



## **Yığma Kemer Köprülerde Kullanılan Malzeme Özelliklerinin Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenmesi**

### **Determination of Material Properties in Masonry Arch Bridges with Non-destructive Methods**

**İrfan Kocaman<sup>1</sup>, İlker Kazaz<sup>2</sup>, Suat Gökhan Özkaya<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Ardahan Üniversitesi Ardahan Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, Ardahan, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [ilkerkazaz@erzurum.edu.tr](mailto:ilkerkazaz@erzurum.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 10.10.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 28.02.2020

DOI:10.21205/deufmd.2020226602

*Atıf şekli/ How to cite* KOCAMAN, I., KAZAZ, I., ÖZKAYA, S.G.(2020). Yığma Kemer Köprülerde Kullanılan Malzeme Özelliklerinin Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenmesi. DEUFMD 22(66), 671-680.

#### **Öz**

Yığma yapıların hesabında yapıyı oluşturan harç, taş vb. malzemelerin özelliklerini içinde eriten tek bir homojenize malzeme kullanımı yaygın bir uygulamadır. Bu malzemenin basınç dayanımı ve elastik modülü gibi özellikleri onu oluşturan birimlerin karakteristik değerlerinden hesaplanabilmektedir. Taş malzemesinin mekanik özelliklerini hasarsız deneyler yardımıyla belirlemek için Schmidt sertlik çekici ve ultrasonik ölçüm cihazları ile P dalga hızı oldukça yaygın kullanılmıştır. Bu çalışmada Erzurum ilinde bulunan tarihi Kireçli ve Kız köprüleri ele alınmıştır. Her iki köprüde yerinde çalışmalar gerçekleştirilerek köprüleri oluşturan taş malzemenin cinsi belirlenerek taş ocaklarından numuneler alınmıştır. Kübik taş numuneleri fiziksel, indeks ve mekanik testlere tabi tutularak bu özellikler arasında ilişki bağıntıları kurulmuştur. Taş numuneler üzerindeki çalışmalardan sonra üç taş bloktan oluşan yığma birimleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yığma birimlerin basınç dayanımları ile P dalga hızı arasında oldukça yüksek korelasyona sahip ilişki belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ultrasonik ses hızı, Schmidt sertlik çekici, malzeme özellikleri, tarihi yığma köprüler

#### **Abstract**

In the calculation of masonry structures, it is common practice to use a single homogenized material, which melts the properties of the mortar, stone, etc. in it. The properties of this material, such as compressive strength and elastic modulus, can be calculated from the characteristic values of the constituent materials. In order to determine the mechanical properties of stone material with the help of undestructive testing, Schmidt hammer and P wave velocity measurement with ultrasonic devices have been widely used. In this study, historical Kireçli and Kız bridges located in Erzurum were studied. On-site studies were carried out to determine the type of stone material and samples were taken from the quarries. Physical, index and mechanical tests were performed on the stone specimens to establish correlations between these properties. After the studies on stone samples, studies were carried out on the masonry units composed of three stone blocks. Highly correlated relation is derived between compressive strength and P wave velocity values of the stone blocks.

**Keywords:** Ultrasonic sound velocity, Schmidt hardness hammer, material properties, historical masonry bridges

## 1. Giriş

Geçmişten günümüze tarihi miras değerinde olan taş köprülere ülkemizin birçok yerinde rastlamak mümkündür. İnşa edildiği dönemde aktif ulaşım güzergâhları üzerinde bulunan bu köprüler, günümüzde daha çok tarihi değerleriyle ön plana çıkmaktadır. Bu köprülerin orijinal özellikleriyle korunabilmesi ve geleceğe güvenle aktarılabilmesi ancak gerekli bakım ve onarım işlemlerinin yapılmasıyla mümkündür. Farklı geometriye, malzemeye ve yükleme şartlarına maruz bu köprülerin davranışlarının en iyi şekilde ortaya konulmasının, yapılacak bakım ve onarım işlemlerinin etkinliğini arttıracığı açıktır.

Köprüler birçok ülkenin en önemli altyapı sistemlerinden biridir. Amerika Birleşik Devletlerinde 600.000, Birleşik Krallıkta 150.000, Çin Halk Cumhuriyeti'nde 500.000 ve Almanya'da 120.000 civarında kara yolu köprüsü bulunmaktadır [1]. Tarihi köprüler halen daha birçok yerde farklı şekilde kullanılmaktadır. Avrupa'da demiryolu ve menfezlerin %60'ı tarihi kemer köprülerden oluşmaktadır [2]. Yapılan son araştırmalara göre Avrupa'da demir yollarında kullanılan tarihi yığma kemer köprülerin sayısı 200.000 civarındadır [2].

Ülkemizde ise aktif kullanılan köprü sayısı 2002 yılında 5168 iken 2017 yılında 8030'a yükselmiştir. 2002 yılında aktif şekilde kullanılan taş köprülerin sayısı 120'iken bu sayı 2017'de 15'e kadar düşmüştür. Bu düşüşün sebebi tarihi köprülerin yol ağı dışına çıkması, kültür varlığı olarak korunmasında karar kılınması vb. durumlar gösterilebilir [3]. Ülkemizde mevcudiyetini koruyan 1816 tarihi köprü bulunmaktadır. Bu köprülerin %77.92'i Osmanlı, %8.82'i Selçuklu, %7.48 Roma, %1.32 Doğu Roma ve %4.46'ı ise Cumhuriyet döneminde inşa edilmiştir. Bu köprülerin %94.77'si taş kemer köprülerdir [4].

Ülkemizde bulunan köprülerin gerek tarihi gerekse günümüzde ulaşımına olan katkıları oldukça açıktır. Bu yapıların deprem, seller vb. yüklemelerden korunması bizlerin önemli görevleri arasındadır. Köprü yapılarının yapısal performanslarının doğru şekilde belirlenmesi, bu tür yapıların gelecek nesillere aktarılması açısından oldukça önemlidir. Ancak, tarihi yapıların yapısal performanslarının belirlenmesi konusu birçok farklı zorluğu içinde

barındırmaktadır. Özellikle, bu yapıların uzun yıllar önce inşa edilmeleri ve yapıldıkları dönemin tarihsel izlerini günümüze taşımaları bu yapılar üzerinde yapılacak uygulamaları zorlaştırmakta ve sınırlamaktadır.

Tarihi köprülerin yapısal davranışlarının belirlenmesinde en önemli adımlardan biri de köprülerin taşıyıcı elemanlarının malzeme özelliklerinin doğru şekilde belirlenmesidir. Ancak bu eserlerin tarihi yapı statüleri, malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yerinde hasarlı deneyler yapılmasını mümkün kılmamaktadır. Bu sebeple araştırmacılar taş malzemesinin mekanik özelliklerini hasarsız deneyler yardımıyla belirlemeye çalışmıştır. Bu hasarsız yöntemlerden Schmidt sertlik çekici ve ultrasonik ölçüm cihazları ile P dalga hızı oldukça yaygın kullanılmıştır. Katz vd. [5]; Karaman [6]; Yılmaz ve Sendir [7]; Yaşar ve Erdoğan [8] çalışmalarında her iki deney yöntemini de kullanarak ele aldıkları taşların Schmidt sertlik değerleri ( $R_n$ ), P dalga hızı ( $V_p$ ), basınç dayanımları ( $f_c$ ), elastisite modülleri ( $E$ ) ve yoğunlukları ( $\rho$ ) arasında korelasyonlar kurmuşlardır.

Öte yandan yığma yapıların sonlu elemanlar metodu gibi nümerik yöntemlerle analizinde genellikle yapıyı oluşturan harç, taş, dolgu gibi malzemeleri ayrı ayrı modellemekten ziyade farklı malzemeleri tek bir homojenize malzeme gibi ele almak etkin ve çoğu zaman gerekli bir uygulamadır [9,10]. Bunu gerçekleştirebilmek için yığma yapıyı oluşturan malzemelerin tek tek mekanik özelliklerinin bilinmesi, sonrasında bu malzemelerin bir bütün olarak çalışmasına bağlı olarak homojenize elastisite modülünün ve basınç dayanımının belirlenmesi gerekir [11, 12].

Bu amaçla tarihi kemer köprülerde kullanılan yapı malzemelerinin mekanik özelliklerinin tahribatsız yöntemlerle belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Çalışma kapsamında, Erzurum ili sınırları içinde bulunan tarihi Kireçli ve Kız köprülere ele alınmıştır. Yerinde incelemeler neticesinde köprülerde Kumtaşı (Tercan taşı) ve Traverten (İspir Traverteni) taşlarının kullanıldığı belirlenmiştir. Belirlenen taş çeşitleri köprülere yakın taş ocaklarından elde edilerek indeks, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ele alınan taşların belirtilen özellikleri arasında korelasyonlar kurulmuştur. Malzeme özelliğinden köprülerin taşıyıcı elaman özelliklerine geçiş sağlanmıştır.

## 2. Ele Alınan Köprüler

### 2.1. Kireçli Köprüsü

Erzurum ili Tortum ilçesinde bulunan tarihi taş kemerli Kireçli Köprüsü yaklaşık 100 yıllık bir geçmişe sahiptir. Tek açıklıklı sivri kemere sahip olan bu köprü sarı renkli taş işçiliğine sahiptir. Köprü taşıyıcı kemer, yan duvarlar ve dolgu malzemesinden oluşmaktadır Şekil 1'de köprü'nün görünüşü verilmektedir.



Şekil 1. Kireçli köprüsü

### 2.2. Kız Köprüsü

Erzurum ili İspir ilçesinde bulunan köprü'nün kitabesi bulunmamaktadır. Ancak 17. yüzyılda yapıldığı düşünülmektedir. Köprü son yıllarda restore edilmiştir ve kemer kısmında düzgün kesme taş kullanılmıştır. Sabit çaplı tek açıklıklı köprü, yan duvarlar, dolgu malzemesi ve taş korkuluklardan oluşmaktadır. Şekil 2'de köprü'nün görünüşü verilmektedir.



Şekil 2. Kız köprüsü

## 3. Taşların Fiziksel, İndeks ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

### 3.1. Taş Numunelerinin Fiziksel Özellikleri

Ele alınan Tercan taşı ve İspir traverteni numuneleri üzerinde fiziksel deneyler gerçekleştirilmiştir. Taş numuneler 95 mm

çapında 150 mm boyunda silindirik şekilde kesilmiştir. Kesilme esnasında meydana gelen boyut farklılıkları kumpas ile ölçümlerle dikkate alınmış ve hesaplamalara dahil edilmiştir.

Numunelerin oda koşullarında birim hacim ağırlık ( $\rho$ ) değerleri aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (1)$$

Burada,  $\rho$  birim hacim ağırlık ( $\text{g/cm}^3$ ),  $W$  örnek ağırlığı ( $\text{g}$ ) ve  $V$  numune hacmi ( $\text{cm}^3$ )'dir. Daha sonra indeks ve mekanik deneylerde kullanılan numunelerin oda koşullarında birim hacim ağırlıkları Tablo 1'de verilmektedir.

**Tablo 1.** Numunelerin oda koşullarında birim hacim ağırlıkları

| No   | Tercan Taşı |                            | Traverten   |                            |
|------|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
|      | Ağırlık (g) | $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ ) | Ağırlık (g) | $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ ) |
| 1    | 2139.2      | 2.012                      | 2445.1      | 2.341                      |
| 2    | 2102.4      | 1.977                      | 2473.6      | 2.365                      |
| 3    | 2048.3      | 1.926                      | 2412.2      | 2.318                      |
| 4    | 2193.5      | 2.063                      | 2440.4      | 2.339                      |
| 5    | 2092.6      | 1.968                      | 2486.7      | 2.376                      |
| 6    | 2037.0      | 1.916                      | 2502.1      | 2.394                      |
| 7    | 2053.8      | 1.932                      | 2437.2      | 2.336                      |
| 8    | 2068.7      | 2.004                      | 2473.4      | 2.371                      |
| 9    |             |                            | 2426.3      | 2.315                      |
| 10   |             |                            | 2416.5      | 2.319                      |
| 11   |             |                            | 2471.4      | 2.363                      |
| 12   |             |                            | 2464.4      | 2.348                      |
| 13   |             |                            | 2356.5      | 2.254                      |
| 14   |             |                            | 2476.8      | 2.365                      |
| Ort. | 2091.9      | 1.975                      | 2448.8      | 2.350                      |

Numunelerin oda koşullarındaki birim hacim ağırlığının belirlenmesinin sebebi taşların etüvde özelliklerinin değişmesidir. Şöyle ki; bazı taş numuneleri doygun birim hacim ağırlık, kuru birim hacim ağırlık, boşluk oranı vb. farklı fiziksel özelliklerinin belirlemek için test prosedürlerine tabi tutulmuştur. Ancak bu test prosedürleri için numunelerin etüv içinde kurutulması gerekmektedir. Etüv öncesi ve sonrası indeks özellikleri ve göz ile yapılan muayenelerde etüvün taşların yapısını değiştirdiği gözlemlenmiştir. Taş grubunun bir kısmıyla bu işlem yapılarak fiziksel özellikler bir aralık şeklinde verilebilirdi ancak çalışmanın sonraki aşamalarında farklı özellikler ile kalibre edilmesi planlandığı için bu test prosedüründen vazgeçilmiştir. Numunelerin fiziksel özellikleri sadece oda koşullarında birim hacim ağırlığın belirlenmesi ile sınırlandırılmıştır.

### 3.2. Taş Numunelerinin İndeks Özellikleri

Schmidt sertlik indeksi deneyi, silindirik şekilde kesilen taş numuneler üzerinde uygulanmıştır. Yay vasıtasıyla kurulan çelik uç kayaç yüzeyi üzerinde zıplatılarak zıplama mesafesi çekiç üzerindeki kadrandan okunarak Schmidt indeks değeri olarak kaydedilmiştir. Schmidt çekici deneyinde farklı uygulamalar söz konusudur. Yaklaşık sekiz ayrı yöntem içerisinde, 9 ile 25 arasında yapılan vuruşların ortalaması alınmıştır. Deneyde N tipi Schmidt çekici test aleti kullanılmıştır. Tablo 2’de numunelerin Schmidt sertlik indisleri verilmektedir.

Ultrasonik hız deneyleri Proceq marka Pundit ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Beton malzemelerin ölçülen P dalga hızı değerlerinden basınç dayanımlarına ve elastisite modüllerine hızlı bir geçiş için farklı eğriler tanımlanmıştır. Ölçümler esnasında bu eğriler aktif hale getirilmesi durumunda beton malzemeleri için basınç dayanımı ve elastisite modülü özellikleri oldukça hızlı şekilde elde edilebilir. Ancak beton harici farklı malzemelerde P veya S dalgası ile mekanik özellikler arasında hazır geçiş eğrilerin bulunmaması, malzemenin dalga hızının tek başına bilinmesini bir noktada önemsiz kılmaktadır. Bu sebeple aynı ocaktan çıkarılan taşların hasarsız şekilde mekanik özelliklerinin belirlenirken ses hızı deneyi kullanılması hedefleniyorsa, bu taşların mekanik, fiziksel ve indeks özellikleri belirlenerek o taşta ait geçiş eğrileri/bağıntıları oluşturulması gerekmektedir. Bu sebeple çalışma kapsamında ele alınan taşlara özgü geçiş eğrileri oluşturulmuştur.

Ultrasonik hız deneyi, kayaç örnekleri içerisinde geçirilen boyuna (P) ve enine (S) dalgalarının yayılma hızlarından yararlanılarak, kayaç malzemesinin dinamik elastik modülü ile dinamik poisson oranının tayini amacıyla yapılmıştır. Yöntem, homojen ve izotrop veya çok az derecede anizotropiye sahip kayaçlarda uygulanabilmektedir. Deneyler ISRM (1981)’e göre yapılmıştır. Tablo 2’de numunelerin ölçülen boyuna dalgaların yayılma hızları verilmektedir.

Travertenin ses ölçümü sırasında silindirik numunelerin farklı yerlerinden alınan ölçümlerde farklı ses hızları belirlenmiştir. Bu travertenin basınç testleri sonrasında (ileriki bölümde gösterilecektir) numunelerin içinde düzensiz bir şekilde dağılmış ve farklı büyüklükte boşluklar olduğu gözlemlenmiştir. Travertenin

bu özelliğinin ses dalgalarının birbirine yakın yerlerde farklı ilerleme hızına sahip olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bunun yanında Tercan taşı daha homojen bir özellik göstermesi sebebiyle P dalga hızları daha kesin olarak elde edilmiştir.



Şekil 2. (a) Proceq Schmidt sertlik çekici; (b) Proceq Pundit

Tablo 2. Taş numunelerin indeks özellikleri

| No   | Tercan Taşı |       | Traverten   |       |
|------|-------------|-------|-------------|-------|
|      | $V_p$ (m/s) | $R_n$ | $V_p$ (m/s) | $R_n$ |
| 1    | 2857        | 24    | 4429        | 29    |
| 2    | 2799        | 24    | 4600        | 32    |
| 3    | 1748        | 24    | 4573        | 29    |
| 4    | 3198        | 20    | 4353        | 32    |
| 5    | 2737        | 25    | 4581        | 30    |
| 6    | 2712        | 24    | 4487        | 31    |
| 7    | 2008        | 19    | 4549        | 30    |
| 8    | 2703        | 19    | 4907        | 32    |
| 9    |             |       | 4503        | 30    |
| 10   |             |       | 4478        | 30    |
| 11   |             |       | 4692        | 31    |
| 12   |             |       | 4991        | 32    |
| 13   |             |       | 4865        | 29    |
| 14   |             |       | 4967        | 30    |
| Ort. | 2595        | 22    | 4641        | 31    |

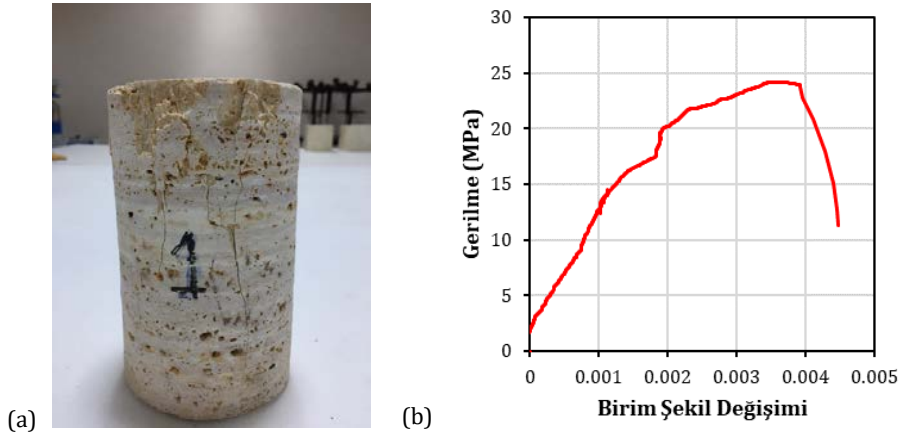
Başka önemli bir gözlem de Schmidt sertlik çekici uygulamasında gerçekleşmiştir. Taş numunelerin konulduğu zemin değiştiğinde ya da aynı cins taşın üstüne konularak çekiç darbe testi yapıldığında birbirinden kesin şekilde farklı indeks değerleri belirlenmiştir. Sertlik çekici

genellikle hali hazırda taşıyıcı rolü olan elemanlarda kullanılmaktadır. Bu da teste tabi tutulan malzemenin mesnet koşulunu rahatlıkla göz ardı edilmesine sebep olmaktadır. Ancak bu test prosedürü sadece taştan oluşan küp veya silindirik numunelerde kullanıldığında, numunenin konulduğu zemin oldukça önemli olmaktadır. Bu sebeple, Schmidt sertlik çekici uygulamasında aynı cins taş yığını üzerinde testin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

### 3.3. Taş Numunelerinin Mekanik Özellikleri

Tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülü tayini için kaya örneklerinden karot alma makinesi ile 95 mm çaplı 150 mm boyunda

silindirik numuneler alınmıştır. Numuneler oda koşullarında bırakıldıktan sonra test edilmiştir. Öncelikle numunelerin çapları ve boyları kumpas yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir. Daha sonra hazırlanan bu numuneler tek tek hidrolik pres çelik plakaları arasına yerleştirilmiştir. Ayrıca silindirik numuneler üzerinde potansiyometre bağlanarak her P yükünde bir  $\Delta L$  deformasyon değeri okunmuştur. Elde edilen  $\Delta L$  değerleri parçanın deneyden önceki uzunluğuna bölünerek  $\varepsilon = \Delta L / L$  her bir yük artışı adımında birim şekil değiştirme değeri elde edilmiştir. Numunelere 0.1 MPa/s hızında yükleme gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. (a) 1 Nolu traverten numune ve (b) birim şekil değiştirme-gerilme eğrisi

Yüklemeye maruz tutulan numunenin taşıyabildiği maksimum yük değeri ( $P$ ) numune kesit alanı ( $A$ ) değerlerine bölünerek her bir numunenin tek eksenli basınç dayanımları aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Burada,  $\sigma_c$  tek eksenli basınç dayanımı (MPa),  $P$  kırılma yükü (N),  $A$  numunenin basınca maruz kalan yüzey alanı (mm<sup>2</sup>)'dir. Bütün numunelerin basınç dayanımları ve elastisite modülleri Tablo 3'de verilmektedir.

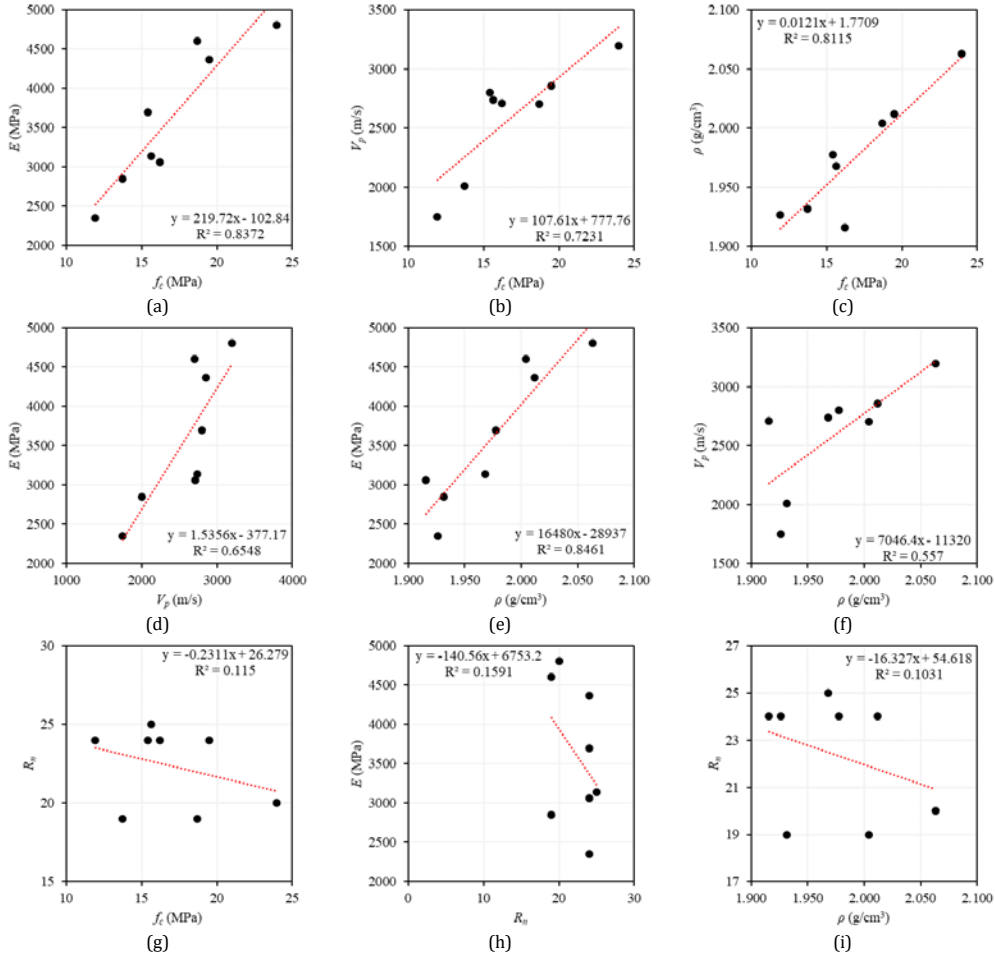
Tablo 3. Numunelerin basınç dayanımları ve elastisite modülleri

| Num No | Tercan Taşı |           | Traverten   |           |
|--------|-------------|-----------|-------------|-----------|
|        | $f_c$ (MPa) | $E$ (MPa) | $f_c$ (MPa) | $E$ (MPa) |
| 1      | 19.51       | 4363      | 24.15       | 7325      |
| 2      | 15.41       | 3694      | 23.91       | 7201      |
| 3      | 11.94       | 2348      | 18.73       | 3601      |
| 4      | 23.97       | 4807      | 21.58       | 3377      |
| 5      | 15.63       | 3141      | 15.97       | 8996      |
| 6      | 16.23       | 3059      | 40.47       | 12363     |
| 7      | 13.75       | 2848      | 30.64       | 10409     |
| 8      | 18.68       | 4605      | 54.41       | 13188     |
| 9      |             |           | 36.86       | 6740      |
| 10     |             |           | 29.43       | 10748     |
| 11     |             |           | 48.53       | 12375     |
| 12     |             |           | -           | -         |
| 13     |             |           | 35.92       | 9199      |
| 14     |             |           | 24.08       | 5801      |
| Ort.   | 16.89       | 3608      | 31.13       | 8563      |

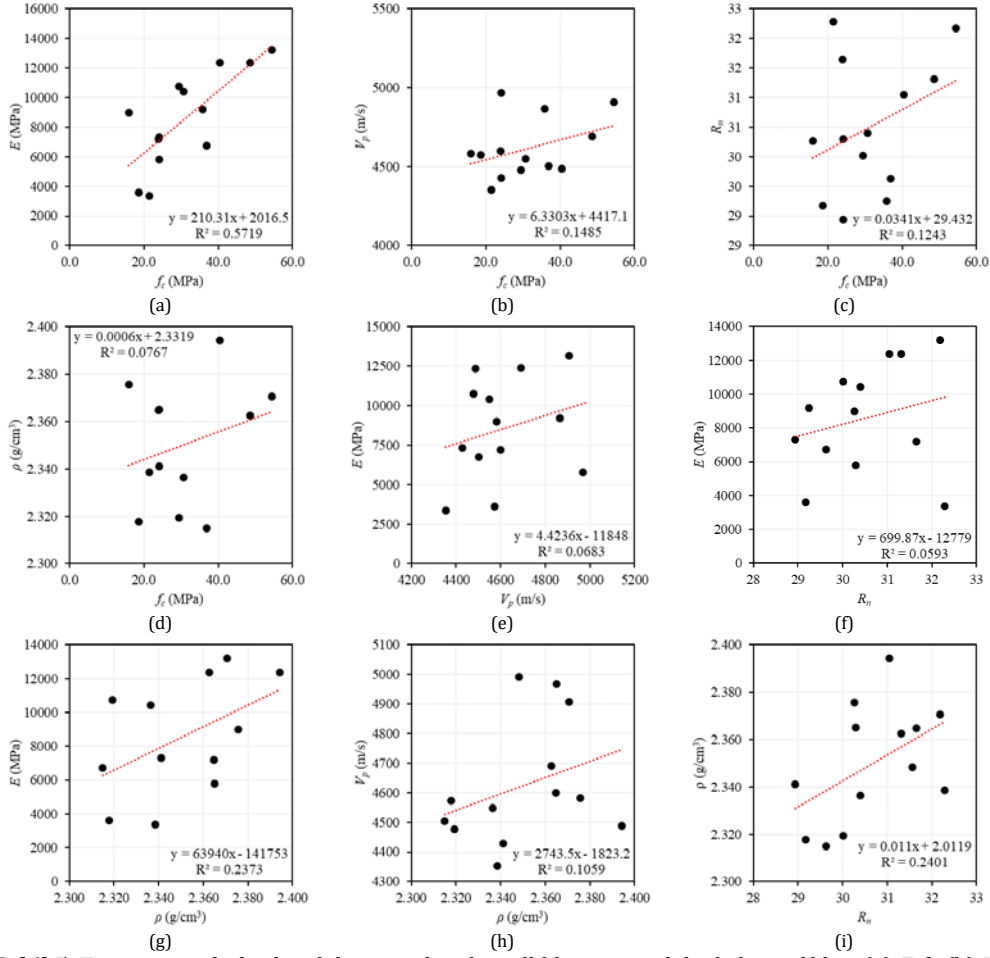
### 3.4. Taş Numunelerin Fiziksel, İndeks ve Mekanik Özellikleri Arındaki Bağlıntılar

Literatüre bakıldığında taşların fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri arasında korelasyon kurmaya yönelik bağıntıların sayısı oldukça fazladır. Ancak taş, doğal bir malzemedir ve farklı etkilere maruz kalmaktadır. Aynı ocaktan çıkarılan taş numuneler arasında bile farklı özellikler gözlemlenmektedir. Bu nedenle aynı kayaç türlerinin bile farklı korelasyon bağıntıları mevcuttur. Belirtilen karmaşıklığın önüne geçebilmek için şöyle bir yöntem izlemek doğru olacaktır; araştırmacılar ilk olarak kullanacakları taş cinsini belirlemeleri gerekmektedir. Sonrasında ise aynı ocaktan taş numuneleri temin edilerek, numune topluluğunun fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri deneysel olarak

belirlenmelidir. Belirlenen bu özellikler arasında ilişkiler kurularak hasarsız yöntemlerin o numune topluluğu içinde kullanılması güvenli hale getirilir. Literatürde taş cinslerine göre fiziksel, indeks ve mekanik özellikler arasında birçok bağıntı önerilse de, bu bağıntılar ancak o çalışmada ele alınan taş numune topluluğu için güvenli sonuç verecektir. Bu sebeple, araştırmacılar çalışmalarında kullandığı taşların özelliklerinin belirlenmesinde literatürde önerilen denklemleri değil, fiziksel, indeks ve mekanik özelliklerinin belirleyip, çalışmalarına sonrasında devam etmeleri önerilmektedir [8,13-15]. Ele alınan numunelerin fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri arasında ilişki mevcuttur. Şekil 4 ve 5'de verilen özellikler arasındaki ilişkiler grafiklerde verilmektedir.



Şekil 4. Tercan Taşının fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri arasındaki ilişki grafikleri (a)  $E$ - $f_c$ ; (b)  $V_p$ - $f_c$ ; (c)  $\rho$ - $f_c$ ; (d)  $E$ - $V_p$ ; (e)  $E$ - $\rho$ ; (f)  $V_p$ - $\rho$ ; (g)  $R_n$ - $f_c$ ; (h)  $E$ - $R_n$ ; (i)  $R_n$ - $\rho$



**Şekil 5.** Travertenin fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri arasındaki ilişki grafikleri (a)  $E$ - $f_c$ ; (b)  $V_p$ - $f_c$ ; (c)  $R_n$ - $f_c$ ; (d)  $\rho$ - $f_c$ ; (e)  $E$ - $V_p$ ; (f)  $E$ - $R_n$ ; (g)  $E$ - $\rho$ ; (h)  $V_p$ - $\rho$ ; (i)  $\rho$ - $R_n$

Verilen grafikler neticesinde Tercan taşının  $E$ - $f_c$ ,  $V_p$ - $f_c$ ,  $\rho$ - $f_c$ ,  $E$ - $V_p$ ,  $E$ - $\rho$  ve  $V_p$ - $\rho$  özellikleri arasında korelasyon katsayıları yüksek bağıntılar elde edilmiştir. Şöyle ki ele alınan numune kümesinde oda koşullarındaki birim hacim ağırlığı ve/veya P dalga hızı bilinen bir numunenin basınç dayanımı ve elastisite modülü mekanik deneylere gerek kalmadan güvenli şekilde elde edilebilir olduğu görülmektedir. Ancak Tercan taşı için Schmidt sertlik çekici ile belirlenen indeks özelliği ile diğer herhangi bir özellik arasında anlamlı bir ilişki ( $R^2 > 0.6-0.7$ ) kurulamamıştır.

Travertenin özellikleri arasındaki ilişkilere bakıldığında oldukça düşük korelasyon ve/veya anlamsız korelasyon değerleri görülmektedir. Bunun sebebi Travertenin oldukça düzensiz olan

iç yapısında kaynaklandığı düşünülmektedir. Travertenin bu özelliği sebebiyle sonraki bölümde açıklanan sistemlerde kullanılmamıştır.

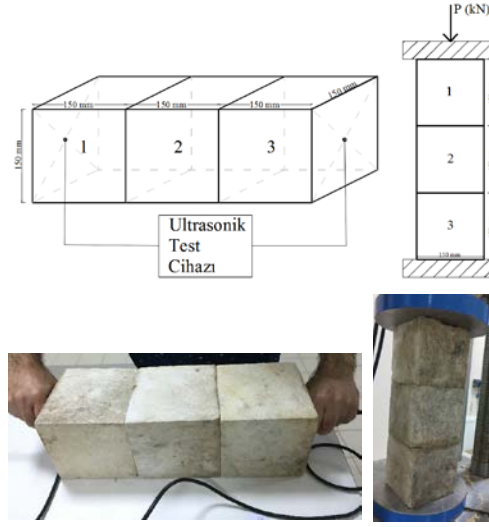
### 3.5. Yığma Birimi Basınç Dayanımı

Önceki bölümde tahribatlı ve tahribatsız deneysel yöntemler kullanılarak taşların mekanik ve indeks özellikleri arasında anlamlı ilişkiler oluşturulmaya çalışılmıştır. Şimdi belirli bir taştan oluşan yığma biriminin mekanik özellikleri sadece Schmidt çekici ve ultrasonik ses hızı yöntemleriyle belirlenerek, yığma duvarı temsil ettiği düşünülen birim için indeks özellikleri ile mekanik özellikler arasında mevcut olan ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu bölümde küp taş numuneleri üçerli olmak üzere birleştirilmiştir. Üst üste konulan taşların yığılma davranışına daha yakın sonuçlar vereceği kabul edilmiştir. Bu deney düzeneği literatürde sıklıkla kullanılmaktadır [11, 16]. Önceki bölümde belirlenen özellikler arasındaki bağıntılar yardımıyla küp taş numunelerinin basınç dayanımlarını hasarsız şekilde belirlenmiştir. Böylelikle tek tek basınç dayanımı bilinen taşlardan oluşan sistemin basınç dayanımının nasıl değiştiği irdelenmiştir.

Taşların tekil özellikleri belirlendikten sonra Şekil 6'da verilen sistemler aralarında harç bulunmadan (dry joint) şekilde üretilmiştir. Sistemi oluşturan taşların ultrasonik ölçümü gerçekleştirilerek önceki bölümde Şekil 4 ve 5'te verilen ilişkilerle basınç dayanımları belirlenmiştir. Numuneler üzerinde yığılma birimi boyunca iletilen ses dalgaları ölçümleriyle  $V_p$  değeri ve basınç yüklemesi vasıtasıyla basınç dayanımları belirlenmiştir.

Yığılma birimlerinde kullanılan taşların basınç dayanımları indeks özellikleri yardımıyla belirlenmiştir. Her bir taş numunesinin  $V_p$  dalga hızı belirlenerek önceki bölümde verilen korelasyon denklemleri ile basınç dayanımları belirlenmiştir. Tablo 4'de her bir taş numunesinin P dalga hızı ve basınç dayanımı özellikleri verilmektedir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen yığılma birimi basınç dayanımları Tablo 5'de verilmektedir.



Şekil 6. Yığılma birimi ölçümleri ve basınç testleri

Tablo 4. Yığılma biriminde kullanılan Tercan taş numunelerinin özellikleri

| $V_p$<br>(m/s)   | $f_c$<br>(MPa) | $V_p$<br>(m/s)   | $f_c$<br>(MPa) |      |      |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------|------|
| <b>Birim (1)</b> |                | <b>Birim (2)</b> |                |      |      |
| T1               | 2404           | 15.6             | T4             | 2679 | 17.4 |
| T2               | 2586           | 16.8             | T5             | 2982 | 19.4 |
| T3               | 2125           | 13.7             | T6             | 2683 | 17.4 |
| <b>Birim (3)</b> |                | <b>Birim (4)</b> |                |      |      |
| T7               | 2431           | 15.7             | T10            | 2459 | 15.9 |
| T8               | 2347           | 15.2             | T11            | 2683 | 17.4 |
| T9               | 2820           | 18.3             | T12            | 2262 | 14.6 |

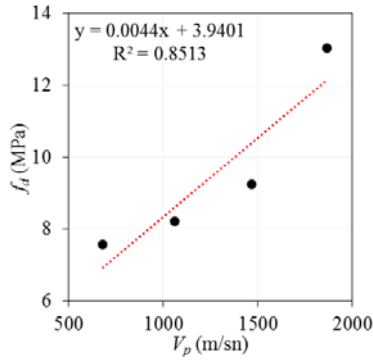
$f_c$  değerleri  $f_c-V_p$  ilişkisi yardımıyla belirlenmiştir.

|                  |                  |                  |                 |
|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| T1<br>15.6MPa    | T4<br>17.4MPa    | T7<br>15.7MPa    | T10<br>15.9MPa  |
| T2<br>16.8MPa    | T5<br>19.4MPa    | T8<br>15.2MPa    | T11<br>17.4MPa  |
| T3<br>13.7MPa    | T6<br>17.4MPa    | T9<br>18.3MPa    | T12<br>14.6MPa  |
| $f_d$ : 13.0MPa  | $f_d$ : 8.2MPa   | $f_d$ : 9.2MPa   | $f_d$ : 7.6MPa  |
| $V_p$ : 1865 m/s | $V_p$ : 1060 m/s | $V_p$ : 1466 m/s | $V_p$ : 681 m/s |

Tablo 5. Tercan taşı yığılma birimlerinin test sonuçları



Tabloda verilen basınç değerlerine bakıldığında tek taş numunelerinin basınç dayanımlarının oluşturdukları üçlü yığma biriminin basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Oluşturulan yığma birimlerinde basınç dayanımı-P dalgası hızı ilişkisi Şekil 7'de gösterildiği şekilde oldukça yüksek korelasyonla elde edilmiştir. Korelasyon bağıntıları incelendiğinde tekil taşlar ile yığma birimleri arasında farklılık olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında tek taşların  $f_c-V_p$  ilişkisi sistemlerin  $f_d-V_p$  ilişkisinden daha düşük korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Sistemlerde bu korelasyon değerlerinin yüksek çıkması, boşluk yapısının farklı sistemler arasında oldukça benzer olması olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple aynı süreksizlik alanına sahip benzer dayanımdaki sistemler birbirleri ile anlamlı korelasyon ilişkisi kurmaktadır.



Şekil 7. Sistemlerin basınç dayanımı-P dalgası hızı ilişkisi

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, tarihi yığma yapılarda gerçekleştirilen deneyler ışığında malzeme özelliklerinin hasarsız deneyler ile belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda farklı tarihi köprüler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak tarihi Kireçli ve Kız köprülerinde kullanılan veya restorasyon sonrasında değiştirilen taşların cinsleri belirlenmiştir. Bu taşlardan belirli numuneler elde edilmiştir. Taş numuneler üzerinde fiziksel, indeks ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda bu özellikler arasında ilişkiler kurulmuştur. Bu ilişkiler yardımıyla elde bulunan taşların mekanik özellikleri hasarsız

deney yöntemleri ile belirlenmiştir. Taş numunelerin özellikleri arasındaki bağıntılar elde edildikten sonra üçlü yığma birimleri ile taşlar arasındaki süreksizliğin sistem üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Her bir taşın mekanik özellikleri bir adım önceki bağıntılar yardımıyla belirlenmiş ve sistemin mekanik özelliğine etkisi irdelenmiştir. Her bir taş sisteminin basınç dayanımı ile P dalgası hızı arasında oldukça yüksek korelasyona sahip bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen bu bağıntılar ile üç taşlı yığma biriminde sadece ses hızı ölçülerek elde edilen duvar modelinin basınç dayanımına geçiş bağıntısı elde edilmiştir.

Bu çalışma, malzeme özelliklerinin belirlenmesi için önerilen yöntem/bağıntılara dair aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Tercan taşı için fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri arasındaki ilişki bağıntıları;

$$E = 219.72f_c - 102.84 \quad (3)$$

$$E = 1.5356V_p - 377.17 \quad (4)$$

$$E = 16480\rho - 28937 \quad (5)$$

$$V_p = 107.61f_c - 777.76 \quad (6)$$

$$\rho = 0.0121f_c + 1.7709 \quad (7)$$

$$V_p = 7046.4\rho - 11320 \quad (8)$$

Tercan taşı ile yapılan sistemlerde kullanılacak  $f_d-V_p$  ilişki bağıntısı;

$$f_d = 0.0044V_p + 3.9401 \quad (9)$$

şeklinde belirlenmiştir. Bu bağıntılar yardımıyla köprülerin kemer kısımlarındaki malzemelerin mekanik özellikleri direkt olarak belirlenebilir. Ayrıca bahsi geçen köprülerin tempan duvarı ve kemer üstü duvarlarında kullanılan kaplamanın özellikleri literatürde verilen farklı yaklaşımlarla belirlenebilmektedir. Bu yaklaşımda taş birimlerin basınç dayanımlarına ve elastisite modüllerine ihtiyaç duyulmaktadır. Önerilen bağıntılar, bu tip yöntemlerin başlangıç verilerini elde etmek için kullanılabilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında sonraki çalışmalar için başlıklar önerilmektedir;

- Ülkemiz envanterinde bulunan tarihi yapıların malzeme özellikleri belirlenerek bu tür hasarsız testler ile malzeme karakterizasyonu yapılmalıdır.
- Ses ölçümü, Schmidt indeks değeri vb. hasarsız deneylerin ülkemiz tarihi yapılarında

daha çok kullanılabilmesi için birçok farklı kayaç türünün geçiş bağıntı kütüphanesi oluşturulmalıdır.

- Testlerin sayısı artırılarak farklı fiziksel, indeks ve mekanik özelliklerde belirlenmeli bu özellikler arasındaki geçiş bağıntılarının sayısı daha fazla veri noktası ile artırılmalıdır.

- Yığma birimlerin sayısı, süreksiz alanları, şekilleri vb. geometrik özellikleri çoğaltarak taş numune dayanımından duvar dayanımına geçiş için daha yüksek korelasyona ve veri noktasına sahip bağıntılar önerilmelidir.

### Teşekkür

Bu çalışma ETÜ-BAP-2017-03 numaralı proje kapsamında Erzurum Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir. Yazarlar, katkılarından dolayı ETÜ-BAP'a teşekkürü borç bilirlir. Ayrıca deneysel ölçümlerde yardımlarından dolayı yüksek lisans öğrencisi Emre Alkazan'a teşekkür ederiz.

### Kaynakça

- [1] Ratzinger, Proske. 2010. Historical stone arch bridges under horizontal debris flow impact. 6th International Conference on arch Bridges, 11-13 October, Fuzhou, China.
- [2] UIC International Union of Railways, 2005. Improving Assessment, Optimization of Maintenance and Development of Database for Masonry Arch Bridges, <http://orisoft.pmmf.hu/masonry/>.
- [3] URL1: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Karayolları Genel Müdürlüğü, Köprü envanter Bilgileri, <http://www.kgm.gov.tr>
- [4] URL 2: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Karayolları Genel Müdürlüğü, Sanat Yapıları Dairesi, <http://www.kgm.gov.tr>
- [5] Kartz. O., Reches. Z., Roegiers. J.C. 2000. Evaluation of Mechanical Rock Properties Using a Schmidt Hammer. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 37, p. 723-728.
- [6] Kahraman. S., 2001. A Correlation Between P-Wave Velocity, Number of Joints and Schmidt Hammer Rebound Number. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 38, p. 729-733.
- [7] Yılmaz. I., Sendir. H. 2002. Correlation of Schmidt Hardness with Unconfined Compressive Strength and Young's Modulus in Gypsum from Sivas (Turkey). Engineering Geology, p. 2060.
- [8] Yaşar. E., Erdoğan. Y. 2002. Bazı Kayaçların Sertlik Değerleri ile Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İstatistiksel Analizi. KAYAMEK'2002-VI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, s. 197-204, Konya, Türkiye
- [9] Koca Zucchini A., Lourenço. P.B. 2002. A Micro-Mechanical Model for the Homogenisation of Masonry. International Journal of Solids and Structures, 39-12, 3233-3255.

- [10] Atamtürktür. S., Asce. M., Sevim. B. 2012. Seismic Performance Assessment of Masonry Tile Domes through Nonlinear Finite-Element Analysis. Journal of Performance of Constructed Facilities, 26-4, 410-423.
- [11] Lourenço. P.B. 1996. Computational strategies for masonry structures. PhD thesis, Delft University, Netherlands.
- [12] Kocaman. I., Okuyucu. D., Kazaz. İ. 2019. Tarihi Yapı Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesinde Yeni Bir Yöntem Önerisi: Lala Paşa Cami Örneği. Teknik Dergi, s. 9125-9146, yazı 537.
- [13] Teymen. A. 2005. Bazı Kayaçların Petrografik, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Türkiye.
- [14] Babacan. A.E., Erzoy. H., Gelişli. K. 2012. Kayaçların Fiziksel, Mekanik ve elastik Özelliklerinin Ultrasonik Hız Tekniği ve Zaman-Frekans Analiziyle Belirlenmesi: Bej Kireçtaşları (KD Türkiye) Üzerine Örnek Bir Çalışma, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, vol. 36(1), s. 63-73.
- [15] Moradian. Z.A., Behnia. M. 2009. Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Static Young's Modulus of Intact Sedimentary Rocks Using the Ultrasonic Test. Int. J. Geomech, vol. 9(1) 14-19.
- [16] Oliveira. D.V. 2003. Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading. PhD thesis, University of Minho, Portugal.