

Kayseri İlindeki Bazı Tarihi Eserlerde Bozunma Etkilerinin Tahribatsız Deney Yöntemleriyle Değerlendirilmesi

*Evaluation of Deterioration of on Some Historical Monuments in Kayseri Province
Using Non-Destructive Testing Methods*

Muhammed Kamil AKGÜL¹ , Mutluhan AKIN^{2*} , Müge K. AKIN³

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Nevşehir

³Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri

Geliş (Received): 09/11/2024 / Düzeltme (Revised): 13/02/2025 / Kabul (Accepted): 09/03/2025

ÖZ

İç Anadolu'da önemli bir yerleşim merkezi olan Kayseri, farklı dönemlerden günümüze kadar gelen birçok tarihi esere ev sahipliği yapmaktadır. İlin farklı bölgelerinde özellikle yoğun yerleşimin bulunduğu alanlarda, Selçuklu Dönemi'ne ait 12. ve 14. yüzyıllar arası yapılmış çok sayıda cami, kümbet ve medrese türü tarihi esere rastlamak mümkündür. Kültürel miras niteliğindeki bu eserler çoğunlukla yakın çevrede yoğun olarak bulunan farklı renk ve dokudaki ignimbirit türü kaya malzemesi kullanılarak inşa edilmişlerdir. Genel olarak düşük dayanıma sahip ve su etkilerine karşı hassas olan bu ignimbiritler zaman içerisinde atmosferik etkenler, hava kirliliği, vandalizm vb. gibi olaylar sonucunda bozunmakta ve ilksel özelliklerini kaybetmektedirler. Bu çalışmada Kayseri il merkezindeki Roma ve Selçuklu dönemlerine ait tarihi eserler ile bu eserlerde zaman içinde meydana gelen bozunma etkileri incelenmiştir. Bozunma etkilerinin gözlemsel olarak incelenmesinin yanı sıra, eserlere herhangi bir zararı bulunmayan tahribatsız deney yöntemlerinden İğne Penetrometresi, Schmidt Çekici ve P-dalga hızı deneylerinden faydalanılmıştır. Bunun yanı sıra, bozunmuş ignimbirit bloklarına ait yerinde deneylerle belirlenen değerler, aynı malzemeye ait taze örneklerin fiziko-mekanik özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda tarihi eserlerin taban bölümlerinde özellikle kılcallık sebebiyle pullanma ve kavlaklanma türü bozunmaların geliştiği ve ignimbiritlerin bu bölümlerde dayanımlarını önemli ölçüde kaybettiği tespit edilmiştir. İncelenen kümbetlerin bazılarında uygulanan iyileştirme çalışmalarında ise kümbetlerin çevresinde bulunan yüzey suyu drenajlarının yeterli ölçüde yapılamadığı ve yağmur ile biriken suların tarihi eserlerin daha fazla bozunmasına sebep olduğu saptanmıştır. Kültürel miras olarak değerlendirilen bu tarihi yapıların korunup gelecek nesillere aktarılması amacıyla, ignimbirit yapılarının yüzeysularına karşı duyarlılığı dikkate alınarak tarihi kümbetlerin çevresinde su drenajı iyileştirme çalışmaları yapılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bozunma, ignimbirit, tarihi eser, Kayseri, Schmidt çekici, iğne penetrometresi, P-dalga hızı

ABSTRACT

Kayseri, an important settlement in Central Anatolia, is notable for its historical monuments from different periods as well as natural beauty. In the densely populated areas of the city center, there are many historical

monuments such as mosques, tombs and madrasahs from the Seljuk Period built between the 12th and 14th centuries. These monuments, which are cultural heritage, were mostly constructed using ignimbrite rock materials with different colors and textures found in the close vicinity. These ignimbrites, which generally have low strength and are sensitive to water effects, deteriorate and lose their primary characteristics over time as a result of factors such as atmospheric effects, air pollution, vandalism, etc. Within the scope of this study, historical monuments from the Seljuk and Roman periods within the borders of the city center of Kayseri were investigated, and the deterioration that occurred in these monuments over time was examined. In addition to observational examination of the effects of deterioration, Needle Penetrometer, Schmidt Hammer and P-wave velocity tests, which are non-destructive test methods that do not damage monuments, were used. In addition, the values determined by in-situ tests on weathered ignimbrite blocks were compared with the physical-mechanical properties of fresh samples of the same material.

As a result of the evaluations, flaking and spalling type deterioration developed in the base sections of the historical monuments, especially due to capillarity, and the ignimbrites had significantly lost strength in these sections. In the improvement works carried out in some of the examined tombs, surface water drainage around the tombs was not sufficient and this caused the historical monuments to come into contact with more water. Therefore, in order to protect these historical monuments, which are considered cultural heritage, and to pass them on to future generations, it is recommended that improvement works be carried out for water drainage around historical tombs, considering that ignimbrites are quite sensitive to water.

Keywords: Deterioration, ignimbrite, historical monument, Kayseri, Schmidt hammer, needle penetrometer, P-wave velocity

GİRİŞ

Tarihi ve kültürel yapılar, dayanımları yüksek doğal taşlardan yapıldıkları için günümüze kadar yapı bütünlüklerini koruyarak varlıklarını sürdürmüşlerdir. Ancak, taşlar üzerinde etkili olan biyolojik, kimyasal ve fiziksel etkenler nedeniyle çeşitli bozunmalar meydana gelmiş; zamanla özelliklerini kaybetmiş, görünüşleri değişmiş ve dayanım kayıpları yaşanmıştır. İklimsel özellikler de bu bozunmalarda önemli bir rol oynamakta olup, taşların kimyasal ve fiziksel yapısı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Akin, 2008; Hasbay ve Hattap, 2017; Ertaş ve Topal, 2022).

İnsanlık tarihi boyunca insan eliyle yapılan, kullanılan ve günümüze kadar ayakta kalan bir kısım tarihi yapılar doğa faktörleri ve insan kaynaklı tahribatların etkileriyle bozunmaya uğramaktadırlar (Topal ve Sözmen, 2003). Bu nedenle kültürel miras özelliğindeki birçok yapı bozunma ile ilksel özelliklerini

ve yapısal bütünlüklerini kaybetmektedir. Bozunmaları engelleyebilmek ya da etkilerini en aza indirebilmek için bozunmaların hangi sebeple meydana geldiğini çok iyi tespit edilmesi gerekmektedir (Dal ve Öcal, 2017). Tarihi eserlerin bozunmasına neden olan dış etkenlerin erken ve doğru bir şekilde tespit edilmesi, eserin ömrünü uzatmak ve koruyucu önlemler almak açısından önemli bir adımdır.

Bugüne kadar tarihi eserlerde kullanılan doğal yapıtaşlarındaki bozunmanın araştırılmasına yönelik çok sayıda bilimsel araştırma yapılmıştır. İnce vd. (2018), Konya'daki Ferit Paşa Sarnıç'ında kullanılan doğal yapıtaşlarındaki bozunmayı tahribatsız deneyler ile değerlendirmiştir. Buna göre eserde kullanılan Gödene Taşı'nın bozunma davranışı Schmidt Çekici, P-dalga hızı, nemlilik ölçümü ve termal görüntüleme yöntemleri ile incelenmiş ve bozunan yüzeylerin haritalaması yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda incelenen tarihi

eserdeki en önemli bozunma türünün pullanma olduğu sonucuna varılmıştır. Öte yandan, Schmidt geri tepme sayılarının doğal yapıtaşlarındaki bozunma derecesinin artması ile düştüğü, sadece yüzeysel renk değişimi olan bloklarda ise yükseldiği vurgulanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, tarafımızca gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile de uyum göstermektedir. Korkanç (2018), tarihi Tyana Su Kemerleri'ndeki yapıtaşlarında bozunma süreçlerini incelemiştir. Bu kapsamda, mineralojik, petrografik ve petrofiziksel özelliklerin tespiti için tarihi eserde kullanılan Mio-Pliyosen yaşlı travertenlerde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, tarihi eser üzerinde farklı dokusal özellik gösteren seviyelerde Schmidt Çekici deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında travertenlerde bozunma etkilerinin düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, insan faktörü ile birlikte Tyana Su Kemerleri'nin bozunmasında küçük yapıtaşı boyutunun kullanılmasının ve çıkarıldıkları taş ocağından farklı ve düşük kalitedeki taşların tercih edilmesinin etkili olduğu da ifade edilmiştir. Tosunlar vd. (2018), Konya'daki tarihi Mısıroğlu Köprüsü'nde kullanılan Sille Taşı'nda tahribatsız deney yöntemleri ile bozunmaları değerlendirmişlerdir. Bunun için, bölgede bağıl nem (RH) ölçümleri ve Schmidt Çekici testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, köprü ayaklarında ve kemerlerinde kullanılan yapıtaşlarında önemli bozunmalar tespit edilmiştir. Ayrıca, taze numunelerin tek eksenli basınç dayanımı (UCS) değerinin ortalama 61 MPa seviyesinde olmasına rağmen, köprüde kullanılan yapıtaşlarının UCS değerlerinin ise atmosferik etkiler nedeniyle bir miktar azaldığı ve 8-51 MPa değer aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Elde edilen atmosferik etkenlere bağlı dayanım azalımı sonuçları tarafımızca gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar ile benzerlik

sunmaktadır. Erten ve Mısırlı (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Edirne'deki tarihi Harbiye Kışlası'ndaki bozunmalar gözlemsel olarak incelenmiş ve taşıyıcı duvarları oluşturan doğal yapıtaşlarında önemli ölçüde bozunma ve diğer yapısal elemanlarda hasarlara dayalı çatlaklar geliştiği saptanmıştır. Buna bağlı olarak, söz konusu doğal taş malzemelerde biyolojik ve kimyasal bozunma ile çatlak oluşumlarına bağlı fiziksel hasarlar meydana geldiği ortaya konmuştur.

Kayseri ili günümüze kadar birçok uygarlığa ev sahipliği yapmıştır. Kayseri, tabii güzelliklerinin yanı sıra, tarihi eserleri ile de bilinen Anadolu şehridir. İl merkezi içerisinde farklı lokasyonlarda, özellikle Selçuklu, Osmanlı ve Roma dönemine ait mezar, camii, medrese ve kümbet türünde çok sayıda tarihi eser bulunmaktadır. Bu eserler zamanla oluşan kentsel yapılaşma nedeni ile sokak aralarında ve yol kenarlarında kalmış olup, olumsuz koşullar altında birçok farklı bozunma türlerine maruz kalmaktadırlar.

Bu yayın, Akgül (2021) tarafından gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında elde edilen veriler doğrultusunda hazırlanmıştır. Bu doğrultuda, Kayseri il merkezinde bulunan Selçuklu Emir 1, Selçuklu Emir 2, Hacıp Çavlı, Alicafer, Emirhan, Döner Kümbet, Hasbek, Babükbey, Emir Şahap, Çifte Kümbet, Emir Ali Pişrev, Köşk Medresesi, Suya Kanmış Hatun kümbetleri olmak üzere Selçuklu dönemine ait toplam 13 adet tarihi kümbette ve 1 adet tarihi Roma Mezarı'nda meydana gelen bozunma etkileri incelenmiştir (Şekil 1). Bu Kümbet, medrese ve benzeri tarihi eserlerde zamanla meydana gelen bozunmanın gözlemsel olarak incelenmesinin yanı sıra, arazi çalışmaları esnasında eserlere herhangi bir zararı olmayan, tahribatsız deney yöntemlerinden; Schmidt

çekici, P-dalga hızı ve İğne Penetrometresi deneyleri kullanılmıştır. Diğer taraftan, bu eserlerin yapılmasında kullanılan ignimbirit türü kaya malzemesinin taze örneklerine ait fiziksel ve mekanik özellikleri daha önce yapılmış olan bilimsel çalışmalardan (Akın vd., 2020; Akın vd., 2023) yararlanılarak tespit edilmiştir. Çalışmadaki amaç, tarihi yapıların yapımında kullanılan kaya malzemesinin bozunmadan etkilenmemiş, taze örneklerine ait fiziko-mekanik özellikler ile incelenen tarihi eserlerin tahribatsız deneylerle dolaylı olarak yerinde belirlenmiş parametrelerinin karşılaştırılması ve ilksel özelliklerdeki değişimin ortaya çıkartılmasıdır.

MALZEME ve YÖNTEM

İncelenen Tarihi Eserlerin Tanıtımı

Kayseri, Anadolu'da, Erciyes Dağı eteklerinde yer alan ovaları ve bölgeden akan akarsuları ile geçmişten günümüze kültürel zenginliğini korumayı başarmış bir şehirdir. Ermeniler, Kapadokya Krallığı döneminde şehri ele geçirip yeni yerleşim alanları kurmuşlardır. Romalılar, şehri kontrol altına aldıktan sonra buraya büyük değer vermiş ve şehrin günümüzdeki adını oluşturan "Caesareia" ismini vermişlerdir. Araplar, bu bölgeyi ele geçirmek için Bizanslılarla savaşlar yapmışlardır. Selçuklular ise Anadolu'ya geldikten sonra Kayseri'yi ana yurtları haline getirmişlerdir. Osmanlı İmparatorluğu da burada ordularını dinlendirerek şehrin önemli bir gelişim göstermesine katkıda bulunmuştur (Köksal, 2019).

Bu çalışma kapsamında incelenen tarihi yapılar arasında Roma dönemine ait 1 adet Roma mezarı ve 13 adet Selçuklu dönemine ait kümbet bulunmaktadır.



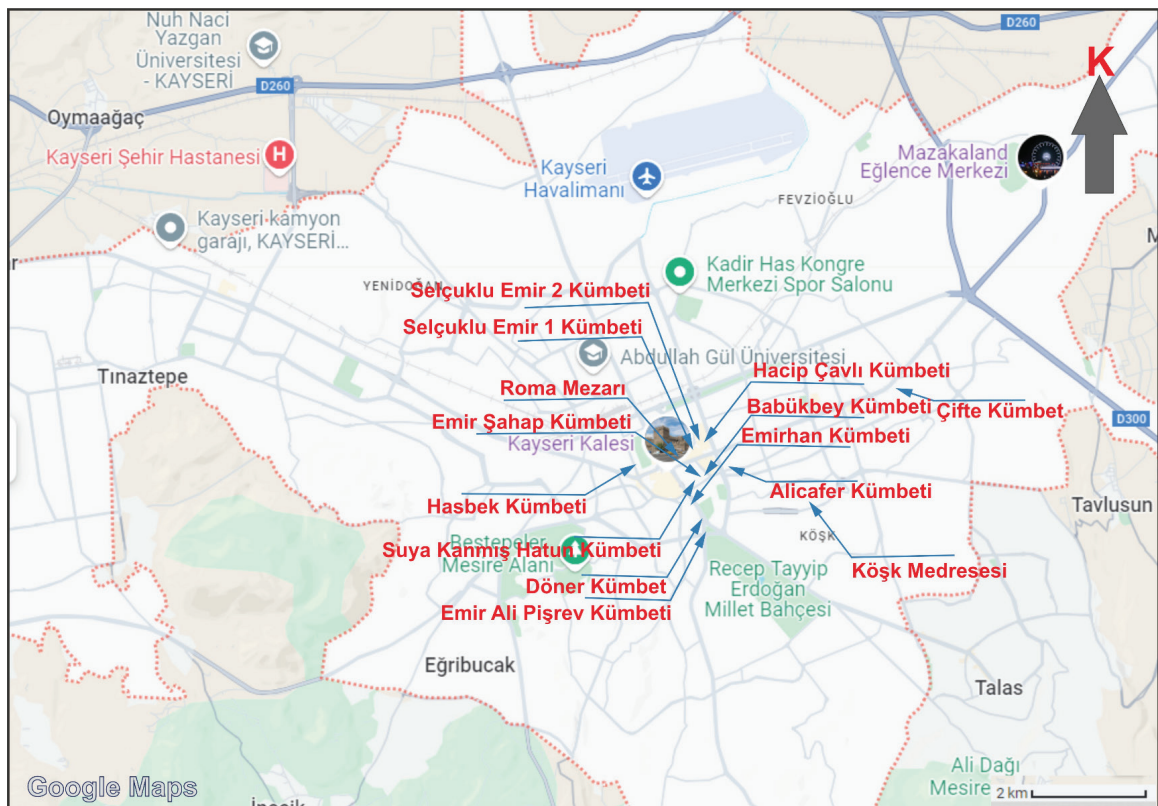
Şekil 1. Çalışma kapsamında incelenen tarihi eserlerin bazılarının genel görünüm, a) Roma Mezarı, b) Selçuklu Emir 2 Kümbeti, c) Hasbek Kümbeti, d) Çifte Kümbet, e) Döner Kümbet, f) Köşk Medrese.

Figure 1. General views of some of the historical monuments examined within the scope of the study, a) Roman Tomb, b) Seljuk Emir 2 Tomb, c) Hasbek Tomb, d) Çifte Tomb, e) Döner Tomb, f) Köşk Madrasa.

Bu kapsamda, Kayseri il merkezinde Melikgazi ve Kocasinan ilçelerinde bulunan Selçuklu Emir 1, Selçuklu Emir 2, Hacıp Çavlı, Emirhan, Alicaffer, Döner, Hasbek, Emir Şahap, Babükbey, Çifte Kümbet, Emir Suya Kanmış Hatun, Ali Pişrev kümbetleri ve Roma Mezarı olmak üzere toplam 14 tarihi yapıda inceleme ve yerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır (Şekil 2). İncelemeye konu olan Roma Mezarı'nın IV. yüzyılda, Selçuklu Dönemi'ne ait kümbetlerin ise XII ve XIV. yüzyıllar arasında yapıldığı tahmin edilmektedir (Çizelge 1).

İncelenen Tarihi Eserlerde Yerinde Gerçekleştirilen Tahribatsız Deneyler

Kayseri il merkezindeki farklı lokasyonlarda bulunan ve yerinde incelemeler yapılan bu tarihi eserlerin, kültürel değer taşıması sebebiyle örnekleme yapılamamıştır. Bu nedenle sahada yapılan gözlemsel çalışmaların yanı sıra, doğaltaş malzemesinin tek eksenli basınç dayanımını dolaylı olarak belirlemek ve taze örnek değerleriyle karşılaştırmak için Schmidt Çekici ve İğne Penetrometresi deneylerinden yararlanılmıştır. Bunların yanı sıra, ultrasonik P-dalga hızı test cihazı kullanılarak ignimbirit bloklarında P-dalga hızları belirlenmiştir.



Şekil 2. Çalışma kapsamında incelenen tarihi eserlerin konumları.

Figure 2. Locations of historical monuments examined within the scope of the study.

Çizelge 1. İncelenen tarihi yapılar hakkında genel bilgiler.

Table 1. General information about the historical monuments.

Eser adı	Yapım tarihi	Lokasyon	Yapımında Kullanılan Malzeme
Roma Mezarı	IV. yüzyıl	Kocasinan	Siyah-koyu gri bazalt
Selçuklu Emir 1 Kümbeti	XII. yüzyıl	Kocasinan	Gri ignimbirit
Selçuklu Emir 2 Kümbeti	XII. yüzyıl	Kocasinan	Kahverengi ignimbirit
Hasbek Kümbeti	XII. yüzyıl	Kocasinan	Kahverengi ignimbirit
Köşk Medresesi	XII. yüzyıl	Melikgazi	Kahverengi ignimbirit
Hacip Çavlı Kümbeti	XIII. yüzyıl	Kocasinan	Gri ignimbirit
Emirhan Kümbeti	XIII. yüzyıl	Melikgazi	Gri ignimbirit
Çifte Kümbet	XIII. yüzyıl	Melikgazi	Kahverengi ignimbirit
Alicafer Kümbeti	XIV. yüzyıl	Melikgazi	Kahverengi ignimbirit
Döner Kümbeti	XIV. yüzyıl	Melikgazi	Gri ignimbirit
Babükbey Kümbeti	XIV. yüzyıl	Melikgazi	Gri ignimbirit
Emir Şahap Kümbeti	XIV. yüzyıl	Melikgazi	Kahverengi ignimbirit
Suya Kanmış Hatun Kümbeti	XIV. yüzyıl	Melikgazi	Kahverengi ve gri ignimbirit
Emir Ali Pişrev Kümbeti	XIV. yüzyıl	Melikgazi	Kahverengi ignimbirit

Çizelge 2. Schmidt çekici geri tepme sayısı ile kaya sertliğinin sınıflandırılması (ISRM, 1981; 2007).

Table 2. Classification of rock hardness based on Schmidt hammer rebound value (ISRM, 1981; 2007).

Schmidt çekici geri tepme sayısı	Blok/Kaya malzemesi sertliği
0 - 10	Yumuşak
10 - 20	Az Yumuşak
20 - 40	Az Sert
40 - 50	Sert
50 - 60	Çok Sert
>60	Oldukça Fazla Sert

Schmidt Çekici Deneyleri

Schmidt Çekici uzun yıllardır kullanılan tahribatsız deney metotlarından birtanesidir. Bir dönem sadece beton sertliği, dayanımının tahmininde kullanılırken, zamanla kaya malzemesi veya süreksizlik yüzey dayanımının belirlenmesinde de kullanılmıştır. Dayanımı tespit edilecek kaya yüzeyine farklı açılarla yerleştirilen Schmidt Çekici, yüzeye bastırılarak, içerideki yayın gerilerek geri sıçraması sağlanmaktadır. Yayın atması ve aletin içerisindeki bilyanın geri

tepmesi sonucu göstergedeki geri sıçrama değeri okunmaktadır (Ulusay vd., 2001). Sağlam ve dayanımı yüksek yüzeylerde geri tepme sayısı artarken, zayıf veya bozunmuş yüzeylerde geri sıçrama değerleri düşmektedir. Schmidt çekici geri tepme sayısı ile kaya sertliği sınıflandırılması Çizelge 2’de sunulmaktadır.

Tarihi eserler üzerinde yapılan Schmidt Çekici ölçümlerinde Proceq marka L-tipi alet kullanılmıştır (Şekil 3). Schmidt Çekici deneyleriyle elde edilen “Schmidt Geri Tepme

Sayı (N)” yardımıyla tek eksenli basınç dayanımının belirlenmesinde zayıf kayalar için önerilen aşağıdaki eşitlik 1 ve 2’den yararlanılmıştır.



Şekil 3. Tarihi eserler üzerinde kullanılan L-tipi Schmidt Çekici’nden bir görünüm.

Figure 3. A view of the L-type Schmidt Hammer used on the historical monuments.

$$\sigma_c = 0.0001N^{3.2658} \quad (\text{Gökçeoğlu, 1996}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = \exp(0.818 + 0.059N) \quad (\text{Yılmaz ve Sendir, 2002}) \quad (2)$$

σ_c = Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

N = Schmidt geri tepme sayısı

İğne Penetrometresi Deneyleri

Kayseri il merkezindeki Selçuklu Dönemi’ne ait tarihi kümbetler üzerinde yapılan bozunmaya yönelik değerlendirmelerde özellikle bozunma derecesinin arttığı ignimbirit blokları üzerinde SH-70 kodlu İğne Penetrasyon aleti kullanılmıştır. Söz konusu alet Maruto Testing Machine Co. (Maruto, 2006) tarafından üretilmiş ve yaklaşık olarak 700 g ağırlığındadır (Şekil 4). İğne Penetrometresi deneyinde, alet üzerine el ile uygulanan yavaş baskı penetrometrenin ucundaki iğnenin kayacın içine batmasını sağlamaktadır (Ergüler, 2007). Bu batmanın gerçekleşmesi için uygulanan yük (N) ile batma değeri (mm) oranlanmakta ve bir iğne batma oranı değeri (NPR, N/mm) bulunmaktadır.

İğne penetrometresi yardımıyla inceleme yapılan kümbetlerde bozunma derecesi yüksek olan ignimbiritlerin tek eksenli basınç dayanımı belirlenmiştir (Şekil 5). Elde edilen NPR değerleriyle ignimbiritlerin dayanımlarının (UCS) tahmininde Ergüler ve Ulusay (2007) ve Aydan (2012) tarafından önerilen eşitlik 3 ve 4 kullanılmıştır.



Şekil 4. İğne Penetrometresi deney aleti.

Figure 4. Needle Penetrometer test equipment.

$$\sigma_c = 0.51 * NPR^{0.8575} \text{ Ergüler ve Ulusay (2007) (3)}$$

$$\sigma_c = 0.2 * NPR \text{ Aydan (2012) (4)}$$

σ_c = Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

NPR= İğne Batma Oranı (N/mm)

P-Dalga Hızı Deneyleri

Araştırmaya konu olan eserlerde P-dalga hızı ölçüm cihazı ile ultrasonik dalgaların kaya malzemesinin içerisindeki yayılma hızı ölçülmüştür. Tarihi yapılardaki blok yüzeylerinin zaman zaman aşırı derecede bozunmuş, gözenekli ve pürüzlü bir yapıya sahip olması nedeniyle bazı bloklarda ölçüm yapılamamıştır. Ölçümün esası eksenel atımlardan oluşan bir dalganın, incelenen blok malzemesinin yüzeyi ile temas eden bir elektro-akustik transdüser ile

üretilmesi ve uzunluğu belirlenen bir mesafeyi geçen titreşim dalgalarının ikinci bir transdüser tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülerek elektronik zamanlama devresi tarafından dalganın geçiş hızının ölçülmesi esasına dayanır.

Bu çalışma kapsamında incelenen tarihi yapılar üzerinden alınan P- dalgası hızı ölçümleri genellikle dolaylı yöntem ile yapılmıştır (Şekil 6). Doğrudan P-dalga hızı ölçümlerinde alıcı ve verici karşılıklı yerleştirilir. Öte yandan, dolaylı ölçümde alıcı ve verici belirli bir aralıkla yan yana konumlandırılır. Ölçüm yapılan tarihi yapılarda genellikle alıcı-verici transdüserlerin karşılıklı yerleştirilebileceği yüzeyler bulunmadığı için dolaylı ölçüm yöntemine başvurulmuştur. Alıcı ve verici arasındaki iletim hassasiyeti ve miktarı transdüserlere sürülen jel ile artırılmıştır.



Şekil 5. İğne Penetrometresi'nin bozunmuş ignimbirit blokları üzerinde uygulanması.

Figure 5. Application of Needle Penetrometer to deteriorated ignimbrite blocks.



Şekil 6. Tarihi eserlerde gerçekleştirilen P-dalga hızı ölçümlerinden bir görünüm

Figure 6. P-wave velocity measurements performed on historical monuments

Çizelge 3. Kaya malzemesinin P-dalga hızına göre sınıflandırılması (ANON, 1979).

Table 3. Classification of rock material according to P-wave velocity (ANON, 1979).

Sınıfı	P-Dalga hızı (m.s. ⁻¹)	Dayanımı
1	<2500	Çok Zayıf
2	2500 - 3500	Zayıf
3	3500 - 4000	Orta
4	4000 - 5000	Yüksek
5	>5000	Çok Yüksek

Kullanılan ultrasonik dalga hızı cihazı 1 ile 10 Hz arasında dalga üretmektedir ve ölçümler 1 ve 5 Hz ile yapılmıştır. Alıcı-verici arasındaki uzaklık “L” ve cihazdan elde edilen dalga iletim zamanı “T_p” ile ifade edilmek üzere, P-dalga iletim hızı (V_p) eşitlik 5 ile bulunmuştur. Öte yandan, ANON (1979) tarafından P-dalga hızlarına göre kayalar Çizelge 3’te sunulduğu şekilde dayanımlarına göre sınıflandırılmıştır.

$$V_p = \frac{L}{T_p} \quad (5)$$

Bu araştırma kapsamında tarihi yapılarda kullanılan ignimbirit bloklarda ölçülen P-dalga hızı ile bozunmamış taze ignimbiritlerin değerleri

karşılaştırılarak P-dalga hızlarının bozunmaya bağlı olarak değişimi hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

İNCELENEN TARİHİ ESERLERDE GÖZLENEN BOZUNMALAR

Bu çalışma kapsamında incelenen tarihi eserlerde yapıtaşı olarak kullanılan ve suya karşı oldukça hassas olan ignimbirit malzemesinde (Topal ve Doyuran, 1998) zaman içerisinde oluşan bozunma genellikle fiziksel ve kimyasal etkenlerden kaynaklanmakta olup, bozunma oranları tarihi eserin konumuna göre değişiklikler gösterebilmektedir. Atmosferik etkiler ve hava

kirliliği, zamana bağlı eserlerin renklerinde değişime, taşlar üzerindeki bazı motiflerin belirginliğinin azalmasına ve motiflerde aşınmalara neden olmuştur. İldeki hızlı nüfus artışı ve aşırı kentleşme, kalitesiz yakıt kullanımı ve araçların egzozundan çıkan dumanlar hava kirliliğine yol açmaktadır. Atmosferik etkiler, hava kirliliği, insan etkileri vb. çeşitli etkiler neticesinde tarihi eserlerde görünüm, yapısal durumları ve dayanımlarında kayıpların olduğu gözlenmiştir.

Kayseri il merkezinde incelenen tarihi eserlerde genel olarak fiziksel bozunma izlerine rastlanılmıştır (Şekil 7). Söz konusu tarihi eserlerde kullanılan kaya malzemelerinde yer yer çatlak oluşumları mevcuttur (Şekil 7-a). Bu çatlaklar bazen kayacı bütün olarak da kesebilmekte ve eserlerde kırılmaya sebep olmaktadır. Tarihi eserlerde çatlakların oluşumunu tetikleyen en önemli unsurlardan bir tanesi gözenekli yapıya sahip yapıtaşlarının, gözenekleri içerisinde biriken suyun donarak hacminin artmasıdır. Benzer olarak gözeneklerde, hava kirliliği sonucu olarak biriken tuzlar su içeriklerini kaybederek kururken, gözenek çeperlerine basınç uygulayarak, kayalar içerisinde çatlak oluşturabilmektedir.

İncelenen eserlerde gözlenen diğer bir fiziksel bozunma türü petegözlülüktür (Şekil 7-b). Petegözlülük, yapı taşları yüzeylerinde birbirinden bağımsız oyukların meydana gelmesi şeklinde tanımlanır. Petegözlülük oluşumundaki en önemli etkenler arasında nem, tuz oranının fazlalığı ve atmosferden gelen asidik yağmurlar yer almaktadır (Dal vd., 2016; Hasbay ve Hattap, 2017). Özellikle Ali Pişrev Kümbeti'nde kullanılan ignimbirit bloklarında oyuklanmalar görülmektedir.

Eserlerde kullanılan kaya malzemelerindeki fiziksel bozunmalar sonucunda yüzey (malzeme)

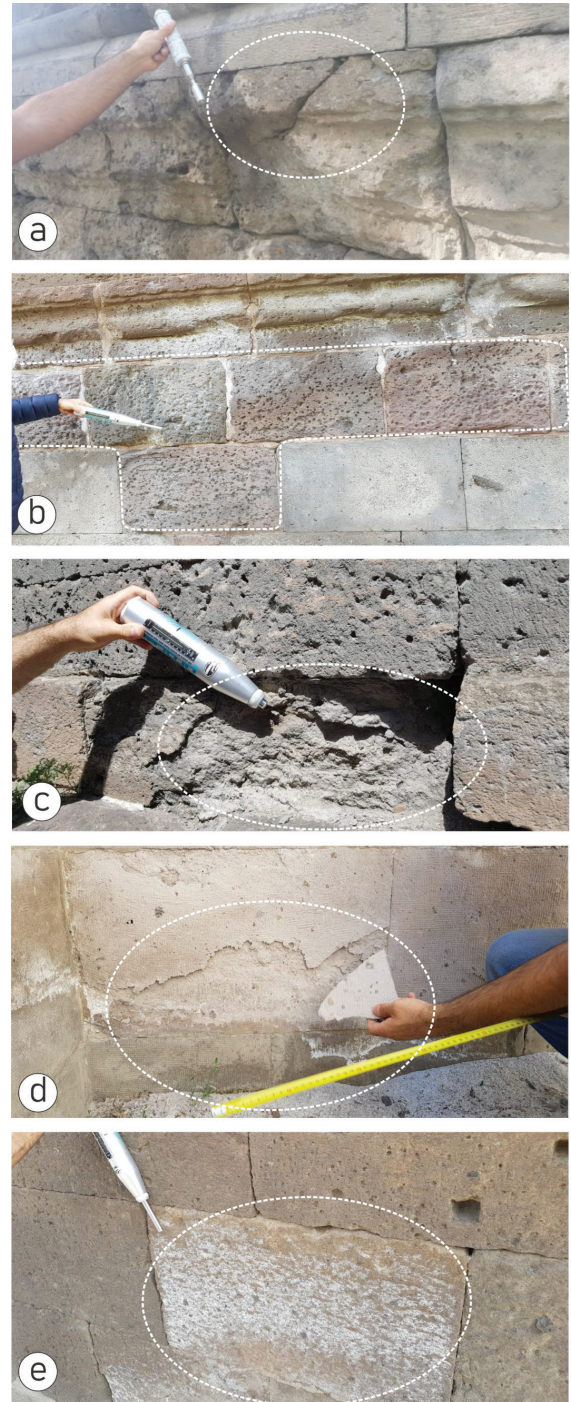
kayıpları yoğun şekilde gözlenmektedir (Şekil 7-c). Fiziksel bozunma sürecinde taşın yüzeyi ıslanma-kuruma, ısınma-soğuma, donma-çözülme vb. gibi bir dizi etkinin sonucunda önce yüzey bozunarak pürüzlü hale gelmekte, artan bozunmaya bağlı olarak kaya malzemesi dayanımı azalmaktadır. Bu bozunma süreci taşın bir bölümünün ana kütleden ayrılmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte gözeneklerdeki ve çatlaklardaki suyun donması, basınç oluşturarak zayıflayan bölümleri iterek ana kütlein yüzeyinden bazı parçaların ayrılmasına sebep olmaktadır (Dal ve Öcal, 2017).

Kayseri il merkezindeki Selçuklu Dönemi'ne ait tarihi eserlerde en çok gözlenen fiziksel bozunma türlerinden bir diğeri de pullanma ve bunun ileri safhalarında gelişen kavlaklanmadır (Şekil 7-d). Pullanma yapıtaşının yüzeyine paralel olarak genellikle ince ve küçük yapıya sahip plakalar halinde kaya malzemesinden ayrılmalar şeklinde gerçekleşir. Pullanma ve kavlaklanmada en önemli etken kaya malzemesi içine nüfuz eden sudur. İgnimbiritlerin ince boşluklu yapısı ve buna bağlı olarak gelişen kılcalılık sebebiyle özellikle tarihi eserlerin taban kesimlerine yakın kesimlerde kullanılan kaya malzemelerinde pullanma daha belirgindir. İgnimbiritlerdeki kılcalılık ve su emme potansiyeli üzerine yapılan bilimsel çalışmalarda Kapadokya ve yakın çevresindeki ignimbiritlerde yüksek kılcal su emme potansiyelinin, Kapadokya'daki birçok tarihi ve doğal miras yapısının bozulmasına ve ayrışmasına neden olduğu ifade edilmektedir (Kaşmer ve Ulusay, 2013). Benzer şekilde Dinçer ve Bostancı (2019) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalara dayalı araştırmada özellikle 5-10 µm civarında homojen bir gözenek dağılımına sahip olan ignimbiritlerin daha yüksek kılcal su emme potansiyeli gösterdiği ve Kapadokya bölgesindeki birçok tarihi ve doğal miras yapısının bozunması ve ayrışmasında

önemli rol oynadığı ifade edilmiştir. Varol (2024) ise Nevşehir ve yakın çevresinde yoğun olarak bulunan üç farklı tip ignimbirit üzerinde kılcal su emme özelliğini incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda sarı, gülkurusu ve bej renkli ignimbiritlerin kılcal su emme potansiyelinin sırasıyla $114.03 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$, $87.39 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ ve $115.71 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ olduğu belirlenmiştir. Kılcal su emme değerinin en düşük olduğu gülkurusu renkli ignimbiritin en yüksek tek eksenli basınç dayanımı değerine sahip olmasının kılcal su emme özellikleri ile dayanım ve dolayısıyla bozunmaya karşı duyarlılık arasında anlamlı ilişkilerin olduğu vurgulanmıştır.

İncelenen tarihi eserlerde tespit edilen diğer bir bozunma türü de tuzlanmadır. İgnimbirit mazlemenin gözenekli bölümlerindeki tuzlar, yağış suları ile birlikte yüzeye taşınmakta ve ısınarak suyun buharlaşması ile kaya malzemesi yüzeyinde tuz kristalleşmeleri meydana gelmektedir (Şekil 7-e). Gözeneklerde biriken tuz kristallerinin oluşturduğu basınç, kaya bloklarının zaman içerisinde parçalanmasına neden olmaktadır (Akın, 2008; Akın ve Özsan, 2011). Özellikle ignimbiritlerde yüksek gözeneklilik ve kılcallık etkisi ile tuzlanmaya bağlı bozunmalar, yoğun olarak gözlenmektedir (Özvan vd., 2015).

Çalışma kapsamında incelenen Roma ve Selçuklu dönemine ait tarihi eserlerde fiziksel bozunma izlerinin yanı sıra daha az oranda kimyasal ve biyolojik bozunmaya neden olabilecek etkenlere de rastlanmıştır (Şekil 8). Buna göre, bazı tarihi eserlerde kararma (Şekil 8-a) ve tozlaşma (Şekil 8-b) gibi kimyasal bozunma türleri gözlenirken, biyolojik bozunmaya neden olabilecek etkenlerden ise derz aralarında bitki oluşumları (Şekil 8-c ve d) ve kuşların neden olduğu biyolojik birikimler (Şekil 8-e) tespit edilmiştir.



Şekil 7. Kayseri il merkezindeki tarihi eserlerde gözlenen bazı fiziksel bozunma izleri, a) kırık-çatlak oluşumu, b) Petekgözlülük, c) Malzeme kayıpları, d) Pullanma-kavlaklanma, e) Tuzlanma.

Figure 7. Some traces of physical deterioration traces observed in historical monuments in Kayseri city center, a) fracture-crack formation, b) honeycombing, c) material loss, d) flaking-scaling, e) salinization.

Birçoğu mahalle aralarında ve yol kenarlarında kalmış olan Selçuklu dönemine ait tarihi eserlerde özellikle kış aylarında yoğun olan atmosferik kirleticilere bağlı olarak eserlerdeki ignimbirit yapıtaşlarında kararmalar yaygın olarak görülmektedir. Öte yandan, gerek fiziksel ve gerekse kimyasal bozunmanın bir sonucu olarak bazı ignimbirit bloklarının yüzeyine elle veya bir cisimle dokunulduğunda tozlaşarak ufalanmaktadır. Bitki tohumları rüzgârla taşınarak eserlerdeki derz aralarında veya gözeneklerde/çatlaklarda zamanla büyüyerek bitki halini

almaktadır. Zamanla büyüyen bitkilerin kökleri yeni çatlak ve kırık oluşumuna sebep olurlar. Kümbetlerin çatı kısımlarında tüneyen kuşların bıraktığı dışkılarının biyolojik bozunmaya yol açtığı da gözlenmektedir. Güvercin gibi kuşların dışkıları asidiktir ve doğal yapıtaşlarının bozunmasını hızlandırırlar. Kuş dışkıları tarihi eserlerin çatısına tüneyen kuşlar tarafından bırakıldıktan kısa bir süre sonra kayaç yüzeyini asidik yapılarından dolayı yıpratmaya başlarlar. Dışkının küf tarafından kolonize edilmesi veya dışkıdan tuzların kayaç içine sızması gibi diğer faktörler de devreye girerek doğal yapıtaşının ilerleyen süreçte içsel olarak da zayıflamasına sebep olur (Spennemann vd., 2017).

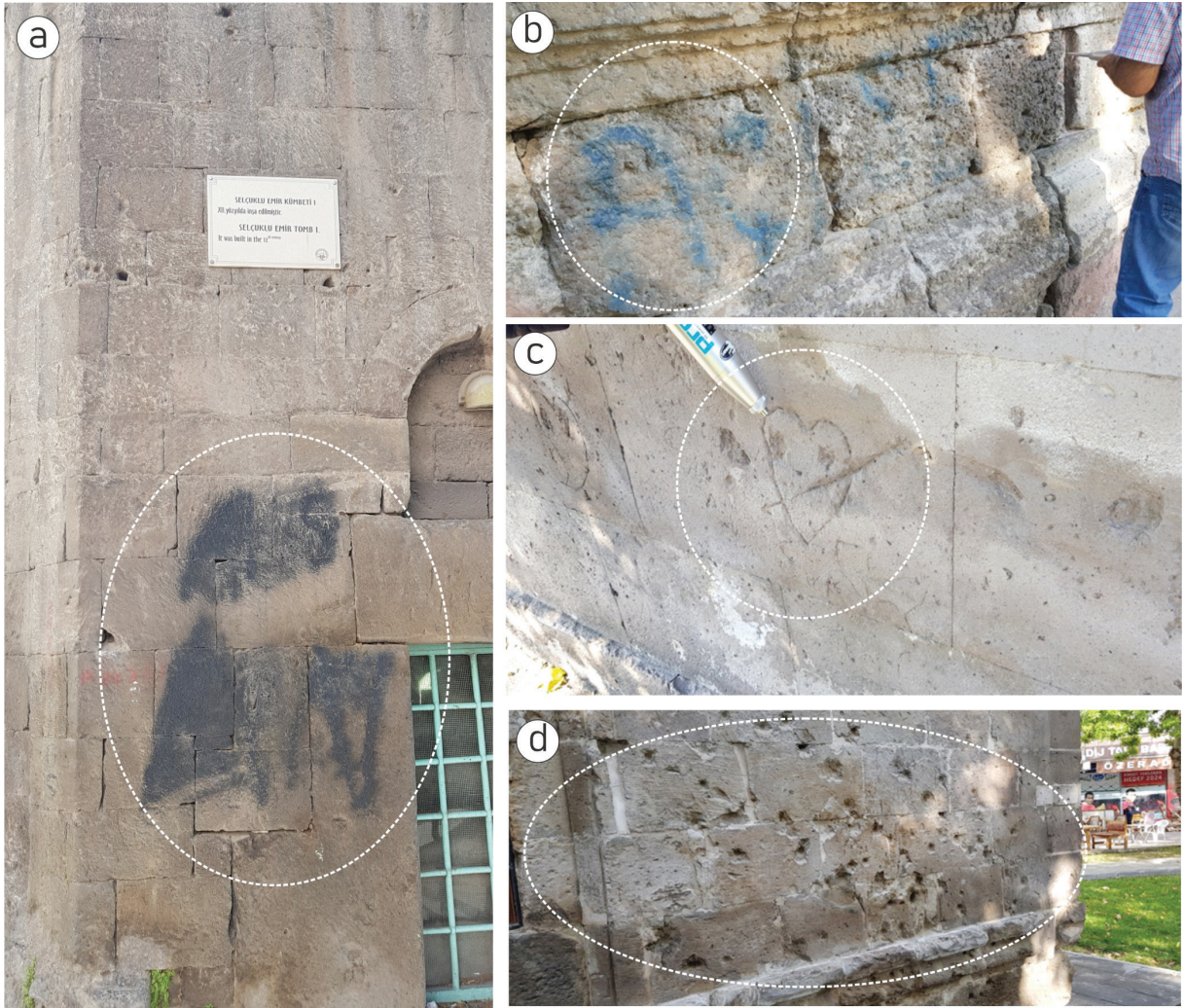


Şekil 8. İncelenen tarihi eserlerde gözlenen bazı kimyasal ve biyolojik bozunma izleri, a) kararma, b) tozlaşma, c-d) derz aralarında bitki büyümeleri, e) biyolojik birikimler.

Figure 8. Some traces of chemical and biological weathering observed in the examined historical monuments, a) darkening, b) dusting, c-d) plant growth between joints, e) biological accumulations.

Kayseri il merkezindeki tarihi eserler üzerinde doğanın etkisi sonucu gözlenen bozunmanın yanı sıra insan etkileri de (vandalizm) büyük ölçüde eserlerin tahrip olmasına sebep olmuştur (Şekil 9). Buna bağlı olarak, yerinde yapılan saha gözlemlerinde tarihi eserlerin üzerine çeşitli boya maddeleri ile yazı yazıldığı (Şekil 9-a ve b), kesici malzemelerle ignimbirit

blokları üzerine farklı şekiller kazındığı ve oyulduğu (Şekil 9-c) gözlenmiştir. Öte yandan, yapılan araştırmalar sonucunda edinilen bilgiler neticesinde Emir Ali Şahap Türbesi'ne insanlarca kurşun atıldığı tespit edilmiştir (Şekil 9-d). Yoğun şekilde tahrip olan bu eserlerde, bozunma oluşumu da hızlanmaktadır.



Şekil 9. Kayseri il merkezindeki tarihi eserlerde gözlenen insan kaynaklı tahribatlar, a-b) eserler üzerine yazı yazma, c) kazıma, d) kurşunlama.

Figure 9. Anthropogenic destruction observed in historical monuments in Kayseri city center, a-b) graffiti on monuments, c) engraving, d) shooting.

YERİNDE TAHRİBATSIZ DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kayseri il merkezindeki Selçuklu Dönemi'ne ait tarihi eserler üzerinde tahribatsız deney yöntemleri ile farklı bloklarda inceleme yapılmıştır. İncelenen tarihi eserlerde üç deney yöntemi her zaman birlikte uygulanamamıştır. Schmidt Çekici deneyi ileri derece bozunmuş bloklarda uygulanamadığından, bozunmanın fazla olduğu daha yumuşak bloklarda İğne Penetrometresi yönteminden faydalanılmıştır. Diğer taraftan, İğne Penetrometresi deneyi dayanımı görece yüksek olan sert bloklarda deney sırasında iğne hassasiyeti ve iğnenin bloğa batmaması nedeniyle kullanılamamıştır. Bazı P-dalga hızı ölçümleri de ignimbiritlerin blok yüzeylerinin yer yer çok pürüzlü olması ve yeterli temas sağlanamaması nedeniyle gerçekleştirilememiştir.

Bu çalışmada kullanılan tahribatsız tespit yöntemleri tarihi eserlerdeki kaya bloklarının, bozunmaya neden olan çevresel etkilere maruz kalan dış yüzeylerinde yapılmıştır. Buna bağlı olarak elde edilen deneysel değerler kaya malzemesine ait en düşük değerleri yansıtmakta olup, bozunma etkilerinin bloğun yüzeyinden itibaren içeri doğru azalması göz önüne alınmalıdır. İncelenen blokların yapı üzerindeki konumlarına göre farklı derecede bozunmaların gözlenmesi de bunu kanıtlamaktadır.

Suya doygunluk, nem içeriği gibi faktörler yapılan ölçümleri ve deney sonuçlarını etkilemektedir. Bu sebeple, tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilen tahribatsız yerinde deneyler, yağışsız mevsimde yapılmıştır. Tarihi yapılardan elde edilen deneysel veriler, kümbetlerin yapımında kullanılmış olan ignimbiritlerin alındığı taş ocaklarından elde edilen bozunmamış (taze) örneklerle karşılaştırılmıştır. Bozunmamış ignimbirit örneklerine ait fiziksel ve mekanik

özelliklere ait veriler Akın vd. (2020) ve Akın vd. (2023) tarafından yapılan bilimsel çalışmalardan alınmıştır. Kayseri yöresinden çıkarılan bazı taze ignimbirit örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4'te özet olarak sunulmuştur.

Araştırma kapsamında yapılan incelemelerde, Kayseri il merkezindeki 12. ve 14. yüzyıllar arasında inşaa edilmiş Selçuklu Dönemi'ne ait kümbetlerin çoğunlukla Kayseri yakın çevresine ait kahverengi ve gri ignimbiritler ile yapıldığı görülmüştür. Değerlendirmeler kapsamında Çizelge 4'te gri ve kahverengi ignimbiritlere ait değerler, taze örnekler için referans değer olarak alınmıştır. Roma Dönemi'nde yapılan ve şehrin merkezindeki Roma Mezarı ise bazalt malzemesi kullanılarak inşaa edilmiştir. Kullanılan bazaltlara ilişkin taze örnek verisi bulunmadığından, bu konuda herhangi bir değerlendirme yapılamamıştır.

Yerinde yapılan deneysel çalışmalar tarihi eserlerin farklı yönleri bakan cephelerinde birbirinden farklı bloklar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız deneylerin gerçekleştirildiği ignimbirit malzemeleri birbirinden farklı bozunma derecelerine sahiptir. Schmidt Çekici'nin görece daha yüksek dayanıma sahip kaya blokları üzerinde uygulanabildiği düşünüldüğünde, Selçuklu Dönemi'ne ait tarihi eserlerde gerçekleştirilen Schmidt Çekici deneylerinin ileri derecede bozunmuş yüzeyler üzerinde gerçekleştirilemediği dikkate alınmalıdır. Öte yandan, incelenen tarihi eserler daha önceki dönemlerde kısmi yenileme çalışmalarına maruz kalmışlar ve daha taze kaya blokları ile bazı bölümleri yenilenmiştir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen yerinde tahribatsız deneyler yenilenen bloklar üzerinde değil, tarihi eserin ilksel blokları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5'te Selçuklu Dönemi'nde inşaa edilmiş 13 farklı tarihi eser üzerinde gerçekleştirilen Schmidt Çekici

deneylerinden dolayı yöntemle elde edilmiş ignimbiritlere ait tek eksenli basınç dayanımları en düşük, en yüksek ve ortalama olarak iki farklı yöntemle (Gökçeoğlu, 1996; Yılmaz ve Sendir, 2002) göre sunulmuştur. Deneysel çalışmalar eserlerin farklı yönlerine bakan cephelerinde yapılmış olup, Çizelge 5'te en düşük değerlerin elde edildiği cepheye ait değerler sunulmuştur.

Çizelge 5 incelendiğinde, Gökçeoğlu (1996) tarafından sunulan ve zayıf kayalar için önerilmiş olan eşitlik ile Schmidt geri tepme değerleri ile belirlenen dolaylı tek eksenli basınç dayanımlarının, Yılmaz ve Sendir (2002) tarafından önerilen yöntemlere göre çok daha düşük olduğu dikkati çekmektedir. Buna göre, ortalama değerler dikkate alındığında, Selçuklu Emir 1, Hacı Çavlı ve Alicafer kümbetlerindeki ignimbirit bloklarında dayanım değerlerinin diğer eserlere oranla çok daha düşük olduğu görülmektedir. Öte yandan, Selçuklu Emir 2, Emirhan, Emir Ali Pişrev ve Çifte Kümbetleri ile Köşk Medrese'de ignimbirit bloklarının dayanım değerleri daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Bunun yanı sıra, yerinde yapılan deneysel çalışmalarda tarihi eserlerde kullanılan yapı malzemelerinin bakı yönünün bozunma üzerinde önemli bir etken olmadığı belirlenmiştir. Çizelge 5 incelendiğinde tarihi eserlerde en düşük dayanım değerlerinin farklı bakı yönlerinde olabildiği görülmektedir.

Çizelge 6'da ise 9 farklı tarihi eser üzerinde gerçekleştirilen İğne Penetrometresi deneylerinden ulaşılan ignimbiritlerin dolaylı tek eksenli basınç dayanımları en düşük, en yüksek ve ortalama olarak iki farklı yöntemle (Ergüler ve Ulusay, 2007; Aydan, 2012) göre sunulmuştur. Schmidt Çekici deneylerinde olduğu gibi İğne Penetrometresi deneyleri de eserlerin farklı yönlerine bakan cephelerinde yapılmıştır ve Çizelge 6'da en düşük değerlerin elde edildiği cepheye ait değerler sunulmuştur. İğne Penetrometresi Deneyi'nin hassasiyetinden dolayı bu deney yöntemi tüm eserlerde uygulanamamıştır.

Çizelge 4. Kayseri bölgesine ait ignimbiritlerin ortalama mekanik ve fiziksel özellikleri (Akın vd., 2020; Akın vd., 2023).

Table 4. Average physical and mechanical properties of ignimbrites from the Kayseri region (Akın et al., 2020; Akın et al., 2023).

İgnimbirit Rengi	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Doygun Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Görünür Gözeneklilik (%)	Ağırlıkça Su Emme (%)	P-dalga Hızı-Kuru (m/s)	P-dalga Hızı-Doygun (m/s)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı-Kuru (MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı-Doygun (MPa)
Siyah	15.71	16.73	26.32	18.29	2785	2487	21.05	14.01
Kahverengi	14.64	16.73	26.94	18.76	2710	2694	22.52	16.8
Kırmızı	17.42	19.24	22.18	12.75	2090	1897	20.65	18.86
Sarı	15.37	18.3	28.72	18.19	2045	1896	20.92	16.18
Gri	17.84	19.73	15.99	8.63	1965	1695	36.84	32.8
Beyaz	15.78	18.53	27.96	17.37	1936	1748	17.26	15.65

Akgül, Akın, K. Akın

Çizelge 5. Tarihi eserlerdeki ignimbirit blokları üzerinde gerçekleştirilen Schmidt Çekici deneylerinden elde edilen dolaylı tek eksenli basınç dayanımları.

Table 5. Indirect uniaxial compressive strengths obtained by Schmidt Hammer tests performed on ignimbrite blocks in historical monuments.

Eser adı	Malzeme türü	Deneyin yapıldığı cephe	Gökçeoğlu (1996)			Yılmaz ve Sendir (2002)		
			Min. (MPa)	Maks. (MPa)	Ort. (MPa)	Min. (MPa)	Maks. (MPa)	Ort. (MPa)
Selçuklu Emir 1 Kümbeti	Gri İgnimbirit	Doğu	1.3	8.2	4.7	6.6	15.0	10.8
Selçuklu Emir 2 Kümbeti	Kahve İgnimbirit	Batı	1.3	28.9	15.0	6.6	36.3	21.4
Hasbek Kümbeti	Kahve İgnimbirit	Kuzey	0.9	15.7	8.3	5.8	22.6	14.2
Köşk Medresesi	Kahve İgnimbirit	Batı	1.3	27.0	14.1	6.6	43.3	24.9
Hacip Çavlı Kümbeti	Gri İgnimbirit	Kuzey	2.8	8.2	5.52	8.8	15.0	11.9
Emirhan Kümbeti	Gri İgnimbirit	G.Batı	1.8	26.9	14.4	7.4	34.2	20.8
Çifte Kümbet	Kahve İgnimbirit	Doğu	0.9	26.9	13.9	5.8	34.2	20.0
Alicafer Kümbeti	Kahve İgnimbirit	Kuzey	3.7	5.97	4.8	9.9	12.5	11.2
Döner Kümbeti	Gri İgnimbirit	Batı	0.9	20.0	10.4	5.8	27.0	16.4
Babükbey Kümbeti	Gri İgnimbirit	Güney	1.8	15.7	8.7	7.4	22.6	15.0
Emir Şahap Kümbeti	Kahve İgnimbirit	Kuzey	3.7	17.0	10.4	9.9	24	17.0
Suya Kanmış Hatun Kümbeti	Kahve İgnimbirit	Batı	5.3	17.0	11.2	11.8	24.0	17.9
Emir Ali Pişrev Kümbeti	Kahve İgnimbirit	Güney	10.0	23.3	16.7	16.8	30.4	23.6

Çizelge 6. Tarihi eserlerdeki ignimbirit blokları üzerinde gerçekleştirilen İğne Penetrometresi deneyleri ile elde edilen dolaylı tek eksenli basınç dayanımları.

Table 6. Indirect uniaxial compressive strengths obtained by Needle Penetrometer tests performed on ignimbrite blocks in historical monuments.

Eser adı	Malzeme türü	Deneyin yapıldığı cephe	Ergüler ve Ulusay (2007)			Aydan (2012)		
			Min. (MPa)	Maks. (MPa)	Ort. (MPa)	Min. (MPa)	Maks. (MPa)	Ort. (MPa)
Selçuklu Emir 1 Kümbeti	Gri İgnimbirit	Batı	4.0	5.0	4.5	6.7	8.1	7.4
Selçuklu Emir 2 Kümbeti	Kahve İgnimbirit	Batı	2.9	10.0	6.4	5.0	14.6	9.8
Hasbek Kümbeti	Kahve İgnimbirit	Kuzey	2.0	10.0	6.0	3.7	14.6	9.1
Hacip Çavlı Kümbeti	Gri İgnimbirit	Doğu	3.3	4.0	3.7	5.7	6.7	6.2
Emirhan Kümbeti	Gri İgnimbirit	Doğu	4.4	10.0	7.2	7.3	14.6	10.9
Çifte Kümbet	Kahve İgnimbirit	Doğu	3.3	10.0	6.7	5.7	14.6	10.1
Alicafer Kümbeti	Kahve İgnimbirit	K.Doğu	2.0	8.0	5.0	3.7	12.1	7.9
Döner Kümbeti	Gri İgnimbirit	Batı	4.0	10.0	7.0	6.7	14.6	10.6
Suya Kanmış Hatun Kümbeti*	Kahve İgnimbirit	Kuzey	10.0	10.0	10.0	14.6	14.6	14.6

*Tek ölçüm bulunmaktadır.

Farklı iki yönteme göre yapılan tek eksenli basınç dayanımı kestirimine göre Ergüler ve Ulusay (2007) tarafından önerilen formülde elde edilen dolaylı tek eksenli basınç dayanım değerlerinin, Aydan (2012)'ye ait eşitlikten biraz daha düşük sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, İğne Penetrometresi Deneyi'nden elde edilen ortalama dayanım değerlerine bakıldığında ignimbirit blok dayanımlarının genellikle 10 MPa'nın altında olduğu ve dayanım değerlerinin Schmidt Çekici ile elde edilen değerlerin çok altında kaldığı göze çarpmaktadır. İğne Penetrometresi Deneyi'nin zayıf ve ayrılmış kaya malzemesi için daha anlamlı sonuçlar verdiği ve bu çalışma kapsamında da bu deneyin daha çok blokların bozunmuş kesimlerinde gerçekleştirildiği göz önüne alındığında elde edilen bu sonucun anlamlı olduğu düşünülmektedir. İncelenen tarihi eserler içerisinde en düşük blok dayanımına Hasbek Kümbeti'nde ulaşılrken, Suya Kanmış Hatun Kümbeti'ndeki tek ölçüm göz ardı edildiğinde, Emirhan Kümbeti ile Döner Kümbet'in en yüksek dayanım değerlerini verdiği görülmüştür.

Selçuklu Dönemi'ne ait eserlerde farklı bozunma derecelerine sahip bloklarda dolaylı P-dalga hızı ölçümleri ile ignimbiritlerdeki P-dalga hızının değişimi incelenmiştir. P-dalga hızı ölçümleri, su emme kapasitesi yüksek olan ignimbiritlerde suya doygunluğun ölçümleri etkilememesi için yağışsız mevsimde gerçekleştirilmiştir. Buna göre, değerlendirmeye alınan tarihi eserlerdeki P-dalga hızı değerleri Çizelge 7'de sunulmaktadır. P-dalga hızı değerlerine ve gözlemsel değerlendirmelere göre incelenen eserlerde bozunma derecesi ve P-dalga

hızı arasında ters orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, tarihi eserlerde bozunma miktarının artmasıyla, P-dalga hızının azaldığı gözlenmektedir (Akın ve Özsan, 2011).

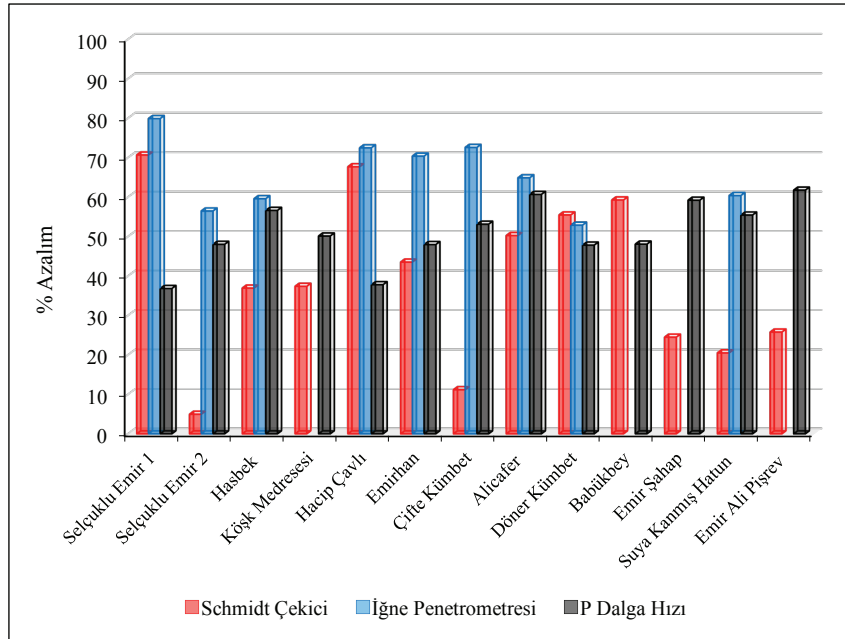
Elde edilen deneysel verilere göre, incelenen tarihi kümbetlerin tamamında ölçülen P-dalga hızlarının 2500 m/s'den düşük olduğu dikkati çekmektedir (Çizelge 7). P-dalga hızı değerleri ve Çizelge 3'te verilen sınıflama dikkate alındığında, farklı renk ve doku özelliklerine sahip ignimbirit bloklarının "çok zayıf" kaya grubunda olduğu görülmektedir. P-dalga hızının 1200 m/s'den büyük olduğu tarihi eserler sırasıyla Selçuklu Emir 2, Köşk Medrese, Çifte Kümbet, Selçuklu Emir 1, Hacıp Çavlı ve Suya Kanmış Hatun kümbetleridir. Diğer Selçuklu eserlerinde ise P-dalga hızları yaklaşık 1000 m/s mertebesindedir.

İğne Penetrometresi ve Schmidt Çekici deneyleriyle belirlenen dolaylı tek eksenli basınç dayanımı değerleri, aynı kaya malzemelerinin taze örneklerinin ortalama dayanım değerleri (Çizelge 4) ile karşılaştırılmış ve dayanım değerlerindeki yüzdesel azalış Şekil 10'da sunulmuştur. Schmidt Çekici deneyinden belirlenen dolaylı dayanımlar için Yılmaz ve Sendir (2002) yönteminden elde edilen veriler dikkate alınırken, dayanım azalışı değerlendirmelerinde İğne Penetrometresi için Aydan (2012) eşitliğinden bulunan dayanım değerleri kullanılmıştır. Tarihi eserlerdeki P-dalga hızlarındaki % değişime de aynı grafik üzerinde yer verilmiştir. Öte yandan, taze örneklerin ve tarihi eserlerdeki doğal yapıtaşlarının P-dalga hızlarının ölçümünde aynı ekipman ve yöntem kullanılmıştır.

Çizelge 7. Tarihi eserlerdeki ignimbirit blokları üzerinde gerçekleştirilen P-dalga hızlarının istatistiksel dağılımı.

Table 7. Statistical distribution of P-wave velocities of ignimbrite blocks in historical monuments.

Eser adı	Malzeme türü	Ölçüm Sayısı	En Düşük P-Dalga Hızı (m/s)	En Yüksek P-Dalga Hızı (m/s)	Ortalama P-Dalga Hızı (m/s)
Selçuklu Emir 1 Kümbeti	Gri İgnimbirit	7	1000	1684	1241
Selçuklu Emir 2 Kümbeti	Kahve İgnimbirit	3	1068	1600	1408
Hasbek Kümbeti	Kahve İgnimbirit	9	844	1733	1175
Köşk Medresesi	Kahve İgnimbirit	8	824	1923	1351
Hacıp Çavlı Kümbeti	Gri İgnimbirit	4	1000	1538	1222
Emirhan Kümbeti	Gri İgnimbirit	9	844	1147	1022
Çifte Kümbet	Kahve İgnimbirit	25	904	2094	1270
Alicafer Kümbeti	Kahve İgnimbirit	5	776	1246	1065
Döner Kümbeti	Gri İgnimbirit	7	853	1206	1025
Babükbey Kümbeti	Gri İgnimbirit	12	786	1563	1020
Emir Şahap Kümbeti	Kahve İgnimbirit	11	822	1622	1105
Suya Kanmış Hatun Kümbeti	Kahve İgnimbirit	11	941	1637	1207
Emir Ali Pişrev Kümbeti	Kahve İgnimbirit	12	719	1369	1036



Şekil 10. İncelenen tarihi eserlerde Schmidt Çekici ve İğne Penetrometresi değerlerine göre dayanım azalımı ve P-dalga hızı değişim yüzdeleri.

Figure 10. Strength reduction and P-wave velocity variation percentages in the examined historical monuments according to Schmidt Hammer and Needle Penetrometer values.

Selçuklu Dönemi'ne ait eserlerde tahribatsız deneylerden elde edilen veriler incelendiğinde, Schmidt Çekici ve İğne Penetrometresi deneylerinden belirlenen tek eksenli basınç dayanımlarında yer yer belirgin oranda fark olduğu görülmektedir. Buna gerekçe olarak, İğne Penetrometresi'nden bulunan tek eksenli basınç dayanımı verilerinin, tarihi eserlerde bozunmanın daha fazla gözlemlendiği blokların dayanımını karakterize etmesidir. Bunun tersine, Schmidt Çekici deneyine ait dolaylı dayanım değerleri ise bozunmanın görece daha az olduğu yapı bloklarına aittir. Şekil 10'da sunulan grafik incelendiğinde bazı tarihi eserlerdeki ignimbirit bloklarında dayanım azalımının %50'nin üzerine çıktığı görülmektedir. Özellikle Selçuklu Emir-1, Hacıp Çavlı, Emirhan ve Çifte Kümbetlerde İğne Penetrometresi'nden bulunan dayanım azalımının %70-80 mertebelerinde olduğundan söz edilebilir. Deneysel olarak dayanım azalımına yönelik elde edilen bu bulgular, yerinde gözlemsel incelemeler ile de doğrulanmıştır. Bazı tarihi eserlerdeki özellikle taban kesime yakın olan bloklarda ignimbirit malzemesindeki bütünlük kayıpları çok fazladır. Bu durum malzemedeki dayanım azalımının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

Öte yandan, P-dalga hızlarındaki ölçümlerle taze örneklerle ait P-dalga hızları arasındaki yüzdesel farklılıklar incelendiğinde, tarihi eserlerdeki bloklar üzerinde elde edilen P-dalga hızlarının genel olarak %40-50 oranında daha düşük olduğu saptanmıştır. Tarihi eserlerin yapıldığı dönem temel alındığında yaklaşık 600-700 yıldır atmosferik etkilere maruz kalan ignimbirit malzemesinde; ıslanma-kuruma, ısınma-soğuma, donma-çözülme ve tuz kristallenmesi gibi atmosferik değişimler neticesinde meydana gelen bozunmalar ve oyuklanma artışları tarihi eserlerin yapı

malzemelerinde P-dalga hızlarının düşmesinde rol oynayan etkenlerdir.

İncelenen ignimbirit bloklarındaki bozunma derecesi, bloğun yüzey pürüzlülüğü, deney yapılan yüzeyin hemen arkasında bulunabilecek zayıflık düzlemleri, blokların tarihi eser üzerindeki konum farklılığı gibi birçok etken, incelenen tarihi yapılarda farklı deneysel yöntemlerle değişik sonuçlarının bulunmasına yol açmıştır. Ancak elde edilen veriler genel olarak değerlendirildiğinde ve yerinde gözlemlerle desteklendiğinde, Selçuklu Dönemi'ne ait bu tarihi eserlerin özellikle yoğun şekilde yüzey suları ile teması neticesinde önemli ölçüde dayanımlarını yitirdikleri ve bozunmaya uğradıkları tespit edilmiştir.

Bunun en güzel örneklerinden bir tanesi incelenen Döner Kümbet için verilebilir. Yakın dönemde Döner Kümbet'in restorasyon çalışmaları neticesinde, kümbetin etrafında birikecek yağış sularının drenajı için oluşturulan tahliye kanalı girişinin hatalı konumlandırılmasından kaynaklı olarak kümbet çevresinde biriken suyun tahliyesinin yeterince yapılmadığı tespit edilmiştir (Şekil 11). Su tahliye kanalı, kümbet taban kotundan yaklaşık 5 cm yukarıda yapılmış olup, yağışlı dönemlerde yağış suları kümbet etrafında birikerek uzun süre kalabilmektedir. Kümbetin bulunduğu alanda yapılan tahliye giderlerinin giriş ağızlarının tabandan 5 cm civarında bir yüksekliğe konumlandırılması, yağışların ardından kümbet etrafında biriken yüzey suyunun bu yüksekliğe ulaşmadan drene olamayacağı ve kümbet tabanındaki ignimbirit bloklarının biriken su ile uzun süre temas edeceği anlamına gelmektedir. Bunun bir sonucu olarak, tarihi kümbetin alt bölümlerinin kılcallığın da etkisiyle diğer bölgelere oranla daha fazla bozunduğu kolaylıkla görülmektedir (Şekil 11).



Şekil 11. Döner Kumbet çevresinde hatalı yapılan su giderleri sonucu kümbet tabanındaki bloklarda gelişen ileri derecede bozunma.

Figure 11. Advanced weathering of blocks at the base of the tomb as a result of insufficient water drainage around the Döner Tomb.

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında 13'ü Selçuklu Dönemi'ne ait kümbet ve medrese ile Roma Dönemi'nde inşa edilmiş bir adet mezar olmak üzere kültürel miras niteliğindeki toplam 14 tarihi eser yerinde incelenmiştir. Gözlemsel ve deneysel olarak incelenen bu yapılar üzerinde yerinde yapılan tahribatsız deneyler ile bozunmaya uğramış yapı bloklarında bozunmanın, blok dayanımı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Tarihi eserler üzerinde uygulanan Schmidt Çekici, İğne Penetrometresi ve P-dalgı hızı deneylerinden elde edilen veriler neticesinde, tarihi yapıların bazılarında ıgnimbirit bloklarında ileri derecede bozunmaların oluştuğu, %80'lere ulaşan ölçülerde dayanım kayıpları meydana geldiği tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen Selçuklu Dönemi'ne ait kümbet ve medreselerde yaygın

olarak kavlaklanma ve pullanma, malzeme kayıpları, kararma, insan tahribatlarına bağlı gelişen deformasyonlar, petekgözlülük ve tuzlanma türü bozunmaların oluştuğu tespit edilmiştir. Bunların sonucunda, kültürel miras niteliğindeki bu eserlerde, malzeme dayanım kayıplarına bağlı olarak parçalanmalar, kırılmalar, yapıdan kopma-ayırılma, derz boşalması şeklinde ilerleyen dönemlerde yapı bütünlüğünü bozabilecek bozunmalar meydana gelmektedir. Fakat incelenen tarihi eserlerde mevcut durumda yapı bütünlüğünün kaybolmasına yol açacak derecede bir bozunma tespit edilmemiştir.

Zamana bağlı gelişen yüksek derecede bozunmadan dolayı bazı tarihi yapılarda yenileme çalışmaları yapılarak bozulan ve ilksel özelliğini kaybeden bloklar değiştirilmiş, yapı bütünlüğü yeniden sağlanmıştır. Ancak, kümbetlerin alt

bölümlerinde yüzey suları ile uzun süre temas eden yakın dönemde değiştirilmiş yeni kaya malzemesinde bile yer yer tozlaşma ve pullanma-kavlaklanma türü bozunmaların geliştiği dikkati çekmektedir.

Selçuklu Dönemi'nden günümüze kadar gelen bu eserlerde, yüzey suları ile temasın yoğun olduğu bölümlerde, kılcallık sebebiyle bozunmanın ileri derecede olduğu, kavlaklanma-pullanma türü bozunmaların geliştiği, gözenek miktarının arttığı ve gözeneklerde biriken tuzlar nedeniyle bozunma derecesinin ilerlediği görülmektedir. Buna ilave olarak, havadaki kirleticiler sebebiyle bazı tarihi kümbetlerde önemli oranda renk değişimleri meydana gelmekte ve tarihi eserlerdeki kararmalar, yapının estetik açıdan özelliğinin kaybolmasına, üzerlerindeki motiflerin belirginliğini kaybetmesine neden olmaktadır.

İncelenen tarihi eser niteliğindeki yapılarda ignimbiritlerin bozunmasında en önemli faktörün yüzey suları olduğu yerinde yapılan gözlemsel ve deneysel çalışmalar neticesinde ortaya konmuştur. Su ve kılcallık etkisi ile alt bölgelerde oluşan ileri derecede bozunma, kümbetlerin taban kesimlerinin su ile yoğun şekilde temasta olduğunu göstermektedir. Tarihi eserlerin su ile yoğun şekilde temas eden taban kısımlarındaki bozunmanın, yüksek kısımlarındaki bozunmaya oranla daha fazla olduğu görülmektedir. 12. ve 14. yüzyıllardan günümüze kadar gelen ve yoğun olarak ignimbirit malzemesi kullanılan bu tarihi eserlerde, yüzlerce yıl zaman farkı olmasına rağmen, yer yer yeni kullanılan kaya malzemesinin de en az eski bloklar kadar atmosferik etkenlerden ve yağış sularından etkilenecek kısa sürede bozunduğu saptanmıştır. Eserlerin tabanında bulunan ve yüzey sularının yoğun şekilde nüfuz ettiği yeni yapı malzemesinde benzer şekilde pullanma-kavlaklanma ve tozlaşma türü bozunmalar görülmektedir.

Tarihi eserlerde uygulanan iyileştirme çalışmalarında yapıların çevresindeki yağış suyu drenajlarının yeterli ölçüde yapılamadığı ve bunun tarihi eserlerin daha fazla yüzey suyu ile temas etmesine neden olduğu gözlenmiştir. Kültürel miras niteliğindeki bu tarihi eserlerin korunarak gelecek nesillere aktarılabilmesi için ignimbiritlerin suya karşı oldukça hassas oldukları göz önüne alınarak, tarihi kümbetlerin çevresinde etkili bir su drenajına yönelik iyileştirme çalışmalarının yapılması önerilmektedir.

Tarihi eserler üzerindeki biyolojik bozunmaya sebep olan irili ufaklı bitkilerin düzenli olarak temizlenerek tarihi yapıdan uzaklaştırılması gerekmekte olup, hava kirliliğinin neden olduğu kararmaların da belirli aralıklarla temizliğinin yapılması gerekmektedir. Son olarak, yerleşim içinde korunaksız bir şekilde yol kenarlarında ve mahalle aralarında kalmış Selçuklu Dönemi'ne ait bu tarihi yapıların korunarak insan tahribatlarının önüne geçilmesi önem arz etmektedir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Muhammed Kamil Akgül'ün Nevşehir Hacı Bektaş Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde gerçekleştirdiği Yüksek Lisans Tez çalışmasına ait verilerden üretilmiştir. Yazarlar, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi'ne ve çalışma sırasında gerekli desteği sağlayan Kayseri Vakıflar Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Akgül, M.K. (2021). Kayseri il merkezindeki bazı tarihi eserlerde bozunmanın değerlendirilmesi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 122 sf.

- Akın, M. (2008). Eskipazar (Karabük) travertenlerinin bozunmasının araştırılması (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akın, M. & Özsan, A. (2011). Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 101–114.
- Akın, M., Topal, T., Dinçer, İ., Akin, M.K., Özvan, A., Orhan, A. ve Orhan, A. (2020). İgnimbritlerde kaynaşma derecesi ile litik malzeme şekli arasındaki ilişkinin değerlendirmesi (Yayımlanmamış). Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP18F25) Sonuç Raporu, 89 sf.
- Akın, M., Topal, T., Dinçer, İ., Akin, M.K., Özvan, A., A., Orhan, A. & Orhan, A. (2023). A new quantitative welding degree classification for ignimbrites. *Environmental Earth Sciences*, 82, 345.
- ANON (1979). Classification of rocks and soils for engineering geological mapping part 1: Rock and soil materials. *Bulletin of International Association of Engineering Geology*, 19, 355–371.
- Aydan Ö. (2012). The inference of physico-mechanical properties of soft rocks and the evaluation of the effect of water content and weathering on their mechanical properties from needle penetration tests. Symposium of ARMA, Chicago, Paper No. ARMA12- 639 (on CD).
- Dal, M. & Öcal, A. (2017). Mardin şehrindeki taştan yapılanmış eserlerde görülen bozunmalar. *BAUM Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1), 60-74.
- Dal, M., Yalçın, M. & Öcal, A.D. (2016). Gazimağusa Kale içindeki tarihi taş yapılarda görülen bozunmalar. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 355-363.
- Dinçer, İ. & Bostancı, M. (2019). Capillary water absorption characteristics of some Cappadocian ignimbrites and the role of capillarity on their deterioration. *Environmental Earth Sciences*, 78:7.
- Ergüler, Z.A. (2007). Su içeriğinin kil içeren kayaların mühendislik davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ergüler, Z.A. & Ulusay, R. (2007). Estimation of uniaxial compressive strength of clay-bearing weak rocks using needle penetration resistance. *Proceedings of 11th Congress on International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, vol. 1, 265–268.
- Ertaş, B. & Topal, T. (2022). Durability assessment of some Cappadocian tuffs using factor analysis, multiple regression analysis, and analytical hierarchy process. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(6).
- Erten, Ş.Y. ve Mısırlı, A. (2023). Yığma yapılarda gözleme dayalı bozulma/hasar tespiti: Eski Harbiye Kışlası. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 38-50.
- Gökçeoğlu, C. (1996). Schmidt sertlik çekici kullanılarak tahmin edilen tek eksenli basınç dayanımı verilerinin güvenilirliği üzerine bir değerlendirme. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 48:78–81.
- Hasbay, U. & Hattap, S. (2017). Doğal taşlardaki bozunma (ayırışma) türleri ve nedenleri. *Munzur Üniversitesi Bilim ve Gençlik Dergisi*, Cilt:5, Sayı:1, ISSN:2148-0273.
- İnce, İ., Bozdağ, A., Tosunlar, M.B., Hatır, M.E. & Korkanç, M. (2018). Determination of deterioration of the main facade of the Ferit Paşa Cistern by non-destructive techniques (Konya, Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 77:420.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics) (1981). *Rock characterization testing and monitoring*. E. Brown (Ed.), Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics) (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization. Testing and Monitoring: 1974-2006*. R. Ulusay, J.A. Hudson (Eds.), 628 p.
- Kaşmer, Ö. & Ulusay, R. (2013). Effects of geo-engineering characteristics of the soft tuffs

- and environmental conditions on the rock-hewn historical structures at Zelve Open Air Museum (Cappadocia, Turkey). *Environmental & Engineering Geoscience*, 19(2), 149–171.
- Korkanç, M. (2018). Characterization of building stones from the ancient Tyana aqueducts, Central Anatolia, Turkey: implications on the factors of deterioration processes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 237–252.
- Köksal, S. (2019). Kayseri ili yer adları: kimlik, kültür ve mekan (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Maruto (2006). Penetrometer for soft rock: Model SH-70 Instruction Manual. Tokyo, Japan.
- Özvan, A., Dinçer, İ., Akın, M., Oyan, V. & Tapan, M. (2015). Experimental studies on ignimbrite and the effect of lichens and capillarity on the deterioration of Seljuk Gravestones. *Engineering Geology*, 185, 81-95.
- Spennemann, D.H.R., Pike, M. & Watson, M.J. (2017). Behaviour of pigeon excreta on masonry surfaces. *Restoration of Buildings and Monuments*, 23(1), 15–28.
- Topal, T. & Doyuran, V. (1998). Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 34(1), 5-20.
- Topal, T. & Sözmen, B. (2003). Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument. *Engineering Geology*, 68(3–4), 201-223.
- Tosunlar, M.B., Hatır, M.E., İnce, İ., Bozdağ, A. & Korkanç, M. (2018). The determination of deteriorations on the Mısırlıoğlu Bridge (Konya, Turkey) by non-destructive techniques (NDT). *International Journal of Architecture & Planning*, 6(2), 399-412.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C. ve Binal, A. (2001). Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri, 1. Baskı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, 161 s.
- Varol, O.O. (2024). Nevşehir ignimbritlerinde kapiler su emme özelliğinin incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2, 1064-1074.
- Yılmaz, I. & Sendir, H. (2002). Correlation of Schmidt Hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas. *Engineering Geology*, 66, 211–219.

