Farklı Petrografik Kökenli Kayaçların Yüksek Sıcaklık Altındaki Jeomekanik Davranışlarının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi

A Comparative Study of the Geomechanical Behavior of Rocks of Different Petrographic Origins Under High Temperatures

Şahin GÜLERYÜZ[1*], Hüsna Nur KÖROĞLU[2], Mehmet Volkan ÖZDOĞAN[3]
[1,3] Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir
**Sorumlu Yazar: sahin.guleryuz@deu.edu.tr*

Özet

Bu çalışmada, deney veri setinde yer alan Andezit, Traverten, Kireçtaşı-2 ve Kireçtaşı-3 örneklerinin 105°C, 400°C ve 800°C sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra gösterdiği jeomekanik değişimler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, ISRM (International Society for Rock Mechanics, Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği) tarafından önerilen yöntemler kapsamında NX çapında (54,7 mm) hazırlanan silindirik kayaç numuneleri üzerinde kuru ve suya doygun koşullarda ultrasonik dalga hızı (P ve S dalgaları), birim hacim ağırlık, tek eksenli sıkışma dayanımı, statik ve dinamik elastisite modülü değerlerini belirlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Bulgular, karbonatlı sedimanter kayaçların (Traverten ve Kireçtaşı-2) özellikle 800°C'deki sıcaklıkta kalsinasyon reaksiyonuna uğrayarak iç yapısal bütünlüklerini kaybettiğini ve dayanımlarında ciddi düşüşler yaşandığını göstermiştir. Buna karşın, kuvars içerikli matrise sahip olan Kireçtaşı-3 örneği, termal şoklara karşı daha kararlı bir davranış sergilemiştir. Deney serisinde en yüksek termal stabiliteyi ise, düşük gözenekli volkanik matrisi ve mineraller arası termal kenetlenme mekanizması sayesinde andezit numuneleri göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Andezit, jeomekanik özellikler, kireçtaşı, termal şok, traverten.

Abstract

In this study, the geomechanical changes exhibited by the Andesite, Travertine, Limestone-2, and Limestone-3 samples in the experimental dataset after heating to 105°C, 400°C, and 800°C were examined comparatively. As part of the experimental studies, tests were conducted on cylindrical rock specimens prepared with an NX diameter (54.7 mm) in accordance with the methods recommended by the ISRM (International Society for Rock Mechanics) to determine the ultrasonic wave velocity (P and S waves), unit weight, uniaxial compressive strength, and static and dynamic elastic modulus values under dry and water-saturated conditions. The findings showed that carbonate sedimentary rocks (Travertine and Limestone-2) completely lost their internal structural integrity and experienced significant decreases in strength, particularly upon calcination at 800°C. In contrast, the Limestone-3 rock, which has a quartz-rich matrix, exhibited more stable behavior against thermal shocks. The andesite samples demonstrated the highest thermal stability in the test series, thanks to their low-porosity volcanic matrix and intermineral thermal interlocking mechanism.

Keywords: *Andesite, geomechanical properties, limestone, thermal shock, travertine.*

1. Giriş

Kayaçlar, jeotermal enerji üretimi, nükleer atık depolama tesisleri, yeraltı madencilik operasyonları, tünel yangınları ve patlatma süreçleri gibi doğal ve mühendislik uygulamaları sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Yapı ve tünel yangınları esnasında ortam sıcaklıkları kısa sürede 1000°C - 1200°C seviyelerine ulaşabilirken, patlatma veya ani soğutma süreçlerinde açığa çıkan termal şoklar kayaç matrisinde şiddetli sıcaklık gradyanları oluşturmaktadır. Kayaç matrisini oluşturan minerallerin farklı termal genleşme katsayılarına sahip olması (anizotropik termal genleşme), mineral tane sınırlarında yüksek gerilmelerin birikmesine ve yoğun mikro çatlak ağlarının gelişmesine yol açmaktadır (Zhang ve ark., 2016; Yan ve ark., 2019; Moghrabi ve ark., 2026).

Yüksek sıcaklık ve soğuma rejimlerinin birleşik etkisi, kayaçların fiziksel, indeks ve mekanik özelliklerinde kademeli veya ani bozunmalara neden olmaktadır. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar; kayaç sıcaklığı arttıkça kayaçların kütle kaybı yaşadığını, efektif gözenekliliğinin yükseldiğini ve buna bağlı olarak ultrasonik dalga yayılım hızları, tek eksenli sıkışma dayanımı ile statik/dinamik elastisite modülleri gibi kritik jeomekanik parametrelerinde şiddetli düşüşler meydana geldiğini göstermektedir (Yang ve ark., 2017; Qi ve ark., 2021). Bu bozunma mekanizmalarının şiddeti, ulaşılan eşik sıcaklıklara ve kayaçların mineralojik bileşimine doğrudan bağlıdır. 400 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda esas olarak serbest ve bünye suyunun uzaklaşması ile fiziksel genleşmeler etkiliyken; 400 °C - 600 °C aralığında kuvars içeren kayaçlarda $\alpha - \beta$ faz dönüşümü, 600 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda ise karbonatlı kayaçlarda kalsinasyon reaksiyonu ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) gibi mikroyapısal yıkıma yol açan mineralojik dönüşümler gerçekleşmektedir (Gautam ve ark., 2018). Belli başlı magmatik kayaçlarda ise yüksek sıcaklıklarda gözlenen camsı faz oluşumları veya mineraller arası termal kenetlenme mekanizmaları, çatlak ilerlemesini kısıtlayarak kayaç matrisine göreli bir termal direnç kazandırabilmektedir (Li ve ark., 2023; Jin ve ark., 2024).

Literatürde yüksek sıcaklığın kaya mekaniği üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda araştırma bulunmasına rağmen; mevcut çalışmaların büyük bir kısmı tekil kayaç türlerine odaklanmış veya sadece kuru koşullardaki davranışları değerlendirmiştir. Kayaç türlerinin termal davranışlarını saptamaya yönelik olarak yapılan geçmişteki deneysel araştırmalar, sıcaklık artışının mikroyapısal ve mekanik parametreler üzerindeki bozundurucu etkisini ortaya koymuştur. Sirdesai ve ark. (2017), yüksek sıcaklığa maruz bırakılan kumtaşı kayaçlarında 500 °C sonrasında kayacın gözenek yapısının hızla genişlediğini, ultrasonik dalga hızlarında belirgin bir düşüş yaşandığını ve elastisite modüllerinin de önemli ölçüde gerilediğini tespit etmişlerdir. Benzer şekilde Idris (2018) tarafından yapılan çalışmada ise, karbonatlı kayaçların yüksek sıcaklık altındaki mekanik özellikleri incelenmiş, 600 °C sınırının aşılmasıyla başlayan kalsinasyon sürecinin kayaç matrisinde termal çatlak yoğunluğunu katlayarak tek eksenli sıkışma dayanımında ani ve yıkıcı kayıplara neden olduğu vurgulanmıştır. Diğer taraftan Vagnon ve ark. (2019), yüksek sıcaklığa maruz bırakılan mermerlerde oluşan termal etkilerin ve mikro çatlak ağlarının fiziko-mekanik özellikler üzerindeki değişimlerini inceledikleri kapsamlı araştırmalarında, artan sıcaklıkla birlikte mermerlerin ultrasonik dalga hızları ile mekanik dayanımları arasında doğrusal düşüş bağıntıları elde etmişlerdir.

Farklı petrografik kökene (magmatik ve sedimanter) ve farklı mineralojik matrise sahip kayaçların, aynı sıcaklık kademeleri altında hem kuru hem de suya doygun durumdaki jeomekanik yanıtlarını bütüncül olarak kıyaslayan araştırmalar ise oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmanın temel amacı; magmatik (Andezit) ve karbonatlı sedimanter kökenli kayaçların (Traverten, Kireçtaşı-2 ve Kireçtaşı-3) yüksek sıcaklık koşulları altındaki jeomekanik davranışlarını karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. Bu kapsamda, ISRM standartlarına uygun olarak NX çapında hazırlanan silindirik numuneler üzerinde standart deney prosedürünün dışında 400 °C ve 800 °C sıcaklıklara ısıtılan kayaçların, kuru ve suya doygun koşullarda birim hacim ağırlık, ultrasonik dalga hızı, tek eksenli sıkışma dayanımı ile statik ve dinamik elastisite modülü deneyleri gerçekleştirilmiş, petrografik kökenin ve doygunluk durumunun termal bozunma üzerindeki belirleyici rolü detaylandırılmıştır.

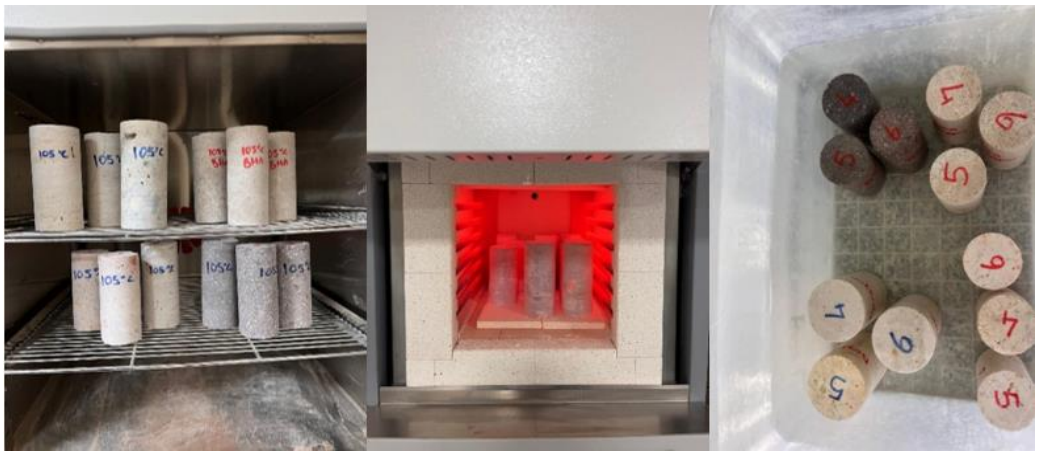
2. Materyal ve Yöntem

Laboratuvar çalışmalarında, farklı petrografik kökenlere sahip yapı taşlarında yüksek sıcaklığın kayacın bazı jeomekanik özellikleri üzerindeki etkisinin tespit edilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada kullanılan Andezit, Traverten ve Kireçtaşı (Kireçtaşı-2 ve Kireçtaşı-3) kayaçlarından, ISRM (2007) standartlarına uygun olarak NX çaplı (54,7 mm) silindirik karot örnekler alınmıştır (Şekil 1). Numunelerin L/D (boy/çap) oranı 2,0 ile 2,5 arasında tutulmuş ve mekanik testlerde eksantrik (eksen dışı) yüklemeleri önlemek için uç yüzeyleri pürüzsüz bir hale getirilmiştir. Numuneler hazırlandıktan sonra kaya örneklerinin çalışma kapsamında planlanan fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Standart prosedür izlenerek gerçekleştirilen deneylerin ardından kayaçlar 400 ºC ve 800 ºC'ye ısıtılıp oda sıcaklığına getirildikten sonra aynı deneyler tekrarlanmış ve aradaki fark yorumlanmıştır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan silindirik karot örnekleri

Çalışmada kullanılan kayaçların birim hacim ağırlığı, tek eksenli sıkışma dayanımı, statik ve dinamik elastisite modülü değerleri ISRM 2007 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla numuneler 105°C'de 24 saat etüvde kurutulduktan sonra (Şekil 2a) desikatörde soğutulması beklenilip numuneler oda sıcaklığına ulaştığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisini belirlemek amacıyla numuneler kül fırınında kademeli olarak önce 200°C'de 30 dakika, ardından hedef sıcaklıkta (400°C ve 800°C) 2 saat olmak üzere 400°C ve 800°C kademelerinde ısıtılmıştır (Şekil 2b). Kayaçların ısıtılması sonrası numunelerde, ani soğuma çatlaklarını önlemek için fırın kapatıldıktan sonra fırın içerisinde önce kısa bir süre kademeli soğumaya bırakılmış (2-5°C/dk), sonrasında ise 24 saatte desikatör içerisinde oda sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Ardından numuneler iki gruba ayrılarak bir kısmı "kuru" ortamda muhafaza edilmiş, diğer kısmı ise saf suda bekletilerek "suya doygun" hale getirilmiştir (Şekil 2c).



a) *b)* *c)*

Şekil 2. Numunelerin etüv ve kül fırınında yüksek sıcaklıklara çıkartılması ve suya doygun hale getirmek için 24 saat su içerisinde bekletilmesi

Bu koşullandırma süreçlerinin ardından, numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler standart test yöntemleriyle belirlenmiştir. Bu kapsamda, kayaçların yüksek sıcaklığa maruziyetinin örnekler üzerindeki kütlesel ve hacimsel etkilerini belirlemek amacıyla birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Isıl hasarın kayaç matrisi içerisindeki etkilerini tahribatsız test yöntemleriyle belirlemek amacıyla ise ultrasonik dalga hızı ölçümleri yapılmış (Şekil 3) ve elde edilen veriler üzerinden dinamik elastisite modülleri hesaplanmıştır.



Şekil 3. Kayaçların P ve S dalga hızlarının ölçülmesi

Benzer şekilde yüksek sıcaklıklara ısıtılıp oda sıcaklığına soğutulmuş numunelerin dayanımlarındaki değişimin belirlenmesi amacıyla da deformasyon kontrollü tek eksenli sıkışma dayanım deneyleri gerçekleştirilmiş (Şekil 4) ve kayaçların yüksek sıcaklık sonrası dayanımlarındaki ve statik elastisite modüllerindeki değişimleri yorumlanmıştır.



Şekil 4. Deney numunelerine tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin uygulanması

3. Bulgular ve Tartışma

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri saptamak amacıyla yapılan testler sonucunda örneklerin 400 °C ve 800 °C'ye ısıtılıp oda sıcaklığına soğutulduktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler Tablo 1'de numune bazında sunulmuştur. Bu deney sonucu elde edilen veriler standart deneyler sonucunda (105°C) yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Standart (105 °C) ve farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış kayaçların deney sonuçları

Numune Adı ve Sıcaklık Derecesi	**Birin Hacim Ağırlık (kN/m^3)**	**Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)**	**Statik Elastisite Modülü (MPa)**	**V_p (m/sn)**	**V_s (m/sn)**	**Dinamik Elastisite Modülü (MPa)**
Traverten Kuru 105 °C	23,73	40,36	7986,60	4384	2428	36471
Traverten Kuru 400 °C	23,35	29,47	3240,81	3983	2284	31167
Traverten Kuru 800 °C	20,32	21,05	3120,45	2502	1711	12865
Traverten Doygun 105 °C	23,80	38,58	9649,36	4182	2398	35019
Traverten Doygun 400 °C	23,15	30,61	7928,12	3910	2250	29925
Traverten Doygun 800 °C	22,46	23,57	3588,52	3435	2124	24593
Andezit Kuru 105 °C	23,78	47,23	9971,79	3392	1748	19542
Andezit Kuru 400 °C	23,60	46,34	2599,07	3250	1890	21389
Andezit Kuru 800 °C	23,16	66,80	8289,32	3316	2048	23150
Andezit Doygun 105 °C	24,17	58,62	7831,29	3846	2210	30168
Andezit Doygun 400 °C	23,80	38,58	5420,15	3450	1980	23862

Andezit Doygun 800 ℃	23,20	68,18	9333,78	3512	2024	26110
Kireçtaşı-2 Kuru 105 ℃	23,69	17,39	4322,16	4220	2478	36682
Kireçtaşı-2 Kuru 400 ℃	23,02	14,02	2144,94	3656	2285	28902
Kireçtaşı-2 Kuru 800 ℃	22,37	*	*	2514	1420	11640
Kireçtaşı-2 Doygun 105 ℃	25,53	28,42	6890,20	4726	2510	42745
Kireçtaşı-2 Doygun 400 ℃	24,47	16,80	5293,74	4344	2187	31741
Kireçtaşı-2 Doygun 800 ℃	22,56	11,59	2262,29	3124	1825	19010
Kireçtaşı-3 Kuru 105 ℃	24,57	35,89	9377,60	4518	2625	42980
Kireçtaşı-3 Kuru 400 ℃	24,50	28,47	6275,80	2914	1804	19332
Kireçtaşı-3 Kuru 800 ℃	24,43	17,42	2490,56	1712	1129	7080
Kireçtaşı-3 Doygun 105 ℃	25,29	41,97	7633,47	4448	2718	45786
Kireçtaşı-3 Doygun 400 ℃	25,18	25,44	5225,01	3840	2298	33101
Kireçtaşı-3 Doygun 800 ℃	25,02	10,25	1460,02	2162	1380	11232

* : Kayaçta meydana gelen fiziksel bozulma nedeniyle geçerli ölçüm alınamamıştır.

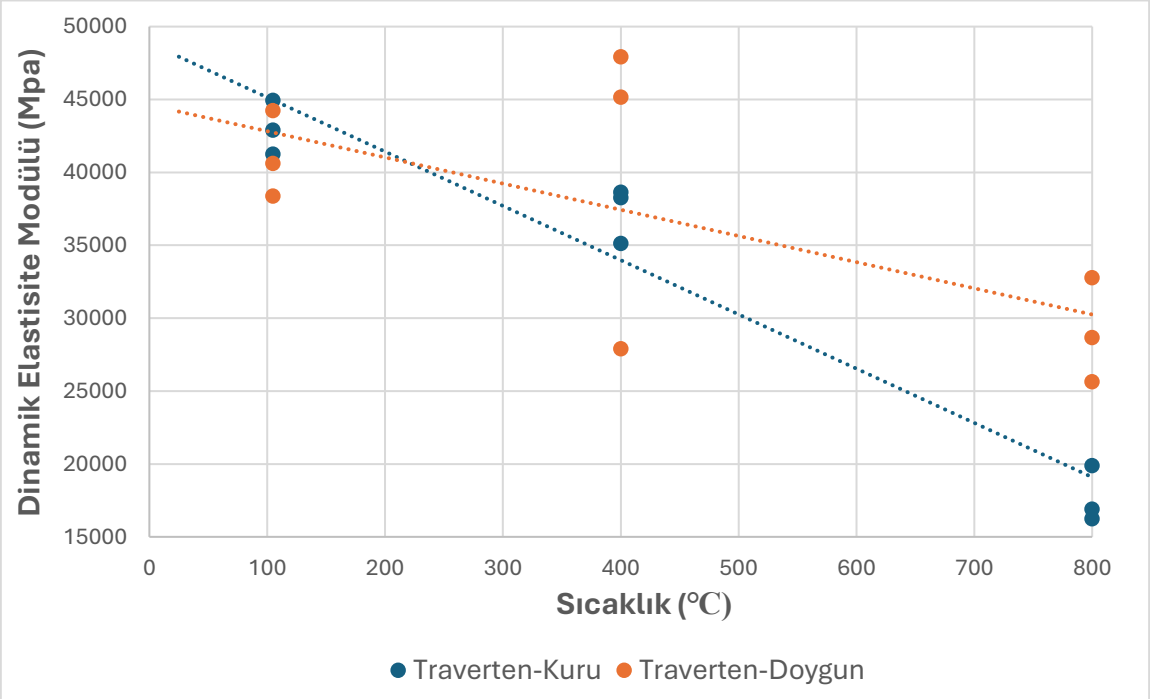
Elde edilen bulgular, kayaçların petrografik kökenlerine ve mineralojik bileşimlerine bağlı olarak sıcaklık artışı ile belirgin şekilde birbirlerinden farklı jeomekanik davranışlar gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle karbonat baskın sedimanter kayaçlardan Traverten ve Kireçtaşı-2, 400°C'ye kadar belirli bir oranda dayanım kaybı sergilerken; 800°C gibi yüksek sıcaklıkta şiddetli bir kalsinasyon reaksiyonuna ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) uğrayarak iç yapılarında yoğun mikro-çatlak ağları geliştirmiş ve dayanımlarında ciddi kayıplar yaşanmıştır. Ultrasonik deney sonucu V_p değerlerinde gözlemlenen düşüşler kayaç içerisindeki çatlak yapısının arttığını doğrulamaktadır. Deney serisinde en yüksek termal stabilite ise magmatik kökenli Andezit numunelerinde gözlenmiştir.

Karbonatlı kayaçlarda gözlenen dayanım kaybının temel nedeni kalsinasyon reaksiyonu iken; Andezit numunelerinde artan sıcaklıkla birlikte meydana gelen jeomekanik bozunmalar (elastisite modülü düşüşleri ve içsel mikro-hasarlar), litolojiyi oluşturan farklı minerallerin ısı karşısında farklı genleşme katsayılarına sahip olmasından kaynaklanan "anizotropik termal genleşme" ve buna bağlı "termal uyumsuzluk" mekanizmalarıyla açıklanmaktadır (Yang ve ark., 2017). Andezit; plajiyoklaz, hornblend ve piroksen gibi farklı termal genleşme katsayılarına sahip minerallerin heterojen birleşiminden oluşmaktadır. Sıcaklık arttıkça mineral tanelerinin farklı yönlerde genleşmesi, tane sınırlarında yüksek gerilmelere yol açarak mikro çatlak ağları oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, 500-600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda andezit yapısındaki minerallerin suyunu kaybetmesi (dehidroksilasyon) ve mineraller arasındaki yapısal değişimler (faz dönüşümleri) iç yapıdaki bozulmayı artırmıştır. Öte yandan, kayaçların ısıtılması sonrası koşullandırma evresinin sonuçları incelendiğinde, numunelerin suya doygun hale getirilmesinin, kuru numunelere kıyasla tüm sıcaklık kademelerinde suyun çatlak içi hidrodinamik basıncı ve mineral bağlarını zayıflatıcı etkisi nedeniyle daha belirgin mekanik yenilmelere yol açtığı saptanmıştır.

Tablo 1'deki veriler ayrıntılı olarak incelendiğinde, kireçtaşı numunelerinde düşük sıcaklıklarda suya doygunluğun sağladığı matris içi gözenek suyu sıkışmazlığı, mekanik dayanımı geçici olarak desteklerken, sıcaklık 800°C'ye ulaştığında kalsinasyon reaksiyonu nedeniyle bu etki tamamen kaybolmaktadır. Andezit kayacında 800°C gibi yüksek

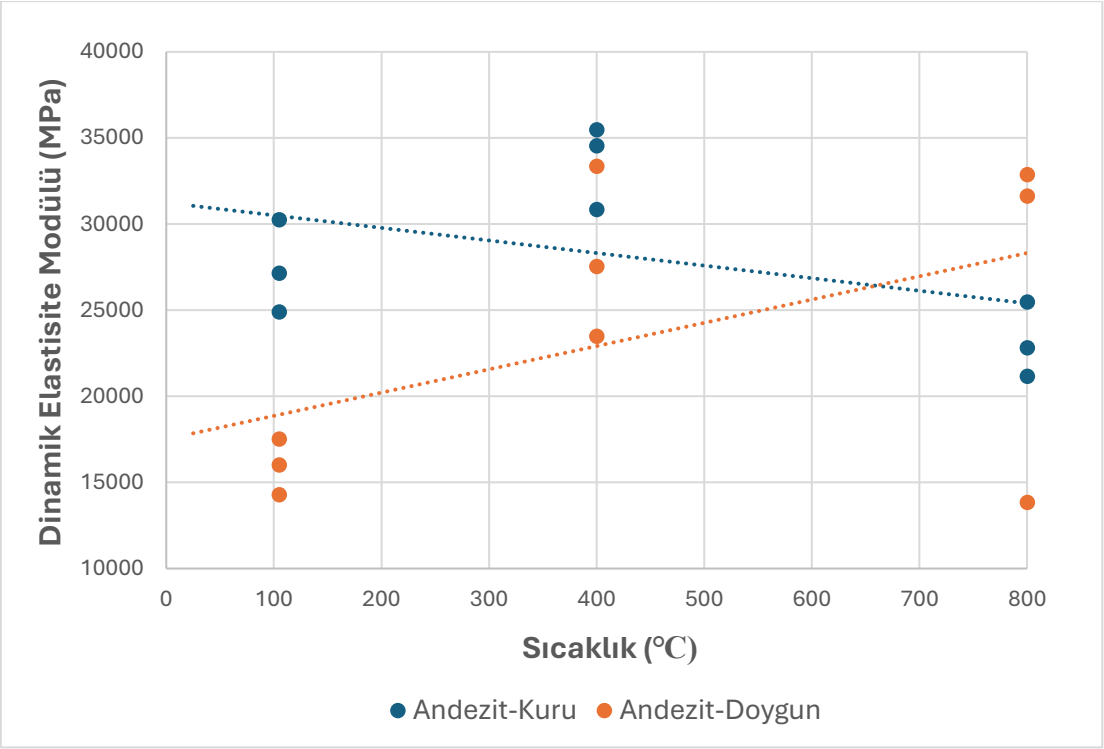
sıcaklıklarda, plajiyoklaz ve ferromagnezyen minerallerin farklı yönlerde genleşmesi tane sınırlarında mikro çatlakların termal kenetlenmesine neden olmakta, aynı zamanda matriste camsı faz oluşarak yapıyı sıkılaştırmaktadır. Yük altına giren bu yapı, kayacın rijitliğini artırarak statik elastisite modülü ve tek eksenli sıkışma dayanımında belirgin bir yükselmeye yol açmaktadır. Dinamik elastisite modülünün aynı sıcaklıkta düşük kalması ise mikro çatlakların ses dalgalarını yavaşlatmaya devam ettiğini, ancak kayacın yük altında kenetlenerek yüksek bir mekanik direnç kazandığını göstermektedir.

Deneye tabi tutulan numunelerin yüksek sıcaklık sonrasında meydana gelen mekanik özelliklerindeki değişimler sırasıyla grafikler üzerinde de gösterilmiştir. Traverten numuneleri için (traverten-kuru ve traverten-doygun) farklı sıcaklıklardaki numunelerin (105°C, 400°C ve 800°C) dinamik elastisite modülü değerindeki değişim grafiği Şekil 5'te yer almaktadır.



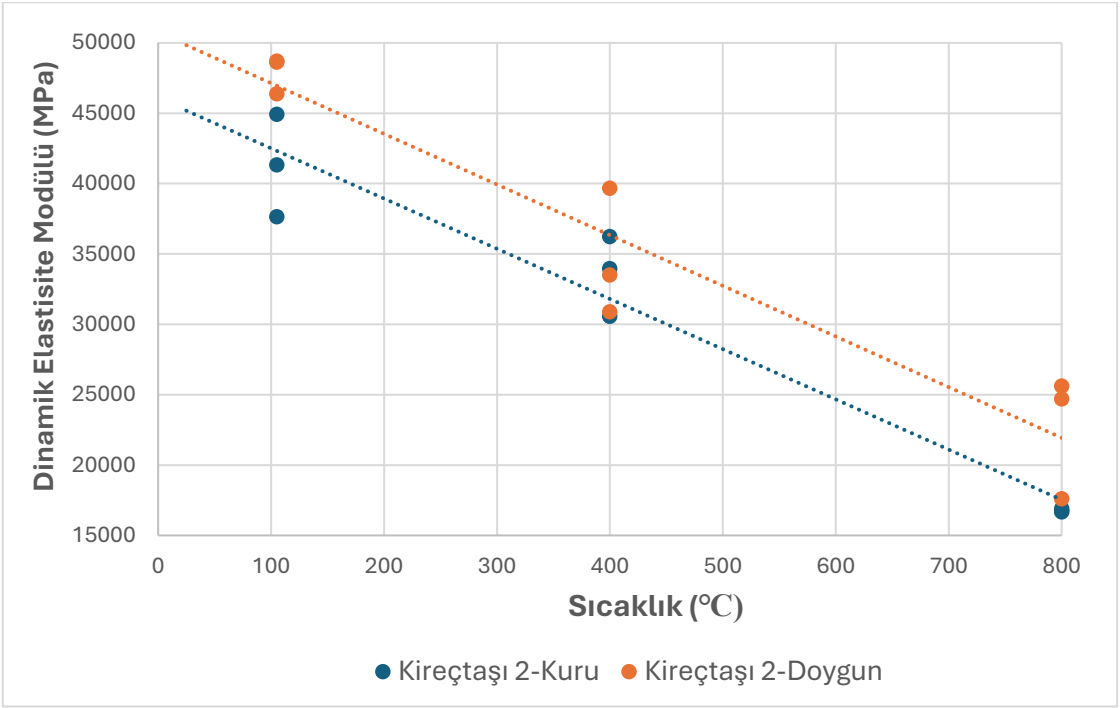
Şekil 5. Dinamik elastisite modülünün Traverten kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Andezit numuneleri için (andezit-kuru ve andezit-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800 °C) dinamik elastisite modülü değerindeki değişim grafiği Şekil 6'da yer almaktadır.



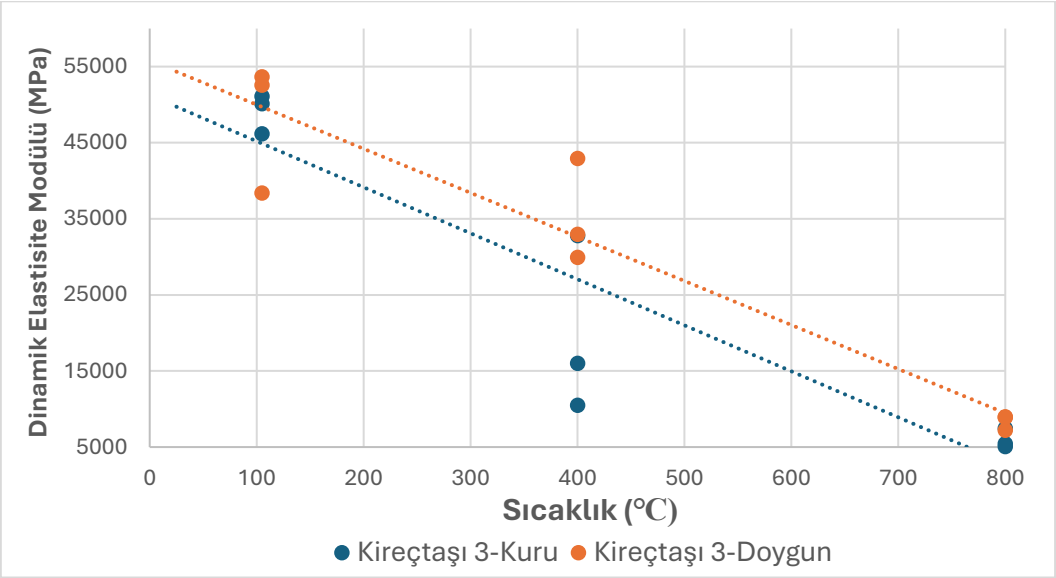
Şekil 6. Dinamik elastisite modülünün Andezit kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Kireçtaşı 2 numuneleri için (kireçtaşı 2-kuru ve kireçtaşı 2-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800 °C) dinamik elastisite modülü değerindeki değişim grafiği Şekil 7'de yer almaktadır.



Şekil 7. Dinamik elastisite modülünün Kireçtaşı 2 kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Kireçtaşı 3 numuneleri için (kireçtaşı 3-kuru ve kireçtaşı 3-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800°C) dinamik elastisite modülü değerindeki değişim grafiği Şekil 8'de yer almaktadır.



Şekil 8. Dinamik elastisite modülünün Kireçtaşı 3 kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

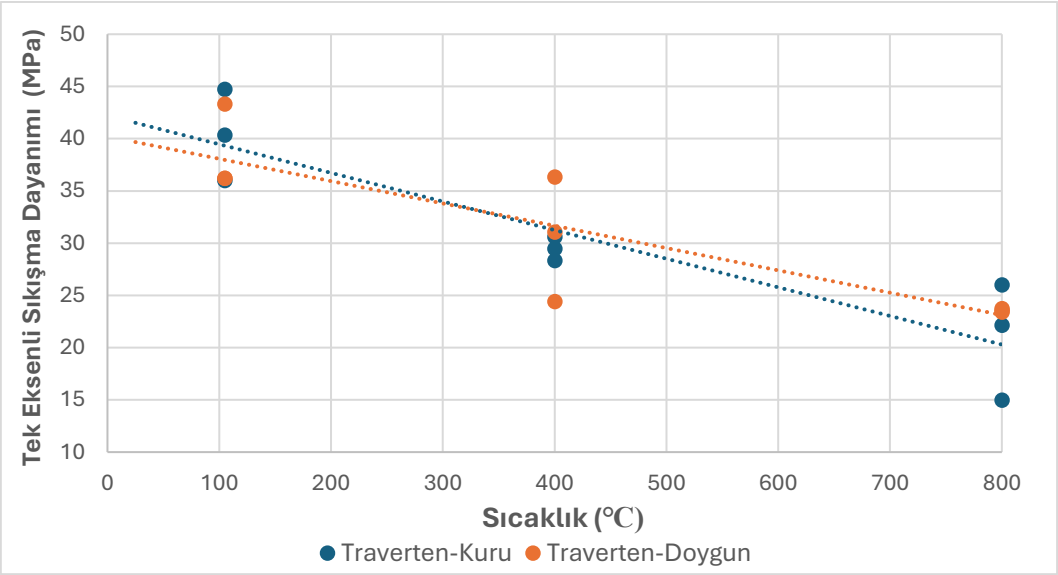
Sıcaklık artışının kayaç matrisinde oluşturduğu mikro-çatlak ağlarını ve içsel tahribatı doğrudan yansıtan dinamik elastisite modülü değerlerinin, artan sıcaklığa bağlı değişimleri Traverten (Şekil 5), Andezit (Şekil 6), Kireçtaşı-2 (Şekil 7) ve Kireçtaşı-3 (Şekil 8) için grafiksel olarak sunulmuştur. Tablo 1 ve ilgili grafikler bütüncül olarak incelendiğinde; dinamik elastisite modülü değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte kayaç türüne ve doygunluk koşuluna bağlı olarak belirgin düşüş eğilimleri gösterdiği, özellikle 800°C sıcaklıkta karbonatlı kayaçlarda şiddetli kayıpların yaşandığı tespit edilmiştir.

Karbonat bileşimli sedimanter kayaçlardan Traverten (Şekil 5) ve Kireçtaşı-2 (Şekil 7) numuneleri 400°C'ye kadar kademeli bir bozunma sergilerken; 800°C sıcaklıkta gerçekleşen kalsinasyon reaksiyonunun ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) tetiklediği yoğun mikro-çatlaklanma nedeniyle standart deney olan 105 °C sıcaklık sonrası yapılan deney sonucunda alınan değere kıyasla dinamik elastisite modülünde kuru koşullardaki Travertende %64,73 ve Kireçtaşı-2'de %68,27 düşüş gözlemlenmiştir. Kireçtaşı-3 numunesinde ise (kuru koşullarda) (Şekil 8) 800°C'deki elastisite modülündeki düşüş %83,53 seviyelerine ulaşarak serideki en şiddetli ultrasonik dalga sönümlenmesini oluşturmuştur. Bütün grafiklerde dikkat çeken ortak bir diğer husus, 105°C'de suya doygun numunelerin gözenek içi suyun yüksek ses iletim hızı sayesinde kuru numunelere kıyasla daha yüksek dinamik elastisite modülü değerleri sergilemesi, ancak 400°C ve 800°C'de suyun buharlaşması ve termal çatlakların baskın hale gelmesiyle bu farkın tamamen kapanmasıdır.

Beklendiği üzere en yüksek termal stabilite magmatik kökenli Andezit numunelerinde (Şekil 6) gözlenmiştir. Andezit; sahip olduğu sıkı, düşük gözenekli volkanik doku ve mineraller arası termal kenetlenme mekanizması sayesinde 800°C'lik sıcaklığa rağmen yapısal

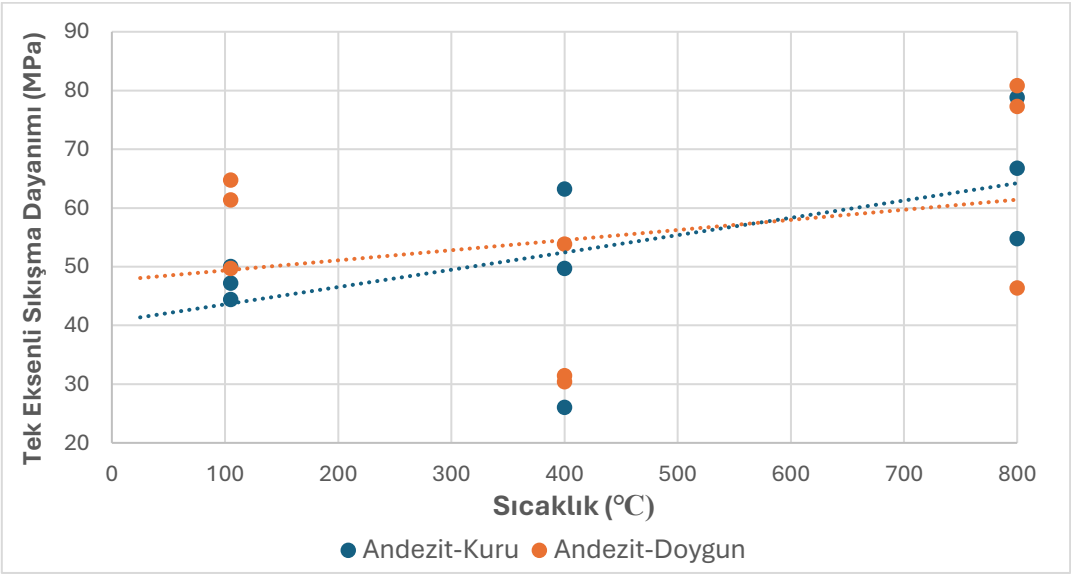
bütünlüğünü korumuş; kuru koşullardaki dinamik elastisite modülü değerlerinde bir azalma olmayıp yüksek bir termal direnç sergilemiştir. Elde edilen bu bulgular, tahribatsız bir yöntem olan ultrasonik darbe hızı ölçümlerinin ve türetilen dinamik modül verilerinin, kayaç matrisindeki mikro-ölçekli gizli termal hasarları ve kalsinasyon kaynaklı yapıyı tespit etmede son derece hassas ve güvenilir bir gösterge olduğunu kanıtlamaktadır.

Traverten numuneleri için (traverten-kuru ve traverten-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800°C) tek eksenli sıkışma dayanımındaki değişimleri gösteren grafik Şekil 9'da sunulmuştur.



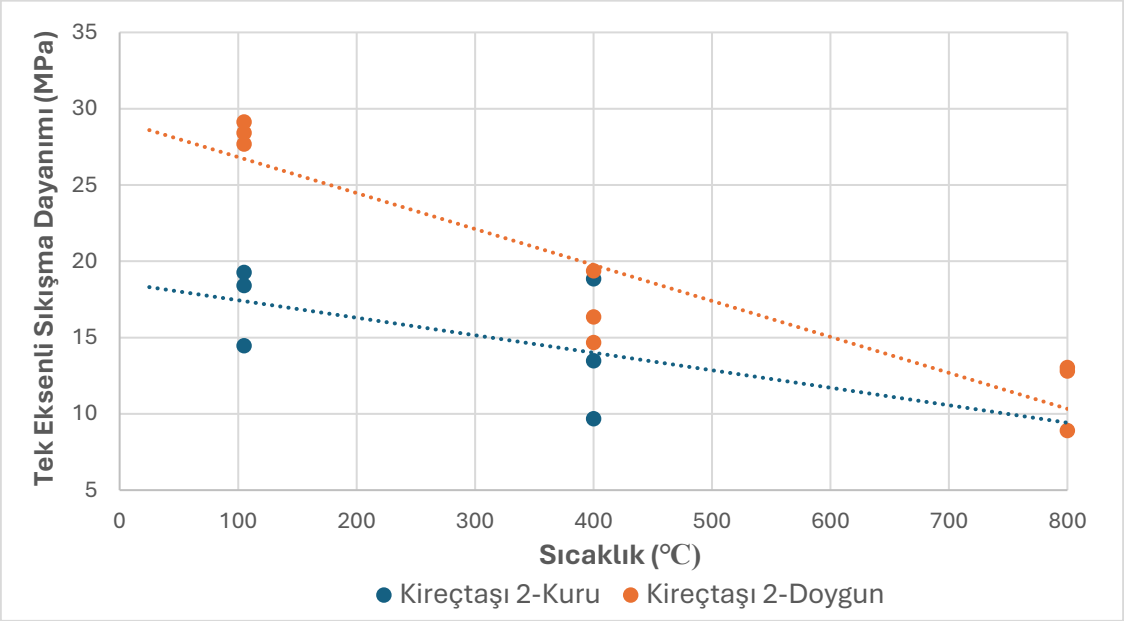
Şekil 9. Tek eksenli sıkışma dayanımının Traverten kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Andezit numuneleri için (andezit-kuru ve andezit-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800°C) tek eksenli sıkışma dayanımındaki değişimi gösteren grafik Şekil 10'da sunulmuştur.



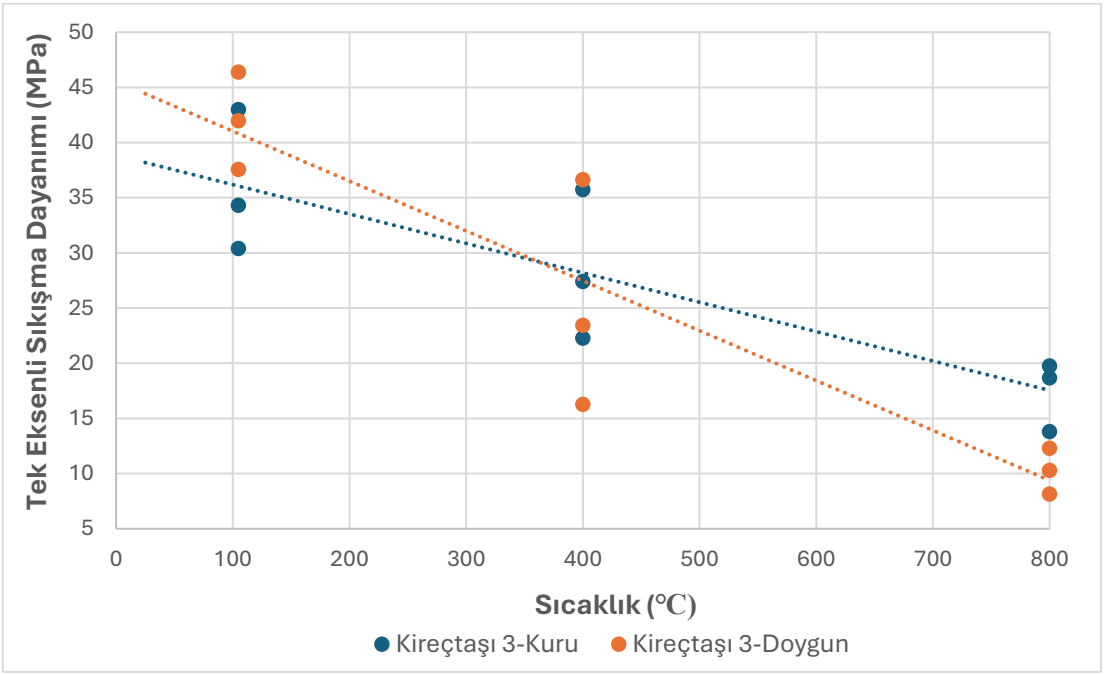
Şekil 10. Tek eksenli sıkışma dayanımının Andezit kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Kireçtaşı 2 numuneleri için (kireçtaşı 2-kuru ve kireçtaşı 2-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800°C) tek eksenli sıkışma dayanımındaki değişimi gösteren grafik Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Tek eksenli sıkışma dayanımının Kireçtaşı-2 kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Kireçtaşı 3 numuneleri için (kireçtaşı 3-kuru ve kireçtaşı 3-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800°C) tek eksenli sıkışma dayanımındaki değişimi gösteren grafik Şekil 12'de sunulmuştur.



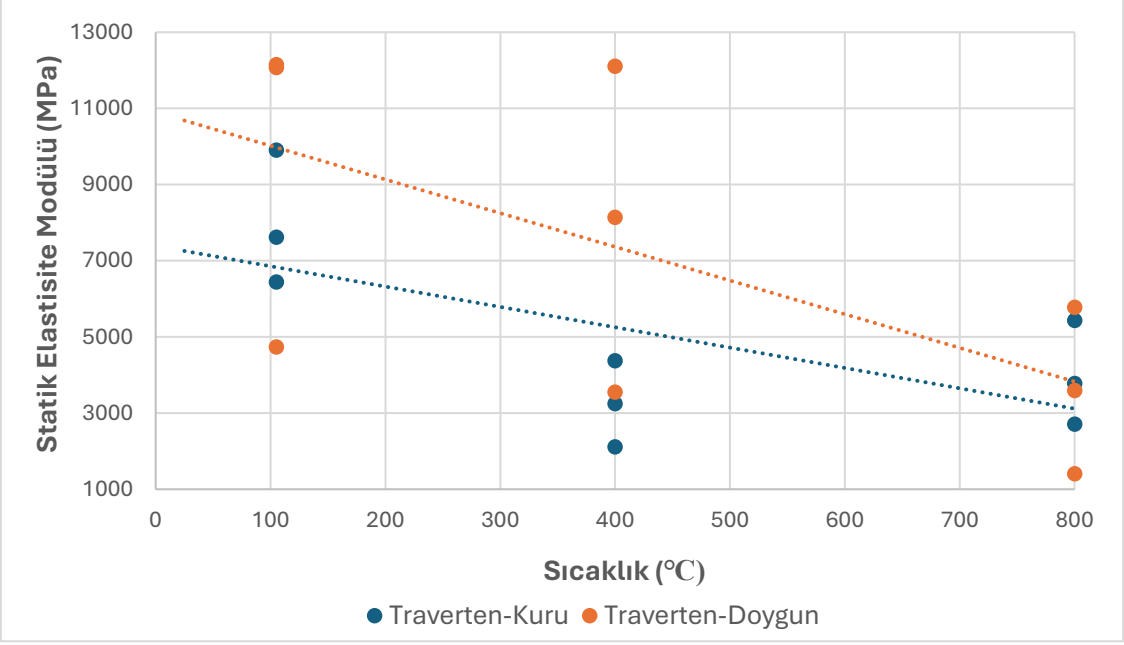
Şekil 12. Tek eksenli sıkışma dayanımının Kireçtaşı-3 kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçların nihai dayanımları üzerindeki etkilerini gösteren tek eksenli sıkışma dayanımı değişimleri Traverten (Şekil 9), Andezit (Şekil 10), Kireçtaşı-2 (Şekil 11) ve Kireçtaşı-3 (Şekil 12) için grafiksel olarak sunulmuştur. Tablo 1'deki gerilme verileri ve ilgili grafikler bütüncül olarak incelendiğinde, artan sıcaklık rejimlerinin kayaçların nihai dayanımları üzerinde petrografik kökene ve mineralojik matrise bağlı olarak belirgin ve farklı düzeylerde bozundurucu etkiler oluşturduğu saptanmıştır.

Karbonat bileşimli Traverten (Şekil 9) ve Kireçtaşı-2 (Şekil 11) numunelerinin tek eksenli sıkışma dayanımları 400°C'ye kadar kademeli bir düşüş sergilemiştir. Sıcaklığın 800°C'ye ulaşmasıyla birlikte gerçekleşen kalsinasyon reaksiyonunun ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) matris bütünlüğünü tamamen bozması neticesinde, dayanım değerlerinde ani kayıplar yaşanmıştır. 800°C sıcaklıkta Kireçtaşı-2 kuru koşulda tamamen dağıldığı için ölçüm alınamamış, Traverten kayacının dayanımı ise bu sıcaklıkta (800°C) %47,84 oranında azalmıştır.

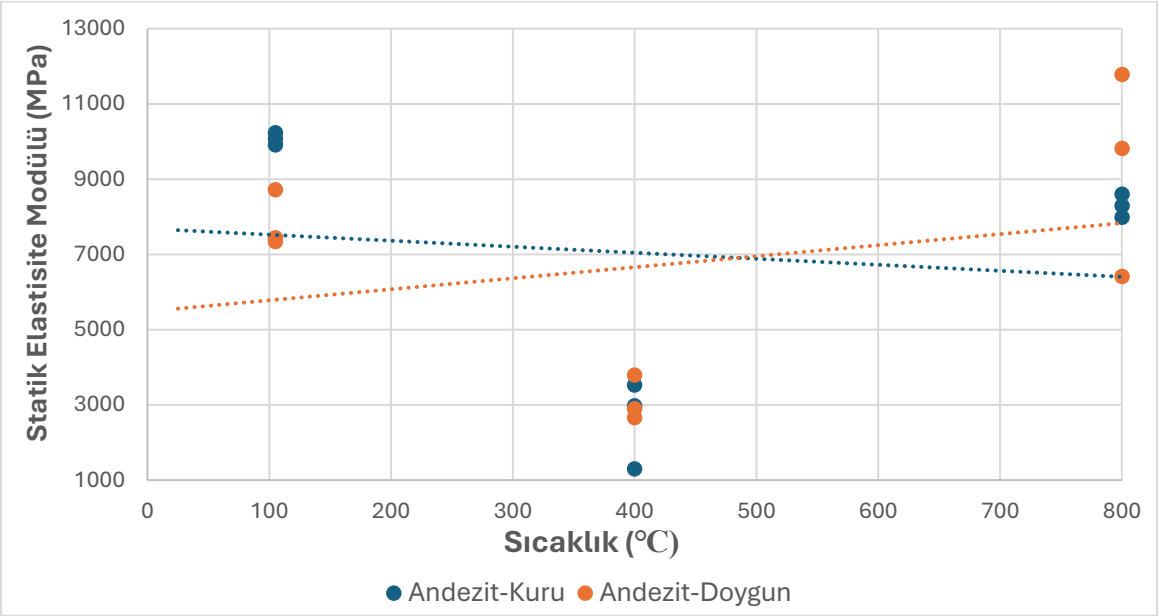
Koşullandırma süreçlerinin (doygunluk durumunun) mekanik davranış üzerindeki etkisi detaylandırıldığında, 105°C gibi düşük sıcaklık kademelerinde gözenek suyunun sıkışmazlığı ve matris içi gerilme dağılımını desteklemesi sayesinde suya doygun numunelerin genelde kuru numunelere kıyasla daha yüksek veya dengeli dayanım değerleri sergilediği görülmektedir. Ancak 400°C ve 800°C gibi yüksek sıcaklık kademelerinde, matriste gelişen termal mikro-çatlakların içerisine nüfuz eden suyun hidrodinamik kamalama etkisi ve mineral bağlarını zayıflatması neticesinde, suya doygun numunelerin kuru numunelere kıyasla daha düşük tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri verdiği net bir şekilde tespit edilmiştir.

Traverten numuneleri için (traverten-kuru ve traverten-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800°C) statik elastisite modülü değerindeki değişim grafiği Şekil 13'te sunulmuştur.



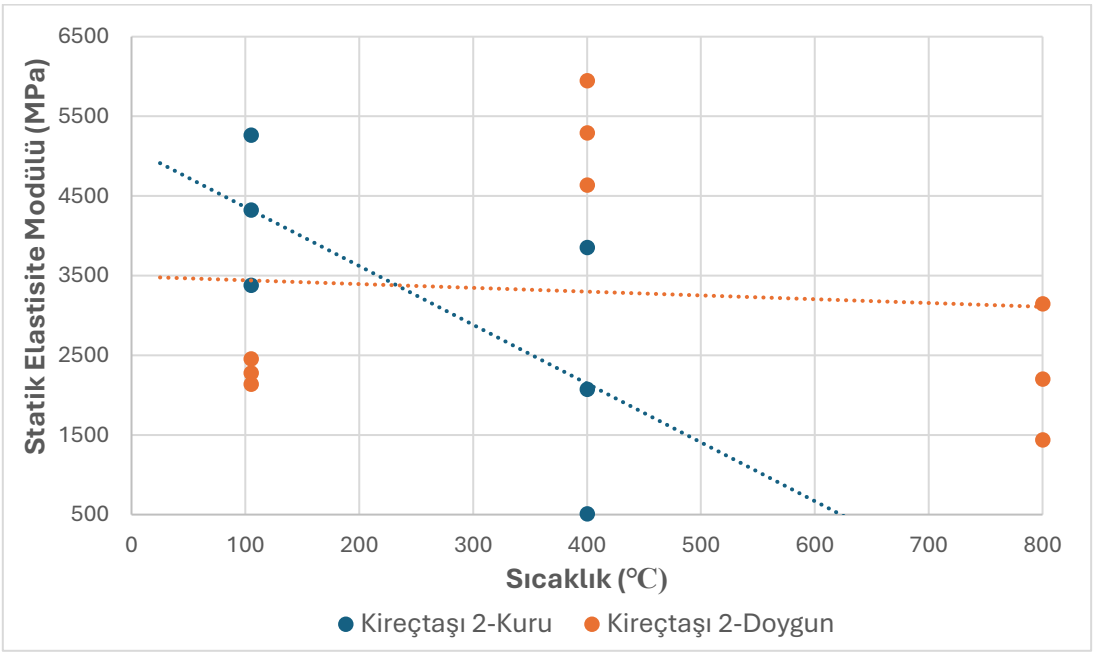
Şekil 13. Statik Elastisite Modülü değerinin Traverten kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Andezit numuneleri için (andezit-kuru ve andezit-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800°C) statik elastisite modülü değerindeki değişim grafiği Şekil 14'te sunulmuştur.



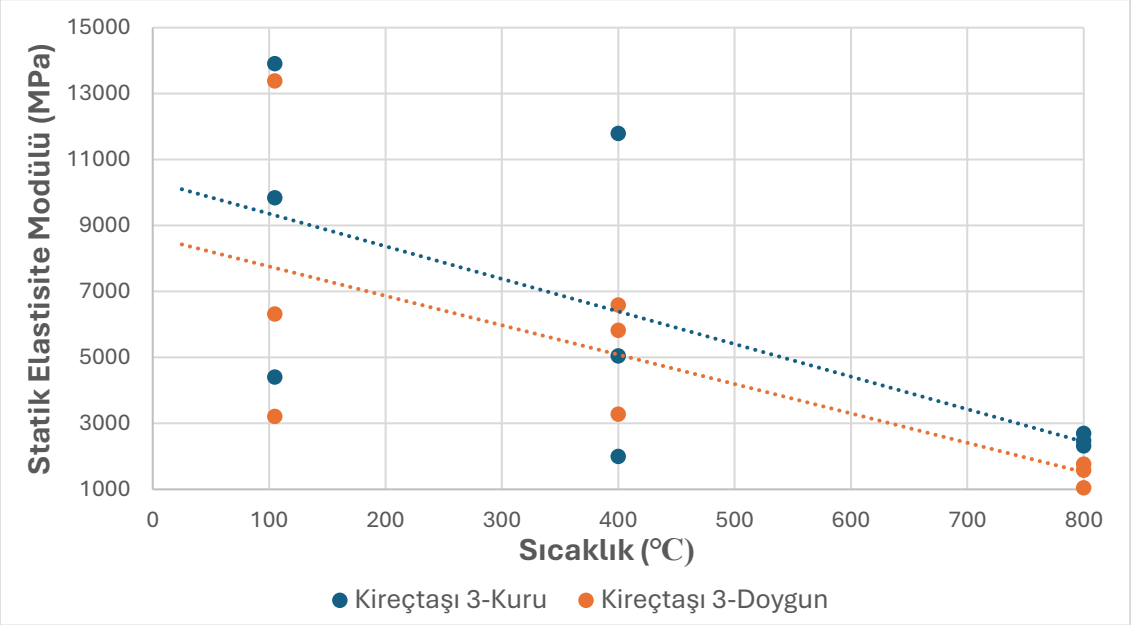
Şekil 14. Statik Elastisite Modülü değerinin Andezit kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Kireçtaşı 2 numuneleri için (kireçtaşı 2-kuru ve kireçtaşı 3-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800°C) statik elastisite modülü değerindeki değişim grafiği Şekil 15'te sunulmuştur.



Şekil 15. Statik Elastisite Modülü değerinin Kireçtaşı-2 kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Kireçtaşı 3 numuneleri için (kireçtaşı 3-kuru ve kireçtaşı 3-doygun) farklı sıcaklıklardaki (105°C, 400°C ve 800°C) statik elastisite modülü değerindeki değişim grafiği Şekil 16'da sunulmuştur.



Şekil 16. Statik Elastisite Modülü değerinin Kireçtaşı-3 kayacında sıcaklığa bağlı değişimleri

Sıcaklık artışının kayaçların yük altındaki şekil değiştirme davranışları üzerindeki bozundurucu etkilerini yansıtan statik elastisite modülünde (tanjant modülü) meydana gelen değişimler, Traverten (Şekil 13), Andezit (Şekil 14), Kireçtaşı-2 (Şekil 15) ve Kireçtaşı-3 (Şekil 16) için grafiksel olarak sunulmuştur. Tablo 1 verileri ve ilgili grafikler bütüncül olarak değerlendirildiğinde, statik elastisite modülü değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte tüm kayaç türlerinde genel bir düşüş eğilimi sergilediği, ancak düşüşün şiddetinin ve karakterinin litolojik bileşim ile uygulanan doygunluk koşuluna doğrudan bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Karbonatlı sedimanter kayaçlardan Traverten (Şekil 13) ve Kireçtaşı-3 (Şekil 16), 400°C ve 800°C sıcaklıklarda şiddetli kayıplara maruz kalmıştır. Travertende standart deney olan 105°C sonrası yapılan deney sonucunda 7986,60 MPa olan kuru numunenin statik elastisite modülü, 800°C'de 3120,45 MPa seviyesine gerilemiştir. (%60,93 düşüş). Kireçtaşı-3'te ise 105°C'deki 9377,60 MPa'lık kuru numunenin statik elastisite modülü, 800°C'deki kalsinasyon yıkımının etkisiyle 2490,56 MPa seviyesine düşerek %73,44 oranında ciddi bir kayıp yaşamıştır. Kireçtaşı-2 numunelerinde ise (Şekil 15) matris yapısının daha zayıf olması sebebiyle düşüş daha düşük sıcaklıklarda başlamış; 800°C'de numune bütünlüğünü tamamen yitirdiği için statik elastisite modülü ölçümü gerçekleştirilememiştir (Şekil 17).



Şekil 17. 800°C sıcaklığa maruz bırakılmış Kireçtaşı-2 numunelerindeki makroskobik bozunmalar

Bu çalışmada elde edilen deneysel veriler, farklı petrografik kökene sahip kayaçların yüksek sıcaklık altındaki jeomekanik davranışlarına yönelik son derece güçlü ve tutarlı eğilimler ortaya koysa da veri setinin istatistiksel değerlendirmesi açısından birtakım yöntemsel kısıtlamalar mevcuttur. Özellikle 800°C gibi yüksek termal kademelerdeki kalsinasyon reaksiyonunun ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) yarattığı şiddetli içsel tahribat sebebiyle, bazı karbonatlı sedimanter kayaç numuneleri (özellikle Kireçtaşı-2) mekanik veya ultrasonik test aşamasına geçemeden makro-çatlaklanmalarla dağılmış ve geçerli veri üretilememiştir. Bu durum, söz konusu spesifik sıcaklık kademelerindeki ortalama değerlerin istatistiksel temsil gücünü sınırlandırmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda kayaçların yüksek sıcaklığa maruz kalması sonrası mekanik özelliklerinde meydana gelen yüzdesel değişimler toplu olarak Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Yüksek sıcaklık sonrası kayaçların mekanik özelliklerinde meydana gelen yüzdesel değişimler

Numune Adı ve Sıcaklık Derecesi	**105°C'de Gerçekleştirilen Referans Değerlere Göre Değişim (%)**		
	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı	**Statik Elastisite Modülü**	**Dinamik Elastisite Modülü**
Traverten Kuru 400 °C	-26,98	-59,42	-14,54
Traverten Kuru 800 °C	-47,84	-60,93	-64,73
Traverten Doygun 400 °C	-20,66	-17,84	-14,55
Traverten Doygun 800 °C	-38,91	-62,81	-29,77
Andezit Kuru 400 °C	-1,88	-73,94	+9,45
Andezit Kuru 800 °C	+41,44	-16,87	+18,46
Andezit Doygun 400 °C	-34,19	-30,79	-20,90
Andezit Doygun 800 °C	+16,32	+19,19	-13,45

Kireçtaşı-2 Kuru 400 °C	-19,38	-50,37	-21,21
Kireçtaşı-2 Kuru 800 °C	*	*	-68,27
Kireçtaşı-2 Doygun 400 °C	-40,89	-23,17	-25,74
Kireçtaşı-2 Doygun 800 °C	-59,22	-67,17	-55,53
Kireçtaşı-3 Kuru 400 °C	-20,67	-33,08	-55,02
Kireçtaşı-3 Kuru 800 °C	-51,46	-73,44	-83,53
Kireçtaşı-3 Doygun 400 °C	-39,39	-31,55	-27,70
Kireçtaşı-3 Doygun 800 °C	-75,58	-80,87	-75,47

* : Kayaçta meydana gelen fiziksel bozulma nedeniyle geçerli ölçüm alınamamıştır.

Bu bağlamda; gelecekte gerçekleştirilecek araştırmalarda numune türü ve sayısının artırılması, termal bozunma nedeniyle test dışı kalan numunelerin tolere edilmesini sağlayacak ve elde edilen jeomekanik parametrelerin istatistiksel güvenilirliğini artırarak termal hasar mekanizmalarının ve regresyon modellerinin daha yüksek bir hassasiyetle kurgulanmasına olanak tanıyacaktır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada; magmatik (Andezit) ve sedimanter (Traverten, Kireçtaşı-2 ve Kireçtaşı-3) kökenli farklı yapı taşlarının öncelikli olarak standart 105°C sıcaklıkta, ardından 400°C ve 800°C sıcaklıklara ısıtılıp soğutulması ve farklı doygunluk koşullarında (kuru ve suya doygun) gösterdikleri jeomekanik davranışlar karşılaştırmalı ve bütüncül olarak incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler ve mekanik analizler ışığında varılan temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. **Sedimanter Karbonat Kayaçlarında Şiddetli Kalsinasyon Tahribatı:** Karbonat içerikli sedimanter kayaçlar olan Traverten ve Kireçtaşı-2, 400°C'ye kadar kademeli bir bozunma sergilerken; 800°C sıcaklıkta gerçekleşen kalsinasyon reaksiyonu ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) nedeniyle içsel bütünlüklerini tamamen kaybetmiştir. Bu bozunma neticesinde ultrasonik dalga iletim hızlarında (V_p, V_s), tek eksenli sıkışma dayanımlarında ve elastisite modüllerinde ani ve kritik düşüşler yaşanmış, Kireçtaşı-2 numunesi ise tamamen dağılarak ölçüm yapılamaz hale gelmiştir.
2. **Kuvars İçeriğinin Termal Dirence Katkısı:** Sedimanter grupta yer alan Kireçtaşı-3 örneğinde ise, matristeki kuvars içeriği ve silis bağları sayesinde kalsit ağırlıklı örneklere kıyasla mikro-çatlak gelişimi daha iyi sınırlandırılmış; 800°C sıcaklıkta kalsinasyona maruz kalınmasına rağmen diğer karbonatlı kayaçlara göre nispeten daha yüksek bir mekanik performans sergilenmiş ve bütünlük korunabilmiştir.
3. **Andezitte Termal Kenetlenme ve Yüksek Stabilite:** Deney serisindeki termal etkilere karşı en yüksek kararlılık magmatik kökenli Andezit numunelerinde gözlenmiştir. Karbonatlı kayaçlardaki kalsinasyon reaksiyonunun aksine, Andezitte gelişen bozunmalar yalnızca minerallerin farklı genleşme katsayılarından kaynaklanan anizotropik termal genleşme (termal uyumsuzluk) ve dehidroksilasyon mekanizmalarıyla sınırlı kalmıştır. Sıkı, düşük gözenekli volkanik doku ve mineraller arası güçlü kenetlenme özelliği sayesinde, 800°C'lik şiddetli ısıl şok sonrasında dahi çatlak ilerlemesi kısıtlanmış ve matris sıkılaşarak (sinterleşme etkisi) dayanım ve statik modül değerlerinde bir artış kaydedilmiştir.

4. **Doygunluk Koşulunun (Su Etkisi) Mekanik Zayıflatması:** Kayaçların yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması sonrası numunelerin suya doygun hale getirilmesi; 400°C ve 800°C gibi yüksek sıcaklıklarda genişleyen ve mikro-çatlaklara dolan suyun yük altında yarattığı hidrodinamik kamalama etkisi sebebiyle tüm kayaç türlerinde kuru koşullara kıyasla daha belirgin mekanik zayıflamalara yol açmıştır.

Literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı tekil kayaç türü veya kuru koşullarla sınırlı kalırken; yapılan bu çalışmada farklı petrografik kökenli kayaçların (magmatik-sedimanter) ve suya doygunluk durumunun birleşik etkilerini bütüncül bir veri setiyle ortaya koyarak literatüre katkı sağlanmıştır. Mühendislik uygulamaları açısından; yüksek sıcaklık riski barındıran yeraltı açıklıkları, jeotermal santral yapıları ve üst yapı projelerinde, kalsinasyon nedeniyle ani göçme riski taşıyan karbonatlı tortul kayaçlar yerine mekanik kararlılığını koruyan Andezit gibi magmatik kayaçların taşıyıcı malzeme olarak tercih edilmesinin büyük bir önem taşıdığı sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

Gautam, P. K., Verma, A. K., Jha, M. K. & Singh, T.N. (2018). Effect of high temperature on physical and mechanical properties of Jalore granite. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 460-474.

Idris, M. A. (2018). Effects of elevated temperature on physical and mechanical properties of carbonate rocks in South-Southern Nigeria. *Journal of Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 20-27.

ISRM. (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. (Ulusay, R., & Hudson, J.A.) *Kozan Ofset.*

Jin, J., Liu, J., Chen, W., Li, G., Cheng, W., Zhang, X., & Luo, Y. (2024). The impact of high temperature on mechanical properties and behaviors of sandstone. *Frontiers in Earth Science.,* volume 12. journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2024.1322495/full

Li, X., Fan, X., Tao, M., Yin, T., & Huang, S. (2023). Damage Effect of Thermal Shock on the Heated Granite at Different Cooling Rates. *Buildings.* 13 (3), 629.

Moghrabi, R., Törük, A., & Vasarhelyi, B., (2026). High Temperature Effects on the Engineering Properties of Sandstone. *Rock Mechanics Letters* 3(1):295-301.

Qi, H., Ba, J., & Müller, T. B. (2021). Temperature Effect on the Velocity-Porosity Relationship in Rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 126(1) https://doi.org/10.1029/2019JB019317.

Sirdesai, N. N., Ranjith, P. G., Singh, T. N., & Mahanta, B. (2017). Effects of thermal treatment on physico-morphological properties of Indian fine-grained sandstone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.* 78, 883-897.

Vagnon, F., Colombero, C., Colombo, F., Comina, C., Ferrero, A. M., Mandrone, G., & Vinciquerra, S. C., (2019). Effects of thermal shocks on the physical and mechanical properties of Valdieri Marble. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 116, 75-86.

Yan, Q., Tian, H., Xu, N., & Chen, Y. (2019). Physical and Mechanical Properties of Granite After High-Temperature Treatment. *Rock Mechanics and Rock Engineering,* 53(1), 305-322.

Yang, S. Q., Ranjith, P. G., Jing, H. W., Tian, W.L., & Ju, Y. (2017). An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments. *Geothermics,* 65, 180-197.

Zhang, W., Sun, Q., Hao, S., Geng, J., & Lv, Chao. (2016). Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment. *Applied Thermal Engineering,* 98, 1297-1304.