

## ENJEKSİYONLA ANKRAJ YAPILAN KAYA BULONLARI ÜZERİNDE DONMA-ÇÖZÜNMENİN ETKİSİ

### THE EFFECTS OF FREEZE-THAW ON THE ROCK BOLTS ANCHORED BY GROUTING

Alaattin SAKCALI<sup>1</sup>, Fatih ARTUK<sup>2</sup>, Ahmet Şahin ZAIMOĞLU<sup>3</sup>

#### ÖZET

Tünellerde tahkimat elemanı olarak kullanılan kaya bulonları tünel giriş ve çıkışlarında şev stabilitesi amacıyla kullanılmaktadır. Karasal iklimin yaşandığı bölgelerde uygulanan kaya bulonlarında donma-çözünme sonrası zayıflama nedeniyle ankraj kapasitelerinde değişim olabilir. Literatürde donma-çözünmenin kaya bulonu uygulamalarının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmada genellikle malzemeler bağımsız olarak incelenmekte ve kaya bulonlu sistemler bütüncül olarak yeterince ele alınmamaktadır. Bildiride bulon kaya içerisine enjeksiyonla ankraj edilerek oluşturulmuş kaya bulonlu numunelerde donma-çözünmenin etkileri incelenmiştir. Ayrıca, kaya bulonlu numuneyi oluşturan kaya ve enjeksiyon malzemelerinde donma-çözünme sonrası meydana gelen değişimler ele alınmıştır. Çalışmada kaya olarak riyodasit, bulon olarak Ø12 nervürlü donatı ve enjeksiyon sıvısı olarak su/çimento oranı (S/Ç) 0,4 olan karışım seçilmiştir. Hazırlanan enjeksiyon, kaya ve kaya bulonlu numuneler 14, 56, 84 ve 140 donma-çözünme çevrimlerine tabi tutulmuştur. Enjeksiyon numunelerinde 90 çevrim sonrası kırılmalar meydana geldiği için bu çevrimden sonra çevrimler sonlandırılmış ve 84 çevrime kadar yapılan deneyler değerlendirilmiştir. Laboratuvar deney sonuçları, donma-çözünme çevrimlerinin kaya ve enjeksiyon numunelerinde fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişikliğe neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kaya bulonlu numunelerde başlangıçta 49.935 kN olan çekme kuvvetinin 84 çevrim sonrasında 34.628 kN'ye düşmesi, donma-çözünmenin ankraj kapasitesini düşürdüğünün bir kanıtıdır. Sonuç olarak, donma-çözünmenin kaya bulonu performansına olumsuz etki ettiği ve tasarımda bu etkinin değerlendirilmesi gerektiği belirlenmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Ankraj kapasitesi, Çekme kuvveti, Donma-çözünme, Kaya bulonu, Tünel*

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Atatürk Üni. Mühendislik Fak. İnşaat Müh., alaattinsakcali@atauni.edu.tr (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Arş. Gör. Dr., Atatürk Üni. Mühendislik Fak. İnşaat Müh., fatih.artuk@atauni.edu.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr., Atatürk Üni. Mühendislik Fak. İnşaat Müh., zaimoglu@atauni.edu.tr



## ABSTRACT

The rock bolts, which are used as support elements in tunnels, are used for slope stability at tunnel entrances and exits. The rock bolts applied in the regions with a continental climate may change in their anchorage capacity due to weakening after freeze and thaw. There are studies in the literature investigating the effects of freeze-thaw on the mechanical properties of the rock bolt applications. In these studies, the materials are generally examined independently and the rock bolt systems are not adequately addressed holistically. In the paper, the effects of freeze and thaw on the rock bolted samples formed by anchoring the bolt into the rock with grout were examined. Additionally, the changes occurring in the rock and grout materials that make up the rock bolted sample after freeze and thaw are discussed. Rhyodacite as the rock, Ø12 ribbed support as the bolt, and the mixture with a water/cement (W/C) ratio of 0.4 as the grout was selected in the study. The prepared grout, rock and rock bolted samples were subjected to 14, 56, 84 and 140 freeze-thaw cycles. Since fractures occurred in the injection samples after 90 cycles, the cycles were terminated after this cycle and the experiments up to 84 cycles were evaluated. The test results in laboratory show that freeze-thaw cycles cause changes in the physical and mechanical properties of rock and grout samples. The fact that the tensile force in rock bolted samples, which was initially 49.935 kN, decreased to 34.628 kN after 84 cycles is evidence that freeze-thaw reduces the anchorage capacity. The test results showed that the initial tensile force, which was 49.935 kN, decreased to 34.628 kN after 84 cycles. In addition, it was determined that freeze-thaw cycles caused changes in the physical and mechanical properties of rock and grout samples. The study reveals that freeze-thaw cycles negatively affect the rock bolt anchorage capacity. As a result, it was determined that freeze-thaw negatively affects the rock bolt performance and this effect should be evaluated in the design.

*Keywords: Anchorage capacity, Freeze-thaw, Pull-out force, Rock bolt, Tunnel*

## 1. GİRİŞ

Kaya bulonları tünellerin yanı sıra tünel portalları ve şev stabilitesi gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında tahkimat elemanı olarak kullanılmaktadır. Tünel portalları ve şev stabilitesi amacıyla daha çok tam enjeksiyonlu (fully grouted) kaya bulonları tercih edilmektedir. Özellikle karasal iklimin hüküm sürdüğü bölgelerde don derinliğinde uygulanan kaya bulonlarının ankraj kapasitesi donma-çözünmenin etkisiyle azalmaktadır. Türkiye’de denize kıyısı olan yerlerde don derinliği çok düşük olsa da 160 cm’ye kadar çıktığı yerlerde bulunmaktadır (KEÜPR, 2008). Don derinliğinde meydana gelen donma-çözünme zayıflaması neticesinde kayma veya kaya düşmesi gibi problemler tetiklemektedir.

Kaya bulonu uygulamalarında ankraj kapasitesine etki eden etmenler kaya, enjeksiyon ve bulondur. Enjeksiyonla ankre edilen kaya bulonlarında donma-çözünmeden kaynaklı zayıflama kaya ve enjeksiyonda meydana gelecektir. Bu bağlamda literatürde donma-çözünmenin kayanın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalar yapılmıştır. Hale ve Shakoor (2003) donma ve çözünme çevrimlerinden dolayı kumtaşının basınç dayanımındaki değişimi analiz etmişlerdir. Chen vd. (2004) yaptığı çalışmada donma-



çözünme etkisiyle yüksek gözenekli tuf üzerinde suya doygunluğun etkisini incelemişlerdir. Topal ve Sözmen (2003) beyaz ve pembe renkli tüflerin bozulma modunu araştırmak için laboratuvarda donma-çözünme analizi yapmışlardır. Yavuz vd. (2006) çalışmalarının bir bölümünde karbonatlı kayaların donma-çözünme sonrası dayanıklılığını ve stabilitesini anlamak için endeks özelliklerini veren eşitli önerisi yapmışlardır. Karaca vd. (2010) donma-çözünme çevrimlerine maruz kalan kayada Böhme aşınmasının etkisini incelemişlerdir. Yavuz (2011) andezit üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada donma-çözünmenin kaya dayanıklılığı ve dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bayram (2012) dokuz kireçtaşında yaptığı çalışmada donma-çözünme sonrası fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimi incelemiştir. Khanlari ve Abdilor (2015) farklı kumtaşlarında yaptıkları çalışmalarında donma-çözünmenin etkilerini incelemişlerdir. Ding ve Song (2016) kumtaşlarında gerçekleştirdikleri çalışmalarında donma-çözünme sonrası P-dalga hızı ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemişlerdir. Fang vd. (2019) çalışmaların donma-çözünme koşullarında yük uygulanmış kayada meydana gelen hasarın istatistiksel bir modelin kurmuşlardır. Zhang vd. (2020) donma-çözünme çevrimlerine bırakılan konsolide basınçtaki kayanın özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir.

Enjeksiyonda donma-çözünmeden kaynaklanan zayıflamanın incelendiği çalışmalar kayadaki araştırmalara göre daha azdır. Rios ve Hashemian (2019) köpük enjeksiyonların donma-çözünme koşullarında performanslarını incelemişlerdir. Zhong vd. (2023) donma-çözünme hasarına maruz kalan çimento enjeksiyon ile beton arasındaki bağ performansını araştırmışlardır. Wei vd. (2023) donma-çözünmenin değişen içerikli çimento enjeksiyonlarına etkisini incelemişlerdir.

Literatürde kaya bulonlarında donma-çözünmenin etkisinin araştırıldığı az sayıda çalışma mevcuttur. An ve Nai (2012) eklemlı kayalarda donma-çözünme çevrimlerinin ankraj sistemlerinde bozunmalara yol açtığını ve çevrim sayısının artmasıyla ankraj kapasitesinde belirgin bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Zhang vd. (2021) çalışmasının bir bölümünde kaya bulonlarının donma-çözünme sonrasındaki davranışlarını incelemişlerdir. Yuan vd. (2021) donma-çözünme çevrimlerine maruz kalan kaya bulonlarında çekme dayanımında azalma, deformasyonlarda ise artma tespit etmişlerdir. Zhang vd. (2022) çalışmalarında sundukları analitik ilişkilerde donma-çözünme sonrası kaya bulonlarının mekanik özelliklerinin belirlenebileceğini vurgulamışlardır.

Görüldüğü üzere literatürde kaya, enjeksiyon ve kaya bulonları ayrı ayrı çalışılmış, tümünün birlikte değerlendirildiği çalışma yok denecek kadar azdır. Bu çalışmada enjeksiyon ile kayaya ankre edilmiş bulonların kesme gerilmesi üzerinde donma-çözünmenin etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla kaya, enjeksiyon ve kaya bulonlu numuneler hazırlanmış olup farklı donma-çözünme çevrim sayılarına (14, 56, 84, 140) maruz bırakılmıştır. 90 çevrim sonrası enjeksiyon numunelerinde kırılmalar olduğu için 84 çevrime kadarki çevrimler değerlendirilmiştir. Çalışmalarda kaya olarak riyodasit, enjeksiyon olarak maksimum dayanımı veren S/Ç 0,4 olan enjeksiyon sıvısı kullanılmıştır. Donma-çözünme çevrimlerindeki artışın ankraj kapasitesini düşürdüğü ve bu azalmanın kaya ve enjeksiyon malzemelerinde meydana gelen zayıflamalardan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

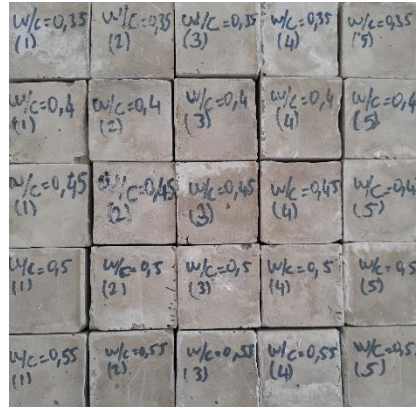


## 2. MALZEME VE İZLENEN YÖNTEM

### 2.1. Su/Çimento Oranının Belirlenmesi

Enjeksiyon sıvısı belirlenirken farklı S/Ç oranları kullanılarak ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon sıvısında CEM I 42,5 R sınıfı portland çimento (TS EN 197-1, 2012) kullanılmıştır.

Ön deneyler için S/Ç oranları 0,35; 0,40; 0,45; 0,50 ve 0,55 olarak belirlenmiş olup 5x5x5 cm boyutlarında küp numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin tek eksenli basınç dayanımı belirlenmiş (TS EN 196-1, 2009) ve en yüksek dayanıma sahip enjeksiyon sıvısı (W/Ç=0,4) deneylerde kullanılmıştır (Tablo 1). Farklı S/Ç oranlarında hazırlanmış enjeksiyon numuneleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Enjeksiyon numuneleri (Farklı S/Ç oranları)

Tablo 1. Enjeksiyonların tek eksenli basınç dayanımları (farklı S/Ç oranları)

S/Ç	Enjeksiyon tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{cB}$ )	
	7 günlük kür sonrası	28 günlük kür sonrası
0,35	33.86±1.84	35.75±1.32
0,40	36.79±0.57	40.70±1.54
0,45	33.95±1.80	35.73±2.10
0,50	23.14±0.56	25.91±0.61
0,55	22.89±0.59	23.99±1.60

### 2.2. Kaya Numunesi

Kaya bulonlu numunelerde eksenel çekme testi sırasında kayada kırılma olmaması için kaya bulonlu numuneler hazırlanırken sağlam bir kaya türü tercih edilmiştir. Erzurum sınırlarındaki bir ocakta çıkarılan volkanik kökenli, kalkalkali riyolit grubundaki yüzey kayaçlarından riyodasit seçilmiştir. Tercih edilen kayacın donma-çözünme öncesi başlangıç fiziksel ve mekanik özellikleri TS 699 (2009)'a göre belirlenmiştir (Tablo 2).



Tablo 2. Kayanın fiziko-mekanik özellikleri

Kaya özellikleri	Değerler
Tek eksenli basınç dayanımı, $\sigma_{cir}$ (MPa)	106.94±12.95
Elastik modül, $E_{ir}$ (GPa)	34.38±8.61
Birim hacim ağırlık, $d_h$ (gr/cm <sup>3</sup> )	2.38±0.005
Görünür gözeneklik, $P_a$ (%)	3.21±0.06
Ağırlıkça su emme oranı, $S_w$ (%)	2.11±0.04
P-dalga hızı, $V_p$ (km/sn)	3.82±0.09

### 2.3. Kaya Bulonu

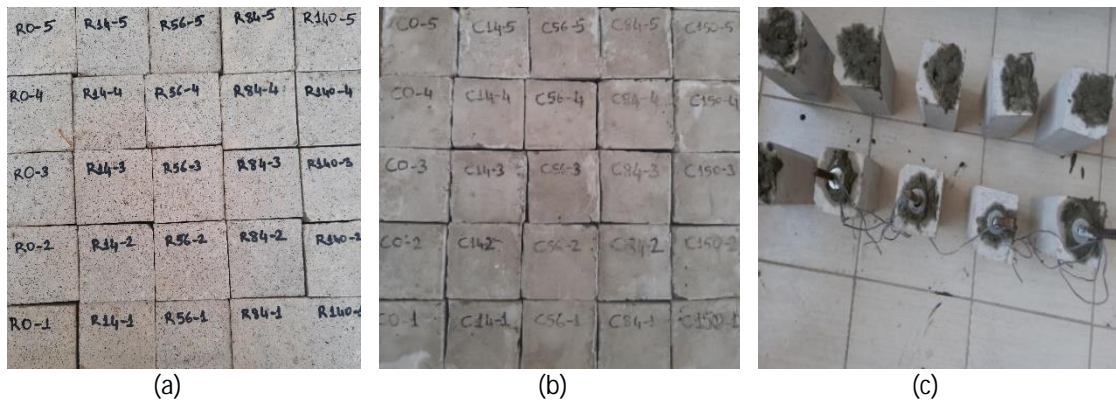
Kaya bulonu olarak 12 mm çaplı nervürlü demir kullanılmıştır. ASTM A615/A615M-20 (2020) standartlarındaki nervürlü demirin çekme dayanımı 500 MPa, akma dayanımı 420 MPa, elastik modülü 210 GPa ve birim hacim ağırlığı 7,85 g/cm<sup>3</sup>'dir.

### 2.4. Numunelerin Hazırlanması

Farklı donma-çözünme çevrimleri (14, 56, 84, 140) için kaya, enjeksiyon ve kaya bulonlu numuneler hazırlanmıştır. Kaya numuneleri her bir çevrimde 5'er adet olmak üzere 6x6x6 cm boyutlarında hazırlanırken başlangıç koşulu da dâhil toplamda 25 numune hazırlanmıştır.

Ön deneylerle belirlenen enjeksiyon sıvısı ( $S/\Ç = 0,4$ ) kullanılarak donma-çözünme çevrimleri için her bir çevrime 5 adet olacak şekilde 5x5x5 cm'lik enjeksiyon numuneleri hazırlanmış (toplamda 25 numune) ve 28 gün havada kür gerçekleştirilmiştir.

Kaya bulonlu numuneler hazırlanırken ilk olarak 10x10x20 cm boyutlarında kayalar kesilmiştir. Kayaların merkezine 24 mm çapında ve 19 cm uzunluğunda silindirik delikler açılmıştır. Açılan deliklere önceden belirlenen enjeksiyon sıvısı doldurulmuş ve bulon çukur merkezi ile merkezlenerek kaya içerisine yerleştirilmiştir. Her bir çevrim için 4, toplamda 20 kaya bulonlu numune hazırlanmıştır. Kaya, enjeksiyon ve kaya bulonlu numunelerin hazırlanması sırasında alınan anlık görüntüler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Numuneler; a) Kaya b) Enjeksiyon, c) Kaya bulonlu



## 2.5. Donma-Çözünme Deneyi

Donma-çözünme deneyleri TS EN 12371 (2011)'a göre havada donma ve suda çözünme çevrimleri ile gerçekleştirilmiştir. Her bir çevrim  $-12^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat havada donma ve  $+20^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat suda çözünmeden oluşmaktadır. Hazırlanan kaya, enjeksiyon ve kaya bulonlu numuneler farklı donma-çözünme çevrim sayılarında (14, 56, 84 ve 140) deneye tabi tutulmuştur. Donma-çözünme çevrimleri sonrasında numunelerin hava şokuna maruz kalmaması için  $105^{\circ}\text{C}$ 'de 48 saat kurutulmuş ve etüv içerisinde 24 saat kapalı ortamda bekletilmiştir. Kaya, enjeksiyon ve kaya bulonlu numunelere ait donma-çözünme çevrimlerinde alınan anlık görüntüler Şekil 3'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. Donma-çözünme; a) Donma, b) Çözünme

## 2.6. Donma-Çözünme Sonrası Fiziko-Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Kaya ve enjeksiyon numunelerine ait fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimin incelenmesi için 0,01 gr hassasiyetli Archimed terazisi (Şekil 4.a), 54 kHz frekanslı problarla ölçüm yapan Qust 126+ ultrasonik test cihazı (Şekil 4.b) ve 300 ton kapasiteli BESMAK marka hidrolik basınç test cihazı (Şekil 4.c) kullanılmıştır. Kaya bulonlu numunelerde ise eksenel çekme testi için BESMAK marka hidrolik basınçlı çekme test cihazı (Şekil 4.d.) kullanılmıştır.

Kaya ve enjeksiyon numuneleri için başlangıçta ve her bir çevrim sonrası ultrasonik dalga hızı (UPV), görünür gözeneklilik ve ağırlıkça su emme oranı (suda doyurma ile birim hacim ağırlığın-BHA belirlenmesi testi) belirlenmiştir. Tahribatsız belirlenen bu özelliklerden sonra numuneler tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) testine tabi tutulmuştur. Her bir numuneye ait elastik modül tek eksenli basınç deney aleti ile otomatik belirlenmiştir.

Hem donma-çözünme çevrimi yapılmayan hem de farklı donma-çözünme çevrimine tabi tutulan kaya bulonlu numunelerde ise eksenel çekme deneyi yapılmıştır.





(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4. Test cihazları; a) Suya doyurma ile BHA, b) UPV, c) TEBD, d) Eksenel çekme

### 3. DEĞERLENDİRME

#### 3.1. Kaya ve Enjeksiyon Numunelerindeki Değişim

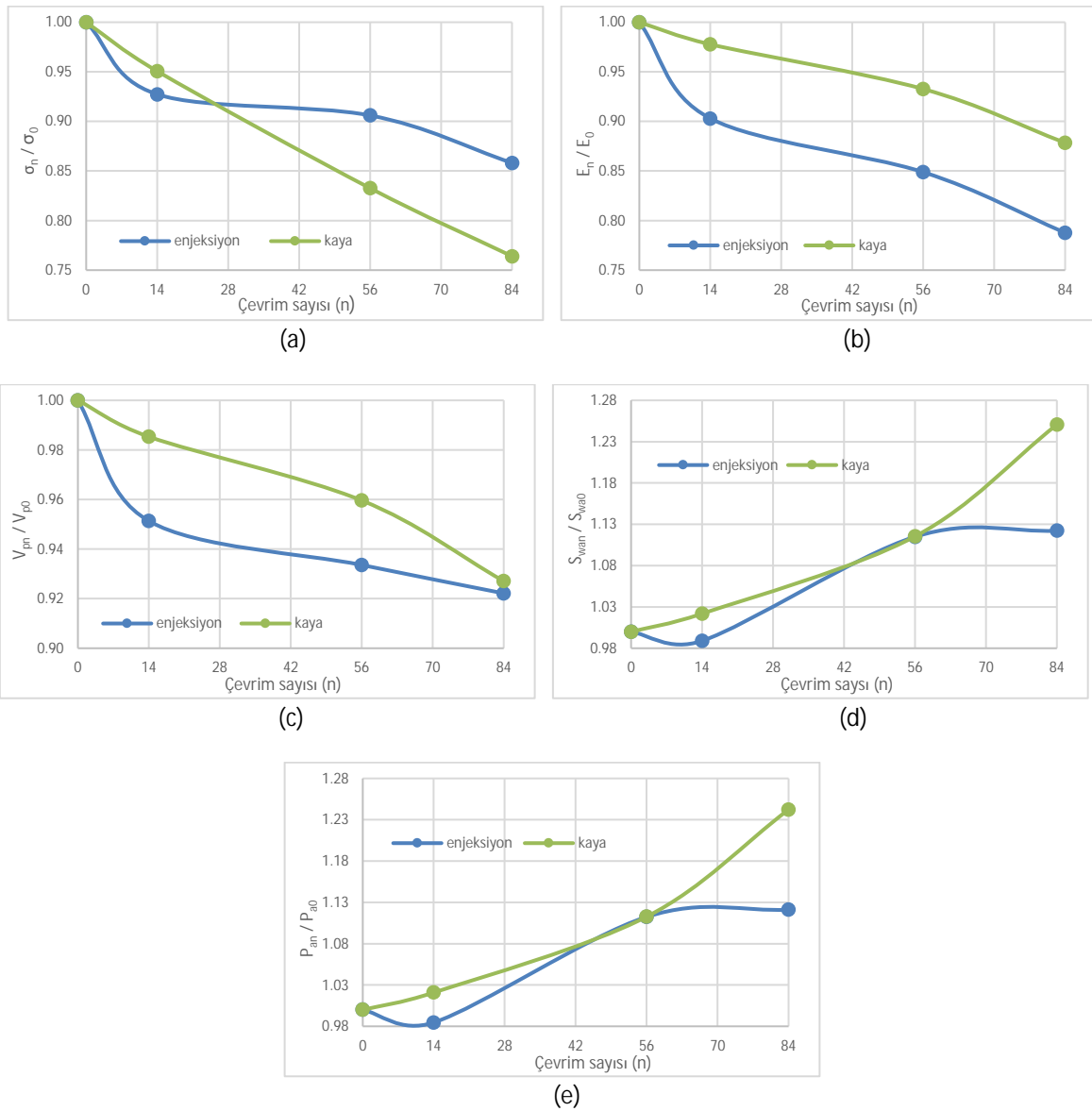
Donma-çözünme deneyleri gerçekleştirilirken 90 çevrim sonrası enjeksiyon numunelerinde kırılmalar meydana geldiği için 150 çevrim değerlendirmede kullanılmamıştır. Her bir donma-çözünme çevrimi sonrasında kaya ve enjeksiyon numunelerinin fiziko-mekanik özelliklerindeki değişim belirlenmiştir. Kaya ve enjeksiyon numunelerine ait tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ), elastik modülü (E), P-dalga hızı ( $V_p$ ), ağırlıkça su emme oranı ( $S_w$ ) ve görünür gözeneklilikteki ( $P_a$ ) değerler Tablo 3'te verilmiştir.



Tablo 3. Donma-çözünme sonrası numunelerin fiziko-mekanik özellikleri

Malzemeler	Çevrimler	$\sigma_c$ (MPa)	E (GPa)	$V_p$ (km/sn)	$S_w$ (%)	$P_a$ (%)
Kaya	Başlangıç koşulu	106.94±12.95	34.38±8.61	3.82±0.09	1.35±0.03	3.21±0.06
	14 çevrim sonrası	101.66±11.56	33.62±11.00	3.78±0.13	1.38±0.19	3.28±0.44
	56 çevrim sonrası	89.05±12.82	32.07±7.52	3.67±0.36	1.51±0.21	3.57±0.49
	84 çevrim sonrası	81.71±8.24	30.20±10.32	3.54±0.19	1.69±0.28	3.99±0.64
Enjeksiyon	Başlangıç koşulu	40.70±1.54	18.75±0.64	3.41±0.19	14.10±1.42	24.99±2.46
	14 çevrim sonrası	37.74±1.05	16.93±2.29	3.25±0.09	13.94±1.80	24.61±2.68
	56 çevrim sonrası	36.87±2.02	15.91±3.23	3.19±0.13	15.71±0.21	27.80±0.35
	84 çevrim sonrası	34.93±2.49	14.77±1.10	3.15±0.11	15.82±0.26	28.02±0.48

Tablo 3'teki değerler normalize edilerek çevrim sayısı ile TEBD, elastik modülü, P-dalga hızı, ağırlıkça su emme oranı ve görünür gözeneklilik ilişkileri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Çevrim sayısı-normalize edilmiş fiziko-mekanik özellikler ilişkileri; a) Çevrim sayısı-TEBD, b) Çevrim sayısı-Elastik modül, c) Çevrim sayısı-P-dalga hızı, d) Çevrim sayısı-Ağırlıkça su emme oranı, e) Çevrim sayısı-Görünür gözeneklilik





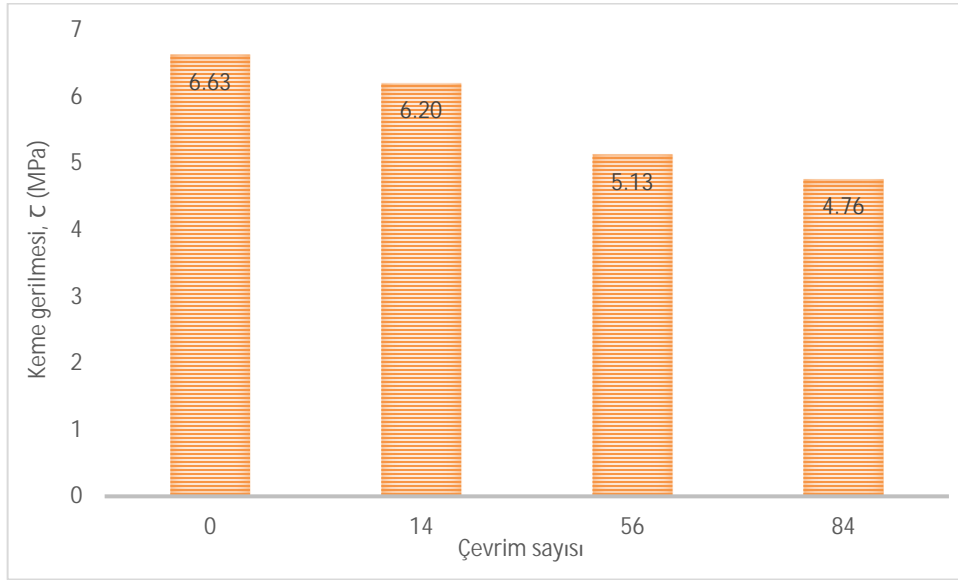
Şekil 5.a incelendiğinde, hem kaya hem de enjeksiyon numunelerinde donma-çözünme çevrim sayısı artışı ile normalize edilen tek eksenli basınç dayanımı azalmıştır. Benzer olarak, Şekil 5.b ve c'de sırasıyla elastik modül ve P-dalga hızında da çevrim sayısı arttıkça özelliklerdeki azalma oluğu görülmüştür. Şekil 5.d ve e bakıldığında ise, çevrim sayısındaki artış ile ağırlıkça su emme oranı ve görünür gözeneklilik artmıştır.

### 3.2. Kaya Bulonlu Numunelerdeki Değişim

Her bir donma-çözünme çevrimi sonrası kaya bulonlu numuneler üzerinde yapılan eksenel çekme deneyi sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'deki değerler kullanılarak kaya bulonları için her bir donma çözünme çevrim sonrası belirlenen kesme gerilmesi-çevrim sayısı ilişkisi Şekil 6'da gösterilmiştir.

Tablo 4. Maksimum eksenel çekme kuvveti (farklı çevrimler sonrası)

Çevrimler	Maks. çekme kuvveti (kN)
Başlangıç koşulu	49.935±2.309
14 çevrim sonrası	44.188±1.969
56 çevrim sonrası	37.230±2.012
84 çevrim sonrası	34.628±2.453



Şekil 6. Kesme gerilmesi-çevrim sayısı ilişkisi

Şekil 6 incelendiğinde, donma-çözünme çevrim sayısının artması ile kaya bulonlarındaki kesme gerilmesinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, kaya ve enjeksiyon numunelerindeki donma-çözünme çevrim sayısının artmasına bağlı olarak meydana gelen azalmadan kaynaklanmaktadır.

## 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Çalışmada don derinliğinde gerçekleştirilmiş kaya bulonu uygulamalarında donma-çözünmenin etkisi ele alınmıştır. Bu amaçla laboratuvar ortamında kaya bulonu uygulaması farklı çevrimlerde donma-çözünmeye bırakılmış ve eksenel çekme kuvveti altında kesme gerilmesi değişimlerine bakılmıştır.



Ayrıca, kaya bulonlu numuneleri meydana getiren kaya ve enjeksiyonun donma-çözünme çevrimleri sonrası değişimine de bakılmıştır. Çalışmada elde edilen bulgu ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Literatürdeki birçok çalışmada olduğu gibi donma-çözünme çevrimlerindeki artış ile kaya ve enjeksiyon numunelerinin dayanım, elastik modül ve P-dalga hızı azalmış; görünür gözeneklilik ve ağırlıkça su emme oranı artmıştır.
- Kaya bulonlu numunelerde donma-çözünme sayısındaki artış ile eksenel çekme kuvveti azalmıştır. Eksenel çekme kuvvetinde meydana gelen maksimum kesme gerilmesi 84 çevrim sonrası başlangıç koşuluna göre %30 azalmıştır.
- Kaya bulonunda meydana gelen kesme gerilmesindeki azalmalar donma-çözünme sonrası kaya ve enjeksiyon numunelerinin fiziko-mekanik özelliklerindeki değişimlerden kaynaklanmaktadır.
- Çalışma karasal iklim koşullarında gerçekleştirilen kaya bulonu tasarımında donma-çözünmeden kaynaklanan zayıflamanın dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

## TEŞEKKÜR

*Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde sağladıkları destek için Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Proje No: FBA-2022-10770) teşekkür ederiz.*

## KAYNAKLAR

- An, Y.K., Nai, L. (2012), "Mechanism and Style of Anchorage Degradation in Jointed Rock Mass Under Cycle of Freezing and Thawing", J. Jinlin Univ., Vol 42, Issue 2, 462-467.
- ASTM A615/A615M-20 (2020), "Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement" ASTM Int, West Conshohocken, PA.
- Bayram, F., (2012), "Predicting Mechanical Strength Loss of Natural Stones after Freeze-Thaw in Cold Regions", Vol 83-84, 98-102. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.07.003>
- Chen, T.C., Yeung, M.R., Mori, N. (2004). "Effect of Water Saturation on Deterioration of Welded Tuff due to Freeze-Thaw Action", Cold Reg. Sci. Technol., Vol 38, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2003.10.001>
- Ding, Q.L., Song, S.B. (2016), "Experimental Investigation of the Relationship Between the P-wave Velocity and the Mechanical Properties of Damaged Sandstone", Adv. Mat. Sci. Eng., No: 7654234, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2016/7654234>
- Fang, W., Jiang, N., Luo, X. (2019), "Establishment of Damage Statistical Constitutive Model of Loaded Rock and Method for Determining Its Parameters Under Freeze-Thaw Condition", Cold Reg. Sci. Technol., Vol 160, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.01.004>



- Hale, P.A., Shakoor, A. (2003), "A Laboratory Investigation of the Effects of Cyclic Heating and Cooling, Wetting and Drying, and Freezing and Thawing on the Compressive Strength of Selected Sandstones", *Environ Eng Geosci*, Vol 9, Issue 2, 117-130. <https://doi.org/10.2113/9.2.117>
- Karaca, Z., Deliormanli, A.H., Elci, H., Pamukcu, C. (2010), "Effect of Freeze-Thaw Process on the Abrasion Loss Value of Stones", *I. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol 47, 1207-1211. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.07.003>
- KEÜPR (2008), T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. Tenkik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 148.
- Khanlari, G., Abdilor, Y. (2015), "Influence of Wet-Dry, Freeze-Thaw, and Heat-Cool Cycles on the Physical and Mechanical Properties of Upper Red Sandstones in Central Iran", *Bull. Eng. Geol. Environ.*, Vol 74, 1287-1300. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0691-8>
- Rios, V.A.V, Hashemian, L. (2019), "Laboratory Investigation of Foam Grout Performance under Freeze and Thaw Conditioning", *Transport. Res. Rec.*, Vol 2673, Issue 8, 477-484. <https://doi.org/10.1177/0361198119845655>
- Topal, T., Sozmen, B. (2003), "Deterioration Mechanics of Tuffs in Midas Monument", *Eng. Geol.*, Vol 68, Issue 3-4, 201-223. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00228-4)
- TS 699 (2009), "Doğal Yapı Taşları- İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri.. Türk Standardı, Ankara, 36.
- TS EN 196-1 (2009), "Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 31.
- TS EN 197-1 (2012), "Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 21.
- TS EN 12371 (2011), "Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Dona Dayanım Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 8.
- Wei, Y., Dou, H., Gao, J., Su, R., Ma, S. (2023), "Frost-Heaving Behavior and Enhancement Approaches of Cement-Based Grout Materials under Freeze-Thaw Conditions", *Coatings*, Vol 13, No 1919, 1-21. <https://doi.org/10.3390/coatings13111919>
- Yavuz, H. (2011), "Effect of Freeze–Thaw and Thermal Shock Weathering on the Physical and Mechanical Properties of an Andesite Stone", *Bull. Eng. Geol. Env.*, Vol 70, 187-192. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0302-2>
- Yavuz, H., Altındag, R., Sarac, S., Ugur, I., Sengun, N., (2006), "Estimating the Index Properties of Deteriorated Carbonate Rocks due to Freeze–Thaw and Thermal Shock Weathering", *I. J. Rock Mech. Mining Sci.*, Vol 43, Issue 5, 767-775. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.12.004>
- Yuan, J., Ye, C., Yang, J., Xie, Z., Liu, J., Wang, S., Liu, Y. (2021), "Experimental and Numerical Investigation on the Deterioration Mechanism for Grouted Rock Bolts Subjected to Freeze–Thaw Cycles", *Bull. Eng. Geol. Env.*, Vol 80, 5563–5574. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02279-2>
- Zhang, H., Meng, X., Yang, G. (2020), "A Study on Mechanical Properties and Damage Model of Rock Subjected to Freeze-Thaw Cycles and Confining Pressure", *Cold Reg. Sci. Technol.*, Vol 174, No 103056, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103056>



- Zhang, W., Song, Y., Huang, L., Gong, S. (2022), "Analytical Relations for the Mechanical Properties of Full-Length Bonded Rock Bolts when Subjected to Freeze-Thaw Processes", *Comp. Geotech.*, Vol 145, No 104667, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104667>
- Zhang, W., Wang, L., Song, Y., Tan, Y. (2021), "Experimental Study on the Mechanical Properties of Grouted Rock Bolts Subjected to Sulfate Attack and Freeze-Thaw Cycling", *Constr. Build. Mat.*, Vol 291, No 123391, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123391>
- Zhong, S., Hu, X., Yang, B., Peng, G. (2023), "Bond Performance Between Cementitious Grout and Normal Concrete Subjected to Freeze-Thaw Damage", *Constr. Build. Mat.*, Vol 2405, No 133344, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133344>

## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$d_h$	Birim hacim ağırlık	$V_p$	P-dalga hızı
$E_{ir}$	Kaya elastik modülü	$\sigma_{cg}$	Enj. tek eks. basınç day.
$P_a$	Görünür gözeneklilik	$\sigma_{cir}$	Kaya tek eks basınç day.
$S_w$	Ağırlıkça su emme oranı	$C$	Kesme gerilmesi

