

Bu makale aşağıda atf bilgisi verilen makalenin Türkçe evirisidir.

Atf bilgisi: Kayabalı, K., Beyaz, T., zdemir, İ., K., Yılmaz, D. 2024. A simple and practical tool for indirect determination of the unconfined compressive strength of most common construction materials. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 173, 189-201. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1267931>



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>

MADEN TETKİK VE ARAMA
D E R G İ S İ



KEMALER

Yaygın yapı malzemelerinin tek eksenli sıkışma dayanımının dolaylı olarak belirlenmesi için basit ve pratik bir araç

A simple and practical tool for indirect determination of the unconfined compressive strength of most common construction materials

Kamil KAYABALI^{a*}, Turgay BEYAZ^b, İlnur KARAASLAN ZDEMİR^a ve Deniz YILMAZ^a

^a Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

^b Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Tek eksenli sıkışma dayanımı, yapı malzemeleri, çivi tabancası, çakma enerjisi.

Z

İnşaat malzemelerinin tek eksenli sıkışma dayanımının (UCS) laboratuvarında belirlenmesi meşakkatli ve zaman alıcıdır. Daha basit araçlar ve teknikler kullanarak UCS'yi dolaylı olarak tahmin etmek için birçok girişimde bulunulmuştur. Bunlardan biri de çivi tabancasıdır. Bu araştırmanın kapsamı, UCS'si 1-100 MPa arasında değişen tüm inşaat malzemelerine uygulanabilecek bir çivi tabancası tasarlamaktır. Araştırmada malzeme olarak kaya, tuğla ve farklı imento/kum oranlarında hazırlanmış, farklı dayanım aralıklarına sahip betonlar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemelerin tek eksenli sıkışma dayanımları öncelikle geleneksel sıkışma deneyleri ile belirlenmiştir. Aynı malzemeler üzerinde iki farklı enerji seviyesinde deneyler yapılarak çivi çakma derinlikleri belirlenmiştir. ivi akma derinliği, çakma enerjisi ve çivi çapı bağımsız değişkenler, geleneksel yöntemle belirlenen UCS ise bağımlı değişken olarak kullanılarak ampirik bir ilişki geliştirilmiştir. Çoklu regresyon analizi ile belirlenen ampirik ilişkiye göre, yapı malzemelerinin UCS'si çivi çakma yöntemi ile %99 anlamlılık düzeyinde tahmin edilebilmektedir. Araştırma ayrıca kayaların UCS'sinin %30'a kadar yüksek bir varyasyon katsayısına sahip olabileceğini ortaya koymuştur.

Geliş Tarihi: 24.03.2023

Kabul Tarihi: 24.03.2024

Keywords:

Compressive strength, building materials, nail gun, driving energy.

ABSTRACT

Determination of the unconfined compressive strength (UCS) of construction materials in the laboratory is tedious and time-consuming. There have been many attempts to indirectly predict UCS using simpler tools and techniques. One of them is the nail gun. The scope of this investigation is to design a nailer which can be applied all construction materials whose UCS range from 1-100 MPa. In the research, rocks, bricks, and concretes prepared in different cement/sand ratios with different strength ranges were used as materials. The unconfined compressive strength of the materials used in the experiments was first determined by conventional compression tests. The nail penetration depths were determined by conducting experiments on the same materials using a nailer with two different energy levels. An empirical relationship was developed by using nail penetration depths, driving energies, and nail diameters as the independent variables and the UCS determined by the conventional method as the dependent variable. According to the empirical relationship determined by multiple regression analysis, the UCS of building materials can be estimated with significance level of 99% by the nail penetration method. The research also revealed that the UCS of rocks might have a coefficient of variation as high as 30%.

*Başvurulacak yazar: Kamil KAYABALI, kayabali@ankara.edu.tr

Giriş

Yapı malzemeleri, özellikle kaya, beton, tuğla, briket ve tuğla/briketin bağlayıcısı (harç) çok çeşitlidir. Bu malzemelerin her birinin basınç ve kesme dayanımları laboratuvar yöntemleriyle belirlenmektedir. Basınç dayanımının (CS) laboratuvarında ölçülmesi basit gibi görünse de, paralel yükleme düzlemlerine sahip kaliteli karot numunelerinin alınması, testin aynı kayadan (veya betondan) birkaç "özdeş" numune üzerinde yapılması (örn. ASTM, 2002) gibi koşullar göz önüne alındığında, önemli ölçüde iş gücü gerektirir ve biraz maliyetlidir. Laboratuvar yöntemleri daha yaygın olarak "doğrudan test yöntemleri" olarak adlandırılır. Hem test düzeneklerinin yüksek maliyeti hem de nispeten zaman alan numune hazırlama ve test süreci nedeniyle, CS'nin doğrudan ölçüm yöntemlerine alternatif olarak CS'yi daha kısa sürede ve daha düşük maliyetle belirleyecek ekipman ve yöntemlerin geliştirilmesi konusunda bugüne kadar çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu tür dolaylı yöntemlerin en önde gelenleri Schmidt sertlik deneyi, iğne penetrasyon deneyi, çivi çakma deneyi vb. yöntemlerdir.

Schmidt sertlik deneyi ISRM (1978) ve ASTM (2001) standartlarına göre yapılabilir. 10 MPa'dan düşük kayalar için güvenilir sonuçlar vermediği için Schmidt sertlik deneyi 20-150 MPa CS değerine sahip kayalar için önerilmektedir (ISRM, 1978; Li vd., 2000). Bu deney tekniğinin başlıca avantajları uygulama kolaylığı, düşük düzenek maliyeti ve sıfır deney maliyeti, kolay taşınabilirlik ve tekrarlanabilirliktir. Kaya/beton dayanımı için tamamen güvenilir bir deney olarak kabul edilmez; daha ziyade, genellikle test edilen malzemenin CS'sinin ön değerlendirmesi için yapılan bir deney türüdür.

Nokta yükü testi (PLT; ISRM, 1985; ASTM, 1995), CS değeri 15 MPa'dan büyük olan kayalar için önerilmektedir (Broch ve Franklin, 1972). Silindirik, prizmatik ve düzensiz şekilli numunelere uygulanabilir. CS, bu testle bulunan nokta yük dayanımının $[I_{s(50)}]$ belirli bir katsayı ile çarpılmasıyla elde edilir. Yılmaz ve Sendir (2002)'e göre bu dönüşüm katsayısı çok belirsiz olup 6 ila 105 arasında değişebilir. Test edilen kayaların CS'si hakkında sadece yaklaşık bir tahmin verebilir.

Blok zımbalama deneyi (BPI; Van der Schrier, 1988; Ulusay vd., 2001) özel olarak hazırlanmış ince, disk şeklindeki numuneler üzerinde gerçekleştirilir. CS değeri 0,5-70 MPa arasında değişen kayalar üzerinde uygulanmaktadır. Diğer birçok deneyde olduğu gibi, numune boyutunun ve anizotropinin deney sonuçları üzerindeki etkisinin büyük olduğu belirtilmiştir. Bu deney yöntemi ayrıca özel numune hazırlığı gerektirmektedir. Mishra ve Basu (2012), bazı kayaların CS ve çekme dayanımını tahmin etmek için BPI yöntemini kullanmış ve BPI yönteminin CS'yi ölçmek için PLT yöntemi kadar yararlı olduğunu göstermiş ve ayrıca Brezilya çekme dayanımının blok zımba indeksi ile tahmin edilmesinin nokta yük dayanımından daha hassas olduğu sonucuna varmıştır.

Aşırı zayıf ve çok zayıf kayalarda uygulanan iğne penetrasyon deneyi Schmidt sertliği, blok zımbalama deneyi ve nokta yükü deneyi gibi test yöntemlerinde karşılaşılan eksiklikleri gidermek için geliştirilmiştir. Ayrıca penetrasyon derinliği dikkate alınarak püskürtme beton üzerinde kullanım için de uygundur (Bae vd., 2004). CS'yi 0,3 MPa kadar düşük değerlerde ölçülebilir. Ölçümün üst sınırı 40 MPa'dır (Maruto Corporation, 2006; Ngan-Tillard vd., 2011). CS 30-40 MPa aralığında olduğunda doğrudan ölçüm testinden elde edilen değerlere kıyasla %30'a varan standart sapmalara neden olmaktadır. CS'nin tahmin edilmesinde büyük belirsizlikler içerdiği bildirilmiş ve CS'yi doğru bir şekilde belirleyen bir deneyden ziyade bir indeks testi olarak önerilmiştir. Equotip sertlik test cihazı başlangıçta metaller için geliştirilmişse de daha sonra sınırlı sayıda araştırmacı tarafından kayalara da uygulanmıştır (örn. Verwaal ve Mulder, 1993; Aoki ve Matsukura, 2008). CS için uygulanabilirlik aralığı 0,1-100 MPa'dır. Bu test yönteminin CS'yi ne derece güvenilir kıldığı henüz net değildir.

Liberatore vd. (2003) geliştirdikleri özel bir penetrometre ile yığma yapılarıdaki harcın dayanımını dolaylı olarak belirlemeyi amaçlamışlardır. Penetrometre düzeneği, farklı tarihi yapıların harçlarına tekrarlanan çekiçleme işlemleri ile çakılmıştır. Penetrasyon derinlikleri 40-50 mm arasında değişmiştir. Harca 1 mm çakma uygulamak için gereken darbe sayısının 0,54-1,23 arasında değiştiği belirtilmiştir. Öte yandan Felicetti ve

Gattesco (1998), yığma yapılarda harcın dayanımını ölçmek için dinamik bir penetrometre geliştirmiştir. Bu araştırmacılar penetrometrenin darbe enerjisinin 2,2 J olduğunu belirtmişler ve penetrasyon derinliği ile harcın basınç dayanımı arasında bir ilişki aramışlardır.

Kayaların CS'sini dolaylı olarak ölçmek için kullanılan son yöntemlerden biri de çivi çakma deneyidir (Kayabalı ve Selçuk, 2010; Selçuk vd., 2012; Selçuk ve Kayabalı, 2015). Bu alternatif teknik ile CS 5-100 MPa aralığında ölçülebilmektedir. Kayabalı ve Selçuk (2010), çivi çakma deneyi ile dolaylı olarak belirlenen CS'nin oldukça güvenilir sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Çivi çakma deneyinin CS belirleme kabiliyetinin Schmidt sertlik çekicinden ve nokta yükleme deneyinden daha üstün olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, Selçuk vd. (2012) çivi çakma deneyini beton numunelere de uygulamıştır. Farklı agregalara sahip beton numuneler üzerinde yapılan çivi çakma deneylerinden elde edilen sonuçlar, basınç deneylerinden elde edilen sonuçlarla büyük bir uyum içindedir ($R^2 > 0,95$). Çivi çakma deneyinin agrega ve çimento matrisinin dayanım üzerindeki birleşik etkisini iyi bir şekilde temsil ettiğini belirtmişlerdir. Selçuk ve Kayabalı (2015) ise CS'yi belirlemek için farklı enerji seviyelerinde ve farklı çivi çaplarında çivi tabancaları ile çivi çakma deneyini uygulamışlardır. Farklı darbe enerjilerine sahip 5 farklı ticari çivi çakma tabancası kullanmışlar ve CS'yi çivi çakma derinliği, çivi çakma enerjisi ve çivi çapının bir fonksiyonu olarak tahmin edebilen ampirik bir ilişki geliştirmişlerdir.

Palassi ve Emami (2014), 4,54 kg kütle ve 0,46 m düşme yüksekliğine sahip mekanik bir çivi çakıcı geliştirmişlerdir. 122 J enerjisini sabit tutarak travertenler ve mermerler üzerinde toplam 6 çakma işleminde bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Çivi çapı 3,5 mm olan deneylerinde, sağlam kayanın CS'si ile çivi çakma derinliği arasında 0,98 belirleme katsayısı ile üstel bir ilişki tanımlamışlardır.

Yılmaz (2009), kaya karot numunelerinin CS'sini dolaylı olarak belirlemek için "karot boğma testi" adı verilen bir deney yöntemi kullanmıştır. Bu deneyin prensibi, bir karotun uzun eksenine dik bir dairesel hat boyunca "boğma" şeklinde yüklenmesine dayanmaktadır. Bazı araştırmacılar, çentik testinin sonuçlarını kayaların CS'si ile ilişkilendirmiştir.

Szwedzicki (1998), kaya sertliğinin bir ölçüsü olarak standart bir çentik deneyi ve bunun CS için bir tahmin edici olarak kullanılmasını önermiştir.

Penetrasyon yoluyla dayanımı ölçmek için kullanılan bir başka yöntem de 1960'larda betonun CS'sini yerinde ölçmek için geliştirilen Windsor probudur. Nispeten daha az tahrip edici olan bu test, betonun CS'sini kısa sürede belirlemek için kullanılan bir tür sertlik dayanımı testidir. Bu teknik de betonun içine özel bir prob sürülerek ölçülen penetrasyon derinliği ile sıkışma dayanımı arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Cihazla birlikte verilen kalibrasyon tablosunun her zaman güvenilir sonuçlar vermediği bildirilmiştir (Malhotra ve Carino, 1991; Pucinotti, 2005; 2009).

Yazarlar tarafından yürütülen bir araştırma projesinin son ürünü olarak iki farklı enerji seviyesi uygulayabilen ve farklı çivi çapları kullanabilen basit, sağlam ve ekonomik bir çivi çakma aparatı tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu araştırmanın kapsamı, bu çivi çakma aparatı aracılığıyla üretilen çivi çakma derinlikleri ile test malzemelerinden (çoğunlukla kayalar) elde edilen sıkışma dayanımlarını ilişkilendirerek farklı yapı malzemelerinin sıkışma dayanımını dolaylı olarak tahmin etmek ve CS'yi çivi penetrasyonu, çivi çapı ve çakma enerjisinin bir fonksiyonu olarak veren ampirik bir ilişki önermektir.

1. Materyal ve Yöntem

Çalışmada kullanılan başlıca ekipman, iki farklı enerji seviyesine sahip ve üç farklı çapta çiviyle atış yapabilen bir çivi tabancasıdır (Şekil 1). Enerji kaynağı olarak kurusıkı (veya ses) mermiler(i) kullanılmıştır. Bu aletin çakma enerjisi, yüksek çözünürlüklü bir video kamera önünde tabancadan ateşlenerek çıkan çivinin hızı (V) ölçülerek belirlenmiştir. Bir çivinin kütlesi (m) bilindiğinden, ses mermisinin enerjisi $W = 0.5 m V^2$ den hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan standart ses mermilerinin çarpma enerjisi 150 J olarak bulunmuştur. Düşük dayanımlı malzemeler için bu enerji seviyesinin yüksek olacağı düşünülerek, özel sipariş üzerine barutu 2/3 oranında azaltılmış özel ses mermileri üretilmiştir. Bunların çakma enerjisi 50 J olarak belirlenmiştir. Çivilerin uç açısı 45° olup, uygulamalar sırasında eğilmeye karşı ısıl işleme tabi tutulmuştur.



Şekil 1- Araştırmada kullanılan çivi tabancası, üç farklı çaptaki çiviler ve ses kurşunları.

Çalışmada 2 tip blok tuğla malzeme, farklı çimento/kum oranlarında hazırlanmış 8 adet dökme beton malzeme, titreşimli sıkıştırıcılarla hazırlanmış 4 adet beton malzeme ve 34 çeşit kaya malzemesi kullanılmıştır. Kayaların çoğu tortul ve magmatik kökenli, az bir kısmı ise metamorfik kökenlidir. Beton numuneleri laboratuvarında hazırlanmıştır. Tuğla numuneleri ticari tedarikçilerden temin edilmiştir.

Tuğlalardan 54 mm (NX) çapında beş karot numunesi alınmıştır (Şekil 2). Tuğla ve kaya karotlarının basınç dayanımlarını belirlemek için 1000 kN kapasiteli bir pres kullanılmıştır.

Tek eksenli sıkışma deneylerini gerçekleştirmek için ASTM standardı D2938 (American Testing Society for Materials, 2002) yönergesi sıkı bir şekilde takip edilmiştir. Deney numuneleri, uzunluk/çap (L/D) oranı 2,0 ila 2,5 olan uygun silindirik şekillere sahiptir.

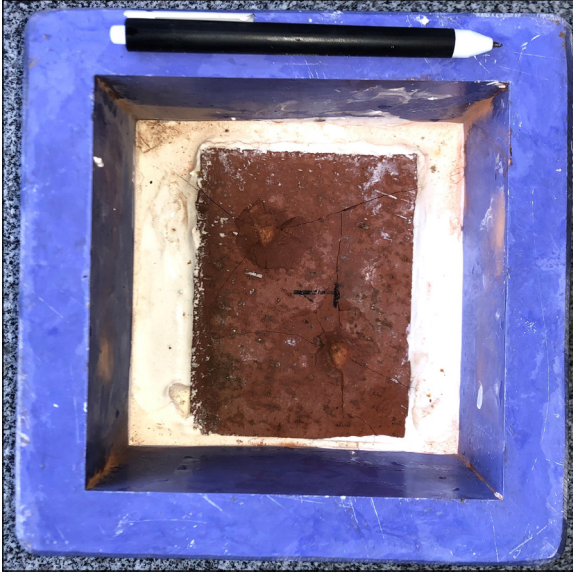


Şekil 2- Tuğla karotlarından bir görünüm.

Deney numunelerinin kenarları pürüzsüz tutulmuş ve herhangi bir düzensiz çıkıntı bırakılmamıştır. Deney numunelerinin uçları birbirine paralel ve uzun eksene dik açı yapacak şekilde kesilmiştir. Her deney öncesi küresel yükleme başlık yatağının kendi yuvasında serbestçe dönebilmesi sağlanmıştır. Eksenel yükü numunenin uçlarına iletmek için iki çelik plaka kullanılmıştır. Deney malzemesinin beklenen UCS'sine bağlı olarak deney numunesine 10 kPa/s, 100 kPa/s ve 500 kPa/s sabit yük oranları uygulanmış ve yükleme, numune yenilene kadar devam etmiştir. Beton numuneler için basınç deneylerini yürütmek üzere 50 kN kapasiteli bir pres kullanılmıştır.

Bazı tuğla numuneler, test edilen numunenin sınırlı boyutu nedeniyle çivi tabancasının atışı sırasında parçalanmıştır. Bunu önlemek için tuğla numunelerinin etrafına alçı dökülmüş (Şekil 3) ve alçı kurduktan sonra çivi tabancası ile atışlar gerçekleştirilmiştir. Bazı tuğla numunelerinde çivi çakma deneyinin ardından kuşatıcı alçının çatladığı gözlemlenmiş olsa da, alçı ve kap tarafından sağlanan kuşatma, uygun çivi çakma işlemini elde etmek için tuğla numunelerinin parçalanmasını önlemede yeterli olmuştur.

Araştırmada kullanılan ikinci malzeme türü, Portland çimentosu ve kumun farklı oranlarda (C/S) karıştırılmasıyla hazırlanan beton bloklardır. Beton blokların hazırlanması için çimento/kum oranları (hacimce) 1/2, 1/3, . . . ve 1/9 olarak seçilmiştir. Bu oranlar sadece rasgeledir; amaç beton numunelerin basınç dayanımı için daha geniş bir aralık elde



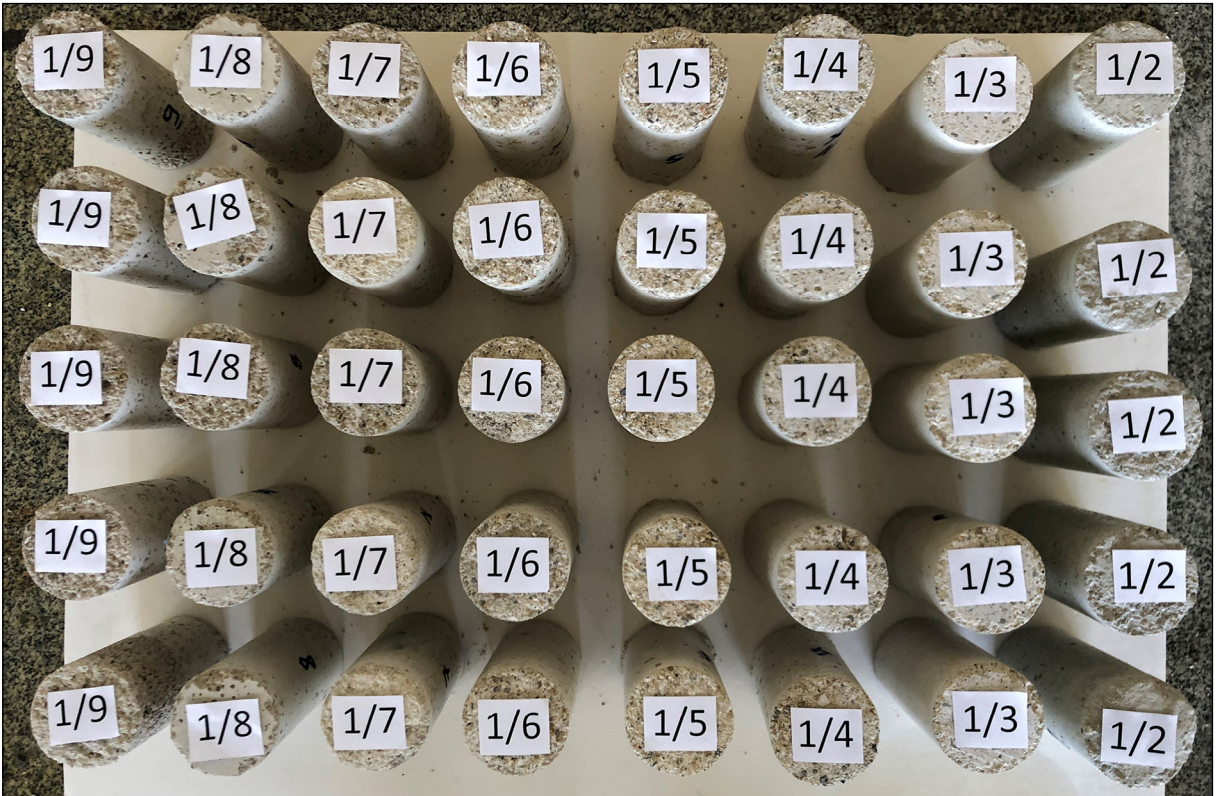
Şekil 3- Alçıyla kuşatılmış tuğla.

etmektir. Çimento macunu plastik kaplara dökülmüştür (Şekil 4). İç çapı 57 mm ve yüksekliği 120 mm olan silindirik numune kalıpları plastik kutudaki "ıslak" beton hamurunun içine yerleştirilmiştir (Şekil 4). Numune alıcıların prizmatik beton blok içerisine yaş iken yerleştirilmesinin temel nedeni, çivi çakma



Şekil 4- Dökme beton ve beton içine gömülmüş silindirik silindirik numune kapları.

için kullanılacak beton blok ile silindirik numune alıcı ile çıkarılacak örneklerin aynı özelliklere sahip olması zorunluluğudur. Farklı Portland çimentosu/kum oranlarındaki beton karışımları 28 gün boyunca açık havada kurumaya bırakılmıştır. Kuruma işlemi tamamlandıktan sonra, daha önce beton içerisine yerleştirilen silindirik kalıplar dikkatlice çıkarılmıştır. Her bir C/S oranı için beş adet silindirik beton numunesi hazırlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5- Farklı çimento/kum oranlarından hazırlanan beton numuneleri.

Beton malzeme çeşitliliğini artırmak için, çimento/kum (C/S) oranları 1/2, 1/3, 1/4 ve 1/5 olan prizmatik numuneler ayrıca titreşimli tokmak ile hazırlanmıştır. Bunların hazırlanmasında, titreşimli tokmakla sıkıştırma kısmı hariç, bir önceki paragrafta açıklanan yöntem kullanılmıştır.

Önerilen aletin öne çıkan avantajlarından biri çivi çapının değişkenliğidir. İlk denemeler 5 mm'lik bir çapın çok çeşitli UCS'ler için uygun olduğunu göstermiştir. Ancak, 5 mm'lik çivilerin uygulanması iki sorunu beraberinde getirmiştir. Birincisi, bu çivi dayanımının sağlam (UCS > 60 MPa) kayalar için yeterli olmamasıdır. Bu tür kayalara 5 mm'lik çivilerin uygulanması ya çivilerin kırılmasına ya da bükülmesine neden olmuştur. Bunu önlemek için 6 mm çaplı çiviler tercih edilmiştir. İkinci olarak, daha düşük enerjili mermiler uygulandığında bile bazı beton numunelerde maksimum 60 mm delme derinliği aşılmış ve bu da 6 mm çaplı çivilerin kullanılmasını gerektirmiştir. Ayrıca 4 mm çaplı çivilerin de dahil edilmesinin nedeni, test edilen malzemelerin basınç dayanımını tahmin etmek için çivi çapına göre önerilen denklemin kapsamını genişletmektir. Çivi çakma deneyi verileri kapsamında çivi çaplarının dağılımının genel olarak eşit olmadığına dikkat edilmelidir.

Çok düşük dayanımlı betonlarda (1/9 ve 1/8 C/S oranlarına sahip numunelerde) 5,0 ve 6,0 mm çapında çiviler kullanılmıştır. Bu betonlarda 4,0 mm çaplı çiviler kullanılmamıştır, çünkü çivinin tüm uzunluğu

(60 mm) betona girmiştir. C/S oranı 1/2 ve 1/3 olan betonlarda, düşük enerjili mermiler 6,0 mm çaplı çivileri betona çakmak için yeterli olmamıştır. Benzer C/S oranlarına sahip betonlara sadece 4,0 mm ve 5,0 mm çaplı çiviler saplanabilmiştir. C/S oranı 1/4, 1/5, 1/6 ve 1/7 olan betonlarda her üç tip çivi çapıyla da başarılı çivi atışları gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). Titreşimli tokmak ile sıkıştırılan beton numunelerde 150 J enerjili mermiler ve 6 mm çapında çiviler kullanılmıştır.

Ayrıca her kaya bloğu için beş karot numunesi hazırlanmıştır (Şekil 7). Kaya blokları üzerindeki çivi çakma deneyleri ile ilgili olarak, çivinin zayıf ve çok zayıf kayalara kolaylıkla saplanabildiği gözlenmiştir. Penetrasyon derinlikleri, çivinin dışarıda kalan uzunluğu bir kumpas aracılığıyla ölçüldükten sonra bu uzunluğun çivi uzunluğundan çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Kaya bloğunun orta derecede sağlam ile sağlam olduğu durumlarda, çivinin kayaya düzgün bir şekilde saplanması mümkün olmamıştır. Bu gibi durumlarda kaya yüzeyine çakılan çivi yüzeyde çentik veya bir çukurluk oluşturmuştur. Bu durumda, penetrasyon derinliğini belirlemek için çivinin kaya üzerinde oluşturduğu çukurluğun en derin kısmı bir kumpas ile ölçülmüştür (Şekil 8). Çivinin oluşturduğu çukurluğun çevresinin düzensiz kaya yüzeyine sahip olduğu durumlarda güvenilir bir okuma yapabilmek için çukurluğun etrafına 10 mm yüksekliğinde bir halka yerleştirilerek oyuğun derinliği belirlenmiştir (Şekil 8). Çalışmada kullanılan tuğlaların dayanımı



Şekil 6- Beton yüzeye çakılan çiviler. Arka sıra: 6 mm çapında çiviler, orta sıra: 5 mm çapında çiviler, ön sıra: 4 mm çapında çiviler.



Şekil 7- Farklı kaya türlerinden alınan karot örnekleri.



Şekil 8- Bir çivinin kayaya saplanmadığı durumlarda çivi penetrasyon derinliğinin ölçümü.

çok yüksek olduğu için bu blok tuğlalara çivi çakılması mümkün olmamış ve bu malzemeler üzerine yapılan atışlarla oluşan yüzey çukurluğunun derinliği sağlam kayalardakine benzer şekilde belirlenmiştir.

2. Deneysel Sonuçları

Deneysel malzemelerine çakılan çivilerin penetrasyon derinlikleri, araştırmada kullanılan kaya, beton ve tuğla numunelerine çivi tabancası ile atış yapılarak ölçülmüştür. Her bir deneysel malzemesi üzerinde beş çivi atışı yapılmıştır. Kaya malzemeleri için çivi çakma deneyleri karotlar üzerinde değil; blok numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Blok boyutunun küçük olduğu bazı kaya numunelerinde atış sayısı (kayanın parçalanması nedeniyle) 3 civarında kalmıştır. Malzemenin dayanım seviyesine bağlı olarak uygun çivi çapı ve çakma enerjisi seçilmiştir. Çivi çakma deneyi sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Yerden tasarruf etmek için her numuneye ait beş

Çizelge 1- Çivi çakma deneylerinin sonuçları (ϕ : çivi çapı, h: penetrasyon derinliği, E: çakma enerjisi).

No.	İsim	ϕ (mm)	h (mm)	E (J)
1	Kıltaşı	5	37,8/40,1/39,0	150
2	Litik tuf-1	5	8,6/11,2/9,6	75
3	Kireçtaşı-1	5	18,5/21,0/20,2	150
4	Andezit-1	6	7,4/8,8/8,1	150
5	Kireçtaşı-2	5	8,0/8,7/8,2	150
6	Kuvars arenit-1	6	6,7/7,7/7,2	150
7	İgnimbrit-1	4	16,6/20,1/17,8	75
8	Kuvars arenit-2	5	12,7/14,8/13,5	150
9	Kristalin kireçtaşı	5	9,9/11,9/10,8	150
10	Trakiandezit-1	5	13,3/13,4/13,3	150
11	Mermer-1	5	8,9/11,2/10,1	150
12	Granit porfir	5	10,7/12,4/11,5	150
13	Tebeşir	5	20,1/21,0/20,6	150
14	Meta-kireçtaşı	5	10,4/12,1/11,1	150
15	Kalkışt	5	10,8/11,4/11,2	150
16	İgnimbrit-2	4	20,1/24,7/23,2	75
17	Kireçtaşı-3	5	9,4/12,4/10,6	150
18	Trakiandezit-2	5	11,1/12,9/12,0	150
19	Granodiyorit	6	6,8/7,8/7,3	150
20	Litik tuf-2	5	20,1/26,2/23,2	150
21	Zeolitik tuf-1	5	11,7/14,0/13,0	150
22	Olivin bazalt	6	6,6/9,0/8,3	150
23	Andezit-2	5	9,1/10,9/10,1	150
24	Harzburgit	6	5,4/6,7/6,1	150
25	Gösel kireçtaşı-1	5	18,7/24,7/21,5	150
26	Dasit	5	8,1/12,1/10,4	150
27	Andezit-3	5	11,5/13,5/12,2	150
28	Andezit-4	5	11,7/14,2/12,5	150
29	Mikritik kireçtaşı	5	12,3/16,5/14	150
30	Zeolitik tuf-2	5	15,5/23,3/18,2	150
31	Kristalin tuf	5	32,9/46,6/38,6	150
31	Kristalin tuf	6	14/23,9/20,5	150
31	Kristalin tuf	5	5,8/23,6/15,3	50

No.	İsim	ϕ (mm)	h (mm)	E (J)
31	Kristalin tuf	4	16,8/29,2/21,5	50
32	Gösel kireçtaşı-2	5	7,5/13,6/10,4	150
33	Mermer-2	5	8,2/10,8/9,6	150
34	Gösel kireçtaşı-3	5	6,8/9,2/8,0	150
35	Tuğla-1	5	8,6/9,3/9,0	150
36	Tuğla-2	5	8,8/11,5/9,8	150
37	Beton 1/9	6	21,8/30,4/27,3	50
37	Beton 1/9	5	33,8/50,3/45,3	50
38	Beton 1/8	6	21,2/40,8/32,6	50
38	Beton 1/8	5	37,1/52,7/42,7	50
39	Beton 1/7	6	20,4/27,3/23,7	50
39	Beton 1/7	5	22,0/36,1/30,8	50
39	Beton 1/7	4	38,9/49,4/46,5	50
40	Beton 1/6	6	16,6/21,7/18,7	50
40	Beton 1/6	5	18,6/33,8/25,0	50
40	Beton 1/6	4	24,8/37,0/32,6	50
41	Beton 1/5	6	12,3/16,7/14,9	50
41	Beton 1/5	5	19,6/28,4/23,1	50
41	Beton 1/5	4	21,5/30,7/27,0	50
42	Beton 1/4	6	9,8/13,4/11,8	50
42	Beton 1/4	5	16,0/23,9/19,6	50
42	Beton 1/4	4	20,1/27,1/24,5	50
43	Beton 1/3	5	14,8/23,4/17,3	50
43	Beton 1/3	4	20,6/34,8/27,1	50
44	Beton 1/2	5	17,2/26,2/21,6	50
44	Beton 1/2	4	19,8/26,5/23,0	50
44	Beton 1/2	6	33,0/38,4/34,8	150
45	Beton 1/2*	6	19,2/19,9/19,6	150
46	Beton 1/3*	6	20,8/23,5/21,9	150
46	Beton 1/4*	6	23,4/24,7/24,1	150
48	Beton 1/5*	6	25,2/27/26,3	150
48	Beton 1/5*	4	15/19,5/17,9	50

delme derinliği çizelgeye girilmemiştir. Bunun yerine sadece minimum, maksimum ve ortalama değerler verilmiştir.

Bu araştırma için kullanılan diğer önemli deney ise tek eksenli sıkışma deneyi ya da kısaca basınç deneyidir. Kaya, beton ve tuğla numunelerinin her biri için beş basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 2'de minimum, maksimum ve ortalama basınç dayanımları olarak verilmiştir.

Çivi penetrasyon derinlikleri ile basınç dayanımları arasında bir korelasyon kurmaya yönelik ilk denemeler tatmin edici olmamıştır. Bu zayıf korelasyonun olası nedenini anlamak için, hem yüksek enerjili mermilerin penetrasyon derinliği hem de seçilen iki kayanın basınç dayanımı için istatistiksel bir analiz yapılmıştır. İlk aşamada, ilk markanın ses mermileri kullanılarak aynı kayaya (litik tuf-2) 30 atış yapılmış ve bu ses mermilerinin penetrasyon derinliklerinin eşdeğışkisi (kovaryansı, COV) hakkında bir fikir edinmek için

Çizelge 2- Tek eksenli sıkışma deneylerinin sonuçları.

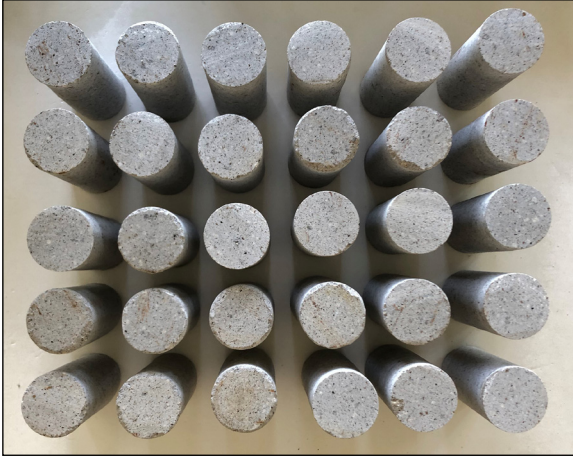
No.	İsim	σ_c (MPa)
1	Kiltaşı	8,9/14,3/11,0
2	Litik tuf-1	21,6/42,5/29,7
3	Kireçtaşı-1	21,9/62,3/42,6
4	Andezit-1	77,1/94,8/84,3
5	Kireçtaşı-2	34,7/90,3/57,9
6	Kuvars arenit-1	83,6/137,0/103,5
7	İğnimbrit-1	24,6/29,9/27,6
8	Kuvars arenit-2	37,9/59,3/50,9
9	Kristalin kireçtaşı	34,4/45,1/39,2
10	Trakiandezit-1	30,2/63,8/51,5
11	Mermer-1	41,0/46,5/43,8
12	Granit porfir	41,7/54,5/47,7
13	Tebeşir	27,5/50,6/40,6
14	Meta-kireçtaşı	33,8/59,5/47,9
15	Kalkşist	56,1/83,8/65,8
16	İğnimbrit-2	14,9/20,9/18,0
17	Kireçtaşı-3	47,8/73,7/54,9
18	Trakiandezit-2	50,6/75,6/65,2
19	Granodiyorit	69,3/112,2/86,8
20	Litik tuf-2	27,2/50,7/39,5
21	Zeolitik tuf-1	51,2/63,3/55,8
22	Olivin bazalt	86,5/119,7/99,6
23	Andezit-2	22,4/81,2/47,0
24	Harzburgit	80,1/123,2/102,4
25	Gösel kireçtaşı-1	15,3/25,5/20,6

No.	İsim	σ_c (MPa)
26	Dasit	42,2/101,2/64,1
27	Andezit-3	42,7/59/50,5
28	Andezit-4	40,4/56,3/51,1
29	Mikritik kireçtaşı	32,2/44,5/41,4
30	Zeolitik tuf-2	18,6/27,7/23,4
31	Kristalin tuf	10,0/12,7/11,3
32	Gösel kireçtaşı-2	62,6/88,8/79,4
33	Mermer-2	37,2/52,2/43,8
34	Gösel kireçtaşı-3	46,3/99,8/70,4
35	Tuğla-1	67/127/96
36	Tuğla-2	44,8/73,7/59,9
37	Beton 1/9	1,1/1,4/1,2
38	Beton 1/8	1,0/1,4/1,3
39	Beton 1/7	1,2/2,0/1,7
40	Beton 1/6	2,7/3,1/2,9
41	Beton 1/5	3,5/5,3/4,6
42	Beton 1/4	4,9/7,3/5,7
43	Beton 1/3	6,8/9,8/8,1
44	Beton 1/2	5,5/8,7/7,3
45	Beton 1/2*	19,2/19,9/19,6
46	Beton 1/3*	20,8/23,5/21,9
46	Beton 1/4*	23,4/24,7/24,1
48	Beton 1/5*	25,2/27/26,3

(* Bu beton numuneleri titreşimli tokmak kullanılarak hazırlanmıştır).

çivinin penetrasyon derinlikleri kaydedilmiştir. Bu 30 atış için belirlenen minimum, maksimum ve ortalama (μ) delme derinlikleri sırasıyla 6,8 mm, 18,1 mm ve 10,6 mm'dir. Bu atışların standart sapması (σ) 3,3 mm ve değişim katsayısı ($COV = \sigma / \mu * 100$) %31'dir. Bu COV'nin kabul edilemeyecek kadar yüksek olduğu ve bu ses mermilerinin bu araştırma için uygun olmayacağı düşünülerek, ikinci marka ses mermileri kullanılarak başka bir kayaya (gösel kireçtaşı-1) 30 çivi atışı yapılmıştır. Bu atışlar için kaydedilen minimum, maksimum ve ortalama çivi penetrasyon derinlikleri sırasıyla 18,7 mm, 23,8 mm ve 21,5 mm'dir. Araştırma için uygun olarak değerlendirilen bu ikinci marka ses mermileri için standart sapma ve eşdeğışki (COV) sırayla 1,5 mm ve %7,0 olup, araştırmada sonraki aşamalarda kullanılan tüm malzemeler üzerinde bu ses mermileri ile çivi atışları yapılmıştır.

Ses mermilerinin enerjisinin sabit olmadığı ve belirli bir değışim katsayısına sahip olduğu gözleminden yola çıkarak, basınç dayanımı için test edilen bir kaya numunesinde değışim katsayısının aralığı hakkında fikir edinmek amacıyla deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Bunun için dasitten (Çizelge 1'de 26 numara) alınan 30 adet karot numunesi (Şekil 9) üzerinde basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde bulunan en düşük, en yüksek ve ortalama basınç dayanımları sırasıyla 42,2 MPa, 101,2 MPa ve 64,1 MPa'dır. Standart sapma ve değışim katsayısı sırasıyla 16,1 MPa ve %25 olarak bulunmuştur. Basınç dayanımı konusunda ikinci bir değışim katsayısını belirlemek için farklı bir kaya (andezit-2) kullanılarak başka bir dizi deneme daha yapılmıştır. Bu kaya için kaydedilen minimum, maksimum ve ortalama basınç dayanımları sırasıyla 22,4 MPa, 81,2 MPa ve 47,0 MPa'dır. Andezit-2'nin standart sapması



Şekil 9- Basınç dayanımı değişim katsayısı için kullanılan dasit kaya karotları.

ve değişim katsayısı sırasıyla 14,5 MPa ve %31 olarak belirlenmiştir. Bu gözlemler, test edilen kayalar için basınç dayanımı değişim katsayısının şaşırtıcı derecede yüksek olduğunu göstermektedir. Bu da herhangi bir kayanın (belki de herhangi bir beton için) basınç dayanımının mutlak olmadığını ve dolaylı test tekniklerini kullanarak basınç dayanımını belirlemeye çalışırken ciddi bir şekilde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. COV analizlerine tabi tutulan bu iki kaya türü için UCS'lerin sadece ortalamalarının regresyon analizlerine dahil edildiği unutulmamalıdır.

Deney verileri, çeşitli malzeme türleri için UCS'yi dolaylı olarak belirleyecek en uygun tahmin denklemini bulmak amacıyla çoklu regresyon analizlerine tabi tutulmuştur. Sağlam kayalar, beton ve tuğlalar üzerinde kaydedilen toplam 325 çivi penetrasyon derinliği ile bunlara karşılık gelen çivi çapları ve çakma enerjileri analize dahil edilmiştir. CS girişi ile ilgili olarak, regresyon analizinde sadece ortalama basınç dayanımları kullanılmıştır. Esasen 325 basınç dayanımı değeri yoktur; sadece 48

ortalama değer mevcuttur. Başka bir ifadeyle, basınç dayanımı değerleri regresyon analizinde tekrarlı olarak kullanılmıştır. Örneğin, herhangi bir kaya veya beton numunesi için kullanılan iki farklı enerji seviyesi ve üç farklı çivi çapı, aynı basınç dayanımının 30 kez kullanılmasını gerektirir (2 enerji seviyesi x 3 çivi çapı x 5 atış = 30 defa). Çoklu regresyon analizi için DATAFIT (v. 9.0; Oakdale Engineering, 2008) programı kullanılmıştır. Regresyon analizinde çivi penetrasyon derinliği, çivi çapı ve çakma enerjisi bağımsız değişkenler, basınç dayanımı ise bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Çoklu regresyon analizlerinde a) tüm malzemeler, b) sadece kaya numuneleri, c) sadece beton numuneleri, d) sadece 150 J enerji seviyesi ve e) sadece 5 mm çivi çapı olmak üzere farklı senaryolar dikkate alınmıştır. Sonuçlar, Hataların Ortalama Karekökü (RMSE), Açıklanan Değişim (VAF) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE) gibi istatistiksel göstergelerle birlikte Çizelge 3'te sunulmuştur. En yüksek regresyon katsayısının ($R^2 = 0,89$) çoklu regresyona tüm malzemelerin, tüm çivi çaplarının ve iki farklı enerji seviyesinin dahil edildiği durumda aşağıdaki ilişkiden elde edildiği görülmüştür:

$$\sigma_c = \text{üs} (0,1453\phi - 0,087h + 0,0142E + 2,14) \quad (1)$$

RMSE'nin oldukça küçük olduğu durumlarda VAF %100'e çok yakındır. Ancak, MAPE metrikleri kritik derecede yüksektir (50,3) ve 50'den büyük değerler "iyi değil" şeklinde değerlendirilir. Ki kare testine göre Denklem (1)'in anlamlılık düzeyi %99'dur. Bu tahmin denklemi Selçuk ve Kayabalı (2015) tarafından önerilen denkleme çok benzemektedir. Selçuk ve Kayabalı'nın (2015) ile aynı bağımsız değişkenlerden oluşmasına rağmen, bu araştırmacıların tahmin denkleminin regresyon katsayısı ($R^2 = 0,95$) burada sunulandan ($R^2 = 0,89$) daha yüksektir. Bu

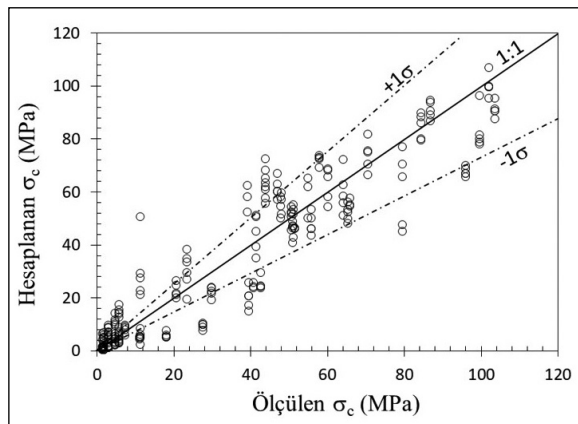
Çizelge 3- Regresyon analizlerinin sonuçları (ϕ : Çivi çapı, h: Penetrasyon derinliği, E: Çakma enerjisi, RMSE: Hataların Ortalama Karekökü, VAF: Açıklanan Değişim, MAPE: Ortalama Mutlak Yüzde Hatası).

Durum	Denklem	R ²	RMSE	VAF	MAPE
Tüm malzemeler	$\sigma_c = \text{exp}(0,1453\phi - 0,087h + 0,0142E + 2,14)$	0,89	10,3	91,8	50,3
Kaya numuneleri	$\sigma_c = \text{exp}(0,227\phi - 0,07h + 0,0095E + 2,25)$	0,81	11,4	93,5	15,7
Beton numuneleri	$\sigma_c = \text{exp}(0,437\phi - 0,0746h + 0,0177E + 4,39)$	0,85	1,9	92,4	12,8
Sadece E=150 J	$\sigma_c = 3,69\phi - 1,1h + 0,315E$	0,74	12,8	74,5	66,6
Sadece $\phi = 5$ mm	$\sigma_c = 7,74\phi - 2,77h + 0,343E$	0,66	16,8	65,8	32,9

farklılığın en olası nedeni iki şekilde açıklanabilir. Birincisi, bu araştırmacılar çalışmalarında propan gazı ateşleyen çivi tabancaları kullanmışlardır. Bu tabancalarla uygulanan çakma enerjisinin sabit olması nedeniyle çivi penetrasyon derinliklerinin COV'unun çok düşük olduğu tahmin edilmektedir; oysa bu çalışmadaki çivi penetrasyon derinliklerinin COV'u, ses mermilerindeki barut miktarındaki olası farklılıklar nedeniyle daha yüksektir. İkincisi de, bu araştırmacıların sadece kaya örnekleri kullanmış olmalarıdır.

Beton ve tuğlalar regresyon analizinden çıkarıldığı zaman daha düşük R^2 (=0,81) değerine sahip bir tahmin denklemi ortaya çıkmıştır. Yazarların tercihi, ölçülen parametrenin burada incelenen üç inşaat malzemesi türü için ortak bir endeks olması nedeniyle tüm malzemeler için Denklem (1)'i kullanmaktır.

Bir sonraki adım, basınç dayanımlarını dolaylı olarak tahmin etmek için 325 çivi penetrasyon deney setinin bağımsız değişkenlerinin girilmesini içermektedir. Deneysel olarak ölçülen basınç dayanımları ve Denklem (1) kullanılarak hesaplanan basınç dayanımları 325 veri seti için çizilmiştir (Şekil 10). Sınırlı sayıda aykırı saçılım noktası göz ardı edildiğinde, hesaplanan basınç dayanımları ile ölçülen basınç dayanımları arasındaki uyum derecesinin oldukça iyi olduğu görülmektedir. İki parametrenin 1:1 doğrusu da bu grafikte verilmiştir. Ayrıca, $+\sigma$ - σ standart sapma çizgileri de 23 numaralı kaya (andezit-2) için belirlenen %31 değişim katsayısına



Şekil 10- 325 verinin tamamı kullanılarak tahmin edilen ve ölçülen basınç dayanımları arasındaki karşılaştırmayı gösteren grafik.

dayalı olarak gösterilmiştir. İncelenen 48 malzemenin öngörülen basınç dayanımlarının büyük çoğunluğu, ölçülen basınç dayanımının $+1\sigma$ - -1σ standart sapması içinde kalmıştır.

UCS'nin farklı aralıkları için uygun çivi çaplarının ve farklı enerji seviyelerinin kullanılması konusunda profesyonellere yol göstermek amacıyla Çizelge 4 oluşturulmuştur.

Çizelge 4- Çeşitli UCS seviyeleri ve iki farklı çakma enerjisi için uygun çivi çaplarının (milimetre cinsinden) kullanımına ilişkin kılavuz.

σ_c aralığı (MPa)	E = 50 J	E = 150 J
0 - 20	4, 5, 6	-
20 - 60	-	4, 5
60 - 100	-	5, 6
> 100	-	6

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu araştırmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Yapı malzemelerinin basınç dayanımını dolaylı olarak tahmin etmek üzere ampirik bir ilişki geliştirilmiştir.

- Bu araştırmada en yaygın yapı malzemelerinin basınç dayanımlarını dolaylı olarak tahmin etmek için kullanılan çivi tabancası tahribatsız bir deney olup, hesaplanan ile ölçülen CS'ler arasında çok yüksek bir korelasyon katsayısı ($R^2 = 0,89$) vermektedir.

- Geliştirilen çivi tabancası ile yapı malzemelerinin basınç dayanımı geniş bir aralıkta (1-100 MPa ve üzeri) büyük bir doğrulukla tahmin edilebilmektedir.

- Ayrıntılı olarak çalışılan iki çeşit kaya numunesinin basınç dayanımlarının değişim katsayısı şaşırtıcı derecede yüksektir. Bu bulgu daha önceki araştırmalarda hiç ele alınmamış olup, bu konuda daha fazla çalışma gereklidir. Aynı kayanın basınç dayanımlarının bu kadar geniş bir aralıkta olmasının olası bir açıklaması, karot numunelerindeki mikro çatlak dağılımındaki farklılıklar olabilir. Her bir kaya karotundaki mikro çatlakların dağılımının ilgili CS'lerle ilişkilendirildiği kapsamlı bir çalışma yapılması önerilmektedir.

- Çivi penetrasyon derinliğinin değişim katsayısı, doğrudan yöntem kullanılarak basınç dayanımı için bulunandan önemli ölçüde daha küçüktür.

- Yeterli sayıda özdeş kaya veya beton numunesi almak ve bu malzemelerin karotları üzerinde bir dizi basınç deneyi yapmak için gereken süre numune başına birkaç saatten bir güne kadar sürebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan çivi çakma tabancası ile dolaylı olarak basınç dayanımını elde etmek (5 atış için) yarım saatten daha kısa sürmektedir.

- Bu çalışmada kullanılan çivi çakma tabancası, farklı basınç dayanımı seviyelerine sahip malzemeler için farklı enerji seviyelerine sahip birkaç çivi çakma tabancası kullanma ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

Aynı kaya malzemesinin basınç dayanımındaki büyük değişkenlik, "geleneksel basınç deneyleri ile belirlenen basınç dayanımı tek ya da mutlak bir değer midir?" sorusunu akla getirmektedir. Aynı soru beton malzemeler için de geçerlidir. Bu tespit, doğrudan basınç deneylerinin daha ileri çalışmalarda ele alınması gereken önemli bir yönü olup, daha fazla kanıtla doğrulanmalıdır.

Önerilen araç, geliştirilen ampirik denklemlerle birlikte çakmanın kaya yüzeyinde oluşturduğu çukurun derinliği ölçülerek 100 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımlarını kestirebilmektedir. Sağlam ve çok sağlam kayalarda çivi çakmayla oluşan çukurun derinliğinin basınç dayanımıyla birlikte azalmasının biraz sorgulanması gerekir. Çivilerin karakteri göz önüne alındığında, çivi uçlarının 2-3 milimetre arasında değişen sivri kısmı, uç açısının veya sivri kısmın uzunluğunun basınç dayanımı üzerinde herhangi bir etkisi olup olmadığını göstermek için daha fazla deney yapılması gereklidir.

Kaya dayanımının anormal derecede yüksek değişim katsayıları (COV) hakkında daha ileri bir çalışma olarak yazarlar, kayalar (ve ayrıca betonlar) üzerinde daha fazla sayıda deney malzemeleri içeren kapsamlı doğrudan basınç deneyleri yapılmasını önermektedir. Bu şekilde, uygun istatistiksel yöntemlerin kullanılması, yapı malzemeleri için gerçek basınç dayanımlarının en uygun şekilde seçilmesini sağlayabilir.

Katkı Belirtme

Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 120M030 numaralı proje desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Değinen Belgeler

- Aoki, H., Matsukura, Y. 2008. Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67, 23–29.
- ASTM. 1995. Standard test method for determination of the point load strength index of rock. ASTM Standard D5731.
- ASTM. 2001. Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method. ASTM Standard D5873.
- ASTM. 2002. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimen. ASTM D2938.
- Bae, G. J., Lee, S. W., Chang, S. H., Park, H. G., Lee, M. S., Kim, J. K. 2004. Application of pneumatic pin penetration test to estimation of compressive strength of shotcrete in Korea. *Tunneling and Underground Space Technology* 19, 432-440.
- Broch, E., Franklin, J. A. 1972. Point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 9(6), 241-246.
- Felicetti, R., Gattesco, N. 1998. A penetration test to study the mechanical response of mortar in ancient masonry buildings. *Materials and Structures* 31(5), 350-356.
- ISRM. 1978. Suggested method for determining hardness and abrasiveness of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 15, 89–97.
- ISRM. 1985. Suggested method for determining point-load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 22, 53-60.
- Kayabalı, K., Selçuk, L. 2010. Nail penetration test for determining the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47, 265-271.
- Li, X., Rupert, G., Summers, D. A., Santi, P., Liu, D. 2000. Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 33,1–13.
- Liberatore, D., Spera, G., Cotugno, M. 2003. A new penetration test on mortar joints. *On-site Control and Evaluation of Masonry Structures* 191-202.
- Malhotra, V. M., Carino, N. J. 1991. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. Boca Raton, FL, CRC Press, 384.

- Maruto Corporation. 2006. Penetrometer for soft rock: Model SH-70 instruction manual.
- Mishra, D. A., Basu, A. 2012. Use of the block punch test to predict the compressive and tensile strengths of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 51, 119-127.
- Ngan-Tillard, D. J. M., Verwaal, W., Mulder, A., Engin, H. K., Ulusay, R. 2011. Application of the needle penetration test to a calcarenite, Maastricht, the Netherlands. *Engineering Geology* 123(3), 214-224.
- Oakdale Engineering 2008. DATAFIT: Version 9.0, RC 101, 23 Tomey Road, Oakdale, PA, 15071 USA.
- Palassi, M., Emami, V. 2014. A new nail penetration test for estimation of rock strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (66), 124-127.
- Pucinotti, R. 2005. Non destructive testing in the valuation of reinforced concrete structural degradation. *L'Industria Italiana del Cemento* 810, 446-460.
- Pucinotti, R. 2009. In situ concrete strength assessment: Influence of the aggregate hardness on the Windsor probe test results. *Journal of Building Appraisal* 5(1), 75-85.
- Selçuk, L., Kayabalı, K. 2015. Evaluation of the unconfined compressive strength of rocks using nail guns. *Engineering Geology* 195(3), 164-171.
- Selçuk, L., Çoban, S., Kayabalı, K., Şimşek, O. 2012. A non-destructive testing technique: Nail penetration test. *ACI Structural Journal* 109(2), 245-252.
- Szwedzicki, T. 1998. Indentation hardness testing of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 35, 825-829.
- Ulusay, R., Gökceoğlu, C., Sülükçü, S. 2001. Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38, 1113-1119.
- Van der Schrier, J. S. 1988. The block punch index test. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 38, 121-126.
- Verwaal, W., Mulder, A. 1993. Estimating rock strength with the Equotip hardness tester. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Geomechanics Abstracts* 30, 659-662.
- Yılmaz, I. 2009. A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, 1349-1357.
- Yılmaz, I., Sendir, H. 2002. Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). *Engineering Geology* 66, 211-219.

