

**ISIL ETKİYE MARUZ KALMIŞ GRANİT VE MERMER
ÖRNEKLERİNİN FİZİKSEL VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF THE VARIATION IN PHYSICAL AND
MECHANICAL PROPERTIES OF GRANITE AND MARBLE
SAMPLES SUBJECTED TO THERMAL EFFECT**

DİLEK KARAPINAR

PROF. DR. REŞAT ULUSAY

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2017

DİLEK KARAPINAR'ın hazırladığı "Isıl Etkiye Maruz Kalmış Granit ve Mermer Örneklerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin Araştırılması" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüsnü Aksoy

Başkan



Prof. Dr. Reşat ULUSAY

Danışman



Doç. Dr. Yılmaz Mahmutoğlu

Üye



Doç. Dr. Mehmet Ali Hindistan

Üye



Doç. Dr. Ergün Tuncay

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Eşim ve Aileme...

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun 2019 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

15 / 06 / 2017

Dilek
(İmza)

Öğrencinin Adı Soyadı

Dilek Karapınar

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarında uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

14/06/2017

DİLEK KARAPINAR

ÖZET

ISIL ETKİYE MARUZ KALMIŞ GRANİT VE MERMER ÖRNEKLERİNİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Dilek KARAPINAR

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Reşat ULUSAY

Haziran 2017, 92 sayfa

Kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişimlere neden olan faktörlerden biri de sıcaklıktır. Isıl etki olarak adlandırılan bu etki; günümüzde yer mühendisliği alanında kaydedilen gelişmeler kapsamında radyoaktif atıkların depolanması, kömür damalarından gaz üretimi, jeotermal enerji, derin maden işletmeleri gibi uygulamalarda kayaların ortaya çıkan yüksek sıcaklıklara maruz kalmaları ve ayrıca yangınların meydana geldiği taş yapılarda yangınla birlikte gelişen sıcaklık artışlarıyla birlikte kendisini göstermektedir. Isıl etkinin yukarıda belirtilen ilk türüyle ilgili çalışmalarda kaya örnekleri istenilen sıcaklığa ulaşılan değin ısıtılmakta ve fiziksel ve mekanik özellikler bu sıcaklık altında tayin edilmekte olup, bu uygulama pahalı ve daha karmaşık deney cihazlarını gerektirmekte ve bu tür etkiyle ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yangınları temsil edilen diğer ısıl etkinin değerlendirilmesinde ise, genellikle yangın sonrası durum dikkate alınarak, önce ısıtılıp sonra soğutulmuş örnekler üzerinde yapılan deneylerle sıcaklığa bağlı değişimler incelenmektedir. Bu yaklaşıma göre yapılmış çalışmalar daha fazla olmakla birlikte, ülkemizde sadece yapı taşı olarak kullanılan bazı kaya türlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin sıcaklıkla değişiminin incelendiği oldukça sınırlı sayıda çalışma mevcuttur.

Yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak bu tez çalışmasında; geçmişte maruz kalınmış ısıl etkiye bağlı olarak granit ve mermer örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinde sıcaklıkla değişimin araştırılması ve sonuçların aynı tür kayalarla ilgili

önceki benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılarak, bu özelliklerin sıcaklıkla değişimindeki genel eğilimlerin ve bunlara ilişkin eşik sıcaklık değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda her iki kaya türünden farklı deneylerde kullanılmak üzere hazırlanan örnekler, önce 1000°C'ye kadar değişik sıcaklıklarda ısı etkiye maruz bırakılmışlar, daha sonra yavaş şekilde oda sıcaklığına kadar soğutulmuşlardır. Bu şekilde hazırlanmış tüm örneklerin başlıca fiziksel ve mekanik özellikleri tayin edilerek değerlendirilmiş, ayrıca gerilme-birim deformasyon eğrileri çizilerek bunların sıcaklığa bağlı değişimleri ortaya konulmuştur. Bunların yanı sıra, granit ve mermer örneklerinin gözeneklilikleri X-ışınları CT yöntemiyle de tayin edilmiş ve ayrıca bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aynı tür kayalar üzerinde yapılmış önceki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın sonuçlarına göre; sıcaklık arttıkça, küçük dalgalanmalar dışında, incelenen granit ve mermer örneklerinin mineralojik bileşimlerinde sıcaklıkla belirgin bir değişimin olmadığı anlaşılmaktadır. Her iki kaya türü için görünür gözeneklilik dışında, incelenen fiziksel ve mekanik özelliklerin sıcaklık arttıkça azaldıkları anlaşılmaktadır. Granit ve mermer örneklerinin yenilme davranışı sıcaklık arttıkça kırılmandan sünümlüye doğru bir geçiş göstermekte olup, bu durum önceki çalışmaların sonuçlarını desteklemektedir. Sıcaklıktaki artışla birlikte suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi değerleri oldukça azalan granit ve mermerin doğada yüzeye yakın kesimlerde çok sayıda ıslanma-kuruma süreçlerine maruz kalmaları ve bu durumda yapı malzemesi olarak kullanılmaları halinde çıkabilecek yangınlardan kaynaklanacak ısı etkinin bu malzemeleri olumsuz yönde etkilemesi söz konusu olabilecektir. X-ışınları CT yöntemi ve ISRM'nin önerdiği yöntem kullanılarak belirlenen gözeneklilik değerleri belirli bir sıcaklığa kadar örtüşmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar granit ve mermerler üzerinde yapılmış benzer amaçlı önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, ısı etkiye maruz kalmış örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin genel olarak önceki çalışmalardakilerle oldukça benzer bir eğilim sergiledikleri anlaşılmaktadır. Karşılaştırılan özelliklerin ortalama eğilim çizgilerinden farklı özellikler esas alınarak belirlenen eşik sıcaklık değerlerine göre, granitin sıcaklık artışından genel olarak belirgin şekilde etkilenmeye başladığı eşik sıcaklık 400°C iken, bu sıcaklığın mermer için 100°C olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isıl etki, sıcaklık, granit, mermer, fiziksel ve mekanik özellikler.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE VARIATION IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GRANITE AND MARBLE SAMPLES SUBJECTED TO THERMAL EFFECT

Dilek KARAPINAR

Master of Science, Geological Engineering Department

Supervisor: Prof. Dr. Reşat ULUSAY

June 2017, 92 pages

One of the factors affecting physical and mechanical properties of rocks is temperature. This effect, which is called thermal effect, manifests itself in the applications of field of geo-engineering such as geological repositories for radioactive wastes, underground gasification of coal, geothermal energy, deep underground mining where rocks are subjected to high temperatures, and in the form of temperature increases in stone buildings which subject to fires. In studies related to the first type of thermal effect mentioned above, rock samples are heated until the desired temperature is reached and then physical and mechanical properties are determined under this temperature. This application requires expensive and more sophisticated test devices and there is limited number of study on this kind of thermal effect. In the assessment of the other thermal effect, which represents fires, by considering the conditions after fires, changes due to temperature are evaluated on the specimens which were first subjected to heating and then allowed to cool down to room temperature. Although the number of studies based on this approach is greater, in our country, there is limited study, which were conducted on the variation of physical and mechanical properties of only a few building stones.

By considering the above mentioned issues, in this thesis study, it was aimed to investigate the changes in the physical and mechanical properties of granite and marble samples depending on temperature based on a thermal effect occurred in

the near past and to assess general trends and threshold temperature values associated with the changes in these properties by comparing the results from this and previous studies. For these purposes, the specimens prepared from both rock types to be used in different tests were subjected to thermal effect under temperatures reaching up to 1000°C, and then they were allowed to cool down slowly to room temperature. Main physical and mechanical properties of all specimens were determined and assessed, besides their stress-strain curves were also drawn to evaluate their variations depending on temperature. In addition, porosity of the specimens was also determined using X-ray CT method and the results obtained from this study were compared to those obtained from the previous studies with similar purpose.

Based on the results of the study, except small fluctuations, generally no evident change in the mineral composition of the granite and marble specimens depending on the increase in temperature has occurred. For both rock types, except porosity, it is understood that all physical and mechanical properties showed a decrease with increasing temperature. Both granite and marble specimens show transition from brittle to ductile behaviour as temperature increases and this trend confirms the results of the previous studies. If the granite and marble, of which the values of slake durability index significantly reduced with the increase in temperature, are subjected to a number of wetting-drying cycles in the field and then used as a building stone, these materials would be adversely influenced by thermal effect resulted from fires. The values of porosity determined from the X-ray CT method and the method suggested by ISRM are consistent until a certain temperature. The comparisons between the results of this study and those from the previous similar studies conducted on granites and marbles indicated that the physical and mechanical properties of the specimens subjected to thermal effect generally show a similar trend to those in the previous investigations. According to the values of threshold temperature, which were estimated from the average trend lines for different rock properties, the threshold value indicating that the granite specimens are evidently influenced by the increase in temperature is 400°C, while it is 100°C for the marble specimens.

Key words: Thermal effect, temperature, granite, marble, physical and mechanical properties.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, her alanda ilgi ve katkılarını benden esirgemeyen, çalışma günü ve saati konusunda sınırlama yapmadan her an bana yardımcı olan, tezin yapısal ve düşünsel şekillenmesinde büyük emeği geçen tez danışmanım Prof. Dr. Reşat ULUSAY'a,

Tez savunması aşamasındaki değerlendirmeleri ve esirgemedikleri değerli katkıları için jüri üyeleri; Doç. Dr. Ergün Tuncay, Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU, Prof. Dr. Hüsnü AKSOY ve Doç. Dr. Mehmet Ali HİNDİSTAN'a,

Çalışmamda kullandığım örneklerin ısıtılma aşamasında yardımlarını esirgemeyen Kimya Mühendisliği Bölümü'nden Yrd. Doç. Dr. Işıl GERÇEK BEŞKARDEŞ'e,

Japonya Kumamoto Üniversitesi'nde X-ışınları CT yöntemiyle ilgili örneklerimin çekim ve değerlendirmelerini yapan Prof. Dr. Yuzo OBARA ve ekibine,

Mineralojik değerlendirmelerimde yardımlarını esirgemeyen Hacettepe Üniversitesi Mineraloji-Petrografi Ana Bilim Dalı araştırma görevlilerinden Yüksek Mühendis Lütfiye AKIN başta olmak üzere tüm araştırma görevlilerine ve X-ışınları kırınım analizleri konusunda bilgi veren ve önerilerini esirgemeyen Dr. Güllü Deniz KÜLAHÇI'ya,

Kaya Mekaniği Laboratuvar çalışmalarımdaki yardımlarından dolayı Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı Teknisyeni Özgür EROL'a,

Tez çalışmamın son aşamasında tezimin düzenlemesinde yardımlarını esirgemeyen Hacettepe Üniversitesi araştırma görevlilerinden Yüksek Mühendis Levent BAYRAM ve Jeoloji Yüksek Mühendisi Aylin FİDAN ÜZGÜN'e,

Tezimin son aşamasında Ankara'da kalmama yardımcı olan ve bu sayede çalışmamı tamamlamama olanak sağlayan yeni görev alacağım İstanbul Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nün yönetimine ve ilgili hocalarıma,

Hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme, hayatımın her anında olduğu gibi çalışmalarım boyunca tüm benliğiyle yanımda olan eşim İbrahim KARAPINAR'a ve son olarak çalışmamın en yoğun zamanlarında benim sağlık sorunu yaşamadan çalışmama olanak sağlayan, yakında doğacak olan oğlum Kemal'e,

Teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. SICAKLIĞIN KAYA ÖZELLİKLERİNE VE DAVRANIŞINA ETKİLERİYLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Isıl Etkiye Maruz Kalmış Granitlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin Araştırıldığı Çalışmalar	5
2.2. Isıl Etkiye Maruz Kalmış Mermerlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin Araştırıldığı Çalışmalar	8
2.3. Isıl Etkiye Maruz Kalmış Diğer Kaya Türlerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin Araştırıldığı Çalışmalar	11
3. MALZEMELER VE KULLANILAN DENEYSEL YÖNTEMLER	16
3.1. Kaya Türü Seçimi ve Örnekleme	16
3.2. Deney Yöntemleri	18
3.2.1. Mineralojik Çözümlemelerde Kullanılan Yöntemler	18
3.2.2. Isıtma Yöntemi	20
3.2.3. Kaya Mekaniği Deneylerinde Kullanılan Yöntemler	21
3.2.4. X-ışınları Bilgisayarlı Tomografi Çekim Yöntemi	21
4. İNCELENEN KAYA TÜRLERİNİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ	25
4.1. İncelenen Kaya Türlerinin Mineralojik Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi	25
4.1.1. Granit Örneklerinin Mineralojik Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi	25
4.1.2. Mermer Örneklerinin Mineralojik Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi	31
4.2. İncelenen Kaya Türlerinin Fiziksel ve İndeks Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi	36
4.2.1. Granit Örneklerinin Fiziksel ve İndeks Özelliklerinin Değişimi	36

4.2.2. Mermer Örneklerinin Fiziksel ve İndeks Özelliklerinin Değişimi.....	41
4.3. İncelenen Kaya Türlerinin Mekanik Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi	46
4.3.1. Granit Örneklerinin Mekanik Özelliklerinin Değişimi	46
4.3.2. Mermer Örneklerinin Mekanik Özelliklerinin Değişimi.....	50
4.4. İncelenen Kaya Türlerinin Diğer Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi	54
4.4.1. Renk değişimi.....	54
4.5. X-ışınları Bilgisayarlı Tomografi Çekimlerinin Değerlendirilmesi	56
5. BULGULARIN ÖNCEKİ ÇALIŞMALARIN SONUÇLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI	63
5.1. Granitler Üzerinde Yapılan Çalışmaların Sonuçlarının Karşılaştırılması	64
5.1.1 Fiziksel Özelliklerin Karşılaştırılması	64
5.1.2 Mekanik Özelliklerin Karşılaştırılması	67
5.2. Mermerler Üzerinde Yapılan Çalışmaların Sonuçlarının Karşılaştırılması	74
5.2.1 Fiziksel Özelliklerin Karşılaştırılması	74
5.2.2 Mekanik Özelliklerin Karşılaştırılması	79
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ	92
EKLER	93

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan kaya türlerinin alındıkları ocakların yerlerini gösteren yer bulduru haritası.....	17
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan prizmatik geometriye sahip (a) granit ve (b) mermer blokları.	17
Şekil 3.3. Kaya mekaniği deneyleri için hazırlanan granit ve mermer karotlarından bir görüntü.	19
Şekil 3.4. Bu çalışmada kullanılan (a) nokta sayım cihazı ve mikroskop ile, (b) nokta sayım işleminin yakından görünümü.	19
Şekil 3.5. (a) Araştırmada kullanılan fırın, (b) ısıtma sonrası kaya mekaniği deneyleri için örneklerin dessikatörde bekletilmesi.....	21
Şekil 3.6. Kumamoto Üniversite'nde kullanılan X-ışınları CT cihazının odası ve görüntüsü [58].	23
Şekil 3.7. X-ışınları CT cihazının şematik gösterimi [49]	23
Şekil 3.8. X-ışınları CT yönteminde fotoğraflama özellikleri [58].....	24
Şekil 3.9. X-ışınları CT fotoğrafı ve voksel verisi: (a) X-ışınları CT fotoğrafı ve (b) fotoğrafı oluşturan pikseller ve dilimler [49].	24
Şekil 4.1. İncelenen granitin içerdiği minerallerin farklı sıcaklıktaki yüzdeleri.	26
Şekil 4.2.(a) Isıtılmamış ve (b) ısıtılmış granit örneklerinin nokta sayım yöntemiyle belirlenmiş hacimce mineral yüzdeleri.	27
Şekil 4.3. Isıtılmamış ve ısıtılmış granit örneklerinin ince kesitlerdeki tek ve çift nikol görüntüleri: (a) 100°C, (b) 200°C, (c) 400°C, (d) 600°C, (e) 800°C, (f) 1000°C (Q: Kuvars, B: Biyotit, Plj: Plajiyoklaz, A. Fe: Alkali feldispat, A: Amfibol, M: Manyetit).....	28
Şekil 4.4. Isıtılmamış ve ısıtılmış mermer örneklerinin ince kesitlerdeki tek ve çift nikol görüntüleri: (a) ısıtılmamış örnek, (b) 100°C, (c) 200°C, (d) 400°C ve (e) 600°C.	32

Şekil 4.5. Isıtılmamış ve ısıtılmış mermer örneklerinin X-ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş tüm kayaç difraktogramları: (a) 100°C, (b) 200°C, (c) 400°C ve (d) 600°C.	34
Şekil 4.6. Granit örneklerinin birim hacim ağırlığının sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin birim hacim ağırlıklarıyla karşılaştırılması	38
Şekil 4.7. Granit örneklerinin ısıtılmamış ve ısıtılmış örneklerinin (a) hacim ve (b) ağırlıklarının karşılaştırılması.....	38
Şekil 4.8. Granit örneklerinin görünür gözenekliliğin sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin görünür gözeneklilikleriyle karşılaştırılması.	39
Şekil 4.9. Granit örneklerinin P-dalga hızlarının sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin P-dalga hızlarıyla karşılaştırılması.	39
Şekil 4.10. Granit örnekleri için suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinin çevrim sayısına bağlı değişimi.	41
Şekil 4.11. Granit örnekleri için I_{d2} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	41
Şekil 4.12.(a) 800° C'de ısıtılınca dağılan M6 no.lu örnek, (b) 700°C'de ısıtılınca dağılan M7 no.lu örnek (şeker yapısı).	42
Şekil 4.13. Mermer örneklerinin birim hacim ağırlığının sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin birim hacim ağırlıklarıyla karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.14. Mermer örneklerinin ısıtılmamış ve ısıtılmış örneklerinin (a) hacim ve (b) ağırlıklarının karşılaştırılması.	43
Şekil 4.15. Mermer örneklerinin görünür gözenekliliğin sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin görünür gözeneklilikleriyle karşılaştırılması.	44
Şekil 4.16. Mermer örneklerinin P-dalga hızlarının sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin P-dalga hızlarıyla karşılaştırılması.....	45
Şekil 4.17. Mermer örnekleri için suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinin çevrim sayısına bağlı değişimi.	45
Şekil 4.18. Mermer örnekleri için I_{d2} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.	46
Şekil 4.19. Granit örneklerinin çekilme dayanımının sıcaklıkla değişimi.	47

Şekil 4.20.(a) Granit örnekleri için aksenal gerilme-birimdeformasyon eğrilerinin sıcaklıkla değişimi ve diğer bazı araştırmacıların (b) Chen vd. [5], (c) Shao vd. [10], (d) Yang vd. [28] ısıtılmış granit örneklerinde elde ettikleri sonuçlar.	49
Şekil 4.21. Granit örneklerinin tek aksenli sıkışma dayanımının sıcaklıkla değişimi	50
Şekil 4.22. Granit örneklerinin (a) tanjant (teğet) (E_t), (b) ortalama (E_{av}) ve (c) giriş (sekant)(E_s) modüllerinin sıcaklıkla değişimi.	51
Şekil 4.23. Mermer örneklerinin çekilme dayanımının sıcaklıkla değişimi.	52
Şekil 4.24. Mermer örneklerinin aksenal gerilme-birim deformasyon eğrilerinin (a) bu çalışma ve (b) Peng vd. [34]'nin sıcaklıkla değişimi.	53
Şekil 4.25. Mermer örneklerinin tek aksenli dayanımının sıcaklıkla değişimi.	54
Şekil 4.26. (a) Mermer örneklerinin (a) tanjant (teğet)(E_t), (b) ortalama (E_{av}) ve (c) giriş (sekant)(E_s) modüllerinin sıcaklıkla değişimi.	55
Şekil 4.27. Granit örneklerinin (a) jeomekanik deneyler için hazırlanan karot ve (b) toz örneklerinde sıcaklığa bağlı renk değişimi.	57
Şekil 4.28. Mermer örneklerinin mekanik deneyler için hazırlanan karot örnekleri üzerinde sıcaklığa bağlı renk değişimi.	57
Şekil 4.29.(a) Isıtılmış granit örneklerinden düşey ve yatay yönlerde alınmış kesitler boyunca X-ışınları CT yöntemiyle tayin edilen gözeneklilik değerleri ve (b) X-ışınları CT yöntemi ve ISRM [43]'nin önerdiği yöntemle göre tayin edilmiş gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması (Obara [58] tarafından verilmiş deney sonuçlarına göre çizilmiştir).	60
Şekil 4.30.(a) Isıtılmış mermer örneklerinin düşey ve yatay yönlerde alınmış kesitler boyunca X-ışınları CT yöntemiyle tayin edilen gözeneklilik değerleri ve (b) X-ışınları CT yöntemi ve ISRM [43]'nin önerdiği yöntemle göre tayin edilmiş gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması (Obara [58]) tarafından verilmiş deney sonuçlarına göre çizilmiştir).	61
Şekil 4.31. Granit örneklerinin farklı sıcaklıklarda çekilmiş X-ışınları CT görüntüleri: (a) 100°C, (b) 400°C, (c) 600°C, (d) 800°C ve (e) 1000°C.	62

Şekil 5.1. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) birim hacim ağırlık ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı.....	
değişimlerinin karşılaştırması.	65
Şekil 5.2. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş gözeneklilik değerlerinin sıcaklığa bağlı değerimlerinin karşılaştırması.	66
Şekil 5.3. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) P-dalga hızı ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değerimlerinin karşılaştırması.	67
Şekil 5.4. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) tek eksenli sıkışma dayanımları ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değerimlerinin karşılaştırması.	68
Şekil 5.5. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) tanjant modüllerinin, (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin ve (c) ortalama elastisite modüllerinin sıcaklığa bağlı değerimlerinin karşılaştırılması....	72
Şekil 5.6. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) çekilme dayanımı ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerin sıcaklığa bağlı değerimlerinin karşılaştırılması.	74
Şekil 5.7. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) birim hacim ağırlık ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değerimlerinin karşılaştırması.	77
Şekil 5.8. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) gözeneklilik ve (b) bunların normalize edilmiş sıcaklığa bağlı değerimlerinin karşılaştırması.	78
Şekil 5.9. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) P-dalga hızı ve (b) bunların normalize edilmiş sıcaklığa bağlı değerimlerinin karşılaştırması.	79
Şekil 5.10. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) tek eksenli sıkışma dayanımları ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değerimlerinin karşılaştırması.	80

Şekil 5.11. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) elastisite modülleri ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması. 82

Şekil 5.12. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) çekilme dayanımları ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması. 84

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 3.1. Hazırlanmış granit ve mermer örnekleri ve maruz bırakıldıkları sıcaklıklar.	18
Çizelge 3.2. Bu çalışmaya ait örnekler için Kumamoto Üniversitesi (Japonya)'nde kullanılan X-ışınları CT cihazının özellikleri.	22
Çizelge 4.1. Granit örneklerinde sıcaklıkla renk değişimi görüntüleri ve tanımları.	58
Çizelge 4.2. Mermer örneklerinde sıcaklıkla renk değişimi görüntüleri ve tanımları.	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
n	Gözeneklilik
I_{d2}	Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (%)
V_p	P-dalga hızı (m/s)
E_t	Tanjant modülü (GPa)
E_{av}	Ortalama modül (GPa)
E_s	Kiriş modül (GPa)
σ	Eksenel gerilme (MPa)
σ_c	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)
σ_t	Çekilme dayanımı (MPa)

Kısaltmalar

ISRM	International Society for Rock Mechanics (Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği)
GSA	Geological Society of America (Amerikan Jeoloji Birliği)

1. GİRİŞ

Kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli düzeyde değişime neden olan faktörlerden biri de sıcaklıktır. İnsanlar tarihi dönemlerden bu yana sıcaklık etkisi (ısı etki) altında kayaların mekanik anlamda sağlamlaştığı veya zayıfladıkları konusunda ilgilenmiş olup, kaolinin yanmasıyla ilgili çalışmayla (Dimitriev vd. ([1]; [2]'den)) bu konu muhtemelen ilk kez belirgin şekilde gündeme gelmiştir. 1970'lerden bu yana yer mühendisliği (kaya mekaniği ve mühendisliği, zemin mekaniği, mühendislik jeolojisi) alanında yüksek sıcaklıkların, kayaların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerine yönelik olarak yapılan çalışmalarda pek çok ilerleme kaydedilmiştir. Günümüzde radyoaktif atıkların yer altında kaya kütleleri içinde depolanması, yeraltında kömür damarlarından gaz üretimi, jeotermal enerji ve ham petrol rezervuarlarından üretim, büyük derinliklerde yer altı madencilik uygulamaları vb. gibi projeler 1000°C'ye ulaşan ve hatta bu değeri aşan (Ranjith vd., [3]) yüksek sıcaklıkların kayaların jeomekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu, dolayısıyla bu konunun da araştırıldığı projelerdir (örn.; [4]–[6]). Bu konu ayrıca inşasında doğal taşın da kullanıldığı yapılarda ve tünellerde meydana gelen yangınların neden olduğu ve literatürde kısa sürede 1500°C'ye ulaştığı ifade edilen ([7]) sıcaklıkların etkilerini de kapsamaktadır.

Yukarıdaki paragrafta değinilen yangın dışındaki diğer alanları içeren yüksek sıcaklık etkisinin olduğu ortamlarda (örn. radyoaktif atık depolaması, kömürden gaz üretimi vb.) sıcaklık sürekli etkilediği için, bu tür ortamlarla ilgili olarak sıcaklığın kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, kaya örnekleri soğutulmadan hedeflenen sıcaklığa ulaşılarak bu sıcaklık altında deneye tabi tutulmak suretiyle değerlendirilmektedir (örn., [3]-[4], [8]–[15]). Yangına maruz kalmış yapılarda kullanılan kayaların ve ayrıca yapı taşı malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişiminin incelenmesi literatürde en yaygın şekilde kullanılan yöntemle göre, örnekler belirlenen sıcaklığa kadar fırında ısıtılıp yavaş şekilde soğutulduktan sonra oda sıcaklığında bekletilip deneylerde soğutulmuş bu örneklerin kullanılmasını içermektedir (örn.; [16]–[19]). Oldukça pahalı ve özel olarak üretilen düzenekleri gerektiren, yapımı uzun süre alan ve sıcaklığın hedeflenen değere yükseltilip örneklerin bu sıcaklık altında deneye tabi tutuldukları yöntemle ilgili yayınlar nispeten daha azdır. Örneklerin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp daha sonra yavaş bir hızla soğutulup oda sıcaklığında bekletildikten sonra

fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenip değerlendirildiği çalışmalar ise, hem sayıca hem de incelenen kaya türü açısından daha fazladır. Bu tez çalışmasında da söz konusu bu yöntem kullanılarak belirlenen sıcaklıklara kadar ısıtıldıktan sonra oda sıcaklığında bekletilmiş örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiştir. Bu nedenle çalışmanın amaç ve içeriği belirlenirken bu husus dikkate alınmıştır. Özellikle bu ikinci yaklaşım (soğutulmuş örneklerin kullanılması) esas alınarak diğer ülkelerde yapılmış çalışmalarla karşılaştırıldığında, ülkemizde bu konuda ve bu yöntem kullanılarak yapılmış çok sınırlı sayıda çalışma bulunmakta olup, bunlar bazı yapı taşı türlerinin (granit, mermer, kireçtaşı, traverten) fiziksel ve mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimini incelemiştir. Gerek ülkemizde gerekse diğer ülkelerde yapılmış çalışmalarda sıcaklığın 800-1000°C düzeyine çıkarılmış olanlar oldukça sınırlıdır. Bunun yanı sıra, sıcaklığa bağlı olarak fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimlerin karşılaştırıldığı çalışmaların sayısı da sınırlıdır.

Yukarıda değinilen hususlar dikkate alınarak, sadece belirli sıcaklıklara kadar ısıtıldıktan sonra soğutulup oda sıcaklığında bekletilmiş örnekler üzerinde deney yapılması yaklaşımını (yangına maruz kalma durumunu bir ölçüde yansıtan) esas alacak şekilde bu çalışmada; (a) ısı etkiye maruz kalmış kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişim konusunda önceki çalışmalara katkı sağlanması ve (b) bu çalışmanın ve benzeri kapsamda aynı tür kayalarda yapılmış çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılarak, incelenen kaya türlerinin başlıca fiziksel ve mekanik özelliklerinin ısı etkiye bağlı değişiminde eşik değer olabilecek sıcaklık düzeylerinin belirlenmesi başlıca amaçlar olarak öngörülmüştür.

Tarihi ve güncel yapıların inşasında en yaygın kullanılan yapı malzemeleri ve sıcaklığın kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisine yönelik önceki bazı çalışmalarda da kullanılmış olmaları gibi başlıca iki neden dikkate alınarak, “granit” ve “mermer” bu araştırmada kullanılacak malzemeler olarak seçilmiştir. Yukarıda belirtilen amaçlar doğrultusunda araştırmanın hedefleri aşağıdaki gibi öngörülmüştür:

- (a) Seçilen her iki kaya türünden hazırlanmış ısıtılmamış örneğin yanı sıra, farklı sıcaklıklara maruz bırakılıp sonra soğutulmuş örnekler (ısıtılmış örnekler) üzerinde; birim hacim ağırlık, görünür gözeneklilik, P-dalga hızı ile suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi, tek eksenli sıkışma dayanımı,

çekilme dayanımı ve elastisite (Young) modülü gibi fiziksel ve mekanik özellikler tayin edilerek, bu özelliklerin ısı etkiyle değişiminin değerlendirilmesi ve bu özelliklerde belirgin değişimlerin gerçekleştiği eşik sıcaklık düzeylerinin belirlenmesi,

- (b) Granit ve mermer kaya türleri üzerinde ısı etkiyle ilgili olarak daha önce yapılmış çalışmalardan elde edilen sonuçların bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılıp, araştırmada kullanılan her iki kaya türünde fiziksel ve mekanik özelliklerin değişimi açısından ortak olabilecek hususların ve eşik sıcaklık değerlerinin belirlenmesi.

Yukarıda belirtilen hedefler doğrultusunda, tez kapsamında aşağıda verilen aşamalar izlenmiştir:

- (a) Söz konusu iki kaya türünden hazırlanarak 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve daha sonra oda sıcaklığında bekletilmiş örnekler üzerinde gözlemler ve mineralojik incelemeler yapılarak ısı etkiye bağlı olarak bu kaya örneklerinin renklerdeki ve mineralojik bileşimlerdeki değişimler incelenmiş,
- (b) İncelenen kaya türlerinin seçilen sıcaklık aralığına (0-1000°C) maruz kaldıktan sonra fiziksel özelliklerdeki değişimin belirlenmesi amacıyla birim hacim ağırlık, P-dalga hızı ve görünür gözeneklilik tayinleri ile suda dağılmaya karşı duraylılık deneyleri yapılmış,
- (c) Benzer şekilde, bu kaya türlerinin mekanik özelliklerinin maruz kaldıkları sıcaklıklardan sonra değişiminin belirlenmesi için örneklerin çekilme ve tek eksenli sıkışma dayanımları ve elastisite modülleri tayin edilmiş,
- (d) Ayrıca kayalara hasar vermeyen bir deney olması nedeniyle son yıllarda kaya mekaniği ve kaya mühendisliği uygulamalarında kullanımı giderek artan, ancak ülkemizde bu alanda henüz kullanılmayan X-ışınları bilgisayarlı tomografi (X-ışınları CT) tekniğinden sıcaklığa bağlı olarak gözeneklilikteki değişimin belirlenmesi amacıyla yararlanılması da öngörülmüştür. Bu amaçla doğal haldeki örneklerle birlikte farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış örnekler oda sıcaklığında bekletildikten sonra Kumamoto Üniversitesi (Japonya)'nin kaya mekaniği laboratuvarında söz konusu deneye tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar çalışmanın amacına uygun şekilde değerlendirilmiştir,

(e) Elde edilen sonuçlar granit ve mermerler için yapılmış önceki benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve incelenen kaya türlerinde mühendislik özelliklerinin ısı etkisiyle değişimi açısından eşik değer olarak dikkate alınabilecek sıcaklıklar belirlenmiştir.

Altı bölümden oluşan bu tezin, "Giriş" başlıklı birinci bölümünü izleyen 2. Bölümünde; ısı etkisiye maruz kalmış granit ve mermer türü kayalar ile diğer kaya türlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinde sıcaklıkla değişimin araştırıldığı önceki çalışmalarda elde edilmiş başlıca sonuçlar üç alt başlık altında sunulmuştur. 3. Bölüm'de; bu çalışmada kullanılan mermer ve granit kaya türleri ana hatlarıyla tanıtılmış, izlenen örnekleme ve uygulanan ısıtma yöntemi hakkında bilgi verilmiş, ayrıca fiziksel ve mekanik özelliklerin tayini amacıyla kullanılan deney yöntemlerine ana hatlarıyla değinilmiştir. Tezin 4. Bölümünde; ısı etkisiye maruz bırakılmış granit ve mermer örneklerinin fiziksel, mekanik ve mineralojik özelliklerinde sıcaklığa bağlı değişim, ısıtılmamış örnekler ile ısıtılmış örnekler arasındaki farklılıklar ortaya konularak tartışılıp karşılaştırılmıştır. Ayrıca incelenen kaya türlerinin sıcaklığa maruz kalmasıyla meydana gelen renk değişimi ve X-ışınları CT çekimlerinin değerlendirilmesine de yine bu bölümde yer verilmiştir. Tezin 5. Bölümü, çalışmada elde edilen sonuçların ısı etkisiye maruz bırakılmış granit ve mermerlerle ilgili önceki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmasını içermektedir. 6. Bölüm'de ise, bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlara ve konuyla ilgili olarak gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik önerilere yer verilmiştir.

2. SICAKLIĞIN KAYA ÖZELLİKLERİNE VE DAVRANIŞINA ETKİLERİYLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tezin 1. Bölümü'nde değinildiği gibi, ısı etkiyle ilgili çalışmalarda; biri örneklerin doğrudan belirlenen sıcaklık altında deneye tabi tutulmaları, diğeri ise hedeflenen sıcaklığa kadar ısıtılan örneklerin yavaş bir hızla soğutulup deneylerin oda sıcaklığında gerçekleştirilmesi şeklindeki iki farklı uygulama söz konusudur. Bu çalışmada deneyler ikinci yöntem esas alınarak yapıldığı için; bu bölümde sadece bu yöntemin kullanıldığı önceki çalışmalar sunulmuş olup, birinci yöntemin uygulandığı çalışmalara (örn.; [3]-[4], [8]-[15]) değinilmemiştir. İlgili önceki çalışmalar, bu tez çalışmasında kullanılan granit ve mermer türü kayalar ile bunların dışında kalan diğer kaya türleri olmak üzere, izleyen alt bölümlerde üç alt başlık altında verilmiştir.

2.1. Isıl Etkiye Maruz Kalmış Granitlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin Araştırıldığı Çalışmalar

Homend-Etienne ve Houpert [20] çalışmalarında iki farklı granit (Remiremont ve Senones graniti) kullanarak 0°C ile 600°C arasında değişen sıcaklıklarda kayacın mekanik özelliklerindeki değişimin yanı sıra, bu özelliklerin sıcaklıkla değişen kırık-çatlak boyundan nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Bu araştırmada ısıtılmış ve ısıtılmamış örneklerin merkezinden 20 mm çaplı örnekler alarak mekanik deneyler yapmıştır. Bu araştırmacılar çalışmalarının sonucunda elastisite modülü, tek eksenli sıkışma dayanımı ve çekilme dayanımının sıcaklık arttıkça azaldığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar dayanımdaki bu azalmayı, kayaç içerisindeki kırık boylarının ve yoğunluğunun artmasıyla ilişkilendirmişler, ayrıca elastisite modülünün, tek eksenli sıkışma dayanımına göre artan kırık yoğunluğuna karşı daha duyarlı olduğunu belirtmişlerdir.

Chakrabarti vd. [21] yangınların yapılarda kullanılan doğal taşlar üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmalarında; çeşitli kayalarla birlikte granit de kullanmışlar ve bu kaya örneklerini 1000°C'ye varan sıcaklıklara maruz bırakmışlardır. Deneylerde kullanılan örnek sayısının ve herhangi bir grafiğin verilmediği bu çalışmada araştırmacılar; genel olarak, granitte sıcaklığın 20-250°C arasında değişen değerlere ulaştığı küçük yangınlarda çok fazla hasar söz konusu değilken, sadece demir içerikli minerallerde renk değişiminin başladığını, sıcaklığın 900°C civarına

ulaştığı yangınların kayaca oldukça fazla hasar verebilir bir etki yaratabileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, 600-800°C arasında değişen sıcaklıklarda birçok kayacın dayanımının ciddi şekilde azaldığını ortaya koyarlarken, sıcaklığın 300°C'yi aşması halinde ise renk değişiminin başladığını vurgulamışlardır.

David vd. [22], La Peyratte granitlerinin (Fransa) fiziksel özellikleri ve mikroyapısı üzerinde ısı çatılma ve gerilme etkisini laboratuvarda 220-450°C arasında değişen sıcaklıklarda araştırdıkları çalışmalarında; mikroyapının kayacın fiziksel özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğunu ortaya koymuşlar ve sıcaklık artışıyla birlikte kayacın değişen mikroyapısının fiziksel özelliklerinin de değişmesinde etkili olduğu yorumunu yapmışlardır.

Chaki vd. [23], bir granitin gözeneklilik, geçirgenlik ve ultrasonik dalga hızları gibi fiziksel özellikleri üzerinde sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Bu araştırmada, ısıtılmamış ve ısıtılmış örnek olarak her sıcaklık değeri için birer örnek kullanılmıştır. Bu araştırmacılar; 600°C'ye kadar ısıttıkları örneklerin 500-600°C arasında ciddi değişimlere uğradıklarını, gözeneklilik ve permeabilitenin arttığını, P-dalga hızının ise azaldığını belirlemişlerdir.

Takarli ve Agbodjan [24], Chaki vd. [23]'nin çalışmasına ait veriye ek olarak, sıcaklığın granitin mekanik özellikleri ve davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Değişen sıcaklıklara maruz bırakılan örneğin, fiziksel özelliklerinde olduğu gibi, mekanik özelliklerinde de (tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü) değişim gözlemleyen bu araştırmacılar, α - β kuvars geçiş sıcaklığı olan 573°C'nin örnekte sıcaklığa bağlı gelişen ısı hasarla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle bu araştırmacılar, sıcaklık 500°C'nin üzerine çıktığında granitin fiziksel özelliklerinin ve mekanik davranışının oldukça ciddi bir şekilde etkilendiğini belirtmektedirler.

Lam dos Santos vd. [25], 20 ile 200°C arasında değişen sıcaklıklarda, yapı taşı ile birer kireçtaşı ve granitin dayanımlarının ve elastisite modüllerinin sıcaklıktaki artışla azaldığını belirlemişlerdir.

Saiang [7] ve Saiang ve Miskovsky [26] çalışmalarında 1500°C sıcaklığa ulaşabilen daha önce meydana gelmiş tünel yangınlarının kayalar üzerindeki etkilerinin önemini dikkate alarak; yol ve tünellerde meydana gelebilecek yangınlar sırasında yapı malzemelerinin daha güvenli şekilde kullanılabilirliğini araştırmak

amacıyla aralarında granitin de bulunduğu bazı kaya türlerinin ısı etkiyle sıcaklığa bağlı olarak mekanik davranışlarındaki değişimi araştırmışlardır. Çalışmada örnekler 400°C, 750°C ve 1100°C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve kayaların tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü, çekilme dayanımı ve Poisson oranı ile ayrıca mineral yüzdeleri de tayin edilmiştir. Çalışmanın sonucunda; başlangıçta demir minerali içeren kayalarda demirin sıcaklığa karşı göstermiş olduğu reaksiyondan dolayı kayaların dayanımının bir miktar arttığı, ancak sıcaklığın daha da artmasıyla minerallerde gerçekleşen faz değişiminden sonra farklı minerallerin farklı ısı iletkenliklerinden dolayı yeni oluşan ve artan mikro-kırıkların kayacın mekanik davranışını etkileyerek kayaların dayanımlarında azalmaya neden olduğu ortaya konulmuştur.

Chen vd. [5], tek eksenli sıkışma ve yorulma yükü altında sıcaklığın granitin mekanik özelliklerine etkisinin (max. 1000°C) araştırıldığı bir çalışma yapmışlar ve her sıcaklık aşaması için 3'er adet örnek kullanmışlardır. Çalışmada; ısıtılmamış örneklerle 1000°C sıcaklığa maruz kalmış ısıtılmış örnekler karşılaştırıldığında, ısıtılan örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımının yaklaşık %20, elastisite modülünün %5 azaldığı, deformasyonun ise arttığı ve granitin incelenen özelliklerinin ani ve hızlı bir şekilde değişmesiyle bu özelliklerle ilgili eşik sıcaklığın 400°C olduğu sonucuna varılmıştır.

Liu ve Xu [18], Çin'deki Qinling granitini ısı etkiye (en yüksek 1000°C) maruz bırakılıp oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra mekanik özelliklerini tayin etmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları deneyler sonucunda; P-dalga hızının 100°C'ye kadar az miktarda arttığını, ancak sıcaklığın 200°C ve üzerine çıkması durumunda doğrusal bir şekilde azaldığını, tek eksenli sıkışma dayanımının ise sürekli azalan bir eğilim sergilediğini ortaya koymuşlardır.

Liu ve Xu [27] çalışmalarında, 2014 yılında yaptıkları çalışmada uyguladıkları gibi, kumtaşı ve granit örneklerinin sıcaklıkla değişen fiziksel ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Ultrasonik dalga hızına göre örneklerin sıcaklık nedeniyle maruz kaldıkları ısı hasarı hesaplamışlar ve sonuçta inceledikleri özelliklerin sıcaklıktan farklı şekilde etkilendiklerini belirlemişlerdir. Bu araştırmada, incelenen kaya türleri için gerilme-birim deformasyon eğrisinde kırılğan-sünümlü davranışın gözlemlendiği eşik sıcaklık değerinin ise 600-800°C arasında değiştiği belirlenmiştir.

Yang vd. [28], granit örneklerinin ısı etkiye (en yüksek 800°C) maruz bırakıldıktan sonra mekanik davranışının ve uğradığı ısı hasarın araştırılması amacıyla X-ışınları CT yöntemi kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada; tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılarak 800°C'ye kadar artan sıcaklıklarda granitte gelişen kırık hasarı ile kayacın dayanımı ve deformasyonu hesaplanmıştır. İncelenen granitin gözenekliliğinin artmasıyla kırık yoğunluğunun da artarak örneğe hasar vermeye başladığı, kayanın tek eksenli sıkışma dayanımının ve statik elastik modülünün azaldığı eşik sıcaklık değeri 300°C iken, statik Poisson oranının azalmaya başladığı eşik sıcaklık 600°C'dir. 25-300°C arasındaki sıcaklıklarda minerallerde ısı genleşme olmuş, ancak örneklerde mikrokırık gözlenmemiştir. 400-600°C arasında feldispat ve kuvars tanelerinde sınır çatlakları ve tane içi çatlaklar gözlenmiş olup, 700-800°C arasında her iki türdeki çatlaklar birbirine geçmiş durumda görülmüştür. Araştırmacılar ayrıca, deformasyon sırasında kırık içi gelişimini akustik emisyon (AE) izleme yöntemiyle izlemişler ve kırık gelişiminin sıcaklıkla ilgili olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar son aşama olarak granitin deformasyon mekanizmasını X-ışınları mikro CT yöntemiyle analiz ederek; granitin tek eksenli sıkışma deneyi sırasında 25-600°C arasındaki sıcaklıklarda daha gevrek bir davranış sergilerken, 700-800°C arasındaki sıcaklıklarda daha sünümlü bir davranış gösterdiğini ve granitin yenilme sürecinin değişiklik gösterdiği eşik sıcaklığın 600°C olduğunu belirlemişlerdir.

Yin vd. [29], hem yüksek sıcaklık altında hem de ısı etkiye (en fazla 800°C) maruz bırakılıp soğutulduktan sonraki durumlar için bir granitin mekanik özelliklerini ayrı ayrı belirleyerek karşılaştırmışlardır. Sıcaklık altındaki ve soğutulmuş örneklerden elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında; sıcaklık altında iken granitin tek eksenli sıkışma dayanımının daha düşük, deformasyonun daha büyük ve elastisite modülünün ise daha küçük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca kayacın hem fiziksel özelliklerinin hem de çevresel koşulların kayanın mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu yorumu yapılmıştır.

2.2. Isı Etkiye Maruz Kalmış Mermerlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin Araştırıldığı Çalışmalar

Chakrabarti vd. [21]'nin, yangının yapılarda kullanılan doğal taşlar üzerindeki etkisi konusunda yaptıkları ve örnekleri en fazla 1000°C'ye kadar ısıttıkları çalışmalarında değişik kayaçlarla birlikte beyaz mermer de kullanılmıştır.

Çalışmanın sonuçlarına göre; sıcaklık artışıyla birlikte mermerde ufalanma ve parçalanmanın gerçekleştiği, dolayısıyla mermerin ısı etkiyle dayanımının azalıp daha kırılabilir bir davranış sergilediği anlaşılmıştır.

Mahmutoğlu [30], mermer ve kumtaşı örneklerinde ardarda uygulanan ısıtma ve soğuma işlemine ait çevrim sayılarının, bu kayaçların dayanım özellikleri (tek eksenli sıkışma, üç eksenli ve çekilme dayanımı) üzerindeki etkisini araştırmıştır. Her çevrimde örnekler 600°C'ye kadar ısıtılmış ve sonrasında 20°C'ye kadar soğutulmuştur. Örneklere 0 ile 16 arasında değişen ısıtma-soğuma çevrimi uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, ısıtma-soğuma çevrim sayısı arttıkça örneklerin dayanım özelliklerinin azaldığı ortaya konulmuştur.

Ferrero ve Marini [19], deneysel olarak mermerin fiziksel özelliklerinin ve mekanik davranışının sıcaklıkla değişimini ortaya koymak amacıyla beyaz ve siyah mermer örneklerine oda sıcaklığı ile 600°C arasında değişen sıcaklıklar uygulamışlardır. Araştırmacılar uygulanan her sıcaklık aşaması için 5'er örnek kullanmışlardır. Bu çalışmada; artan sıcaklıkla birlikte yoğunluğun, elastisite modülünün ve çekilme dayanımının azaldığı, görece düşük sıcaklıklarda tek eksenli sıkışma dayanımında bir miktar artış olduktan sonra sıcaklığın artmasıyla bu dayanımın da azaldığı, yeni kırıkların oluşması ve kırık yoğunluğunun artmasıyla artan gözeneklilik arasında bir ilişki olduğu, ancak incelenen mermerlerden siyah mermerin kristalize kalsitten, beyaz mermerin ise mikrokristalin kalsitten oluşmuş olmasına göre bu ilişkiyi etkileyebileceği gibi sonuçlara varılmıştır.

Koca vd. [31], İzmir'deki tarihi Mithatpaşa Teknik Lisesi'nde çıkan yangının ardından okuldaki mermer kolonların mühendislik özelliklerindeki yangının neden olduğu sıcaklığa bağlı değişimler konusunda çalışmışlar bu kapsamda kolonların taşıma kapasitesini ve değişen mermer özelliklerini belirlemişlerdir. Sıcaklığın yaklaşık 500°C civarında olduğu tahmin edilen yangında, mermer kolonların arasındaki gözenekliliğin sıcaklıktan doğrudan etkilendiğini saptamışlardır. Sonuçta araştırmacılar; 2 saat boyunca yangına maruz kalan mermerin tek eksenli sıkışma dayanımının yaklaşık %20 azalmış olabileceğini, kayanın içerdiği mikro kırık sayısının ve uzunluğunun artacağını, kayaçta renk değişimi gözleneceğini ve bazı fiziksel özelliklerdeki (gözeneklilik, su emme) değişime bağlı olarak kayacın dayanımının değiştiğini belirtmişlerdir.

Yavuz vd. [32], Türkiye'den derledikleri 2 tür mermer ve 3 tür kireçtaşına ait örneklerin 500°C'ye kadar sıcaklığa maruz bırakıldıklarında örneklerin bu sıcaklıklarda kalma süresinin bu kaya türlerinin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda; kayaların mikro yapısal özelliklerinin, yoğunluklarının, etkin gözenekliliklerinin ve P-dalga hızlarının örneklerin sıcaklığa maruz kaldığı süreye bağlı olarak eşik sıcaklık değerinin de değiştiği belirtilmiştir. Buna göre ısı etkiye bağlı olarak örneklerde hasarın önemli bir kısmı 24 saatlik ısıtma süresi içinde meydana gelmiş olup, 24 saati aşan ısıtma sürelerinde fiziksel özelliklerde çok küçük değişimler söz konusudur.

Şengün [33]; Türkiye'deki bazı karbonatlı kayaçların yanı sıra, 2 tür mermeri de içeren çalışmalarında, en fazla 600°C'ye kadar sıcaklığa maruz bırakılmış örneklerin ziksel ve mekanik özellikleri üzerinde sıcaklıktan kaynaklanan hasarın etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada, genel olarak; 300°C gibi nispeten düşük sıcaklıklara maruz bırakılan kaya örneklerinin incelenen özelliklerinde (yoğunluk, gözeneklilik, P-dalga hızı, tek eksenli sıkışma dayanımı, çekilme dayanımı) meydana gelen değişimler bu araştırmacı tarafından önemli değişimler olarak değerlendirilmeyerek, daha yüksek sıcaklıklarda gözenekliliğin arttığı, yoğunluk, tek eksenli sıkışma dayanımı, P-dalga hızı ve çekilme dayanımının azaldığı, en çok azalmanın elastisite modülünde, en az azalmanın ise yoğunlukta gerçekleştiği gibi sonuçlara varılmıştır.

Özgüven ve Özçelik [17], doğal yapı malzemesi olarak kullanılan kayalarda yangının ve yüksek sıcaklığın hasara neden olduğu gerçeğini dikkate alarak, Türkiye'de de yapı malzemesi olarak sıklıkla kullanılan mermer ve kireçtaşı türlerinden bazılarını seçip bunlardan hazırladıkları örneklere ısı etki uygulayarak (en fazla 1000°C'ye kadar olan sıcaklıklar) fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri araştırmışlardır. Araştırmacılar; sıcaklığın 800°C'nin üzerine çıkılmasıyla örneklerin içerdiği kalsitin porlanda dönüşerek kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin değişmesine neden olmasının da etkisiyle, incelenen mermerlerin sıcaklık arttıkça yoğunluklarının azaldığını, gözenekliliğin arttığını, tek eksenli sıkışma dayanımı ve çekilme dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. İnceledikleri bu özelliklerde genel olarak değişimlerin en çok gözlemlendiği 600-800°C arasındaki sıcaklıklarda örneklerin önemli ölçüde hasara uğradıklarını ortaya koyan bu araştırmacılar, bu kayaçların kullanımı sırasında yüksek sıcaklığa veya

bir yangına maruz kalmaları durumunda yapının güvenliği açısından belirlenen sıcaklık aralığına dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Peng vd. [34], sıcaklık etkisiyle hasara uğramış iri taneli bir mermerin fiziksel ve mekanik davranışını araştırmışlardır. Araştırmacılar; sıcaklık 800°C'ye ulaştığında mermer örneğinin tamamen dağılması nedeniyle kayacı en fazla 600°C'ye kadar ısıtarak inceleme yapabilmişlerdir. Çalışma sonucunda araştırmacılar; sıcaklık artışıyla örnekte renk değişiminin ve birçok mikro kırığın geliştiğini, ayrıca P-dalga hızı, tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülünün azaldığını, deformasyonun arttığını ve yenilme davranışının kırılığandan sünümlüye geçtiğini gözlemlemişlerdir.

2.3. Isıl Etkiye Maruz Kalmış Diğer Kaya Türlerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin Araştırıldığı Çalışmalar

a) Kumtaşları üzerinde yapılmış çalışmalar:

Chakrabarti vd. [21] yangınların yapılarda kullanılan doğal taşlar üzerindeki etkisi konusunda yaptıkları çalışmada, 1000°C'ye kadar ısıtılmak üzere çeşitli kayaçlarla birlikte kumtaşı da kullanmışlardır. Bu çalışmada başlıca; 250-300°C arasında demirli bileşenlerin dehidrasyonu nedeniyle kahverengi-ten rengi olan kumtaşının kırmızımsı kahverengiyeye dönüştüğünü, α - β kuvars geçiş sıcaklığı olan 573°C'den sonra ise kayacın daha kırılğan bir davranış eğilimi gösterdiği gibi sonuçlar elde edilmiştir.

Hajpal [35], yangınlar sırasında oluşan yüksek sıcaklığın kumtaşından yapılmış tarihi heykeller üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada; en fazla 900°C sıcaklığa maruz kalmış ve oda sıcaklığına kadar soğutulmuş örneklerde yapılan ayrıntılı petrografik analizlere ve dayanım deneylerinin sonuçlarına dayanarak araştırmacı; kil minerallerinin 450-750°C'de dağıldığını ve 575°C'de α -kuvarsın β -modifikasyonuna dönüştüğü için artan sıcaklıkla birlikte kumtaşının tek eksenli dayanımının azaldığını belirtmektedir. Bu çalışmada ayrıca; kumtaşlarının kullanıldığı yapılarda büyük yangınların meydana gelmesinin ardından gerçekleştirilecek restorasyon çalışmalarında, sıcaklıkla değişen kumtaşının özelliklerinin bilinmesinin yapılacak olan restorasyonun etkisinin ve ekonomikliğinin artması için yarar sağlayacağı ifade edilmiştir.

Hajpal ve Török [16], ısı etki altında kuvars kumtaşı örneklerinin mineralojik bileşimini ve rengindeki değişimi incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda; 573°C'de α - β kuvars geçişinin olması nedeniyle kumtaşının mineralojik değişime uğradığı, 600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda taneler arası mikro-kırıkların gözlemlendiği ve 750°C'nin üzerinde kuvars ve feldispatların tane içlerinde gelişen kırıklar nedeniyle kayacın tek eksenli sıkışma dayanımının azalacağı sıcaklığın 450°C-750°C arasında değiştiği belirtilmiştir.

Wu vd. [36], çalışmalarında Jiaozuo (Çin) kumtaşının 20-1200°C arasındaki sıcaklıklarda fiziko-mekanik ve termo-mekanik karakterizasyonunu yapmışlardır. Sonuçta araştırmacılar, özellikle kayacın tek eksenli sıkışma dayanımının ve elastisite modülünün ısı etki nedeniyle kumtaşını oluşturan minerallerin ısı iletkenlik katsayılarının farklı olmasından kaynaklanan mikro-kırık gelişimine bağlı olarak azaldığını ortaya koymuşlardır. Örneğin; kuvarsın, kalsit ve feldispata göre ısı iletkenlik katsayısı daha yüksek olup, 573°C'de α - β kuvars modifikasyonunun gerçekleşmesi kuvarsın hacimsel olarak genişlemesiyle kayacın mikro-kırıkların gelişmesine neden olmaktadır.

Daha önce granit türü kayalarla ilgili önceki çalışmalar alt bölümünde bahsedildiği gibi, Liu ve Xu [27] ayrıca kumtaşı üzerinde de çalışarak örneklerin renginin 400°C'nin üzerinde griden kahverengimsi kırmızıya dönüştüğünü, ve gerilme-birim deformasyon eğrisinden kayacın kırılma-sünümlü davranış sergilediği eşik sıcaklık değerinin 800°C olduğunu belirlemişlerdir.

Török ve Vàsàrhelyi [37], en fazla 900°C'ye kadar sıcaklıklar uygulanıp soğutulan, Almanya'dan sağladıkları kumtaşları üzerinde kırılma araştırmaları yaptıkları çalışmalarının sonucunda; sıcaklık arttıkça kırılmanın da arttığını ve bu nedenle kumtaşlarında açılmış olan tünellerde herhangi bir yangın gerçekleştiğinde tünellerin yan duvarlarında duraysızlık sorununun ortaya çıkabileceğini belirtmişlerdir.

Tian vd. [38], daha önce yüksek sıcaklık altındaki ve yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığında soğutulmuş kumtaşı örneklerinin mekanik özellikleri (tek eksenli sıkışma dayanımı, çekilme dayanımı ve elastisite modülü) üzerine yapılmış çalışmaları derlemişler ve şu sonuçlara varmışlardır: (i) mekanik özelliklerde belirli bir sıcaklığa kadar (500°C) dalgalanmalar ve hatta artışlar olup, söz konusu sıcaklıktan sonra ise bu özellikler azalma eğilimindedir, (ii) bu nedenle kumtaşları için genel olarak mekanik özellikler açısından 500°C kritik (eşik) bir

değerdir. Mekanik özellikler ile sıcaklık arasındaki ilişki bu araştırmacılar tarafından 3 grupta kategorize edilmiştir: Tip 1 olarak belirlenen ve eşik sıcaklık değeri 500°C'nin altında kalan sıcaklıklar olup, Tip 2 ve Tip 3 ise mekanik özelliklerin %10 civarında artıp azaldığı, ya da sabit kaldığı veya azaldığı sıcaklıklardır.

Ding vd. [39], ısı etkiye maruz kalmış (en fazla 800°C) bir kumtaşının mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmacılar; tek eksenli sıkışma dayanımında ve elastisite modülünde 400°C'den itibaren ciddi bir azalma, yatay yöndeki deformasyonda önemli derecede artış, 200°C'den itibaren ise yüzde olarak hacim değişiminde artış, kütle değişiminde ise azalma saptamışlardır.

b) Kireçtaşları üzerinde yapılmış çalışmalar:

Chakrabarti vd. [21], yangının yapılarda kullanılan doğal taşlar üzerindeki etkisi konusunda yaptıkları çalışmada, 1000°C'ye kadar ısıtılıp daha sonra soğutulmuş test edilen çeşitli kayaçlarla birlikte kireçtaşı da kullanmışlardır. Araştırmacılar; 250-300°C arasında kahverengimsi ten rengi olan kireçtaşının pembe ya da kırmızımsı kahverengiye dönüştüğünü, 400°C'den sonra daha da kırmızılaştığını, 800-1000°C arasında ise kayacın grimsi beyaza dönüştüğünü ve ufalanmaların söz konusu olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışmaya ait kaynakta 600-800°C sıcaklıklar arasında dayanım özelliklerine ait herhangi bir veriye ulaşılamamakla birlikte, araştırmacılar yüksek sıcaklığın etkisiyle kayanın dağılabileceğini ve yapısal hasara uğrayacağını belirtmektedirler.

Lam dos Santos vd. [25], 20-200°C sıcaklıkları arasında çalıştıkları kireçtaşında sıcaklık artışıyla dayanım ve elastisite modülünün azaldığını ortaya koymuşlardır.

Şengün [33]; sıcaklığın karbonatlı kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi konulu çalışmasında mermer, kireçtaşı ve traverten türü birimleri kullanmıştır. Sonuç olarak; 300°C'den yüksek sıcaklıklarda gözenekliliğin arttığı, yoğunluk, tek eksenli sıkışma dayanımı, P-dalga hızı ve çekilme dayanımının azaldığı ve sıcaklığa bağlı en fazla azalmanın elastisite modülünde, en az azalmanın ise yoğunlukta gerçekleştiği belirlenmiştir.

Brotons vd. [40], San Julian (İspanya) kalkarenitinin 105-600°C arasında ısıtılması ve farklı yöntemlerle (kuru ve suda) soğutulmasından sonra, kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimi araştırdıkları çalışmalarında; kayacın mekanik

özelliklerinin ve davranışlarının sıcaklık artışından olumsuz yönde etkilendiği sonucuyla birlikte suda soğuma yöntemi kullanılan örneklerin sıcaklık artışından daha çok etkilendiklerini öne sürmüşlerdir.

c) Diyabazlar üzerinde yapılmış çalışmalar:

Saiang ve Miskovsky [26], granitin yanı sıra diyabaz üzerinde de yüksek sıcaklık etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar; sıcaklık artıkça diyabaz örneklerinin mineralojik bileşimlerinin değiştiğini, tek eksenli sıkışma dayanımı, çekilme dayanımı ve elastisite modülünün ise azaldığını ortaya koymuşlardır.

d) Şistler üzerinde yapılmış çalışmalar:

Saiang ve Miskovsky [26], granit ve diyabaz üzerinde olduğu gibi, sıcaklığın şistlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini de araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, diğer kaya türlerinde olduğu gibi, incelenen şistin mekanik özelliklerinin sıcaklık artışından azalarak olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir. Ancak, diğer kaya türlerinin sıcaklık artışına bağlı olarak mekanik özelliklerinin değişmesinde örneklerin suya doygunluğu etkili değilken; şistin sahip olduğu foliasyon düzlemleri arasında bulunan suyun fazla olmasının kayacın mekanik özelliklerinin sıcaklıktaki artıştan daha çok etkilenmesine neden olduğu öne sürülmüştür.

e) Travertenler üzerinde yapılmış çalışmalar:

Şengün [33], mermer ve kireçtaşının yanı sıra ayrıca sıcaklığın travertenin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini de araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda; 300°C'den yüksek sıcaklıklarda gözenekliliğin arttığını, yoğunluk, tek eksenli sıkışma dayanımı, P-dalga hızı ve çekilme dayanımının azaldığını, sıcaklık artışıyla en çok azalmanın elastisite modülünde, en az azalmanın ise yoğunlukta gerçekleştiğini, kayaçların genel eğilimlerinin değişmemesine rağmen sıcaklık artışından farklı derecede etkilendiklerini belirtmişlerdir.

f) Diyoritler üzerinde yapılmış çalışmalar :

Tian vd. [41]; granit ve diyorit gibi granitik kayaçların nükleer atık depolama alanları ve sıcak kuru kaya rezervuarlarının (HDR) ana kayaçları olarak sıklıkla kullanıldığını vurgulayarak, günümüze değin yapılmış çalışmaların genelde granitin fiziksel ve mekanik özelliklerinin sıcaklıkla değişimini araştırmak amacıyla

gerçekleştirildiğini ifade etmektedirler. Bu nedenle bu araştırmacılar, sıcaklığın diyoritin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini ayrıntılı şekilde araştırabilmek amacıyla örneklere en fazla 1000°C sıcaklık uygulayarak diyorit için bir dizi dayanım deneyi yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre tek eksenli sıkışma dayanımı 400°C'ye kadar yaklaşık %10 artarken, sıcaklığın daha da artmasıyla birlikte dayanım belirgin bir azalışa geçmiştir. Elastisite modülü ise, yine aynı sıcaklığa kadar yaklaşık %20 arttıktan sonra azalmaya başlamıştır. Araştırmacılar; gerilme-birim deformasyon eğrisine göre diyoritin kırılardan sünümlü davranışa geçtiği 600°C'yi, söz konusu kaya türü için eşik sıcaklık olarak değerlendirmişlerdir.

g) Kilitaşları üzerinde yapılmış çalışmalar :

Tian vd. [42], en fazla 1000°C' ye kadar sıcaklığa maruz bıraktıkları bir kilitaşının fiziko-mekanik özelliklerini ve davranışını araştırmışlardır. Isıl etkiye maruz bırakılmış örnekler üzerinde yoğunluk ve hacim değişimi tayinleri ile tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda; ısıtılmış ve ısıtılmamış örneklere ait deneysel sonuçlar karşılaştırdığında, artan sıcaklıkla birlikte örnek hacminin ve gözenekliliğinin arttığı, kütesinin ve yoğunluğunun azaldığı, deformasyon modülü ile tek ve üç eksenli sıkışma dayanımlarında 800°C'nin altında dalgalanmaların olduğu, ancak sıcaklığın daha da artmasıyla birlikte bu dalgalanmanın azaldığı ortaya konulmuştur.

3. MALZEMELER VE KULLANILAN DENEYSEL YÖNTEMLER

3.1. Kaya Türü Seçimi ve Örneklemeye

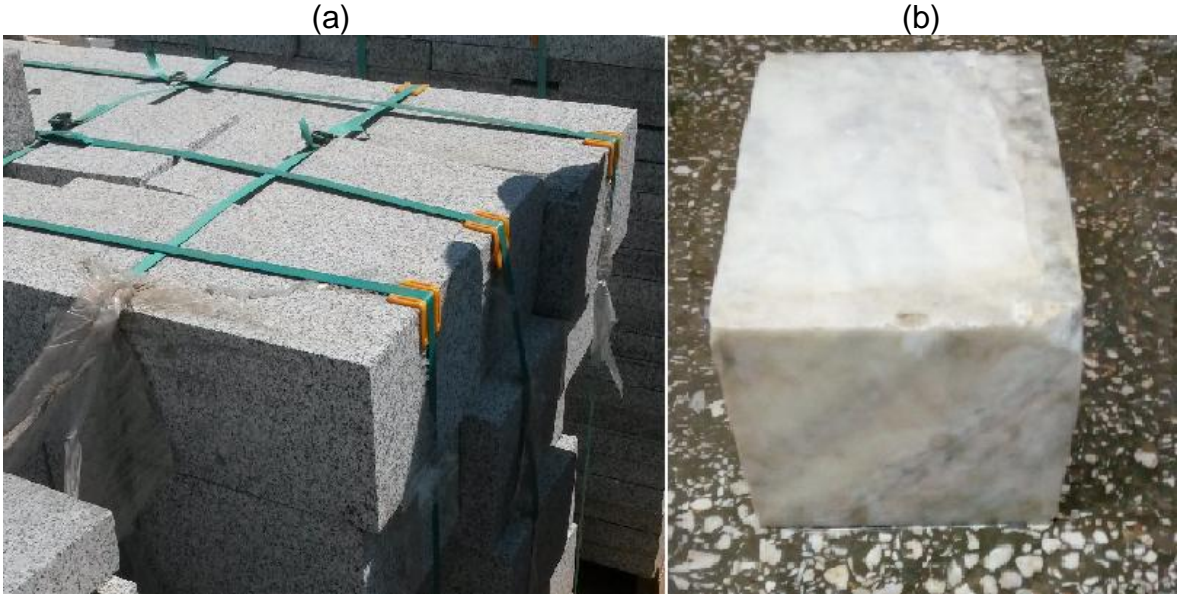
Konuyla ilgili, yurt dışında yürütülen önceki çalışmalarda granit türü kayalarla ilgili araştırmaların daha fazla olduğu, ülkemizde gerçekleştirilen sınırlı sayıda çalışmada ise en çok kullanılan yapı taşı olması nedeniyle mermerlerin ön planda yer aldığı görülmektedir. Gerek kullanım alanı genişliği bakımından, gerekse çalışma sonuçlarının önceki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırma olanağının olması nedeniyle bu tez çalışmasında da granit ve mermer olmak üzere iki kaya türü kullanılmıştır.

Örneklemeye sırasında seçilen kaya türlerinden, kaya mekaniği deneyleri için ilgili deney yöntemlerince önerilmiş örnek boyutlarına göre örneklerin hazırlanabilmesi açısından, herhangi bir zayıflık düzlemi içermemelerine dikkat edilmiştir. Araziden alınacak kaya örneklerinin bozunmaya maruz kalmış kesimlerinin bulunabileceği düşünülerek, bu kayaların araziden derlenmesi yerine, sağlam yapı taşı olarak kullanılmak üzere sağlam ve prizmatik kaya bloğu satışı yapan firmalardan temin edilmesi tercih edilmiştir. Yapı taşı satan firmalardan temin edilen Kırşehir (Kaman) ve Afyon'dan getirilmiş granit ve mermerin çıkarıldığı ocakların yerleri Şekil 3.1'deki haritada gösterilmiştir. Düzenli geometriye sahip ve bozunma etkilerinin söz konusu olmadığı bu bloklarda, oldukça yüksek karot verimleriyle karot örnekleri alınmış olup, söz konusu granit ve mermer blokları Şekil 3.2'de görülmektedir.

Bu çalışmada kullanılmak üzere alınan örnekler Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'na nakledilmiştir. Orijinal (ısıtılmamış) örnekler ile 6 farklı sıcaklığa (100, 200, 400, 600, 800 ve 1000°C) tabi tutulacak örneklerin hazırlanması amacıyla yine aynı laboratuvarda blok örneklerden karotlar alınmış ve bu karotların numaraları bunlara uygulanacak sıcaklık değerleriyle birlikte Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan kaya türlerinin alındıkları ocakların yerlerini gösteren yer bulduru haritası.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan prizmatik geometriye sahip (a) granit ve (b) mermer blokları.

Granit ve mermer bloklarından ısıtılmamış ve 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakılıp soğutulduktan sonra fiziksel ve mekanik deneylerin yapılması amacıyla her sıcaklık için birer adet olmak üzere toplam 7'şer karot örneği hazırlamıştır. Ancak deney aşamasında, M6 numaralı mermer örneği 700 ve 800°C sıcaklıklarda dağılmış ve dolayısıyla mermer örnekleri için 600°C'den daha yüksek sıcaklıklar uygulanamamış olup, mermer için M1-M5 no.lu toplam 5 örnek kullanılmıştır (Çizelge 3.1). Mermer örnekleriyle ilgili bu durumun gerekçeleri tezin 4. Bölümü'nde sunulmuştur.

Örnek hazırlamada bir grup örnek üzerinde birim hacim ağırlık, P-dalga hızı, tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülü; diğer bir grup örnekte çekilme dayanımı, bir diğerinde görünür gözeneklilik son grupta ise X-ışınları CT deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla her kaya türünden 4 grup halinde karotlar hazırlanmıştır. Bu 4 grup örnek, bloklardan çıkarılan en uzun karot örneği kesilerek elde edilmiş karotlardır. Görünür gözeneklilik ve X-ışınları CT deneylerinin yapıldığı örnekler bu deneyler tamamlandıktan sonra suda dağılmaya karşı duraylılık deneylerinde de kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Hazırlanmış granit ve mermer örnekleri ve maruz bırakıldıkları sıcaklıklar.

Sıcaklık (°C)	Granit	Mermer
Isıtılmamış örnek	G1	M1
100°C	G2	M2
200°C	G3	M3
400°C	G4	M4
600°C	G5	M5
800°C	G6	-
1000°C	G7	-

3.2. Deney Yöntemleri

Blok örneklerden kaya mekaniği deneylerinde kullanılmak üzere Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda ISRM [43] tarafından önerilmiş yöntemlere göre NX (54.7 mm) çaplı karotlar alınmış ve bu karotlar ilgili deneyler için uygun boyutlarda kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 3.3). Farklı boylarda alınan karotlar; Çizelge 3.1'deki karot numaralarının ardına ek olarak, o karotta hangi tür deneylerin yapılacağına da belirtilmesi amacıyla Çizelge 3.2'de verilen kısaltmalar da eklenerek kullanılmıştır.

3.2.1. Mineralojik Çözümlemelerde Kullanılan Yöntemler

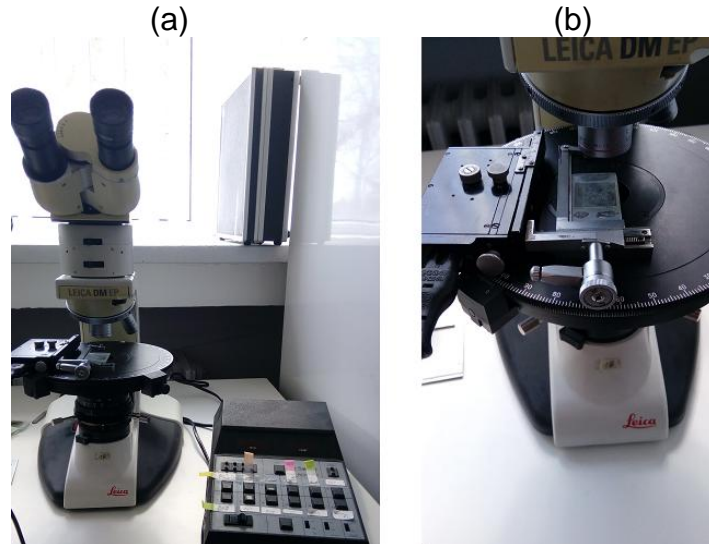
a) Nokta Sayım Yöntemi

İlk kez Glagoleff ([44]; [45]'den) tarafından önerilen "Nokta Sayım Yöntemi" incekesit üzerinde aralıkları sabit olan bir nokta ağı içine düşen farklı mineralleri sayma esasına dayanır. Belirli bir minerale düşen nokta sayısı nokta ağında

bulunan toplam nokta sayısına bölünerek ve daha sonra 100 ile çarpılarak o mineralin kayaç içindeki miktarı yüzde cinsinden bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında; Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mineraloji-Petrografi Anabilim Dalı Laboratuvar'ında bulunan ve her bir kesitte 1500 nokta sayacak şekilde ayarlanan James Swift marka nokta sayım cihazı kullanılarak ve ilgili anabilim dalı çalışanlarından destek alınarak Leica DM EP tipi mikroskopta (Şekil 3.4) her bir minerale yüzde verilerek örneklerin modal mineralojik bileşimleri belirlenmiştir.



Şekil 3.3. Kaya mekaniği deneyleri için hazırlanan granit ve mermer karotlarından bir görüntü.



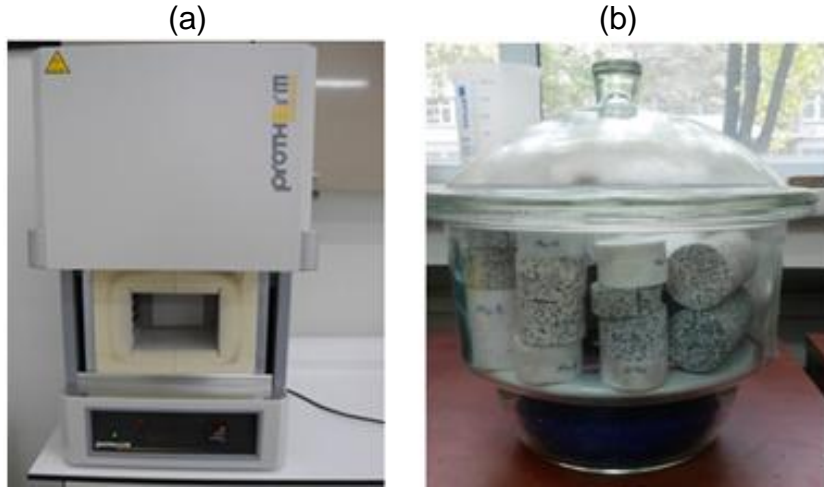
Şekil 3.4. Bu çalışmada kullanılan (a) nokta sayım cihazı ve mikroskop ile, (b) nokta sayım işleminin yakından görünümü.

b) X-ışınları Kırınım Yöntemi

X-ışınları kırınım çekimi için kaya örneklerinden öğütülerek hazırlanan toz örnekler Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü X-ışınları mikro analiz laboratuvarındaki Philips PW-1140 model X-ışınları difraktometresi ile çekilmiştir. Difraktometrede 2°/dak hıza sahip olan bir gonyometre bulunmaktadır. Tüm kaya çözümlenmelerinde belirlenen difraktogramlardaki piklerin tanımladığı minerallerin belirlenmesi için ASTM [46]'nin kartoteksleri kullanılmıştır. X-ışınları kırınım analizleri sonucunda belirlenen difraktogramlardaki pik değerlerinin oranlarına göre mineral yüzdeleri Gündoğdu [47] tarafından önerilen yöntemle göre belirlenmiştir.

3.2.2. Isıtma Yöntemi

Hazırlanan örnekler, Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan Protherm marka PLF serisi elektronik fırın (Şekil 3.5a) kullanılarak 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır. Daha önce yapılmış bir çok çalışmada da olduğu gibi (örn. [3], [8], [9], [11], [17], [19], [36], [40], [41]), örneklerde ani ısınma ve soğumaya bağlı gelişebilecek kırıklar ve hasarı önlemek amacıyla sıcaklık artış hızı 0.8-1.5°C/dak olacak şekilde ısıtılmıştır. Isıtıldıktan sonra soğutulmuş örneklerde deney yapılmış çalışmalarda hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra örneklerin soğutma aşamasına geçilmeden önce bu sıcaklıkta tutulma süreleri olarak literatürde 1 saat ([15], [17], [26], [40], 4 saat ([34]) ve 2 saat ([23], [24], [27], [36], [48]) olarak belirtilmektedir. Bu çalışmada, ısının kayaç içerisinde homojen olarak dağılabilmesi için hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra örnekler söz konusu bu sıcaklık altında 2 saat süreyle fırında bekletilmiştir. Daha sonra fırının içindeki sıcaklık oda sıcaklığı koşullarına düşene değin fırının kapağı açılmadan oldukça yavaş bir hızla soğutulmuştur. Bu soğutulma süreleri hakkında bir fikir vermesi açısından, 1000°C'ye kadar ısıtılmış bir örneğin oda sıcaklığına kadar düşmesi için yaklaşık bir hafta geçmiştir. Örnekler kaya mekaniği deneyleri yapılana değin, sahip oldukları nem içeriği koşullarının değişmemesi için dessikatörde bekletilmişlerdir (Şekil 3.5b). Isıtılıp soğutulan bu örnekler bu tez raporunda "ısıtılmış örnek", herhangi bir ısıtma sürecine maruz bırakılmamış örnek ise "ısıtılmamış örnek" adıyla anılacaktır.



Şekil 3.5. (a) Araştırmada kullanılan fırın, (b) ısıtma sonrası kaya mekaniği deneyleri için örneklerin dessikatörde bekletilmesi.

3.2.3. Kaya Mekaniği Deneylerinde Kullanılan Yöntemler

Sıcaklığın bu çalışmada seçilmiş kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri ve davranışları üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla ISRM [43] tarafından önerilen yöntemlere göre fiziksel özellik ve indeks deneyleri kapsamında; birim hacim ağırlık, görünür gözeneklilik, P-dalga hızı ve suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneyleri; mekanik özelliklerin belirlenmesi kapsamında ise tek eksenli sıkışma dayanımı, Brazilian (dolaylı yöntem) çekilme dayanımı ve elastisite modülü tayinleriyle ilgili deneyler yapılmıştır.

Görünür gözeneklilik değerleri ilk olarak, düzenli geometriye sahip olan karotlarda, ISRM [43] tarafından önerilen suda doyurma yöntemine göre tayin edilmiştir. Gözeneklilik ayrıca, Bölüm 3.2.4'te ayrıntılı şekilde verilen X-ışınları bilgisayarlı tomografi çekim yöntemiyle de hesaplanmıştır. Mekanik özellik deneyleri, Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda bulunan 500 kN yükleme kapasiteli ve otomatik hız kontrollü hidrolik pres kullanılarak yapılmıştır. Elastisite modülünün tayini için her örnekte FLA-10-11 tipinde, 120 ohm dirençli ve direnç faktörü 2.09 olan birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır.

3.2.4. X-ışınları Bilgisayarlı Tomografi Çekim Yöntemi

X-ışınları bilgisayarlı tomografi çekim (X-ışınları CT) yöntemi; bir malzemenin iç yapısını malzemeye hasar vermeden inceleyen yöntemlerden biri olup, bu yöntemde X-ışınları sönmeme katsayısı ile ilgili üç boyutlu görüntüler yeniden

yapılandırılarak, malzemenin iç yapısı araştırılmaktadır [49]. Bu ve benzeri gibi malzemeye hasar vermeyen yöntemlerin jeo-mühendislik çalışmalarında kullanımı ve popülaritesi günümüzde giderek artmaktadır.

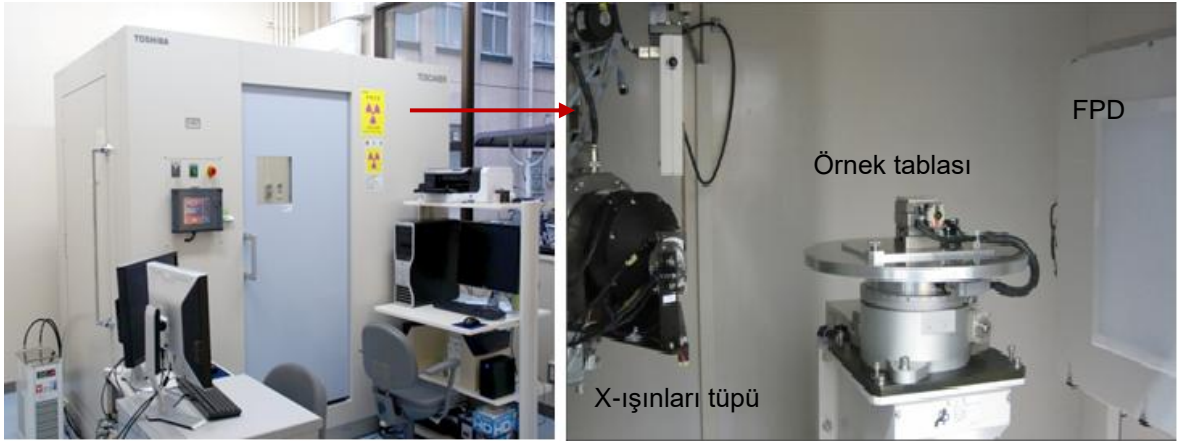
X-ışınları CT yöntemi bir malzemenin yapısındaki hasarın gelişimini ve yayılmasını yansıtmada etkili bir ölçüm aracı olarak gösterilmiş ve geçmişteki birçok çalışmada (örn. [50]–[56]; [28]’dan) kayaçlarda gelişen hasarın ve kayacın yenilme davranışının araştırılmasında kullanılmıştır [28]. X-ışınları CT yöntemini, örneğin Sufian ve Russell [52] Gosford (Avustralya) kumtaşında tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinde yenilme öncesi ve yenilme sırasında örneğin mikroyapısını ve gözeneklilikteki değişimi araştırırken; Yang vd. [56] ise, kumtaşının üç eksenli yükleme koşulunda iç yapısında meydana gelen hasarı analiz ederken kullanmışlardır [28]. Bu tez çalışmasında da X-ışınları CT çekim yöntemi kullanılarak yüksek sıcaklığa maruz kalan granit ile mermer örneklerinin görünür gözeneklilik değişimi tayin edilmiştir. Ülkemizde kaya mekaniği ve jeo-mühendislik alanlarında henüz bu yöntemin kullanılmaması nedeniyle bu çalışmada, X-ışınları CT çekimleri için örnekler hem ısıtılmadan hem de ısıtıldıktan sonra Japonya’daki Kumamoto Üniversitesine gönderilmiş ve çekimler Prof. Yuzo Obara ve ekibi tarafından yapılarak, sonuçlar Prof. Yuzo Obara tarafından değerlendirilmiştir. Örneklerin gönderildiği Kumamoto Üniversitesi’nde μ -boyutunda ve özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiş olan X-ışınları CT cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.6). Kullanılan cihazın başlıca bölümleri ise Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Bu çalışmaya ait örnekler için Kumamoto Üniversitesi (Japonya)’nde kullanılan X-ışınları CT cihazının özellikleri.

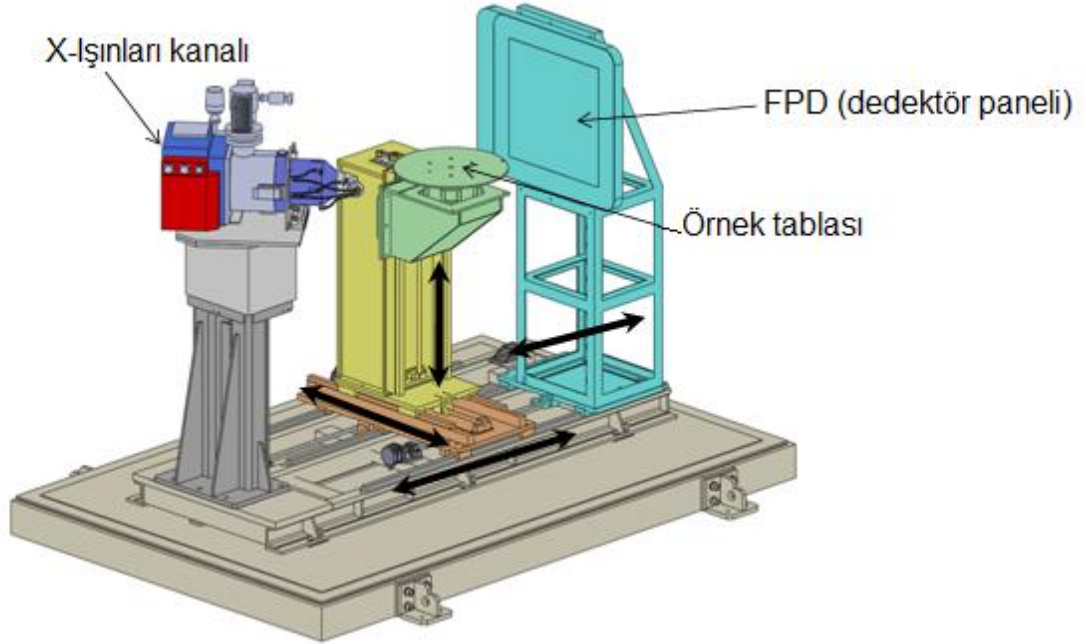
Radyografik görüntü alanı	400 mm, uzunluk 500 mm
Ekran piksel sayısı	Konik 1024×1024
Çözünürlük	5 μ m en az
Konik giriş taraması	Normal, Ötelemeli, Yarı
X-ışınları kalınlığı	5 μ m minimum
X-ışınının gücü	240 kV (140 W) en fazla
En fazla örnek ağırlığı	245 N

İlk olarak örnek, örnek tablasına yerleştirilir ve X-ışınları tüpünden yayılan konik şekilli X-ışını sayesinde örnek görüntülenir. Görüntüleme boyunca, örnek tablası

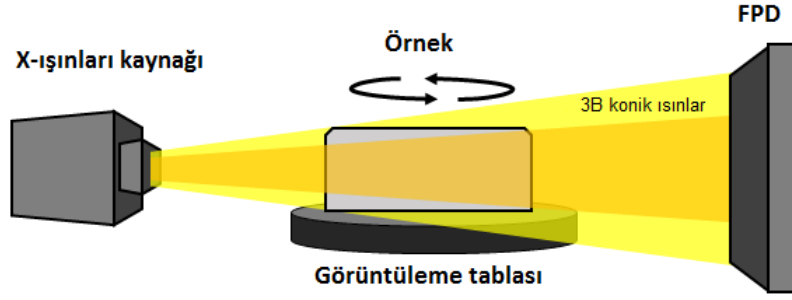
döner ve bu sayede de X-ışınları 360° boyunca örneğe nüfuz eder ([57]; [49]'den) (Şekil 3.8). X-ışınları CT çekimleri için NX (54.7 mm) çapında, ortalama 30 mm boyunda hazırlanan karot örnekleri, kalınlığı 0.069 mm olan yaklaşık 500 dilime ayrılarak fotoğraflanmıştır. Bu fotoğraflar, 1024x1024 pikselden oluşan kübik voksellerden (bir pixelin üç boyutlu karşılığı) oluşmaktadır (Şekil 3.9). Bu yöntemle göre gözenekliliği hesaplamak için, gözenekleri temsil eden voxel adedi sayılmış ve bu sayının toplam voxel sayısına bölünmesiyle gözeneklilik değerleri bulunmuştur [49].



Şekil 3.6. Kumamoto Üniversite'nde kullanılan X-ışınları CT cihazının odası ve görüntüsü [58].

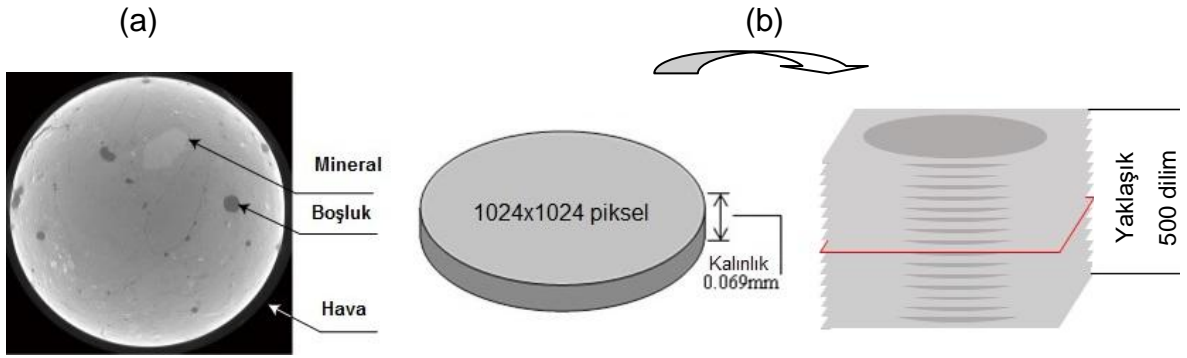


Şekil 3.7. X-ışınları CT cihazının şematik gösterimi [49]



- Fotoğraflama özellikleri
 - [Voltaj] 210kV
 - [Akım] 300mA
 - [Matrix] 1024×1024
 - [Dilim aralığı] 0.069mm
 - Her örnek için yaklaşık 450-500 tane 2B fotoğraf

Şekil 3.8. X-ışınları CT yönteminde fotoğraflama özellikleri [58].



Şekil 3.9. X-ışınları CT fotoğrafı ve voksel verisi: (a) X-ışınları CT fotoğrafı ve (b) fotoğrafı oluşturan pikseller ve dilimler [49].

4. İNCELENEN KAYA TÜRLERİNİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ

Bu bölümde; tez çalışmasında kullanılan iki kaya türünün laboratuvar deneyleriyle belirlenen mineralojik-petrografik, fiziksel ve indeks ve mekanik özellikleri ile bu özelliklerin sıcaklığa bağlı değişimi sunulmuştur. Ayrıca, bu kaya birimlerinde sıcaklığa bağlı olarak gözlenen renk değişimleri ve X-ışınları CT çekimlerinin sonuçları da sunulup değerlendirilmiştir.

Bu bölümde sunulan değerlendirmelere granit ve mermerlerin aynı özelliklerinin sıcaklıkla değişimini konu alan önceki çalışmaların sonuçlarının bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması dahil edilmemiş olup, söz konusu karşılaştırmalara tezin 5. Bölüm'ünde yer verilmiştir.

4.1. İncelenen Kaya Türlerinin Mineralojik Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi

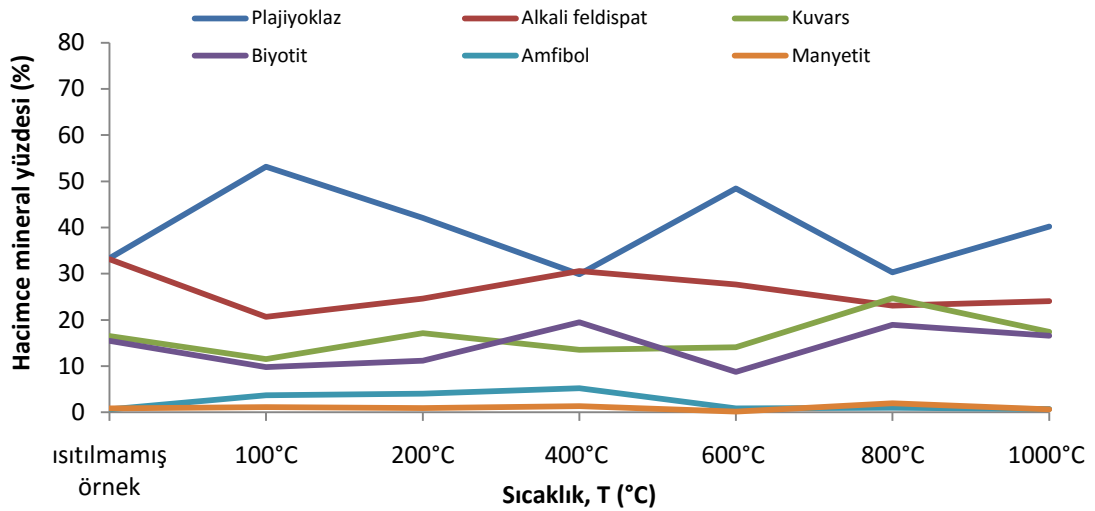
Granit ve mermer örnekleri için ince kesitlerin hazırlanması amacıyla bloklardan elde edilen ve görünür gözeneklilik tayinlerinde kullanılacak olan karotların hemen alt veya üst uçlarından kesilen parçalar kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında incelenen farklı kaya türünden granit örneklerine ait ince kesitlerde nokta sayma yönteminden, mermerde ise ince kesitler ve X-ışınları kırınım analizinden yararlanılarak her mineral türünün hem doğal hem de farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış örneklerde bulunma yüzdeleri hesaplanmış ve böylece kayacın modal mineralojik bileşimi ortaya konulmuş, mineral içerikleri ile minerallerin kaya içerisindeki hacimsel oranları tayin edilmiş ve örnekler petrografik olarak adlandırılmıştır. İnce kesitler Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İnce Kesit Laboratuvar'ında hazırlanmış olup, X-ışınları kırınım analizleri ve nokta sayma işlemleri de yine aynı bölümün ilgili laboratuvarlarında yapılmıştır. Mineralojik tayinler ve X-ışınları kırınım analizleri mermer örneklerinin tamamen kalsit mineralinden oluştuğunu gösterdiği ve dolayısıyla bu örnekler tek mineralle temsil edildiği için bunlara ait herhangi bir analiz çizelgesi verilmemiştir. Bu nedenle analiz sonuçları olarak sadece granit örneklerine ait mineralojik bileşimler EK-1'de sunulmuştur.

4.1.1. Granit Örneklerinin Mineralojik Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi

Petrografik çözümlenmelerin sonuçlarına göre; holokristalin taneseli doku özelliği gösteren 1 no.lu örneğin ince kesitinde; kayacın ana mineralojik bileşenleri olarak

plajiyoklaz, alkali feldispat, kuvars, biyotit, amfibol ve tali mineralojik fazları olarak manyetit mineralleri görülmektedir. Granite ait doğal (ısıtılmamış) ve farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış örneklerde nokta sayım yöntemiyle yapılan yüzdece mineral bileşimleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre, Streckeisen ([59]; [45] ‘den)’nın önerdiği magmatik kayaların modal mineralojik bileşimlerine göre sınıflandırmasında örneğin granit olduğu belirlenmiştir.

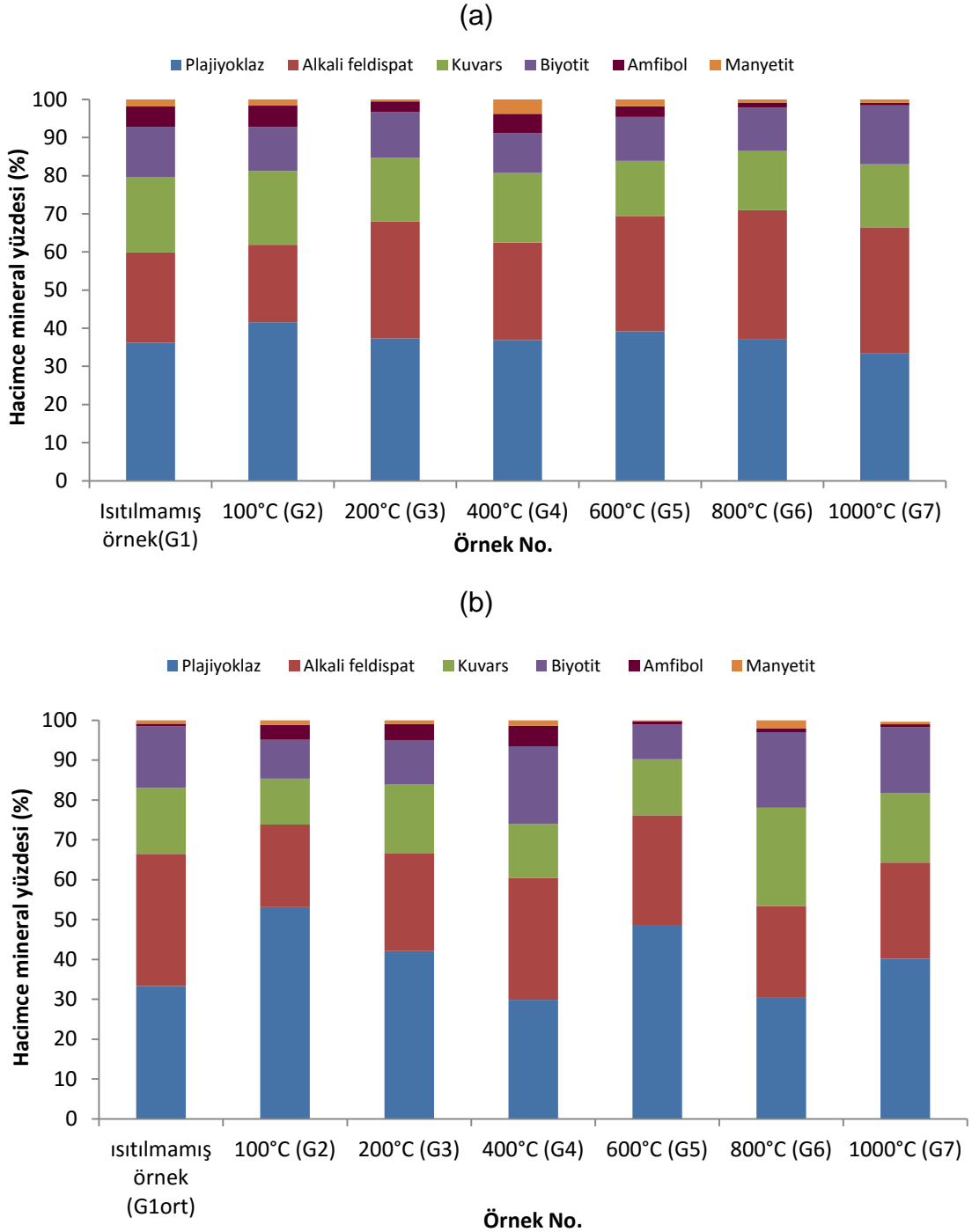
Şekil 4.1’de verilmiş granitin mineralojik bileşiminde sıcaklığa bağlı değişime göre; minerallerin hacimce yüzdelerinin muhtemelen örneklerdeki heterojenite nedeniyle sıcaklıkla birlikte küçük dalgalanmalar gösterdiği, bununla birlikte ısıtılmamış örnek ile 1000°C’ye kadar ısıtılmış örnek arasında mineralojik bileşimin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu nedenle sıcaklık artışının granitin mineralojik bileşimini değiştirmedeğinin söylenmesi mümkündür. Benzer bir değerlendirme, granit üzerinde çalışan ve örneklerin mineralojisini inceleyen Yang [28] tarafından da yapılmıştır.



Şekil 4.1. İncelenen granitin içerdiği minerallerin farklı sıcaklıktaki yüzdeleri.

Biri doğal örnek olmak üzere, farklı sıcaklıklara tabi tutulmak üzere hazırlanmış toplam 7 adet granit örneğinin ısıtılmadan önce ince kesitleri hazırlanıp incelenmiştir. Doğal örneklerin mineral yüzdeleri histogram halinde Şekil 4.2a’da verilmiştir. Bu histogramdan da görüleceği gibi, granit örnekleri arasında her mineral türü için çok belirgin farklılıklar söz konusu olmayıp, bu örnekler mineralojik bileşimleri açısından homojen olarak kabul edilebilirler. Bu durum dikkate alınarak, ısıtılmamış doğal granitin mineralojik bileşimi için 7 adet ince kesite ait mineralojik bileşimlerin ortalaması (G1ort) esas alınmıştır.

Şekil 4.1’de verilen ve granit örneklerinin içerdiği minerallerin farklı sıcaklıklardaki hacimce mineral yüzdeleri sıcaklığa bağlı olarak durumunu çubuk histogramlar ısıtılmamış ve ısıtılmış örnekler için Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu histogramlar da Şekil 4.1 ile ilgili yukarıda verilen yorumu desteklemektedir.



Şekil 4.2.(a) Isıtılmamış ve (b) ısıtılmış granit örneklerinin nokta sayım yöntemiyle belirlenmiş hacimce mineral yüzdeleri.

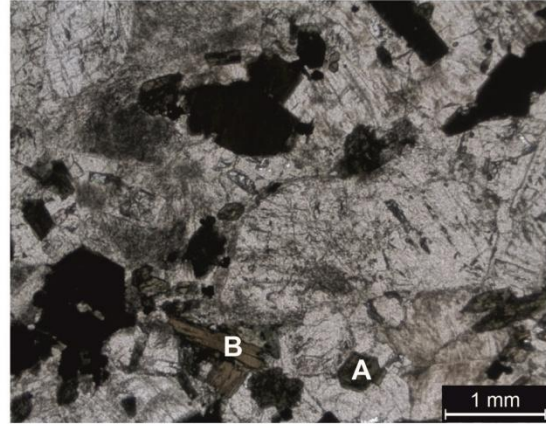
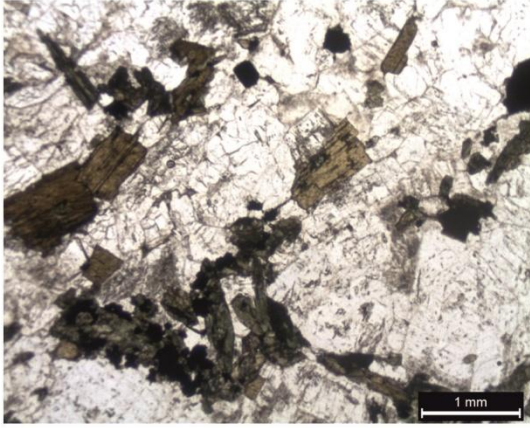
Isıtılmış granit örneklerinin içerdiği minerallerin 600°C'ye kadar yapısal ve dokusal anlamda belirgin bir şekilde etkilenmediği görülmektedir (Şekil 4.3). Ancak sıcaklık 600°C'ye ulaştığında plajiyoklazlarda aşırı miktarda parçalanma görülmüş, biyotitlerin kenar kısımlarında kırmızımsılıklar oluşmaya ve bozunmaya bağlı ikizlenmiş plajiyoklaz içine girmiş kuvars kurtçukları içeren mirmekit doku gözlenmeye başlanmıştır. 800°C'de biyotitlerin neredeyse tamamı kırmızıya dönüşmüştür (Şekil 4.3e). 1000°C sıcaklığa kadar ısıtılmış granit örneğinde ise, birçok mineral dağılmış ve hatta ufalanmış durumdadır (Şekil 4.3f).

(a)

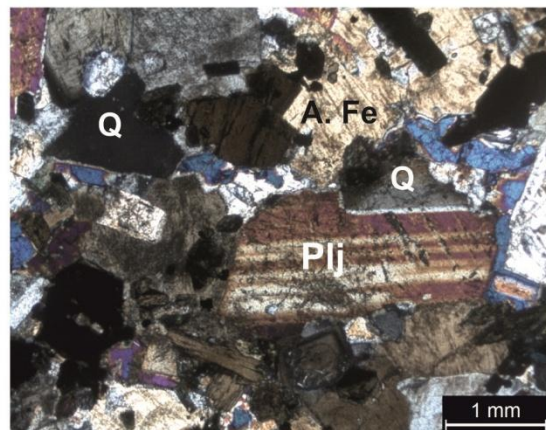
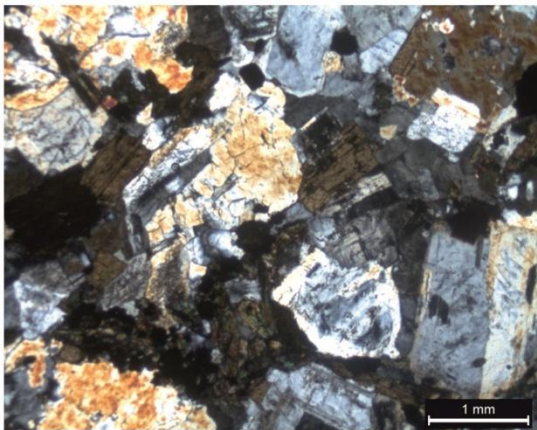
Isıtılmamış Örnek

Isıtılmış Örnek (100°C)

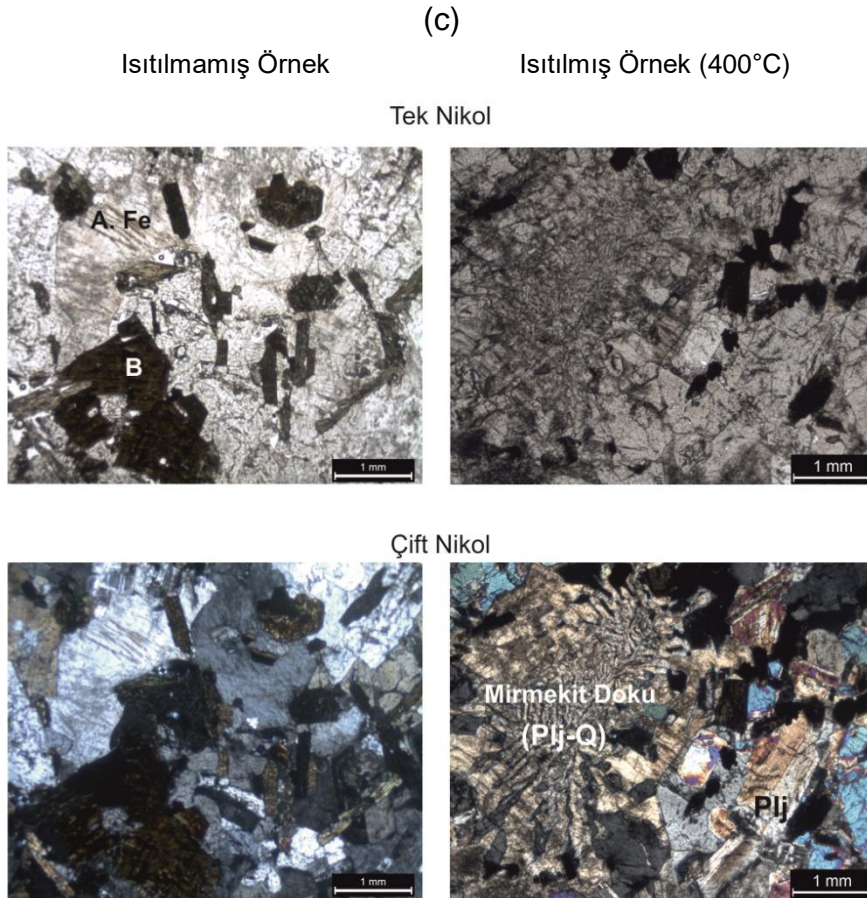
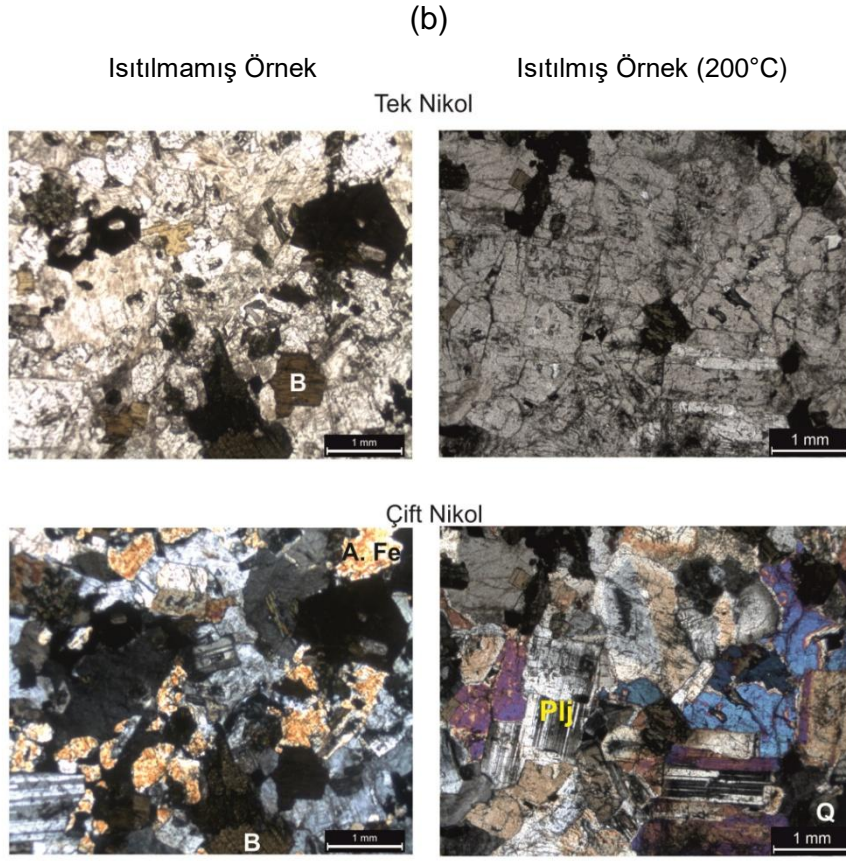
Tek Nikol



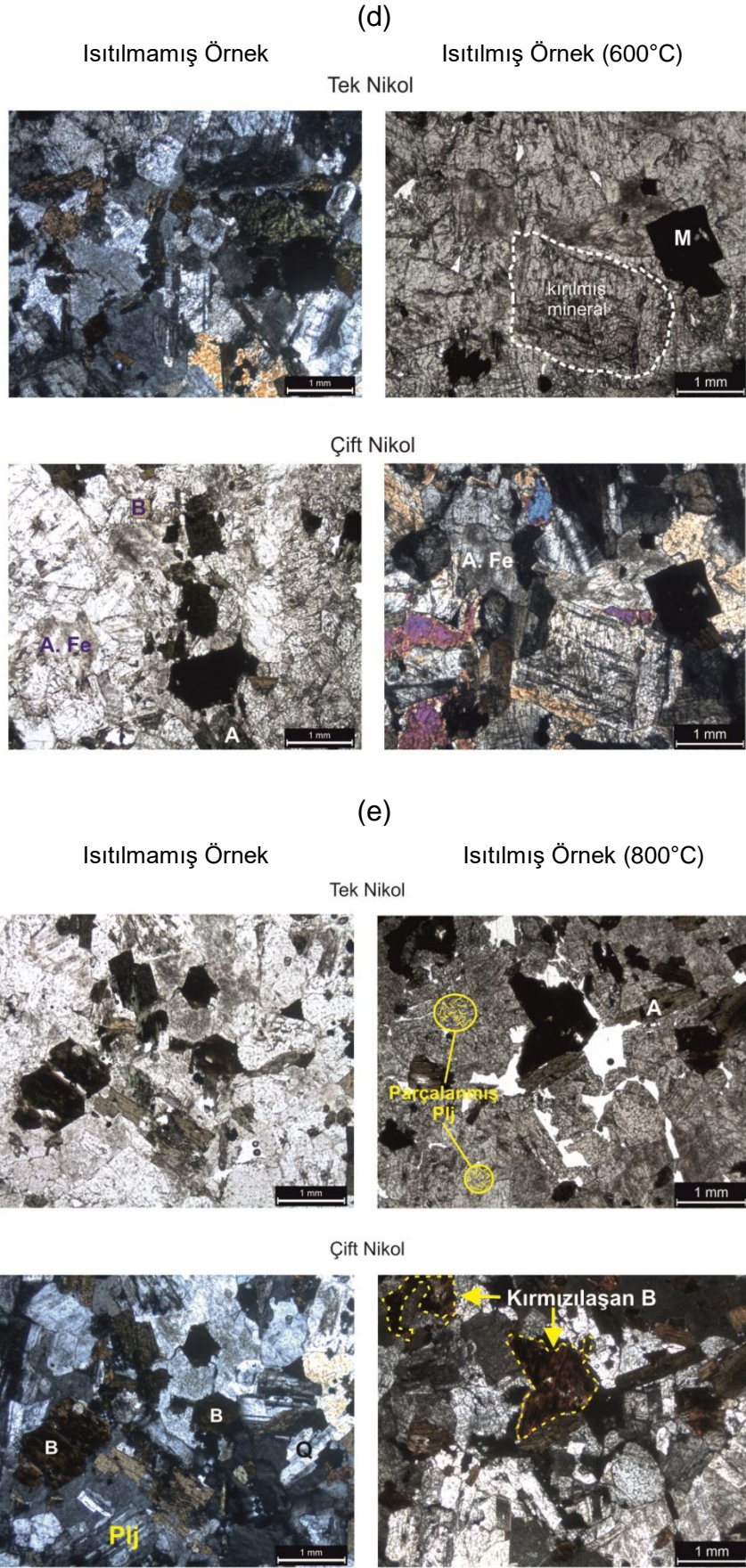
Çift Nikol



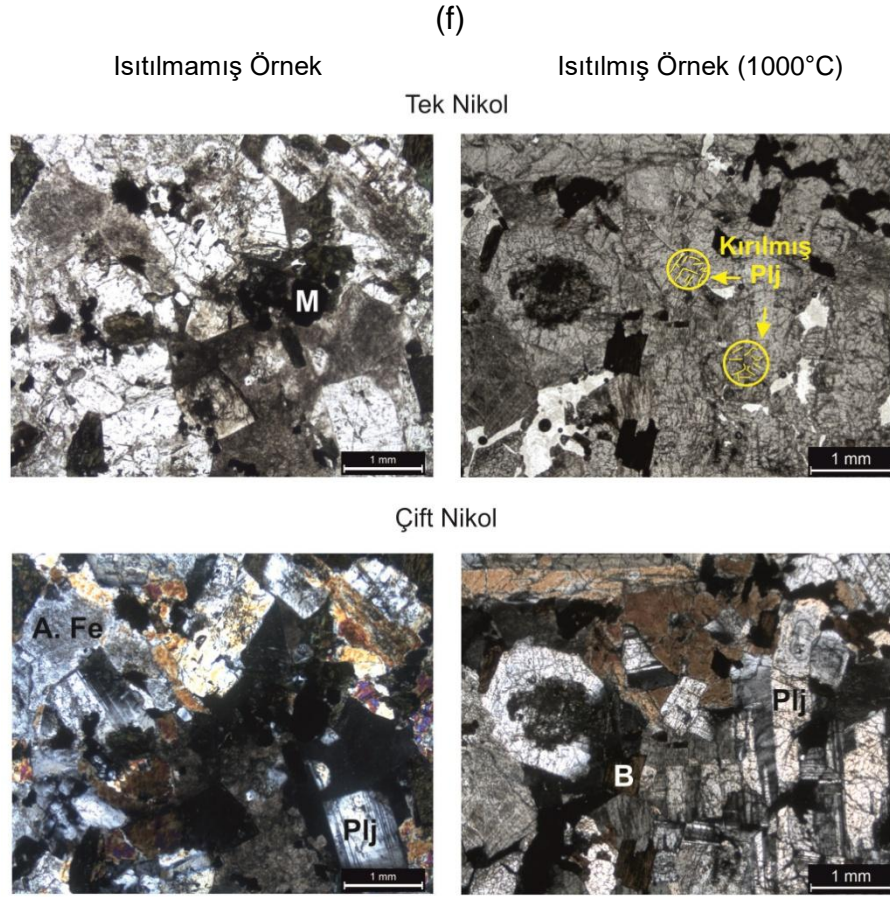
Şekil 4.3. Isıtılmamış ve ısıtılmış granit örneklerinin ince kesitlerdeki tek ve çift nikol görüntüleri: (a) 100°C, (b) 200°C, (c) 400°C, (d) 600°C, (e) 800°C, (f) 1000°C (Q: Kuvars, B: Biyotit, Plj: Plajiyoklaz, A. Fe: Alkali feldispat, A: Amfibol, M: Manyetit).



Şekil 4.3 (devam ediyor)



Şekil 4.3 (devam ediyor)



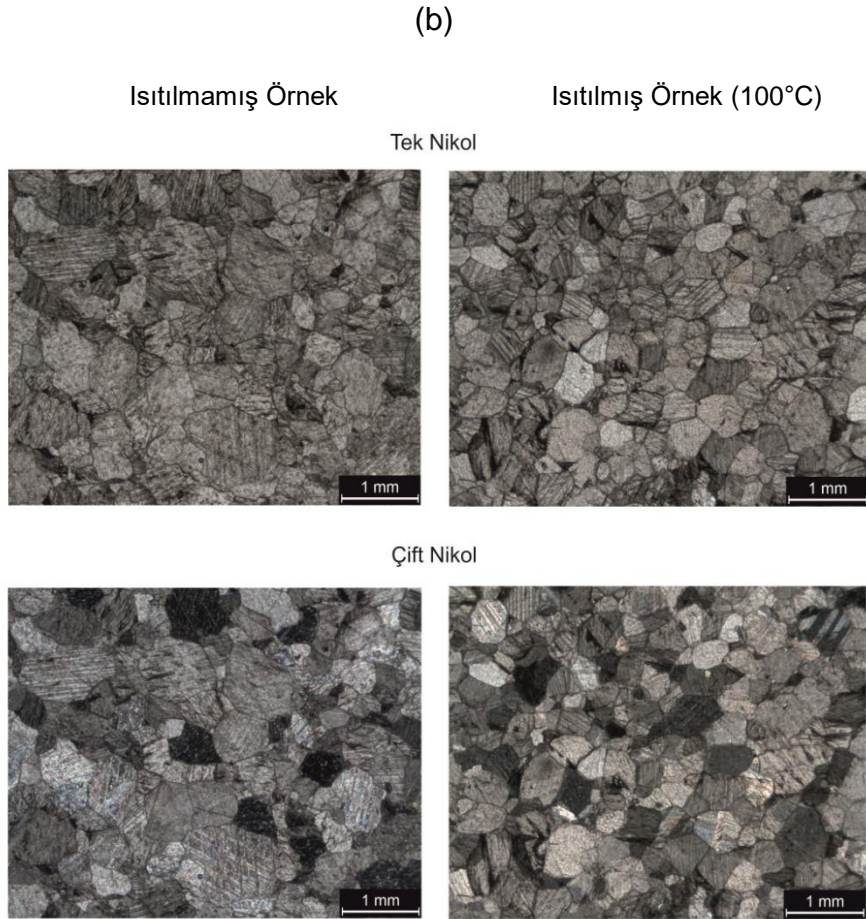
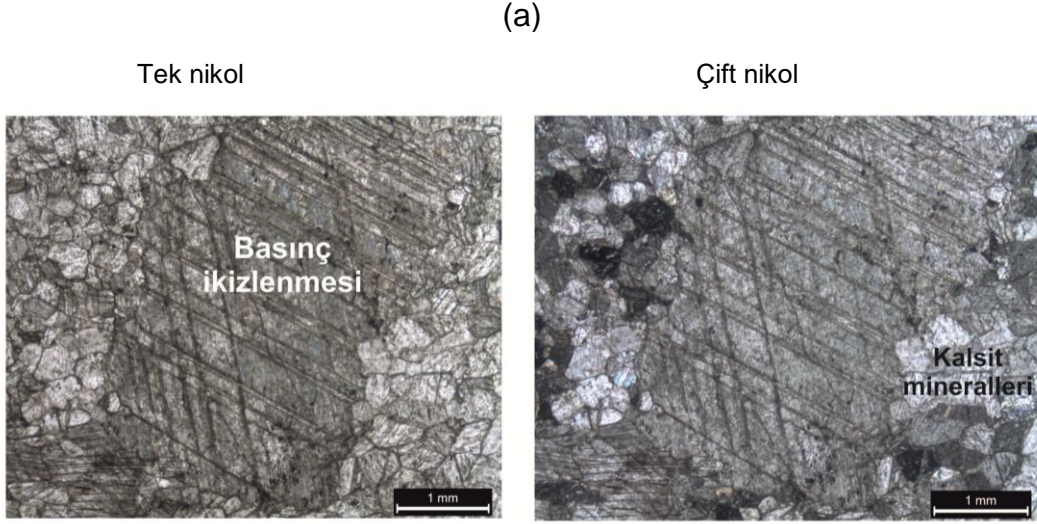
Şekil 4.3 (devam ediyor)

4.1.2. Mermer Örneklerinin Mineralojik Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi

Petrografik çözümlenmelerin sonuçlarına göre; granoblastik dokuya sahip, minerallerinin metamorfizmaya bağlı basınç ikizlenme doku özelliği gösterdiği, ince taneli kalsit minerallerinden oluşmuş 2 no.lu örnek, mermer olarak adlandırılmıştır. Mermerin nokta sayım yöntemiyle belirlenen modal mineralojik bileşimine göre; kayacı oluşturan minerallerin tümü kalsit olarak değerlendirilmiş, bu nedenle granitler için hazırlanan Şekil 4.2'deki gibi histogramların mermer için hazırlanmasına gerek duyulmamıştır.

Şekil 4.4'e göre; doğal haldeki ve farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış mermer örneklerinin ince kesitlerinin değerlendirilmesi sonucunda, metamorfik bir kayaç olması nedeniyle zaten oluşurken yüksek sıcaklık ve basınç altında oluşmuş kalsit minerallerinde mineralojik ve dokusal açıdan herhangi bir değişim meydana gelmediği, ayrıca sıcaklığa bağlı gözle fark edilebilecek düzeyde bir renk değişiminin olmadığı anlaşılmaktadır. İnce kesitlerde nokta sayım yöntemiyle kalsit dışında başka bir mineral görülmediği için, ayrıca X-ışınları kırınım analizleri de

yapılmış ve X-ışınları yansıması 100'lük pik değerlerine göre değerlendirilen analiz sonuçlarına göre mermer örneğinin sadece kalsitten oluştuğu ve mineralojik bileşiminin sıcaklıkla değişmediği doğrulanmıştır (Şekil 4.5).



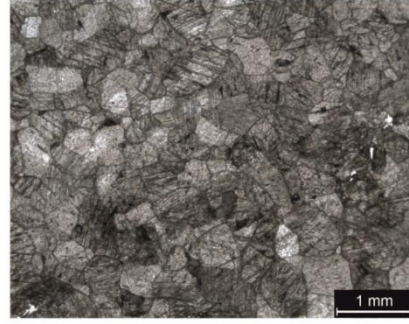
Şekil 4.4. Isıtılmamış ve ısıtılmış mermer örneklerinin ince kesitlerdeki tek ve çift nikol görüntüleri: (a) ısıtılmamış örnek, (b) 100°C, (c) 200°C, (d) 400°C ve (e) 600°C.

(c)

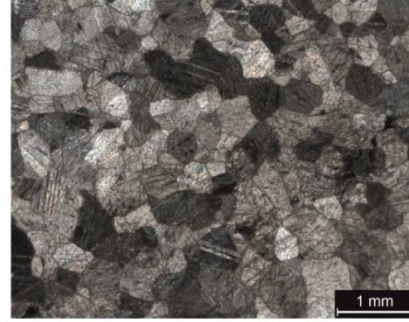
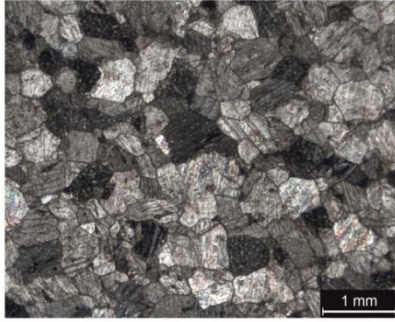
Isıtılmamış Örnek

Isıtılmış Örnek (200°C)

Tek Nikol



Çift Nikol

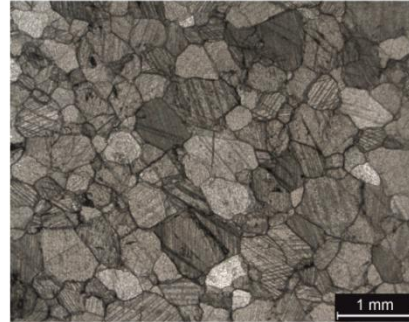
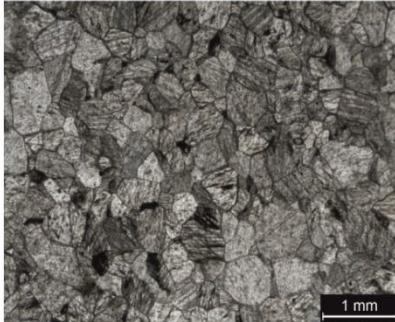


(d)

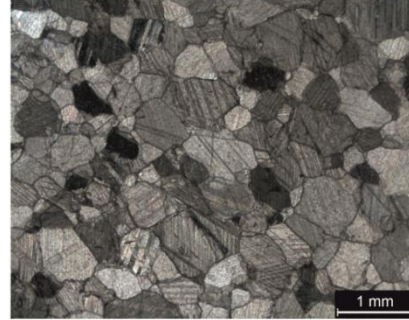
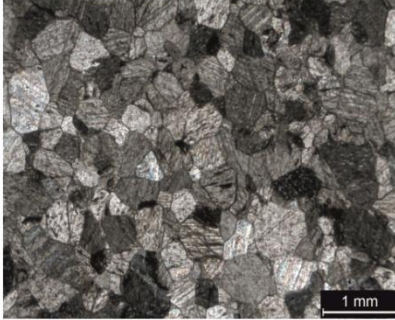
Isıtılmamış Örnek

Isıtılmış Örnek (400°C)

Tek Nikol



Çift Nikol



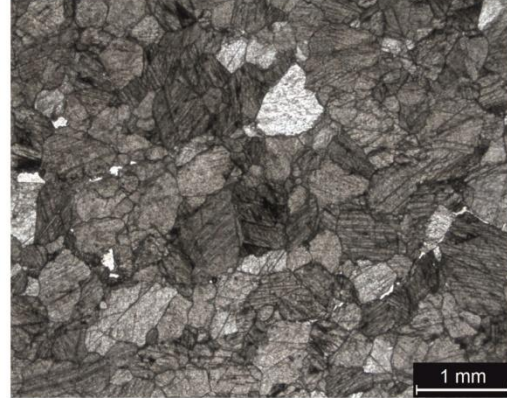
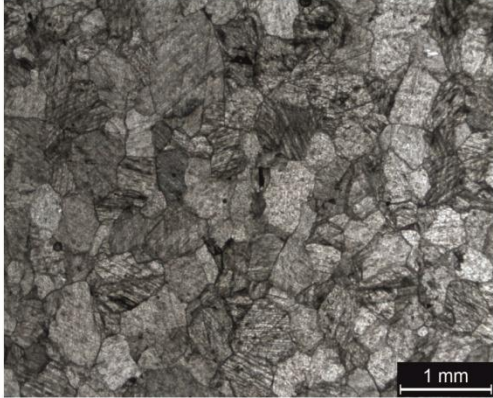
Şekil 4.4 (devam ediyor)

(e)

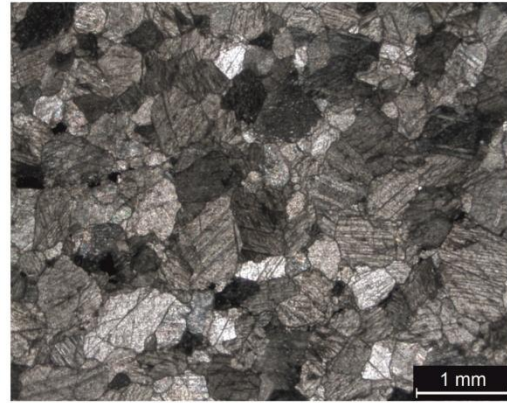
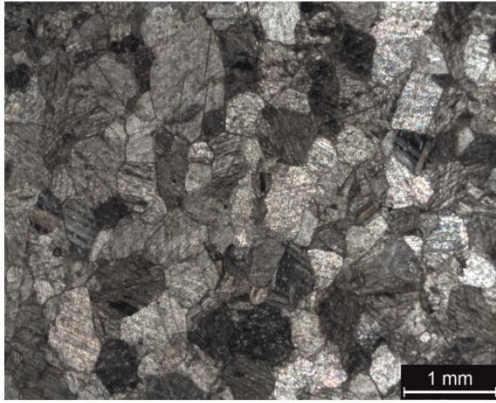
Isıtılmamış Örnek

Isıtılmış Örnek (600°C)

Tek Nikol



Çift Nikol

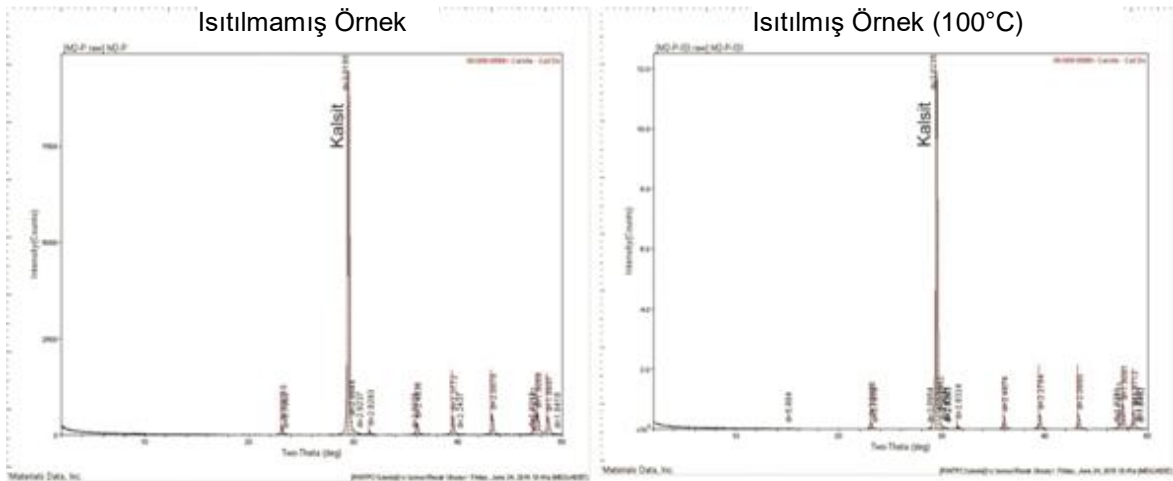


Şekil 4.4 (devam ediyor)

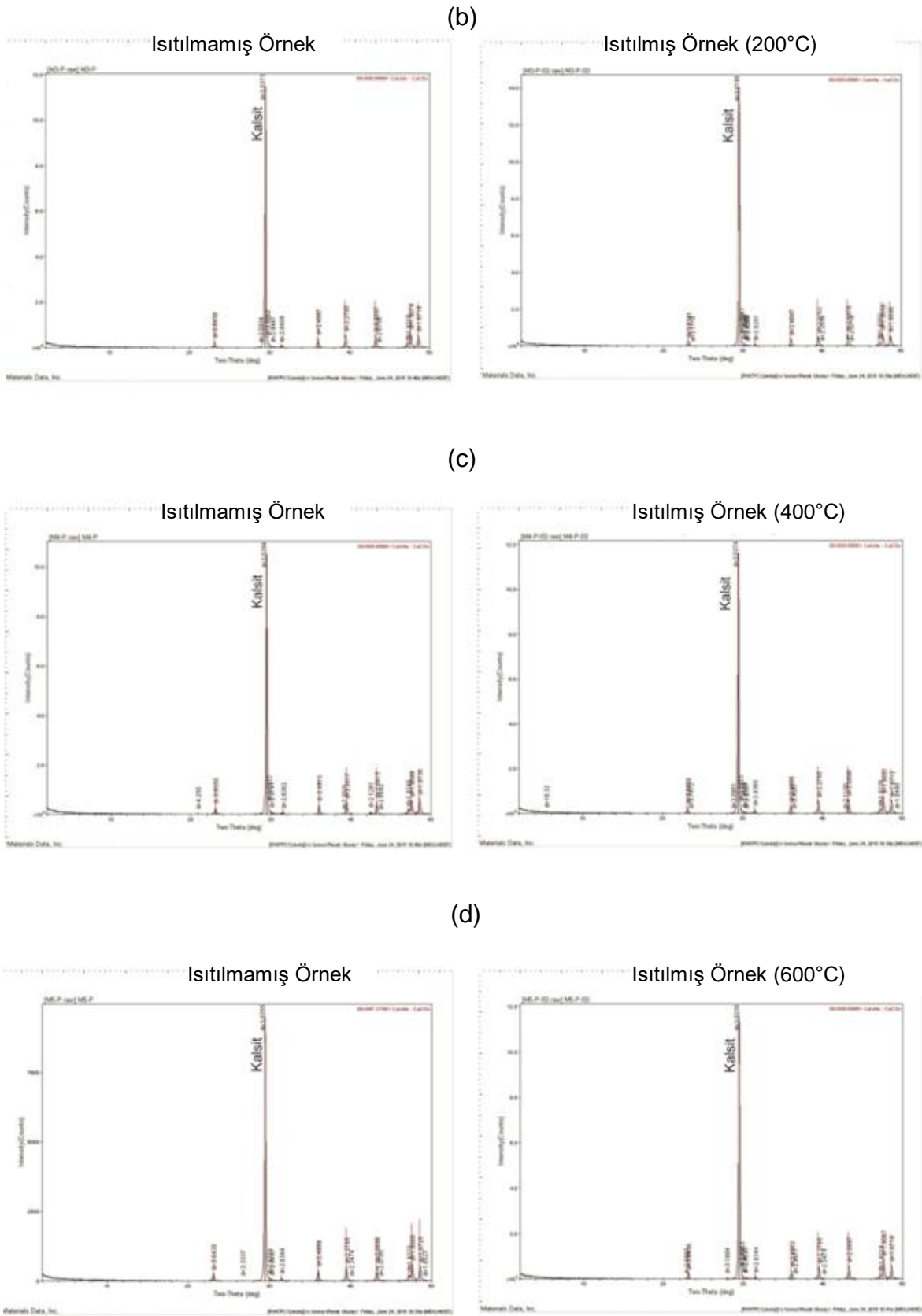
(a)

Isıtılmamış Örnek

Isıtılmış Örnek (100°C)



Şekil 4.5. Isıtılmamış ve ısıtılmış mermer örneklerinin X-ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş tüm kayaç difraktogramları: (a) 100°C, (b) 200°C, (c) 400°C ve (d) 600°C.



Şekil 4.5 (devam ediyor)

Sonuç olarak incelenen kaya örneklerinde, bu tez çalışmasında kullanılan mineralojik-petrografik yöntemlerle, özellikle granitte sıcaklık artışıyla birlikte minerallerin sadece fiziksel olarak değişimini görmek mümkün olmuştur. Kayacın özelliklerinin sıcaklıkla değişiminde kayacı oluşturan minerallerin birebir etkisinden bahsedebilmek için yapılacak kimyasal analizlerle bu minerallerin oluşum koşulları çözümlenerek, sıcaklık-basınç faz diyagramlarından minerallerin faz değişim sıcaklıklarını belirleyebilecek daha ayrıntılı ve uzmanlık gerektiren araştırmaların yapılması gerekmektedir.

4.2. İncelenen Kaya Türlerinin Fiziksel ve İndeks Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi

Tez çalışmasında incelenen iki farklı kaya türünde fiziksel ve indeks özellikler kapsamında; birim hacim ağırlık, görünür gözeneklilik, P-dalga hızı, suda dağılmaya karşı duraylılık tayini deneyleri yapılmıştır. Birim hacim ağırlık, gözeneklilik ve P-dalga hızı deneyleri örneklerde herhangi bir hasara yol açmadığı için, bu deneyler aynı örnekte hem ısıtılmamış haliyle hem de öngörülen farklı sıcaklıklarda yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ancak suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi vb. gibi deneyler sırasında örnekler hasara maruz kaldıkları için, sıcaklıkla değişim konusu, farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış birer örnekten elde edilen sonuçların ısıtılmamış tek bir örnek üzerinde yapılan deneyin sonucuyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasında incelenen kaya örneklerinin fiziksel ve indeks özellikleriyle ilgili elde edilen tüm deney sonuçları EK-2a'da verilmiştir.

4.2.1. Granit Örneklerinin Fiziksel ve İndeks Özelliklerinin Değişimi

a) Birim Hacim Ağırlık

Granit örneklerinin ısıtılmadan önce tayin edilen birim hacim ağırlıkları 26,02-26,13 kN/m³ aralığında çıkmıştır (Şekil 4.6). Şekil 4.7'ye göre, 200°C'ye kadar olan sıcaklıklara maruz kalan granit örneklerinde birim hacim ağırlık açısından kayda değer bir değişim olmamıştır. 200-600°C arasında ise, birim hacim ağırlık azalmaya başlarken, 600°C'den daha yüksek sıcaklığa maruz kalan örneklerin birim hacim ağırlığında daha belirgin bir azalma görülmektedir. Granit için birim hacim ağırlığın sürekli azaldığı sıcaklık olması nedeniyle, bu özellik için eşik sıcaklık değerinin 200°C olduğu söylenebilir. Bu sonuç daha önceki benzer amaçlı

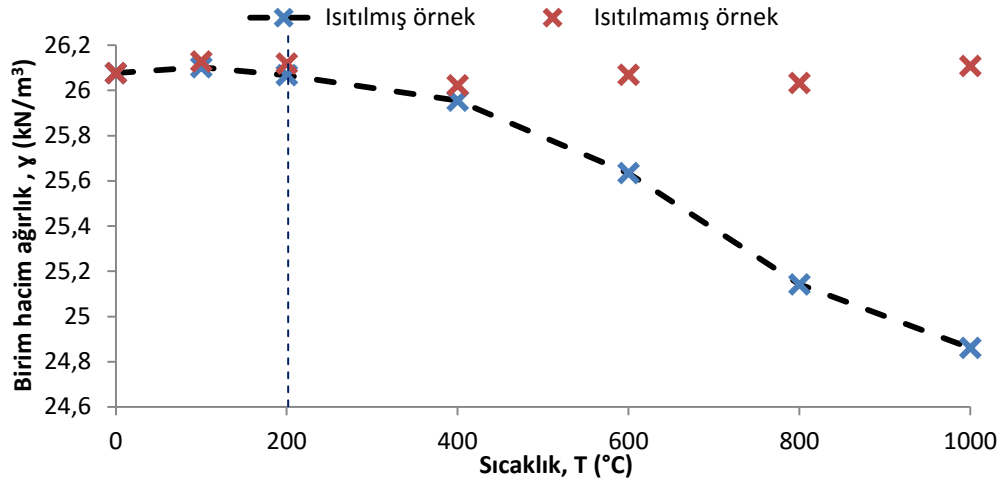
çalışmalardan Liu ve Xu [27] tarafından elde edilmiş sonuçlarla da uyumludur. Isıtılmamış örnek dışında birim hacim ağırlık deneylerinde kullanılan diğer 6 örneğin ısıtılmadan önceki hacimleri ve ağırlıkları Şekil 4.7'de karşılaştırılmıştır. Buna göre granit örneklerinin ağırlıkları 400°C'ye kadar değişmezken, bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda azalmaktadır. Buna karşın aynı sıcaklıktan itibaren daha yüksek sıcaklıklarda ise; hacim artmaktadır. Bu da, birim hacim ağırlığın sıcaklıkla azaldığına işaret etmekte, dolayısıyla Şekil 4.6'da verilen eğilimi desteklemektedir.

b) Görünür Gözeneklilik

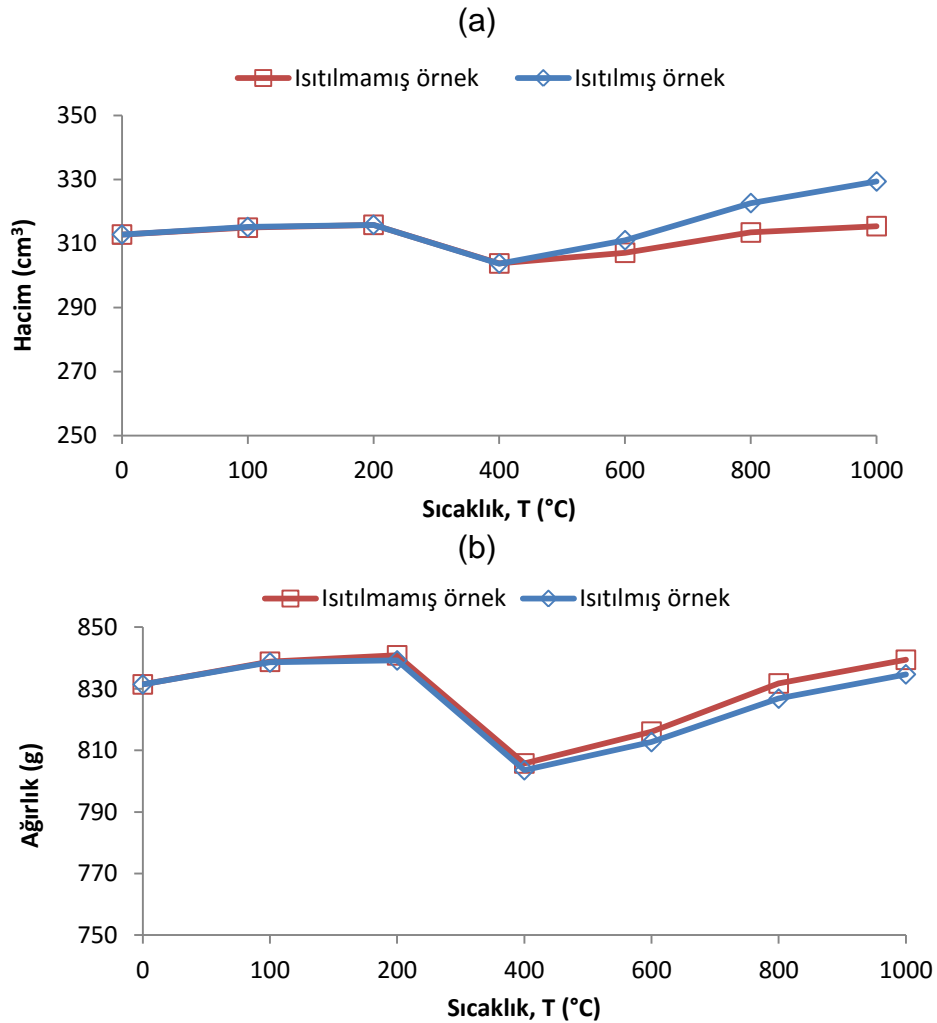
Granit örneklerinin gözeneklilik değerleri önce suda doyurma yöntemiyle "P" no.lu örnekler üzerinde tayin edilmiştir. Kaya mekaniği deneyleri kapsamında genellikle ISRM [43]'nin önerdiği yöntem olan suda doyurma tekniğiyle gözeneklilik tayini yapılmaktadır. Ancak bu yöntemle ilgili olarak örnek içerisindeki boşluklarda bulunan hava çıkarılmadan bu boşluklara suyun girip giremeyeceği ve boşluklar arasında iletim kanalı olmadığı durumda suyun boşluklara yeterince ulaşım sağlayamayacağı gibi bazı soru işaretleri bulunmaktadır. Bu nedenle, bu yöntemle tayin edilecek gözeneklilik değerlerinin gerçek gözeneklilik değerlerinden daha düşük olacağı dikkate alınarak, ayrıca ikinci yöntem olarak X-ışınları CT çekimleri de yapılarak gözeneklilik tayin edilmeye çalışılmış olup, bu yöntemle ilgili değerlendirme ve karşılaştırmalar Bölüm 4.5'te sunulmuştur.

ISRM [43]'in önerdiği yöntem kullanılarak Şekil 4.8'de verilen sonuçlara göre, 400°C'ye kadar sıcaklıklara maruz kalan granit örnekleri için gözeneklilik değerlerinde kayda değer bir değişim olmamıştır. 400°C'den itibaren daha yüksek sıcaklıklara maruz kalan örneklerde ise, görünür gözeneklilikte belirgin bir artış olduğundan, söz konusu özellik için 400°C'nin eşik sıcaklık olduğu söylenebilir. Sıcaklık arttıkça minerallerin parçalanmasına bağlı olarak, mineraller arası boşlukların artması kayacın içerdiği mikro kırıkların genişlemesine ve yeni kırıkların oluşmasına, dolayısıyla kayacın içerisindeki kırık yoğunluğundaki artışın gözeneklilikte de artışa neden olduğu düşünülmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte kayacın gözenekliliğinin de artmasıyla ilgili 573°C'de gözlenen α - β kuvars geçişi nedeniyle minerallerdeki farklı ısı iletkenliklerin gözenek artışına neden olması son zamanlarda bazı araştırmacılar (Géraud vd., [60]; Takarli ve Agbodjan [24]'den) tarafından tartışılmaktadır. Ancak bu tez çalışmasında yapılan

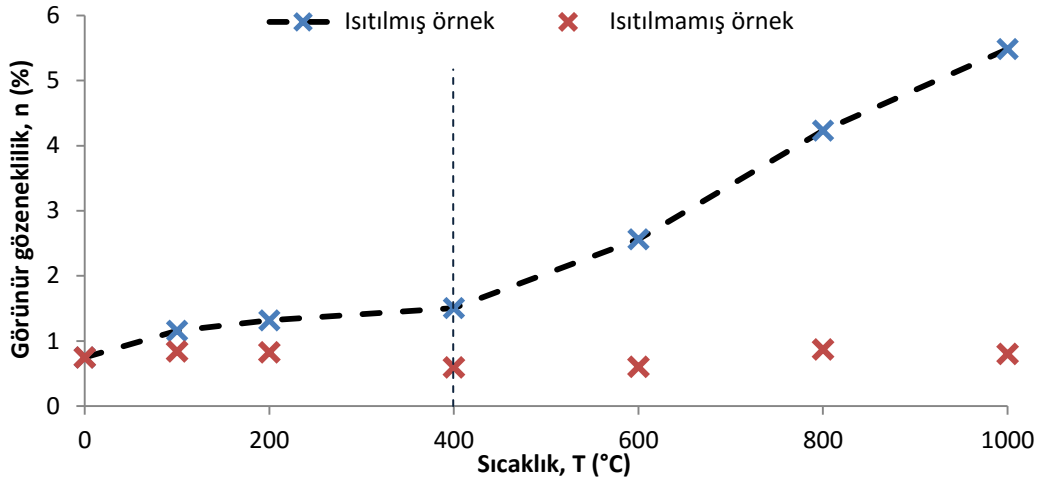
mineralojik analizlerde α - β kuvars geçişine ilişkin bir bulgu bulunamadığı için böyle bir varsayım üzerinde durulmamıştır.



Şekil 4.6. Granit örneklerinin birim hacim ağırlığının sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin birim hacim ağırlıklarıyla karşılaştırılması.



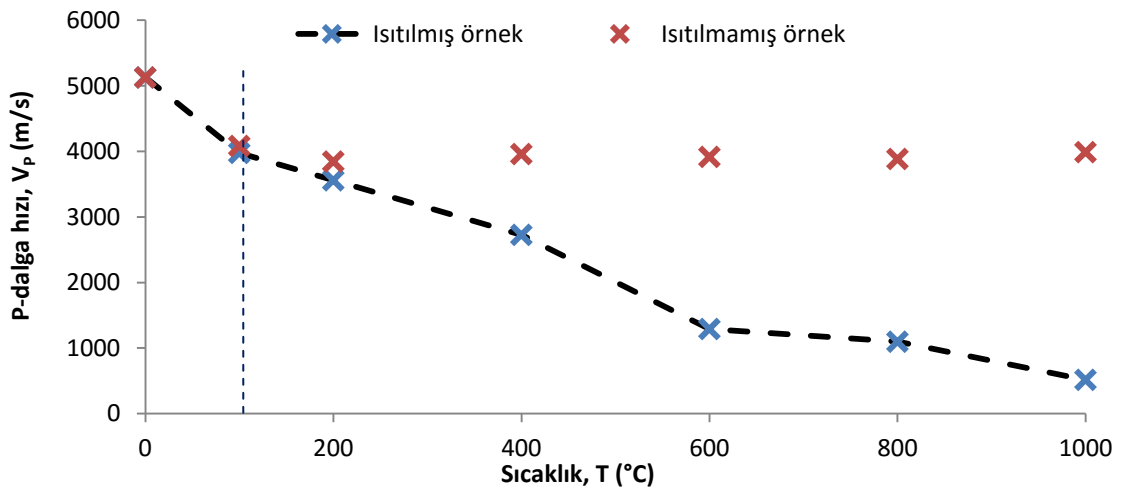
Şekil 4.7. Granit örneklerinin ısıtılmamış ve ısıtılmış örneklerinin (a) hacim ve (b) ağırlıklarının karşılaştırılması.



Şekil 4.8. Granit örneklerinin görünür gözenekliliğinin sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin görünür gözeneklilikleriyle karşılaştırılması.

c) P-dalga hızı

Granit örneklerinin sıcaklığa maruz bırakılmadan önce tayin edilen P-dalga hızları 3845-5128 m/s aralığında çıkmıştır. Şekil 4.9'da P-dalga hızının sıcaklıktaki artışla birlikte azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın en net olarak başladığı sıcaklık olan 100°C söz konusu özellik için eşik değer olarak düşünülebilir. Kayacın içerisindeki suyun buharlaşması, artan kırık sayısı ve kırık yoğunluğu gözenekliliği artırır. P-dalga hızı gaz ortamlarda, katı ve sıvı ortamlara göre daha yavaş ilerler bu nedenle P-dalgası ilerlerken boşluklar önünde bir engel gibi davranır bu nedenle de gözeneklilikteki artış P-dalga hızının azalmasına neden olur. Benzer amaçlı çalışmalar yapmış diğer bazı araştırmacılar (örn. [24], [27], [61]), sıcaklık artışından etkilenerek P-dalga hızının azalmasının temel nedeni olarak gözeneklilikteki artışı işaret etmektedirler.

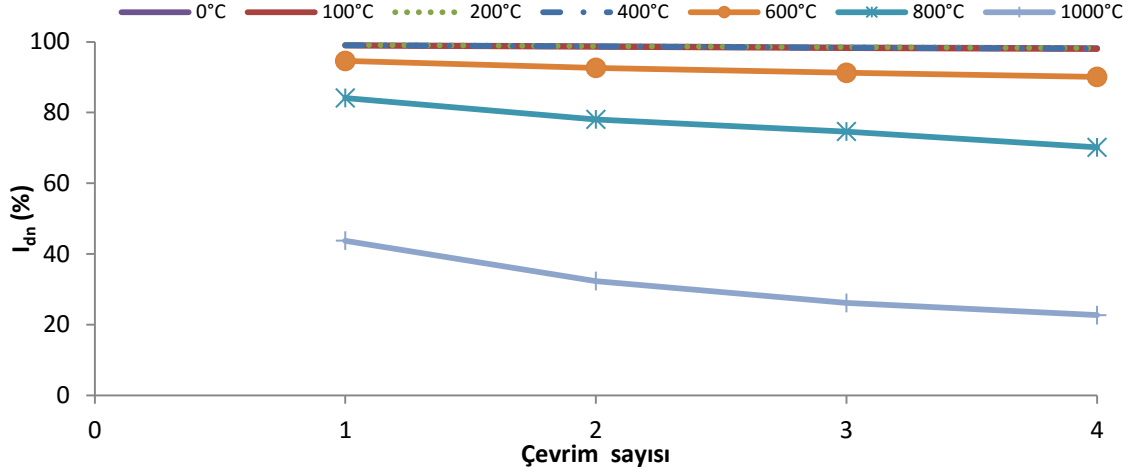


Şekil 4.9. Granit örneklerinin P-dalga hızlarının sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin P-dalga hızlarıyla karşılaştırılması.

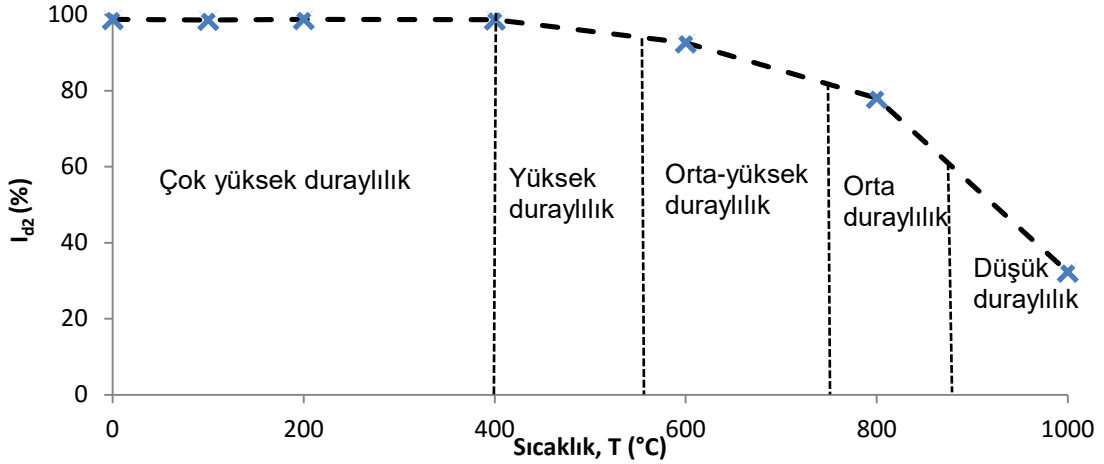
d) Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi

Gökçeoğlu vd. [62]; suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi tayin edilirken kayacın mineral boyutunun çevrim sayısından etkilendiğini, kil tane boyutundaki malzeme yüzdesinin egemen olması durumunda ISRM [43]'nin önerdiği gibi 2 çevrim yapılarak tayin edilen suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinin (I_{d2}) tam olarak gerçeği yansıtmayacağını belirtmişlerdir. Bu nedenle incelenen kayalarda, Gökçeoğlu vd. [62] tarafından önerildiği gibi, bu deneyde dört çevrim uygulanarak sıcaklık artışıyla birlikte çevrim sayısının suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (I_d) üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Ancak deney sonuçları, incelenen granitin I_d 'sinin, çevrim sayısından etkilenmediğini göstermiştir (Şekil 4.10). Farklı 7 sıcaklığa ait örneklerin suda dağılmaya karşı duraylılık indekslerinin çevrim sayısına bağlı değişimi Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bununla birlikte, 0, 100, 200 ve 400°C sıcaklıklara ait verilerin aynı olması nedeniyle bu sıcaklıklara ait veriler çakıştığı için, Şekil 4.10'da ayrı ayrı gösterilememiştir. Çünkü I_d değeri, çevrim sayısının iki ya da dört olmasından etkilenmemiş ve neredeyse sabit kalmıştır. Bu nedenle I_d değerleri, ISRM [43]'de de önerildiği gibi, 2 çevrim esas alınarak tayin edilmiştir.

Şekil 4.11'e göre, suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi sınıflamasına ([63]; [64]'den) göre, incelenen granit örneği; 400°C sıcaklığa kadar çok yüksek, yaklaşık 400-550°C arasında yüksek, 550-700°C aralığında orta derecede yüksek, 700-880°C aralığında orta ve 880°C'den daha yüksek sıcaklıklarda ise düşük duraylılık sınıflamasında yer almaktadır. Dolayısıyla granitte 400°C'den itibaren suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinin azalmaya başladığı ve 600°C'den itibaren daha yüksek sıcaklıklarda ciddi derecede azalarak kayanın suda dağılmaya karşı duraylılık özelliği açısından artan sıcaklığın oldukça etkili olduğu söylenebilir. Bu azalma; tezin ilerleyen bölümlerinde değinilecek olan granitin artan sıcaklıkla birlikte azalan tek eksenli sıkışma dayanımına paralellik göstermekte olup, sıcaklık arttıkça granit daha kolay parçalanıp dağılabilmektedir. Granit üzerinde daha önce yapılmış benzer çalışmalarda suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi incelenmediği için bu çalışmanın sonuçlarının başka çalışmalarla karşılaştırılması söz konusu olamamıştır.



Şekil 4.10. Granit örnekleri için suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinin çevrim sayısına bağlı değişimi.



Şekil 4.11. Granit örnekleri için I_{d2} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.

4.2.2. Mermer Örneklerinin Fiziksel ve İndeks Özelliklerinin Değişimi

Tez çalışmasına başlanırken incelenecek her iki kaya türü için de örneklerin 1000°C sıcaklığa kadar ısıtılması öngörülmüştü. Ancak ısıtma işlemi sırasında mermer örneği, 800°C'ye kadar ısıtıldığında karot şeklini kısmen koruyarak dağılmıştır (Şekil 4.12a). Mermer örneğinin 800°C'de dağılmasının ardından 1000°C'ye kadar ısıtılması planlanan M7 no.lu örnek 700°C'ye kadar ısıtılmış, ancak bu sıcaklıkta da örnek Şekil 4.12b'de görüldüğü gibi dağılmıştır. Stanmore ve Gilot [65]'un karbonatlı kayalarda kalsinasyon süreciyle ilgili eleştirel derleme türündeki ayrıntılı makalelerinde, kalsitin kayadaki saflığına göre kalsinasyona maruz kalması ile ilgili sıcaklığın 600 ile 950°C arasında değiştiği belirtilmektedir. Kalsinasyonda kalsitin mineral suyu kaybolmakta ve mineral kararlılığını yitirerek

şeker yapısı olarak da adlandırılan bir şekilde dağılabilmektedir. Bu nedenle tez çalışmasında kullanılan ve 700 ile 800°C'ye kadar ısıtılan örneklerin bu şekilde dağılmış olması (Şekil 4.12), bu çalışmada kullanılan mermerin kalsinasyona uğradığının bir göstergesidir. Dolayısıyla bu çalışmada mermer örneklerine uygulanabilecek en yüksek sıcaklığın 600°C olduğu sonucuna varılmıştır.

a) Birim Hacim Ağırlık

Mermer örneklerin ısıtılmadan doğal örnekler üzerinde tayin edilen birim hacim ağırlıkları 26,37-26,47 kN/m³ aralığında çıkmıştır. 100°C'ye kadar ısıtılan örnekte birim hacim ağırlıkta değişim gözlenmezken, daha yüksek sıcaklıklardan itibaren sıcaklık artışına karşı sürekli azalan bir eğilim gösteren birim hacim ağırlık değerleri söz konusudur (Şekil 4.13). Bu nedenle mermer için birim hacim ağırlık açısından 100°C'nin eşik sıcaklık olarak değerlendirilebileceği yorumu yapılmıştır. Isıtılmamış örnek dışında birim hacim ağırlık deneylerinde kullanılan diğer 4 örneğin ısıtılmadan önceki hacimleri ve ağırlıkları Şekil 4.14'de karşılaştırılmıştır. Buna göre mermer örneklerinin ağırlıkları hemen hemen değişmezken, 600°C'de çok az azalmaktadır. Hacim ise, 200°C'de sıcaklıktan itibaren daha yüksek sıcaklıklarda artmaktadır. Bu da, birim hacim ağırlığın sıcaklıkla azaldığına işaret etmekte, dolayısıyla Şekil 4.13'de verilen eğilimi desteklemektedir.

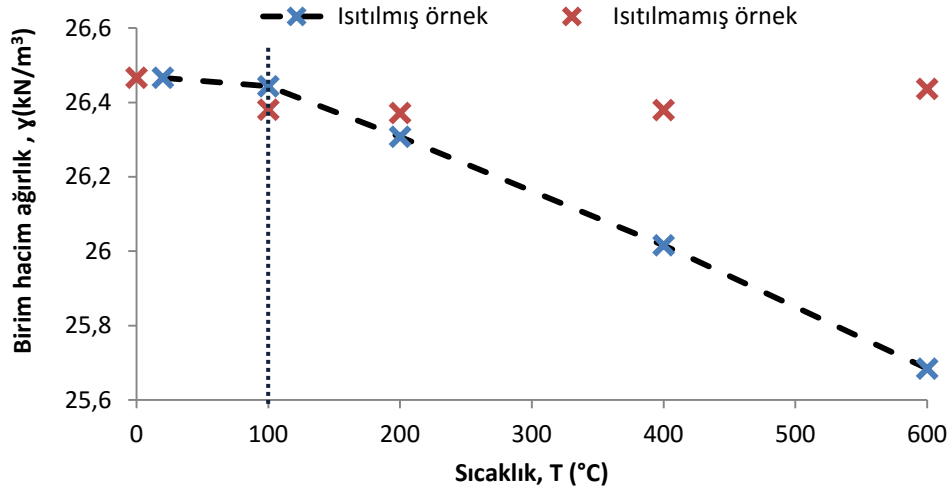
(a)



(b)

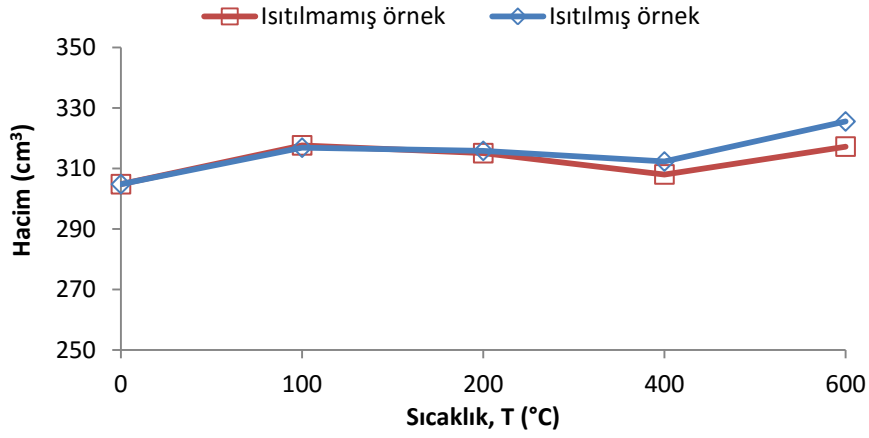


Şekil 4.12.(a) 800° C'de ısıtılınca dağılan M6 no.lu örnek, (b) 700°C'de ısıtılınca dağılan M7 no.lu örnek (şeker yapısı).

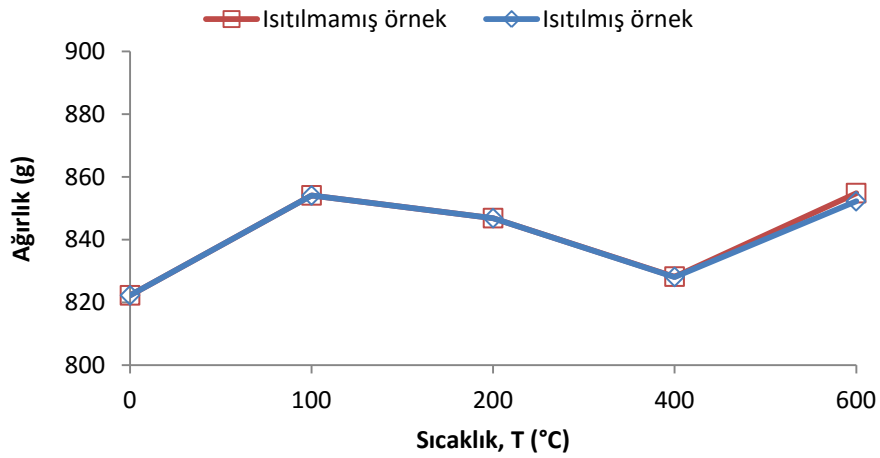


Şekil 4.13. Mermer örneklerinin birim hacim ağırlığının sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin birim hacim ağırlıklarıyla karşılaştırılması.

(a)



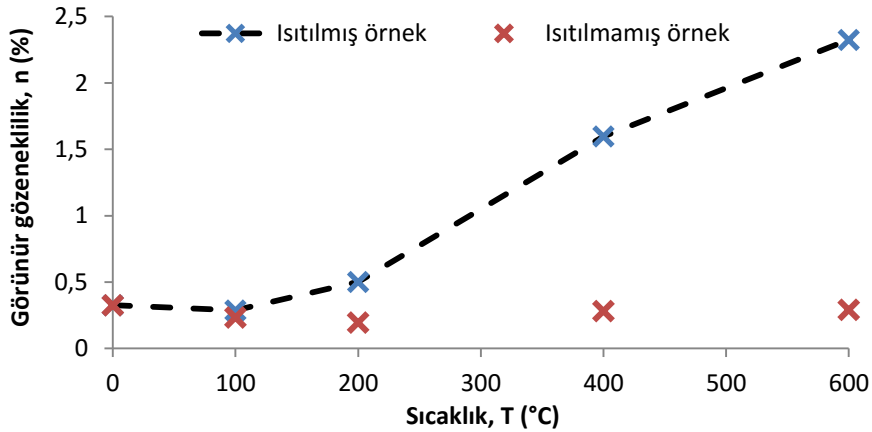
(b)



Şekil 4.14. Mermer örneklerinin ısıtılmamış ve ısıtılmış örneklerinin (a) hacim ve (b) ağırlıklarının karşılaştırılması.

b) Görünür gözeneklilik

Görünür gözenekliliğin 100°C'den itibaren sıcaklık artışıyla birlikte arttığı görülmektedir (Şekil 4.15). Bu nedenle söz konusu sıcaklığın, kayacın gözenekliliği açısından eşik bir değer olduğunu söylemek mümkündür. Kayaçlarda yangın ile ilişkili ısıl etkiler hakkında Gomez-Heras vd. ([66]; [17]'den)'nin yaptığı çalışmaların tümünde gözeneklilikte artış olduğunu belirtilmektedir. Bu tez çalışmasında da gözeneklilikle ilgili elde edilen sonuçlar, benzer amaçla yapılmış çalışmaların sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Ayrıca sıcaklık arttıkça minerallerin parçalanmasına bağlı olarak, mineraller arası boşlukların artması, kayacın içerdiği mikro kırıkların genişlemesine ve yeni kırıkların oluşmasına, dolayısıyla kayaçtaki kırık yoğunluğunun artışı gözenekliliğin de artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.15. Mermer örneklerinin görünür gözenekliliğinin sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin görünür gözeneklilikleriyle karşılaştırılması.

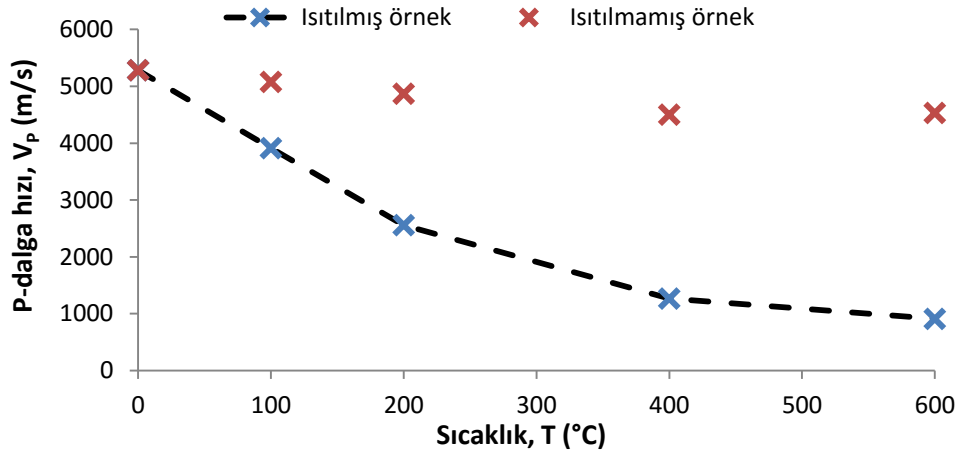
c) P-dalga hızı

P-dalga hızının sıcaklık artışıyla birlikte azaldığı Şekil 4.16'da görülmektedir. Çünkü P-dalga hızı kaya örneğindeki süreksizliklere karşı oldukça hassas olup, sıcaklığa maruz kalan örneklerde gelişen ve sıcaklık artışıyla giderek arttığı düşünülen mikro-kırıklar P-dalga hızında azalmaya neden olmaktadır.

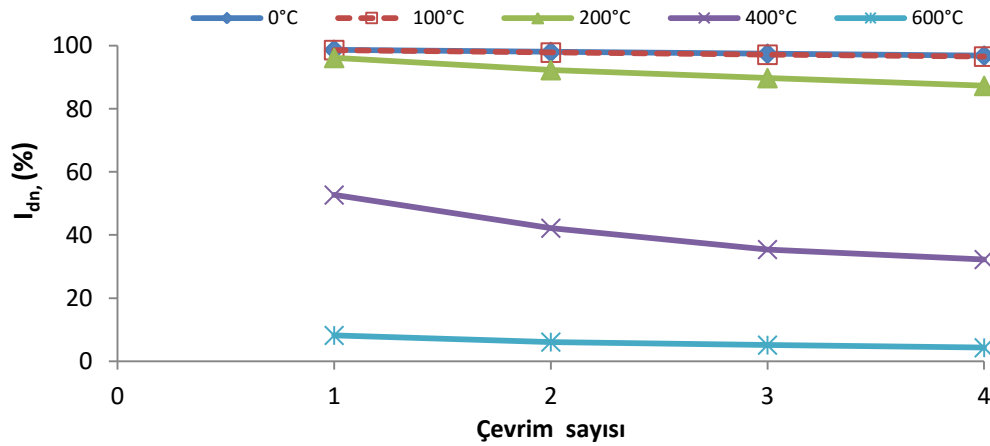
d) Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi

Granit için sunulmuş olan gerekçeler nedeniyle mermerin suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinde de çevrim sayısına göre önemli bir farklılık gözlenmediği için (Şekil 4.17), ISRM [43] tarafından önerildiği gibi, 2 çevrim esas alınarak mermerin I_{d2} değerleri tayin edilmiştir (Şekil 4.18). Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi sınıflamasına göre ([63]; [64]'den) incelenen mermer; yaklaşık 150°C sıcaklığa

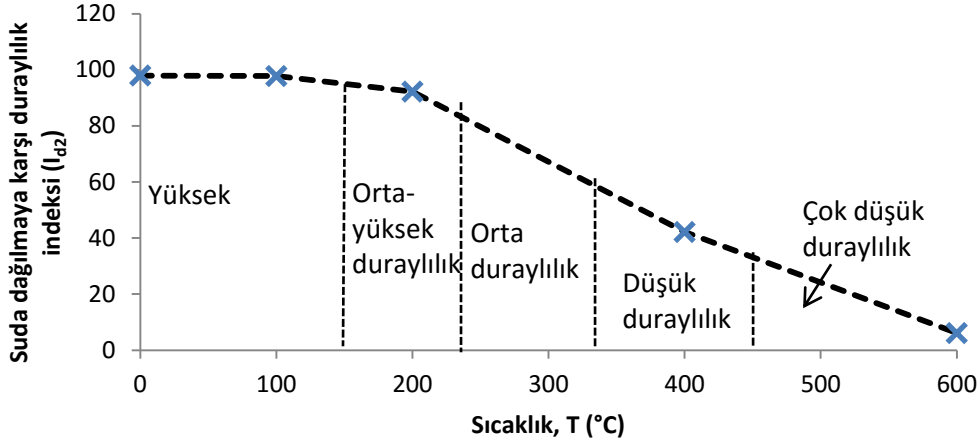
kadar yüksek, 150-230°C arasında orta derecede yüksek, 230-340°C arasında orta, 340-450°C aralığında düşük ve 450°C'den yüksek sıcaklıklarda çok düşük duraylılık sınıflarında yer almaktadır. Dolayısıyla suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi 200°C'den itibaren sıcaklıktaki artıştan belirgin düzeyde azalma göstererek etkilenmiştir. Yüksek sıcaklıktan etkilenen mermerin suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi, artan sıcaklıkla birlikte azalan tek eksenli sıkışma dayanımıyla paralellik göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, mermer örnekleri sıcaklığa maruz kaldıkça daha kolay kırılıp dağılmaktadırlar. Mermerlerle ilgili daha önceki benzeri çalışmalarda suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi konusu incelenmediği için bu çalışmanın sonuçlarıyla herhangi önceki bir çalışmanın sonuçları arasında karşılaştırma yapılamamıştır.



Şekil 4.16. Mermer örneklerinin P-dalga hızlarının sıcaklıkla değişimi ve ısıtılmamış örneklerin P-dalga hızlarıyla karşılaştırılması.



Şekil 4.17. Mermer örnekleri için suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinin çevrim sayısına bağlı değişimi.



Şekil 4.18. Mermer örnekleri için I_{d2} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.

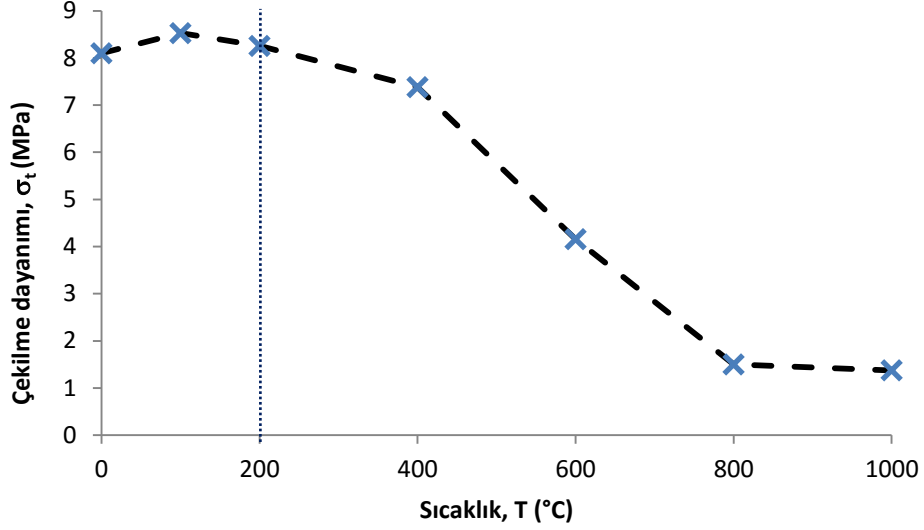
4.3. İncelenen Kaya Türlerinin Mekanik Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi

Tez çalışmasında incelenen iki farklı kaya türü için; doğal ve farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış örneklerin mekanik özellikler olarak; Brazilian çekilme dayanımı (σ_t), tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c) ve elastisite modülü (E) tayin edilmiştir. Mekanik özelliklere ilişkin deneyler sırasında örnekler ısı hasara maruz kaldıkları için, sıcaklıkla değişim konusu farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış örneklerden elde edilen sonuçlar ısıtılmamış doğal örnek üzerinde yapılan deneyin sonucuyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasında mekanik özelliklerle ilgili tüm deney sonuçları EK-2b'de verilmiştir.

4.3.1. Granit Örneklerinin Mekanik Özelliklerinin Değişimi

a) Brazilian Çekilme Dayanımı

200°C sıcaklığa kadar ısıtılan örneklerde kayda değer bir değişim gözlenmezken, 200°C sıcaklıktan itibaren sıcaklık artışıyla çekilme dayanımının belirgin şekilde azaldığı görülmektedir (Şekil 4.19). Bu nedenle çekilme dayanımı açısından 200°C eşik sıcaklık değeri olarak düşünülmüştür. Benzer amaçla yapılan önceki çalışmaların sonuçları ile bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar arasında benzerlikler olup, sıcaklık artışıyla granitin çekilme dayanımının azalması söz konusudur. Bu azalma, Homand-Etienne ve Houpert [20] tarafından sıcaklık artışından kaynaklanan mikro-kırık yoğunluğunun artmasıyla ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4.19. Granit örneklerinin çekilme dayanımının sıcaklıkla değişimi.

b) Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı

Doğal örnek ve farklı sıcaklıklarda ısıtılmış granit örnekleri için, tek eksenli yükleme koşulunda “gerilme-birim deformasyon” eğrileri çizilerek tek eksenli sıkışma dayanımları tayin edilmiş ve örneklerin yenilme davranışları gözlemlenmiştir. Ancak çalışmanın gerçekleştirildiği ilgili laboratuvarında örneğin yenilme sonrası davranışının da kaydedilebileceği bir cihaz bulunmadığı için “gerilme-birim deformasyon” kayıtları yenilme (kırılma) anına kadar alınabilmiştir.

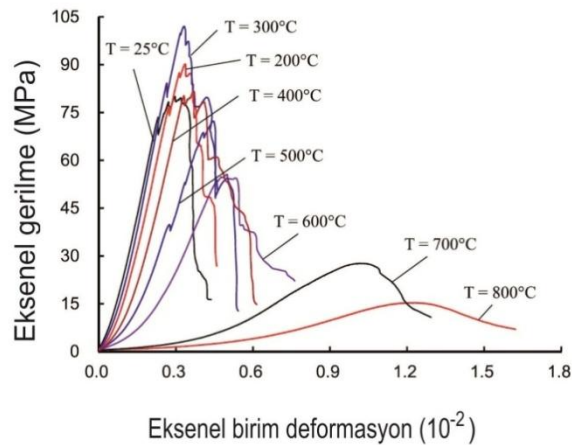
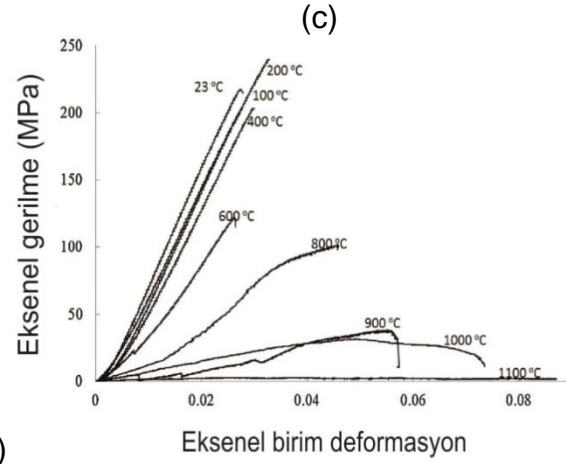
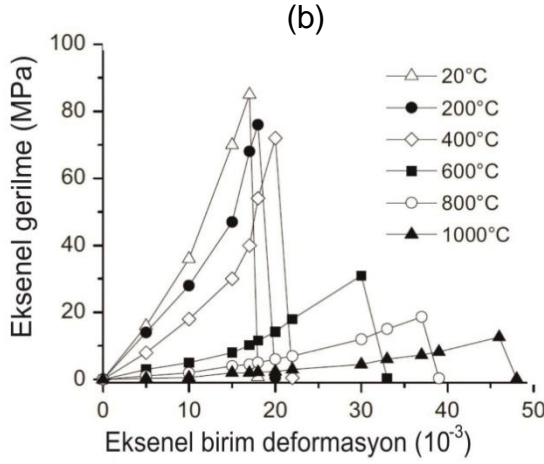
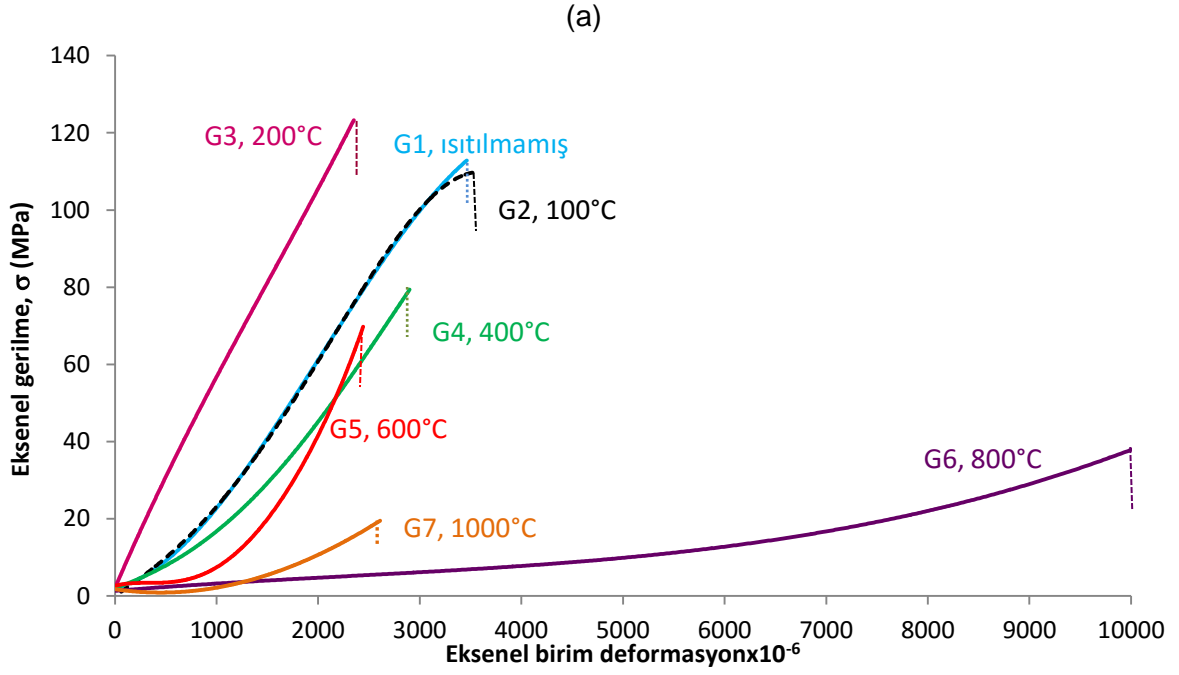
Şekil 4.20a'ya göre, granitin tek eksenli sıkışma dayanımı ve deformasyona bağlı davranışı sıcaklıktan oldukça fazla etkilenmekte ve gerilme-birim deformasyon eğrilerinden 2 farklı davranış gözlenmektedir. 200°C sıcaklığa kadar örnekler yenilirken kırılğan davranış sergilerlerken, 200-600°C arasında ise kırılğan-sünümlü davranış göstermektedirler. Buna karşın, 600-1000°C arasında sünümlü davranış görülmektedir. Genel olarak sıcaklık arttıkça kayacın daha düşük gerilmelerde daha fazla deformasyona uğradığını söylemek mümkündür. Isıl hasarın gerilme-birim deformasyon eğrileri üzerinde önemli etkisinin gözlenmesinin yanı sıra, bu eğrilerin ilk deformasyon aşamasındaki doğrusallıktan sapma düzeyinin sıcaklık artışıyla birlikte arttığı da belirgindir. Ayrıca bu çalışmada elde edilen gerilme-birim deformasyon davranışı, daha önce benzer amaçlarla mermerler üzerinde yapılmış çalışmaların (örn. [2], [5], [10], [28], [29]) sonuçlarıyla uyumludur (Şekil 4.20b-d).

200°C sıcaklığa kadar örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımları çok fazla değişmemekle birlikte, sadece 200°C'de örneğin tek eksenli sıkışma dayanımı bir miktar artmıştır (Şekil 4.21). Ayrıca bazı araştırmacıların [27], [29] öngördükleri gibi, ısıtılan her örnekte süreksizliklerin homojen olmayışından, o örnekte görece daha az veya küçük süreksizliklerin varlığının tek eksenli sıkışma dayanımının artmasında etkili olabileceği dikkate alınmalıdır. 200°C'den itibaren sıcaklıktaki artışla birlikte tek eksenli sıkışma dayanımı sürekli azalma eğilimi göstermektedir. Bu nedenle söz konusu özellik için 200°C'nin eşik değer olabileceği söylenebilir. Söz konusu bu azalmanın; sıcaklığın artmasıyla birlikte kayacı oluşturan minerallerin kırılmasıyla kayacın gözenekliliğin artması ve bünyesindeki suyun tamamen buharlaşarak kayacın gerilme altında daha kırılğan ve sıcaklığa karşı daha duyarlı hale gelmesi nedenleriyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla kayacın tek eksenli dayanımındaki azalmayı bazı çalışmacılar (örn. Tullis ve Yund ([67]; [11]' den); [2], [10]) mineral fazlarında meydana gelen değişimlerle ilişkilendirmişlerdir.

c) *Elastisite Modülü*

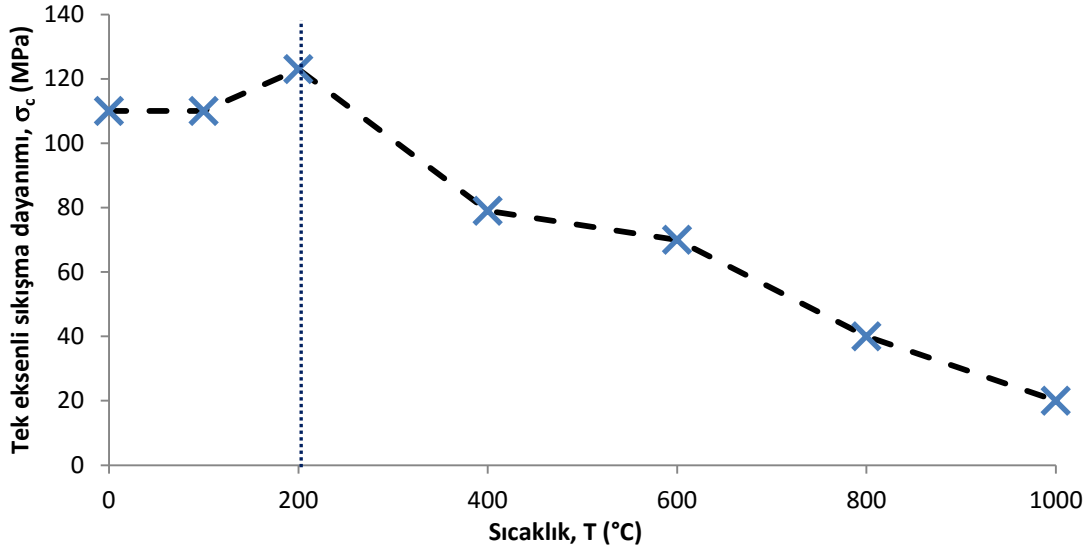
Doğal ve farklı sıcaklıklarda ısıtılmış granit örnekleri için tek eksenli yükleme koşulunda "gerilim-birim deformasyon" eğrileri çizilerek elastisite modülü değerleri belirlenmiştir. Tanjant, ortalama ve kiriş modülleri genel anlamda birbirleriyle benzer ve önce artan sonra belirli bir sıcaklıktan itibaren azalan bir eğilim göstermektedirler (Şekil 4.22). Şekil 4.22'ye göre; tanjant ve ortalama modülleri birbirlerine oldukça benzer bir eğilime sahip olup, 600°C ve daha düşük sıcaklıklarda çok fazla değişmezlerken, bu sıcaklığın üzerinde ani bir azalma göstermektedirler. Ancak kiriş modülü diğer modüllerden biraz farklı bir eğilim sergilemektedir. Şekil 4.22c'den 200°C'de ani bir sıçrama sergileyen bu modül daha yüksek sıcaklıklarda diğerleri gibi sürekli olarak azalma eğilimi göstermektedir. Söz konusu sıcaklık değerlerindeki sıçrama, aynı örneğin tek eksenli sıkışma dayanımının da aynı sıcaklıkta daha yüksek ve eksenel gerilme-birim deformasyon eğrisinin diğer sıcaklıklara göre daha dik bir eğime sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Elastisite modülü türleri hesaplanırken, eksenel gerilme-birim deformasyon grafiklerinin çiziminde farklı doğru eğimleri kullanıldığı için, kiriş modülünde olduğu gibi, diğer modül türlerinde söz konusu sıcaklıkta bir sıçrama görülmemiştir. Ancak



Şekil 4.20.(a) Granit örnekleri için eksenel gerilme-birimdeformasyon eğrilerinin sıcaklıkla değişimi ve diğer bazı araştırmacıların (b) Chen vd. [5], (c) Shao vd. [10], (d) Yang vd. [28] ısıtılmış granit örneklerinde elde ettikleri sonuçlar.

600°C'de örneğin tanjant ve ortalama modülünde daha düşük sıcaklıklara göre söz konusu değerlerde bir miktar artış görülmektedir. Bu konuda yapılmış benzer çalışmaların ([5], [27], [29]) sonuçları ve elastisite modülündeki artış miktarı göz önünde bulundurulduğunda, bu artışın anlamlı olmadığı ve muhtemelen deneysel bir hatadan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda kayacın davranışının kırılığandan sünümlüye geçmesiyle birlikte (bknz. Şekil 4.20a) aksenal gerilme-birim deformasyon eğrilerinin azalan eğimleri elastisite modülünün de azalmasına neden olmuştur.



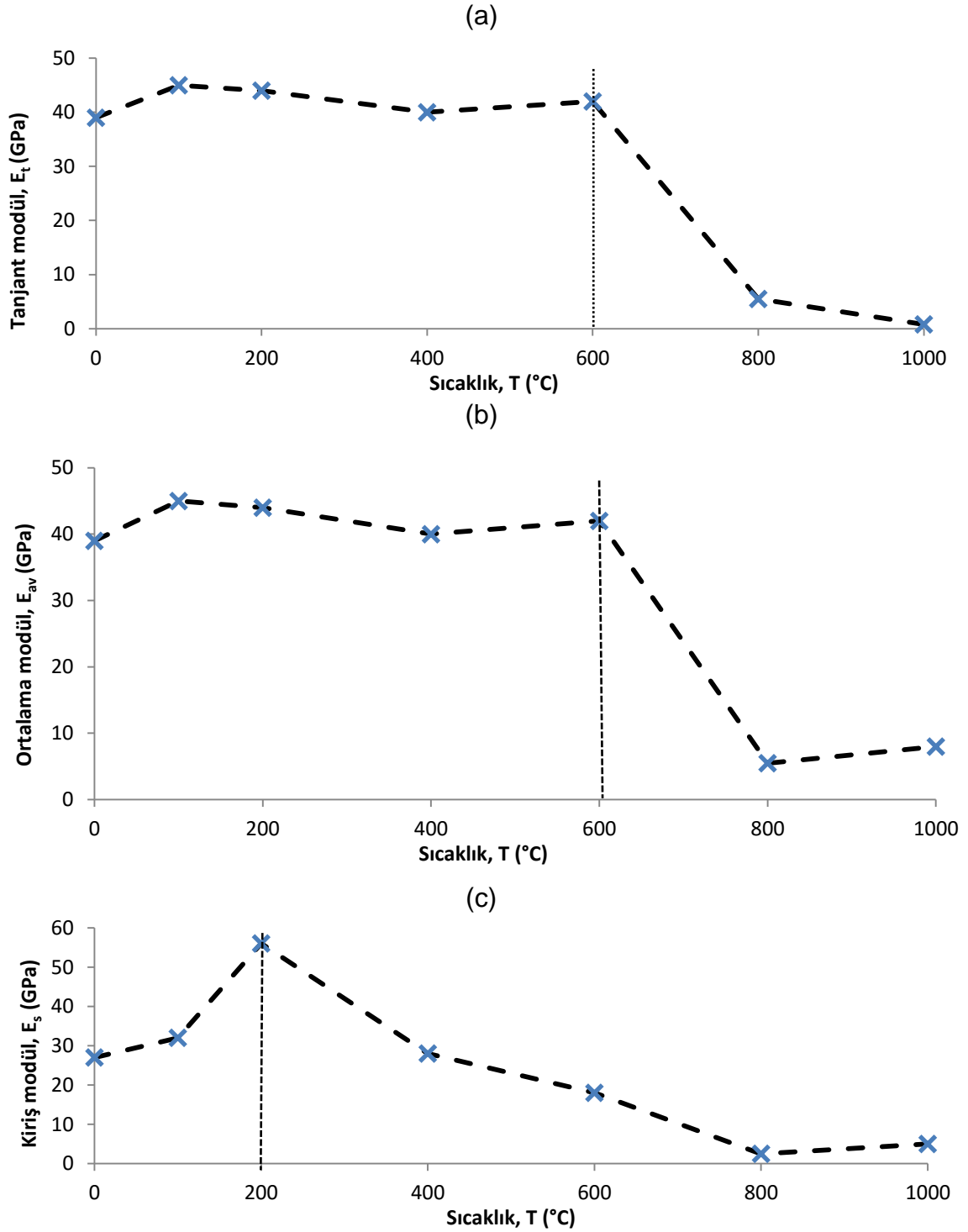
Şekil 4.21. Granit örneklerinin tek aksenal sıkışma dayanımının sıcaklıkla değişimi.

4.3.2. Mermer Örneklerinin Mekanik Özelliklerinin Değişimi

a) Brazilian Çekilme Dayanımı

Brazilian deney yöntemi kullanılarak mermerin çekilme dayanımının tayini amacıyla ısıtılan örneklerde 100°C sıcaklığa kadar ısıtılan örneğin doğal örneğe kıyasla çekilme dayanımında bir miktar artış gözlenirken, 100°C'den daha yüksek sıcaklıklara maruz kalmış örneklerin çekilme dayanımında belirgin ve sürekli bir azalış söz konusudur (Şekil 4.23). Bu nedenle mermer için söz konusu özellik açısından eşik sıcaklığın 100°C olduğu düşünülebilir. Her ne kadar örnekler homojen kabul edilmiş olsa da, içerdikleri mikro-kırık ve çatlaklar her yerde aynı yönelim ve yoğunlukta olmadıkları için mermer örnekleri üzerinde yapılan deneylerin sonuçları birbirinden farklı olmaktadır. Bu nedenle, 100°C'de belirlenen çekilme dayanımının yüksek olmasının muhtemelen deneysel bir hatayla ilgili olabileceği düşünülmektedir. Belirlenen kritik sıcaklıktan itibaren çekilme

dayanımının azalışı ise, mermerin fiziksel ve indeks özelliklerinin sıcaklıkla değişimi bölümünde nedenlerinin sunulmuş olduğu sıcaklık artışıyla değişen fiziksel özelliklerinin etkisiyle ilişkilendirilmektedir.

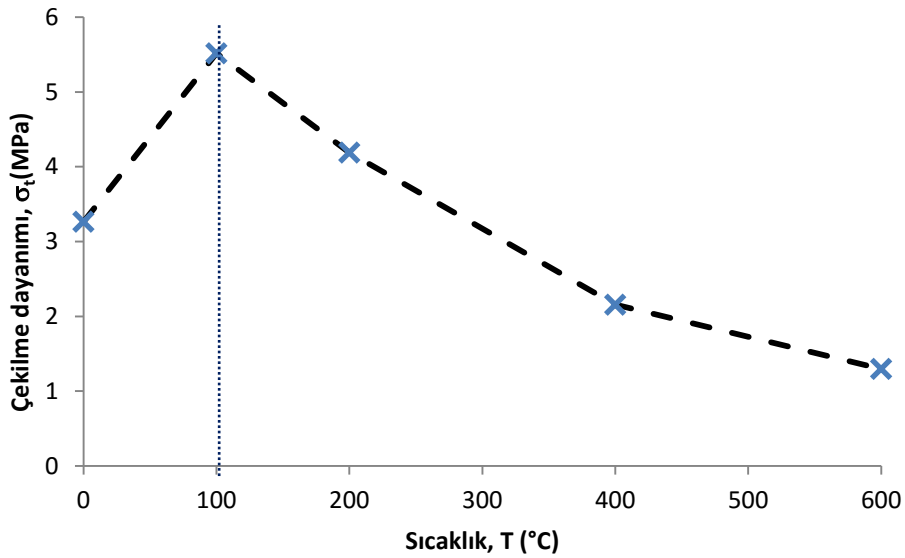


Şekil 4.22. Granit örneklerinin (a) tanjant (teğet) (E_t), (b) ortalama (E_{av}) ve (c) kiriş (sekant) (E_s) modüllerinin sıcaklıkla değişimi.

b) Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı

Doğal mermer örneği ve farklı sıcaklıklarda ısıtılmış mermer örnekleri için, tek eksenli yükleme koşulunda “gerilme-birim deformasyon” eğrileri çizilerek tek eksenli sıkışma dayanımları tayin edilmiş ve örneklerin yenilme davranışları değerlendirilmiştir. Ancak çalışmanın gerçekleştirildiği ilgili laboratuvarında örneğin yenilme sonrası davranışının da gözlenebileceği özellikte alet olmadığı için örnekler yenilme anına kadar incelenebilmiştir.

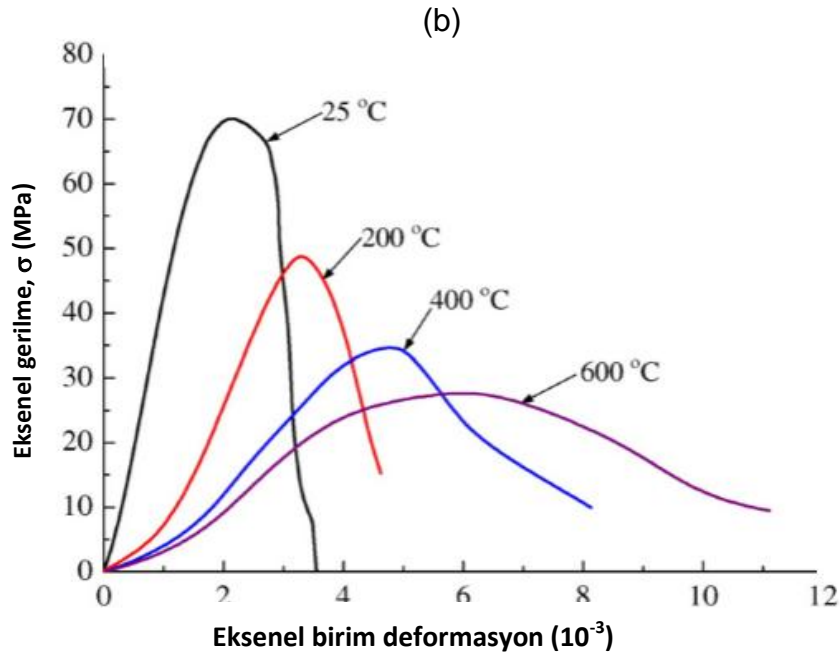
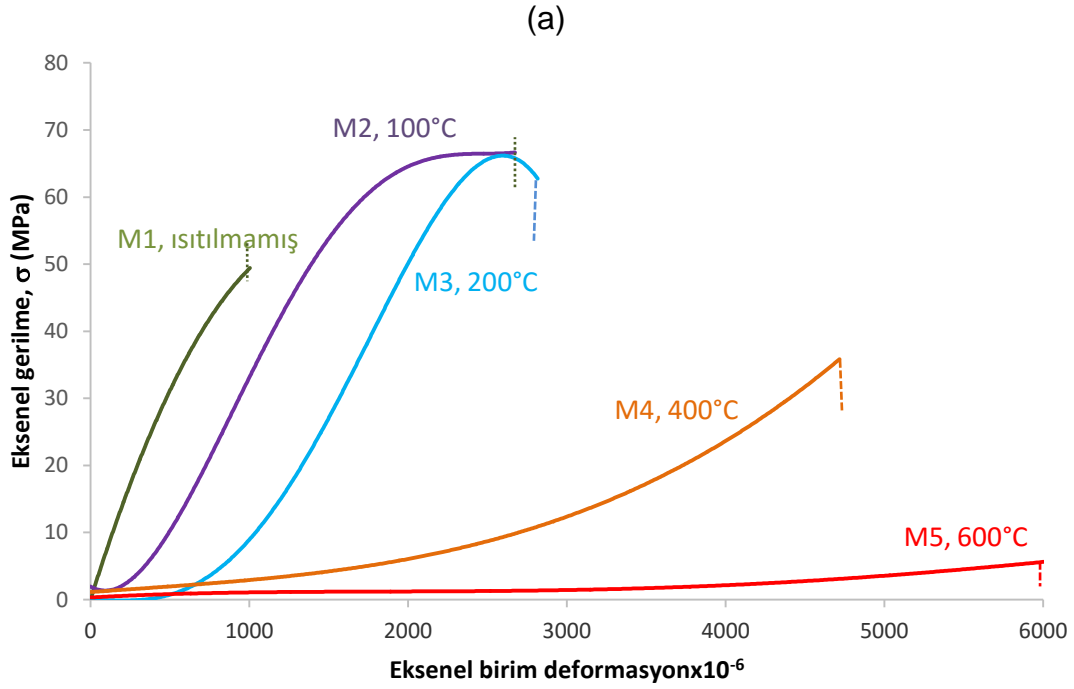
Şekil 4.24a'ya göre, mermerin tek eksenli sıkışma dayanımı ve deformasyona bağlı davranışı sıcaklıktan oldukça fazla etkilenmekte ve gerilme-birim deformasyon eğrilerine göre 2 farklı davranış gözlenmektedir. Doğal örnek yenilirken kırılğan davranış göstermiştir. 100 ve 200°C sıcaklığa maruz kalan örnekler ise; yenilme sırasında kırılğan-sünümlü davranış gösterirlerken, 400 ve 600°C sıcaklığa kadar ısıtılan örnekler sünümlü davranmışlardır. Genel olarak sıcaklık artışıyla örnekler daha düşük gerilmeler altında daha fazla deforme olmuşlardır. Bu tez çalışmasında aksenel gerilme-birim deformasyon eğrilerinden görülen kaya davranışları, genel itibariyle, benzer çalışmalar yapmış olan (örn. Peng vd. [34]) sonuçlarıyla genel bir uyum göstermektedir (Şekil 4.24b).



Şekil 4.23. Mermer örneklerinin çekilme dayanımının sıcaklıkla değişimi.

Şekil 4.25'deki grafikten görüldüğü gibi, 200°C'ye kadar ısıtılan örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımında, doğal örneğinkine göre bir miktar artış, 200°C'den itibaren ise tek eksenli sıkışma dayanımında belirgin ve sürekli bir azalma eğilimi görülmektedir. Sıcaklığın 200°C'yi aşmasıyla kayada yeni kırıkların oluşması ve

mevcut kırıkların genişlemesi ve tek eksenli sıkışma dayanımının azalması söz konusu olmaktadır. Bu mermer örneklerinde azalmanın başladığı sıcaklık olan 200°C eşik sıcaklık olarak yorumlanabilir.

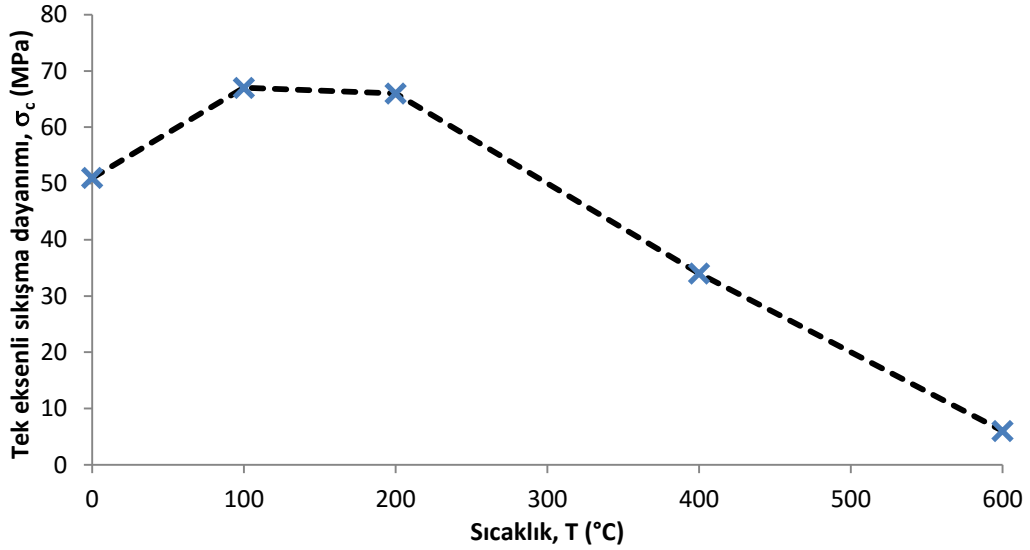


Şekil 4.24. Mermer örneklerinin eksenel gerilme-birim deformasyon eğrilerinin (a) bu çalışma ve (b) Peng vd. [34]'nin sıcaklıkla değişimi.

c) Elastisite Modülü

Doğal ve farklı sıcaklıklarda ısıtılmış mermer örnekleri için, tek eksenli yükleme koşulunda “gerilme-birim deformasyon” eğrileri çizilerek elastisite modülü tayin edilmiştir. Tanjant, ortalama ve kiriş modüllerinin sıcaklığa bağlı değişimi genel

anlamda, birbirine benzeyen ve sürekli azalan bir eğilim göstermektedir. Şekil 4.26'ya göre elastisite modülündeki azalma eğilimi 200°C ve üzerindeki sıcaklıklarda, düşük sıcaklıklara göre daha da artmıştır. Bu nedenle elastisite modülü açısından eşik sıcaklığın 200°C olduğu söylenebilir. Belirlenen bu eşik sıcaklık, tek eksenli sıkışma dayanımı ve örnekler yenilirken sünümlü davranışa geçtikleri eşik sıcaklık değerleri ile aynıdır. Sıcaklık artışıyla mermerin değişen fiziksel özellikleri, aynı zamanda mekanik özelliklerinin değişmesine ve dolayısıyla kayacın eksenel gerilme-birim deformasyon eğrisinin de değişmesine yol açmaktadır. Mermer örneklerinin maruz kaldığı sıcaklıklar arttıkça görece daha düşük gerilmeler altında daha fazla deformasyona uğradıkları için de elastisite modülleri azalmıştır.



Şekil 4.25. Mermer örneklerinin tek eksenli dayanımının sıcaklıkla değişimi.

4.4. İncelenen Kaya Türlerinin Diğer Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi

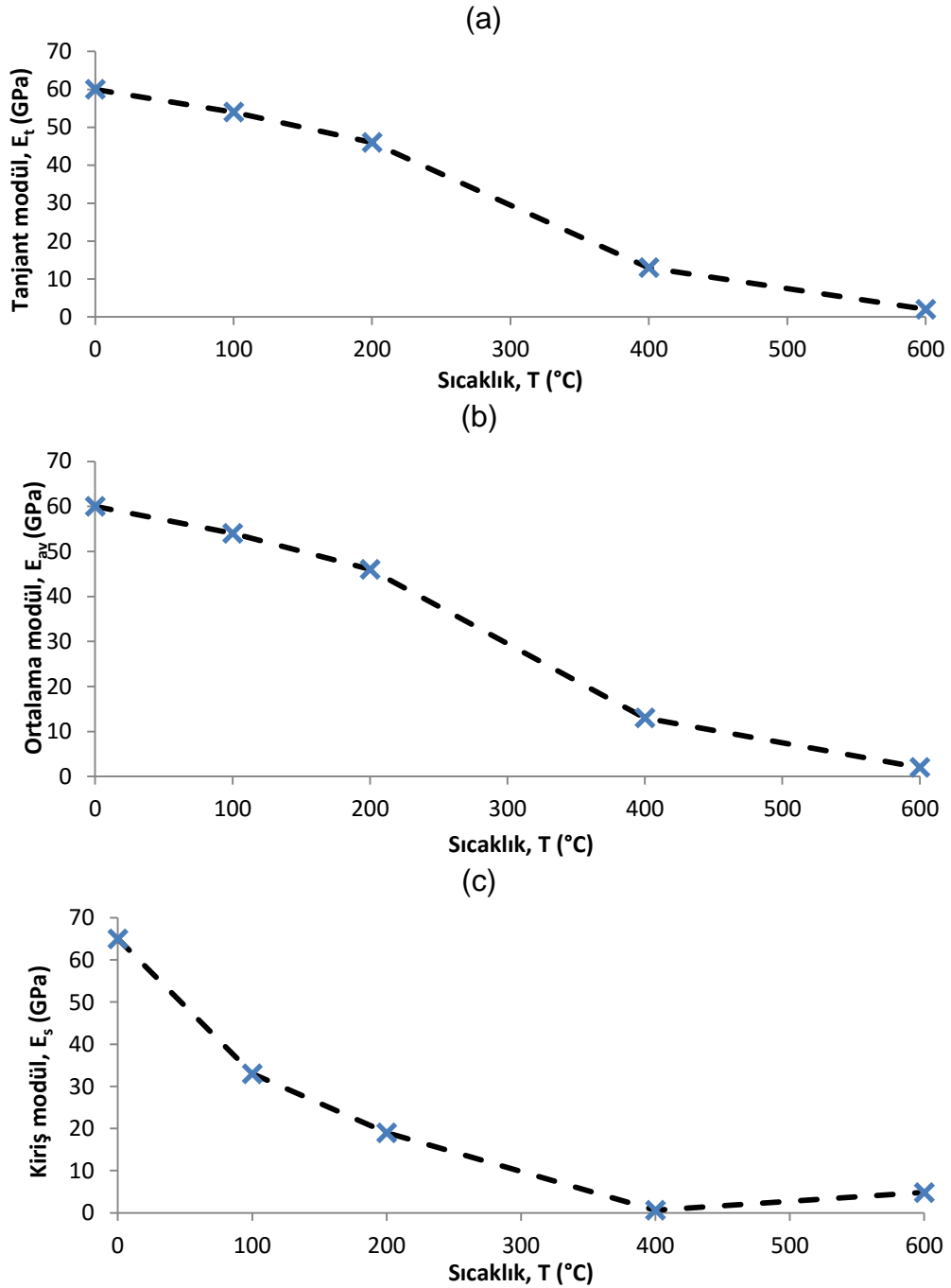
4.4.1. Renk değişimi

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan granit ve mermer örnekleri incelendiğinde, sıcaklık değişimiyle birlikte kayaçların renginde de değişimler olduğu gözlenmiştir. Bu değişimleri tanımlayabilmek amacıyla 1975 yılında Amerikan Jeoloji Birliği (GSA) [68]'nin hazırlamış olduğu kaya renk kartlarından yararlanılmıştır.

a) Granitte sıcaklığa bağlı renk değişimi

GSA [68] kartlarına göre granit örnekleri, açık ve koyu renkli mineraller esas alınarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Çizelge 4.1). Granitler için renk değişimi; açık

renkli minerallerde (alkali feldispat, plajiyoklaz, kuvars) 400°C sıcaklığa kadar beyaz-gri arasında değişirken, 400°C sıcaklıkta koyu gri olmaktadır. 400°C sıcaklığın üzerinde ise, renk pembemsi beyaz-açık griye dönüşmektedir (Şekil 4.27a). Granit örneklerinin sıcaklık artışına bağlı olarak maruz kaldıkları renk değişiminin daha net görülebilmesi için doğal ve ısıtılmış örneklerin öğütülmüş fotoğrafları da verilmiştir (Şekil 4.27b). Şekil 4.27b'ye göre, doğal örnek ile 600°C



Şekil 4.26. (a) Mermer örneklerinin (a) tanjant (teğet)(E_t), (b) ortalama (E_{av}) ve (c) kiriş (sekant)(E_s) modüllerinin sıcaklıkla değişimi.

sıcaklığa kadar ısıtılmış örneklerin renkleri arasında çok büyük farklılık görülmemektedir. Ancak 600°C'deki örneğin rengi düşük sıcaklıklara göre biraz koyulaşmış, 600°C'den yüksek sıcaklıklarda ise pembeleşmiştir.

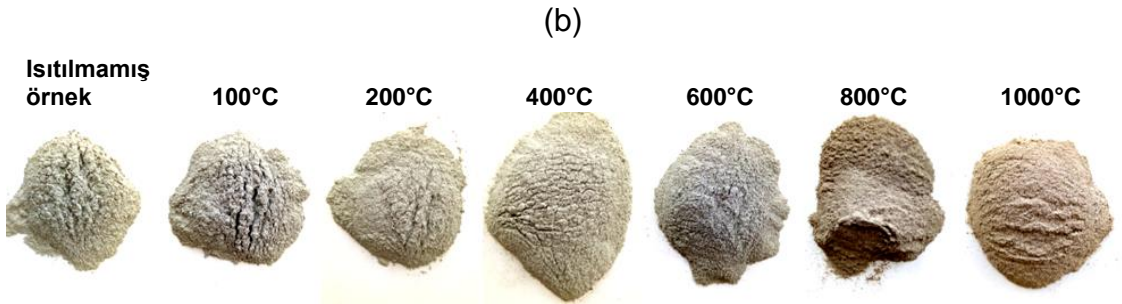
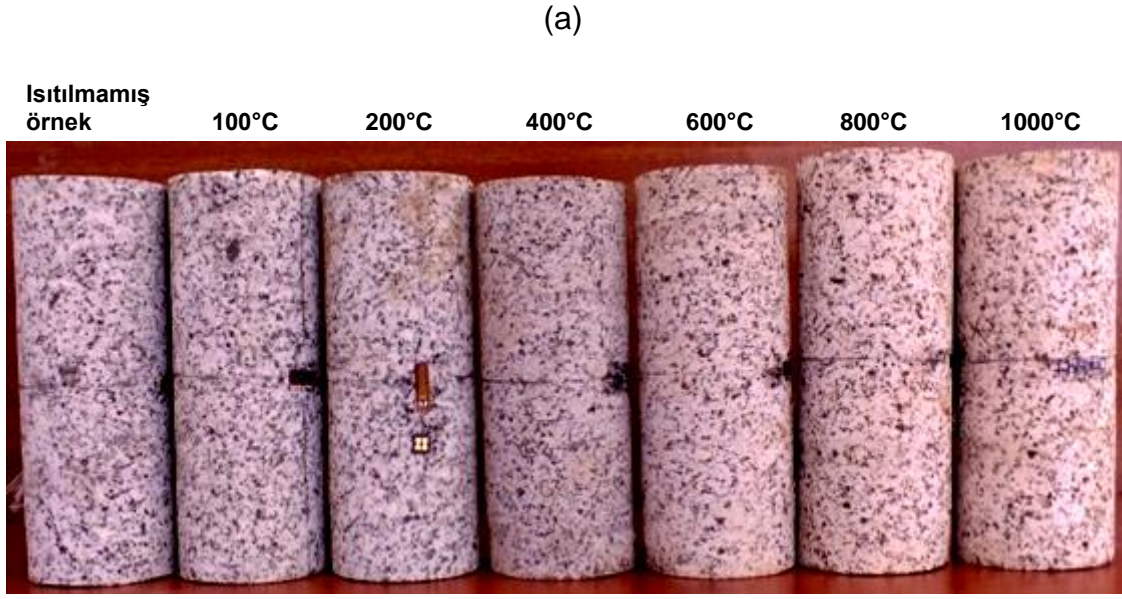
Koyu renkli minerallerde (biyotit, amfibol) ise; 400°C sıcaklığa kadar gri-siyah arasında iken, 400°C sıcaklığın üzerinde gri-kahverengimsi siyah tonlarına dönüşmekte olup, 400°C'nin üzerinde renk tonu belirgin bir şekilde açılmaktadır (Şekil 4.27a). Genel anlamda kayaçtaki bu renk değişimi, minerallerin yanması ve demir içerikli minerallerin okside olmasıyla, diğer bir ifadeyle minerallerin fiziksel değişime uğramasıyla ilişkilendirilmiştir. Kayaçtaki renk değişimi 400°C sıcaklıktan itibaren gözle çok kolay bir şekilde ayırt edilebilmesi açısından, söz konusu sıcaklığın eşik sıcaklık değeri olabileceği düşünülmektedir.

a) Mermerde sıcaklığa bağlı renk değişimi

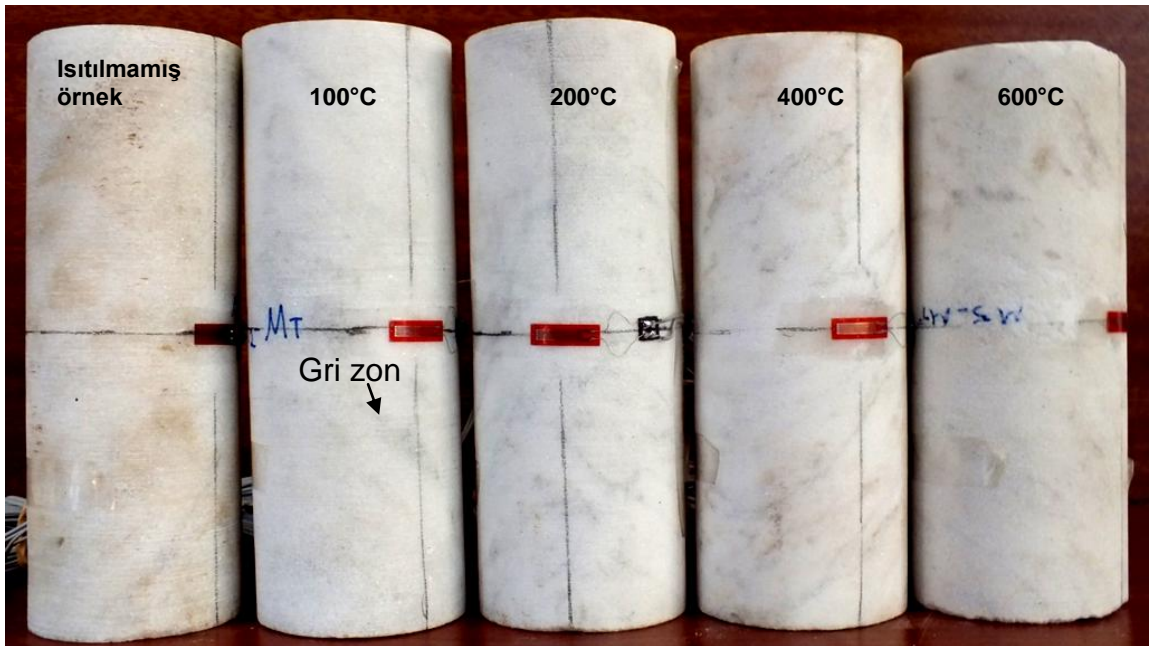
GSA [68] kartlarına göre mermer örnekleri ana kaya ve içindeki farklı renk tonunda kalsit minerallerinden oluşan açık gri zonlar (Şekil 4.28) ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Çizelge 4.2). Sıcaklık artışıyla; ana kayayı oluşturan beyaz rengin tonunun kısmen açıldığı, gri tonlu zonların ise daha belirgin hale geldikleri gözlenmektedir. Doğal örnek üzerinde görülen kirli yüzeyin (bkz. Şekil 4.28) orijinal örneğe ait olmayıp, karot alma işlemi sırasında karotiyerin ağzından karota bulaşan gres yağı ilgilidir. Bu nedenle bu örneğin rengi de diğerleri gibi beyazdır. 400°C ve 600°C sıcaklıklarda ise gri zonların kahverengimsi griliğe dönüştüğü görülmektedir (Şekil 4.28). Chakrabarti vd. [21] tarafından da belirtildiği üzere, sıcaklığa bağlı renk değişimi oldukça karmaşık bir mekanizmadır ve bunun nedeninin minerallerin değişimi ve alterasyonu ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Ancak bu tez çalışmasında yapılan mineralojik incelemeler ve kullanılan yöntemler bu mekanizmanın anlaşılması için yeterli değildir.

4.5. X-ışınları Bilgisayarlı Tomografi Çekimlerinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.29a'da granitin yatay ve düşey yönlerde alınmış kesitler boyunca X-ray CT yöntemiyle tayin edilmiş gözeneklilik değerleri verilmiştir. Her iki yöndeki kesit için verilen gözeneklilik değerleri birbirine oldukça yakındır ve 400°C'den itibaren gözenekliliğin belirgin ve sürekli şekilde arttığı görülmektedir. Şekil 4.29b'de ise, granitin yatay ve düşey yönlerdeki kesitler boyunca X-ray CT yöntemiyle tayin edilmiş gözeneklilik değerleri ile ISRM [43]'nin önerdiği yöntemle göre tayin edilmiş

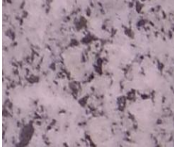
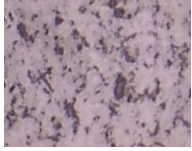
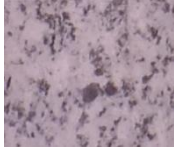
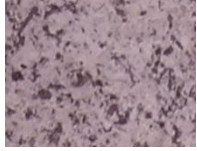
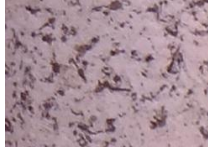
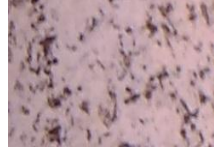
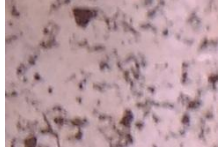


Şekil 4.27. Granit örneklerinin (a) jeomekanik deneyler için hazırlanan karot ve (b) toz örneklerinde sıcaklığa bağlı renk değişimi.








Şekil 4.28. Mermer örneklerinin mekanik deneyler için hazırlanan karot örnekleri üzerinde sıcaklığa bağlı renk değişimi.

Çizelge 4.1. Granit örneklerinde sıcaklıkla renk değişimi görüntüleri ve tanımları.

	Oda sıcaklığı (G1-MT)	100 °C (G2-MT)	200 °C (G3-MT)	400 °C (G4-MT)	600 °C (G5-MT)	800 °C (G6-MT)	1000 °C (G7-MT)
Açık renkli mineraller	Mavimsi beyaz- çok açık gri (5B 9/1-N ₉ -N ₈)	Beyaz-açık gri (N ₉ -N ₇)	Çok açık gri-orta açık gri (N ₈ -N ₆)	Çok açık gri-orta gri (N ₈ -N ₅)	Pembemsi gri (5 YR 8/1)	Pembemsi gri (5 YR 8/1)	Grimsi turuncumsu pembe (10 R 8/2)
Koyu renkli mineraller	Orta gri-grimsi siyah (N ₅ -N ₂)	Orta gri-griyimsi siyah (N ₅ -N ₂)	Orta gri-griyimsi siyah(N ₅ -N ₂)	Orta açık gri-koyu gri(N ₆ -N ₃)	Orta açık gri-koyu gri (N ₆ -N ₃)	Orta gri(N ₅) Orta koyu gri(N ₄) Kahverengimsi gri (5 YR4/1)	Koyu gri (N ₃) Kahverengimsi gri (5 YR 4/1) Kahverengimsi siyah (5 YR 2/1)
							

Çizelge 4.2. Mermer örneklerinde sıcaklıkla renk değişimi görüntüleri ve tanımları.

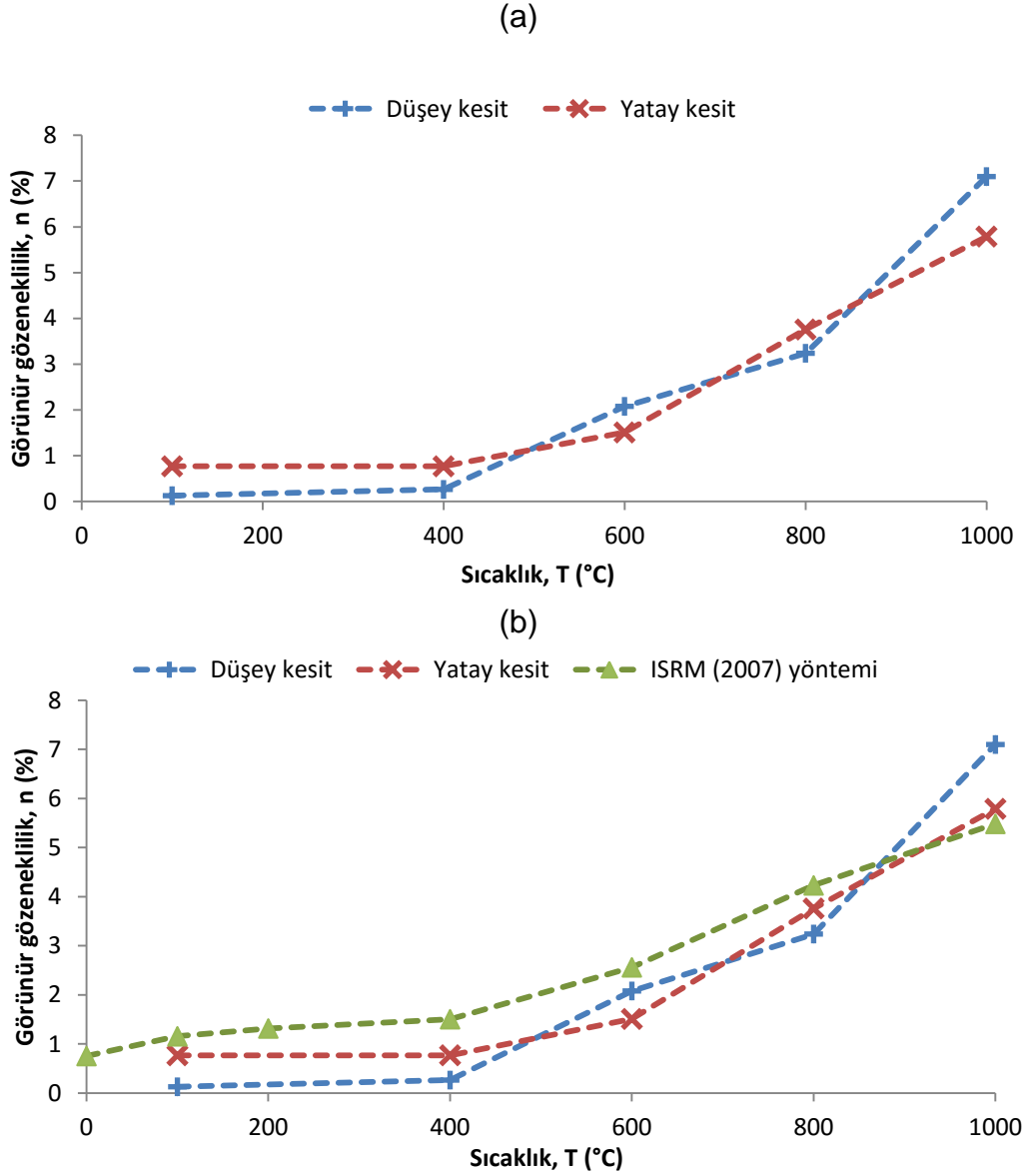
	Oda sıcaklığı (M1-MT)	100°C (M2-MT)	200°C (M3-MT)	400°C (M4-MT)	600°C (M5-MT)
Ana kaya	Çok açık gri (N ₈)	Beyaz (N ₉)	Beyaz (N ₉)	Beyaz (N ₉)	Beyaz (N ₉)
Gri zonlar	Orta açık gri (N ₆)	Orta açık gri (N ₆)	Orta açık gri (N ₆)	Orta açık gri (N ₆) ve Pembemsi gri (5 YR 8/1)	Orta açık gri (N ₆) ve Kahverengimsi gri (5YR 4/1)
					

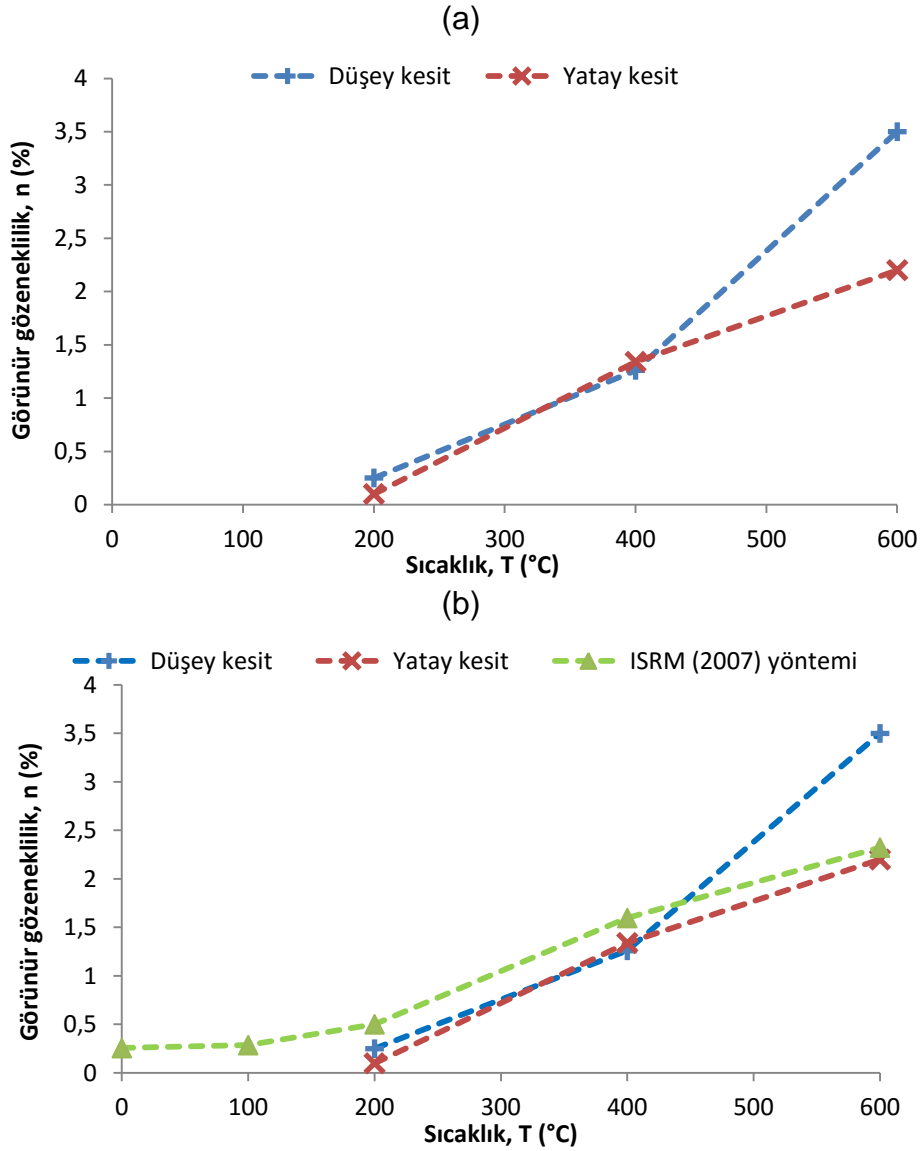
gözeneklilik değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre, yaklaşık 800°C'ye kadar ISRM [43]'ye göre tayin edilen gözeneklilik değerleri, X-ray CT yöntemiyle tayin edilen gözeneklilik değerlerine göre aynı eğilime sahip olmakla birlikte, biraz daha yüksektir. Sıcaklığın 800°C'yi aşmasıyla birlikte ISRM [43]'ye göre tayin edilen gözeneklilik değerleri, X-ray CT yöntemiyle tayin edilen gözeneklilik değerlerinden daha düşük çıkmış olup, daha yavaş bir artış hızı göstermektedir.

Şekil 4.30a'da mermerden yatay ve düşey yönlerde alınmış kesitler boyunca X-ray CT yöntemiyle tayin edilmiş gözeneklilik değerlerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Her iki yöndeki kesit için belirlenen gözeneklilik değerleri birbirine yakın olmakla birlikte, 400°C'den yüksek sıcaklıklarda dikey kesitteki gözeneklilik değeri yatay yöne ait kesitteki gözeneklilik değerine göre daha yüksek çıkmıştır.

Şekil 4.30b'de ise, mermerden yatay ve düşey yönlerde alınmış kesitler boyunca X-ray CT yöntemiyle tayin edilmiş gözeneklilik değerleri ile ISRM [43]'nin önerdiği yöntemle göre tayin edilmiş gözeneklilik değerleri karşılaştırılmıştır. Farklı yöntemlere göre tayin edilen bu gözeneklilik değerleri birbirine paralel ve sıcaklığın artmasıyla artan bir eğilim göstermektedir. Mermer örneklerinin gözeneklilik değerlerinin 200°C'den daha yüksek sıcaklıklara doğru belirgin şekilde arttığı anlaşılmaktadır. Gözeneklilik tayini için kullanılmış deney yöntemlerinden

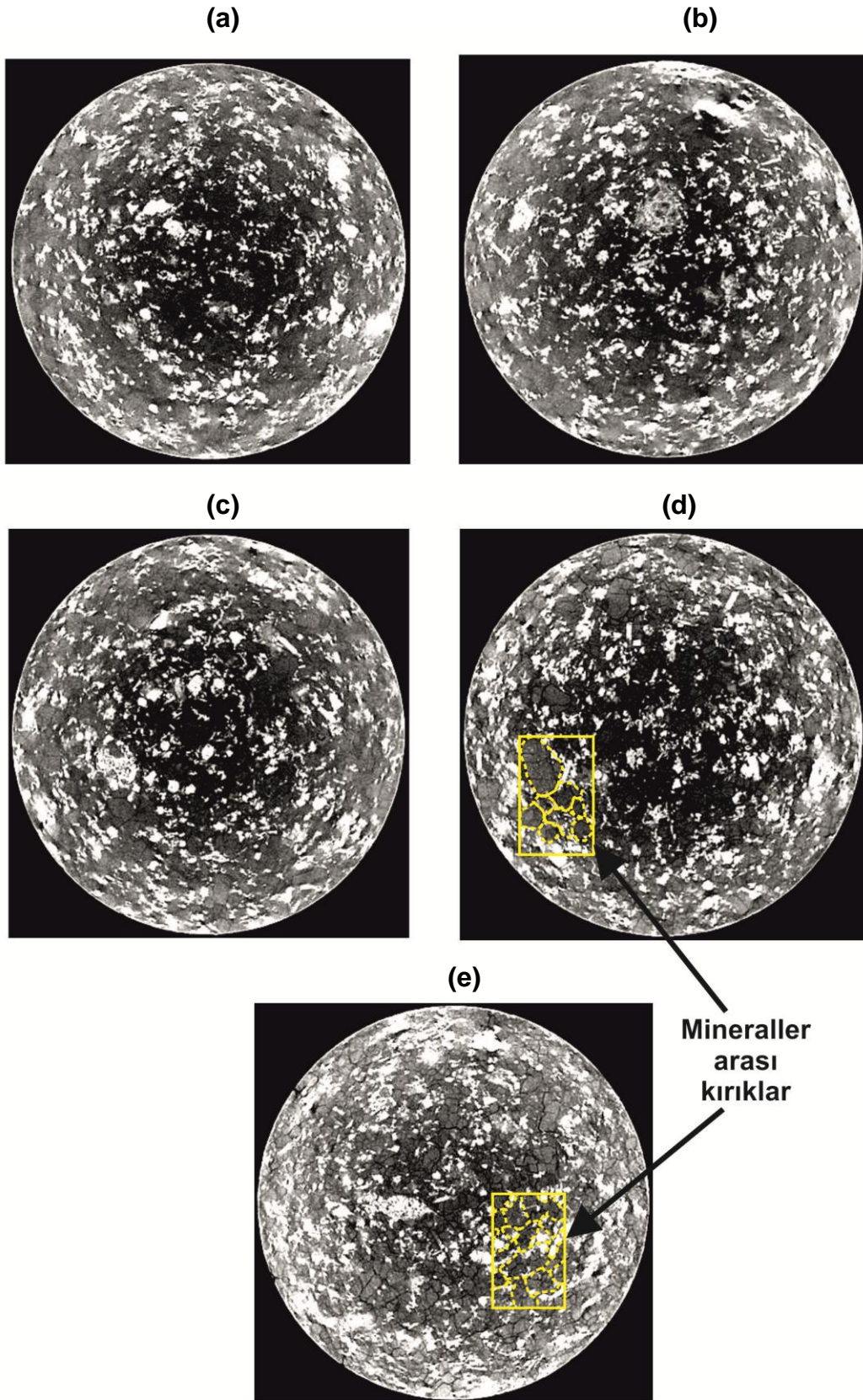
hangisinin daha güvenilir olduğunun belirlenebilmesi için, daha fazla örnek üzerinde ve daha ayrıntılı bir çalışma yapılması gerekmektedir.





Şekil 4.30.(a) Isıtılmış mermer örneklerinin düşey ve yatay yönlerde alınmış kesitler boyunca X-ışınları CT yöntemiyle tayin edilen gözeneklilik değerleri ve (b) X-ışınları CT yöntemi ve ISRM [43]'nin önerdiği yöntemle göre tayin edilmiş gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması (Obara [58]) tarafından verilmiş deney sonuçlarına göre çizilmiştir.

Şekil 4.31'de granit örneklerinin farklı sıcaklıklardan alınmış X-ışınları CT görüntülerinde, mineraller arasında artan kırıklar görülmektedir. Sıcaklıkla artan bu kırık yoğunluğunun incelenen örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin, diğer bir ifadeyle örneklerin gerilme altında davranışlarının değişmesinde etken olduğu düşünülmektedir. Bu tez çalışmasında X-ışınları CT yöntemini değerlendiren araştırmacıların granit için göndermiş oldukları X-ışınları CT görüntülerine benzer görüntülerden mermer örneğine ait olanları göndermediklerinden mermer için böyle bir değerlendirme yapılamamıştır.



Şekil 4.31. Granit örneklerinin farklı sıcaklıklarda çekilmiş X-ışınları CT görüntüleri: (a) 100°C, (b) 400°C, (c) 600°C, (d) 800°C ve (e) 1000°C.

5. BULGULARIN ÖNCEKİ ÇALIŞMALARIN SONUÇLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

Sıcaklığın kayaların mühendislik özelliklerine etkisi konusunda daha önce yapılmış çalışmalardan elde edilen sonuçların belirli kaya türlerine göre gruplanarak bunların kendi aralarında karşılaştırıldığı bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Bu husus dikkate alınarak, bu tez çalışmasında elde edilen bulgular aynı tür kayalar üzerinde (granit ve mermer) yapılmış önceki çalışmaların sonuçlarıyla birlikte karşılaştırılmış ve sıcaklığın bu tür kayaların fiziko-mekanik özelliklerinin belirgin şekilde değişimine neden olduğu ortak veya birbirine yakın bir eşik sıcaklık değerinin olup olmadığı araştırılmıştır.

Önceki çalışmalara ait sonuçlarla birlikte karşılaştırmalar yapılırken; tüm çalışmalarda aynı sıcaklık değerleri kullanılmadığı için, incelenen mühendislik özelliklerinin sıcaklıkla değişimine ilişkin eğilimlerini ve farklılıklarını daha net şekilde görüp değerlendirmek amacıyla bu özelliklerin normalize edilmiş değerleri (Eşitlik 6.1) kullanılmıştır.

$$N(A) = (A_{TO}/A_{RO}) \quad (6.1)$$

Burada; $N(A)$ kayanın herhangi bir özelliğine ait normalize edilmiş değer olup, A_{TO} ilgili özelliğin herhangi bir sıcaklıktaki, A_{RO} ise o özelliğin oda sıcaklığındaki değerini temsil etmektedir.

Bu tez çalışmasında incelenen granit ve mermerin normalize edilmiş birim hacim ağırlık, gözeneklilik, P-dalga hızı, tek eksenli sıkışma dayanımı, Brazilian çekilme dayanımı ve elastisite modülü değerleri daha önceki benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ancak bu karşılaştırmalar yapılırken, önceki çalışmalardan bazılarında kullanılan örneklere ait bazı özellikler verilmemiştir. Örneğin; sıcaklıkla değişen yoğunluk değerlerinin verildiği bazı çalışmalarda ([19], [24], [27]–[29], [33]) yoğunluk değerlerinden verilmemiş olan birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Bu tür çalışmalarda verilmiş olan özellikler kullanılarak, verilmeyen özellik değerleri mümkün olduğu ölçüde hesaplanarak karşılaştırmalara dahil edilmiştir. Bu bölümde verilen karşılaştırmalarda, bu tez çalışmasında olduğu gibi, örneklerin belirli bir sıcaklığa ulaşana değin ısıtıldıktan

sonra yavaşça soğutulduğu ve deneylerin bu örnekler üzerinde yapıldığı çalışmalar dikkate alınmıştır.

Aşağıdaki alt bölümlerde verilen karşılaştırma grafiklerinde gerek bu çalışmanın gerekse önceki çalışmaların sonuçlarına göre ilgili parametrelerin ve bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Ayrıca her özellik için ilgili olarak karşılaştırmalara dahil edilen tüm çalışmaların sonuçlarına göre her özellik için ilgili özelliğin sıcaklığa bağlı değişim eğilimini temsil eden ortalama eğilim çizgisi de çizilmiş ve bu grafik kesik çizgiyle gösterilmiştir. Ortalama eğilim çizgisi çizilirken, karşılaştırılan çalışmalarda farklı sıcaklık değerleri için o özelliğin değerleri toplanmış ve veri sayısına bölünerek o sıcaklıktaki ortalama özellik değeri belirlenmiştir. Farklı sıcaklıklar için belirlenen bu ortalama değerlerden geçirilen kesikli kırmızı çizgi de "ortalama eğilim çizgisi olarak ilgili şekillerin üzerinde gösterilmiştir.

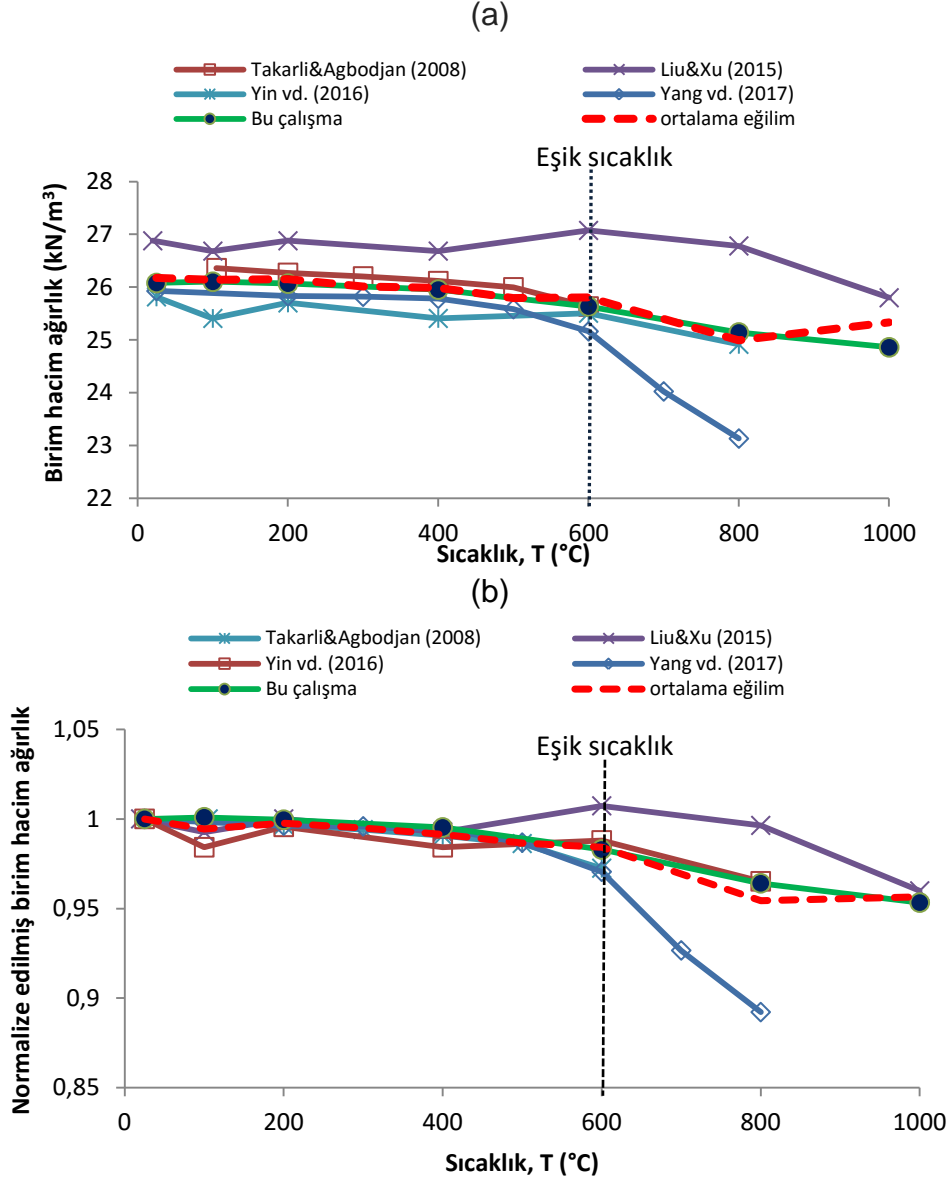
5.1. Granitler Üzerinde Yapılan Çalışmaların Sonuçlarının Karşılaştırılması

5.1.1 Fiziksel Özelliklerin Karşılaştırılması

(a) Birim hacim ağırlık:

Bu tez çalışmasında kullanılan granit örneklerinde tayin edilmiş sıcaklıkla değişen birim hacim ağırlık değerleri ile daha önce granitlerle ilgili benzer çalışmalar yapmış araştırmacıların elde ettikleri sıcaklığa bağlı birim hacim ağırlık değişimleri Şekil 5.1'de karşılaştırılmıştır. Şekil 5.1'de kesik çizgiyle gösterilen ortalama eğilim çizgisine göre, sıcaklık arttıkça birim hacim ağırlığının azaldığı görülmektedir. 600°C'ye kadar önemli düzeyde bir değişim gözlenmezken, bu sıcaklıktan itibaren genel olarak birim hacim ağırlıkta bir azalma eğilimi görülmektedir. Ancak 800°C'den yüksek sıcaklıklarda birim hacim ağırlık tayini yapılmış sadece iki çalışma (bu çalışma ve Liu ve Xu [27]) söz konusu olup, bu çalışmalarda 1000°C'de tayin edilen birim hacim ağırlık değerleri, birim hacim ağırlığının sıcaklıkla azalma eğilimine uymakla birlikte, biraz yüksek oldukları için kesik çizgiyle gösterilen ortalama eğilim grafiğinde 1000°C'de birim hacim ağırlık değerinde artış oluyormuş şeklinde görülmektedir (Şekil 5.1). Bu karşılaştırma çerçevesinde, aşağıdaki bölümlerde değinilecek olan diğer kaya özellikleriyle karşılaştırıldığında, granitlerde birim hacim ağırlığının sıcaklıktan daha az etkilendiği ve 600°C'den daha yüksek sıcaklıklarda birim hacim ağırlığının sıcaklıktan etkilenmesinin biraz daha

belirginleştığı söylenebilir. Liu ve Xu [27], yüksek sıcaklıklarda birim hacim ağırlıkta gözlenen küçük artışları, yüksek sıcaklığa bağlı olarak gerçekleşen dehidrasyon ve taneler arası sıkı bağlanmayla ilişkilendirmişlerdir.

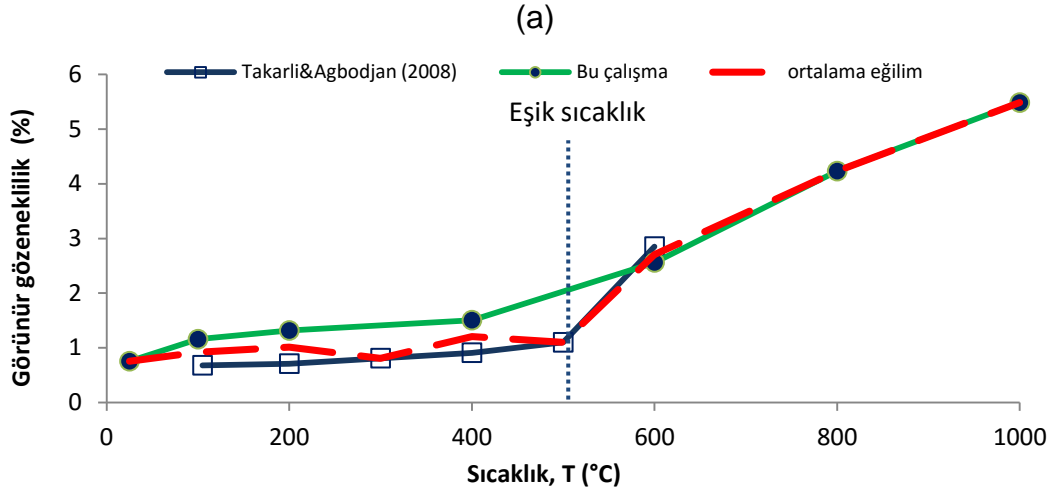


Şekil 5.1. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) birim hacim ağırlık ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.

(b) Görünür Gözeneklilik:

Gözenekliliğin sıcaklıkla değişimi konusunda sadece bir çalışma (Takarli ve Agbojan [24]) bulunduğu için, sonuçlar sadece bu iki çalışma esas alınarak karşılaştırılmıştır. Ancak Takarli ve Agbodjan [23]'ün çalışmalarında örneklerle uyguladıkları en yüksek sıcaklık 600°C olduğu için, karşılaştırma bu sıcaklığa

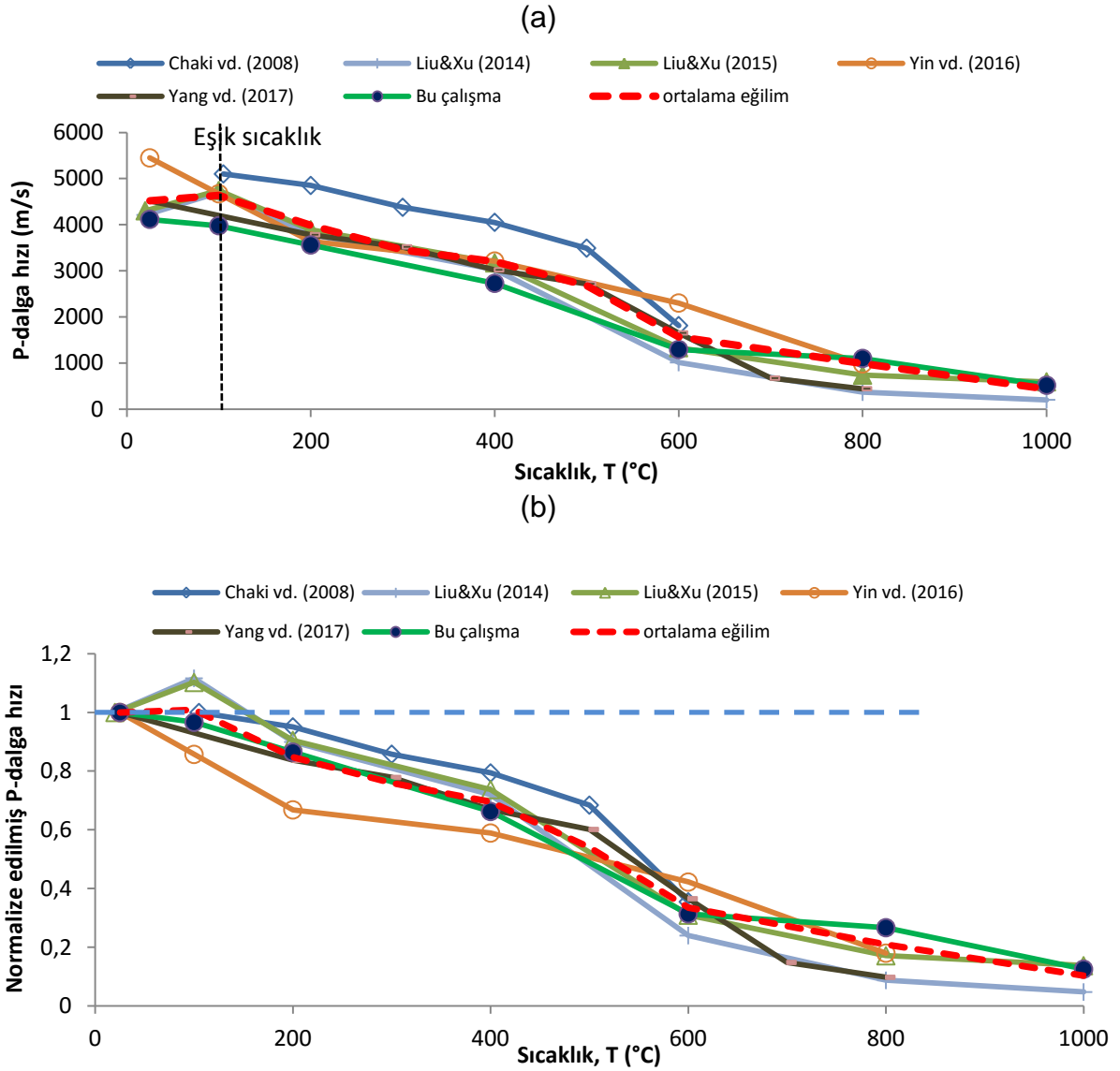
kadar yapılmış ve ortalama eğilim çizgisinin 600°C'den yüksek sıcaklıkları temsil eden kısmı için bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar dikkate alınmıştır. Şekil 5.2'deki grafikten görüleceği gibi, karşılaştırılan her iki granit için de gözenekliliğin 500°C'ye kadar çok az arttığı, ancak bu sıcaklıktan sonra belirgin bir artış sergilediği anlaşılmakta olup, 500°C gözeneklilikteki belirgin artışın başladığı eşik sıcaklık değeri olarak düşünülebilir.



Şekil 5.2. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş gözeneklilik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.

(c) P-dalga hızı:

Bu tez çalışmasında tayin edilmiş sıcaklıkla değişen P-dalga hızları ile daha önce granitlerde benzer çalışmalar yapmış araştırmacıların elde ettikleri sıcaklık- V_p sonuçları Şekil 5.3'te karşılaştırılmıştır. Bu şekilde verilen grafikler; kesik çizgiyle gösterilen ortalama eğilimin sıcaklık artışıyla birlikte P-dalga hızının sıcaklıkla azaldığı yönünde olduğunu göstermektedir. Genel olarak, 100°C'den itibaren belirgin ve düzenli şekilde azalmaya başlayan P-dalga hızları, 400-600°C aralığında daha hızlı bir şekilde azalma eğilimine sahiptirler. Genel ortalama eğilim göz önünde bulundurularak, P-dalga hızındaki azalmanın en belirgin olduğu sıcaklığın 400°C olduğu söylenebilir. Diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu tez çalışmasında P-dalga hızı ile ilgili elde edilen sonuçların da bu genel eğilimle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

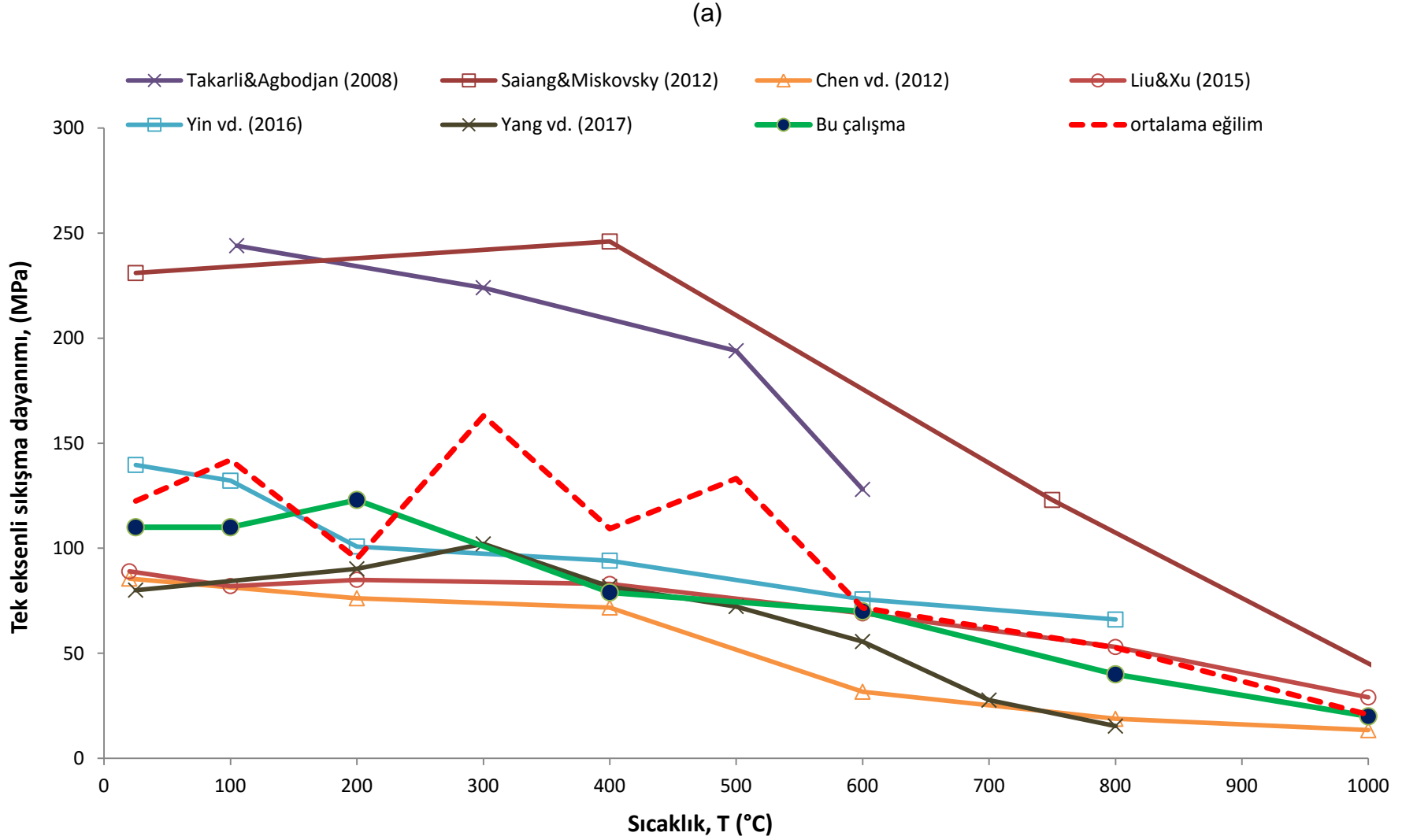


Şekil 5.3. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) P-dalga hızı ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.

5.1.2 Mekanik Özelliklerin Karşılaştırılması

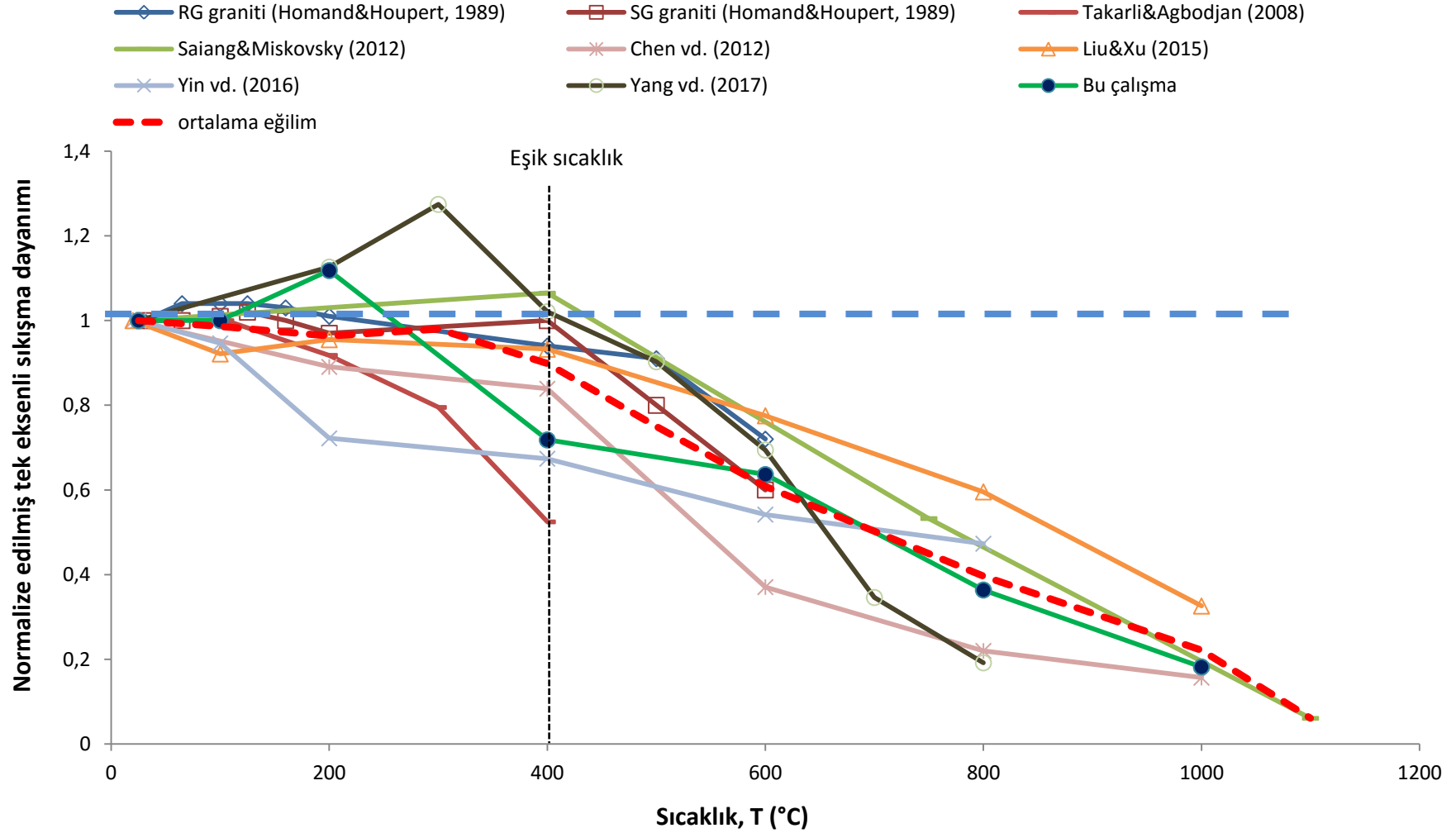
(a) Tek eksenli sıkışma dayanımı:

Bu tez çalışmasında farklı sıcaklıklar altında tayin edilmiş tek eksenli sıkışma dayanımları, daha önce granitlerle ilgili benzer çalışma yapmış araştırmacıların sıcaklık-tek eksenli sıkışma dayanımı sonuçlarıyla Şekil 5.4a'da karşılaştırılmıştır. Homand ve Houpert [20] yayınladıkları çalışmalarında sadece normalize edilmiş tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerini verip, oda sıcaklığında yapılan deneylerin sonuçlarını vermedikleri için Şekil 5.4a'daki veri sayısı Şekil 5.4b'ye göre daha azdır. Nispeten düşük sıcaklıklardaki tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri,



Şekil 5.4. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) tek eksenli sıkışma dayanımları ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.

(b)



Şekil 5.4 (devam ediyor)

oldukça geniş bir aralıkta değişerek sıcaklığa bağlı olarak azalmaktadır. Ancak sıcaklık artıka, küçük dalgalanmalar olmakla birlikte, tüm granit örneklerinde tek eksenli sıkışma dayanımının özellikle 400°C'den itibaren belirgin şekilde azaldığının söylenmesi mümkündür. Diğer bir ifadeyle, dayanımdaki sıcaklığa bağlı azalmanın belirginleştiği eşik sıcaklık değeri 400°C olarak kabul edilebilir. Normalize edilmiş tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 5.4b'de verilmiştir. Bu grafikte normalize edilmiş tek eksenli sıkışma dayanımının 1 olduğu değer noktalı çizgiyle gösterilmiştir. Daha önceki çalışmalarda incelenmiş bazı granitlerde tek eksenli sıkışma dayanımında belirli sıcaklıklara kadar artış gözlenmiştir.

Granitlerle ilgili önceki çalışmalarda sıcaklıkla değişen tek eksenli sıkışma dayanımına göre yapılan karşılaştırmada çizilen ortalama eğilimle (Şekil 5.4b, kırmızı kesik çizgi), bu çalışmaya ait tek eksenli sıkışma dayanımı-sıcaklık grafiği oldukça uyumludur. Şekil 5.4b'deki karşılaştırma grafiğinden de görüldüğü gibi, bu tez çalışmasıyla birlikte sadece daha önce yapılmış 4 çalışmada tek eksenli sıkışma dayanımının sıcaklıkla değişimi 1000°C'ye kadar incelenmiştir. Bu sıcaklığa ulaşmayan araştırmalarda da tek eksenli sıkışma dayanımı açısından genel eğilimin, sıcaklığın artması durumunda diğer çalışmalardakilere benzer şekilde olacağı yönünde ipuçları vermektedir. Sıcaklığın 1000°C'nin üzerine çıkarıldığı iki çalışmada ise, kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımının son derece düşük değerlere doğru azaldığı anlaşılmaktadır (Şekil 5.4a-b).

(b) Elastisite Modülü:

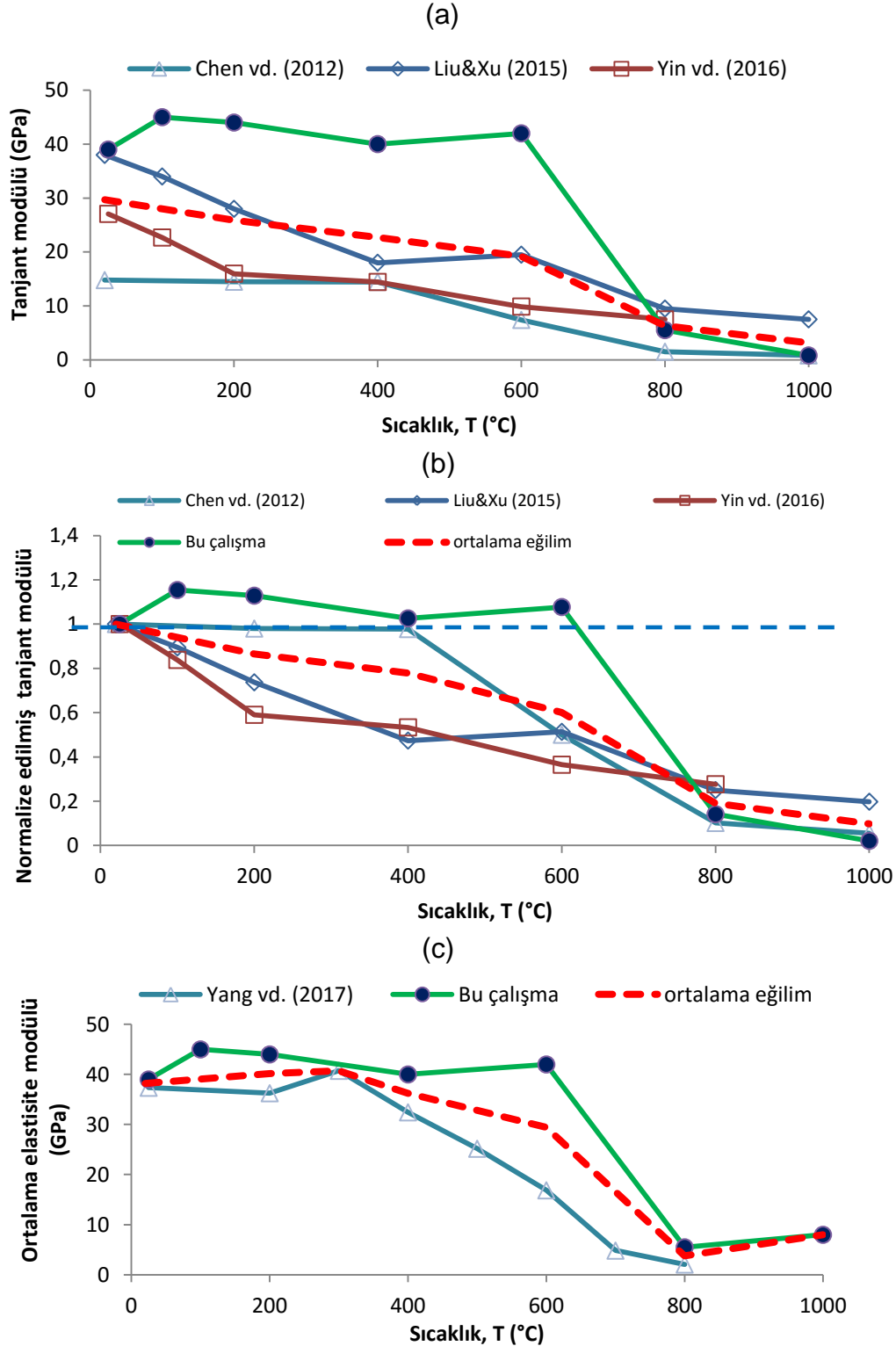
Bu tez çalışmasında farklı sıcaklıklar altında tayin edilmiş elastisite modülleri, daha önce granitlerle ilgili benzer çalışmalar yapmış araştırmacıların sıcaklık-elastisite modülü sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ancak birkaç çalışmacı ([5], [28]) dışında, elastisite modülü verisinin kullanıldığı çalışmalarda tayin edilen elastisite modülünün türü (teğet, ortalama veya kiriş modülü) hakkında net bir bilgi verilmemiştir. Liu ve Xu [27] ile Yin vd. [29] çalışmalarında kullandıkları elastisite modülünün türünü belirtmemişler, ancak bunu tanımlarken bu özelliği eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon eğrisinde tek eksenli sıkışma dayanımının %40-60 aralığına denk gelen doğrunun eğiminden hesapladıklarını ifade etmişlerdir. Peng vd. [34] mermer üzerinde yaptığı çalışmalarında ise, kullandıkları

elastisite modülünü yine Yin vd. [29]'nin tanımlamasıyla aynı olarak belirtirlerken, bu tanımlamanın tanjant modülünü işaret ettiğini de ayrıca ifade etmişlerdir. Liu ve Xu [27] ile Yin vd. [29] çalışmalarında, Peng vd. [34]'nin çalışmasından da anlaşılacağı gibi, tanjant modülünü kullandıkları düşünülmektedir. Bu nedenle; çalışmalarında elastisite modülü verisi bulunan ancak bunun türü hakkında bilgi verilmeyen önceki çalışmaların sonuçları, karşılaştırma grafiklerinin değerlendirilmesinde bir yanılgıya sebebiyet vermemeleri için, karşılaştırma grafiklerinin veri tabanına dahil edilememişlerdir. Karşılaştırma grafiğine verisi dahil edilen çalışmalardan, Yang vd. [28] ortalama modülü, diğer çalışmacılar ise tanjant modülünü kullandıkları için bu çalışmada tayin edilmiş tanjant ve ortalama elastisite modülleriyle, aynı tür elastisite modülünün kullanıldığı diğer çalışmaların sonuçları karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırılan grafikler incelendiğinde, tanjant modülü kullanılarak çizilen ortalama eğilime göre sıcaklık arttıkça tanjant modülünde azalma görülmektedir (Şekil 5.5a). Normalize edilmiş tanjant modülü değerlerine göre çizilmiş ortalama eğilimde de sıcaklık arttıkça, normalize edilmiş tanjant modülünde azalma görülmektedir. Normalize edilmiş tanjant modülü grafiğinde "1" çizgisinin üzerine çıkan tek bir çalışma (bu çalışma) vardır (Şekil 5.5b). Bu durum, Bölüm 4.3.1'de değinildiği gibi, 600°C'den düşük sıcaklıklarda tayin edilmiş tanjant modüllerinin doğal örneklerin tanjant modüllerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmıştır (bkz. Şekil 4.22a). Normalize edilmiş tanjant modülü-sıcaklık ilişkisinin ortalama eğilimi göz önünde bulundurulduğunda, bu tez çalışmasının sonucunda bulunan normalize edilmiş değerler, 600°C dışındaki sıcaklık hariç diğer sıcaklıklardaki normalize edilmiş değerler diğer çalışmalarla uyum göstermektedir.

Ortalama elastisite modülü değerleri kullanılarak Yang vd. [28]'nin sonuçları ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizilen ortalama eğilime göre, sıcaklık arttıkça ortalama elastisite modülünün de azaldığı görülmektedir (Şekil 5.5c). Ancak karşılaştırılan çalışmalar tek tek incelendiğinde, Yang vd. [28]'nin çalışmasında 300°C'de ortalama modül artmakta olup (Şekil 5.5c), bu artış, Yang vd. [28] tarafından sıcaklıktaki artışın örneği daha sıkı hale getirmesinden kaynaklanabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Ortalama modül verisi bulunan bu çalışma dışında sadece Yang vd. [28]'ne ait bir çalışmanın olması nedeniyle,

normalize edilmiş değerlere göre yapılan bir karşılaştırmanın çok fazla anlam ifade etmeyeceği düşüncesiyle böyle bir karşılaştırmaya yer verilmemiştir.

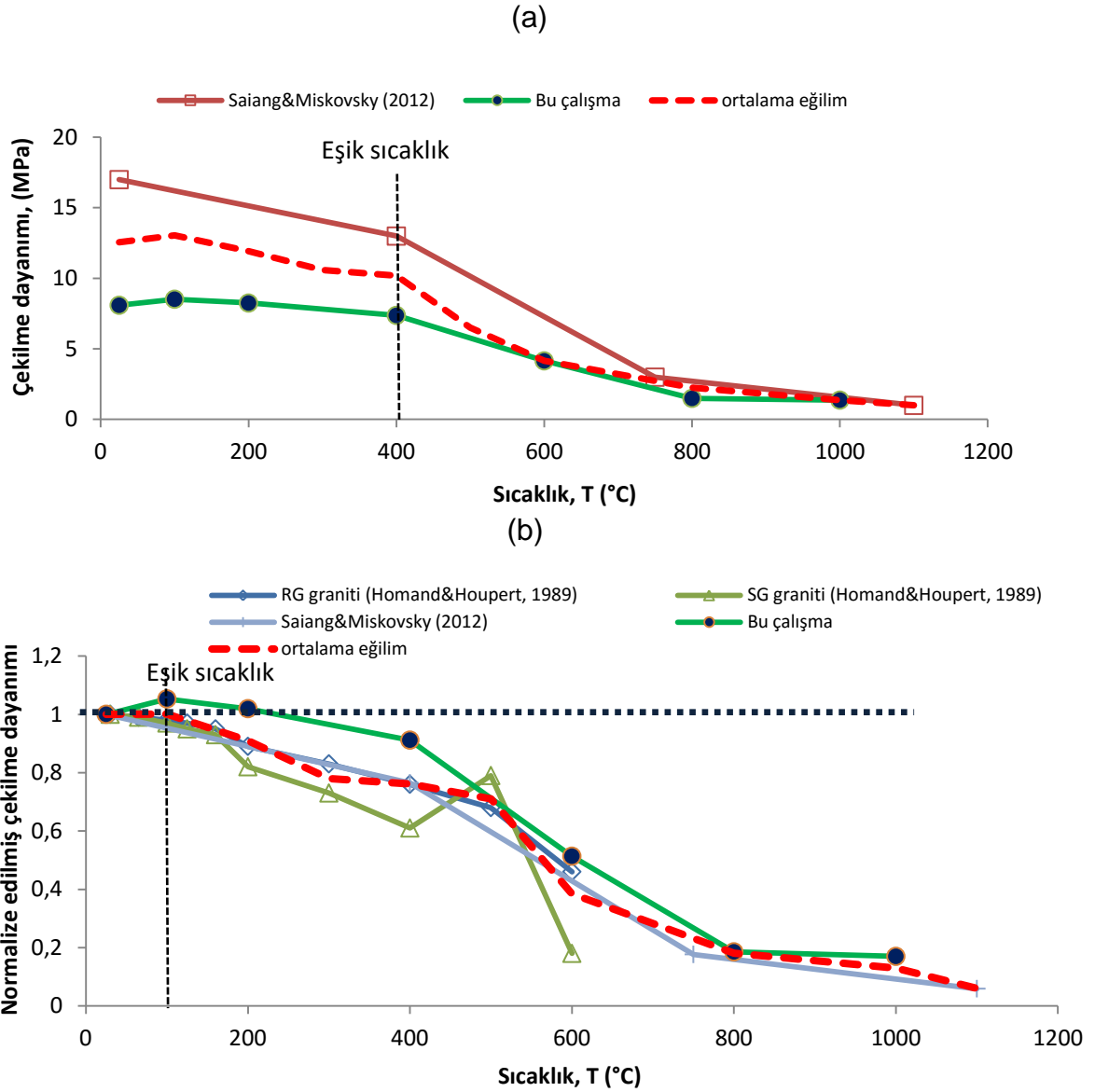


Şekil 5.5. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) tanjant modüllerinin, (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin ve (c) ortalama elastisite modüllerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırılması.

(c) Çekilme dayanımı:

Bu tez çalışmasında farklı sıcaklıklarda tayin edilmiş çekilme dayanımları ile daha önce granitlerle ilgili benzer çalışma yapmış araştırmacıların sıcaklık-çekilme dayanımı sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 5.6a). Ancak çekilme dayanımının sıcaklıkla değişiminin tayin edildiği üç araştırmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmalardan, deneyleri ancak 200°C'ye kadar düşük sıcaklıklarda yapıldığı için bu çalışmaya ait verinin çok fazla anlam ifade etmeyeceği düşünülerek, "IG" simgesiyle verilen granit üzerinde çalışan Dwivedi vd. [12]'nin verisi değerlendirmeye alınmamıştır. Karşılaştırma grafiğinde (Şekil 5.6a) değerlendirilen Saiang ve Miskovsky [26]'nin verisi ile bu tez çalışması arasında oldukça uyumlu bir eğilim söz konusudur. Bu iki çalışmaya göre çizilen ortalama eğilim çizgisine göre; 400°C'ye kadar çekilme dayanımında çok önemli bir değişim gözlenmezken, 400-800°C arasında ani bir azalma gerçekleştikten sonra örneklerin çekilme dayanımları son derece düşük değerlere ulaşmıştır. Bu nedenlerle çekilme dayanımı açısından 400°C'nin eşik sıcaklık değeri olduğu düşünülmektedir.

Normalize edilmiş çekilme dayanımı değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 5.6b'de verilmiştir. Daha önceki çalışmalar incelendiğinde, sıcaklığa bağlı olarak çekilme dayanımının değişimini inceleyen tek bir çalışmanın (Saiang ve Miskovsky [26]) olmasına karşın, normalize edilmiş çekilme dayanımı değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimini araştıran çalışmalar daha fazladır. Ancak bu çalışmalarda doğal örneklerin çekilme dayanımı değerleri verilmediği için bu çalışmalara ait sıcaklıkla değişen sadece normalize edilmiş çekilme dayanımlarıyla bu tez çalışmasında belirlenen normalize edilmiş çekilme dayanımları karşılaştırılmıştır (Şekil 5.6b). Şekil 5.6b'de normalize edilmiş çekilme dayanımı verisi sayıca daha fazla olduğundan Şekil 5.6a'ya göre karşılaştırmada daha çok çalışma dahil edilmiştir. Daha fazla sayıda çalışmayla oluşturulan bu grafiğin ortalama eğilimi de Şekil 5.6a'daki grafiğin ortalama eğilimiyle uyumlu olmakla birlikte, belirlenen eşik sıcaklık değeri 100°C'dir. Şekil 5.6b'de daha fazla çalışma bulunması nedeniyle bu grafiğe göre belirlenen eşik sıcaklık değeri daha anlamlıdır. Grafiğin ortalama eğilimine uyumsuz olarak sadece Homand vd. [20]'nin "SG graniti" çalışmasında 500°C'de çekilme dayanımında bir miktar artış görülmektedir. Ancak Homand vd. [20]'in çalışmasında bunun nedeniyle ilgili bir yorum bulunmamaktadır.



Şekil 5.6. Granit örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) çekilme dayanımı ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırılması.

5.2. Mermerler Üzerinde Yapılan Çalışmaların Sonuçlarının Karşılaştırılması

5.2.1 Fiziksel Özelliklerin Karşılaştırılması

(a) Birim hacim ağırlık:

Benzer amaçlar doğrultusunda mermerler için birim hacim ağırlığının sıcaklıkla değişimini inceleyen çalışmalar karşılaştırılmış ve bu çalışmaların ortalama eğilim grafiği çizilmiştir (Şekil 5.7a). Buna göre, grafiğin ortalama eğilimi sıcaklık arttıkça birim hacim ağırlığının azalması yönündedir. 200°C'ye kadar çok fazla değişim göstermeyen birim hacim ağırlık değerleri, bu sıcaklıktan itibaren azalmaya

başlayıp, sıcaklık 400°C'ye yükseldiğinde birim hacim ağırlıktaki azalmanın hızı artmaktadır. Bu çalışmada tayin edilen değerler ortalama eğilim çizgisiyle uyumludur.

Ancak grafik incelendiğinde, Ferrero ve Marini [19] ile Özgüven ve Özçelik [17]'in kullandıkları mermer örneklerinin farklı yerlerden alınmış olması nedeniyle birim hacim ağırlık değerlerindeki ani düşüşün gerçekleştiği sıcaklıkların veya örneklerin sıcaklığa karşı vermiş oldukları tepkinin derecesinin de farklı olduğu görülmektedir. Ferrero ve Marini [19] çalışmalarında kullandıkları mermer örneklerinin sıcaklık artışına karşın birim hacim ağırlıklarındaki farklı değişimin nedeni olarak, mineralojik bileşim olarak birinin sadece kristalize, diğerinin ise mikrokristalin kalsitten oluşmasından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir.

Benzer amaçlı çalışmaları daha sağlıklı bir şekilde karşılaştırmak için hesaplanan normalize edilmiş birim hacim ağırlık-sıcaklık grafiğinde (Şekil 5.7b) de görüldüğü üzere, birim hacim ağırlık-sıcaklık değişiminde genel eğilimler birbirleriyle oldukça uyumludur. Söz konusu özellik açısından da hızlı düşüşün gerçekleştiği 400°C'nin eşik sıcaklık olduğu söylenebilir.

(b) Görünür gözeneklilik:

Benzer amaçlar doğrultusunda mermerler için sıcaklıkla değişen görünür gözeneklilik değerlerinin incelendiği çalışmalar karşılaştırılmış ve bu çalışmaların ortalama eğilim grafiği çizilmiştir (Şekil 5.8). Şekil 5.8a'ya göre; 200°C'ye kadar görünür gözeneklilikleri fazla bir değişim göstermeyen mermerlerin söz konusu sıcaklıktan itibaren görünür gözeneklilikleri artmaya başlamıştır. İncelenen mermerlerin gözeneklilik-sıcaklık grafiklerinin ortalama genel eğilimi ile bu tez çalışmasında elde edilen sıcaklık-görünür gözeneklilik ilişkisi de oldukça uyumludur. Sıcaklık artışıyla birlikte görünür gözeneklilik de artmış olmakla birlikte, örneklerin görünür gözenekliliğindeki artış hızları farklılık göstermektedir. Özgüven ve Özçelik [17], görünür gözeneklilikteki değişim hızının kayacın pekişme derecesinden etkilendiğini ve daha pekişmiş kayaların görünür gözenekliliğinin sıcaklık artışından daha hızlı şekilde etkileneceğini ifade etmişler.

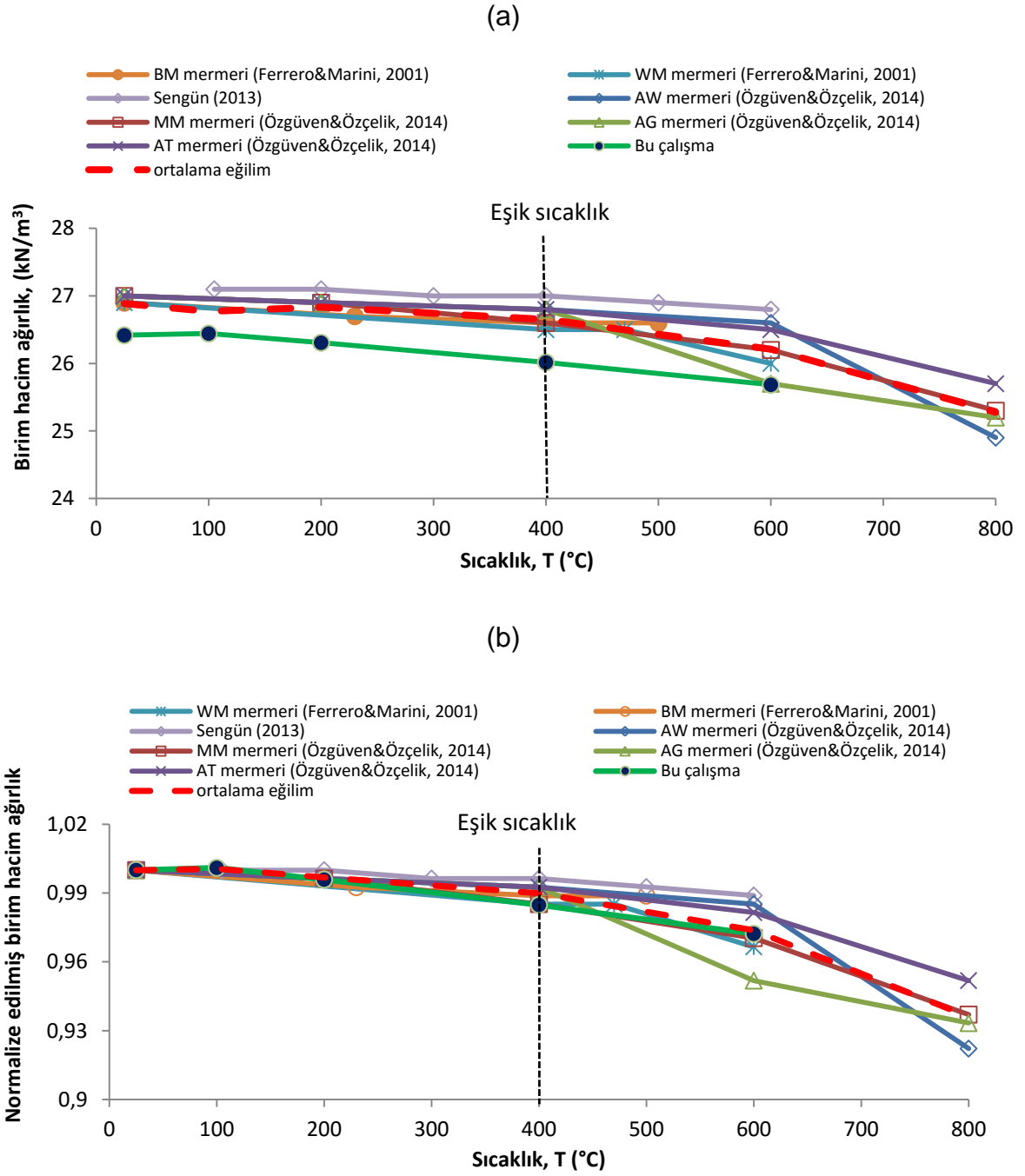
Karşılaştırılan sıcaklık-normalize edilmiş görünür gözeneklilik grafiklerinde sıcaklık arttıkça sıcaklığa maruz kalan örneğin görünür gözenekliliğinin doğal örneğin görünür gözenekliliğine oranının giderek arttığı görülmektedir (Şekil 5.8b). Bu tez

çalışmasında elde edilen bulgularla benzer çalışmaların bulguları oldukça uyumludur. Sıcaklık artışına bağlı görünür gözeneklilik değerlerinin sürekli ve artış hızının giderek artmaya başladığı sıcaklık değeri göz önünde bulundurularak, karşılaştırılan mermerler için görünür gözeneklilik açısından 200°C'nin eşik sıcaklık olduğu söylenebilir (Şekil 5.8b).

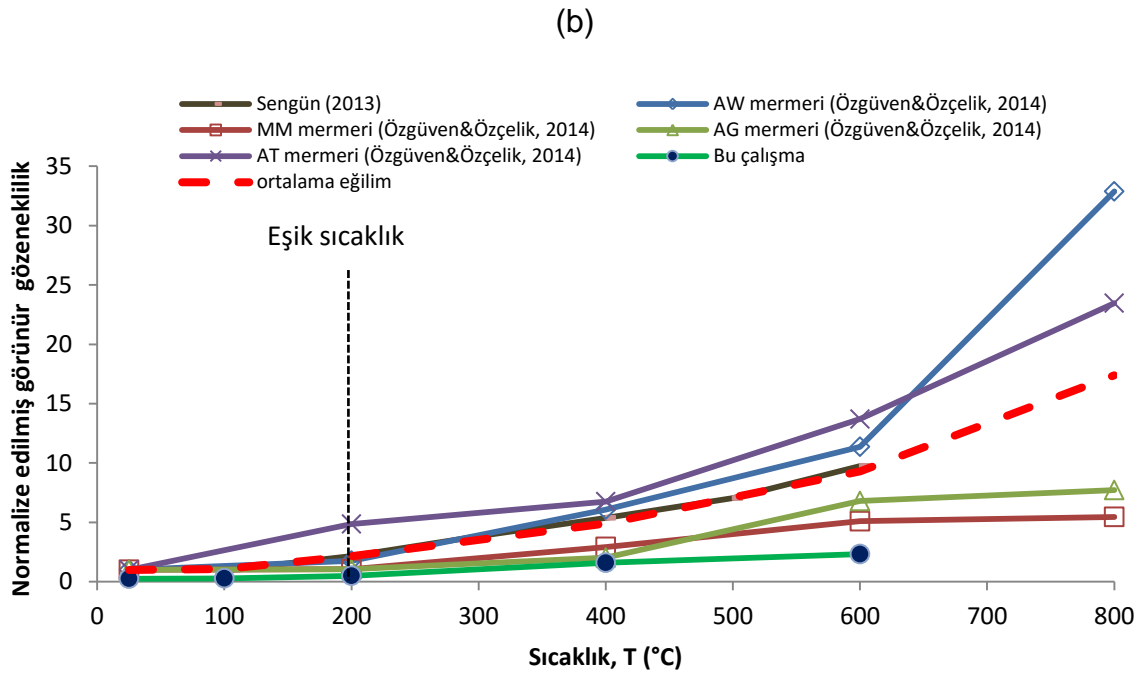
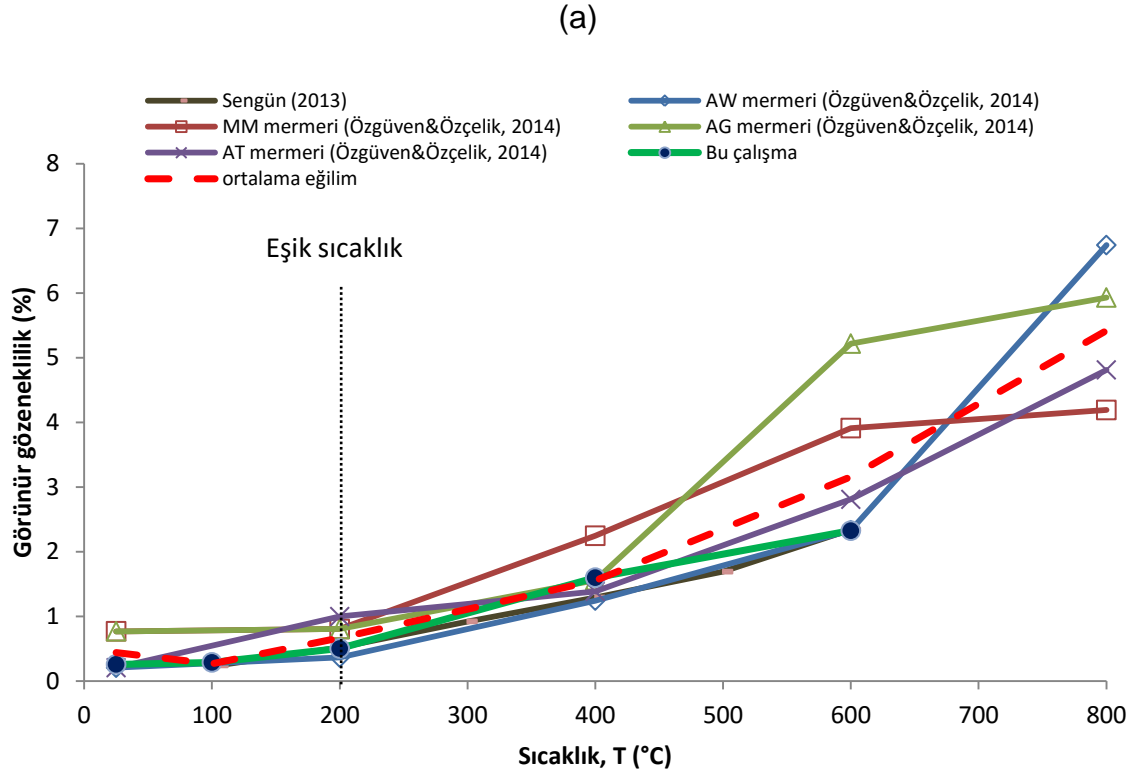
(c) P-dalga hızı:

Benzer amaçlar doğrultusunda mermerler için sıcaklıkla değişen P-dalga hızlarını inceleyen çalışmalar karşılaştırılmış ve bu çalışmaların ortalama eğilim grafiği çizilmiştir (Şekil 5.9). İncelenmiş tüm mermerler için Şekil 5.9a'da gösterilen ortalama eğilime göre, sıcaklığın artmasıyla P-dalga hızının azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın belirgin şekilde başladığı 100°C sıcaklık eşik sıcaklık değeri olarak değerlendirilmiştir. Bu azalmanın hızı 400°C'den itibaren düşmektedir. Bu tez çalışmasında sıcaklıkla değişen P-dalga hızı grafiğinin eğilimi ile tüm çalışmaların ortalama grafiğinin eğilimi birbiriyle oldukça uyum göstermektedir.

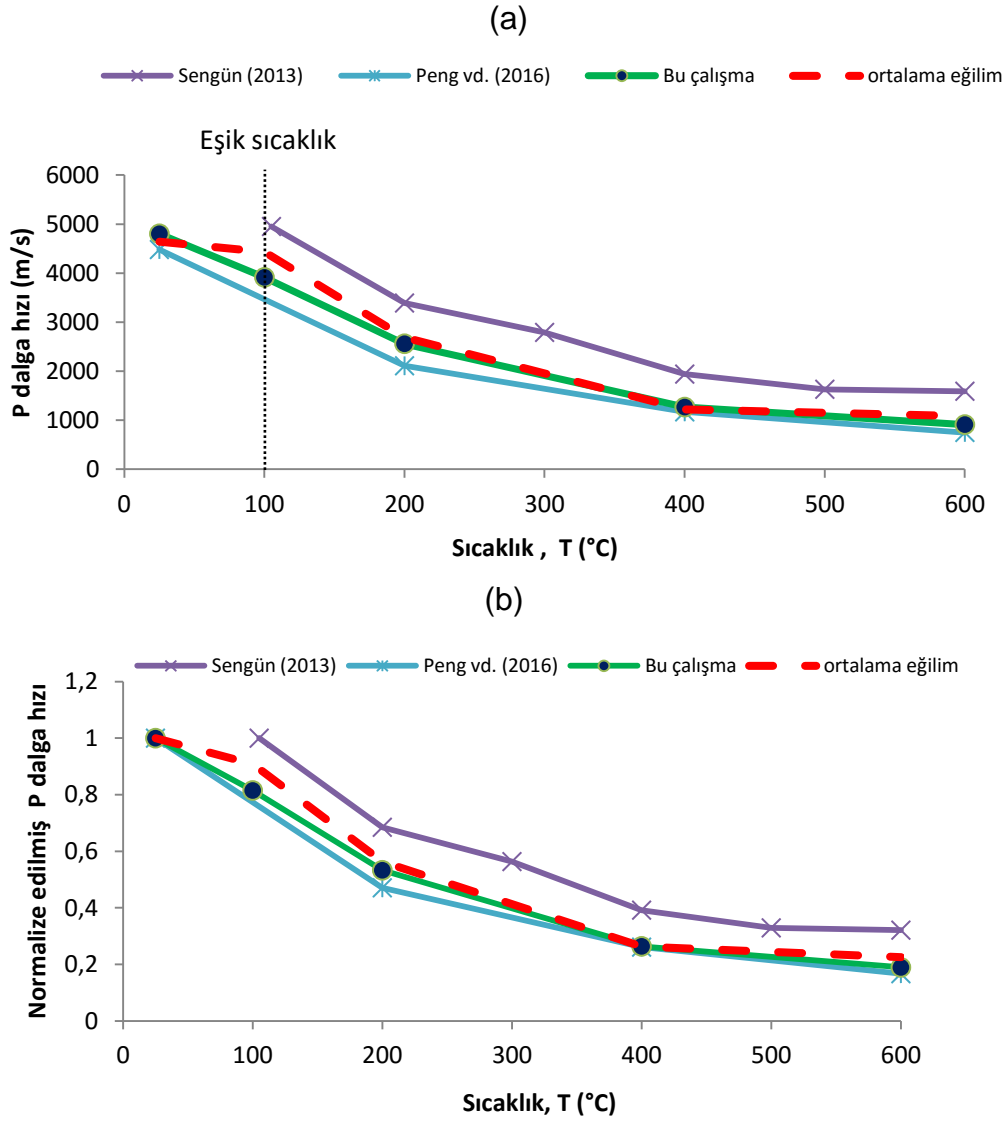
Benzer amaçla yapılan çalışmalardan elde edilen sıcaklık-normalize edilmiş P-dalga hızı ilişkileri incelenmiştir (Şekil 5.9b). Söz konusu özelliğin mermerlerde sıcaklıkla değişimi hakkında çok fazla çalışma bulunmamasına rağmen, ulaşılabilen çalışmalarda ([33], [34]) P-dalga hızının sıcaklık artışından oldukça fazla etkilendiğini görülmektedir. Normalize edilmiş P-dalga hızının, örneklerin ısıtılmasıyla birlikte hızlı bir şekilde azalması, belirli bir eşik değeri belirlenmesine imkan vermemektedir.



Şekil 5.7. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) birim hacim ağırlık ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.



Şekil 5.8. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) gözeneklilik ve (b) bunların normalize edilmiş sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.



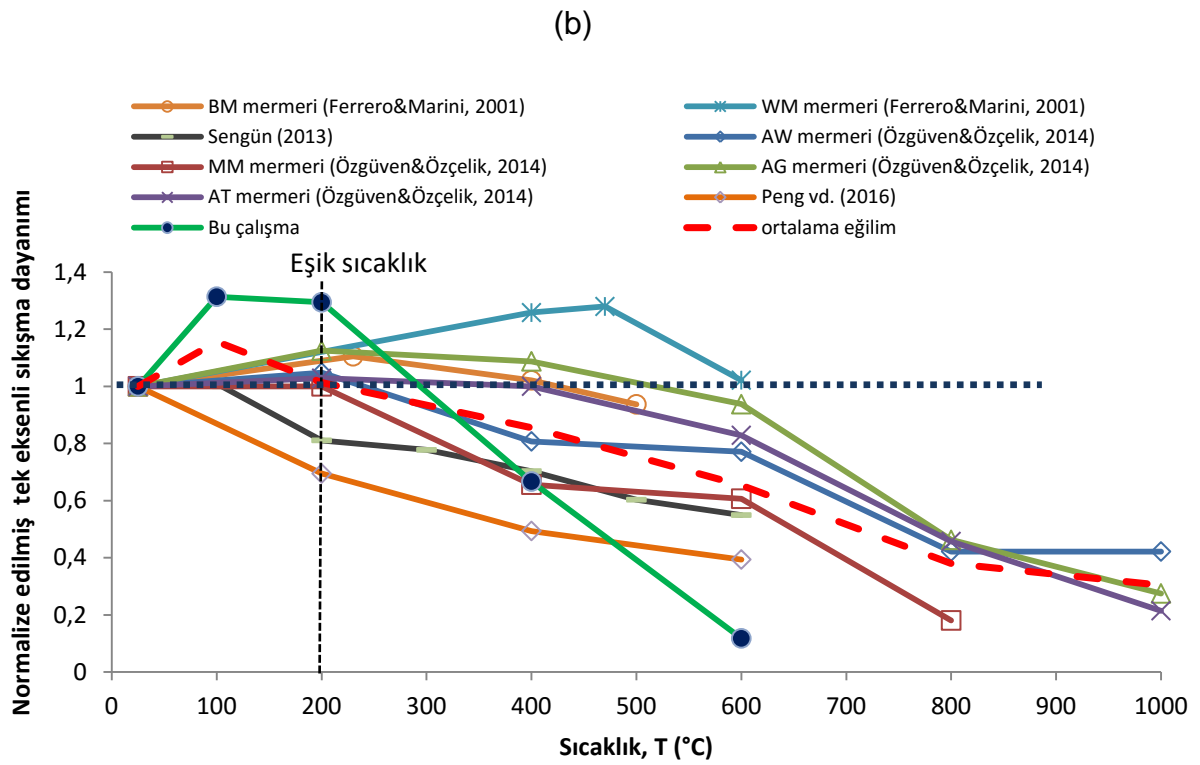
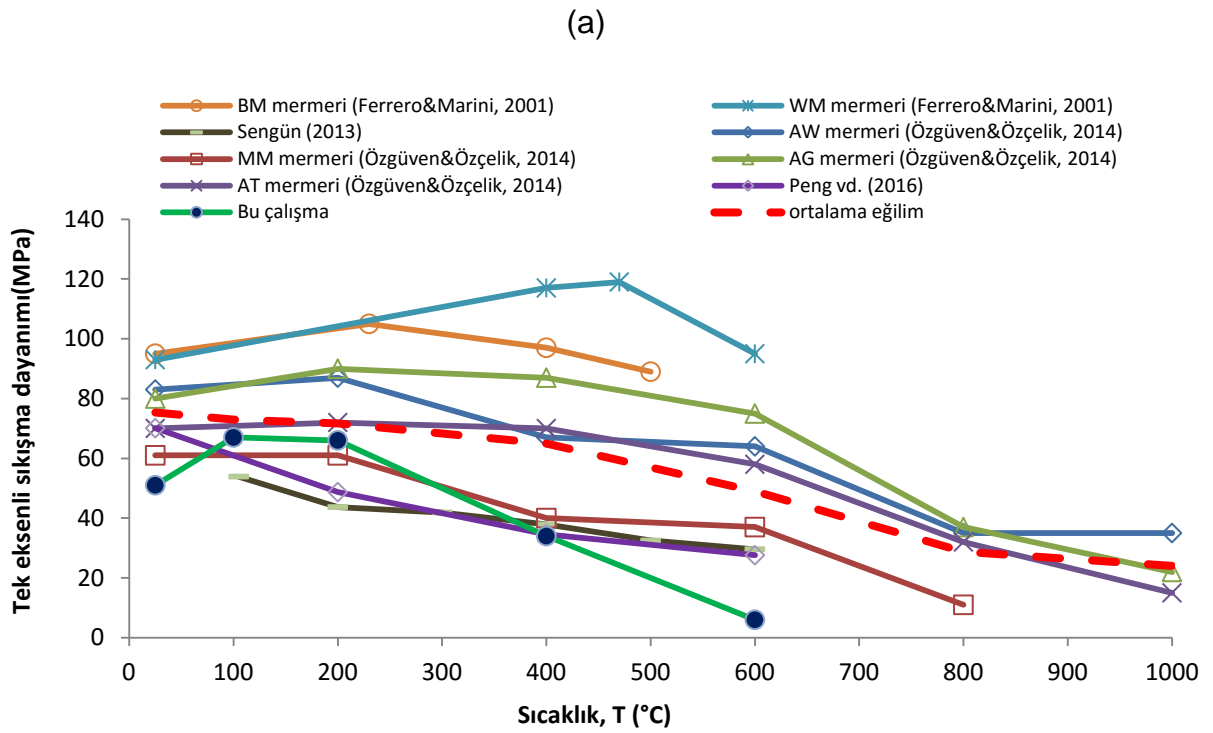
Şekil 5.9. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) P-dalgası hızı ve (b) bunların normalize edilmiş sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.

5.2.2 Mekanik Özelliklerin Karşılaştırılması

(a) Tek eksenli sıkışma dayanımı:

Bu tez çalışmasında mermerin sıcaklıkla değişen tek eksenli sıkışma dayanımı ve daha önce mermerlerle ilgili benzer çalışmalar yapmış araştırmacıların sıcaklık-tek eksenli sıkışma dayanım ilişkileri Şekil 5.10'da karşılaştırılarak grafiklerin ortalama eğilimleri belirlenmiştir.

Şekil 5.10a'ya göre, düşük sıcaklıklarda tek eksenli sıkışma dayanımları farklı olan mermer örneklerinin, sıcaklığın artmasıyla genel olarak dayanımları azalmaktadır. Ortalama eğilim çizgisine göre 0-200°C aralığında çok fazla değişmeyen tek



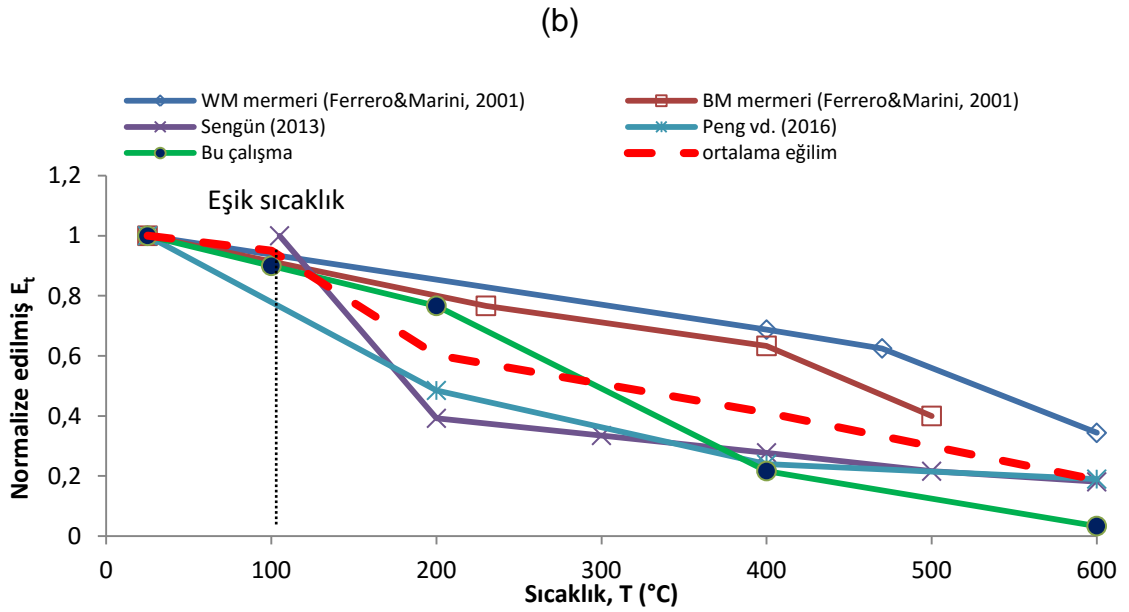
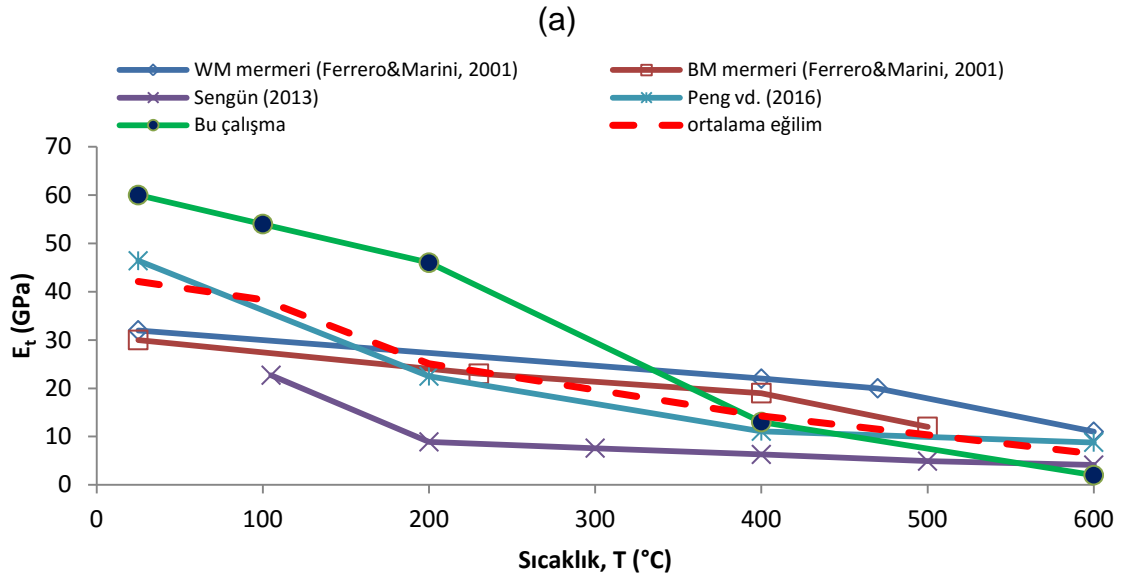
Şekil 5.10. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) tek eksenli sıkışma dayanımları ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.

eksenli sıkışma dayanımı, 200-400°C arasında az miktarlarda azalmaya başlamış, 400-800°C arasında düzenli bir şekilde azalmış, 800°C'den sonra ise azalmasını sürdürmüştür. Ortalama eğilim çizgisiyle bu tez çalışmasında elde edilen değişim grafiği 100°C ve 200°C dışındaki diğer sıcaklıklar için uyumludur. Söz konusu uyumsuz sıcaklık aralığı, tıpkı bu çalışmada olduğu gibi, diğer bazı çalışmalarda ([17], [19]) da söz konusudur. Ortalama eğilime göre 100-200°C sıcaklıklar arasında, tek eksenli sıkışma dayanımı her ne kadar sabit gibi görünüyorsa da, kimi çalışmalar için azalmış kimisinde artmıştır. Ancak bu dalgalanmalar yaklaşık 10 MPa civarındadır. Ferrero ve Marini [39]'nin de belirttiği üzere, örneklerde gözle fark edilebilen herhangi bir anizotropi bulunmasa bile mikroskopik ölçekteki bir anizotropinin kayacın dayanımı üzerinde etkili olabileceği olasılığı dikkate alınarak, bu dalgalanmalar büyük farklılıklar olarak değerlendirilmemiştir.

Aynı kaya türünde yapılmış benzer çalışmaların sıcaklık-normalize edilmiş tek eksenli sıkışma dayanımı grafikleriyle bu grafiklerin ortalama eğilimleri Şekil 5.10b'de verilmiştir. Şekil 5.10b'ye göre sıcaklığın 200°C'nin üzerine çıkması durumunda mermer örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımındaki sürekli azalma göz önünde bulundurularak, söz konusu sıcaklığın mermerin dayanımı açısından eşik sıcaklık değeri olabileceği söylenebilir.

(b) Elastisite modülü:

Bu tez çalışmasında mermerin sıcaklıkla değişen elastisite modülü (tanjant) ve daha önce mermerlerle ilgili benzer çalışmalar yapmış araştırmacıların sıcaklık-elastisite (tanjant) modülü ilişkileri Şekil 5.11'de karşılaştırılarak grafiklerin ortalama eğilim çizgisi belirlenmiştir. Şekil 5.11a'ya göre, başlangıçta farklı elastisite modülü değerlerine sahip mermer örneklerinin, elastisite modüllerinde sıcaklığın artmasıyla genel olarak bir azalmanın meydana geldiği söylenebilir. Elastisite modülünün 200°C'ye kadar hızlı bir azalma gösterdikten sonra sıcaklık arttıkça azalma hızı düşmektedir. Bu tez çalışmasında belirlenen sıcaklık-elastisite modül grafiğiyle ortalama eğilimin grafiği uyumlu birlikte, elastisite modülünün sıcaklık artışıyla belirgin olarak azaldığı eşik sıcaklık değerleri farklıdır. Örnekler hemen hemen aynı mineralojik bileşime sahip olsalar bile, farklı basınç ve sıcaklık koşullarında oluşmuş olduklarından bazı mühendislik özellikleri ve dışarıdan gelen müdahaleler (sıcaklık, basınç vb.) karşısında göstermiş oldukları tepkilerinde farklılık göstermeleri olasıdır. Bu nedenle grafiklerdeki bazı sıcaklıklarda elastisite



Şekil 5.11. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) elastisite modülleri ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.

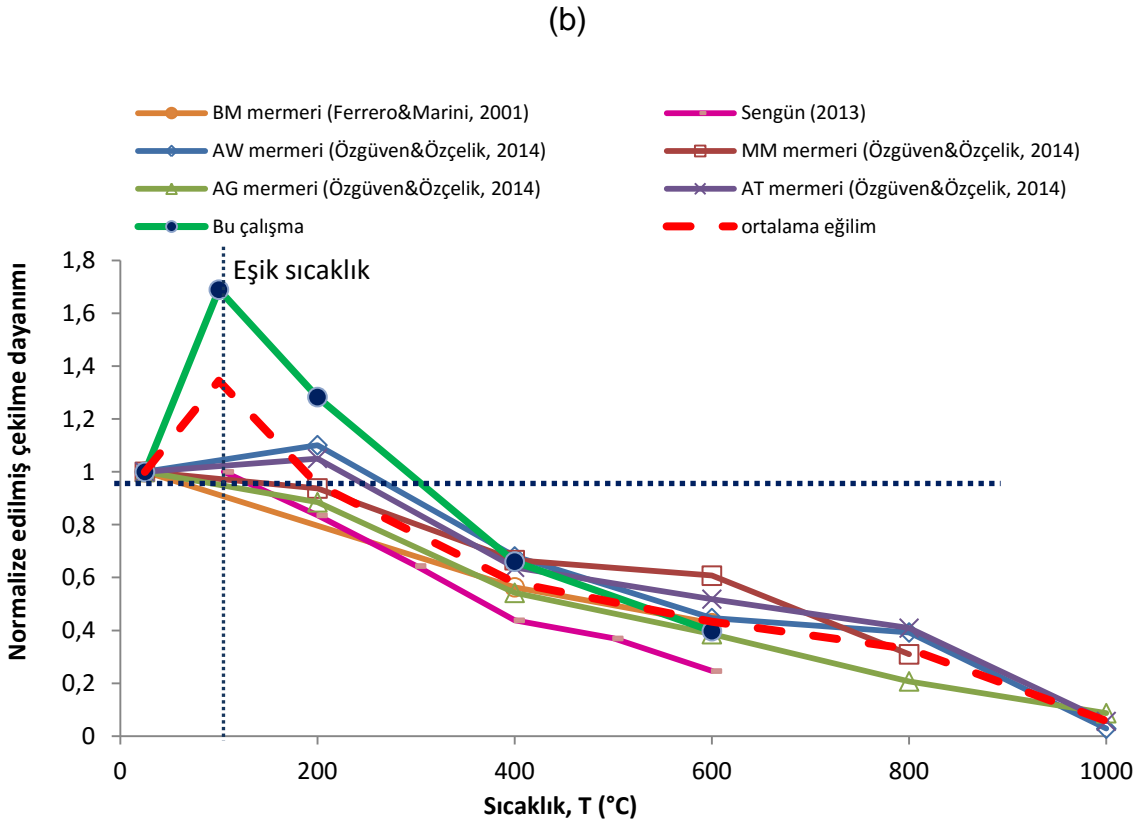
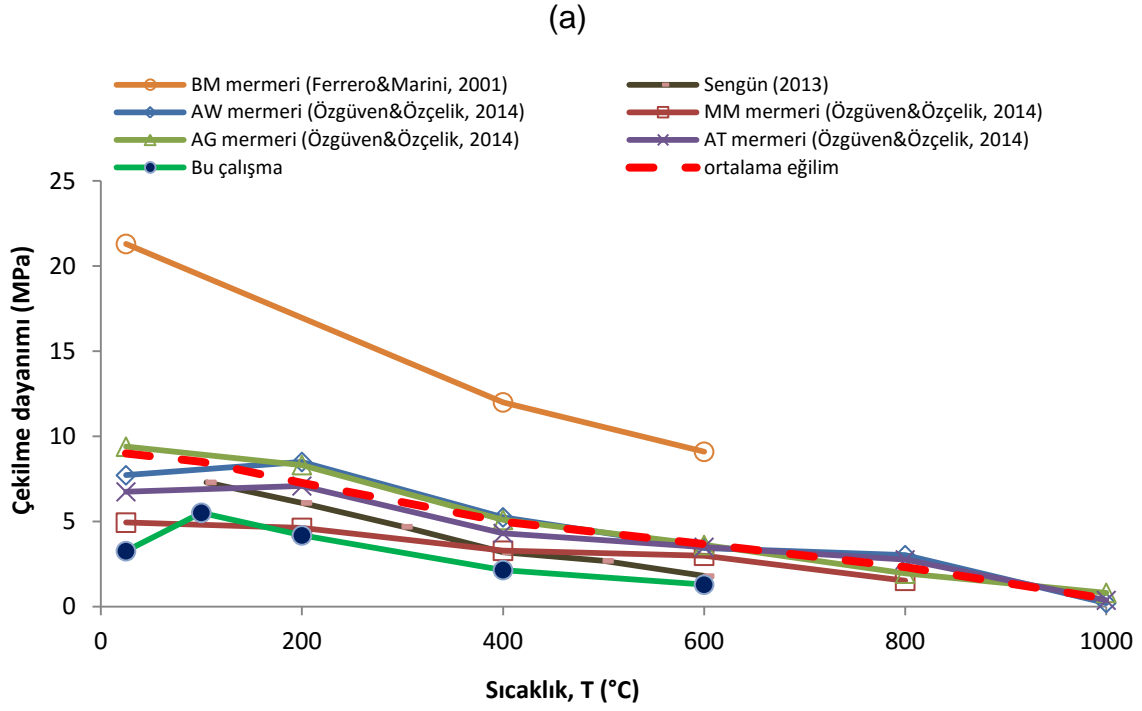
modülünün azalma hızı farklı olsa bile, genel anlamda sıcaklık artışıyla elastisite modülünün azaldığı literatürde ulaşılabilen bütün çalışmaların ortak sonucudur.

Benzer amaçlarla yapılmış çalışmalara ait sıcaklık-normalize edilmiş elastik modül grafikleriyle bu grafiklerin ortak eğilimleri Şekil 5.11b'de verilmiştir. Ortalama eğilim çizgisiyle bu tez çalışmasında belirlenen sıcaklık-elastisite modül grafiği birbirleriyle uyum göstermektedir. Ortalama eğilim çizgisinin durumuna göre, elastisite modülü açısından belirgin değişimin gözlemlendiği bir eşik sıcaklık değeri (100°C) belirlenmiştir.

(c) Çekilme dayanımı:

Benzer amaçlar doğrultusunda mermerler için sıcaklıkla değişen çekilme dayanımlarının incelendiği çalışmalar karşılaştırılmış ve bu çalışmaların ortalama eğilim çizgisi çizilmiştir (Şekil 5.12). Şekil 5.12a incelendiğinde, düşük sıcaklıklarda farklı çekilme dayanımlarına sahip mermer örneklerinin, sıcaklığın artmasıyla birlikte genel olarak çekilme dayanımlarında bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu çalışmada tayin edilen çekilme dayanımı-sıcaklık ilişkisi grafiğiyle, ortalama eğilim çizgisi uyum göstermektedir.

Şekil 5.12a'ya göre, düşük sıcaklıklarda farklı çekilme dayanımlarına sahip mermer örneklerinin, sıcaklığın artmasıyla genel olarak çekilme dayanımlarında bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu çalışmada çizilen çekilme dayanımı-sıcaklık grafiğiyle, tüm çalışmalardan elde edilen ortalama eğilim çizgisi uyum göstermektedir. Şekil 5.12b'ye göre, çalışmaların çoğunda 100°C'den itibaren normalize edilmiş çekilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Ancak bu çalışmada kullanılan mermer örneğiyle birlikte üç mermer türünde (AW ve AT) 200°C'ye doğru çekilme dayanımının artmış olmasından kaynaklı, normalize edilmiş çekilme dayanımları lacivert kesik çizgilerle çizilmiş olan "1" çizgisinin tam üstünde ve/veya üzerinde kalmıştır. Bu durum, söz konusu bu mermerlerde 200°C'ye kadar örneklerin doğal örneklere göre çekilme dayanımının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak sıcaklığın artmasıyla artan çekilme dayanımı değerleri, Şekil 5.12a'da görüldüğü gibi, ihmal edilebilecek boyutta olup, çekilme dayanımının genel olarak sıcaklık artışıyla azaldığı sonucuna varılmaktadır. Ortalama genel eğilim çizgisine göre ise, 100°C'den itibaren normalize edilmiş çekilme dayanımları sürekli azalmaktadır.



Şekil 5.12. Mermer örnekleri için farklı araştırmacılar tarafından tayin edilmiş (a) çekilme dayanımları ve (b) bunların normalize edilmiş değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin karşılaştırması.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Isıl etkiye maruz kalmış granit ve mermer örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin sıcaklıkla değişiminin araştırılması amacıyla gerçekleştirilen bu tez çalışmasında elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- 1) İncelenen granit ve mermer örneklerinin sıcaklık arttıkça, küçük dalgalanmalar olmakla birlikte, mineralojik bileşimlerinin sıcaklıktan belirgin şekilde etkilenmediği belirlenmiştir. Granit örneklerinin içerdikleri mineraller sıcaklık artışına bağlı olarak özellikle 600°'den yüksek sıcaklıklarda kırılmışlar ve genel olarak renk tonlarında açılma olmuştur. Mermer örneklerinde ise kalsitin 600°C'den yüksek sıcaklıklarda şekerlenme yapısı göstererek parçalanması bu örneklerin kalsinasyona uğradığının göstergesi olarak değerlendirilmektedir.
- 2) Minerallerin parçalanmasına bağlı olarak mineraller arası boşlukların artması, kayacın içerdği mikro kırıkların genişlemesine ve yeni kırıkların oluşmasına neden olarak örneklerin görünür gözenekliliğini arttırmış olması muhtemeldir.
- 3) Granit ve mermer örnekleri suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi sınıflamasına göre sırasıyla; çok yüksek duraylılık-düşük duraylılık, yüksek duraylılık-çok düşük duraylılık sınıfları aralığında yer almaktadır. Ancak sıcaklığın granit ve mermer örnekleri için sırasıyla 800°C ve 350°C'yi aşması halinde, her iki kaya türü düşük duraylılığa sahip olmakta ve bu durum doğada çok sayıda ıslanma-kuruma sürecine maruz kalabilecek bu tür kayaların yapı malzemesi olarak kullanılmaları halinde, ilgili yapılarda meydana gelebilecek olası bir yangın sonrasında dağılmaya maruz kalabileceklerine işaret etmektedir.
- 4) Örneklerin gerilme-birim deformasyon eğrileri, ısıl etkinin granit ve mermer örneklerinin yenilme davranışının kırılığandan sünümlüye geçerek değişmesine neden olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar granit ve mermerde yapılmış önceki çalışmaların sonuçlarını desteklemektedir.
- 5) X-ışınları CT yöntemiyle tayin edilen gözeneklilik değerleri ile ISRM (2007)'nin önerdiği yöntem kullanılarak tayin edilen gözeneklilik değerleri genellikle uyum göstermekle birlikte, granitte 800°C'den, mermerde ise 400°C'den daha yüksek sıcaklıklarda X-ışınları CT yöntemiyle tayin edilen gözeneklilik değerleri, diğer yöntemden elde edilen sonuçlara göre daha hızlı

şekilde artmaktadır. Ayrıca X- ışınları CT görüntüleri, özellikle 600°C'den sonra granitteki kırıkların arttığını göstermektedir. Bu da X-ışınları CT yöntemiyle belirlenen gözeneklilikteki artışı desteklemektedir.

- 6) Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ile granitler ve mermerler üzerinde yapılmış önceki benzer çalışmaların sonuçları karşılaştırıldığında; fiziksel ve mekanik özelliklerin sıcaklığa bağlı değişimi açısından sonuçların genel olarak aynı eğilimde oldukları anlaşılmaktadır. Buna göre karşılaştırılan çalışmalar için belirlenen ortalama genel eğilim çizgisi esas alınarak, her iki tür kaya için sıcaklık artışına bağlı olarak araştırılan özelliklerde değişimlerin başladığı eşik sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Buna göre, genel olarak granitin incelenen tüm özelliklerinin sıcaklık artışından etkilenmeye başladığı eşik sıcaklık yaklaşık 400°C iken, mermerde ise 100°C olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar dikkate alınarak, gelecekte yapılacak benzer çalışmalar için yararlı olabileceği düşünülen öneriler aşağıda sunulmuştur.

- 1) Bu çalışmada incelenen kaya örneklerinde, bu tez çalışmasında kullanılan mineralojik yöntemlerle, özellikle granitte sıcaklık artışıyla birlikte minerallerin sadece fiziksel olarak değişimini görmek mümkün olmuştur. Kayacın özelliklerinin sıcaklıkla değişiminde kayacı oluşturan minerallerin birebir etkisinden bahsedebilmek için yapılacak kimyasal analizlerle bu minerallerin oluşum koşulları çözümlenerek hazırlanacak olan sıcaklık-basınç faz diyagramlarından minerallerin faz değişim sıcaklıklarını belirlemek üzere daha ayrıntılı araştırmaların yapılması önerilir.
- 2) Bu tez çalışmasında fiziksel ve mekanik özellik deneyleri birer örnek üzerinde yapılmıştır. Ancak daha sonra bu konu üzerinde yapılabilecek çalışmalarda kayaların ısı etkiyle değişen özelliklerinin daha iyi yorumlanabilmesi açısından daha fazla sayıda örnek kullanılması önerilmektedir.
- 3) X-ışınları CT yöntemiyle tayin edilen gözeneklilik değerleriyle ISRM tarafından önerilen yöntemle göre tayin edilen görünür gözeneklilik değerleri arasında belirli bir sıcaklığa kadar uyum varken, bu sıcaklıktan sonra bir miktar farklılık görülmektedir. Bu nedenle her iki yöntemin daha iyi karşılaştırılabilmesi açısından, piknometre deneyi de yapılarak belirlenecek özgül ağırlık değerleri kullanılarak gözenekliliğin tayin edilmesi de önerilir.

KAYNAKLAR

- [1] Dimitriyev, A. P., Kusyayev, L. S., Protasov, Y. I., and Yamschichikov, V. S., *Physical Properties of Rocks at High Temperature, Moskva, Nedra. 1969.*
- [2] Sygala, A., Bukowska, M., and Janoszek, T., High Temperature Versus Geomechanical Parameters of Selected Rocks—the Present State of Research, *J. Sustain. Min.*, vol. 12, no. 4, pp. 45–51, **2013.**
- [3] Ranjith, P. G., Vieta, D. R., Chen, B. J., and Perera, M. S. A., Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behaviour of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure, *Eng. Geol.*, vol. 151, pp. 120–127, **2012.**
- [4] Mao, X., Zhang, L., Li, T., and Liu, H., Properties of failure mode and thermal damage for limestone at high temperature, *Min. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 290–294, **2009.**
- [5] Chen, Y., Ni, J., Shao, W., and Azzam, R., Experimental study on the influence of temperature on the mechanical properties of granite under uni-axial compression and fatigue loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 56, pp. 62–66, **2012.**
- [6] Zhang, L., Mao, X., Liu, R., Guo, X., and Ma, D., The Mechanical Properties of Mudstone at High Temperatures: an Experimental Study., *Rock Mech. Rock Eng.*, **2013.**
- [7] Saiang, C. M., Influence of heat on the physical and mechanical properties of selected rock types, pp. 15–22, **2011.**
- [8] Mao, X., Zhang, L., Liu, R., and Ma, D., Mechanical and Thermal Damage Properties of Sandstone at High Temperatures Experimental method, *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 19, pp. 3137–3150, **2014.**
- [9] Shao, S.S.Ranjith, P.G and Chen, B. K., Influence of high temperature on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granites with different grain sizes, *Am. Rock Mech. Assoc.*, vol. the 47th U, **2013.**
- [10] Shao, S., Ranjith, P. G., Wasantha, P. L. P., and Chen, B. K., Geothermics Experimental and numerical studies on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite at high temperatures: An application to geothermal energy, *Geothermics*, vol. 54, pp. 96–108, **2015.**
- [11] Kumari, W. G. P., Ranjith, P. G., Perera, M. S. A., and Chen, B. K., Investigation on temperature dependent mechanical behaviour of Australian granite, **2016.**
- [12] Dwivedi, R. D. D., Goel, R. K. K., Prasad, V. V. R. V. R., and Sinha, A., Thermo-mechanical properties of Indian and other granites, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 45, no. 3, pp. 303–315, **2008.**
- [13] Liu, S. and Xu, J., International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Study on dynamic characteristics of marble under impact loading and high temperature, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 62, pp. 51–58, **2013.**
- [14] Malkowski, P., Kaminski, P., and Skrzykowski, K., Impact of Heating of carboniferous rocks on their mechanical parameters, *AGH J. Min. Geo.*

- Engin.*, vol. 36, no. 1, pp. 142–231, **2012**.
- [15] Keshavarz, M., Pellet, F. L., and Lorete, B., Damage and Changes in Mechanical Properties of a Gabbro Thermally Loaded up to 1,000°C, *Pure Appl. Geophys.*, vol. 167, no. 12, pp. 1511–1523, **2010**.
- [16] Hajpal, M. and Török, Á., Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat, in *Environmental Geology*, vol. 46, no. 3–4, pp. 311–322, **2004**
- [17] Ozguven, A. and Ozcelik, Y., Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones, *Eng. Geol.*, vol. 183, pp. 127–136, **2014**.
- [18] Liu, S. and Xu, J., International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 71, pp. 188–193, **2014**.
- [19] Ferrero, A. M. and Marini, P., Experimental Studies on the Mechanical Behaviour of two Thermal Cracked Marbles, *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 57–66, **2001**.
- [20] Homand-Etienne, F. and Houpert, R., Thermally Induced Microcracking in Granites: Characterization and Analysis, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 26, no. 2, pp. 125–134, **1989**.
- [21] Chakrabarti, B., Yates, T., and Lewry, A., Effect of fire damage on natural stonework buildings, *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 1, pp. 539–544, **1996**.
- [22] David, C., Menendez, B., and Darot, M., Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 36, pp. 433–448, **1999**.
- [23] Chaki, S., Takarli, M., and Agbodjan, W. P., Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions, *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 7, pp. 1456–1461, **2008**.
- [24] Takarli, M. and Prince-Agbodjan, W., Temperature Effects on Physical Properties and Mechanical Behavior of Granite: Experimental Investigation of Material Damage, *J. ASTM Int.*, vol. 5, no. 3, pp. 1–13, **2008**.
- [25] Santos, J. P. L., Rosa, L. G., and Amaral, P. M., Temperature effects on mechanical behaviour of engineered stones, *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 171–174, **2011**.
- [26] Saiang, C. and Miskovsky, K., Effect of heat on the mechanical properties of selected rock types - a laboratory study, in *Harmonising Rock Engineering and the Environment*, Qian, Zhou (eds.), Taylor and Francis Group, London, pp. 815–820, **2012**
- [27] Liu, S. and Xu, J., An experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks, *Eng. Geol.*, vol. 185, pp. 63–70, **2015**.
- [28] Yang, S., Ranjith, P. G., Jing, H., Tian, W., and Ju, Y., An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite

- after exposure to different high temperature treatments, *Geothermics*, vol. 65, pp. 180–197, **2017**.
- [29] Yin, T., Shu, R., Li, X., Wang, P., and Liu, X., Comparison of mechanical properties in high temperature and thermal treatment granite, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 26, no. 7, pp. 1926–1937, **2016**.
- [30] Mahmutoglu, Y., Mechanical Behaviour of Cyclically Heated Fine Grained Rock, *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 31, no. 3, pp. 169–179, **1998**.
- [31] Koca, M. Y., Ozden, G., Yavuz, A. B., Kincal, C., Onargan, T., and Kucuk, K., Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 43, pp. 520–530, **2006**.
- [32] Yavuz, H., Demirdag, S., and Caran, S., International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 47, no. 1, pp. 94–103, **2010**.
- [33] Sengun, N., Influence of thermal damage on the physical and mechanical properties of carbonate rocks, *Arab J Geosci.*, pp. 5543–5551, **2014**.
- [34] Peng, J., Rong, G., Cai, M., Yao, M., and Zhou, C., Physical and mechanical behaviors of a thermal-damaged coarse marble under uniaxial compression, *Eng. Geol.*, vol. 200, pp. 88–93, **2016**.
- [35] Hajpál, M., Changes in sandstones of historical monuments exposed to fire or high temperature, *Fire Technol.*, vol. 38, no. 4, pp. 373–382, **2002**.
- [36] Wu, G., Wang, Y., Swift, G., and Chen, J., Physico-mechanical and thermo-mechanical characterization of sandstone, in *Harmonising Rock Engineering and the Environment*, Qian, Zhou (eds.), Taylor and Francis Group, London, pp. 881–886, **2012**.
- [37] Török, Á. and Vásárhelyi, B., Rigidity of sandstone at elevated temperatures, in *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future (Ulusay vd. eds.)*, Taylor and Francis Group, London, **2016**.
- [38] Tian, H., Kempka, T., Yu, S., and Ziegler, M., Mechanical Properties of Sandstones Exposed to High Temperature, *Rock Mech. Rock Eng.*, pp. 321–327, **2016**.
- [39] Ding, Q., Feng, J., Mao, X., Ma, D., Yu, B., and Song, S., Experimental Investigation of the Mechanical Behavior in Unloading Conditions of Sandstone After High-Temperature Treatment, *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 49, no. 7, pp. 2641–2653, **2016**.
- [40] Brotóns, V., Tomás, R., Ivorra, S., and Alarcón, J. C., Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite, *Eng. Geol.*, vol. 167, pp. 117–127, **2013**.
- [41] Tian, H., Mei, G., and Yan, G. J., High-Temperature Influence on Mechanical Properties of Diorite, *Rock Mech. Rock Eng.*, pp. 1–6, **2017**.
- [42] Tian, H., Ziegler, M., and Kempka, T., Physical and mechanical behavior of claystone exposed to temperatures up to 1000 C, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 70, pp. 144–153, **2014**.
- [43] ISRM, *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization*,

Testing and Monitoring; 1974–2006, R.Ulusay, J.A. Hudson (eds.), Suggested Methods prepared by the ISRM Commission on Testing Methods, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, p. 628, 2007.

- [44] Glagoleff, A. A., On the geometrical methods of quantitative- ve mineralogic analysis of rocks, *Trans. Inst. Econ. Miner. Met. Moscow*, vol. 59, **1933**.
- [45] Erkan, Y., *Magmatik Petrografi, JMO Yayınları*, p. 175, **2013**.
- [46] ASTM, *Inorganic index to the powder diffraction file. Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Philadelphia., 1972.*
- [47] Gündoğdu, M. N., Neojen yaşlı Bigadiç sedimanter baseninin jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi. Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Enstitüsü, Ankara (yayımlanmamış)., **1982**.
- [48] Wu, G., Wang, Y., Swift, G., and Chen, J., Laboratory Investigation of the Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Sandstone, *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 809–816, **2013**.
- [49] Obara, Y., Tanikura, I., Jung, J., Shintani, R., and Watanabe, S., Evaluation of Micro-damage of Concrete Specimens under Cyclic Uniaxial Loading by X-ray CT Method, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 14, no. 8, pp. 433–443, **2016**.
- [50] Hirono, T., Takahashi, M., and Nakashima, S., In situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT, *Eng. Geol.*, vol. 70, pp. 37–46, **2003**.
- [51] Feng, X., Chen, S., and Zhou, H., Real-time computerized tomography (CT) experiments on sandstone damage evolution during triaxial compression with chemical corrosion, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 41, pp. 181–192, **2004**.
- [52] Sufian, A. and Russell, A. R., International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Microstructural pore changes and energy dissipation in Gosford sandstone during pre-failure loading using X-ray CT, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 57, pp. 119–131, **2013**.
- [53] Zhao, G., Russell, A. R., Zhao, X., and Khalili, N., International Journal of Solids and Structures Strain rate dependency of uniaxial tensile strength in Gosford sandstone by the Distinct Lattice Spring Model with X-ray micro CT, *Int. J. Solids Struct.*, vol. 51, no. 7–8, pp. 1587–1600, **2014**.
- [54] Meier, T., Rybacki, E., Backers, T., and Dresen, G., Influence of Bedding Angle on Borehole Stability: A Laboratory Investigation of Transverse Isotropic Oil Shale, *Rock Mech. Rock Eng.*, pp. 1535–1546, **2015**.
- [55] Ge, X., Ren, J., Pu, Y., Ma, W., and Zhu, Y., Real-in time CT test of the rock meso-damage propagation law, *Sci. China Ser. E Technol. Sci.*, vol. 44, no. 3, pp. 328–336, **2001**.
- [56] Yang, S.-Q., Ranjith, P. G., Huang, Y.-H., Yin, P.-F., Jing, H.-W., Gui, Y.-L., and Yu, Q.-L., Experimental investigation on mechanical damage characteristics of sandstone under triaxial cyclic loading, *Geophys. J. Int.*, vol. 201, no. 2, pp. 662–682, **2015**.

- [57] Mukunoki, T., Mikami, K., and Sato, T., Image simulation of wetting and drying process in sandy soils by m-focus X-ray CT scanner, in *Proc. of the 2nd Japan-Korea Joint Workshop on Unsaturated Soils and Ground*, pp. 221–228, **2011**.
- [58] Obara, Y., Rapor için PowerPoint Sunumu Kumamoto Üniversitesi, Japonya, **2017**.
- [59] STRECKEISEN, A., To each plutonic rock its proper name, *Earth-Science Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–33, **1976**.
- [60] Géraud, Y., Mazerolle, F., and Raynaud, S., Comparison Between Connected and Overall Porosity of Thermally Stressed Granites, *J. Struct. Geol.*, vol. 14, no. 8/9, pp. 981–990, **1992**.
- [61] Yu, W., Bao-lin, L., Hai-yan, Z., Chuan-liang, Y., Zhi-jun, L., and Zhi-qiao, W., Thermophysical and Mechanical Properties of Granite and Its Effects on Borehole Stability in High Temperature and Three-Dimensional Stress, *The Sci. World. J.*, vol., **2014**.
- [62] Gökceoğlu, C., Ulusay, R., and Sönmez, H., Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles, *Eng. Geol.*, vol. 57, no. 3, pp. 215–237, **2000**.
- [63] Gamble, J. C., Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks, Doktora tezi, Illinois Üniversitesi (yayınlanmamış), **1971**.
- [64] Ulusay, R., Gökceoğlu, C., and Binal, A., *Kaya Mekaniği Laboratuvar DeneYleri, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası*, p.167, **2011**.
- [65] Stanmore, B. R. and Gilot, P., Review — calcination and carbonation of limestone during thermal cycling for CO₂ sequestration, *Fuel Proc. Tech.*, vol. 86, pp. 1707–1743, **2005**.
- [66] Gomez-Heras, M., Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Hajpál, M., Török, a, and Varas, M. J., Evolution of porosity in Hungarian building stones after simulated burning, *Herit. Weather. Conserv. HWC-2006*, no. September 2015, pp. 513–519, **2006**.
- [67] Tullis, J. and Yund, R. A., Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspar: mechanisms and microstructures, *Geology*, vol. 15, pp. 606–609, **1987**.
- [68] GSA, Rock-Color Chart, *The Rock Color Chart Committee, The Geological Society of America, Boulder, Colorado*, **1975**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Dilek KARAPINAR

Doğum Yeri: Niğde

Medeni Hali: Evli

E-posta: dilekrapinar@itu.edu.tr

Adresi: Güzelkent Mahallesi, 366. Sokak, Metro Yaşam Sitesi, 4B Blok, No: 6, Etimesgut, Ankara

Eğitim

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2008 – 2013)

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2014 – 2017)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (İyi)

İş Deneyimi

Haziran 2013 – Haziran 2014 : Akademi Jeoloji Jeoteknik Etüd Proje Mühendislik Müş. Ltd. Şti., Proje Mühendisi

Mayıs 2017 - : İ. T. Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi

Deneyim Alanları

Mühendislik jeolojisi, kaya ve zemin mekaniği

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu İle Katıldığı Toplantılar

EKLER

EK-1

GRANİT ÖRNEKLERİNİN MİNERALOGİK BİLEŞİMİ

EK-1.1. Granit örneklerinin sıcaklığa maruz kalmadan önce yüzdece mineralojik bileşimleri

Örnek Adı	Plajiyoklaz	Alkali feldispat	Kuvars	Biyotit	Amfibol	Manyetit
G1	36,2	23,7	19,7	13,1	5,3	1,9
G2	41,5	20,4	19,4	11,5	5,6	1,6
G3	37,3	30,7	16,7	11,9	2,8	0,5
G4	36,9	25,6	18,2	10,4	5,2	3,7
G5	39,2	30,1	14,5	11,5	2,9	1,8
G6	37,2	33,8	15,5	11,4	1,3	0,8
G7	33,3	33,1	16,5	15,5	0,7	0,9

EK-1.2. Granit örneklerinin sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra yüzdece mineralojik bileşimleri

Örnek Adı	Plajiyoklaz	Alkali feldispat	Kuvars	Biyotit	Amfibol	Manyetit
G2 (100°C)	53,13	20,67	11,53	9,80	3,73	1,13
G3 (200°C)	42,06	24,65	17,15	11,19	4,02	0,94
G4 (400°C)	29,87	30,60	13,53	19,47	5,20	1,33
G5 (600°C)	48,47	27,67	14,07	8,73	0,87	0,20
G6 (800°C)	30,33	23,07	24,67	18,93	1,00	2,00
G7 (1000°C)	40,20	24,10	17,40	16,60	0,71	0,64

EK-2

KAYA MEKANİĞİ DENEY SONUÇLARI

EK-2a

KAYAÇLARIN FİZİKSEL VE İNDEKS ÖZELLİKLERİ

EK-2a.1. Granit örneklerinin fiziksel ve indeks özellikleri

Örnek Adı	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Görünür gözeneklilik (%)	P-dalga hızı (m/s)	Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (%)
G1 (ısıtılmamış)	26,08	0,62	4115,25	98,77
G2 (100°C)	26,10	0,95	3977,19	98,57
G3 (200°C)	26,07	1,08	3558,7	98,78
G4 (400°C)	25,95	1,24	2726,96	98,66
G5 (600°C)	25,63	2,11	1291,09	92,64
G6 (800°C)	25,14	3,48	1097,61	78,07
G7 (1000°C)	24,86	4,51	515,65	32,33

Ek-2a.2 Mermer örneklerinin fiziksel ve indeks deney sonuçları

Örnek Adı	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Görünür gözeneklilik (%)	P-dalga hızı (m/s)	Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (%)
M1 (ısıtılmamış)	26,42	0,26	4801,45	97,98
M2 (100°C)	26,44	0,29	3913,14	97,79
M3 (200°C)	26,31	0,50	2558,98	92,23
M4 (400°C)	26,02	1,60	1267,43	42,16
M5 (600°C)	25,68	2,32	910,28	6,10

EK-2b

KAYAÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

EK-2b.1 Granit ve mermer örneklerinin elastisite modülleri

Granit	E_t (GPa)	E_{av} (GPa)	E_s (GPa)	Mermer	E_t (GPa)	E_{av} (GPa)	E_s (GPa)
G1 (Isıtılmamış)	39	39	27	M1 (doğal)	60	60	65
G2 (100°C)	45	45	32	M2 (100°C)	54	54	33
G3 (200°C)	44	44	56	M3 (200°C)	46	46	19
G4 (400°C)	40	40	28	M4 (400°C)	13	13	0,638
G5 (600°C)	42	42	18	M5 (600°C)	2	2	4,82
G6 (800°C)	5,5	5,5	2,5				
G7 (1000°C)	0,8	8	5				

E_t : Tanjant modülü
 E_{av} : Ortalama modülü
 E_s : Kiriş modülü

Granit	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Mermer	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)
G1 (doğal)	110	8	M1 (doğal)	51	3
G2 (100°C)	110	9	M2 (100°C)	67	6
G3 (200°C)	123	8	M3 (200°C)	66	4
G4 (400°C)	79	7	M4 (400°C)	34	2
G5 (600°C)	70	4	M5 (600°C)	6	1
G6 (800°C)	40	1			
G7 (1000°C)	20	1			

σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı
 σ_t : Çekilme dayanımı



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

...JEOLAJİ... MÜHÜR... ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 15/06/2017.

Tez Başlığı / Konusu: ...Isıl... Etkiye... Maruz... Kalınış... Giriclit... ve... Mermer... Örneklerinin...
Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimin Araştırılması

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam ...87... sayfalık kısmına ilişkin, 15.06.2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2. 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

15/06/2017

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Dilek Karapınar
Öğrenci No: N13122672
Anabilim Dalı: Jeoloji Mühendisliği
Programı: Jeoloji Mühendisliği - Yüksek Lisans
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Resat ULUSAY

(Unvan, Ad Soyad, İmza)