

KAYALARDA ÇENTİK-DARBE DENEYİNİN  
UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mahmut ÇİFÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
2009

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYALARDA ÇENTİK-DARBE  
DENEYİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI

Mahmut ÇİFÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI  
Doç. Dr. Kazım GÖRGÜLÜ

SİVAS  
2009

Bu çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan Prof. Dr. Atilla CEYLANOĞLU \_\_\_\_\_

Üye Doç. Dr. Burhan SELÇUK \_\_\_\_\_

Üye(Danışman) Doç. Dr. Kazım GÖRGÜLÜ \_\_\_\_\_

### ONAY

Bu tez çalışması, 28.07.2009 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

---

Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MÜDÜRÜ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 24-09-2008 tarihli ve 7 sayılı toplantısında kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

## ÖZET

### KAYALARDA ÇENTİK-DARBE DENEYİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mahmut ÇİFÇİ

Yüksek Lisans Tezi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kazım GÖRGÜLÜ

2009, 69 sayfa

Bu çalışmada çentik darbe deneyinin kayalarda uygulanabilirliğinin araştırılmasını amaçlamıştır. Bu amaçla, bazı kayalar üzerinde çentiksiz, U ve V çentikli darbe deneyleri yapılmış, kayaların darbe kırılma enerjileri ve darbe kırılma dirençleri belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan kayaların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve bu özellikler ile çentik darbe deneyi sonuçları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Kayaların darbe kırılma dirençleri ile kırılma tokluğu, eğilme dayanımı, elastisite modülü, tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanımı, Schmidt sertliği, kırılma indeksi, toplam ve etkili gözenekliliği arasında oldukça iyi ilişkiler elde edilmiştir. Ayrıca, kayaların kırılma tokluğu ile eğilme dayanımı, tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanımı, Schmidt sertliği, toplam ve etkili gözenekliliği arasında iyi ilişkiler belirlenmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Çentik darbe deneyi, darbe kırılma enerjisi, darbe kırılma direnci, kırılma tokluğu, kaya malzeme özellikleri.

## ABSTRACT

### THE INVESTIGATION OF APPLICABILITY OF NOTCHED-IMPACT TESTS ON ROCKS

Mahmut ÇİFÇİ

Master of Science Thesis, Department of Mining Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kazım GÖRGÜLÜ

2009, 69 pages

In this study, it was aimed to investigate the applicability notched-impact tests on rocks. For this purpose, unnotched, U and V-notched impact tests on some rocks were carried out, impact fracture energies and resistances of rocks were determined. Furthermore, some physical and mechanical properties of rocks used in this study were determined and the relationship between these properties and notch impact test results were investigated.

Considerably high relationships between impact fracture resistances of rocks and fracture toughness, flexural strength, elasticity modulus, uniaxial compressive strength, point load strength, Schmidt hardness, brittleness index, total and effective porosity were obtained. In addition, good relationships between fracture toughness of rocks and flexural strength, uniaxial compressive strength, point load strength, Schmidt hardness, total and effective porosity were determined.

**Key words:** Notch impact tests, impact fracture energy, impact fracture resistance, fracture toughness, rock material properties.

## **TEŞEKKÜR**

Bu çalışmanın her aőamasında emeğini ve zamanını esirgemeyen Danıőmanım Sayın Doç. Dr. Kazım GÖRGÜLÜ 'ye teőekkürü bir borç bilirim.

Laboratuar çalışmalarında yardımlarından dolayı Yrd.Doç. Dr. Yavuz GÜL'e ve Maden Y. Müh. Feramuz ÇİFÇİ'ye teşekkür ederim.

Bu tez çalışması sırasında fedakârlık ve anlayıőlarından dolayı aileme, özellikle kızlarım Beyza ile Sena'ya çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KIRILMA VE KIRILMA MEKANİĞİ.....	4
2.1 Kırılma Türleri .....	4
2.1.1 Makroskobik Açıdan Kırılma türleri.....	4
2.1.2 Mikroskobik Açıdan Kırılma Tipleri .....	5
2.2 Kırılma Mekanîği.....	5
2.2.1 Griffith Teorisi.....	5
2.2.2 Irwin Teorisi.....	6
2.3 Kırılma Yük Modelleri.....	7
2.4 Kırılma Deneyleri.....	8
3. ÇENTİK DARBE DENEYİ.....	9
3.1 Çentik Darbe Deneyinin Tarihsel Gelişimi.....	9
3.2 Çentik Darbe Deney Düzenegi.....	14
3.2.1 Çentik Darbe Deneyinin Mekanîği.....	16
3.3 Çentik Darbe Deneyini Etkileyen Faktörler.....	19
3.3.1 Deney Numunesinin Boyut ve Geometrisi.....	20
3.3.2 Çentik geometrisi.....	23
3.3.3 Deney Parçası Destekleri ve Örsler .....	23
3.3.4 Çekiç geometrisi.....	25
3.3.5 Çekiç vurma hızı.....	25
3.4 Malzemelerin Çentik Darbe Deney Sonuçları ile Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkiler.....	25
4. LABORATUVAR DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	34



4.1 Çentik Darbe Deney Cihazı .....	34
4.2. Deneysel Çalışmalar .....	39
4.2.1. Numune Boyutlarının Belirlenmesi .....	40
4.2.2 Çalışılan Kaya Birimlerinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	43
4.2.3 Darbe Deneyi ve Kırılma Tokluğu Deneyi Sonuçları.....	46
4.2.4 Kayaların Darbe Direnci ile Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Ararsındaki İlişkiler .....	49
4.2.5 Kayaların Kırılma Tokluğu ile Diğer Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Ararsındaki İlişkiler.....	54
4.2.6 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	57
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	69

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Kırılma modelleri .....	8
Şekil 3.1	Charpy ve Izod darbe deney düzeneği.....	15
Şekil 3.2	Çentik darbe testinde mesnetler üzerindeki numunenin çekicinin darbesiyle kırılması (Tanguy ve ark., 2004).....	16
Şekil 3.3	Sarkaç salınım hareketi (Serway, 1992).....	17
Şekil 3.4	Sarkacın serbest hareket yörüngesi (Ohanian, 1994).....	17
Şekil 3.5	Sarkacın deney numunesini kırdıktan sonraki hareketi....	19
Şekil 3.6	Çentik geometrisi ve numune boyutları .....	23
Şekil 3.7	Çentik darbe deney makinesinde deney numunesi örs ve destekleri (TS EN 10045-1, 1999).....	24
Şekil 3.8	Charpy deneyi çekiç geometrisi.....	25
Şekil 3.9	Charpy darbe kırılma enerjisi ve kırılma tokluğu arasındaki ilişki (Strnadel ve Hausild, 2007).....	27
Şekil 3.10	Darbe enerjisi ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki (Furuzumi ve ark., 2006).....	28
Şekil 3.11	Kayaların darbe kırılma direnci ile gözenekliliği arasındaki ilişki (Furuzumi ve ark., 2006).....	28
Şekil 3.12	Kayaların darbe kırılma direnci ile tek eksenli basınç dayanımları arasındaki ilişki (Furuzumi ve ark., 2006).....	29
Şekil 3.13	Kayaların darbe kırılma direnci ile Brazilian çekme dayanımları arasındaki ilişki (Furuzumi ve ark., 2006).....	29
Şekil 3.14	Kayaların darbe enerjisi ile dinamik kırılma tokluğu arasındaki ilişkiler (Furuzumi ve ark., 2006).....	30
Şekil 4.1	Çentik darbe deney cihazı.....	34
Şekil 4.2	Çentik darbe deneyi ölçüm şeması .....	35
Şekil 4.3	Çentik darbe cihazı kadranı ve ibre hareket düzeneği.....	37
Şekil 4.4	Örs ve destek ölçüleri.....	38
Şekil 4.5	Çekiç geometrisi ve boyutları.....	39
Şekil 4.6	Mesnetler üzerindeki numuneye çekiç vuruş pozisyonu.....	39
Şekil 4.7	Boyut çalışması için hazırlanmış çentikli ve çentiksiz mermer numuneleri.....	40
Şekil 4.8	Çentiksiz mermer numuneleri için darbe kırılma enerjisi (J) ile numune genişliği (mm) arasındaki ilişki .....	41
Şekil 4.9	Çentiksiz mermer numuneleri için darbe kırılma direnci ( $J/cm^2$ ) ile numune genişliği (mm) arasındaki ilişki.....	42
Şekil 4.10	U-Çentikli mermer numuneleri için darbe kırılma enerjisi (J) ile numune genişliği (mm) arasındaki ilişki.....	42
Şekil 4.11	U-Çentikli mermer numuneleri için darbe kırılma direnci ( $J/cm^2$ ) ile numune genişliği (mm) arasındaki ilişki.....	43
Şekil 4.12	Çentik darbe deneyi ve kırılma tokluğu deneyi numuneleri.	46
Şekil 4.13	Çentiksiz, U ve V çentikli kaya numunelerinin darbe kırılma enerjileri (J) .....	48
Şekil 4.14	Çentiksiz, U ve V çentikli kaya numunelerinin darbe kırılma dirençleri ( $J/cm^2$ ).....	48

Şekil 4.15	Kayaların kırılma tokluğu ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.....	49
Şekil 4.16	Kayaların eğilme dayanımı ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.....	50
Şekil 4.17	Kayaların elastisite modülü ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.....	50
Şekil 4.18	Kayaların tek eksenli basınç dayanımı ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.....	51
Şekil 4.19	Kayaların nokta yük dayanımı ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.....	51
Şekil 4.20	Kayaların Schmidt sertliği ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.....	52
Şekil 4.21	Kayaların toplam gözeneklilik ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.....	52
Şekil 4.22	Kayaların etkili gözeneklilik ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.....	53
Şekil 4.23	Kayaların kırılma tokluğu ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.....	53
Şekil 4.24	Kayaların kırılma tokluğu ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki.....	54
Şekil 4.25	Kayaların kırılma tokluğu ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.26	Kayaların kırılma tokluğu ile nokta yük dayanımı arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.27	Kayaların kırılma tokluğu ile Schmidt sertliği arasındaki ilişki.....	56
Şekil 4.28	Kayaların kırılma tokluğu ile toplam gözeneklilik arasındaki ilişki.....	56
Şekil 4.29	Kayaların kırılma tokluğu ile etkili gözeneklilik arasındaki ilişki.....	57

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Deney numunesi boyutları (TS EN 10045-1, 1999) .....	21
Çizelge 3.2.	Örs ve desteklerin özellikleri (TS EN 10045-1, 1999)....	24
Çizelge 3.3.	Kırılma tokluğu ile kaya özellikleri arasındaki ilişkiler (Hucka ve Das, 1974).....	31
Çizelge 3.4.	Kırılma tokluğu ile kaya özellikleri arasındaki ilişkiler (Altındağ, 2000).....	32
Çizelge 4.1	Çalışılan Kaya Birimlerinin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	44
Çizelge 4.2	Kayalarda çentik darbe ve kırılma tokluğu deneyi sonuçları.....	47
Çizelge 4.3	Kayaların çentiksiz numune darbe kırılma direnci ( $J/cm^2$ ) ile kırılma tokluğu ( $MPa.m^{1/2}$ ) ve diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler.....	58
Çizelge 4.4	Kayaların statik kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) ile diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasında kurulan ilişkilerin sonuçları.....	59

## 1. GİRİŞ

Kayaların özelliklerini ve değişik koşullardaki davranışlarını belirlemek için oldukça farklı deneyler uygulanmıştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar bazen başka bir deneyden elde edilecek sonucu kestirmeye veya kayaları sınıflandırmaya yönelik kullanılır iken bazen de doğrudan tasarıma yönelik olarak kullanılmıştır. Kaya mekaniği tasarım problemlerinde kaya kütlesi birincil öncelikli iken; delme, patlatma, tünel açma, kesme ya da kırma gibi parçalama süreçlerinde kaya malzemesinin kendisi önemli olmaktadır. Bununla beraber, kaya madde ve kütlesi yakın olarak ilişkilidir. Dolayısıyla kırılma mekaniği kavramı, kaya malzemesi ile birincil ilişkili olmasına rağmen, pratik kaya mühendisliğine önemli katkılar yapar (Bieniawski, 1981). Son yıllarda bu kavramlar hem analitik çalışmalarda hem de kayanın kırılma tokluğu test alanında artan bir ilgi almıştır (Ouchterlony, 1981; Rossmanith, 1983; Ingraffea, 1985).

Kırılma, malzemelerin gerilme altında birden fazla parçalara ayrılması olarak tanımlanmakta olup başlıca iki safhada gerçekleşmektedir. Birinci safhada çatlak teşekkülü, ikinci safha da ise çatlağın ilerlemesi meydana gelmektedir. Yani kırılma, karakteri ne olursa olsun çatlak teşekkülü + çatlağın ilerlemesi ile oluşur. Kırılmanın karakteri malzemeden malzemeye değişir ve genellikle tatbik edilen gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma olaylarının değerlendirilmesinde kırılma mekaniği prensipleri dikkate alınmaktadır.

Kırılma mekaniği, mühendislik yapılarda kullanılan malzemelerin yük taşıma kapasitelerini ve kırılmayla belirlenen hasarları incelemekte olup, amacı sağlam yapısal bir bileşenin çatlak gelişimi ile kırılmasının nicel tanımını vermek olan bir mühendislik disiplindir. En temel şekliyle, kırılma mekaniği bir çatlağın lokasyon ve boyutunda izin verilebilir maksimum gerilme ile ilgilidir. Kırılma mekaniği çevresel etkiler ya da yük değişimleri tarafından bir kritik boyutta gelişen çatlakların oranını da tahmin etmektedir. İlave olarak, hızlı ilerleme durumlarını ve çatlak ilerlemesinin durdurulmasını belirlemektedir.

Kırılma mekaniği öncelikle metal, plastik, seramik gibi insan yapısı malzemelerin yapısının yıkıcı kırılmasını tahmin etmek ve korunmak için kullanılmıştır. Onun beton çatlakları için uygulamaları da önemli olmaktadır (Wittman, 1983; Shah, 1985). Jeofizikte, deprem fay hareketlerinin tahmini gelişen önemli bir uygulamadır.

Bununla beraber, kaya mühendisliğinin çoğu uygulamalarında kırılma mekaniğinin faydalı olduğunun kabul edildiği gözlenmektedir (Ouchterlony, 1988).

Tarihsel olarak, kırılma mekaniği, kırılmanın olup olmayacağına karar vermek için bazı malzeme dayanım değerleri ile bir yapıdaki gerilmeyi karşılaştıran, malzemelerin dayanım yaklaşımının bir gelişimidir. Kırılma mekaniğinde temel malzeme parametresi kırılma tokluğu olarak adlandırılmaktadır. Kırılma mekaniği çatlakların etkisini kendine özgü bir biçimde tanımladığından dolayı, iyi tanımlanmış çatlaklı numuneler gerektiren kırılma tokluk deneyleri olağan dayanım deneylerinden farklıdır.

Kayaların kırılma tokluk değerlerinin kullanıldığı bazı alanlar aşağıda özetlenmiştir (Ouchterlony, 1988'den alınmıştır).

- i. Kaya malzemesinin sınıflaması (Gunsallus ve Kulhawy, 1984),
- ii. Tünel açma (Lindqvist, 1982; Nelson ve Fong, 1986) ve model ölçekli patlatma gibi parçalanma prosesleri (Rustan ve ark, 1983),
- iii. Kaya kesme (Saouma ve Kleinosky, 1984), hidrolik çatlatma (Rummel ve Winter, 1982; Roegiers ve ark., 1982; Takahashi, 1983), gaz göndererek parçalama (Nilson ve ark, 1985; Nilson ve Griffiths, 1986), gaz kuyularının patlayıcı tahriki (Travis ve Davis, 1980; McHugh ve Keough, 1982), radyal patlayıcı kırıkları (Warpinski ve ark., 1981; Grady, 1985) ve krater patlatması (Adams ve ark., 1985) gibi kaya parçalanma modellerinde bir malzeme özelliğinin yanı sıra duraylılık analizleri (Ingraffea, 1979; Kemeny ve Cook, 1985) ve jeolojik özelliklerin yorumlanması (Pollard ve ark., 1982; Tharp, 1983)'dir.

Bu model örneklerin bazılarında kırılma tokluğu sadece dayanım özelliği olarak girmez. Nispeten az baskın çatlaklar modellenirken diğer dayanım ölçütlerinden daha ilgili olabilir. Böylece kırılma tokluğu pratik olaylarda kayacın davranışını tahmin etmekte esas bir yaklaşım sunar. Diğer yandan, kaya mühendisliğinde jeotermal enerji üretimi kırılma mekaniği ve kırılma tokluğu testlerinin kullanıldığı bir örnektir (Abe ve Takashashi, 1984; Takahashi ve ark., 1986).

Malzemelerin kırılma davranışının belirlenebilmesi için çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar elasto-plastik kırılma tokluğu deneyleri (CTOD yöntemi, J integrali ve R eğrileri), statik kırılma tokluğu deneyleri (Standart  $J_{IC}$  T testi, üç nokta eğme, kompakt çekme, çift ankastre kiriş ve indentasyon yöntemi) ve dinamik kırılma deneyleri (Çentik darbe, enstrumante edilmiş çentik darbe ve çatlak durdurma) olarak üç ana gruba ayrılmaktadır (Yayla, 2007). Buradan da anlaşılacağı üzere kırılma

deneysinde yük statik ya da dinamik olarak iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Statik yük uygulamasında yük yavaş artırılmakta, dinamik yük uygulamasında ise yük hızlı artırılmakta ya da malzemenin üzerine ani yük uygulanmaktadır.

Hızlı bir şekilde uygulanan yüklere birçok teknik uygulamalarda karşılaşılmaktadır. Bazı durumlarda bu yükler bilerek uygulanırken (örneğin patlatmalar, öğütme ve parçalama işlemlerinde) bazı durumlarda da dinamik yükler kazaen ortaya çıkan koşullarda oluşmaktadır. Bir dereceye kadar tüm kırılma olayları dinamiktir. Kırılma esnasında atomları bir arada tutan bağların kopması başlı başına dinamik bir prosestir. Ancak genel algılamaya göre makroskobik seviyede büyük parçaların atalet etkilerinin doğru bir hesaplama için enerji dengesinde göz önüne alınmasının zorunlu olduğu hallerde dinamik kırılma mekaniği önem kazanmaktadır.

Çentik-darbe deneyi metallere yönelik olarak geliştirilmiş dinamik bir deney olup, bu deneyle malzemenin tokluğu ve darbelere karşı koyma yeteneği belirlenmektedir. Burada tokluk bir malzemenin kırılmadan önce bünyesine aldığı enerji olarak tanımlanmakta ve bu enerji birim alana düşen enerji olarak ifade edilmektedir. Deneyde sabit ağırlıklı çekiç belirli bir yükseklikten bırakılmakta ve salınarak aşağı doğru inerken numuneye çarparak kırmaktadır (Dowling, 1999; Baydur, 1987; Demirci, 2004; Anık, 2000; İpek, 1999; TS EN 10045-1, 1999; TS EN 10045-2, 1999; TS EN ISO 14556, 2005). Daha sonra ilgili bağıntılar yardımıyla numune tarafından soğrulan enerji belirlenmektedir. Bu enerjiye karşılık sıcaklık değişimi ya da deformasyon değerleri kullanılarak da çeliklerde sünek-kırılgan davranış geçişinin belirlenmesi sıklıkla yapılan bir uygulamadır (Benzerga ve ark., 2002; DeSandre ve ark., 2004).

Daha çok metal, plastik ve kompozit malzemelerde kullanılan çentik darbe deneyinin kayalara uygulanması amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmanın ikinci bölümünde kırılma ve kırılma mekaniği, üçüncü bölümünde çentik darbe deneyi, dördüncü bölümde laboratuvar deney sonuçları ve değerlendirilmesi konularına yer verilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

## 2. KIRILMA VE KIRILMA MEKANİĞİ

Kırılma, malzemelerin gerilme altında birden fazla parçalara ayrılması olarak tanımlanmakta olup başlıca iki safhada gerçekleşmektedir. Birinci safhada çatlak teşekkülü, ikinci safha ise çatlağın ilerlemesi meydana gelmektedir. Yani kırılma, karakteri ne olursa olsun çatlak teşekkülü + çatlağın ilerlemesi ile oluşur. Kırılmanın karakteri malzemeden malzemeye değişir ve genellikle tatbik edilen gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır.

### 2.1 Kırılma Türleri

Kırılma türleri makroskopik ve mikroskopik olarak iki şekilde incelenmektedir. Makroskopik incelemede daha çok oluşan deformasyonlar dikkate alınır iken mikroskopik incelemede kırılmanın oluş mekaniği değerlendirilmektedir.

#### 2.1.1 Makroskobik Açıdan Kırılma Türleri

Malzemelerin kırılma öncesi durumuna, kırılmaya sebep olan yükleme şartlarına ve kırılma sonrası meydana gelen deformasyona bağlı olarak kırılma (gevrek), sünek, sürünme ve yorulma kırılması olarak sınıflandırılmaktadır.

- i. Kırılma kırılma: Malzeme üzerinde çok az veya hiç plastik deformasyon oluşturmadan meydana gelen kırılma tipidir.
- ii. Sünek kırılma: Kırılma öncesi malzemede plastik deformasyon meydana gelirse bu tip kırılmaya sünek kırılma denir.
- iii. Sürünme kırılması: Yüksek sıcaklıklarda, sabit gerilme veya sabit yük altında, sürünme deformasyonu sonucunda meydana gelen kırılma tipidir. Makroskobik açıdan bakıldığında, sürünme kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluşur, bu sebeple sünek kırılmaya benzer. Mikroskobik açıdan ise, sürünme kırılması, düşük sıcaklıklarda meydana gelen sünek kırılmadan farklıdır.
- iv. Yorulma Kırılması: Alternatif yükler altında kalan malzemelerde meydana gelen kırılma tipidir. Yorulma kırılmaları genel olarak plastik deformasyon meydana gelmeden de olabilir. Bazen yorulma kırılmaları sünek kırılmalara benzerse de, yorulma kırılmasında çatlak ilerlemesi sünek kırılmadan farklı olup, çatlak her bir yükleme periyodunda ancak belirli bir miktar ilerler.



### **2.1.2 Mikroskopik Açıdan Kırılma Tipleri**

Malzemeyi meydana getiren bir tanenin kırılması, kristallografik düzlemler üzerinde veya kristallografik düzlemleri kesen atomlar arası bağın kopması yani atomlar arası kohezyon kuvvetinin sıfıra inmesi sonunda olur. Malzemelerin kırılması mikroskopik açıdan dilimlenme ve kayma kırılması olarak ikiye ayrılmaktadır.

- i. Dilimlenme (klivaj) Kırılması: Kırılma, dilimlenme düzlemleri diye bilinen belirli kristallografik düzlemler boyunca meydana gelirse, buna dilimlenme kırılması denir. Bu tip kırılma, dilimlenme düzlemine dik normal gerilmelerin kritik bir değeri aşması ile dilimlenme düzlemine dik atom bağlarının koparılması sonucunda olur.
- ii. Kayma kırılması: Metalik malzemelerde plastik deformasyon, kaymaya karşı direnci az olan atom düzlemlerinin kayması ile meydana gelir. Bu düzlemlere kayma düzlemleri adı verilir. Metalik malzemelerde kayma çatlakları maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu kısımlarda ilerleme eğilimi gösterir. Çok taneli malzemelerde tane sınırlarındaki kohezyonun çeşitli sebeplerle az olması halinde, malzemenin kırılması tane sınırları yüzeylerinden tanelerin birbirinden ayrılması şeklinde meydana gelir. Bu tip kırılmaya taneler arası kırılma adı verilmektedir. Kayma gerilmelerinin etkisiyle tanelerin kayma kırılması şeklinde kopmasıyla veya tanelerin dilimlenme düzlemleri boyunca kırılması şeklinde meydana gelen kırılmaya taneleri keserek kırma denir.

## **2.2 Kırılma Mekanikliği**

Kırılma mekanikliği, mühendislik yapılarında kullanılan malzemelerin yük taşıma kapasitelerini ve kırılmayla belirlenen hasarları incelemekte olup, kırılmayla belirlenen hasarları incelemekte iki yaklaşım öngörmektedir. Bunlardan birincisi Griffith'in enerji dengesi yaklaşımı (1920), diğeri de Irwin teoremidir (1956).

### **2.2.1 Griffith Teorisi**

Griffith camın kırılma mukavemetini incelerken, cam çubuğun boyu uzadıkça mukavemetinin azaldığını görmüştür. Bu durumun, camın yüzey hatalarından ileri geldiği düşünülmüştür, çünkü cam çubuğun boyu uzadıkça yüzey hatalarının bulunma ihtimali artmaktadır.

Griffith gevrek bir malzemede çatlak bulunması halinde, malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilmeyi tayin eden ilk bağıntıyı geliştirmiştir.

$$\sigma_f = \left( \frac{2\gamma E}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2.1]$$

Burada,  $\sigma_f$ : Kırılma enerjisi,  $\gamma$ : Yüzey enerjisi, E: Elastisite modülü, a: Çatlak boyunun yarısıdır. Griffith denkleminde göre, kırılmaya sebep olan gerilme miktarı " $\sigma_f$ ", mevcut çatlak boyutu ile ters orantılıdır. Griffith denkleminde yüzey enerjisi terimi yerine, genellikle kırılma işini gösteren bir parametre (G) kullanılır. Bu durumda denklem;

$$\sigma_f = \left( \frac{EG_{IC}}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2.2]$$

şeklini alır. Burada  $G_{IC}=2\gamma$  olup, kırılma için toplam işi gösterir. Griffith, analizinde, deformasyon enerjisinin çatlak ilerlemesi sırasında, ara yüzey dönüşümünü esas almıştır. Dolayısıyla G, aynı zamanda çatlak birim yüzeyde ilerlemesi için gerekli olan enerji miktarıdır. Birimi N/m dir. Kırılma, G' nin kritik bir değeri olan  $G_{IC}$  'de meydana gelir.

### 2.2.2 Irwin Teorisi

Irwin ve arkadaşları kırılma kırılmayı ayrı bir görüşle analiz etmişler, analizlerinde çatlak ucu civarındaki gerilme durumunu esas almışlardır. Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasından, bir gerilme yoğunlaşma faktörü (K) parametresi geliştirmişlerdir. Gerilme şiddet faktörü uygulanan gerilmenin, çatlak boyut ve şeklinin (geometrisinin) fonksiyonudur.

Griffith'in 2.2 nolu eşitliği  $\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = \sqrt{E \cdot G_{IC}}$  şekilde yazılabilir. Bu eşitlikten  $\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$  'nın değerinin  $\sqrt{E \cdot G_{IC}}$  'ye ulaştığında çatlak ilerleyeceği anlaşılmaktadır.  $\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$  teriminin çatlak ilerlemesi için gerekli kuvvet ölçüsü olduğu düşünülerek, bu terim gerilme yoğunlaşma faktörü olarak isimlendirilmektedir. Dolayısıyla,

$$K = \sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad [2.3]$$

olarak gösterilir. Gerilme yoğunlaşma faktörü K 'nın kritik bir  $K_{IC}$  değerine ulaştığında kırılma olur. Bu durumda,

$$K_{IC} = \sqrt{E \cdot G_{IC}} \quad [2.4]$$

olur. Kritik gerilme yoğunlaşma faktörü ( $K_{IC}$ ) kırılma tokluğu olarak isimlendirilmekte olup, birimi  $MPa \cdot m^{1/2}$  'dir.

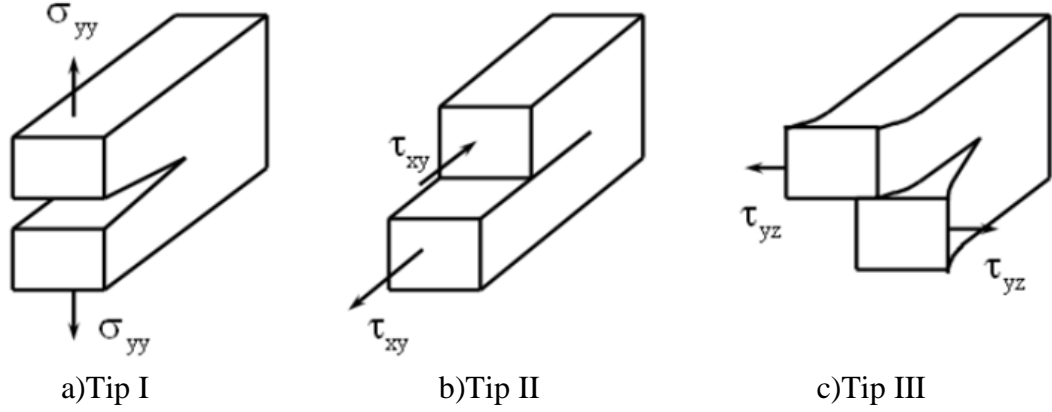
Gerilme yoğunlaşma faktörü, yalnızca gerilme durumu ve çatlakın geometrisiyle ilgili bir parametre olup malzemenin özelliklerine bağlı değildir. Hâlbuki kırılma tokluğu, malzeme özelliğiyle ilgili bir parametredir. Kırılma tokluğu özelliğini belirlemek için gerilme yoğunlaşma faktörü ölçülür.  $K=K_{IC}$  olduğunda çatlak ilerler ve kırılma olur.

Yukarıdaki bağıntılar sonsuz boyuttaki levhalar için geçerlidir. Belirli boyuttaki numuneler için gerilme yoğunlaşma faktörünün hesaplanmasında deneysel ve teorik yolla geliştirilmiş farklı bağıntılar kullanılmaktadır.

### 2.3 Kırılma Yük Modelleri

Yüklemeye durumuna bağlı olarak malzemedeki çatlaklar üç şekilde ilerleyebilmektedir (Şekil 2.1). Bunlar, çatlak açılma (Tip I), düzlem içi kayma (Tip II) ve düzlem dışı kayma (yırılma) (Tip III) olarak isimlendirilmektedirler (Yayla, 2007).

Çatlak açılma tipinde, gerilmenin normal bileşeni, çatlak yüzeyine dik olarak y eksenini doğrultusunda etki etmektedir (Şekil 2.1a). Düzlem içi kayma tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlak x eksenini doğrultusunda etki etmektedir (Şekil 2.1b). Düzlem dışı kayma tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlak z eksenini doğrultusunda etki etmektedir (Şekil 2.1c).



Şekil 2.1 Kırılma modelleri

## 2.4 Kırılma Deneyleri

Malzemelerin kırılma davranışının belirlenebilmesi için çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar elasto-plastik kırılma tokluğu deneyleri (CTOD yöntemi, J integrali ve R eğrileri), statik kırılma tokluğu deneyleri (Standart  $J_{IC}$  T testi, üç nokta eğme, kompakt çekme, çift ankastre kiriş ve indentasyon yöntemi) ve dinamik kırılma deneyleri (Çentik darbe, enstrumante edilmiş çentik darbe ve çatlak durdurma) olarak üç ana gruba ayrılmaktadır (Yayla, 2007). Buradan da anlaşılacağı üzere kırılma deneylerinde yük statik ya da dinamik olarak iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Statik yük uygulamasında yük yavaş artırılmakta, dinamik yük uygulamasında ise yük hızlı artırılmakta ya da malzemenin üzerine ani yük uygulanmaktadır. Bu çalışmanın konusu dinamik yükleme altında malzeme davranışını belirlemek üzerine olduğundan statik yükleme ile ilgili konulara değinilmeyecektir.

Hızlı bir şekilde uygulanan yüklere birçok teknik uygulamalarda karşılaşılmaktadır. Bazı durumlarda bu yükler bilerek uygulanırken (örneğin patlamalar, öğütme ve parçalama işlemlerinde) bazı durumlarda da dinamik yükler kazaen ortaya çıkan koşullarda oluşmaktadır. Bir dereceye kadar tüm kırılma olayları dinamiktir. Kırılma esnasında atomları bir arada tutan bağların kopması başlı başına dinamik bir prosestir. Ancak genel algılamaya göre makroskobik seviyede büyük parçaların atalet etkilerinin doğru bir hesaplama için enerji dengesinde göz önüne alınmasının zorunlu olduğu hallerde dinamik kırılma mekaniği önem kazanmaktadır.

### 3. ÇENTİK DARBE DENEYİ

Çentik-darbe deneyi metallere yönelik olarak geliştirilmiş bir deney olup, bu deneyle malzemenin tokluğu ve darbelere karşı koyma yeteneği belirlenmektedir. Tokluk bir malzemenin kırılmadan önce bünyesine aldığı enerji olarak tanımlanmakta ve bu enerji birim alana düşen enerji olarak ifade edilmektedir. Deneyde sabit ağırlıklı çekiç belirli bir yükseklikten bırakılmakta ve salınarak aşağı doğru inerken numuneye çarparak kırmaktadır (Dowling,1999; Baydur,1987; Demirci, 2004; Anık, 2000; İpek, 1999; TS EN 10045-1, 1999; TS EN 10045-2, 1999; TS EN ISO 14556, 2005). Daha sonra ilgili bağıntılar yardımıyla numune tarafından soğrulan enerji belirlenmektedir. Bu enerjiye karşılık sıcaklık değişimi ya da deformasyon değerleri kullanılarak da çeliklerde sünek-kırılma davranış geçişinin belirlenmesi sıklıkla yapılan bir uygulamadır (Benzerga ve ark., 2002; DeSandre ve ark., 2004).

#### 3.1 Çentik Darbe Deneyinin Tarihsel Gelişimi

Malzemelerin çarpma etkileri üzerine bilinen en eski yayın Tredgold tarafından 1824'te yayımlanan döküm demir malzemelerin çarpma kuvvetlerine dayanması konulu araştırma sonuçlarıdır (Siewert ve ark., 1999).

1849'da İngiltere'de bir komisyon toplanarak demiryolu endüstrisinde kullanılan demiri test etmek için pratik yaklaşımları da dikkate alarak vurma deneyini kullanmıştır. 1857'de Rodman silahlarda kullanılan çeliği test etmek için ağırlık düşürme deneyi makinesini tasarlamış, takip eden 30 yıllık sürede bu makine, demiryollarında kullanılan çelik ve çelik ürünlerin kalitesinin belirlenmesinde geniş şekilde kullanılmıştır. İlk yapılan deneylerde çentiksiz veya çatlama başlatıcı bir etki olmayan deney numuneleri kullanılmıştır. Le Chatalier 1892'de çentikli numune kullanılan ağırlık düşürme deneyini tanıtmıştır. Bazı çeliklerin çentik olmayan numunede sünme davranışı göstererek çatlama bükülme gösterdiği görülmüştür. Deney numunesi çentikli yapılarak deney yönteminde önemli bir gelişme sağlanmıştır ve yapılan deneylerde malzeme çatlama (kırılma) mukavemetinin nicel olarak ölçülmesi mümkün olmuştur (Siewert ve ark., 1999).

1895–1922 arasında vurma deneyini kapsayan, üzerinde görüş birliğine varılmış standartların ve deney yöntemlerinin geliştirilmesini sağlayan ulusal ve uluslararası birçok standart belirleyici kurumun oluştuğu görülmüştür. Bu kurumlardan Amerika

Malzeme Deney Birliği (American Society for Testing and Materials-ASTM) 1898’de, Uluslararası Malzeme Deney Birliği (International Association for Testing Materials - IATM) 1901’de kurulmuştur. Aynı yıllarda ASTM’nin çalışmaları ile vurma deneyi üzerine iki standart geliştirilmiştir.

1902’de ASTM vurma deneyi ve vurma deneyi makinesi ile ilgili bir kaynakça yayınlanmıştır. Bu kaynakçada Amerika, Fransa ve Almanya’da yapılmış olan 100’den fazla vurma deneyi sonucu listelenmiştir. Bu sonuç raporları, IATM uyelerinin de bildiği bilgileri içermiş, bazı sonuç raporları IATM kongresinde tartişılmış ve sunulmuştur (Siewert ve ark., 1999).

Bu sonuç raporları arasında Russel tarafından hazırlanan rapor (ilk kez 1898’de yayımlanmıştır) zamanın tasarım muihendisleri tarafından dikkate değer olarak goriulmüş ve deney için nicel olme yontemlerini ortaya koymuştur. Russel zamanın ağırlık duişürme deneyi makinelerinin hiçbirinin işaret etmediği deney numunesinin kırılıp kırılmadığını veya sağlam kalıp kalmadığı bilgisinin ötesinde bir bilgi saptama amacındaydı. Bu yuzden deney numunesi kırılırken malzemenin emdiği enerjiyi gerçek olarak olebilmek için sarkaç makinesini tasarlamış ve uygulamasını yapmıştır. Russel raporunda sallanan sarkaç prensibi temelinde ve günümüzde de kullandığımız deney makinesini gostermiş ve dikkatle yaptığı analizler ile sonucun doğrulanması için sürtünme kayıplarından ve yerçekimi merkezinin karşılaştırılmasından bahsetmiştir. İlk geliştirilen deney makinesi deneyi yapılan tüm ürünleri kırabilecek yetenekte çok büyük ve ağır yapılmıştır. Russell’in sarkaç vurma makinesi deney numunesinde emilen enerjinin olülmesi için çözüm sağlamış ve Russell’in raporunda deney makinesi teknolojisi ve malzeme performansı için açıklama ve gelecekteki araştırmacılar için ayrıntılı bir değerlendirme verilmiştir (Siewert ve ark., 1999).

IATM komisyonunun 22 üyesi çarpma deneyi tekniğinde tanımlanmış kusurların etkisini yok etmek için çalışmalarını sürdürmüşlerdir. IATM 1906 Brüksel kongresinden sonra vurma deneyi araştırmalarına Fransız temsilci G. Charpy başkan seçilmiştir. O dönemde IATM komisyon başkanı olmasından ve bu konudaki dinamik araştırmacıların içinde olmasından ötürü bu deney günümüzde Charpy adını taşımaktadır. Charpy’nin 1901 yılındaki raporu Russell’in icat ettiği sarkaç vurma deneyine tıpatıp benzemektedir. Raporunda metalin gevrekliğini değerlendirmek için sayısal değerler elde edilmesi ve bunun için yontemler tartişılmaktaydı (Siewert ve ark., 1999).

Rusell 1897'de Amerika İnşaat Mühendisleri Odasına malzeme deneyi için vurma makinesiyle yeni deneyler adlı raporunu sunmuştur. O geliştirdiği deney makinesi ile deney numunesinin kırılmasında kesitte emilen enerjiyi hesaplamıştır. Deney makinesinde sarkaç kolu ucunda deney numunesine çarpan bir çekiç bulunmaktaydı. Sarkaç kolu belli bir yükseklikten serbest bırakılarak denge noktasındaki deney numunesine çarpması ve numuneyi kırarak diğer yönde yükselmeye devam etmesi sağlanmıştır. Sarkaç kolunun başlangıç ve deney numunesine çarptıktan sonraki yükseklik farkından barın kırılma enerjisi hesaplanmıştır (Siewert ve ark.1999).

1905 yılında Charpy tarafından önerilmiş olan makine dikkat çekecek ölçüde mevcut tasarıma benzemekle birlikte literatüre Charpy deney ve Charpy metodu olarak geçmiştir. Charpy 1914'e kadar bu konudaki çalışmalara öncülük etmiştir. Makine tasarımı ve deney yöntemi ile ilgili diğer bir çözüm Ehrensberger tarafından geliştirilmiş ve 1907'de Alman Malzeme Deney Birliği (German Association for Testing Materials) tarafından kabul edilmiştir. Sarkaç vurma deneyi için henüz yeterli bir yaygın kullanım kabul edilmediğinden dolayı vurma makinesi tasarım ve üreticileri 3 ayrı tip makine sunmuşlardır. Bunlar ağırlık düşürme makinesi (Fremont, Hatt-Turner and Olsen), sarkaç vurma makinesi (Amsler, Charpy, Dow, Izod, Olsen ve Russell) ve dönen tambur makinesidir (Guillery) (Siewert ve ark., 1999).

Bu dönemde deney numunesi hazırlanması ve boyutları konusunda günümüz standartlarına oldukça yaklaşmıştır. Başlangıçta 2 tip deney numune boyu benimsenmiştir. Küçük olanı 10mm x 10mm kesitinde ve 55mm uzunluğunda hazırlanmıştır. Deney sırasında örsler arası mesafe 40 mm, çentik 2-5 mm derinliğinde ve çentik yarıçapı 1 mm olarak yapılmıştır. Başlangıçta daha popüler olan daha büyük olanda ise tüm ölçüler 3 kat daha büyük yapılmıştır. Büyük deney numunesi taraftarları kesitin daha büyük olmasının bir avantaj olduğunu ve küçük deney numunesi hazırlamanın daha zor olduğuna dikkat çekmişlerdir. Küçük deney numunesi kullanan deney makineleri boyut olarak küçük ve maliyet olarak da daha ucuza imal edilebildiğinden küçük deney numunesi kullanılmasını savunan grup tartışmayı kazanmıştır. Küçük deney numunesi boyutları itibariyle günümüzde kullanılabilecek kadar yakın yapılmıştır.

1912 de yapılan bir toplantıda hazırlanan bir rapor ile çelik ürünler için vurma deneyi yöntemleri ve daha az gevrek çelikler için tavsiye edilen işlemler belgelenmiştir (Siewert ve ark.1999).

ASTM komitesince malzemelerin darbe testi üzerine 1922 yılında Atlantik City, New Jersey de bir sempozyum düzenlenmiştir. Sempozyum bu alandaki tarihsel gelişimi içermekteydi. İngiliz Mühendislik Standartları Birliği (British Engineering Standards Association) tarafından yapılmış birkaç teknik sunum gözden geçirilmiş ve yapılan inceleme sonuçları 64 Amerika deney laboratuvarına gönderilmiştir. 23 adet laboratuardan deney makinelerinin kullanılması, deney numunesi boyutları ve deney yöntemleri gibi konuları içeren detaylı bilgiler cevap olarak gönderilmiş, ek olarak vurma deneyi için ASTM standartlarının geliştirilmesi konusunda isteklerini bildirmişlerdir. 1923 yılında yapılan bu inceleme ve toplanan bilgiler temel alınarak ASTM alt komitesi sarkaç deneyi için deney yöntemleri standardı hazırlamaya başlamıştır. Bu çalışma 1933' e kadar sürmüş ASTM "Metal malzemelerin geçici vurma deneyi yöntemleri" adıyla E23-33T yi yayınlamıştır (Siewert ve ark., 1999).

ASTM E23-33T ile deney için kullanılacak sarkaç tipi makine belirlenmiş ve deney parçasının tutulması ve çekiçle vurulması üzerine iki yöntem tanıtılmıştır. Bu yöntemler Charpy ve Izod deneyleri olarak bilinmektedir. İki deney yönteminde de çekicinin vurma kenarı geometrisi belirtilmemiştir. Komite deney sonucuna etki eden birçok detaydan söz etmemiştir. Zamanla Charpy deneyi daha ön plana çıkmıştır.

E23 teki ilk düzenleme 1934'te yayınlanmıştır. Örslerin boyutları ve yarıçapları standarda eklenmiştir. Charpy deneyinde çekicinin boyutları ve yarıçapları deney numunesi ile ilişkili olmasına rağmen 1934 teki düzenlemede bundan bahsedilmemiştir. 1939 ve 1940 ta vurma deneyi alt komitesinde bu konu üzerinde durulmuş, İngiltere ve Fransa'da kullanılan geometriler incelenmiştir. Bu ülkelerde kullanılan çekiç vurma ağzı yarıçapı İngiltere de 0,57 mm Fransa da 2 mm olarak hazırlanmış, ancak sonuçları kaydedilmemiştir. 1940'taki toplantıda alt komite üyeleri 8 mm yarıçap kabul edilmiştir. Bu konu ile ilgili olarak ASTM E23 revize edilmiştir. E3-41T olarak tekrar yayınlanmıştır. Diğer iki değişiklik metrik birim sisteminin tercih edilmesi ve Charpy deneyi için U çentikli deney numunesi özelliklerinin belirtilmesiyle yapılmıştır (Siewert ve ark.1999).

Vurma deneyi, malzeme değerlendirme için kullanışlı gözükmeyle beraber, çelikte süneklikten gevrekliğe geçişi saptayabilme yeteneğinin tanınmasına kadar, satın alma yapı standartları gibi ortak gereksinimlerde ön plana çıkmamıştır. Muhtemelen en büyük sıçrama 2. Dünya savaşı sırasında birçok gemide hata ve bozuklukların meydana gelmesiyle, malzeme özellikleri ve üretim standartlarının muayenesi için vurma deneyinin uygulanmaya başlanması ile olmuştur.



1948’de çoğu kullanıcı kendi geliştirdiği deney makinesini kullanmaktaydı. Elde edilen sonuçlarda belli bir standart sağlanamamaktaydı. Bu nedenle deney metotlarını ve birincil deney parametrelerini belirlemek için dikkatli bir çalışma başlatılmıştır. 1964’te ASTM E23, deneyde yapılan doğrulama ve birincil parametrelerin ne olduğunu belirtmek için gözden geçirilmiştir. Vurma deneyi sonuç değerlerinin yanlış olmasının önemli nedenleri özetlenmiş ve aşağıdaki gibi yayınlanmıştır (Siewert ve ark., 1999);

- i. Uygun olmayan makine yapılması,
- ii. Çarpma kenarı ve örslerde yanlış boyutların kullanılması,
- iii. Hareketli bölümlerde çok fazla sürtünme,
- iv. Bağlantılarda gevşeklik,
- v. Deney numunesinin sonu ile destek kenarı arasında yetersiz açıklık,
- vi. Kötü şekilde hazırlanmış deney numunesi,
- vii. Yanlış soğutma ve deney teknikleri.

ASTM E23 ile belirlenmiş deney teknikleri ve numuneleriyle yapılan deneylerde başarının arttığı görülmüştür. Deney sonuçlarının incelenmesinde ilk zamanlar deney makinelerini %44’ünün önerilen limitleri karşılama başarısız olduğu görülmüştür. Bu oranın çok olması, makinenin yanlış kullanılmasının sonucu olduğu düşünülmüştür. Ancak iyi makineler hazırladıkça vurma deneyi makinelerindeki hataların çok hızlı bir şekilde düştüğü görülmüştür ve deney metotları için daha fazla dikkat edilmiştir. Deney makinelerinin %90’ının önerilen limitleri karşıladığı tahmin edilmiştir. (Siewert ve ark.1999).

Bütün doğrulama limitlerinin ASTM E23 ile birleştirilmesi vurma makinelerinin performansını çok artırmıştır. Toplanan veriler ile ASTM E23 standardına uyan makinelerin diğerlerine kıyasla daha güvenilir olduğu görülmüştür. ASTM E23’un düşük enerjili makineler için (15J-20J) tüm dünyada bilinen tek standart olduğu söylenebilir (Siewert ve ark.1999).

Küresel standartların geliştirilmesi için ASTM E23’ten başka araştırmalar da bulunmaktadır. ISO komisyonu TC 164, mekanik deney konusunu ve SC 4 alt komitesi ise dayanıklılık deneyini ele almıştır. Bu alt komite dayanıklılık deneyi üzerine 10 adet standart geliştirmiştir. Bunlardan en çok bilinenin ISO R422, “Metal Malzemeler-Vurma Deneyi–Sarkaç Vurma Makinelerinin Doğrulanması” standardı olduğu söylenebilir. Bu standardın önemli bir özelliği Charpy deneyinde çekiç vurma ağzı yarıçapı için 8mm ve 2mm olarak iki değişik ölçünün tanıtılmış olmasıdır. Japon standardı JIS Z 2242 “Metal Malzemeler İçin Vurma Deneyi Yöntemi” gibi vurma

deneyi yöntemleri üzerine başka bölgesel ve ulusal standartlar da bulunmaktadır (Siewert ve ark.1999).

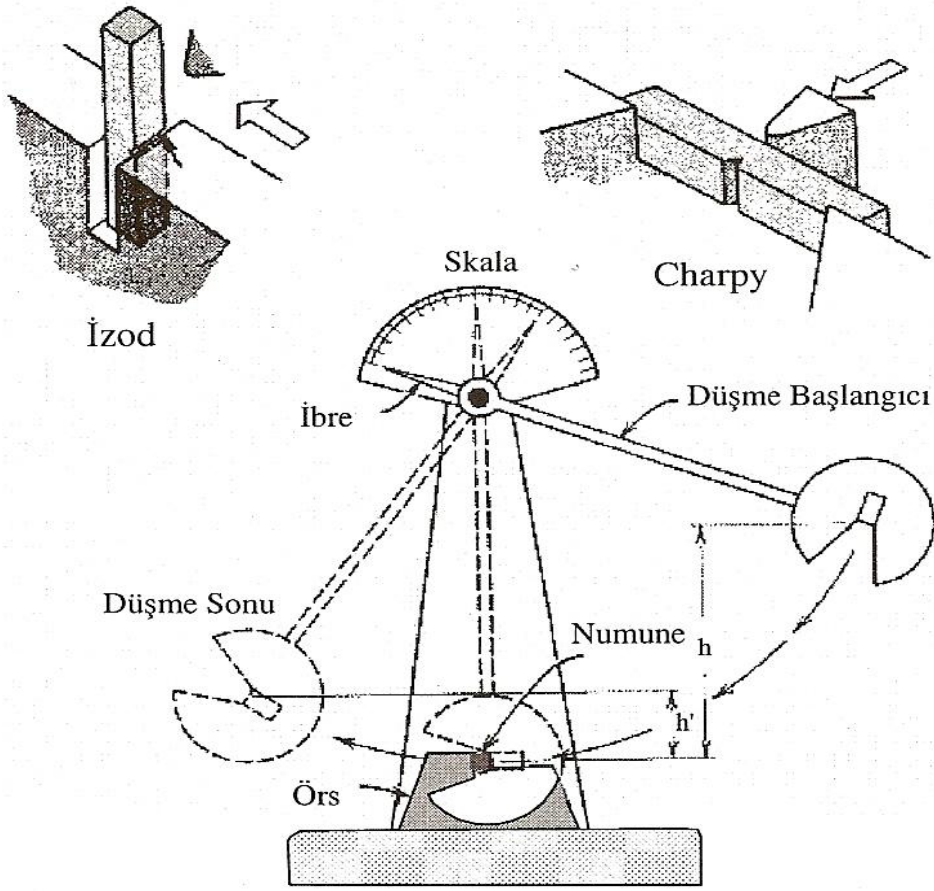
Ülkemizde TS EN 10045-1 (1999) “Metalik Malzemeler-Charpy Vurma Deneyi-Bölüm 1: Deney Metodu (V ve U Çentikleri)”, TS EN 10045-2 (1999) “Metalik Malzemeler-Charpy Vurma Deneyi-Bölüm 2: Deney Makinesinin Doğrulanması (Sarkaçla Vurma)”, TS EN 875 (2002) “Metalik Malzemelerde Kaynaklar Üzerinde Tahribatlı Deneyler-Vurma Deneyleri-Deney Numunesi Yeri, Çentik Yönü Ve Muayene”, TS ISO 946 (2002) “Gri Dökme Demir-Çentiksiz Vurma Deneyi”, TS EN ISO 14556 (2005) “Çelik-Charpy V-Çentikli Sarkaç Darbe Deneyi-Aletli Deney Metodu”, TS EN ISO 179-1 (2006) “Plastikler-Charpy darbe özelliklerinin tayini-Bölüm 1: Ölçü aletsiz darbe deneyi”, TS EN ISO 179-2 (2006) Plastikler-Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini-Bölüm 2: Ölçü aletli darbe deneyi”, standartları mevcuttur.

### **3.2 Çentik Darbe Deney Düzenegi**

Çentik darbe deneyi sarkaç yöntemi kullanılarak geliştirilmiş bir deney yöntemidir. Deneyde sabit ağırlıklı çekiç belirli bir yükseklikten bırakılmakta ve salınarak aşağı doğru inerken numuneye çarparak kırmaktadır. Sarkaç düzenekli vurma deneylerinin en yaygın olanları Charpy ve Izod deneyleri olarak bilinmektedir (Şekil 3.1). Eğer deney cihazının örs ve mengene kısımları uygun ise her iki deney de aynı cihaz üzerinde yapılabilmektedir. Bu çalışmada kayaların çentik darbe deney değerlerinin belirlenmesinde Charpy yöntemi esas alınmıştır.

İzod deney parçası ise 11.43 mm dairesel kesitli veya 10 mm x 10 mm kare kesitli ve 71 mm uzunluğunda ki numune dairesel kesitlerde 3.33 mm, kare kesitlerde 2 mm uzunluğunda çentikli numuneden oluşur. Bu deneyde numune bir kenarından dik duracak şekilde mengeneyle sabitlenmekte, sıkıştırılan kısma yakın yerden numuneye çentik açılmaktadır. Çentik tarafına ağırlığı bilinen bir çekiç belli bir yükseklikten bırakılarak numune kırılmaktadır.

Charpy darbe testi 10 mm x 10 mm x 55 mm boyutlarında ortasından çentik açılmış kare kesitli bir numunenin darbe altında kırılması esasına dayanır. Burada yatay olarak her iki uçtan desteklenen numunenin ortasına çentiğin ters tarafına, ağırlığı bilinen bir çekiç belli bir yükseklikten bırakılarak numune kırılmaktadır. Bu iki deneyin uygulanmasında farklılık olmasına rağmen kırılma enerjisinin hesaplanması aynıdır. Her iki deney şeklinde de malzeme kırıldıktan sonra çekicinin yüksekliğindeki azalmayı esas alan skaladan kırma işi için harcanan enerjinin miktarı bulunmaktadır.

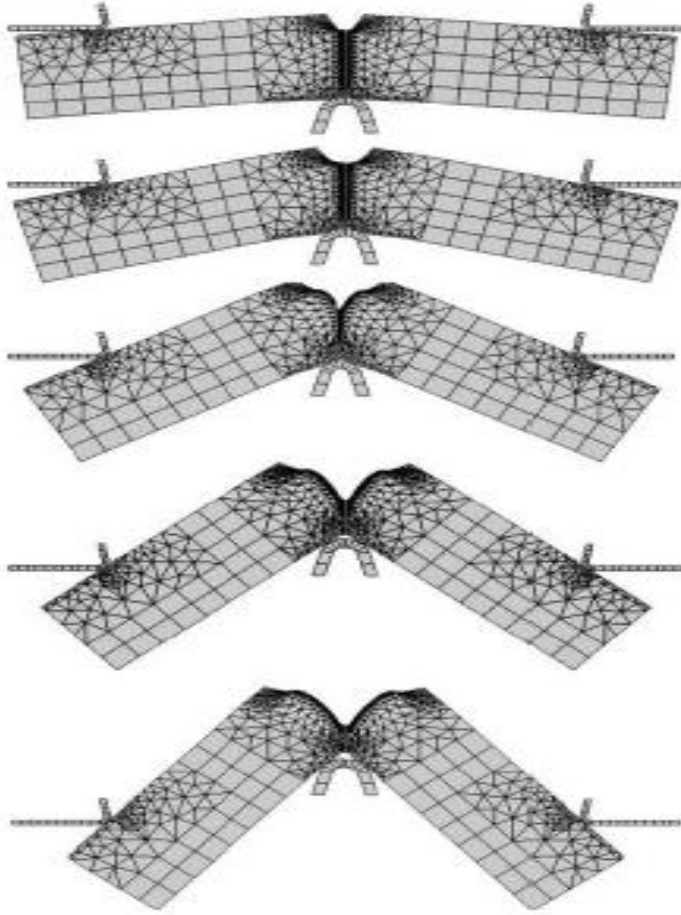


Şekil 3.1 Charpy ve Izod darbe deney düzeneği

Deneyin uygulanmasında, ağırlığı bilinen sarkaç belirli bir yüksekliğe çıkarılmaktadır. Boyutları standartlara uygun olarak hazırlanmış olan numune mesnetlere (örslere) tam olarak yaslanacak şekilde ve çekicinin salınım düzlemi ile çentiğin simetri düzlemi  $\pm 0.5$  mm içinde birbirine çakışacak şekilde yerleştirilmektedir. Sarkaç kolu kendi ağırlığı ile serbest düşmeye bırakılmadan önce durağan halde iken başlangıç potansiyel enerjisine (deney enerjisi) sahiptir.

Sarkaç bu yükseklikten serbest bırakıldığında düşey bir düzlem içinde hareket ederken çekici numuneye çarparak numuneyi kırar ve ters yönde hareketine devam ederek yükselir. Sarkacın ters yöndeki en yüksek noktadaki kol hızı sıfır iken sahip olduğu potansiyel enerji deney sonu enerjisidir. Başlangıç potansiyel enerji ile deney sonu potansiyel enerji arasındaki fark, o numunenin kırılması için gereken enerjiyi, başka bir deyişle, çentik darbe direncini vermektedir.

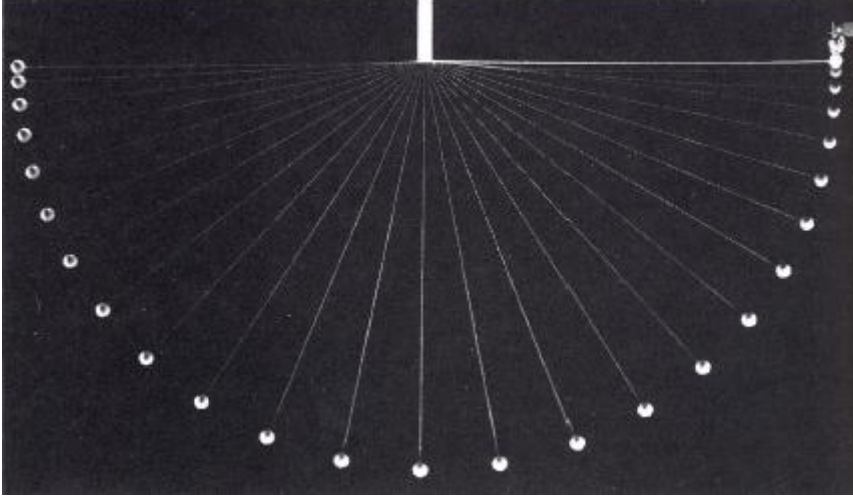
Tanguy ve ark., 2004, çentik darbe deneyinde mesnetler üzerindeki numunenin çekicinin darbesiyle kırılma aşamalarını Şekil 3.2'deki gibi göstermişlerdir. Buna göre çekicinin darbe etkisiyle numune çekiç hareket yönünde eğilerek hareket etmekte, bu esnada çentikli yüzeyde yeni çatlak oluşmakta ve nihayetinde numune kırılarak iki parçaya ayrılmaktadır.



Şekil 3.2 Çentik darbe testinde mesnetler üzerindeki numunenin çekicinin darbesiyle kırılması (Tanguy ve ark., 2004).

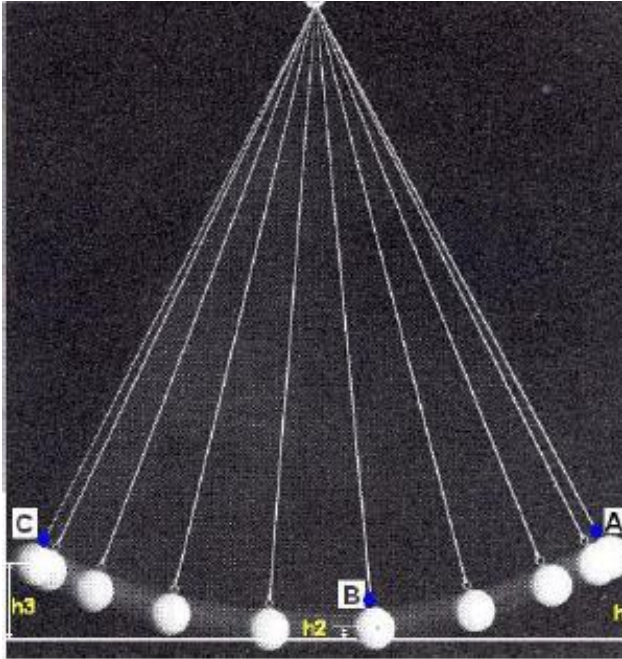
### 3.2.1 Çentik Darbe Deneyinin Mekanikliği

Charpy ve Izod darbe deneyinde kullanılan düzeneğin çalışmasının, sarkacın çalışma prensibine bağlı olduğu söylenebilir. Sarkacın salınımı incelendiğinde, düzgün olmayan (hızı sabit kalmayan) dairesel hareket yaptığı görülmektedir. İdeal durumda, yani sarkaç kolundaki sürtünme ve hava sürtünmesi gibi kayıplar yok kabul edilirse sarkaç kolu ilk bırakıldığı yüksekliğe çıkar (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Sarkaç salınım hareketi (Serway, 1992).

Sarkacın serbest hareket anındaki yörüngesindeki herhangi bir noktada (Şekil 3.4) çekicinin sahip olduğu enerji belirlenebilmektedir. Sarkaç hareketinin herhangi bir noktasında oluşan mekanik enerji ( $E_t$ ), sarkacın sahip olduğu potansiyel ( $E_p$ ) ve kinetik ( $E_k$ ) enerjilerinin toplamına eşittir ( Serway ve Faughn, 1995).



Şekil 3.4 Sarkacın serbest hareket yörüngesi (Ohanian, 1994).

Sarkacın ilk bırakıldığı anda A noktasında;

$$E_{tA} = E_{pA} + E_{kA} \quad [3.1]$$

$E_{pA} = mgh_1$  ve  $E_{kA} = 0$  olmak üzere

$$E_{tA} = mgh_1 \quad [3.2]$$

şeklinde yazılabilir.

Sarkacın hareket yörüngesindeki B noktasında;

$$E_{tB} = E_{pB} + E_{kB} \quad [3.3]$$

$E_{pB} = mgh_2$  ve  $E_{kB} = \frac{1}{2}mV_B^2$  olmak üzere

$$E_{tB} = mgh_2 + \frac{1}{2}mV_B^2 \quad [3.4]$$

şeklinde yazılabilir. Sarkaç B noktasını geçip tam olarak düşey pozisyona geldiğinde

potansiyel enerji sıfıra eşit olacağından  $E_t = \frac{1}{2}mV^2$  olarak ifade edilebilir.

Sarkacın diğer tarafta eriştiği en yüksek C noktasında;

$$E_{tC} = E_{pC} + E_{kC} \quad [3.5]$$

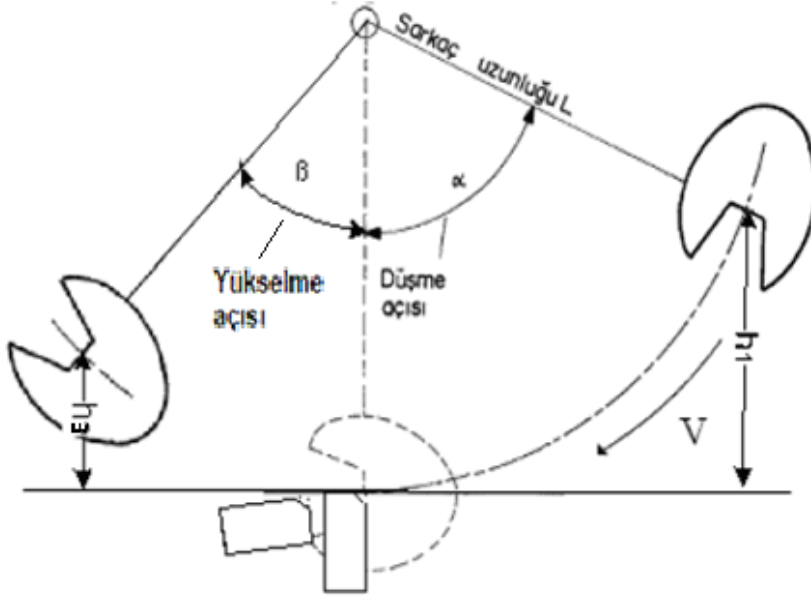
$E_{pC} = mgh_3$  ve  $E_{kC} = 0$  olmak üzere

$$E_{tC} = mgh_3 \quad [3.6]$$

şeklinde yazılabilir.

Yukarıda ifade edildiği gibi, sarkaç kolundaki sürtünme kayıpları yok kabul edilirse sarkaç kolu ilk bırakıldığı yüksekliğe çıkar. Bu durumda  $h_1=h_3$  yazılabilir. Ancak, gerçek deney düzeneğinde sarkaç kolundaki sürtünme kaybı ve hava direncinden dolayı oluşan kayıp sıfır yapılamadığından  $h_1$  yüksekliğinden serbest bırakılan sarkaç kolu  $h_3$  yüksekliğine ulaşmaktadır ve  $h_3 < h_1$  olmaktadır.

Deney sırasında ise  $h_1$  den serbest bırakılan sarkaç kolu, kol yüksekliğinin sıfır olduğu, kol mekanik enerjisinin tamamen hareket enerjisine dönüştüğü durumda ( $\alpha=\beta=0$ ), deney numunesine çarpmakta ve sahip olduğu enerjinin bir kısmı deney numunesinin kırılması için harcanmaktadır. Sarkaç kolu diğer tarafta  $h_3$  yüksekliğine çıkmakta ve  $h_3 < h_1$  olmaktadır. Ancak buradaki  $h_3$  yüksekliği serbest bırakılma anındaki  $h_3$  yüksekliğinden de daha az olmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Sarkacın deney numunesini kırdıktan sonraki hareketi

Bu durumda numunenin kırılması için harcanan enerji ( $E_{CVN}$ );

$$E_{CVN} = mgh_1 - mgh_3 = mg(h_1 - h_3) = mg(\cos \beta - \cos \alpha) \quad [3.7]$$

olarak belirlenmektedir. Bu enerji deney numunesinin kırık kesit alanına ( $A$ ) bölünerek numunenin çentik darbe kırılma direnci ( $\sigma_{CVN}$ );

$$\sigma_{CVN} = \frac{E_{CVN}}{A} = \frac{mg(h_1 - h_3)}{A}, \quad J/cm^2 \quad [3.8]$$

bulunmaktadır.

### 3.3 Çentik Darbe Deneyini Etkileyen Faktörler

Değişik zamanlarda ve değişik laboratuarlarda yapılan çentik darbe deneylerden alınan sonuçların tutarlı olmaması, çentik darbe deneyi sonuçlarının önemini azaltmaktaydı. Zamanla araştırmacılar, bu deneyden elde edilen sonuçların deney numunesinin boyut ve geometrisi, çentik geometrisi, örs ve çekiç geometrisi gibi etkenlere kuvvetli şekilde bağlı olduğunu; daha az olmakla beraber çarpma hızı, deney makinesindeki enerji kaybı gibi diğer etmenlerden de etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Deney düzenekleri, belirli ölçütlere göre hazırlandığında elde edilen sonuçlardaki farklılıkların azaldığı gözlenmiştir. 1900-1960 arası deney, teknoloji ve yöntem olarak yüksek doğruluk seviyesine ulaşmış ve standartları belirlenerek günümüzde çok yaygın kullanılabilir hale gelmiştir (Siewert ve ark., 1999).

### 3.3.1 Deney Numunesinin Boyut ve Geometrisi

Çentik darbe deneylerinde amaç deney numunesinin kırılma enerjisini ölçebilmek olduğundan deney sonucunda numunenin tam olarak kırılarak iki parçaya ayrılması gerekmektedir. Bu nedenle, deney cihaz kapasitesi ile de ilişkili olarak, deney yapılacak malzemenin boyutlarının ve geometrisinin malzemenin kırılmasına olanak verecek şekilde seçilmesi zorunlu olmaktadır. Diğer yandan, sünek davranış gösteren malzemelerle yapılan deneylerde çentiksiz numunelerin kırılmadan bükülebildiği, çentik olduğunda kolay kırılabilir olduğu gözlemlenmiştir (Manahan, 1996; Siewert ve ark., 1999). Ayrıca, kırılma davranış gösteren malzemelerin deneylerinin çentikli veya çentiksiz olmasının herhangi bir kırılma sorunu oluşturmadığı çeşitli araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir (Manahan, 1996; Siewert ve ark., 1999; Anık, 1999; TS ISO 946, 2002; Demirci, 2004; Hufenbach ve ark., 2007; Jeong ve ark., 2008).

Günümüzde metallere uygulanan çentik darbe deneyinde (Charpy) 10x10x55 mm boyutlarında ortasından çentik açılmış kare kesitli numuneler kullanılmaktadır (Çizelge 3.1) (ASTM E23, 1997; TS EN 10045-1, 1999). Plastik ve kompozit malzemelerde uygulanan deneylerde verilen boyutlar aynı kullanılabildiği gibi zaman zaman farklı boyutlar tercih edilebilmektedir (TS EN ISO 179-1, 2006; Eren, 2007).

Benzerga ve ark. (2002), bazı çeliklerde kırılma-sünek davranış geçiş sıcaklığına numune boyutunun etkisini belirlemek amacıyla geometrik olarak benzer ve boyutları orantılı olarak artırılmış numuneler üzerinde çentik darbe deneyleri yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda, numune boyutunun artışı ile kırılma-sünek geçiş sıcaklığının arttığını, hem kırılma hem de sünek davranış bölgelerinde numunenin kırılma anında absorbe ettiği enerjinin de arttığını belirlemişlerdir. Bu değişimin numune boyutları ile orantılı olduğuna dair deney verileri elde edilememiştir (Benzerga ve ark., 2002).

DeSandre ve ark. (2004), Charpy V çentik deneyinde malzeme ataleti ve boyutunun etkilerini belirlemek amacıyla iki farklı çelik numune üzerinde çalışma yapmışlar ve büyük boyutlu numunelerin kırılma için absorbe ettiği enerjinin hem kırılma hem de sünek davranış bölgelerinde küçük boyutlulara göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Numune tarafından kırılma için absorbe edilen enerji boyuta göre normalize edildiğinde bile önemli bir boyut etkisi kalmakta, numunelerin sünek ve kırılma bölgelerinin her ikisi için de bu etkiler açıkça görülmektedir. Yeterince küçük numuneler yaklaşık olarak boyuttan bağımsız davranış gösterirken, daha büyük



numuneler boyuta kuvvetli olarak bağı davranış göstermektedir (DeSandre ve ark., 2004).

Çizelge 3.1 Deneysel numunesi boyutları (TS EN 10045–1, 1999)

Adlandırma	U-çentikli deney parçaları			V-çentikli deney parçaları		
	Anma boyutu	İşleme toleransı		Anma boyutu	İşleme toleransı	
			ISO sembolü <sup>1)</sup>			ISO sembolü <sup>1)</sup>
Uzunluk	55 mm	± 0,60 mm	J <sub>s</sub> 15	55 mm	± 0,60 mm	J <sub>s</sub> 15
Yükseklik	10 mm	± 0,11 mm	J <sub>s</sub> 13	10 mm	± 0,60 mm	J <sub>s</sub> 13
Genişlik						
- standard deney parçası	10 mm	± 0,11 mm	J <sub>s</sub> 13	10 mm	± 0,11 mm	J <sub>s</sub> 13
- daralmış kesitli deney parçası	-	-	-	7,5 mm	± 0,11 mm	J <sub>s</sub> 13
- daralmış kesitli deney parçası	-	-	-	5 mm	± 0,06 mm	J <sub>s</sub> 12
Çentik açısı	-	-	-	45°	± 2°	-
Çentik altı yükseklik	5 mm	± 0,09 mm	J <sub>s</sub> 13	8 mm	± 0,06 mm	J <sub>s</sub> 12
Çentik tabanı kavis yarıçapı	1 mm	± 0,07 mm	J <sub>s</sub> 12	0,25 mm	± 0,025 mm	-
Deneysel parçasının uçlarından simetri düzleminin uzaklığı	27,5 mm	± 0,42 mm	J <sub>s</sub> 15	27,5 mm	± 0,42 mm	J <sub>s</sub> 15
Çentiğin simetri düzlemi ile deney parçasının uzunlamasına bitişik yüzleri arasındaki açı	90°	± 2°		90°	± 2°	
Deneysel parçasının uzunlamasına bitişik yüzleri arasındaki açı	90°	± 2°		90°	± 2°	
1) TS 1845 EN 20286-1'e göre 2) Deneysel parçasının otomatik olarak yerleştirildiği makineler için, toleransın ± 0,42 mm yerine ± 0,165 mm alınması tavsiye edilmektedir.						

Jeong ve ark. (2008), çentiksiz numuneler üzerinde yaptıkları darbe deneylerinde numune kalınlığının artışı ile kırılma enerjisinin arttığını belirlemişlerdir. Chao ve ark. (2007) ise küçük boyutlu numunelerin Charpy darbe kırılma enerjisinin standart kalınlıklardaki numunelerden daha az olduğunu belirlemişlerdir. Çentikli ya da çentiksiz darbe deneylerinde standart boyutta olmayan numunelerin deney verileri

numune geometrisinden bağımsız darbe kırılma enerji değeri elde etmek için bir normalizasyon katsayısı ile düzeltilmektedir. Schubert ve ark. (1995), bu normalizasyon katsayısını;

$$NF = \frac{Bb^2}{KL} \quad [3.9]$$

olarak önermişlerdir. Burada; NF normalizasyon katsayısı, B numune kalınlığı, b çentik sonrasında kalan kırılan alan uzunluğu, K çentik gerilme yoğunlaşma katsayısı ve L numune uzunluğudur. Chao ve ark. (2007) çalışmalarında kullandıkları numunelerin ASTM standartlarına göre kalınlığı farklı olduğundan sadece kalınlık için düzeltme yapmışlardır. Tower (1986), 10 mm kalınlıktan daha az kalınlığa sahip numuneler için Charpy darbe kırılma enerjisi ( $CVN_B$ ), standart numunenin darbe kırılma enerjisi ( $CVN_{10}$ ) ve numune kalınlığı (B) değerlerinden hareketle ( $CVN_B/CVN_{10}$ ) x (10/B) orantısına karşı test numunesinin kalınlığını (B) baz alan bir değerlendirme yapmış, 5 mm ve daha büyük kalınlığa sahip numunelerin yaklaşık aynı oranı (1) verdiğini ifade etmiştir. Wallin (2001), ASTM standartlarına göre ince (B=2.5-9 mm) ve kalın (B=20 mm) olan değişik dayanımlı çelikler üzerinde çalışmalar yapmış ve standart olmayan kalınlıklara sahip numunelerin darbe enerjisini standart numunenin darbe enerjisine dönüştürmek için Eşitlik 3.10'u önermiştir.

$$\frac{CVN_B \times 10}{CVN_B \times B} = 1 - \frac{0.5e^f}{1 + e^f} \quad [3.10]$$

Burada;  $f = \frac{2 \left( \frac{CVN_{10}}{B} - 44.7 \right)}{17.3}$  değerine sahiptir.

Eşitlik 3.9 ve 3.10'a göre Charpy darbe kırılma enerjisi numune kalınlığı ile orantılıdır. Bu nedenle kalınlığı standart olmayan numuneler standart boyutlara normalize edilebilir.

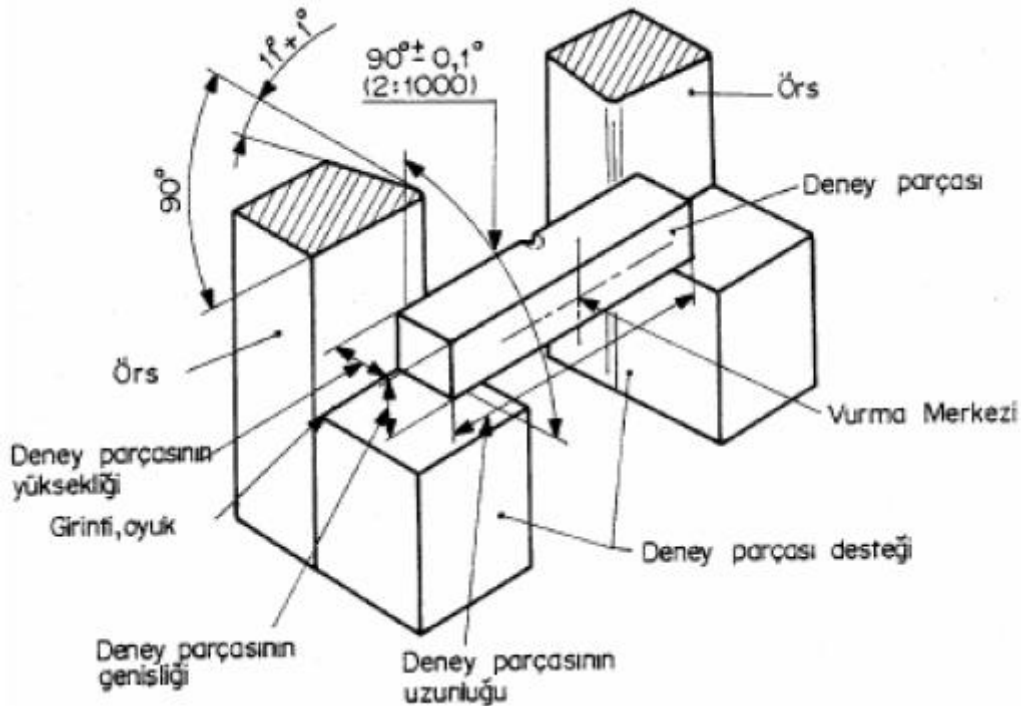
Kayalara yönelik olarak standart bir deney yöntemi ve numune boyut-geometrisi tanımlaması bulunmamaktadır. Furuzumi ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada 50x40x70 mm boyutlu, 10 mm derinlik, 2 mm genişlik ve 1 mm uç yarıçaplı çentikli kaya numuneleri kullanılmıştır. Bu boyutların seçimi ile ilgili ayrıntı verilmemiştir. Ayrıca bu çalışmada numune boyutunun deney sonuçları üzerindeki etkisine değinilmemiştir.



Çizelge 3.2 Örs ve desteklerin özellikleri (TS EN 10045–1, 1999)

Adlandırma	Değer
Örsler arası mesafe	$40_0^{+0.2} mm$
Örslerin yarıçapı	$1_0^{+0.5} mm$
Her örsün koniklik açısı	$11^0 \pm 1^0$
Destekle örs arasındaki açı	$90^0 \pm 0.1^0$

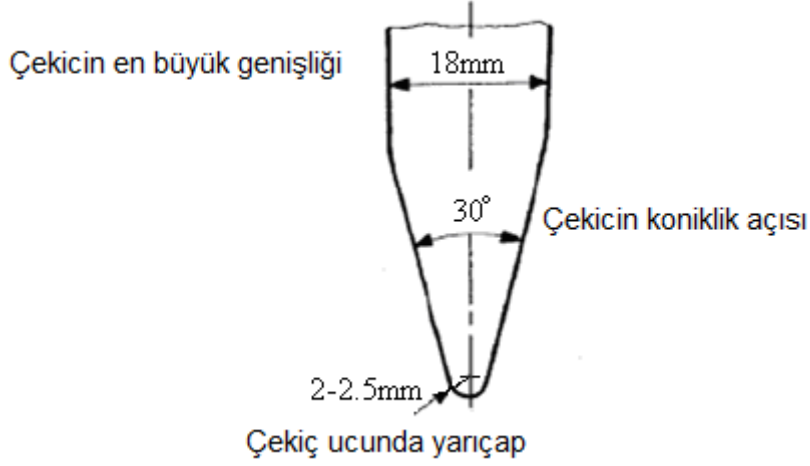
- Destekler bir ve aynı düzlemde bulunmalı; destek düzlemleri arasındaki mesafe hiçbir zaman 0,1 mm 'yi geçmemelidir. Destekler, deney parçası eksenini 3/1000 toleransla sarkacın dönme eksenine paralel olacak şekilde hazırlanmalıdır.
- Örsler bir ve aynı düzlemde bulunmalı; iki düzlem arasındaki mesafe hiçbir zaman 0,1 mm 'yi geçmemesi gerekmektedir. Örslerin düzlemi ile desteklerin düzlemi arasındaki açı  $90^0 \pm 0,10^0$  olmalıdır.
- Örsler arasındaki mesafe  $40_0^{+0.20mm}$  olmalıdır. Örslerin kavis yarıçapı  $1_0^{+0.5mm}$  olmalıdır. Örslerin koniklik açısı  $11^0 \pm 1^0$  olmalıdır



Şekil 3.7 Çentik darbe deney makinesinde deney numunesi örs ve destekleri (TS EN 10045–1, 1999)

### 3.3.4 Çekiç geometrisi

Çentik darbe deney makinelerinde kullanılan çekiç geometrisi Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8 Charpy deneyi çekiç geometrisi

### 3.3.5 Çekiç vurma hızı

Charpy vurma deneyinde çekiçin deney numunesine vurma anındaki hızı standartlara göre 5-5,5 m/sn olması gerekmektedir (TS EN 10045–2, 1999). Aşağıdaki formülden çekiçin deney numunesine vurma hızı bulunabilmektedir.

$$V = \sqrt{2gL(1 - \cos \alpha)} \quad [3.11]$$

Burada;

V: Vurma hızı (m/sn)

g: Serbest düşme ivmesi ( $g = 9,81 \text{ m/sn}^2$  alınır.)

L: Vurma ağızı merkezi ile dönme eksenindeki mesafe (m),

$\alpha$  : Düşme açısı (°)'dir.

## 3.4 Malzemelerin Çentik Darbe Deney Sonuçları ile Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkiler

Malzemelerin çentik darbe deney sonuçları ile fiziksel ve mekanik özellikleri arasında ilişkileri belirlemeye yönelik çalışmalar iki safhada yoğunlaşmıştır. Çalışmaların en yoğun olduğu aşama metal malzemelerde sıcaklığa bağlı olarak kırılma-sünek davranış

geçiş bölgelerinin tespit edilmesi yönündedir. Diğer aşama ise çentik darbe deneyi ile elde edilen darbe kırılma enerjisi ( $E_{CVN}$ ) ile statik kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) veya dinamik kırılma tokluğu ( $K_{Id}$ ) arasında belli bir ilişkinin olup olmadığının araştırılmasıdır.

Rolfe ve Novak (1970), metallerde statik kırılma tokluğu ile çentik darbe kırılma enerjisi arasında ilişkiyi belirlemek için Eşitlik 3.12'yı önermişlerdir.

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = 0.64\left(\frac{E_{CVN}}{\sigma_y} - 0.01\right) \quad [3.12]$$

Burada;

$\sigma_y$ : Akma dayanımı (MPa)'dır.

Sailors ve Corten (1971) metallerde statik kırılma tokluğu ile çentik darbe kırılma enerjisi arasında Eşitlik 3.13'deki gibi bir ilişkinin olduğunu ifade etmişlerdir.

$$K_{IC}^2 = 14.6(E_{CVN})^{0.5} \quad [3.13]$$

Barsom (1974), metallerde dinamik kırılma tokluğu ile çentik darbe kırılma enerjisi arasında Eşitlik 3.14'deki gibi bir ilişki belirlemiştir.

$$\frac{K_{Id}^2}{E} = 0.64(E_{CVN}) \quad [3.14]$$

Burada;

E: Elastik modülü (MPa)

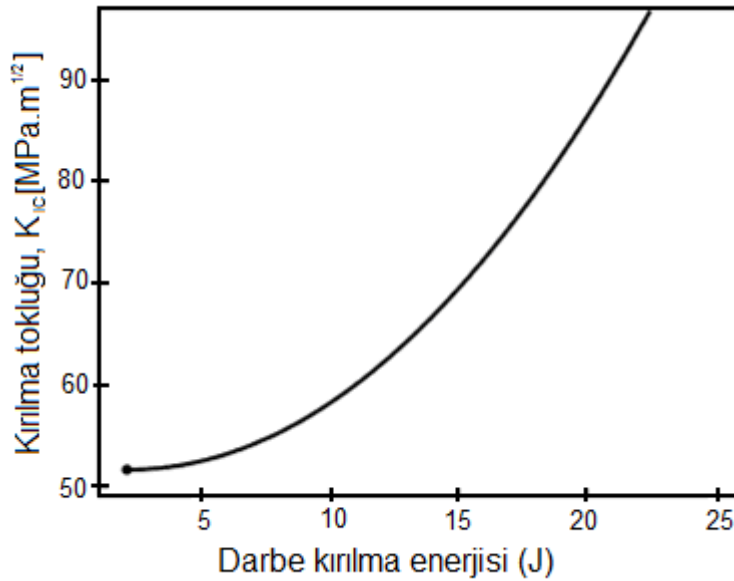
Wullaert ve Server (1975), metallerde statik ve dinamik kırılma tokluğu ile çentik darbe kırılma enerjisi arasındaki ilişkileri belirlemek için Eşitlik 3.15'i önermişlerdir.

$$K_{IC,d} = 2.1(\sigma_y E_{CVN})^{0.5} \quad [3.15]$$

Barsom ve Rolfe (1987), metallerde dinamik kırılma tokluğu ile çentik darbe kırılma enerjisi arasında Eşitlik 3.16'daki gibi bir ilişki belirlemişlerdir.

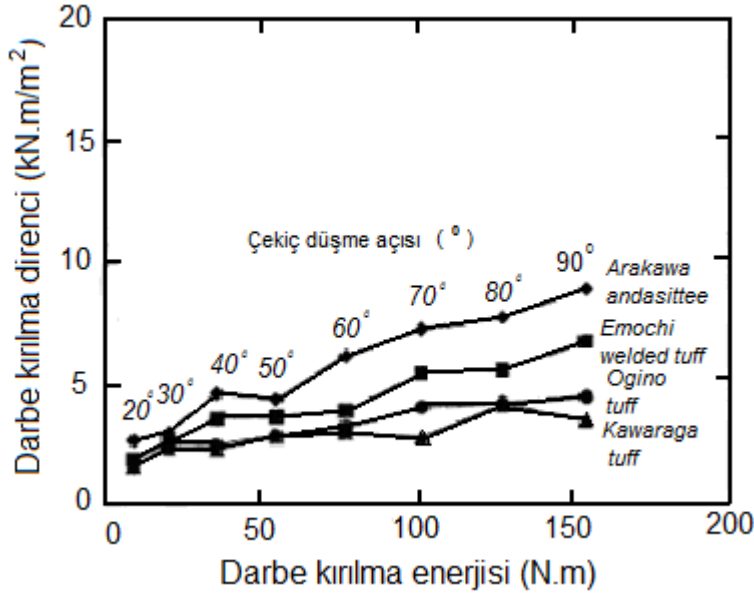
$$\frac{K_{Ic}^2}{E} = 0.22(E_{CVN})^{3/2} \quad [3.16]$$

Strnadel ve Hausild (2007), benzer çelik numuneler üzerinde kırılma tokluğu ve Charpy darbe deneyleri yapmışlar ve bu iki deney sonuçları arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir (Şekil 3.9). Yazarlar Şekil 3.9'in sol alt bölümünü çok kırılman alan olarak ifade etmişler ve bu alanda Charpy darbe kırılma enerjisi artışı ile darbe tokluğu değerinin artışının düşük seviyede olduğunu, kırılma tokluğunun daha yüksek olduğu alanlarda Charpy darbe kırılma enerjisinin artışı ile kırılma tokluğunda daha belirgin bir artış olduğunu ifade etmişlerdir.



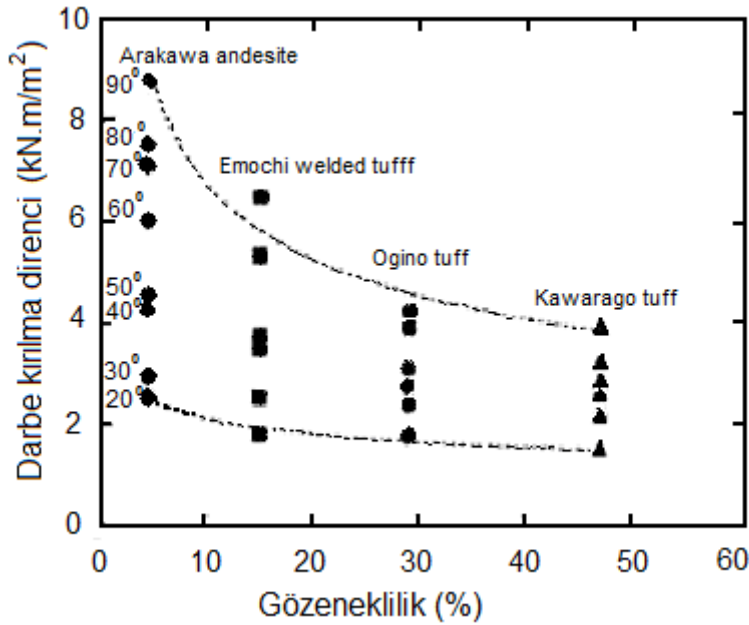
Şekil 3.9 Charpy darbe kırılma enerjisi ve kırılma tokluğu arasındaki ilişki (Strnadel ve Hausild, 2007)

Furuzumi ve ark. (2006), kayalar üzerinde yaptıkları çentik darbe testlerinde deney cihazının çekicinin düşme açısını 20–90° arasında değiştirilerek numune üzerine bırakılmışlar ve darbe kırılma enerjisine bağlı olarak net kırılma enerjisi olarak ifade ettikleri darbe kırılma direncini belirlenmiştir (Şekil 3.10). Buna göre çekiç düşme açısının artışı ile darbe kırılma enerjisi ve darbe kırılma direnci artmıştır.



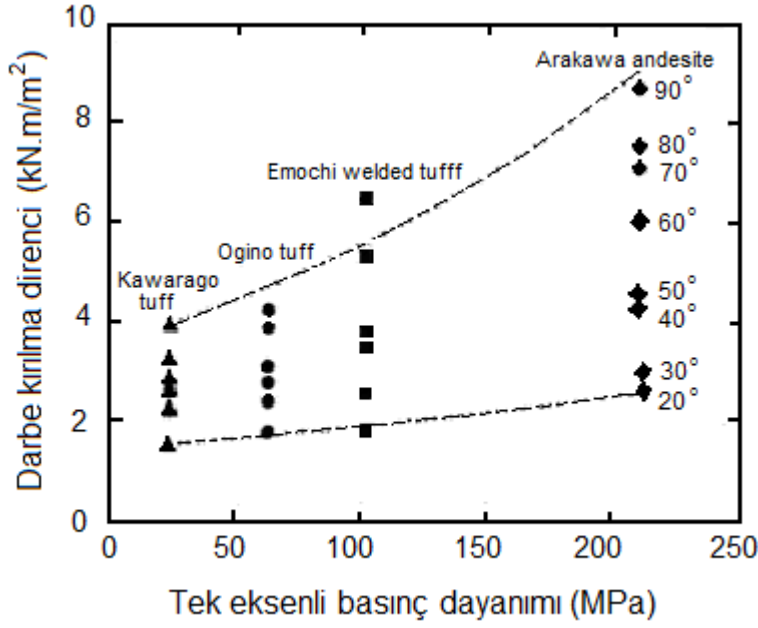
Şekil 3.10 Darbe enerjisi ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki (Furuzumi ve ark., 2006)

Furuzumi ve ark. (2006), aynı çalışmada kayaların darbe kırılma direnci ile gözenekliliği, tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişkileri de araştırmışlardır (Şekil 3.11–3.13). Bu sonuçlara göre kayaların gözenekliliğinin artışı ile darbe kırılma direncinin azaldığı, tek eksenli basınç ve Brazilian çekme dayanımlarının artışı ile darbe kırılma direncinin arttığı görülmektedir.

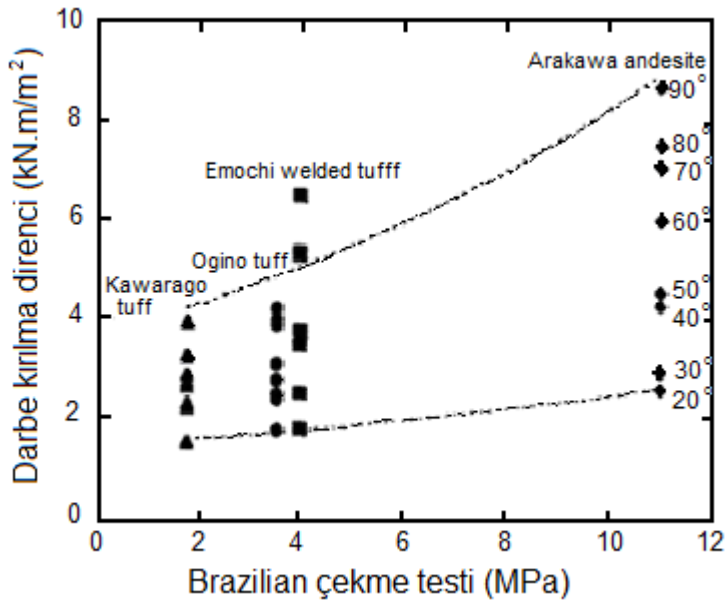


Şekil 3.11 Kayaların darbe kırılma direnci ile gözenekliliği arasındaki ilişki (Furuzumi ve ark., 2006)



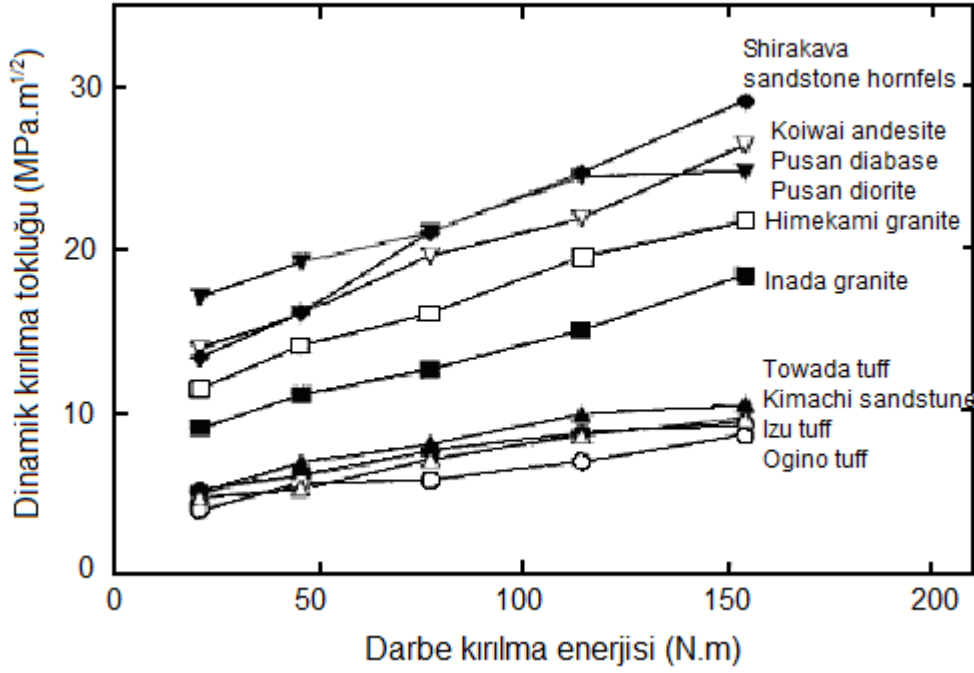


Şekil 3.12 Kayaların darbe kırılma direnci ile tek eksenli basınç dayanımları arasındaki ilişki (Furuzumi ve ark., 2006)



Şekil 3.13 Kayaların darbe kırılma direnci ile Brazilian çekme dayanımları arasındaki ilişki (Furuzumi ve ark., 2006).

Furuzumi ve ark. (2006), kayaların darbe enerjisi ile dinamik kırılma tokluğu arasındaki ilişkileri (Şekil 3.14) deney cihazının çekicinin düşme açısını 20–90° arasında değiştirilerek incelemişler ve darbe enerjisinin artışı ile dinamik kırılma tokluğunun arttığını ifade etmişlerdir.



Şekil 3.14 Kayaların darbe enerjisi ile dinamik kırılma tokluğu arasındaki ilişkiler (Furuzumi ve ark., 2006).

Buraya kadar özetlenen literatür araştırmasında kayalar dışındaki malzemelerin darbe kırılma enerjisi ve/veya direnci ile diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasında ilişkiler kurmaya yönelik verilere rastlanılmamıştır. Ancak, darbe kırılma enerjisi ve/veya direnci ile statik ve dinamik kırılma tokluğu arasında oldukça iyi ilişkilerin olduğu görülmüştür. Malzemelerin darbe kırılma enerjisi ve/veya direnci ile kırılma toklukları arasında var olan ilişkilerin kayalarda da olması beklenmektedir. Nitekim yukarıda ifade edildiği gibi Furuzumi ve ark. (2006), kayaların darbe kırılma enerjisi ile dinamik kırılma tokluğu arasında bu ilişkinin olduğunu ifade etmektedirler. Diğer yandan, kayaların kırılma tokluğu ile fiziksel ve mekanik özellikleri arasında aşağıda özetlenen oldukça anlamlı ilişkiler olduğu bilinmektedir.

Hucka ve Das (1974) kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) ile tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_C$ ), Brazilian çekme dayanımı ( $\sigma_t$ ), nokta yük dayanım indeksi ( $I_s$ ), elastisite modülü ( $E$ ), koni delici değeri ( $CI$ ) ve tek eksenli basınç dayanımının çekme dayanımına oranı ( $\sigma_C/\sigma_t$ ) olarak tanımlanan gevreklik değeri arasındaki ilişkileri incelemişler, incelenen parametreler ile kırılma tokluğu arasında anlamlı ilişkiler olduğunu ifade etmişlerdir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3 Kırılma tokluğu ile kaya özellikleri arasındaki ilişkiler (Hucka ve Das,1974)

Denklem	Korelasyon katsayısı (r)
$K_{IC} = - 0,221 + 0,0030 \sigma_c$	0,964
$K_{IC} = - 0,957 + 0,281 \sigma_t$	0,900
$K_{IC} = - 0,916 + 0,163 E$	0,814
$K_{IC} = -0,820 + 4,731 \log (CI)$	0,751
$K_{IC} = 0,632 + 0,325 I_s$	0,702
$K_{IC} = - 1,406 + 0,492 (\sigma_c/\sigma_t)$	0,735

Gunsallus ve Kulhawy (1984) kırılma tokluğu ile nokta yük dayanımı arasında ( $I_{s(50)}$ ) lineer bir ilişki belirlemişlerdir (Eşitlik 3.17).

$$K_{IC} = (0.0995 I_{s(50)}) + 1.11 \quad [3.17]$$

Whittaker ve ark., (1992) kayalarda kırılma tokluğu ve çekme dayanımı arasında Eşitlik 3.18'deki gibi lineer bir ilişki önermişlerdir.

$$\sigma_t = 9.35 K_{IC} - 2.53 \quad [3.18]$$

Brown ve Reddish (1997) kaya kırılma tokluğu ve yoğunluk ( $\rho$ ) arasındaki ilişkileri incelemişler ve Eşitlik 3.19'daki gibi lineer bir ilişki önermişlerdir.

$$K_{IC} = 3.21\rho - 6.95 \quad [3.19]$$

Zhang ve ark., (1998) kayalarda kırılma tokluğu ve çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi üstel olarak ifade etmişlerdir (Eşitlik 3.20).

$$\sigma_t = 8.88 K_{IC}^{0.62} \quad [3.20]$$

Bearman (1991) çapsal karot numunelerinde kırılma tokluğu değerlerini belirlemiş ve kırılma tokluğu değerleri ile nokta yükü dayanım indeksi arasında lineer bir denklem elde etmiş, bu çalışmaya eksenel karot, düzensiz topak ve blok testlerini (1998) ilave ederek çalışmasını genişletmiştir. Bearman (1998), karotlarda çapsal yüklenen numuneler için Eşitlik 3.21'i, düzensiz test parçaları ve eksenel yüklenen karot numuneleri için Eşitlik 3.22'yi önermiştir.

$$K_{IC} = \frac{29,84P}{D^{3/2}} \quad [3.21]$$

$$K_{IC} = \frac{29,84P}{(WD)^{3/2}} \quad [3.22]$$

Burada ;

$K_{IC}$  =Kırılma tokluğu (MN/m<sup>3/2</sup>),

P = Nokta yük deneyinde yenilme yükü (kN),

W = Nokta yük platenleri arasındaki uzaklık (çapsalda karot çapı) (mm),

D = Test parçasının minimum genişliği (mm)'dir.

Altındağ (2000), kayacın kırılma tokluk değerlerini Brazilian diski üzerinde tek kama çatlak yöntemi ile belirleyerek kırılma tokluğu ile diğer mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Kırılma tokluğu ile tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, gevreklik (rg), elastisite modülü, koni delici ve nokta yük dayanım değerleri arasındaki ilişkilerin olduğunu ifade etmiş, daha sonra çoklu regresyon analizleri yaparak kırılma tokluğu ile kayacın tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanım indeksi ve koni delici değerlerinin birlikte kullanılmasıyla en anlamlı ilişkiyi elde ettiğini ifade etmiştir. Yazar tarafından önerilen ilişkiler Çizelge 3.4'de toplu olarak sunulmuştur.

Çizelge 3.4 Kırılma tokluğu ile kaya özellikleri arasındaki ilişkiler (Altındağ, 2000)

Denklem	Korelasyon katsayısı (r)
$K_{IC} = -1.406 + 0.492 \text{ rg}$	0.540
$K_{IC} = -0.221 + 0.030 \sigma_c$	0.929
$K_{IC} = -0.957 + 0.281 \sigma_t$	0.811
$K_{IC} = -0.916 + 0.163 E$	0.662
$K_{IC} = -0.820 + 4.731 \log (CI)$	0.567
$K_{IC} = 0.632 + 0.325 I_s$	0.493
$K_{IC} = -0.533 + 0,0232 \sigma_c + 0,0767 \sigma_t$	0,971
$K_{IC} = -0,196 + 0,0349 \sigma_c - 0,0946 I_s$	0,972
$K_{IC} = -0,117 + 0,356 \sigma_c - 0,129 CI$	0,973
$K_{IC} = -0,959 + 0,234 \sigma_t + 0,117 I_s$	0,923
$K_{IC} = -1,09 + 0,231 \sigma_t + 0,162 CI$	0,931
$K_{IC} = -0,133 + 0,0368 \sigma_c - 0,054 I_s - 0,092 CI$	0,975
$K_{IC} = -1,07 + 0,227 \sigma_t + 0,030 I_s + 0,134 CI$	0,932

Zhang (2002), bazı araştırcılar tarafından (Whittaker ve ark., 1992; Zhang ve ark., 1998; Nordlund ve Carlsson, 1999; Khan ve Al-shayea, 2000; Yu, 2001) farklı zamanlarda sunulan deney verilerini alarak kırılma tokluğu ve çekme dayanımı arasında Eşitlik 3.23’de sunulan ilişkiyi ( $r^2=0.94$ ) vermiştir. Yazar bu ilişkinin hemen hemen durgun yada düşük hızlı statik yükler altında yumuşaktan serteye kadar genel kayalar için geçerli olduğunu ifade etmiştir.

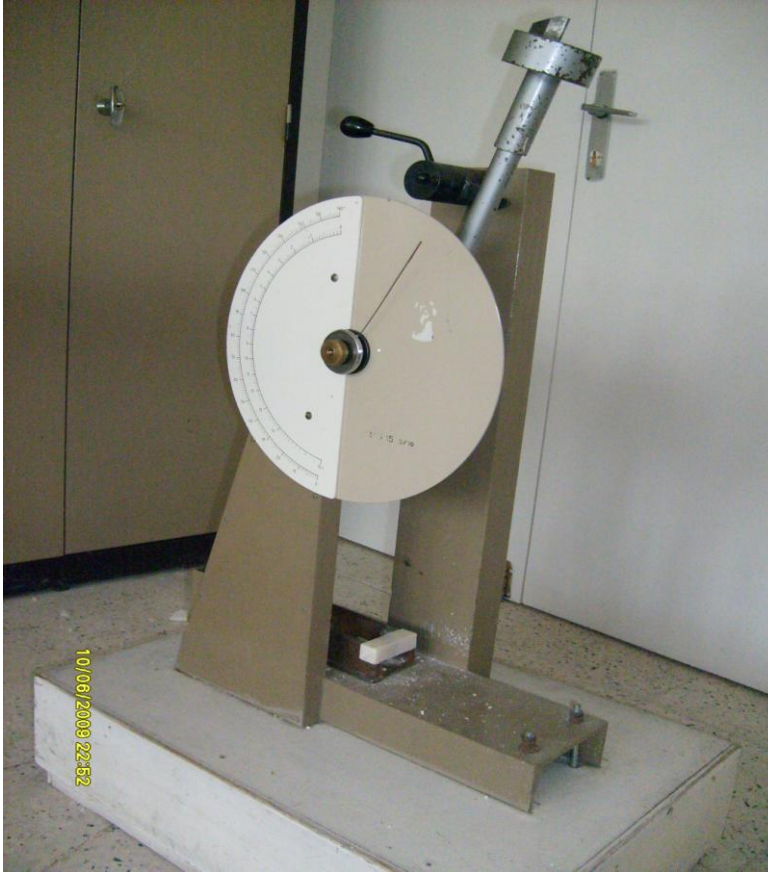
$$\sigma_t = 6.88K_{IC} \quad [3.23]$$

#### 4. LABORATUAR DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kayaların çentik darbe direncinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışma iki farklı laboratuarda gerçekleştirilmiştir. Kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarında, Çentik darbe direnci ve statik kırılma tokluğunu belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar ise Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Meslek Yüksekokulu Malzeme Laboratuvarında sürdürülmüştür. Bu bölümde sadece çentik darbe deneyi ile ilgili çalışmalar ayrıntılı olarak sunulacaktır.

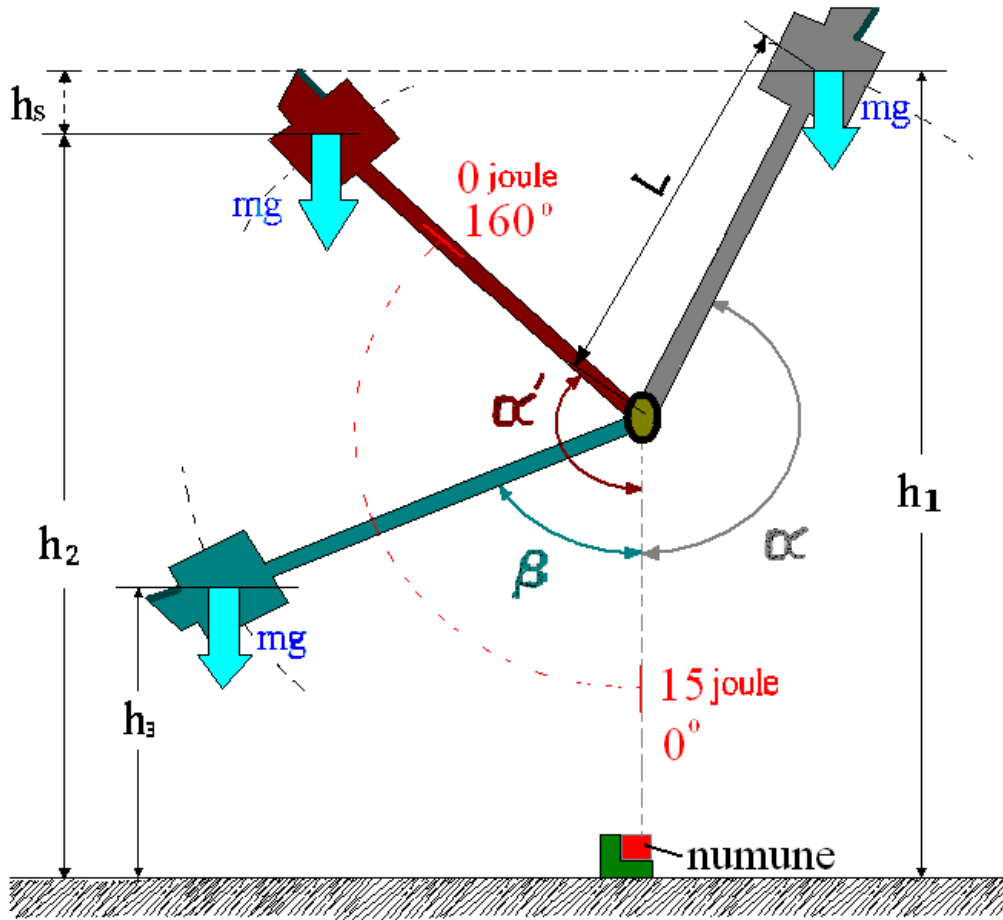
##### 4.1 Çentik Darbe Deney Cihazı

Deneylerde Kogel Leipzig KSG15 3/70 marka DIN 51222 (1995) (TS EN 10045-1 (1999) yabancı karşılıklar kısmında yer verilmiştir.) standardına uygun çentik darbe deney cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Çentik darbe deney cihazı

Bu cihazda sarkaç ucundaki çekiçin ağırlığı 2 kg, sarkacın ağırlık merkezinin sarkacın salınım merkezine uzaklığı 390 mm, çekiç düşme açısı  $160^\circ$  ve yaklaşık çarpma hızı 3,85m/sn'dir. Bu durumda cihazın maksimum enerji kapasitesi 15 Joule olmaktadır. Deney düzeneği numune, numunenin üzerine konduğu mesnetler, ucuna ağırlık takılmış ve makine gövdesi üzerinde serbest dönebilecek şekilde monte edilmiş sarkaç, çekiçle aynı mile bağlı bir ibre ve bu ibre yardımıyla enerji değerlerini ve/veya düşme-yükselme açılarını ölçen bir göstergeden ibarettir (Şekil 4.1–4.2).



Şekil 4.2 Çentik darbe deneyi ölçüm şeması

Sarkaç dairesel bir yol izleyerek düşmekte ve numunenin ortasına kinetik enerji transfer ederek çarpmaktadır. Sürtünme ve hava direncinden dolayı oluşan enerji kaybı küçük olduğundan ihmal edilebilir olsa da cihazın her deneyden önce kalibrasyonu yapılarak bu kayıplar minimize edilmektedir. Kalibrasyon işlemi mesnetler üzerine herhangi bir numune konmadan çekiç serbest bırakıldığında ibre başlangıç noktası ayarlanarak sıfıra gelmesi sağlanmaktadır. Bu işlem, Şekil 4.2'deki düşme yüksekliği

( $h_1$ ) ve düşme açısı ( $\alpha$ ) yerine, hesaplamalarda sürtünme kayıpları çıkarılmış olan boşta çekiç yükselme yüksekliği ( $h_2$ ) ve boşta yükselme açısını ( $\alpha'$ ) kullanmak ile eşdeğerdir. Boşta yükselme yüksekliği;

$$h_2 = h_1 - h_s \quad [4.1]$$

Burada;

$h_2$ : Kalibrasyon amacıyla numunesiz olarak bırakıldığında çekiç yükselme miktarı,

$h_1$ : Çekiç bırakılma yüksekliği,

$h_s$ : Hava ve yatak sürtünmesinden oluşan yükseklik azalması miktarıdır.

Darbe kırılma enerjisinin okunmasını ve kalibrasyon yapılmasını sağlayan ibreyi hareket ettiren düzenek Şekil 4.3'de verilmiştir. Cihaz kadranı incelendiğinde çekicinin çıkabileceği en üst noktaya 0 Joule ( $160^0$ ) konmak üzere gösterge çizelgesi aşağı doğru artarak devam etmekte ve düşey noktada maksimum enerji değeri olan 15 J ( $0^0$ ) görülmektedir. İbreyi hareket ettiren tırnağın bağlı olduğu ve ayna olarak isimlendirilen kısım çekiçle aynı mile bağlıdır. Deney esnasında sarkacın dönme hareketinin aynısını yaparak önündeki ibreyi hareket ettirir ve ibre yükselme yönünde çekicinin çıktığı en yüksek noktada kalır. Kalibrasyon işleminde, çekiç başlangıç pozisyonundayken tırnağın yerini aşağı ya da yukarı çevirerek önündeki ibreyi numunesiz olarak çekiç serbest bırakıldığında diğer yönde 0 Joule ( $160^0$ ) gelmesi sağlanmalıdır. Bu işlemden sonra çekiç ve ibre tekrar başlangıç pozisyonuna alınarak mesnetler üzerine kırılacak olan numune konur ve çekiç serbest bırakılır. Çekiç üzerindeki enerjinin bir kısmını numuneyi kırmaya harcıyıp arta kalan enerjisiyle diğer yönde yükselmeye çalışacak ve yükselebildiği en üst noktaya ibreyi taşıyacaktır. Deney cihazının kadranı üzerinde darbe kırılma enerjisini okuyabileceğimiz gösterge çizelgesinden başka birde açı gösterge çizelgesi bulunmaktadır (Şekil 4.3). Darbe kırılma enerjisini doğrudan göstergedeki okunabildiği gibi düşme ve yükselme açıları okunarak ta hesaplama yapmak mümkün olmaktadır. Kayıplar düşülmeden numunenin kırılması için harcanan darbe enerjisi ( $E_{CVN}$ ) formülü daha önce Eşitlik 3.7'de verilmişti. Sürtünme kayıpları çıkarıldıktan sonra darbe kırılma enerjisi ( $E_{CVN}$ ) Eşitlik 4.2'de sunulmuştur.

$$E_{CVN} = mgh_2 - mgh_3 = mg(h_2 - h_3) = mgL(\cos \beta - \cos \alpha') \quad [4.2]$$



Burada;

$E_{CVN}$  = Darbe kırılma enerjisi (Joule),

$m$  = Sarkacın kütlesi (kg),

$g$  = Yerçekimi ivmesi ( $m/sn^2$ )

$L$  = Sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m),

$h_1$  = Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m),

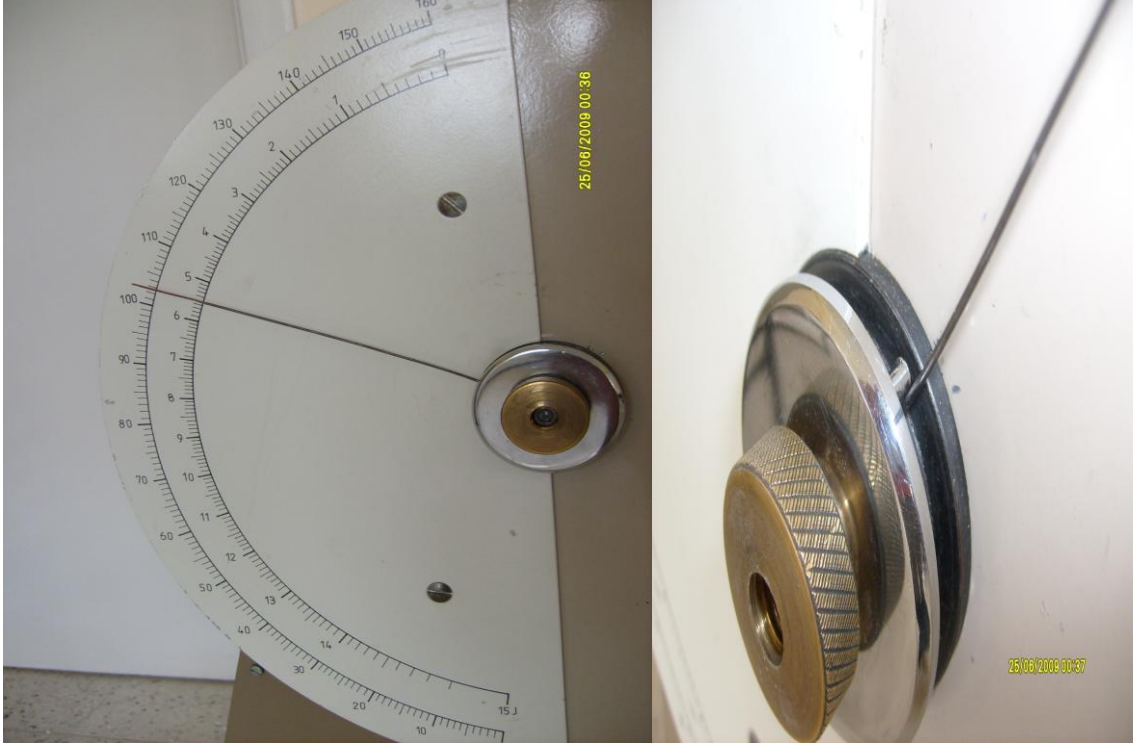
$h_2$  = Sarkacın ağırlık merkezinin numunesiz bırakıldığında çıkış yüksekliği (m),

$h_3$  = Sarkacın ağırlık merkezinin numune kırıldıktan sonra çıkış yüksekliği (m),

$\alpha$  = Çekiç düşme açısı ( $^{\circ}$ ),

$\alpha'$  = Çekicinin serbest bırakıldığında yükselme açısı ( $^{\circ}$ ),

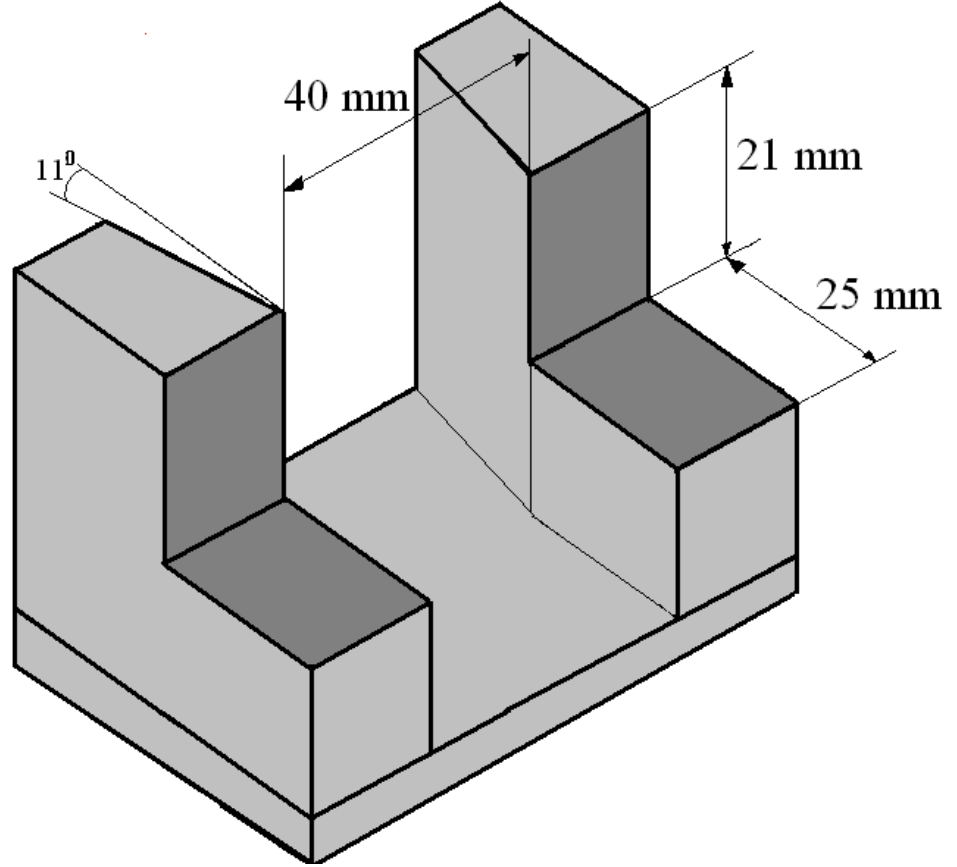
$\beta$  = Çekicinin numuneyi kırıldıktan sonra yükseliş açısı ( $^{\circ}$ ),



Şekil 4.3 Çentik darbe cihazı kadrani ve ibre hareket düzeneği

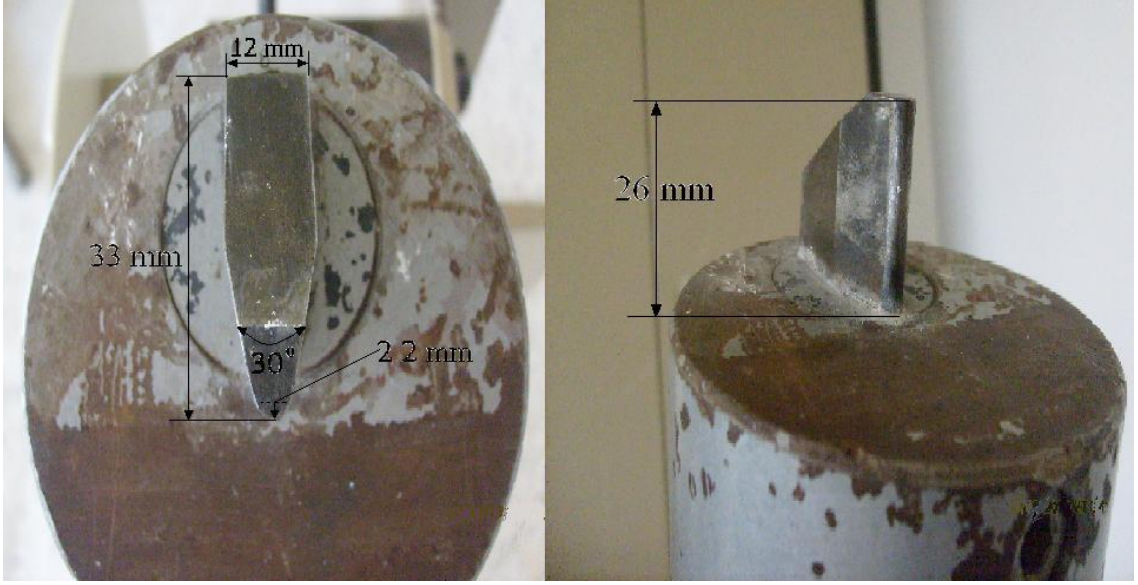
Eşitlik 4.2. yardımıyla belirlenen darbe kırılma enerjisi numunenin kırılan bölgesinin kesit alanına bölüldüğünde darbe kırılma direnci ( $\sigma_{CVN}$ ) (Eşitlik 3.8) bulunmaktadır. Eğer numune çentiksiz ise kesit alanın tamamı alınırken, çentikli parçalarda çentikten geriye kalan kısmın alanı kesit alan olarak hesaplamada kullanılmaktadır.

Örsler arası mesafe 40 mm, her örsün koniklik açısı  $11^{\circ}$ , destekle örs arasındaki açı  $90^{\circ}$  dir. Metallerde uygun olarak imal edilen deney cihazının örs yüksekliği 10 mm ve destek genişliği 11 mm'dir. Ancak, kayalarda 10\*10 mm kalınlık ve genişliğe sahip numunelerden daha büyük olan numuneler kullanılabileceğinden numunenin konulacağı yatak ölçüleri diğer ölçüleri sabit kalmak koşuluyla değiştirilmiştir. Bu durumda çekicinin hareketini engellemeyecek ve çekicinin bıçak kısmının numune ile tam temasını sağlayacak şekilde örs yüksekliği 20 mm'ye, destek genişliği ise çekicinin düşey pozisyonu tam ortasına gelecek şekilde 25 mm'ye çıkartılmıştır (Şekil 4.4). Bu değişiklik sırasında çekiç vurma merkezinin değişmemesine dikkat edilmiş, gerekli değişiklikler yapılarak imal edilen mesnet deney cihazının gövdesine sabitlenmiştir.



Şekil 4.4 Örs ve destek ölçüleri.

Deney cihazının çekiç geometrisi Şekil 4.5'de sunulmuştur. Çekicinin vurucu uç kısmının maksimum yüksekliği 26 mm, uç çapı 2,2 mm ve açısı  $30^{\circ}$  dir. Şekil 4.6'da ise mesnetler üzerindeki numune ile çekicinin vuruş pozisyonu görülmektedir.



Şekil 4.5 Çekiç geometrisi ve boyutları



Şekil 4.6 Mesnetler üzerindeki numuneye çekiç vuruş pozisyonu

#### 4.2 Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalara üzerinde çentik darbe deneyi yapılacak olan kaya numunelerinin boyutlarını tespit etmeye yönelik araştırmalar ile başlanmıştır. Daha önce de ifade edildiği gibi metal malzemeler için ASTM ve TS'de numune boyutu 10x10x55 mm, örsler arasında kalan kısım 40 mm olarak verilmiştir. Diğer yandan, bu deneyle ilgili olarak kayalara yönelik herhangi bir standart bulunmamaktadır. Ön denemelerde ASTM

ve TS standartlarına uygun boyutlu kaya numuneleri ile çalışılması durumunda darbe kırılma enerjisi değerlerinin okunmasında sorunlarla karşılaşmış ve numune boyutlarının değiştirilmesi zorunlu olmuştur. Kayalarda çentik darbe deneyi yapan Furuzumi ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada 50x40x70 mm boyutlu, 10 mm derinlik, 2 mm genişlik ve 1 mm uç yarıçapına sahip çentikli kaya numuneleri kullanırken, numune boyutlarının seçimi ve deney sonuçları üzerindeki etkisi ile ilgili ayrıntı vermemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan deney cihazının örs ve destek ile çekiç boyutları maksimum 22x30 mm kalınlık ve genişliğe sahip numuneler ile çalışmaya olanak vermektedir.

#### 4.2.1. Numune Boyutlarının Belirlenmesi

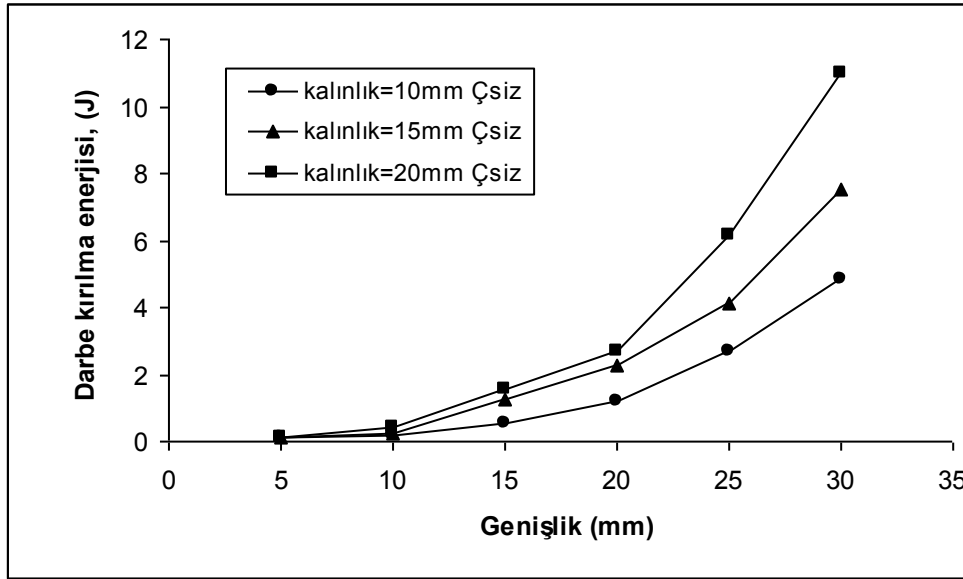
Yukarıda ifade edildiği gibi çekiç yüksekliği ile örs ve destek yükseklik ve genişlikleri numune kalınlık ve genişliklerinin sınırlamaktadır. Bu nedenle, örs ve destekler arası mesafe 40 mm olarak sabit kalmak koşulu ile maksimum 20x30 mm kalınlık ve genişlik baz alınarak değişik kalınlık ve genişliğe sahip çentikli ve çentiksiz numuneler ile deneyler yapılmıştır (Şekil 4.7). Bu deneylerde Afyon şeker olarak adlandırılan mermer numuneleri kullanılmıştır.



Şekil 4.7 Boyut çalışması için hazırlanmış çentikli ve çentiksiz mermer numuneleri

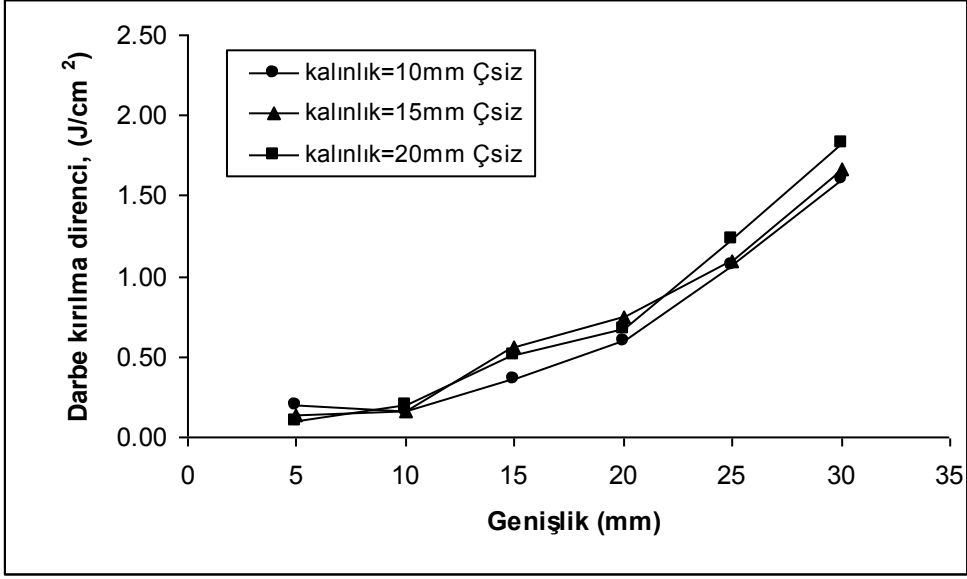
Numune kalınlıkları 10, 15 ve 20 mm olarak üç farklı ölçüde incelenmiştir (Şekil 4.8-4.11). Daha ince numuneler ile yapılan deneylerde değer okuması yapılamadığından değerlendirmeye alınmamıştır. Numune genişlikleri her üç kalınlık için de 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 mm olarak seçilmiştir. Numune uzunlukları tüm deneylerde 55 mm olarak sabit alınmıştır. Deneyler çentikli ve çentiksiz numuneler üzerinde iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Boyut belirleme çalışmalarında U çentik açılmış olup, çentik derinliğinin belirlenmesinde numune genişliği/çentik derinliği oranı 5/1 baz alınmıştır.

Çentikli ve çentiksiz numunelerin kalınlığına bağlı olarak darbe kırılma enerjisi (J) ve darbe kırılma direncinin ( $J/cm^2$ ) numune genişliği (mm) ile değişimi incelenmiş (Şekil 4.8-4.11) ve sonuçları yorumlanmaya çalışılmıştır. Aynı kalınlığa sahip numunelerin genişliğinin artışı ile darbe kırılma enerjisi üssel olarak artmıştır (Şekil 4.8). Ayrıca, numune kalınlığının artışı ile de darbe kırılma enerjisi artmıştır. Bu artışlar darbe kırılma direncine de yansımıştır (Şekil 4.9). Ancak darbe kırılma direnci numune kalınlığından daha az etkilenmiştir.

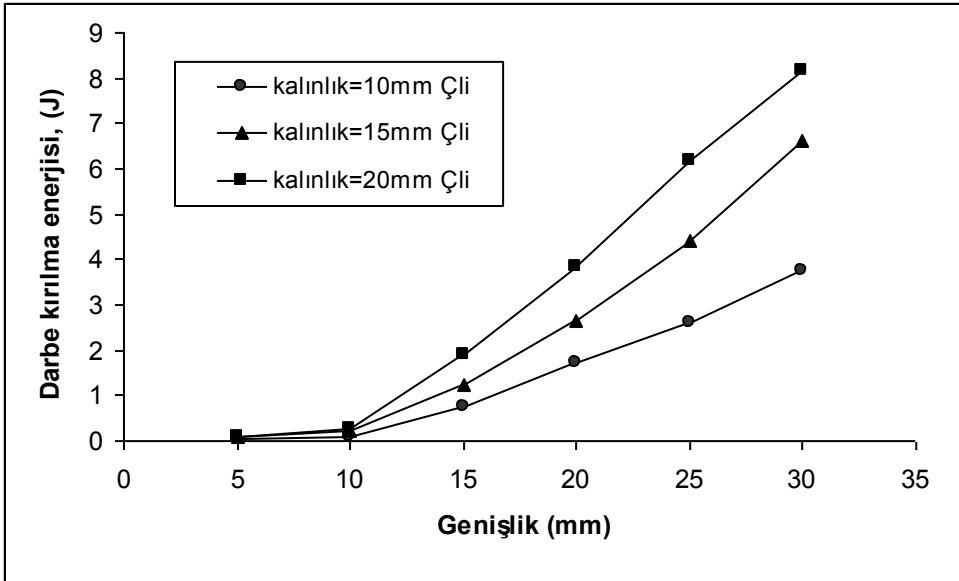


Şekil 4.8 Çentiksiz mermer numuneleri için darbe kırılma enerjisi (J) ile numune genişliği (mm) arasındaki ilişki.

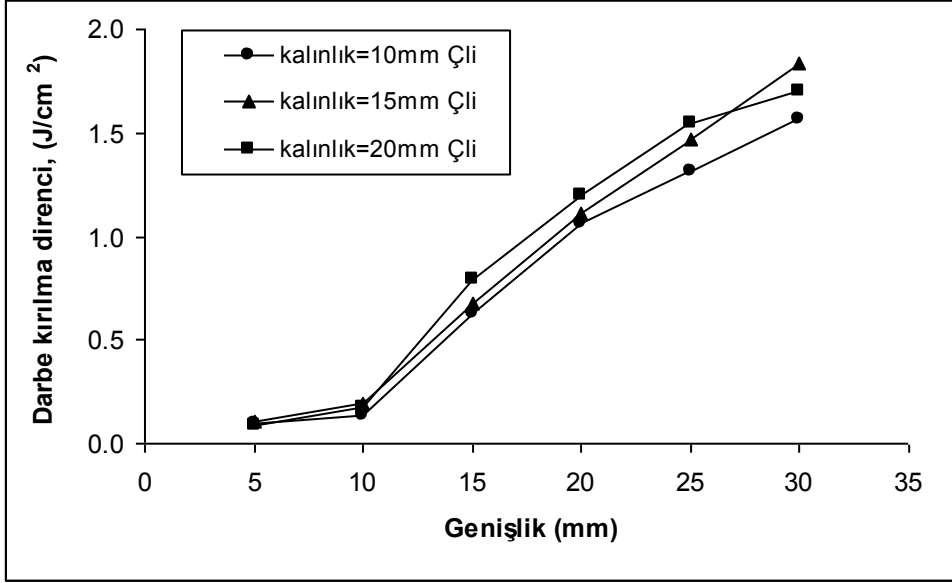




Şekil 4.9 Çentiksiz mermer numuneleri için darbe kırılma direnci ( $J/cm^2$ ) ile numune genişliği (mm) arasındaki ilişki.



Şekil 4.10 U-Çentikli mermer numuneleri için darbe kırılma enerjisi (J) ile numune genişliği (mm) arasındaki ilişki.



Şekil 4.11 U-Çentikli mermer numuneleri için darbe kırılma direnci ( $J/cm^2$ ) ile numune genişliği (mm) arasındaki ilişki.

Bütün kalınlıklarda, 5 ve 10 mm genişlik için okunan enerji değerlerinin çok küçük olduğu tespit edilmiştir. 20x20 mm kalınlık ve genişliğe sahip gerek çentikli, gerekse çentiksiz numunelerin kırılma enerji değerleri dikkate alındığında cihazın kapasitesi ile uyumlu kırılma değerleri elde edildiği görülmüştür. Daha üst boyutlara sahip numuneler ile deneyler yapıldığında numunenin kırılmaması ve deneyin tamamlanamaması gibi durumlar ile karşılaşılacağı düşünülmektedir. Diğer yandan, statik kırılma tokluğu deneylerinde numuneye çentik açıldıktan sonra 20x20 mm kalınlık ve genişliğe sahip numune üzerinde deney yapılmaktadır. Dolayısıyla çentik darbe deneylerinde de aynı ölçülerde çalışılması deneylerin karşılaştırılması açısından kolaylık sağlayacaktır. Bu nedenlerden dolayı çentik darbe deney numunesi boyutları 20x20x55 mm olacak şekilde seçilmiştir.

#### 4.2.2 Çalışılan Kaya Birimlerinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Bu çalışmada 13 farklı kaya birimi kullanılmış olup, bu birimlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için standart kaya mekaniği deneyleri yapılarak sonuçları Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Çalışılan Kaya Birimlerinin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

KAYA TÜRÜ	Min. Tane Yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	Tabii Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Toplam Gözeneklilik (%)	Etkili Gözeneklilik (%)	Darbe Dayanımı (Kgf.cm/cm <sup>3</sup> )	Dolaylı Çekme Dayanımı (MPa)	Kohezyon (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
Beyaz traverten	2.61	2.309	11.551	7.058	8.22	1.67	--	7.47
Muğla beyaz mermer	2.71	2.709	0.190	0.120	9.14	6.56	25.82	21.06
Tüf	1.56	1.454	36.35	30.850	5.24	2.87	9.78	4.95
Bej mermer	2.70	2.693	0.195	0.115	3.44	7.27	19.84	13.86
Sarı traverten	2.68	2.411	10.190	5.555	9.15	5.18	19.16	7.00
Siyah kireçtaşı	2.71	2.700	0.417	0.039	3.74	6.82	26.17	11.91
Jips	2.96	2.300	32.430	25.340	8.09	2.42	3.99	5.74
Pembe kireçtaşı	2.64	2.632	0.676	0.014	12.95	3.72	15.04	11.49
Afyon şeker mermer	2.73	2.708	0.734	0.191	10.19	5.93	25.93	27.24
Gri kireçtaşı	2.67	2.421	11.948	9.261	4.27	3.11	7.38	9.23
Siyenit	2.70	2.671	2.330	0.217	7.37	9.21	17.86	33.00
Afyon gök mermer	2.71	2.697	0.509	0.077	4.61	5.02	17.32	13.72
Koyu bej kireçtaşı	2.69	2.662	0.970	0.372	7.75	2.65	--	11.72



Çizelge 4.1'devamı. Çalışılan Kaya Birimlerinin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

KAYA TÜRÜ	Nokta Yük Dayanımı (Is(50)) (MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (Derece)	Elastisite Modülü (GPa)	Poison Oranı	Schmidt Sertliği	Shore Sertliği	Kırılgenlik İndeksi*
Beyaz traverten	3.85	50.06	--	20.97	0.276	52.6	53.10	41.888
Muğla beyaz mermer	5.69	61.14	33.22	28.79	0.256	56.1	59.17	200.539
Tüf	1.75	20.12	19.29	21.20	0.198	35.6	44.30	28.872
Bej mermer	5.65	91.60	49.73	35.37	0.316	61.0	69.88	332.966
Sarı traverten	5.72	37.80	26.14	29.55	0.292	47.1	51.70	97.902
Siyah kireçtaşı	5.93	68.34	43.82	35.81	0.273	59.8	74.53	233.039
Jips	1.92	14.65	32.80	19.26	0.179	33.6	27.50	17.727
Pembe kireçtaşı	5.52	67.37	51.20	38.23	0.322	61.5	66.80	125.308
Afyon şeker mermer	6.78	66.44	32.85	35.16	0.265	57.2	59.88	196.995
Gri kireçtaşı	4.58	34.08	43.20	36.00	0.229	56.3	66.40	52.920
Siyenit	14.57	112.51	54.80	58.72	0.437	62.1	105.00	518.277
Afyon gök mermer	5.44	49.74	35.06	34.70	0.289	57.9	52.91	124.847
Koyu bej kireçtaşı	7.45	86.84	--	38.04	0.362	66.8	77.50	114.884

\* Kahraman ve Altındağ, 2004'e göre

### 4.2.3 Darbe Deneyi ve Kırılma Tokluğu Deneyi Sonuçları

Kayalar üzerinde çentik darbe ve statik kırılma tokluğu deneyleri yapmak amacıyla hazırlanan kaya numuneleri Şekil 4.12’de görülmektedir. Toplam 13 kaya birimi üzerinde çalışma yapılmıştır. Çentik darbe deneyi numuneleri 20x20x55 mm olarak belirlenmiş, numuneler çentiksiz, U ve V çentikli olarak hazırlanmıştır. Statik kırılma tokluğu deney numuneleri ise 20x40x160 mm boyutlarında hazırlanmış olup 40 mm’lik kısma 20 mm deriliğinde çentik açılmıştır.



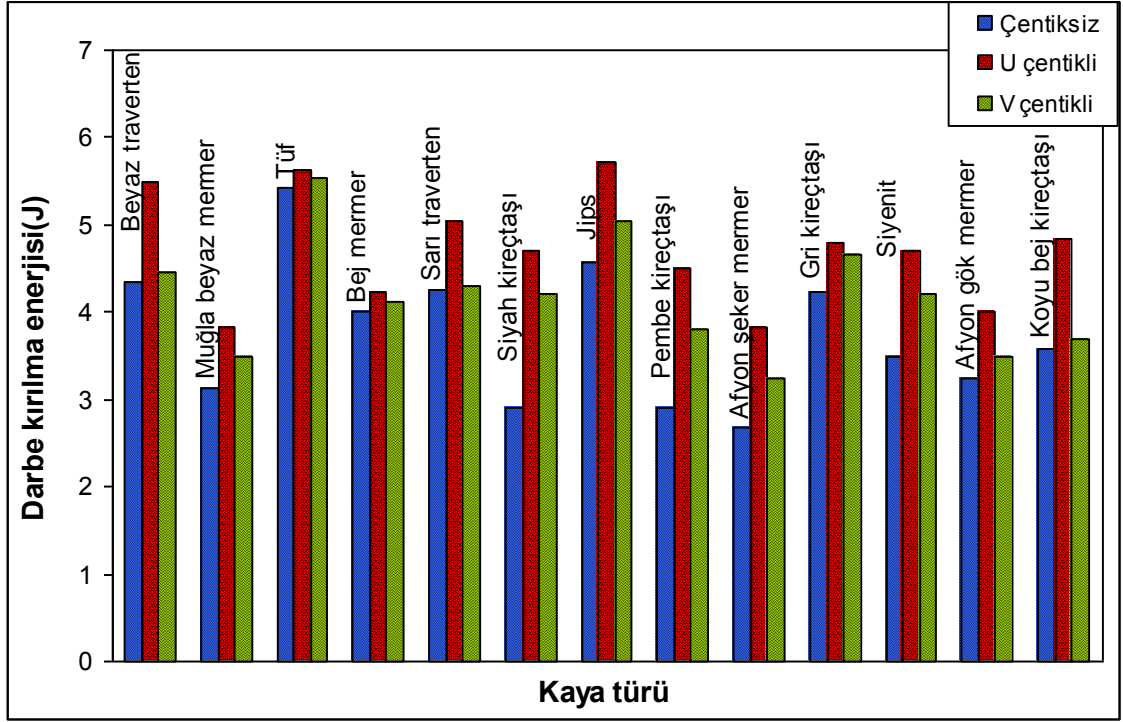
Şekil 4.12 Çentik darbe deneyi ve kırılma tokluğu deneyi numuneleri

Kayalardaki çentikli ve çentiksiz darbe deneyleri numuneler üzerinde gerçekleştirilen çentik darbe deneyi ve kırılma tokluğu deneyi sonuçları Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

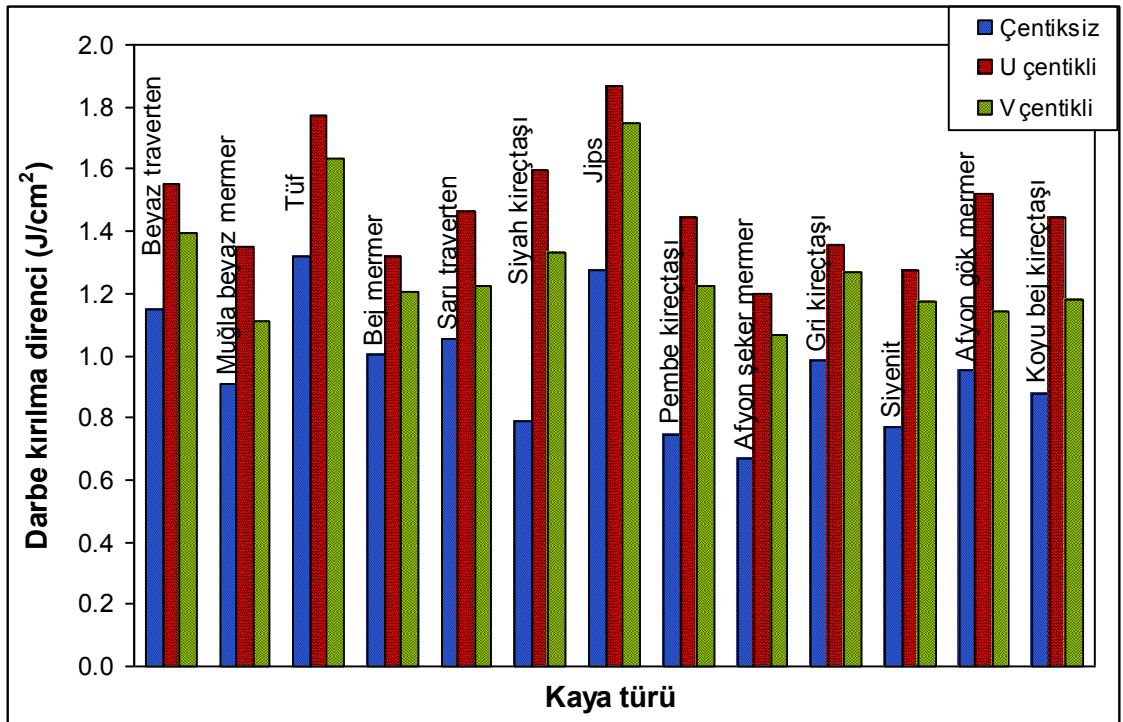
Çizelge 4.2 Kayalarda çentik darbe ve kırılma tokluğu deneyi sonuçları

Kaya Türü	Çentiksiz Darbe Kırılma Enerjisi (J)	Çentiksiz Darbe Kırılma Direnci (J/cm <sup>2</sup> )	U Çentikli Darbe Kırılma Enerjisi (J)	U Çentikli Darbe Kırılma Direnci (J/cm <sup>2</sup> )	V Çentikli Darbe Kırılma Enerjisi (J)	V Çentikli Darbe Kırılma Direnci (J/cm <sup>2</sup> )	Kırılma Tokluğu (MPa.m <sup>1/2</sup> )
Beyaz traverten	4.35	1.15	5.50	1.55	4.45	1.40	0.385
Muğla beyaz mermer	3.12	0.91	3.82	1.35	3.50	1.11	0.757
Tüf	5.43	1.32	5.63	1.77	5.53	1.63	0.244
Bej mermer	4.02	1.00	4.24	1.32	4.13	1.20	0.662
Sarı traverten	4.25	1.05	5.03	1.46	4.30	1.23	0.553
Siyah kireçtaşı	2.90	0.79	4.70	1.60	4.20	1.33	0.677
Jips	4.57	1.28	5.73	1.87	5.05	1.75	0.324
Pembe kireçtaşı	2.90	0.75	4.50	1.45	3.80	1.23	0.728
Afyon şeker mermer	2.69	0.67	3.83	1.20	3.25	1.07	0.987
Gri kireçtaşı	4.24	0.99	4.80	1.36	4.65	1.27	0.424
Siyenit	3.50	0.77	4.71	1.28	4.20	1.17	0.728
Afyon gök mermer	3.23	0.95	4.00	1.52	3.50	1.14	0.916
Koyu bej kireçtaşı	3.58	0.88	4.84	1.44	3.70	1.18	0.804

Kayalarda çentik darbe deneyi sonuçları incelendiğinde çentikli numuneleri kırmak için harcanan enerji (J) miktarının çentiksiz numuneleri kırmak için harcanan enerji miktarından fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.13). Kırma işlemi için harcanan enerji miktarı ile hesaplanan darbe kırılma direnci (J/cm<sup>2</sup>) miktarlarında da aynı fark görülmüştür (Şekil 4.14). Ayrıca U çentikli numuneleri kırmak için harcanan enerjinin V çentikli numuneleri kırmak için harcanan enerjiye göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum darbe kırılma dirençleri içinde geçerlidir. Çentikli numunelerin darbe kırılma dirençlerinin (J/cm<sup>2</sup>) çentiksizlere göre daha yüksek çıkmasının nedeninin çentik açıldıktan sonra kesit alanlarındaki küçülme ve çentik ucunda gerilme yoğunlaşması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. V çentiklilerde çentiğin şekli nedeniyle çentik ucunda kırılma anında oluşan kırılma direnci yoğunlaşması tek noktada, U çentiklilerde ise daha geniş bir alanda olduğundan gerilme yoğunlaşmasının U çentikli numunelerde V çentiklilere göre daha yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 4.13 Çentiksiz, U ve V çentikli kaya numunelerinin darbe kırılma enerjileri (J).



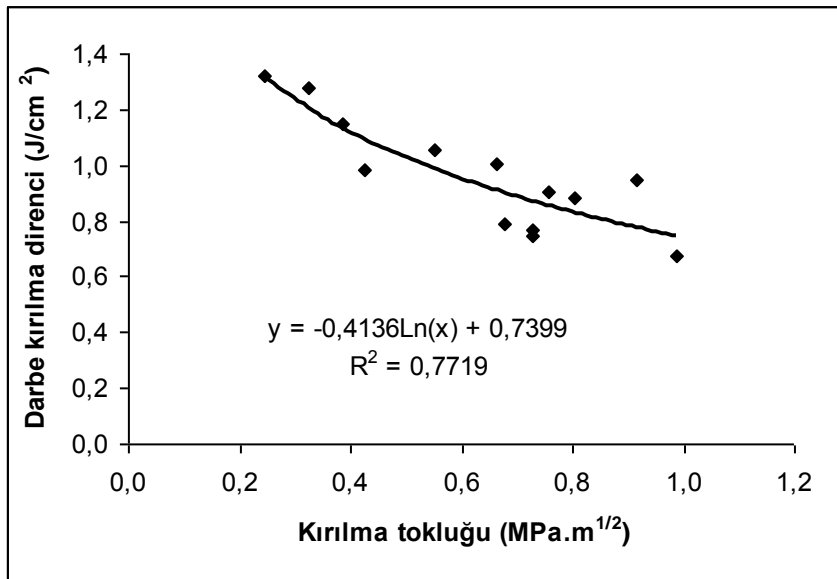
Şekil 4.14 Çentiksiz, U ve V çentikli kaya numunelerinin darbe kırılma dirençleri (J/cm<sup>2</sup>).

#### 4.2.4 Kayaların Çentik Darbe Deney Sonuçları ile Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkiler

Kayaların darbe kırılma enerjisi ve/veya darbe kırılma direnci ile fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla Microsoft Office Excel 2003 kullanılarak basit regresyon analizleri yapılmış ve doğrusal, logaritmik, üssel veya üstel fonksiyonlardan en yüksek korelasyonu sağlayan eğri seçilerek uyumları araştırılmıştır. Burada çentik darbe deney sonuçları ile fiziksel ve mekanik özellikler arasındaki kurulan ilişkilerde korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0.60'ın üzerinde olan ilişkiler verilmiştir (Şekil 4.15-4.23).

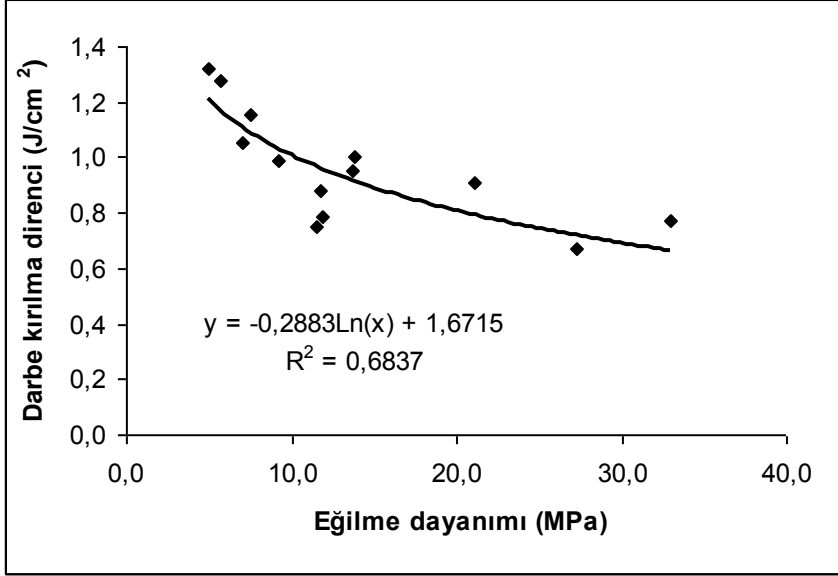
Çentikli ve çentiksiz darbe deney sonuçları ile en iyi ilişkiyi kayaların statik kırılma tokluğu vermiştir. Diğer taraftan kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri ile çentiksiz numunelerle yapılan darbe deney sonuçlarının ilişkilerinin uyumunun çentikli numunelerle yapılan darbe deney sonuçlarının uyumuna göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, ilişkilerin modelleri aynıdır. Bu nedenle, buradaki grafiksel değerlendirmelerde sadece çentiksiz kaya numuneleriyle yapılan darbe deneylerinden elde edilen darbe kırılma dirençleri ( $J/cm^2$ ) ile kayaların diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler verilmiştir.

Kayaların kırılma tokluğu ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki metaller için verilen farklıdır (Şekil 4.15). Bu ilişki metallerde kırılma tokluğu arttığında darbe kırılma direnci artan bir üssel veya üstel ilişki iken kayalarda kırılma tokluğu arttığında darbe kırılma direncinde azalan logaritmik bir ilişki görülmüştür.



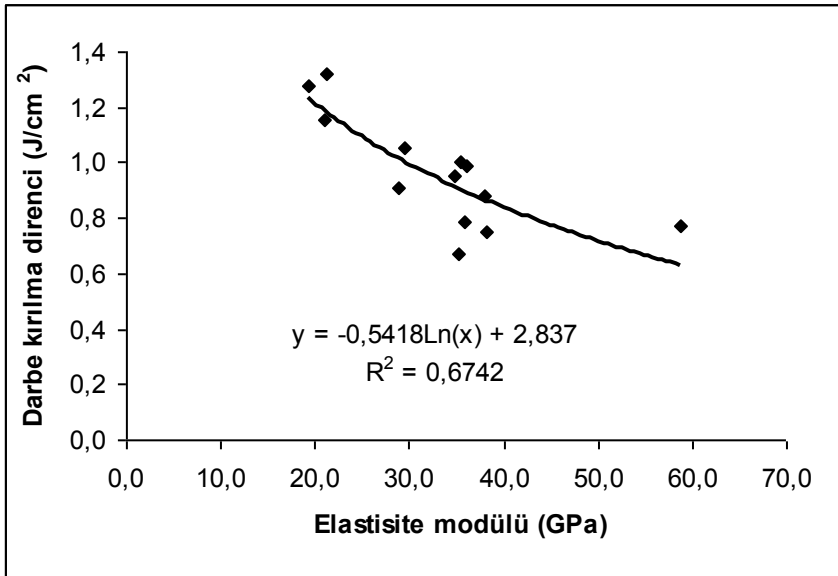
Şekil 4.15 Kayaların kırılma tokluğu ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.

Kayaların eğilme dayanımı artışı ile darbe kırılma direnci azalmaktadır (Şekil 4.16). Bu ilişki kırılma tokluğu-darbe kırılma direnci ilişkisine oldukça benzerdir. Kayaların eğilme dayanımı artışı ile çentiksiz numune darbe kırılma direncinde azalan logaritmik bir ilişki görülmüştür.



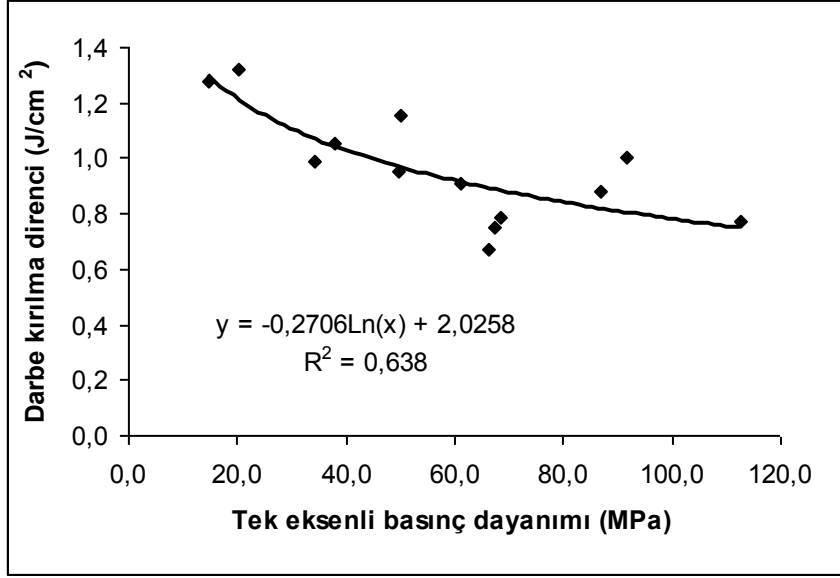
Şekil 4.16 Kayaların eğilme dayanımı ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.

Kayaların elastisite modülü artışı ile darbe kırılma direnci azalan logaritmik bir ilişki vermiştir (Şekil 4.17).



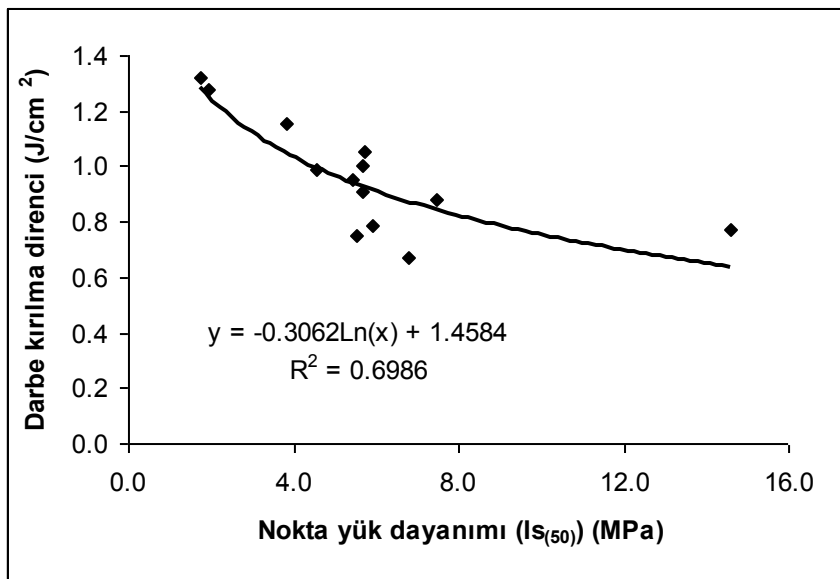
Şekil 4.17 Kayaların elastisite modülü ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.

Kayaların tek eksenli basınç dayanımı artışı ile darbe kırılma direnci azalmaktadır (Şekil 4.18). Kayaların tek eksenli basınç dayanımı artışı ile darbe kırılma direncinde azalan logaritmik bir ilişki görülmüştür.



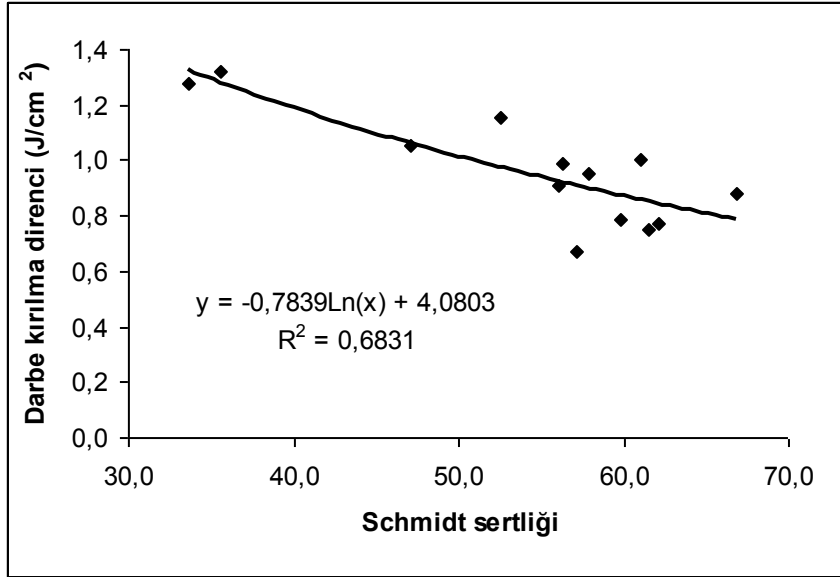
Şekil 4.18 Kayaların tek eksenli basınç dayanımı ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.

Kayaların nokta yük dayanımı artışı ile darbe kırılma direnci azalmaktadır (Şekil 4.19). Kayaların nokta yük dayanımı artışı ile çentiksiz numune darbe kırılma direncinde azalan logaritmik bir ilişki belirlenmiştir.



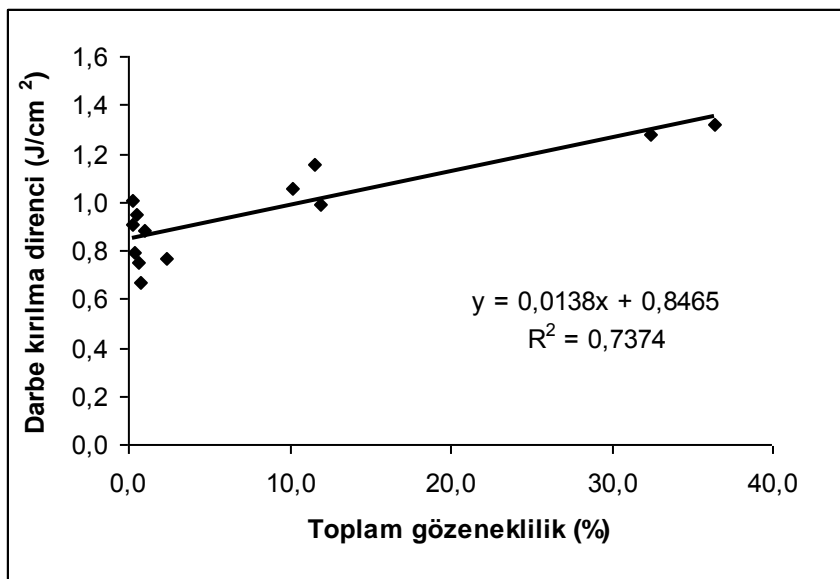
Şekil 4.19 Kayaların nokta yük dayanımı ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.

Kayaların Schmidt sertliği ile darbe kırılma direnci arasında azalan logaritmik bir ilişki mevcuttur (Şekil 4.20).



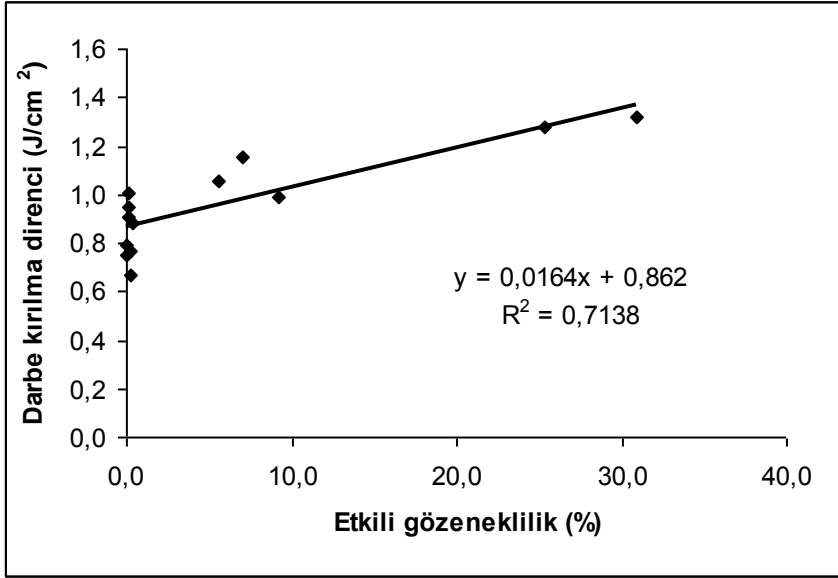
Şekil 4.20 Kayaların Schmidt sertliği ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.

Kayaların toplam ve etkili gözeneklilikleri ile darbe kırılma direnci arasında doğrusal artan ilişkiler belirlenmiştir (Şekil 4.21 ve 4.22). Kayaların gözenekliliklerinin artışı ile darbe kırılma direncinin artmasının en önemli nedenlerinin gözeneklilik artışı ile numunede kesit azalmasının meydana gelmesi ve gözenekli malzemelerin darbeyi daha iyi soğurmasının olduğu düşünölmektedir.



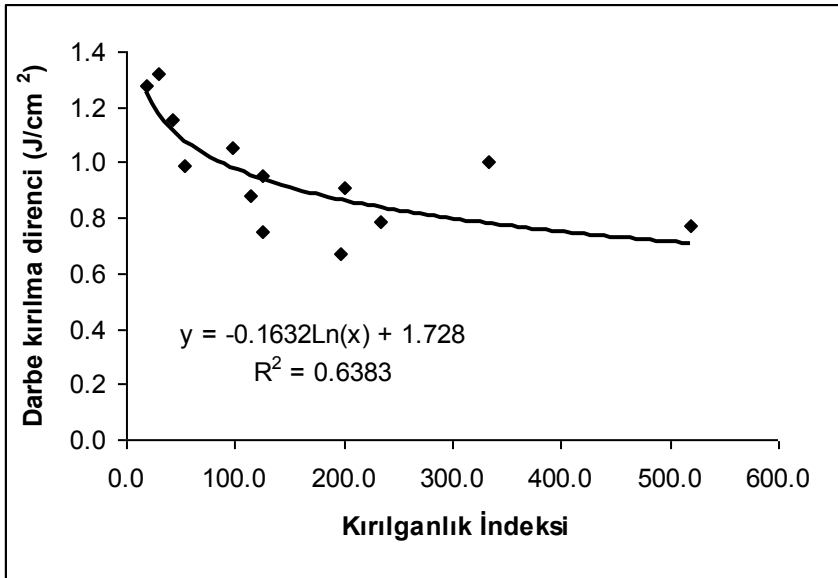
Şekil 4.21 Kayaların toplam gözeneklilik ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.





Şekil 4.22 Kayaların etkili gözeneklilik ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.

Kayaların kırılma direncinin artışı ile darbe kırılma direnci logaritmik olarak azalmaktadır (Şekil 4.23). Bu sonuç kayaların mekanik özelliklerinin artışı ile darbe kırılma direncinin azalmasını, gözeneklilik artışı ile darbe kırılma direncinin artışı açıklamaktadır.

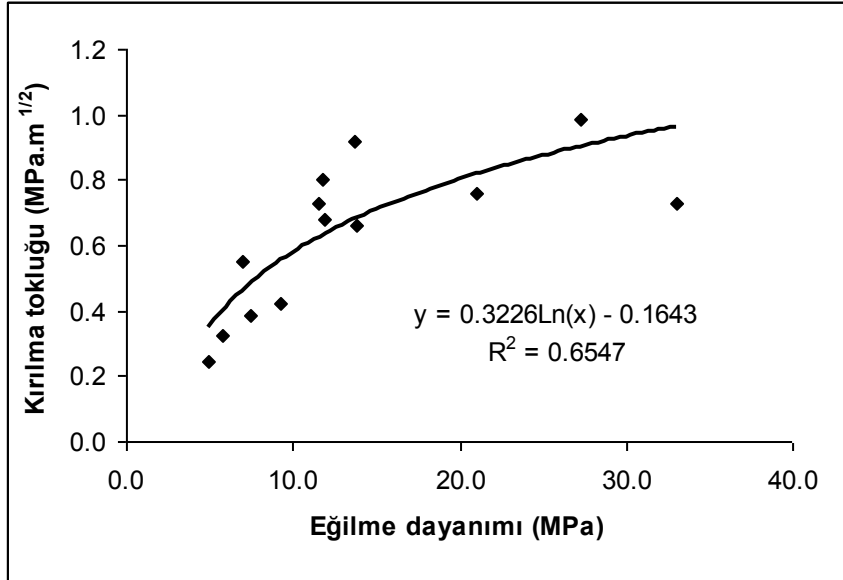


Şekil 4.23 Kayaların kırılma indeksi ile darbe kırılma direnci arasındaki ilişki.

#### 4.2.5 Kayaların Kırılma Tokluğu ile Diğer Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkiler

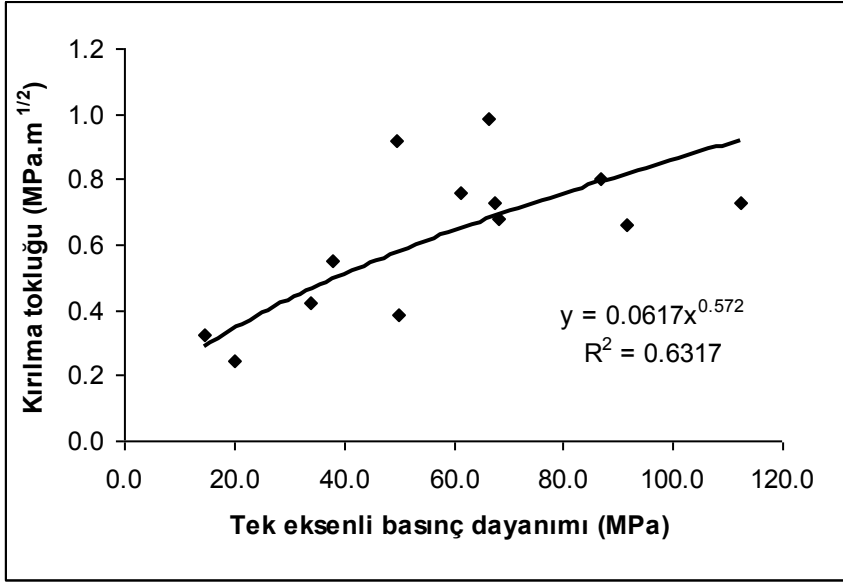
Kayaların hesaplanan statik kırılma tokluğu ile diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla Microsoft Office Excel 2003 kullanılarak basit regresyon analizleri yapılmış ve doğrusal, logaritmik, üssel veya üstel fonksiyonlardan en yüksek korelasyonu sağlayan eğri seçilerek uyumları araştırılmıştır. Bu ilişkilerden korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0.60'dan yüksek olanlar Şekil 4.24-4.29 verilmiştir. Daha düşük korelasyon katsayısına sahip olan ilişkiler burada verilmemiştir.

Kayaların eğilme dayanımı arttıkça kırılma tokluğu değeri artmaktadır (Şekil 4.24). Kayaların eğilme dayanımı artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında artan logaritmik bir ilişki tespit edilmiştir.



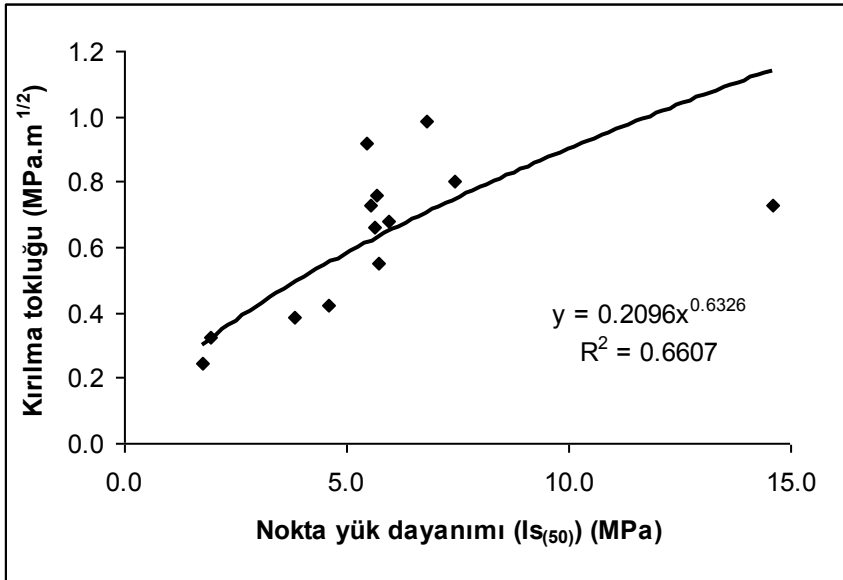
Şekil 4.24 Kayaların kırılma tokluğu ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki.

Kayaların tek eksenli basınç dayanımı arttıkça kırılma tokluğu değeri artmaktadır (Şekil 4.25). Kayaların tek eksenli basınç dayanımı artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında artan üssel bir ilişki tespit edilmiştir.



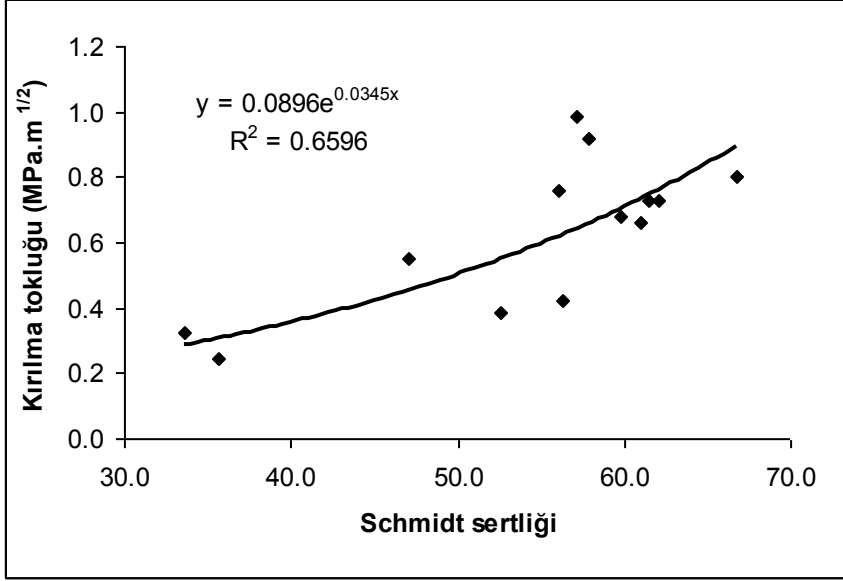
Şekil 4.25 Kayaların kırılma tokluğu ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Kayaların nokta yük dayanımı arttıkça kırılma tokluğu değeri artmaktadır (Şekil 4.26). Kayaların nokta yük dayanımı artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında artan üssel bir ilişki tespit edilmiştir.



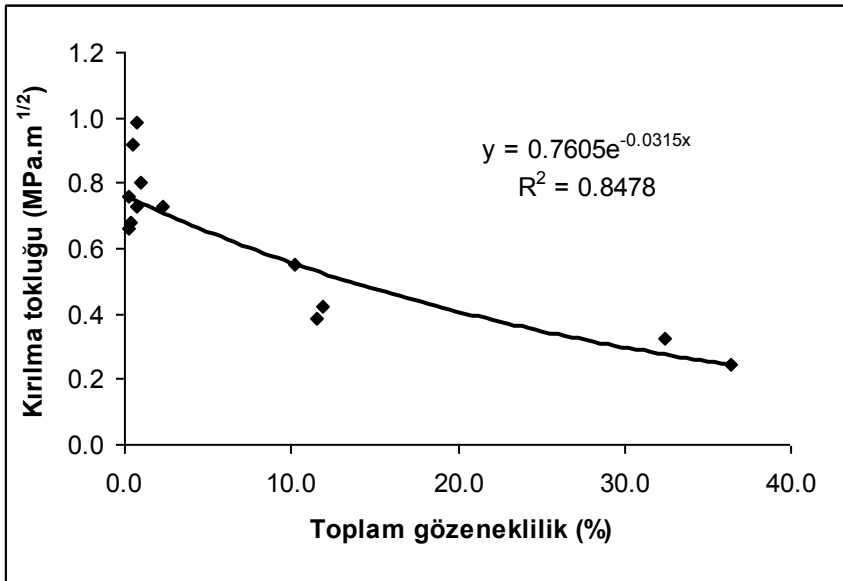
Şekil 4.26 Kayaların kırılma tokluğu ile nokta yük dayanımı arasındaki ilişki.

Kayaların Schmidt sertliği artıkça kırılma tokluğu değeri artmaktadır (Şekil 4.27). Kayaların nokta yük dayanımı artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında artan üstel bir ilişki tespit edilmiştir.



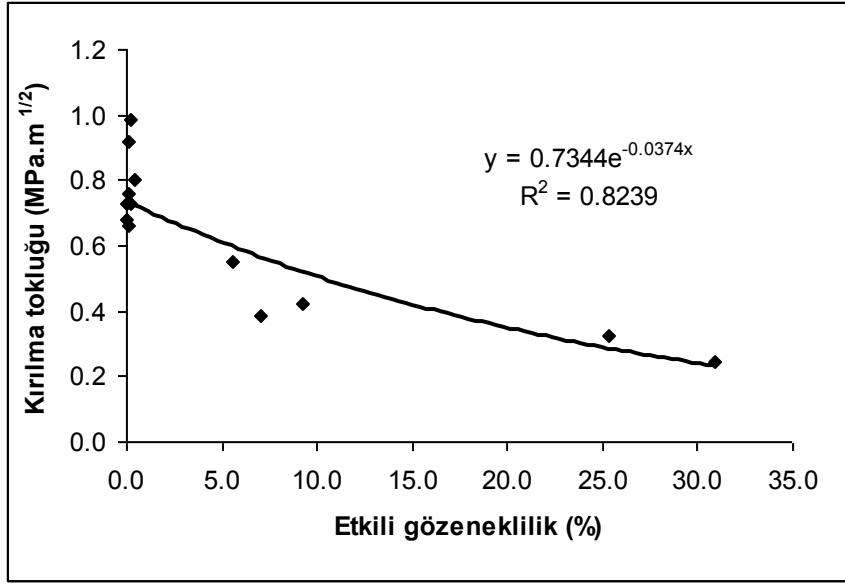
Şekil 4.27 Kayaların kırılma tokluğu ile Schmidt sertliği arasındaki ilişki.

Kayaların toplam gözenekliliği artıkça kırılma tokluğu değeri azalmaktadır (Şekil 4.28). Kayaların toplam gözenekliliği artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında azalan üstel bir ilişki tespit edilmiştir.



Şekil 4.28 Kayaların kırılma tokluğu ile toplam gözeneklilik arasındaki ilişki.

Kayaların etkili gözenekliliği artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında azalan üstel bir ilişki tespit edilmiştir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 Kayaların kırılma tokluğu ile etkili gözeneklilik arasındaki ilişki.

#### 4.2.6 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çentikli ve çentiksiz kaya numunelerinin darbe kırılma direnci ile diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerden Çizelge 4.3’de verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Daha önce de ifade edildiği gibi korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0.60’nın altında olan ilişkilere burada yer verilmemiştir.

Kayaların statik kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) ile diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerden Çizelge 4.4’de verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Çizelge 4.3 Kayaların çentiksiz numune darbe kırılma direnci ( $J/cm^2$ ) ile kırılma tokluğu ( $MPa.m^{1/2}$ ) ve diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler.

Kayaların fiziksel veya mekanik özelliği	Çentik durumu	Çentik darbe deneyi ile ilişki	$R^2$
Kırılma tokluğu ( $MPa.m^{1/2}$ )	Çentiksiz	$\sigma_{CVN} = -0.4136 \ln(K_{IC}) + 0.7399$	0.772
	U Çentikli	$\sigma_{CVN-U} = -0,3248 \ln(K_{IC}) + 1,2996$	0.519
	V Çentikli	$\sigma_{CVN-V} = -0,4212 \ln(K_{IC}) + 1,0586$	0.787
Eğilme dayanımı (MPa)	Çentiksiz	$\sigma_{CVN} = -0.2883 \ln(R_0) + 1.6715$	0.684
	U Çentikli	$\sigma_{CVN-U} = 2.2847 (R_0)^{-0.1811}$	0.675
	V Çentikli	$\sigma_{CVN-V} = 2.0957 (R_0)^{-0.203}$	0.640
Elastisite modülü (GPa)	Çentiksiz	$\sigma_{CVN} = -0.542 \ln(E) + 2.837$	0.674
	U Çentikli	$\sigma_{CVN-U} = -0.4619 \ln(E) + 3.0724$	0.534
	V Çentikli	$\sigma_{CVN-V} = -0.4873 \ln(E) + 2.9712$	0.536
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	Çentiksiz	$\sigma_{CVN} = -0.2706 \ln(\sigma_c) + 2.0258$	0.638
	U Çentikli	$\sigma_{CVN-U} = -0.2515 \ln(\sigma_c) + 2.4629$	0.601
	V Çentikli	$\sigma_{CVN-V} = -0.278 \ln(\sigma_c) + 2.3778$	0.661
Nokta yük dayanımı (MPa)	Çentiksiz	$\sigma_{CVN} = -0.306 \ln(I_{S(50)}) + 1.4584$	0.699
	U Çentikli	$\sigma_{CVN-U} = -0.2859 \ln(I_{S(50)}) + 1.9374$	0.664
	V Çentikli	$\sigma_{CVN-V} = -0.3127 \ln(I_{S(50)}) + 1.7917$	0.715
Schmidt sertliği	Çentiksiz	$\sigma_{CVN} = -0.784 \ln(SH) + 4.0803$	0.683
	U Çentikli	$\sigma_{CVN-U} = -0.7094 \ln(SH) + 4.2962$	0.610
	V Çentikli	$\sigma_{CVN-V} = -0.8272 \ln(SH) + 4.5755$	0.747
Toplam gözeneklilik (%)	Çentiksiz	$\sigma_{CVN} = 0.0138 (n_T) + 0.8465$	0.737
	U Çentikli	$\sigma_{CVN-U} = 0.0121 (n_T) + 1.3732$	0.613
	V Çentikli	$\sigma_{CVN-V} = 0.0149 (n_T) + 1.1607$	0.837
Etkili gözeneklilik (%)	Çentiksiz	$\sigma_{CVN} = 0.0164 (n_{eff}) + 0.862$	0.714
	U Çentikli	$\sigma_{CVN-U} = 0.0145 (n_{eff}) + 1.3856$	0.609
	V Çentikli	$\sigma_{CVN-V} = 0.0178 (n_{eff}) + 1.1764$	0.824
Kırılma indeksi	Çentiksiz	$\sigma_{CVN} = -0.1632 \ln(B_I) + 1.728$	0.638
	U Çentikli	$\sigma_{CVN-U} = -0.15 \ln(B_I) + 2.1782$	0.588
	V Çentikli	$\sigma_{CVN-V} = -0.1645 \ln(B_I) + 2.0568$	0.637

Çizelge 4.4 Kayaların statik kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) ile diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasında kurulan ilişkilerin sonuçları.

Kayaların fiziksel veya mekanik özelliği	Kırılma tokluğu deneyi ile ilişki	$R^2$
Eğilme dayanımı (MPa)	$K_{IC} = 0.3226 \ln(R_0) - 0.1643$	0.66
Elastisite modülü (GPa)	$K_{IC} = 0.0177 (E)^{1.0112}$	0.52
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	$K_{IC} = 0.0617 (\sigma_c)^{0.572}$	0.63
Nokta yük dayanımı (MPa)	$K_{IC} = 0.2096 (I_{S(50)})^{0.6326}$	0.66
Schmidt sertliği	$K_{IC} = 0.0896 e^{0.0345(SH)}$	0.66
Toplam gözeneklilik (%)	$K_{IC} = 0.7605 e^{-0.031(n_T)}$	0.85
Etkili gözeneklilik (%)	$K_{IC} = 0.7344 e^{-0.037(n_{eff})}$	0.82
Kırılma indeksi	$K_{IC} = 0,1766 \ln(B_I) - 0,1988$	0.57

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çentik darbe deneyinin kayalara uygulanması ve deney sonuçları ile kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- i. Malzemelerin kırılma davranışının belirlenebilmesi için çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiş olup bunlar elasto-plastik kırılma tokluğu deneyleri, statik kırılma tokluğu deneyleri ve dinamik kırılma deneyleri olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Çentik darbe deneyi dinamik kırılma deneyleri grubunda yer almaktadır.
- ii. Sünek davranış gösteren malzemelerin çentik darbe deney uygulamalarında kırılmanın tam olarak gerçekleştirilebilmesi için numune üzerine çentik açılması zorunludur. Kırılgan davranış gösteren malzemelerin çentik darbe deney uygulamalarında ise çentikli ve/veya çentiksiz numuneler kullanılabilir.
- iii. Çentikli ve/veya çentiksiz darbe deney sonuçlarını etkileyen faktörler deney numunesinin boyut ve geometrisi, çentik geometrisi, deney parçası destekleri ve örsler, çekiç geometrisi ve çekiç vurma hızı olarak sıralanmaktadır.
- iv. Kayalarda çentik darbe deneyi numune boyutlarının belirlenmesi amacıyla çentikli ve çentiksiz numuneler ile yapılan boyut çalışmasında, aynı kalınlığa sahip numunelerin genişlik artışı ile darbe kırılma enerjisi üssel olarak artmıştır. İlave olarak, numune kalınlığının artışı da kırılma enerjisini artırmıştır. Bu artışlar darbe kırılma direncine de yansımıştır. Ancak darbe kırılma direnci numune kalınlığından daha az etkilenmiştir.
- v. 20x20 mm kalınlık ve genişliğe sahip gerek çentikli, gerekse çentiksiz numunelerin kırılma enerji değerleri dikkate alındığında cihazın kapasitesi ile uyumlu kırılma değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Diğer yandan, statik kırılma tokluğu deneylerinde numuneye çentik açıldıktan sonra 20x20 mm kalınlık ve genişliğe sahip numune üzerinde deney yapılmaktadır. Dolayısıyla çentik darbe deneylerinde de aynı ölçülerde çalışılmasının deneylerin karşılaştırılması açısından kolaylık sağlayacağı düşünüldüğü için darbe deney numunesi boyutları 20x20x55 mm olacak şekilde seçilmiştir.



- vi. 13 farklı kaya birimi üzerinde çentiksiz, U ve V çentikli darbe deneyleri yapılarak darbe kırılma enerjileri ve darbe kırılma dirençleri tespit edilmiştir. Tüm kaya birimlerinde çentikli numuneleri kırmak için harcanan enerji miktarının çentiksiz numuneleri kırmak için harcanandan daha yüksek olduğu, çentikli numunelerin darbe kırılma dirençlerinin de daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çentikli numunelerin darbe kırılma dirençlerinin çentiksizlere göre daha yüksek çıkmasının nedeninin çentik açıldıktan sonra kesit alanlarındaki küçülme ve çentik ucunda gerilme yoğunlaşması ile ilgili olduğu düşünülmektedir.
- vii. U çentikli numunelerin darbe kırılma dirençlerinin ( $J/cm^2$ ) V çentikli numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. V çentiklilerde çentiğin şekli nedeniyle çentik ucunda kırılma anında oluşan kırılma direnci yoğunlaşması tek noktada, U çentiklilerde ise daha geniş bir alanda olduğundan gerilme yoğunlaşmasının U çentikli numunelerde V çentiklilere göre daha yüksek olduğu söylenebilir.
- viii. Kayalarda kırılma tokluğunun artışı ile darbe kırılma direnci çentikli ve çentiksiz numuneler için logaritmik olarak azalan ( $R^2=0.52-0.79$ ) bir davranış göstermektedir. Literatürde metaller için bu ilişkiler üssel veya üstel artan davranış olarak verilmektedir. Dolayısı ile kayaların kırılma tokluğu-darbe kırılma enerjisi arasında sunulan ilişkiler metaller için verilen ilişkilerden farklıdır.
- ix. Kayaların eğilme dayanımı artışı ile çentiksiz numune darbe kırılma direnci logaritmik ( $R^2=0.68$ ), çentikli numune darbe kırılma direnci ise üssel ( $R^2=0.64-0.68$ ) olarak azalmaktadır. Bu ilişki kırılma tokluğu-darbe kırılma direnci ilişkisine oldukça benzerdir.
- x. Kayaların elastisite modülü artışı ile darbe kırılma direnci (çentikli ve çentiksiz) arasında logaritmik azalan ( $R^2=0.53-0.67$ ), tek eksenli basınç dayanımı artışı ile darbe kırılma direnci arasında logaritmik azalan ( $R^2=0.60-0.66$ ), nokta yük dayanımı artışı ile darbe kırılma direnci arasında logaritmik azalan ( $R^2=0.66-0.72$ ), Schmidt sertliği artışı ile darbe kırılma direnci arasında logaritmik azalan ( $R^2=0.61-0.75$ ), toplam ve etkili gözeneklilikleri ile darbe kırılma direnci arasında doğrusal artan ( $R^2=0.61-0.84$ ), kırılma indeksi artışı ile darbe kırılma direnci arasında logaritmik azalan ( $R^2=0.59-0.64$ ) ilişkiler belirlenmiştir. Kayaların burada belirtilmeyen diğer fiziksel ve

mekanik özellikleri ile çentik darbe deney sonuçları arasında düşük korelasyon katsayısına ( $R^2=0.30-0.60$ ) sahip ilişkiler elde edilmiştir. Çentiksiz numunelerin darbe deney sonuçları ile verdiği ilişkilerin uyumu çentiklilere göre daha yüksektir.

- xi. Kayaların kırılma tokluğu ile diğer fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemek için değerlendirmeler yapılmış, eğilme dayanımı ( $R^2=0.66$ ) ve kırılma tokluğu ( $R^2=0.57$ ) artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında logaritmik artan, tek eksenli basınç dayanımı ( $R^2=0.63$ ), elastisite modülü ( $R^2=0.52$ ) ve nokta yük dayanımı ( $R^2=0.66$ ) artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında üssel artan, Schmidt sertliği artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında üstel artan ( $R^2=0.66$ ), toplam ve etkili gözeneklilik ( $R^2=0.82-0.85$ ) artışı ile kırılma tokluğu değeri arasında üstel azalan ilişkiler tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar doğrultusunda oluşan öneriler şunlardır.

- i. Bu çalışmada toplam 13 kaya birimi üzerinde çalışılmıştır. Çalışılan birim sayısı artırılarak darbe deneylerinin sürdürülmesinde yarar görülmektedir.
- ii. Daha yüksek kapasiteli, destek ve örs boyutları ile çekiç geometrisinin değiştirilebildiği cihazlar ile deneylerin sürdürülmesi ve deneylerin karot numunelerine uygulanabilir hale getirilmesinde yarar görülmektedir.
- iii. Çentik darbe deneyi ile kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri arasında oldukça iyi sayılabilecek ilişkiler elde edilmiştir. Bu ilişkiler bu deney sonuçlarının madencilik tasarım problemlerinde de kullanılabilir olduğuna işaret etmekte olup bu deneyden bu anlamda yararlanma olanakları araştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Abe, H. and Takahashi, H., 1984. Crustal rock fracture mechanics for design and control of artificial subsurface cracks in geothermal energy extraction engineering (r-project). Proc. 9th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Report SGP-TR-74, Stanford University. CA.
- Adams, T. F., Demuth, R. B., Keller, C. F., Fargolin, L. G. and Nicholas, B. D., 1985. Simulation of dynamic rock breakage with the shale code. In Fragmentation by Blasting (Edited by Fournery, W. L. et. al.). 1st edn., pp. 147-157. SEM. Littleton, CT.
- Altındağ, R., 2000. Kayaçlarda Kırılma Tokluğu ve Diğer Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 2, Sayı: 2, Sh. 39-47.
- Anık, S., 2000. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen Yayınevi, İst.
- ASTM E23, 1997. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, Charpy test; fracture appearance; Izod test; impact test; notched specimens; pendulum machine; ICS Number Code 77.040.10, Mechanical testing of metals Physical and Mechanical Testing Standards, pp. 28.
- Barsom, J.M., 1974. The Development of AASHTO Fracture toughness requirements for bridge steels”, U.S. Steel Report, presented at the U.S. Japan Cooperative Science Seminar, Tohoku University, Sendai, Japan, 12-16 Aug. 1974; Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp.605-618.
- Barsom, J.M., Rolfe, S.T., 1987. Fracture and fatigue control in structures, Prentice-Hall, Engle-wood Cliffs, NJ, pp. 174–6.
- Baydur, G., 1987. Malzeme, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, 443 sayfa.
- Bearman, R.A., 1991. The application of rock mechanics parameters to the prediction of crusher performance. Ph.D. Thesis, Camborne School of Mines.
- Bearman, R.A., 1998. The use of the point load test for the rapid estimation of Mode I fracture toughness. Int J Rock Mech Min Sci;36:257–63.
- Benzerga, A.A., Tvergaard, V., Needleman, A., 2002. Size Effects in The Charpy V-Notch Test. Int. J. Frac. 116, 275–296.
- Bieniawski, Z. T., 1981. Rock materials under mixed mode fracture. In Mixed Mode Fracture Propagation (Edited by Sih G. C. and Theocaris P. S.). pp. 333-347. Sijthoff & Noordhoff. The Netherlands.
- Brown, G.J., Reddish, D.J., 1997. Experimental relations between rock fracture toughness and density, Int J. Rock Mech. Min. Sci., 34: 153-155.

- Chao, Y.J., Ward, Jr. J.D., Sands, R.G., 2007. Charpy Impact Energy, Fracture Toughness And Ductile–Brittle Transition Temperature Of Dual-Phase 590 Steel, *Materials And Design* 28, 551–557.
- Demirci, H., 2004. *Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi-Seçilmiş Temel Kavramlar ve Endüstriyel Uygulamalar*, Alfa yayınevi, İstanbul, 207s.
- DeSandre, D.A., Benzerga, A.A., Tvergaard, V., Needleman, A., 2004. Material Inertia And Size Effects in The Charpy V-Notch Test” *European Journal of Mechanics A/Solids* 23, 373–386.
- DIN 51222, 1995. Pendulum impact testing machines with a rated initial potential energy of 50 J or less - Requirements and verification.
- Dowling, N.E., 1999. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*, USA, 806 pp.
- Eren, Y., 2007. *Kompozit Yapıların Darbe Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Furuzumi, M., Sugimoto, F., Imai T., Kamoshida, N., Abe, M., 2006. The Charpy Impact Test of Rock 1st Report-Dynamic Fracture Energy, Research Paper Akita university-japan.
- Grady, D., 1985. The mechanics of fracture under high-rate stress loading. In *Mechanics of Geomaterials; Rocks, Concretes, Soils* (Edited by Bazant Z. P.). pp. 129-156, Wiley, Chichester.
- Griffith, A.A. 1920. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Royal Soc. London*; A221: 163-197.
- Gunsallus, K.L., Kulhawy, F.H., 1984. A comparative evaluation of rock strength measures, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech Abstr.*;21, 233-248.
- Hucka, V., Das, B., 1974. Brittleness determination of rocks by different methods, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 11, pp.389-392.
- Hufenbach, W., Marques, Ibraim, F., Langkamp, A., Böhm, R., Hornig, A., 2007. Charpy impact tests on composite structures – An experimental and numerical investigation, *Composites Science and Technology* 68, 2391–2400.
- Ingraffea, A. R., 1979. The strength ratio effect in the fracture of rock structures. *Proc. 20th U.S. Symp. Rock Mechanics*, pp. 153-159. University of Texas, Austin.
- Ingraffea, A. R., 1985. Fracture Propagation in Rock. In *Mechanics of Geomaterials; Rocks, Concretes, Soils* Edited by Bazant Z. P., pp. 219-258. Wiley, Chichester.
- Irwin, G.R., 1956. Onset of Fast Crack Propagation in High Strength Steel and Aluminum Alloys, *Sagamore Research Conference Proceedings*, Vol.2, pp.289-305.

- İpek, R., 1999. Pratik Malzeme Bilgisi, Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları No:81,Sivas.
- Jeong, D.Y., Yu, H., Gordon, J.E., Tang, Y.H., 2008. Finite Element Analysis of Unnotched Charpy Impact Tests, Proceedings of the Materials Science & Technology, Conference and Exhibition, Pittsburgh, Pennsylvania.
- Kemeny, J. and Cook, N. G. W., 1985. Formation and stability of steeply dipping joint sets. Proc. 26th U.S. Symp. Rock Mechanics, Vol. I, pp. 471-478. Balkema, Rotterdam.
- Kahraman, S. and Altındağ, R., 2004. A brittleness index to estimate fracture toughness, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41, pp. 343–348.
- Khan, K. and Al-Shayea, N. A., 2000. Effect of Specimen Geometry and Testing Method on Mixed Mode I-II Fracture Toughness of a Limestone Rock from Saudi Arabia. Rock Mech. Rock Engng. (2000) 33 (3), 179-206.
- Lindqvist, P.A., 1982. Rock fragmentation by indentation and disc cutting. Doctoral Thesis: 20D, Lulea Univ. Techn . Lulea, Sweden.
- Manahan, Sr, M.P., 1996. Advances In Notched Bar Impact Testing. ASTM Standardization News, 23-29.
- McHugh, S. and Keough, D., 1982. Use of laboratory derived data to predict fracture and permeability enhancement in explosive-pulse tailored field tests. Proc. 23rd U.S. Symp. Rock Mechanics, pp. 504-514 AIME, New York.
- Nordlund, E. Li C., Carlsson B., 1999. Mechanical properties of the diorite in the prototype repository at Aspö HRL—laboratory tests. International Progress Report, IPR-99-25, SKB, June.
- Nelson, P. P. and Fong, F. L. C., 1986. Characterization of rock for boreability using fracture material properties. Proc. 27th U.S. Symp. Rock Mechanics, pp. 846-852. SME, Littleton. CO.
- Nilson, R. H. and Griffiths, S, K., 1986. Similarity analysis of energy transport in gas-driven fractures. Int. J. Fracture. 30, 115-134.
- Nilson, R. H., Proffer, W. J. and Duff, R. E., 1985. Modelling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, 3-19.
- Ohanian, H.C., 1994. Principles of Physics, Newyork, 915p.
- Ouchterlony, F., 1981. Extension of compliance and stress intensity formulas for the single edge cracked round bar in bending, ASTM STP 745, 237-256.
- Ouchterlony, F., 1988. ISRM suggested methods, Suggested method for determining the fracture toughness of rocks. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr;252:71–96.

- Pollard, D. D., Segall, P. and DeJaney, P. T., 1982. Formation and interpretation of dilatant echelon cracks. *Geol. Soc. Am. Bull.* 93, 1291-1303.
- Roegiers, J. C, MacLennan, J. D. and Schultz, L. D., 1982. In-situ stress determinations in northeastern Ohio. *Proc. 23rd U.S. Symp. Rock Mechanics*, pp. 219-229. AIME, New York.
- Rolfe, S.T., Novak, S.R., 1970. Slow-bend  $K_{IC}$  testing of medium-strength high-toughness steels. *Recent developments in plane strain fracture toughness testing ASTM STP 463*, Philadelphia, ASTM, pp. 124–159.
- Rossmannith, H. P., 1983. Editor *Rock Fracture Mechanics*. CISM Courses and Lectures No. 275. Springer, Vienna.
- Rummel, F. and Winter, R. B., 1982. Application of laboratory fracture mechanics data to hydraulic fracturing field tests. *Proc. 1st Japan -U.S.A. Seminar on Geothermal Energy and Hydraulic Fracturing*, pp. 31 – 39.
- Russel, S., 1898. Experiments with a new machine for testing materials by impact. *Trans. Am. Soc. Civil. Eng.* 39 (826), 237–250.
- Rustan, R. A., Vutukuri, V. S. and Naartijarvi. T., 1983. The influence from specific charge, geometric scale and physical properties of homogeneous rock on fragmentation. *Proc. 1st Int. Symp. Rock Fragmentation by blasting*, Vol. 1, pp.115-142. Lulea Univ. Techn., Lulea.
- Saouma, V. E. and Kleinosky, M. J., 1984. Finite element simulation of rock cutting: a fracture mechanics approach. *Proc. 25th U.S. Symp. Rock Mechanics*, pp. 792-799. AIME. New York.
- Sailors, R.H. Corten, H.T., 1971. Relationship Between Material Fracture Toughness Using Fracture Mechanics and Transition Temperature Tests, *Proc. of the 1971 National Symposium on Fracture*, ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, , p. 164-191.
- Schubert, LE, Kumar, AS, Rosinski, ST, Hamilton, ML., 1995. Effect of specimen size on the impact properties of neutron irradiated A533B steel. *J Nucl Mater* 1995;225:231–7.
- Serway, R.A., 1992. *Physics For Scientists and Engineers*, Florida, 1169p.
- Serway, R.A., Faughn, J.S., 1995. *College Physics*, Harcourt Brace & Company, Orlando, Florida, 1042p.
- Shah, S.P., 1985. Editor *Application of Fracture, Mechanics to Composites*, NATO ASI Series E: Applied Sciences, Vol. 94. Nijhoff, Dordrecht.

- Siewert, T.A., Manahan, M.P., McCowan, C.N., Holt, J.M., Marsh, F.J., and Ruth, E.A., 1999. The History and Importance of Impact Testing, in Pendulum Impact Testing: A Century of Progress, STP1380, 1–16, ASTM, West Consohocken, PA.
- Strnadel, B., Hausild, P., 2007. Statistical scatter in the fracture toughness and Charpy impact energy of pearlitic steel, Materials Science and Engineering A 486, 208–214.
- Takahashi, H., Shoji, T., Abe, H., 1986. Recent progress and future and r-project at Thoku University, Japan, E.E.C/U.S. Workshop on Hot Dry Rock, Brussels.
- Takahashi, H., 1983. In hydraulic fracturing and geothermal energy (Edited by Nemat-Nasser S. et al.), pp. 291-305. Nijhoff, Amsterdam.
- Tanguy, B., Besson, J., Piques, R., Pineau, A., 2004. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test Part II: modeling of the Charpy transition curve, Engineering Fracture Mechanics 72 ,413–434.
- Tharp, T. M., 1983. Mechanics of failure for rock masses subjected to long term tensile loading-analysis of large natural accruing cantilevers. Proc. 24th U.S. Symp. Rock Mechanics, pp. 309-318. Texas A&M University, College Station.
- Tower, O.L., 1986. Testing of sub-size Charpy specimens. Part 1 – The influence of thickness on the ductile/brittle transition. Metal Construe 1986;18(3):171R–6R.
- Travis, B. J. and Davis, A. H., 1980. Calculation of gas-driven fracture propagation in rocks. Proc. 21st U.S. Symp. Rock Mechanics, pp. 356-361. University of Missouri, Rolla. MO.
- TS EN 10045-1, 1999. Metalik Malzemeler - Charpy Vurma Deneyi Bölüm 1 – Deney Metodu V Ve U - Çentikleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 9 sayfa.
- TS EN 10045-2, 1999. Metalik Malzemeler - Charpy Vurma Deneyi - Bölüm 2:Deney Makinesinin Doğrulanması Sarkaçla Vurma, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 23 sayfa.
- TS EN 875, 2002. Metalik Malzemelerde Kaynaklar Üzerinde Tahribatlı Deneyler - Vurma Deneyleri - Deney Numunesi Yeri, Çentik Yönü Ve Muayene, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 6 sayfa.
- TS EN ISO 14556, 2005. Çelik – Charpy V-Çentikli sarkaç darbe deneyi – Aletli deney metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 18 sayfa.
- TS EN ISO 179-1, 2006. Plastikler – Charpy darbe özelliklerinin tayini-Bölüm 1: Ölçü aletsiz darbe deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 22 sayfa.
- TS EN ISO 179-2, 2006. Plastikler-Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini-Bölüm 2: Ölçü aletli darbe deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 19 sayfa.

- TS ISO 946, 2002. Gri Dökme Demir- Çentiksiz Vurma Deneyi ,Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,10 sayfa.
- Wallin, K., 2001.Upper shelf energy normalization for sub-sized Charpy-V specimens. Int J Pres Ves Pip;78:463–70.
- Warpinski, N. R ., Schmidt, R. A., Cooper, P. K., Walling, H. C. and Northrop, D. A., 1981. High energy gas frac: multiple fracturing in a wellbore. Proc. 20th U.S. Symp. Rock Mechanics, pp. 143-152, University of Texas, Austin.
- Whittaker, B.N., Singh, R.N., Sun, G., 1992. “Rock Fracture Mechanics - Principles, Design and Applications”, p.570, Elsevier, Amsterdam.
- Wittman, F. H., 1983. (Editor) Fracture, It mechanics of Concrete, Developments in Civil Engineering, Vol. 7. Elsevier. Amsterdam.
- Wullaert, R.A., Server, W.L., 1975. Procedures for Testing and Data Analysis Effects, Technology Inc.ETI Report TR75-43, Santa Barbara, CA, Ireland D.R.
- Yayla, P., 2007. Kırılma Mekaniği, Çağlayan Kitabevi,İstanbul.
- Yu, Y., 2001. Measuring properties of rock from the site of permanent shiplock in three Gorges project. Test Report, Yangtze River Scientific Research Institute, June.
- Zhang, Z. X., Kou, S. Q., Yu, J., Yu, Y., Jiang, L. G. and Lindqvist, P.A., 1998. Effects of loading rate on rock fracture, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **36**: 597-611.
- Zhang, Z.X., 2002. An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 39, 401–406.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Mahmut ÇİFÇİ
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 28/03/1974
Medeni Hali	Evli
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, 58140-Sivas
E-posta Adresi	<a href="mailto:mcifci@cumhuriyet.edu.tr">mcifci@cumhuriyet.edu.tr</a>

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Şarkışla Endüstri Meslek Lisesi, Elektrik Bölümü, 1990.
Önlisans	Cumhuriyet Üniversitesi, SMYO, Elektrik Bölümü, 1994.
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği, 2006.
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, Maden Müh. Anabilim Dalı, Maden İşletme, 2009.

### İş Tecrübesi

Cumhuriyet Üniversitesi SMYO, Mekanik Lab., İleri Ölç. Lab., 1993-.....

### Ödüller, Teşvikler ve Üyelikler