

Araştırma Makalesi / Research Article

Yangın Sonrası Soğuma Koşullarında Karbonat Yapı Taşlarındaki Mineralojik ve Mikro-Yapısal Değişimlerin Değerlendirilmesi

An Evaluation of Mineralogical and Micro-Structural Changes in Carbonate Building Stones under Post-Fire Cooling Conditions

Hasan KOLAYLI , Muhammet Oğuz SÜNNETÇİ* , Murat KARAHAN , Hakan ERSOY

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

Gelis, (Received): 29 Aralık (December) 2022, Düzeltme (Revised): 24 Ocak (January) 2023, Kabul (Accepted): 01 Şubat (February) 2023

ÖZ

Bu çalışmada yangın sonrası farklı soğutma modellerinin etkisi incelenmiştir. Isıtılan kayalar; (1) doğal çevre koşullarını temsil etmek için oda sıcaklığında, (2) soğuk mevsimleri temsil etmek için sıfırın altında ve (3) yangına müdahale senaryosu göz önüne alınarak suda soğumaya maruz bırakılmıştır. Çalışmada yapı taşı olarak sıklıkla kullanılan traverten, mermer ve kireçtaşı türündeki karbonat kayaları kullanılmıştır. Kayaların mineralojik bileşimlerini ve ısıtma-soğutma işlemlerinden sonra mineralojik değişimleri belirlemek için ince kesit incelemeleri ve XRD analizleri yapılmış, mikro-kırık gelişimini ortaya çıkarmak amacıyla SEM görüntüleri kullanılmış, fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimleri belirlemek için jeomekanik deneyler uygulanmıştır. Soğuma sonrasında, yeni mikro-çatlakların oluşumundan ziyade, mevcut mikro-çatlakların büyüdüğü görülmüştür. Kayaların dayanım özellikleri, soğuma süreçlerinden fiziksel özelliklere göre daha fazla etkilenmiş ve en düşük dayanım değerleri suda soğuma sonrası gözlenmiştir. Ani soğuma sonrası traverten ve mermerlerin çekme dayanımı %70-80 arasında azalırken, kil içeren kireçtaşlarında bu değer %30'u geçmemiştir. Sonuçlar, mevcut mikro-çatlakların büyümesi nedeniyle ani soğumanın genellikle yavaş soğumaya göre daha fazla termal hasara neden olduğunu, soğumanın kayaların termal bozunması üzerinde ısıtmadan daha etkili olduğunu ve kil içeriğine bağlı olarak bu etkinin arttığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Soğuma şekli, karbonat kayalar, termal hasar, yangın sonrası, yapı taşı

ABSTRACT

This study investigated the effects of different post-fire cooling types. Heated rocks were cooled (1) at room temperature to represent natural environmental conditions, (2) below zero to represent cold seasons, and (3) in water to mimic fire fighting scenarios. The study used, 3 different carbonate rocks frequently used as building material; travertine, marble, and limestone. Thin section studies and XRD analyzes were carried out to determine the mineralogical composition of the rocks and the mineralogical changes after the heating-cooling processes; SEM images were used to reveal the microfracture development; and geo-mechanical experiments were conducted to determine the changes in physical and strength properties. After cooling, it was observed that, rather than the formation of new micro-cracks, existing micro-cracks grew. The strength properties of the rocks were more affected by cooling processes than the physical properties, and the lowest strength values were observed after cooling in water. While the tensile strength of travertine and marble decreased 70-80% after sudden cooling, this value did not exceed 30% in limestone containing clay. The results show that rapid cooling generally causes more thermal damage than slow cooling due to

the growth of existing micro-cracks; and that cooling has a greater impact on the thermal degradation of rocks than heating, and this effect increases depending on the clay content.

Key Words: *Cooling type, carbonate rocks, thermal damage, post-fire, building stones*

GİRİŞ

Erozyon, donma-çözülme ve ıslanma-kuruma döngüleri, oksidasyon ve hidroliz gibi kimyasal olaylar kayaçların mikro-yapısal özelliklerinin değişmesinde, dolayısıyla dayanımlarının azalmasında etkili olan doğal ve yavaş süreçlerdir. Bu süreçler statik ve dinamik yükler, asidik çözeltiler ve yüksek sıcaklıklar gibi çevresel koşulların etkisiyle hızlanabilir. Kayaçlar; jeotermal alanlar, radyoaktif atık barındıran derin jeolojik bariyerler, gömülü petrol/doğal gaz hatları ve yüksek voltajlı güç kabloları gibi mühendislik uygulamalarının yapıldığı bölgeler, sıkıştırılmış veya sıvılaştırılmış doğal gaz/petrol barındıran yeraltı depoları ve derin yeraltı madenleri gibi alanlarda yüksek sıcaklıklara maruz kalabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçların fiziksel, dayanım ve mineralojik özelliklerindeki değişime (Ersoy vd., 2019; Zhu vd., 2020; Ersoy vd., 2021a; Meng vd., 2021; Wang vd., 2022) veya kayaçların termal iletkenliklerinin belirlenmesine (Nasseri vd., 2013; Pei vd., 2018; Villagraga vd., 2018; Abdulagatova vd., 2020; Emirov vd., 2021) odaklanan birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunda bir standart mevcut olmayıp, ısınma oranı, uygulanacak maksimum sıcaklık, maruz kalma süresi ve soğuma şekli çalışmadan çalışmaya farklılık göstermektedir. Çalışmaların çoğunda uygulanacak deneysel prosedürün ne tür bir ortamı, karakterize ettiği belirsizdir. Popov vd. (2016) tarafından hazırlanan bir "ISRM Önerilen Yöntem" mevcut olsa da bu yöntem yalnızca termal iletkenlik, termal yayılma ve hacimsel ısı kapasitesi parametrelerinin ölçülmesine yönelik detaylı bir metodoloji sunmaktadır.

Önerilen bir yöntem mevcut olmadığı için çalışmalarda genel olarak, hızlı ısıtmanın neden olduğu termal hasarı önlemek için kayalar genellikle lineer artış oranları dikkate alınarak ısıtılmış ve ısıtma hızı genellikle 1-10°C/dak arasında tutulmuştur. Ayrıca, ani soğuma etkisini ortadan kaldırmak için kayaçlar oda sıcaklığında ve/veya fırında yavaşça soğutulmuştur. Bu yavaş ısıtma ve soğuma oranları jeotermal sahalar, derin maden sahaları ve nükleer atıkların depolandığı derin jeolojik bariyerler için kabul edilebilir olsa da bir yangın sırasında sıcaklık artışı ve çevresel koşullara bağlı olarak meydana gelecek soğuma şeklini simüle etmek için yetersizdir.

Diğer sıcaklık koşullarından farklı olarak yangın anında ortam sıcaklığı doğrusal olarak artmaz, aksine aniden yükselip 5 dakikada 500°C'ye, 30 dakika sonra 800 °C'ye ulaşabilir (Ersoy vd., 2021b). Bu artış çoğunlukla logaritmik veya üsteldir ve en yüksek artış oranı ilk 5 dakika içinde gerçekleşir. Bu nedenle, özellikle yangınların kayalar üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda, ısı artış oranının, maksimum sıcaklığın, maruz kalma süresinin ve soğuma şeklinin gerçeğe yakın bir şekilde simüle edilmesi gerekir (Biro vd., 2019; Wang vd., 2020). Yeraltı madenlerinde meydana gelen grizu patlamalarında veya taş binalarda meydana gelen yangınlarda kayaçlar çok yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarından, soğuma şekli kayaçların dayanımının değişmesinde en az çevre koşullarının değişmesi kadar etkili olmaktadır (Sha vd., 2019; Han vd., 2019; Wang vd., 2020).

Birçok çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kayaçlar oda sıcaklığında soğutulsa da son yıllarda sıcak kuru kaya (SKK) jeotermal

sahalarında meydana gelen yüksek iletkenliğe sahip ikincil çatlakların oluşması sürecini simüle eden çalışmalar önem kazanmıştır (Wu vd., 2019; Chen vd., 2020; Feng vd., 2020; Sha vd., 2020; Rong vd., 2021). Kumari vd. (2017) granit örneklerini 800 dereceye kadar yüksek sıcaklıklara tabi tutmuş ve örnekleri fırın içinde çok yavaş ve su içinde ani soğumaya bırakmıştır. Özellikle ısıtılmış örneklerde ani soğumanın dayanım özelliklerindeki değişimde çok etkili olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde Kara (2021) tarafından 700 dereceye kadar ısıtılan kireçtaşı örnekleri su püskürtmeye maruz bırakılmış, ani soğuyan örneklerde boyuna dalga hızının (V_p) %70, tek eksenli sıkışma dayanımının (UCS) ise %45'in üzerinde değer kaybettiği ortaya koyulmuş ancak farklı soğumanın etkisinin net olarak görülmediği belirtilmiştir.

Bazı çalışmalarda ise ani soğutma etkisi su ve/veya sıvı nitrojen (LN_2) kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır (Wu vd., 2019; Sha vd., 2020; Rong vd., 2021). Sha vd. (2020) 600 °C kadar ısıtılan granitleri farklı soğuma şekillerine maruz bırakmış; artan sıcaklıklara bağlı olarak dayanımın sürekli azaldığı ve bu azalmanın en fazla LN_2 'ye maruz kalan örneklerde en az ise havada soğuyan örneklerde olduğu belirlemiştir. Benzer şekilde Rong vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada granit örnekleri 300 dereceye kadar ısıtılarak havada LN_2 de olmak üzere farklı soğuma şekillerine maruz bırakılmış, bu süreç 24 döngü sürdürülmüştür. Özellikle soğumadan bağımsız olarak ısınma-soğuma döngülerinin kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirdiği belirlenmiştir. Çalışmada LN_2 ile soğumaya maruz kalan örneklerde dayanımın daha fazla azaldığı net olarak görülmüştür. Özellikle ani soğuma karşısında yeni çatlak oluşumundan çok var olan çatlakların büyümesi söz konusu olduğu savunulmuştur.

Araştırmacılar su veya sıvı nitrojen (LN_2) kullanarak ani soğumanın yüksek sıcaklıklara maruz kalmış kayaçların dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sıvı nitrojen soğutulmuş örneklerin en düşük dayanım değerlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanında, bu çalışmalarda 500 °C'ye kadar ısıtılan kayaçlarda soğuma şeklinin ve ısınma/soğuma hızlarının (hızlı veya yavaş) pek bir öneminin olmadığı, maksimum sıcaklığın ise dayanım üzerinde önemli bir rol oynadığı da yine bu çalışmalarda ileri sürülmüştür (Han vd., 2019; Wu vd., 2019; Shao, 2020).

Han vd. (2019) yeraltı madenciliğinde bir yangın çıkması durumunda müdahale sonrasında ani soğumanın söz konusu olacağını belirtmiş, 800 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kumtaşı örneklerinde ani soğumanın 500 °C'den daha fazla ısınan örnekler üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde Wu vd. (2019) (b) tarafından yapılan çalışmada 800 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz kalan granit örneklerinde farklı soğuma durumlarında dayanımın sürekli azaldığı, azalmanın en fazla suda soğuyan örneklerde en az ise fırın içinde soğuyan örneklerde olduğunu belirtilmiştir. Bununla birlikte soğuma şeklinin ve hızının 400 °C'ye kadar ısıtılan örneklerin dayanımı üzerinde etkili olmadığı belirlenmiştir. Shao (2020) tarafından granit örnekleri 1000 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra LN_2 ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Çalışmada 500 °C'ye altında soğuma etkisinin önemsiz olduğu vurgulanmış, bu sıcaklıktan sonra ise LN_2 ile soğuyan örneklerin dayanımlarında azalış net olarak görülmüştür. Bu çalışmaların sonuçları termal bozulmanın en önemli sebebinin sıvı nitrojen ile ani soğuma olduğunu ve kayacın mineralojik bileşiminin dayanımın azalması üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

Benzer şekilde Li vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada da suda soğuyan örneklerin havada soğuyan örneklere göre ani soğumadan daha fazla etkilendiği, ancak soğumanın 400°C sıcaklıktan sonra etkili olduğu belirtilmiştir. Shen vd. (2020) tarafından yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan granitler farklı sıcaklıklardaki sıvılara (-20, 0 ve 20 °C) maruz bırakılmış, özellikle Vp ve UCS değerlerinde her koşulda azalış kaydedilmiş, ancak en düşük dayanım değerleri ısınma sonrası -20 °C'ye maruz kalan örneklerde görülmüştür. Çalışmada öne çıkan en önemli sonuç soğuma şeklinin ancak 550 °C'den sonra önem kazandığı, daha düşük sıcaklıklarda soğuma şeklinin önemsiz olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte su ve hava sıcaklığının aynı olması durumunda soğuma şeklinin öneminin olmadığı belirtilmiştir.

Li vd. (2019) kumtaşlarını 600 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz bırakmış ve kayaçların fiziksel ve dayanım özellikleri üzerinde ani soğuma etkisini araştırmıştır. Çalışmada ani soğuma su ve LN₂ (sıvı nitrojen) ile gerçekleştirilmiş her iki durumda da kayaçların dayanımlarında sürekli azalma belirlenmiştir. Ani soğumaya bağlı gelişen kırıkların LN₂ ye maruz kalan kayaçlarda arttığı belirtilmiştir. Çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kumtaşı örneklerinin havada soğutulması durumunda dayanımlarının ilk 200-300 °C'ye kadar artabileceği belirtilmiş, ancak ani soğuma söz konusu ise dayanımın her sıcaklık kademesinde azaldığı belirlenmiştir. Benzer sonuç Ersoy vd. (2021b) tarafından karbonat kayaçlar üzerinde yapılan çalışmada da belirtilmiştir.

Browning vd. (2016) tarafından volkanik kayaçlar 1100 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak ve normal koşullarda soğumaya bırakılmıştır. Soğuma sırasında

eş zamanlı akustik emisyon ve Vp ölçümleri gerçekleştirilmiş mikro kırık oluşumunda soğumanın daha etkili olduğunu belirtilmiştir. Ancak ister ısınma ister soğuma olsun yeni kırık oluşumundan çok var olan kırıkların büyümesi daha fazla gözlenmiştir. Benzer şekilde Zhang vd. (2018), Sha vd. (2020) ve Rong vd. (2021) tarafından yapılan çalışmalarda mikro-kırık oluşumunda soğumanın daha etkin olduğunu savunulmuş, ani soğuma karşısında yeni çatlak oluşumundan çok var olan çatlakların büyümesi söz konusu olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte bazı çalışmalarda soğuma sırasında taneler arası kırıkların etkin olduğu belirtilmiştir (Feng vd., 2020; Li vd., 2020; Sha vd., 2020).

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçların soğuma şeklinin termal hasar üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmalar değerlendirildiğinde aşağıda maddeler halinde sunulan sonuçlar ortaya çıkmıştır.

- (1) kayaçlar üzerinde ani soğuma yavaş soğumaya göre daha fazla termal hasara neden olmaktadır.
- (2) ani soğuma genellikle 400-500 °C'den daha yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçlarda etkilidir. Daha düşük sıcaklıklarda farklı soğuma şekillerinin önemi yoktur. Yani farklı soğuma etkisi tabii tutulan maksimum sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir.
- (3) kayaçların termal bozunmasında ve özellikle mikro-kırık oluşumunda soğuma tipi ısıtma işlemine oranla daha etkilidir.
- (4) ani soğuma etkisi genellikle yeni çatlak/kırık oluşumu ile değil, var olan çatlak/kırıkların büyümesi ile kendini göstermektedir.
- (5) mineralojik bileşimin tüm çevre koşullarında (yükleme, asitli sular, yangın, vb.) kayaçların mühendislik davranışında en etkin parametredir.

Yukarıda özetlenen çalışmalardan elde edilen sonuçlar birçok çalışmanın ortak sonucu olarak genel bir kabul olarak görülebilir. Ancak bazı çalışmalarda farklı sonuçların elde edildiği de göz ardı edilmemelidir. Bu sonuçlardan farklı olarak birkaç çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan granit örneklerinde ani soğuma sonrası üniform olmayan lokal plastik sertleşme olaylarından dolayı dayanımın bir miktar arttığı belirtilmiştir (Zhang vd., 2018; Zhang vd., 2020). Bu artışın yaklaşık 400 °C'ye kadar devam ettiği, ancak daha yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçların dayanımının her koşulda ani soğuma sonrası termal kırılmaya bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Zhang vd. (2020), termal sertleşme sebebiyle 500 °C'ye kadar ısıtılmış ve suda ani soğumaya bırakılmış granit örneklerinin dayanımının havada soğutulan örneklerden daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Bu nedenle araştırmacılar soğuma şeklinin kayanın dayanımı üzerinde önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Li vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada ise dayanımın ani soğuma sonrası sürekli azaldığı, belli sıcaklık kademelerinde görülen dayanım artışının sadece yavaş soğuma sonrası meydana geldiği belirtilmiştir.

Wang vd. (2020) tarafından yangın sonrası farklı soğuma şekillerinin granitler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu nedenle çalışmada kayaçlar birçok çalışmadan farklı olarak 200-300 °C/dakika gibi yüksek bir ısıtma hızına tabi tutulmuştur. Çalışmada özellikle 400 °C'ye kadar kayaç özellikleri üzerinde soğumanın çok etkili olmadığı, ana etkinin maruz kalınan maksimum sıcaklık olduğu savunulmuştur (Zhu vd., 2020). Bununla birlikte mikro-kırık oluşumunda ısınmanın soğumadan daha etkili olduğu ortaya konulmuştur. Literatürdeki birçok çalışmadan daha farklı sonuçların elde edildiği bu çalışmalarda kayaç türünün ve mineralojik bileşimin sıcaklık karşısındaki davranışını

etkileyen en önemli faktör olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde Ersoy ve Acar (2016) tarafından farklı mineralojik bileşime sahip granitlerin dayanımlarındaki değişim araştırılmış, mineral yüzdesi ve kayaç dokusunun kayaç dayanımında en etkili parametreler olduğu ortaya konulmuştur.

Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış kayaçlar üzerinde farklı soğuma etkilerinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda; genellikle (i) gerçek bir yangını simüle edecek sıcaklık-zaman eğrilerinin kullanılmadığı, (ii) bir yangında ani ısınma sonrasında farklı soğuma koşullarının gerçeğe yakın modeller dikkate alınarak tanımlanmadığı görülmektedir. Ersoy vd. (2021b) tarafından yapılan çalışmada yangın etkisi gerçeğe yakın modellenmiş ancak farklı soğuma etkileri dikkate alınmamış, Shen vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada yangın sonrasında kayaçlar farklı sıcaklıklardaki sıvılara (-20, 0 20 °C) maruz bırakılmış, gerçek atmosfer koşulları dikkate alınmamıştır. Yangına maruz kalan kayaçlar 3 farklı şekilde soğutulabilir: (1) ortam koşullarında kendi kendine soğuma, (2) soğuk mevsimlerde sıfırın altındaki sıcaklıklarda kendi kendine soğuma ve (3) yangına müdahale edilmesi durumunda suyla soğuma. Bu çalışmada, literatürdeki birçok çalışmanın aksine, oluşum ve köken bakımından farklı olan 3 karbonat kayaç gerçek bir yangını karakterize eden eksponansiyel ısınma oranları kullanılarak yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış ve doğal koşullar dikkate alınarak 3 farklı şekilde soğutulmuş, son olarak soğuma şeklinin kayaçlar üzerindeki termal hasar etkisi araştırılmıştır.

MALZEME VE YÖNTEM

Örnekleme Lokasyonları ve Örnek Hazırlama

Türkiye'de en çok ihraç edilen yapı taşları karbonat kayaçlarıdır ve bunlar dünya doğal

taş endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte, bu kayaçlar geçmişte kaleler ve tapınaklar inşa etmek için kullanılmış ve halen Türkiye'deki tarihi yapıların restorasyonunda kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada ülkemizin farklı bölgelerinde bulunan ve doğal yapı taşı olarak kullanılan 3 farklı karbonat kayacı kullanılmıştır. Bunlar Marmara Bölgesi'nden mermer ve Karadeniz Bölgesi'nden traverten ve kireçtaşıdır.

Çalışmada kullanılacak kayaç grupları belirlendikten sonra kayaç örnekleri araziden toplanmış ve termal işlemden önce dikkatli bir şekilde incelenmiştir. Her bir kayaç grubu için 50-60 mm çapında ve 1:1 yarıçap/boy oranına sahip toplam 40 adet örnek hazırlanmış ve bu örneklerden 10'ar tanesi kayaçların ilksel durumdaki fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır. Kalan 30 örnek ısıtıldıktan sonra her bir soğuma şekli için (oda koşullarında soğuma, suda soğuma ve -20 °C'de soğuma) 10'ar adet örnek kalacak şekilde ayrılmıştır. Örnek hazırlama adımından sonra çalışma kapsamında uygulanacak olan yöntem 4 adımdan oluşmaktadır:

- (1) Kayaçların ilksel durumdaki (termal işlemden önce) mineralojik, mikro-yapısal ve jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi,
- (2) Dış yangın eğrisi dikkate alınarak kayaçların 680 °C'ye kadar ısıtılması ve maksimum sıcaklığın sabit tutulması (toplam ısı işlem süresi 2 saat),
- (3) Kayaçların 3 farklı şekilde soğutulması (oda koşullarında, suda ve -20 °C'de),
- (4) Isıtma-soğutma döngüsüne maruz bırakılan kayaçların mineralojik, mikro-yapısal ve jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi.

Termal Isıtma ve Soğutma Prosedürü

Çalışmada UTD-1462 model programlanabilir zamanlayıcıya sahip (6 lt, 1200°C maksimum sıcaklık) kül fırını kullanılmıştır. Bu fırının ayarlanan sıcaklıktan sapma miktarı 2°C'dir. Maksimum sürekli sıcaklığı 1050 °C olup bu sıcaklığa ulaşma süresi 65 dakikadır. 2000 W güce sahip olan fırın PID algoritması ile sıcaklık üzerinde hassas kontrol sağlayabilmektedir.

Birçok çalışmada termal şoktan kaynaklanan mikro-kırık oluşumunun önüne geçmek amacıyla 5 veya 10 °C/dk'lık ısınma oranları tercih edilmiştir. Bu yaklaşım jeotermal sahalar, derin maden kazıları ve nükleer depolama alanlarındaki kayaçlar için uygun olsa da yangına maruz kalan kayaçlar için pek uygun değildir çünkü yangın sırasında ortam ısısı lineer bir şekilde artmamaktadır. Tipik bina yangınlarında malzemelerin veya sistemlerin test edilmesinde yangın test eğerilerinin kullanılması daha uygundur. Yangına maruz kalan malzemelerin dayanımının belirlendiği çalışmalarda genellikle standart yangın eğrisi (ISO 834, 1999) kullanılırken, dış cephe yangınlarına maruz kalan malzemelerin dayanımının araştırıldığı çalışmalarda dış yangın eğrisi kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada bir dış yangın durumunda karbonat kayaçların mikro-yapısal ve jeomekanik özelliklerinin araştırılması amacıyla termal ısıtma adımında dış yangın eğrisi (BS EN 1991-1-2, 2002) kullanılmıştır (Şekil 1). Çalışmada uygulanan dış yangın sıcaklığına ait eşitlik aşağıda verilmiştir:

$$Q_e = 660 (1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.687e^{-3.8t}) + 20$$

Burada;

Q_e (°C) : Ortam sıcaklığı,

T (dk) : Hedef sıcaklığa ulaşma süresidir.

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçlarda farklı soğuma şekillerinin etkilerinin

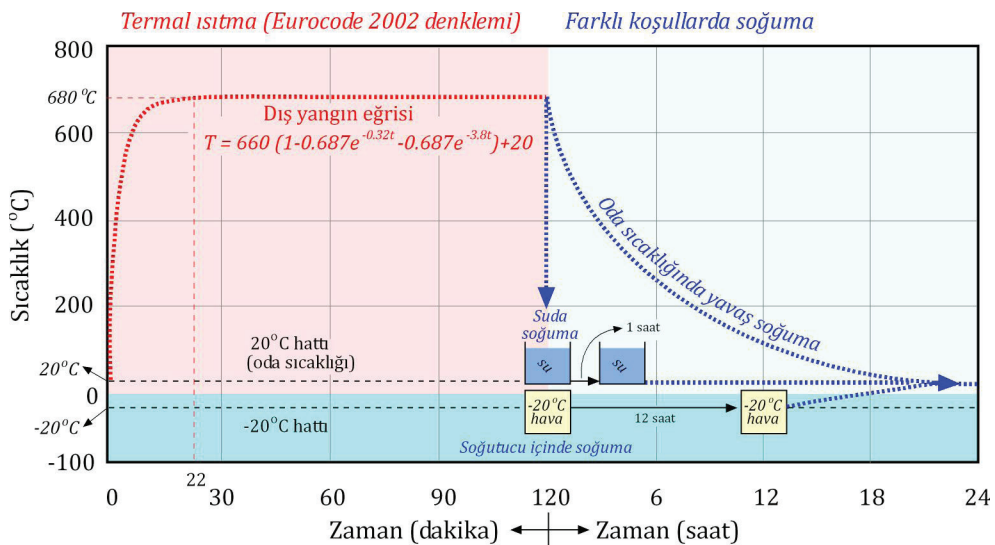
değerlendirildiği çalışmalarda genel olarak su ve LN_2 kullanılmaktadır. Bunlardan farklı olarak kademeli soğuma etkisinin veya ısınma-soğuma döngülerinin araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur. Yangın etkinin araştırıldığı çalışmalarda da ani ısınma etkisi çoğu zaman Eurocode tarafından önerilen zaman-sıcaklık eğrileri kullanılarak belirlenmemekte, yangın sonrası farklı soğuma şekilleri ihmal edilmektedir. Oysaki bir yangın sonrasında ani ısınmaya maruz kalan kayalar, yangının zamana bağlı sönmesinden sonra yavaşça soğuyabilir, yangına müdahale edilmesi durumunda suyun etkisiyle ani olarak soğuyabilir veya soğuk iklimlerde sıfırın altındaki hava koşullarında yavaşça soğuyabilir. Bu nedenle çalışma kapsamında yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayalar ayrı ayrı

- (1) oda koşullarında 24 saat süre ile yavaş soğumaya,
- (2) $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 'deki dondurucuda 12 saat süre ile soğumaya,
- (3) su içerisinde 1 saat süre ile ani soğumaya tabi tutulmuştur.

$-20\text{ }^\circ\text{C}$ 'de soğuyan örnekler 12 saat ve suda soğuyan örnekler ise 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiş ve bu süreçler sonrası tüm örnekler $105\text{ }^\circ\text{C}$ fırında 12 saat süre ile kurumaya bırakılmıştır (Şekil 1).

Mineralojik ve Mikro-Yapısal Analizler

Bu çalışmada, ince kesit gözlemleri ve taramalı elektron mikroskop (SEM) analizleri yardımıyla kayaların türleri belirlenmiş mikro-yapısal özellikleri ortaya konmuştur. Bu amaçla her bir kayaç grubundan 2 adet ince kesit hazırlanmış ve bu kesitler polarizan mikroskop (Nikon LV 100Pol) altında ISRM (1978) standartlarına uygun bir şekilde incelenerek kayaların ısıl işlem öncesi petrografik özellikleri tayin edilmiştir. İnce kesit incelemelerine ek olarak 1 cm^3 hacme sahip kübik örnekler üzerinde 20 kV hızlandırma voltajında elektronik Everhart Thornley dedektörü ile yapılan analizlerle her bir kayaç grubu için 5 adet SEM görüntüsü elde edilmiştir. SEM analizlerinde çözünürlük ve büyütme sırasıyla $2\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$ ve $1\text{-}5 \times 10^3$ olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada uygulanan zamana bağlı ısıtma ve soğutma süreçleri (BS EN 1991, 2002).

Figure 1. Time dependent heating and cooling processes applied in the study (BS EN 1991, 2002).

Çalışmada yüksek sıcaklık ve farklı soğuma etkilerinin mineralojik bileşimde bir değişime neden olup olmadığının araştırılması amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır. XRD analizleri için örnekler agat havan ile öğütülmüş ve Kunze (1965) tarafından önerilen kimyasal işlem, çökeltme ve santrifüjleme adımlarından geçirilerek kil fraksiyonları belirlenmiştir. Analizler Rigaku DMAX 2200 model difraktometre (Cu-K ve Ni filtreli) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve mineral kısaltmaları Whitney ve Evans'ın (2010) önerileri dikkate alınarak kullanılmıştır.

İndeks ve Dayanım Deneyleri

Yüksek sıcaklıklar karşısında karbonat kayaçların fiziksel ve dayanım özelliklerinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi amacıyla ısıtma işlemlerinden önce ve sonra yoğunluk, porozite, boyuna dalga hızı ve çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Yoğunluk değerleri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemle silindirik örneklerin ağırlık ve boyut değerleri kullanılarak, özgül ağırlık değerleri ise toz haline getirilen örnekler üzerinde yine ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemle yapılan piknometre deneyi ile belirlenmiştir. Porozitenin değerleri, (1) örneklerin toplam hacimleri ve (2) özgül ağırlık ile katı birim hacim ağırlık arasındaki eşitlikten elde edilen katı hacmi değerleri kullanılarak ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemle belirlenmiştir. Boyuna dalga hızları ASTM (2008)'e uygun olarak 54 KHz frekansında çalışan piezoelektrik özelliklere sahip alıcı-verici çiftiyle donatılmış Pundit Plus ekipmanı kullanılarak belirlenmiştir. Brazilian deneyleri ise ISRM (2007)'ye uygun olarak 1:1 boy/yarıçap oranına sahip silindirik örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Brazilian deneyleri sırasında 15-30 saniye arasında

kırılma olacak şekilde örneklere 200-300 N/sn'lik yükler uygulanmış ve kırılma süresi not edilmiştir. Deney disk şekilli örnekler üzerinde gerçekleştirilebildiğinden bu çalışmada tercih edilmiştir.

BULGULAR

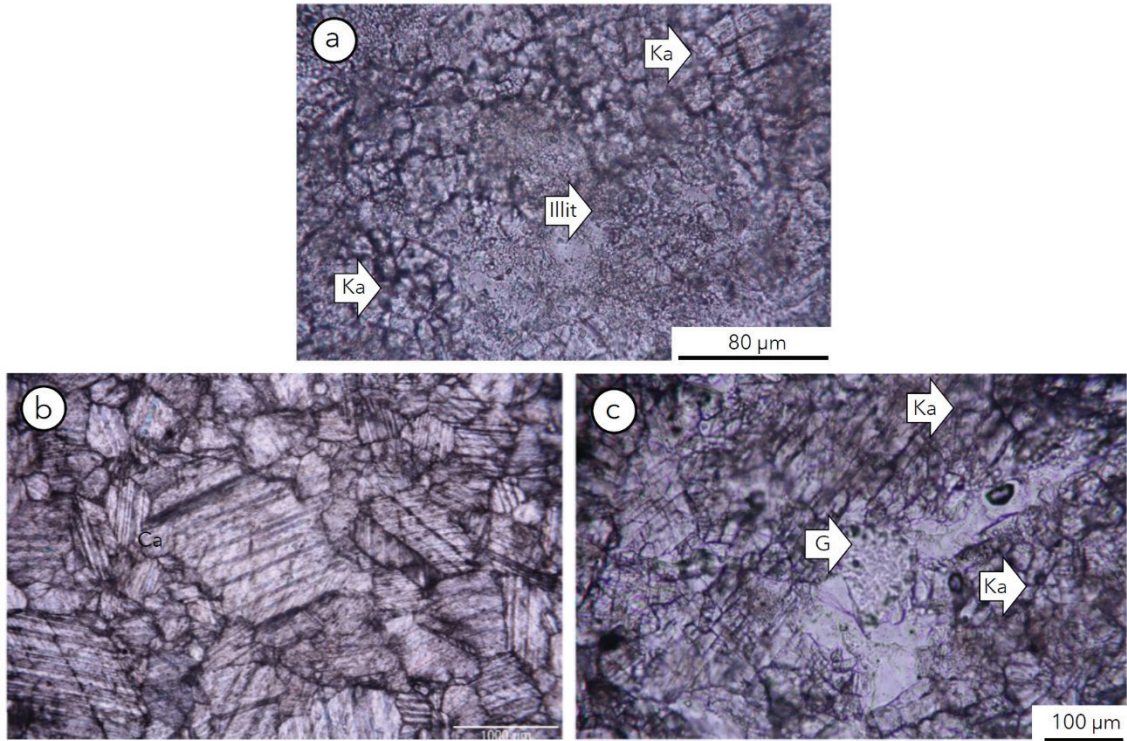
Kayaç Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında yüksek sıcaklıklara maruz kalan karbonat kayaçların fiziksel, mineralojik ve dolaylı çekme dayanımı özelliklerinin soğuma şekline göre değişimi incelenmiş, bu amaçla traverten, kireçtaşı ve mermerden oluşan kayaç grupları çalışmaya dahil edilmiştir.

Kayaçların ilksel koşulda mineralojik ve mikro-yapısal özelliklerini tanımlamak için ince kesit görüntülerinden, XRD analiz sonuçlarından ve SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. İnce kesit görüntüleri incelendiğinde, mermer ve traverten örneklerinin tamamen kalsitten oluştuğu ve monomineralik bileşimde olduğu görülmüştür. Kristal boyutları mermerlerde 100-2000 µm, travertenlerde 30-200 µm arasında değişmektedir. Sepiyolit her iki kaya grubunda da eser miktarda bulunmuştur. Kireçtaşı örnekleri başlıca kalsit (%70-80) ve daha az ölçüde illit (%20-30) içermektedir. Kalsit kristal boyutları 2-10 µm arasında değişirken, illit kristallerinin boyutları birkaç µm'dir (Şekil 2). Benzer olarak XRD analizleri sonucunda, traverten örneklerinde kalsit ve sepiyolit, kireçtaşı örneklerinde kalsit, illit ve kuvars, mermer örneklerinde kalsit, sepiyolit ve illit minerallerinin hâkim olduğu görülmüştür (Şekil 3). SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4), traverten örneklerinde uzunlukları 10-50 mikron arasında mikrokırıkların hâkim, bu kırıklara göre daha az oranda boşlukların mevcut olduğu görülmüştür. Kireçtaşı örneklerinde ise genel olarak mikro-

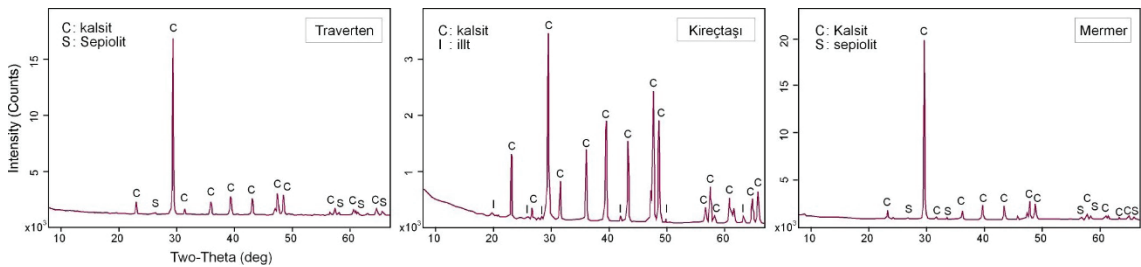
kırık gözlenmemiş, birincil boşlukların hâkim olduğu belirlenmiştir. Mermer örnekleri ise diğer kayaç gruplarına göre daha kompakt bir

yapı sunmaktadır. SEM görüntülerinde izlenen kırıklar ise genellikle kapalıdır.



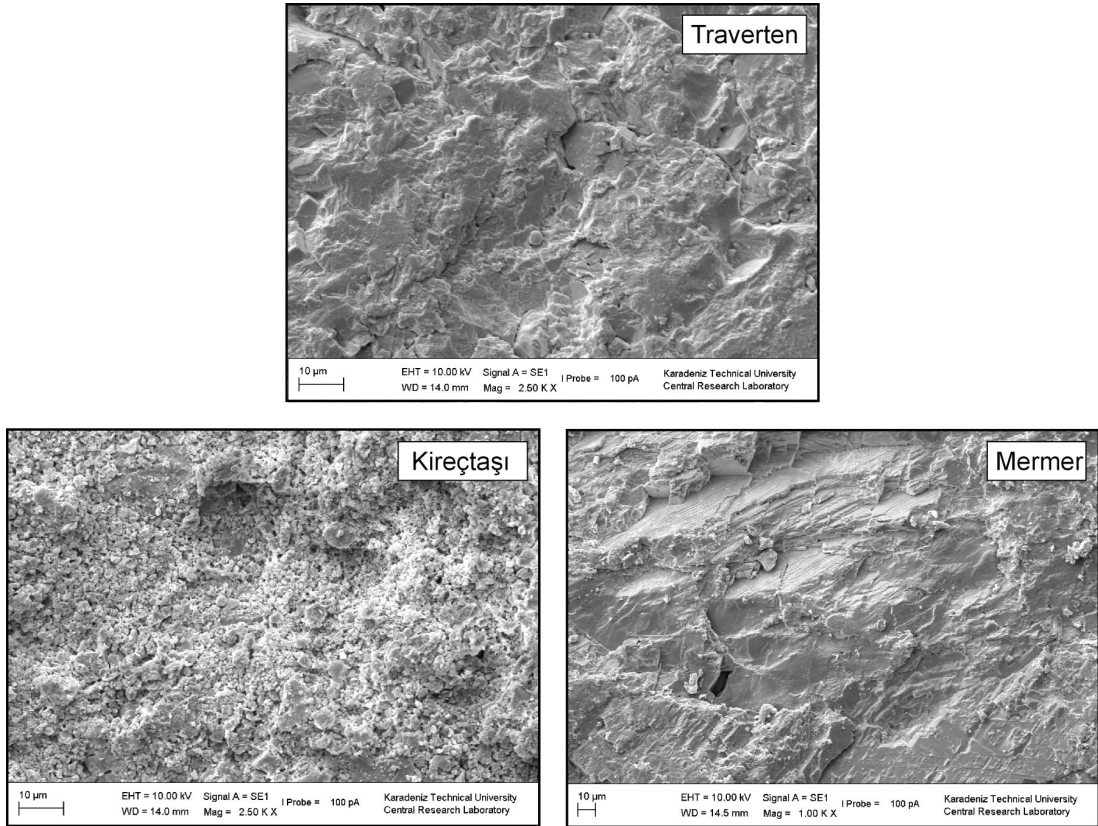
Şekil 2. Karbonat kayaç örneklerinin tek nikol mikroskop görüntüleri: (a) mermer, (b) traverten, (c) kireçtaşı (Ka: kalsit, Illit: illit, G: gözenek).

Figure 2. Parallel Nicol microscope images of carbonate rock samples: (a) marble, (b) travertine, (c) limestone (Ka: calcite, Illite: illite, G: pore).



Şekil 3. Karbonat kayaçların ilksel durumdaki difraksiyon paternleri.

Figure 3. Diffraction patterns of carbonate rocks in their initial state.



Şekil 4. Karbonat kayaçların ilksel durumdaki SEM görüntüleri.

Figure 4. SEM images of carbonate rocks in their initial state.

Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirildiğinde traverten, kireçtaşı ve mermer örneklerinin birim hacim ağırlık değerlerinin sırasıyla 23.6, 23.2 ve 26.4 kN/m³, porozite değerlerinin sırasıyla %13.1, 14.6 ve 2.7, boyuna dalga hızı değerlerinin sırasıyla 4111, 2703 ve 5673 m/s, dolaylı çekme dayanımı değerlerinin ise 4.8, 3.3 ve 5.4 MPa olduğu belirlenmiştir (Tablo 1).

Mikro-Yapısal Değişiklikler

Çalışma kapsamında, mikro-yapısal değişimler SEM görüntüleri ile yorumlanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda farklı soğuma

şekillerinde farklı ölçeklerde SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 5). SEM görüntüleri değerlendirildiğinde travertenlerde, havada soğuyan örneklerde mevcut çatlakların uzadığı ve açıklıklarının arttığı görülmüştür (Şekil 5b). Suda soğuyan örneklerde kristallerde topaklaşma görülmüş, çatlak açıklıkları artmıştır (Şekil 5c). -20 °C'de havada soğuyan örneklerde ise diğer soğuma şekillerine göre belirgin bir değişim izlenmiş, çatlaklardan bağımsız olarak boşluklar kısmen artmış ve kayaç yapısı süngerimsi bir görüntü kazanmıştır (Şekil 5d). Bu durum soğuma süreçlerinin kayaç özelliklerinde etkin bir rol oynadığını göstermektedir.

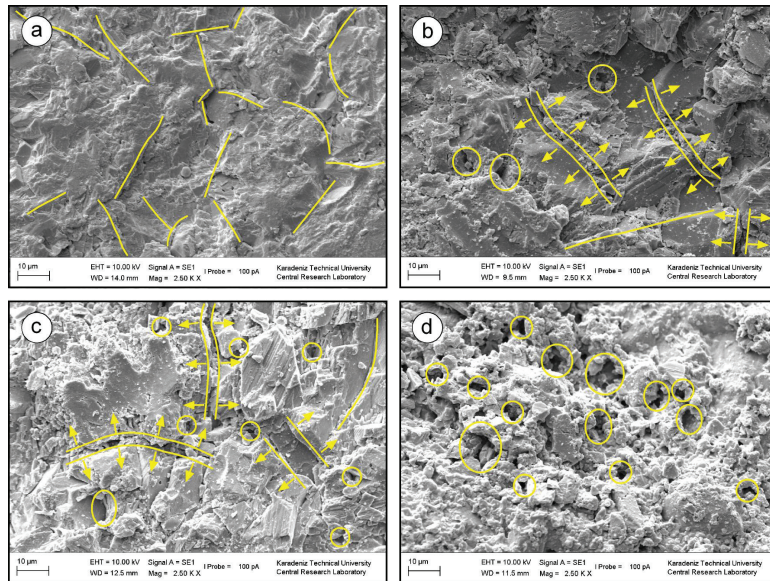
Kireçtaşı örneklerine ait SEM görüntülerinde ısınma-soğuma döngüsü sonrasında çok belirgin bir fark gözlenmemiştir. Özellikle ısınma sürecinden sonra havada soğumanın çok etkili olmadığı, suda ve $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de havada soğuyan örnekler için SEM görüntülerinde kısmen yeni çatlakların geliştiği ve porozitenin bir miktar arttığı görülmüştür. Bu sonuç kayaç dayanımının azalmasında ani soğumanın etkili olduğunu göstermektedir (Şekil 6).

Mermer örneklerinde ısınma sonrası havada soğuyan örneklerin yüzey pürüzlülüğünün arttığı, suda soğuyan örneklerde çok yönlü çatlaklar ve kayaçta topaklaşma olduğu görülmüştür. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuyan örneklerde ise çatlaklar uzamış, çatlak açıklıkları artmış ve kayacın yapısal bütünlüğü bozulmuştur (Şekil 7).

Çizelge 1. Çalışılan karbonat kayaçların bazı indeks ve dayanım özellikleri.

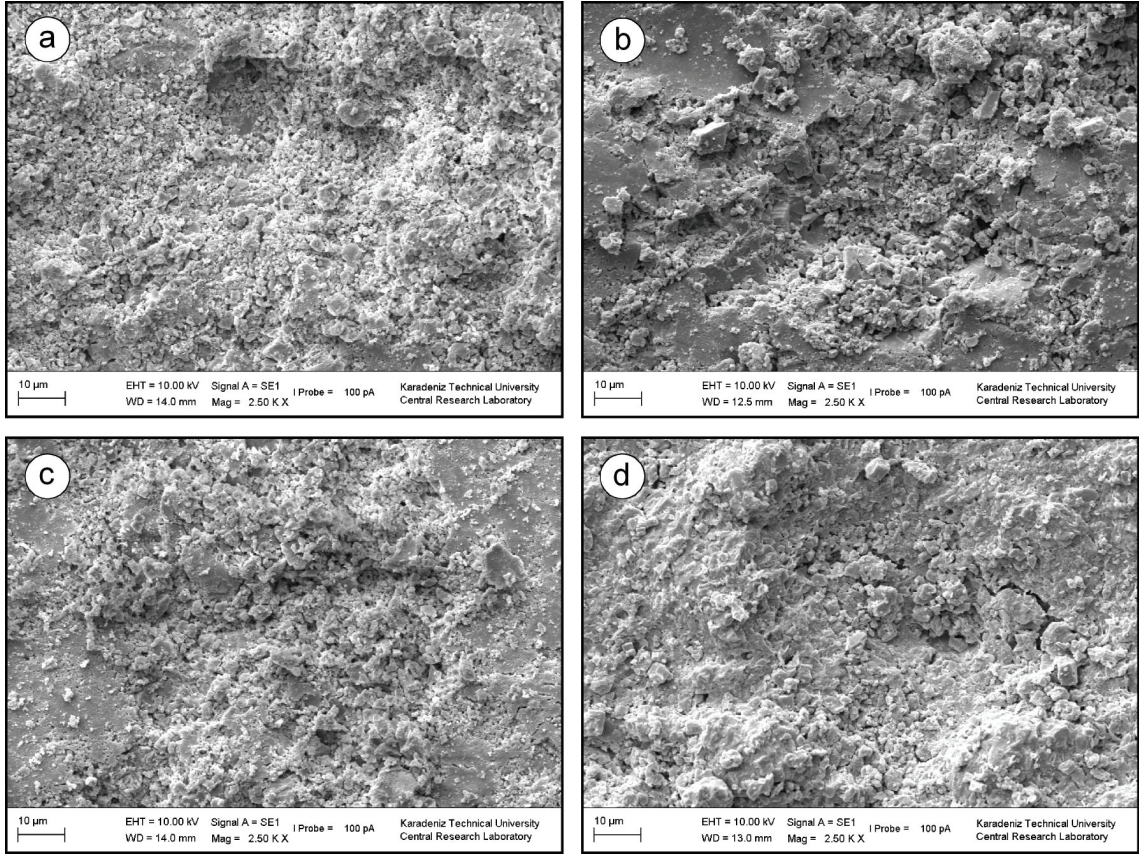
Table 1. Some index and strength properties of the studied carbonate rocks.

Özellik		Traverten	Kireçtaşı	Mermer
Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	Maks.	24.4	24.0	26.6
	Min.	22.9	22.2	26.1
	SS.	0.4	0.5	0.1
	Ort.	23.6	23.2	26.4
Porozite (%)	Maks.	15.6	18.4	4.0
	Min.	10.1	11.8	2.1
	SS.	1.6	1.9	0.5
	Ort.	13.1	14.6	2.7
P-dalga hızı (m/s)	Maks.	4702	3507	6191
	Min.	3726	2106	5348
	SS.	282	376	227
	Ort.	4111	2703	5673
Çekme dayanımı (MPa)	Maks.	5.9	3.5	7.0
	Min.	3.2	3.0	4.4
	SS.	1.0	0.3	0.8
	Ort.	4.8	3.3	5.4



Şekil 5. Traverten örneklerinin farklı soğuma şekillerine ait SEM görüntüleri. Sarı renkli düz çizgiler kırık/çatlakları, daireler gözenekleri, iki çizgi ve oklarla gösterilen alanlar ise açıklık artışını ifade etmektedir (a: ilksel durum, b: havada soğuma, c: suda soğuma, d: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuma).

Figure 5. SEM images of travertine samples for different cooling types. Yellow solid lines indicate fractures/cracks, circles indicate pores, and areas marked by two lines and arrows indicate increased aperture (a: initial condition, b: cooling in air, c: cooling in water, d: cooling at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Şekil 6. Kireçtaşı örneklerinin farklı soğuma şekillerine ait SEM görüntüleri (a: ilksel durum, b: havada soğuma, c: suda soğuma, d: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuma).

Figure 6. SEM images of limestone samples for different cooling types (a: initial condition, b: cooling in air, c: cooling in water, d: cooling at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimler

Tüm kayaçlarda, ısınma ve soğuma döngüsünde kütle kaybı olmadığı için porozite ve birim hacim ağırlık değerlerinde belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Ancak suda ve $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de havada soğuma, oda sıcaklığında soğumaya göre kayaç özellikleri üzerinde biraz daha etkili olmuş ve bu koşullarda az da olsa BHA değerlerinde azalma, porozite değerlerinde artış kaydedilmiştir. Sonuçlar, ilksel değerlere göre normalize edilmiş şekilde Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8 değerlendirildiğinde yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan traverten ve mermerlerde

havada soğumanın etkili olmadığı, bu nedenle soğuma şeklinin ısınmaya oranla biraz daha etkili olduğu görülmüştür. Fiziksel özellikler dikkate alındığında traverten ve mermerler en çok suda soğumadan, kireçtaşları ise $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de havada soğumadan etkilenmiştir.

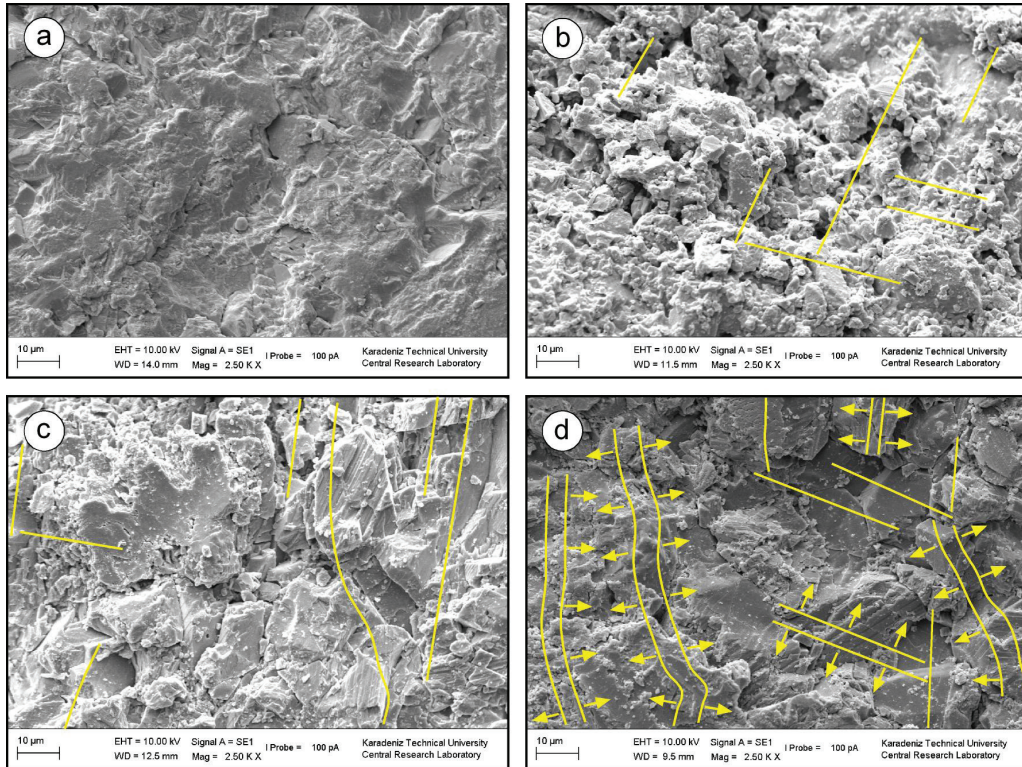
Fiziksel özelliklerden farklı olarak P-dalgı hızı ve çekme dayanımı değerleri ısınma-soğuma döngüsünden etkilenmiş ve farklı soğuma şekillerin hepsinde bir hayli azalmıştır. Bu durumun kayaç yapısında bulunan kilerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kiler ısıtıldıklarında $80\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında

adsorpsiyon sularını, 400-600 °C arasında ise yapı sularını kaybederler. 600 °C sıcaklıktan sonra ise bünyelerinde yıkıcı prosesler başlar. Bu nedenle çalışma konusu kayalarda birim hacim ağırlık ve porozite değerlerinde çok fazla değişim izlenmezken, boyuna dalga hızları ve dayanımları azalmıştır. Azalma eğilimi traverten ve mermerlerde kireçtaşlarına oranla daha fazladır. SEM görüntüleri bu durumu çok net olarak göstermektedir.

Mineralojik değişimler

Kayaçların mineral bileşimlerinin belirlenmesi ve ısınma-soğuma sürecinde mineralojik bir değişimin olup olmadığının

anlaşılması amacıyla XRD analizlerinden yararlanılmıştır. Analizlerde, travertenlerde ilksel koşullarda ve ısınma-soğuma döngüsü sonrasında mineralojik bileşimde bir değişimin olmadığı, genel olarak kalsit mineralinin hâkim olduğu, buna sepiyolitlerin eşlik ettiği belirlenmiştir. Mermerlerde ilksel koşullarda görülen kalsit, sepiyolit ve illit mineralleri farklı soğumalardan sonra da görülmüş, gerek ısıtma gerekse soğutma sonrası mineralojik bir değişim izlenmemiştir. Kireçtaşlarında ise benzer şekilde kalsit minerali hâkim olup ısınma ve soğuma aşamalarının tamamında izlenmiştir. Yine ilksel koşullarda kalsite eşlik eden illit ve kuvars mineralleri ısıtma sonrası her koşulda görülmüştür (Tablo 2).

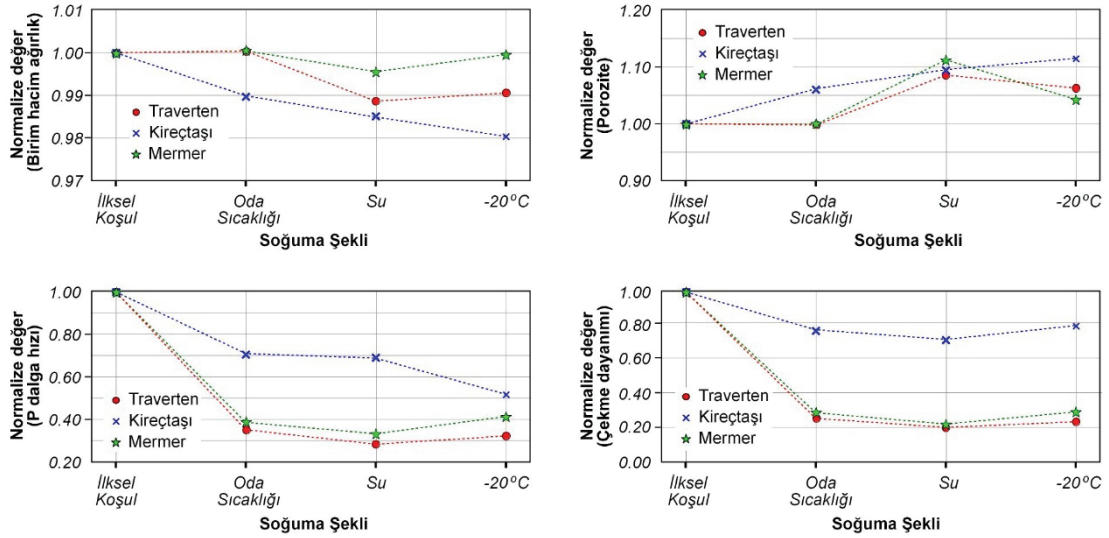


Şekil 7. Mermer örneklerinin farklı soğuma şekillerine ait SEM görüntüleri (a: ilksel durum, b: havada soğuma, c: suda soğuma, d: -20 °C’de soğuma).

Figure 7. SEM images of marble samples for different cooling types (a: initial condition, b: cooling in air, c: cooling in water, d: cooling at -20 °C).

Kalsiyum karbonatın bozunma sıcaklığı ortamdaki karbon dioksit konsantrasyonu ve kısmi basınç koşullarına bağlı olarak yaklaşık 900 °C'dir (Johnston, 1910). Özellikle kayaçlardaki

kil içeriğinin de etkisiyle 680 °C kalsinasyon sürecinin tamamlanması için yeterli olmamış ve karbonat kayaçların mineralojik özelliklerinde bir değişim meydana gelmemiştir.



Şekil 8. Isıl işleme tabi tutulan karbonat kayaçların farklı soğuma süreçlerinin ardından fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişim.

Figure 8. Changes in physical and mechanical properties of -heated carbonate rocks after different cooling processes.

Çizelge 2. XRD analizi sonuçları ve farklı soğuma koşullarında karbonat kayaçların mineral bileşimleri. Table 2. Results of XRD analyses and mineralogical compositions of the carbonate rocks after different cooling conditions.

Kayaç türü	Durum	Mineraller			
		Kalsit	Sepiyolit	İllit	Kuvars
Traverten	İlksel	x	x		
	Havada soğuma	x	x		
	Suda soğuma	x	x		
	-20 °C'de soğuma	x	x		
Kireçtaşı	İlksel	x		x	x
	Havada soğuma	x		x	x
	Suda soğuma	x		x	x
	-20 °C'de soğuma	x		x	x
Mermer	İlksel	x	x	x	
	Havada soğuma	x	x	x	
	Suda soğuma	x	x	x	
	-20 °C'de soğuma	x	x	x	

TARTIŞMA

Bu bölümde çalışma sonrasında ulaşılan sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış, ısıtma ve farklı soğutma sonrası kayaçlarda meydana gelen değişimin nedenleri yorumlanmıştır.

Mikro-Yapısal Değişimlerin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında her farklı soğuma şekli için alınan SEM görüntüleri değerlendirildiğinde traverten ve mermer örneklerinin benzer davranış sunduğu, kireçtaşının bu süreçlerden daha az etkilendiği, tüm kayaçlarda fiziksel özellikler üzerinde ısınmadan daha çok soğuma şeklinin önemli olduğu çok net görülmüştür. Kayaç yapısında en fazla değişim ise $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuyan örneklerde meydana gelmiştir (Tablo 3). Bununla birlikte kayaçlarda yeni kırık oluşumundan daha çok var olan kırıkların büyümesinin etkin olduğu, özellikle ani soğuma sırasında kırık açıklıklarının arttığı görülmüştür.

Literatürde de benzer sonuçlar görülmüştür. Kim vd. (2014) ve Li vd. (2019) tarafından

yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklara maruz kalan örneklerin ani soğutulması durumunda dış yüzeylerinde ani ısı değişiminin çekme gerilmesi oluşmasına neden olduğunu, aksine yavaş soğuma sırasında veya örneğin ısı değişiminden fazla etkilenmeyen iç kesimlerinde ise sıkışma gerilmesinin hâkim olduğunu belirlemişlerdir. Çalışmada, SEM görüntülerinde mikro-kırıkların genişlediği gözlenmiş, bu nedenle hızlı soğumada kayaç yapısının daha fazla bozulmasının nedeninin çekme gerilmesi kaynaklı olarak mikro-kırıkların genişlemesi olduğunu savunmuşlardır. Yapılan çalışmaların hemen hemen hepsinde yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan örnekler için SEM görüntülerinde mikro-kırık oluşumunda ani soğumanın daha etkili olduğu, kayaç yapısının bozulmasında yeni kırık oluşumundan daha çok var olan kırıkların genişlemesinin daha etkili olduğu görülmüştür (Browning vd., 2016; Zhang vd., 2018; Rong vd., 2021). Bununla birlikte bazı çalışmalarda soğuma sırasında yeni gelişen kırıkların ise genellikle taneler arasında geliştiği belirtilmiştir (Feng vd., 2020; Li vd., 2020; Sha vd., 2020).

Çizelge 3. Karbonat kayaçların mikro-yapısal özelliklerini en çok etkileyen koşullar.

Table 3. Conditions that most affect the microstructural properties of carbonate rocks.

Kayaç türü	Mikro-kırık oluşumu	Mikro-kırık gelişimi	Porozitenin artması
Traverten	Oda sıcaklığında soğuma Suda soğuma	Suda soğuma	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuma
Kireçtaşı	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuma Suda soğuma	Suda soğuma	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuma
Mermer	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuma Suda soğuma	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuma	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuma

Fiziksel ve Dayanım Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde özellikle ısınma-soğuma döngülerinin çalışma konusu karbonat kayaçların fiziksel özellikleri üzerinde belirgin bir değişime neden olmadığı görülmüştür. Zhang vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada da özellikle 300 °C'ye kadar kireçtaşlarının fiziksel özelliklerinde bir değişim olmadığı, termal hasarın ancak 600 °C'den sonra çok belirgin olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde Meng vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada kireçtaşları 800 dereceye kadar ısıtılmış 400 dereceye kadar fiziksel özelliklerde bir değişimin olmadığı belirtilmiştir. Ersoy vd. (2021b) tarafından karbonat kayaçlar üzerinde yapılan çalışmada ise ilk 400 °C kadar tebeşir ve kalkarenitlerin fiziksel özelliklerinde değişimin olmadığı, 400-800 °C arasında çok belirgin olmayan bir değişimin olduğu, 800 °C sıcaklık ve sonrasında ise fiziksel özelliklerde %50'ye varan değişimlerin olduğu belirlenmiştir. Tersine, Crosby vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada ise kireçtaşları 800 °C kadar ısıtılmış, her sıcaklık kademesinde fiziksel özelliklerde değişim kaydedilmiştir. Bu sonuçlar farklı soğuma şekillerinin etkisinin araştırıldığı çalışmalarda belirtilmiştir.

Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde boyuna dalga hızı ve dayanım değerlerinin fiziksel özelliklerden farklı olarak belirgin bir şekilde azaldığı, bu azalmanın traverten ve mermer örneklerinde %50'yi aştığı görülmüştür. Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde de hangi soğuma türü tercih edilirse edilsin P-dalga hızının her sıcaklık kademesinde sürekli olarak azaldığı, buna rağmen fiziksel özelliklerin ve dayanımın bir eşik sıcaklık değerine kadar değişmediği, hatta özellikle P-dalga hızı azalırken dayanımın arttığı görülmüştür (Wang

vd., 2015, Li vd., 2020, Ersoy vd., 2021a). P-dalga hızı ve dayanım değerlerinin her ikisinin de artan sıcaklıklara bağlı olarak sürekli azaldığı çalışmalarda bile P-dalga hızı değerlerindeki azalma oranı, dayanımdaki azalma oranının birkaç katı olabilmektedir (Liu and Xu 2015; Li vd., 2020). P dalga hızı ve dayanım bazen farklı eğilim sunsa da özellikle ani soğuma sonrasında bu değerlerin havada soğuma sonrası elde edilen değerlerden daha düşük olduğu birçok çalışmanın ortak görüşüdür (Wu vd., 2019b; Shao vd., 2020; Shen vd., 2020). Ancak bazı çalışmalarda artan sıcaklığa bağlı olarak P-dalga hızı ve dayanımın azalması durumunda bile, P-dalga hızı ve dayanım değerlerindeki eğilimin farklı olduğu, P-dalga hızının suda soğumadan, dayanımın ise havada soğumadan daha fazla etkilendiği belirlenmiştir (Zhang vd., 2020). Zhang vd. (2020), 500 °C'den daha düşük sıcaklıklara maruz kalan kayaçların suda aniden soğutulduğunda, termal sertleşme nedeniyle havada soğuyan örneklere göre daha yüksek dayanım değerleri verdiği ve bu nedenle soğutma tipinin dayanım değişiminde çok önemli bir rol oynadığını bulmuşlardır. Farklı olarak, Li vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada ise dayanımın ani soğuma sonrası sürekli azaldığı belirlenmiş, belli sıcaklık kademelerinde görülen dayanım artışının sadece yavaş soğuma sonrası meydana gelebileceği belirtilmiştir.

Tablo 4'te fiziksel ve dayanım özelliklerin değişiminde en etkin süreçler görülmektedir. Burada ısınmadan ziyade soğuma süreçlerinin kayaçların özellikleri üzerinde daha etkili olduğu traverten ve mermerlerin genel olarak benzer davranış sunduğu ve özelliklerinin suda soğumadan etkilendiği anlaşılmıştır. Farklı olarak, kireçtaşı özelliklerinin -20 °C'de havada soğuma sonrasında daha fazla değişime uğradığı görülmüştür.

Çizelge 4. Karbonat kayaçların fiziksel ve dayanım özellikleri üzerinde en çok etkili olan koşullar.

Table 4. Conditions that have the most influence on the physical and strength properties of carbonate rocks.

Kayaç türü	Birim hacim ağırlık	Porozite	P-dalga hızı	Dol. çekme day.
Traverten	Suda soğuma	Suda soğuma	Suda soğuma	Suda soğuma
Kireçtaşı	-20 °C'de soğuma	-20 °C'de soğuma	-20 °C'de soğuma	Suda soğuma
Mermer	Suda soğuma	Suda soğuma	Suda soğuma	Suda soğuma

Özellikle yukarıda açıklanan sebeplere bağlı olarak ani soğumanın ancak ve ancak maksimum sıcaklığa bağlı olduğu ve bir eşik değerden sonra etkili olduğu söylenebilir. Gerek bu çalışmada elde edilen veriler gerekse literatür, termal hasarın ve farklı soğuma etkisinin litolojiden bağımsız olarak, maruz kalınan maksimum sıcaklığa, kayacın mineralojik bileşimine, çimentolanma derecesine ve özellikle kil vb. ikincil minerallerin varlığına bağlı olduğunu göstermektedir. Ersoy vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada bu durum çok net olarak ortaya konmuştur. Çalışmada 1000 °C'ye kadar ısıtılan volkanik kayaçlarda hızlı ve yavaş soğumadan hangisinin kayaç yapısında daha etkili olduğu tam olarak belirlenememiştir. Bu durumun yüksek sıcaklık minerallerinin davranışına bağlı olduğu, dolayısıyla mineralojik bileşimin bu süreçte etkin rol oynadığı düşünülmektedir.

Mineralojik Değişimlerin Değerlendirilmesi

Monomineralik bir bileşime sahip olan mermer ve travertenlerdeki kalsit kristallerinde, mineral bileşiminde herhangi bir değişiklik olmamasına rağmen sıcaklığa bağlı olarak termal genişleme meydana gelmiştir. Kayaçta birbirleriyle birincil temas halinde olan kalsit kristalleri, artan sıcaklığın etkisiyle oluşan ısıl genişleme sırasında C kristal eksenine paralel yönde genişler ve C kristal eksenine dik yönde büzülür (Rosenholtz ve Smith, 1949). Bu, kalsit-kalsit sınırındaki bağı zayıflatmış ve bu kristal

sınırları boyunca mikro kırılmalara neden olarak dayanımda azalmaya sebep olmuştur.

Kireçtaşında durum daha farklıdır. Kalsit kristalleri ısınma ile aynı fiziksel davranışı gösterse de kalsit-illit sınırında farklı bir durum ortaya çıkmıştır. Kalsitin sert yapısına karşın illit çok esnek bir mineraldir. Kireçtaşında sıcaklığın artmasıyla termal genişleme meydana gelmiş, ancak kalsit-illit sınırındaki kalsit kristallerinin uzaması veya kısalması esnek illit tarafından sönümlenmiştir. Bu nedenle, kalsit-illit kristal sınırlarında daha az mikro-kırık gelişmiştir. Kireçtaşı örneklerindeki dayanım azalma oranının traverten ve mermer örneklerinde meydana gelen dayanım oranı azalmasına göre daha düşük olmasının ana nedeni budur.

SONUÇLAR

Yüksek sıcaklıkların, özellikle yangınların, kayaçlar üzerindeki etkilerinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda; genel olarak lineer sıcaklık-zaman eşitlikleri kullanılmakta, uygulamada 5-10 °C/dk'lık ısınma oranları seçilmektedir. Ayrıca ani soğutma etkisi genel olarak su ve LN₂ kullanılarak araştırılmaktadır. Bu çalışmada literatürdeki çalışmaların birçoğundan farklı olarak Eurocode (2002) tarafından önerilen ve gerçek bir yangını simüle edebilen sıcaklık-zaman eğrileri (eksponansiyel ısınma oranları) kullanılarak ısıtma yapılmıştır. Bu çalışmada kayaçlar gerçek bir yangın sonrası soğuma koşulları göz önüne alınarak 3 farklı

şekilde soğutulmuştur: (1) ortam sıcaklığında kendi kendine soğuma, (2) soğuk mevsimlerde sıfırın altındaki sıcaklıklarda kendi kendine soğuma ve (3) yangın müdahalesine bağlı olarak suyla soğutma. Hem bu çalışma hem de literatürdeki çalışmalarda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve aşağıda özetlenen sonuçlar elde edilmiştir:

- (1) Kayaçlar üzerinde ani soğuma çoğu zaman yavaş soğumaya göre daha fazla termal hasara neden olmaktadır. Isınma sonrası ani soğuma durumunun söz konusu olması durumunda kayaçların termal bozunmasında ve özellikle mikro-kırık oluşumunda soğuma şekli ısınmaya oranla daha etkilidir.
- (2) Ani soğumada genellikle yeni çatlak oluşumundan daha çok var olan kırıkların büyümesi önem taşımaktadır. Yeni çatlaklar ise genellikle minerallerde değil, çimentoda gelişmektedir.
- (3) Çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan traverten ve mermerlerin farklı soğuma koşullarında benzer, kireçtaşlarının ise bunlardan farklı davranış sergilediği görülmüştür. Kayaçlar karbonat bileşimli kimyasal tortul ve metamorfik kayaçlar olmasına karşın farklı davranış sunmaları bileşimlerindeki kil vb. gibi diğer minerallerden kaynaklanmaktadır. Traverten ve mermerlerden farklı olarak kireçtaşlarının kil içeriklerinin fazla olması yüksek sıcaklıklar karşısında davranışlarının farklı olmasındaki en önemli nedendir.
- (4) Yüksek sıcaklıklara maruz kalan traverten ve mermer örneklerinin fiziksel özellikleri en fazla suda soğuma sonrası değişirken, kireçtaşları için en etkin süreç $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de havada soğuma olmuştur. Ancak bu değişim %20'yi aşmamıştır. Bu nedenle bir dış yangın durumunu simüle eden 680 derece sıcaklığın

karbonat kayaçların fiziksel özelliklerini çok fazla etkilemediği söylenebilir.

- (5) Dayanım fiziksel özelliklerden farklı olarak soğuma süreçlerinden daha fazla etkilenmiş, tüm kayaç gruplarında en düşük değer suda soğuma sonrası gözlenmiştir. Bu soğuma koşulunda, traverten ve mermerlerde dayanım %70-80 arasında azalırken, kireçtaşlarında bu değer %30'u geçmemiştir.
- (6) Tüm soğuma süreçlerinden en az etkilenen kayaç grubu kireçtaşıdır. Özellikle kil içeriği yüksek kayaçların dayanımlarının $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda bile ilksel dayanımlarından daha yüksek olması (Ersoy vd., 2019, Ersoy vd., 2021b) durumu dikkate alındığında, bu çalışmada $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa tabi tutulan kil içeriği yüksek kireçtaşlarının dayanımların diğer kayaç gruplarına göre daha az etkilenmesi önceki çalışmalarla uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

- Abdulagatova, Z.Z., Kallaev, S.N., Omarov, Z.M., Bakmaev, A.G., Grigor'Ev, B.A., Abdulagatov, I.M., (2020). Temperature effect on thermal-diffusivity and heat-capacity and derived values of thermal-conductivity of reservoir rock materials. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 6, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s40948-019-00131-2>
- ASTM, (2008). D2845-08 standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. West Conshohocken: ASTM International
- Biró, A., Hlavička, V., Lublóy, É., (2019). Effect of fire-related temperatures on natural stones. *Construction and Building Materials*, 212, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.333>
- Browning, J., Meredith, P., Gudmundsson, A., (2016). Cooling-dominated cracking in thermally stressed volcanic rocks. *Geophysical*

- Research Letters, 43, 8417-8425. <https://doi.org/10.1002/2016GL070532>
- Chen, Y., Zhang, C., Zhao, Z., Zhao, X., (2020). Shear behavior of artificial and natural granite fractures after heating and water-cooling treatment. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 5429-5449. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02221-0>
- Crosby, Z.K., Gullett, P.M., Akers, S.A., Graham, S.S., (2018). Characterization of the mechanical behavior of Salem limestone containing thermally-induced microcracks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 101, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.002>
- Emirov, S.N., Aliverdiev, A.A., Zarichnyak, Y.P., Emirov, R.M., (2021). Studies of the effective thermal conductivity of sandstone under high pressure and temperature. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 3165-3174. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02353-3>
- EN 1991-1-2, (2002). Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC
- Ersoy, H., Acar, S., (2016). Influences of petrographic and textural properties on the strength of very strong granitic rocks. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1461. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6277-y>
- Ersoy, H., Atalar, C., Sünnetci, M.O., Kolaylı, H., Karahan, M., Ersoy, A.F., (2021). Assessment of damage on geo-mechanical and micro-structural properties of weak calcareous rocks exposed to fires using thermal treatment coefficient. *Engineering Geology*, 284, 106046. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106046>
- Ersoy, H., Karahan, M., Kolaylı, H., Sünnetci, M.O., (2021). Influence of mineralogical and micro-structural changes on the physical and strength properties of post-thermal-treatment clayey rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 679-694. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02282-1>
- Ersoy, H., Kolaylı, H., Karahan, M., Harputlu Karahan, H., Sünnetci, M.O., (2019). Effect of thermal damage on mineralogical and strength properties of basic volcanic rocks exposed to high temperatures. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 1515–1525. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1208-z>
- Feng, G., Wang, X., Kang, Y., Zhang, Z., (2020). Effect of thermal cycling-dependent cracks on physical and mechanical properties of granite for enhanced geothermal system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 134, 104476. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104476>
- Han, G., Jing, H., Su, H., Liu, R., Yin, Q., Wu, J., (2019). Effects of thermal shock due to rapid cooling on the mechanical properties of sandstone. *Environmental Earth Sciences*, 78, 146. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8151-1>
- ISO, (1999). ISO 834: Fire resistance tests-elements of building construction. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- ISRM, (1978). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Suggested method for determining indirect tensile strength by Brazilian test. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Z.T. Bieniawski and I. Haweks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15, 102–103
- ISRM, (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. Suggested methods prepared by the commission on testing methods. In: Ulusay R, Hudson JA, eds. *Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group*. Ankara, Turkey
- Johnston, J., (1910). The Thermal Dissociation of Calcium Carbonate. *Journal of the American Chemical Society*, 32, 938-946
- Kara, I.B., (2021). Effects of cooling regimes on limestone rock and concrete with limestone aggregates at elevated temperatures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138, 104618. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104618>

- Kim, K., Kemeny, J., Nickerson, M., (2019). Effect of rapid thermal cooling on mechanical rock properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 2005-2019. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0523-3>
- Kumari, W.G.P., Ranjith, P.G., Perera, M.S.A., Chen, B.K., Abdulagatov, I.M., (2017). Temperature-dependent mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite with different cooling treatments. *Engineering Geology*, 229, 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.09.012>
- Kunze, G.W., (1965). Pretreatment for mineralogical analysis. In: Black CA, ed. *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Properties Including Statistics of Measurement and Sampling*. American Society of Agronomy, Madison WI; 568-577
- Li, Q., Yin, T., Li, X., Zhang, S., (2020). Effects of rapid cooling treatment on heated sandstone: a comparison between water and liquid nitrogen cooling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 313-327. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01571-6>
- Li, Z., Fortin, J., Nicolas, A., Deldicque, D., Gueguen, Y., (2019). Physical and mechanical properties of thermally cracked andesite under pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 3509-3529. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01785-w>
- Li, Z.W., Long, M.C., Feng, X.T., Zhang, Y.J., (2021). Thermal damage effect on the thermal conductivity inhomogeneity of granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138, 104583. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104583>
- Liu, S., Xu, J., (2015). An experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks. *Engineering Geology*, 185, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.013>
- Meng, Q.B., Zhang, M.W., Han, L.J., Pu, H., Chen, Y.L., (2019). Experimental research on influence of loading rate on mechanical properties of limestone in high temperature state. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 3479-3492. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1332-4>
- Meng, T., Yongbing, X., Ma, J., Yue, Y., Liu, W., Zhang, J., Erbing, L., (2021). Evolution of permeability and microscopic pore structure of sandstone and its weakening mechanism under coupled thermo-hydro-mechanical environment subjected to real-time high temperature. *Engineering Geology*, 280, 105955. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105955>
- Nasseri, M.H.B., Goodfellow, S.D., Wanne, T., Young, R.P., (2013). Thermo-hydro-mechanical properties of Cobourgh limestone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 212-222. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.03.004>
- Pei, L., Blöcher, G., Milsch, H., Zimmermann, G., Sass, I., Huenges, E., (2018). Thermo-mechanical Properties of Upper Jurassic (Malm) Carbonate Rock Under Drained Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 23-45. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1313-0>
- Popov, Y., Beardsmore, G., Clauser, C., Roy, S., (2016). ISRM suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 4179-4207. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1070-5>
- Rong, G., Sha, S., Li, B., Chen, Z., Zhang, Z., (2021). Experimental investigation on physical and mechanical properties of granite subjected to cyclic heating and liquid nitrogen cooling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 2383-2403. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02390-6>
- Rosenholtz, J.L., Smith, D.T., (1949). Linear thermal expansion of calcite, var. Iceland spar, and Yule Marble. *American Mineralogist*, 34, 846-854
- Sha, S., Rong, G., Chen, Z., Li, B., Zhang, Z., (2020). Experimental evaluation of physical and mechanical properties of geothermal reservoir rock after different cooling treatments *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 4967-4991. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02200-5>

- Sha, S., Rong, G., Peng, J., Li, B., Wu, Z., (2019). Effect of open-fire-induced damage on Brazilian tensile strength and microstructure of granite. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 4189-4202. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01871-z>
- Shao, Z., Wang, Y., Tang, X., (2020). The influences of heating and uniaxial loading on granite subjected to liquid nitrogen cooling. *Engineering Geology*, 271, 105614. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105614>
- Shen, Y., Hou, X., Yuan, J., Xu, Z., Hao, J., Gu, L., Liu, Z., (2020). Thermal deterioration of high-temperature granite after cooling shock: multiple-identification and damage mechanism. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 5385-5398. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01888-7>
- Villarraga, C.J., Gasc-Barbier, M., Vaunat, J., Darrozes, J., (2018). The effect of thermal cycles on limestone mechanical degradation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 109, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.017>
- Wang, F., Konietzky, H., Frühwirt, T., Li, Y., Dai, Y., (2019). Impact of cooling on fracturing process of granite after high-speed heating. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 125, 104155. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104155>
- Wang, P., Xu, J., Liu, S., (2015). Staged moduli: a quantitative method to analyze the complete compressive stress-strain response for thermally damaged rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 1505-1514. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0648-z>
- Wang, Z., Zhang, W., Shi, Z., Zhang, S., (2022). Changes of physical properties of thermal damaged sandstone with time lapse. *Acta Geophysica*, 2022, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00782-y>
- Whitney, D., Evans, B., (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wu, X., Huang, Z., Song, H., Zhang, S., Cheng, Z., Li, R., Wen, H.T., Huang, P.P., Dai, X.W., (2019). Variations of physical and mechanical properties of heated granite after rapid cooling with liquid nitrogen. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 2123-2139. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1727-3>
- Wu, X., Huang, Z., Zhang, S., Cheng, Z., Li, R., Song, H., Wen, H.T., Huang, P., (2019). Damage analysis of high-temperature rocks subjected to LN2 thermal shock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 2585-2603. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1711-y>
- Zhang, F., Zhang, Y., Yu, Y., Hu, D., Shao, J., (2020). Influence of cooling rate on thermal degradation of physical and mechanical properties of granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 129, 104285. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104285>
- Zhang, F., Zhao, J., Hu, D., Skoczylas, F., Shao, J., (2018). Laboratory investigation on physical and mechanical properties of granite after heating and water-cooling treatment. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 677-694. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1350-8>
- Zhang, W., Qian, H., Sun, Q., Chen, Y., (2015). Experimental study of the effect of high temperature on primary wave velocity and microstructure of limestone. *Environmental Earth Sciences*, 74, 5739-5748. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4591-4>
- Zhu, D., Jing, H., Yin, Q., Ding, S., Zhang, J., (2020). Mechanical characteristics of granite after heating and water-cooling cycles. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 2015-2025. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01991-6>

