Farklı Kayalarda $MgSO_4$ Tuz Kristallenmesi Deneyi Sonuçlarının Bozunma Hızı (AV) Yöntemi ile değerlendirilmesi

Evaluation Of $MgSO_4$ Salt Crystallization Test Sesults İn Different Rocks By Using The Alteration Velocity (AV) Method

Ali Özvan [1], Mesut Bor [2], Elif Erdeve Özvan [3]*

[1]*Van Yüzüncü Yıl Üni., Müh. Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, aozvan@yyu.edu.tr*
[2]*Van Yüzüncü Yıl Üni., Fen Bil. Enst., Jeoloji Mühendisliği ABD, 65080, Van, mesutbor8989@gmail.com*
*[3] *Van Yüzüncü Yıl Üni., Van Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 65080, Van eliferdeveozvan@yyu.edu.tr*

Özet

Yüz yıllardır iç ve dış mekânlar için tedarik edilen yapı malzemelerinin önemli bir kısmı doğal kaya malzemelerden oluşmaktadır. Uzun yıllar boyunca iklim koşullarından etkilenen bu malzemeler, doğal özelliklerini kaybedebilmektedirler. Günümüzde kaya malzemeler seçilirken uzun dönem boyunca oluşabilecek yıpranma özelliklerinin bilinmesi ve buna göre kullanılacak yer ve mekânların belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada da, farklı kayaları doğada en çok yıpratan tuz kristallenmesi etkisi araştırılmış ve bozunma deneyleri yapılarak kayıp miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada küp örnekler üzerinde tuz kristallenmesi deneyleri yapılmış ve çeşitli noktalardan alınan toplamda 13 adet kaya örneğinin bozunma öncesi ve sonrasındaki fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Değerlendirmede son yıllarda kullanılan Bozunma Hızı (AV) yöntemlerine göre kaya örnekler değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, porozite ve mineralojik bileşime bağlı olarak, farklı kayaların fiziksel özelliklerinin, bozunma derecesinin ve parçalanmasının değişkenlik göstereceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Bozunma hızı, gözeneklilik, kaya, mineralojik bileşim, tuz kristallenmesi.

Abstract

For centuries, a significant portion of construction materials supplied for both interior and exterior applications have consisted of natural stone materials. Over the years, these materials, exposed to climatic conditions, may lose their inherent properties. Today, when selecting stone materials, it is essential to consider their potential deterioration characteristics over the long term and to determine their appropriate areas of application accordingly. In this study, the effect of salt crystallization, which is one of the most deteriorating factors for rocks in nature, was investigated, and weathering tests were carried out to determine the amount of material loss. Salt crystallization experiments were conducted on cubic samples, and the physical and mechanical properties of a total of 13 rock samples, collected from various locations, were examined both before and after the deterioration process. For the evaluation, the rock samples were assessed based on the Weathering Rate (AV) methods commonly applied in recent years. In light of the obtained data, it was concluded that the physical properties, degree of deterioration, and fragmentation of different rocks vary depending on porosity and mineralogical composition.

Keywords: *Weathering rate, porosity, rock, mineralogical composition, salt crystallization*.

1. Giriş

İnsanoğlunun barınma ihtiyacının artmasıyla, doğal yapıtaşı malzemelerine olan talep de zaman içerisinde artmıştır. Geçmişten günümüze kadar gelmeyi başaran yapıların çoğunda doğru malzeme ve yapım yöntemlerinin olduğu bilinmektedir. Günümüzde, malzeme seçimlerinin tesadüfe bırakılmadan, daha bilinçli ve uzun ömürlü performans gösterecek şekilde yapılması amacıyla, doğal haldeki kayalardan üretilen malzemelerin özelliklerini belirleme ve uzun süreli performanslarını değerlendirme üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

Kaya örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri, çeşitli sektörlerde kullanılabilirliğini sağlayan en önemli kriterlerdendir. İklimsel koşullar ve bulunduğu ortamda maruz kaldığı basınç etkisiyle kayaçlarda yıpranma ve bozulmalar oluşması yaygın olarak karşılaşılan durumlardır. Bilhassa tarihi yapıların yıllar içerisinde atmosfer olaylarından olumsuz etkilenmesi ve sulu ortamlarda bulunan kayaların bozunmalara uğraması sıklıkla görülmektedir. Kaya örneklerinin minerolojik fiziksel ve mekanik özellikleri bozunma derecesi ve bozunma hızını etkilemektedir. Ayrıca, kayanın jeolojik geçmişi boyunca maruz kaldığı çevresel koşullar da bozunma derecesi üzerinde etkili olabilmektedir.

Çevresel koşullara bağlı olarak, kaya kütlelerinde uzun vadede gelişen bozunmalar; anroşman, riprap, agrega ve kaplamalarda kullanılması durumunda çok daha hızlı şekilde görülebilmektedir. Bu çalışmada, kaya kütle boyutundan arındırılarak belirli bir boyuta getirilmiş ve yapıtaşı olarak kullanılacak kaya örneklerinin, hızlandırılmış $MgSO_4$ tuz kristallenmesi deneyi ile bozunma davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. 7 cm kenar ölçülerine sahip küp örnekler laboratuvar ortamında bozunmaya tabi tutulmuş ve gerçekleştirilen testler neticesinde dayanımda azalmalar gözlemlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, 13 farklı kaya örneğinde bozunma derecesinin değişimi ve bozunmaya neden olan etkenler her bir kaya örneği için değerlendirilerek yorumlanmıştır. Çalışmada kullanılan bu 13 kaya örneği, endüstride mermer olarak sınıflandırılan ve Türkiye ile İran'ın farklı bölgelerinden temin edilmiştir.

Son yıllarda konu ile ilgili çok sayıda araştırma mevcuttur. Yapılan çalışmalardan bazılarını özetlersek, Eskipazar (Karabük) travertenlerindeki bozunmanın araştırıldığı bir çalışmada, travertenlerde ciddi seviyede bozunmanın olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, Anıtkabir'de bulunan sarı travertenlerin, yer yer bozunmaya uğradığı belirtilmiştir (Akın, 2008). Bitlis Ahlat bölgesinde bulunan tarihi Selçuklu Mezarlığı'ndaki ignimbiritler ve aynı bölgede yer alan ignimbirit seviyelerinden alınan dört farklı numune üzerinde inceleme yapılmış ve ignimbiritlerin özelliklerini litik madde içeriğinin kontrol ettiği vurgulanmıştır.800 yıllık tarihi süreçte maruz kaldıkları bozunmanın aslında ignimbiritlerin yüksek gözenekliliği, kılcal su emme gibi kendine has özelliklerinin mezar taşlarında bozunmayı tetikleyen en önemli faktör oduğu ifade edilmiştir (Akın ve ark., 2016; Özvan ve ark., 2015). Ayrıca, Ahlat ignimbiritleri üzerinde yapılan laboratuvar testleri sonrasında kaynaklanma derecesinin yanı sıra litik malzeme içeriğinin de ignimbiritlerin mukavemet ve kılcallık özelliklerini esas olarak kontrol ettiği belirlenmiş ve gözenek çapı ile tuz kristalleşmesi bozunma sabiti arasında da düşük anlamlı bir ilişki elde edilmiştir (Akın ve ark., 2017). Tuz kristalleşmesinin kumtaşı ve kireçtaşı örnekleri üzerindeki etkisini belirlemek için deneyler yapılmış ve hızlandırılmış $MgSO_4$ testinin sayısal verilerle tanımlandığı bozunma hızı ve bozunma indeksi terimleri ileri sürülmüştür (Angeli ve ark., 2007). Ayrıca tuz kristalleşmesinin bozunmayı hızlandıran en önemli etkenlerden biri olduğu ifade edilmiştir (Benavente ve ark., 2004). Bir başka çalışmada gözenekli kayalardaki tuz bozunmasının, kayaların petrofiziksel özelliklerinden nasıl etkilendiği araştırılmış ve tuz bozunmasının kayaların yapıtaşlarını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir (Benavente ve ark., 2007). Piroklastik kayaçların petrografik özelliklerinin de bozunma dayanımlarını kaydadeğer düzeyde etkilediği belirtilmiştir (Jackson ve ark., 2005). Suyun bozunmada en önemli unsur olduğu vurgulanırken (Seiki ve Aydan, 2003), gözenekliliğin ve gözenek geometrisinin bozunmayı kontrol ettiği belirtilmiştir (Sousa ve ark., 2005; Tuğrul 1997; Tuğrul, 2004;). Bir başka çalışmada ise, Kapadokya bölgesindeki tüflerde bozunma derecesi ve bozunma derinliği belirlenmiş ve tüflerin duraylılığının zayıf-çok zayıf olduğu ortaya konmuştur (Topal ve Doyuran, 1997). İstanbul çevresindeki kumtaşları üzerinde suda kütle kaybına karşı yapılan dayanım deneyleri sonucunda, tane mineralojisine kıyasla dokusal özelliklerin dayanımı etkileyen önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir (Tuğrul ve

Zarif, 1998). Sıcaklık ve tuz kristalleşmesinin Batı Anadolu mermerlerinden temin edilen 6 adet farklı mermer türünün bozunmasını nasıl etkilediği araştırılmış, tuz kristallerinin sıcaklık ve basınca bağlı olarak bozunmada etkili olduğu ancak çevrimsel donma-çözülme ve ıslanma-kuruma deneylerinin bozunmayı önemli ölçüde etkilemediği ortaya konulmuştur (Yavuz ve Topal, 2007).

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Analizler

Laboratuvar çalışmalarında, yapıtaşı sektöründe de kullanılan küp şekilli örneklerde, dayanım üzerinde tuz kristalleşmesinin etkisinin tespit edilmesi araştırılmıştır. Numuneler TSE ve ISRM standartlarına uygun olarak yapılmıştır (Tablo 1). Yurdumuzun çeşitli bölgelerinden temin edilen 13 farklı kaya, ilgili standartlara uygun olarak kenar uzunluğu 7cm olacak şekilde küp örnekler hazırlanmıştır. Ardından kaya örneklerinin kimyasal bileşimi, petrografik ve mineralojik özellikleri tespit edilmiştir.

Kaya küp numuneler, %14 $MgSO_4$ çözeltisi içerisine konulmuş ve gözeneklerin tuz çözeltisine doymasını sağlayabilmek için 2 saat süreyle bekletilmiştir. Küpler çözelti içerisinden çıkarılıp su ile yıkanmış ve etüvde 105±5°C'de 24 saat boyunca kurutulmuştur. Bu işlem bir döngü olarak ifade edilmekte olup, deney boyunca 25 adet çevrim gerçekleşmiştir. Numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri izleyebilmek amacıyla, her 5 çevrimde 3 adet örnek alınmıştır.

Tablo 1. Laboratuvar deneyleri, örnek şekli ve deney standartları

Test Türü	Yapılan Testler	Numune tipi	Test Standardı
Fiziksel özellik testleri	Birim hacim ağırlık testleri Porozite ve boşluk oranı Ağırlıkça ve hacimce su emme testi	Agregalar ve küp örnekler (7x7x7cm)	TS- 699 (2009) ve ISRM (2007)
Mekanik özellik testleri	Tek eksenli basınç dayanımı testi	Küp örnekler (7x7x7cm)	ISRM (2007)
Yapay bozunma testleri	Tuz kristallenme testi	Küp örnekler (7x7x7cm)	RILEM, (1980)

2.2. Tuz ($MgSO_4$) kristallenmesi deneyi

Tuz kristallenmelerinin, doğal kayalarda bozunmaya ciddi oranda katkı sunduğu bilinmektedir (Benavente ve ark., 2004; Akın, 2008). Yağmur, rüzgâr gibi iklimsel olayların etkisi ile kayaların gözeneklerinde biriken tuzlar, su ile reaksiyona girerek çözünebilmektedir. Doğal koşullar altında tuz kristallenmesi ile oluşan basınçların kayalar üzerindeki etkisinin deneysel olarak tespiti tuz kristallenmesi deneyinin en önemli amaçlarından biridir.

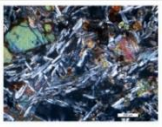
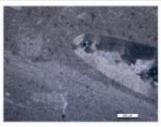
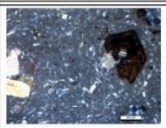
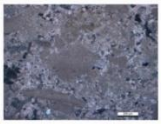
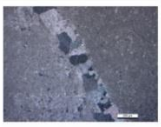
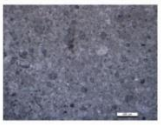
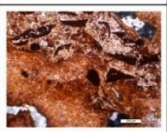
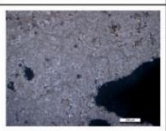
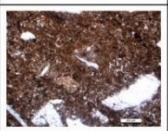
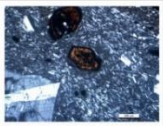
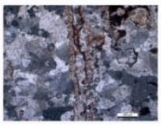
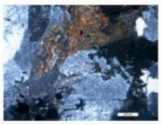
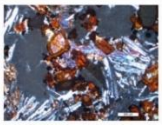
RILEM (1980) standartlarına göre farklı mineralojik özelliklere sahip 13 adet kaya türünden elde edilen 7x7x7cm boyutlarındaki 195 adet küp örnek (Şekil 1) üzerinde hızlandırılmış $MgSO_4$ tuz kristallenmesi deneyleri yapılmış ve malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin deney öncesi ve sonrasındaki değişimleri incelenmiştir. Her bir örnekten 3 adet alınarak bozunma deneyine tabi tutulmadan önce (bozunmamış) tek eksenli basınç dayanımı testi yapılmıştır. Bozunma deneyleri sonrasında da her çevrimin ardından 3 adet küp örnek alınmış ve her bir örneğin fiziksel ve mekanik özelliğindeki değişim çevrim sonrasında belirlenmiştir.

Şekil 1- Çalışmada kullanılan kaya numunelerine ait görüntüler.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Çalışmada kullanılan örneklerin petrografik özellikleri

Bozunma derecesinde malzemenin petrografik özellikleri en önemli parametrelerden biridir. Bu çalışmada da, incelenen örneklerin ince kesit üzerinden petrografik özellikleri ve minerallerdeki ayrışmalar belirlenmiştir (Şekil 2).

Kaya Adı	Kayanın ince kesit görüntüsü	Petrografik tanım	Kaya Adı	Kayanın ince kesit görüntüsü	Petrografik tanım	Kaya Adı	Kayanın ince kesit görüntüsü	Petrografik tanım
(1) BAZALT		İntersertal dokulu, plajiyoklas, olivin, piroksen-ojit mineralleri Olivin kısmen iddingsitleşmiş.	(6) KİREÇTAŞI		Fosil ve kalsit minerali gözlenmekte.	(11) ANDEZİT		Zonlu plajiyoklas, kısmen veya tamamen opasitleşmiş amfibol, piroksen-klinopiroksen mineralleri gözlenmekte.
(2) KALKARENİT		Bol foraminifer fosilleri ve yüzde 50'den fazla kum boyutu (0.0625 ila 2 mm çapında) karbonat taneleri gözlenmekte.	(7) KİREÇTAŞI		Mikrokristalin kalsit minerali (Oolit) içermekte, mikro çatlaklar kalsit dolgulu	(13) KİLLİ KİREÇTAŞI		Kalsit ve kil mineralleri gözlenmekte.
(3) TRAVERTEN		Mikrokristalin karbonat matriksinde kahvemsi/kırmızımsı renkli, bol miktarda boşluk ve nadir silikat mineralleri gözlenmekte.	(8) TRAVERTEN		Kalsit mineralleri ve bol boşluk yapısı gözlenmekte.	(13) İGNİMBİRİT		Pomza ve kaya parçaları ile plajiyoklas, sanidin ve piroksen mineralleri gözlenmekte. Volkanik hamur feldispat ve volkanik camdan oluşmakta.
(4) ANDEZİT		Kısmen veya tamamen opasitleşmiş amfibol, piroksen-klinopiroksen mineralleri gözlenmekte.	(9) TRAVERTEN		Mikrokristalin karbonat matriksinde kahvemsi/kırmısımsı renkli, bol miktarda boşluk ve nadir silikat mineralleri gözlenmekte.			
(5) GRANİT		Plajiyoklas, ortoklas, biyotit, kuvars, hornblend-sfen Holokristal-granüler granit. Biyotitlerde ileri derecede kloritleşme var.	(10) BAZALT		İntersertal dokulu, plajiyoklas, olivin, piroksen-ojit mineralleri Olivinde ileri derecede iddingsitleşme gözlenmekte.			

Şekil 2 -Testlerde kullanılan örneklerin petrografik özellikleri

3.2. Küp örneklerin fiziko-mekanik özellikleri

Seçilen 13 farklı kaya türüne ait bozunma testlerinden önce, toplam 195 örnek üzerinde fiziksel özellikler de ayrıca incelenmiştir. 13 adet kaya türünün her birinden, 5'er tane örnek alınıp, başlangıçtaki tek eksenli basınç dayanım değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca, örneklere ait fiziksel özelliklerin ortalama değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Belirlenen ortalama fiziksel özellikler arasında, doygun birim hacim ağırlık (γ_d), kuru birim hacim ağırlık (γ_k), porozite (n) ve kütlece su emme (KSE) yer almaktadır. Özellikle traverten örneklerinde gözeneklilik önemli bir değişken olup, yalnızca dayanımı etkilemekle kalmayıp bozunma sürecinde de belirleyici bir rol oynamaktadır. Gözle görülebilen gözenekler genellikle küçük ve eliptik şekillidir.

Kaya türlerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesiyle birlikte istatistiksel olarak bu değişkenler arasındaki ilişkiler de incelenmiştir. Buna göre gözeneklilik (n) ve KSE arasında, doygun (γ_d) ve kuru (γ_k) birim hacim ağırlık değerleri arasında anlamlı ilişkilerin olduğu da gözlenmiştir (Şekil 3).

Her bir çevrimde, 5 numune üzerinde tek eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin tek eksenli basınç dayanımı Tablo 2'de sunulmuştur. Seçilen numunelere ait ortalama porozite ile tek eksenli basma dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde, genel olarak porozite arttıkça dayanımın azaldığı görülmektedir.

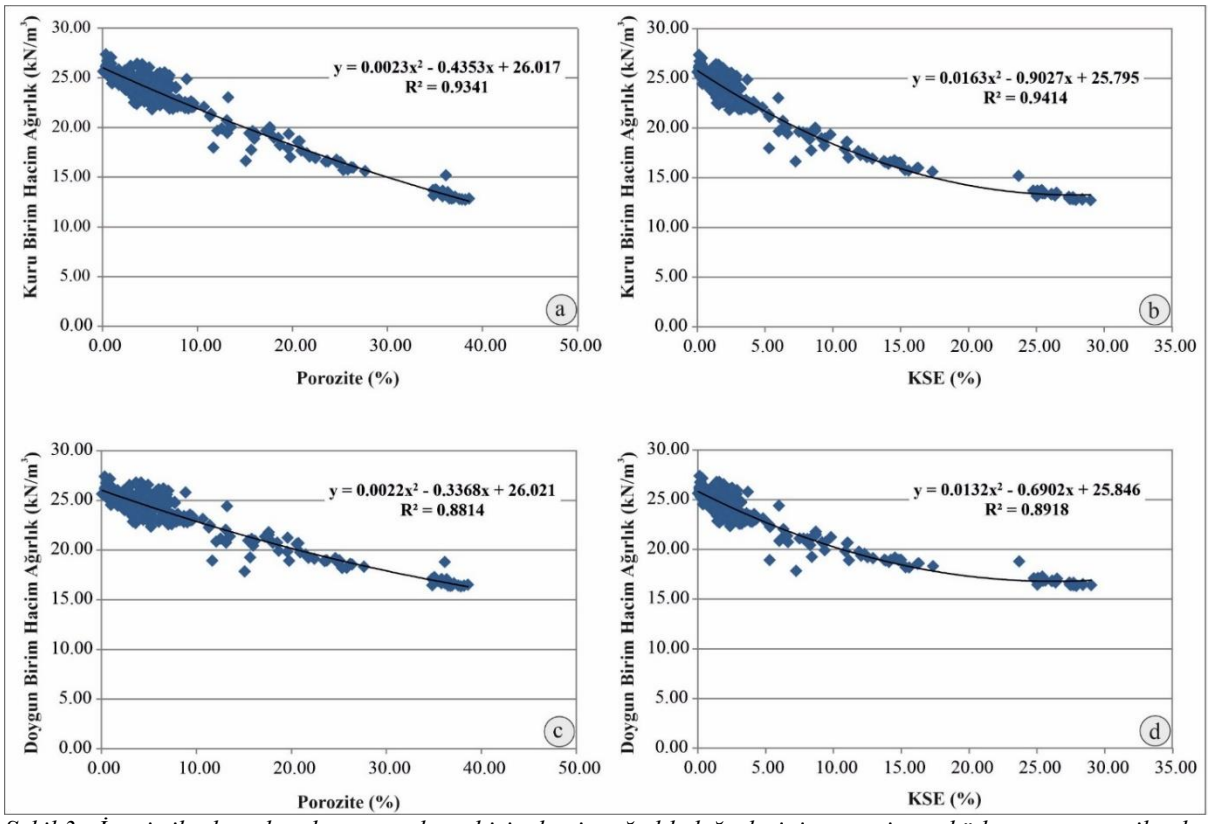
3.3. Küp örnekler üzerinde $MgSO_4$ ile yapılan tuz kristallenmesi deneyi sonuçları

Yapılan deney sonucunda, 13 farklı kaya türüne ait toplam 195 adet örneğin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin grafiksel gösterimi ise Şekil 4'te sunulmuştur. Deney sonucunda kütle kayıpları incelendiğinde, genel olarak örneklerde önemli düzeyde kütle kayıpları gözlenmemiştir. Ancak, 13 numaralı ignimbirit örneğinde, 10. çevrimden sonra yoğun bir kütle kaybı meydana gelmiş ve örnek ilksel bütünlüğünü yitirdiği için deney sürecinden çıkarılmıştır

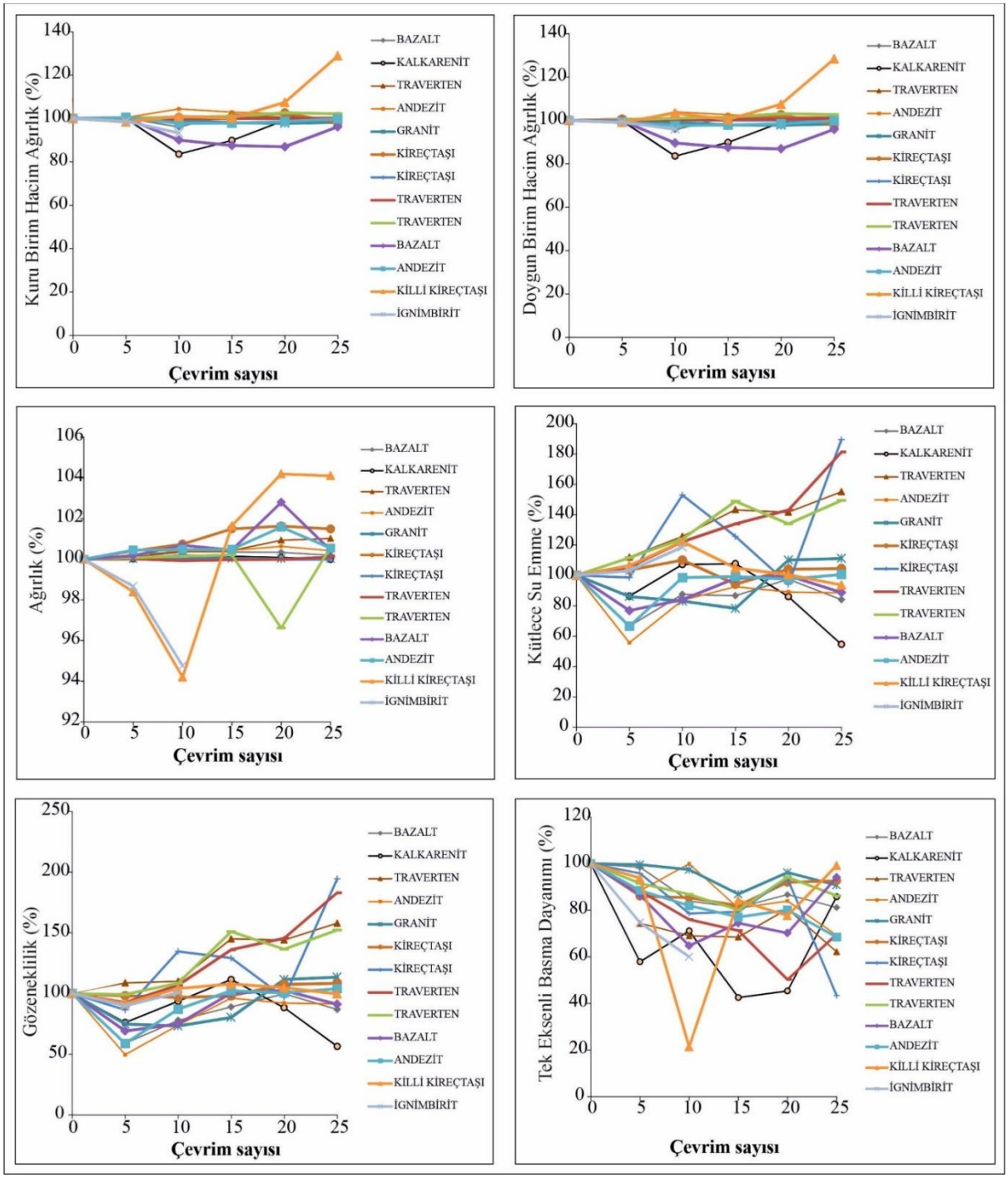
(Şekil 5). Kütle kayıplarına ek olarak, 12 numaralı killi kireçtaşı örneklerinde kuru birim hacim ağırlığında düzensiz bir artış tespit edilmiştir. Diğer örneklerde ise genellikle azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, bu anomaliler doygun birim hacim ağırlığının normalize edildiği grafiklerde de görülmektedir.

Tablo 2. Numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Örnek No	Kaya Adı	Ortalama γ_k (kN/m^3)	Ortalama γ_d (kN/m^3)	Ortalama KSE (%)	Ortalama Porozite (n) (%)	Ortalama UCS (MPa)
1	Bazalt	24.50	25.04	2.20	5.44	102.77
2	Kalkarenit	25.16	25.32	0.63	1.61	92.91
3	Traverten	23.52	23.95	1.82	4.26	72.84
4	Andezit	22.30	23.08	3.55	7.84	138.50
5	Granit	25.84	25.94	0.36	0.94	196.26
6	Kireçtaşı	24.86	25.40	2.20	5.40	125.06
7	Kireçtaşı	25.85	25.91	0.24	0.62	121.24
8	Traverten	23.94	24.29	1.47	3.47	62.23
9	Traverten	23.73	24.06	1.39	3.29	58.30
10	Bazalt	24.73	25.24	2.07	5.16	134.26
11	Andezit	22.39	23.21	3.71	8.35	69.70
12	Killi Kireçtaşı	19.12	20.78	8.96	17.19	36.52
13	İgnimbirit	14.45	17.55	22.12	31.89	10.50



Şekil 3 - İstatistiksel açıdan doygun ve kuru birim hacim ağırlık değerlerinin porozite ve kütlece su emme ile olan ilişkisi



Şekil 4-MgSO₄ deneyleri sonrasında örneklerde meydana gelen değişim grafikleri.

Tuz kristallenmesi deneyinin, örneklerin gözenekliliğini nasıl etkilediği incelendiğinde, çoğunlukla artış yönünde bir eğilim gözlemlenmiş; ancak bu durum 2 numaralı kalkarenit ve 7 numaralı kireçtaşı örnekleri için geçerli olmamıştır. Kütlece su emme değerlerine ait normalize eğri incelendiğinde, bu değişimlerin gözeneklilikteki artışla uyumlu olduğu görülürken deney sonunda elde edilen tek eksenli basma dayanımı verileri incelendiğinde, tüm örneklerin başlangıç değerlerine kıyasla azalma yönünde eğilim gösterdiği belirlenmiştir. Bu bağlamda, $MgSO_4$ tuz kristallenmesi çevrimlerinin örnekler üzerinde çoğunlukla azalan bir eğilim gösterdiği gözlenmiştir. İlk ve son çevrim arasındaki dayanım değişimlerine göre, en az dayanım kaybının granit, 6 numaralı kireçtaşı ve 9 numaralı traverten örneklerinde, en fazla

dayanım kaybının ise kalkarenit, andezit, bazalt, ve 7 numaralı kireçtaşı örneklerinde; gerçekleştiği tespit edilmiştir. Tüm örnekler değerlendirildiğinde, literatürde de bilindiği gibi porozitenin artması ile dayanımın düştüğü ve aynı ters ilişkinin birim hacim ağırlık ile dayanım arasında da gözlendiği belirlenmiştir. Bu durumu kayaların bozunmasındaki etkisinin de ne olduğuna bakmak amacıyla da aynı örnekler bir sonraki aşama da bozunma testine tabi tutulmuşlardır.

Şekil 5- İgnimbirit örneklerinde oluşan bozunma görüntüsü.

3.4. $MgSO_4$ tuz kristallenmesi deneyi sonuçlarının bozunma hızı (AV) yöntemi ile değerlendirilmesi

Küp örnekler üzerinde gerçekleştirilen tuz kristallenmesi deneylerine göre, örneklerin bozunmaya karşı gösterdiği direncin sayısal verilerle tanımlanması amacıyla Angeli ve ark. (2007) tarafından ifade edilen "bozunma indeksi (AI)" ve "bozunma hızı (AV)" kavramları kullanılmaktadır. Bozunma indeksi (AI), tuz kristallenmesi deneyi esnasında örneklerde gözle görülebilen ilk çatlamaların oluştuğu çevrim sayısı şeklinde tanımlanır (Angeli ve ark., 2007; ve Akın, 2008). Ancak, AI hesaplamasında çekilme dayanımı verisi gereklidir ki bu çalışmada çekme dayanımı ölçülmediği için AI değeri hesaplanamamıştır.

Bozunma hızı (AV) kavramı ise, araştırmacılar tarafından üç ayrı aşamada, kayanın kütlesinde meydana gelen değişimlere göre değerlendirilmiştir. Birinci aşamada, tuz çözeltisi içinde bekletilen kayanın boşluklarında tuz birikimi gerçekleştiğinden kütlelerinde artış gözlemlenir. İkinci aşama, kaya bünyesinde ilk çatlamaların başladığı çevrim ile başlar; bu süreçte malzemede ufalanmalar olabilir ki kütlede artış ya da azalma olabilir. Bozunma testi esnasında örnekler bozunma sürecine girmekte ve dolayısıyla ikinci aşama bazen izlenememektedir. Üçüncü aşama ise, kayanın bozunma sürecinin hızlandığı ve buna bağlı olarak kütlede azalma görülebilen süreç olarak tanımlanmaktadır (Angeli ve ark., 2007). Deneyin üçüncü aşamasının başlamasıyla birlikte, deney sonuna kadar örnek kütlesindeki değişim, Bozunma hızı (AV)'nın hesaplanmasında belirleyici faktördür.

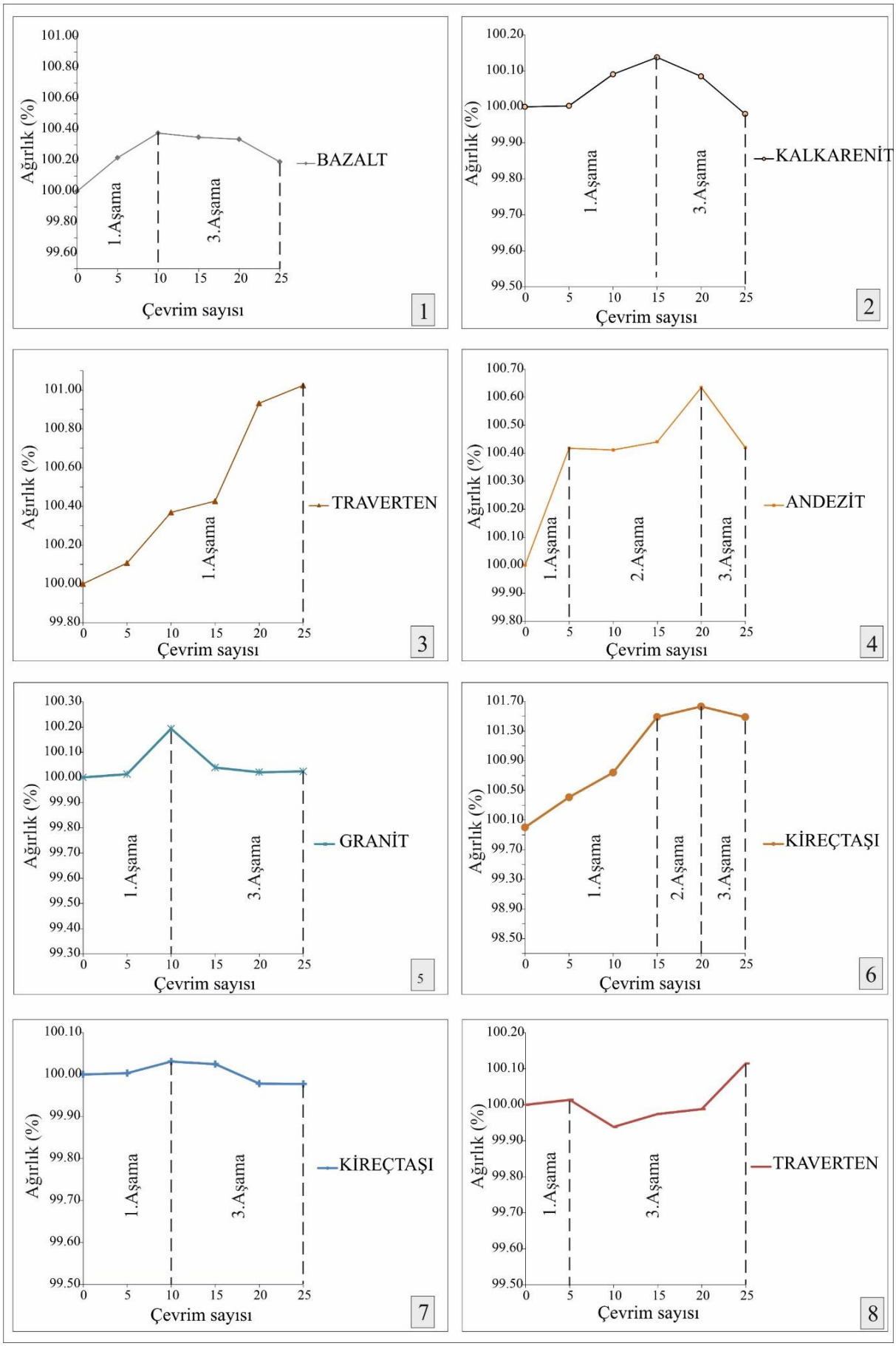
AV değeri, normalize edilmiş grafik üzerinde deney sonu kütle ile üçüncü aşamanın başladığı çevrimdeki kütle farkının, deneydeki toplam çevrim sayısı ile üçüncü aşamanın başladığı çevrim sayısının farkına oranı ile hesaplanmaktadır (Eş. 1).

$$AV = \frac{\text{Deney sonu kütle} - \text{ üçüncü aşamanın başladığı çevrimdeki kütle}}{\text{Toplam çevrim sayısı} - \text{ üçüncü aşamanın başladığı çevrim sayısı}} \qquad Eş.1$$

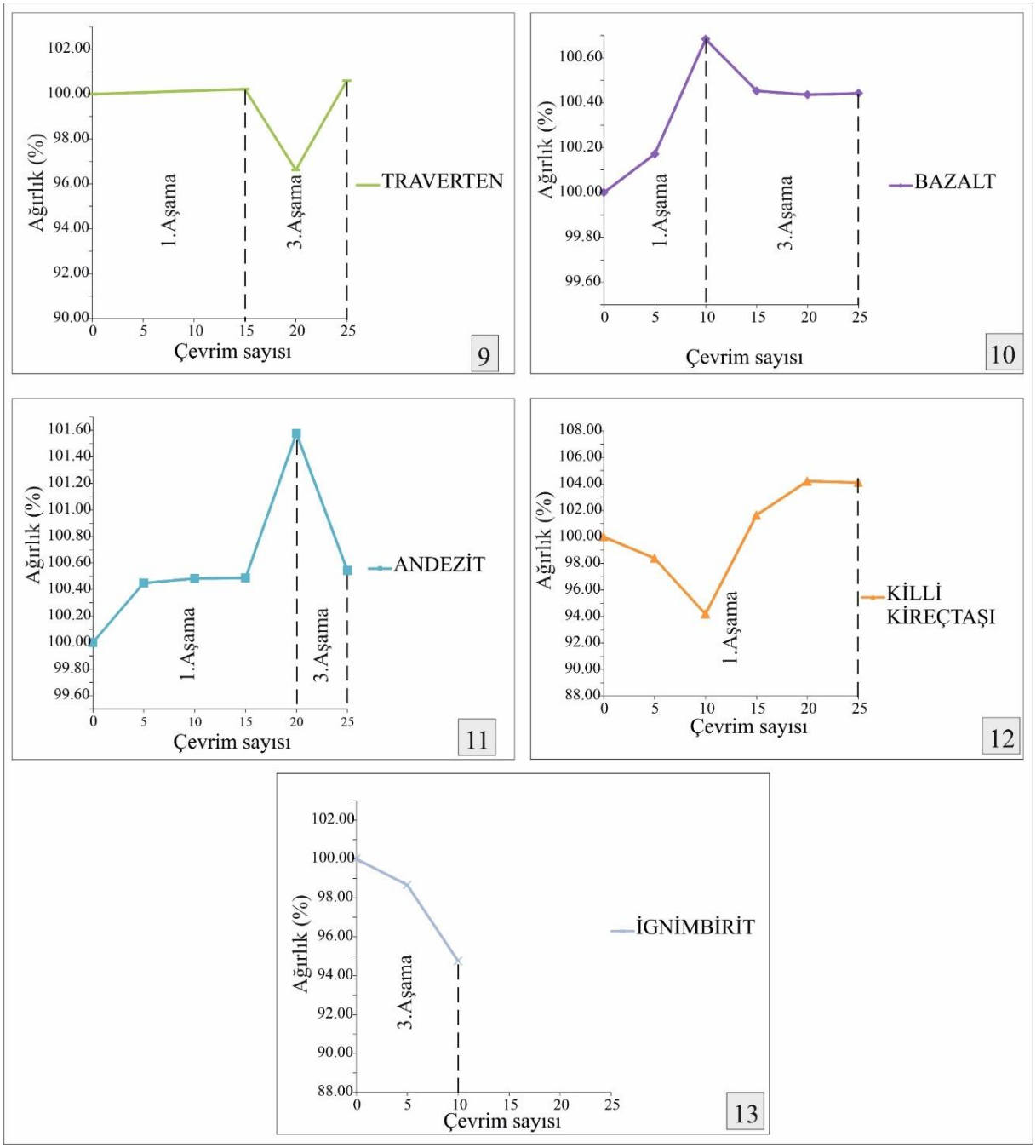
Eşitlik 1'e göre yapılan hesaplamalarda negatif değerler elde edilebilmekte olup, bu değerlerin örneğin bozunmaya başladığı çevrimi ifade ettiği düşünülmektedir. Ancak bu çalışmada, negatif değerler değerlendirme dışı bırakılmıştır. Angeli ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmalarda, elde edilen bozunma hızı değerlerine göre kayalar üç gruba ayrılmıştır.

a) AV > %5 (Yüksek bozunma hızı)
b) AV = %1 - %5 (Orta bozunma hızı)
c) AV < %1 (Düşük bozunma hızı)

Kütle değişimleri incelendiğinde, Şekil 6 ve 7'de gösterildiği üzere 1, 2, 5, 7, 8, 9, 10, 11 ve 12 numaralı kayalarda ikinci aşama gözlemlenmemiştir. 1 numaralı bazalt örneğinde, bozunma süreci 20. çevrimden sonra başlamış ve kütle kaybı gözlenmiştir. 2 numaralı kalkarenit örneğinde ise bu süreç 15. çevrimde başlamış olup, buna göre bozunma hızı (AV) hesaplanmıştır. 3 numaralı traverten örneği yüksek gözeneklilik nedeniyle 25 çevrim boyunca tuz birikimine bağlı olarak sürekli kütle artışı göstermiştir. 4 numaralı andezit ve 6 numaralı kireçtaşı örneklerinde ikinci aşama gözlemlenmiş, her iki örnekte de bozunma süreci 20. çevrimden itibaren başlamıştır. 8 numaralı travertenin, 5. çevriminde, numunenin kütlesi artarken, 10. çevriminde numunenin kütlesi azalmakta, ardından ise 25. çevriminde yeniden numunenin kütlesinde artış gelişmiştir. Bu durum, kayanın boşluklu yapısına tuz birikmesiyle açıklanabilir. Ancak, örneklerin homojen olmaması nedeniyle bazı çevrimlerdeki 8 numaralı traverten örneklerinde bozunma süreci daha erken başlamış ve buna bağlı olarak kütle kaybı yaşanmıştır. Benzer bir durum 9 numaralı traverten örneğinde de görülmüş; bu örnekte 20. çevrimden sonra kütle artışı kaydedilmiştir. 12 numaralı killi kireçtaşı örneğinde yalnızca birinci aşama gözlenmiş, kaya 10. çevrime kadar kütle kaybı göstermiş; sonrasında ise sürekli bir kütle artışı yaşanmıştır. Bu durum, malzemenin yüksek boşluk oranına ve düşük dayanımına bağlanabilir. Bu nedenle, aynı numuneye ait örnekler bozunmaya karşı farklı davranışlar sergilemiştir. 13 numaralı ignimbirit örneği, 15. çevrimden önce başlangıçtaki fiziksel koşullarını yitirdiği için deneye son verilmiştir. Bu örnekte bozunma, deneyin başından itibaren başlamış olup, 5. çevrime kadar ikinci aşama, 10. çevrime kadar ise üçüncü aşama gözlenmiştir. Tüm örneklere ait hesaplanan bozunma hızı (AV) değerleri Tablo 3'te sunulmuştur.



Şekil 6 - 1 ile 8 arasındaki örneklerde MgSO4 tuz kristallenmesi deneyi sonrası meydana gelen kütle değişimleri



Şekil 7 - 9 ile 13 arasındaki örneklerde MgSO4 tuz kristallenmesi deneyi sonrası meydana gelen kütle değişimleri

Tablo 3. Bazı örneklerin bozunma hızı (AV) değerleri

Örnek No	Üçüncü Aşama Başlangıç Kütle Değeri (%)	Üçüncü Aşama Sonu Kütle Değeri (%)	Üçüncü Aşama Başlangıç Çevrim Sayısı	Üçüncü Aşama Sonu Çevrim Sayısı	AV (%)	Bozunma Hızı
1	100.3	100.2	20	25	0.032	Düşük
2	100.1	99.9	15	25	0.016	Düşük
4	100.6	100.4	20	25	0.042	Düşük
6	101.6	101.5	20	25	0.028	Düşük
11	101.6	100.5	20	25	0.208	Düşük
13	98.7	94.7	5	10	≥1	Orta - Yüksek

4. Sonuçlar

Kaya örneklerin uzun süreli atmosferik koşullar altında kalması ve maruz kaldığı koşullar kütlesel kayıplara neden olmaktadır. Kütlesel kayıplarda en yüksek hızlandırıcı ise tuz gibi aşındırma özelliği olan malzemelerden kaynaklanmaktadır. Laboratuvar ortamında yapılan hızlandırılmış testler ile kütlesel kayıplar belirlenirken bu kayıpların sayısal olarak ifadesi için de farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada da bu yöntemlerden olan bozunma hızı indeksi değeri ile kaya malzemedeki bozunmaya bağlı kayıpların derecesi ortaya konulmuştur. Seçilen on üç farklı mineralojik ve petrografik özelliğe sahip kayada bozunma hızı değerlerine bakıldığında, porozite değerinin artmasının bozunma hızı değerini de arttırdığı belirlenmiştir. Çoğunlukla, çevrimler ilerledikçe gözeneklilik değeri artış yönünde bir eğilim göstermektedir. Tuz kristallerinin kolayca kristalleşebildikleri boşluklarda ani ağırlık artışlarının ardından gelişen düşüşlerin bozunma hızında kaydadeğer bir öneme sahip olduğu görülmüştür. Granit gibi boşluk oranı çok düşük olan kayaların bozunma hızı tayininde, yöntemde verilen birinci, ikinci ve üçüncü aşamalar net şekilde gözlemlenirken, ignimbirit gibi porozite oranı yüksek kaya malzemelerde ise ilk iki aşamayı görmek pek mümkün olmayabilmekte ve ağırlık kaybı çok hızlı bir şekilde gelişebilmektedir. Bu duruma porozitenin dışında, kayanın fiziksel yapısı ile ilişkili dayanım özellikleri de etkili olmaktadır. Özellikle atmosferik koşullar altında kalan ve yüksek porozite değerine sahip olan kaya malzemeler için bozunma hızı değerlerine mutlaka bakılmalı ve malzeme seçimine öyle karar verilmelidir. Diğer yandan, $MgSO_4$ tuz kristallenmesi çevrimlerinin, örneklerin mekanik değerleri üzerinde de çoğunlukla azalan bir eğilim gösterdiği söylenebilir.

Kaynaklar

Akın, M., 2008. Eskipazar Karabük Travertenlerinin Bozunmasının Araştırılması. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği, Ankara, Doktora Tezi, 280 s.

Akın, M., ve Dinçer, İ., Özvan, A., Oyan, V., Tapan, M., 2016. İgnimbiritlerdeki Kılcal Su Emme Özelliğinin Ahlat Selçuklu Mezar Taşlarının Bozunmasındaki Rolü. Jeoloji Mühendisliği Dergisi. 40 (2).

Akın, M., Özvan, A., Dinçer, İ., Topal, T., 2017. Evaluation of the physico-mechanical parameters affecting the deterioration rate of Ahlat ignimbrites (Bitlis, Turkey). Environmental Earth Sciences. 76:827.

Angeli, M., Bigas, J.P., Benavente, D., Menendez, B., Hebert, R., David, C., 2007. Salt crystallization in pores: quantification and estimayion of damage. Environmental Geology. 52. 205-213.

Benavente, D., Del Cura, M.A.G., Fort, R., Ordonez, S., 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. Engineering Geology. 74, 113-127

Benavente, D., Cueto, J., Martinez, N., Garcia, M.A., Canaveras, J.C., 2007. The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. Environmental Geology. 52, 197-206.

ISRM The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Ulusay R, Hudson JA, editors. Ankara: Kozan Ofset; 2007.

Jackson, M.D., Marra, F., Hay, R.L., Cawood, C., Winkler, E.M., 2005. The judicious selection and preservation of tuff and travertine building stone in ancient Rome. Archaeometry. 47(3), 485-510.

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.

RILEM Recommended Tests To Measure The Deterioration Of Stone And To Assess The Effectiveness Of Treatment Methods. Commission 25-PEM. Material and Structures. 13, 175-253, 1980.

Seiki, T., Aydan, Ö., 2003. Deterioration of Oya tuff and its mechanical property change as building stone. Proceedings of Industrial Minerals and Building Stones. 329-336.

Sousa, L.M.O., Del Rio, L.M.S., Calleja, L., De Argandona, V.G.R., Rey, A.R. 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. Engineering Geology. 77, 153-168.

TS 699 Doğal Yapı Taşları, İnceleme Ve Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü.ICS 91.100.01; 91.100.15. Ankara. 2009.

Topal, T., Doyuran, V., 1997. Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. Environmental Geology. 34(1), 5-19.

Tuğrul, A., Zarif, İ.H., 1998. The influence of mineralogical, textural and chemical characteristics on the durability of selected sandstones in İstanbul, Turkey. Bull. Engineer Geology Environmental. 57, 185-190.

Tuğrul, A., 1997. Change in pore size distribution due to weathering of basalts and its engineering significance. Engineering Geology and the Environment, Proc. International. Symp. On Engineering Geology and the Environment. IAEG (pp. 419-424), Athens, Greece.

Tuğrul, A., 2004. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. Engineering Geology. 75, 215-227.