

Kaya Numunelerinin Dinamik Yükler Altında Mekanik Davranışının İncelenmesi

Hüseyin YAVUZ^{*1}, Kenan TÜFEKÇİ², Ramazan KAYACAN², Halim CEVİZCİ¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık-Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü / ISPARTA

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık-Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü / ISPARTA

Alınış Tarihi:21.12.2011, Kabul Tarihi:23.03.2012

Özet: Bazı kaya mühendisliği uygulamaları, kayaların yüksek birim deformasyon hızlı yüklemeler altındaki davranışının tanımlanmasını zorunlu kılmaktadır. Kayaların dinamik özellikleri kesme, kazı, delme, patlatma ve kırma gibi madencilik ve inşaat amaçlı işlemlerde önemli olmaktadır. Bu çalışmada, kayaların dinamik testinde yaygın olarak kullanılan ayırık Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle bir kireçtaşına ait 7 adet numune test edilmiştir. Dinamik testlerin sonuçları analiz edilerek, yüksek birim deformasyon hızlı yüklemelerde kayalarda zamana bağlı dinamik basınç gerilmesinin ve elastik davranışın belirlenmesi için gerekli deneysel yöntem açıklanmıştır. Testlerde dinamik yükleme esnasında sinyal şekillendirme tekniği kullanılarak kaya numunelerinde dinamik gerilme dengesi ve sabit birim deformasyon oranının sağlandığı sonuçlar analiz edilerek görülmüştür. Aynı şartlarda, sağlam numunelerde birim zamandaki gerilme artışının (yükleme hızının) zayıf numunelere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sağlam numunelerin testi esnasında ölçülen sabit birim deformasyon süresi zayıf numunelere göre daha fazla olmaktadır. Numunelerde oluşan birim deformasyonun artış hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki incelenmiş olup elastisite modülü büyük ölçüde birim deformasyon hızına bağlıdır. Aynı şartlarda hızlı şekil değiştiren numunelerin elastisite modülü daha düşük değerlerde olmaktadır. Bu çalışmada test edilen kayanın dinamik basınç dayanımı statik dayanımının yaklaşık 2.5 katı olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Ayırık Hopkinson basınç çubuğu, kaya numunesi, dinamik davranış, yükleme hızı

Investigation into Mechanical Behaviour of Rock Samples under Dynamic Loads

Abstract: Some rock engineering applications require the behaviour of rocks to be known under high strain rate loading. Dynamic properties of rocks are important for mining and civil engineering operations such as cutting, excavating, drilling, blasting and crushing. In this study, split Hopkinson pressure bar (SHPB) method, which is commonly used for dynamic testing of rocks, is used. 7 limestone samples were tested using this method. Analysing the results of dynamic tests, testing method for determining the time-dependent compressive stress and elastic behaviour was explained. Analysis of results showed that dynamic equilibrium condition and constant strain rate during the tests could be achieved with pulse shaping technique. Under same testing conditions, increase in stress with time (loading rate) is more significant for strong samples compared to weak samples. Duration of constant strain rate during testing is larger for strong limestone samples than weak samples. It was found that elasticity modulus is strongly related to strain rate. Samples having high strain rate had lower elasticity modulus. It was found that dynamic compressive strength of rock tested in this study was about 2.5 times the static strength.

Key words: Split Hopkinson pressure bar, rock sample, dynamic behaviour, loading rate

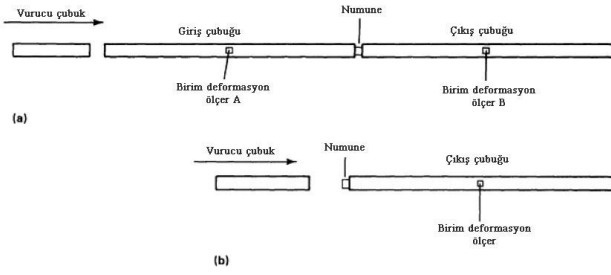
Giriş

Kayalar kazı, kesme, delme, patlatma ve kırma gibi bazı madencilik veya inşaat amaçlı çalışmalar esnasında dinamik yüklere maruz kalmaktadırlar. Yüksek birim deformasyon hızlı yüklemeye maruz kayanın davranışı statik ve quasi-statik testlerle belirlenen davranışına göre oldukça farklıdır ve çoğu pratik uygulama kayanın dinamik ortamda mekanik davranışının bilinmesini gerektirmektedir (Zhou vd., 2010). Ancak, yüksek birim deformasyon hızlı yüklemelerde kayaların mekanik davranışı üzerine araştırmalar, deneysel ve teknik şartların sağlanmasında karşılaşılan zorluklardan dolayı statik testlere göre sınırlı kalmıştır (Wang vd., 2006). Son yıllarda kaya ve kaya benzeri gevrek materyallerin mekanik davranışına dinamik yüklerin etkisinin incelenmesi üzerine araştırmalar giderek artmaktadır (Zhu, 2008).

Hopkinson basınç çubuğu sistemi ilk olarak Hopkinson (1914) tarafından önerilmiş olup Kolsky (1949) tarafından geliştirilmiştir. Araştırmacılar yüksek şekil

değiştirme hızlarında katı materyallerin dinamik basınç altında davranışını incelemek için Hopkinson basınç çubuğu sistemini yaygın olarak kullanmışlardır (Zhao, 2003; Kumar vd., 2004; Xia vd., 2008; Dai vd., 2010). Farklı deney ekipmanları içinde bu dinamik test tekniği, ölçümlerin tekrarlanabilirliği ve nispeten doğru sonuçlar vermesi gibi avantajları ile göze çarpmaktadır (Zhou vd., 2010). Hopkinson basınç çubuğu deneyi için iki basınç çubuğu düzeneği vardır: Ayırık Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) ve tek Hopkinson basınç çubuğu (Şekil 1). Her iki teknik prensipte aynı olmakla birlikte, dinamik yük birincisinde uzun iki çubuk vasıtasıyla, ikincisinde ise direkt olarak sadece bir vurucu çubuk vasıtasıyla uygulanmaktadır. SHPB daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Vurucu çubuk, basınçlı hava, sarkaç veya patlayıcı gibi yöntemlerle ivmelendirilmekte ve darbe üretilmektedir. Her iki elastik çubuktaki birim deformasyon ölçümlerinden numunenin gerilme-birim deformasyon davranışı belirlenmektedir (Tüfekçi, 2008).

*huseyinyavuz@sdu.edu.tr



Şekil 1. Hopkinson çubuğunun tipik konfigürasyonları a) Ayrık Hopkinson basınç çubuğu b) Tek Hopkinson basınç çubuğu (Namet-Nasser, 2000)

Son zamanlarda araştırmacılar, kayaların testi için SHPB deney tekniğinin geliştirilmesi ve kayaların dinamik davranışının anlaşılması üzerine araştırmalar yürütmüşlerdir. Kaya gibi gevrek materyallerin testinde klasik SHPB sistemi uygun değildir (Sunny vd., 2009). Bunun nedeni, yenilme öncesi meydana gelen birim deformasyonların çoğunun elastik gerilme-birim deformasyon olmasından dolayıdır. Bunun sonucunda gevrek numuneler, içinde denge şartları sağlanmadan önce yenilmektedir. Bunu önlemek için SHPB deney teknikleri üzerinde bazı değişiklikler yapılmıştır. Bu değişikliklerden en önemli olanı yüklemeye sinyalinin ayarlanmasını sağlayan sinyal şekillendirme tekniğinin kullanılmasıdır (Frew vd., 2001). Frew vd. (2001) geleneksel SHPB cihazını, cihazın giriş çubuğunun darbe alan yüzeyine ince bir bakır disk yerleştirerek modifiye etmiştir. Sinyal şekillendirici, yük sinyalinin artan kısmının eğimini ayarlaması, yüklemenin artış hızını düşürmesi ve yüklemeye esnasında numunede denge durumunun sağlanması için yeterli zaman sağlaması açısından kayaların dinamik testinde oldukça yararlı olmuştur (Xia vd., 2008; Sunny vd., 2009). Kumar vd. (2004) giriş çubuğundaki gerilme dalgasının süresini (dalga boyunu) uzatmak yani gerilmenin zamana bağlı hızlı artışını önlemek için konik darbe çubuğu tasarımı yapmışlardır. Böylece düzenli gerilme dalgalarının numuneyi etkimesini sağlamışlar, gerilme dalgalarının numuneyi etkimesini sağlamışlardır.

Yüklemeye hızı veya birim deformasyon hızının kayaların dinamik mekanik özelliklerine etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Shan vd., 2000; Zhu, 2008; Asprone vd., 2009). Kumar (1968) yüklemeye hızı ve ısının granit ve bazaltın dinamik dayanımına etkisini SHPB cihazını kullanarak araştırmıştır. Goldsmith vd. (1976) kayaların basınç ve çekme dayanımlarının yüklemeye hızına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Asprone vd. (2009) tuf numuneleri ile dinamik çekme deneyleri yapmışlar ve deneyler sonucunda birim deformasyon hızındaki artış ile tufün çekme dayanımının arttığını ve bu artışın yüksek birim deformasyon hızlarında quasi-statik şartlara göre yaklaşık üç kata kadar olduğunu belirlemişlerdir. Li vd. (2008) kaya yenilmesine çubuk çapı ve yüklemeye hızının etkisini araştırmak için uzunluk/çap oranı 0,5-0,6 arasında değişen granit numunelerini test etmişlerdir. Test sonuçlarına göre elastik çubuk çapı arttıkça numuneler daha düşük yüklemeye hızlarında kırılabilirlerdir. Aynı birim deformasyon hızlı yüklemelerde ise numuneler, geniş çaplı çubukların kullanıldığı SHPB düzeneği ile

küçük çaplı çubukların kullanıldığı SHPB düzeneğine göre daha çok parçalanmaktadır. Zhai vd. (2008) sinyal şekillendirici kullanarak modifiye edilmiş SHPB ile granit numuneleri üzerinde dinamik basınç deneyleri yapmış ve farklı birim deformasyon hızlarında yenilme tiplerini analiz ederek basınç dayanımını ve parçalanma derecesinin yüklemeye hızı ile değişimini araştırmışlardır. Dai vd. (2010) kayaların dinamik basınç dayanımına kaya numunesi şeklinin (uzunluk/çap oranı) ve çubuk ile kaya arasındaki sürtünmenin etkisini incelemişlerdir. Sürtünmedeki artış ile dinamik basınç dayanımının arttığını bulmuşlar ve ara yüzeylerin yağlanması ile dayanım üzerinde şekil etkisinin azaldığını belirlemişlerdir.

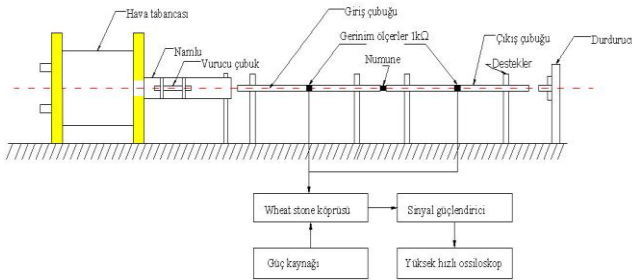
Yukarıda verilen deneysel teknik üzerindeki çalışmalara ek olarak kaya materyalinin dinamik mekanik davranışını karakterize etmek üzere farklı deneysel çalışmalar da yürütülmüştür. Bohloli (1997) modifiye SHPB ile diyabaz ve gnays numunelerini test etmiş ve test sonucunda dinamik dayanım değerlerinin statik değerlerin iki katı olduğunu ve yenilme tipinin de kaya türüne göre değiştiğini görmüştür. Shan vd. (2000) granit ve mermer numunelerinin dinamik gerilme-birim deformasyon davranışlarını incelemiştir. Wang vd. (2006) mermer numunelerinin elastisite modülü ve dinamik çekme dayanımının ölçülmesi için deneysel bir yöntem önermişler ve deneyler sonucunda yüksek birim deformasyon hızlı yüklemelerde dinamik elastisite modülü ve çekme dayanımının statik değerlerden oldukça fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Xia vd. (2008) granit içindeki mikroçatlakların, birim deformasyon hızındaki değişime bağlı olarak dinamik basınç davranışına etkisini araştırmışlardır. Düşük ve yüksek birim deformasyon hızlı yüklemelerde ölçülen maksimum gerilmenin mikroçatlak konumundan etkilenmediği, orta dereceli yüklemeye hızlarında ise daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Zhou vd. (2010) kayanın dinamik davranış karakteristiklerini belirlemek üzere SHPB yöntemi ile granit numuneleri üzerinde dinamik basınç testleri gerçekleştirmişlerdir. SHPB yöntemi ile elde edilen gerilme-birim deformasyon eğrilerinin kaya davranışını tanımlamadaki geçerliliği üzerindeki tartışmaların nedenleri irdelenmiştir.

Kayaların içinde gerçekleştirilen mühendislik çalışmalarında yaygın olarak dinamik yüklemeye durumuyla karşılaşmakta ve bu durumda kaya materyalinin mekanik davranışı, diğer mühendislik malzemelerinde olduğu gibi oldukça farklı olabilmektedir. Bu yüzden, dinamik materyal özelliklerinin bilinmesi ve bunun ampirik yaklaşımlarda dikkate alınması kayadaki işlemlerin performansını belirlemede daha iyi sonuçlar verebilecektir. Bu çalışmada, SHPB test yöntemi tanıtılmakta ve kireçtaşı numuneleri test edilerek kaya materyalinin dinamik şartlar altındaki davranışı incelenmektedir.

Dinamik test yöntemi

Bu çalışmada, kaya numunelerinin dinamik basınç testi, Şekil 2'de gösterilen SHPB sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SHPB düzeneği vuruç çubuk, giriş çubuğu, çıkış çubuğu, durdurma ünitesi, hava tabancası ve veri toplama ünitesi gibi yardımcı ekipmanlardan

meydana gelmektedir. Kaya numunesi giriş çubuğu ile çıkış çubuğu arasına yerleştirilir. Çubukların hepsi dairesel kesitlidir. Giriş ve çıkış çubuklarının çapı 19,03 mm, uzunlukları ise sırasıyla 1850 ve 1350 mm'dir. Vurucu çubuk 15 mm çapında ve 300 mm uzunluğundadır. Çubuklar yüksek dayanımlı maraging çeliğinden yapılmış olup yoğunluğu 8100 kg/m³, Young modülü 200 GPa, boyuna dalga hızı 4970 m/s'dir. Şekil 2'de görüldüğü gibi giriş ve çıkış çubukları üzerine birim deformasyon (gerinim) ölçerler yerleştirilmiş olup numune-çubuk ara yüzeyinden uzaklıkları sırasıyla 850 mm ve 350 mm'dir. Birim deformasyon ölçerlerde meydana gelen direnç değişimlerini voltaj cinsinden belirlemek için Wheatstone köprüleri kullanılmıştır. Bu köprülerde çıkış voltajı ayarlanabilir güç kaynağı ile beslenmektedir. Wheatstone köprüleri sistemde saniyede 1.000.000 veri toplama kapasitesine sahip yüksek hızlı osiloskoba bağlanmıştır. Test esnasında vurucu çubuk hava tabancası tarafından harekete geçirilerek hızlandırılır ve namlu boyunca hareket ederek giriş çubuğuna yüksek hızla çarpar. Vurucu çubuğun oluşturduğu darbe ile giriş çubuğunda "giriş dalgası" olarak tanımlanan bir elastik basınç dalgası oluşur. Bu basınç dalgası, giriş çubuğunda ilerleyerek giriş çubuğu-numune ara yüzeyine ulaşır. Giriş çubuğunda, zamana bağlı olarak gelişen birim deformasyon "giriş dalgası" değerleri " $\varepsilon_{gir}(t)$ " çubuk üzerine yapıştırılmış olan birim deformasyon ölçerle ölçülür ve kaydedilir. Giriş dalgasının bir kısmı giriş çubuğu-numune ara yüzeyinden geri yansırken "yansıyan dalga" kalanı numune boyunca ilerleyerek çıkış çubuğuna geçer ve çıkış çubuğunda "geçen dalga"yı oluşturur. Dalganın yansıyan kısmı çekme dalgası olarak giriş çubuğunda ilerlerken oluşturduğu zamana bağlı birim deformasyon "yansıyan dalga" değerleri " $\varepsilon_{yan}(t)$ " giriş çubuğuna yapıştırılmış aynı birim deformasyon ölçer ile kaydedilir. Birim deformasyon ölçerler giriş ve yansıma dalgaları ayrı ayrı ölçülebilecek, aynı yerde üst üste binmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Çıkış çubuğuna geçen basınç dalgasının oluşturduğu zamana bağlı elastik birim deformasyon "geçen dalga" değerleri de " $\varepsilon_{gec}(t)$ " giriş çubuğuna yapıştırılmış olan birim deformasyon ölçerden kaydedilir. Giriş ve çıkış çubuklarından ölçülen bu üç elastik birim deformasyon değerleri zamana bağlı olarak birim deformasyon ölçerlerle kaydedilmekte olup örnek sinyaller Şekil 3'te görülmektedir. Testlerin tamamlanması sonrası zamana bağlı kaydedilen bu birim deformasyon değerleri kullanılarak numunede oluşan gerilme ve birim deformasyonlar hesaplanmaktadır.



Şekil 2. Dinamik basınç deneylerinde kullanılan SHPB sisteminin şematik gösterimi (Tüfekçi, 2008)

SHPB sisteminde büyük uzunluk/çap oranlarına sahip çubuklar kullanıldığından, çubukların elastik deformasyonu vurucunun darbe hızı belli sınırlar içinde tutularak sağlandığından, yenilme öncesi numunede gerilme dengesi şartı sinyal şekillendirici kullanılarak sağlandığından, numunedeki sürtünme etkisi numune yüzeyleri yağlanarak azaltıldığından ve atalet etkisi de numune boy/çap oranı ile kontrol altında tutulduğundan dolayı tek boyutlu dalga teorisi kullanılarak numunede gerilme ve birim deformasyonlar hesaplanabilmektedir (Meyers, 1994; Shan vd., 2000; Zhao, 2003; Dai vd., 2010; Zhou vd., 2010). Numunenin birim deformasyonun hızı ($\dot{\varepsilon}_s$) yani numunede oluşan birim deformasyonun (ε_s) zamana (t) bağlı değişimi

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{v_1(t) - v_2(t)}{l_0} \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Eşitlikte v_1 ve v_2 sırasıyla giriş çubuğu-numune ve numune-çıkış çubuğu ara yüzeyindeki hız, l_0 ise numune boyudur. Ara yüzeye gelen basınç dalgası pozitif, ara yüzeyden yansıyan çekme dalgası negatif işaretli alınıp ara yüzeydeki hızlar (v_1 ve v_2) aşağıdaki eşitliklerden belirlenebilir:

$$v_1(t) = c[\varepsilon_{gir}(t) - \varepsilon_{yan}(t)] \quad (2)$$

$$v_2(t) = c\varepsilon_{gec}(t) \quad (3)$$

Burada; c çubuktaki eksenel ses hızıdır. Eşitlik 2 ve 3'teki ara yüzey hızlarını veren ifadeler eşitlik 1'de yazıldığında numunenin zamana bağlı birim deformasyon hızı değerleri çubuklardaki zamana bağlı birim deformasyon değerlerine bağlı olarak aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{c[\varepsilon_{gir}(t) - \varepsilon_{gec}(t) - \varepsilon_{yan}(t)]}{l_0} \quad (4)$$

Eğer numunede deformasyon düzenli ise giriş ve çıkış çubuğundaki birim deformasyonlar aynı olacaktır.

$$\varepsilon_{gir}(t) - \varepsilon_{yan}(t) = \varepsilon_{gec}(t) \quad (5)$$

Bu şart eşitlik 4'te yerine yazılırsa numunenin birim deformasyon hızı;

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{-2c\varepsilon_{yan}(t)}{l_0} \quad (6)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Bu eşitliğin integrali alınarak birim deformasyon değeri elde edilir.

$$\varepsilon_s(t) = \frac{-2c}{l_0} \int \varepsilon_{yan}(t) dt \quad (7)$$

Ara yüzeylerde kuvvet dengesi için eşitlikler yazılıp düzenlenerek belirlenen giriş çubuğu-numune ve numune-

çıkış çubuğu ara yüzeyindeki gerilmeler (σ_1 ve σ_2) aşağıdaki gibidir:

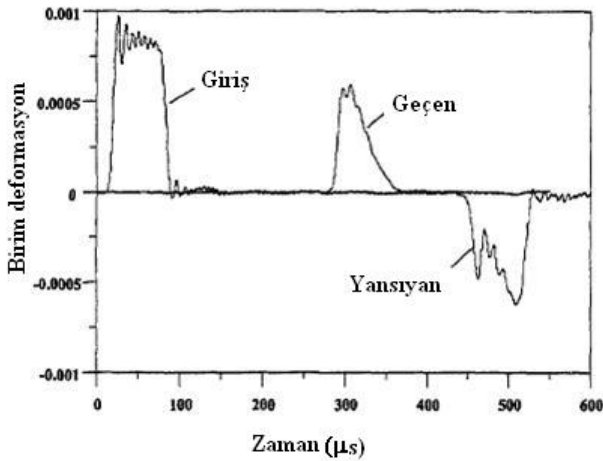
$$\sigma_1(t) = \frac{EA}{A_s} [\varepsilon_{gir}(t) + \varepsilon_{yan}(t)] \quad (8)$$

$$\sigma_2(t) = \frac{EA}{A_s} \varepsilon_{gec}(t) \quad (9)$$

Burada; A ve E sırasıyla çubukların kesit alanı ve elastisite modülü, A_s ise numunenin kesit alanıdır.

Dinamik test koşulları

Geleneksel SHPB yöntemi ile gevrek kayaların dinamik basınç testinde giriş dalgası Şekil 3'te görüldüğü gibi yaklaşık olarak dikdörtgen şeklinde olup zamana bağlı birim deformasyon artışı çok yüksektir ve birim deformasyon değişimi çok dalgalıdır. Deneylerde dinamik gerilme dengesini ve numunenin test süresince sabit hızda deformasyonunu sağlamak için ince bir bakır disk, sinyal şekillendirici olarak kullanılmıştır. Bakır disk 6 mm çapında ve 0.8 mm kalınlığında olup 400 derece sıcaklıktaki fırında 2 saat bekletilerek tavlınmıştır.



Şekil 3. Bir kireçtaşı numunesinin konvansiyonel SHPB testinden elde edilmiş birim deformasyon-zaman sinyalleri (Frew vd., 2001)

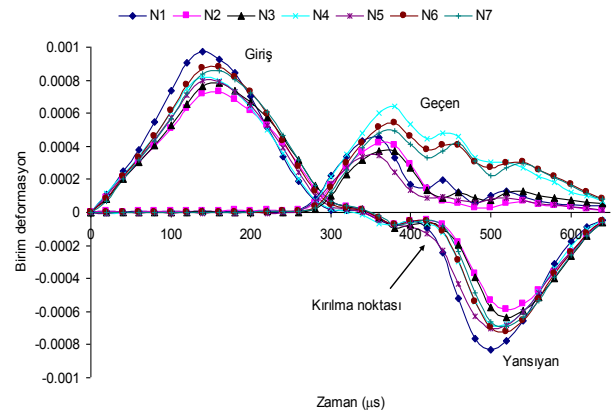
Dinamik basınç testleri çapı 18 mm, kalınlığı 11 mm olan silindirik şekilli 7 adet kireçtaşı (limra) numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kayanın birim hacim ağırlığı 2,377 g/cm³, görünür porozitesi % 9,32 ve basınç dayanımı 43 MPa'dır. Numuneler su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. Numune kalınlık/çap oranı 0,6 olup atalet etkisinin azaltılması için uygundur (Li vd., 2008). Numune-çubuk ara yüzeylerindeki sürtünmenin dayanım üzerindeki etkisini azaltmak için numune yüzeyleri ince bir gres tabakası ile kaplanmıştır.

Yansıyan ve geçen dalgalar tamamen vurucu çubuk hızına ve özellikle kaya numunesindeki hasarın derecesine bağlıdır. Vurucu çubuğun hızı, çubuğun namludaki konumu (Şekil 2) ve hava basıncından etkilenmektedir. Bu çalışmada, numunelerin testinde hava basıncı 6 atm olarak sabit tutularak (çubukların deformasyonu elastik sınırlar içindedir) numunelerin dinamik davranışları incelenmiştir. Bu basınçtaki deneyler esnasında tüm

numuneler ufalanarak (çok küçük parçalara ayrılarak) kırılmıştır.

Test sonuçları ve analizi

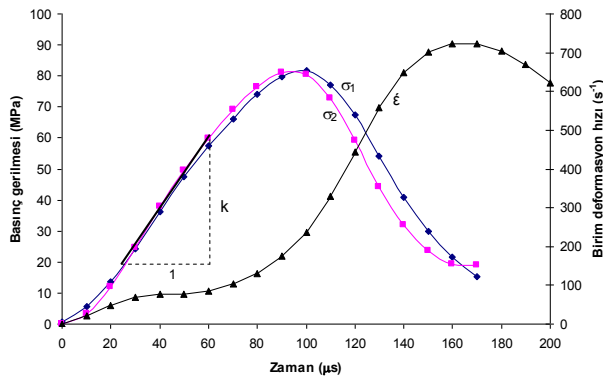
Numunelerin sinyal şekillendirici kullanılarak yapılmış testlerinden elde edilmiş giriş, yansıyan ve geçen dalga birim deformasyon sinyallerinin durumu Şekil 4'te gösterilmektedir. Eğriler giriş ve çıkış çubuklarında oluşan birim deformasyonların zamana bağlı değişimini göstermektedir. Numunelerin birim deformasyon hızı, yansıyan dalgada görülen birim deformasyon değerleri kullanılarak eşitlik 6'dan ve gerilme değerleri de giriş, geçen ve yansıyan dalgada görülen birim deformasyon değerleri kullanılarak eşitlik 8 ve 9'dan hesaplanmıştır. Sinyal şekillendirici kullanıldığından dolayı, sinyalin Şekil 3'teki sinyale göre daha tedrici yükseldiği Şekil 4'te görülmektedir. Bu da numunede gerilme dengesinin oluşması için gerekli zamanı sağlamıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi giriş çubuğunda ortalama olarak 140-150 µs süresine kadar değişen zamanda birim deformasyon artışı olmakta yani numune bu süre boyunca basınç yüklemesine maruz kalmaktadır. Dalganın geçişi esnasında numunede meydana gelen kırılma ile birlikte giriş ve çıkış çubukları arasındaki temas kesilmektedir. Böylece çıkış çubuğunda yükselme eğiliminde olan birim deformasyon sinyali birden düşüşe geçmektedir. Buna paralel olarak giriş çubuğunda, numune-giriş çubuğu ara yüzeyinden geri yansıyan sinyalde artışa geçmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi giriş çubuğundaki geri yansıyan sinyalin yükselişe geçtiği nokta numunenin kırılma noktası olarak kabul edilmektedir.



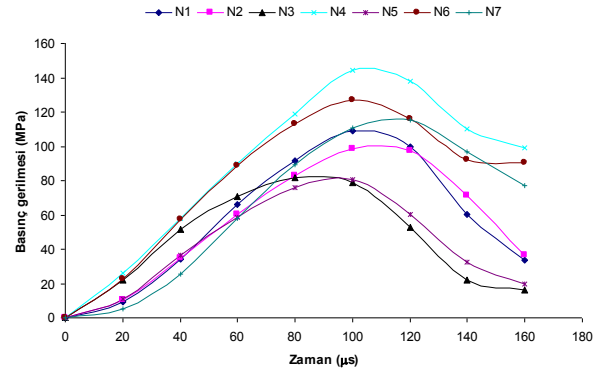
Şekil 4. Kireçtaşı numunelerinin (N1-N7) sinyal şekillendirici kullanılarak SHPB testinden elde edilmiş birim deformasyon-zaman sinyalleri

Numune-giriş çubuğu ve numune-çıkış çubuğu arakesitindeki gerilmeler (σ_1 ve σ_2) 8 ve 9 eşitliklerinden hesaplanmış, 5 no'lu numune için zamana bağlı değişimleri Şekil 5'te örnek olarak verilmektedir. σ_1 ve σ_2 eğrileri maksimum gerilme değerine kadar birbiriyle neredeyse çakıştığından numunede yaklaşık olarak dinamik gerilme dengesinin sağlandığı söylenebilir. Bunun sağlanması test sonuçlarının güvenilirliği açısından önemlidir. Şekil 5'te ayrıca 6 no'lu eşitlikten hesaplanan birim deformasyon hızının zamana

bağlı değişimi görülmektedir. Numunenin şekil değiştirme hızı 20 μs ile 70 μs zaman aralığında yaklaşık olarak sabit bir değerdir. Bu durum da denge durumunu gösteren diğer bir unsurdur. Birim deformasyon hızının yaklaşık sabit kısmı, basınç gerilmesi-zaman eğrisinde lineer olan kısma yani elastik deformasyonların oluştuğu bölgeye isabet etmektedir. 70 μs 'den sonra yenilme başlamış olup numunede oluşan deformasyonlar homojen değildir ve birim zamanda gerilme artışı elastik bölgeye göre daha düşüktür. Yaklaşık olarak 100 μs 'de numunede maksimum gerilme değerine ulaşılmakta olup bu noktadan sonra artan birim deformasyon hızı ile birlikte basınç gerilmesi azalmaktadır. Şekil 5'ten σ_2 eğrisinin lineer kısmının eğimi (k) hesaplanarak numuneye birim zamanda uygulanan gerilmedeki artış değeri (yükleme hızı) belirlenebilir. Eşitlik 9'dan hesaplanarak bulunmuş tüm numunelerdeki zamana bağlı basınç gerilmesindeki artış Şekil 6'da görülmektedir. Şekilden sağlam numunelerde birim zamandaki gerilme artışının zayıf numunelere göre daha fazla olduğu söylenebilir. Eğrilerin elastik kısımlarından belirlenen yükleme hızı değerleri ise Çizelge 1'de verilmektedir. Minimum yükleme hızı 1.20 MPa/ μs değeriyle 5 no'lu numunede, maksimum yükleme hızı ise 1.70 MPa/ μs değeriyle 6 no'lu numunede ölçülmüştür. Şekil 7'de numunelerde oluşan birim deformasyon hızının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Genel olarak sağlam numunelerde birim deformasyon hızının sabit olduğu sürenin zayıf numunelere göre daha fazla olduğu söylenebilir. Bu da tahmin edileceği gibi elastik deformasyonların daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Test edilen numunelerdeki ortalama birim deformasyon hızının belirlenmesinde, Şekil 7'de verilen birim deformasyon hızı-zaman eğrisinin düz kısmının ortalama değeri baz alınmış olup Çizelge 1'de verilmektedir. Bütün numuneler için birim deformasyon hızı 20 ile 120 değerleri arasında değişmektedir. Genel olarak sağlam numunelerin birim deformasyon hızının zayıf numunelere göre daha yüksek olduğu söylenebilir.



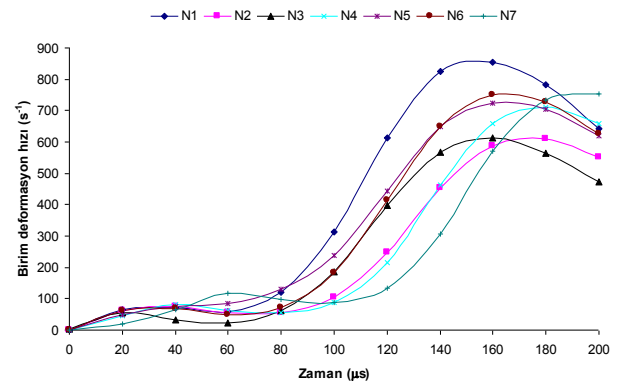
Şekil 5. 5 no'lu numunenin (N5) dinamik basınç testinden ölçülen giriş çubuğu-numune ve numene-çıkış çubuğu arakesitlerindeki gerilmelerin (σ_1 ve σ_2) karşılaştırılması ve birim deformasyon hızının ($\dot{\epsilon}$) zamana bağlı değişimi



Şekil 6. Kireçtaşı numunelerinde (N1-N7) zamana bağlı dinamik basınç gerilmesindeki değişim

Çizelge 1. Kireçtaşı numunelerinin SHPB testinden elde edilen yükleme hızı, ortalama birim deformasyon hızı, dinamik basınç dayanımı ve dinamik elastisite modülü değerleri

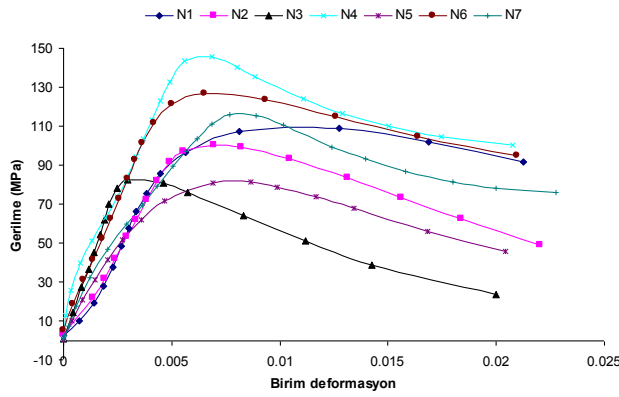
Numune	Yükleme hızı (MPa/ μs)	Ortalama birim deformasyon hızı (s^{-1})	Dinamik basınç dayanımı (MPa)	Dinamik elastisite Modülü (GPa)
1	1.45	65	110	23.53
2	1.26	63	101	20.41
3	1.43	38	83	33.35
4	1.56	69	147	20.8
5	1.2	80	82	15.66
6	1.7	58	127	26.06
7	1.63	95	117	14.42
Ortalama(x)	1.46	67	110	22.03
Standart sapma(S)	0.18	18	23	6.45



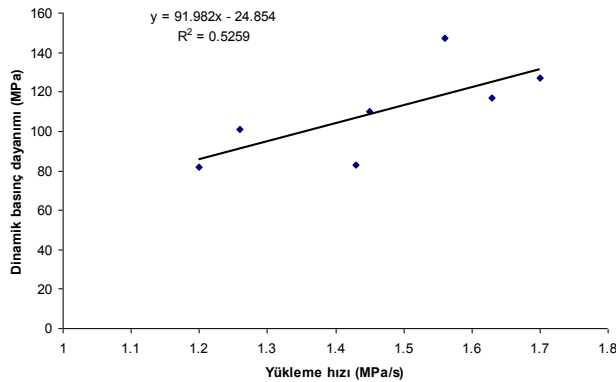
Şekil 7. Kireçtaşı numunelerinin (N1-N7) zamana bağlı birim deformasyon hızı değişimi

Şekil 8'de numunelerin gerilme-birim deformasyon eğrileri çizilmiştir. Test edilen kireçtaşı örneklerinin dinamik basınç dayanımı 82 ile 147 MPa değerleri arasında değişmektedir (Çizelge 1). Bu değişimin nedeni test edilen kayacın oldukça gözenekli, kil ihtiva eden

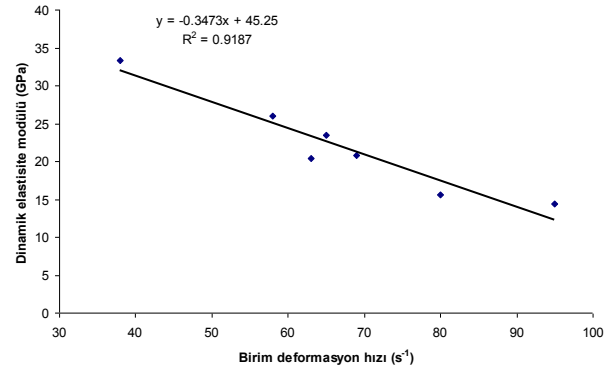
heterojen bir yapısının olmasından dolayıdır. Bu yüzden aynı şartlarda numunelerin yükleme hızı da değişmiştir. Yükleme hızı yüksek olan numunelerin dayanımı yüksektir (Şekil 9). Numunelerin çoğu yenilme başlamadan önce doğrusal gerilme-birim deformasyon davranışı sergilemiş olup dinamik elastisite modülü, basınç dayanımının %50 değerinden eğriye teğet çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 1’de verilmektedir. Şekil 10’da numunedeki birim deformasyon artış hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki incelenmiş olup oldukça anlamlı ilişkinin olduğu görülmektedir. Aynı şartlarda hızlı şekil değiştiren numunelerin elastisite modülü daha düşüktür. Elastisite modülü büyük ölçüde birim deformasyon hızına bağlı olduğundan belirlenen elastisite modülünü, gerilme-birim deformasyon ilişkisini tanımlayan kurucu modellerde kullanmak doğru değildir (Shan vd., 2000). Test edilen kayanın dinamik basınç dayanımı, quasi-statik basınç dayanımının yaklaşık 2.5 katı olarak bulunmuştur.



Şekil 8. Kireçtaşı numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrileri



Şekil 9. Dinamik basınç dayanımı-yükleme hızı ilişkisi



Şekil 10. Dinamik elastisite modülü-birim deformasyon hızı ilişkisi

Sonuçlar

Bu çalışmada, bir kireçtaşı (limra) kayacından alınan çapı 18 mm, kalınlığı 11 mm olan silindirik şekilli 7 adet numune üzerinde ayrıık Hopkinson basınç çubuğu düzeneği kullanılarak dinamik basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 6 mm çapında ve 0.8 mm kalınlığında 400 derece sıcaklıkta fırında 2 saat bekletilerek tavlanmış bakır disk sinyal şekillendirici olarak kullanılmıştır. Sinyal şekillendirici dinamik gerilme dengesini ve numunelerin test süresince sabit hızda deformasyonunu sağlamada başarılı olmuştur. Aynı şartlarda test edilen numuneler içinde, dayanımı yüksek numunelerde birim zamandaki gerilme artışının zayıf numunelere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sağlam numunelerde oluşan elastik deformasyonlar zayıf numunelere göre daha fazla olduğundan, sağlam numunelerin testi esnasında sabit birim deformasyon oluşum süresinin zayıf numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Numunelerde oluşan birim deformasyonun artış hızı ile dinamik elastisite modülü arasındaki ilişki incelenmiş olup dinamik elastisite modülünün büyük ölçüde birim deformasyon hızına bağlı olduğu belirlenmiştir. Aynı şartlarda hızlı şekil değiştiren numunelerin elastisite modülü daha düşük değerlerde olmaktadır. Bu çalışmada test edilen kayanın dinamik basınç dayanımı statik dayanımının yaklaşık 2.5 katıdır.

Kaynaklar

- Asprone, D., Cadoni, E., Prota, A., Manfredi, G. 2009. Dynamic behavior of a Mediterranean natural stone under tensile loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 46 (3), 514–520.
- Bohloli, B. 1997. Effects of the geological parameters on rock blasting using the Hopkinson split bar. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 34 (3-4), 321–329.
- Dai, F., Huang, S., Xia, K., Tan, Z. 2010. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43 (6), 657–666.

- Frew, D.J., Forrestal, M.J., Chen, W. 2001. A split Hopkinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials. *Experimental Mechanics*, 41 (1), 40–46.
- Goldsmith, W., Sackman, J.L., Ewert, C. 1976. Static and dynamic fracture strength of Barre granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 13, 303-309.
- Hopkinson, B. 1914. A method of measuring the pressure produced in the detonation of explosives or by the impact of bullets. *Philosophical transactions of the royal society*, 213, 437-456.
- Kolsky, H. 1949. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of strain. *Proceedings of the Physical Society*, B62: 676–700.
- Kumar, A., Mies, L.T.S., Pengjun, Z. 2004. Design of an impact striker for a split Hopkinson pressure bar. *Journal of the Institute of Engineering*, 44(1), 119–130.
- Kumar, A. 1968. Effect of stress rate temperature on the strength of basalt and granite. *Geophysics*, 33(3), 501-510.
- Li, X.B., Hong, L., Yin, T.B., Zhou, Z., Ye, Z. 2008. Relationship between diameter of split Hopkinson pressure bar and minimum loading rate under rock failure. *Journal of Central South University of Technology*, 15, 218–223.
- Meyers, M.A. 1994. *Dynamic behavior of materials*. John Wiley & Sons.
- Namet-Nasser, S. 2000. Introduction to high strain rate testing. *ASM Handbook, Mechanical testing and Evaluation*, vol. 8, USA.
- Shan, R., Jiang, Y., Li, B. 2000. Obtaining dynamic complete stress-strain curves for rock using the split Hopkinson pressure bar technique. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 37, 983–992.
- Sunny, G., Yuan, F., Prakash, V., Lewandowski, J. 2009. Design of inserts for split hopkinson pressure bar testing of low strain-to-failure materials. *Experimental Mechanics*, 49 (4), 479–490.
- Tüfekçi, K., 2008. Gerinim hızının kortikal kemiğin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi. Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta (yayımlanmamış).
- Wang, Q.Z., Li, W., Song, X.L. 2006. A method for testing dynamic tensile strength elastic modulus of rock materials using SHPB. *Pure and Applied Geophysics*, 163, 1091–1100.
- Xia, K., Nasser, M.H.B., Mohanty, B., Lu, F., Chen, R., Luo, S.N. 2008. Effects of microstructures on dynamic compression of Barre granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 45, 879–887.
- Zhai, Y., Ma, G., Zhao, J., 2008. Dynamic failure analysis on granite under uniaxial impact compressive load. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China* 2(3): 253–260.
- Zhao, H. 2003. Material behavior characterization using SHPB techniques, tests and simulations. *Computers and Structures*, 81, 1301–1310.
- Zhou, Z., Li, X., Ye, Z., and Liu, K. 2010. Obtaining constitutive relationship for rate-dependent rock in SHPB tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43 (6), 697–706.
- Zhu, W.C. 2008. Numerical modelling of the effect of rock heterogeneity on dynamic tensile strength. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41 (5), 771–779.