksenli basınç dayanımı, tek eksenli basınç dayanımı, statik yorulma deneyi) veya arazi şartlarında (çeşitli kazıların etrafındaki hasarın büyüklüğü ve genişliği) kalibre edilmektedir. Aşağıda üç eksenli basınç dayanımı deneyine göre kayacın mikro özelliklerinin kalibre edilme yöntemi verilmiştir. Bu yöntemle göre önce deformasyon, daha sonra dayanım ve en son aşamada da tanecikler arası sürtünme katsayısı ve dayanım zarfları kalibre edilir (ITASCA 2006). Bu bağlamda yürütülmesi gereken modelleme çalışmaları adım adım aşağıda verilmiştir :

- İlk olarak malzemenin normal ve kayma dayanımı yüksek bir değere ayarlanır. Temas bağı malzeme için sadece tanecikler arası temas modülü (E_c), paralel bağı malzeme için hem tanecikler arası temas modülü (E_c), hem de paralel bağı modülü ($\bar{E}_c$) değerleri

değiştirilerek örneklerin Young modülleri eşleştirilir. Daha sonra, temas bağlı malzeme için tanecik katılık oranı (k_n/k_s), paralel bağlı malzeme için hem tanecik katılık oranı (k_n/k_s) hem de paralel bağ katılık oranı ($\bar{k}_n/\bar{k}_s$) değerleri değiştirilerek örneklerin Poisson oranları eşleştirilir.

- Arzu edilen elastiklik koşulları sağlandıktan sonra, malzemenin normal ve kayma dayanımlarının standart sapma değerleri sıfıra ayarlanır. Temas bağlı malzeme için normal (σ_c) ve kayma dayanım (τ_c) değerleri, paralel bağlı malzeme için hem tanecik normal dayanımları (σ_c) ve kayma (τ_c), hem de paralel bağın normal ($\bar{\sigma}_c$) ve kayma dayanım ($\bar{\tau}_c$) değerleri değiştirilerek eksenel gerilme-eksenel şekil değiştirme grafiğindeki numunenin en tepe (pik) noktası (tek eksenli basınç dayanımı) eşleştirilir.
- Deformasyon ve dayanım değerleri ayarlandıktan sonra, malzeme dayanımlarının standart sapma değerleri değiştirilerek çatlak başlangıç gerilmesi eşleştirilir. Bu durumda dayanım değeri azalabilir. Bu yüzden 2. ve 3. adımlar arasında birkaç iterasyon yapmak gerekebilir.
- Eğer malzemenin yenilme sonrası davranışı incelenmek istenirse, tanecikler arası sürtünme katsayısı (μ) değiştirilir.
- Üç eksenli basınç dayanımı deneyinde yanal basınçların değiştirilmesiyle dayanım zarfı da elde edilebilir.

Yukarıda değinilen aşamalardan sonra örneğin eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği çizilerek sonuçlar incelenir. Örneğin sergilediği mekanik özelliklere göre modelleme ve laboratuvar sonuçları arasında en uygun ilişki elde edildiğinde modelleme tamamlanır ve ilgili mikro özellikleri kayıt edilir.

Deneme-yanılma yöntemiyle yürütülen tüm bu aşamalar tamamlandıktan sonra, laboratuvar da kullanılan örneğin bilgisayar ortamında mikro özellikleri kalibre edilerek modelleme çalışmalarında kullanmak üzere hazır hale gelmiş olur.

BÖLÜM 4

DENEYSEL VE ANALİTİK ÇALIŞMALAR

Kayaç kesme mekanizmasının PFC^{3D}'de modellenmesine yönelik laboratuvar da herhangi bir kesme deneyi yapılmamış, Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda (ZTH) daha önceden yapılmış laboratuvar çalışmalarından yararlanılmıştır.

Ayrıca, geçmişten günümüze kadar farklı araştırmacıların kalem uçlu kes kiler için öne sürdüğü kayaç kesme mekanizmalarından yararlanılarak maksimum kesme kuvvet değerleri hesaplanmış ve sonuçları sunulmuştur.

4.1 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda kömür çevre kayaçlarının kazılabilirliği ile ilgili bugüne kadar çeşitli çalışmalar ve araştırmalar yapılmıştır. Bu açıdan bugüne kadar yapılan çalışmalarda oldukça geniş bir veri tabanı oluşmuştur. Bu veri tabanına bağlı olarak, kayaç kesme mekanizmalarının modellenmesine yönelik tekrar deneysel çalışmalar yapılmamış ve daha çok sayısal modelleme çalışmalarına ağırlık verilmiştir.

ZTH'nda yürütülmüş en önemli kazılabilirlik çalışmaları Kel (2003) tarafından yürütülmüştür. Bu kapsamda ZTH'dan alınan kumtaşı, kireçtaşı ve silttaşı numunelerinin öncelikle petrografik analizleri yapılmış, dayanım ve deformasyon özellikleri ile fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Ayrıca, İTÜ Kazı Teknolojileri ve Maden Makinaları Laboratuvarları'nda kalem uçlu keski kullanılarak farklı kesme derinliklerinde bağımsız kesme deneyleri yürütülmüştür.

PFC^{3D}'de yürütülen sayısal modelleme çalışmaları süresince Kel (2003) tarafından yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarından yararlanılmıştır. Ancak, silttaşı kayacının anizotropik

yapısı nedeniyle modelleme çalışmalarında kullanılmamıştır. Buna göre kumtaşı ve kireçtaşı kayaçlarının petrografik analizleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 ZTH’sı kömür çevre kayaçlarının petrografik değerlendirme sonuçları (Kel 2003).

Kumtaşı-1				
Genel Tanım	Litikarkoz; örnek kuvars, ortoklaz, metamorfik kayaç parçaları, biyotit, klorit ve opak minerallerden oluşmaktadır. Bu mineraller karbonat çimento ile birbirine bağlanmıştır. Taneler genellikle ince kum tane boyutunda ve köşeli-yarı köşeli şekle sahiptirler. Birkaç kuvars tanesinde yuvarlak şekil izlenmiştir.			
Sertlik	Mohs sertlik değeri : 5,41			
Mineral Kompozisyonu	Kuvars	Feldspat	Kayaç Parçası	Bağlayıcı
	% 57,04	% 8,26	% 14,04	% 20,66
Kumtaşı-2				
Genel Tanım	Litikarkoz; örnek kuvars, ortoklaz, çört, mika, plajiyoklaz, klorit ve opak minerallerden oluşmaktadır. Bu mineraller kil matriks, yer yer de karbonat çimento ile birbirine bağlanmıştır. Taneler genellikle kum boyunda ve köşeli-yarı köşeli şekle sahiptirler. Ortoklazlarda killeşmeler, mika minerallerinde ve matrikste kloritleşmeler izlenmiştir.			
Sertlik	Mohs sertlik değeri : 5,24			
Mineral Kompozisyonu	Kuvars	Feldspat	Kayaç Parçası	Bağlayıcı
	% 45,00	% 21,80	% 10,20	% 23,00
Kumtaşı-3				
Genel Tanım	Litikarkoz; örnek kuvars, feldspat, mika, çört, glokonit ve opak minerallerden oluşmaktadır. Bu mineraller kil matriks ile bağlanmıştır. İnce kum-silt tane boyunda ve köşeli-yarı köşeli şekiller izlenmiştir. Kil bağlayıcıda yer yer serisitleşme ve kloritleşmeler, ortoklazların hepsinde killeşmeler, biyotitlerde kloritleşmeler izlenmiştir.			
Sertlik	Mohs sertlik değeri : 4,06			
Mineral Kompozisyonu	Kuvars	Feldspat	Kayaç Parçası	Bağlayıcı
	% 31,52	% 25,13	% 7,88	% 35,47
Kireçtaşı				
Genel Tanım	Biyopelletsparit; örnek bol miktarda fosil parçaları, pellet ve ooid tanelerden oluşmaktadır. Bu taneler sparit çimento ile birbirine bağlanmıştır. İnce çatlaklar boyunca demiroksit boyamaları izlenmiştir.			
Sertlik	Mohs sertlik değeri : 3			

Aynı kayaçların fiziksel, dayanım ve deformasyon özellikleri Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Kel (2003) tarafından yapılan çalışmada kayacın Poisson oranı değerleri belirlenmemiştir. Fakat,

Gerçek (2007) ZTH'daki kömür çevre kayaçlarının Poisson oranlarının belirlenmesine yönelik kapsamlı bir çalışma yapmış ve bu çalışmaya göre tüm kayaçların yaklaşık Poisson oranı değerleri bulunmuştur. Dolayısıyla Çizelge 4.1'de verilen petrografik özelliklere göre kayaçların dokusal özelliklerinden yararlanarak Gerçek'ten (2007) tüm kayaçların tahmini Poisson oranı değerleri tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2 Kömür çevre kayaçlarının dayanım ve deformasyon özellikleri (Kel 2003).

Özellik	Kumtaşı-1	Kumtaşı-2	Kumtaşı-3	Kireçtaşı
Tek eks. bas. day. (MPa)	113,6	173,7	87,4	121
Dolaylı çekme day. (MPa)	6,6	11,6	8,3	7,8
Kesme dayanımı (MPa)	13,7	22,4	14,0	15,4
Statik Young mod. (GPa)	17,0	28,0	33,3	57,0
Poisson oranı *	0,20	0,29	0,25	0,20
Yoğunluk (gr/cm ³)	2,65	2,67	2,67	2,72

* Gerçek'ten (2007) alınmıştır.

Petrografik, dayanım ve deformasyon özellikleri tanımlanan dört farklı kayaç türü üzerinde, İTÜ Kazı Teknolojileri ve Maden Makinaları Laboratuvarları'nda bulunan Doğrusal Kazı Setinde bağımsız kesme deneyleri yürütülmüştür. Deneylerde Sandvik S35/80H kalem uçlu keski ve 57°'lik hücum (dalma) açılı keski tutucu kullanılmıştır. Ayrıca, deneysel çalışmalarda uygulanan keski uç açısı 80°, temizleme açısı 17° ve kesme açısı -7°'dir. Bu parametrelere bağlı olarak yürütülen bağımsız kesme deneylerinin sonuçları da Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Bağımsız kesme deneyi sonuçları (Kel 2003).

Kayaç tipi	d (mm)	FC (kN)	FC' (kN)	FN (kN)	FN' (kN)	Q (m ³ /km)	SE (kWh/m ³)
Kumtaşı-1	3	3,9	9,1	4,4	8,8	0,023	47,2
	6	6,7	18,2	6,7	14,5	0,091	20,0
	9	8,8	28,1	8,0	21,5	0,205	11,8
Kumtaşı-2	3	4,1	9,2	6,1	11,9	0,021	54,9
	6	8,2	23,3	10,8	23,9	0,045	50,1
	9	16,9	48,7	19,3	42,8	0,178	26,0
Kumtaşı-3	3	1,8	4,5	2,3	4,6	0,024	20,5
	6	3,8	9,1	3,8	7,8	0,088	11,8
	9	6,6	15,9	5,9	12,7	0,321	6,10
Kireçtaşı	3	4,0	11,8	7,6	15,3	0,036	31,7
	6	7,5	21,5	12,5	27,3	0,143	19,2
	9	11,6	29,4	20,4	39,6	0,197	17,4

Burada; FN; ortalama normal kuvvet, FN'; ortalama pik normal kuvveti, FC; ortalama kesme kuvveti, FC'; ortalama pik kesme kuvveti, Q; birim mesafedeki kazı hacmi, SE; spesifik enerji'dir.

4.2 ANALİTİK ÇALIŞMALAR

Keskiler, endüstride kullanılan kazı makinalarının kesici kafa veya tamburlarına belirli bir şekilde konumlandırılırlar. Eğer keski ileriye doğru atımlı olarak yerleştirilirse buna asimetrik kesme koşulu denir.

Geçmişten günümüze kadar kayaç kesme mekanizmalarıyla ilgili geliştirilen görgül bağıntılarda genellikle kayacın dayanım ve çekme özelliklerinden yararlanılmış olup, kesme açısına bağlı bir parametre bulunmamaktadır. Bu yüzden kayaç kesme mekanizmalarıyla ilgili geliştirilen tüm bağıntılar simetrik kesme koşulları için geliştirilmiştir. Dolayısıyla teorik bağıntılardan hesaplanan ve deneysel çalışmalardan ölçülen kesme kuvvetlerinde, kesme koşulları birbirinden farklıdır.

Önceki bölümde asimetrik kesme koşullarında, yani laboratuvar ortamında ölçülen kesme kuvvet değerleri verilmiştir. Bu bölümde de simetrik kesme koşullarında, yani kayaç kesme teorilerinden elde edilen kesme kuvvet değerleri hesaplanmıştır. Konik keskiler için literatürde en yaygın olarak kullanılan kayaç kesme teorileri Evans (1984), Göktan (1997) ve Roxborough ve Liu (1995) tarafından geliştirilen bağıntılardır. Bu bağıntılara göre kumtaşı-1 kayacının 3 mm kesme derinliğinde maksimum kesme kuvvet değerleri Eşitlik 4.1-4.3'te hesaplanmıştır. Diğer kayaçlar için elde edilen sonuçlar da Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Evans (1984) kesme teorisine göre;

$$FC' = \frac{16 \cdot \pi}{\cos^2(\phi / 2)} \cdot \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right) \cdot \sigma_t \cdot d^2 = \frac{16 \cdot \pi}{\cos^2 40} \cdot \left(\frac{6,6}{113,6} \right) \cdot 6,6 \cdot 3^2$$
$$= 295,6 \text{ N} \approx 0,30 \text{ kN} \quad (4.1)$$

Göktan (1997) kesme teorisine göre;

$$FC' = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma_t \cdot d^2 \cdot \sin^2((\phi / 2) + \psi)}{\cos((\phi / 2) + \psi)} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 3^2 \cdot \sin^2(40 + 8,5)}{\cos(40 + 8,5)}$$
$$= 632 \text{ N} \approx 0,63 \text{ kN} \quad (4.2)$$

Roxborough ve Liu (1995) kesme teorisine göre;

$$FC' = \frac{16 \cdot \pi \cdot \sigma_c \cdot d^2 \cdot \sigma_t^2}{\left[2 \cdot \sigma_t + \frac{\sigma_c \cdot \cos(\phi/2)}{\left(\frac{1 + \tan \psi}{\tan(\phi/2)} \right)} \right]^2} = \frac{16 \cdot \pi \cdot 113,6 \cdot 3^2 \cdot 6,6^2}{\left[2 \cdot 6,6 + \frac{113,6 \cdot \cos 40}{\left(\frac{1 + \tan 16}{\tan 40} \right)} \right]^2} = 0,46 \text{ kN} \quad (4.3)$$

Çizelge 4.4 Kesme teorilerinden elde edilen maksimum kesme kuvvet değerleri (simetrik kesme koşulları).

Kayaç tipi	d (mm)	Evans'a göre FC' (kN)	Göktan'a göre FC' (kN)	Roxb. & Liu'ya göre FC' (kN)
Kumtaşı-1	3	0,30	0,63	0,46
	6	1,18	2,53	1,83
	9	2,66	5,69	4,12
Kumtaşı-2	3	0,60	1,11	0,87
	6	2,39	4,44	3,50
	9	5,37	10,00	7,87
Kumtaşı-3	3	0,61	0,79	0,75
	6	2,43	3,18	3,00
	9	5,47	7,15	6,75
Kireçtaşı	3	0,39	0,75	0,58
	6	1,55	2,99	2,30
	9	3,49	6,72	5,18

Çizelge 4.3'te de verildiği üzere asimetrik kesme koşullarında yürütülen deneysel çalışmaların sonuçları Çizelge 4.5'teki simetrik kesme koşulları için hesaplanmış olan kesme kuvvet değerlerinden çok farklıdır.

Göktan ve Güneş (2005); deneysel ve teorik çalışmalar veya bir başka deyişle simetrik ve asimetrik kesme koşulları için elde edilen maksimum kesme kuvvet değerleri arasında bir ilişki kurmak ve aralarında karşılaştırma yapmak üzere Eşitlik 4.4'teki bağıntıyı geliştirmiştir. Bu bağıntıda keskinin uç açısı yerine kesme açısı kullanılmış ve 9 mm kesme derinliğinde daha önce yürütülmüş deneysel çalışmaların sonuçları ile kıyaslanmıştır.

$$FC' = \frac{12 \cdot \pi \cdot \sigma_t \cdot d^2 \cdot \sin^2 \left[\frac{1}{2} \cdot (90 - \alpha) + \psi \right]}{\cos \left[\frac{1}{2} \cdot (90 - \alpha) + \psi \right]} \quad (4.4)$$

Göktan ve Güneş'in (2005) bulgularına göre bu bağıntıdan elde edilen maksimum kesme kuvveti ve laboratuvar çalışmaları arasında % 82'lik bir ilişki katsayısı bulunmuştur. Aynı bağıntı Kel'in (2003) yaptığı deneysel çalışmalara uyarlandığında Çizelge 4.5'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.5 Kesme teorisi ve laboratuvardan elde edilen maksimum kesme kuvvet değerleri (asimetrik kesme koşulları).

Kayaç tipi	d (mm)	Göktan & Güneş'e göre FC' (kN)	Laboratuvarda elde edilen FC' (kN)*
Kumtaşı-1	3	2,89	9,1
	6	11,57	18,2
	9	26,03	28,1
Kumtaşı-2	3	5,08	9,2
	6	20,33	23,3
	9	45,75	48,7
Kumtaşı-3	3	3,64	4,5
	6	14,55	9,1
	9	32,73	15,9
Kireçtaşı	3	3,42	11,8
	6	13,67	21,5
	9	30,76	29,4

* Kel'den (2003) alınmıştır.

Çizelge 4.5'te sunulan sonuçlar incelendiğinde teoride hesaplanan maksimum kesme kuvvet değerlerinin düşük derinliklerde laboratuvar şartlarında ölçülen kesme kuvvet değerlerinden çok farklı olduğu görülmüştür.

Konu ile ilgili olarak Sn. Göktan ile yapılan yazışma sonucunda bu eşitliğin kesme derinliğinin görece yüksek olduğu kesme koşulları için geçerli olduğu ve sığ derinliklerde çok verimli olarak uygulanamayacağı kanaati hasıl olmuştur. Bunun en önemli nedeninin de uygulamada kullanılan konik keskilerin ideal konik olmaması, özellikle uç kısımlarının yuvarlatılmış (körleştirilmiş) olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu bağlamda Eşitlik 4.4'te verilen bağıntının da keski geometrisinin konik olduğu varsayımı üzerine kurulmuş olmasındandır (Göktan 2008).

BÖLÜM 5

SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI İÇİN SANAL ÖRNEK HAZIRLAMA VE MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ

Bağımsız kesme deneyini PFC^{3D}'de modellemek üzere öncelikle uygun bir numune hazırlanmıştır. Burada numune boyutlarını belirleyen en önemli parametreler tanecik yarıçapı ve kesme derinliğidir. Kesme derinliklerinin küçük olması tanecik yarıçapının da küçük seçilmesini gerektirmektedir.

PFC^{3D}'de sınır etkilerden kaçınmak ve mümkün olduğunca uzun kesme mesafelerinde modelleme yapabilmek için büyük bir kayaç oluşturulmaya çalışılmıştır. Ancak, tanecik boyu çok küçük seçildiği için bu koşulun sağlanması oldukça zorlaşmıştır. Bu yüzden Çek Cumhuriyeti'nde düzenlenen PFC Yaz Okulu'ndaki çeşitli araştırmacılar ve Almanya'daki Itasca temsilciliğinde bulunan PFC bilirkişileriyle (danışman) yapılan çeşitli fikir alışverişleri ve tartışmalar doğrultusunda “boyutlandırılmış taneciklerden oluşan” bir sanal örnek hazırlanmıştır. Modelleme için uygun geometride bir numune hazırlandıktan sonra mikro özellikleri kalibre edilmiştir. Her kesme derinliği için farklı boyutlarda numuneler hazırlandığı için, her numunenin mikro özellikleri de ayrı ayrı kalibre edilmiştir.

5.1 BOYUTLANDIRILMIŞ TANECİKLERDEN OLUŞAN NUMUNENİN HAZIRLANMA TEORİSİ

Kayaç kesme deneyini modellemede kullanılacak numune hazırlanırken göz önüne alınması gereken en önemli faktörler; tanecik yarıçapı, kesme derinliği ve kesme mesafesidir. Kesme mesafesinin her deneyde sabit olacağı varsayıldığında, numunenin oluşturulacağı taneciklerin yarıçapı tamamen kesme derinliğine bağlı kalacaktır. Bu nedenle kesme derinlikleri genellikle küçük olduğu için keski ile etkileşim halindeki taneciklerin de yarıçaplarının küçük olması gerekmektedir. Bu sayede modelleme sırasında keskiyle etkileşim halindeki tanecik sayısı artacak ve elde edilecek sonuçlar daha anlamlı olacaktır.

Laboratuvarda iri bloklar üzerinde yürütülen kesme deneyinin modellenenebilmesi için yine büyük boyutlu bir numune hazırlanmasını gerektirmektedir. PFC^{3D}'de küçük yarıçaplı taneciklerden oluşan bir kaya bloğunun hazırlanması oldukça zordur. Bunun en temel nedeni tanecik sayısı arttıkça oluşturulan numunenin bilgisayardaki boyutlarının da artmasıdır. Çizelge 5.1'de bazı deneysel çalışmalar sonucu oluşturulan numunelerin bilgisayarda oluşturduğu boyutları verilmiştir.

Çizelge 5.1 % 35 gözeneklilik oranıyla 3, 6 ve 9 mm kesme derinlikleri için hazırlanan prizmatik numunelerden bazılarının özellikleri.

Tanecik boyut aralığı (mm)	Numune boyutları (mm)	Tanecik sayısı (adet)	Bilgisayardaki dosya boyutu (MByte)
0,25 - 0,30	11*22*11	19 862	38,8
0,30 - 0,36	11*22*11	11 494	22,4
0,40 - 0,48	17*34*17	17 899	34,9
0,48 - 0,58	17*34*17	10 358	20,2
0,55 - 0,66	23*46*23	17 051	33,8
0,66 - 0,79	23*46*23	9 867	19,3

PFC^{3D}'de örnek geometrisinde yaşanan bu sıkıntıyı aşmak için alternatif bir çözüm yöntemi olarak numune boyutları küçültülebilir ya da tanecikler arası gözeneklilik arttırılarak tanecik sayısı azaltılabilir.

Numune boyutları küçültüldüğünde;

- keski, kayaç sınır koşullarından etkilenebilir,
- kazı için gerekli kesme mesafesi sağlanamayabilir,
- kırıntı oluşumu gözlemlenemeyebilir.

Kayacın gözenekliliği artırıldığında;

- tanecikler arasında temas kuvveti oluşmayabilir,
- kayaç içerisindeki yüzen tanecik (floater) sayısı artacağı için mikro özellikler kalibre edilemeyebilir,
- keski-kayaç arasındaki etkileşim gözlemlenemeyebilir.

Bu nedenlerden dolayı numune boyutunun ancak modelleme yapmaya olanak sağlayacak kadar en uygun boyutta hazırlanması gerekmektedir. Gözenekliliğinin artırılması ise olumlu bir yöntem değildir.

İleri teknoloji ürünlerinin pahalı ve mevcut olanakların kısıtlı olması yüzünden mümkün olan en az tanecik sayısı ile en verimli modellemeyi yapabilmek için Kamp'ın (2008) önerisi üzerine “**boyutlandırılmış taneciklerin bir araya getirilmesi**” yöntemiyle bir numune modellenmesi düşünülmüştür. Bu numunede üst yüzeye yakın konumda bulunan ve keskinin etkileşim gösterdiği tanecikler en küçük boyut aralığından oluşmaktadır. Numunenin üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru inildikçe tanecik yarıçapı artmakta ve en alt taban yüzeyinde en büyük boyutlu tanecikler yer almaktadır.

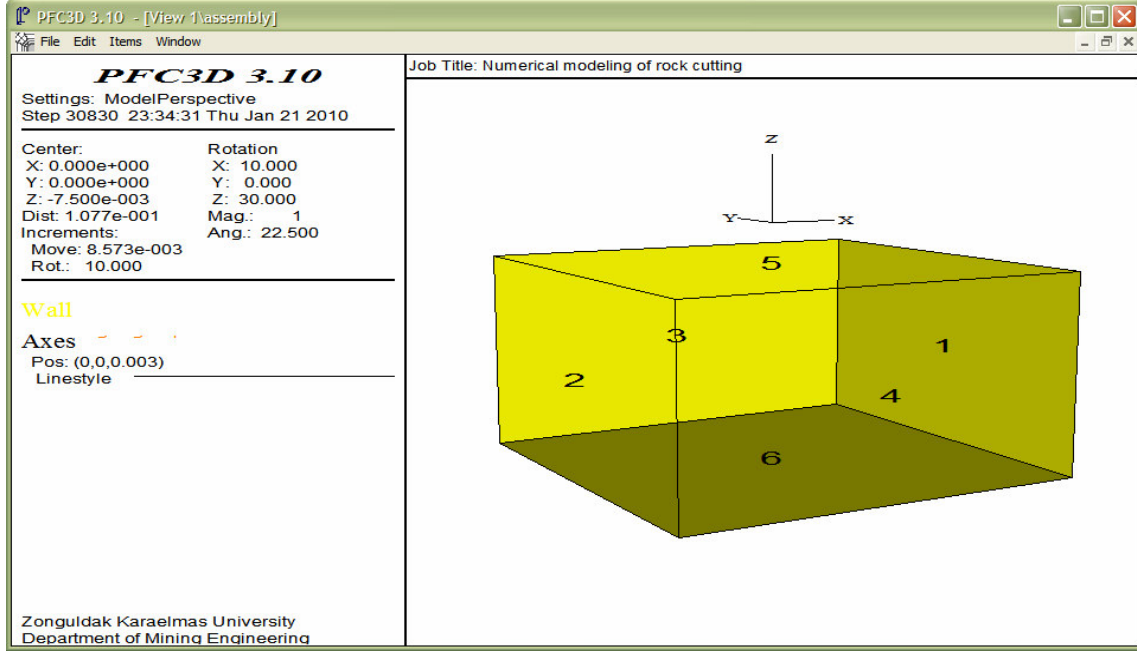
Boyutlandırılmış taneciklerin bir araya getirilmesiyle hazırlanan numunelerde her kesme derinliğine uygun farklı boyutta bir numune hazırlanmıştır. Dolayısıyla 3, 6 ve 9 mm kesme derinlikleri için modellenen numunelerin mikro özellikleri ayrı ayrı kalibre edilmiştir. Numuneler, 20 mm kesme mesafesinde modelleme yapmaya olanak sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Aşağıda öncelikle kumtaşı-1 kayacının 3 mm kesme derinliğinde bağımsız kesme deneyini modellemek üzere boyutlandırılmış taneciklerle oluşturulan numunenin hazırlanma teorisi detaylı olarak verilmiştir. 6 ve 9 mm kesme derinlikleri için numune hazırlama tekniği 3 mm kesme derinliği için uygulanan teknikle aynı olduğu için, yöntem tekrar anlatılmamış ve yapılan çalışmaların sadece sonuçları verilmiştir. Bunu takiben laboratuvar çalışmalarında kullanılan dört farklı kayaç türünün mikro özellikleri kalibre edilmiş ve sonuçları sunulmuştur.

5.1.1 3 mm Kesme Derinliğinde Kesme Deneyi Modellemek Üzere Numune Hazırlama

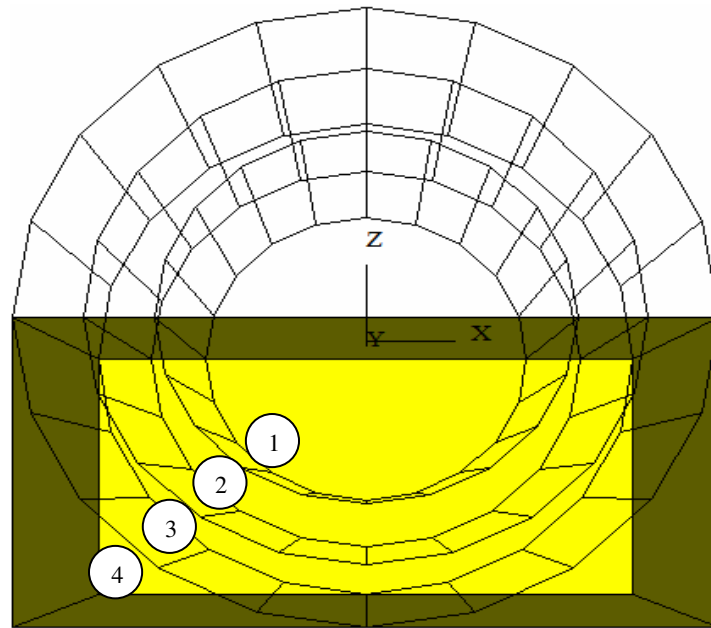
3 mm kesme derinliğinde boyutlandırılmış taneciklerden oluşan bir numune hazırlamak için PFC^{3D} bünyesinde tanımlanmış olan FISH komutları kullanılarak bir program hazırlanmıştır. Bu programda öncelikle kayacın geometrik özellikleri, yani en (x), boy (y) ve yükseklikleri (z) belirlenir. Ayrıca, tanecik boyut aralıkları, tanecikler arası boyut oranı ve yoğunluğu girilir. Son olarak da mikro özellikleri tanımlanır. Tüm bu veriler ışığında kayaç kesme deneyini modellemek üzere gerekli numune aşağıdaki şekilde hazırlanır.

Öncelikle 3 mm kesme derinliğinde bağımsız kesme deneyini modelleme üzere xyz koordinat düzleminde 30*30*15 mm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde numunenin dış çerçevesi hazırlanır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Numune dış çerçevesinin genel görünümü.

Daha sonra yarı hacmi bu çerçeve içerisinde kalan silindirik duvarlar numune içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 5.2). Bu duvarlar tanecik yarıçaplarını kontrol ederek, taneciklerin yukarıdan aşağıya doğru boyutlandırılmasını sağlamaktadır. Yani, bir başka deyişle tabaka (layer) görevi görmektedirler.



Şekil 5.2 Silindirik duvarların genel görünümü.

Tanecikler en içteki silindirden başlayarak numune içerisine yerleştirilirler. Buna göre en küçük yarıçaplı tanecikler en iç silindire (1 no'lu) yerleştirilir. Daha sonra, diğer tanecikler yarıçapları artırılarak tüm bölgelere yerleştirilirler. Burada, en iç silindirdeki en büyük tanecik yarıçapı, bir dıştaki (2 no'lu) silindirde en küçük tanecik yarıçapı olarak kabul edilir.

Numune hazırlanırken tanecikler arası gözeneklilik %35 seçilmiştir. Bu değer gerçek bir kayacın gözeneklilik değeriyle aynı olmak zorunda değildir. Daha çok numune içerisindeki optimum tanecik sayısını belirlemek üzere uygun değerler seçilir. Numunenin denge haline gelmesi veya yüzen taneciklerin ortadan kaldırılması sırasında bazı taneciklerin yarıçapları değiştiği için gözeneklilik değeri modelleme süresince artar veya azalabilir.

3 mm kesme derinliğinde kesme deneyi modellemek üzere hazırlanan numunede en büyük yarıçaplı taneciğin (rhi) en küçük yarıçaplı taneciğe oranı (rlo) 1,2 seçilmiş ve buna göre 1 no'lu bölgedeki en küçük tanecik yarıçapı aralığı 0,25-0,30 mm arasında alınmıştır. Diğer silindirler içerisindeki tanecik yarıçapları Eşitlik 5.1'den belirlenmiştir.

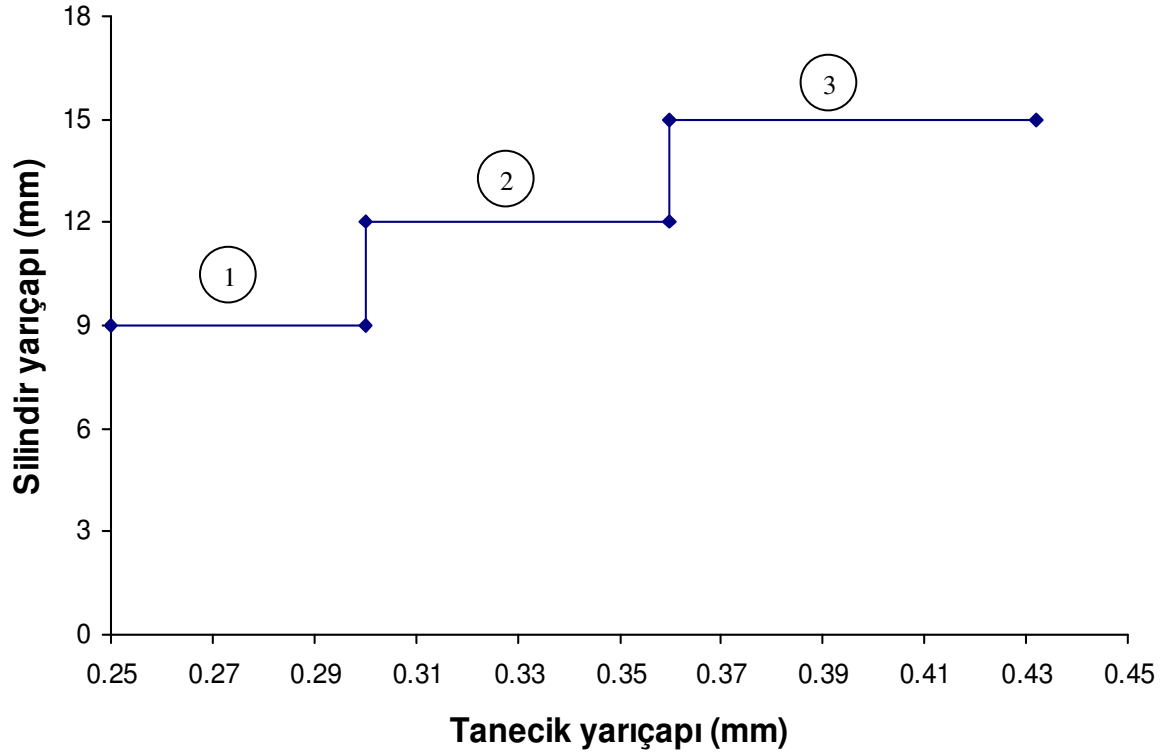
$$rhi = rlo \cdot 1,2 \quad (5.1)$$

Keskinin en içteki yarım silindirde (1 no'lu) bulunan tanecikler üzerinde hareket edeceği göz önüne alındığında, bu silindir yarıçapının belirlenmesi oldukça önemlidir. 3 mm kesme derinliğinde yapılacak sayısal modelleme çalışmaları için, en içteki silindir yarıçapı 9 mm seçilmiştir (Bkz. Bölüm 6). Daha sonra 1 no'lu yarım silindirden itibaren yarıçapları 3 mm arttırılarak diğer silindirler oluşturulmuştur. Silindir numaralarına göre değişen tanecik yarıçapları Çizelge 5.2'de, silindir yarıçaplarıyla tanecik yarıçapları arasındaki ilişki gösteren grafik Şekil 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.2 3 mm kesme derinliğinde hazırlanan numunede kullanılan yarıçap aralıkları.

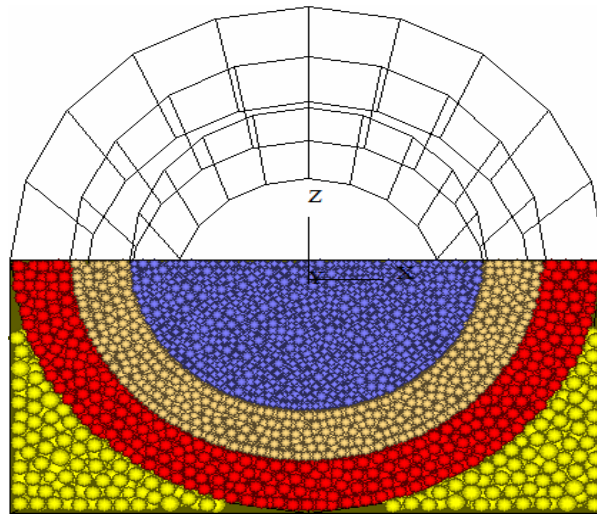
Silindir no	1	2	3	4
Silindir yarıçap aralığı (mm)	0 - 9	9 - 12	12 - 15	> 15
Tanecik yarıçap aralığı (mm)	0,25-0,30	0,30-0,36	0,36-0,43	0,43-0,52
Tanecik sayısı	28 480	12 819	9 538	4 189

15 mm yarıçaplı en dış yarım silindir ile prizmatik numunenin yan duvarları arasındaki alan 4 no'lu bölge olarak gösterilmiştir. Buna göre dört bölgede toplam 55 026 adet tanecik meydana gelmiştir.

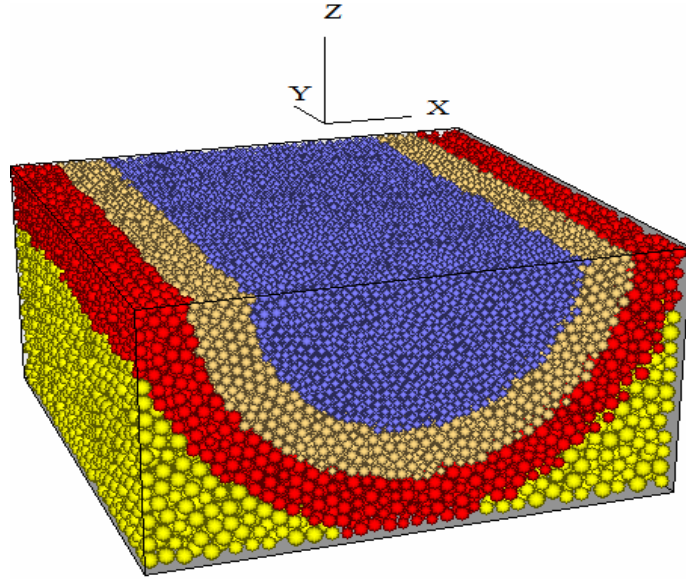


Şekil 5.3 Silindir yarıçapına göre değişen tanecik yarıçaplarının gösterilmesi.

Çizelge 5.2’de verilen aralıklara göre tanecikler %35 gözeneklilik oranıyla silindirler içerisine yerleştirilmiş ve denge haline getirilmiştir (Şekil 5.4). Tanecikler silindirik duvarlar arasında denge haline geldikten sonra bu duvarlar kaldırılır ve tekrar denge haline gelmesi beklenir (Şekil 5.5).

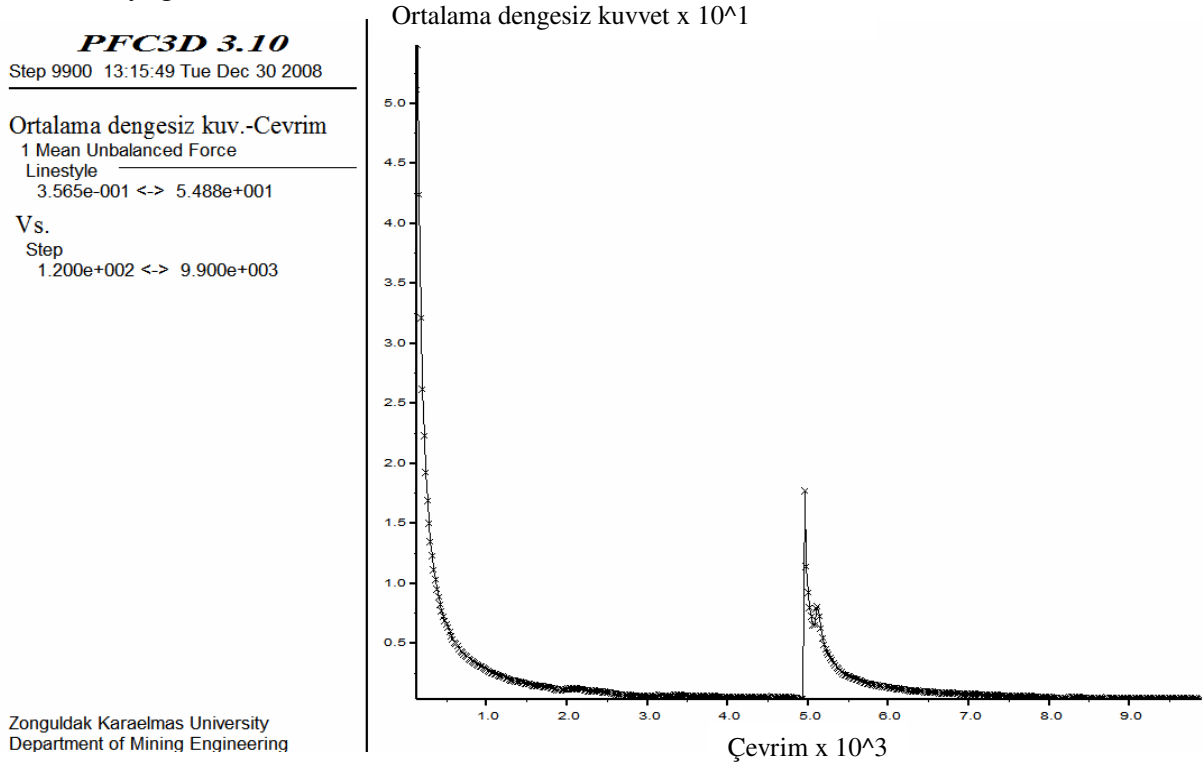


Şekil 5.4 Silindirik duvarlar arasındaki taneciklerin genel görünümü.



Şekil 5.5 Silindirik duvarlar kaldırıldıktan sonra oluşan örneğin genel görünümü.

Numunenin denge haline gelip gelmediği, ortalama dengesiz kuvvet (mean unbalanced force) ve ortalama temas kuvveti (mean contact force) grafiklerine göre kontrol edilir. Şekil 5.6'daki ortalama dengesiz kuvvet ve Şekil 5.7'deki ortalama temas kuvvetlerinin çevrimlere (cycle) göre çizilen grafiklerinde, eğrilerin azalarak sifıra doğru yaklaşması numunelerin denge haline geldiğini göstermektedir. Bu grafiklerin 5000. çevrimde oluşturduğu en yüksek değer, numunedeki silindirik duvarların kaldırılmasından dolayı taneciklerde meydana gelen rahatlamayı göstermektedir.

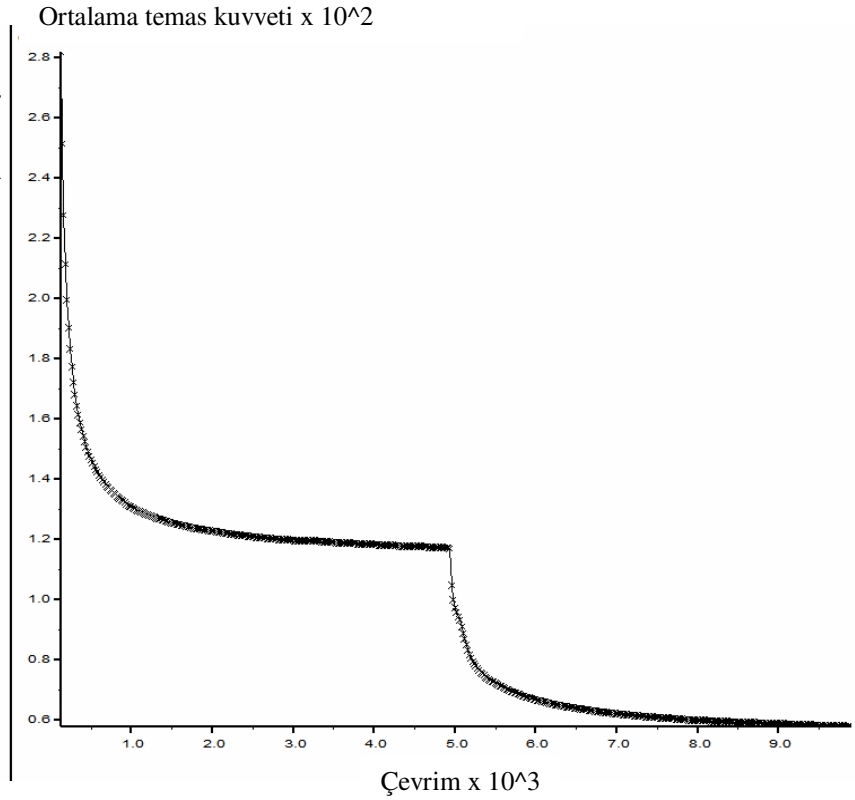


Şekil 5.6 Ortalama dengesiz kuvvetin çevrimle olan ilişkisi.

Ortalama temas kuv.-Çevrim
2 Mean Contact Force
Linestyle
5.804e+001 <-> 2.820e+002

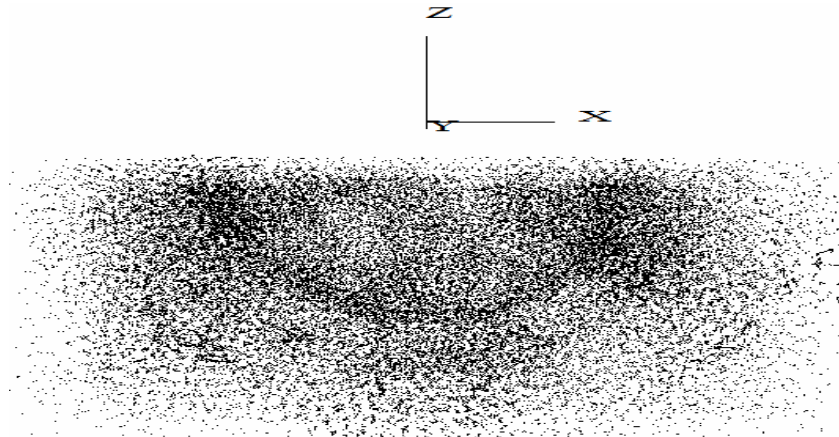
Vs.
Step
1.200e+002 <-> 9.900e+003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil 5.7 Ortalama temas kuvvetinin çevrimle olan ilişkisi.

Ayrıca, numunedeki içsel kuvvetlerin denge halinde olup olmadığını, taneciklerin hız vektörleri kontrol edilerek teyit edilebilir. Şekil 5.8’de gösterildiği üzere numuneyi oluşturan taneciklerin hız vektörlerinin oldukça küçük olduğunu gözlemlenmesi, numunenin denge halinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.8 Tanecikler üzerindeki hız vektörleri.

Numune denge haline geldikten sonra tanecikler arasında 1 kPa’lık izotropik gerilme yüklenmiştir. Başlangıçta 18,81 MPa olan izotropik gerilmenin adım adım 1 kPa’a indirgenmesi Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

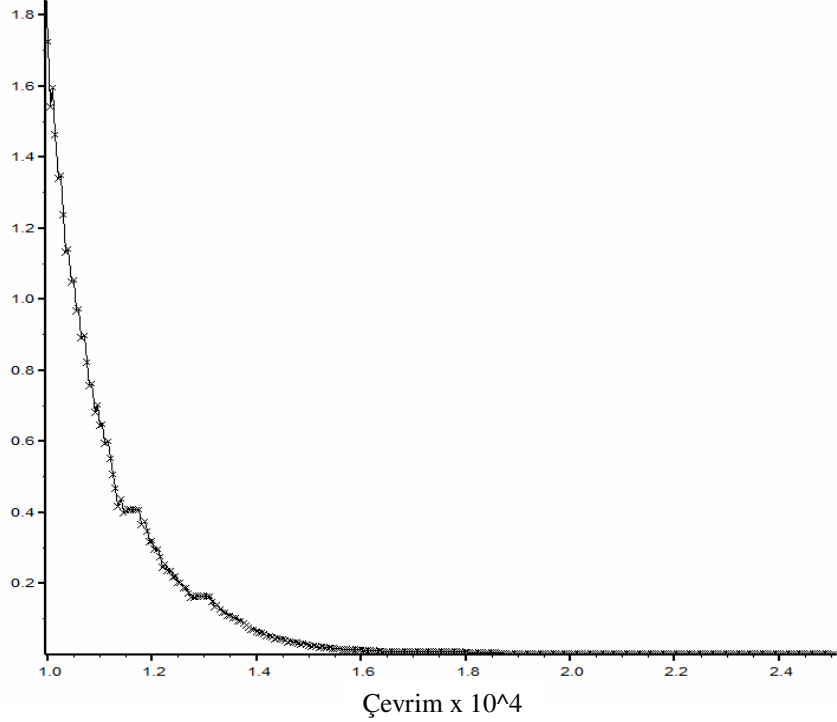
PFC3D 3.10
Step 25118 13:25:53 Tue Dec 30 2008

Izotropik gerilme-Cevrim
Rev 3 isostr (FISH Function)
Linestyle
1.479e+003 <-> 1.881e+007

Vs.
Step
9.950e+003 <-> 2.510e+004

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

İzotropik gerilme x 10⁷



Şekil 5.9 İzotropik gerilmenin taneciklere yüklenmesi.

Numuneye izotropik gerilme yüklendikten sonra, tanecikler arasındaki boşlukta olanlar, yani diğer taneciklerle temas etmeyenler kaldırılır. Buna göre başlangıçta 1873 adet olan yüzen taneciklerin adım adım kaldırılması Şekil 5.10'daki grafik üzerinde gösterilmiştir. En son aşamada hiçbir yüzen tanecik kalmamıştır.

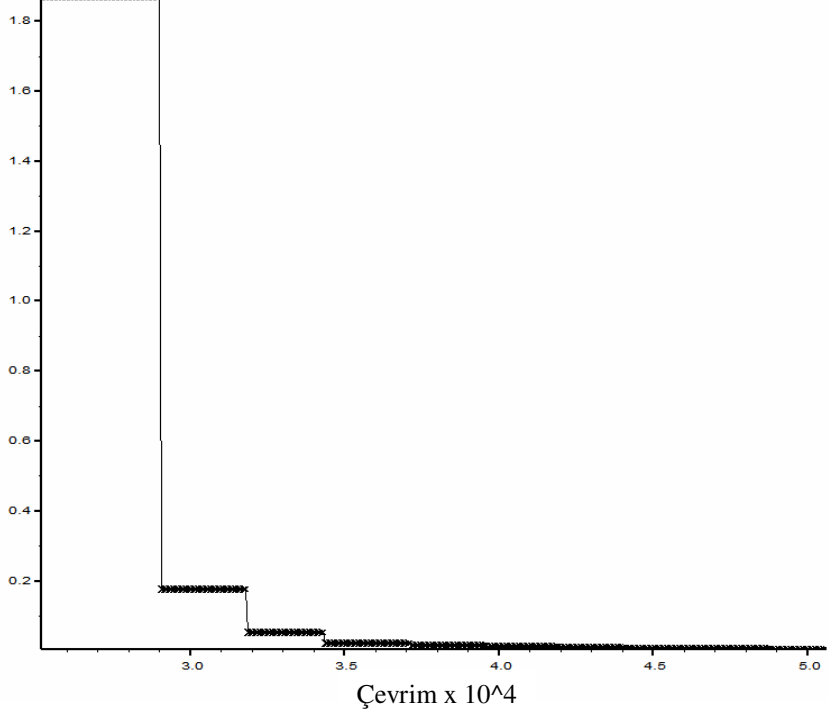
PFC3D 3.10
Step 50618 13:46:16 Tue Dec 30 2008

Yüzen tanecik sayısı-Cevrim
4 _pc_n_float (FISH Symbol)
Linestyle
6.000e+000 <-> 1.873e+003

Vs.
Step
2.515e+004 <-> 5.060e+004

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Yüzen tanecik sayısı x 10³

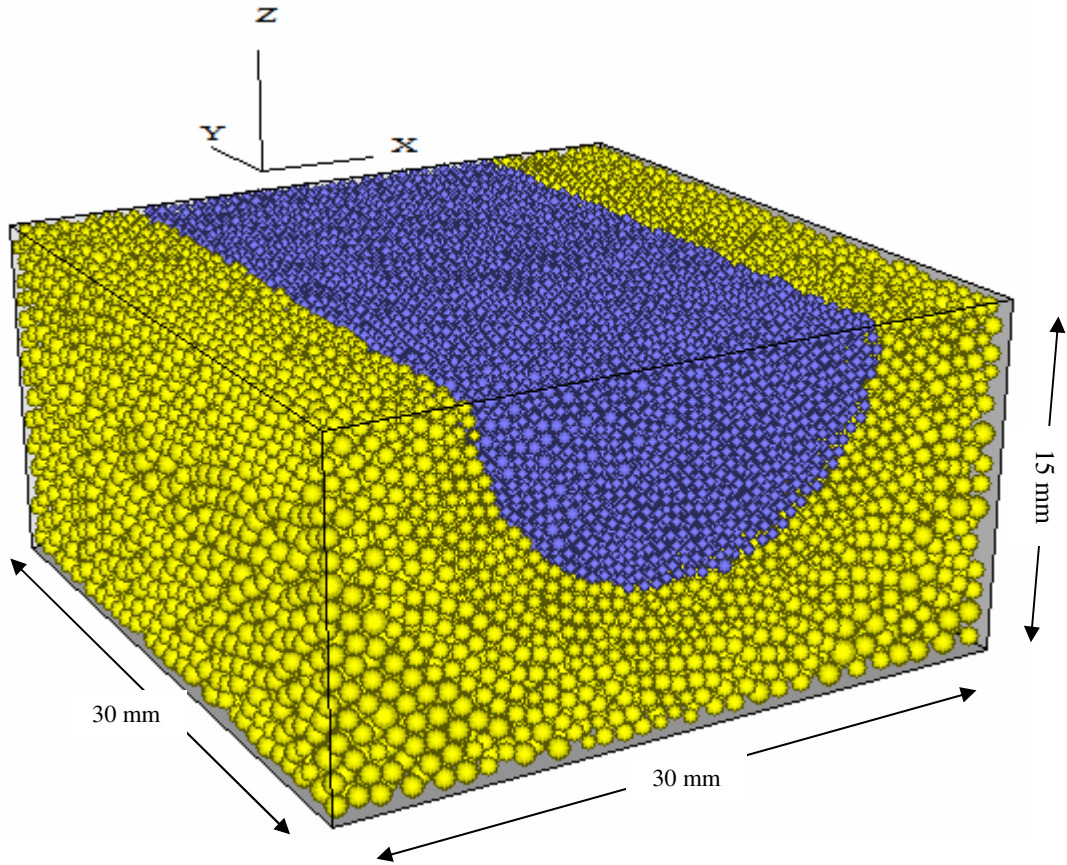


Şekil 5.10 Yüzen taneciklerin (floater) ortadan kaldırılması.

Numunenin hem silindirik duvarlarla, hem de silindirik duvarların kaldırılmasından sonra denge haline getirilmesini takiben, izotropik gerilme yüklenmesi ve yüzen taneciklerin ortadan kaldırılmasından sonra tanecikler arasında temas ve paralel bağlar dayanım değerleri yüklenerek nihai numune elde edilmiştir. Burada tanecikler arasına yüklenen bağ dayanımları mikro özelliklerin kalibre edilmesinden sonra ortaya çıkarılmıştır. 7. Bölüm’de bu değerlerin elde edilmesi detaylı olarak sunulmuştur.

Tüm bu işlemlerden sonra 3 mm kesme derinliğinde bağımsız kesme deneyi yürütmek üzere hazırlanan 30*30*15 mm boyutlarındaki numune modelleme çalışmaları için hazır hale getirilmiştir. Konik keski numunenin orijinindeki en küçük yarıçaplı silindirde oluşturulan ince boyutlu tanecikler üzerinde kesme işlemi yapacaktır. Bu bölge Şekil 5.11’de farklı bir renkle gösterilmiştir.

Kayaç kesme deneyini modellemesi başladığı anda numune yüzeylerinin kesme kuvvetlerini etkilememesi için üst ve yan duvarlar kaldırılır. Numune alt yüzeyine yakın tanecikler sabitlenir. Böylece numunenin denge hali korunmuş olur.



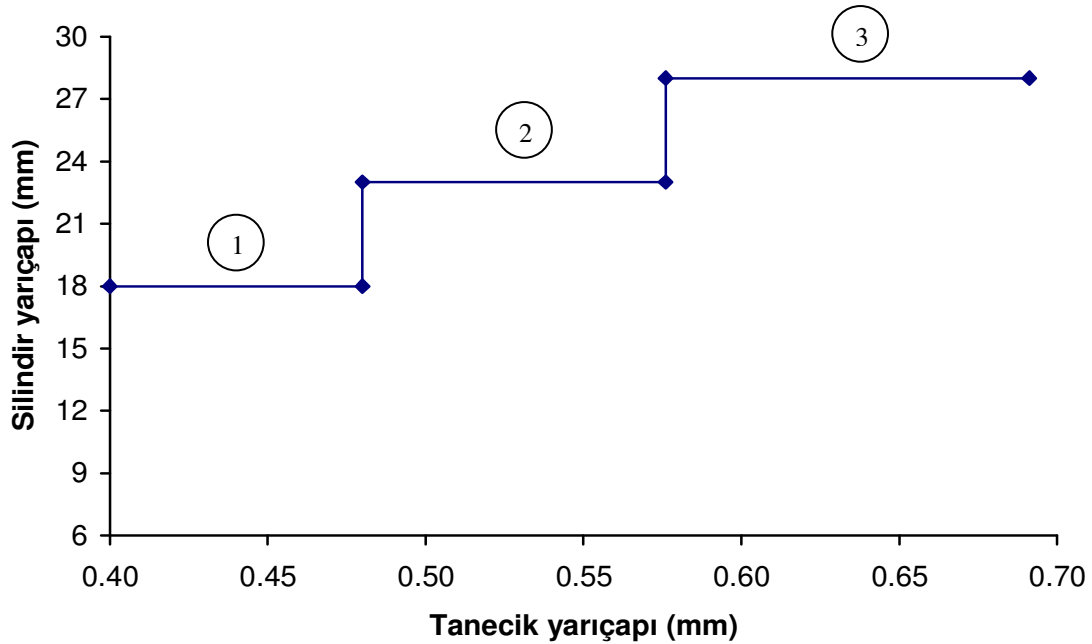
Şekil 5.11 3 mm kesme derinliği için hazırlanan numunenin genel görünümü.

5.1.2 6 mm Kesme Derinliğinde Kesme Deneyi Modellemek Üzere Numune Hazırlama

6 mm kesme derinliğinde bağımsız kesme deneyini modellemek için boyutlandırılmış taneciklerden oluşan yeni bir numune hazırlanmıştır. Numune boyutu 56*30*28 mm (xyz düzlemlerinde) alınmıştır. Tanecikler yine dairesel silindirlerden yararlanarak boyutlandırılmıştır. En iç silindirdeki tanecik yarıçapları 0,40-0,48 mm arasında seçilmiştir. Silindir numaralarına göre değişen tanecik ve silindir yarıçapları Çizelge 5.3'te verilmiştir. Ayrıca, tüm silindirik bölgeler arasında kullanılan tanecik yarıçapları da Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Dört bölgede toplam 48 889 adet tanecik meydana gelmiştir.

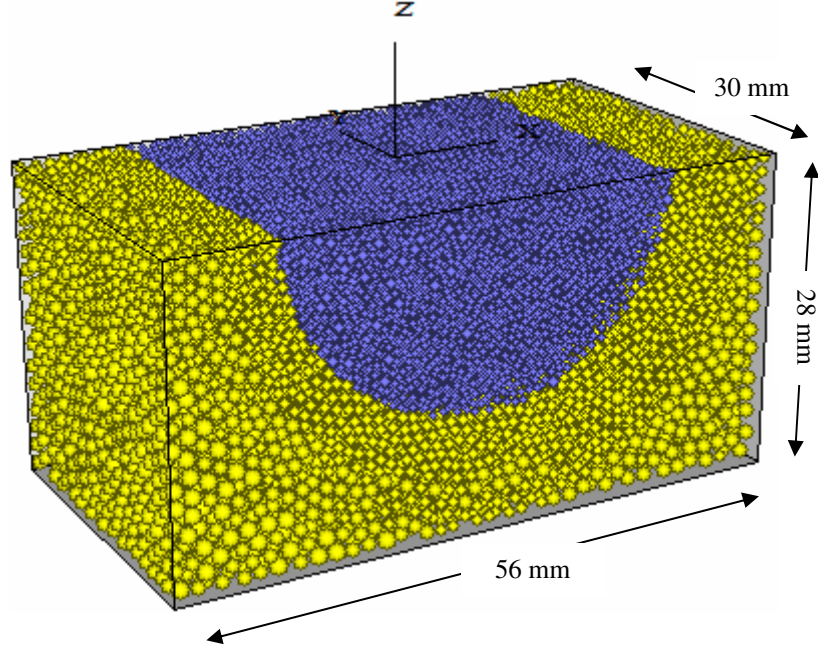
Çizelge 5.3 6 mm kesme derinliğinde hazırlanan numunede kullanılan yarıçap aralıkları.

Silindir numarası	1	2	3	4
Silindir yarıçap aralığı (mm)	0 - 18	18 – 23	23 – 28	> 28
Tanecik yarıçap aralığı (mm)	0,40-0,48	0,48-0,58	0,58-0,69	0,69-0,83
Tanecik sayısı	27 813	10 183	7 330	3 563



Şekil 5.12 Silindir yarıçapına bağlı olarak değişen tanecik yarıçaplarının gösterilmesi.

%35 gözeneklilik oranına göre hazırlanan numune denge haline getirilmiş ve kalibrasyon sonucu elde edilen mikro özellikleri yüklenmiştir. Temas ve paralel bağ kullanılarak elde edilen nihai numune Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13 6 mm kesme derinliği için hazırlanan numunenin genel görünümü.

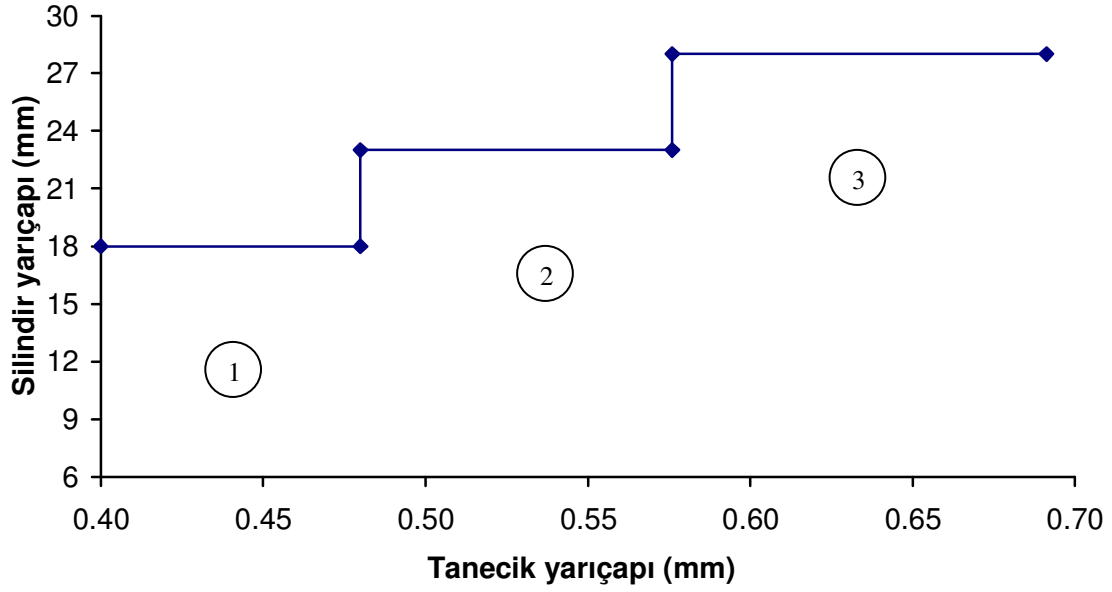
5.1.3 9 mm Kesme Derinliğinde Kesme Deneyi Modellemek Üzere Numune Hazırlama

9 mm kesme derinliğinde bağımsız kesme deneyi modellemek üzere yine boyutlandırılmış taneciklerden oluşan bir numune hazırlanmıştır. Numune boyutu 82*30*41 mm (xyz düzleminde) alınmıştır. Yarım dairesel silindirler arasına en üst yüzeyden en alt yüzeye doğru artacak şekilde %35 gözeneklilik oranıyla yerleştirilmiştir. Buna göre 1 no'lu silindir içerisinde 0,55-0,66 mm yarıçap aralığındaki tanecikler yerleştirilmiştir. Silindirler arasında tanecik boyut oranı yine 1,2 kabul edilmiştir.

Tanecik boyutlarına göre yarım silindirik daireler arasına dağıtılırken kullanılan yarıçap aralıkları Çizelge 5.4'te verilmiştir. Dört bölgede toplam 40 975 adet tanecik meydana gelmiştir. Ayrıca, silindir numaralarına göre yerleştirilmiş olan tanecik ve silindir yarıçapları Şekil 5.14'te gösterilmiştir.

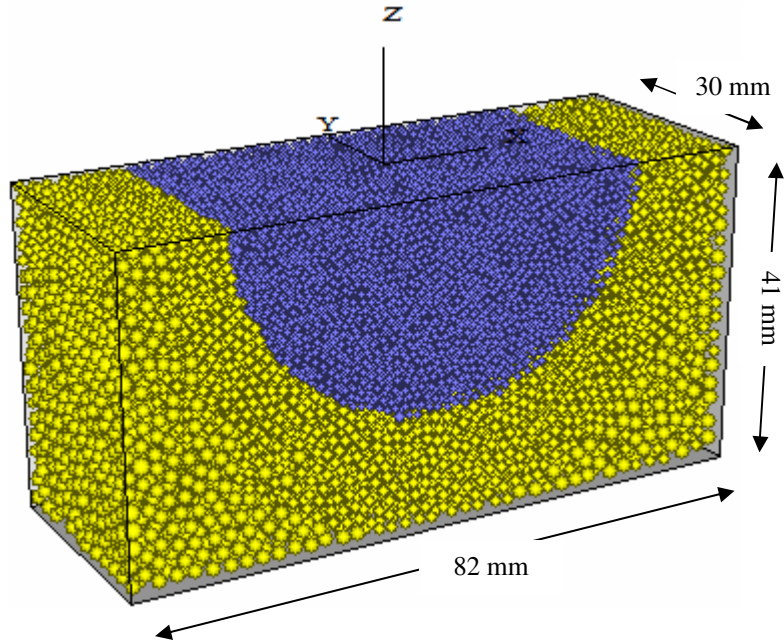
Çizelge 5.4 9 mm kesme derinliğinde hazırlanan numunede kullanılan yarıçap aralıkları.

Silindir no	1	2	3	4
Silindir yarıçap aralığı (mm)	0 – 27	27 – 34	34 – 41	> 41
Tanecik yarıçap aralığı (mm)	0,55-0,66	0,66-0,79	0,79-0,95	0,95-1,14
Tanecik sayısı	24 072	8 159	5 805	2 939



Şekil 5.14 Silindir yarıçapına bağlı olarak değişen tanecik yarıçaplarının gösterilmesi.

Numune hazırlandıktan sonra denge haline getirilmiş ve mikro özellikleri kalibre edilerek bağ dayanımları yüklenmiştir. Elde edilen nihai numune Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.15 9 mm kesme derinliği için hazırlanan numunenin genel görünümü.

5.2 KUMTAŞI-1 KAYACI MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ

Hazırlanan numunede tanecikler boyut dağılımına göre numune içerisine yerleştirilmiş ve yapay bir kayaç elde edilmiştir. PFC^{3D}'de tanecik boyu önemli bir parametre olduğu için,

kayacın her bölgede aynı dayanım ve deformasyon özelliklerini sergilemesi gerekir. Dolayısıyla böyle bir kayacın mikro özelliklerinin kalibre edilmesi de oldukça önemlidir.

Kayacın mikro özelliklerini kalibre etmek için prizmatik numune üzerinde tek eksenli basınç dayanımı deneyi modellenmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı deneyinin modellenmesindeki temel amaç, alt ve üst yükleme başlıklarının sabit bir hızla hareket ettirilmesi sırasında meydana gelen eksenel ve yatay yöndeki birim şekil değiştirme grafiklerine bağlı olarak numunenin Young modülü, Poisson oranı ve en tepe yenilme noktasının taneciklerin mikro özelliklerinden yararlanarak elde edilmesi ve laboratuvar sonuçlarıyla eşleştirilmesidir.

3, 6 ve 9 mm kesme derinlikleri için ayrı numuneler hazırlandığı için kalibrasyonları da ayrı ayrı yapılmıştır. Her bir numunede tanecik boyut aralıkları değiştiği için tek eksenli basınç dayanımı deneyinin modellenmesi için de farklı boyutlarda numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler hazırlanırken en büyük tanecik yarıçapı göz önüne alınmıştır. ISRM (1979) tarafından belirlenen standartlara göre numunenin eni veya genişliği numune içerisindeki en büyük taneciğin en az 10 katı olmak zorundadır. Bu yüzden numune eni veya genişliği boyunca oluşturulan yüzeylerde en az 10 adet tanecikle etkileşim halinde olması hedeflenmiştir.

Aşağıda, öncelikle kumtaşı-1 kayacı için 3 mm kesme derinliğinde yürütülen kalibrasyon süreci detaylı olarak anlatılmış ve daha sonra 6 ve 9 mm kesme derinlikleri için yapılan kalibrasyon çalışmalarının sadece sonuçları verilmiştir. Tüm işlemler aynı şekilde diğer kayalara da (kumtaşı-2, kumtaşı-3 ve kireçtaşı) uygulanmış ve elde edilen sonuçlar çizelgeler halinde verilmiştir.

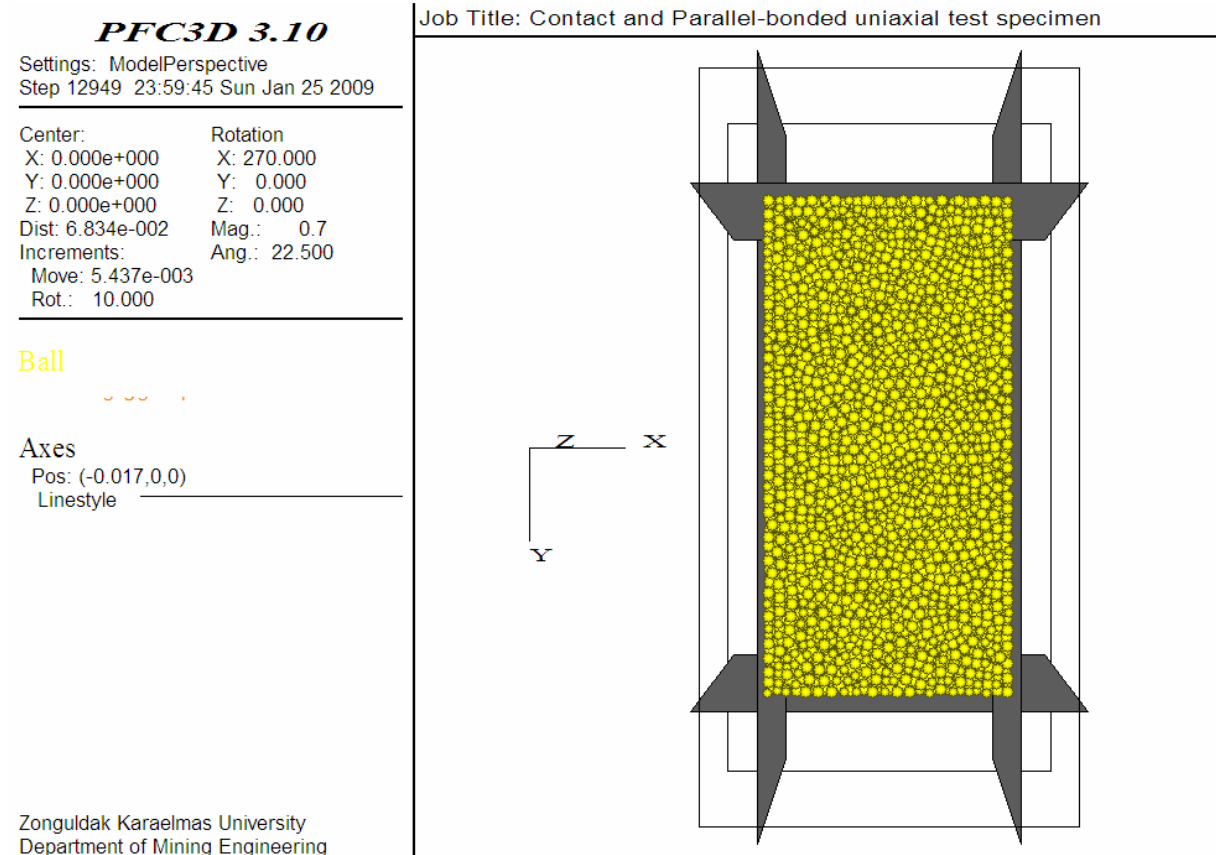
5.2.1 3 mm Kesme Derinliği İçin Hazırlanan Numunenin Mikro Özelliklerinin Kalibre Edilmesi

3 mm kesme derinliğinde kesme deneyini modellemek üzere hazırlanan numunede konik keski 1 no'lu silindirdeki tanecik aralığı üzerinde hareket edecektir. Dolayısı ile öncelikle bu tanecik aralığının mikro özellikleri kalibre edilmiştir. Daha sonra numune boyutu değiştirilmeksizin aynı deney diğer silindirler içerisindeki tanecik boyut aralıkları üzerinde modellenmiştir. Böylece 1 no'lu silindirdeki taneciklerin diğer silindirlerdeki taneciklerle (iri

boyutlu tanecikler) olan mekanik davranışı araştırılmış ve tüm tanecik aralıklarının en içteki silindirde bulunan taneciklerle ne kadar yakın davranış sergilediği ortaya konmuştur.

5.2.1.1 Prizmatik Numunenin Hazırlanması

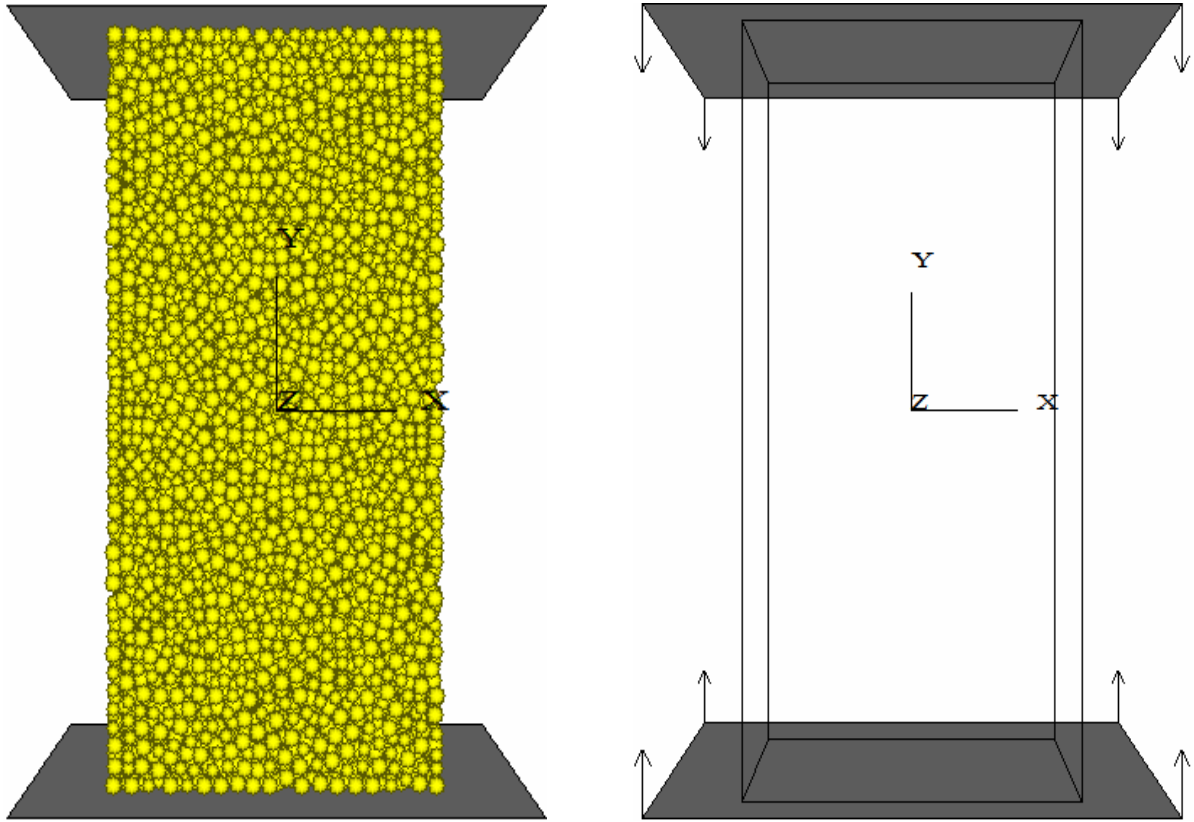
Kayacın mikro özelliklerini kalibre etmek üzere tek eksenli basınç dayanımı deneyi modellenmiş ve bunun için öncelikle prizmatik bir numune hazırlanmıştır. Bunun için x, y ve z eksenlerindeki boyutları sırasıyla 11*22*11 mm olacak şekilde, yükseklik (H) / çap (D) oranı iki olan numune oluşturulmuştur. Çizelge 5.2’de belirtildiği üzere boyutlandırılmış taneciklerden oluşan numunede en büyük tanecik çapı 1,04 mm olduğu için numunenin eni ve genişliği 11 mm alınmıştır. Bu numune içerisinde yarıçapı 0,25-0,30 mm arasında değişen tanecikler %35 gözeneklilik oranıyla bir araya getirilmiştir. Daha sonra yukarıda anlatıldığı üzere, numune ilk olarak denge haline getirilmiş, izotropik gerilme yüklenmiş ve yüzen tanecikler ortadan kaldırılmıştır. Son olarak da tanecikler arasına temas ve paralel bağlar yüklenmiş ve elde edilen nihai numune Şekil 5.16’da gösterilmiştir.



Şekil 5.16 11*22*11 mm boyutlarındaki prizmatik numunenin genel görünümü.

5.2.1.2 Numunenin Deneye Hazır Hale Getirilmesi

Tek eksenli basınç dayanımı deneyinin modellemek için PFC^{3D} kullanma kılavuzunda bulunan üç eksenli basınç dayanımı deney programı modifiye edilmiştir. Bu bağlamda ilk olarak Şekil 5.16'da gösterilen numunedeki yan duvarlar ortadan kaldırılmış ve sadece üst duvarlar aynı pozisyonda bırakılmıştır (Şekil 5.17.a). Bu duvarlar 0,2 m/sn hızla hareket eden yükleme başlıkları olarak kullanılmaktadır (Şekil 5.17.b). Aynı zamanda modelleme sırasında eksenel gerilmeyi ölçmektedir.



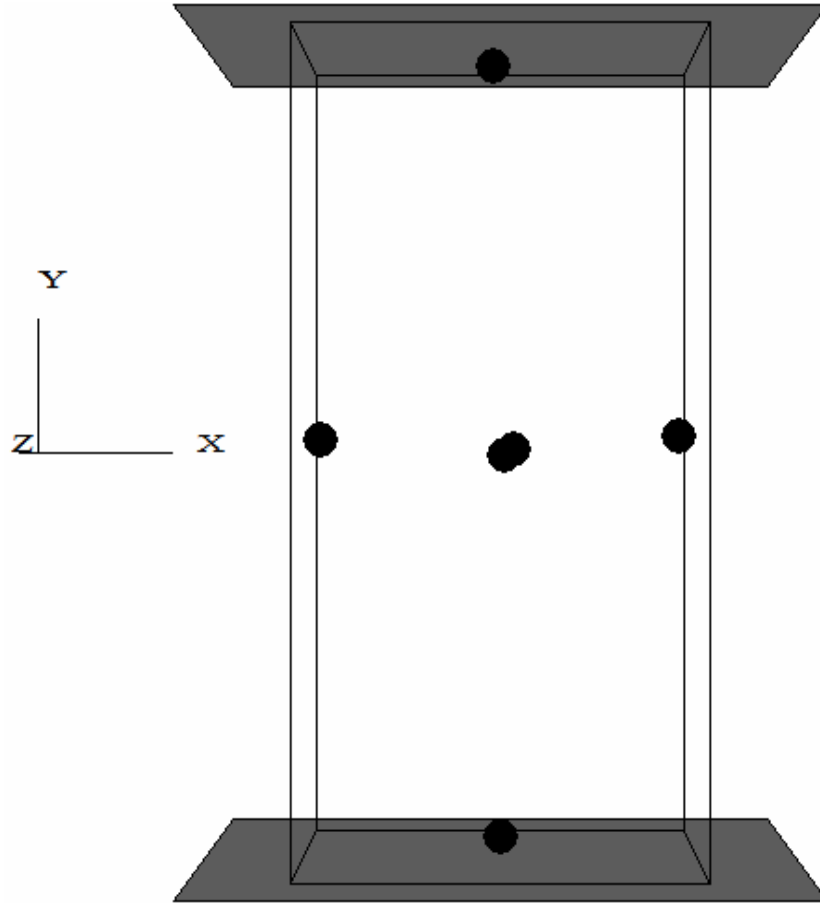
a. Deney öncesi numunenin genel görünümü.

b. Yükleme başlıkları ve yön vektörleri.

Şekil 5.17 11*22*11 mm boyutlarındaki numunenin ve yükleme başlıklarını modelleme öncesi genel görünümü.

Yan duvarlar ortadan kaldırıldığı için programda yanal birim şekil değiştirme belirlenmemektedir. Bu nedenle numune içerisine birim deformasyon ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir. Bu amaçla prizmatik numunenin yatay ve düşey yöndeki orta noktalarına en yakın pozisyondaki taneciklerin koordinatları belirlenmiş ve bu tanecikler deformasyon ölçer olarak işaretlenmiştir (Şekil 5.18). Modelleme başlangıcında ve sonunda bu taneciklerin koordinatları kayıt edilerek yatay ve düşey yöndeki yer değiştirme miktarları bulunur. Ayrıca,

alt ve üst yükleme başlıklarındaki gerilmeler de kayıt edilir. Böylece deney sonucunda eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafikleri çizilir. Bu grafikler Bölüm 4.6’da değinilen algoritmaya göre deneme yanılma yöntemiyle çizilmiştir. Böylece kayacın mikro özelliklerine bağlı olarak PFC^{3D} ve laboratuvarında sergiledikleri makro özellikleri, yani Young modülü, Poisson oranı ve numunenin en tepe yenilme noktası eşleştirilmiştir.



Şekil 5.18 Birim deformasyon ölçerler.

5.2.1.3 Modelleme Sonuçları

Laboratuvarında kullanılan örneklerin mekanik davranışını sergilemesini sağlayan mikro özellikler deneme yanılma yöntemiyle birkaç deneyden sonra belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.5’te sunulmuştur.

Çizelge 5.5 1 no'lu bölgedeki tanecik aralığı için 11*22*11 mm boyutlarındaki numunede elde edilen mikro özellikler.

Temas Bağ (TB)	
Tanecik boyut aralığı (mm)	0,25 – 0,30
Tanecikler arası temas noktasındaki Young modülü (E_c) (GPa)	16,3
Tanecik normal katılığının kayma katılığına oranı (k_n/k_s)	3,8
Tanecikler arası sürtünme katsayısı (μ)	0,50
TB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	18
TB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5
TB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	18
TB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5
Paralel Bağ (PB)	
PB Young modülü ($\bar{E}_c$) (GPa)	16,3
PB normal katılığının kayma katılığına oranı ($\bar{k}_n/\bar{k}_s$)	3,8
PB yarıçap çarpanı ($\bar{\lambda}$)	1,0
PB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	78
PB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5
PB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	78
PB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5

Bu özelliklere göre kayacın dayanım ve deformasyon özelliklerini ortaya koyan grafikler çizilmiştir. Şekil 5.19'da verilen eksenel gerilme–eksenel birim şekil değiştirme grafiğinde kayacın tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) değeri gösterilmiştir. Ayrıca, bu grafiğin düzgün doğrusal kısmının orta noktası (% 50'si) belirlenmiş ve buna göre Eşitlik 5.2'den Young modülü (E) tespit edilmiştir. Yine, Şekil 5.20'de gösterilen eksenel gerilme–yanal birim şekil değiştirme grafiğinin düzgün doğrusal kısmının orta noktası belirlenerek Eşitlik 5.3'ten Poisson oranı (ν) değeri belirlenmiştir. Her iki grafiğin orta noktalarıyla ilgili veriler Çizelge 5.6'da ve ortaya çıkan modelleme sonuçlarıyla birlikte laboratuvar sonuçları Çizelge 5.7'de sunulmuştur.

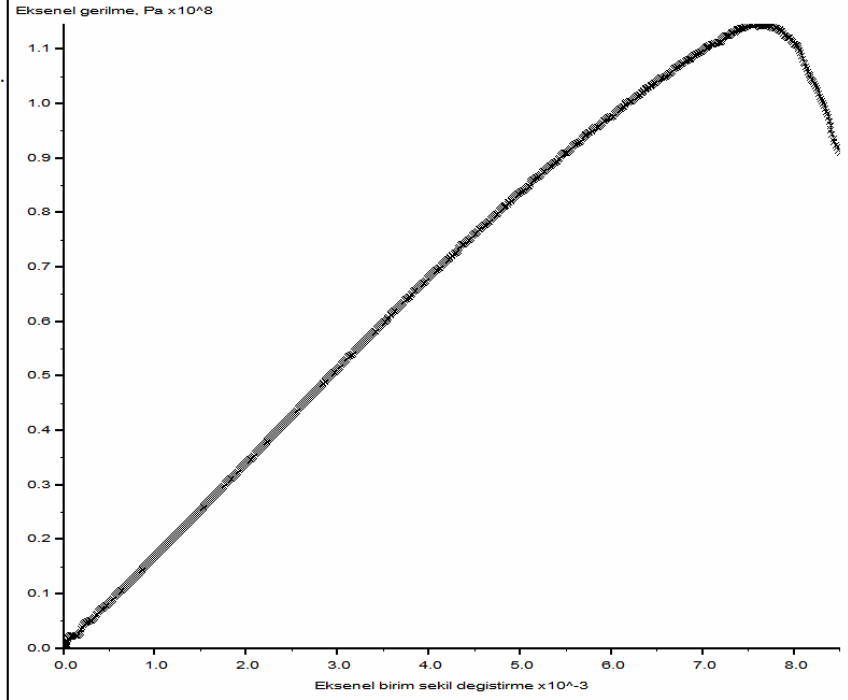
PFC3D 3.10
Step 29750 21:43:50 Thu Feb 19 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.025e+005 <-> 1.147e+008

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
-3.740e-007 <-> 8.503e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil 5.19 11*22*11 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

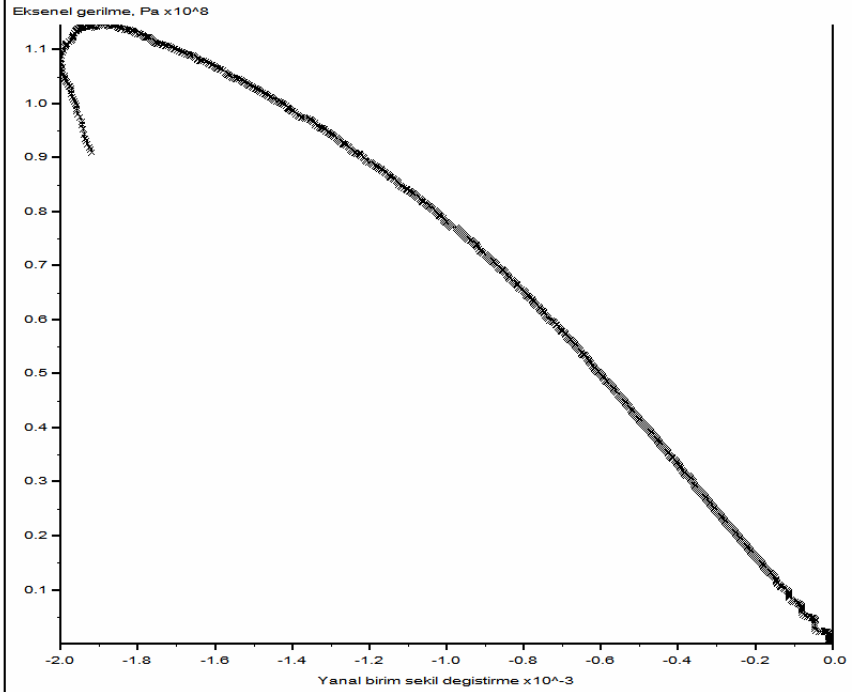
PFC3D 3.10
Step 29750 21:45:37 Thu Feb 19 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.025e+005 <-> 1.147e+008

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-2.002e-003 <-> 2.239e-006

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil 5.20 11*22*11 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 5.6 Eksenel gerilme–eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme–yanal birim şekil değiştirme grafiklerinde elde edilen veriler.

Eksenel gerilme, Pa (σ_{yy})	$57,44 \cdot 10^6$
Eksenel birim şekil değiştirme (ϵ_{yy})	$3,37 \cdot 10^{-3}$
x yönünde yanal birim şekil değiştirme (ϵ_{xx})	$0,73 \cdot 10^{-3}$
z yönünde yanal birim şekil değiştirme (ϵ_{zz})	$0,66 \cdot 10^{-3}$

$$E = \frac{\sigma_{yy}}{\epsilon_{yy}} = \frac{57,44 \cdot 10^6}{3,37 \cdot 10^{-3}} = 17,04 \text{ GPa} \quad (5.2)$$

$$\nu = -\frac{0,5 \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{zz})}{\epsilon_{yy}} = -\frac{0,5 \cdot (0,73 \cdot 10^{-3} + 0,66 \cdot 10^{-3})}{3,37 \cdot 10^{-3}} = -\frac{0,70 \cdot 10^{-3}}{3,37 \cdot 10^{-3}} = 0,21 \quad (5.3)$$

Çizelge 5.7 0,25-0,30 mm yarıçaplı taneciklerden oluşturulan numune ve laboratuvarda elde edilen mekanik özellikler.

Özellikler	Laboratuvar	Modelleme (mm) 11*22*12
σ_c (MPa)	113,6*	114,7
E (GPa)	17,0*	17,04
ν	0,20**	0,21

*Kel'den (2003) alınmıştır.

**Gerçek'ten (2007) alınmıştır.

1 no'lu silindirdeki taneciklerin mikro özellikleri kalibre edildikten sonra prizmatik numune boyutu değiştirilmeksizin aynı özellikler diğer bölgelere de uygulanmıştır. Buna göre her bölgedeki tanecik aralığına göre elde edilen dayanım ve deformasyon özellikleri Çizelge 5.8'de sunulmuştur.

Çizelge 5.8 Tüm bölgelerdeki tanecik topluluklarının mekanik davranışları.

Bölge No	1	2	3	4
Tanecik yarıçapı (mm)	0,25 – 0,30	0,30 – 0,36	0,36 – 0,43	0,43 – 0,52
Tanecik sayısı	19 862	11 494	6 651	3 849
σ_c (MPa)	114,7	111,9	104,5	100,7
E (GPa)	17,04	16,74	16,33	15,87
ν	0,21	0,21	0,19	0,19

Çizelge 5.8'deki sonuçlara göre taneciklerin tüm bölgelerde laboratuvarında kullanılan örneklerle hemen hemen aynı davranışı sergilediği görülmüştür. Buna göre 3 mm kesme derinliğinde bağımsız kesme deneyi modellemek üzere boyutlandırılmış taneciklerden oluşturulan numunenin kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

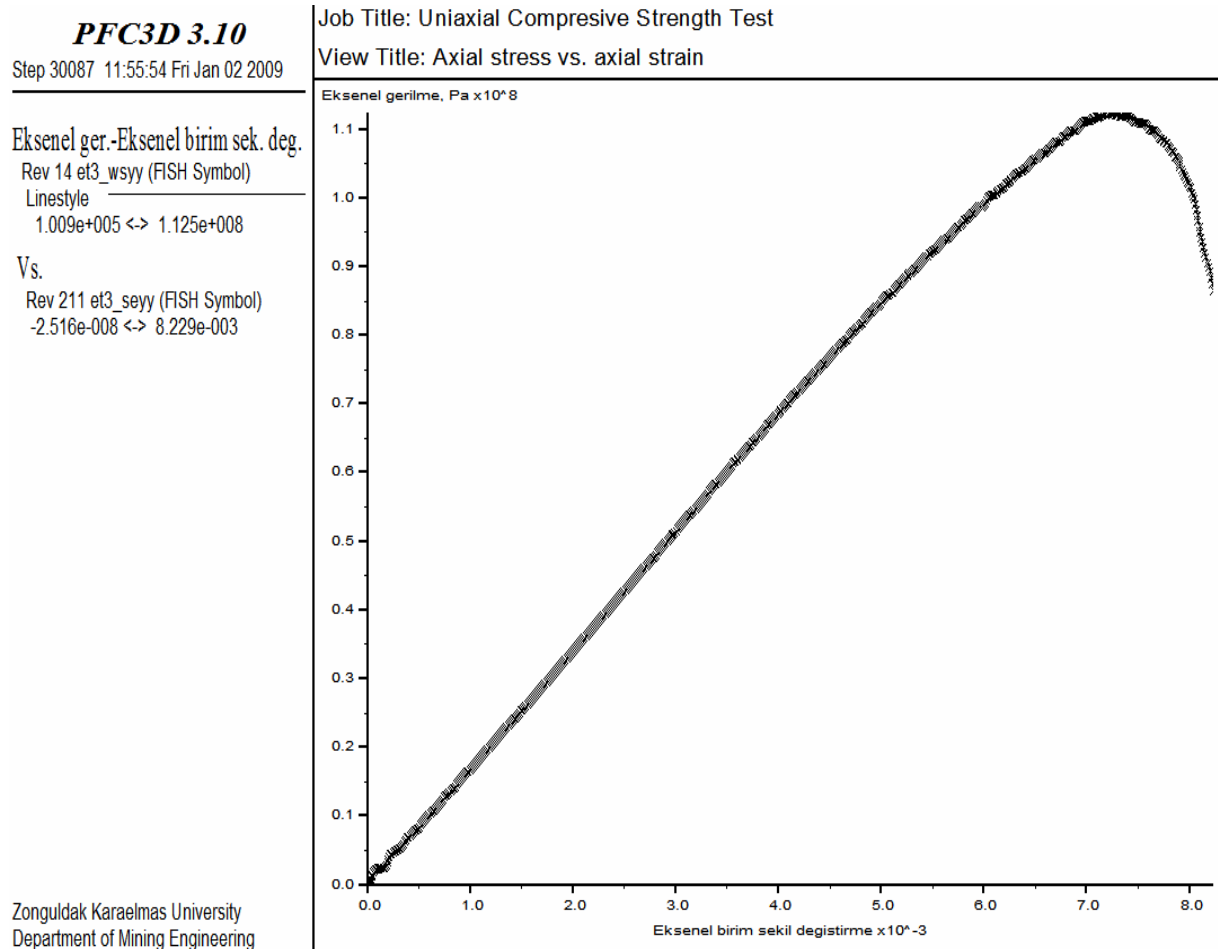
5.2.2 6 mm Kesme Derinliği İçin Hazırlanan Numunenin Mikro Özelliklerinin Kalibre Edilmesi

6 mm kesme derinliğinde bağımsız kesme deneyini modellemek üzere hazırlanan numuneyi kalibre etmek için 17*34*17 mm boyutlarında prizmatik numune hazırlanmıştır. Numune içerisinde 0,40-0,48 mm yarıçaplı tanecikler %35 gözeneklilik oranıyla bir araya getirilmiştir. Numune hazırlama sürecindeki tüm işlemler tekrarlanmış ve numune denge haline getirilmiştir. Modelleme çalışmaları sonucu laboratuvarında kullanılan örneklerin mekanik davranışını sergilemesini sağlayan mikro özellikler deneme yanılma yöntemiyle birkaç deneyden sonra belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 1 no'lu silindirdeki tanecik aralığı için 17*34*17 mm boyutlarındaki numunede elde edilen mikro özellikler.

Temas Bağ (TB)	
Tanecik boyut aralığı (mm)	0,40 – 0,48
Tanecikler arası temas noktasındaki Young modülü (E_c) (GPa)	15,8
Tanecik normal katılığının kayma katılığına oranı (k_n/k_s)	3,5
Tanecikler arası sürtünme katsayısı (μ)	0,50
TB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	20
TB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5
TB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	20
TB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5
Paralel Bağ (PB)	
PB Young modülü ($\bar{E}_c$) (GPa)	15,8
PB normal katılığının kayma katılığına oranı ($\bar{k}_n/\bar{k}_s$)	3,5
PB yarıçap çarpanı ($\bar{\lambda}$)	1,0
PB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	77
PB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5
PB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	77
PB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5

Bu özelliklere göre kayacın dayanım ve deformasyon özelliklerini ortaya koyan grafikler çizilmiştir. Şekil 5.21’de verilen eksenel gerilme–eksenel birim şekil değiştirme ve Şekil 5.22’deki eksenel gerilme–yanal birim şekil değiştirme grafiklerinde kayacın tek eksenli basınç dayanımı değeri gösterilmiştir. Ayrıca, bu grafiklerin orta noktası (%50’ye karşılık gelen) belirlenmiş ve bu noktaya karşılık gelen değerler Çizelge 5.10’da verilmiştir. Bu değerlere göre Eşitlik 5.4 ve Eşitlik 5.5’ten kayacın sekant Young modülü ve sekant Poisson oranı değerleri hesaplanmıştır. Modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar Çizelge 5.11’de sunulmuştur.



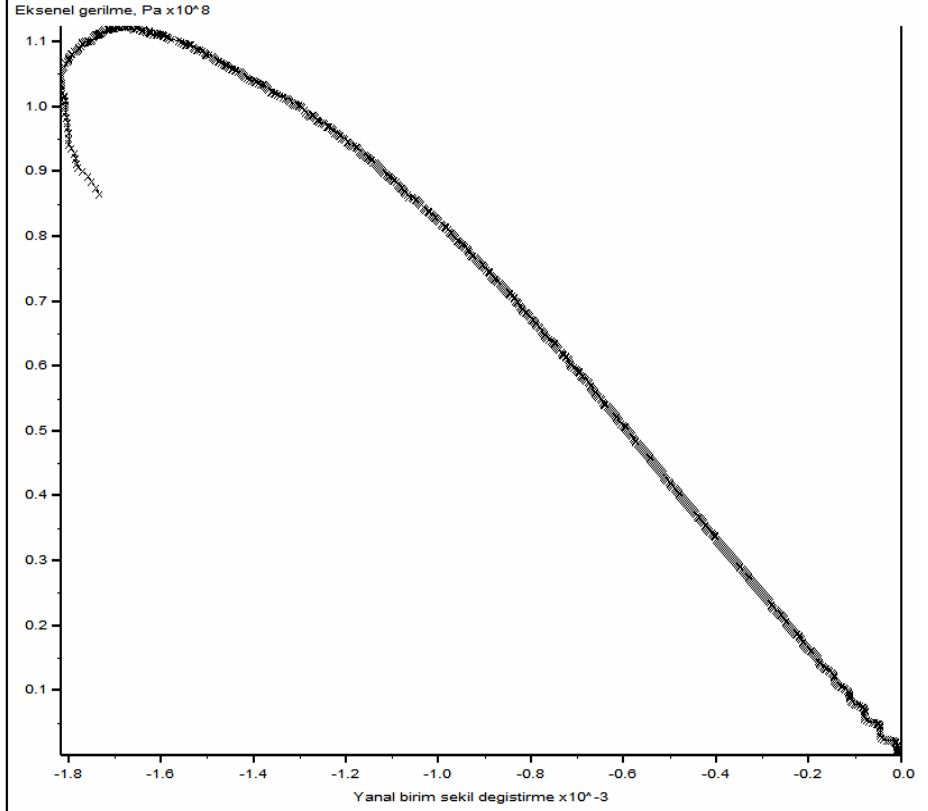
Şekil 5.21 17*34*17 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsy (FISH Symbol)
Linestyle
1.009e+005 <-> 1.125e+008

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-1.817e-003 <-> 1.461e-006

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Uniaxial Compressive Strength Test
View Title: Axial stress vs. lateral strain



Şekil 5.22 17*34*17 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 5.10 Eksenel gerilme–eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme–yanal birim şekil değiştirme grafiğinin orta noktasından (%50) elde edilen veriler.

Eksenel gerilme, Pa (σ_{yy})	$56,20 \cdot 10^6$
Eksenel birim şekil değiştirme (ϵ_{yy})	$3,29 \cdot 10^{-3}$
x yönünde yanal birim şekil değiştirme (ϵ_{xx})	$-0,628 \cdot 10^{-3}$
z yönünde yanal birim şekil değiştirme (ϵ_{zz})	$-0,702 \cdot 10^{-3}$

$$E = \frac{\sigma_{yy}}{\epsilon_{yy}} = \frac{56,20 \cdot 10^6}{3,29 \cdot 10^{-3}} = 17,08 \cdot 10^9 \text{ GPa} \quad (5.4)$$

$$\nu = -\frac{0,5 \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{zz})}{\epsilon_{yy}} = -\frac{-0,665 \cdot 10^{-3}}{3,29 \cdot 10^{-3}} = 0,20 \quad (5.5)$$

Çizelge 5.11 0,40-0,48 mm yarıçaplı taneciklerden oluşturulan numune ve laboratuvarda elde edilen mekanik özellikler.

Özellikler	Laboratuvar	Modelleme (mm) 17*34*17
σ_c (MPa)	113,6*	112,5
E (GPa)	17,0*	17,08
ν	0,20**	0,20

*Kel'den (2003) alınmıştır.

**Gerçek'ten (2007) alınmıştır.

Çizelge 5.9'da verilen mikro özellikler diğer bölgelerdeki tanecik aralıklarına uygulanmıştır. Buna göre prizmatik numunenin boyutu değiştirilmeksizin 1 no'lu bölgedeki taneciklerin mekanik davranışları ile diğer bölgelerdeki taneciklerin mekanik davranışları arasında mukayese yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.12 Tüm bölgelerdeki taneciklerin mekanik davranışları.

Bölge No	1	2	3	4
Tanecik yarıçapı (mm)	0,40 – 0,48	0,48 – 0,58	0,58 – 0,69	0,69 – 0,83
Tanecik sayısı	17 899	10 358	5 994	3 469
σ_c (MPa)	112,5	110,3	109,3	105,0
E (GPa)	17,08	16,90	16,60	16,49
ν	0,20	0,19	0,19	0,17

Çizelge 5.12'deki sonuçlara göre; boyutlandırılmış taneciklerden oluşan numunenin her bölgesindeki taneciklerin yaklaşık olarak aynı davranışı sergilediği görülmektedir.

5.2.3 9 mm Kesme Derinliği İçin Hazırlanan Numunenin Mikro Özelliklerinin Kalibre Edilmesi

9 mm kesme derinliğinde bağımsız kesme deneyini modellemek üzere boyutlandırılmış taneciklerden oluşan numuneyi kalibre etmek için 23*46*23 mm boyutlarında prizmatik numune hazırlanmıştır. Numune içerisinde 0,55-0,66 mm yarıçaplı tanecikler %35 gözeneklilik oranıyla bir araya getirilmiştir. Numune hazırlama sürecindeki tüm işlemler tekrarlanmış ve numune denge haline getirilmiştir. Daha sonra tek eksenli basınç dayanımı

deneyi modellenerek kumtaşı kayacının mikro özellikleri kalibre edilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13 1 no'lu silindirdeki tanecik aralığına göre kumtaşı kayacının mikro özellikleri.

Temas Bağ (TB)	
Tanecik boyut aralığı (mm)	0,55 – 0,66
Tanecikler arası temas noktasındaki Young modülü (E_c) (GPa)	15,8
Tanecik normal katılığının kayma katılığına oranı (k_n/k_s)	3,7
Tanecikler arası sürtünme katsayısı (μ)	0,50
TB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	20
TB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5
TB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	20
TB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5
Paralel Bağ (PB)	
PB Young modülü ($\bar{E}_c$) (GPa)	15,8
PB normal katılığının kayma katılığına oranı ($\bar{k}_n/\bar{k}_s$)	3,7
PB yarıçap çarpanı ($\bar{\lambda}$)	1,0
PB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	79
PB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5
PB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	79
PB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5

Bu özelliklere göre kayacın laboratuvarında belirlenen dayanım ve deformasyon özellikleri Şekil 5.23'te verilen eksenel gerilme–eksenel şekil değiştirme ve Şekil 5.24'teki eksenel gerilme–yanal şekil değiştirme grafiklerinde gösterilmiştir. Bu grafiklerin düzgün doğrusal kısımlarının orta noktası belirlenmiş ve bu noktaya karşılık gelen değerler Çizelge 5.14'te verilmiştir. Bu değerlere göre Eşitlik 5.6 ve Eşitlik 5.7'den kayacın Young modülü ve Poisson oranı değerleri hesaplanmıştır.

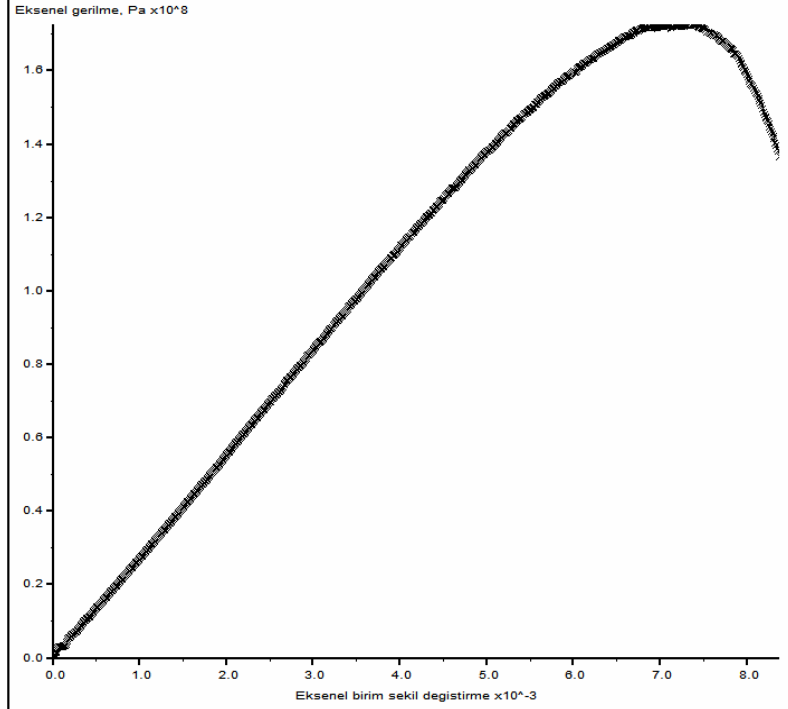
PFC3D 3.10
Step 33949 16:38:59 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.098e+005 <-> 1.727e+008

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
-1.737e-007 <-> 8.369e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil 5.23 23*46*23 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

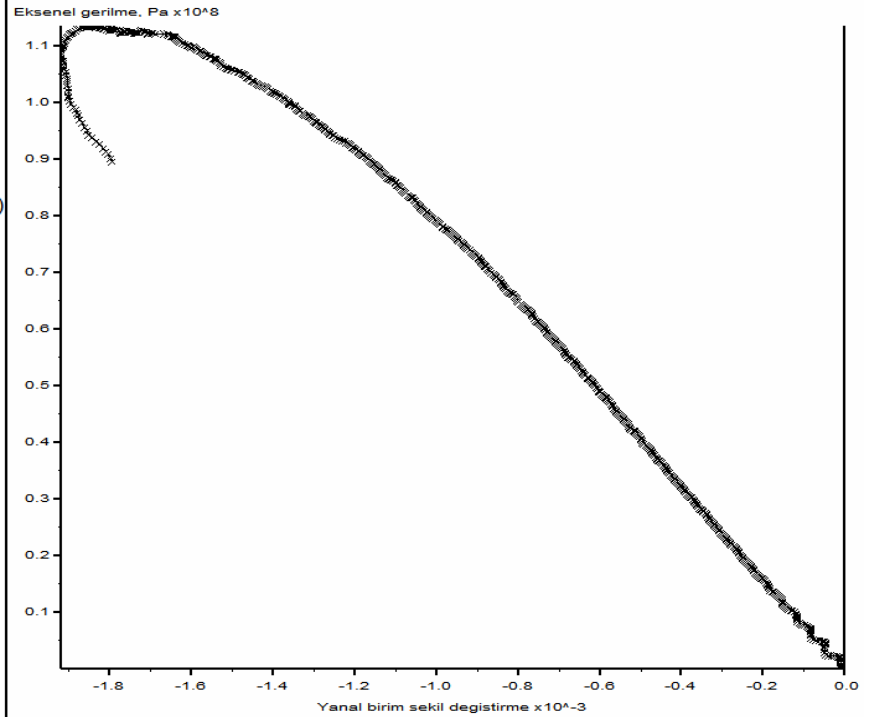
PFC3D 3.10
Step 29263 23:22:22 Sat Feb 14 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
9.005e+004 <-> 1.136e+008

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-1.919e-003 <-> 3.612e-007

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil 5.24 23*46*23 mm boyutlarındaki numunenin modelleme sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 5.14 Eksenel gerilme–eksenel şekil değiştirme ve eksenel gerilme–yanal şekil değiştirme grafiğinin orta noktalarından (%50) elde edilen veriler.

Eksenel gerilme, Pa (σ_{yy})	$56,97 \cdot 10^6$
Eksenel birim şekil değiştirme (ϵ_{yy})	$3,33 \cdot 10^{-3}$
x yönünde yanal birim şekil değiştirme (ϵ_{xx})	$-0,679 \cdot 10^{-3}$
z yönünde yanal birim şekil değiştirme (ϵ_{zz})	$-0,711 \cdot 10^{-3}$

$$E = \frac{\sigma_{yy}}{\epsilon_{yy}} = \frac{56,97 \cdot 10^6}{3,33 \cdot 10^{-3}} = 17,11 \cdot 10^9 \text{ Pa} \quad (5.5)$$

$$\nu = -\frac{0,5 \cdot (\epsilon_{xx} + \epsilon_{zz})}{\epsilon_{yy}} = -\frac{-0,695 \cdot 10^{-3}}{3,33 \cdot 10^{-3}} = 0,21 \quad (5.6)$$

Bu sonuçlar ışığında elde edilen laboratuvar ve modelleme çalışmalarının sonuçları Çizelge 5.15'te sunulmuştur.

Çizelge 5.15 0,55-0,66 mm yarıçaplı taneciklerden oluşturulan numune ve laboratuvarda elde edilen mekanik özellikler.

Özellikler	Laboratuvar	Modelleme (mm) 23*46*23
σ_c (MPa)	113,6*	113,6
E (GPa)	17,0*	17,11
ν	0,20**	0,21

*Kel'den (2003) alınmıştır.

**Gerçek'ten (2007) alınmıştır.

Çizelge 5.13'te verilen mikro özellikler numune boyutu değiştirilmeksizin diğer silindirdeki tanecik aralıklarına da uygulanmıştır. Buna göre tüm silindirler içerisindeki tanecik aralıklarının mekanik davranışları incelenmiş ve aralarında mukayese yapılmıştır (Çizelge 5.16). Bu sonuçlara göre boyutlandırılmış taneciklerden oluşan numunenin her bölgesindeki taneciklerin birbirine yakın davranış sergilediği görülmüştür.

Çizelge 5.16 Numune içerisindeki taneciklerin mekanik davranışları.

Bölge No	1	2	3	4
Tanecik yarıçapı (mm)	0,55-0,66	0,66-0,79	0,79-0,95	0,95-1,14
Tanecik sayısı	17 051	9 867	5 710	3 304
σ_c (MPa)	113,6	113,3	108,0	101,9
E (GPa)	17,11	16,53	16,53	16,44
ν	0,21	0,19	0,22	0,18

5.3 KUMTAŞI-2 KAYACI MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ

Sayısal modelleme çalışmaları süresince tüm kayaçların mikro özellikleri sistematik olarak tek eksenli basınç dayanımı deneyinin PFC^{3D}'de modellenmesiyle kalibre edilmiştir. Bu bağlamda kumtaşı-2 kayacının 3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde uygulanan tanecik boyut aralıkları ve numune boyutları Çizelge 5.17'de verilmiştir. Numuneler hazırlanırken izotropik gerilme 1,5 MPa seçilmiştir.

Çizelge 5.17 Tek eksenli basınç dayanımı deneyin modellenmesi için hazırlanan numunelerde uygulanan geometrik parametreler.

Kesme derinliği (mm)	3	6	9
Prizmatik numune boyutları (mm)	11*22*11	17*34*17	23*46*23
Tanecik yarıçap aralığı (mm)	0,25 – 0,30	0,40 – 0,48	0,55 – 0,66
Gözeneklilik (%)	35	35	35

Kumtaşı-2 kayacının mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen değerler Çizelge 5.18'de verilmiştir.

Bu özelliklere bağlı olarak kumtaşı-2 kayacı üzerinde yürütülen modelleme çalışmaları sonucunda çizilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafikleri Ek Açıklamalar A'da Şekil A.1-A.6'da sunulmuştur. Bu grafiklere göre örneğin tek eksenli basınç dayanımı, Young modülü ve Poisson oranı değerleri kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonucu elde edilen makro özellikler, laboratuvar sonuçlarıyla birlikte Çizelge 5.19'da verilmiştir.

Çizelge 5.18 Kumtaşı-2 kayacının tüm kesme derinliklerinde kullanılan mikro özellikler.

Kesme derinliği (mm)	3	6	9
Temas Bağ (TB)			
Tanecikler arası temas noktasındaki Young mod. (E_c) (GPa)	38	39	39,5
Tanecik normal katılığının kayma katılığına oranı (k_n/k_s)	9,8	9,8	9,9
Tanecikler arası sürtünme katsayısı (μ)	0,5	0,5	0,5
TB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	36	35	35
TB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5	5	5
TB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	36	35	35
TB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5	5	5
Paralel Bağ (PB)			
PB Young modülü ($\bar{E}_c$) (GPa)	38	39	39,5
PB normal katılığının kayma katılığına oranı ($\bar{k}_n/\bar{k}_s$)	9,8	9,8	9,9
PB yarıçap çarpanı ($\bar{\lambda}$)	1,0	1,0	1,0
PB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	150	159	159
PB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5	5	5
PB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	150	159	159
PB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5	5	5

Çizelge 5.19 0,55-0,66 mm yarıçaplı taneciklerden oluşturulan numune ve laboratuvarda elde edilen mekanik özellikler.

Kesme derinliği (mm)		3	6	9
Tanecik yarıçap aralığı (mm)		0,25 – 0,30	0,40-0,48	0,55-0,66
Özellikler	Laboratuvar	Modelleme (mm) 11*22*11	Modelleme (mm) 17*34*17	Modelleme (mm) 23*46*23
σ_c (MPa)	173,7*	172,7	173,6	173,4
E (GPa)	28,0*	27,8	28,0	27,9
ν	0,29**	0,29	0,29	0,29

*Kel'den (2003) alınmıştır.

**Gerçek'ten (2007) alınmıştır.

Kumtaşı-1 kayacında da ispatlandığı üzere silindirik bölgelerdeki tüm tanecik boyut aralıkları birbirine yakın davranış sergilediği için diğer bölgelerdeki tanecik boyut aralıklarının sergilediği mekanik davranış tekrar araştırılmamıştır.

5.4 KUMTAŞI-3 KAYACI MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ

Kumtaşı-3 kayacında 0,8 MPa’lık izotropik gerilmeye göre hazırlanan prizmatik numuneler üzerinde modellenen tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonucu elde edilen mikro özellikler Çizelge 5.20’de sunulmuştur.

Çizelge 5.20 Kumtaşı–3 kayacının tüm kesme derinliklerinde kullanılan mikro özellikler.

Kesme derinliği (mm)	3	6	9
Temas Bağ (TB)			
Tanecikler arası temas noktasındaki Young mod. (E_c) (GPa)	38	38,7	40,2
Tanecik normal katılığının kayma katılığına oranı (k_n/k_s)	5,8	5,7	6,3
Tanecikler arası sürtünme katsayısı (μ)	0,5	0,5	0,5
TB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	15	15	15
TB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5	5	5
TB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	15	15	15
TB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5	5	5
Paralel Bağ (PB)			
PB Young modülü ($\bar{E}_c$) (GPa)	38	38,7	40,2
PB normal katılığının kayma katılığına oranı ($\bar{k}_n/\bar{k}_s$)	5,8	5,7	6,3
PB yarıçap çarpanı ($\bar{\lambda}$)	1,0	1,0	1,0
PB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	68	70	70
PB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5	5	5
PB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	68	70	70
PB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5	5	5

Çizelge 5.20’de verilen mikro özelliklere bağlı olarak her kesme derinliği için çizilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafikleri Ek Açıklamalar A’da Şekil A.7-A.12’de gösterilmiştir. Bu grafiklere bağlı olarak elde edilen makro özellikler de Çizelge 5.21’de verilmiştir.

Çizelge 5.21 Kumtaşı-3 kayacının modelleme çalışmaları sonucu elde edilen makro özellikleri.

Kesme derinliği (mm)		3	6	9
Tanecik yarıçap aralığı (mm)		0,25 – 0,30	0,40-0,48	0,55-0,66
Özellikler	Laboratuvar	Modelleme (mm) 11*22*11	Modelleme (mm) 17*34*17	Modelleme (mm) 23*46*23
σ_c (MPa)	87,4*	89,5	87,0	87,8
E (GPa)	33,3*	33,7	33,2	33,4
ν	0,25**	0,25	0,24	0,25

*Kel'den (2003) alınmıştır.

**Gerçek'ten (2007) alınmıştır.

5.5 KİREÇTAŞI KAYACI MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRE EDİLMESİ

Kumtaşı kayacının yanı sıra kireçtaşı kayacı üzerinde de kesme deneyleri modellenmiştir. Kireçtaşı kayacında tanecikli bir yapı gözlemlenmeksizin, petrografik özellikleri açısından kumtaşı kayacından farklıdır. PFC^{3D}'de kayacın petrografik karakteristiği ne olursa olsun uygun dayanım ve deformasyon koşulları sağlandığında doğadaki tüm kayalar modellenebilir. Örneğin; Yaşitli (2008), laboratuvarında mermer ve kireçtaşı kayaçları üzerinde yürüttüğü çalışmaları PFC^{3D}'de modelleyerek farklı çevresel ve ilerleme hızlarında kesme derinliğine bağlı olarak değişen tepkisel kesme kuvvetlerini incelemiştir. Wang ve Tonon (2009) ise PFC^{3D}'de yine tanecikli bir yapısı olmayan Lac du Bonnet granitinin mikro özelliklerini kalibre ederek kendi geliştirdikleri bir programla üç eksenli basınç dayanımı deneyini modellemişlerdir.

1,2 MPa'lık izotropik gerilmeye göre hazırlanan prizmatik numuneler üzerinde modellenen tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonucu elde edilen mikro özellikler Çizelge 5.22'de sunulmuştur. Bu mikro özelliklere bağlı olarak her kesme derinliği için çizilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafikleri Ek Açıklamalar A'da Şekil A.13-A.18'de gösterilmiştir. Bu grafiklerden hesaplanan makro özellikler de Çizelge 5.23'te verilmiştir.

Çizelge 5.22 Kireçtaşı kayacının tüm kesme derinliklerinde kullanılan mikro özellikler.

Kesme derinliği (mm)	3	6	9
Temas Bağ (TB)			
Tanecikler arası temas noktasındaki Young mod. (E_c) (GPa)	53,5	55,5	55,5
Tanecik normal katılığının kayma katılığına oranı (k_n/k_s)	3,5	3,7	3,7
Tanecikler arası sürtünme katsayısı (μ)	0,5	0,5	0,5
TB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	23	25	25
TB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5	5	5
TB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	23	25	25
TB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5	5	5
Paralel Bağ (PB)			
PB Young modülü ($\bar{E}_c$) (GPa)	53,5	55,5	55,5
PB normal katılığının kayma katılığına oranı ($\bar{k}_n/\bar{k}_s$)	3,5	3,7	3,7
PB yarıçap çarpanı ($\bar{\lambda}$)	1,0	1,0	1,0
PB normal dayanımı, ortalama (σ_c) (MPa)	80	81	81
PB normal dayanımı, standart sapma (σ_c) (MPa)	5	5	5
PB kayma dayanımı, ortalama (τ_c) (MPa)	80	81	81
PB kayma dayanımı, standart sapma (τ_c) (MPa)	5	5	5

Çizelge 5.23 Kireçtaşı kayacının modelleme çalışmaları sonucu elde edilen makro özellikleri.

Kesme derinliği (mm)		3	6	9
Tanecik yarıçap aralığı (mm)		0,25 – 0,30	0,40-0,48	0,55-0,66
Özellikler	Laboratuvar	Modelleme (mm) 11*22*11	Modelleme (mm) 17*34*17	Modelleme (mm) 23*46*23
σ_c (MPa)	121,0*	122,2	121,2	121,3
E (GPa)	57,0*	57,5	57,2	56,7
ν	0,20**	0,20	0,20	0,20

*Kel'den (2003) alınmıştır.

**Gerçek'ten (2007) alınmıştır.

BÖLÜM 6

SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada temel amaç daha önce laboratuvarında tam boyutlu kesme setinde yürütülen bağımsız kesme deneylerini PFC^{3D}'de modellemektir. Modelleme sırasında kayada oluşan hasar ve çatlakları gözlemlemek, keski üzerinde rol oynayan kuvvetleri kayıt ederek spesifik enerji değerini hesaplamaktır.

PFC^{3D}'nin klasik sayısal modellemede kullanılan programlardan farklı bir çalışma mantığının olması, çok fazla komut içermesi ve gelişmiş bir bilgisayar donanımına ihtiyaç olmasından dolayı bir model oluşturmak biraz zaman ve tecrübe gerektirmiştir. Bunun için bu çalışmanın ilk dönemlerinde 0,18-0,20 mm yarıçaplara sahip tanecikleri biraya getirerek 5847 tanecikten 7*5*8 mm boyutlarında bir numune hazırlanmıştır. Bu modelde eşkenar üçgen bir keski kullanılarak kesme mesafesi göz önüne alınmaksızın, sadece programdaki adımlara (step) göre sonuçlar gözlemlenmiştir (Su 2006). Bu model bir sonraki aşamada biraz daha geliştirilmiş ve 0,15-0,25 mm yarıçaplara sahip tanecikleri biraya getirerek 19 032 adet tanecikle 7,5*7,5*15 mm boyutlarında yeni bir numune hazırlanmıştır. Bu numunedeki sınır taneciklere optimum 5 MPa sınır basıncı uygulanarak 4 mm kesme mesafesinde konik şekilli bir keski kullanılarak modelleme çalışmaları yürütülmüş ve sonuçlar incelenmiştir (Su and Akçın 2008). Ancak, hazırlanan her iki numunede 3 mm kesme derinliğindeki modelleme çalışmaları yürütülmüş, 6 ve 9 mm kesme derinlikleri için yetersiz kalmıştır.

Modellemeler sırasında kaya mekaniği ve kazı mekaniğindeki çeşitli parametreler birbirleriyle örtüşmüş ve bu yüzden sadece küçük boyutlu kayalar üzerinde geliştirilen algoritmalar ile basit modeller hazırlanmıştır. Numune hazırlamada yaşanan bu sıkıntılardan dolayı daha sonra alternatif yöntemler araştırılmıştır. Bu bağlamda tanecik aralığı düzgün (uniform) değişen numuneler yerine boyutlandırılmış taneciklerden oluşan numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin modelleme çalışmaları için uygun olup olmadığını ve keskinin hareketi sırasında oluşabilecek sınır etkilerini araştırmak üzere de çeşitli çalışmalar yürütülmüştür.

Kesme derinliğine bağlı olarak farklı boyutlarda oluşturulan numuneler kalibre edildikten sonra kesme deneyleri modellenmiş ve keski üzerinde rol oynayan kesme kuvvetleri kayıt edilmiştir. Ayrıca, modelleme çalışmaları sırasında keski-kayaç arasındaki etkileşim incelenmiş, kayaç üzerinde meydana gelen hasar, kırıntılar ve kayaçta oluşan mikro-çatlaklar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte; kalem ucu tipi keskinin kesme hızı ve kesme açısı gibi parametreleri değiştirilerek modelleme çalışmaları tekrarlanmış ve bu parametrelerin kesme kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

6.1 MODELLEME KOŞULLARININ BELİRLENMESİ

3, 6 ve 9 mm kesme derinlikleri için boyutlandırılmış taneciklerden oluşan numuneler PFC^{3D}'de hazırlanmış ve mikro özellikleri kalibre edilmiştir. Numunelerin modelleme çalışmalarına uygun olup olmadığını araştırmak, uygun keski tasarımı yapmak, keski üzerinde rol oynayan kesme kuvvetlerini kayıt etmek ve spesifik enerji değerlerini hesaplamak için modelleme koşullarının optimum şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda yapılan çalışmalar ve izlenen prosedürler aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

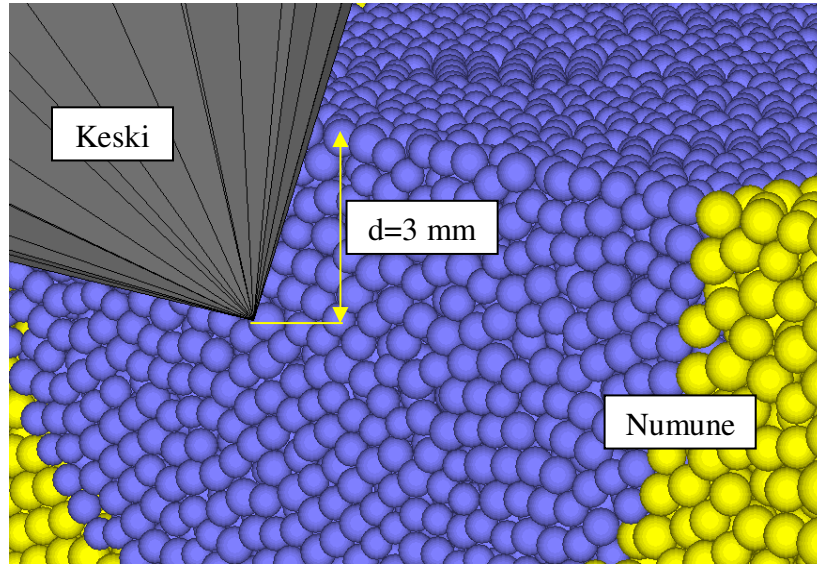
6.1.1 Uygun Tanecik Boyutunun Belirlenmesi

Laboratuvarda yürütülen kesme deneylerinde kesme derinliklerinin çok küçük ve numune boyutlarının da çok büyük olmasından dolayı numune hazırlamada çeşitli sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sorunların üstesinden gelmek için boyutlandırılmış taneciklerden oluşan numuneler kullanılmıştır. Bu numunelerde, üst yüzeyin orta bölgesinde en küçük yarıçaplı tanecikler bulunmaktadır. Numunenin yanal ve alt yüzeylerine doğru gidildikçe tanecik yarıçapları artmaktadır. Alt yüzeye yakın pozisyonundaki taneciklerin yarıçapları en büyük olanlardır ve sadece sınır koşulların etkisini en aza indirmek amacıyla oluşturulmuştur.

Keskinin, kesme işlemine başladığı an kesme derinliği hattı boyunca en az 5-10 adet tanecikle etkileşim halinde olması düşünülmüştür. Bu durumun sağlanabilmesi için mevcut bilgisayar donanımı da göz önüne alınmış ve kesme derinliğine bağlı olarak keski-kayaç arasındaki etkileşim gösteren tanecik sayısına göre optimum tanecik yarıçapları seçilmiştir. Buna göre Çizelge 6.1'de modelleme başlangıcında her kesme derinliğine göre keskiyle etkileşim halindeki tanecik sayıları ve Şekil 6.1'de 3 mm kesme derinliğinde elde edilen bir görünüm verilmiştir.

Çizelge 6.1 Kesme derinliğine bağlı olarak seçilen tanecik yarıçapları.

Kesme derinliği (mm)	Tanecik yarıçapı (mm)	Modelleme başlangıcında keskiyle etkileşim halindeki tanecik sayısı
3	0,25 - 0,30	5 – 6
6	0,40 - 0,48	6 - 7,5
9	0,55 - 0,66	7 – 8



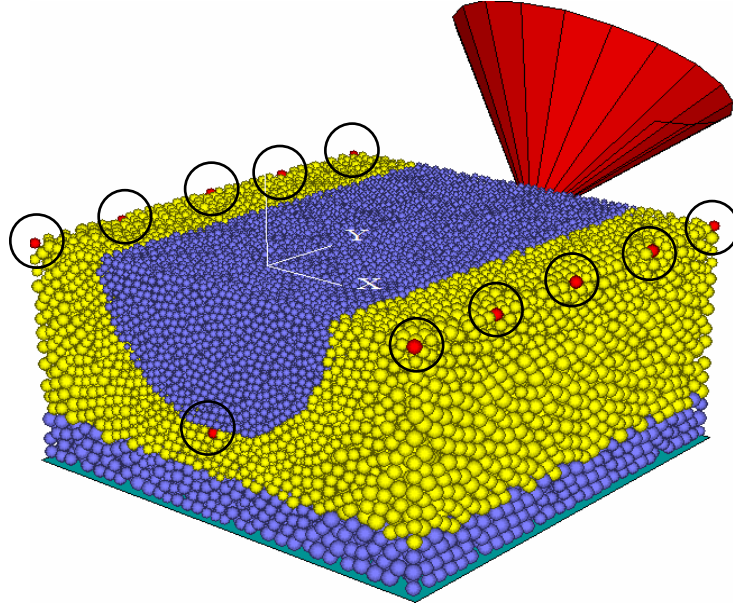
Şekil 6.1 Modelleme başlangıcında keskiyle etkileşim halindeki tanecikler.

6.1.2 Sınır Koşulların Araştırılması

Boyutlandırılmış taneciklerden oluşan numunede dört farklı bölge içerisinde ayrı ayrı tanecik aralıkları kullanılmıştır. Keskinin kayaç üzerindeki hareketi sırasında diğer bölgeleri ne derece etkilediğini tespit etmek üzere numunenin farklı noktalarındaki bazı tanecikler işaretlenmiş ve modelleme süresince bu taneciklerin yerdeğiştirme miktarları izlenmiştir.

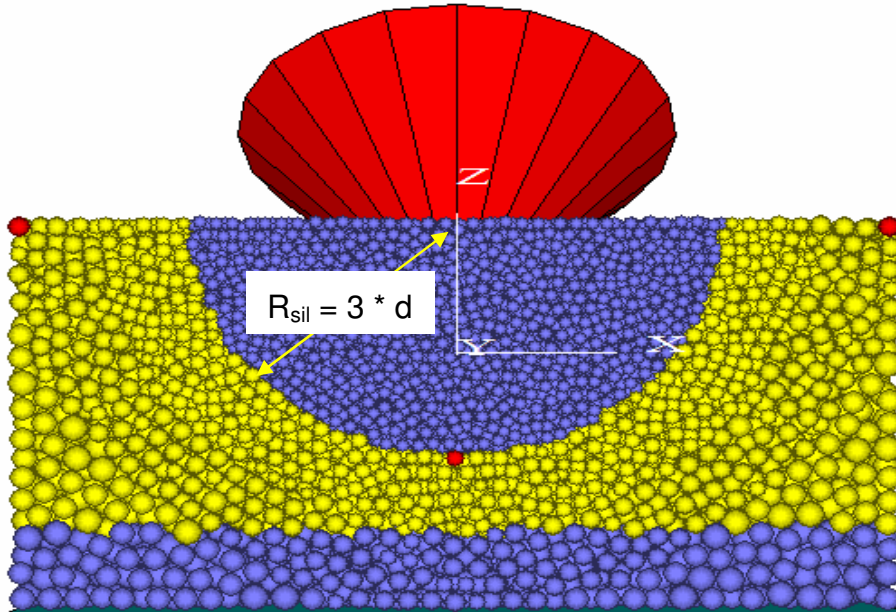
Buna göre keskinin hareket ettiği y eksenı boyunca beş farklı noktadaki tanecikler belirlenmiştir. Daireler içinde gösterilen bu tanecikler Şekil 6.2’de verilmiştir. Tanecik sayısı numune boyuna göre artırılabilir veya azaltılabilir. PFC^{3D}’de tanımlanan bu taneciklerin yerdeğiştirme miktarı 0,1 mm olarak ayarlanmıştır. Keski harekete başladığı andan itibaren her bir taneciğin x, y ve z yönündeki yer değiştirmeleri incelenmiştir. Buna göre keskinin

hareketi sırasında beş tanecikten herhangi birisinin 0,1 mm'den fazla yerdeğiştirmesi halinde program uyarı mesajı vermektedir.



şekil 6.2 Sınır taneciklerinin görünümü.

Kesme derinliğine bağlı olarak hazırlanan numuneler üzerinde yürütölen birkaç modelleme çalışmasından sonra kesme derinliğinin 3 katı uzaklıktaki mesafede taneciklerde herhangi bir yer değiştirme olmadığı belirlenmiştir. Bu yözden numune hazırlanırken kullanılan silindirlerden en içtekinin yarıçapı kesme derinliğinin 3 katı olacak şekilde kabul edilmiştir (şekil 6.3).



şekil 6.3 Silindir yarıçapının gösterilmesi.

6.1.3 Kalem Uçlu Keskinin Modellenmesi

Kalem ucu tipi keski laboratuvarda belirli bir kesme açısıyla keski tutucuya monte edilirler. Keskinin bu şekilde kazı yapmasına asimetrik kesme denir. Modelleme ve laboratuvar çalışmalarının birbirlerine paralel yürütülmesi hedeflendiği için sayısal modelleme çalışmalarında da keski, numune üzerine sabit bir kesme açısıyla yerleştirilmiştir. Yine, diğer kesme parametreleri de laboratuvardakiyle birbirlerine eşdeğer olacak şekilde seçilmiştir (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.2 Modelleme ve laboratuvarda uygulanan kesme parametreleri.

	Laboratuvar	Modelleme
Kesme açısı (°)	-7	-7
Uç açısı (°)	80	80
Dalma açısı (°)	57	57
Temizleme açısı (°)	17	17

Çizelge 6.2’de verilen parametrelerden yararlanarak kalem ucu tipi keski PFC^{3D}’de modellenir. Buna göre ilk önce kesme derinliği (d), kesme mesafesi (l), keski boyu (KB), uç açısı (ϕ) ve temizleme açısının (β) sayısal değerleri tanımlanır. Daha sonra Eşitlik 6.1’den konik keskinin yarıçapı (KY) ve Eşitlik 6.2’den atak açısı (γ) hesaplanır. Tüm bu parametrelere göre kalem uçlu keski numune üzerine uygun şekilde konumlandırılır.

$$KY = KB \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (6.1)$$

$$\gamma = \frac{\phi}{2} + \beta \quad (6.2)$$

Keski kazı işini yaparken numunenin denge durumunun bozulmaması gerekmektedir. Bu yüzden keski 0,3 m/s gibi oldukça düşük bir hızla hareket ettirilmiştir.

6.1.4 Normal ve Kesme Kuvvet Grafiklerinin Çizilmesi

Kesme deneyleri yürütüldükten sonra kazı makinası performans değerlendirmesi veya spesifik enerji değerlerinin hesaplanabilmesi için modelleme sırasında keski üzerinde rol oynayan

normal ve kesme kuvvet değerleri kayıt edilir. Daha sonra bu kuvvet değerlerinin PFC^{3D}'de kesme mesafesi ve zamanla değişimini gösteren grafikleri çizilir. Bu amaçla gerekli değişkenler PFC^{3D}'de modelleme başlangıcında tanımlanır.

Modelleme çalışmaları sonucu çizilen kuvvet grafiklerindeki veriler Excel programında değerlendirilir. Kayıt edilen tüm verilerin ortalamaları alınarak ortalama kuvvet değerleri hesaplanır. Grafiklerdeki 10 pik noktasının ortalaması da maksimum kuvvet değerlerini verir.

6.1.5 Spesifik Enerjinin Hesaplanması

Keski tarafından tüketilen enerjinin hesaplanabilmesi amacıyla modelleme çalışmaları tamamlandıktan sonra keskinin kazdığı, yani numunenin üst bölgesinde (z ekseninde) toplanan tüm taneciklerin hacmini hesaplayan bir fonksiyon yazılmıştır. Modelleme sonucu “m³/mm” olarak belirlenen kazı hacmi spesifik enerjinin MJ cinsinden hesaplanabilmesi için m³/km’ye dönüştürülür. Kesme kuvveti grafiklerinden belirlenen ortalama kesme kuvveti değerine göre de spesifik enerji miktarı hesaplanır (Eşitlik 2.11)

6.2 BAĞIMSIZ KESME DENEYİNİN TEORİSİ VE MODELLEME SONUÇLARI

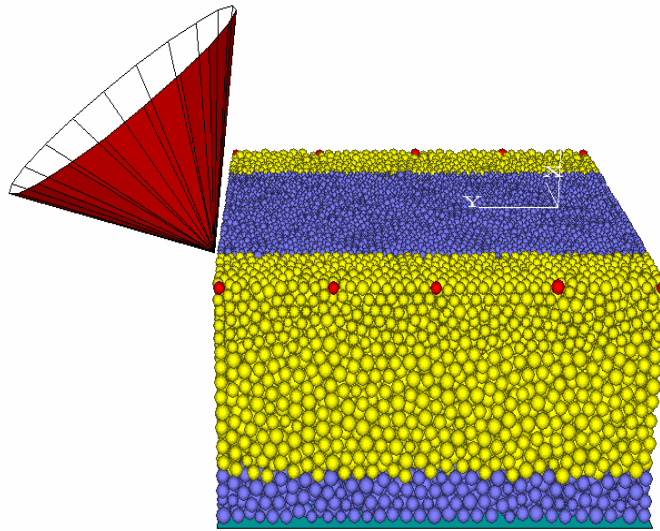
3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde bağımsız kesme deneyini PFC^{3D}'de modellemek üzere çeşitli programlar yazılmıştır. Bu programlarda izlenen adımlar aşağıda verilmiştir.

- Boyutlandırılmış taneciklerden oluşan yapay numuneler hazırlanmıştır.
- Kayacın makro özelliklerine bağlı olarak mikro özellikleri kalibre edilmiştir.
- Kesme parametrelerine bağlı olarak kalem uçlu keski numune üzerine uygun şekilde konumlandırılmıştır.
- Keski numune üzerinde yatay yönde 0,3 m/s hızla ve 20 mm’lik kesme mesafesinde hareket ettirilmiştir.
- Keskinin hareketi sırasında sınırdaki taneciklerdeki yerdeğiştirmeler incelenmiştir. Bu taneciklerde oluşan 0,1 mm’lik yerdeğiştirme halinde program uyarı mesajı vermektedir.
- Modelleme sırasında keski üzerinde rol oynayan normal ve kesme kuvvetleri kesme mesafesine ve zamana bağlı olarak kayıt edilmiştir.
- Modelleme sonucu keski etrafında kazılan numune hacmi belirlenmiş ve buna göre konik keski tarafından tüketilen spesifik enerji değeri hesaplanmıştır.

Kumtaşı-1 kayacı üzerinde 3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde yürütülen sayısal modelleme çalışmaları sonucunda çizilen normal kuvvet-kesme mesafesi ve kesme kuvveti-kesme mesafesi grafikler halinde sonraki üç alt başlıkta verilmiştir. Ayrıca, kumtaşı-2, kumtaşı-3, ve kireçtaşı kayaçları üzerinde yapılan sayısal modelleme çalışmaları sonucunda çizilen normal kuvvet-kesme mesafesi ve kesme kuvveti-kesme mesafesi grafikleri ise Ek Açıklamalar B’de Şekil B.1-B.18 arasında gösterilmiştir. Tüm modelleme çalışmaları süresince kesme süresi aynı olduğu için kuvvet-zaman grafikleri diğer kayaç türleri için tekrar çizilmemiştir.

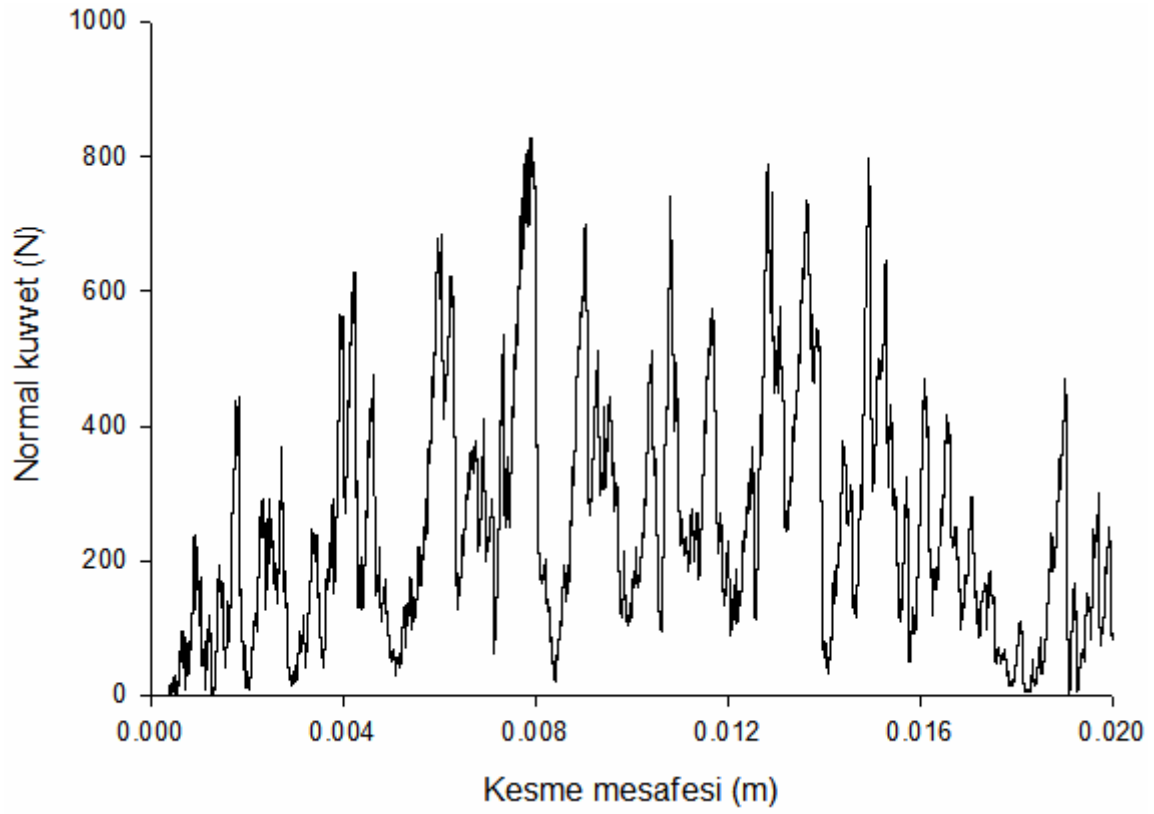
6.2.1 3 mm Kesme Derinliği İçin Modelleme Sonuçları

30*30*15 mm boyutlarında hazırlanan numune üzerinde asimmetrik kesme koşullarında bağımsız kesme deneyi modellenmiştir. Modelleme öncesi keskinin kayaç üzerindeki genel görünümü Şekil 6.4’te sunulmuştur.

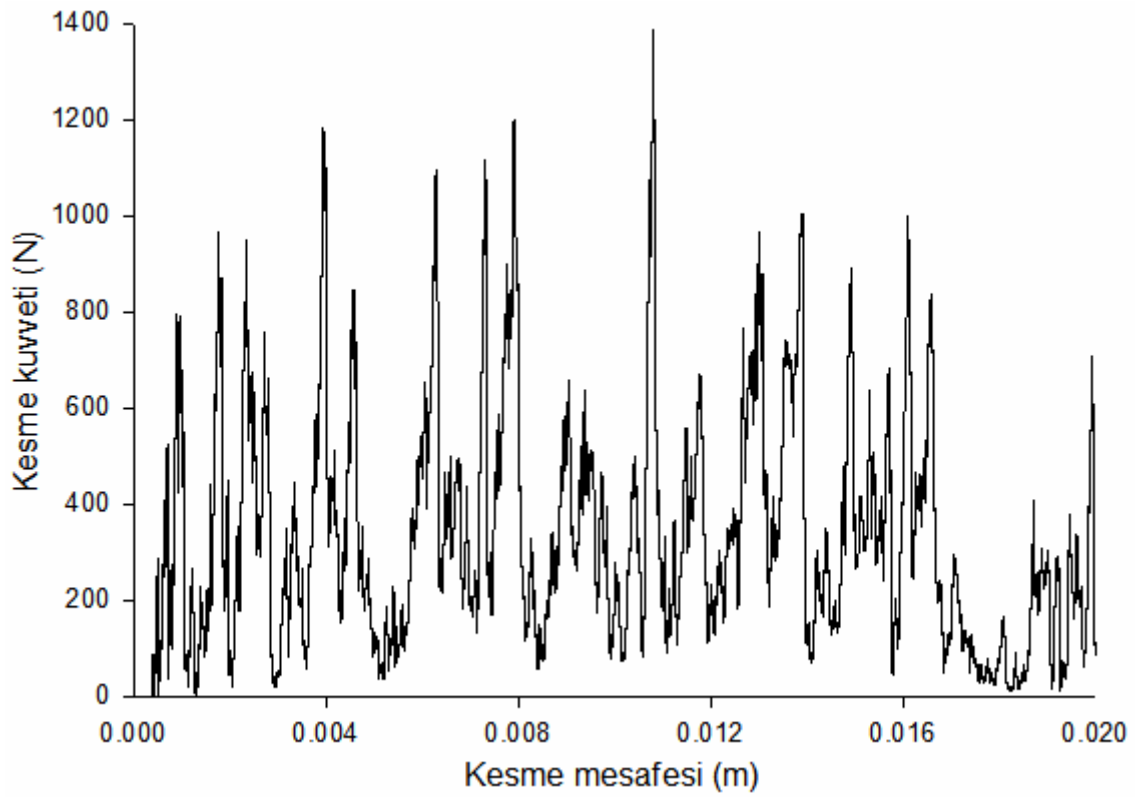


Şekil 6.4 3 mm kesme derinliğinde modelleme öncesi keskinin numune üzerindeki görünümü.

Modelleme çalışmaları sonucunda keski üzerinde rol oynayan kuvvetlerin kesme mesafesi ve zamana göre değişim grafikleri çizilmiştir. Buna göre normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği Şekil 6.5 ve kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği de Şekil 6.6’da sunulmuştur. Bu grafiklerde; keskinin hareketi sırasında numunede oluşan kırıntı yerinden kopuncaya kadar kuvvet grafikleri artmakta ve koptuktan sonra kayaçta meydana gelen ferahlamadan dolayı düşmektedir.



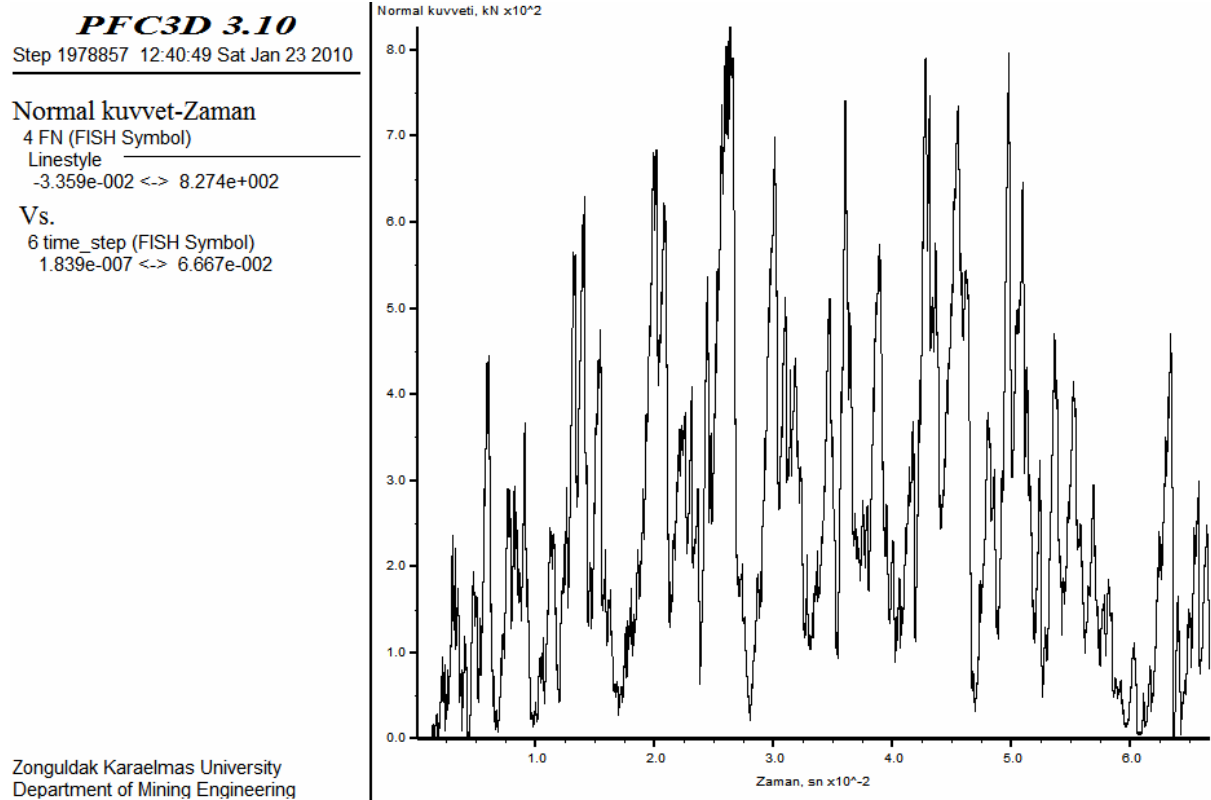
Şekil 6.5 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



Şekil 6.6 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.

Tüm modelleme çalışmalarında kesme mesafesi ve kesme hızı değiştirilmediği için kayaç türüne bakılmaksızın hepsi 0,067 s sürmüştür. Kumtaşı-1 kayacının 3 mm kesme derinliğinde çizilen normal kuvvet-zaman ve kesme kuvveti-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 6.7-6.8’de verilmiştir.

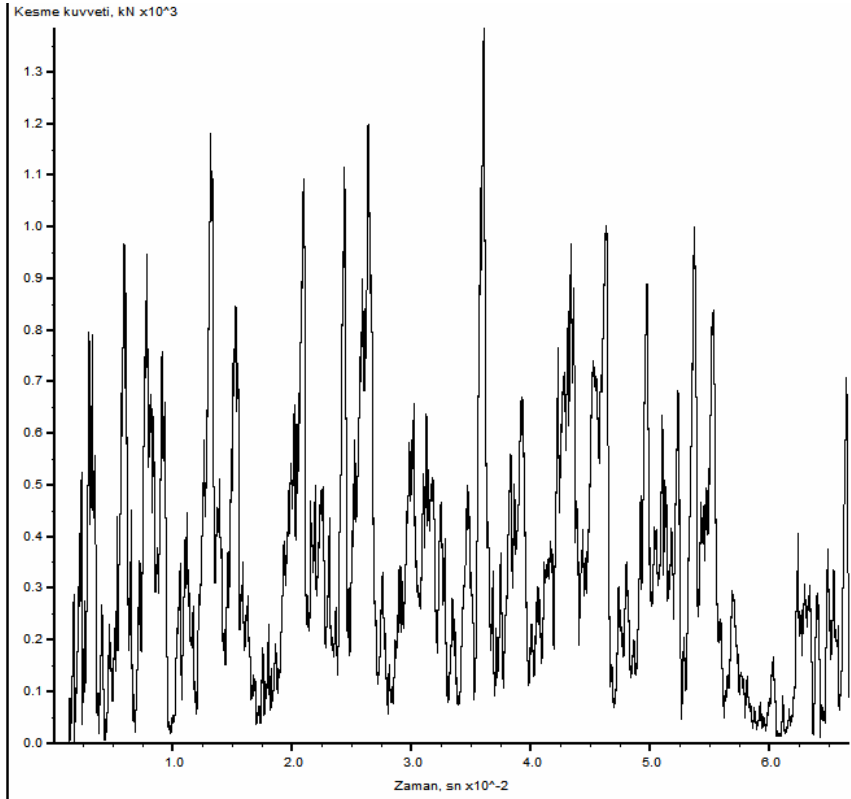
Laboratuvarda kesme deneyleri sırasında kullanılan kesme setinde saniyede 2000 adet veri kayıt edilmektedir. Buna göre 5-6 s süren bir deneyde ortalama 10 000-12 000 adet veri elde edilir. PFC^{3D}’de ise her bir saniyede toplanacak veri sayısı isteğe bağlı olarak ayarlanabilmektedir. Ancak, bu değer kesme sonunda elde edilen çevrim (cycle) ile ilişkilidir. Sayısal modelleme çalışmalarında kesme mesafesinin 20 mm olmasından dolayı kazı süresi de 1 s’den az sürmüştür. Bununla birlikte veri alma sıklığı oldukça düşük seçilmiş ve laboratuvarda elde edilenden çok daha fazla miktarda veri elde edilmiştir. Bu kadar sık aralıklarla veri kayıt edilmesi, modelleme çalışmaları sonucunda hesaplanan keski kuvvetlerinin oldukça hassas olmasını sağlamıştır. Kesme derinliklerine bağlı olarak elde edilen ve her milisaniye (ms) için hesaplanan veri sayıları Çizelge 6.3’te sunulmuştur. Bu sonuçlara göre 3 mm kesme derinliği için her ms’de yaklaşık 6000-8000, 6 mm kesme derinliğinde 4000-5000 ve 9 mm kesme derinliğinde de 3000-4000 adet veri kayıt edilmiştir.



Şekil 6.7 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-zaman grafiği.

Kesme kuvveti-Zaman
3 FC (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.387e+003
Vs.
6 time_step (FISH Symbol)
1.839e-007 <-> 6.667e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil 6.8 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-zaman grafiği.

Çizelge 6.3 Modelleme çalışmalarından zamana bağlı olarak elde edilen veri sayıları.

Kayaç tipi	d (mm)	Toplam veri sayısı (adet)	Her milisaniyede kayıt edilen veri sayısı (adet)
Kumtaşı-1	3	391 359	5 841
	6	253 142	3 778
	9	176 245	2 631
Kumtaşı-2	3	480 726	7 175
	6	304 605	4 546
	9	219 664	3 279
Kumtaşı-3	3	518 253	7 735
	6	323 484	4 828
	9	238 095	3 554
Kireçtaşı	3	709 480	10 589
	6	449 647	6 711
	9	332 934	4 969

Kuvvet grafiklerindeki tüm veriler bir metin (txt) dosyasına kayıt edilmiş ve daha sonra aritmetik ortalamaları alınarak ortalama kuvvet değerleri hesaplanmıştır. Bunun yanında aynı grafiklerdeki 10 adet pik noktası belirlenmiş ve ortalaması alınarak ortalama maksimum kuvvet değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.4). Kumtaşı-1 kayacının 3 mm kesme derinliğinde hesaplanan tüm ortalama ve maksimum kuvvet değerleri Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.4 3 mm kesme derinliğinde belirlenen maksimum normal ve kesme kuvvet değerleri.

FN' (N)	Kesme mesafesi (m)	FC' (N)	Kesme mesafesi (m)
628,1	0,0042	872,0	0,0018
675,8	0,0060	947,5	0,0023
823,0	0,0079	1177,6	0,0039
699,6	0,0090	1086,7	0,0063
740,7	0,0108	1115,7	0,0073
745,7	0,0129	1196,7	0,0079
733,9	0,0136	1387,0	0,0108
795,3	0,0149	945,6	0,0130
643,9	0,0153	985,6	0,0139
467,7	0,0190	991,0	0,0161

Çizelge 6.5 3 mm kesme derinliğinde hesaplanan ortalama ve maksimum kuvvet değerleri.

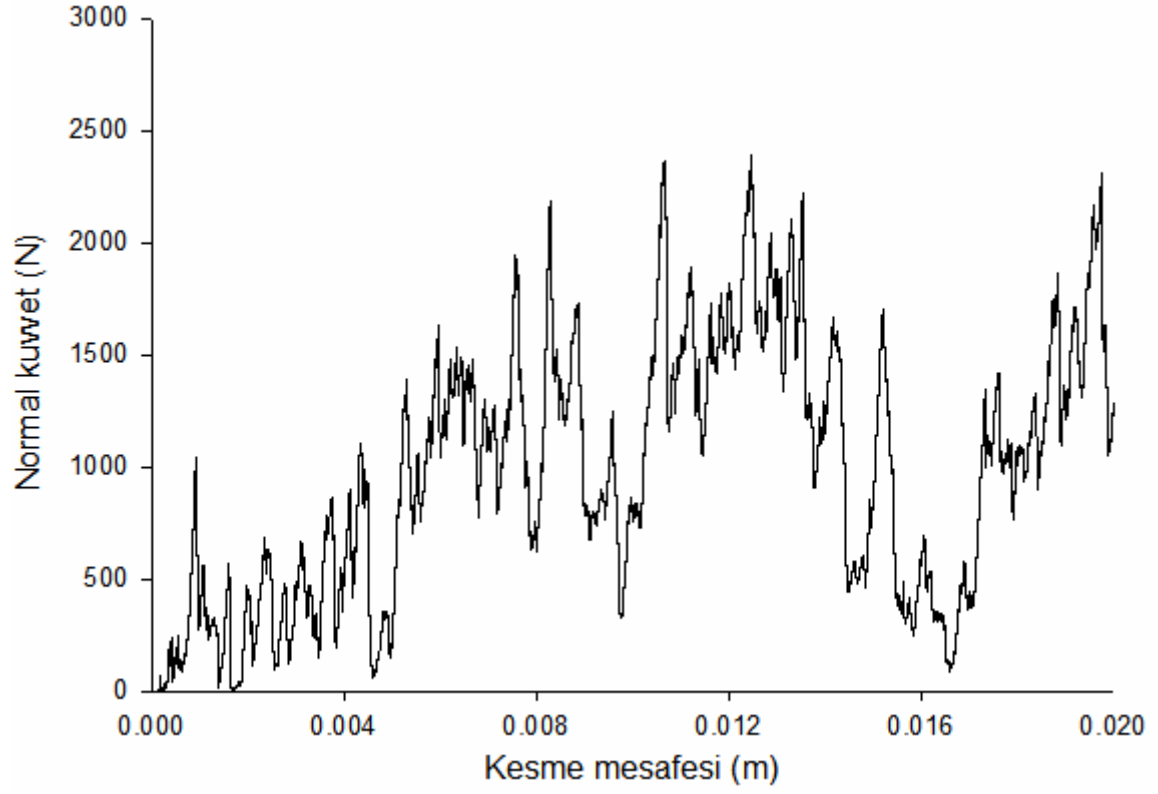
Ortalama normal kuvvet (FN), kN	0,236
Maksimum normal kuvvet (FN'), kN	0,695
Ortalama kesme kuvveti (FC), kN	0,366
Maksimum kesme kuvveti (FC'), kN	1,071

Modelleme çalışmaları sonucunda PFC^{3D} programı tarafından $1,52 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$ 'lük kazı hacmi hesaplanmıştır. Şekil 6.5-6.8'de verilen grafiklerde de görüldüğü üzere keski 20 mm kesme mesafesinde hareket etmektedir. Ancak, ortalama kesme kuvvetleri hesaplanırken, keskinin kayaca batmasıyla oluşan ilk kırıntı ve kesme işlemini tamamladığı anda oluşan son kırıntının oluşturduğu kuvvet değerleri kenar etkisi (side effect) altında kaldığı için hesaplamaya dahil edilmez. Dolayısıyla keski kuvvetleri belirlenirken grafiklerdeki bu kısımlar hesaplamadan çıkarılır. Buna göre kumtaşı-1 kayacının 3 mm kesme derinliğinde 1,40-18,0 mm aralıklarında keskinin kazı yaptığı varsayılmıştır. Yani, kesme mesafesi 16,60 mm alınmıştır. Tüm bu değerlere göre Eşitlik 6.3'ten spesifik enerji değeri hesaplanmıştır.

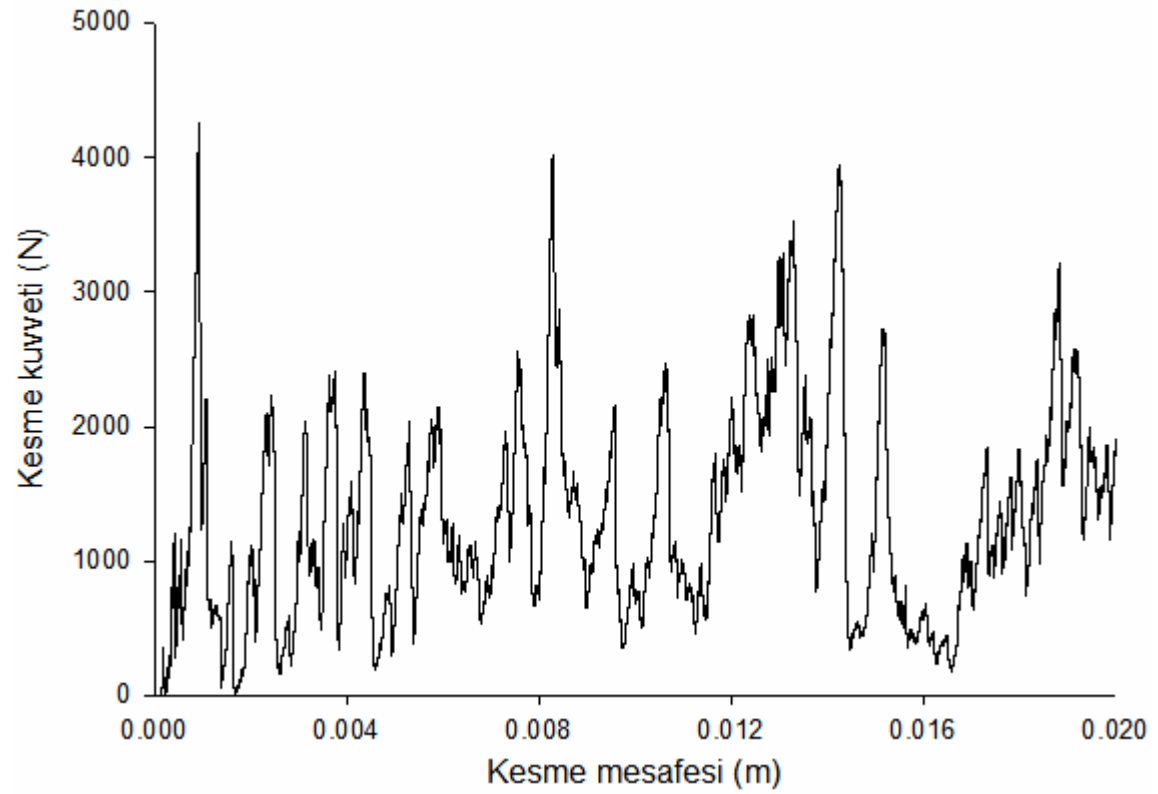
$$SE = \frac{FC}{Q} = \frac{366 \text{ (N)} \cdot 16,60 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}}{1,52 \cdot 10^{-7} \text{ (m}^3\text{)}} = 39,97 \text{ MJ/m}^3 = 11,10 \text{ kWh/m}^3 \quad (6.3)$$

6.2.2 6 mm Kesme Derinliği İçin Modelleme Sonuçları

Kumtaşı-1 kayacının 6 mm kesme derinliğinde yürütülen sayısal modelleme çalışmaları sonucunda çizilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği Şekil 6.9 ve kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.9 6 mm kesme derinliğinde çizilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



Şekil 6.10 6 mm kesme derinliğinde çizilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.

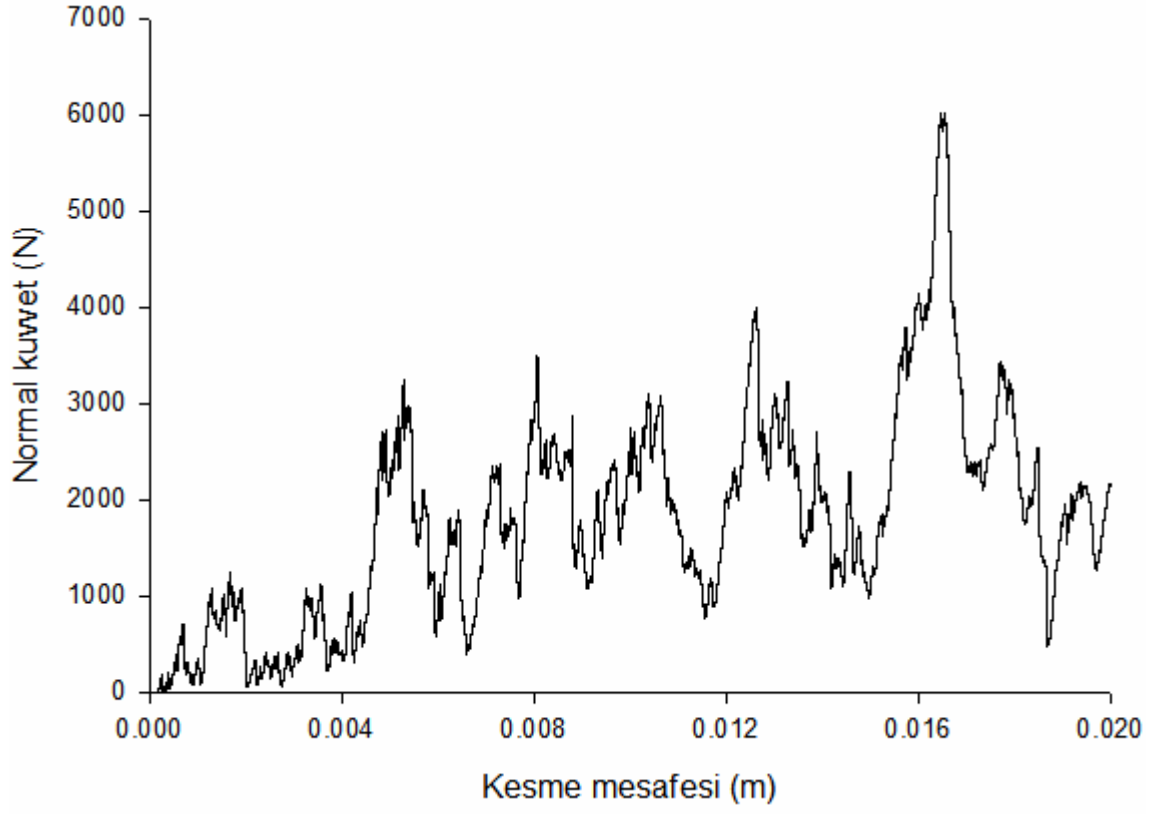
Şekil 6.9-6.10'da çizilen kuvvet grafiklerine göre; ortalama normal kuvvet 1,189 kN ve ortalama kesme kuvveti 1,338 kN olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra Çizelge 6.6'da verilen maksimum kuvvetler ışığında maksimum normal kuvvet 1,917 kN ve maksimum kesme kuvveti de 3,078 kN olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 14,79 mm'lik (1,75-16,54 mm aralıklarında) kesme mesafesinde $5,35 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$ 'lük kazı hacmine göre $10,27 \text{ kWh/m}^3$ 'lük spesifik enerji harcandığı görülmüştür.

Çizelge 6.6 6 mm kesme derinliğinde belirlenen maksimum normal ve kesme kuvvet değerleri.

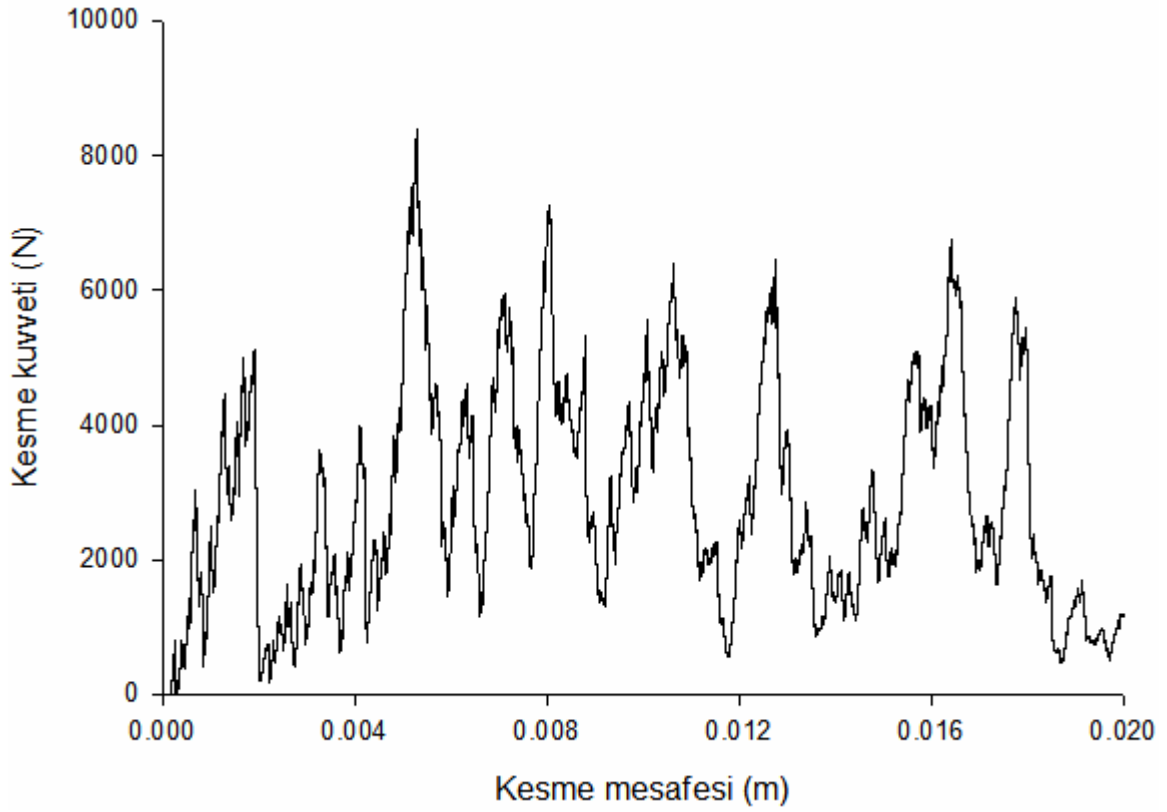
FN' (N)	Kesme mesafesi (m)	FC' (N)	Kesme mesafesi (m)
1386,4	0,0053	4258,2	0,0009
1626,5	0,0060	2408,6	0,0037
1942,4	0,0075	2389,7	0,0044
2176,9	0,0083	2555,6	0,0076
1727,9	0,0089	4010,5	0,0083
2100,4	0,0106	2665,5	0,0124
2232,3	0,0124	2665,5	0,0124
2105,9	0,0133	3899,0	0,0142
1706,7	0,0152	2723,0	0,0151
2169,5	0,0196	3207,4	0,0188

6.2.3 9 mm Kesme Derinliği İçin Modelleme Sonuçları

Kumtaşı-1 kayacı üzerinde 9 mm kesme derinliğinde yürütülen sayısal modelleme çalışmaları sonucunda keski üzerinde rol oynayan normal ve kesme kuvvetlerinin kesme mesafesine göre oluşturduğu grafikler Şekil 6.11-6.12'de gösterilmiştir. Bu grafiklere göre ortalama normal kuvvet 1,837 kN ve ortalama kesme kuvveti 3,179 kN olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte Çizelge 6.7'de verilen maksimum kuvvetler ışığında maksimum normal kuvvet 3,164 kN ve maksimum kesme kuvveti de 6,227 kN olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 15,25 mm'lik (2,17-17,42 mm aralıkları) kesme mesafesinde $1,20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ 'lük kazı hacmine göre $11,22 \text{ kWh/m}^3$ 'lük spesifik enerji harcandığı görülmüştür.



Şekil 6.11 9 mm kesme derinliğinde çizilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



Şekil 6.12 9 mm kesme derinliğinde çizilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.

Çizelge 6.7 9 mm kesme derinliğinde belirlenen maksimum normal ve maksimum kesme kuvvet değerleri.

FN' (N)	Kesme mesafesi (m)	FC' (N)	Kesme mesafesi (m)
1245,1	0,0017	5106,6	0,0019
1117,3	0,0036	8378,0	0,0053
2875,0	0,0052	5845,1	0,0070
3232,0	0,0053	7020,7	0,0080
3488,1	0,0081	5326,8	0,0088
3105,5	0,0104	6399,7	0,0106
3996,2	0,0126	6459,5	0,0128
3226,6	0,0133	5098,1	0,0157
6018,3	0,0165	6759,6	0,0164
3337,5	0,0178	5875,8	0,0178

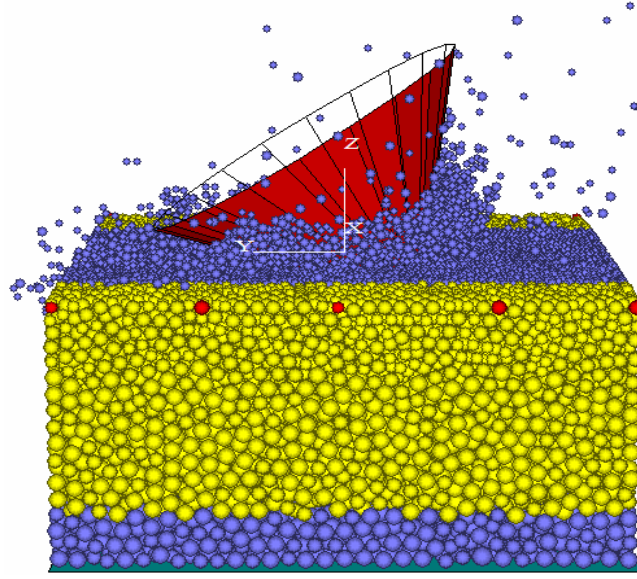
Kumtaşı-2, kumtaşı-3 ve kireçtaşı kayaçlarından elde edilen ortalama kesme kuvveti, kesme mesafesi (s) ve buna bağlı olarak hesaplanan spesifik enerji değerleri de Çizelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.8 Kumtaşı-2, kumtaşı-3 ve kireçtaşı kayaçlarının spesifik enerjilerinin hesaplanması.

Kayaç tipi	d (mm)	FC (N)	Kesme aralığı (mm)	s (m)	Q (m ³)	SE (MJ/m ³)	SE (kWh/m ³)
Kumtaşı-2	3	577	1,13-19,21	$18,1 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-7}$	72,5	20,13
	6	2 473	1,63-18,27	$16,6 \cdot 10^{-3}$	$5,10 \cdot 10^{-7}$	80,7	22,42
	9	5 341	2,47-17,10	$14,6 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	73,0	20,28
Kumtaşı-3	3	191	1,00-19,00	$18,0 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-7}$	21,6	6,00
	6	918	1,35-18,19	$16,8 \cdot 10^{-3}$	$5,12 \cdot 10^{-7}$	30,2	8,38
	9	2 166	1,81-15,91	$14,1 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-6}$	23,7	6,58
Kireçtaşı	3	261	1,16-19,19	$18,0 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-7}$	32,7	9,08
	6	1 212	1,55-18,34	$16,8 \cdot 10^{-3}$	$5,07 \cdot 10^{-7}$	40,1	11,14
	9	2 802	1,56-17,47	$15,9 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$	40,5	11,25

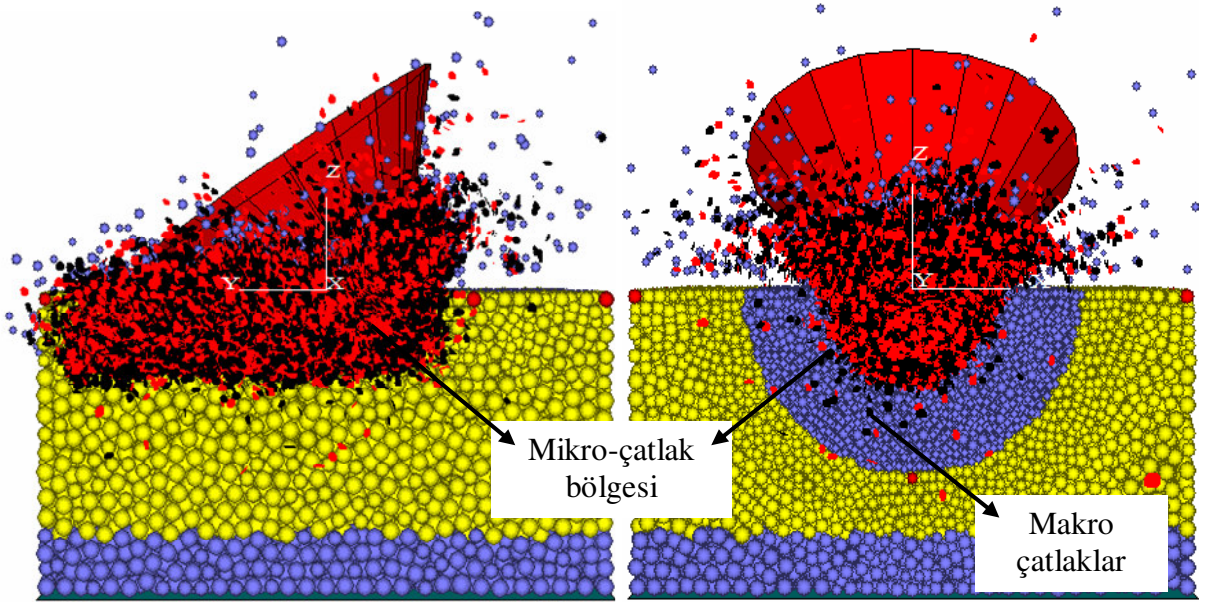
6.3 MODELLEME ÇALIŞMALARI SONUCU KAYAÇTAN KOPAN KIRINTI VE OLUŞAN MİKRO-ÇATLAKLARIN GÖZLEMLENMESİ

0,3 m/s hızla Kumtaşı-1 kayacı üzerinde hareket ettirilen kalem ucu keskinin 3 mm kesme derinliği ve 20 mm’lik kesme mesafesinde yürütülen sayısal modelleme çalışmaları sonucunda keskinin kayaç üzerindeki genel görünümü Şekil 6.13’te gösterilmiştir.



Şekil 6.13 Modelleme sonrası keskinin kayaç üzerindeki genel görünümü.

Kayaç yapısından dolayı basınç ve çekme gerilmelerinin etkisiyle, keski kayaca temas ettiği noktadan itibaren keski etrafında mikro-çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. PFC^{3D}'de altıgen şekilli halkalarla gösterilen bu çatlakların keski etrafında oluşturduğu bölgenin önden ve yandan görünümü Şekil 6.14'te verilmiştir.



Şekil 6.14 Kayaçta oluşan mikro ve makro çatlaklar.

Bu şekilde; mikro-çatlakların daha az yoğun olduğu dış bölgedeki altıgen şekilli halkalarda makro çatlakları temsil etmektedir. Ayrıca, siyah renkle gösterilenler normal, kırmızı renkte gösterilen halkalar da kayma gerilmelerinin etkisiyle oluşan çatlakları belirtmektedir.

Tanecikler arasına yüklenen temas ve paralel bağlardaki oluşan yenilme türüne göre çatlak sayısındaki değişim Çizelge 6.9’da verilmiştir.

Çizelge 6.9 Bağ ve yenilme türüne göre oluşan mikro-çatlak sayıları.

	Normal yenilme (Siyah renkli halkalar)	Kayma yenilmesi (Kırmızı renkli halkalar)	TOPLAM
Temas Bağ	5 579	7 099	12 678
Paralel Bağ	9 330	1 302	10 632
TOPLAM	14 909	8 401	23 310

Çizelge 6.9’da verilen sonuçlar incelendiğinde kumtaşı-1 örneğinde 14 909 adet çatlağın normal, 8 401 adet çatlağında kayma gerilmelerinin etkisinde oluştukları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, temas bağların yenilmesi (kopması) sonucu 12 678 adet ve paralel bağların yenilmesi sonucu da 10 612 adet çatlak meydana gelmiştir. Dolayısı ile kumtaşı-1 kayacının 3 mm kesme derinliğinde yürütülen modelleme çalışmaları sonucunda kayaçta meydana gelen çatlakların % 64’ü normal ve % 36’sıda kayma gerilmelerinin etkisiyle oluştukları ortaya çıkmıştır. Normal ve kayma gerilmelerine bağlı olarak oluşan mikro-çatlak sayıları Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’da gösterilmiştir. Bu şekillerde kullanılan değişkenler Çizelge 6.10’da açıklanmıştır.

Çizelge 6.10 Mikro-çatlak sayılarını gösteren grafiklerde kullanılan değişkenler.

Değişken	Tanımlama
Crk_num	Toplam çatlak sayısı
Crk_num_cnf	Temas bağda normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayısı
Crk_num_pnf	Paralel bağda normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayısı
Crk_num_csf	Temas bağda kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayısı
Crk_num_psf	Paralel bağda kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayısı

PFC3D 3.10
Step 1978857 11:33:56 Sun Sep 27 2009

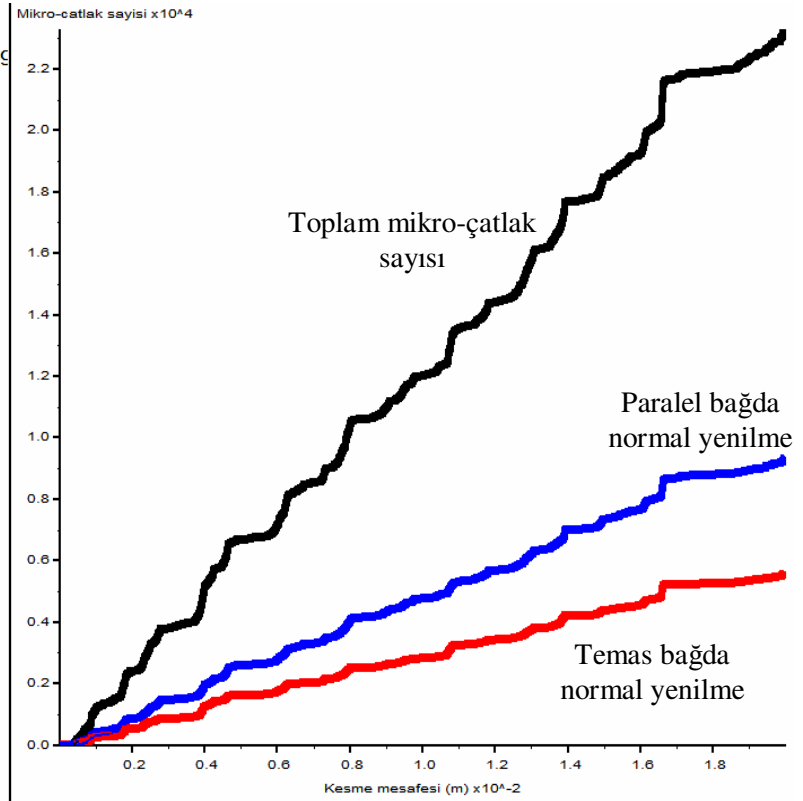
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.331e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 5.579e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 9.330e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
3.066e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil 6.15 Kumtaşı-1 kayacında (d=3 mm) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1978857 11:36:51 Sun Sep 27 2009

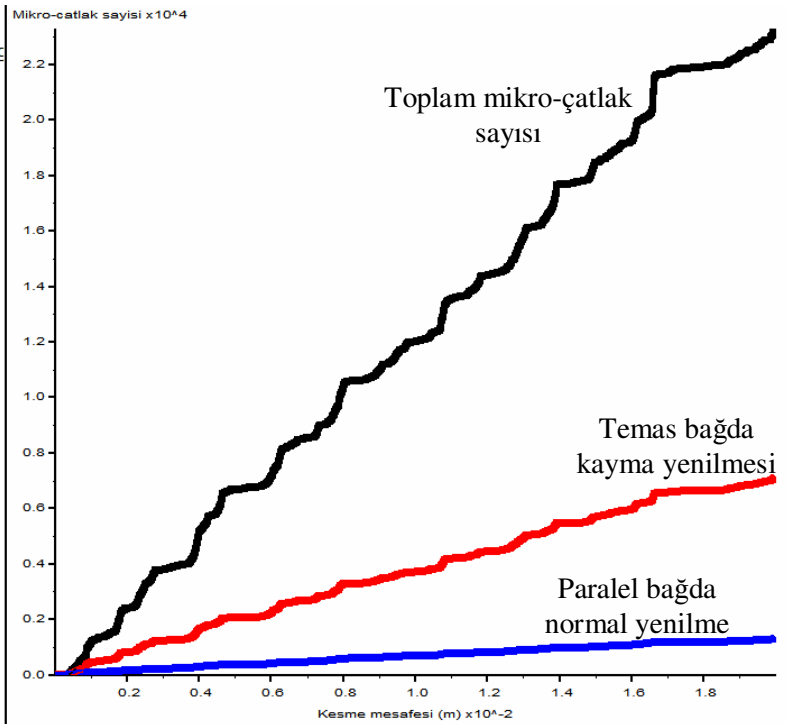
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.331e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 7.099e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.302e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
3.066e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil 6.16 Kumtaşı-1 kayacında (d=3 mm) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

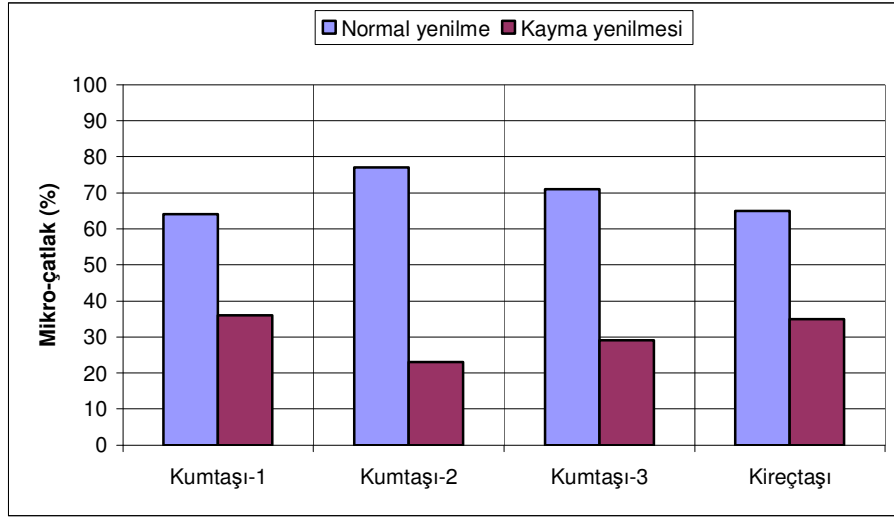
Kumtaşı-1 kayacının 6 ve 9 mm kesme derinlikleri ile kumtaşı- 2, kumtaşı-3 ve kireçtaşlarının 3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde normal ve kayma gerilmeleri altında oluşturdukları mikro-çatlakların sayısı Çizelge 6.11’de verilmiştir. Bu çatlak sayılarını gösteren grafikler de Ek Açıklamalar C’de Şekil C.1-C.20 arasında gösterilmiştir.

Çizelge 6.11 Temas ve paralel bağların yenilmesiyle oluşan çatlak sayıları.

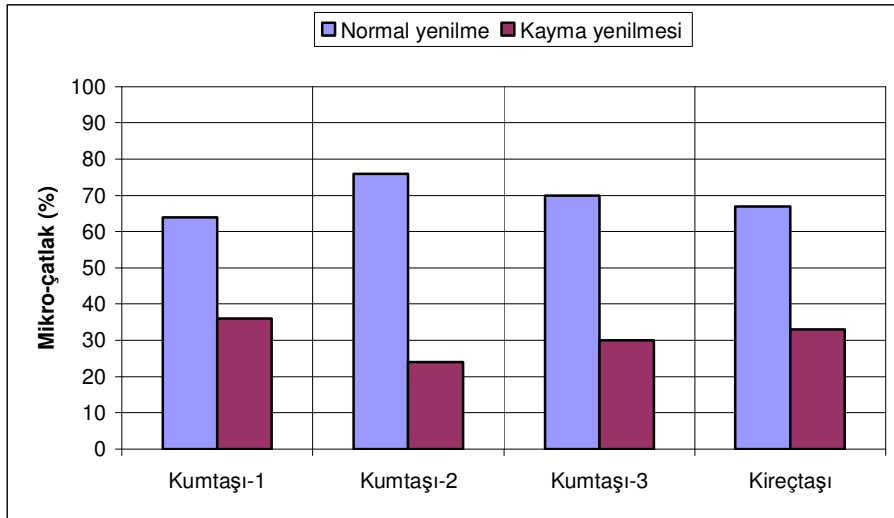
Kayaç Tipi	Yenilme Türü	Temas Bağ	Paralel Bağ	TOPLAM	(%)
Kumtaşı-1 d=6 mm	Normal yenilme	4 335	7 782	12 117	64
	Kayma yenilmesi	5 758	1 184	6 942	36
Kumtaşı-1 d=9 mm	Normal yenilme	4 311	6 801	11 112	67
	Kayma yenilmesi	4 563	871	5 434	33
Kumtaşı-2 d=3 mm	Normal yenilme	6 131	10 249	16 380	77
	Kayma yenilmesi	4 716	268	4 984	23
Kumtaşı-2 d=6 mm	Normal yenilme	6 161	9 479	15 640	76
	Kayma yenilmesi	4 627	231	4 858	24
Kumtaşı-2 d=9 mm	Normal yenilme	6 775	8 815	15 590	81
	Kayma yenilmesi	3 594	159	3 753	19
Kumtaşı-3 d=3 mm	Normal yenilme	6 715	10 271	16 986	71
	Kayma yenilmesi	6 385	643	7 028	29
Kumtaşı-3 d=6 mm	Normal yenilme	6 120	9 436	15 556	70
	Kayma yenilmesi	6 150	612	6 762	30
Kumtaşı-3 d=9 mm	Normal yenilme	5 641	7 690	13 331	72
	Kayma yenilmesi	4 646	437	5 083	28
Kireçtaşı d=3 mm	Normal yenilme	5 492	10 562	16 054	65
	Kayma yenilmesi	6 889	1 651	8 540	35
Kireçtaşı d=6 mm	Normal yenilme	4 953	10 019	14 972	67
	Kayma yenilmesi	6 019	1 352	7 371	33
Kireçtaşı d=9 mm	Normal yenilme	4 836	8 673	13 509	70
	Kayma yenilmesi	4 809	1 017	5 826	30

Kesme derinliklerine bağlı olarak her bir kayaçta etkili yenilme türlerinin yüzde oranları arasında karşılaştırma yapılmış ve elde edilen grafikler Şekil 6.17-6.19’da verilmiştir. Bu

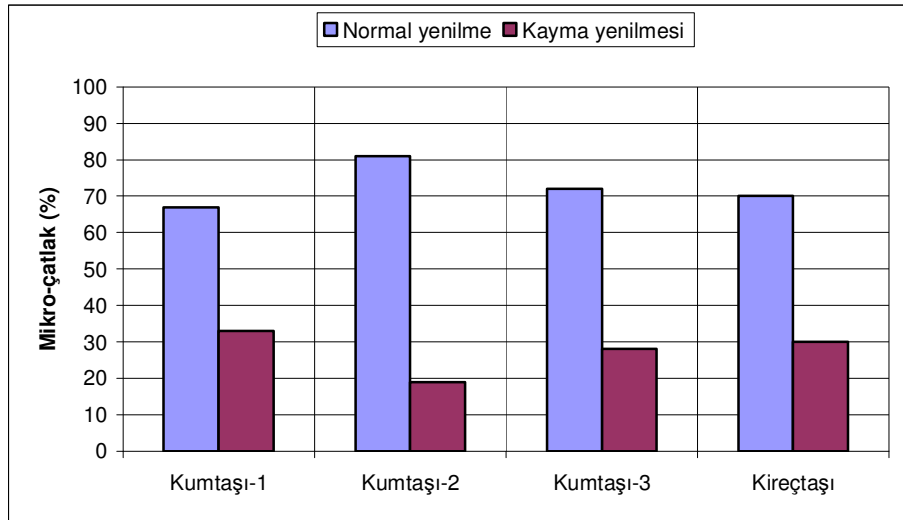
grafiklere göre modelleme çalışmaları sonucunda kayaçların basınç dayanımlarının etkisiyle normal yenilme davranışı sergilediği görünmektedir.



Şekil 6.17 d=3 mm için yenilme türüne bağlı olarak yapılan karşılaştırma grafikleri.

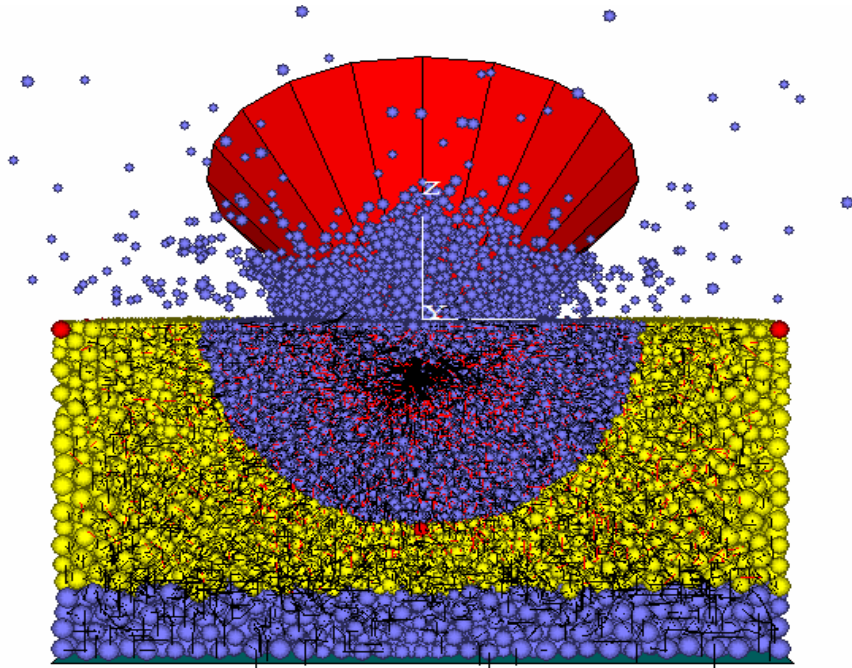


Şekil 6.18 d=6 mm için yenilme türüne bağlı olarak yapılan karşılaştırma grafikleri.



Şekil 6.19 d=9 mm için yenilme türüne bağlı olarak yapılan karşılaştırma grafikleri.

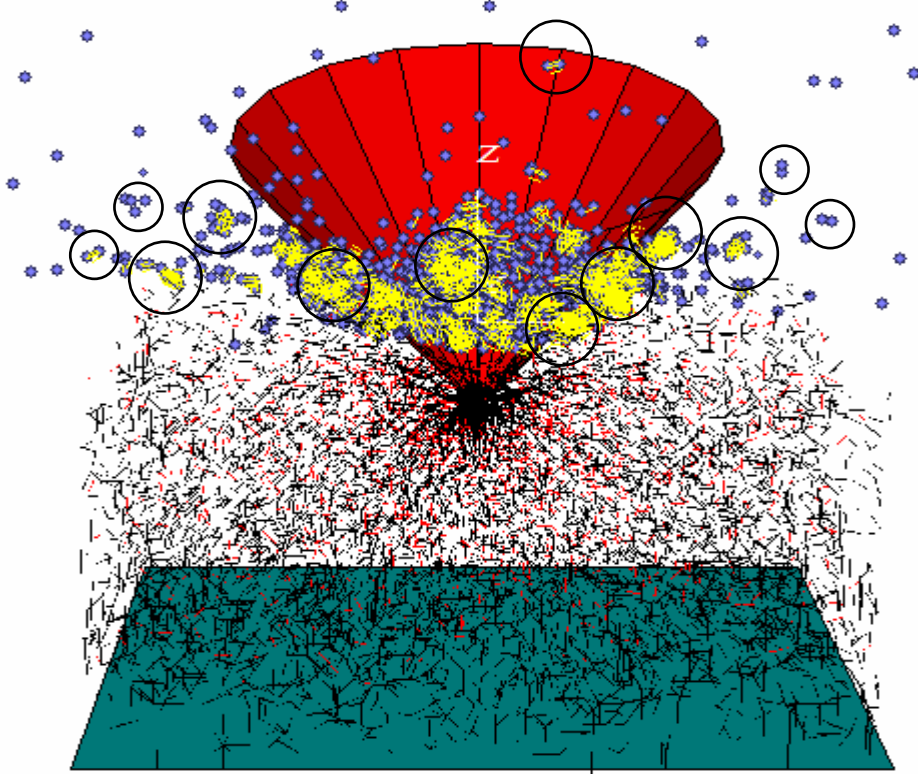
Keskinin numune üzerindeki hareketi sırasında keski-tanecikler arasında bir etkileşim oluşmaktadır. PFC^{3D}'de temas kuvvetleriyle incelenen bu etkileşim Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Etkileşim daha çok keski ucunda yoğunlaşmakta ve uçtan kayacın diğer noktalarına doğru ilerledikçe etkileşim azalmaktadır.



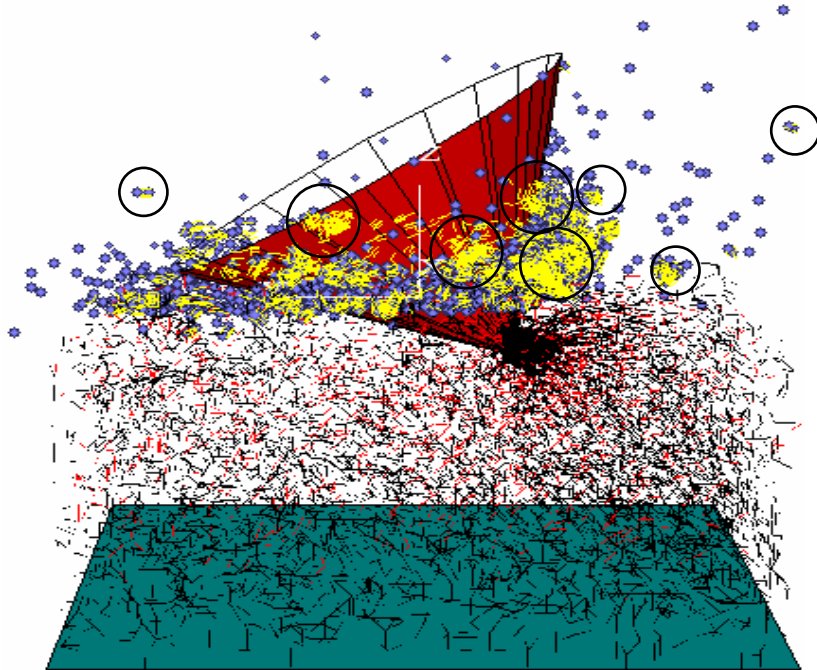
Şekil 6.20 Keski-kayaç arasındaki etkileşimin gösterilmesi (kumtaşı-1, d=3 mm).

Kesme deneyi sırasında, keski etrafında gerek tek tek ve gerekse de gruplar halinde tanecikler oluşmuştur. Bu tanecikler kazı etrafındaki pasayı temsil etmektedir. Ayrıca, gruplar halinde

bulunan tanecikler, aralarındaki temas veya paralel bağlar kopmamış olduğu için aynı zamanda kazı sırasında oluşan kırıntıları (chip) temsil etmektedir. Normal ve kayma gerilmelerinin etkisiyle keski ucundan itibaren ilerleyen mikro-çatlakların sebep olduğu bu kırıntıların önden ve yandan görünüşleri Şekil 6.21-6.22’de daireler içerisinde verilmiştir.

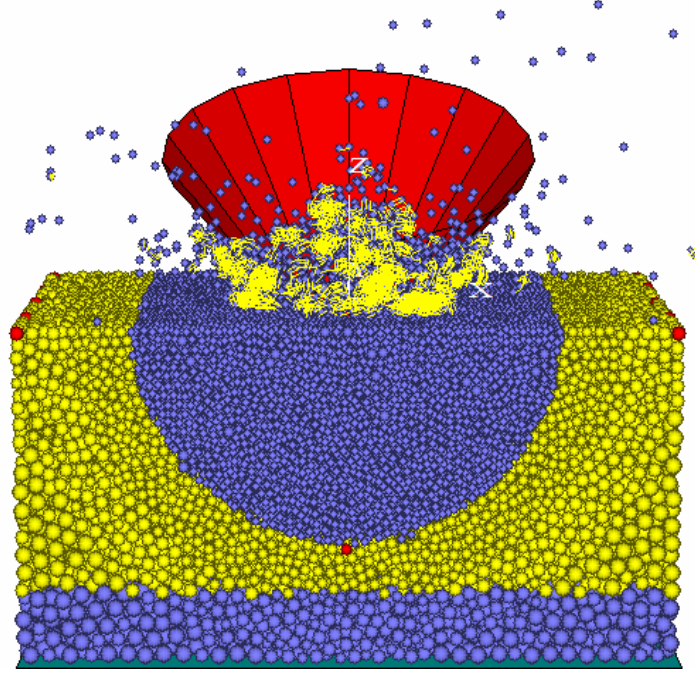


Şekil 6.21 Kesme sonrası oluşan kırıntıların önden görünümü (kumtaşı-1, $d=3$ mm).

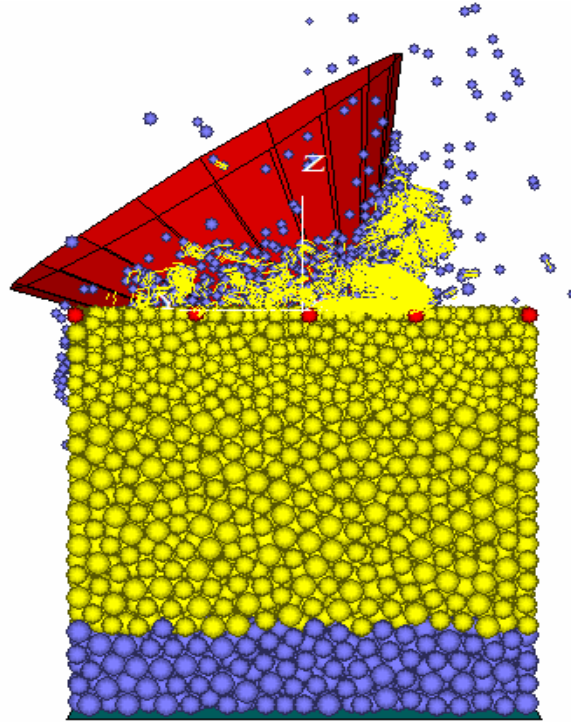


Şekil 6.22 Kesme sonrası oluşan kırıntıların yandan görünümü (kumtaşı-1, $d=3$ mm).

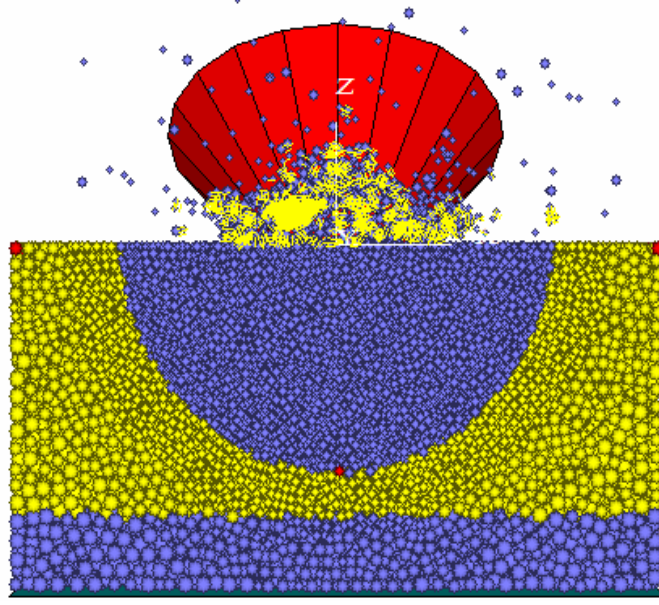
Kumtaşı-1 kayacının 6 ve 9 mm kesme derinliği ve 20 mm kesme mesafesinde yürütülen sayısal modelleme çalışmaları sonucu kayaç üzerinde oluşan kırıntılar Şekil 6.23-6.26'te gösterilmiştir.



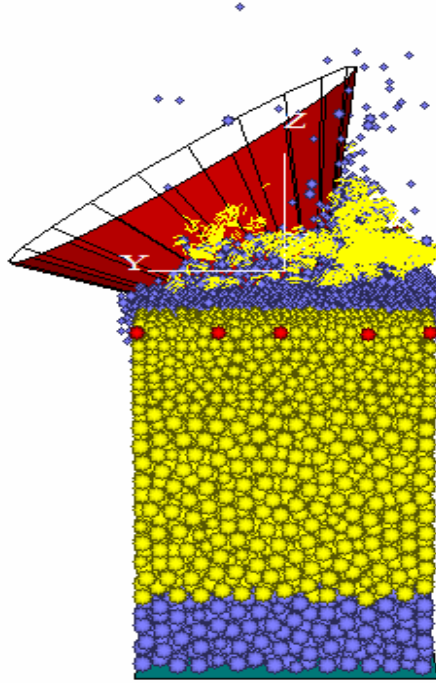
Şekil 6.23 Kumtaşı-1 kayacının 6 mm kesme derinliğinde oluşan kırıntılarının önden görünümü.



Şekil 6.24 Kumtaşı-1 kayacının 6 mm kesme derinliğinde oluşan kırıntılarının yandan görünümü.



Şekil 6.25 Kumtaşı-1 kayacının 9 mm kesme derinliğinde oluşan kırıntılarının önden görünümü.

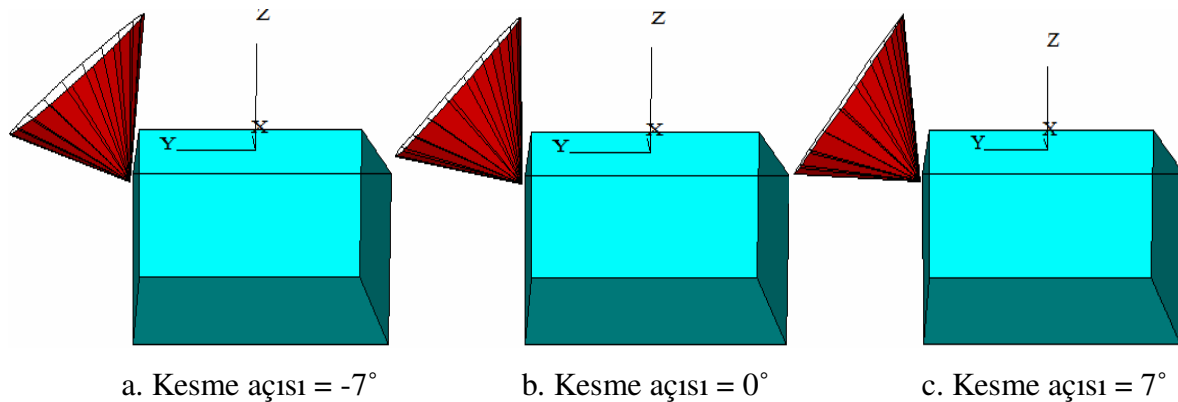


Şekil 6.26 Kumtaşı-1 kayacının 9 mm kesme derinliğinde oluşan kırıntılarının yandan görünümü.

6.4 PARAMETRİK ÇALIŞMALAR

Bir kazı makinasında keskinlerin kesici kafaya uygun şekilde monte edilmesi ve makinadan maksimum performans sağlanması için kesme deneyleri çok büyük önem arz etmektedir. Bu deneylerde uygulanan kesme parametreleri, kazı makinasından maksimum verim elde

edilmesinde oldukça önemlidir. Dolayısıyla, bu parametrelerden bazılarının kazı verimi üzerindeki etkisini incelemek üzere PFC^{3D}'de bir takım parametrik çalışmalar yürütülmüştür. Bu amaçla kalem uçlu keskinin kesme hızı değiştirilerek (0,5 m/s) modelleme çalışmaları tekrarlanmıştır.



BÖLÜM 7

SAYISAL MODELLEME SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kesme parametrelerine bağlı olarak PFC^{3D}'de yürütülen sayısal modelleme çalışmaları sonucunda kalem uçlu keski üzerinde rol oynayan ortalama ve maksimum kuvvet değerleri ile bunların birbirlerine oranları Çizelge 7.1'de sunulmuştur. Bu çizelgede maksimum normal ve maksimum kesme kuvvetleri, kesme derinliği-kesme kuvveti grafiklerindeki 10 pik değerinin Excel bilgisayar programında ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 7.1 Dört kayaç türü üzerinde yürütülen sayısal modelleme çalışmalarının sonuçları.

Kayaç tipi	d (mm)	FN (kN)	FC (kN)	FN' (kN)	FC' (kN)	FC'/FC	FN'/FN
Kumtaşı-1	3	0,24	0,37	0,70	1,07	2,92	2,95
	6	1,19	1,34	1,92	3,08	2,30	1,61
	9	1,84	3,18	3,16	6,23	1,96	1,72
Kumtaşı-2	3	0,48	0,58	1,07	1,57	2,71	2,24
	6	2,05	2,48	3,48	5,47	2,21	1,70
	9	3,46	5,41	5,70	10,33	1,94	1,65
Kumtaşı-3	3	0,14	0,19	0,38	0,64	3,33	2,73
	6	0,69	0,92	1,20	2,16	2,35	1,74
	9	1,10	2,17	1,97	4,24	1,96	1,78
Kireçtaşı	3	0,20	0,26	0,52	0,78	3,00	2,57
	6	0,74	1,21	1,60	2,59	2,14	2,15
	9	1,81	2,80	3,10	6,06	2,16	1,72

Ranman (1985) ucu sivri ve ilk defa kullanılacak olan kalem uçlu bir keski için Eşitlik 3.8'de belirtildiği üzere, ortalama kesme kuvveti maksimum kesme kuvvetinin üçte biri olduğunu vurgulamıştır. Keskideki körelme arttıkça bu oran azalmaktadır. Ayrıca, Bilgin et al. (2006), en yüksek kuvvet değerinin ortalama kuvvet değerine (FC'/FC veya FN'/FN)

oranının; bir kazı makinasının kesici kafasının titreşimi ve bazı mekanik parçalarının bozulmasını etkileyen faktörler olduğunu belirtmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda bu oranın kayacın özelliklerinden etkilenmediğini görmüşlerdir. Bununla birlikte; bağımsız kesme deneyleri için $FC'/FC=2,69\pm0,32$ ve $FN'/FN=2,39\pm0,33$ civarında ve bağımlı kesme deneyleri için $FC'/FC=3,07\pm0,55$ ve $FN'/FN=2,64\pm0,49$ civarında olması gerektiğini bulmuşlardır.

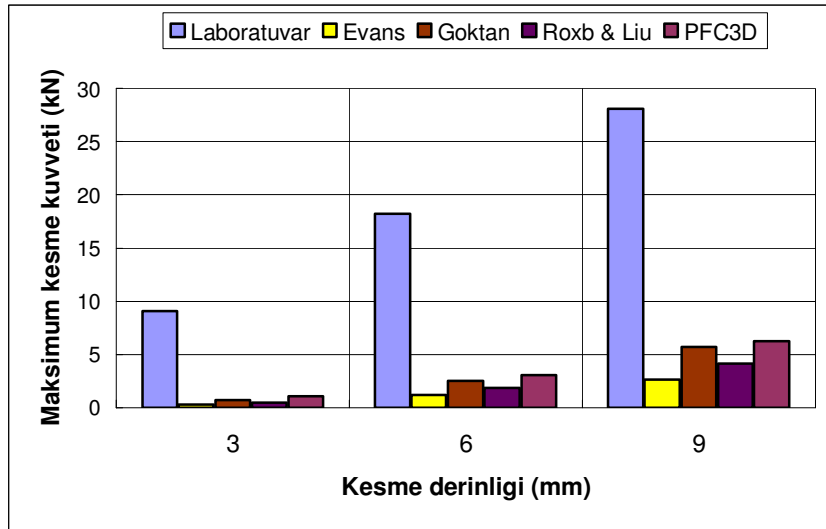
Çizelge 7.1'deki değerler incelendiğinde PFC^{3D}'de modellenen konik keskinin düşük kesme derinliklerinde FC'/FC oranının genellikle 3 civarında olduğu ve kesme derinliği arttıkça bu oranın 2'ye doğru azaldığı görülmüştür. Bu durum kalem uçlu keskinin yüksek kesme derinliklerinde daha fazla aşındığını göstermektedir.

Laboratuvar, modelleme ve kesme teorilerinden elde edilen maksimum kesme kuvvetleri Çizelge 7.2'de sunulmuştur. Kesme teorilerinden hesaplanan maksimum kesme kuvvetleri belirlenirken literatürde yaygın olarak uygulanan Evans (1984) ve Roxborough & Liu (1995) ve Göktan (1997) tarafından önerilen bağıntılardan yararlanılmıştır.

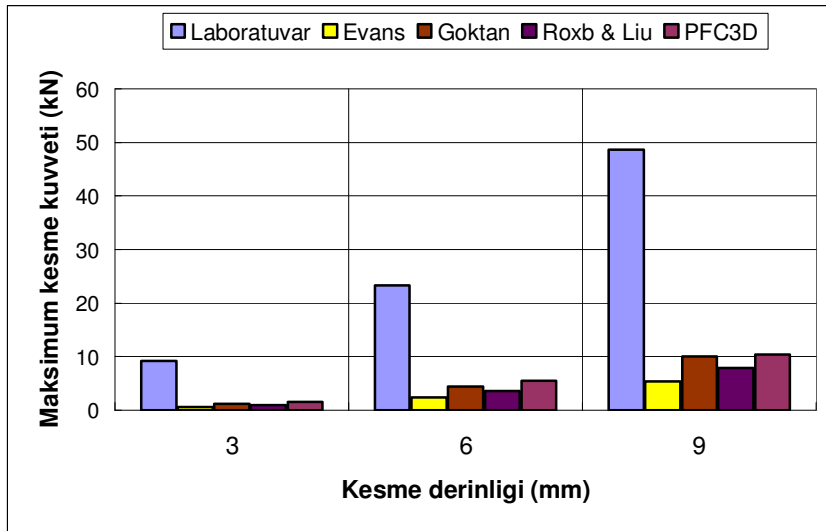
Çizelge 7.2 Maksimum kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi.

Kayaç tipi	d (mm)	Labr. FC' (kN)	Evans FC' (kN)	Göktan FC' (kN)	Roxb. & Liu FC' (kN)	PFC ^{3D} FC' (kN)
Kumtaş-1	3	9,1	0,30	0,63	0,46	1,07
	6	18,2	1,18	2,53	1,83	3,08
	9	28,1	2,66	5,69	4,12	6,23
Kumtaş-2	3	9,2	0,60	1,11	0,87	1,57
	6	23,3	2,39	4,44	3,50	5,47
	9	48,7	5,37	10,00	7,87	10,33
Kumtaş-3	3	4,5	0,61	0,79	0,75	0,64
	6	9,1	2,43	3,18	3,00	2,16
	9	15,9	5,47	7,15	6,75	4,24
Kireçtaşı	3	11,8	0,39	0,75	0,58	0,78
	6	21,5	1,55	2,99	2,30	2,59
	9	29,4	3,49	6,72	5,18	6,06

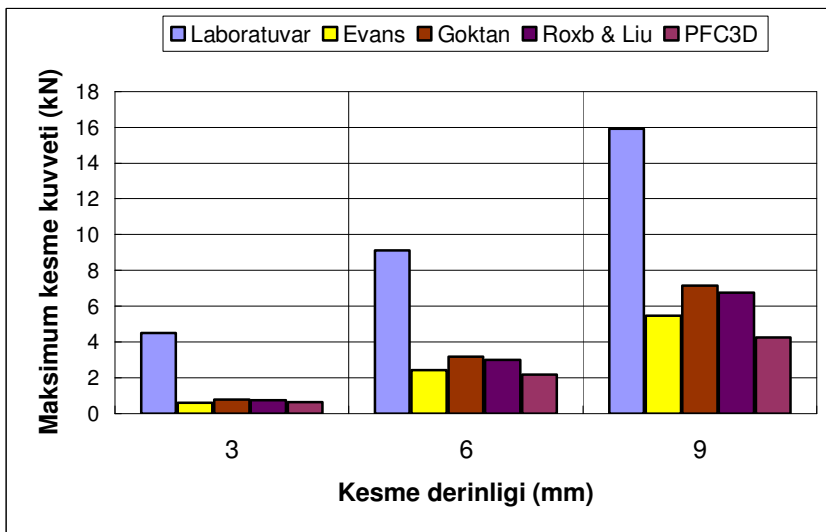
Çizelge 7.2'de verilen maksimum kesme kuvvetleri arasında karşılaştırma yapılmış ve elde edilen grafikler Şekil 7.1-7.4'te gösterilmiştir.



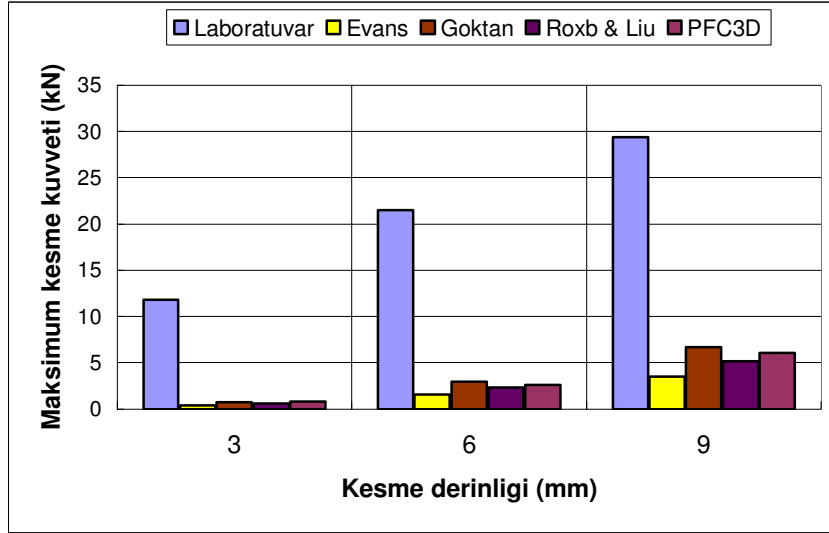
Şekil 7.1 Kumtaşı-1 kayacından elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.



Şekil 7.2 Kumtaşı-2 kayacından elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.



Şekil 7.3 Kumtaşı-3 kayacından elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.



Şekil 7.4 Kireçtaşı kayacından elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.

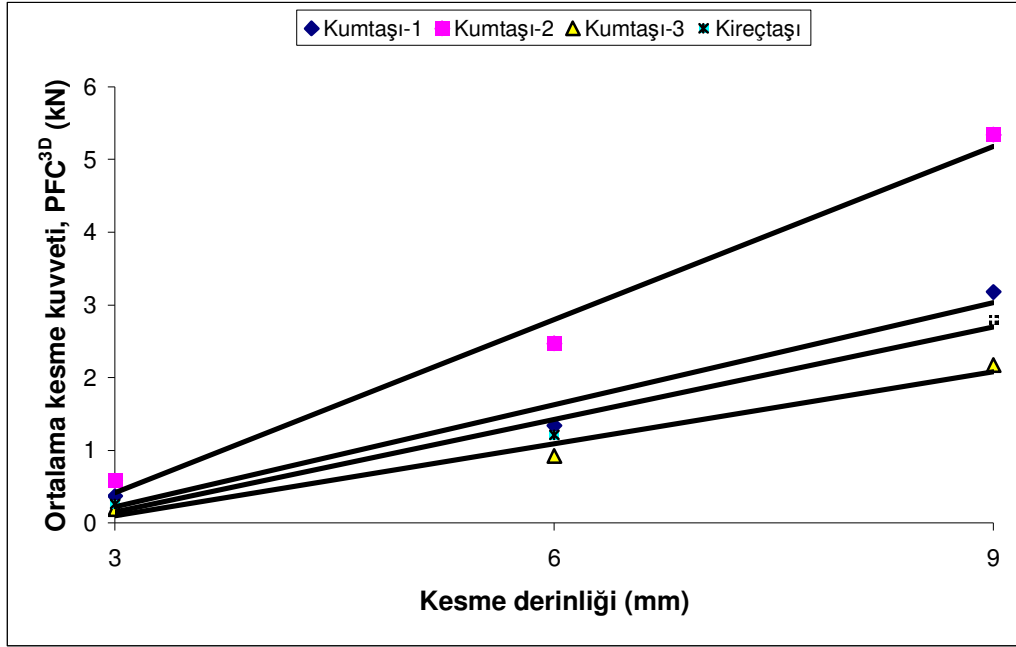
Sayısal modelleme ve laboratuvar çalışmaları mümkün oldukça birbirine paralel yürütülmüştür. Laboratuvarda uygulanan kesme parametreleri PFC^{3D}'de uygulanmıştır. Buna rağmen Şekil 7.1-7.4 arasında yapılan karşılaştırmalarda laboratuvarda yürütülen kesme deneyi sonuçlarının gerek kayaç kesme teorileri ve gerekse de PFC^{3D}'de elde edilen sonuçlardan farklı çıktığı görülmüştür. Su vd. (2009) tarafından da açıklanan bu farklılığın temel nedenleri aşağıdaki gibi özetlenebilir :

- Laboratuvarda kullanılan keskide var olan aşınmışlık modelleme sırasında göz önüne alınmamıştır. Bunun yerine ucu sivri mükemmel konik olan bir keski kullanılmıştır. Dolayısıyla, daha güvenilir sonuçlar elde etmek için keskilerde var olan aşınma göz önüne alınabilir.
- Her ne kadar kayaçların mikro özellikleri PFC^{3D}'de kalibre ediliyor olsa da, fiziksel bir örnekteki gerilme dağılımlarını PFC^{3D}'de modellemek mümkün değildir. Kayaçların heterojenik ve çatlaklı yapısından dolayı bu gerilme dağılımlarını PFC^{3D}'de sağlamak mümkün değildir.
- PFC^{3D}'de modellenen kayaçta kesme mesafesi yetersiz olabilir.

7.1 KESKİ KUVVETLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

PFC^{3D}'de elde edilen normal ve kesme kuvvetleri ile Kel (2003) tarafından belirlenen kuvvetler arasında belirgin bir farklılık olduğu görülmüştür. Ancak, hem modelleme ve hem

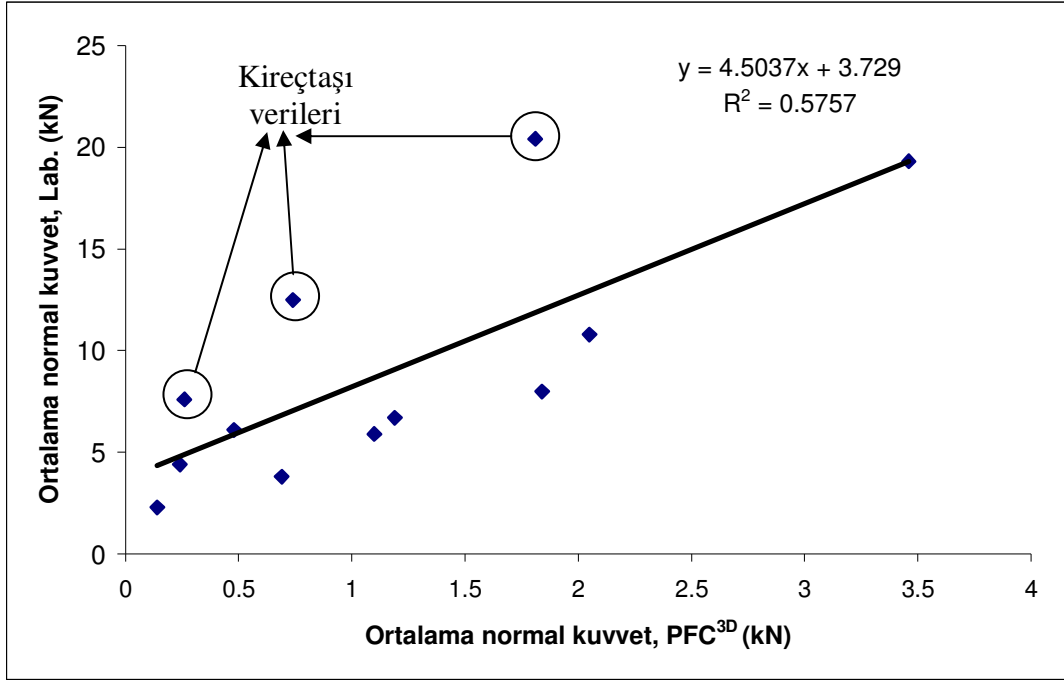
de laboratuvar çalışmaları sırasında kesme derinliği artıkça ortalama kesme kuvveti değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu bağlamda PFC^{3D}'de ortalama kesme kuvvetinin kesme derinliğine bağlı olarak değişimi şekil 7.5'te gösterilmiştir.



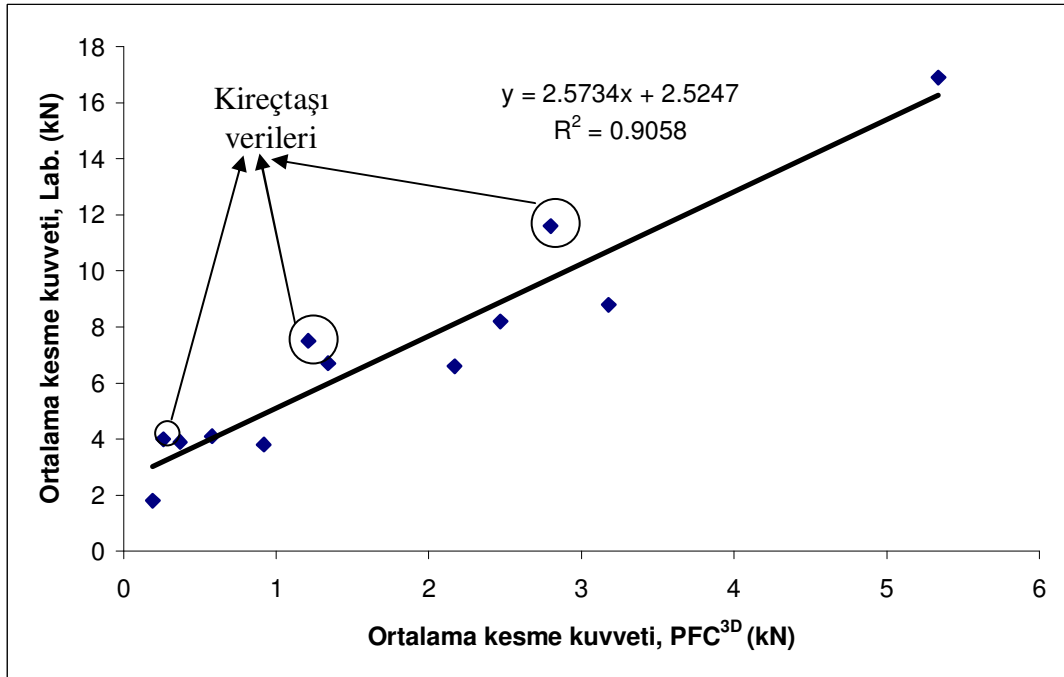
şekil 7.5 Kesme derinliğine bağlı olarak değişen kesme kuvvet grafikleri.

7.1.1 Ortalama Kuvvet Değerleri Arasındaki İlişkiler

Sayısal modelleme ve laboratuvar çalışmaları arasında belirgin bir farklılık ortaya ıkırsa da ortalama kuvvet değerlerinin her iki yöntemde de orantılı olarak arttığı görülmüştür. Buna göre bu çalışmalar arasında normal kuvvetler açısından ilişki katsayısı $R=0,76$ ve kesme kuvvetleri açısından da $R=0,95$ olan doğrusal ilişkiler bulunmuştur (şekil 7.6-7.7). Bu ilişkiler incelendiğinde kireçtaşı kayacının 3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde belirlenen kuvvet değerleri grafiklerinin determinasyon katsayısını düşürmektedir. Bunun temel nedenleri; laboratuvarda kullanılan örnek içerisindeki gerilme dağılımları, çatlak düzlemleri ve kayacın anizotropik doğasıdır.



Şekil 7.6 Ortalama normal kuvvet açısından laboratuvar ve modelleme çalışmaları arasındaki ilişki.



Şekil 7.7 Ortalama kesme kuvveti açısından laboratuvar ve modelleme çalışmaları arasındaki ilişki.

Şekil 7.6-7.7’de verilen ilişkilerin ve bağımlı-bağımsız değişkenlerin katsayılarının anlamlı olup olmadığını incelemek üzere regresyon analizleri yapılmıştır. Bu bağlamda grafiklerde belirlenen noktalara göre elde edilen bağıntılardaki katsayıların anlamlılıklarını tespit etmek

için t testi ve yine bu bağıntıların bir bütün olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek üzere F testleri yapılmıştır. Yapılan regresyon analizlerinin %5 anlamlılık düzeyindeki sonuçları Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4’te verilmiştir.

Çizelge 7.3 Ortalama normal ve kesme kuvvetlerinin t testi sonuçları.

Model	Katsayılar	Standart Hata	t değeri	P değeri	Katsayıların % 95 güvenilirlikteki sınırları	
					Alt sınır	Üst sınır
FN (PFC ^{3D}) - FN (Lab.)	3,729	1,829	2,039	0,069	-0,347	7,805
	4,504	1,223	3,684	0,004	1,779	7,228
FC (PFC ^{3D}) - FC (Lab.)	2,525	0,596	4,233	0,002	1,196	3,854
	2,573	0,262	9,805	0,000	1,989	3,158

Bağımlı değişkenler : FN (Lab.), FC (Lab.)

Bağımsız değişkenler : FN (PFC^{3D}), FC (PFC^{3D})

Çizelge 7.4 Ortalama normal ve kesme kuvvetlerinin F (ANOVA) testi sonuçları.

FN (PFC ^{3D}) - FN (Lab.)					
	Kareler toplamı	df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	213,530	1	13,569	0,004	Anlamlı
Fark	157,367	10			
Toplam	370,897	11			
FC (PFC ^{3D}) - FC (Lab.)					
	Kareler toplamı	df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	170,875	1	96,136	0,000	Anlamlı
Fark	17,774	10			
Toplam	188,649	11			

t ve F testi sonuçlarından hesaplanan P değerlerine göre grafiklerde belirlenen eşitliklerin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu görülmüştür. Bu çerçevede laboratuvar ve PFC^{3D}’de elde edilen ortalama normal ve ortalama kesme kuvvetleri arasındaki bağıntılar Eşitlik 7.1 ve Eşitlik 7.2’de verilmiştir.

$$FN^{Lab} = 3,729 + 4,5037 * FN^{PFC3D} \quad (7.1)$$

$$FC^{Lab} = 2,5247 + 2,5734 * FC^{PFC3D} \quad (7.2)$$

Bununla birlikte laboratuvar ve PFC^{3D}’den hesaplanan normal ve kesme kuvvet değerlerinin ortalamaları karşılaştırılarak söz konusu ortalamalar arasındaki farkın belirli bir güven düzeyinde olup olmadığını test etmek üzere bağımsız t testi de yürütülmüştür (Çizelge 7.5).

Çizelge 7.5 Bağımsız gruplarda t testi sonuçları.

Veri çiftleri	Hesaplanan t değeri *	Çizelgeden okunan t değeri**
FN (PFC ^{3D}) - FN (Lab.)	4,598	2,074
FC (PFC ^{3D}) - FC (Lab.)	4,123	2,074

* Serbestlik derecesi (df) 22’dir.

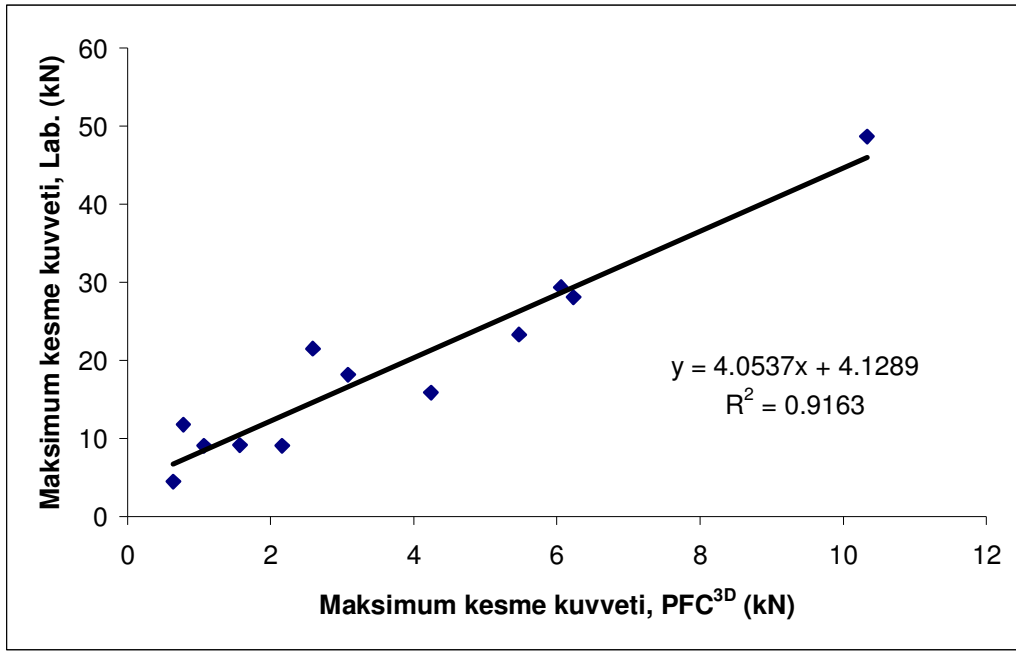
** Köseoğlu ve Yamak’tan (2004) alınmıştır.

Çizelge 7.5’teki sonuçlardan; hesaplanan t değerleri, çizelgelerden elde edilen t değerlerinden yüksek olduğu için Eşitlik 7.1 ve Eşitlik 7.2’de verilen bağıntıların anlamlı olduğu belirlenmiştir.

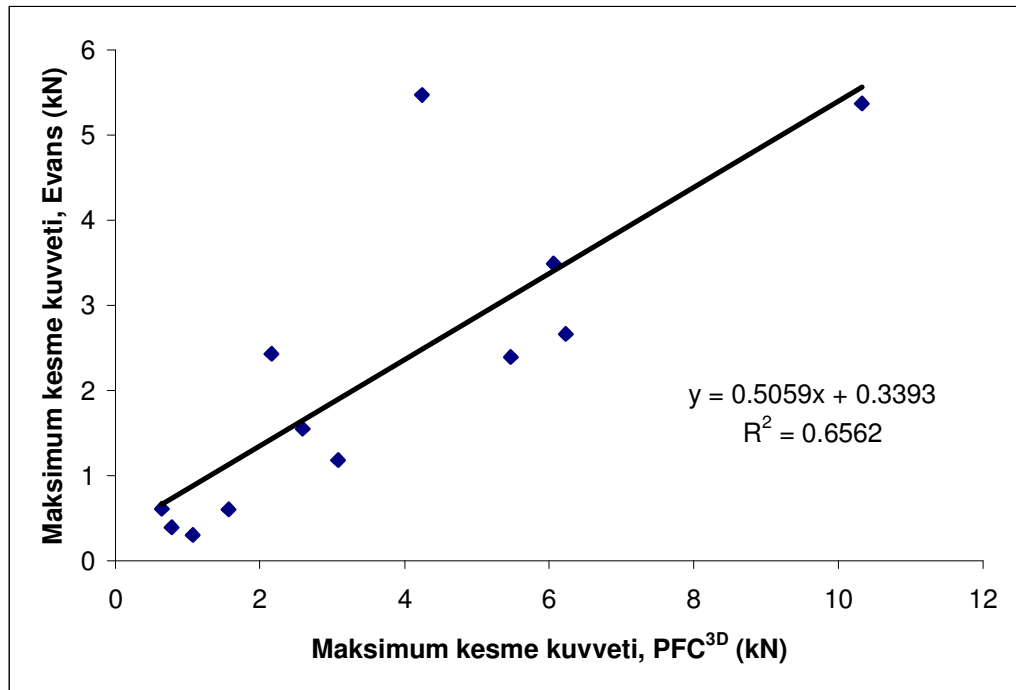
7.1.2 Maksimum Kuvvet Değerleri Arasındaki İlişkiler

Kesme derinliğine bağlı olarak maksimum kesme kuvvetleri arasında yapılan karşılaştırmanın yanı sıra bu kuvvet değerleri arasındaki ilişkiler de araştırılmıştır. Bu bağlamda laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmaları arasında korelasyon katsayısı R=0,96, Evans kesme teorisi ile sayısal modelleme çalışmaları arasında R=0,81, Göktan’ın kesme teorisi ile sayısal modelleme çalışmaları arasında R=0,94 ve Roxborough & Liu’nun kesme teorisiyle R=0,88 olan doğrusal ilişkiler bulunmuştur (Şekil 7.8-7.11).

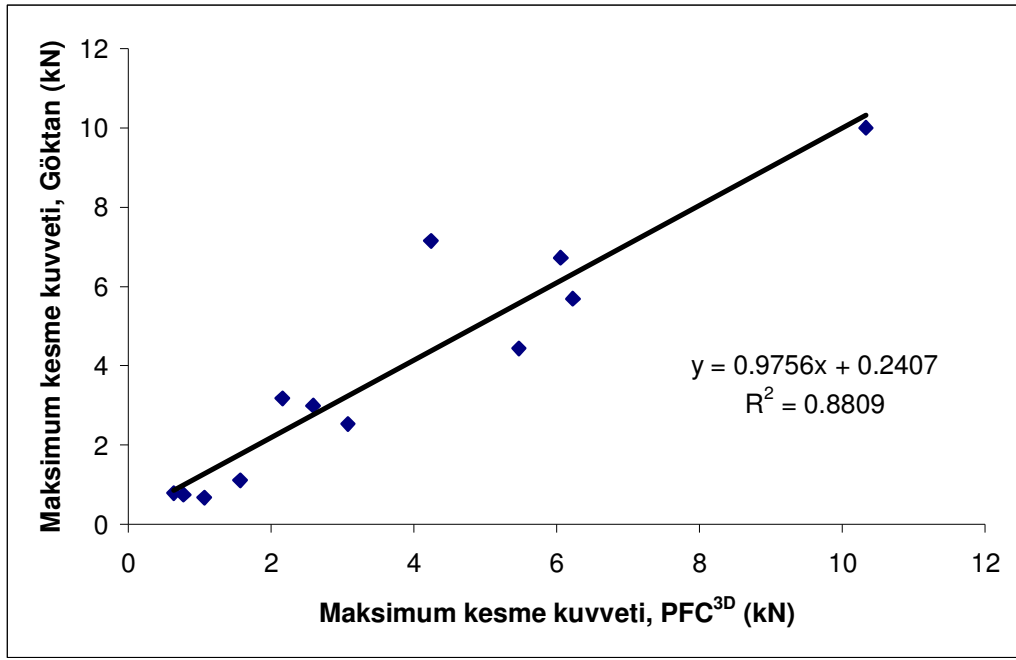
Maksimum kesme kuvvetleri arasındaki ilişkiler belirlendikten sonra elde edilen sonuçların %95 güvenilirlikte regresyon analizleri yapılarak anlamlılığı araştırılmıştır. Buna göre yürütülen t ve F testlerinin sonuçları Çizelge 7.6-7.7’de verilmiştir.



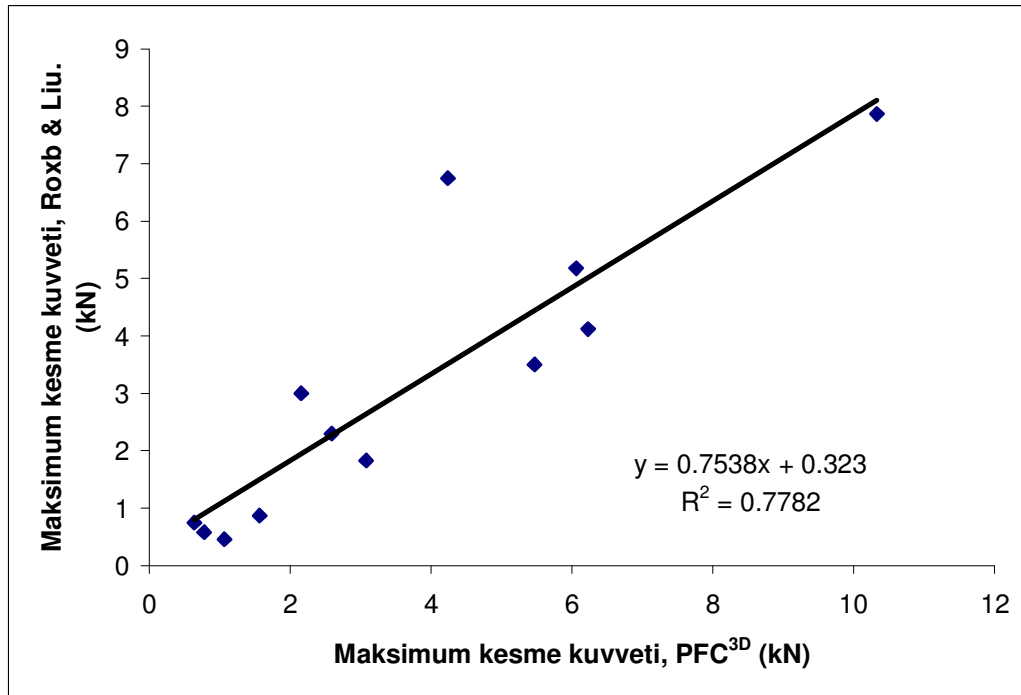
Şekil 7.8 Laboratuvar çalışmaları ile sayısal modelleme çalışmaları arasındaki ilişkiler.



Şekil 7.9 Evans'ın kesme teorisi ile modelleme çalışmaları arasındaki ilişkiler.



Şekil 7.10 Gökten'in kesme teorisi ile modelleme çalışmaları arasındaki ilişkiler.



Şekil 7.11 Roxborough ve Liu'nun kesme teorisi ile modelleme çalışmaları arasındaki ilişkiler.

Çizelge 7.6 Sayısal modelleme, teorik bağıntı ve laboratuvar çalışmalardan elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin t testinden belirlenen sonuçları.

Model	Katsayılar	Standart Hata	t değeri	P değeri	Katsayıların % 95 güvenilirlikteki sınırları	
					Alt sınır	Üst sınır
FC'(PFC ^{3D})-FC'(Lab.)	4,129	1,789	2,308	0,044	0,144	8,114
	4,054	0,388	10,460	0,000	3,190	4,917
FC'(PFC ^{3D})-FC'(Evans)	0,339	0,534	0,635	0,540	-0,852	1,530
	0,506	0,116	4,369	0,001	0,248	0,764
FC'(PFC ^{3D})-FC'(Göktan)	0,241	0,524	0,460	0,656	-0,926	1,407
	0,976	0,113	6,600	0,000	0,723	1,228
FC'(PFC ^{3D})-FC'(Roxb & Liu)	0,323	0,587	0,550	0,595	-0,986	1,632
	0,754	0,127	5,923	0,000	0,470	1,037

Bağımlı değişkenler : FC'(Lab.), FC'(Evans), FC'(Göktan), FC'(Roxb & Liu)

Bağımsız değişkenler : FC'(PFC^{3D})

Şekil 7.8-7.10'da çizilen grafiklerdeki ilişkilerde belirlenen katsayıların değiştiği alt ve üst sınırlara göre, P değeri %5'ten küçük olan katsayıların güvenilirlik sınırlarının birbirine daha yakın olduğu ortaya konmuştur.

Çizelge 7.7 Sayısal modelleme, teorik bağıntılar ve laboratuvar çalışmalardan elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin F (ANOVA) testi sonuçları.

FC'(PFC ^{3D}) - FC'(Lab.)					
	Kareler toplamı	Df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	1522,961	1	109,420	0,000	Anlamlı
Fark	139,185	10			
Toplam	1662,147	11			
FC'(PFC ^{3D}) - FC'(Evans)					
	Kareler toplamı	df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	23,716	1	19,084	0,001	Anlamlı
Fark	12,427	10			
Toplam	36,143	11			

Çizelge 7.7 (devam ediyor).

FC'(PFC ^{3D}) - FC'(Göktan)					
	Kareler toplamı	df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	88,215	1	73,963	0,000	Anlamlı
Fark	11,927	10			
Toplam	100,142	11			
FC'(PFC ^{3D}) - FC'(Roxborough & Liu)					
	Kareler toplamı	df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	52,667	1	35,078	0,000	Anlamlı
Fark	15,014	10			
Toplam	67,680	11			

F testi sonuçlarına göre modelleme çalışmalarından elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin; laboratuvar çalışmaları, Evans, Göktan ve Roxboroug & Liu'nun kesme teorileriyle aralarındaki ilişkilerden hesaplanan P değerleri %5'ten düşük olduğu için bu ilişkilerin anlamlı olduğu görülmektedir. Buna göre modelleme, laboratuvar ve teorik kesme mekanizmaları arasında maksimum kesme kuvvetlerine bağlı olarak meydana gelen ilişkiler Eşitlik 7.3-7.6'da verilmiştir.

$$FC'_{Lab} = 4,1289 + 4,0537 * FC'_{PFC3D} \quad (7.3)$$

$$FC'_{Evans} = 0,3393 + 0,5059 * FC'_{PFC3D} \quad (7.4)$$

$$FC'_{Göktan} = 0,2407 + 0,9756 * FC'_{PFC3D} \quad (7.5)$$

$$FC'_{Roxb \& Liu} = 0,323 + 0,7538 * FC'_{PFC3D} \quad (7.6)$$

Maksimum kesme kuvvet değerlerinin ortalamaları arasındaki farkın belirli bir güven düzeyinde olup olmadığını test etmek üzere bağımsız t testi de yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 7.8'de sunulmuştur.

Çizelge 7.8 Maksimum kesme kuvvetleriyle bağımsız gruplarda yapılan t testi sonuçları.

Veri çiftleri	Hesaplanan t değeri *	Çizelgeden okunan t değeri**
FC'(PFC ^{3D})-FC'(Lab.)	4,219	2,074
FC'(PFC ^{3D})-FC'(Evans)	1,500	2,074
FC'(PFC ^{3D})-FC'(Göktan)	0,125	2,074
FC'(PFC ^{3D})-FC'(Roxb. & Liu)	0,530	2,074

* Serbestlik derecesi (df) 22'dir.

** Köseoğlu ve Yamak'tan (2004) alınmıştır.

Çizelge 7.8'deki sonuçlara göre; FC'(PFC^{3D})-FC'(Lab.) veri çiftinde hesaplanan t değeri, çizelgelerden elde edilen t değerlerinden yüksek olduğu için Eşitlik 7.3 bağıntısının önemli, diğerlerinin ise önemli olmadığı belirlenmiştir.

7.2 SPESİFİK ENERJİ DEĞERLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Laboratuvarda ve PFC^{3D}'de belirlenen pasa hacmine göre hesaplanan spesifik enerji değerleri Çizelge 7.9'da verilmiştir.

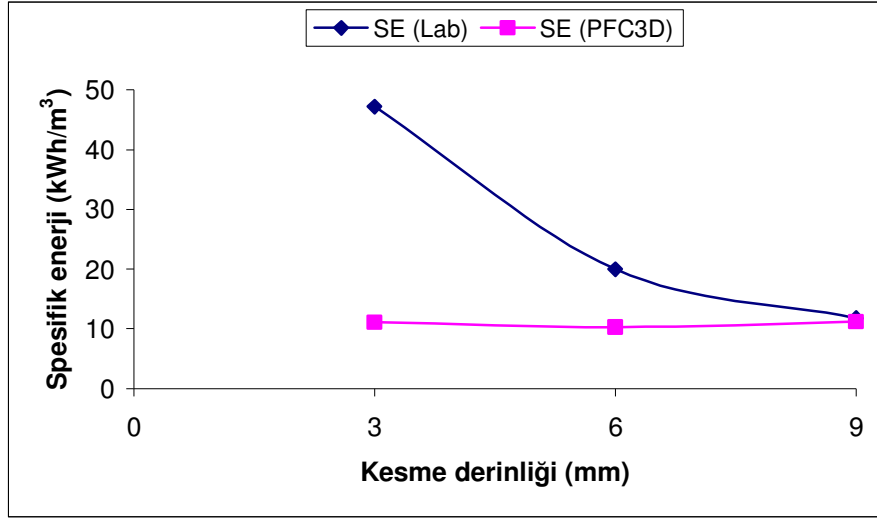
Çizelge 7.9 Laboratuvar ve PFC^{3D}'den hesaplanan spesifik enerji değerleri.

Kayaç tipi	d (mm)	PFC ^{3D}		Laboratuvar *	
		Q (m ³ /km)	SE (kWh/m ³)	Q (m ³ /km)	SE (kWh/m ³)
Kumtaşı-1	3	0,009	11,10	0,023	47,2
	6	0,036	10,27	0,091	20,0
	9	0,079	11,22	0,205	11,8
Kumtaşı-2	3	0,008	20,13	0,021	54,9
	6	0,031	22,42	0,045	50,1
	9	0,073	20,28	0,178	26,0
Kumtaşı-3	3	0,009	6,00	0,024	20,5
	6	0,030	8,38	0,088	11,8
	9	0,091	6,58	0,321	6,1
Kireçtaşı	3	0,008	9,08	0,036	31,7
	6	0,030	11,14	0,143	19,2
	9	0,069	11,25	0,197	17,4

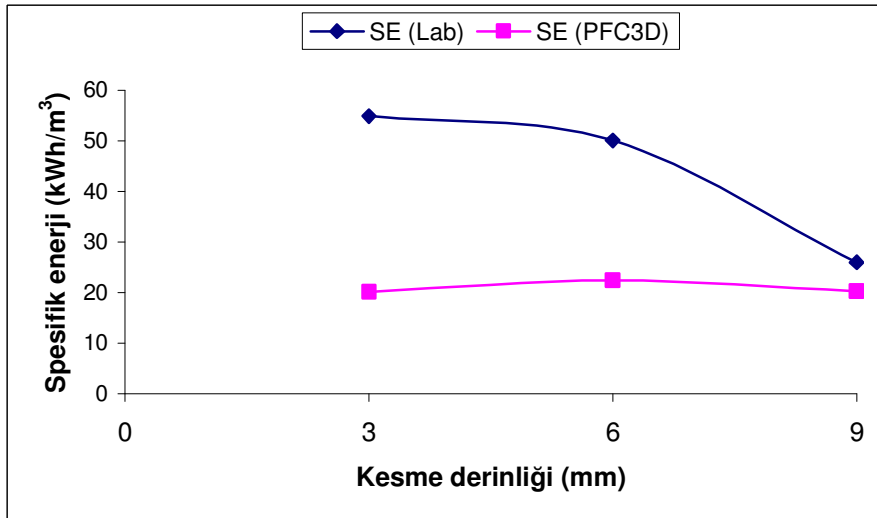
* Kel'den (2003) alınmıştır.

Tanecik yarıçapları tüm örneklerde her ne kadar farklı olsa da genellikle aynı kesme koşullarında modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Dolayısıyla, modelleme sonrası ortaya çıkan pasa hacmi her koşulda birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir. Bu nedenle PFC^{3D} ve laboratuvarından elde edilen spesifik enerji değerleri birbirlerinden farklı çıkmıştır.

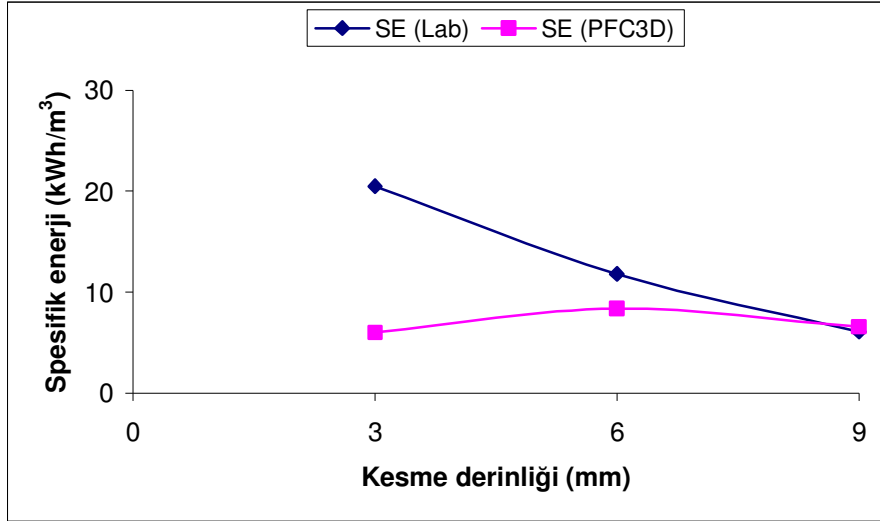
PFC^{3D}'de elde edilen sonuçlar incelendiğinde kesme derinliklerine bağlı olmaksızın spesifik enerji değerlerinin çok fazla değişmediği ortaya konmuştur. Ancak; düşük kesme derinliklerinde (3 ve 6 mm) laboratuvar ve PFC^{3D} sonuçlarının farklı olduğu gözlemlenirken, yüksek kesme derinliğinde (9 mm) PFC^{3D}'den elde edilen spesifik enerji değerlerinin laboratuvar şartlarında belirlenen değerlere daha yakın olduğu saptanmıştır (Şekil 7.12-7.15).



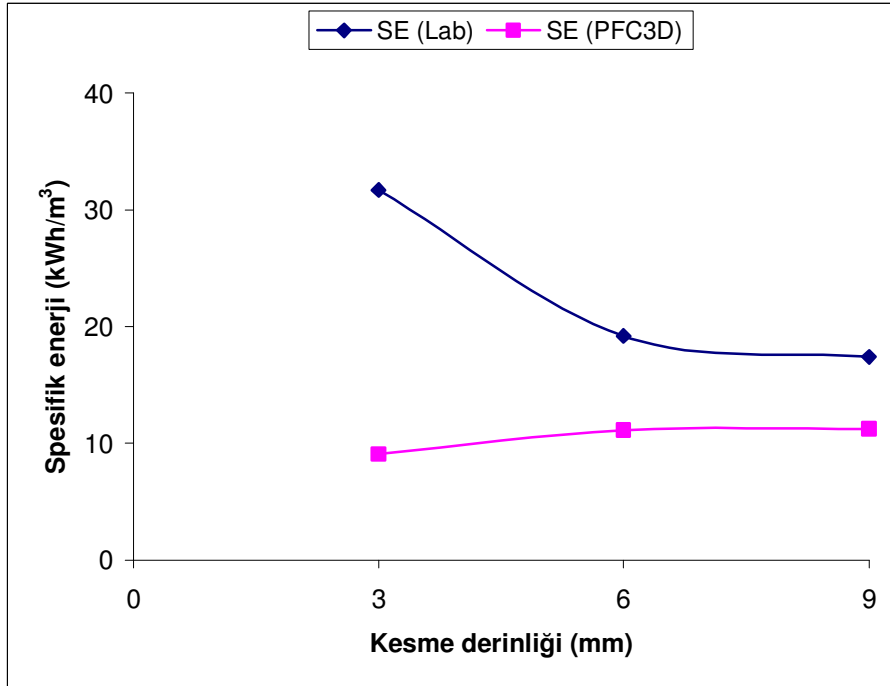
Şekil 7.12 Kumtaşı-1 kayacına ait spesifik enerji değişim grafikleri.



Şekil 7.13 Kumtaşı-2 kayacına ait spesifik enerji değişim grafikleri.

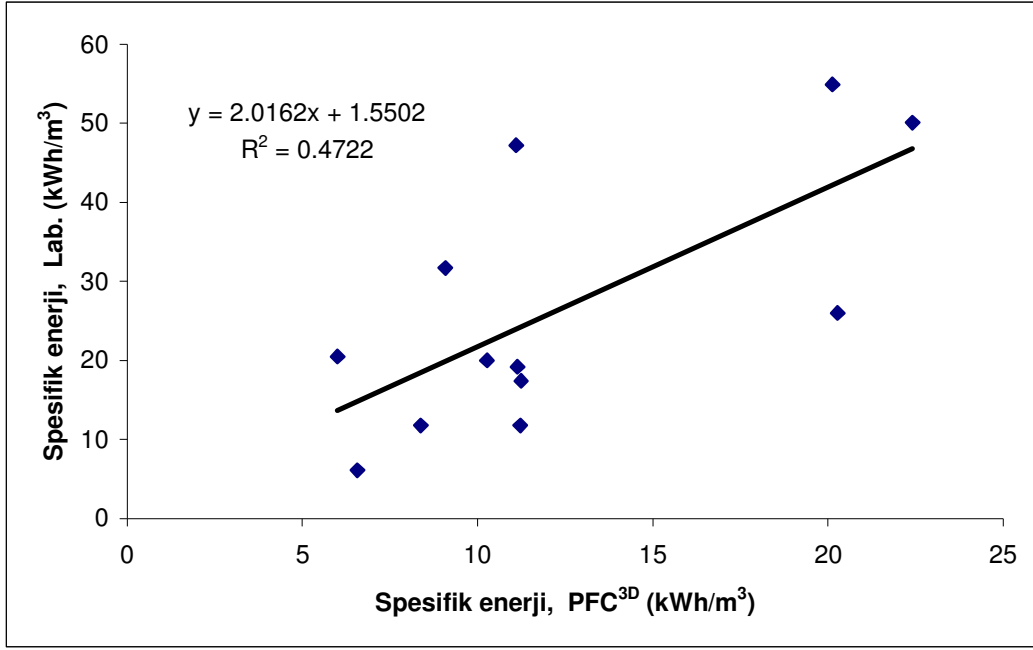


Şekil 7.14 Kumtaşı-3 kayacına ait spesifik enerji değişim grafikleri.

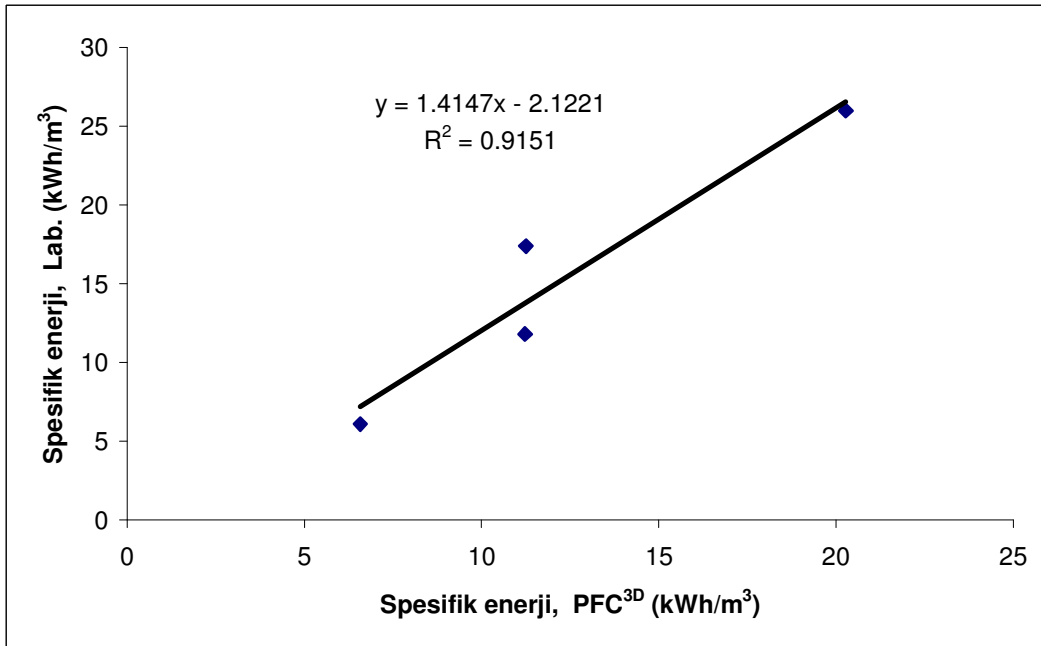


Şekil 7.15 Kireçtaşı kayacına ait spesifik enerji değişim grafikleri.

Laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmalarından hesaplanan spesifik enerji değerleri birbirlerinden farklı çıkmış ve aralarındaki ilişki katsayısının $R=0,69$ olduğu görülmüştür (Şekil 7.16). Bununla birlikte; Şekil 7.17’de gösterildiği üzere özellikle 9 mm kesme derinliğinde; PFC^{3D} ve laboratuvar çalışmaları arasında $R=0,96$ gibi oldukça yüksek korelasyon katsayısına sahip doğrusal bir ilişki bulunmuştur.



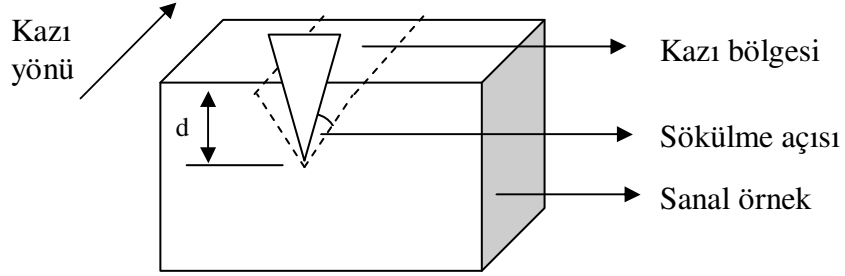
Şekil 7.16 Laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmaları arasında spesifik enerji açısından elde edilen ilişki.



Şekil 7.17 9 mm kesme derinliğinde laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmaları arasında spesifik enerji açısından elde edilen ilişki.

PFC^{3D}'de modelleme tamamlandıktan sonra açığa çıkan kazı hacmi; numune üzerindeki tüm taneciklerin hacminin PFC^{3D}'de yazılan bir fonksiyonla hesaplanmasıyla belirlenmektedir. Ancak, keskinin kesme derinliği boyunca kazdığı bölgede de sökülme açısına bağlı olarak birtakım taneciklerde kazı hacmine dahil edilebilir. PFC^{3D}'de kazı hacmi belirlenirken,

derinliğe bağlı olarak oluşan sökülme açısının değişimi göz ardı edilmiştir. Bu nedenle Şekil 7.18’de gösterilen kazı bölgesindeki taneciklerin hacimleri programlama sırasında karşılaşılan sorunlar nedeniyle hesaplama alınmamıştır.



Şekil 7.18 Sökülme açısına bağlı olarak kazı yapılan bölge.

Laboratuvar kesme deneylerinde kalem uçlu keskinin kayaca batmasıyla birlikte oluşturduğu sökülme açısı düşük kesme derinliklerinde oldukça az, yüksek kesme derinliklerinde ise fazladır. Dolayısı ile yüksek kesme derinliklerinde (ör., 9 mm) keskinin arkasında kalan bölgedeki taneciklerin hacmi tam olarak belirlenmektedir. Ancak, PFC^{3D}’de düşük kesme derinliklerinde sökülme açısının etkisi tam olarak ortaya konamadığından keski etrafında toplanan kazı hacminin tamamı hesaplanamamaktadır. Bu yüzden, sadece 9 mm kesme derinliğinde hesaplanan spesifik enerji değerlerinin gerçeğe yakın olduğu görülmüş ve bu nedenle ilişki katsayısı da yüksek çıkmıştır.

Ayrıca, laboratuvar ve modelleme çalışmalarından elde edilen (Şekil 7.16-7.17) ilişkilerin güvenilir olup olmadığını ortaya koymak için regresyon analizleri yapılmıştır. Bu bağlamda ilişkilerde hesaplanan katsayıların anlamlılıkları t testinden ve bu ilişkilerin güvenilirlikleri de F testinden belirlenmiştir (Çizelge 7.10-7.11).

Çizelge 7.10 Sayısal modelleme ve laboratuvar çalışmalardan elde edilen spesifik enerji değerlerinin t testinden belirlenen sonuçları.

Model	Katsayılar	Standart hata	t değeri	P değeri	Katsayıların % 95 güvenilirlikteki sınırları	
					Alt sınır	Üst sınır
SE (PFC ^{3D})-SE (Lab.) (tüm kesme derinlikleri)	1,550	9,037	0,172	0,867	-18,585	21,686
	2,016	0,674	2,991	0,014	0,514	3,518
SE (PFC ^{3D})-SE (Lab.) (d= 9 mm)	-2,122	4,051	-0,524	0,653	-19,551	15,307
	1,415	0,305	4,643	0,043	0,104	2,726

Bağımlı değişkenler : SE (Lab.)

Bağımsız değişkenler : SE (PFC^{3D})

Çizelge 7.11 Sayısal modelleme ve laboratuvar çalışmalardan elde edilen spesifik enerji değerlerinin F (ANOVA) testi sonuçları.

SE (PFC ^{3D}) – SE (Lab.) (tüm kesme derinlikleri)					
	Kareler toplamı	df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	1360,672	1	8,945	0,014	Anlamlı
Fark	1521,177	10			
Toplam	2881,849	11			
SE (PFC ^{3D}) - SE (Lab.) (d= 9 mm)					
	Kareler toplamı	df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	197,470	1	21,561	0,043	Anlamlı
Fark	18,318	2			
Toplam	215,787	3			

Çizelge 7.10’da verilen t testi sonuçlarında %5 hata payıyla (ya da %95 güvenilirlikte) belirlenen P değerlerine göre bağıntılardaki katsayıların alt ve üst güvenilirlik sınırları gösterilmektedir. Çizelge 7.11’de verilen F testi sonuçlarında hesaplanan P değerlerine göre de; laboratuvardan ve PFC^{3D}’den belirlenen spesifik enerji eşitliklerinin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu ortaya konmaktadır. Bu bağlamda elde edilen bağıntılar Eşitlik 7.6 ve 7.7’de verilmektedir.

$$SE_{Lab} = 1,5502 + 2,0162 * SE_{PFC3D} \quad (7.6)$$

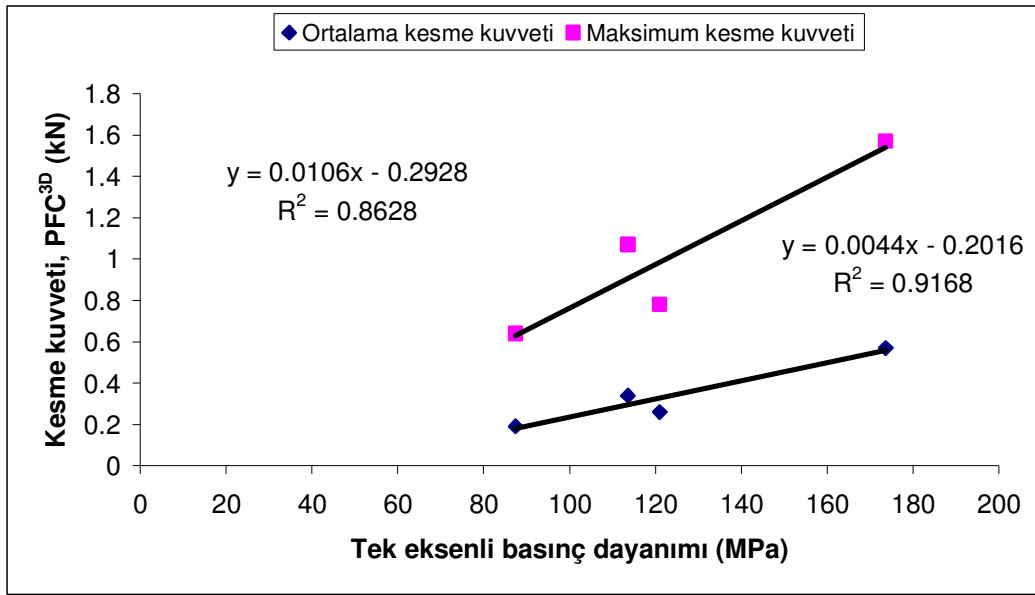
$$SE_{Lab} = 2,1221 + 1,4147 * SE_{PFC3D} \quad (7.7)$$

Eşitlik 7.6’nın tesadüfen mi yoksa gerçekçi bir tahmin modelinden mi ortaya konduğunu belirlemek üzere spesifik enerji değerlerinin ortalamaları bağımsız t testine tabi tutulmuştur. Test sonucu hesaplanan t değeri 2,850 (serbestlik derecesi=22) çıkmıştır. Buna göre Eşitlik 7.6 bağıntısının % 5 hata payıyla anlamlı olduğu görülmüştür.

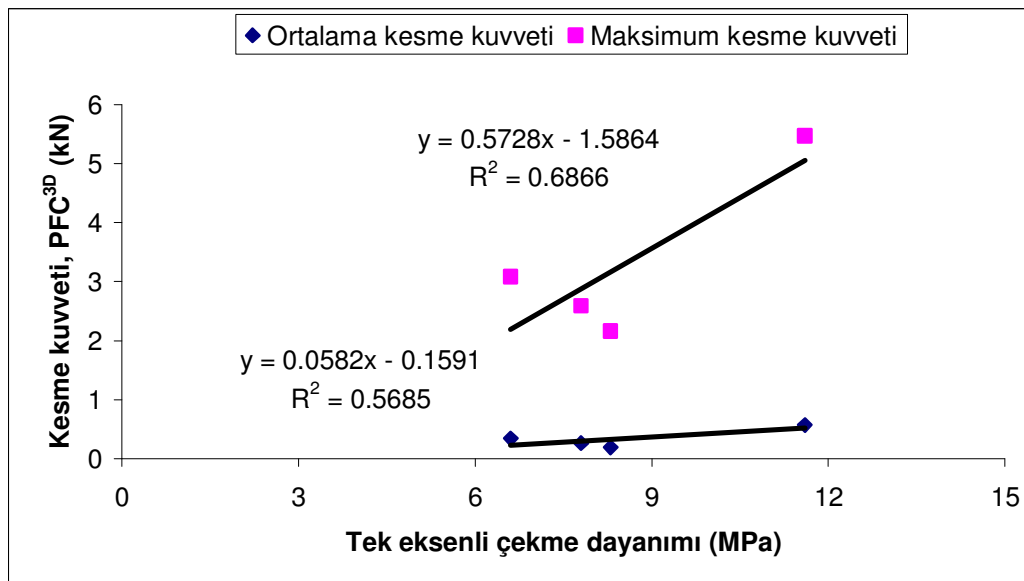
Diğer taraftan, Eşitlik 7.6 toplam 12 veri, Eşitlik 7.7 ise sadece 4 veriye bağlı olarak oluşturulmuştur. İstatistiksel bir analiz yapmak için 4 adet veri oldukça azdır. Bu nedenle elde edilecek sonuçlar gerçeği net olarak yansıtmayacağından Eşitlik 7.7 için bağımsız t testi yapılmamıştır.

7.3 KESKİ KUVVETLERİ İLE KAYACIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

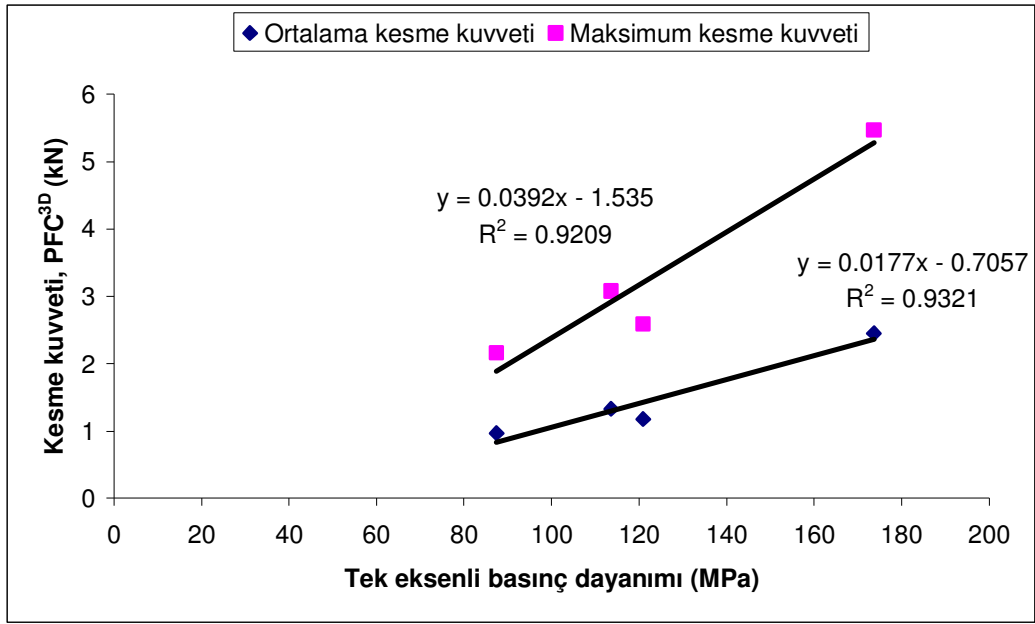
Bir keski kayaç içerisine daldığında öncelikle kayaç üzerinde ezik bir zon oluşturulur. Daha sonra, ezik zondan itibaren radyal çatlaklar oluşur ve bu çatlakların ilerlemesi ile parça ana kayadan koparılır. Bu çatlakların basınç ve çekme gerilmelerinin etkisinde olduğu farklı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. Buna göre; Şekil 7.19-7.24 arasında tüm kayaçların 3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde hesaplanan ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin, basınç ve çekme dayanımıyla olan ilişkileri gösterilmiştir.



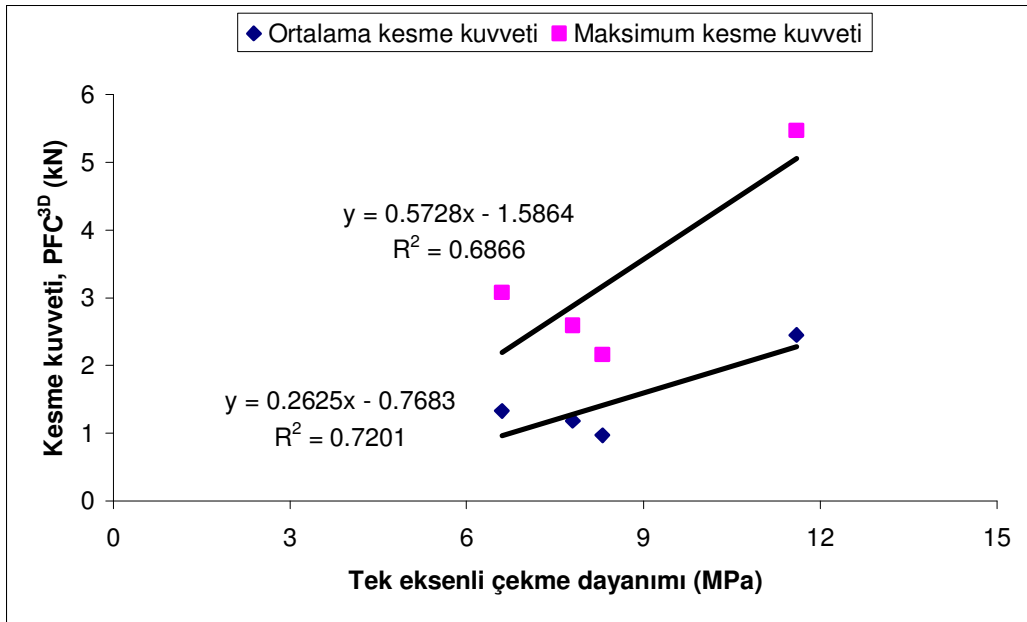
Şekil 7.19 3 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli basınç dayanımıyla olan ilişkisi.



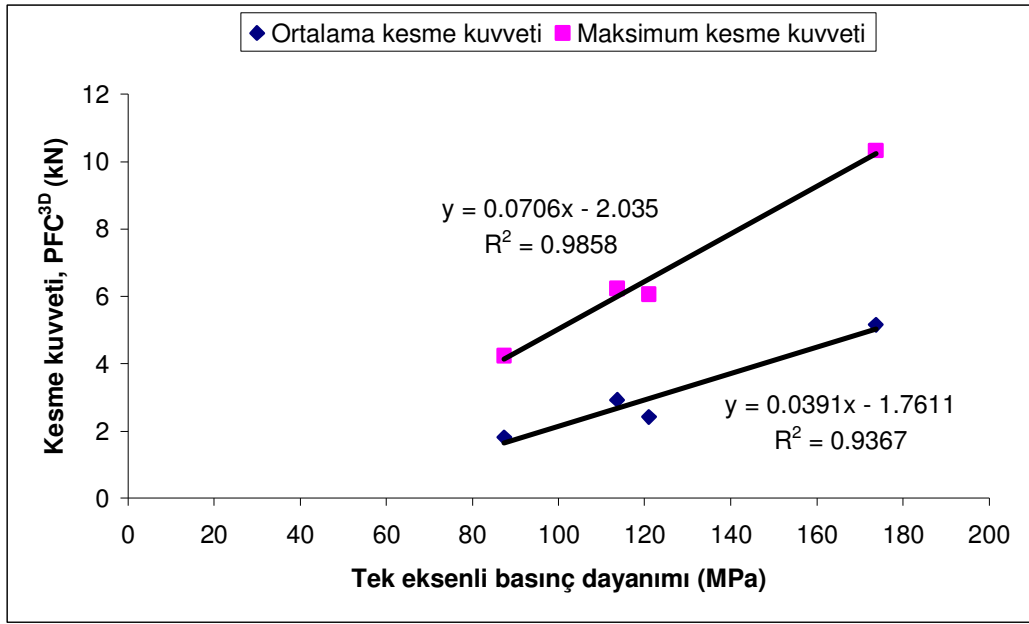
Şekil 7.20 3 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli çekme dayanımıyla olan ilişkisi.



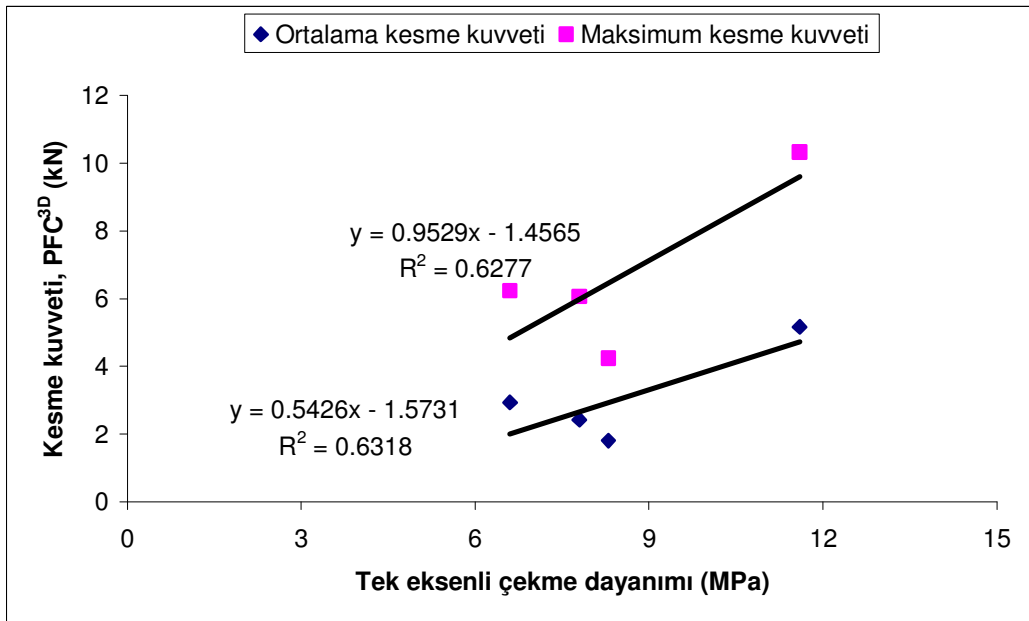
Şekil 7.21 6 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli basınç dayanımıyla olan ilişkisi.



Şekil 7.22 6 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli çekme dayanımıyla olan ilişkisi.



Şekil 7.23 9 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli basınç dayanımıyla olan ilişkisi.



Şekil 7.24 9 mm kesme derinliğinde ortalama ve maksimum kesme kuvveti değerlerinin tek eksenli çekme dayanımıyla olan ilişkisi.

Şekil 7.19-7.24 arasında çizilen grafiklerdeki ilişki katsayıları incelendiğinde kayadaki basınç ve çekme dayanımlarının keski kuvvetleriyle yakından ilişkili olduğu ve PFC^{3D}'de kayacın basınç dayanımının çekme dayanımına göre daha etkin olduğu görülmüştür.

7.4 PARAMETRİK ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kesme hızı ve kesme açısının kazı verimi üzerindeki etkisini incelemek üzere yürütülen sayısal modelleme çalışmalarının sonuçları aşağıda verilmiş ve parametrik çalışmalar aralarındaki ilişkiler incelenmiştir.

7.4.1 Kesme Hızının Etkisi

ZTH’nda farklı bölgelerden kumtaşı ve kireçtaşı örnekleri üzerinde yürütülen kayaç kesme deneyleri 0,3 m/s hızla hareket ettirilen kalem uçlu keskiyle PFC^{3D}’de modellenmiştir. Kesme hızının (v) kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini incelemek üzere tüm kesme koşulları aynı kalmak üzere deney 0,5 m/s hızla tekrar edilmiştir.

PFC^{3D}’de kayacın modelleme sırasındaki statik denge durumunu korumak için kesme hızı oldukça düşük alınmalıdır. Dolayısıyla, yeni modelleme çalışmasında kesme hızı 0,5 m/s seçilmiştir. Buna göre 3, 6 ve 9 mm kesme derinliğinde yürütülen modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri Çizelge 7.12’de verilmiştir.

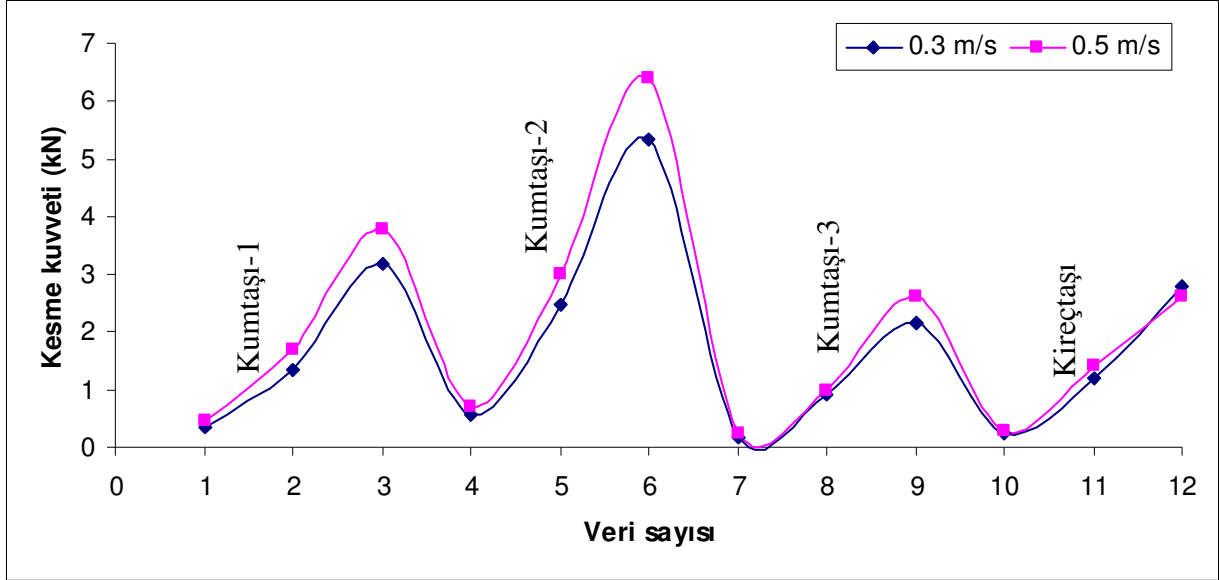
Çizelge 7.12 Kesme hızına bağlı olarak değişen ortalama kesme kuvvetleri.

Kayaç tipi	d (mm)	Veri sayısı	FC [*] (kN)	FC ^{**} (kN)	SE [*] (kWh/m ³)	SE ^{**} (kWh/m ³)
Kumtaşı-1	3	1	0.37	0,46	11,10	15,72
	6	2	1.34	1,69	10,27	15,49
	9	3	3.18	3,80	11,22	15,76
Kumtaşı-2	3	4	0.58	0,69	20,13	23,01
	6	5	2.47	3,01	22,42	27,04
	9	6	5.34	6,40	20,28	22,21
Kumtaşı-3	3	7	0.19	0,26	6,00	8,18
	6	8	0.92	0,98	8,38	8,75
	9	9	2.17	2,62	6,58	8,03
Kireçtaşı	3	10	0.26	0,29	9,08	9,98
	6	11	1.21	1,43	11,14	14,06
	9	12	2.8	2,63	11,25	10,79

* 0,3 m/s hızda modellendi.

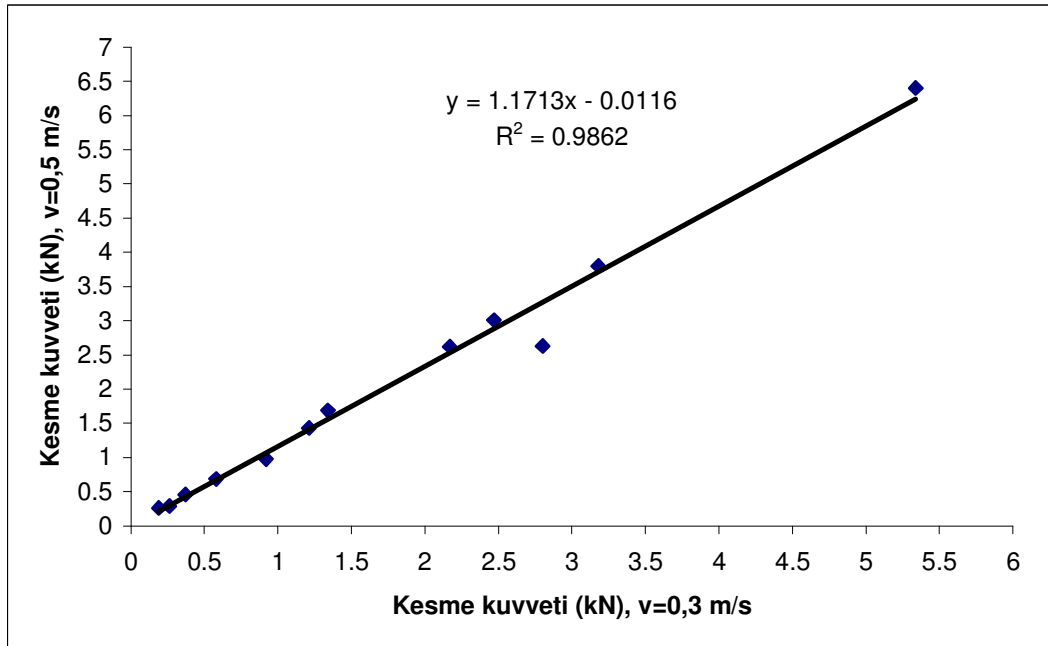
** 0,5 m/s hızda modellendi.

Veri sayısına bağılı olarak kesme kuvvetlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 7.25'te verilmiştir. Buna göre, kesme hızı arttırılrsa dahi kesme kuvvetlerinde çok fazla bir değişim oluşmadığı gözlemlenmiştir.

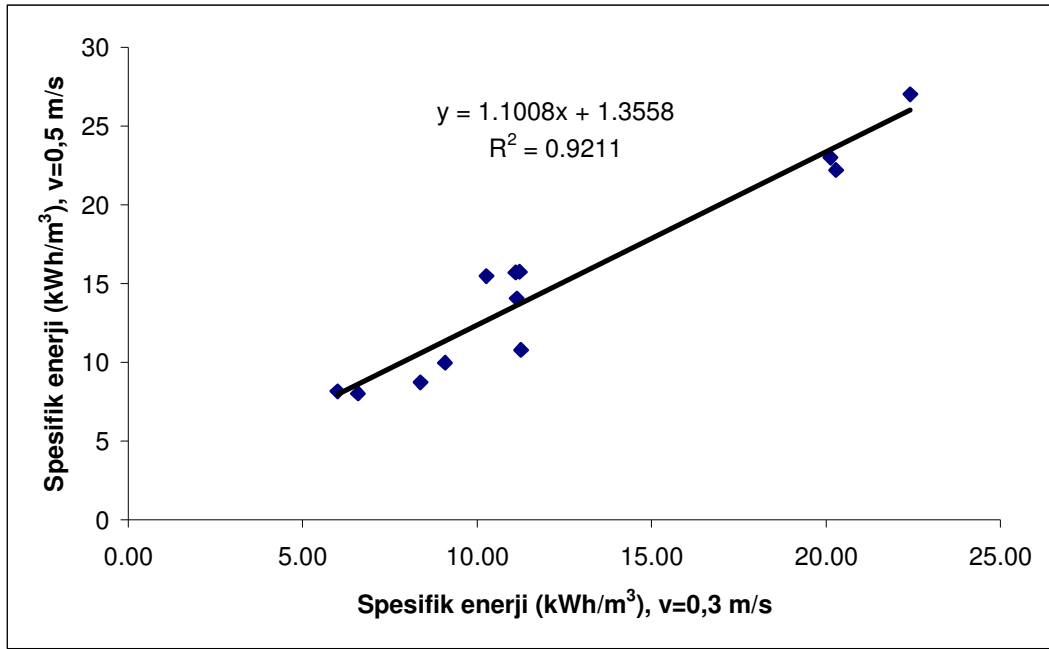


Şekil 7.25 Farklı kesme hızlarında kesme kuvvetlerindeki değişimi gösteren grafik.

0,3 ve 0,5 m/s hızda yürütülen modelleme çalışmaları arasında hem kesme kuvvetleri ve hem de spesifik enerji değerleri arasında yüksek korelasyon katsayısına sahip doğrusal ilişkiler bulunmuştur (Şekil 7.26-7.27).



Şekil 7.26 Farklı kesme hızlarında ortalama kesme kuvvetleri arasındaki ilişki.



Şekil 7.27 Farklı kesme hızlarında spesifik enerji değerleri arasındaki ilişki.

Şekil 7.25-7.27 arasında gösterilen mukayese ve ilişkilerden kesme hızının kazı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç aynı zamanda Roxborough ve Phillips'in (1975) disk tipi keskiiler üzerinde yürüttüğü çalışmalarda da elde edilmiş ve kesme hızının keski üzerinde rol oynayan kuvvetler, spesifik enerji ve kazı hacmine hiçbir etkisinin olmadığı görülmüştür.

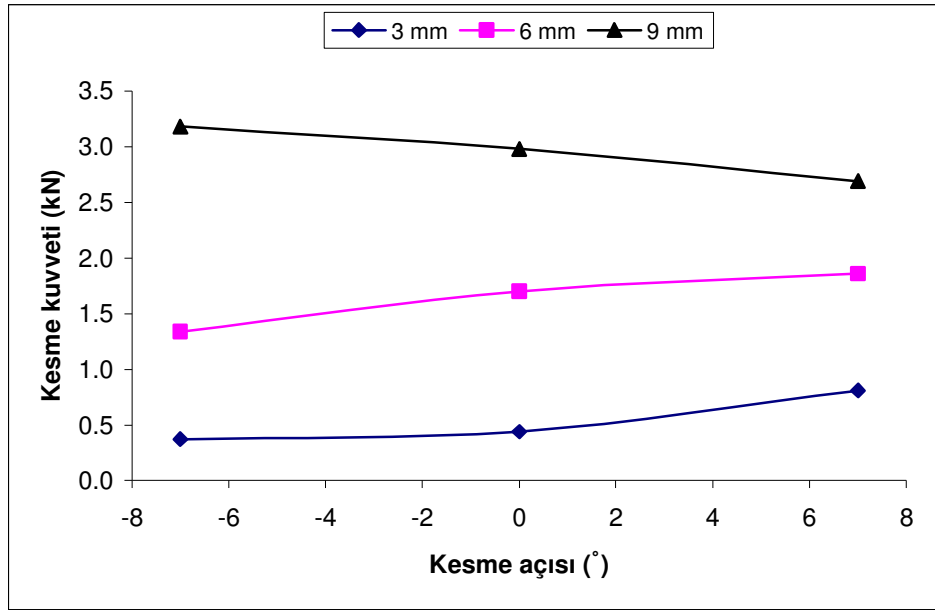
7.4.2 Kesme Açısının Etkisi

Üç farklı kesme açısında yürütülen modelleme çalışmaları sonrasında elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvvet değerleri Çizelge 7.13'te sunulmuştur. Bu sonuçlara göre kesme açısı ve kesme derinliğine bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişimi gösteren grafikler Şekil 7.28-7.31'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.13 PFC^{3D}'de farklı kesme açılarında elde edilen keski kuvvetleri.

Kayaç tipi	d (mm)	FN [*] (kN)	FN ^{**} (kN)	FN ^{***} (kN)	FC [*] (kN)	FC ^{**} (kN)	FC ^{***} (kN)
Kumtaşı-1	3	0,24	0,54	1,85	0,37	0,44	0,91
	6	1,19	1,42	2,80	1,34	1,70	1,86
	9	1,84	1,75	2,71	3,18	2,98	2,69
Kumtaşı-2	3	0,48	0,88	2,69	0,58	0,71	1,20
	6	2,05	2,39	3,16	2,47	2,80	3,04
	9	3,46	3,58	4,88	5,34	5,84	6,07
Kumtaşı-3	3	0,14	0,24	0,93	0,19	0,25	0,46
	6	0,69	0,72	1,42	0,92	0,76	1,15
	9	1,10	1,00	1,68	2,17	1,28	2,14
Kireçtaşı	3	0,20	0,24	0,31	0,26	0,25	0,29
	6	0,74	0,92	1,57	1,21	1,12	1,25
	9	1,81	1,33	1,63	2,80	2,31	2,37

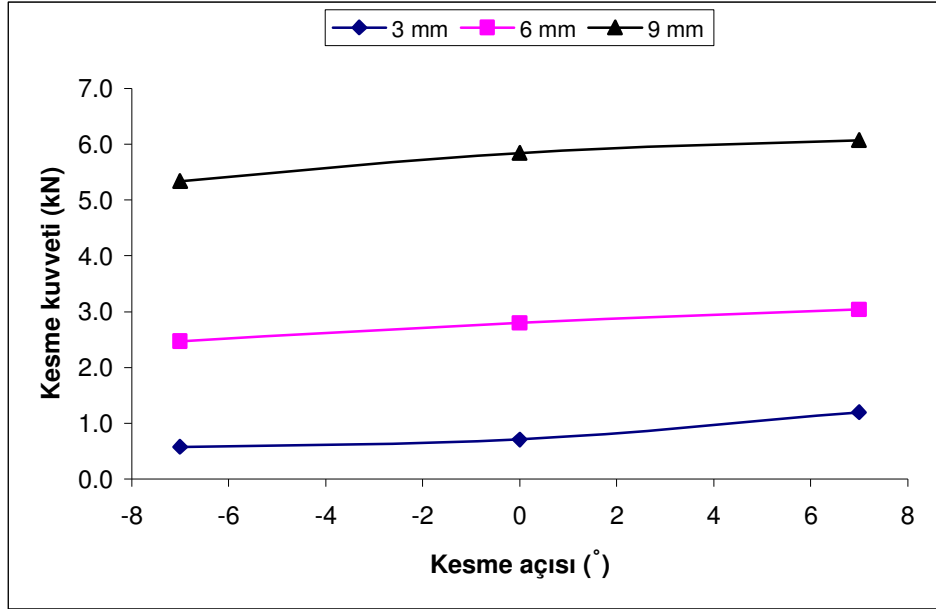
* Kesme açısı = -7°, ** Kesme açısı = 0°, *** Kesme açısı = 7° alınmıştır.



Şekil 7.28 Kumtaşı-1 kayacının kesme kuvvetleri ile kesme açısı arasındaki ilişki.

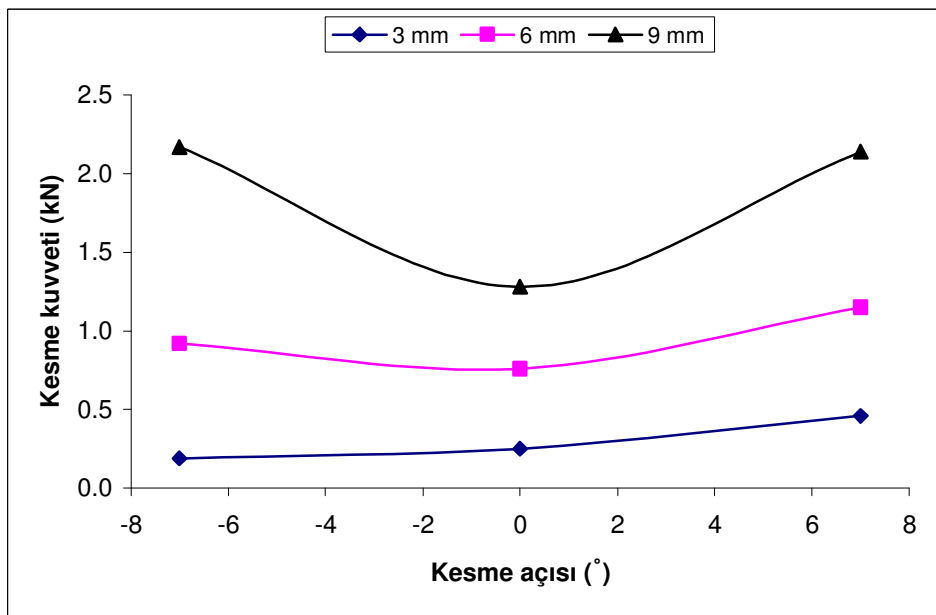
Kumtaşı-1 kayacında 3 mm ve 6 mm kesme derinliklerinde; kesme açısı arttıkça kesme kuvvetleri artmakta, 9 mm kesme derinliğinde ise azalmaktadır.

Bunun yanında; Çizelge 7.13'teki sonuçlar incelendiğinde, tüm kesme derinliklerinde kesme açısı arttıkça normal kuvvet değerleri de artmaktadır. Ayrıca, 3 ve 6 mm kesme derinliğinde ve 7° kesme açısında keski üzerinde rol oynayan normal kuvvet değerleri kesme kuvvetlerinden yaklaşık 1,5-2 kat daha yüksek çıktığı belirlenmiştir.



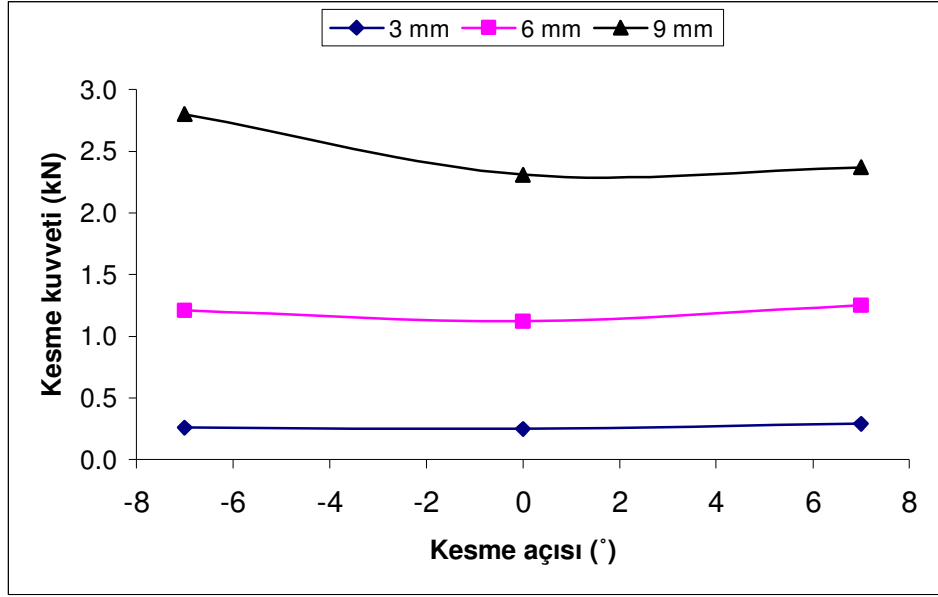
Şekil 7.29 Kumtaşı-2 kayacının kesme kuvvetleri ile kesme açısı arasındaki ilişki.

Kumtaşı-2 kayacının tüm kesme derinliklerinde kesme açısı arttıkça hem normal kuvvet ve hem de kesme kuvvetleri artmaktadır. Yine, kumtaşı-1 kayacında olduğu gibi kumtaşı-2 kayacının 7° kesme açısı, 3 ve 6 mm kesme derinliğinde belirlenen normal kuvvet değerleri kesme kuvveti değerlerinden oldukça yüksektir.



Şekil 7.30 Kumtaşı-3 kayacının kesme kuvvetleri ile kesme açısı arasındaki ilişki.

Kumtaşı-3 kayacında 6 ve 9 mm kesme derinliğinde kesme açısı arttıkça kesme kuvvetleri önce azalmakta ve daha sonra artmaktadır. 3 mm kesme derinliğinde ise kesme açısına bağlı olarak kesme kuvvetleri de artmaktadır. Normal kuvvet değerleri kumtaşı-1 ve kumtaşı-2 kayalarında olduğu gibi 3, 6 mm kesme derinliklerinde ve 7° kesme açısında kesme kuvvetlerinden daha yüksektir.



Şekil 7.31 Kireçtaşı kayacının kesme kuvvetleri ile kesme açısı arasındaki ilişki.

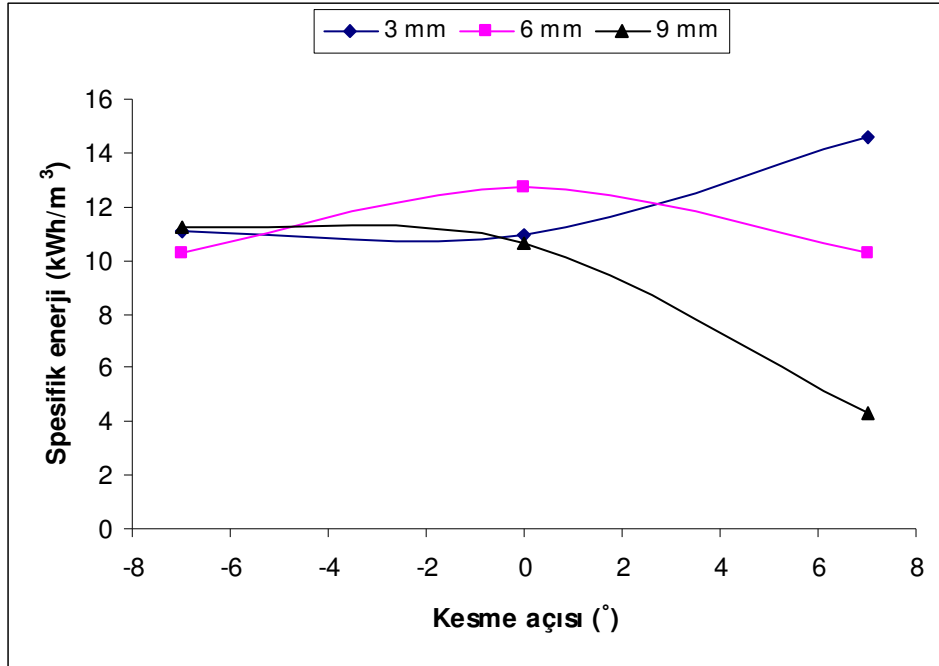
Kireçtaşı kayacında tüm kesme derinliklerinde kesme açısı arttıkça kesme kuvvetleri önce azalmakta ve daha sonra artmaktadır. 7° kesme açısı, 3 ve 6 mm kesme derinliklerinde belirlenen normal kuvvet değerleri kesme kuvvetlerinden yine daha yüksektir.

Diğer yandan kesme açısına bağlı olarak spesifik enerji değerlerindeki değişim incelendiğinde Çizelge 7.14'te verilen sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak -7°, 0 ve 7° kesme açısında spesifik enerjideki değişim Şekil 7.32-7.35'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.14 PFC^{3D}'de farklı kesme açılarında elde edilen spesifik enerji değerleri.

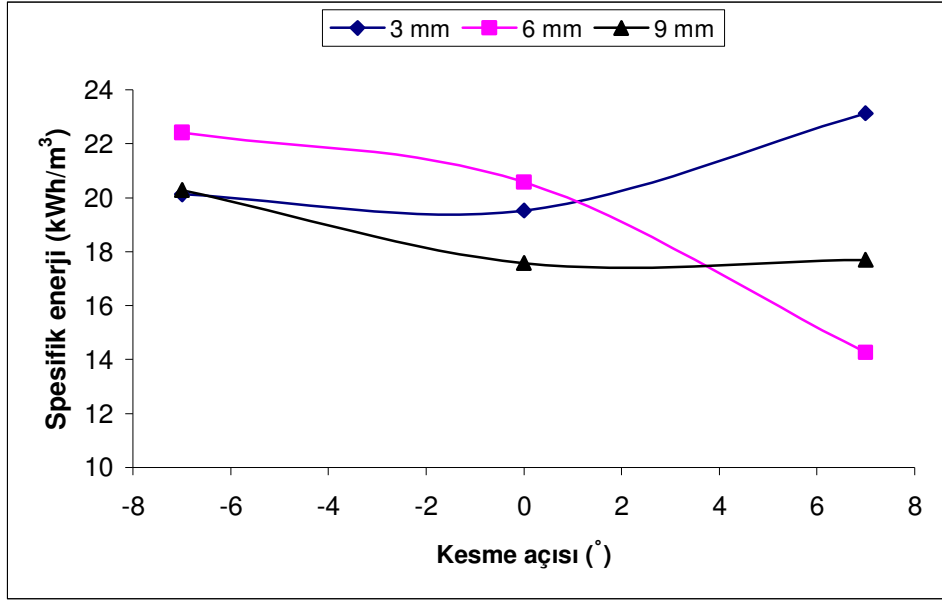
Kayaç tipi	d (mm)	SE [*] (kN)	SE ^{**} (kN)	SE ^{***} (kN)
Kumtaşı-1	3	11,10	10.92	14.55
	6	10,27	12.69	10.25
	9	11,22	10.62	4.29
Kumtaşı-2	3	20,13	19.52	23.13
	6	22,42	20.58	14.26
	9	20,28	17.58	17.7
Kumtaşı-3	3	6,00	6.87	7.78
	6	8,38	4.85	6.61
	9	6,58	4.05	5.95
Kireçtaşı	3	9,08	7.58	5.97
	6	11,14	8.52	6.79
	9	11,25	8.26	4.88

* Kesme açısı = -7°, ** Kesme açısı = 0°, *** Kesme açısı = 7° alınmıştır.



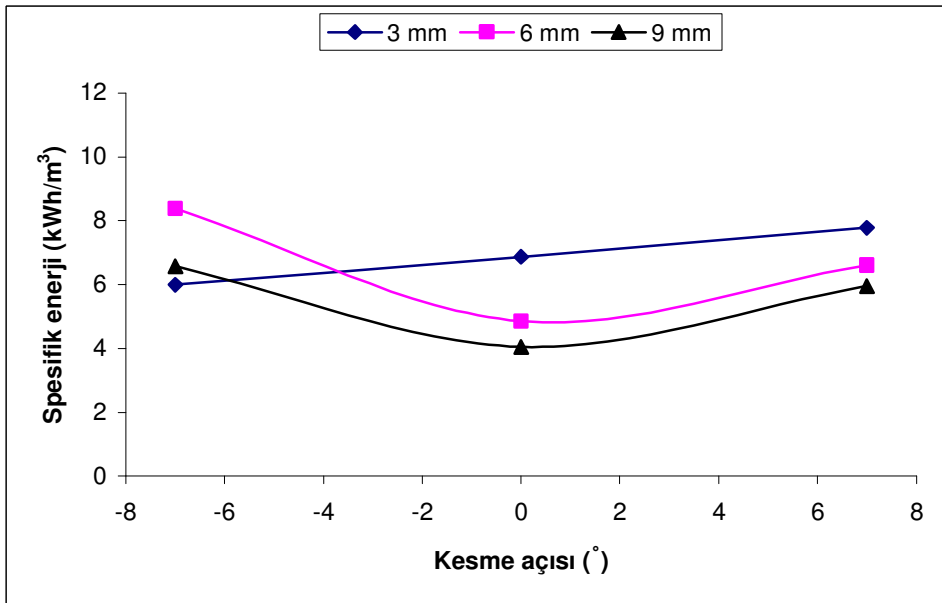
Şekil 7.32 Kumtaşı-1 kayacının kesme açısı ve spesifik enerji arasındaki ilişkisi.

Kumtaşı-1 kayacında 3 mm kesme derinliğinde kesme açısı arttıkça spesifik enerji değerleri artmakta, 6 ve 9 mm'lik kesme derinliklerinde de azalmaktadır.



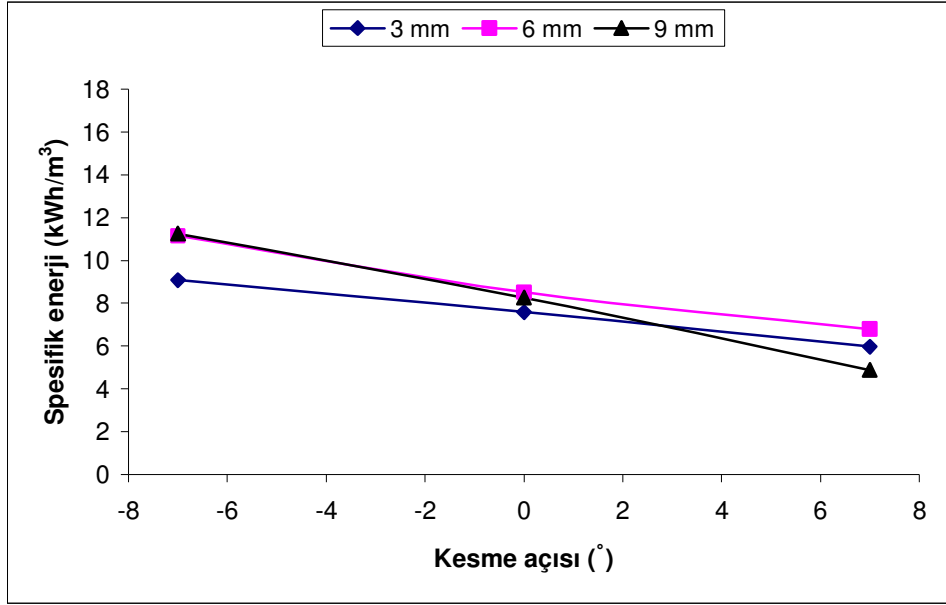
Şekil 7.33 Kumtaşı-2 kayacının kesme açısı ve spesifik enerji arasındaki ilişkisi.

Kumtaşı-2 kayacında da yine 3 mm kesme derinliğinde kesme açısı arttıkça spesifik enerji artmakta, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde de kesme açısı arttıkça spesifik enerji azalmaktadır.



Şekil 7.34 Kumtaşı-3 kayacının kesme açısı ve spesifik enerji arasındaki ilişkisi.

Kumtaşı-3 kayacında 3 mm kesme derinliğinde kesme açısı arttıkça, spesifik enerji artmaktadır. 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde de öncelikle kesme açısında artışla birlikte spesifik enerji azalmakta ve daha sonra artmaktadır.



Şekil 7.35 Kireçtaşı kayacının kesme açısı ve spesifik enerji arasındaki ilişkisi.

Kireçtaşı kayacında tüm kesme derinliklerinde kesme açısı arttıkça spesifik enerji değerleri azalmaktadır.

Tüm bu sonuçlara bağlı olarak genel bir değerlendirme yapıldığında düşük kesme derinliklerinde kalem uçlu keskinin sergilediği davranış yüksek kesme derinliklerinde sergilediği davranıştan tamamen farklıdır. Buna göre düşük kesme derinliğinde kesme açısı arttıkça kesme kuvvetlerinin de genellikle arttığı, yüksek kesme derinliğinde ise kesme kuvvetlerinin azaldığı ortaya konmuştur.

Shih'in (1996) sonlu elemanlar yöntemini uygulayarak kama tipi keskinlerle -2° , 0° , 5° , 15° kesme açılarında yürüttüğü modelleme çalışmaları sonucunda, kesme açısı negatiften pozitif doğru arttıkça kesme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür. Göktan (1990) ve Yılmaz et al.'un (2007) yüksek dayanıma sahip kayalar üzerinde -20° , -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° 'de yürüttüğü çalışmaların sonuçlarından kesme açısı arttıkça kesme kuvvetlerinin azaldığı ortaya konmuştur. Dolayısıyla modelleme çalışmaları sonucunda kesme açısına bağlı olarak yüksek kesme derinliklerinde ($d=9$ mm) belirlenen kesme kuvveti değerlerinin literatürde karşılaşılan sonuçlarla ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca, pozitif kesme açısına sahip keskinlerin üzerinde rol oynayan normal kuvvetler kesme kuvvetlerinden daha büyük sonuçlar vermiştir.

Diğer yandan, düşük kesme derinliklerinde kesme açısı arttıkça spesifik enerji değerleri artmakta ve yüksek kesme derinliklerinde de azalmaktadır. Bunun temel nedeni kayacın homojen olmayan yapısından kaynaklanan gerilme dağılımındaki farklılık olabilir.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Madencilikte kayacın kazılması ve taşınması oldukça fazla zaman alan ve iş gücü gerektiren bir çalışmadır. İnşaat sektöründe ulaşım, sulama, kanalizasyon ve madencilik sektöründe de hazırlık ve üretim amaçlı kazılar yapılmaktadır. Bu kazıların hızlı, emniyetli ve ekonomik olarak yürütülebilmesi mekanize kazı sistemlerinin kullanılmasıyla başarılı bir şekilde yapılabilmektedir.

Kazı yapmak üzere bir makinanın yeraltında montajına başlamadan önce uygun makinanın seçilmesi, performansının değerlendirilmesi, ilerleme hızlarının önceden kestirilmesi, keski aşınması, uç tüketim miktarı ve gerekli maliyet analizlerinin yapılması bir kazı projesinde yürütülmesi gereken en önemli aşamalardır. Bu amaçla yerinde ve laboratuvarında yürütülen deneysel çalışmalardan yararlanılmaktadır. Kayacın mekanik özelliklerinin yanı sıra kazılabilirliğin belirlenmesi kazı verimi ve makina performansının değerlendirilmesinde etkin bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda bir kesici kafa üzerinde bulunan her bir keski üzerinde rol oynayan kesme kuvvetleri tahmin edilir ve tüketilen spesifik enerji değerleri hesaplanır.

Kayaç kazısında kesme kuvvetleri; teorik olarak, laboratuvar deneyleri ve sayısal modelleme çalışmalarıyla hesaplanabilmektedir. Her bir çalışma yönteminin kendine göre avantajları bulunmaktadır. Teorik çalışmalardan belirlenen kuvvetler her zaman gerçek kuvvetleri yansıtmamaktadır. Kesme koşulları ve kayaç içerisindeki gerilme dağılımlarına göre bazen gerçekten uzak sonuçlar elde edilmektedir. Diğer taraftan, laboratuvar çalışmalarında kullanılan Doğrusal Kesme Seti, bir makinanın yerinde yaptığı kazı sırasında tükettiği kuvvet ve harcadığı enerjiyle birebir ölçekli olarak çok yakın sonuçlar sergilemektedir. Ancak, bu setlerin dünyada sadece birkaç araştırma merkezinde bulunması ve iri bloklar kullanılarak numune hazırlanması ve deneylerin fazla zaman alması en büyük dezavantajlarıdır. Bununla birlikte artık günümüzde oldukça gelişmiş bilgisayar yazılımlarının hazırlanmasıyla kazı

sırasında kayacın gösterdiği davranışın önceden belirlenmesi bir hayli kolaylaşmıştır. Bu yazılımlar sayesinde daha kısa zaman içerisinde gerçek bir fiziksel modelin sergilediği davranış modellenabilmektedir. Modelleme sırasında çeşitli parametreler değiştirilerek sonuçların tekrar tekrar incelenmesi de en büyük avantajıdır.

Bu çalışma kapsamında Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda daha önce dört farklı kayaç üzerinde birebir ölçekli kazı setinde yapılan kazılabilirlik çalışmaları PFC^{3D} programı kullanılarak modellenmiştir. Laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmalarının yanı sıra, kayaçların mekanik özelliklerine bağlı olarak farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olan kayaç kesme mekanizmaları yardımıyla da maksimum kesme kuvvetleri belirlenmiştir. Ayrıca, kesme hızı ve kesme açısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan tüm çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiş ve konuyla ilgili öneriler yapılmıştır.

8.1 SONUÇLAR

Modelleme çalışmaları laboratuvarda yürütülen gerçek bir kesme deneyine paralel olacak şekilde yürütülmüştür. Her kesme derinliği için farklı tanecik yarıçapında ve boyutlarda numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin modelleme öncesi mikro özellikleri kalibre edilmiş ve böylece kayacın modellemeye ve laboratuvarda sergilediği dayanım ve deformasyon özellikleri birbirleriyle eşleştirilmiştir.

Kayaç kesme modellemeleri 3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde ve laboratuvarda uygulanan kesme parametrelerine bağlı olarak 20 mm'lik kesme mesafesinde etkileşimsiz olarak yürütülmüştür. Modelleme çalışmaları sonucunda kalem uçlu keski üzerinde rol oynayan kesme kuvvetlerinin kesme derinliğine bağlı grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden ortalama ve maksimum kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Ayrıca, keski etrafında toplanan pasa hacmi (tanecikler) belirlenerek spesifik enerji değerleri hesaplanmıştır. Bununla birlikte; kesme hızı ve kesme açısı gibi parametrelerin keski kuvvetleri üzerindeki etkisini incelemek üzere ayrıyeten modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Buna göre elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir :

- PFC^{3D}'de numune hazırlanırken en içe yerleştirilen silindir yarıçapının, kesme derinliğinin en az 3 katı mesafede olması gerektiği tespit edilmiştir.

- Tüm kayaçlarda normal ve kesme kuvveti değerlerinin kesme derinliğine bağlı olarak arttığı görülmüştür. Buna göre; modelleme çalışmalarında 3, 6 ve 9 mm kesme derinlikleri için kumtaşı-1 kayacının ortalama kesme kuvveti değerleri 0,37-3,18 kN, kumtaşı-2 kayacının 0,58-5,41 kN, kumtaşı-3 için 0,19-2,17 kN ve kireçtaşı kayacının 0,26-2,80 kN arasında değişmektedir. Laboratuvarda belirlenen kuvvet değerleri ile modelleme çalışmalarından elde edilen kuvvet değerleri arasında belirgin bir farklılık ortaya çıkmıştır. Ancak, laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmaları arasında normal kuvvetler açısından $R=0,76$ ve kesme kuvvetleri açısından da $R=0,95$ olan doğrusal ilişkiler belirlenmiştir. Bu ilişkilerden elde edilen bağıntıların güvenilirliği t ve F (ANOVA) testleriyle ispatlanmıştır.
- Modelleme çalışmalarının elde edilen maksimum kesme kuvvetleri laboratuvar sonuçlarından farklı çıkmış, ancak teorik bağıntılara yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu bağlamda, laboratuvar ve PFC^{3D} 'den hesaplanan maksimum kesme kuvvetleri arasındaki korelasyon katsayısı $R=0,96$ olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte; Evans kesme teorisi ile sayısal modelleme çalışmaları arasında $R=0,81$, Gökten'in kesme teorisi ile sayısal modelleme çalışmaları arasında $R=0,94$ ve Roxborough & Liu'nun kesme teorisi ile sayısal modelleme çalışmaları arasında $R=0,88$ olan doğrusal ilişkiler oluşmuştur. Ayrıca, maksimum kesme kuvvetleri arasında oluşan ilişkilerin geçerli olduğu regresyon analizleri ile desteklenmiştir.
- En yüksek spesifik enerji değerleri hem laboratuvarda hem de PFC^{3D} 'de kumtaşı-2 kayacından elde edilmiştir. PFC^{3D} 'de her kayaç için spesifik enerji değerlerinin genellikle değişmediği ve laboratuvar sonuçlarından farklı çıktığı görülmüştür. Bu bağlamda laboratuvar ve modelleme çalışmaları arasındaki ilişki katsayısı $R=0,69$ olarak bulunmuştur. Bununla birlikte 9 mm kesme derinliğinde hesaplanan spesifik enerji değerlerinin laboratuvarda elde edilen değerlere çok yakın çıktığı ve laboratuvar ile modelleme çalışmaları arasındaki ilişki katsayısının $R=0,96$ olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu ilişkilerden elde edilen bağıntıların güvenilirliği de regresyon analizleriyle yapılan istatistiki çalışmalarla ortaya konmuştur.
- Modelleme çalışmalarında kullanılan kalem ucu tipi keski Ranman'ın (1985) kesme teorisi göz önüne alındığında yüksek kesme derinliklerinde daha fazla aşıldığı belirlenmiştir ($FC'/FC < 3$ olduğu için).

- Kayaçların kesilmesiyle ilgili olarak geliştirilen mekanizmalarda basınç, çekme veya kayma gerilmeleri etkin olmaktadır. Modelleme sonucu oluşan mikro çatlakların sayısı göz önüne alındığında; tüm kesme derinliklerinde basınç dayanımıyla oluşan çatlakların sayısı, çekme dayanımıyla oluşan çatlakların sayısından fazladır. Dolayısıyla, PFC^{3D}'de meydana gelen çatlaklar daha çok basınç gerilmesiyle ilerlemekte, yani normal yenilme davranışı sergilemektedir.
- PFC^{3D}'de yürütülen parametrik çalışmalardan kesme hızının kesme kuvveti ve spesifik enerji üzerindeki etkisi çok düşük olduğu görülmüştür.
- PFC^{3D}'de yürütülen bir diğer parametrik çalışmadan da; yüksek kesme derinliklerinde kesme açısı arttıkça kesme kuvvetlerinin azaldığı, düşük kesme derinliklerinde ise arttığı görülmüştür. Ayrıca, düşük kesme derinliklerinde spesifik enerji değerlerinin arttığı ve yüksek kesme derinliklerinde de azaldığı belirlenmiştir. Buna göre, kesme açısına bağlı olarak yüksek kesme derinliklerinde gözlemlenen sonuçların laboratuvardaki sonuçlarla örtüştüğü ispatlanmıştır.

8.2 ÖNERİLER

PFC^{3D} programı kullanılarak yapılan sayısal modelleme çalışmaları sonucunda bir hayli tecrübe ve bilgi birikimi sağlanmıştır. Buna göre PFC^{3D}'de hazırlanan modeller daha fazla geliştirilebilir. Bu bağlamda bundan sonra yapılacak çalışmalara katkı sağlaması açısından aşağıda verilen öneriler göz önüne alınabilir.

- Kayaç kesme deneyini modellemek üzere örnek hazırlanırken göz önüne alınması gereken en önemli faktörler numune boyutları, tanecik yarıçapı ve kesme derinliğidir. Kesme derinlikleri genellikle çok küçük olduğu için kullanılacak taneciklerin yarıçapı da oldukça küçük seçilir. Gerekli kesme koşullarının sağlanması için büyük boyutlu bir numune hazırlanması gerektiği için de tanecik sayısı oldukça fazla olacaktır. Büyük boyutlu bir numunede çok fazla tanecik oluşturulması da çok çok daha gelişmiş bir bilgisayar donanımı ile sağlanabilir. Tüm faktörler birbirine bağımlı olup gerekli koşulların sağlanması oldukça zordur. Ancak, PFC^{3D}'nin yeni çıkan 4.0 sürümünde geliştirilen bazı fonksiyonlarla iri kaya blokları hazırlamak daha kolay hale gelmiştir (ITASCA 2008). Dolayısıyla, kayaç kesme deneyinin modellenmesinde uygun kesme koşulları PFC^{3D}'nin

yeni sürümüyle sağlanabilir. Bu sayede daha büyük numune boyutları oluşturularak bağımlı ve bağımsız kesme deneyleri daha verimli şekilde modellenebilir.

- Kayacın kazı sırasında gösterdiği davranışın önceden belirlenmesi amacıyla sonlu, sınır veya ayrık elemanlar yöntemleri kullanılarak sayısal modellemeler yapılmaktadır. Ayrık elemanlar yönteminde modelleme yapılan ortamın sürekli olmayışı, kayaç içinde bulunan süreksizlik düzlemlerini birbirinden ayırmaktadır. Dolayısıyla, kayaç kesme deneyinin modellenmesi amacıyla ayrık elemanlar yöntemini kullanan programların seçilmesi çok verimli olur.
- PFC^{3D}'de; 9 mm kesme derinliğinde elde edilen sonuçlar gerçeğe daha yakın olduğu için modelleme çalışmalarının yüksek kesme derinliklerinde yürütülmesi daha anlamlı olacaktır. Ancak, 3 ve 6 mm kesme derinliklerinde yapılacak modelleme çalışmaları için kesme sırasında önemli bir rol oynayan sökülme açısının etkisinin tam olarak ortaya konması ve hazırlanan programın biraz daha geliştirilmesi gerekmektedir.
- Uygun koşullar sağlandığı takdirde 20 mm'den daha uzun kesme mesafesinde modelleme çalışmaları yürütülmelidir.
- Kesme deneyi için PFC^{3D}'de numune hazırlanırken en içe yerleştirilen silindir yarıçapının kesme derinliğinin en az 3 katı mesafede olması gerektiği tespit edilmiştir. Bu aynı zamanda iki keskinin aynı zamanlı yan yana kazı yapması (bağımlı kesme deneyi) modellenmek istendiğinde; keskinler arasında, kesme derinliğinin 6 katı kadar bir aralık bırakılırsa keskinlerin birbirlerinin kazı alanlarını etkilemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu düşünce bir bakıma bağımlı kesme deneyinin PFC^{3D}'de modellenmesi anlamına gelmektedir. O halde, PFC^{3D}'de bağımlı kesme deneyini modellemek üzere gerekli koşullar sağlanamadığı takdirde numunenin en içteki silindirinin yarıçapının azaltılmasıyla optimum keskinler arası mesafe tahmin edilebilir. Böylece en uygun s/d oranına göre bağımlı kesme deneyinden SE değerleri de hesaplanabilecektir.
- Kayacın çekme dayanımı kayaç kesme sürecinde çok büyük önem taşıdığı için, kayacın mikro özellikleri çekme dayanımı da göz önüne alınarak kalibre edilebilir.

Tüm bu sonuçlar ışığında sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen kuvvet ve spesifik enerji değerlerinin belirli sınırlamalar çerçevesinde yüksek kesme derinliklerinde uygulanabilir olduğu ve yapılan çalışmaların daha fazla kayaç türü üzerinde tekrarlanarak veri sayısının artırılmasının daha anlamlı olacağı düşünülmektedir.

Ayrıca, bu çalışmanın bir sonraki adımı olarak;

- bağımlı kesme deneylerinin PFC^{3D}'de modellenmesi,
- ucu aşınmış (körlenmiş) bir keski modelleyerek kesme kuvveti ile aşınma miktarı arasındaki ilişkinin araştırılması,
- keski açısı değiştirilerek dalma açısının kesme kuvveti üzerindeki değişimi (asimetrik kesme koşulları) incelenecektir.

KAYNAKLAR

- Akçın N A** (1997) *Kazı Mekaniği Ders Notları* (yayımlanmamış), ZKÜ Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, 101 s.
- Akçın N A, Yarahı O, Bilir E ve Su O** (2009) *TTK'da Kullanılan Monoblok Burguların Uç Açısının Delme Hızı ve Uç Ömrüne Etkisinin İncelenmesi*. TTK Final Raporu, ZKÜ Mühendislik Fakültesi, Zonguldak, 76 s.
- Balcı C ve Bilgin N** (2005) Mekanize kazı makinalarının seçiminde küçük ve tam boyutlu kazı deneylerinin karşılaştırılması. *İtü Dergisi*, 4 (3): 76-86.
- Balcı C and Bilgin N** (2007) Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 44 (3): 468-476.
- Bilgin N** (1989) *İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği*, İstanbul, Birsen Yayınevi, 192 s.
- Bilgin N, Yazıcı S and Eskikaya Ş** (1996) A model to predict the performance of roadheaders and impact hammers in tunnel drivages. *Proc. of 'Eurock 96' ISRM Int. Symp.*, Balkema, Rotterdam, pp. 715-720.
- Bilgin N, Eskikaya Ş, Balcı C and Ergunalp D** (1997) Full scale and small scale cutting tests for equipment selection in a celestite mine. *Sixth Int. Mine Planning and Equipment Selection*, eds. V. Strakos et al., Ostrava, Czech Republic, pp. 387-392.
- Bilgin N, Balcı C, Acaroğlu Ö, Tunçdemir H, Eskikaya Ş, Akgül M and Algan M** (1999a) The performance prediction of a TBM in Tuzla-Dragos sewerage tunnel. *Proc. of the World Tunnel Congress'99*, eds. T. Alten et al., Oslo, Norway, pp. 817-822.
- Bilgin N, Balcı C, Tunçdemir H, Eskikaya Ş, Akgül M and Algan M** (1999b) The performance prediction of a TBM in difficult ground condition. *Proc. of an International AFTES Conference*, Paris, France, pp. 115-121.
- Bilgin N and Balcı C** (2000) *NATO-TU Excavation Project Development of Rapid Excavation Technologies for the Turkish Mining and Tunnelling Industries*. NATO-TU Excavation Project Report, Istanbul Technical University, İstanbul, 172 pp.
- Bilgin N, Demircin M A, Çopur H, Balcı C, Tunçdemir H and Akçın N A** (2006) Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 43 (1): 139-156.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Blindheim O T and Bruland A** (1998) Boreability testing. *Norwegian TBM Tunnelling 30 Years of Experience with TBMs in Norwegian Tunnelling*, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Oslo, Norway, pp. 29-34.
- Breeds C D and Conway J J** (1992) Rapid excavation. *SME Mining Engineering Handbook*, ed. H. Hartman et al., 2nd edn, 2: 1871-1907.
- Cundall P A and Strack O D L** (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29 (1): 47-65.
- Çopur H, Tunçdemir H, Bilgin N and Dinçer T** (2001) Specific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish mines. *Trans. Inst. Min. and Metal. Sec. A*, 110: 149-157.
- Dahl F** (2003) *DRI, BWI, CLI Standard*. SINTEF Report, Norway, 21 p.
- Dahl F, Grøv E and Breivik T** (2007) Development of a new direct test method for estimating cutter life, based on the Sievers' J miniature drill test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22 (1): 106–116.
- Eskikaya Ş, Bilgin N, Dinçer T and Özdemir L** (1998) A model to predict the cutting performance of rapid excavation systems. *7th Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection*, Calgary, Balkema, pp. 575-579.
- Evans I** (1962) A theory of the basic mechanics of coal ploughing. *Proc. of the Int. Symp. on Mining Research*, ed. G. Clark, 2: 761-798.
- Evans I and Pomeroy C D** (1966) *The Strength, Fracture and Workability of Coal*. Pergamon Press, 277 pp.
- Evans I** (1984) A theory of the cutting force for point-attack picks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2 (1): 63-71.
- Gerçek H** (2007) Poisson's ratio values for rocks. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 44 (1): 1-13.
- Göktan R M** (1990) Effect of cutter pick rake angle on the failure pattern of high-strength rocks. *Mining Science and Technology*, 11 (3) : 281-285.
- Göktan R M** (1997) A suggested improvement on Evans' cutting theory for conical bits. *Fourth Int. Symp. on Mine Mechanisation and Automation*, Queensland, Australia, 1: A4/57-61.
- Göktan R M and Günes N** (2005) A semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks. *The J. of the Sou. Afr. Inst. of Min. and Metal.*, 105 (4): 257-264.
- Göktan R M** (2008) Kişisel görüşme. Osmangazi Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Huang H** (1999) Discrete Element Modeling of Tool-Rock Interaction. Ph.D. Thesis, University of Minnesota, Department of Civil Engineering, Minneapolis, Minnesota, 131 pp.
- Huang H, Detournay E and Bellier B** (1999) Discrete element modelling of rock cutting. *Proc. of the 37th U.S. Rock Mech. Symp.*, eds. B. Amadei et al., Vail, Colorado, 1:123-130.
- ISRM** (1979) Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 16 (2): 135-140.
- ITASCA** (2006) *Particle Flow Code in 3 Dimensions, Version 3.1*, Theory and Background. Vol:IV, ITASCA Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.
- ITASCA** (2008) *Particle Flow Code in 3 Dimensions, Version 4.0*, Fish in PFC^{3D}. Vol:III, ITASCA Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.
- Jonak J and Podgorski J** (2001) Mathematical model and results of rock cutting modeling. *J. of Min. Sci.*, 37 (6): 615-618.
- Kaitkay P V** (2002) Modeling of Rock Cutting Using Distinct Element Methods. M.Sc. Thesis, Kansas State University, Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, Manhattan, Kansas, 131 pp.
- Kamp L T** (2008) Kişisel görüşme. Itasca Consultants GmbH, Gelsenkirchen, Germany.
- Kel K** (2003) Zonguldak Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Kazılabilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi (yayımlanmamış), ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 181 s.
- Köseoğlu M ve Yamak R** (2004) *Uygulamalı İstatistik*. 2. basım, Celepler Matbaacılık, Trabzon, 341 s.
- Lei S T and Kaitkay P** (2003) Distinct element modeling of rock cutting under hydrostatic pressure. *Key Engineering*, 250:110-117.
- Liu H** (2002) Numerical Modelling of the Rock Fracture Process Under Mechanical Loading. Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, Division of Rock Engineering, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea, Sweden, 50 pp.
- Liu H Y, Kou S Q and Lindqvist P A** (2002) Numerical simulation of the fracture process in cutting heterogeneous brittle material. *Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech.*, 26 (3): 1253–1278.
- Loui J P and Karanam U M R** (2005) Heat transfer simulation in drag-pick cutting of rocks. *Tunneling and Underground Space Technology*, 20 (3): 263-270.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Merchant M E** (1945) Basic mechanics of the metal cutting process. *J. Appl. Mech.*, 66:168-175.
- Nishimatsu Y** (1972) The mechanics of rock cutting. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 9 (2): 261-270.
- Nishimatsu Y** (1993) Theories of rock cutting. *Comprehensive Rock Engineering Principles, Practice & Projects*, ed. Edwin T. B., Pergamon Press, 1: 647-662.
- Park N** (2006) Discrete Element Modeling of Rock Fracture Behavior: Fracture Toughness and Time Dependent Fracture Growth. Ph.D. Thesis, The University of Texas at Austin, Department of Petroleum and Geosystems Engineering, Austin, Texas, 263 pp.
- Pickering R, Smit A and Moxham K** (2006) Mining by rock cutting in narrow reefs. *Second International Platinum Conference 'Platinum Surges Ahead'*, Johannesburg, pp. 221-230.
- Potyondy D O and Cundall P A** (2004) A bonded particle-model for rock. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 41 (8): 1329-1364.
- Ranman K E** (1985) A model describing rock cutting with conical picks. *Rock Mech. and Rock Eng.*, 18 (2): 131-140.
- Rojek J** (2007) Discrete element modeling of rock cutting. *Computer Methods in Materials Science*, 7 (2): 224-230.
- Roxborough F F** (1973) Cutting rock with picks. *The Mining Engineer*, 133: 445-455.
- Roxborough F F and Phillips H R** (1975) Rock excavation by disk cutter. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 12 (12): 361-366.
- Roxborough F F and Liu Z C** (1995) Theoretical considerations on pick shape in rock and coal cutting. *Proc. of the Sixth Underground Operator's Conference*, ed. Golosinski T.S., Kalgoorlie, Australia, pp. 189-193.
- Shenghua Y** (2004) Simulation of rock cutting by the finite element method. *Proc. of 2004 International ANSYS Users Conference & Exhibition*, Pittsburgh, Pennsylvania, 10 pp.
- Shih A J** (1995) Finite element analysis of the rake angle effects in orthogonal metal cutting. *Int. J. of Mech. Sci.*, 38 (1): 1-17.
- Shmulevich I, Asaf Z and Rubinstein D** (2007) Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil & Tillage Research*, 97 (1): 37-50.
- Stavropoulou M** (2006) Modeling of small-diameter rotary drilling tests on marbles. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 43 (7): 1034-1051.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Su O** (2006) *Kayaç Kesme Mekanizmalarının Modellenmesi*. TUBITAK Final Raporu, ZKÜ Mühendislik Fakültesi, Zonguldak, 40 s.
- Su O and Akçın N A** (2008) Modeling of unrelieved rock cutting test by using PFC^{3D} . *Proc. of the 1st International FLAC/DEM Symp. on Numerical Modeling*, eds. R. Hart, C. Detournay and P. Cundall, Minneapolis, Minnesota, pp. 165-172.
- Su O and Akçın N A** (2009a) Numerical simulation of rock cuttability. *International Conference on Rock Joints and Jointed Rock Masses*, (on CD), Tucson, Arizona, 6 p.
- Su O ve Akçın N A** (2009b) Kumtaşı örneğinin sayısal modelleme çalışmaları öncesi mikro özelliklerinin PFC^{3D} 'de kalibre edilmesi. *Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı*, ed. N. Tamzok ve B. Toka, Antalya, s. 243-251.
- Su O, Akçın N A and te Kamp L** (2009) Modeling of cutting forces acting on a conical pick. *2nd International Conference on Computational Methods in Tunneling*, eds. G. Meschke et al., Bochum, Germany, pp. 199-206.
- Thuro K and Plinninger R J** (1999) Roadheader excavation performance-geological and geotechnical influences. *Proc. of 9th ISRM Congress*, eds. G. Vouille and P Berest, Paris, 2:1241-1244.
- Tiryaki B ve Hekimoğlu O Z** (1998) Mekanik kazı makinalarında kesme titreşimi analizi. *Madencilik*, 37 (3): 3-19.
- Tunçdemir H** (2002) Kollu Galeri Açma Makinalarının veya Benzer Makinaların Cevher Kazısında Kullanımlarının Araştırılması. Doktora Tezi (yayımlanmamış), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 295 s.
- Tunçdemir H ve Bilgin N** (2002) Kollu galeri açma makinalarının cevher kazısında kullanımının araştırılması. *İtü Dergisi*, 1 (2): 14-26.
- Wang Y and Tonon F** (2009) Modeling Lac du Bonnet granite using a discrete element model. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 46 (7): 1124-1135.
- Whittaker B N, Singh R N and Sun G** (1992) *Rock Fracture Mechanics, Principles, Design and Applications*, Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier, 570 pp.
- Yaralı O** (2007) Kayaç kırılgenliği ve delme oranı indeksi arasındaki ilişkilerin araştırılması. *Türkiye 20. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, s. 217-225.
- Yaralı O, Akçın N A, Bacak G ve Su O** (2008) *Mekanik Kazıda Kayaçların Petrografik Özellikleri ile Delinebilirlik ve Aşındırıcılık Özellikleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi*. TUBİTAK Final Raporu, ZKÜ Mühendislik Fakültesi, Zonguldak, 139 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Yaşıtlı N E (2008) Dairesel Testereli Kesme Mekanizmasının Sayısal Modellemesi. Doktora Tezi (yayımlanmamış), HÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 146 s.

Yılmaz N G, Yurdakul M and Goktan R M (2007) Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 44 (6): 962-970.

BİBLİYOGRAFYA

Göktan R M (1995) Prediction of drag bit cutting force in hard rocks. *Proc. of the 3rd Int. Symp. on Mine Mechanization Automation*, Golden, Colorado, 1: 10-31/10-38.

Hurt K G and Evans I (1981) Point attack tools. *Mining Engineer*, 141: 673-675.

McFeat-Smith I and Fowell R J (1977) Correlation of rock properties and the cutting performance of tunnelling machines. *Proc. of a Conference on Rock Engineering*, England, pp. 581-602.

McFeat-Smith I and Fowell R J (1979) The selection and application of roadheaders for rock tunneling. *Proc. of Rapid Excavation and Tunneling Conf.*, eds. A. C. Maevis and W. Hustrulid, Atlanta, pp. 261-280.

EK AÇIKLAMALAR A

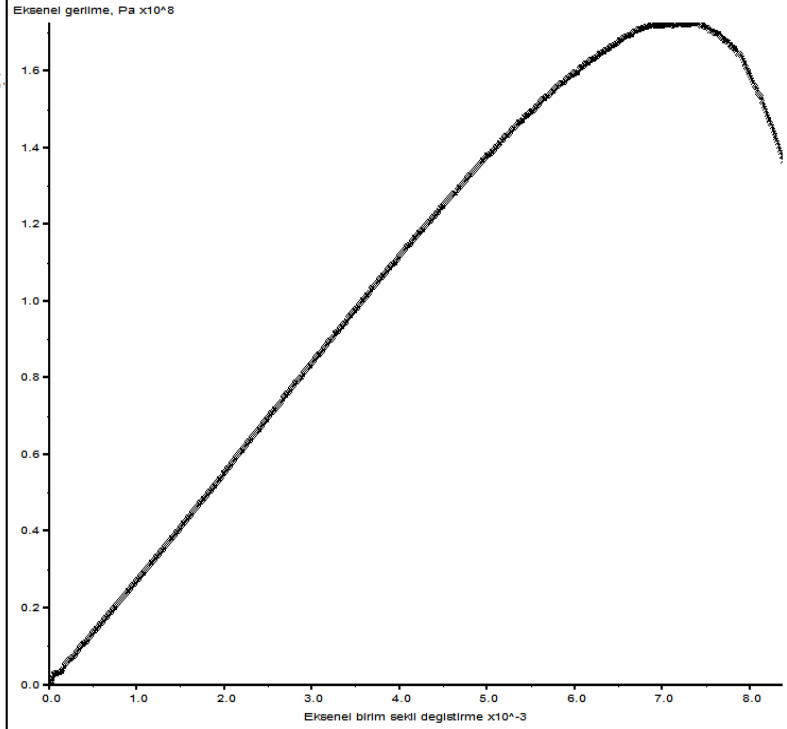
KAYAÇLARIN MİKRO ÖZELLİKLERİNİN KALİBRASYONU SONUCU ÇİZİLEN GRAFİKLER

PFC3D 3.10
Step 33949 15:27:39 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.098e+005 <-> 1.727e+008
Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
-1.737e-007 <-> 8.369e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



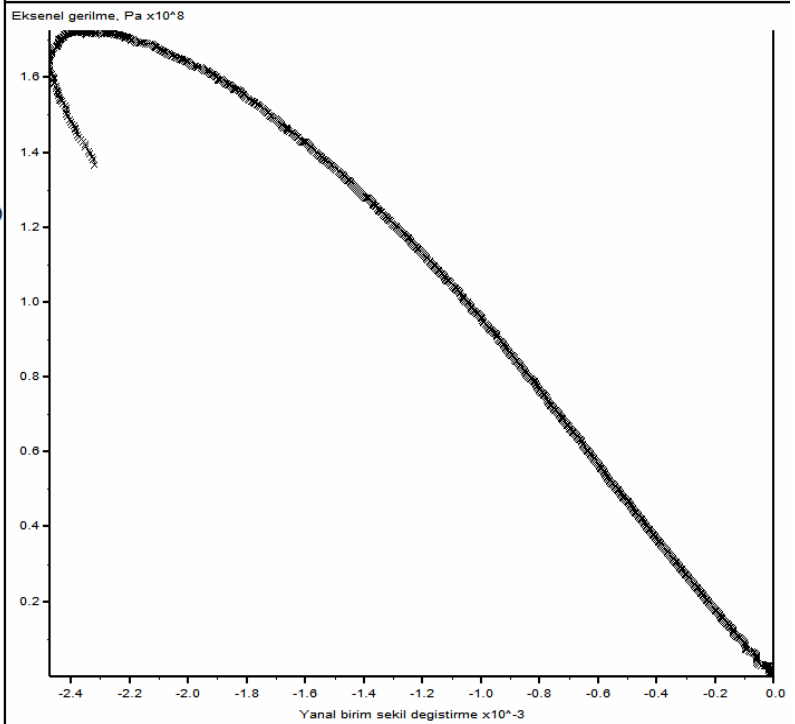
Şekil A.1 Kumtaşı-2 kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

PFC3D 3.10
Step 33949 16:40:14 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.098e+005 <-> 1.727e+008
Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-2.475e-003 <-> 3.996e-007

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.2 Kumtaşı-2 kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

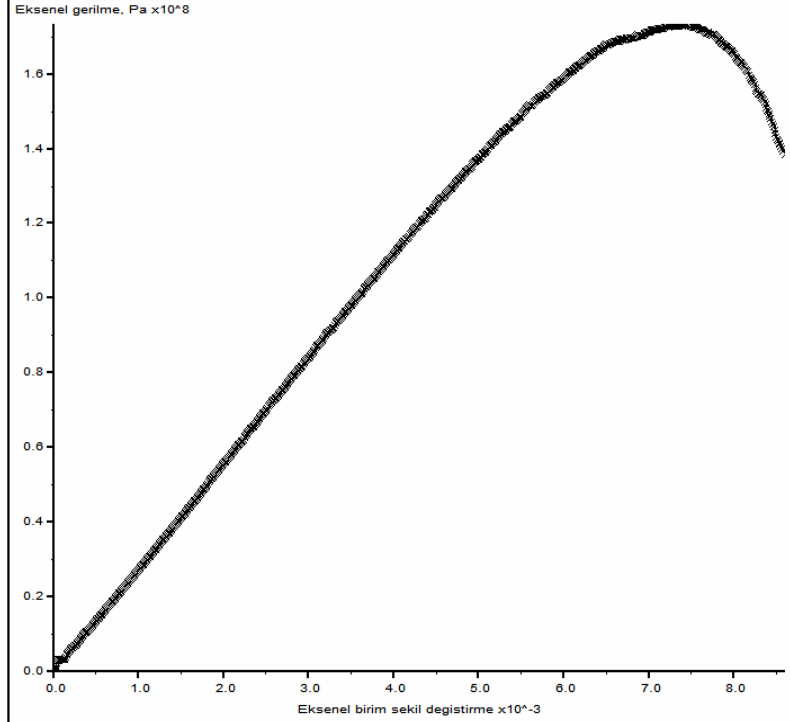
PFC3D 3.10
Step 36621 22:52:24 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.067e+005 <-> 1.736e+008

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
2.628e-007 <-> 8.599e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.3 Kumtaşı-2 kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değıştirme grafiğı.

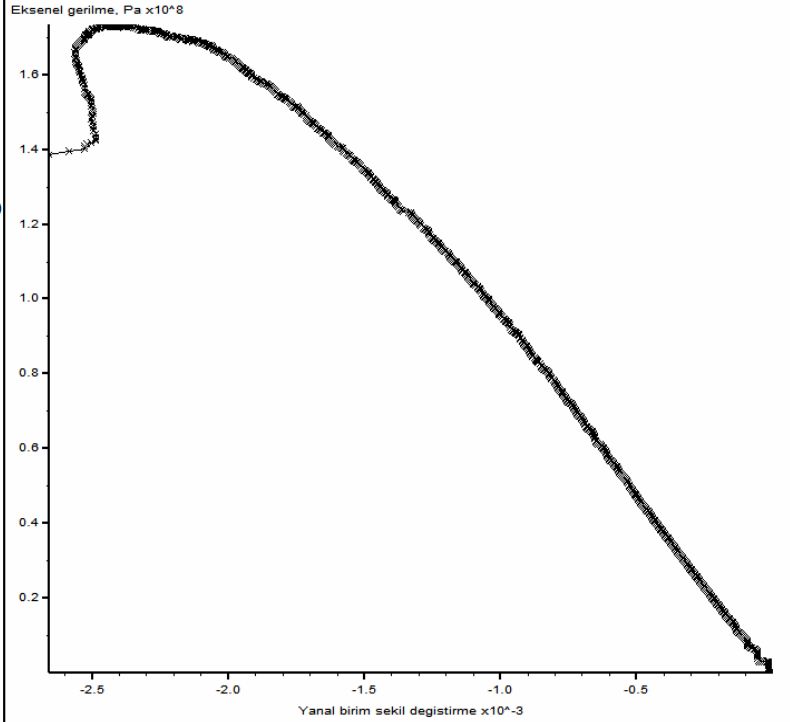
PFC3D 3.10
Step 36621 22:53:44 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.067e+005 <-> 1.736e+008

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-2.660e-003 <-> -3.490e-008

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.4 Kumtaşı-2 kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değıştirme grafiğı.

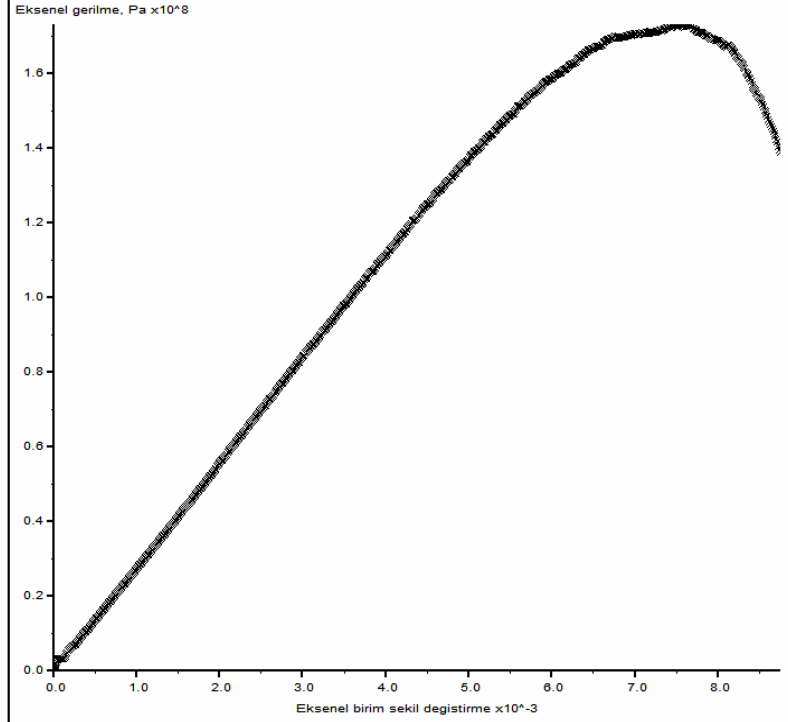
PFC3D 3.10
Step 32811 16:47:36 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.017e+005 <-> 1.734e+008

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
2.187e-007 <-> 8.748e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.5 Kumtaşı-2 kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

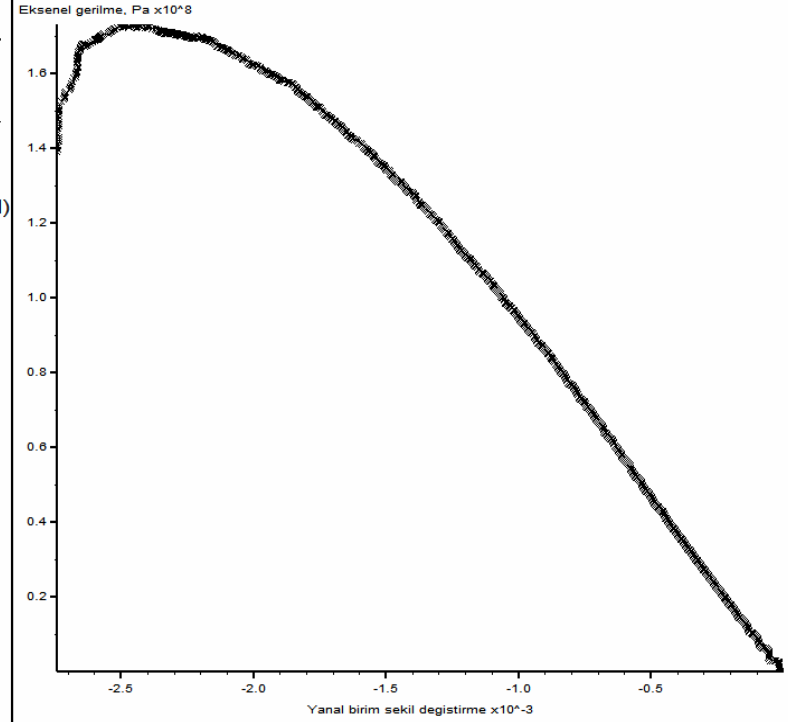
PFC3D 3.10
Step 32811 16:49:12 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.017e+005 <-> 1.734e+008

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-2.743e-003 <-> -1.384e-007

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.6 Kumtaşı-2 kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

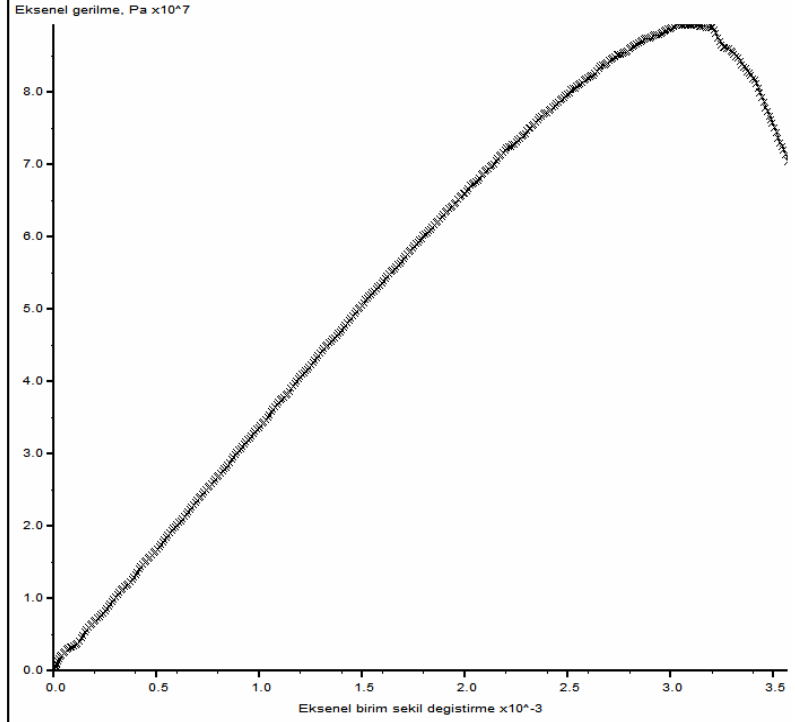
PFC3D 3.10
Step 25982 16:52:35 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.106e+005 <-> 8.952e+007

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
1.255e-007 <-> 3.568e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.7 Kumtaşı-3 kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

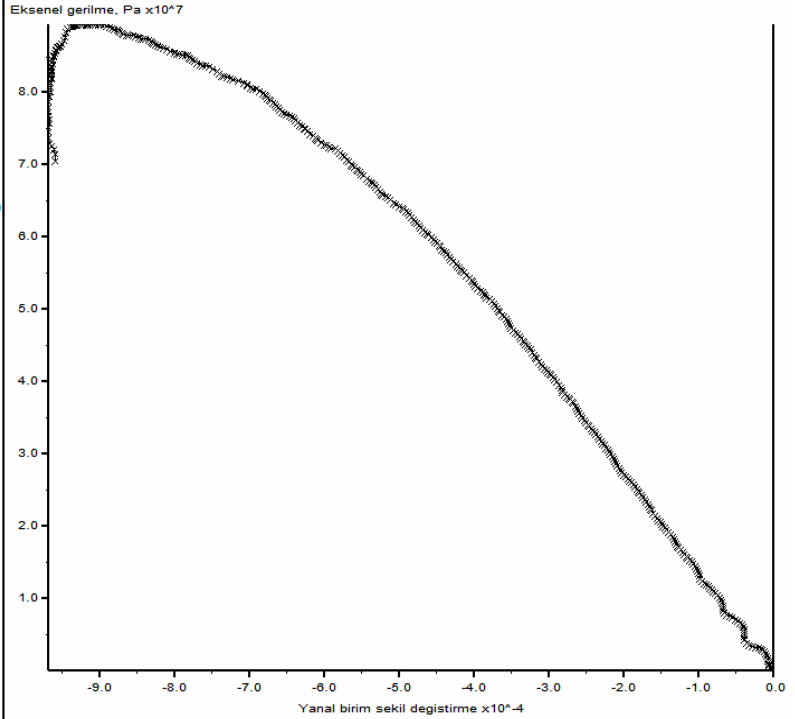
PFC3D 3.10
Step 25982 16:55:48 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.106e+005 <-> 8.952e+007

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-9.694e-004 <-> 7.898e-007

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.8 Kumtaşı-3 kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

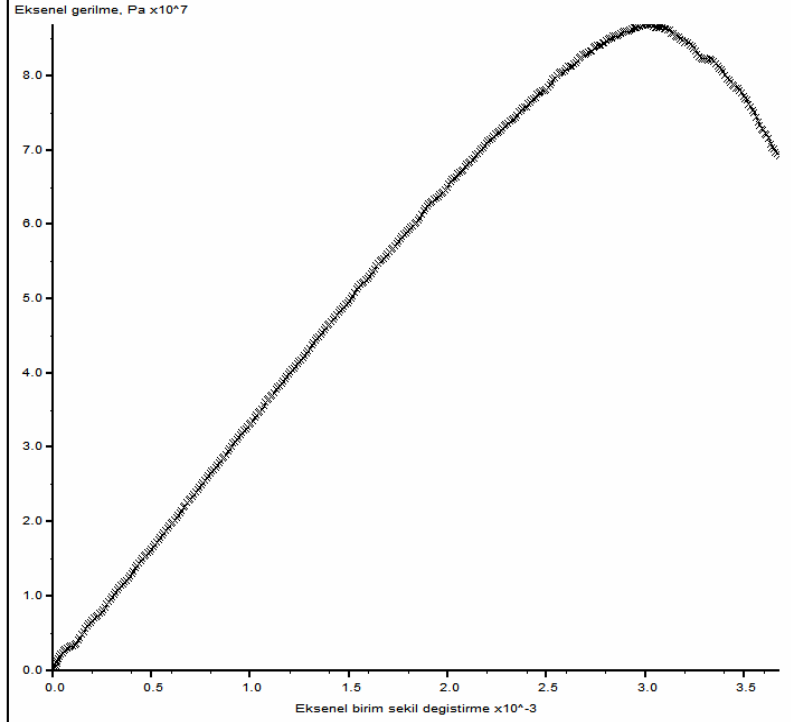
PFC3D 3.10
Step 24795 16:57:59 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.031e+005 <-> 8.699e+007

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
5.790e-008 <-> 3.678e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.9 Kumtaşı-3 kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

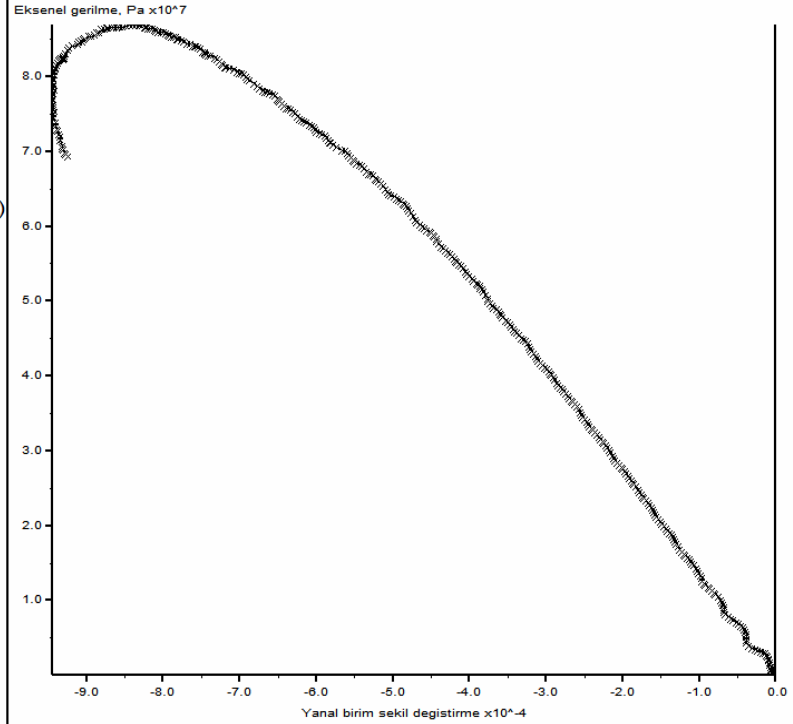
PFC3D 3.10
Step 24795 16:59:06 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.031e+005 <-> 8.699e+007

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-9.454e-004 <-> 5.571e-008

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.10 Kumtaşı-3 kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

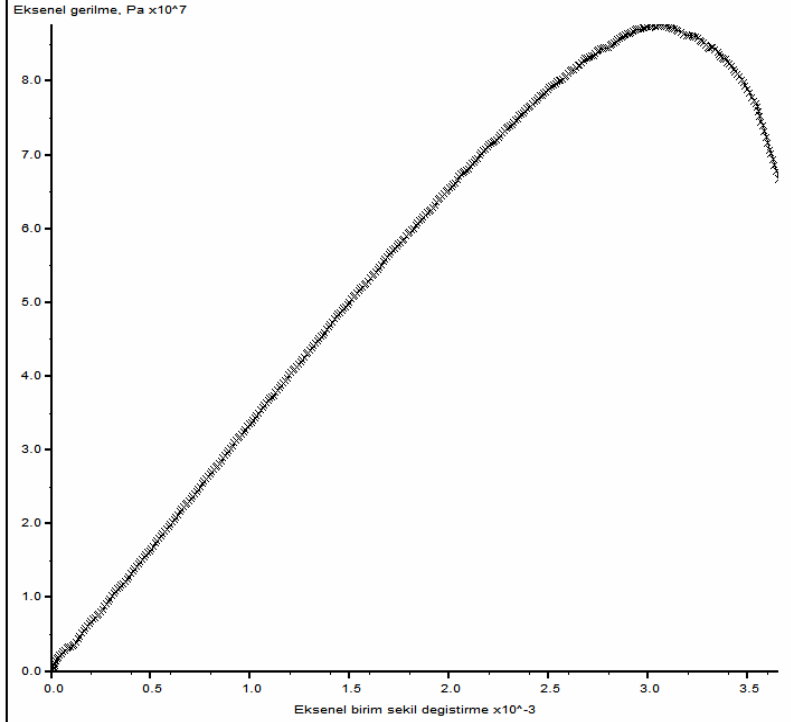
PFC3D 3.10
Step 26058 17:01:22 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
9.901e+004 <-> 8.776e+007

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
2.572e-008 <-> 3.652e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.11 Kumtaşı-3 kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

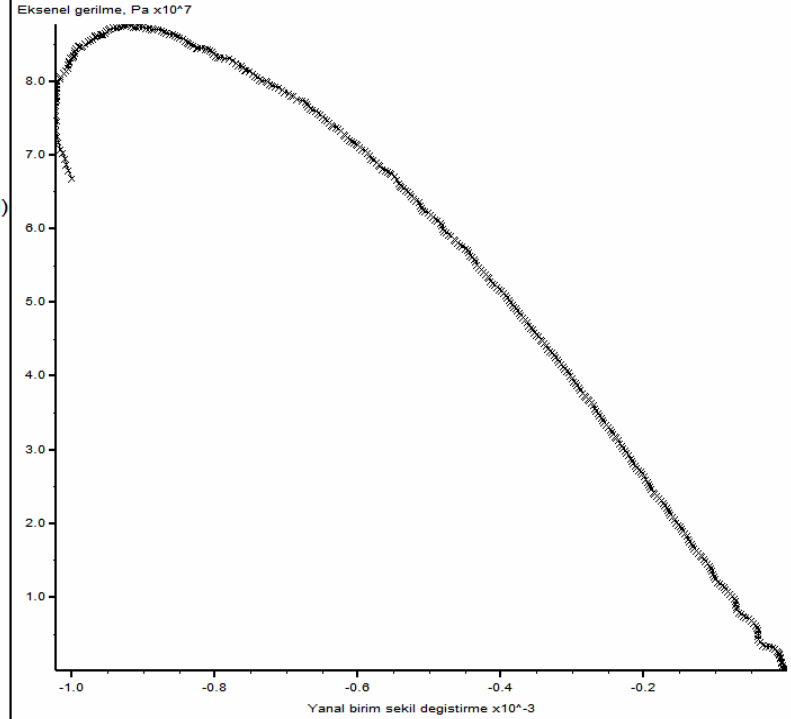
PFC3D 3.10
Step 26058 17:02:42 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
9.901e+004 <-> 8.776e+007

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-1.023e-003 <-> -1.356e-008

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.12 Kumtaşı-3 kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

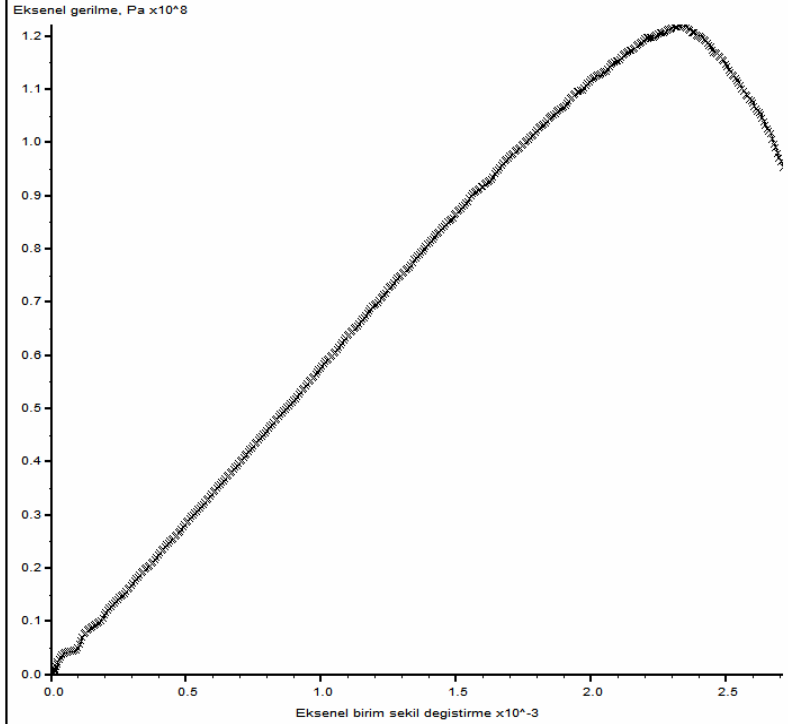
PFC3D 3.10
Step 23510 17:13:21 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.067e+005 <-> 1.223e+008

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
-7.447e-008 <-> 2.712e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.13 Kireçtaşı kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

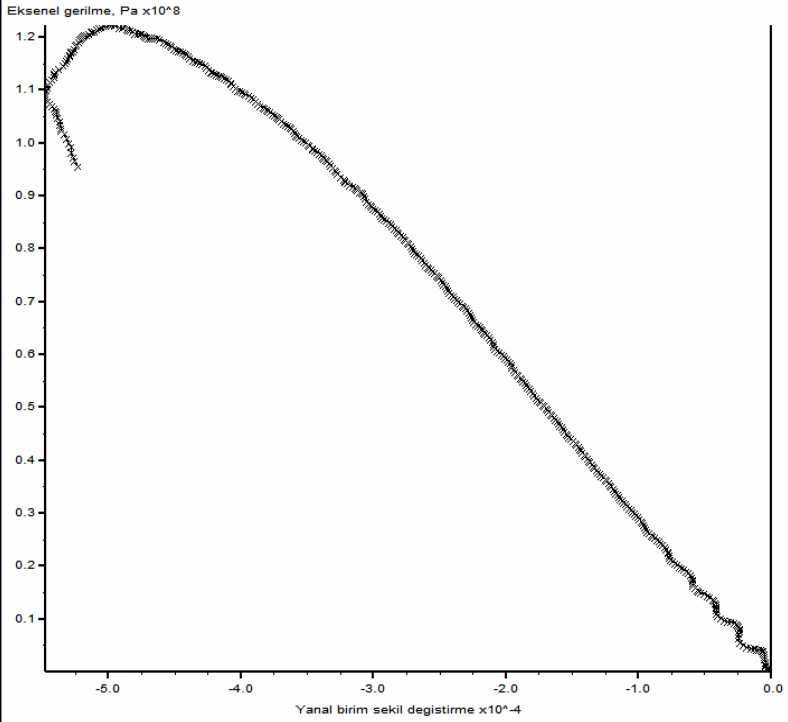
PFC3D 3.10
Step 23510 17:14:24 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.067e+005 <-> 1.223e+008

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-5.480e-004 <-> 6.581e-007

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.14 Kireçtaşı kayacının 3 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

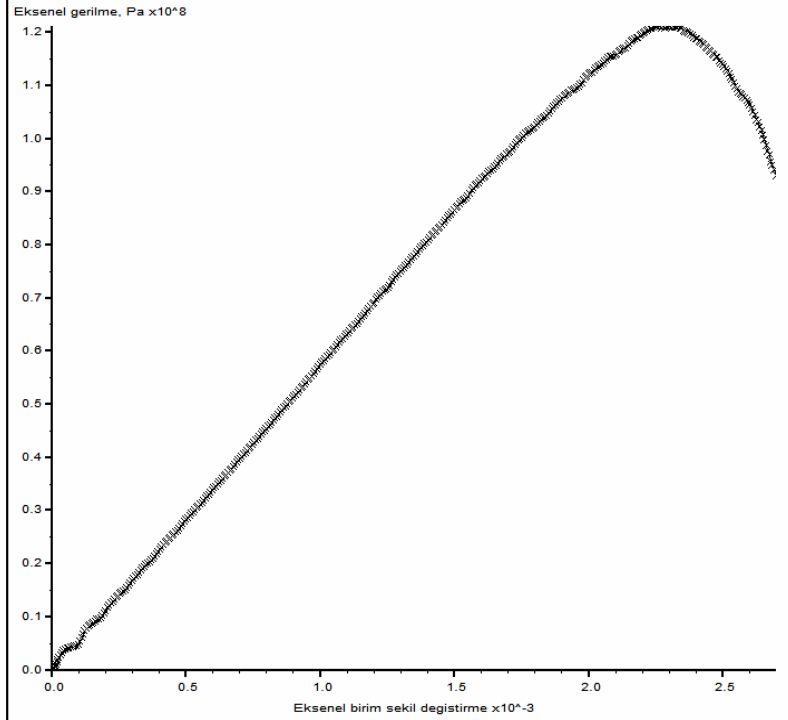
PFC3D 3.10
Step 35188 17:15:18 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.074e+005 <-> 1.212e+008

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
1.431e-009 <-> 2.697e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.15 Kireçtaşı kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

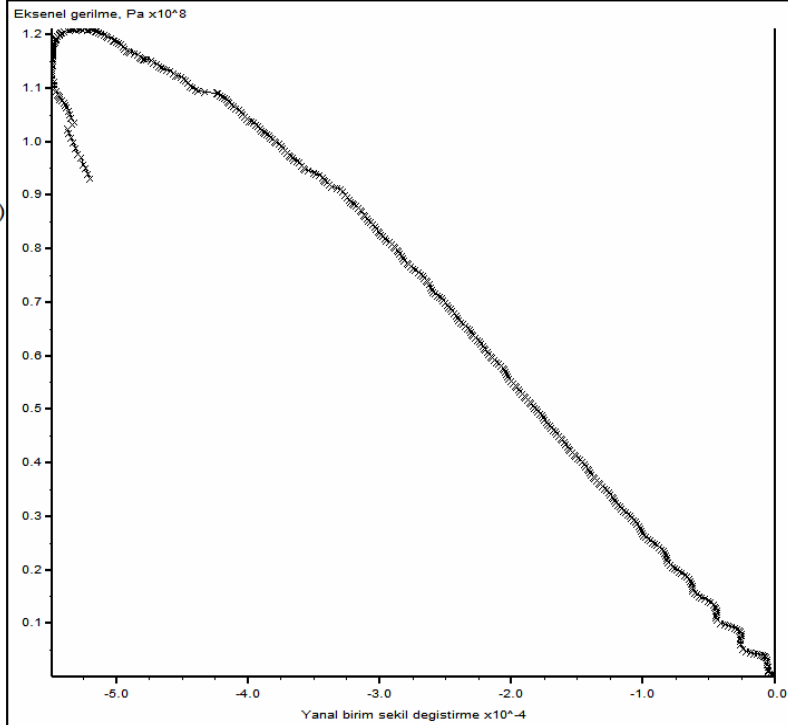
PFC3D 3.10
Step 35188 17:16:21 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.074e+005 <-> 1.212e+008

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-5.492e-004 <-> 8.300e-007

Zonguldak Karaelmas University
Department of Minina Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.16 Kireçtaşı kayacının 6 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

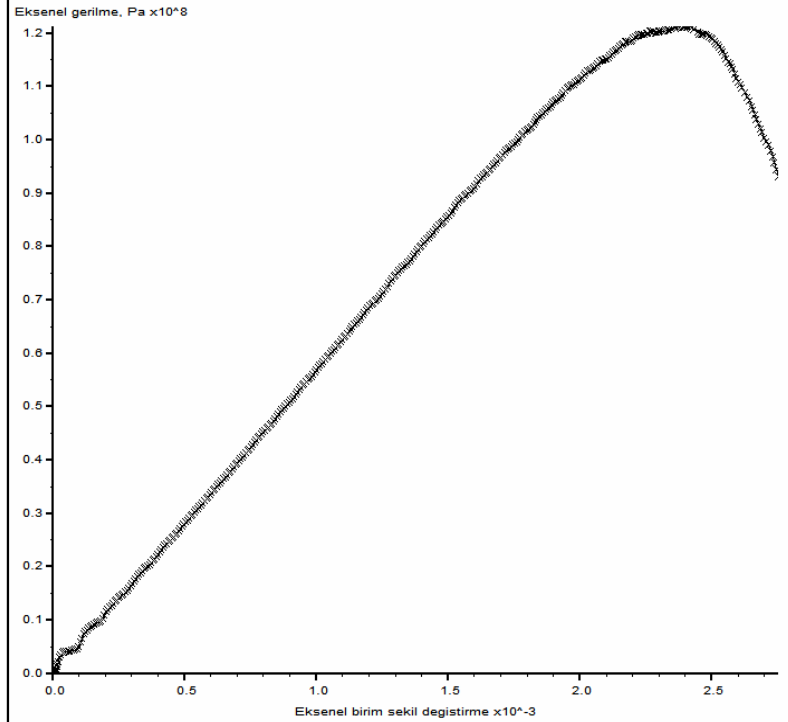
PFC3D 3.10
Step 25341 17:18:13 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Eksenel birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.050e+005 <-> 1.213e+008

Vs.
Rev 211 et3_seyy (FISH Symbol)
3.927e-008 <-> 2.751e-003

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



Şekil A.17 Kireçtaşı kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği.

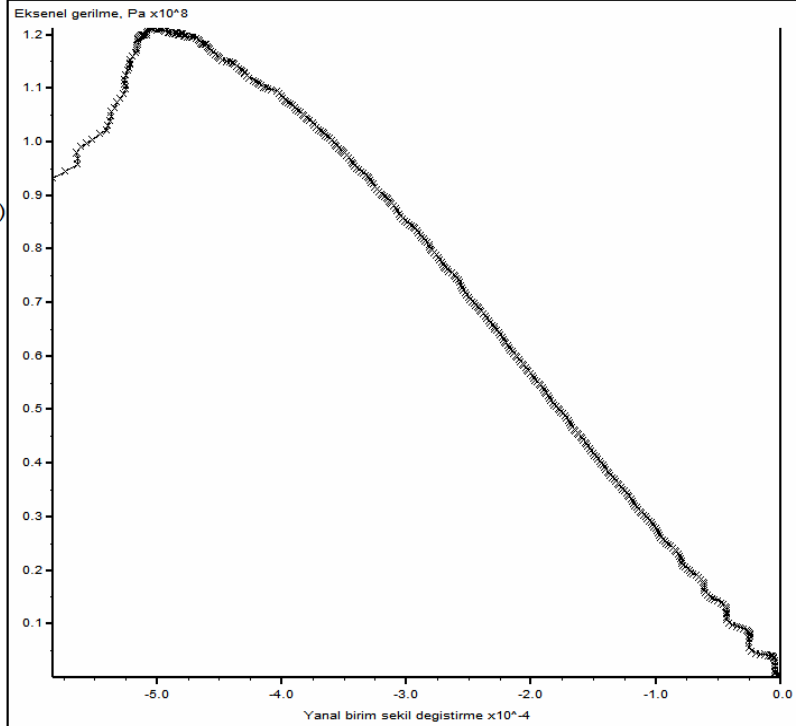
PFC3D 3.10
Step 25341 17:18:58 Mon Jul 06 2009

Eksenel ger.-Yanal birim sek. deg.
Rev 14 et3_wsyy (FISH Symbol)
Linestyle
1.050e+005 <-> 1.213e+008

Vs.
Rev 213 et3_ave_xx_zz (FISH Symbol)
-5.840e-004 <-> 5.749e-007

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering

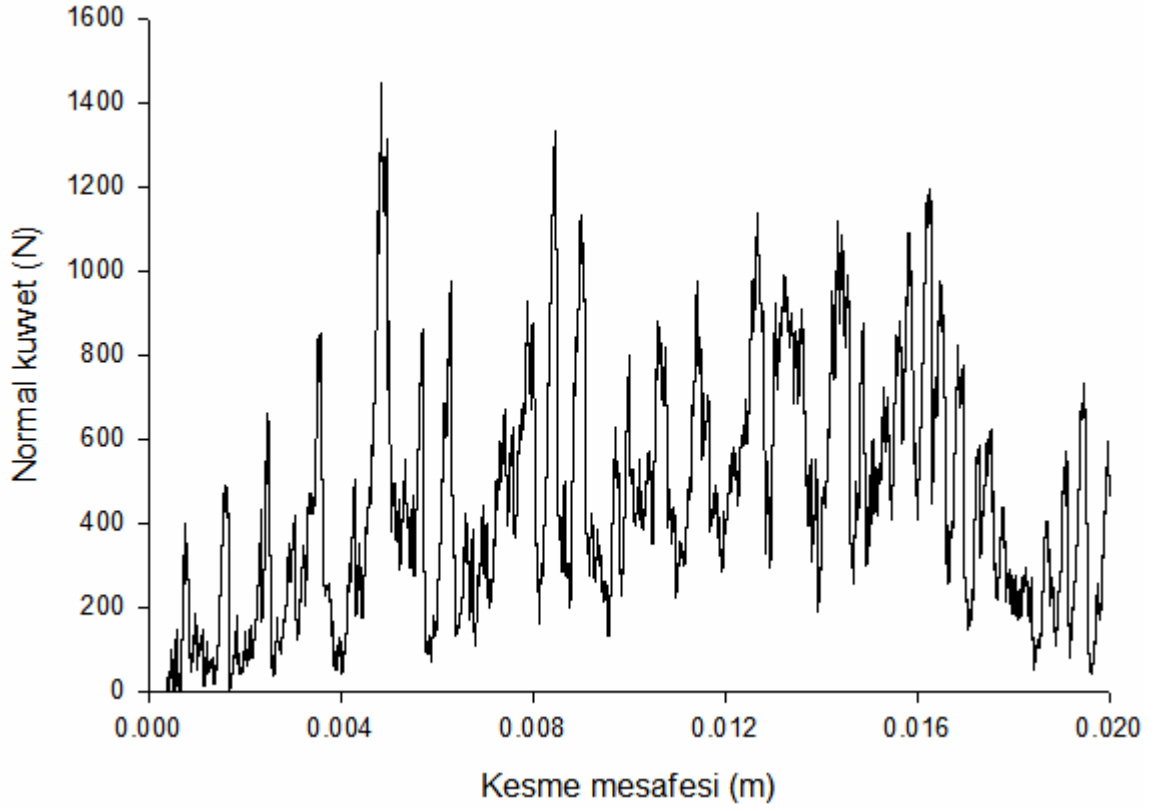
Job Title: Tek Eksenli Basinc Dayanimi Deneyi



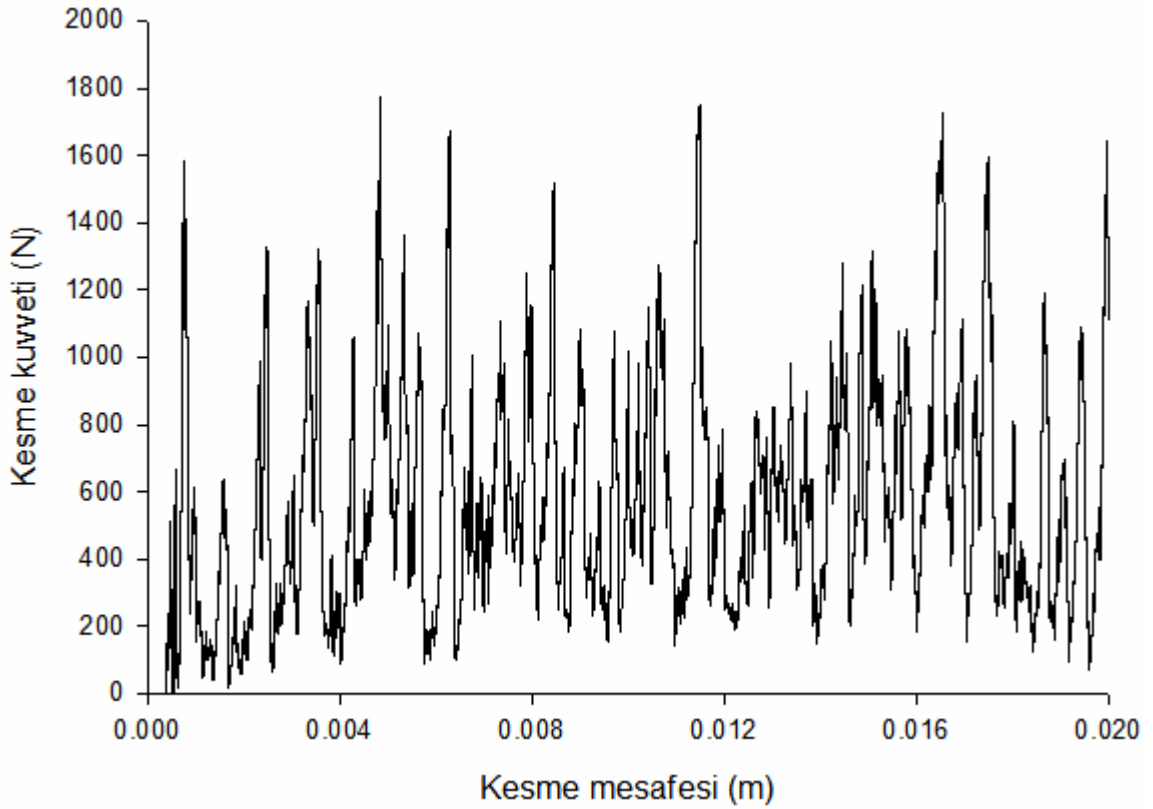
Şekil A.18 Kireçtaşı kayacının 9 mm kesme derinliğinde mikro özelliklerinin kalibrasyonu sonucu elde edilen eksenel gerilme-yanal birim şekil değiştirme grafiği.

EK AÇIKLAMALAR B

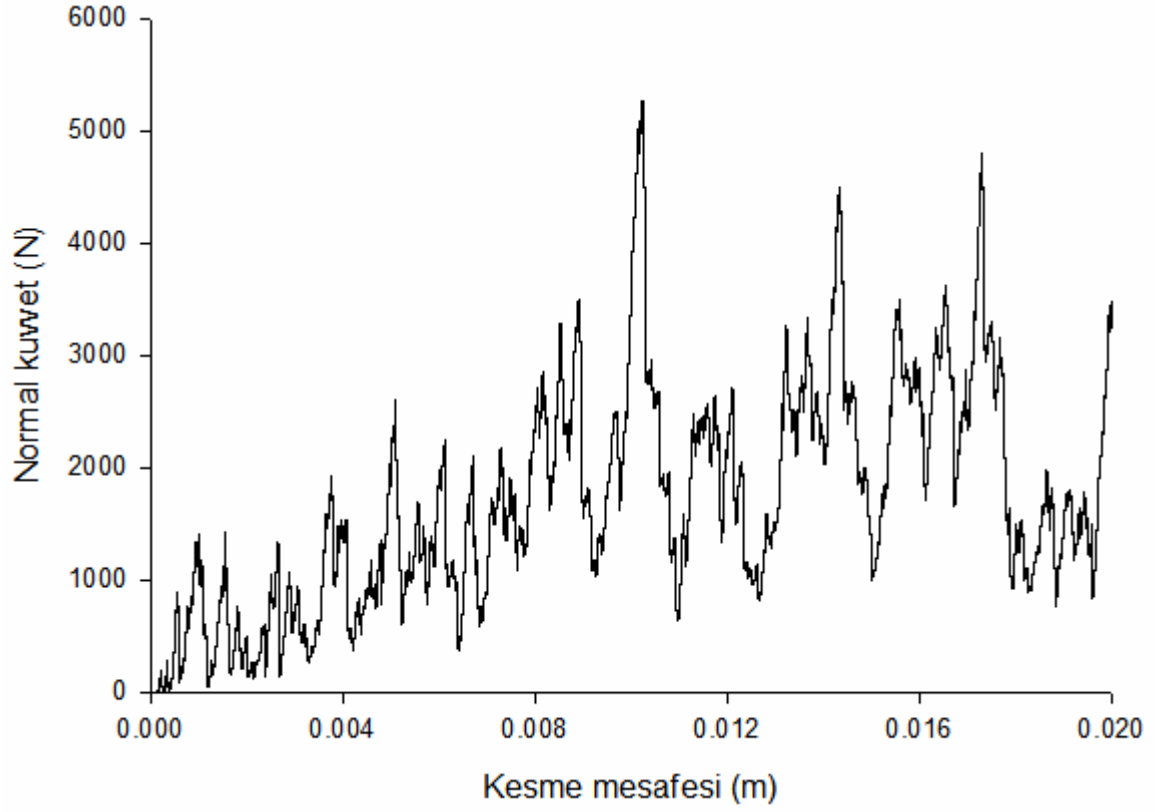
KAYAÇ KESME MEKANİZMALARININ PFC^{3D}'DE MODELLENMESİ SONUCU ÇİZİLEN KESME KUVVETİ GRAFİKLERİ



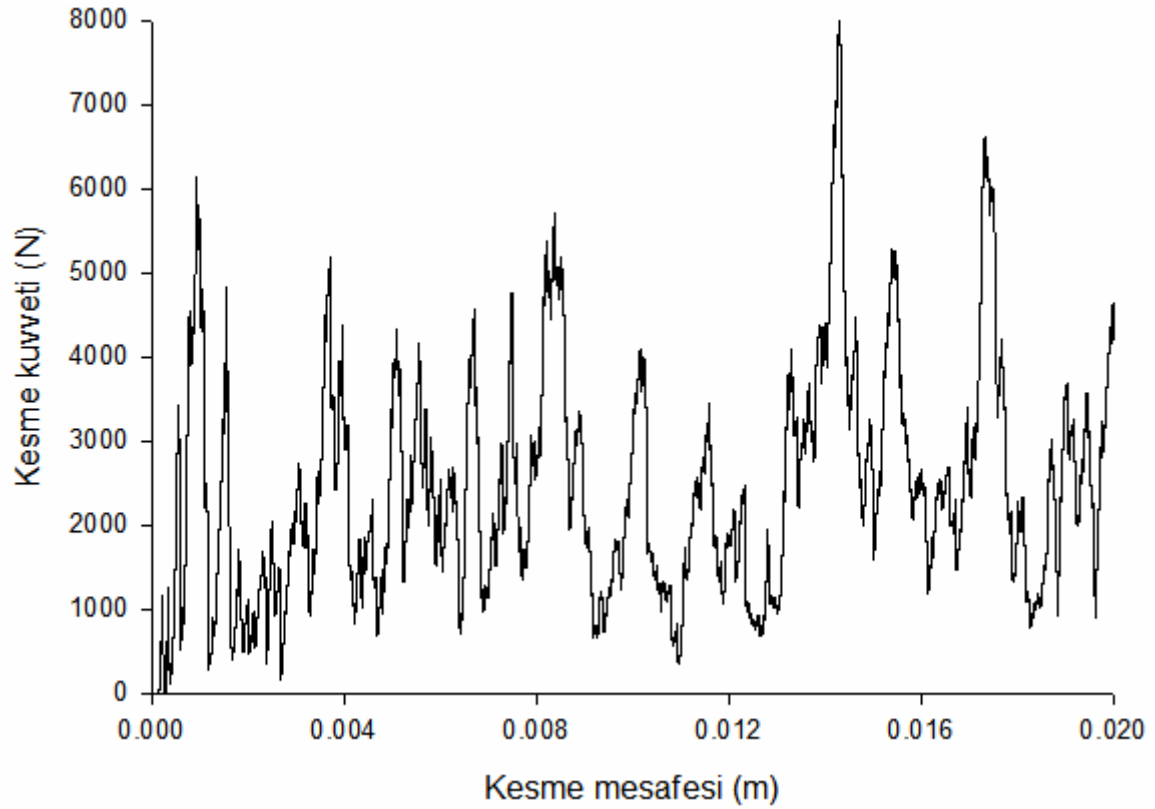
Şekil B.1 Kumtaşı-2 kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



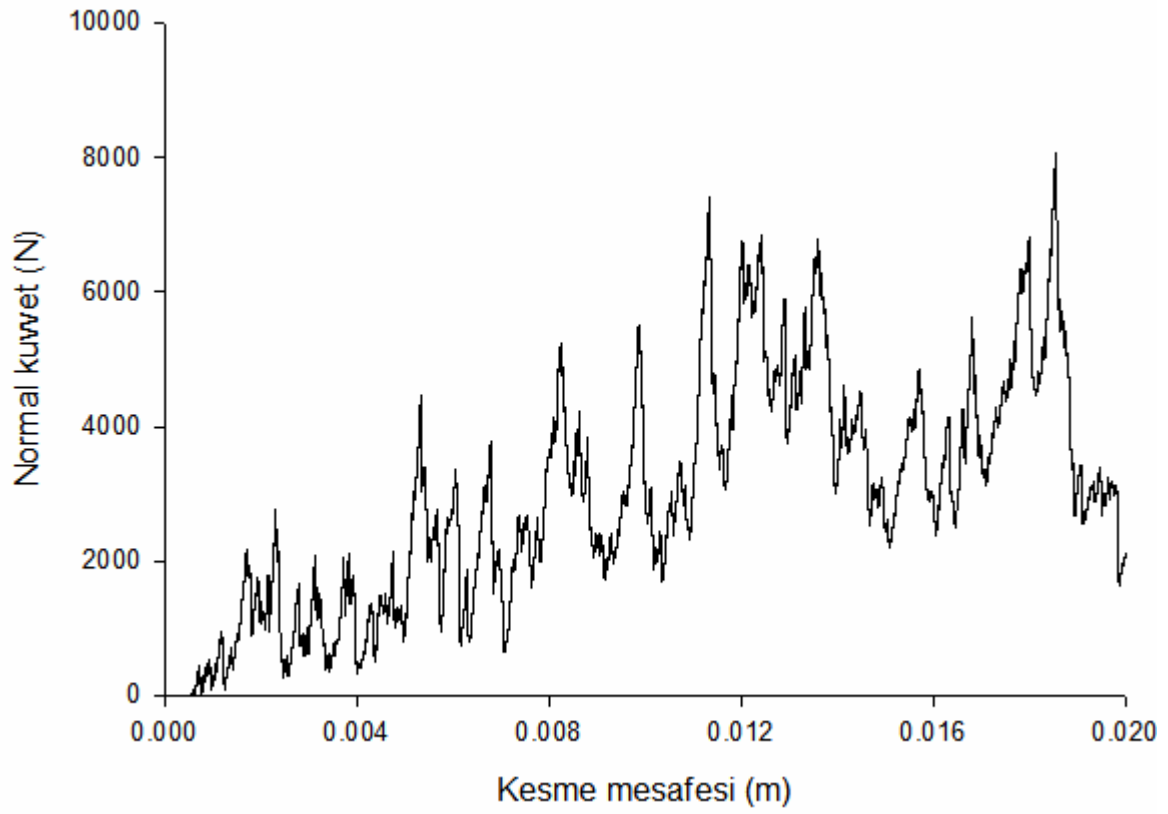
Şekil B.2 Kumtaşı-2 kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.



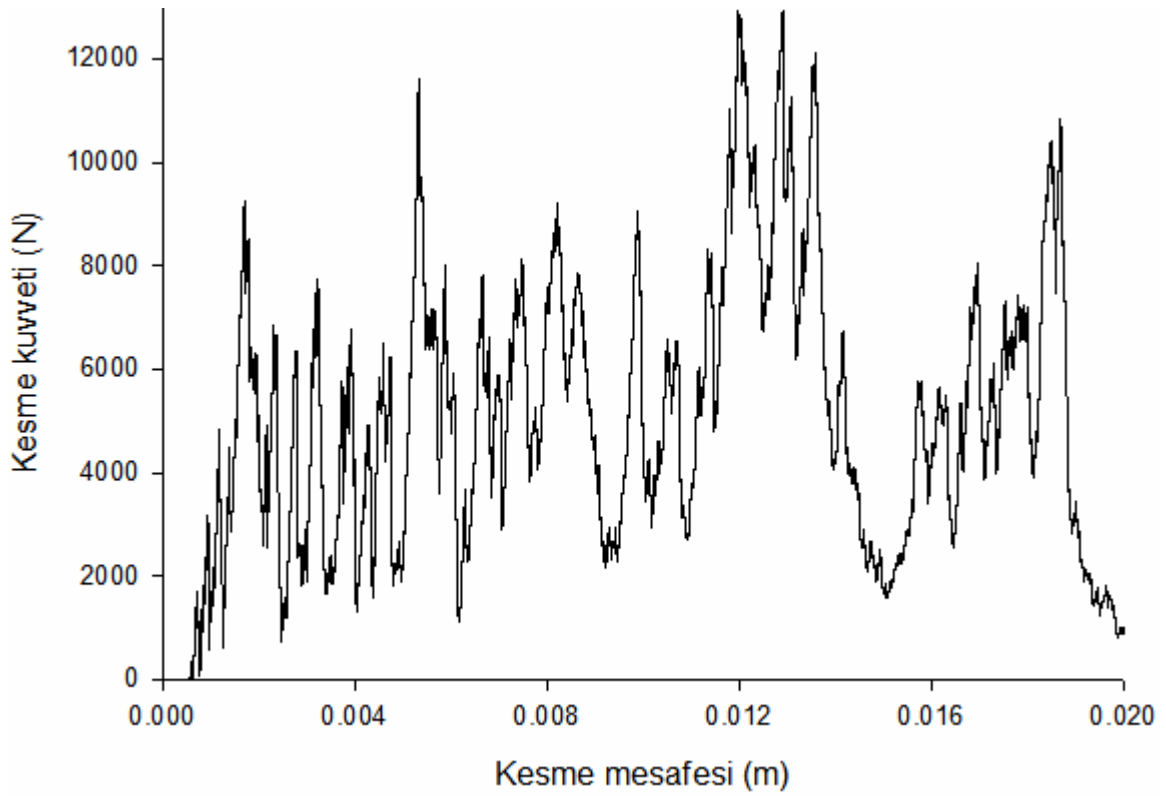
Şekil B.3 Kumtaşı-2 kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



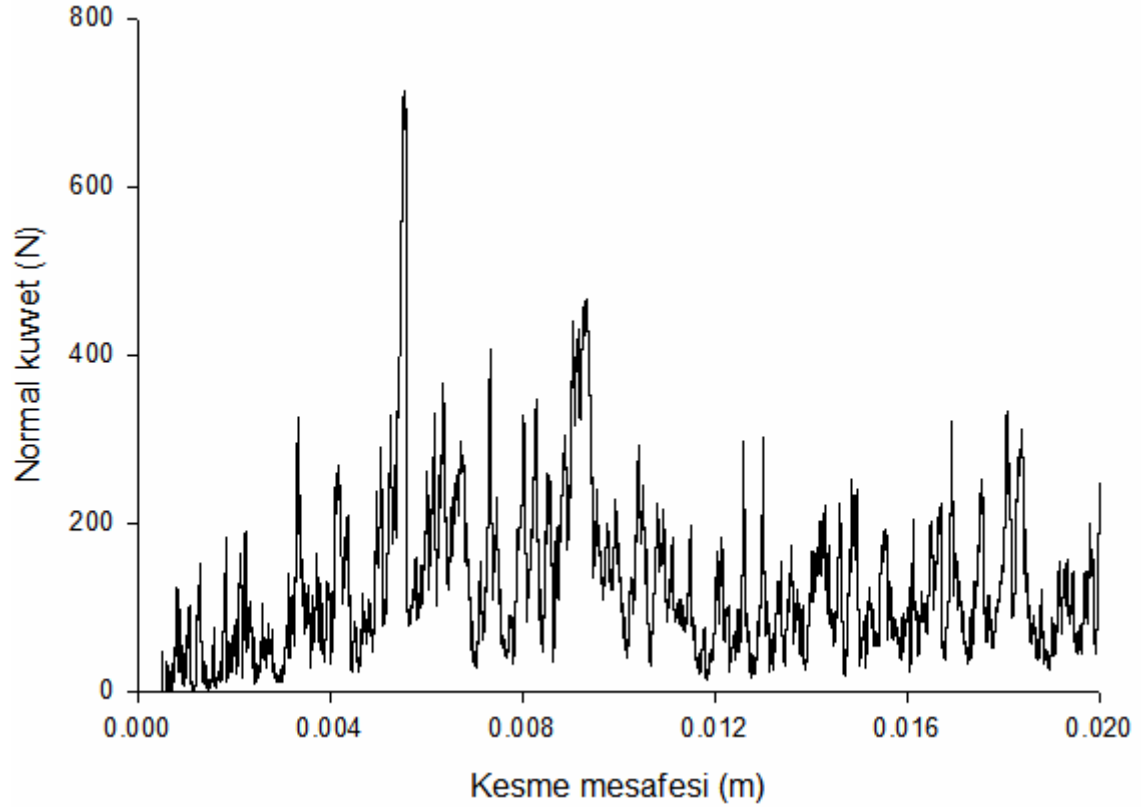
Şekil B.4 Kumtaşı-2 kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.



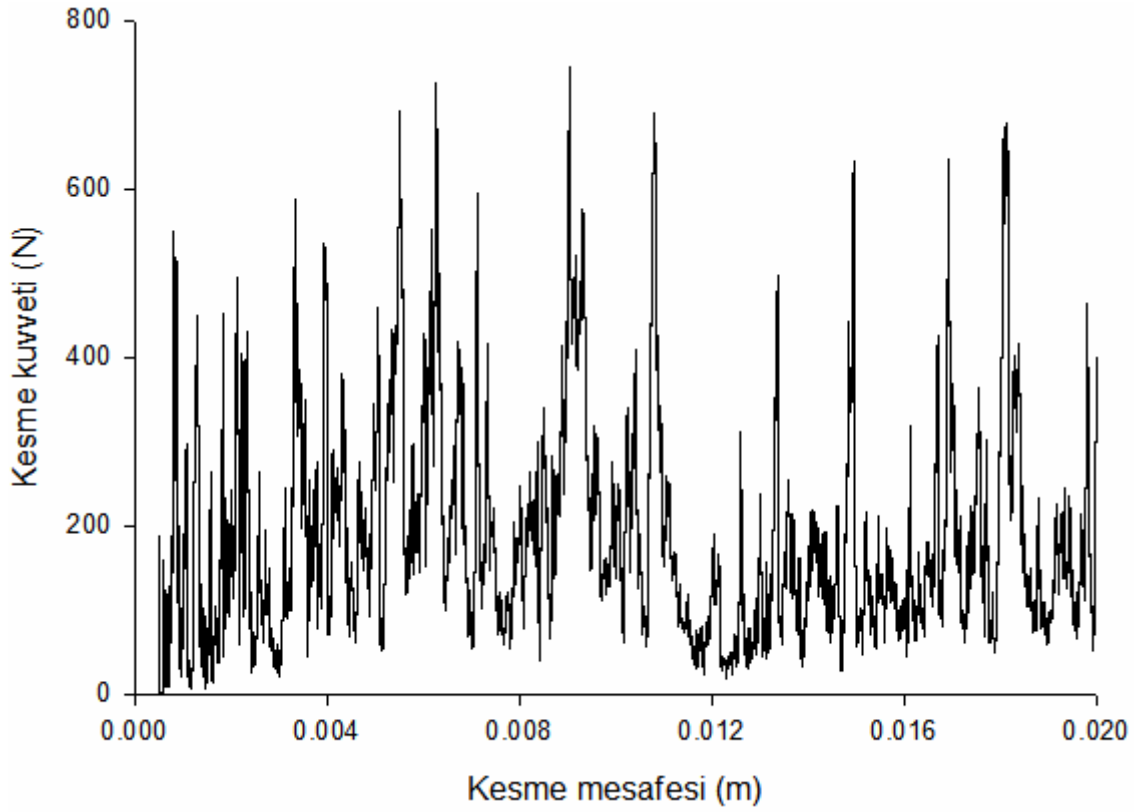
Şekil B.5 Kumtaşı-2 kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



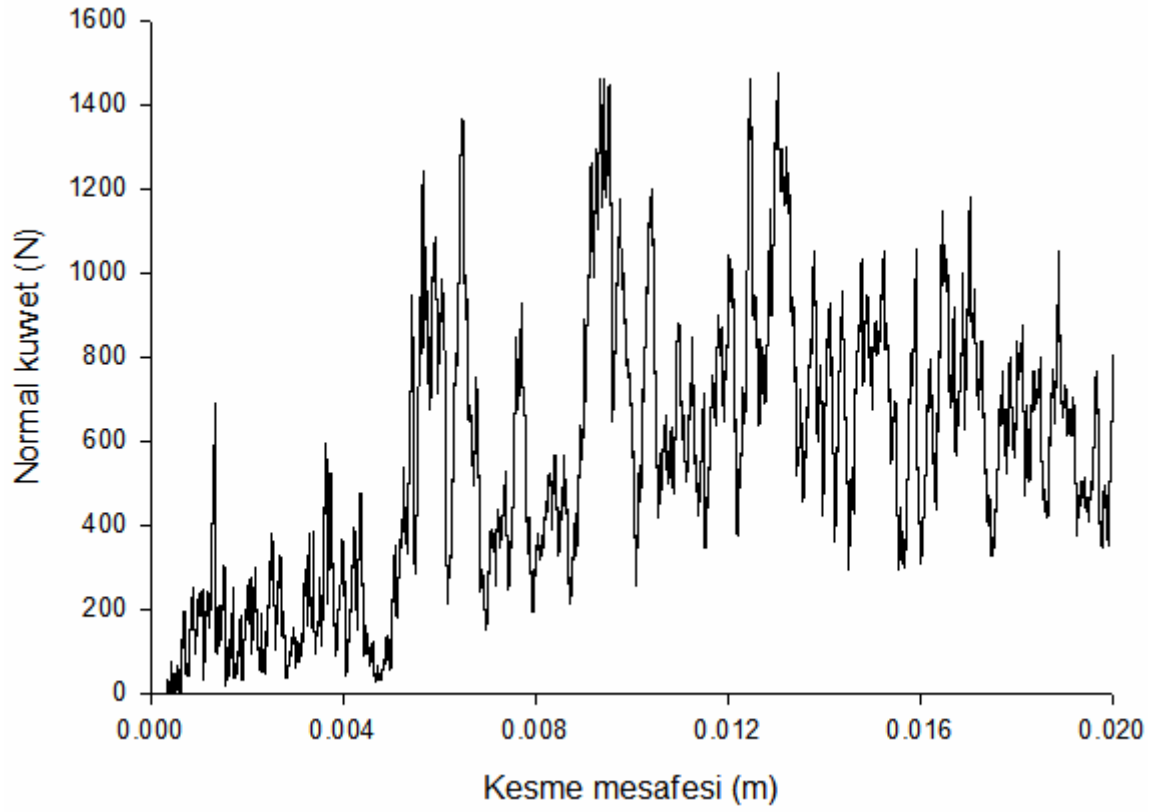
Şekil B.6 Kumtaşı-2 kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.



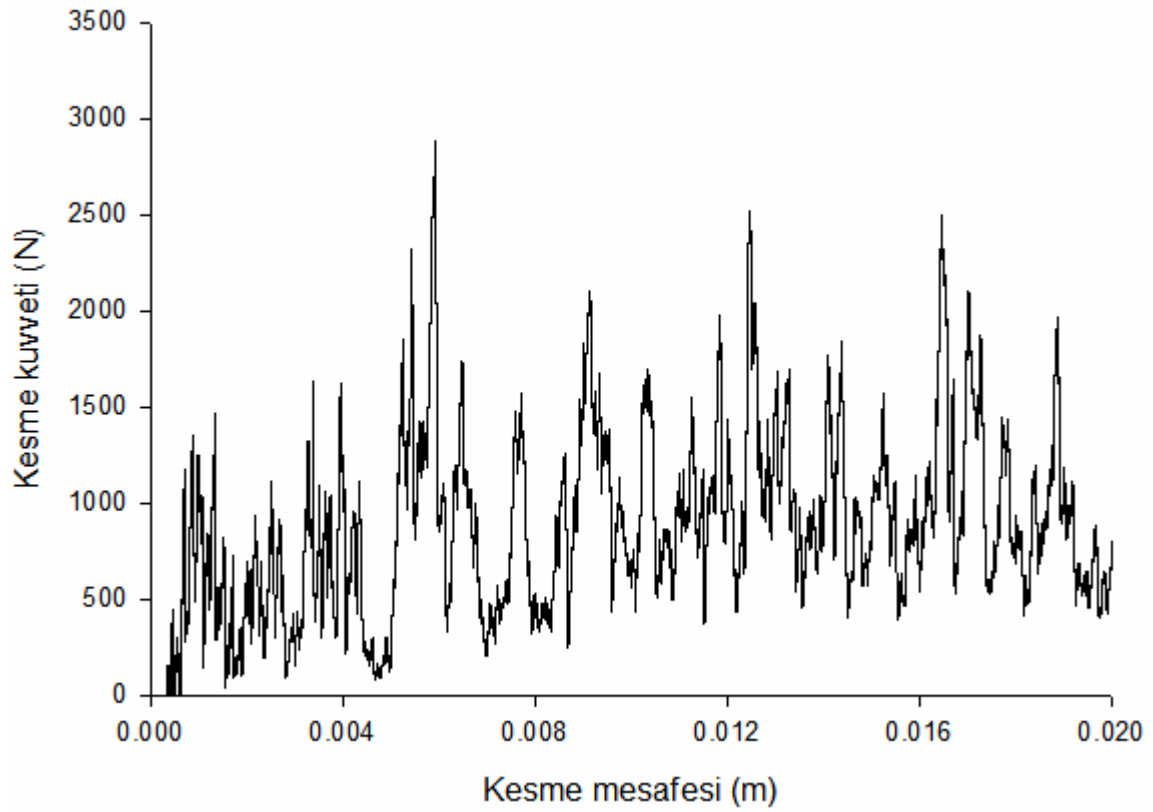
Şekil B.7 Kumtaşı-3 kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



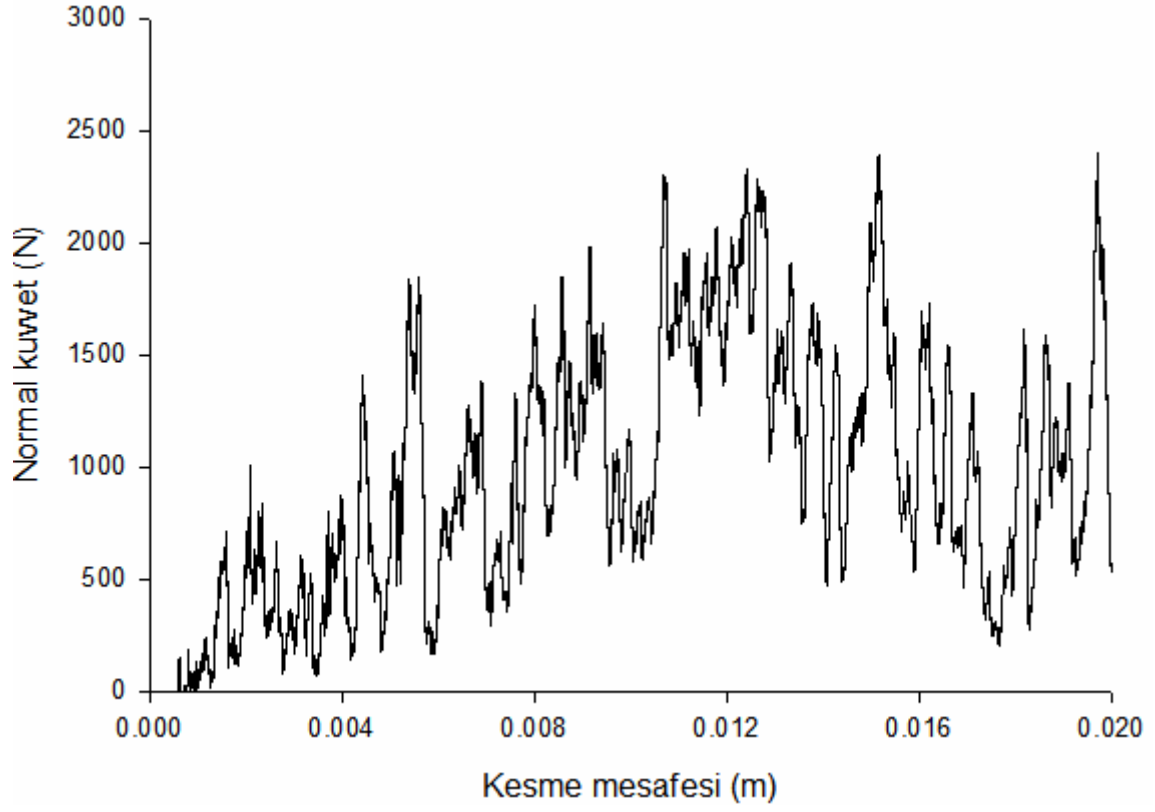
Şekil B.8 Kumtaşı-3 kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.



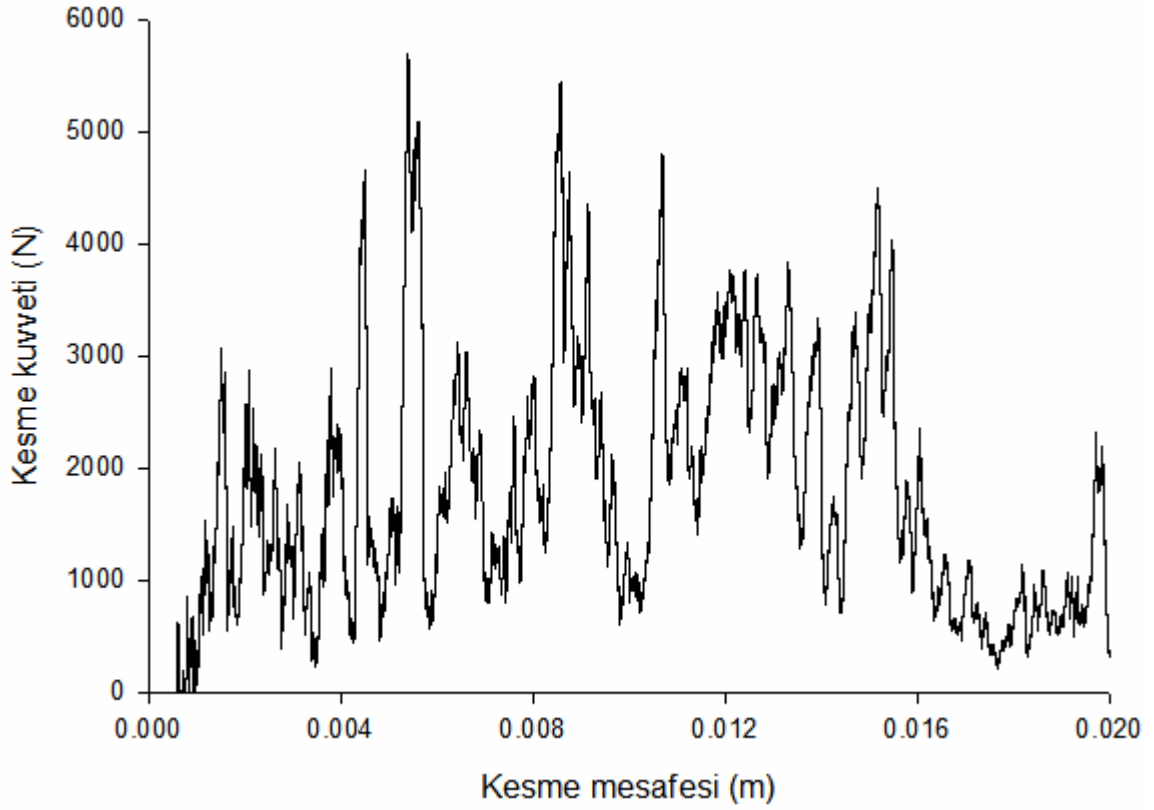
Şekil B.9 Kumtaşı-3 kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



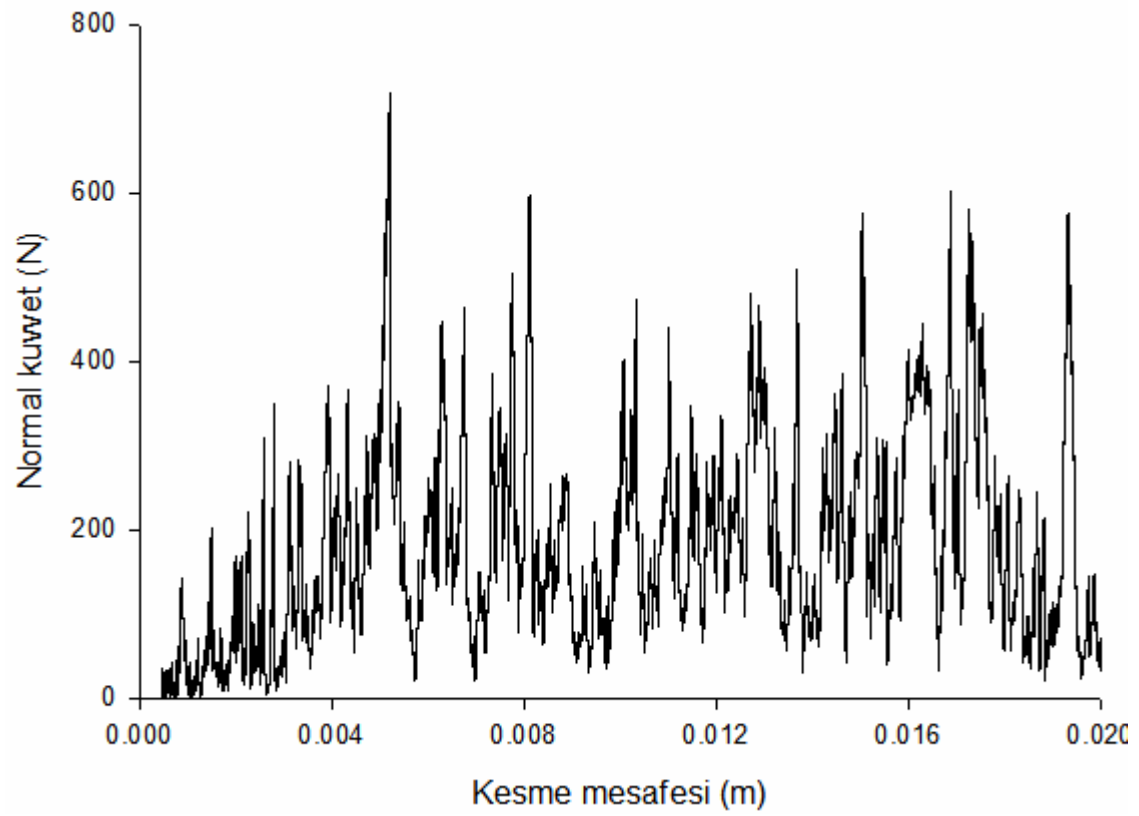
Şekil B.10 Kumtaşı-3 kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.



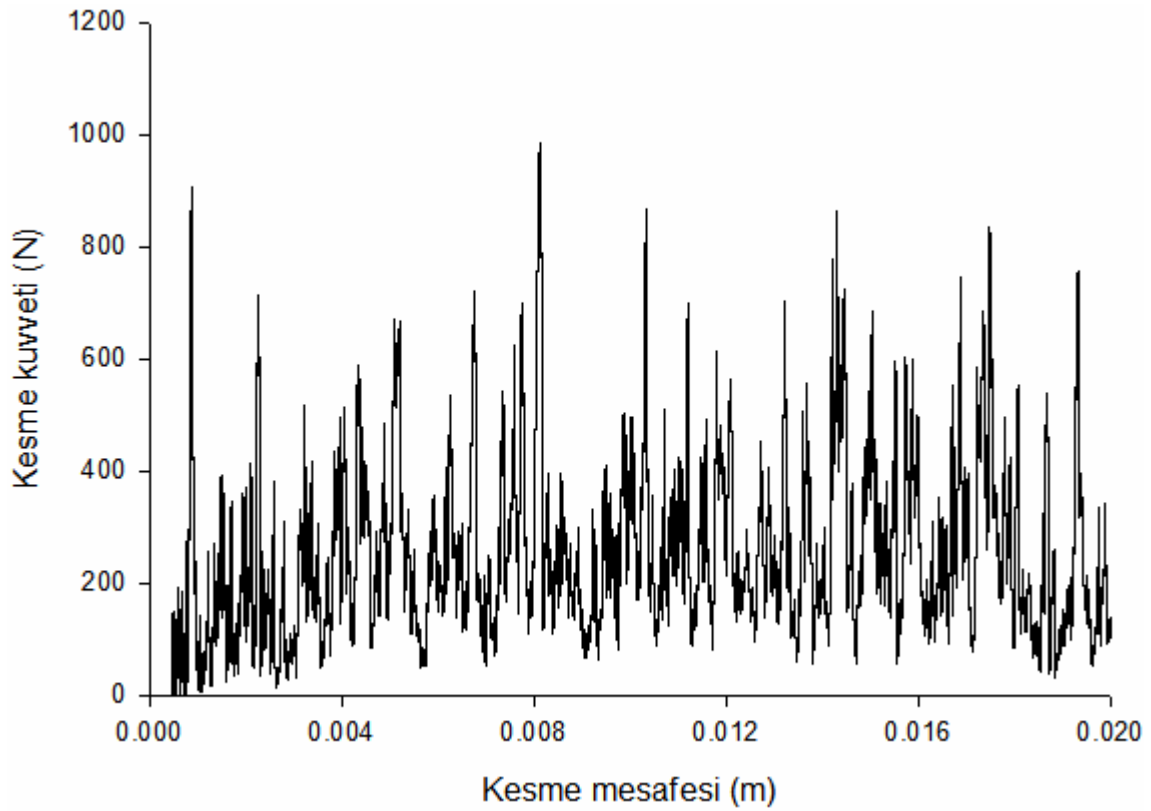
Şekil B.11 Kumtaşı-3 kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



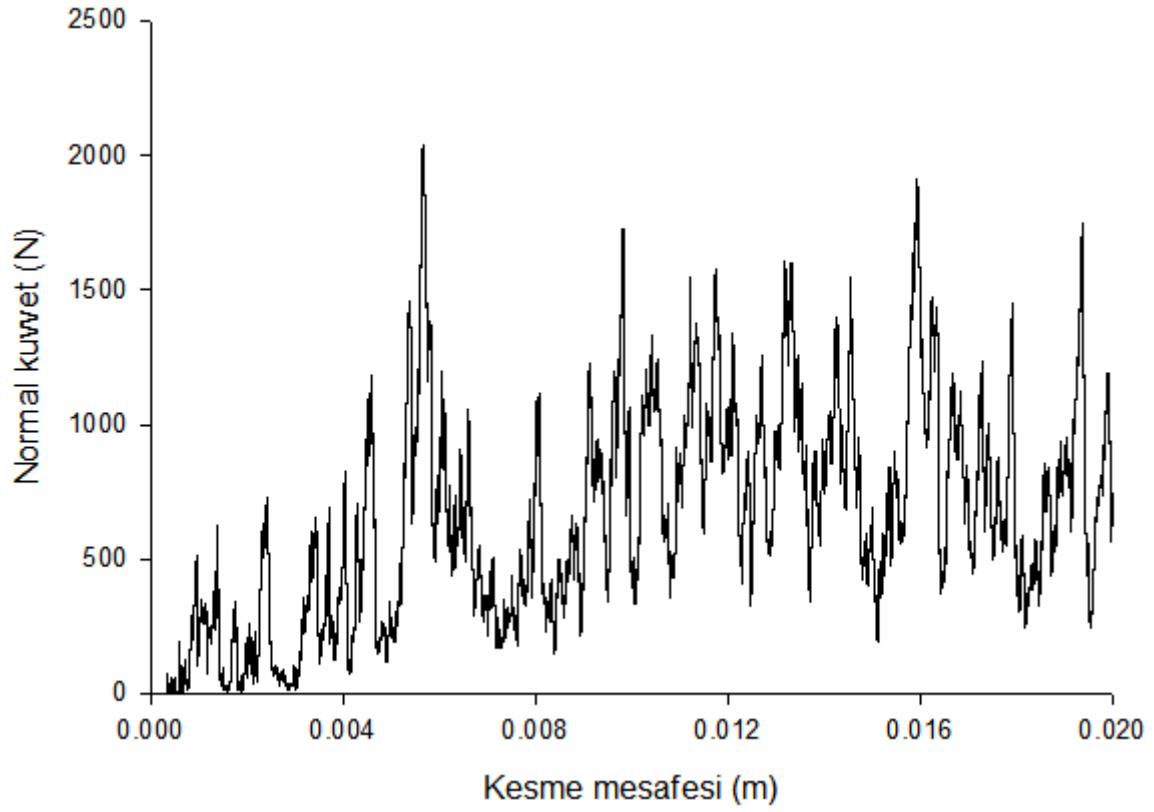
Şekil B.12 Kumtaşı-3 kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.



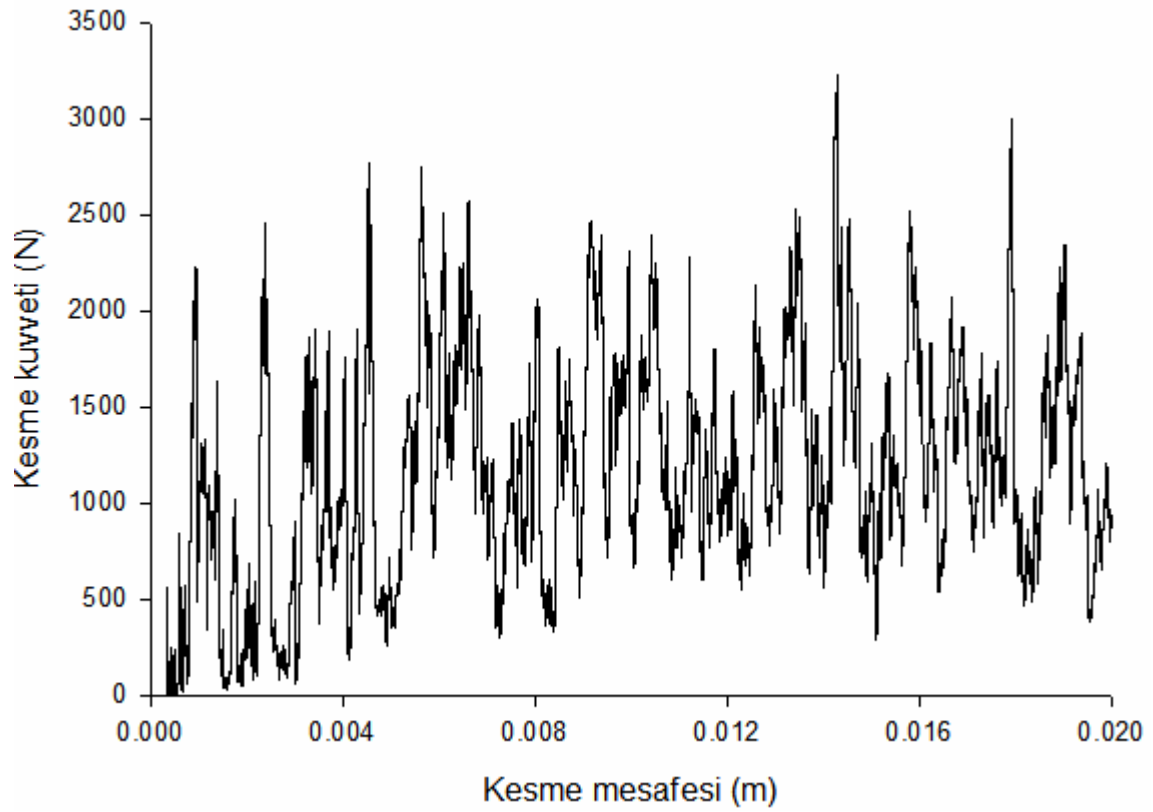
Şekil B.13 Kireçtaşı kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



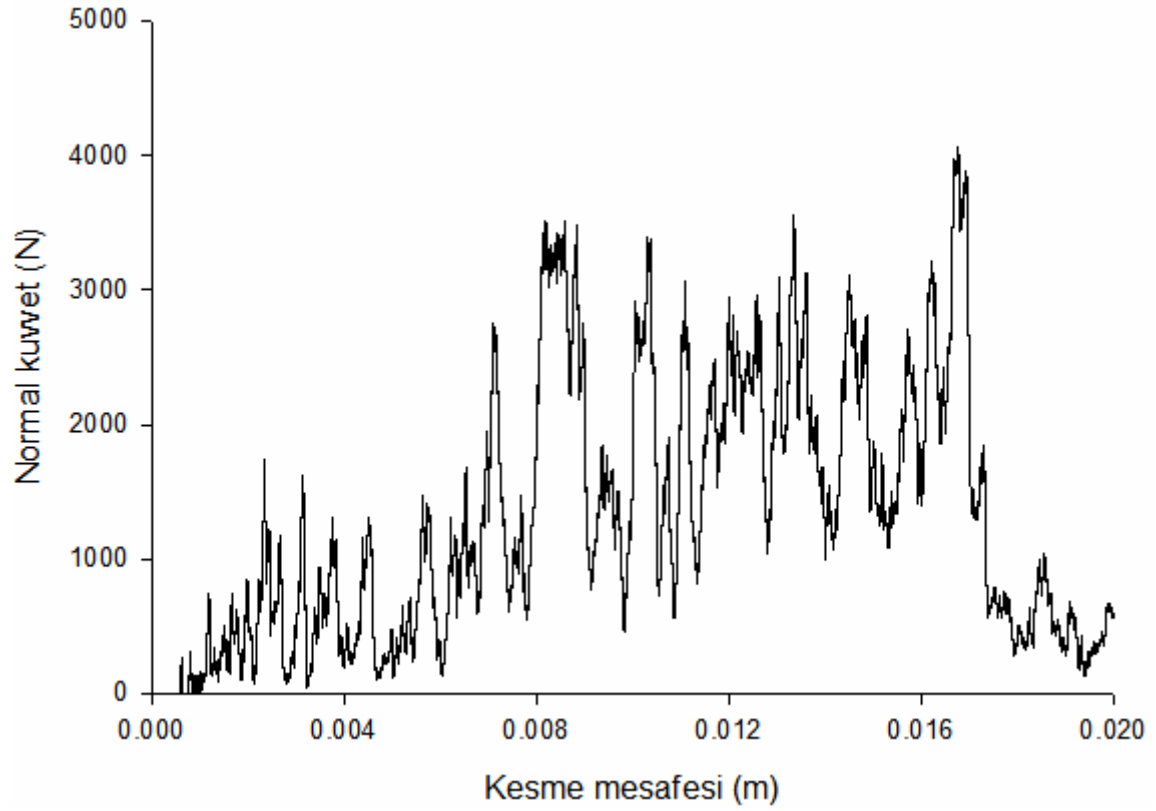
Şekil B.14 Kireçtaşı kayacının 3 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.



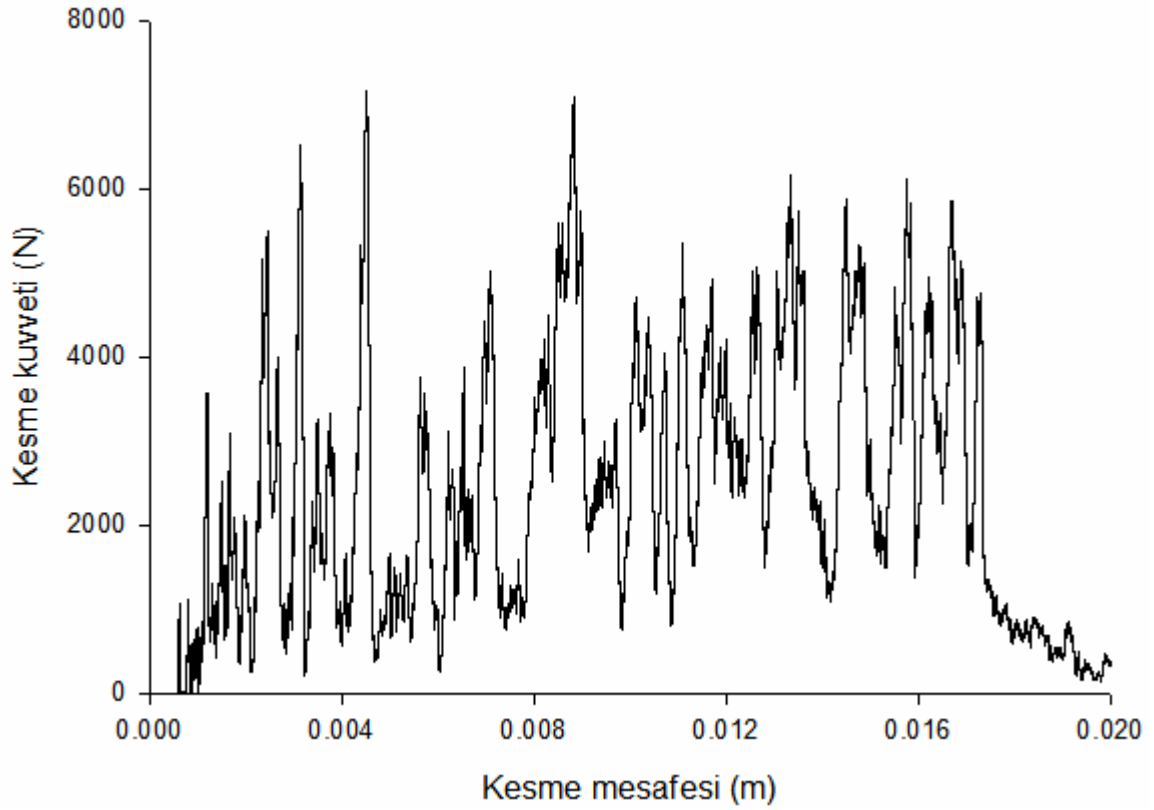
Şekil B.15 Kireçtaşı kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



Şekil B.16 Kireçtaşı kayacının 6 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.



Şekil B.17 Kireçtaşı kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen normal kuvvet-kesme mesafesi grafiği.



Şekil B.18 Kireçtaşı kayacının 9 mm kesme derinliğinde elde edilen kesme kuvveti-kesme mesafesi grafiği.

EK AÇIKLAMALAR C

**KAYAÇ KESME MEKANİZMALARININ PFC^{3D}'DE MODELLENMESİ SONUCU
OLUŞAN MİKRO-ÇATLAK SAYILARININ GÖSTERİLMESİ**

PFC3D 3.10
Step 1295584 14:22:05 Mon Sep 28 2009

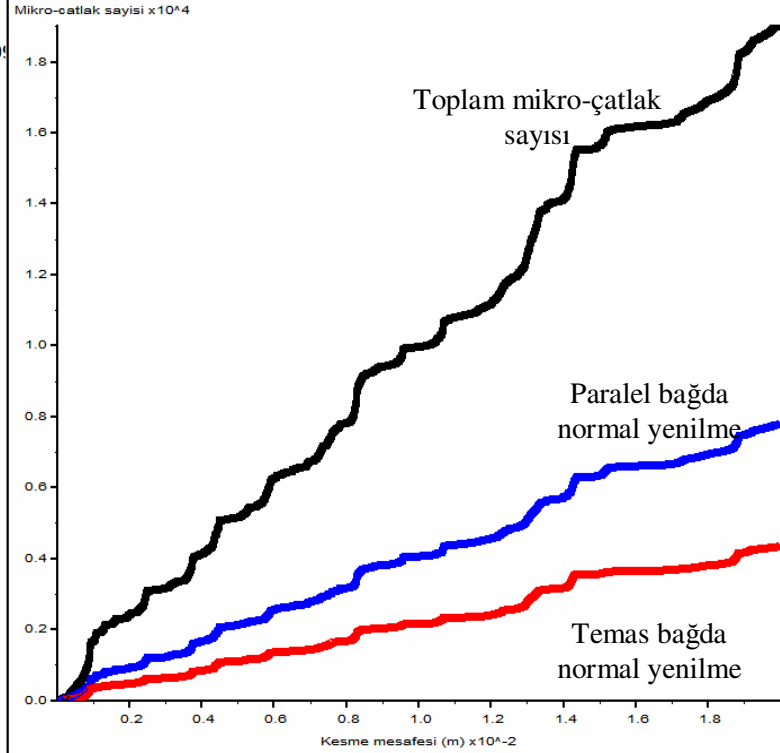
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.906e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.335e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 7.782e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
3.160e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Minina Engineerina



Şekil C.1 Kumtaşı-1 kayacında (6 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1295584 14:23:52 Mon Sep 28 2009

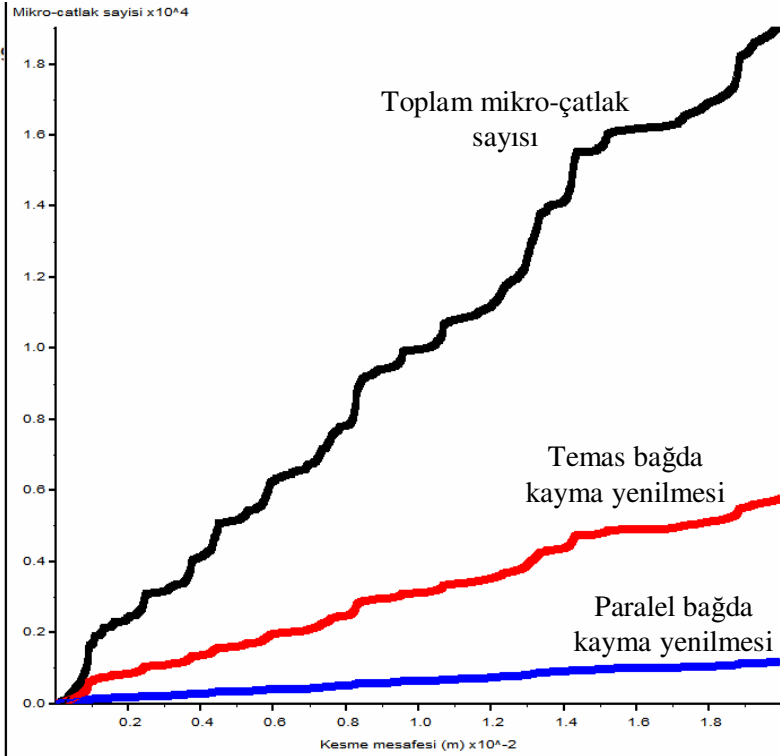
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.906e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 5.758e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.184e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
3.160e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Minina Engineerina



Şekil C.2 Kumtaşı-1 kayacında (6 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 909572 14:28:32 Mon Sep 28 2009

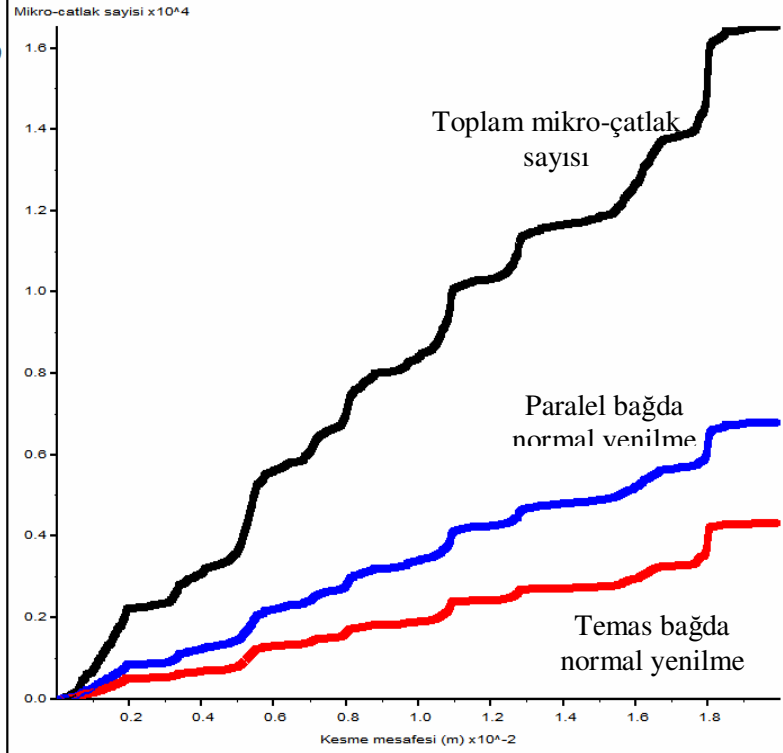
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.655e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.311e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.801e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
6.809e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.3 Kumtaşı-1 kayacında (9 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 909572 14:31:59 Mon Sep 28 2009

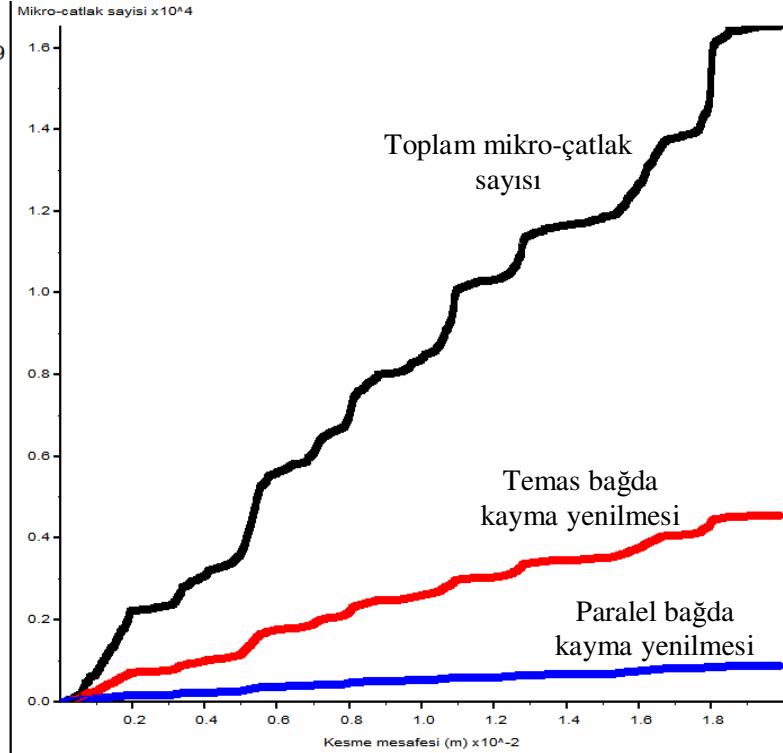
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.655e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.563e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 8.710e+002

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
6.809e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.4 Kumtaşı-1 kayacında (9 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 2430910 14:39:19 Mon Sep 28 2009

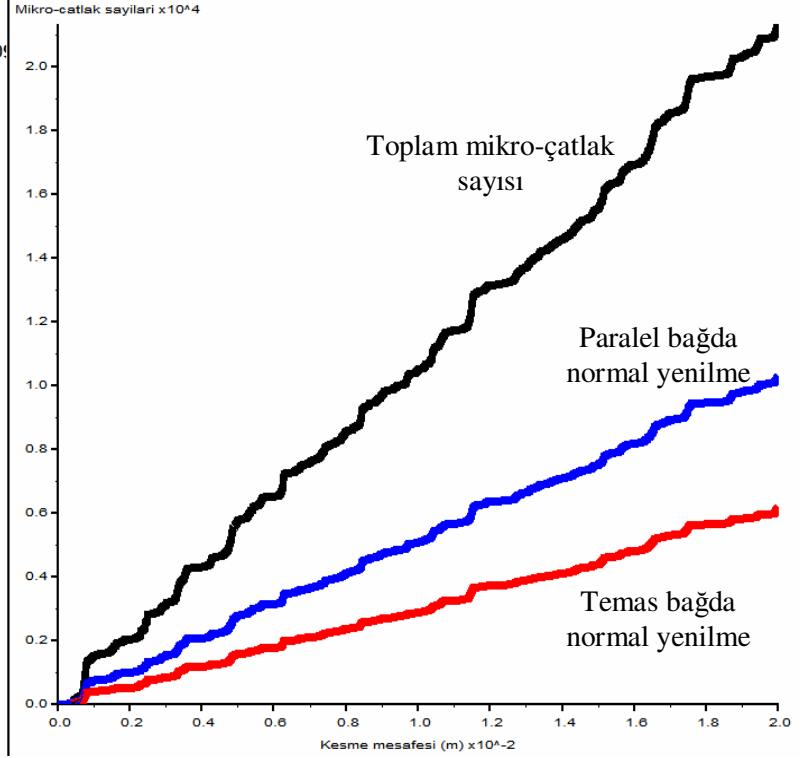
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.136e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.131e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.025e+004

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
0.000e+000 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.5 Kumtaşı-2 kayacında (3 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 2430910 14:41:57 Mon Sep 28 2009

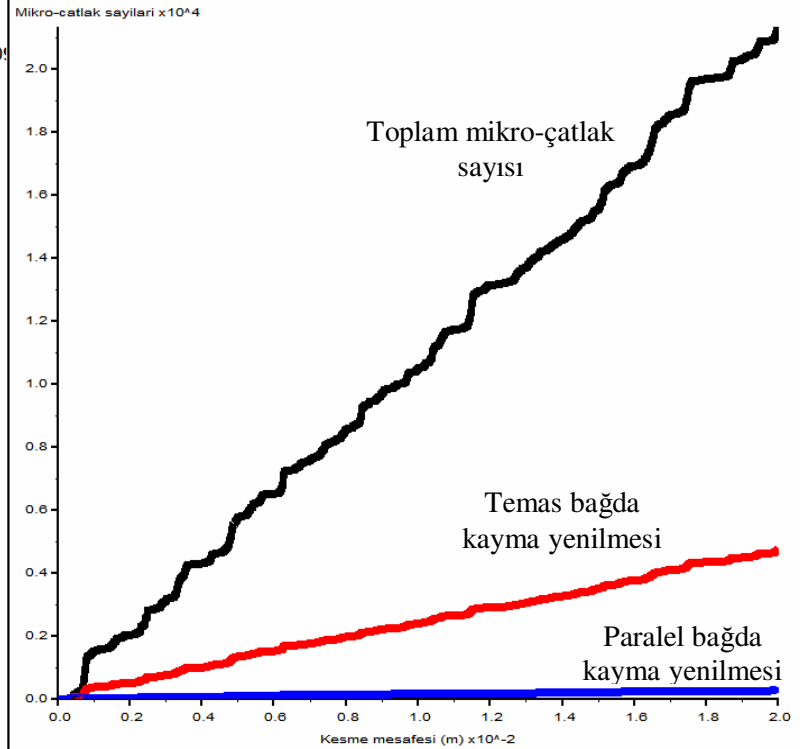
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.136e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.716e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.680e+002

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
0.000e+000 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.6 Kumtaşı-2 kayacında (3 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1548411 14:45:44 Mon Sep 28 2009

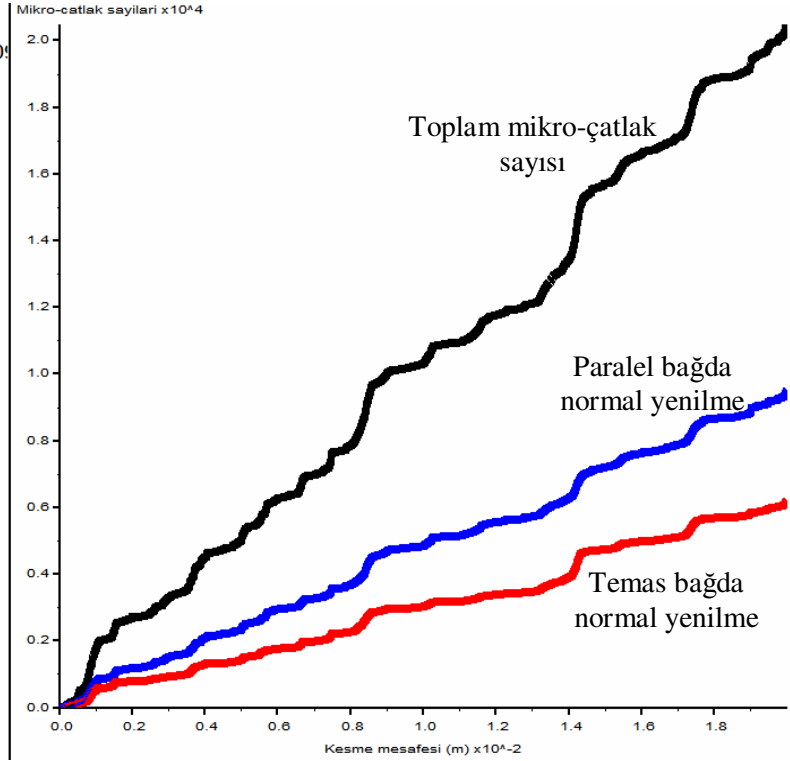
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.050e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.161e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 9.479e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
0.000e+000 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.7 Kumtaşı-2 kayacında (6 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1548411 14:47:34 Mon Sep 28 2009

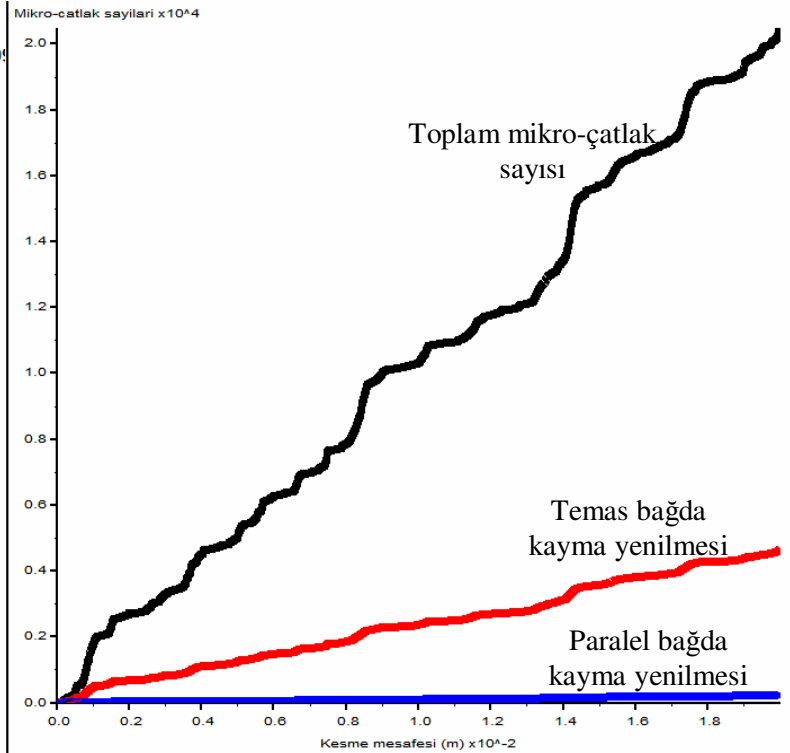
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.050e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.627e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.310e+002

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
0.000e+000 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.8 Kumtaşı-2 kayacında (6 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1129701 14:50:21 Mon Sep 28 2009

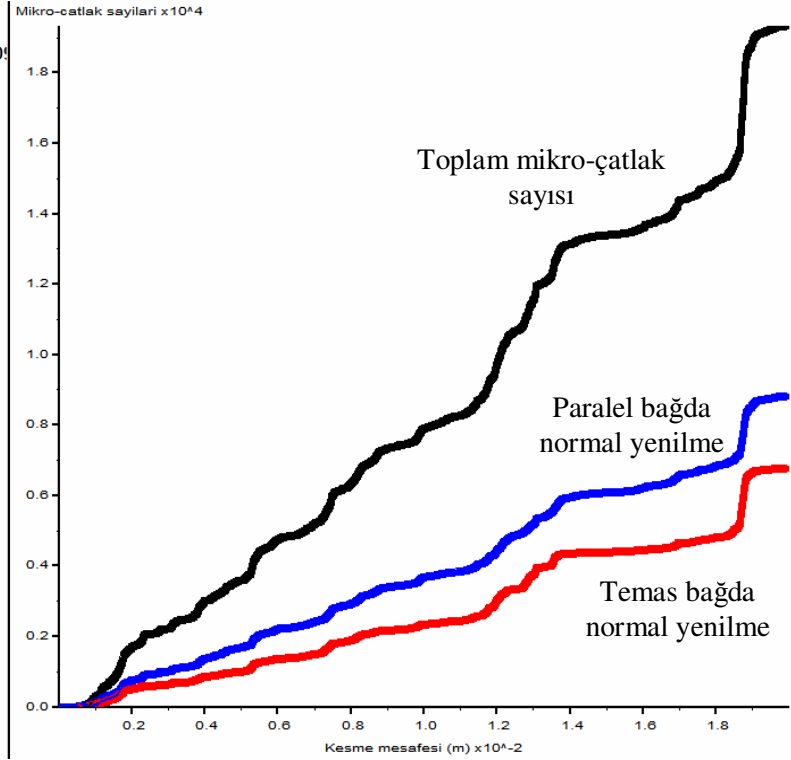
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.934e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.775e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 8.815e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
1.821e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.9 Kumtaşı-2 kayacında (9 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1129701 14:51:50 Mon Sep 28 2009

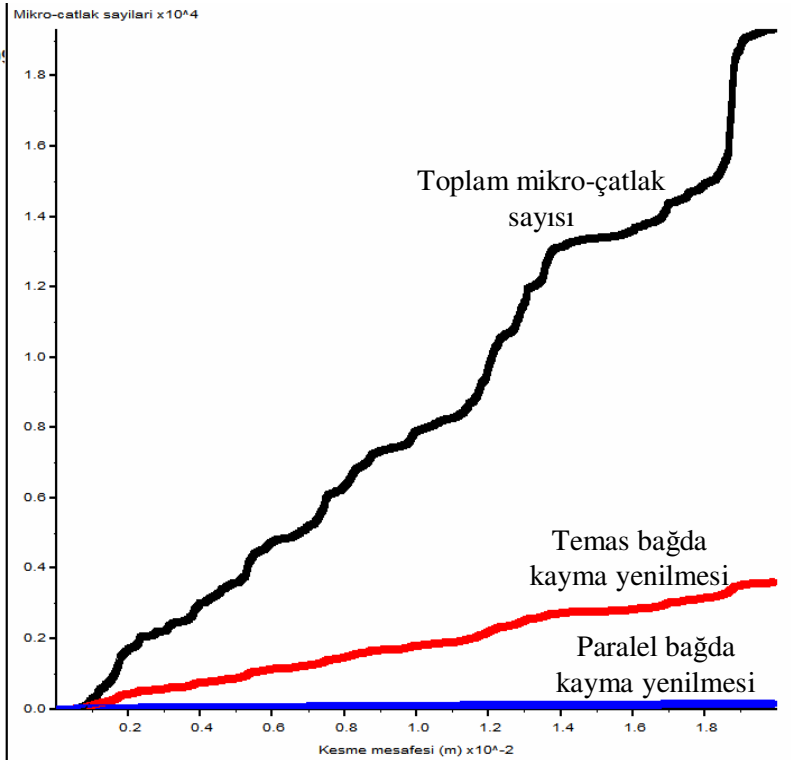
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.934e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 3.594e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.590e+002

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
1.821e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.10 Kumtaşı-2 kayacında (9 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 2622096 15:53:41 Mon Sep 28 2009

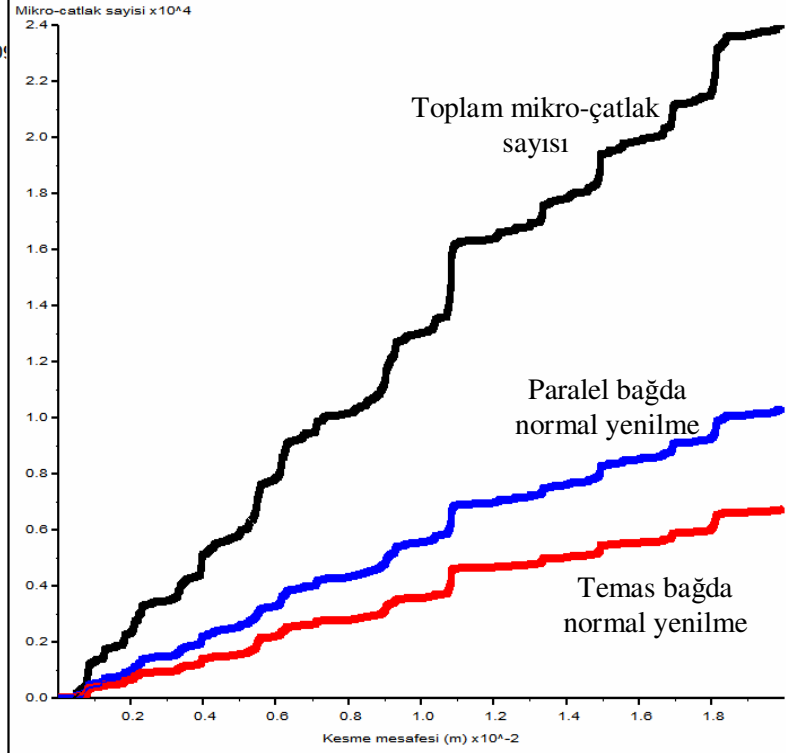
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
1.000e+000 <-> 2.401e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.715e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.027e+004

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
4.965e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.11 Kumtaşı-3 kayacında (3 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 2622096 14:59:18 Mon Sep 28 2009

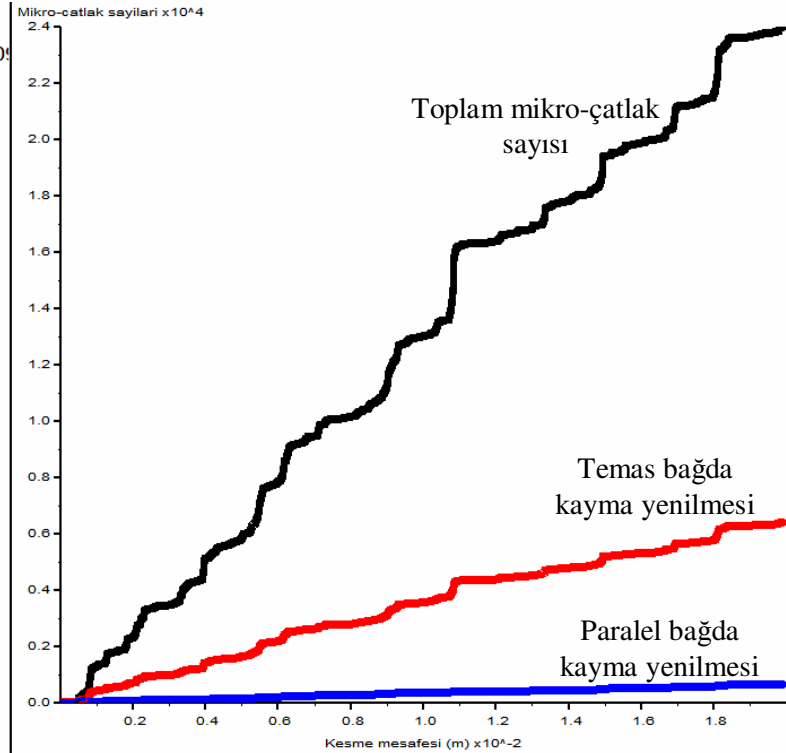
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
1.000e+000 <-> 2.401e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
1.000e+000 <-> 6.385e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.430e+002

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
4.965e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.12 Kumtaşı-3 kayacında (3 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1649472 15:11:14 Mon Sep 28 2009

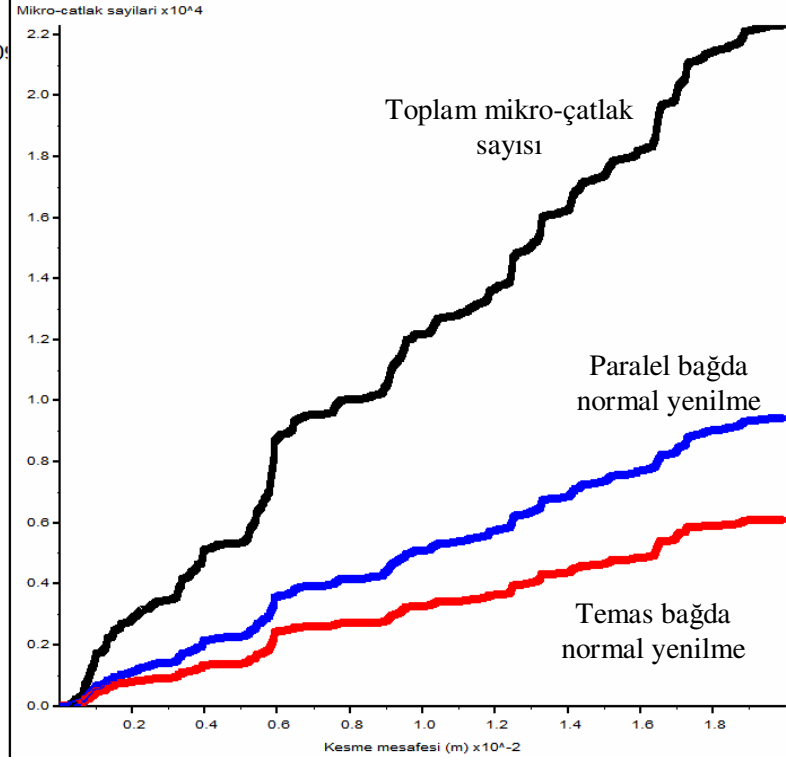
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
1.000e+000 <-> 2.232e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.120e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 9.436e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
4.424e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.13 Kumtaşı-3 kayacında (6 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1649472 15:13:50 Mon Sep 28 2009

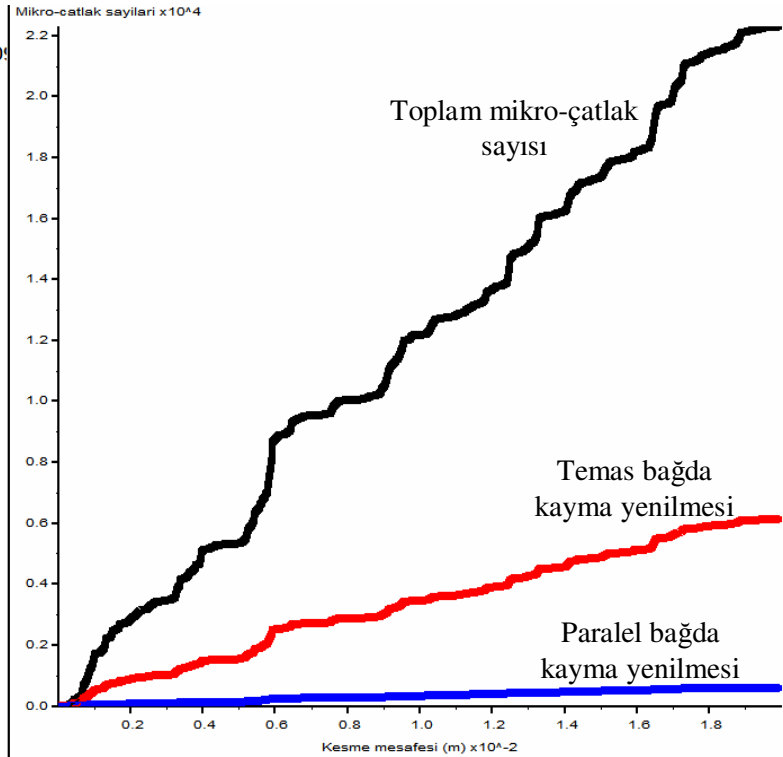
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
1.000e+000 <-> 2.232e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
1.000e+000 <-> 6.150e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.120e+002

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
4.424e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.14 Kumtaşı-3 kayacında (6 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1218604 15:16:51 Mon Sep 28 2009

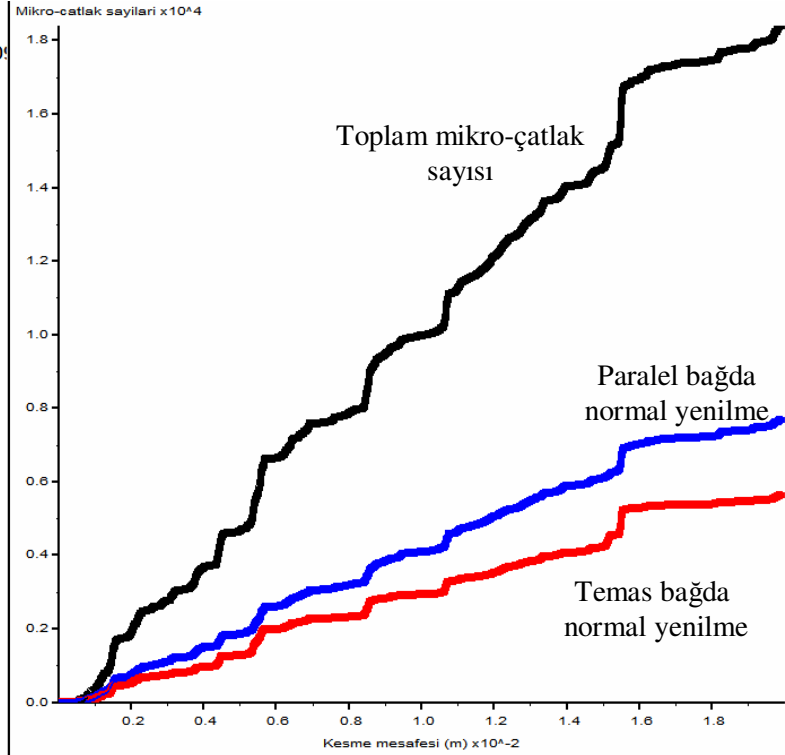
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.841e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 5.641e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 7.690e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
5.992e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.15 Kumtaşı-3 kayacında (9 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1218604 15:18:44 Mon Sep 28 2009

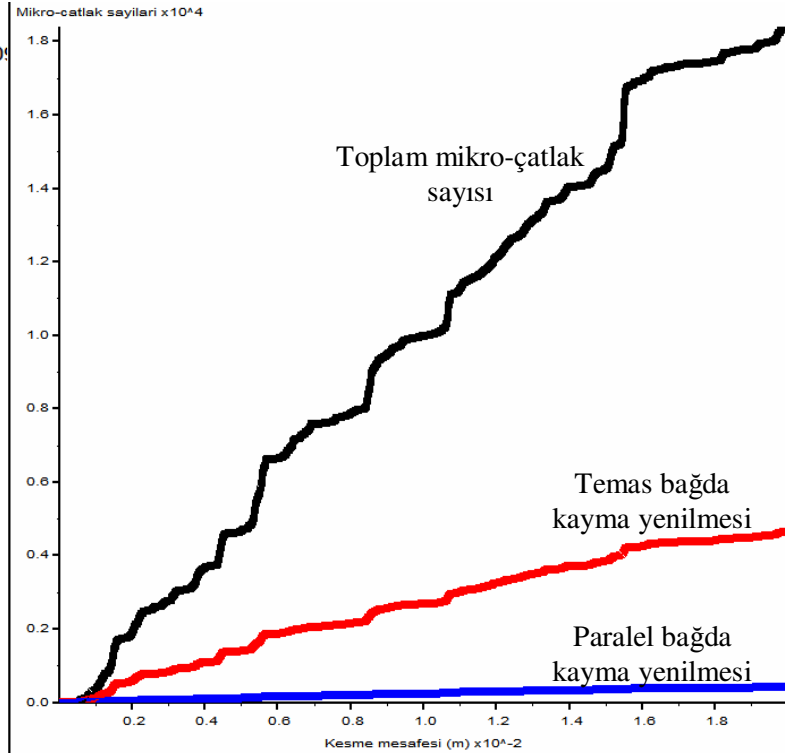
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.841e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.646e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.370e+002

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
5.992e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.16 Kumtaşı-3 kayacında (9 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 3577805 15:21:54 Mon Sep 28 2009

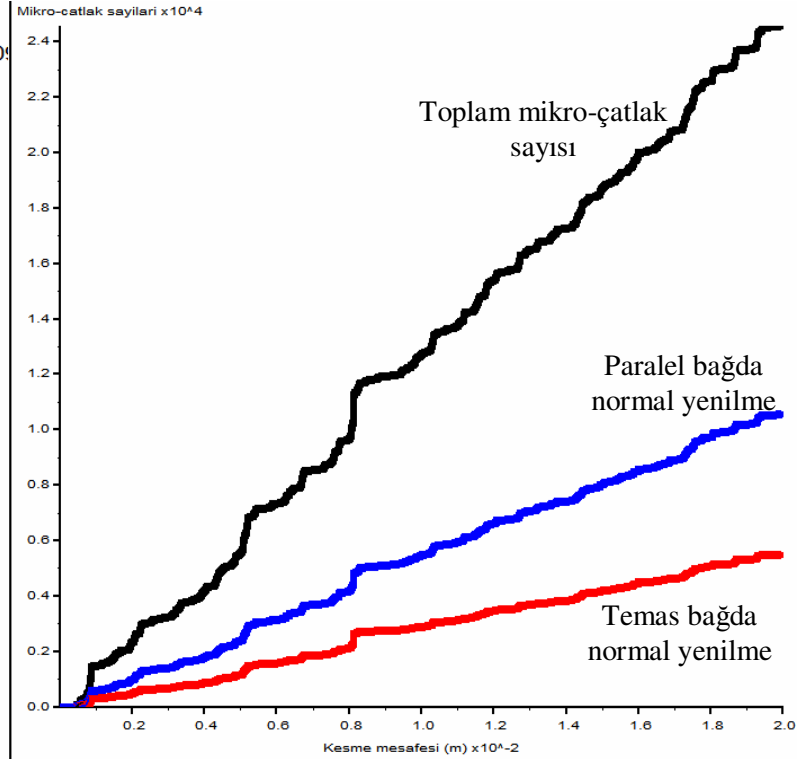
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.459e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 5.492e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.056e+004

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
3.107e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.17 Kireçtaşı kayacında (3 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 3577805 15:25:15 Mon Sep 28 2009

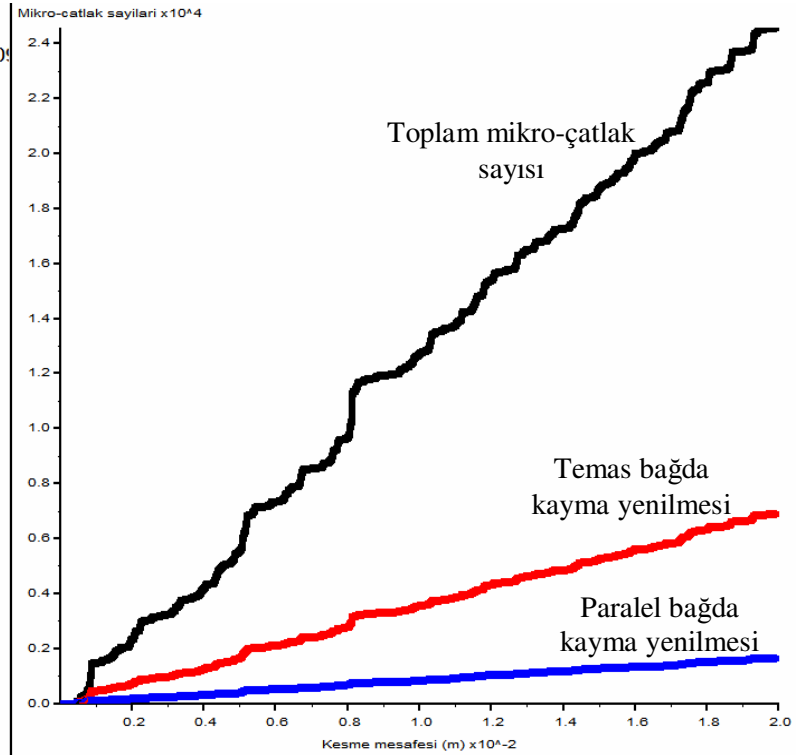
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.459e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.889e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.651e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
3.107e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.18 Kireçtaşı kayacında (3 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 2274273 15:30:08 Mon Sep 28 2009

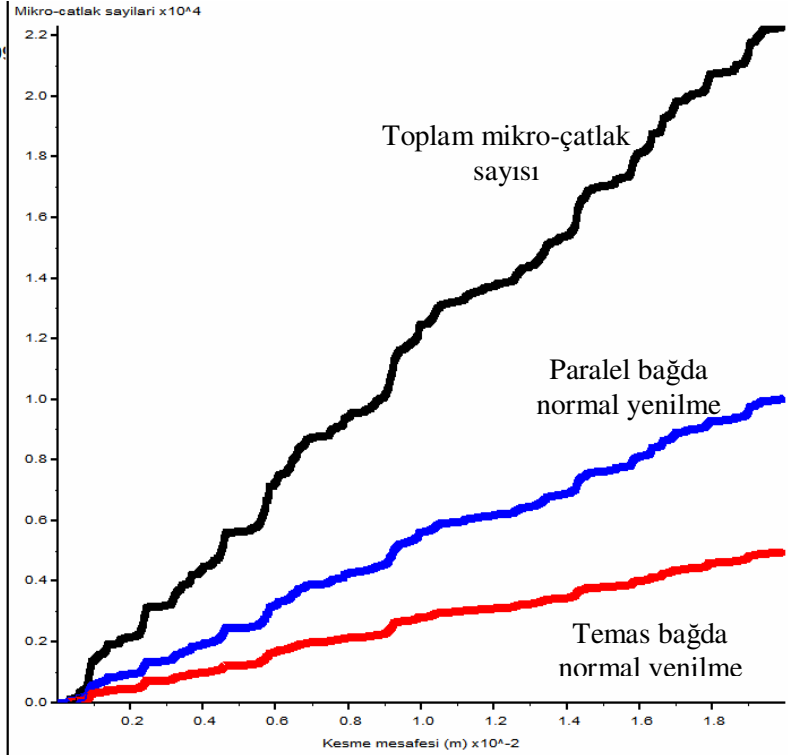
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.234e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.953e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.002e+004

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
3.190e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.19 Kireçtaşı kayacında (6 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 2274273 15:32:24 Mon Sep 28 2009

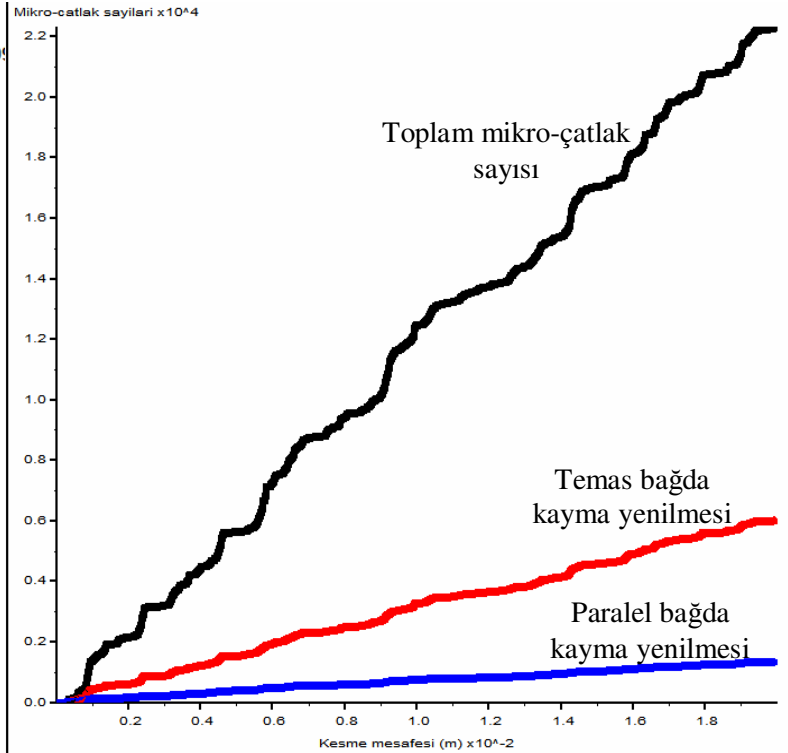
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 2.234e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 6.019e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.352e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
3.190e-008 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.20 Kireçtaşı kayacında (6 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1696266 15:37:23 Mon Sep 28 2009

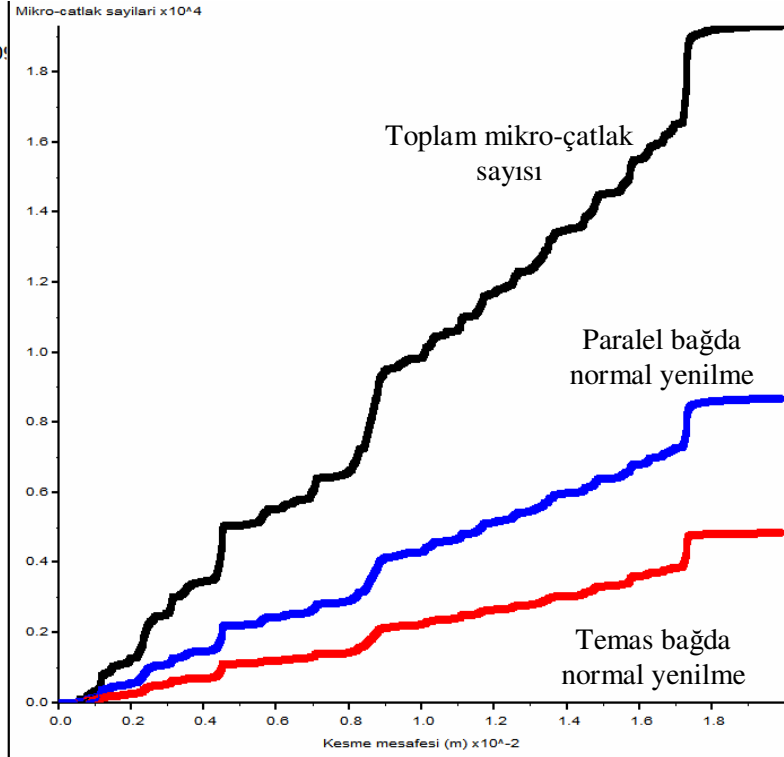
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.934e+004
8 crk_num_cnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.836e+003
10 crk_num_pnf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 8.673e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
0.000e+000 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.21 Kireçtaşı kayacında (9 mm kesme derinliği) normal gerilmeyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

PFC3D 3.10
Step 1696266 15:42:09 Mon Sep 28 2009

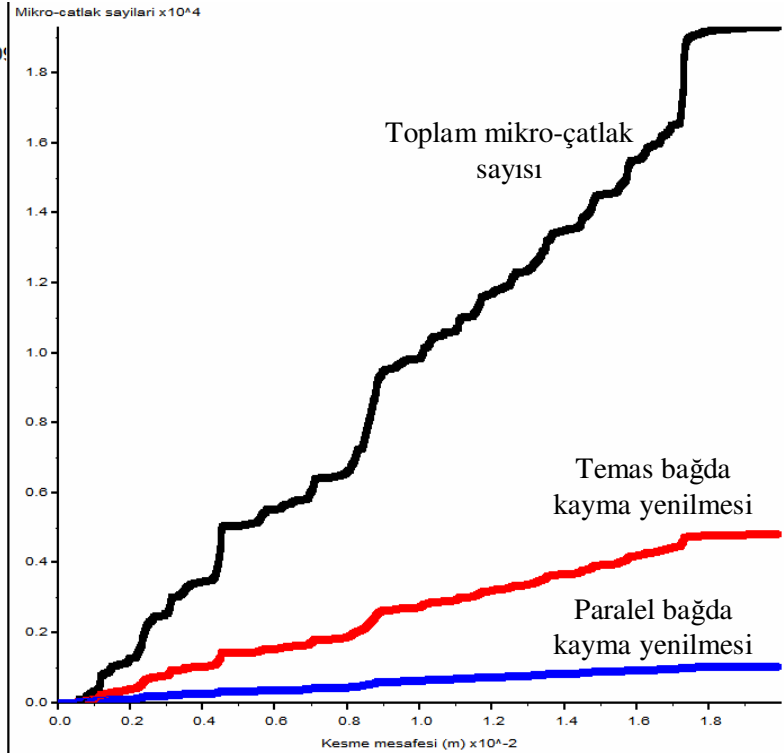
History

7 crk_num (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.934e+004
9 crk_num_csf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 4.809e+003
11 crk_num_psf (FISH Symbol)
Linestyle
0.000e+000 <-> 1.017e+003

Vs.

Rev 5 _disp (FISH Symbol)
0.000e+000 <-> 2.000e-002

Zonguldak Karaelmas University
Department of Mining Engineering



Şekil C.22 Kireçtaşı kayacında (9 mm kesme derinliği) kayma gerilmesiyle oluşan mikro-çatlak sayıları.

ÖZGEÇMİŞ

Okan SU 1978'de Ankara'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini Aydın'da tamamladı; Aydın Anadolu Teknik Lisesi Bilgisayar Bölümü'nden mezun olduktan sonra 1996 yılında ZKÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'ne girdi; 2000'de “iyi” derece ile mezun olduktan sonra 2001 yılında ZKÜ Maden Mühendisliği Bölümü, Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2003 yılında “Maden Yüksek Mühendisi” unvanını aldı ve aynı yıl doktora eğitimine başladı. 2006 yılında TUBİTAK-Yurt Dışı Araştırma Burs Programı'ndan kazandığı destekle 9 ay Arizona Üniversitesi'nde çeşitli araştırmalarda bulundu. Ayrıca, 2008 yılında belirli dönemlerde PFC^{3D} ile ilgili çeşitli seminerlere katıldı ve bununla birlikte Itasca firmasının Almanya temsilciliğinde doktora tez çalışmalarının bir kısmını yürüttü. Halen Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak doktora tez çalışmalarına devam etmektedir

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Maden Mühendisliği Bölümü
67100 ZONGULDAK

Tel: (372) 257 4010
Faks: (372) 257 4023
E-posta: okansu@karaelmas.edu.tr