

**YÜKSEK SICAKLIĞIN YAPI MALZEMESİ OLARAK
KULLANILAN İGNİMBİRİTLERİN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE
PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF
IGNIMBRITES USED AS BUILDING MATERIAL**

NURYILDIZ ŞAHİNER

PROF. DR. ERGÜN TUNCAY

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Annem ve Babam için...



ÖZET

YÜKSEK SICAKLIĞIN YAPI MALZEMESİ OLARAK KULLANILAN İGNİMBİRİTLERİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Nuryıldız ŞAHİNER

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ergün Tuncay

Eylül 2024, 159 sayfa

Kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli düzeyde değişime neden olan faktörlerden biri de yüksek sıcaklıktır. Bu etki kayalar üzerinde kalıcı hasarlar oluşturmakta ve kayaların bozunmasına, dolayısıyla dayanımlarının azalmasına neden olmaktadır. Özellikle yangın sırasında sıcaklıklar zamana bağlı olarak çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Yangın sonrası durum dikkate alınarak yapılan deneyler, genellikle önce ısıtılıp sonra soğutulmuş örnekler üzerinde yapılır ve sıcaklığın etkilerini değerlendirir. Ancak, ülkemizde sadece yapı taşı olarak kullanılan bazı kaya türlerinin sıcaklıkla değişen fiziksel ve mekanik özelliklerini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, yapı taşı olarak kullanılan ignimbiritlerin yüksek sıcaklığa maruz kalmaları durumunda fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimler ile uzun süreli duraylılığına yönelik değerlendirmelere gidebilmek için çatlak ilerlemesi aşamaları eşik gerilme değerlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, Kapadokya Bölgesi'nde yapı taşı olarak üretilen farklı renk ve dokuya sahip blok ignimbirit örnekleri (7 farklı ignimbirit yapı taşı) alınarak, bu örnekler üzerinde (ısı etkiye maruz kalmamış) oda

sıcaklığından 1000°C'ye kadar farklı sıcaklıklara, maruz bırakıldıktan sonra yavaş bir şekilde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Tüm örneklerin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Dayanım deneyleri sırasında Akustik Emisyon (AE) tekniğinden de yararlanılarak gerilme artışına bağlı olarak çatlak ilerleme aşamalarının eşik gerilme değerlerinin de belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunlara ek olarak, seçilen ignimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı olarak mineral değişimi ve çatlak gelişimini gözlemlemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) incelemeler yapılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; sıcaklık arttıkça küçük dalgalanmalar olsa da birim hacim ağırlığı azalmış olup, özgül ağırlık sıcaklıkla belirgin bir değişim göstermemiştir. Özellikle 800°C'de her örnek için tek eksenli sıkışma dayanımı 600°C'ye kıyasla azalmış ve 1000°C'de tekrar artış göstermiştir. Gerilme-birim deformasyon eğrilerinden elde edilen elastik modül değerleri, tek eksenli sıkışma dayanımı testlerinde gözlemlenen davranışlarla uyumlu bulunmuştur. Akustik Emisyon tekniğinden yararlanılarak belirlenen ilksel çatlak başlangıcı ve çatlak birleşimi eşik gerilme seviyelerinin sıcaklıkla değişiminin UCS değerlerinin değişimine paralel ve bu seviyelerin sırasıyla UCS değerlerinin yaklaşık %18'i ve %55'si civarında olduğu tespit edilmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskopundan elde edilen görüntüler değerlendirildiğinde 1000°C'de örneklerin minerallerinde bir değişiklik olmazken kül matriksinde ergimelerin olduğu, bu ergimelerin kaynaklanmaya neden olarak dolaylı yoldan kayacın dayanımını etkilediği düşünülmektedir. 800°C'de çatlak gelişimi görülürken 1000°C'de çatlakların daha derinleştiği ve kül matriksinde kabuklanmalar meydana geldiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Isıl etki, İgnimbirit, Çatlak Gelişimi, Yapı Taşı, Sıcaklık

ABSTRACT

THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF IGNIMBRITES USED AS BUILDING MATERIAL

Nuryıldız ŞAHİNER

Master of Science, Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ergün TUNCAY

September 2024, 159 pages

One of the factors that causes significant changes in the physical and mechanical properties of rocks is high temperature. This effect results in permanent damage to the rocks, leading to their deterioration and consequently a reduction in their strength. During a fire, temperatures can reach very high values over time. Experiments conducted considering the post-fire condition are typically performed on samples that are first heated and then cooled, evaluating the effects of temperature. However, studies investigating the temperature-dependent physical and mechanical properties of certain rock types used solely as building stones in our country are quite limited. This study aims to assess the changes in physical and strength properties and long-term durability of ignimbrites used as building stones when exposed to high temperatures, and to determine the threshold stress values of crack progression stages. For this purpose, ignimbrite samples with different colors and textures produced as building stones in the Cappadocia Region (7 different ignimbrite building stones) were collected. These samples were subjected to various temperatures ranging from room temperature (without any thermal effect) up to

1000°C and then slowly cooled to room temperature. The physical and mechanical properties of all samples were determined and evaluated. During the strength tests, the Acoustic Emission (AE) technique was used to determine the threshold stress values associated with crack progression stages due to stress increase. Additionally, Scanning Electron Microscope (SEM) examinations were conducted on selected ignimbrite samples to observe mineral changes and crack development related to temperature.

According to the results obtained from the study, although there were minor fluctuations, the unit weight decreased with increasing temperature, while the specific gravity did not show significant changes with temperature. Specifically, at 800°C, the uniaxial compressive strength of each sample decreased compared to 600°C, but increased again at 1000°C. The elastic modulus values obtained from the stress-strain curves were found to be consistent with the behaviors observed in the uniaxial compressive strength tests. The changes in the initial crack initiation and crack coalescence threshold stress levels with temperature, determined using the Acoustic Emission technique, were found to be parallel to the changes in UCS values, with these levels being approximately 18% and 55% of the UCS values, respectively. SEM images revealed that at 1000°C, there was no change in the minerals of the samples, but melting in the ash matrix occurred, which is thought to affect the rock's strength indirectly by causing weakening. At 800°C, crack development was observed, while at 1000°C, cracks deepened and spalling occurred in the ash matrix.

Keywords: Thermal effect, Ignimbrite, Crack development, Building stone, Temperature

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi, deneyim ve rehberliğiyle bana yol gösteren, her zaman sabrı ve teşvikiyle yanımda olmuş, akademik ve kişisel gelişimime büyük katkılarda bulunan, değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Ergün Tuncay'a,

Tez savunması sırasındaki öneri ve katkıları için değerli tez jüri üyeleri, Sayın Prof. Dr. Nihat Sinan Işık, Sayın Prof. Dr. Candan Gökçeoğlu, Sayın Prof. Dr. Adil Binal ve Sayın Doç. Dr. Nazlı Tınar Özcan'a,

Örneklerimin Elektron Mikroskop görüntülerini çeken ve deneyimiyle yorumlamamda büyük katkıları olan Sayın Doç. Dr. H. Evren Çubukçu'ya,

Çalışmamda yer alan X-Işını Difraksiyonu analizinden çıkan sonuçları değerlendiren Sayın Prof. Dr. Abidin Temel ve hesaplamalarını bana bütün içtenliğiyle anlatan sevgili hocam Sayın Dr. Güllü Deniz Kulaahçı'ya

Tez kapsamında gerçekleştirilen mineralojik incelemelere sunduğu desteklerden ötürü Sayın Dr. Efe Akkaş ve Sayın Dr. Lütfiye Akın'a,

Aklıma takılan her sorumu tüm nezaketiyle cevaplayan, okula gelemediğim zamanlarda yardımlarıyla stresimi azaltan, canım hocam Sayın Dr. Kemal Cem Solak'a

İnce kesit örneklerimin hazırlanmasında yardımcı olan mühendis Sayın Gülender Demirci ve Maden Teknik Arama'nın ince kesit laboratuvarında çalışan teknisyenlerine,

Tez aşamasında örneklerin yüksek sıcaklıkta ısıtılmasına olanak sağlayan Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Mineraloji Anabilim Dalına ve çok kıymetli hocalarına,

Deneylerimin aksamaması için hafta sonları laboratuvarında çalışmama müsaade eden ve değerli fikirlerini benimle paylaşıp, farklı bakış açısından bakmamı sağlayan Sayın Prof. Dr. Adil Binal'a

Yüksek lisansa devam ettiğim sürede bünyesine dahil olduğum, Yüksel Proje A. Ş. ve beni bu süreçte destekleyen Jeolojik Hizmetler Grup Müdürü Sayın Dr. Kürşat Tokgözoğlu, Müdür Yardımcıları Sayın Erkil Onur Tarı ve Sayın İbrahim Görkem Tunay başta olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma,

Laboratuvar çalışmalarında verdikleri desteklerden ötürü Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı teknisyenleri Sayın zgr Erol'a ve Sayın Ahmet Bay'a,

Nevşehir'den aldığım örnekler için herhangi bir ücret talep etmeyen Saraytař Ocağı'nın sahibi Cavit Bey'e

Laboratuvar çalışmalarım sırasında benden destekleri esirgemeyen sevgili dostlarım Simge Kaya, Kübra Yaz, Kenan Zorlu ve Hilal Tanrıseven'e

Bugünlere gelmemde en büyük katkıyı sağlayan, her zaman yanımda olup bana destek veren, kendi önceliklerini benimkilerle değiştiren fedakr aileme ve ilerde akademik kariyerlerinde beni örnek alacaklarını düşündüğüm canım yeğenlerim İdil ve Tuna'ya

Sonsuz Teřekkürler...

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. Yerkabuğunda Derinliğe Bağlı Olarak Ve/Veya Yapılan İşlem Sonucunda Kayalarda Yüksek Sıcaklık Koşulları	5
2.2. Yangın Etkisi ile Kayalarda Yüksek Sıcaklık Koşulları	7
2.3. Genel Değerlendirmeler	12
3. ÖRNEKLEME VE KAYA TÜRÜNÜN BELİRLENMESİ	13
3.1. Yapıtaşı Kayaların Seçimi ve Örneklemeye Yerinin Tanıtılması	13
3.2. Mineralojik Değerlendirmeler	18
3.2.1. Minerallerin Mikroskop ile Tayini	19
3.2.1. Minerallerin X- Işınları Yansıması ile Tayini	25
4. İGNİMBİRİTLERİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ	34
4.1. Sıcaklığa Maruz Bırakılmamış Örneklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	36
4.2. Sıcaklığa Maruz Kalmış Örneklerin Jeomekanik Özellikleri	42
4.2.1. Renk Değişimi	42
4.2.2. Birim Hacim Ağırlığın Sıcaklıkla Değişimi	45
4.2.3. Özgül Ağırlık ve Boşluk Oranının Sıcaklıkla Değişimi	49
4.2.4. P- Dalga Hızının Sıcaklıkla Değişimi	53
4.2.5. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının (UCS) Sıcaklıkla Değişimi	56

4.2.1. Elastisite Modülünün Sıcaklıkla Değişimi.....	62
4.2.2. İğne Penetrasyonunun Sıcaklıkla Değişimi	65
4.2.3. Brazilian Çekme Dayanımının Sıcaklıkla Değişimi	68
4.3. Genel Değerlendirmeler	71
5. DEFORMASYON VE ÇATLAK İLERLEME AŞAMALARININ SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ	73
5.1. Deformasyon ve Çatlak İlerleme Aşamalarının Belirlenmesine İlişkin Yaklaşımlar.....	73
5.2. Farklı Sıcaklıklara Maruz Bırakılmış İgnimbiritlerin Çatlak İlerleme Aşamalarının Belirlenmesi	77
6. SICAKLIĞIN İGNİMBİRİT ÖRNEKLERİNDEKİ ETKİSİNİN ELEKTRON MİKROSKOBU İLE İNCELENMESİ.....	82
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	86
8. KAYNAKLAR	90
EKLER.....	98
EK-1. Sıcaklığa Bağlı Olarak 7 Farklı İgnimbirit Örneğindeki Renk Değişimleri.....	98
Ek-2. Elastisite Modüllerin Hesaplandığı Örneklerin Gerilme- Birim Deformasyon Grafikleri	105
EK-3. İgnimbirit Örneklerinin Farklı Sıcaklıklarda Gerçekleşen Gerilme- Birim Deformasyon -AE Sayısı Grafikleri	151
ÖZGEÇMİŞ	159

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3. 1. Nevşehir ilindeki ignimbiritler ve bu ignimbiritlerin şehirdeki yapılaşmalarda yaygın kullanılmasına ait bazı görseller (Fotoğraf: Şahiner,2022).....	14
Şekil 3. 2. Ocak alanını gösteren yer bulduru haritası ve örneklerin alındığı açık ocak işletmesine ait görseller.	16
Şekil 3. 3. Kapadokya Bölgesinin genel jeoloji haritası (1:500 000 ölçekli MTA Kayseri K0635 Paftasından Düzenlenmiştir, (2002)).	17
Şekil 3. 4. Deneylerde kullanılmak üzere alınan İgnimbirit bloklarının bir kısmından görünüm.	18
Şekil 3. 5. İgnimbirit 1 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası).	19
Şekil 3. 6. İgnimbirit 2 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası).	20
Şekil 3. 7. İgnimbirit 3 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat).	21
Şekil 3. 8. İgnimbirit 4 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat).	22
Şekil 3. 9. İgnimbirit 5 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat, Pl:plajiyoklaz, Prx:piroksen).	23
Şekil 3. 10. İgnimbirit 6 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat, Prx:piroksen).	24
Şekil 3. 11. İgnimbirit 7 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat, Gp:jips).	25
Şekil 3. 12. İgnimbirit 1 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen kayaç difraktogramları.	27
Şekil 3. 13. İgnimbirit 2 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.	27

Şekil 3. 14. İgnimbirit 3 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.....	28
Şekil 3. 15. İgnimbirit 4 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.....	28
Şekil 3. 16. İgnimbirit örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.....	29
Şekil 3. 17. İgnimbirit 6 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.....	29
Şekil 3. 18. İgnimbirit örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.....	30
Şekil 3. 19. İgnimbirit 1 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.....	31
Şekil 3. 20. İgnimbirit 2 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.....	32
Şekil 3. 21. İgnimbirit 4 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.....	32
Şekil 3. 22. İgnimbirit 5 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.....	33
Şekil 3. 23. İgnimbirit 7 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.....	33
Şekil 4. 1. 7 farklı ignimbirit örneğinden alınan NQ çaplı (47.6 mm) karotların bir kısmından görünüm.....	35
Şekil 4. 2. 7 farklı ignimbirit örneğinden alınan NX çaplı (54.7 mm) karotların bir kısmından görünüm.....	36
Şekil 4. 3. 7 farklı ignimbirit örneğinin 100°C ve 1000°C'deki renk değişimi.	43
Şekil 4. 4. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı BHA değişimi (NQ çaplı örneklerde).	47
Şekil 4. 5. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı BHA'larındaki yüzdelik değişim (NQ çaplı örneklerde).....	47
Şekil 4. 6. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı BHA değişimi (NX çaplı örneklerde).	48
Şekil 4. 7. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı BHA'larındaki yüzdelik değişim (NX çaplı örneklerde).....	48

Şekil 4. 8. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Gs değişimi.....	51
Şekil 4. 9. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Gs değerlerinin yüzdelik değişimi... 51	
Şekil 4. 10. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı boşluk oranı değişimi.....	52
Şekil 4. 11. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı boşluk oranı değerlerinin yüzdelik değişimi.....	52
Şekil 4. 12. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Sonik P dalga hızı (Vp) değişimi... 55	
Şekil 4. 13. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Vp değerlerinin yüzdelik değişimi. 56	
Şekil 4. 14. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı UCS değişimi.....	59
Şekil 4. 15. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı UCS değerlerinin yüzdelik değişimi.	59
Şekil 4. 16. Kaolinitik kilin DTA eğrisi (Illic ve ark., 2010'dan değiştirilmiştir).....	60
Şekil 4. 17. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Elastisite Modülü (MPa) değişimi. 64	
Şekil 4. 18. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Elastisite Modülü değerlerinin yüzdelik değişimi.....	64
Şekil 4. 19. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı NPI değişimi.	67
Şekil 4. 20. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı NPI değerlerinin yüzdelik değişimi.	67
Şekil 4. 21. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı σ_t değişimi.	70
Şekil 4. 22. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı σ_t değerlerinin yüzdelik değişimi. 70	
Şekil 5. 1. (a) Shinkomatsu andeziti ve (b) Mannari graniti için tipik gerilme – birim deformasyon eğrileri ve bunların I – V no.lu aşamalarla ilişkileri (Ohnaka ve Mogi, 1982 - Tuncay 2006'dan alınmıştır).	74
Şekil 5. 2. AE sisteminin şematik gösterimi (Tuncay, 2006'dan alınmıştır).....	78
Şekil 5. 3. Birim deformasyona karşılık gerilme ve AE aktivitesindeki değişime tipik bir örnek.	79
Şekil 5. 4. İlk sel çatlak gelişimi eşik gerilme değerlerinin UCS'ye oranlarının (σ_{ci1} / UCS) sıcaklıkla değişimi.	81
Şekil 5. 5. Çatlak birleşimi eşik gerilme değerlerinin UCS'ye oranlarının (σ_{cs} / UCS) sıcaklıkla değişimi.	81
Şekil 6. 1. İgnimbirit 2 örneği için oda sıcaklığı, 800 ve 1000°C'lerde çekilen SEM görüntüleri.....	83

Şekil 6. 2. İgnimbirit 3 örneği için oda sıcaklığı, 800 ve 1000°C’lerde çekilen SEM görüntüleri.	84
Şekil 6. 3. İgnimbirit 7 örneği için oda sıcaklığı, 800 ve 1000°C’lerde çekilen SEM görüntüleri.	85



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. 1. Zamana bağlı sıcaklık değerleri (İBB, 2024).	2
Çizelge 3. 1. Açık ocak işletmesinde alınan blok örneklerin ticari isimleri.	18
Çizelge 3. 2. İgnimbirit örneklerinin X-RD (TK) çözümleme sonuçları.....	26
Çizelge 3. 3. İgnimbirit örneklerinin X-RD (KF) çözümleme sonuçları.....	31
Çizelge 4. 1. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinden (NQ çaplı) hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri.	37
Çizelge 4. 2. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinden (NX çaplı) hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri.	37
Çizelge 4. 3. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinden hesaplanan özgül ağırlık ve boşluk oranı değerleri.	38
Çizelge 4. 4. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örnekleri için hesaplanan Sonik P Dalgası Hızı (V_p) değerleri.	38
Çizelge 4. 5. Kayaların dayanımının arazide tahmin edilmesine yönelik ISRM (2007) tarafından önerilen ölçütler (Ulusay, 2010'dan alınmıştır).	39
Çizelge 4. 6. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinde gerçekleştirilen UCS deneylerine ait sonuçlar.....	40
Çizelge 4. 7. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinde hesaplanan Elastisite Modülü değerleri.	40
Çizelge 4. 8. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinde hesaplanan NPI değerleri.	41
Çizelge 4. 9. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinde hesaplanan Brazilian çekilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar.	42
Çizelge 4. 10. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden (NQ çaplı) hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri.	46
Çizelge 4. 11. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden (NX çaplı) hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri.	46
Çizelge 4. 12. Farklı sıcaklıklara maruz kalmış ignimbirit örneklerinden hesaplanan özgül ağırlık değerleri.....	50
Çizelge 4. 13. Farklı sıcaklıklara maruz kalmış ignimbirit örneklerinden hesaplanan boşluk oranı değerleri.	50
Çizelge 4. 14. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden hesaplanan Sonik P Dalgası Hızı (V_p) değerleri.	54

Çizelge 4. 15.Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden hesaplanan UCS (MPa) değerleri.....	58
Çizelge 4. 16. Farklı sıcaklıklara maruz kalmış ignimbirit örneklerinden hesaplanan Elastisite Modülü değerleri.	63
Çizelge 4. 17. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden NPI (N/mm) değerleri.	66
Çizelge 4. 18. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden hesaplanan σ_t değerleri. ...	69
Çizelge 5. 1. Yenilme anına kadar oluşan deformasyon süreçleri (Ohnaka ve Mogi, 1982 -Tuncay 2006’dan alınmıştır).....	75
Çizelge 5. 2. Eberhardt et al. (1999) tarafından önerilen deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları (Tuncay, 2006’dan alınmıştır).	76
Çizelge 5. 3. Sıcaklığa bağlı olarak ilksel çatlak gelişimi ve çatlak birleşmesi eşik gerilme değerleri (σ_{ci1} ve σ_{cs}) ve bunların deneylerde belirlenen UCS değerlerine oranları.	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

γ	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
Gs	Özgöl Ağırlık
e	Boşluk Oranı
V _p	P- Dalga Hızı (m/s)
σ_c, σ_n	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)
σ_t	Çekilme Dayanımı (MPa)
E	Elastisite Modülü (MPa)
δ	Birim Deformasyon
nm	Nanometre
pA	Pikoamper

Kısaltmalar

AE	Akustik Emisyon
BHA	Birim Hacim Ağırlık
XRD	X-Işını Difraksiyonu
TK	Tüm Kayaç
KF	Kil Fraksiyonu
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği Asetik asit
UCS	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
NPI	İğne Penetrasyon İndeksi (N/mm)
ASTM	Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop

1. GİRİŞ

Kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörlerden biri de yüksek sıcaklıktır. Araştırmacılar, kayaların sıcaklık etkisi altında mekanik olarak güçlendiği veya zayıfladığı konusuna ilgi göstermişlerdir. Bu konuyla ilgili çalışmalar arasında, kaolinin yanmasıyla ilgili yapılan bir çalışmanın (Dimitriyev ve ark., 1969) bu konuyu belirgin bir şekilde gündeme getiren ilk çalışmalar arasında olduğu gözlemlenmektedir. O tarihten günümüze kadar yer mühendisliği disiplinlerinde yüksek sıcaklıkların, kayaların mekanik özelliklerine olan etkilerini araştıran çalışmalarda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Kayalar yüksek sıcaklığa iki şekilde maruz kalabilirler. İlk olarak, yer kabuğunda derinliğe bağlı olarak sıcaklığın artması veya yapılan işlemler sonucunda sıcaklık artışı yaşanabilir, bu koşullarda yüksek sıcaklık doğrudan etkili olur. Bu durumlara, yeraltı kömür damarlarından gaz üretimi, radyoaktif atıkların yer altındaki kaya kütleleri içinde depolanması, jeotermal enerji ve ham petrol rezervuarlarından üretim gibi projelerde rastlanmaktadır (Ranjith ve ark., 2012; Mao ve ark., 2009; Zhang ve ark., 2013). Bu çalışmalarda, 1000°C'ye kadar ve bu sınırın üzerindeki sıcaklıkların kayaların jeomekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İkincisi ise, yapı malzemesi olarak kullanılan kayaçların yangın gibi olaylar sonucunda yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıdır. Bu iki durumda, kayaların yüksek sıcaklığa maruz kalma etkilerinin aynı olması pek olası değildir. Derinliğe bağlı olarak sıcaklık artışı veya nükleer atık depolama gibi etkilerle kayaların yüksek sıcaklığa maruz kalması durumunda, kayaçlar sürekli olarak ısıya maruz kalır. Ancak, yapı malzemelerinin yangın gibi olaylarda ısıya maruz kalma süresi diğer durumlara kıyasla daha kısadır. Ayrıca, kayaçlar uzun süreli yüksek sıcaklık altında daha gevrek bir davranıştan daha sünek bir davranışa geçer. Bu nedenle, yangın durumunda kayaçların davranışının, diğer yüksek sıcaklık etkileriyle aynı şekilde olmayacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Tez kapsamında, ikinci durum olan yangın koşullarında yüksek sıcaklığın yapı taşları üzerindeki etkisi üzerinde durulmuştur. Yangın sırasında sıcaklıklar zamana bağlı olarak çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir (Çizelge 1. 1). Saiang (2011), doğal taş kullanılan yapılar ve tünellerdeki yangınların, kısa süre içinde 1500°C'ye ulaşabilen yüksek sıcaklıkların etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmada alevle temas eden taşların dış yüzeyi hızla genişlerken, iç yüzeylere aynı hızda ısının nüfuz etmemesi nedeniyle taşların iç kısımlarının soğuk kaldığı belirtilmiştir.

Bu durumda, malzemenin dayanma kapasitesini aşan iç gerilmeler oluşmakta ve sonuç olarak kabarmalar meydana gelmektedir. Bu kabarma sürecinde, taşlar plaklar halinde koparak ayrılmaktadır (Kieslinger, 1968). Yangın esnasında, sıcaklık artışının ilk beş dakikada 555°C'ye, 90 dakika sonunda 985°C'ye ve üç saat içinde 1090°C'ye kadar yükseldiği tespit edilmiştir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi İtfaiye Daire Başkanlığı tarafından kaydedilen verilere göre, geniş çaplı bir yangında sıcaklığın 1500-1700°C'ye kadar ulaşabildiği değerlendirilmiştir (İBB, 2024). Ulaşılan bazı yangın haberlerinde, yapıların büyüklüğüne bağlı olarak söndürme sürelerinin değiştiği ve bu sürenin bazı durumlarda 2 saate kadar uzandığı gözlenmiştir (Nevşehir Kent Haberleri, 2024). Bu durum, yangın söndürme operasyonlarının zaman alıcı olabileceğini ve büyük çaplı yangınların söndürülmesinin zorluğunu ortaya koymaktadır. Bu bilgi, yangın söndürme operasyonlarının zaman alıcı olabileceğini ve büyük çaplı yangınların söndürülmesinin zorlayıcı olabileceğini göstermektedir.

Çizelge 1. 1. Zamana bağlı sıcaklık değerleri (İBB, 2024).

Zaman (dk)	Sıcaklık(°C)
5	555
10	660
15	720
30	820
60	927

Büyük derinliklerdeki yer altı madencilik uygulamaları, radyoaktif atık depolama gibi yüksek sıcaklığın etkisinin olduğu bu tür ortamlarda kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için, kaya örneklerinin hedeflenen sıcaklığa ulaştıktan sonra soğutulmadan deneylere tabi tutularak değerlendirilmektedir (Mao ve ark., 2014). Ancak, bu yöntem oldukça maliyetli ve özel ekipman gerektiren bir süreçtir ve literatürde sıcaklığın belirli bir değere yükseltilip örneklerin bu sıcaklıkta test edildiği çalışmalar kısıtlıdır. Yapı taşı olarak kullanılan malzemelerinin yüksek sıcaklığa maruz kalmasıyla fiziksel ve mekanik niteliklerinin incelenmesi, literatürde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, örneklerin belirlenen sıcaklığa kadar fırında ısıtılması ve ardından yavaşça soğutulması ile oda sıcaklığında bekletilip deneylerde kullanılmasını içermektedir (Hajpal ve ark., 2004; Ferrero ve ark., 2001).

Bu tez çalışmasında da yukarıda bahsedilen ikinci yöntem kullanılarak, yangına maruz kalma durumunu temsil edecek belirli sıcaklıklar için, yapıtaşı olarak kullanılan ignimbirit örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu konu hakkında yapılan önceki çalışmalarda, genellikle 1000°C'nin üzerine çıkılmadığı görülmektedir. Bununla birlikte yapılan çalışmaların çoğunluğunda sağlam kayaların yüksek sıcaklıktaki davranışları incelenmiş olup, zayıf ve yapıtaşı olarak kullanılan kayalarda yapılan çalışmalar sınırlıdır. Tez çalışmasında yüksek sıcaklıklara maruz kalmış zayıf kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişikliklere dair mevcut literatüre katkıda bulunmak ve araştırılan kaya türlerinin temel fiziksel ve mekanik özelliklerindeki sıcaklık etkisiyle oluşan değişimlerin belirleyici eşik değerlerini saptamak, tez çalışmasının ana amacını oluşturmuştur.

Bu amaç doğrultusunda, Kapadokya Bölgesi'nde yapı taşı olarak üretilen farklı renk ve dokuya sahip 7 farklı ignimbiritten blok örnekler alınmış olup, çalışmada hedeflenen hususlar aşağıda sıralanmıştır:

- a. Blok numunelerden alınan karot örnekleri, oda sıcaklığından 1000°C'ye kadar farklı sıcaklık derecelerinde tutulduktan sonra, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, boşluk oranı tayini, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), çekme dayanımı, iğne penetrasyonu, P-dalga hızı, elastisite modülü ve UCS deneyleri sırasında Akustik Emisyon (AE) tekniğinden yararlanılarak gerilme artışına bağlı olarak çatlak ilerleme aşamalarının eşik gerilme değerleri belirlenerek bu özelliklerin sıcaklık etkisiyle değişiminin analizi,
- b. Araştırmalardan elde edilen bulgular değerlendirilerek, fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimlerin meydana geldiği eşik sıcaklık değerlerinin tespit edilmesi.

Hedeflere ulaşmak amacıyla, tez kapsamında aşağıdaki süreçler gerçekleştirilmiştir.

1. Seçilen yedi farklı ignimbirit kaya türü için hazırlanan ince kesit örnekler üzerinde optik incelemeler yapılarak mineralojik bileşimleri belirlenmiştir. Daha sonra öğütülmüş örnekler hazırlanarak X- ışınları kırınım yöntemi ile tüm kayaç analizleri yapılmış olup, mineral ve kil içeriği yüzdeleri belirlenmiştir.
2. İncelenen kaya örneklerinin, farklı sıcaklıklardaki fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla birim hacim ağırlık, özgül ağırlık ve boşluk oranı gibi parametreler tayin edilmiştir.

3. Mekanik özelliklerdeki değişimleri belirlemek amacıyla, örneklerin tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü, çekme dayanımı, iğne penetrasyonu ve P-dalga hızı ölçülmüştür.
4. Dayanım deneyleri sırasında Akustik Emisyon (AE) tekniğinden de yararlanılarak gerilme artışına bağlı olarak çatlak ilerleme aşamalarının eşik gerilme değerleri tayin edilmiş olup bu özelliklerin ısı etkiyle değişimi değerlendirilmiştir.
5. Sıcaklığa bağlı olarak çatlak ilerleme aşamalarının belirlenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tekniğinden de yararlanılarak üç farklı örnek incelenmiştir.
6. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak söz konusu örneklerin kısa ve uzun süreli dayanımını etkileyen kritik sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için değerlendirmelere gidilmiştir.

Bu tezin ikinci bölümünde, kayaçların yüksek sıcaklığa hangi durumlarda ulaştığına ve ısı etkiye maruz kalmış sağlam kayaçlar (granit, mermer vb.) ile nispeten zayıf kayaçların (İğnimbirit gibi) fiziksel ve mekanik özelliklerinin sıcaklıkla değişiminin araştırıldığı önceki çalışmalar sunulmuştur. Üçüncü bölümde, çalışma kapsamında kullanılan İğnimbirit örnekleri tanıtılmış, örnekleme lokasyonu hakkında bilgi verilmiş, bölgenin genel jeolojisinden bahsedilmiştir. Ayrıca, alınan örnekler üzerinde yapılan mineralojik ve kimyasal analizler (X-RD) ve elde edilen sonuçlara değinilmiştir. Dördüncü bölümde, örnekleme ve ısıtma yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmış ve ısı etkiye maruz bırakılmış İğnimbirit örneklerinin fiziksel ve mekanik niteliklerinde, sıcaklık etkisiyle oluşan değişimler incelenmiştir. İğnimbiritlerin kısa süreli dayanımlarının yanı sıra nispeten uzun süreli dayanımlarına etkisinin araştırılması amacıyla Akustik Emisyon (AE) tekniğinden yararlanılmış ve bu değerlendirmeler Beşinci bölümde ele alınmıştır. Altıncı bölümde Elektron mikroskop (SEM) tekniğinden yararlanılarak yapılan incelemelere yer verilmiştir. Yedinci ve son bölümde, bu tez çalışmasından elde edilen başlıca bulgular özetlenmiş ve gelecekteki araştırmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kayaçlar, yüksek sıcaklıklara iki farklı şekilde maruz kalabilir. İlk durum, yerkabuğunda derinliğe bağlı olarak artan sıcaklık ve çeşitli işlemler sonucunda kayaçların yüksek sıcaklık koşullarıyla karşılaşmasıdır. İkinci durum ise, yapı malzemesi olarak kullanılan kayaçların yangın gibi olaylar neticesinde yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıdır. Aşağıda verilen alt bölümlerde bu iki farklı koşul için, yapılan önceki araştırmalara yer verilmiştir.

2.1. Yerkabuğunda Derinliğe Bağlı Olarak Ve/Veya Yapılan İşlem Sonucunda Kayalarda Yüksek Sıcaklık Koşulları

Bu tez çalışmasının asıl amacı yangın etkisiyle yapı taşlarının nasıl etkilendiğini araştırmak olduğu için yerkabuğu ve yapılan işlemler sonucunda etkili olan sıcaklık koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilen çalışmalara bu bölümde kısaca değinilmiştir. Kayaçlar sıcaklık altında genellikle termal hasar ve termal çatlamaya maruz kalır. Bu durum, jeotermal sistemler, yüksek seviyeli radyoaktif atık depoları, jeolojik karbon depolama, yer altı kömür gazlaştırması ve hidrotermal sistemler gibi yer altı mühendisliği ve jeolojik projelerde önemli etkilere yol açabilir (Ghassemi ve ark., 2012; Rutqvist ve ark., 2012; Li ve ark., 2013). Bu gibi çeşitli süreçlerde 1000°C'ye kadar çıkan ve bu sıcaklığı aşan yüksek sıcaklıkların kayaların jeomekanik özelliklerini etkilediği farklı araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir.

Gibb (1999), yüksek seviyeli radyoaktif atıkların güvenli bertarafı için daha derin ve yüksek sıcaklıklarda çözümler geliştirmeyi amaçlamıştır. Geleneksel olarak kullanılan derin maden depoları genellikle jeolojik olarak sıgıdır ve sıcaklıkları 150°C'nin altında tutma gereksinimi vardır. Bu araştırmada, çok derin kuyu depolama yöntemleri ve yüksek sıcaklıkların (400°C'nin üzerinde) bu atıkların bertarafında nasıl avantaj sağlayabileceği incelenmiştir. Önerilen yöntem, radyoaktif atıkların yüksek sıcaklıklarda bertarafını mümkün kılmayı hedeflemiş ve bu sıcaklıklardaki derin kuyu depolarının güvenli ve çevresel olarak daha kabul edilebilir bir çözüm sunabileceğini göstermiştir.

Mao ve ark. (2009), yüksek sıcaklıkların kireçtaşının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yer altı mühendisliği ve jeotermal enerji uygulamalarında kireçtaşının yüksek sıcaklıklara maruz kalması yaygın bir durum olduğunu

belirtmişlerdir. Elde edilen verilere göre, oda sıcaklığından 600°C'ye kadar elastik modülünde ve doruk dayanımında belirgin değişiklikler olmadığını, ancak 600°C'nin üzerinde bu özelliklerin hızla değiştiği tespit edilmiştir. Özellikle 600°C'nin üzerinde elastik modülün %80 ve doruk dayanımın %70 oranında azaldığı bulunmuştur. Bu bilgiler, derin yer altı mühendislik projeleri ve jeotermal enerji üretimi için kireçtaşı kullanımının değerlendirilmesinde kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir.

Yang ve ark. (2017), Avustralya'nın Strathbogie granitinde yüksek sıcaklıkların termal hasar üzerindeki etkilerini inceleyen bu çalışmada, sıcaklık arttıkça kristal yapısının çatlamalardan daha kolay etkilendiğini, mikro çatlak sayısının 400 °C'nin altında sabit kaldığını ve 400 °C'nin üzerinde doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir.

Xu ve ark. (2021), mikrodalga radyasyonu altında kayaçların hasar ve çatlama süreçlerini simüle etmek için 3D hasar bazlı, elektromanyetik-termomekanik bağlı bir model önerilmiştir. Oluşturdukları model ile mineral madenciliği, petrol ve gaz geri kazanımı ile derin yer enerjisi geri kazanımının yönetimi ve optimizasyonunda yardımcı olabileceğini önermektedir. Mikrodalga radyasyonu, malzemeleri hacimsel olarak ısıtarak geleneksel ısıtma yöntemlerinden daha hızlı ve etkili bir şekilde ısınmasını sağlar (Jones ve ark., 2002). Özellikle yüksek sıcaklık altında, mikrodalga radyasyonunun kayalardaki mikro çatlakları artırarak kayacın zayıflamasına neden olduğu gözlenmiştir (David ve ark., 1999; Fredrich ve Wong, 1986). Mikrodalga ile ısıtma, sıcaklık dağılımındaki düzensizlikler nedeniyle yüksek termal gradyanlar oluşturur ve bu da kayaların çatlamasına yol açabildiği söylenebilir (Zheng ve ark., 2017; Li ve ark., 2017).

Zhang ve ark. (2021), derin yer altı mühendisliğinde yüksek sıcaklıkların etkilerini değerlendirmek için geliştirilen bu çalışma, kaya hasarını analiz eden yenilikçi bir termomekanik hasar (TMD) modeli sunmuştur. Model, hızlı ısı transferi ve termal stresin neden olduğu hasarı değerlendirir ve kaya içindeki heterojenlik ile mikro boşluk dağılımının termal etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, yüksek sıcaklıkların kaya üzerindeki doğrudan hasarı ve iç mikro boşlukların meydana gelen termal hasarı ortaya koymuştur. Ayrıca, elastik modül ve dayanımın sıcaklık arttıkça azaldığı, termal hasarın esas olarak gerilme hasarı olduğu ve heterojenliğin termal hasar üzerindeki etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir.

2.2. Yangın Etkisi ile Kayalarda Yüksek Sıcaklık Koşulları

Yangının kayaç bozunması üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, bir dizi laboratuvar ortamında yapılan simülasyon deneylerinden yararlanılmıştır (Allison, 1988; Goudie ve ark., 1992; Allison ve Bristow, 1999). Yapı malzemelerinin yangın dayanıklılığı, inşaat sektöründe tarih boyunca önemli bir konu olmuştur. Özellikle taş binaların yangına karşı direnci üzerine yapılan çalışmalar, bu yapıların yangın sonucu hasar görme olasılığını azaltmaya yönelik önemli bulgular sunmuştur. Hajpal ve Török (1998) tarafından yapılan bir araştırmada, yangın riskinin yapı aşamasında hesaplanabileceği ve bu hesaplamaların yeni taş binaların yapımında kullanılabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmanın sonuçları, taş binaların yangın riskinin değerlendirilmesine yönelik önemli bir rehber sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Laboratuvar deneyleri, yangının kayaçların fiziksel ve petrolojik yapısında değişikliklere yol açtığını ve bu değişikliklerin binanın dayanıklılığını azaltabileceğini göstermiştir.

Duclos ve Paquet (1991) tarafından, 25 ve 1000°C arasındaki sıcaklıklar için bazaltlarda bir dizi UCS deneyi gerçekleştirilmiştir. 25 ve 700°C arasındaki sıcaklıklarda yapılan deneylerde artan sıcaklık ile basınç dayanımının arttığı, ancak 750°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılan deneylerde artan sıcaklık ile basınç dayanımının önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir.

Hajpal (2002), yangınlar sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklığın, kumtaşından inşa edilmiş tarihi yapılar üzerindeki etkilerini incelemiştir. 900°C'ye kadar ısıl etkiye maruz kalmış numunelerde detaylı mikroskopik incelemeler yapılmış olup, 450 ile 750°C aralığında kil minerallerinin dağıldığı ve 575°C sıcaklığında ise α -kuvarsın β -formuna dönüştüğü belirtilmiştir. Bu dönüşüm sonucunda, artan sıcaklıkla birlikte kumtaşının tek eksenli dayanımının azaldığı ifade edilmiştir.

Ünal ve ark. (2007), yaptıkları bir araştırmada 14 farklı örnek kullanarak yapı taşlarının yüksek sıcaklığa karşı dirençlerini ultrasonik ölçümlerle belirlemeye çalışmışlardır. Metamorfik ve sedimanter kökenli kayaçlar, bozunma süreçlerine maruz kalmalarına rağmen genellikle 700°C'ye kadar dayanabilirlerken, magmatik kökenli kayaçların genellikle 1000°C'ye kadar dayanıklılık gösterdiği ve bozunmanın 200 °C civarında başladığını belirtmiştir.

Rao ve ark. (2007), 25 ile 250°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen UCS deneyleri sonucunda artan sıcaklık ile kumtaşının güçlendiğini ve sertleştiğini gözlemlemişlerdir. Ancak, 250°C'yi aşan, özellikle 300°C'lik maksimum test sıcaklığında bu eğilimin dramatik bir şekilde tersine döndüğü belirtilmiştir.

Korkanç (2007), Kapadokya bölgesindeki ignimbiritlerin jeomekanik özelliklerinin yapı malzemesi olarak değerlendirilmesine etkisini araştırmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, piroklastiklerin iyi kaynaşmamış ignimbirit özellikleri gösterdiği ve bu materyallerin jeolojik, petrografik ve kimyasal nitelikleri ile mekanik davranışları arasında belirgin bağlantılar tespit edilmiştir. Mineralojik analizlerde, ince taneli kaya parçacıkları, opak mineraller ve tane oranının matriks oranından düşük olmasından dolayı örneklerin daha düşük porozite, daha yüksek yoğunluk ve basınç dayanımı sergilediği tespit edilmiştir. Düşük yoğunlukları nedeniyle bu örnekler, hafif yapı malzemesi olarak kullanım, işlenme ve taşıma açısından uygun özellikler sunmaktadır. Ancak, bu çalışmada sıcaklık etkisi ele alınmamıştır.

Xu ve ark. (2008) sıcaklığın granitin mekanik özelliklerindeki etkisini araştırmak için, 25 ile 1200°C arası sıcaklıklarda UCS deneyleri gerçekleştirmiştir. 25 ve 800°C arasındaki sıcaklıklarda yapılan deneylerde sıcaklığın artmasıyla granitin dayanımı çok az değişmiştir, ancak 800°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılan deneylerde hem sıkışma dayanımı hem de elastik modül önemli ölçüde azalmıştır.

Zhang ve ark. (2009), 25 ila 800 °C arasındaki sıcaklıklarda kumtaşı üzerinde UCS deneyleri gerçekleştirmiştir. 25 ila 200 °C arasındaki sıcaklıklarda dayanımın artan sıcaklıkla birlikte azaldığını, 200 ila 600 °C arasında ise artan sıcaklıkla dayanımın arttığını bulmuşlardır. Aynı deneylerden elde edilen elastik modül değerlerinin sıcaklıktan etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Keshavarz ve ark. (2010) tarafından, gabro numuneleri 150-1000 °C arasında çeşitli sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Artan sıcaklıkla birlikte UCS 600 C'ye kadar kademeli olarak azalmıştır. Termal yüklemenin her aşamasından sonra hazırlanan ince kesitlerin analizi ile 600 C'nin altında kristallerin termal genleşme katsayılarındaki bir farktan dolayı mikro çatlakların gelişmeye başladığı gözlenmiştir. Sıcaklık arttıkça hem boyuna (Vp) hem de enine (Vs) dalga hızlarının azaldığı, 600 °C ile 700 °C arasında ise keskin bir düşüş gözlemlendiği belirtilmiştir.

Lam dos Santos ve ark. (2011), 20-200°C sıcaklık aralığında ısı etkiye maruz kalan kireçtaşlarının, sıcaklık arttıkça dayanım ve elastisite modülünde azalma gösterdiğini belirtmişlerdir.

Ranjith ve ark. (2012) kumtaşının mekanik tepkisini incelemek için 25 ile 950°C arasında çeşitli sıcaklıklarda UCS ve elastik modüldeki değişimin belirlenmesi için deneyler gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, dayanımın 600°C'ye kadar arttığı, 600'den 950°C 'ye kadar ise artan sıcaklıkla birlikte azaldığı tespit edilmiştir.

Heap ve ark. (2012), İtalya'nın Napoli bölgesinde inşaat için yaygın olarak kullanılan üç tüfün yangın durumunda kararlılığını incelemiş ve yüksek sıcaklığın tüfün dayanımını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Napoliten Sarı Tüf (NYT), gri ignimbirit (WGI) ve Piperno Tüf'ü (PT) 100-750 °C'ye kadar ısıtılmış ve dayanım kaybı en fazla (%80 oranında) NYT adlı tüfte görüldü diğer iki tüf yüksek sıcaklıktan fazla etkilenmediği gözlenmiştir. Yangın durumunda, WGI ve PT'den inşa edilen binaların veya yapıların NYT tüfüne göre daha dayanımlı olduğu ve yapı taşı olarak bu iki tüfün tercih edilmesi önerilmiştir.

Altuğ (2012), yapı malzemesi olarak sıklıkla kullanılan ignimbirit, granit ve traverten kaya türlerinin çeşitli sıcaklıklardaki performansını değerlendirmiştir. Travertenlerin 700°C'ye, ignimbiritlerin ve Kırşehir granitinin 800°C'ye, İspir granitinin ise 1000°C'ye kadar dayanabildiği belirtilmiştir. Çok yüksek sıcaklıklara kadar dayanabilen Kayseri-sarı ignimbirit örneğinde, yalnızca 1000°C'deki bozunmaların çatlak oluşumu şeklinde olduğu, dolayısıyla yangına dayanıklı yapı taşı olarak kullanılabilecekleri vurgulanmıştır.

Brotons ve ark., (2013) tarafından yapılan çalışmada, 105°C ile 600°C arasındaki çeşitli sıcaklıklarda kireçtaşı örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sıcaklık arttıkça, özellikle 600°C'de, dayanım ve elastik parametrelerin (Young modülü, Poisson oranı) azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, porozite ve ultrasonik dalgaların yayılma hızı da sıcaklığa bağlı olarak önemli değişiklikler göstermiştir.

Tian ve ark. (2014), 1000°C'ye kadar sıcaklığa maruz bıraktıkları kilttaşlarında, sıcaklık yükseldikçe gözeneklilik ve örnek hacminin arttığını, kütle ve yoğunluğunun azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, tek eksenli ve üç eksenli sıkışma dayanımları ile deformasyon modülünde 800°C seviyesinin altında dalgalanmalar gözlemlenmiş, fakat sıcaklığın artışı ile bu dalgalanmaların düştüğü tespit edilmiştir.

Heap ve ark. (2014), Campi Flegrei volkanik bölgesinde yaygın olarak gözlenen iki piroklastik kayacın geçirgenlik ve elastik modül özelliklerinde basınç ve sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Çalışmada örnekler, ortam sıcaklığında ve 100, 200, 300, 500, 750 veya 1000°C gibi belirlenen sıcaklıklarda termal gerilmeye maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak, termal gerilmenin, Neapolitan Yellow Tuff'in geçirgenliğini arttırdığı, ultrasonik dalga hızlarını ve elastik modüllerini düşürdüğü, Campanian Ignimbrite tüfü üzerinde etkili olmadığı belirtilmiştir. Neapolitan Yellow Tuff'taki bu termal etkilerin, termal olarak kararsız zeolitlerin kaybindan kaynaklandığı öne sürülmüştür.

Ye ve ark. (2014) tarafından, yeşil tüfün yüksek sıcaklıklarda kayma ve üç eksenli sıkışma davranışları incelenmiştir. Sıcaklığın doruk dayanım üzerindeki etkisinin, artık dayanım ve hacim değişikliğinden daha belirgin olduğu vurgulanmıştır. Sıcaklık arttıkça, doruk dayanımda önemli değişiklikler gözlenmiş ve 40 °C'de termal geri dönüş belirlenmiştir. X-ışını kırınım analizi, termal geri dönüşün zeolit kaybı veya hidrotermal değişimle ilişkili olmadığını göstermiştir. Gelecek çalışmalarda, bu mekanizmayı anlamak için daha fazla mikroyapısal ve kimyasal analiz yapılması önerilmiştir.

Şengün (2014) tarafından, karbonatlı kayaların fiziksel ve mekanik niteliklerine sıcaklığın etkisi incelenmiş olup, araştırmasında kayaç olarak traverten, kireçtaşı ve mermer kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre; 300°C'den daha yüksek sıcaklıklarda tek eksenli basınç dayanımı, P-dalga hızı, çekilme dayanımı ve yoğunluğun azaldığı, gözenekliliğin ise arttığı tespit edilmiştir. Sıcaklık artışı ile birlikte elastisite modülünde en belirgin, yoğunlukta ise en az azalma gözlenmiştir.

Toprak ve ark. (2015) Kütahya Volkanik Tufu (KVT) üzerindeki ısıtma işleminin etkilerini ve maliyet etkinliğini incelemiş olup, ısıtma işleminin KVT'nin mineralojik, fiziksel ve mikro yapısal özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği, dayanımını artırdığı ve gözenekliliğini azalttığı sonucuna varmışlardır. 1200°C'de yapılan ısıtma, tüfün dayanımını %594 oranında artırmış ve görünür gözenekliliğini %63 oranında azaltmıştır. Ayrıca, 1200°C'de korundum ve lösit gibi yeni kristalin yapılar oluşmuş, renk değişimleri gözlenmiştir. Maliyet analizi, ısıtma işleminin metreküp başına 5–8 dolar olduğunu ve bu maliyetin yapı taşı olarak kullanılabilirliğini desteklediğini göstermektedir.

Zang ve ark. (2016) kireçtaşlarının termal hasar özelliklerini ve altında yatan mekanizmaları inceleyen deneysel bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Silindirik kaya

örnekleri, 25°C'den 900°C'ye kadar farklı sıcaklıklarda ısıtılmış olup, sıcaklık arttıkça P-dalga hızının, sıkışma dayanımının ve elastisite modülünün azaldığı gözlenmiştir. 200-600°C aralığında hasar faktörleri daha hızlı artmakta iken yüksek sıcaklıktan kaynaklı çatlak gelişimi tespit edilmiştir. Ayrıca, magnezyum karbonat ve dolomitlerin ayrışması bu sıcaklık aralığında ana reaksiyon olarak belirlenmiştir.

Sert ve ark. (2016), Isparta ve Nevşehir bölgelerine ait tüflerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemiş olup, bu kayaların minerolojik özelliklerini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlarda gözeneklilik ile P-dalga hızını ilişkilendirilmiş ve gözenekli kayalarda P-dalgası hız değerlerinin düşük olduğu, belirtilmiştir. Araştırmada, kaynaklı tüf taşlarının, diğer doğal taşlara (mermer, granit vb.) kıyasla yüksek derecede poroziteye sahip olmaları nedeniyle ısı ve ses yalıtımı sağlama potansiyeline sahip yapı taşı olarak kullanılabileceği önerilmiştir.

Karapınar (2017), 0-1000°C sıcaklıkları arasında ısıtılan mermer ve granit örneklerinin minerolojik bileşimlerinde sıcaklık arttıkça fark edilir bir değişim gözlememiştir. Granit ve mermerin yenilme davranışlarının, sıcaklık arttıkça kırılmandan sünümlüye doğru geçiş gösterdiği, yüksek sıcaklıklarda suda dağılmaya karşı dayanıklılığın azaldığı ve bu durumun yapı malzemesi olarak kullanıldıklarında ısıl etkinin olumsuz etkiler yaratabileceği yönünde değerlendirmeye gidilmiştir. Araştırmacı tarafından granit ve mermerin sıcaklığa bağlı olarak fiziksel ve mekanik özelliklerinin, önceki çalışmalardaki benzer eğilimlere sahip olduğu, granitin 400°C, mermerin ise 100°C'den itibaren belirgin şekilde sıcaklıktan etkilenmeye başladığı tespit edilmiştir.

Heap ve ark. (2018), Ischia Adası'nda Mt. Epomeo Yeşil Tüfü (MEGT) olarak bilinen bir yapı taşının yangına dayanıklılığını incelemişlerdir. Örneklerin porozite ve UCS değerleri, 1000°C'ye maruz kalındıktan sonra sırasıyla artmış ve azalmıştır. Ayrıca deneylerde ölçülen Akustik emisyon verilerine göre MEGT'nin ısınma ve soğuma sırasında termal mikroçatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Mineral bileşenlerinin termal genleşme ve büzülme uyumsuzluğundan kaynaklanan gerilmelerin sonucu olarak, ~370–380°C ve ~540–580°C sıcaklıklarda termal mikro çatlaklar görülmüştür. Sonuç olarak, MEGT'nin yapı taşı olarak kullanılmasının yapı duraylılığını etkileyebileceği, ancak tüflerin genellikle yangınlara karşı dayanıklı olduklarını vurgulamışlardır.

Atarlar ve ark. (2020), Kuzey Kıbrıs'taki düşük dayanımlı kalkalkarenitlerin 200-1000°C aralığındaki sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra mühendislik özelliklerindeki değişiklikleri incelemiştir. Deney sonuçlarına göre 600°C'den itibaren örneklerde ağırlık kaybı başlamış olup, yoğunluk, dalga hızı ve çekme dayanımı belirgin şekilde azalmıştır.

Cobîrzan ve ark. (2021), tûf ikincil ham madde olarak kullanarak kil tuğla üretimini değerlendirmiştir. Araştırmada, tûf oranı ve pişirme sıcaklığının kil tuğlaların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tûf eklenmesi, pişirme sırasında çekmeyi azaltmış ve sıkıştırma dayanımını artırmıştır; özellikle 1100 °C'de pişirilen örneklerde dayanım üç katına kadar yükselmiştir. Ayrıca, tûf oranı artışıyla pişirme çekmesi önemli ölçüde azalmıştır. Bu sonuçlar, tûfün kil tuğla üretiminde %30'a kadar kullanılabileceğini ve böylece döngüsel ekonomi hedeflerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Şimşek (2022), Nevşehir yöresinde bulunan vişne renkli Kavak ignimbiritinin duvar kaplaması için uygunluğunu incelemiştir. Sonuçlara göre, ortalama UCS değeri yaklaşık 43 MPa ve nokta yükü dayanım testi ise 2.06 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, söz konusu ignimbiritin yüksek gözeneklilik nedeniyle su emme katsayısının yüksek olduğu ve bu nedenle su ile temas eden yerlerde kullanılmaması önerilmiştir. Araştırmada söz konusu ignimbiritin özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimi incelenmemiştir.

2.3. Genel Değerlendirmeler

Önceki çalışmalar değerlendirildiğinde, yapı malzemesi olarak kullanılabilecek kayalar arasında yüksek sıcaklığın çoğunlukla dayanımı yüksek kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Fakat ignimbirit gibi nispeten zayıf olan kayalar için yüksek sıcaklık altında gösterdikleri davranışları inceleyen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Ayrıca, bu sınırlı sayıdaki çalışmada Akustik emisyon yöntemiyle yüksek sıcaklıktan sonra gelişebilecek çatlak gelişimi aşamaları belirlenerek uzun süreli duraylılığın değerlendirildiğine rastlanılmamıştır. Kısa süreli duraylılığın yanı sıra uzun süreli duraylılığın değerlendirilmesi, yangın sonrası ignimbiritlerdeki hasar durumunun ve geleceğe yönelik olası tehlikenin öngörülmesi yönünden önem arz etmektedir.

3. ÖRNEKLEME VE KAYA TÜRÜNÜN BELİRLENMESİ

3.1. Yapıtaşı Kayaların Seçimi ve Örneklem Yerin Tanıtılması

Bu çalışmanın konusuyla ilgili olarak yurt dışında ve ülkemizde yapılan çalışmaların daha çok sağlam kayalar üzerine olması ve yapıtaşı olarak kullanılan nispeten zayıf kayalarda yüksek sıcaklığın etkilerine yönelik çalışmaların azlığı nedeniyle bu tez çalışmasında doğal yapı taşı olarak da kullanılan ignimbirit kaya türü seçilmiştir. Nevşehir İlinde özellikle Kapadokya bölgesinde farklı firmalarca ignimbirit türü kayaların yoğun bir şekilde yapı taşı olarak kullanıldığı bilinmekte olup, bunun yanı sıra gerek turistik yerlerde gerekse eski yapılarda (otel vb.) doğrudan orijinal kaya oyulmuş veya doğal boşlukları olan kaya kütleleri eski zamanlardan günümüze kadar yaşam alanı olarak kullanılmıştır (Şekil 3. 1). Dolayısıyla yangından sadece yapı taşı olarak kullanılan ignimbiritler değil bu tarz kayadan oyma yapılar da etkilenecektir. Bu tez çalışmasında yangın çıkması durumunda birkaç katlı da olsa bu binalarda yapıtaşı olarak kullanılan Kapadokya ignimbiritlerinin özelliklerindeki değişimin incelenmesi öngörülmüştür. Tez çalışması kapsamında derlenen ignimbirit örneklerine ilişkin bilgi vermeden önce Kapadokya Bölgesinin jeolojisine aşağıdaki paragraflarda kısaca değinilmiştir.

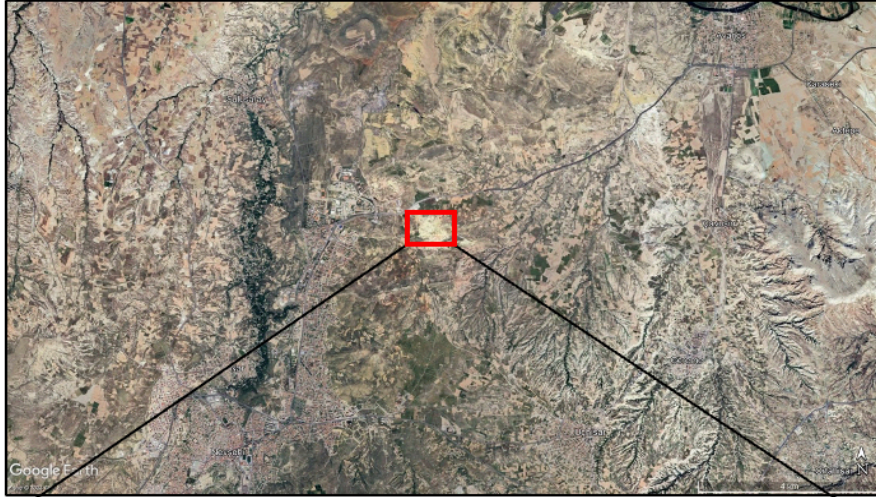
Orta Anadolu Volkanik Bölgesi'nde bulunan ve Ürgüp Formasyonu altında yer alan Kavak üyesine ait olan örnekler, ilk kez Pasquare (1968) tarafından adlandırılmıştır. İgnimbiritler, farklı bölgelerde karasal ve gölsel sedimanter birimlerin arasında ara katmanlar halinde gözlemlenmektedir. Pasquare (1968), yaklaşık 6 milyon yıl boyunca oluşan ignimbiritler, paleotoprak seviyeleri ve lav akıntılarında oluşan tüm birimleri "Ürgüp Formasyonu" şeklinde adlandırmıştır. Piroklastik akıntı seviyeleri, 9.43-9.12 milyon yaş aralığındaki karasal-gölsel sedimanlarla ayrılan Kavak ignimbiriti ile başlar ve bu ignimbirit, dört farklı akış biriminden meydana gelir. (Innocenti ve ark., 1975; Temel, 1992; Aydar ve ark., 2012; Akın, 2019). Kapadokya Volkanik Bölgesi'nde bulunan Miyosen yaşlı Kavak ignimbiritleri, bölgedeki nispeten kısa bir zaman diliminde tekrarlanan birçok patlama dizisini temsil eder ve en eski piroklastik akış birimlerindendir. Kavak ignimbiriti, Nevşehir ilinde Ürgüp ve Avanos bölgelerinde yüzey sularının ikincil alterasyonu sonucunda kırmızı ve sarı tonlarda farklı renklerde görülmektedir (Akın, 2019).



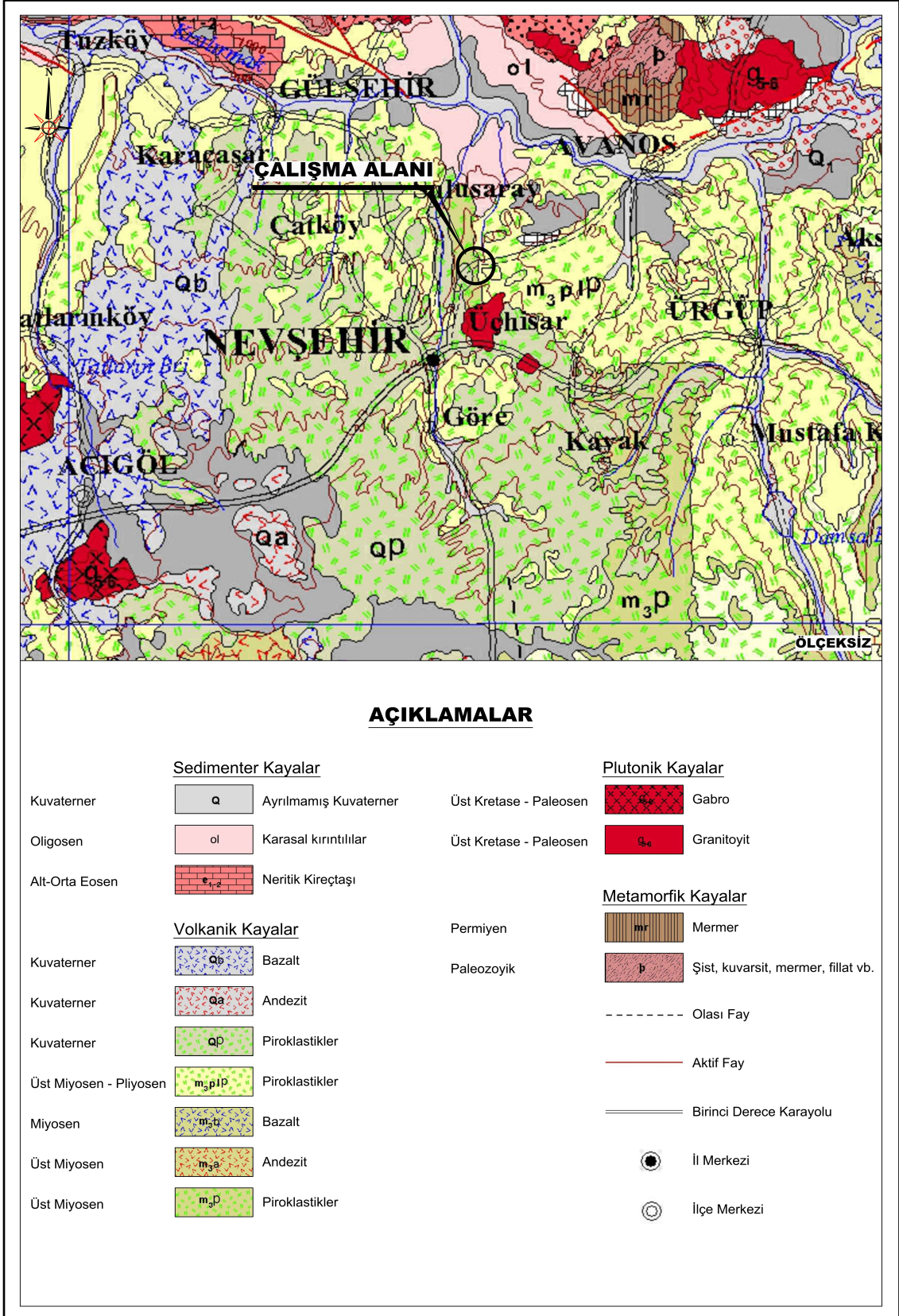
Şekil 3. 1. Nevşehir ilindeki ignimbiritler ve bu ignimbiritlerin şehirdeki yapılaşmalarda yaygın kullanılmasına ait bazı görseller (Fotoğraf: Şahiner,2022).

Yaş açısından oldukça benzer olan ve dört ayrı akıntı biriminden oluşan Kavak ignimbiriti, sedimantolojik özellik, pomza dokusu ve mineralojik bileşim açısından büyük uyum içerisindedir. Bunların arasında gözlenen gölsel sedimanlar, akıntıların bir dizi patlama sonucunda oluştuğuna işaret etmektedir. (Akın, 2019). Kavak ignimbiritleri, olası kaynak alanları olan Çardak Çukuru'nun doğu ve kuzeydoğu kısımlarında iyi bir şekilde gözlenmektedir. Stratigrafik sıra, beyazımsı kül yağıışı birikintisiyle başlar ve ardından pomza zengini akışla (Kavak-1) devam eder. Kavak-1 alt birimini, üzerinde yer alan Kavak-2'den ayıran kül bakımından zengin sedimanlar izler. Kavak-2 alt biriminin tabanı andezitik litiklerle zengindir ve yukarı doğru azalır, üst kısımda ise kül bakımından zengin akış birimlerine dönüşür. Kavak-2'yi Kavak-3'ten ayıran karbonlu konglomeralar arasında küçük bir pomzalı yağış birikintisi bulunur. Kavak-3, nispeten sertleşmiş, kül matrisinde birkaç pomza zengini horizon içerir ve üzerinde yaklaşık olarak 50 cm kalınlığında sarımsı-bej pomza yağışı vardır. Bu birim karakteristik olarak soluk pembe renklidir ve üzerindeki piroklastik akış biriminde, kül matrisinde birkaç litik ve pomza kütlesi bulunur (Aydar ve ark., 2012).

Bu çalışmada kullanılmak üzere Nevşehir'in Avonos ilçesindeki bir açık ocak işletmesinden yapıtaşı olarak kullanılan farklı doku ve renklerde 7 farklı ignimbirit örneklerine ait bloklar alınmıştır. Alınan blok örneklerde atmosferik etkiler nedeniyle bozunma olabileceği ve bu durumun deney sonuçlarını etkileyebileceği göz önünde bulundurularak, olabildiğince homojen kaya blokları tercih edilmiştir. Örneklem için tercih edilen kaya örneklerine ait blokların, planlanan deneylere uygun şekilde hazırlanabilmesi için zayıflık düzlemi içermemesine özen gösterilmiştir. Bu örneklerin Ürgüp Formasyonuna ait Kavak İgnimbiritine ait olduğu o bölgede daha önce yapılan çalışmalar ile desteklenmiştir. Örneklerin hepsinin aynı işletmeden temin edildiği göz önünde bulundurularak, ignimbiritlerin farklı renk ve dokusundaki değişikliğin sebebinin farklı araştırmacılar tarafından da belirtildiği gibi bir dizi patlama sonucu oluştuğu ve Kavak İgnimbiritlerin de kendi içinde ayrıldığını göstermiştir. Ocak alanına ait yer bulduru haritası Şekil 3. 2'de ve jeolojisini gösteren harita Şekil 3. 3'te verilmiştir. Taş ocağından ticari adları sırasıyla bej, vişne, devetüyü, renkli beyaz, gül kurusu, kirli beyaz ve sarı olarak geçen (Çizelge 3. 1), boyutları 60cm x 28cm x 14cm olan farklı renk ve dokuya sahip 7 adet ignimbirit bloğu Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarına getirilmiştir (Şekil 3. 4).



Şekil 3. 2. Ocak alanını gösteren yer bulduru haritası ve örneklerin alındığı açık ocak işletmesine ait görseller.



Şekil 3. 3. Kapadokya Bölgesinin genel jeoloji haritası (1:500 000 ölçekli MTA Kayseri K0635 Paftasından Düzenlenmiştir, (2002)).

Çizelge 3. 1. Açık ocak işletmesinde alınan blok örneklerin ticari isimleri.

Örnek No	Ticari İsimleri
İgnimbirit 1	Bej
İgnimbirit 2	Vişne
İgnimbirit 3	Devetüyü
İgnimbirit 4	Renkli Beyaz
İgnimbirit 5	Gül Kuruşu
İgnimbirit 6	Kirli Beyaz
İgnimbirit 7	Sarı



Şekil 3. 4. Deneylerde kullanılmak üzere alınan İgnimbirit bloklarının bir kısmından görünüm.

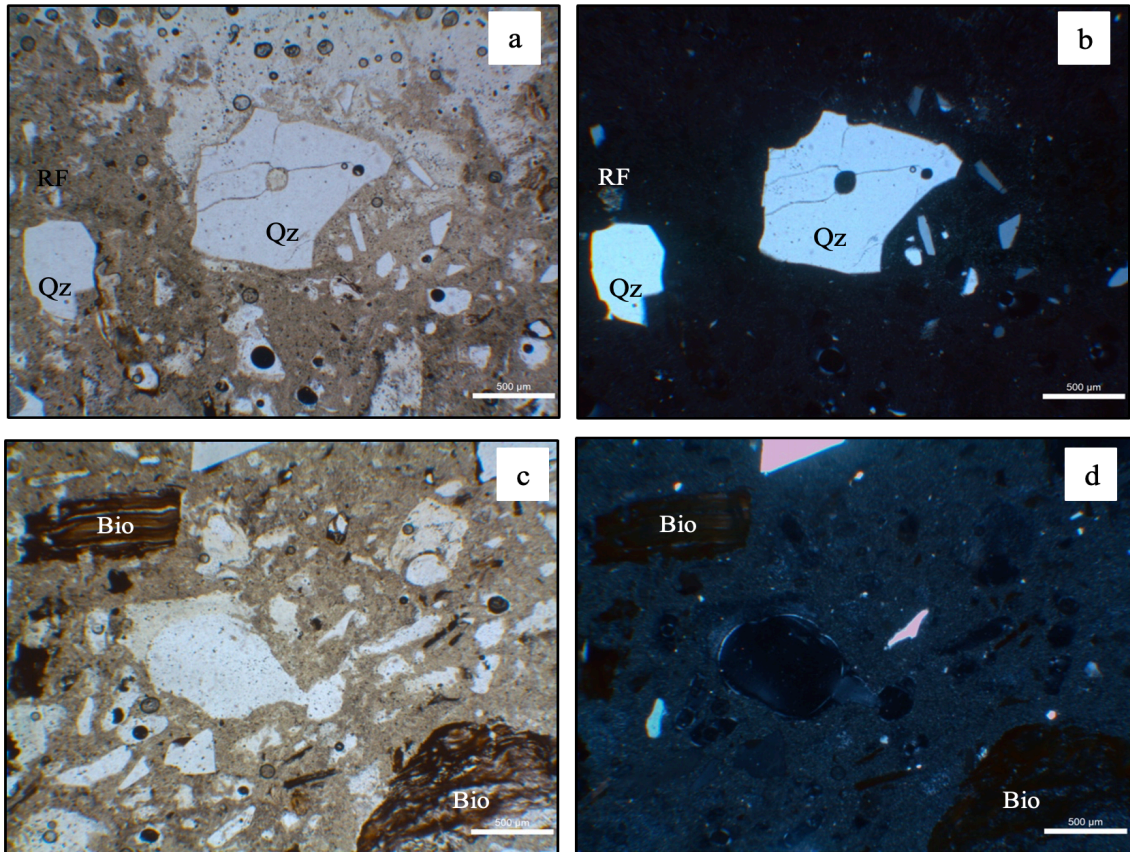
3.2. Mineralojik Değerlendirmeler

Kayacın içeriğindeki mineralojik bileşiminin belirlenmesi amacıyla iki farklı analiz yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, ince kesit örnekler hazırlanmış ve bu örnekler mikroskopik inceleme ile mineralojik özellikleri detaylandırmak amacıyla incelenmiştir. İkinci olarak, X-ışınları kırınımı (XRD) yöntemi kullanılarak öğütülmüş örnekler üzerinde mineral yüzdeleri ve kil içeriği belirlenmiştir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.2.1. Minerallerin Mikroskop ile Tayini

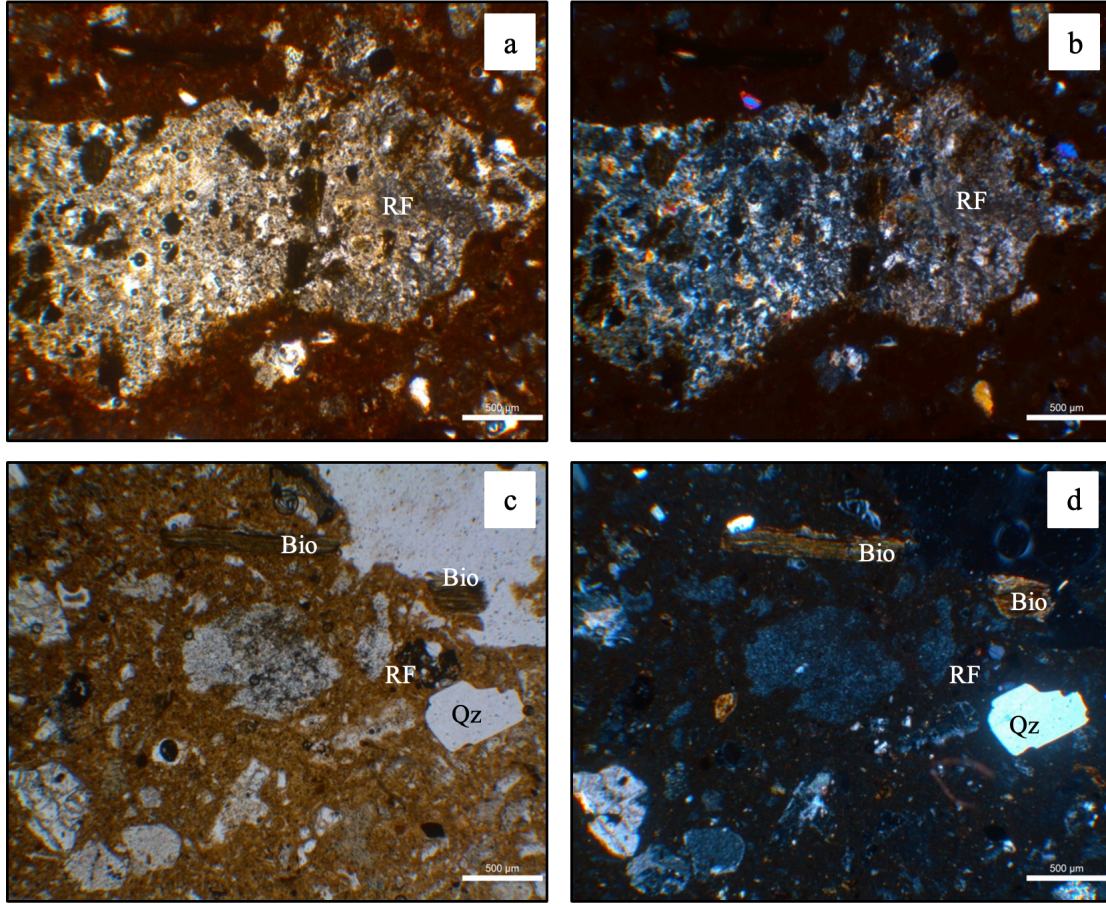
Hazırlanan ince kesit örnekleri, minerallerin ve kayacın detaylı gözlemi ve fotoğraf çekimi amacıyla Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mikroskop Laboratuvarı'ndaki LEICA DM LP marka polarizan alttan aydınlatmalı mikroskop ile incelenmiştir. İnce kesitler incelendiğinde örneklerin tamamı ignimbirit olarak adlandırılmıştır. Genel olarak, camlı küllerinde, plajiyoklaz, kuvars, biyotit, opak mineraller, kayaç parçaları ve killeşmiş feldispat fenokristalleri içeren porfirik bir doku gözlemlenmiş olup, %60-70 oranında kül matriks/volkan camından oluşmaktadır.

İgnimbirit 1 olarak adlandırılan örnek, mikroskop altında incelendiğinde mineral içeriğinde yüzeyi temiz gözüken özşekilsiz kuvars ve biyotit minerallerine rastlanmıştır. Yer yer parçalanmış ve polisentetik ikizlenme göstermeyen plajiyoklazlar görülmüştür. Kesitte kayaç parçası oranı %0-1 oranında olup kesitin büyük çoğunluğu hamurdan oluşmaktadır (Şekil 3. 5).



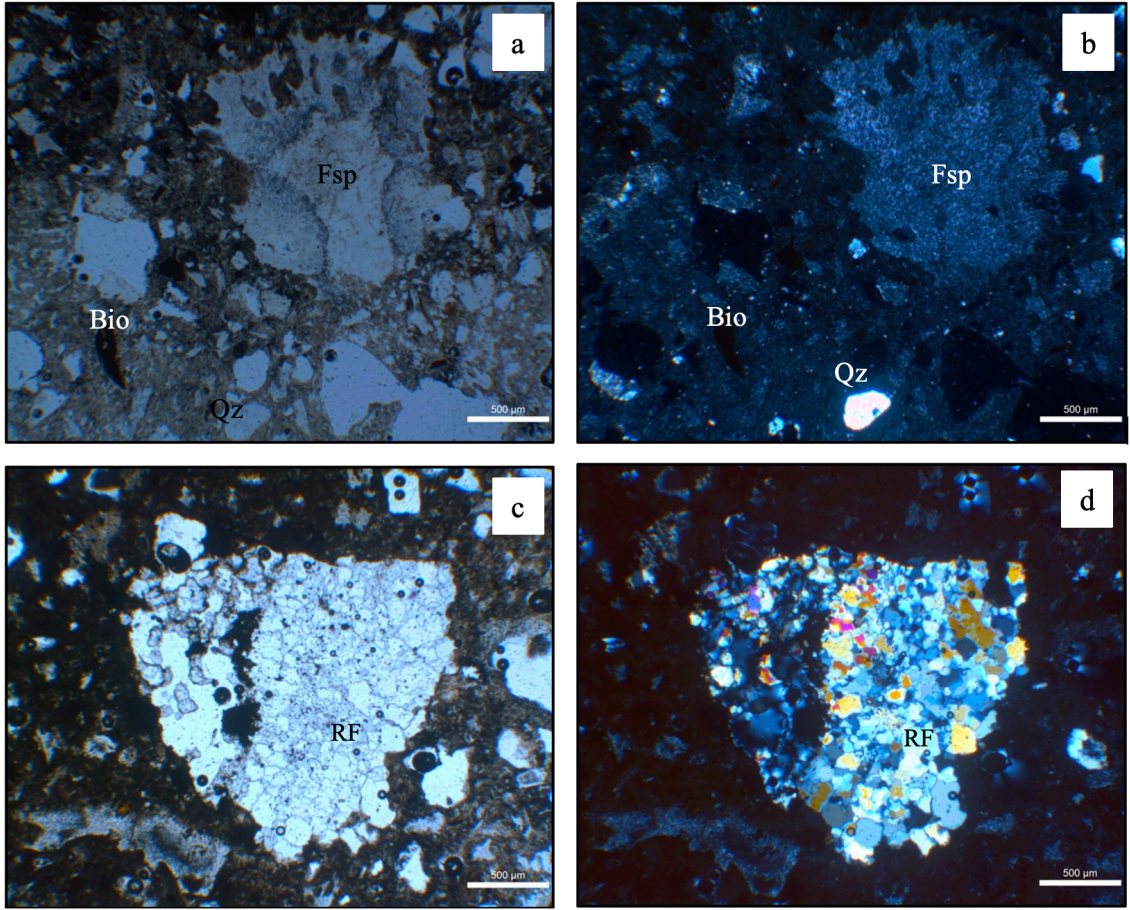
Şekil 3. 5. İgnimbirit 1 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası).

İgnimbirit 2 örneği ağırlıklı olarak kayaç parçalarından oluşmakta olup, özşekilsiz kuvarslara çoğunlukla kayaç parçalarının içinde rastlanmıştır. Hamur içinde mikritik kalsitler görülmüştür. 1. ve 2. nicolde siyah gözükten biyotitlerde opasitleşme izlenirken, plajiyoklazlar ileri derecede bozunmuştur. Plajiyoklaz fenokristallerinde püskürük patlamaları ve biyotit fenokristallerinde deformasyonlar gözlenmiştir. Petrografik gözlemler, yaygın değişim ürünlerinin kil (kaolinit) mineralleri olduğunu göstermektedir. Kesitte kayaç parçası oranı %10-15 oranında gözlenmiştir. (Şekil 3. 6).



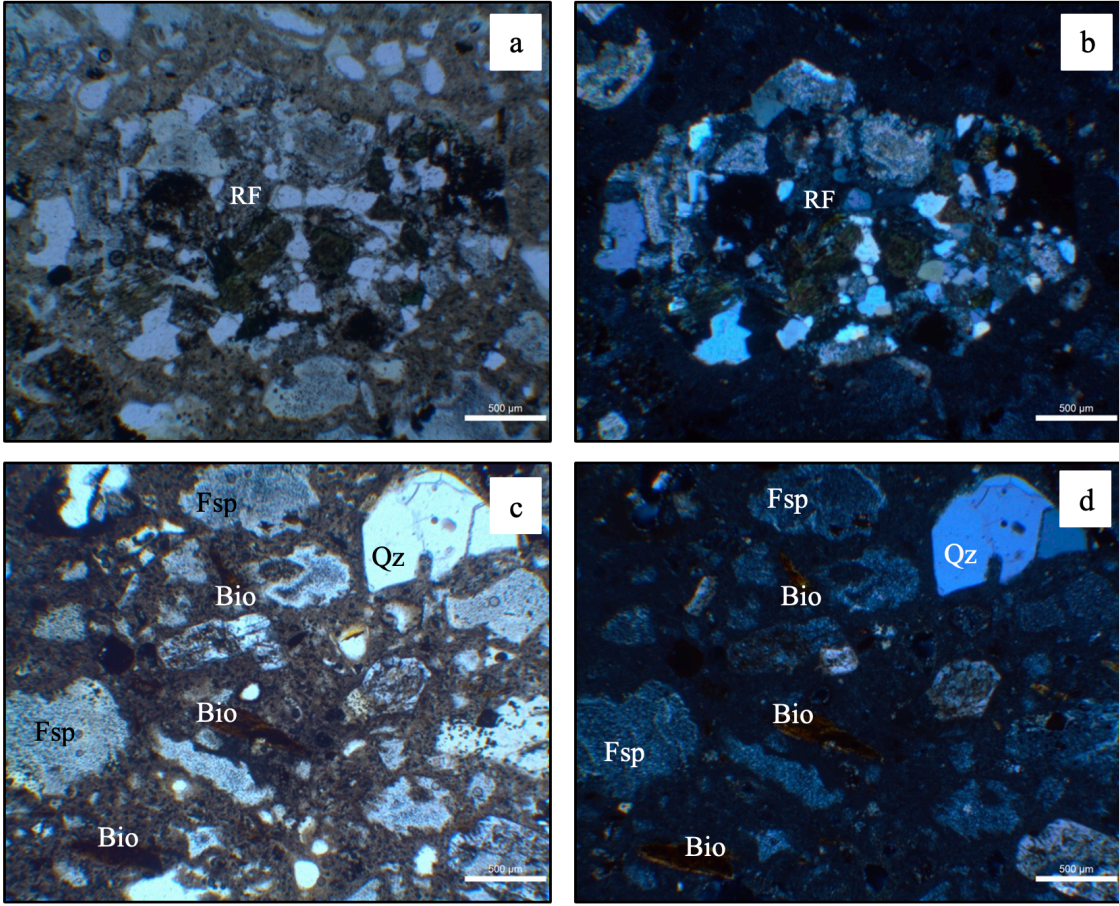
Şekil 3. 6. İgnimbirit 2 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası).

İgnimbirit 3 örneğinden alınan kesit mineral bakımından çok zengin olmamakla birlikte kuvarslar ağırlıklı olarak kayaç parçalarının içinde gözlenmiştir. Yapı olarak feldispatlarının tamamı killeşmiştir, yer yer biyotit mineralline rastlanmıştır. Kesitte kayaç parçası oranı %1-2 oranında izlenmiştir (Şekil 3. 7).



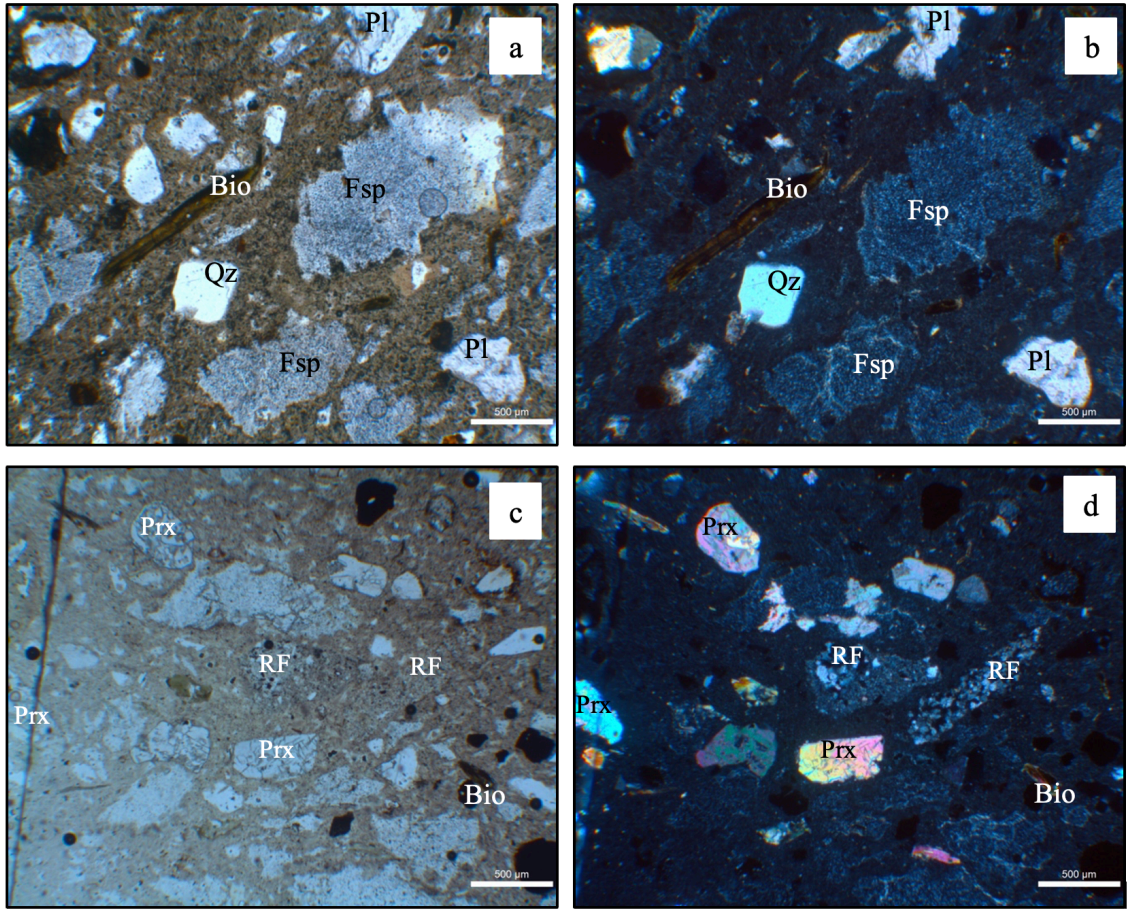
Şekil 3. 7. İğnimbirit 3 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat).

İğnimbirit 4 örneği genel olarak biyotit ve kuvars minerali bakımından zengin olup, içeriğindeki feldispatlar yer yer kaolinleşmiştir. Hamur içinde mikritik kalsitler yoğun bir şekilde izlenmiştir. Kayaç parçalarının içeriğinde ağırlıklı olarak kuvarslar gözlenmiştir. Kuvars mineralleri, volkanik matris tarafından aşındırılmıştır. Matriks silis ve kil minerallerine dönüşmüş; biyotit fenokristalleri opak minerallerle yer değiştirmiştir. Genel olarak, silisleşme ve killeşme ürünleri yaygın değişim ürünleri olarak görülmektedir. Kesitte kayaç parçası oranı %1-2 oranı arasında değişmektedir (Şekil 3. 8).



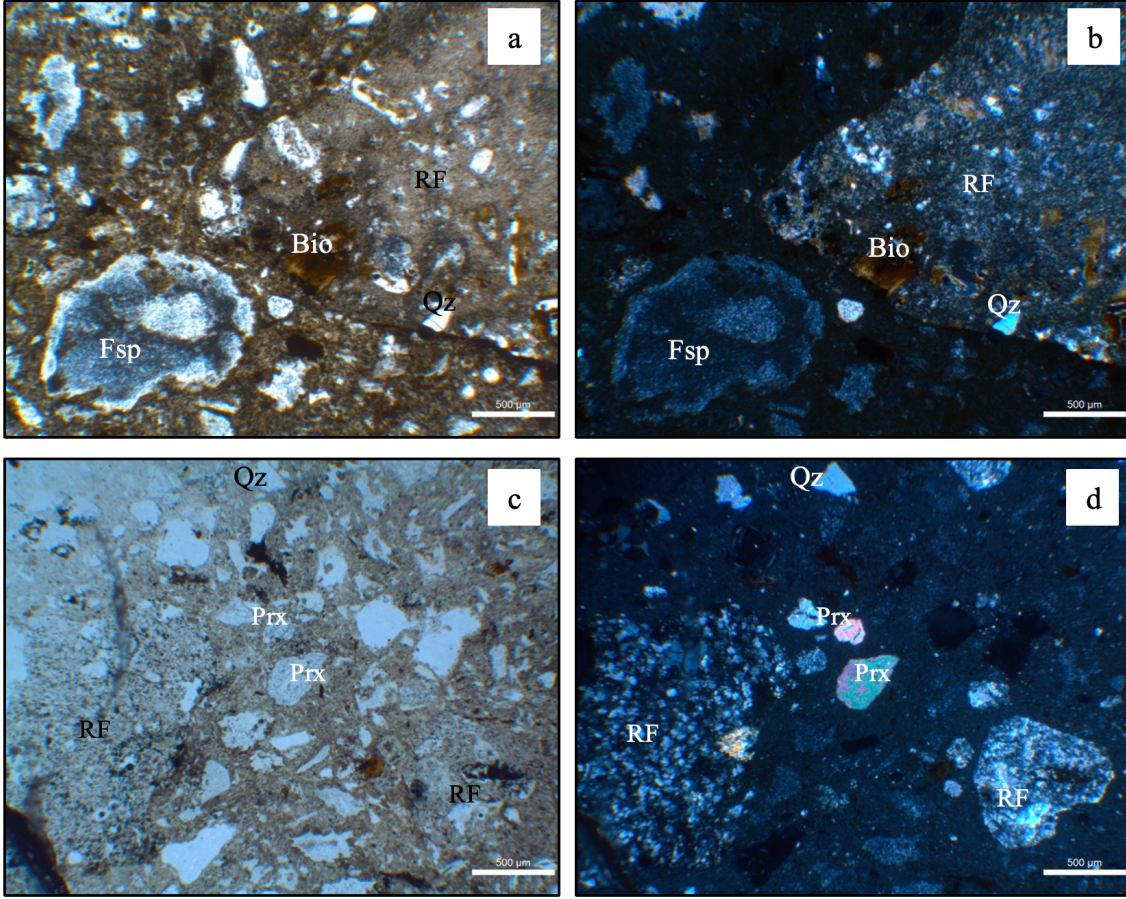
Şekil 3. 8. İgnimbirit 4 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat).

İgnimbirit 5 örneği de genel olarak biyotit minerali bakımından zengin olup, biyotitler büyük ölçüde alterasyona uğramıştır. İçeriğindeki feldispatların tamamı kaolinleşmiştir. Hamur içinde mikritik kalsitler izlenmiş olup kesitte yer yer plajiyoklaz, kuvars ve piroksen mineralleri gözlenmiştir. Polisentetik ikizlenme gösteren plajiyoklaz fenokristalleri, püskürük patlamalarını gösteren kırılmış ve/veya çatlamış bir dokuya sahiptir. İncelenen örneğin kayaç parçası oranı yaklaşık %5 oranında değişmektedir (Şekil 3. 9).



Şekil 3. 9. İğnimbirit 5 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat, Pl:plajiyoklaz, Prx:piroksen).

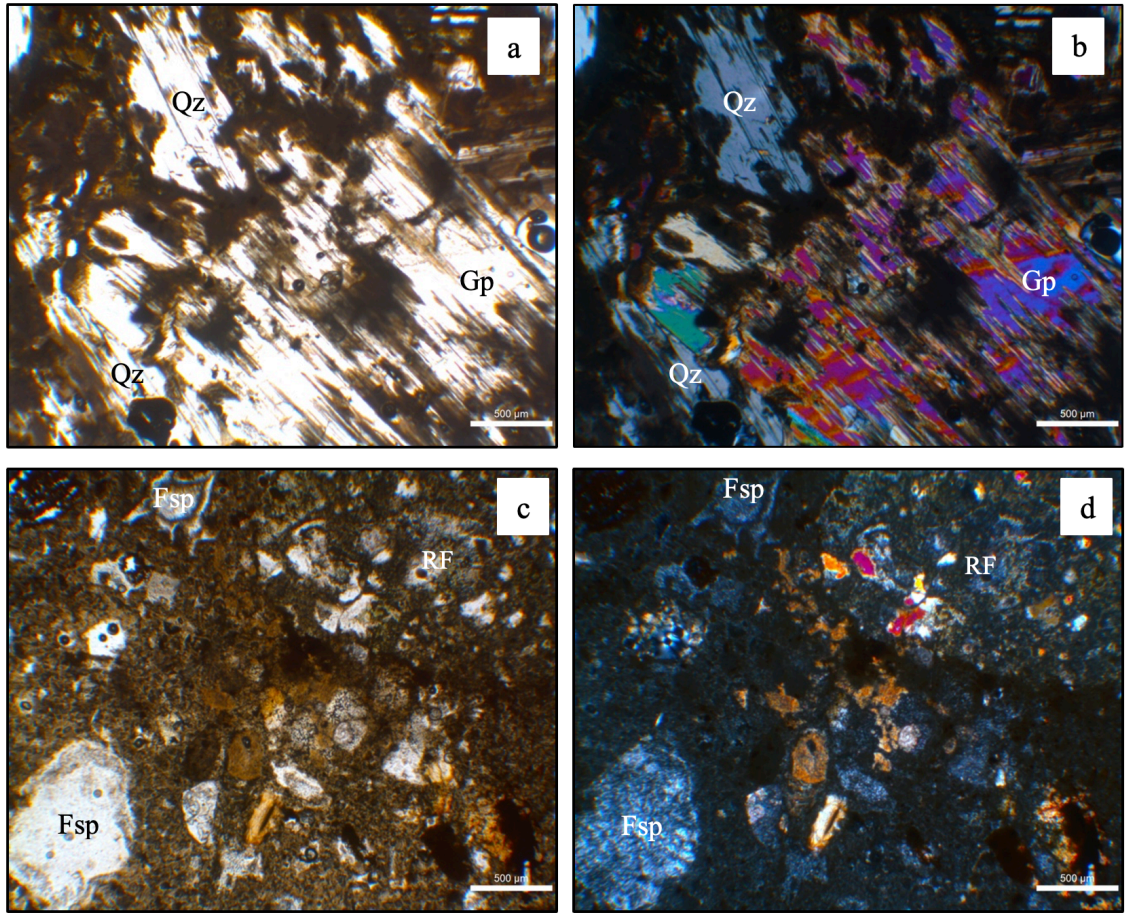
İğnimbirit 6 örneğinde gözlenen feldispatlar bozunmadan kaynaklı killeşmiştir. Kuvarslar ağırlıklı olarak kayaç parçalarının içinde gözlenmiş olup biyotit minerallerine rastlanmıştır. Kayaç parçaları (RF) farklı boyut ve şekillerde, matriks içinde dağılmış durumdadır. 2. Nicol'de daha net anlaşılan yer yer piroksen mineralleri izlenmiştir. Tüm görüntülerde ince taneli bir matriks yapısı görülmekte olup, bu matriks, mineralleri çevreleyen ince taneli kül/volkanik camdan oluşmaktadır. Kesitte kayaç parçası oranı %2-5 oranında değişmektedir (Şekil 3. 10).



Şekil 3. 10. İğnimbirit 6 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, Bio: biyotit, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat, Prx:piroksen).

İğnimbirit 7 örneğinden alınan ince kesitte jipsler görülmüştür. Yer yer kayaç parçaları izlenmiş olup, bu kayaç parçalarının içlerinde kuvars minerallerine rastlanmıştır. Kuvars kristalleri, hem polarize ışık altında hem de düz ışık altında oldukça belirgindir. Kayaç içindeki biyotitler bozunmuş olarak gözlenmiştir. Feldispat taneleri ise daha açık renkli olup, killeşmiştir ve ince taneli matris içinde belirgin bir şekilde seçilebilmektedir. Görüntülerdeki jips (Gp) mineralleri, özellikle tabakalı ve lifli yapısıyla dikkat çekmektedir. Kesitte kayaç parçası oranı %0-1 oranında değişmektedir (Şekil 3. 11).

Genel olarak, minerallerin dağılımı ve matrisin özellikleri, kayaç yapısının heterojen doğasını yansıtmaktadır.



Şekil 3. 11. İğnimbirit 7 adlı örnekten alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol mikroskop görüntüleri (Qz: kuvars, RF: kayaç parçası, Fsp: Feldispat, Gp:jips).

3.2.1. Minerallerin X- Işınları Yansıması ile Tayini

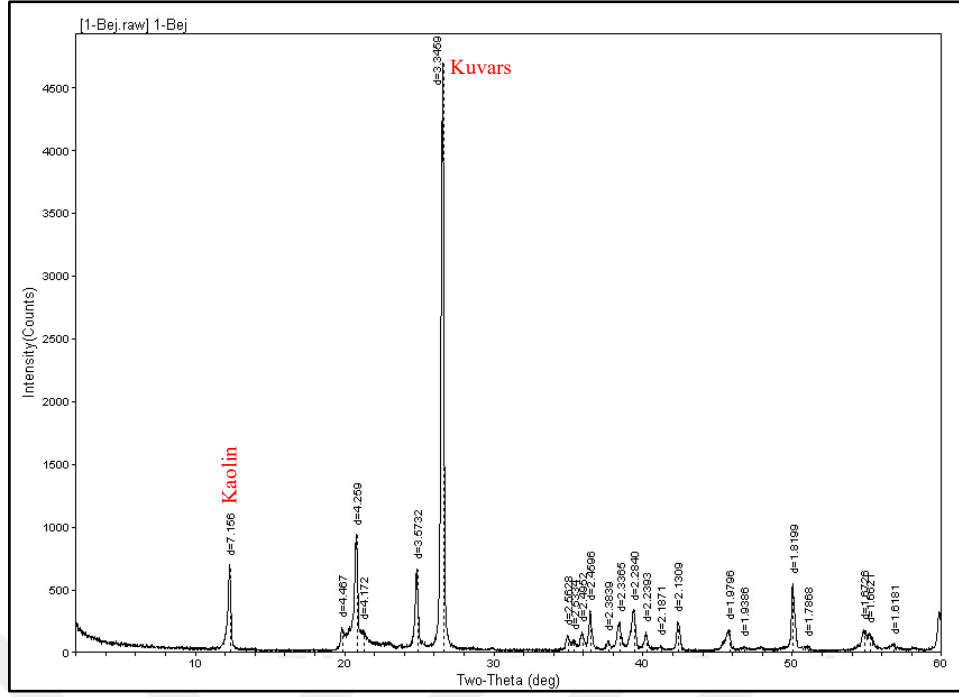
Kaya örneklerinden elde edilen toz numuneler, X-ışınları kırınım analizi için Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Philips PW-1140 model X-ışınları difraktometresiyle incelenmiştir. Difraktometrede, 2°/dak hızında hareket eden bir gonyometre kullanılmıştır. Tüm kayaç (TK) analizlerinde, ASTM (1972)'nin kartotekslerinden elde edilen mineral referansları kullanılarak difraktogramlardaki piklerin tanımlanması gerçekleştirilmiştir. X-ışınları kırınım analizi ile elde edilen difraktogramlarda yer alan piklerin (Şekil 3. 12-Şekil 3. 18) oranlarına dayanarak mineral yüzdeleri, Gündoğdu (1982) tarafından önerilen yöntemle göre hesaplanmıştır.

7 kaya örneği üzerinde gerçekleştirilen tüm kaya analizlerinin ardından, kil minerali içerdikleri tespit edilen 5 örnekte kil fraksiyonları (KF) ayrıştırılmıştır. X-ışını difraktometresi analizleriyle elde edilen veriler, örneklerin kil minerali bileşimlerini tanımlamak için kullanılmıştır.

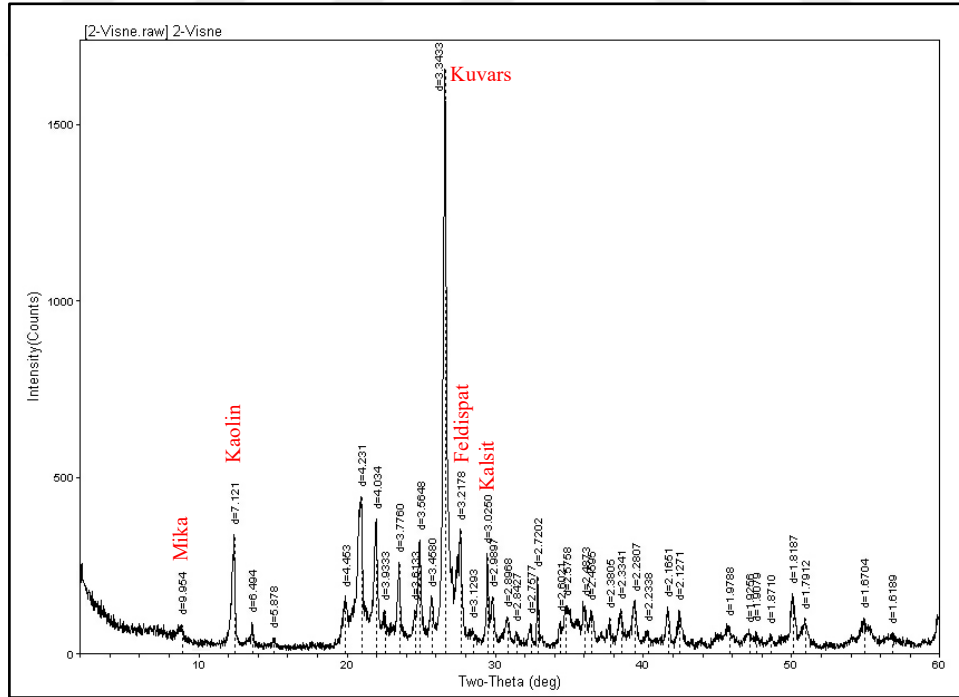
Temel (1992) tarafından yapılan bir çalışmada kavak ignimbiritlerinden oluşan 61 örnek üzerinde yapılan X-RD sonuçlarına göre, en yaygın görülen mineraller sırasıyla kuvars, feldispat ve kil mineralleridir. Optik mikroskop incelemeleri ile X-RD (TK) sonuçları karşılaştırıldığında hidrotermal alterasyon ile feldispatların tamamına yakınının kil mineraline dönüşmüş ve kaolinitler oluşmuştur. Bu tez çalışmasında 7 örnek üzerinde yapılan tüm kayaç analizinden elde edilen veriler ile Temel (1992)'de incelenen örneklerden ulaşılan sonuçlar karşılaştırılmış olup, ağırlıklı olarak kuvars, kil ve eser miktarda diğer (kalsit, jips, mika vb.) minerallerden oluşan örnekler, önceki çalışmalarda çıkan sonuçları destekler niteliktedir. Çizelge 3. 2'de 7 örnek için hesaplanan mineral yüzdeleri verilmiştir. Tüm örneklerde kuvars ve kil mineralleri çeşitli yüzdelerde bulunurken, bazı örneklerde bunun yanı sıra feldispat, mika, kalsit ve jips mineralleri de gözlenmiştir. Kuvars oranı örnekler arasında %13.99 ile %67.84 arasında değişiklik gösterirken, kil oranı çoğu örnekte yüksek seviyelerde tespit edilmiştir.

Çizelge 3. 2. İgnimbirit örneklerinin X-RD (TK) çözümleme sonuçları.

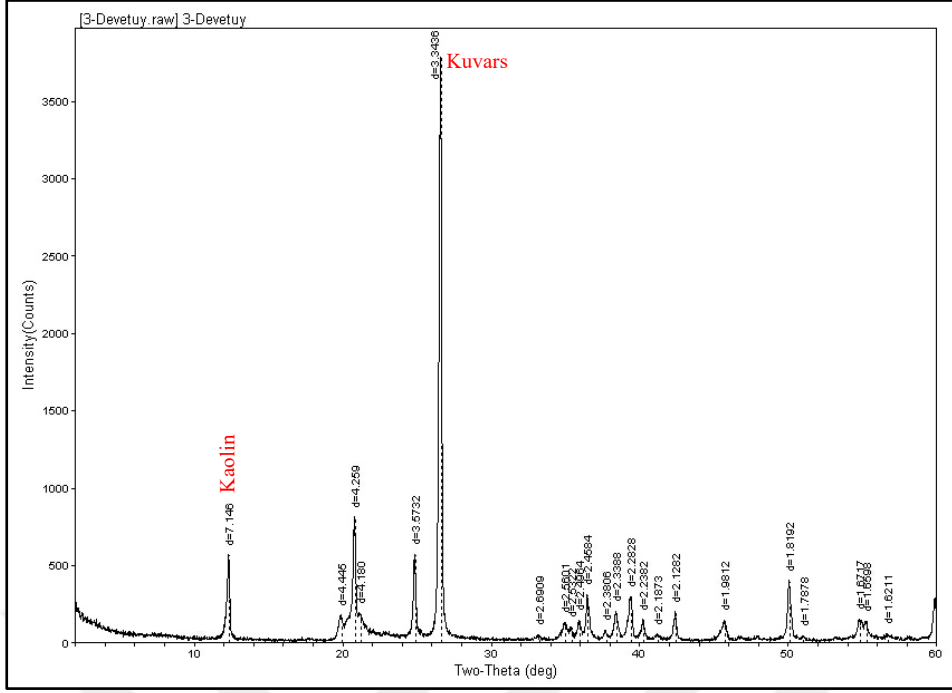
Örnek No	Mineraller (%)						
	Kil	Kuvars	Kaolin	Mika	Feldispat	Kalsit	Jips
İgnimbirit 1	-	57.56	42.44	-	-	-	-
İgnimbirit 2	43.32	13.99	17.67	7.73	12.47	4.82	-
İgnimbirit 3	-	52	48	-	-	-	-
İgnimbirit 4	-	41.45	42.03	5.65	-	10.87	-
İgnimbirit 5	42.85	23.41	18.34	6.38	3.95	5.07	-
İgnimbirit 6	-	48.89	45.07	-	-	6.04	-
İgnimbirit 7	-	67.84	19.34	-	5.52	5.4	1.9



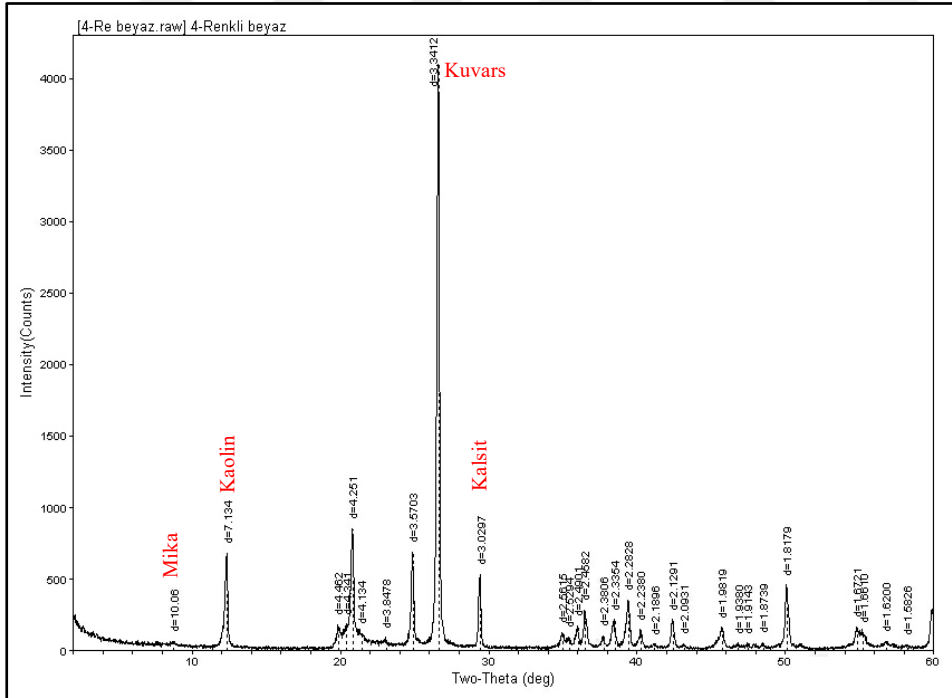
Şekil 3. 12. İğnimbirit 1 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen kayaç difraktogramları.



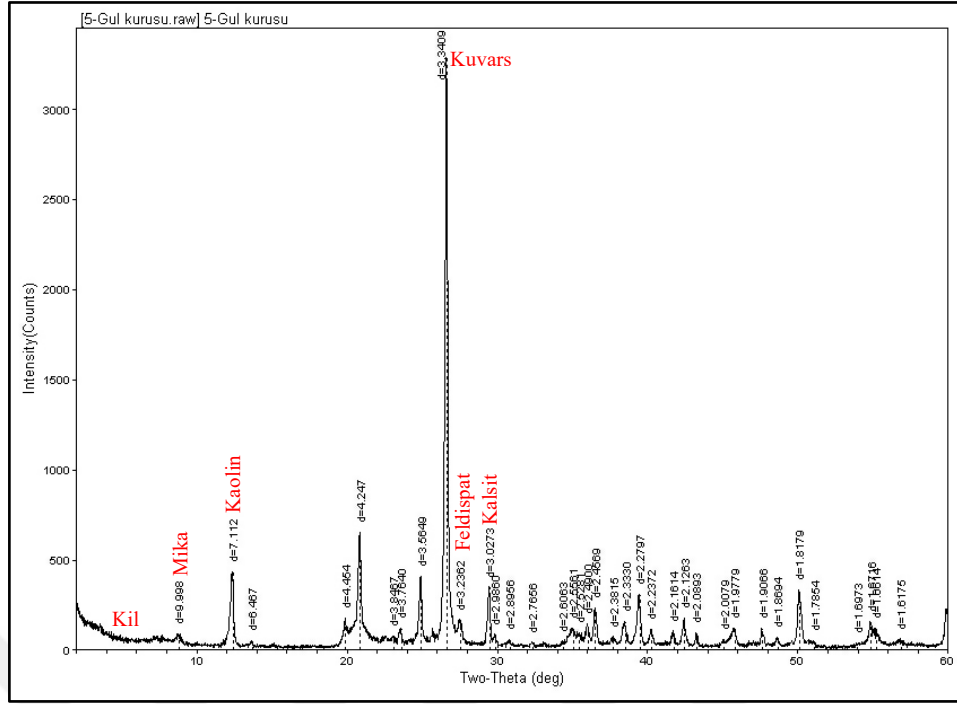
Şekil 3. 13. İğnimbirit 2 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.



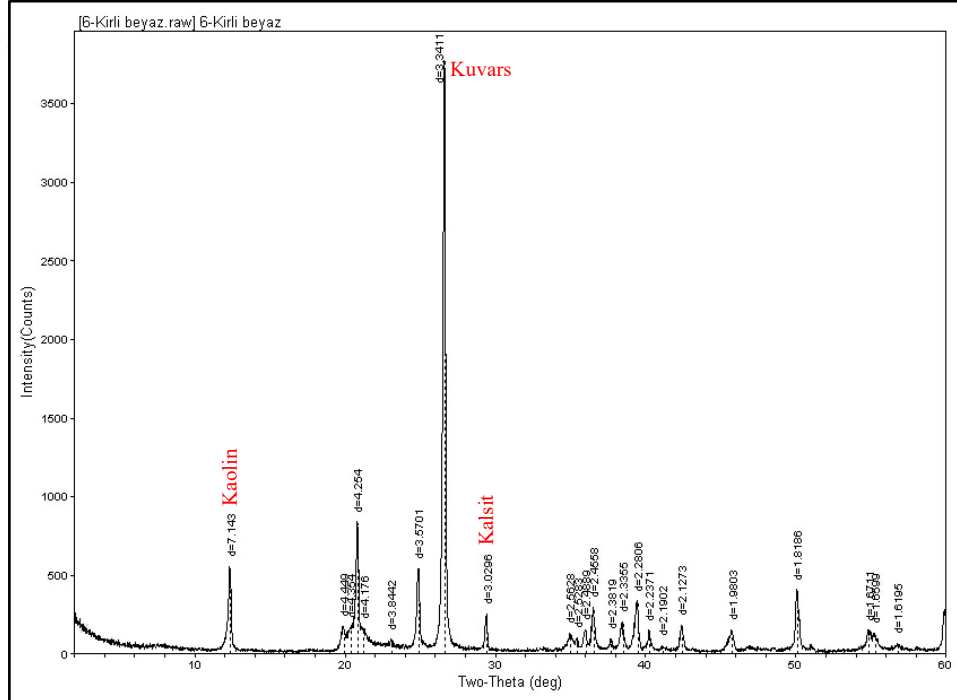
Şekil 3. 14. İğnimbirit 3 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.



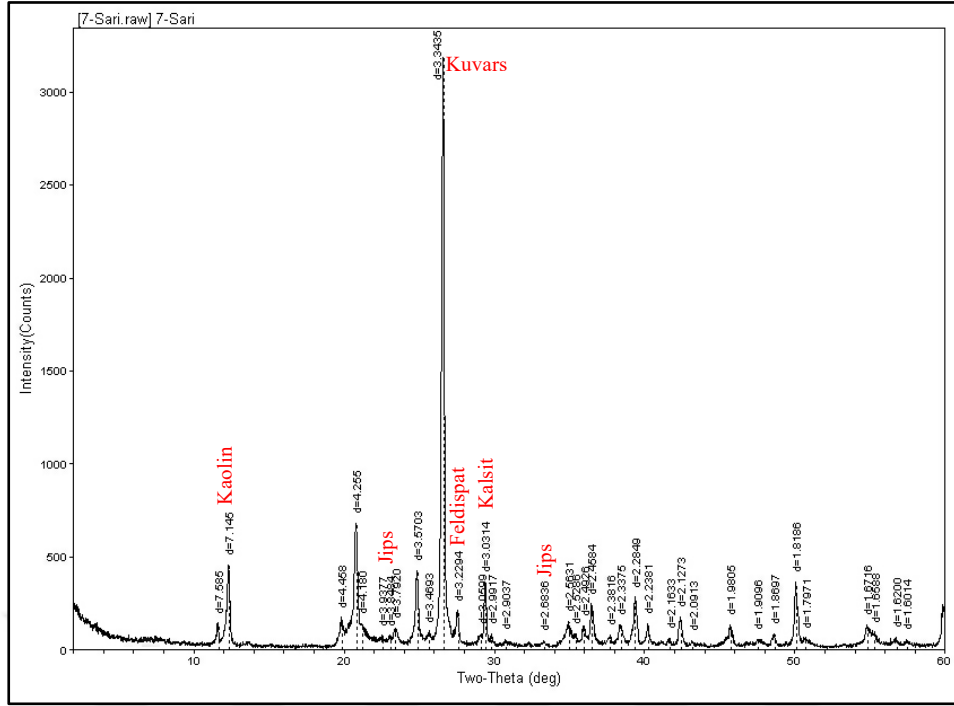
Şekil 3. 15. İğnimbirit 4 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.



Şekil 3. 16. İğnimbirit örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.



Şekil 3. 17. İğnimbirit 6 örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.



Şekil 3. 18. İğnimbirit örneğinin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenen tüm kayaç difraktogramları.

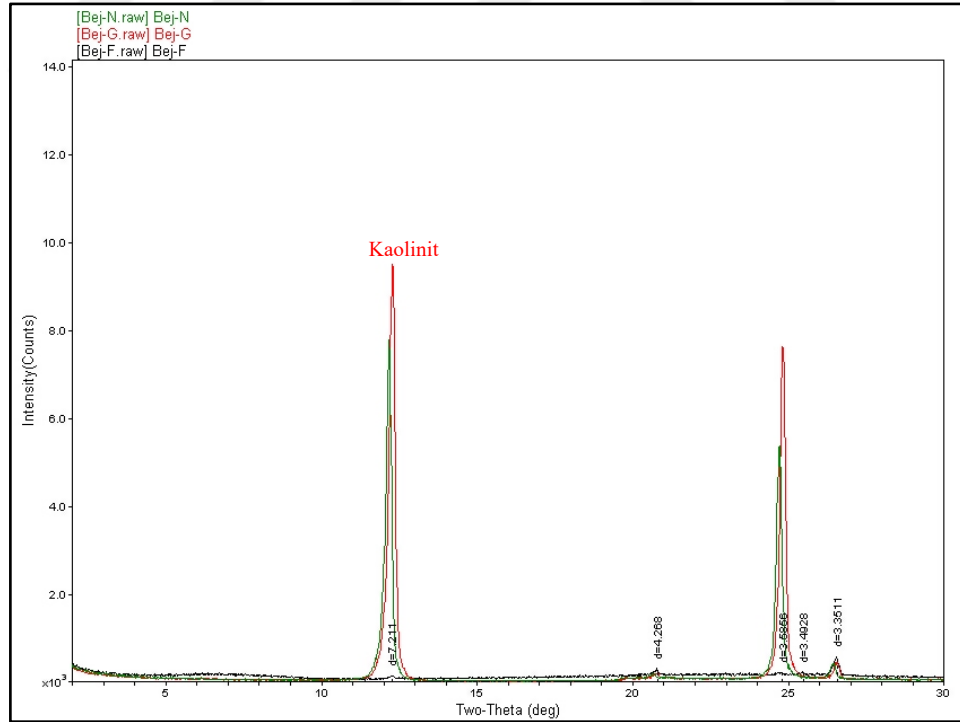
Kil fraksiyonunun bileşimini belirlemek için, Gündoğdu (1982) ve Gündoğdu ve Yılmaz (1984) tarafından önerilen kil ayırma yöntemi kullanılmıştır. Bu metodoloji, kimyasal çözme (karbonat, sülfat gibi mineral fazları ile organik madde), kararlı bir süspansiyon elde etmek için yıkama ve kil fraksiyonunu elde etmek için sifonlama adımlarını içermektedir. Sonrasında, sedimentasyon yolu ile ayrılan 2 mikrondan daha küçük olan kil fraksiyonlarının kil minerallerinin doğru şekilde tanımlanabilmesi için üç farklı difraktogram (normal, etilen glikol ve fırınlı) kaydedilmiştir. Kil minerallerinin tanımlanması ve yarı nicel yüzdeleri, (001) yansımaları kullanılarak belirlenmiştir. Temel (1992) yaptığı çalışmada 23 örnekte gerçekleştirdiği kil fraksiyonu çözümlemeleri illit, simektit ve kaolinit varlığını saptamıştır. Bu tez çalışmasında da yapılan kil ayırma işleminde kaolinit egemen kil minerali olarak bulunmuştur. Eser miktarda bulunan simektit volkan camının alterasyon ürünü olurken, illit biyotitler ile temsil edilmektedir. Kaolinitler ise hidrotermal alterasyon sonucu oluşmuşlardır (Temel,1992).

Çizelge 3. 3'te 5 örnek için hesaplanan kil mineralleri yüzdeleri verilmiştir. Buna göre örneklerin tamamı yüksek oranda kaolinit içermektedir.

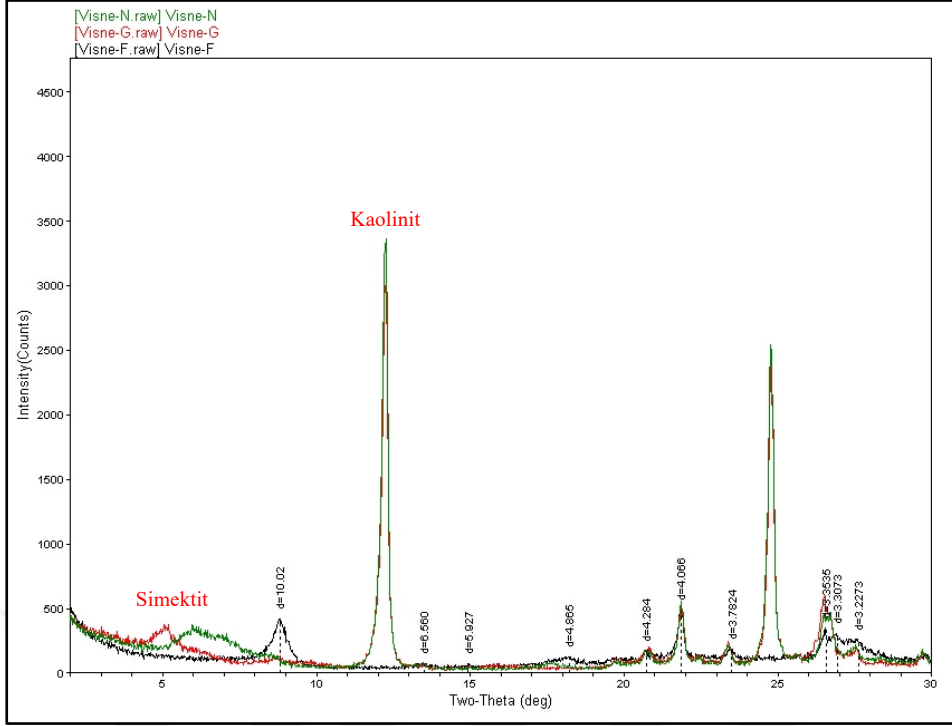
İğnimbirit 1 ve İğnimbirit 4 tamamen kaolinitten oluşurken, İğnimbirit 2, İğnimbirit 5 ve İğnimbirit 7 örneklerinde kaolinit oranı yüksek olmakla birlikte, küçük miktarlarda simektit ve illit de bulunmaktadır. Ayrıca tüm kayaç analizinden çıkan sonuçlara göre İğnimbirit 1 ile aynı mineralojik bileşime sahip oldukları için İğnimbirit 3 ve İğnimbirit 6 için kil ayırma işlemi yapılmamış olup, İğnimbirit 1 gibi %100 kaolinitten oluşmaktadır (Şekil 3. 19-Şekil 3. 23).

Çizelge 3. 3. İğnimbirit örneklerinin X-RD (KF) çözümleme sonuçları.

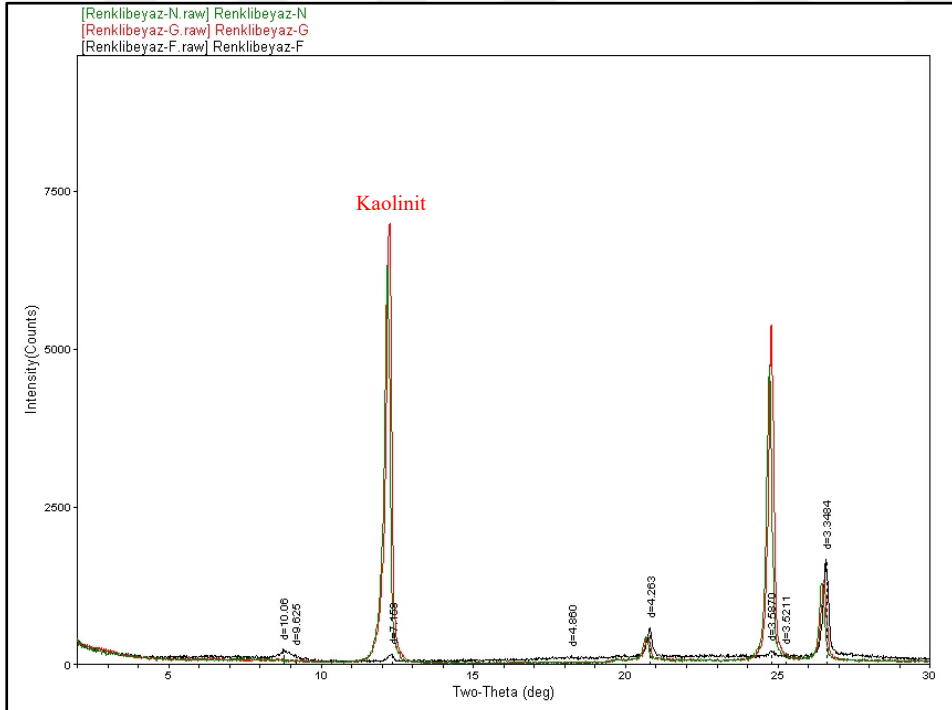
Örnek No	Kil İçeriği (%)		
	Kaolinit	Simektit	İllit+Simektit
İğnimbirit 1	100	-	-
İğnimbirit 2	94	6	-
İğnimbirit 3	100	-	-
İğnimbirit 4	100	-	-
İğnimbirit 5	95	-	5
İğnimbirit 6	100	-	-
İğnimbirit 7	95	-	5



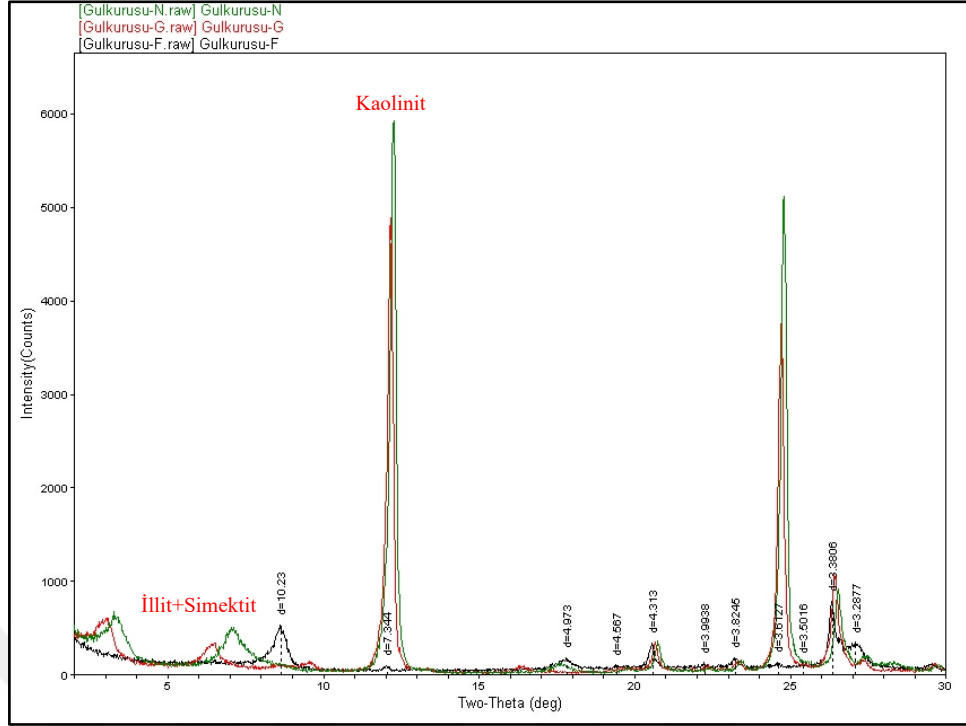
Şekil 3. 19. İğnimbirit 1 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.



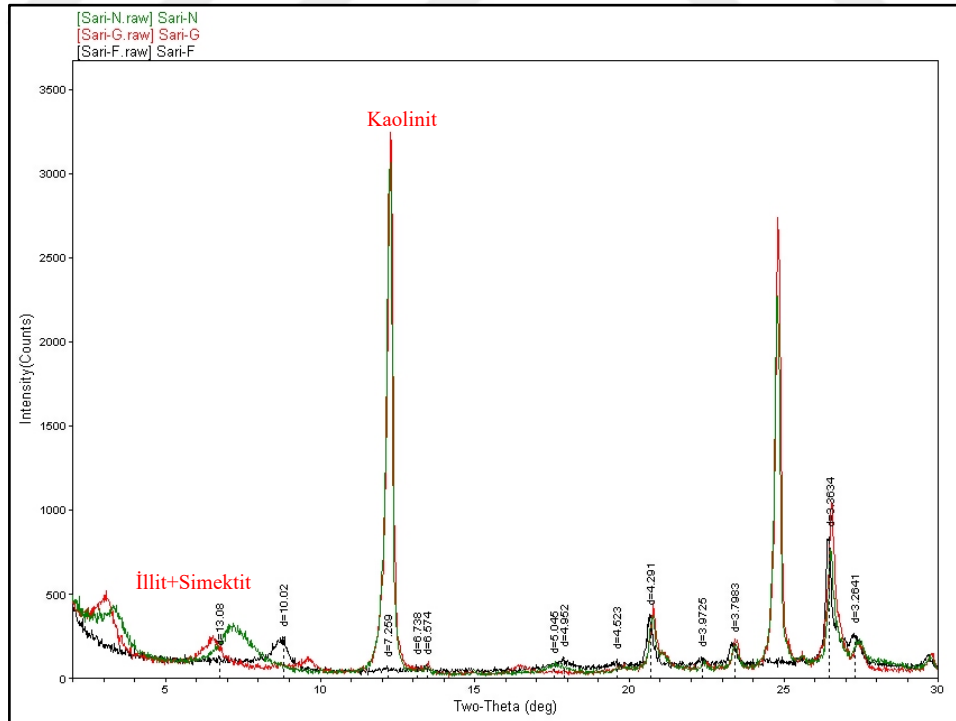
Şekil 3. 20. İğnimbirit 2 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.



Şekil 3. 21. İğnimbirit 4 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.



Şekil 3. 22. İğnimbirit 5 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.



Şekil 3. 23. İğnimbirit 7 adlı örneğin X- ışınları kırınım analizleriyle belirlenmiş kil fraksiyon difraktogramları.

4. İGNİMBİRİTLERİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ

Laboratuvar ortamında, her bir ignimbirit örneği için ayrı ayrı, ısı etkiye maruz kalmamış oda sıcaklığındaki örneklerle birlikte, çeşitli sıcaklık koşullarına tabi tutulacak olan karot örnekler hazırlanmıştır. Bu amaçla, 100°C, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklarında deneyler yapılabilmesi için toplam yedi farklı sıcaklık düzeyinde örnekler hazırlanmıştır. Bu örnekler ignimbirit bloklarından NQ çapında (47.6 mm) ve her bir sıcaklık düzeyi için beşer adet olmak üzere toplam 35 karot örneği olacak şekilde alınmış ve bu işlem yedi farklı ignimbirit türü için tekrarlanmıştır. Böylece toplamda 245 adet karot örneği hazırlanmıştır (Şekil 4. 1). Ayrıca, Brazilian çekilme dayanımı deneyi için NX çapında (54.7 mm) belirli örneklerden, bazı sıcaklıklarda karot yetersizliği nedeniyle her bir sıcaklıktan üçer adet olmak üzere toplam 96 adet örnek temin edilmiştir (Şekil 4. 2). Hazırlanan tüm karot örnekleri, ısıtılmadan önce ve sonra, birim hacim ağırlığının tespiti amacıyla boy, çap ve ağırlıkları ölçülmüştür. Ayrıca, bu örneklerin bir kısmı üzerinde tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü, akustik emisyon, P-dalga hızı ve iğne penetrometre deneyi yapılmıştır. Bir diğer grup örnek ise çekilme dayanımı testleri için kullanılmıştır. Her bir sıcaklık seviyesinde beşer adet NX çaplı örnekten, tek eksenli sıkışma testi öncesinde P-dalga hızını belirlemek amacıyla birer adet örnek seçilmiş, aynı şekilde akustik emisyon deneyinde kullanılmak üzere de birer adet örnek ayrılmıştır. Bu örnekler, UCS testi için kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında, farklı sıcaklık koşullarının ignimbirit örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Ancak bu çalışmada sadece sıcaklık etkilerine odaklanılmıştır. İgnimbiritlerin uzun vadeli performansı ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığı, nem, asidik yağmurlar ve donma-çözülme döngüleri gibi koşullarda daha fazla araştırılması önemlidir. Gelecekte, bu tür deneylerin farklı çevresel koşullarda yapılması gerçek dünya koşullarını daha iyi yansıtabilir. Bu bağlamda, sıcaklık değişimlerinin malzeme özelliklerini nasıl etkilediğini anlamak ve ilgili testler aracılığıyla elde edilen verilerle, malzeme davranışını detaylı bir şekilde aşağıdaki alt başlıklarda incelenmiştir.



Şekil 4. 1. 7 farklı ignimbirit örneğinden alınan NQ çaplı (47.6 mm) karotların bir kısmından görünüm.



Şekil 4. 2. 7 farklı ignimbirit örneğinden alınan NX çaplı (54.7 mm) karotların bir kısmından görünüm.

4.1. Sıcaklığa Maruz Bırakılmamış Örneklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Sıcaklığa maruz bırakılmamış ignimbirit örneklerinde dayanım deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan NQ (UCS deneyleri için) ve NX (Brazilian çekme dayanımı deneyleri için) çaplı karotlarda birim hacim ağırlık (γ) değerlerini tespit etmek amacıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde, ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem dikkate alınmıştır. Çizelge 4. 1 ve Çizelge 4. 2’de bu deneylerden sağlanan bulgular verilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde belirlenen birim hacim ağırlık değerleri birbirine benzemekle birlikte Brazilian deneyleri için hazırlanan küçük silindirik örneklerde birim hacim ağırlıkların bir miktar daha düşük belirlendiği görülmektedir.

Özgöl ağırlık tayini için de aynı şekilde oda sıcaklığındaki örnekler kullanılmış ve ISRM (2007) standartlarına uygun olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Toplamda yedi farklı ignimbirit örneğinden üçer adet olmak üzere 21 adet örnek üzerinde bu deneyler tekrarlanmıştır. Fiziksel parametreler arasındaki dönüşüm eşitliklerinden yararlanılarak boşluk oranına (e) geçilmiştir. Çizelge 4. 3'te bu deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiş olup hesaplanan ölçümlerin ortalamaları kullanılmıştır.

Çizelge 4. 1. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinden (NQ çaplı) hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	Min. γ (kN/m ³)	Maks. γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)
İgnimbirit 1	43	14.34	15.45	14.74
İgnimbirit 2	35	13.65	15.89	14.91
İgnimbirit 3	44	14.05	14.74	14.45
İgnimbirit 4	35	14.88	15.63	15.22
İgnimbirit 5	45	15.84	17.65	16.43
İgnimbirit 6	44	13.77	15.61	15.19
İgnimbirit 7	42	16.88	17.38	17.05

Çizelge 4. 2. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinden (NX çaplı) hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	Min. γ (kN/m ³)	Maks. γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)
İgnimbirit 1	21	13.98	15.44	14.58
İgnimbirit 2	21	14.00	15.15	14.78
İgnimbirit 3	8	13.30	14.50	14.27
İgnimbirit 4	7	14.25	14.66	14.50
İgnimbirit 5	9	15.16	17.93	16.10
İgnimbirit 6	9	14.85	15.17	15.12
İgnimbirit 7	21	15.26	16.96	16.52

Çizelge 4. 3. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinden hesaplanan özgül ağırlık ve boşluk oranı değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	Min. Gs	Maks. Gs	Ort. Gs	Ort. e
İgnimbirit 1	3	2.35	2.57	2.48	0.65
İgnimbirit 2	3	2.38	2.50	2.45	0.62
İgnimbirit 3	3	2.40	2.58	2.48	0.69
İgnimbirit 4	3	2.56	2.76	2.64	0.70
İgnimbirit 5	3	2.46	2.57	2.51	0.50
İgnimbirit 6	3	2.35	2.47	2.40	0.56
İgnimbirit 7	3	2.40	2.53	2.46	0.39

0°C’de toplam 7 örnekte gerçekleştirilen sonik hız deneyinde ISRM (2007) tarafından önerilen hususlar dikkate alınmıştır. Yöntem, kayaç içindeki ultrasonik dalgaların hızını ölçme prensibine dayanır. Karot örneklerinin alt ve üst yüzeyleri düzeltilmiş olup, uzunluğu (L) ve çapı (D) kumpas yardımıyla 0,1 mm hassasiyetle, birbirine dik olacak şekilde iki yönden ölçülmüştür. Bu işlemten sonra, P-dalgasının örnekten geçiş süresi mikro saniye (μs) cinsinden kaydedilmiştir. Çizelge 4. 4’te önerilen eşitlikle hesaplanan P-dalga hızı (V_p) ait sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4. 4. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örnekleri için hesaplanan Sonik P Dalgası Hızı (V_p) değerleri.

Örnek No	L_{ort} (mm)	$T_p(\mu s)$	V_p (m/s)
İgnimbirit 1	119.26	64.70	1843.3
İgnimbirit 2	122.36	69.90	1750.5
İgnimbirit 3	122.90	59.00	2083.1
İgnimbirit 4	118.76	50.80	2337.8
İgnimbirit 5	122.30	54.20	2256.5
İgnimbirit 6	119.61	57.70	2073.0
İgnimbirit 7	123.07	52.00	2366.7

* T_p : P- dalgasının etkin ilerleme zamanı(μs), L: Silindirik deney örneğinin boyu (mm)

Sıcaklığa maruz bırakılmamış toplamda 35 örnekte tek eksenli sıkışma tayini (UCS) yapılmıştır. Çalışma yapılan laboratuvarında üç adet tek eksenli yükleme ünitesi bulunmaktadır. Bu üniteler 10, 50 ve 150 tonluk yükleme kapasitesine sahiptir. Fakat deneylerde kullanılacak örneklerin öngörülen dayanımları düşük olduğu için 50 kN (5 Ton) kapasiteye sahip bir yük hücresi kullanılmıştır. Boy/çap oranlarının en az 2'nin üstünde olmasına ve özdeş boyutlara sahip örnekler üzerinde deneyler yapılmasına dikkat edilmiştir. ISRM (2007) tarafından, kaya malzemesinin dayanımının bir ön değerlendirmesi amacıyla önerilen dayanım tanımlamaları Çizelge 4. 5 'te verilmiş olup, ısıtılmış işlem görmemiş örnekler üzerinde UCS deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4. 6'da sunulmuştur. Ortalama UCS değerleri 2.71 ile 11.84 MPa arasında değişen örneklerin bu sınıflama tanımlarına göre çok zayıf kaya ve zayıf kaya aralığına uyduğu görülmektedir.

Çizelge 4. 5. Kayaların dayanımının arazide tahmin edilmesine yönelik ISRM (2007) tarafından önerilen ölçütler (Ulusay, 2010'dan alınmıştır).

Simge	Dayanım Tanımı	Saha Tanımlaması	UCS (σ_c) (MPa)
R0	Aşırı derecede zayıf kaya	Kayanın yüzeyinde tırnak ile çentik oluşturulabilir.	0.25-1.10
R1	Çok zayıf kaya	Jeolog çekiciyle sert bir darbeye ufalanan kaya, çakı ile doğranabilir.	1-5
R2	Zayıf kaya	Kaya, çakı ile güçlkle doğranır. Jeolog çekici ile yapılacak sert bir darbe kayacın yüzeyinde iz bırakır.	5-25
R3	Orta derecede sağlam kaya	Kaya, çakı ile doğranamaz. Kaya örneği, jeolog çekici ile yapılacak tek ve sert bir darbeye kırılabilir.	25-50
R4	Sağlam kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile birden fazla darbenin uygulanması gerekir.	50-100
R5	Çok sağlam kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile çok sayıda darbe gerekir.	100-250
R6	Aşırı derecede sağlam kaya	Kaya örneği, jeolog çekici ile sadece yontulabilir.	> 250

Çizelge 4. 6. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinde gerçekleştirilen UCS deneylerine ait sonuçlar.

Örnek No	Örnek Sayısı	Min. UCS (MPa)	Maks. UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
İgnimbirit 1	5	1.76	3.51	2.71
İgnimbirit 2	5	1.72	6.48	4.02
İgnimbirit 3	5	3.26	6.71	5.03
İgnimbirit 4	5	4.72	9.89	7.53
İgnimbirit 5	5	5.79	10.13	8.59
İgnimbirit 6	5	2.67	6.74	4.74
İgnimbirit 7	5	9.54	14.63	11.84

Malzemenin elastik davranışını belirlemek için ısıtma işlemi görmemiş toplamda 26 örnekte yapılan UCS deneylerinden elde edilen gerilme değerleri ile örneklerin yükleme koşulundaki yer değiştirme verilerinden yararlanılmıştır. Tek eksenli yükleme koşulunda, "gerilme-birim deformasyon" eğrilerinden Elastisite Modülü (E) hesaplanmıştır. Çizelge 4. 7’de bu ölçümlere ilişkin ortalama elastisite modülü sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4. 7. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinde hesaplanan Elastisite Modülü değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	Min. E (MPa)	Maks. E (MPa)	Ort. E (MPa)
İgnimbirit 1	3	503.922	835.870	626.600
İgnimbirit 2	3	443.306	815.753	616.183
İgnimbirit 3	5	888.209	1256.535	1082.189
İgnimbirit 4	4	907.187	1999.211	1526.239
İgnimbirit 5	4	1434.528	1668.714	1462.113
İgnimbirit 6	3	1028.534	1168.556	1104.047
İgnimbirit 7	4	1530.703	1942.988	1740.490

Düşük dayanımlı yumuşak malzemelerde Schmidt çekici kullanılarak UCS belirlenirken örnek yüzeyinde ezilmeler, geri sıçrama değerinin okunamaması ve UCS belirleme abağında uygun birim hacim ağırlık değerinin bulunmaması nedeniyle Schmidt çekicinin ignimbirit örneklerinde dayanım belirleme konusunda yetersiz kalacağı düşünülmüştür. Schmidt çekiçlerine alternatif olarak İğne Penetrometresi, düşük dayanımlı yumuşak kayalardaki UCS değerlerini pratik bir şekilde belirlemek için kullanılmaktadır. Bu yöntemin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, Ulusay ve ark. (2014) İğne Penetrometre testine yönelik bir yöntem önermiştir. İğne Penetrometresi ile elde edilen NPI değerleri, benzer kaya türleri üzerinde yapılan çalışmalardan türetilen denklemler kullanılarak UCS değerlerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, olası bir yangın sonrasında malzeme dayanımlarını önceden değerlendirebilmek ve hasar tespitine yönelik ön bilgi sağlamak amacıyla bir araç olabileceği düşünülen NPI değerleri incelenmiştir. Bu bölümde öncelikle ısıya maruz kalmamış örneklerin NPI değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4. 8). İleriki bölümlerde NPI değerlerinin kullanım potansiyeli farklı sıcaklıklar için detaylı olarak ele alınmıştır.

Çizelge 4. 8. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinde hesaplanan NPI değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	Min. NPI (N/mm)	Maks. NPI (N/mm)	Ort. NPI (N/mm)
İgnimbirit 1	1	-	-	12.50
İgnimbirit 2	1	14.3	16.7	15.87
İgnimbirit 3	1	15.4	20.0	17.86
İgnimbirit 4	1	22.2	25.0	23.15
İgnimbirit 5	1	20.0	28.6	24.52
İgnimbirit 6	1	18.2	20.0	18.79
İgnimbirit 7	1	-	-	33.33

Isıya maruz bırakılmamış toplam 21 örneğin, çekilme dayanımı (σ_t) tayini için ISRM (2007) tarafından önerilen NX çapta (54.7 mm) örnekler hazırlanmıştır. Örneklerle ait çekilme dayanımları düşük olacağı ön görüldüğü için UCS deneylerinde kullanılan 50 kN'luk yükleme düzeneği kullanılmıştır. Çizelge 4. 9'da çekilme dayanımı deneylerine ait bulgular sunulmuştur.

Çizelge 4. 9. Oda sıcaklığındaki ignimbirit örneklerinde hesaplanan Brazilian çekilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar.

Örnek No	Örnek Sayısı	Min. σ_t (MPa)	Maks. σ_t (MPa)	Ort. σ_t (MPa)
İgnimbirit 1	3	0.12	0.24	0.17
İgnimbirit 2	3	0.10	0.62	0.32
İgnimbirit 3	3	0.65	0.29	0.50
İgnimbirit 4	3	0.15	0.63	0.34
İgnimbirit 5	3	0.23	0.59	0.47
İgnimbirit 6	3	0.20	0.68	0.44
İgnimbirit 7	3	1.16	1.30	1.24

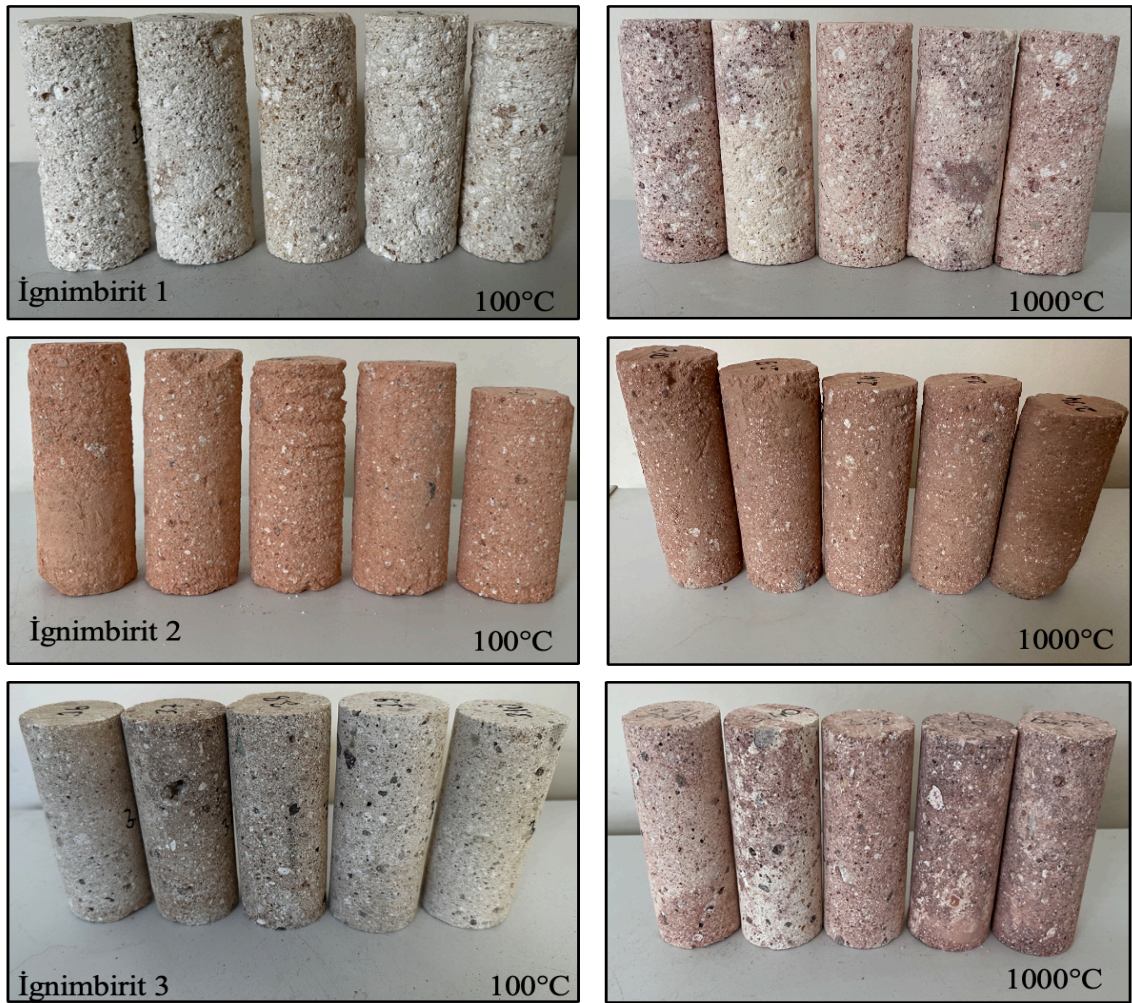
4.2. Sıcaklığa Maruz Kalmış Örneklerin Jeomekanik Özellikleri

İgnimbirit bloklarından alınan örnekler, 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklıklarda ısıtılmış, soğuyan örnekler fiziksel ve mekanik deneyler için hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler, 100 ve 200°C'ye Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'ndaki fırında ısıtılmış olup, diğer sıcaklıklar için yine aynı bölümün Mineraloji Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda bulunan Prothern PLF 130/25 model yüksek ısılı fırınında, ayarlanan sıcaklıklara ulaştıktan sonra 2 saat süreyle ısıtılma maruz bırakılmıştır. Örneklerin fırında 2 saat tutulmasının nedeni, Bölüm 1'de de değinildiği gibi, yangının başlangıcından itibaren müdahale ve söndürülmesine kadar genel olarak 2 saatin geçmesidir. Tezin ilerleyen bölümlerinde, ısıtılma maruz bırakılmamış ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneyler için yapılan değerlendirmelerde, bu sıcaklık 0°C olarak adlandırılmıştır. Ancak, gerçekte bu değerler 0°C değil, oda sıcaklığındaki numunelere aittir. Deneylerde kullanılan yöntemler ısıtılma maruz bırakılmamış örneklerde kullanılan yöntemlerle aynı olup, değişimi incelenen parametreler aşağıda sunulan alt başlıklarda ayrı ayrı sunulmuştur.

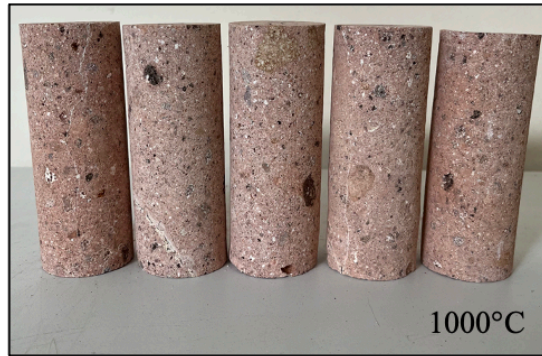
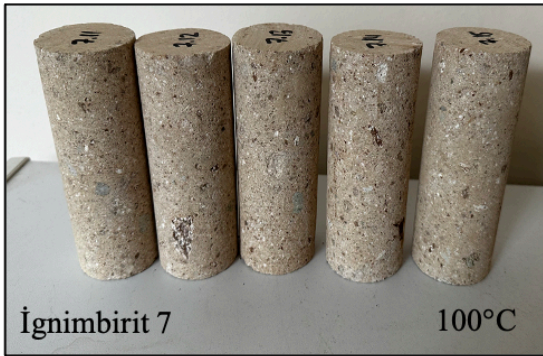
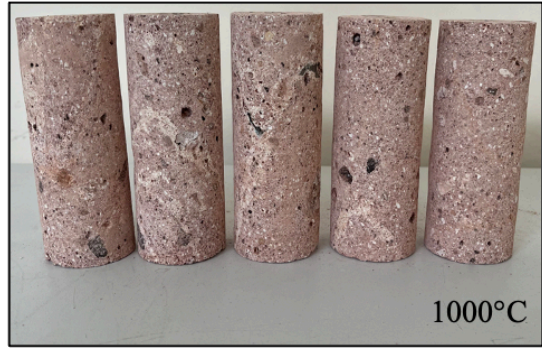
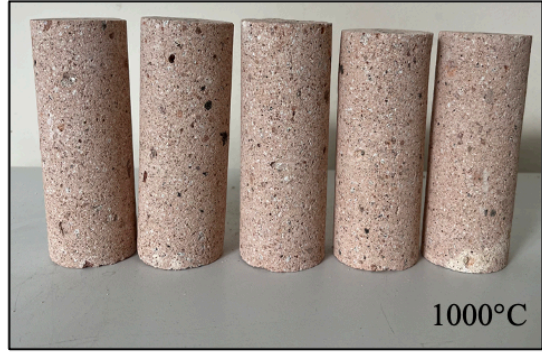
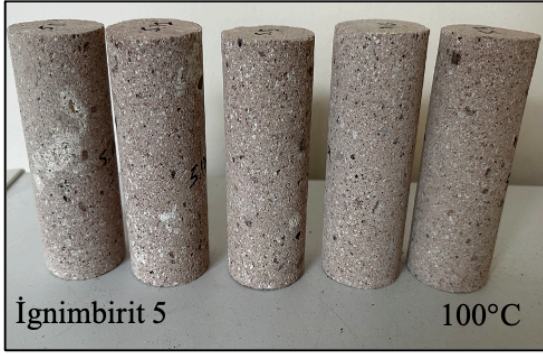
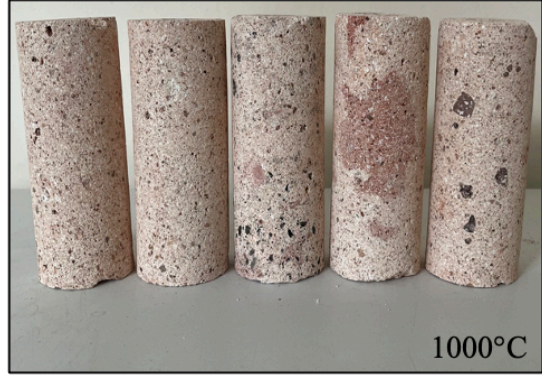
4.2.1. Renk Değişimi

Tüm örneklerde 100 ve 200°C 'de belirgin bir renk değişimi olmazken, 400°C'de renk daha belirgin şekilde koyulaşmış, özellikle pembe tonlar belirginleşmiştir. Bu değişiklikler, mineral yapısında meydana gelen kimyasal reaksiyonlardan, özellikle

demir oksitlerin oluşumundan kaynaklanabilir. Bu da, yüksek sıcaklıklarda termal etkilere maruz kalan kayalarda renk değişiminin, mineralojik değişikliklerle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Mineral içeriklerinde bulunan kaolin bu sıcaklıkta dehidratasyon (bkz. Şekil 4.16) sürecine başlar, 1000 °C’de koyu pembe ve morumsu tonlar baskın olup, bu sıcaklıkta özellikle kaolin, kil ve kalsit içeriği yüksek olan örneklerde, yüksek sıcaklıkların bu mineralleri bozarak yeni fazlara dönüştürmesi ve bunun sonucunda belirgin renk değişikliklerine neden olduğu düşünülmüştür. Kuvars oranının yüksek olduğu örneklerde (İğnimbirit 1 ve 7) ise renk değişiklikleri daha az belirgindir, bu da kuvarsın yüksek sıcaklıklarda stabil kalmasıyla açıklanabilir. Şekil 4. 3’te örneklerin 100 ve 1000°C’deki görselleri verilmiş olup, en fazla renk değişimi İğnimbirit 3 de gözlenirken en az renk değişimi İğnimbirit 2’de gözlenmiştir. Örneklerin ara sıcaklıklardaki ayrıntılı renk değişimlerine ait görseller Ek-1’de verilmiştir.



Şekil 4. 3. 7 farklı ignimbirit örneğinin 100°C ve 1000°C’deki renk değişimi.



Şekil 4.3. devamı.

4.2.2. Birim Hacim Ağırlığın Sıcaklıkla Değişimi

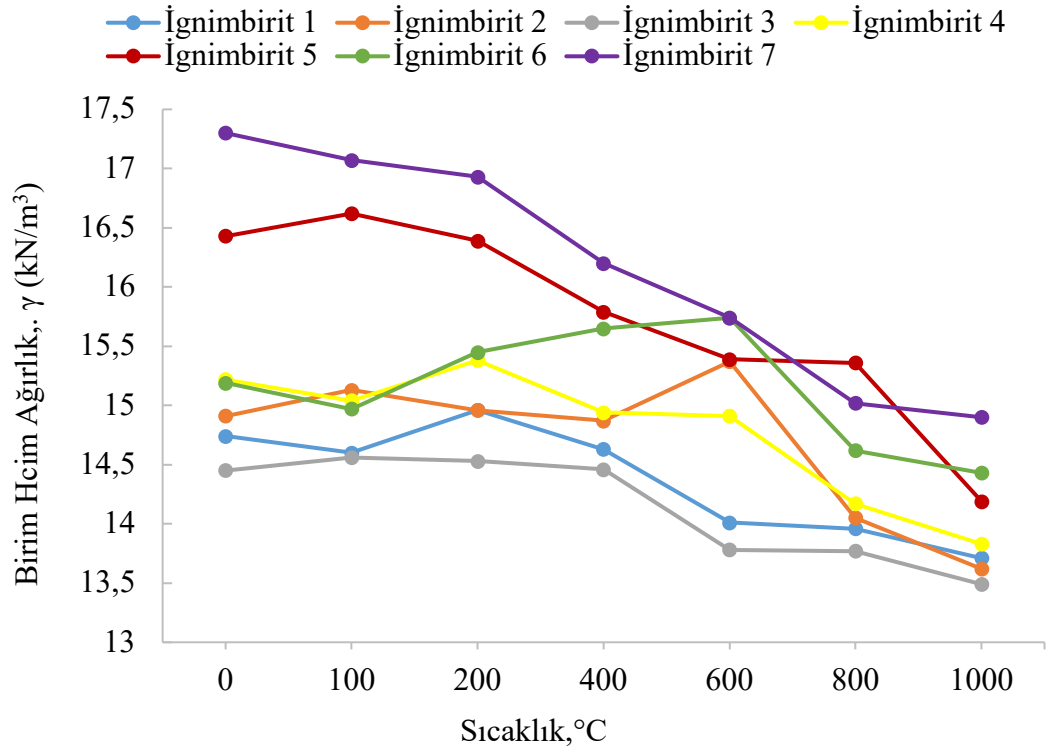
Sıcaklığın ignimbiritlerin birim hacim ağırlığındaki (BHA) etkisini incelemek için karot çapları farklı olan iki grup örnekte ölçümler yapılmış olup, Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’de hesaplanan değerlere yer verilmiştir. Şekil 4. 4 ve Şekil 4. 6’da sıcaklığa bağlı olarak birim hacim ağırlığındaki değişimleri gösteren grafikler, bu değerlerin yüzdelik değişimleri ise Şekil 4. 5 ve Şekil 4. 7’de verilen grafiklerde sunulmuştur. Yüzdelik değişim grafiklerinin oluşturulmasında, $((\text{İlgili Parametre Değeri} - \text{İlksel Parametre Değeri}) / \text{İlksel Parametre Değeri}) \times 100$ eşitliği kullanılmıştır. BHA ve incelenen tüm parametreler için bu eşitlikten yararlanılmıştır. Bu veriler incelendiğinde (Şekil 4.4 ve 4.5 - NQ çaplı örnekler), her bir ignimbirit örneğinin farklı sıcaklık seviyelerindeki BHA değerlerinin değiştiği gözlemlenmektedir. İgnimbirit 1 için 100°C’de ölçülen BHA değeri (14.60 kN/m³), 1000°C’de ölçülen BHA değeri (13.71 kN/m³) ile karşılaştırıldığında sıcaklık arttıkça birim hacim ağırlıkları %5-%7 arasında bir oranda azalmıştır. Benzer şekilde İgnimbirit 3 örneği için de 400°C’ye kadar değerlerde dalgalanmalar olsa da 600°C’de BHA değerinde %5 oranında azalmalar başlamış olup, 100°C’den 1000°C’ye olan aralıkta BHA’daki düşüşler daha belirgindir (14.56 kN/m³’ten 13.49 kN/m³’e). İgnimbirit 2 örneği için 600°C’ye kadar olan sıcaklıklarda BHA değerlerinde %3’lük bir artış (14.96 kN/m³’ten 15.37 kN/m³’e) gözlenirken, 800°C’den sonra bu oran yaklaşık %7 azalmıştır. İgnimbirit 2 için bu artışın, belirli mineral bileşenlerinin termal değişikliklere karşı dirençli olmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. İgnimbirit 4 için, sıcaklık arttıkça BHA değerlerinde kısmi bir azalma olduğu gözlenmiştir. Örneğin, 200°C’de ölçülen BHA değeri 15.38 kN/m³ iken, 800°C ve 1000°C’de sırasıyla 14.17 kN/m³ ve 13.83 kN/m³’e düşerek %8 oranında azalmıştır. İgnimbirit 5, İgnimbirit 6 ve İgnimbirit 7 örnekleri için ise genel olarak sıcaklık arttıkça BHA değerlerinde %12-%23 oranında azalma eğilimi görülmüştür. Bu durum, kayaç içindeki minerallerin belirli bir sıcaklık eşiğine kadar duraylı kalabildikleri, ancak bu eşiğin üzerinde termal bozulmaya veya reaksiyonlara girdikleri şeklinde yorumlanabilir. NX çaplı örneklerde hesaplanan BHA değerleri (Şekil 4.6 ve 4.7) incelendiğinde ise benzer bir durumun varlığı gözlenmiştir.

Çizelge 4. 10. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden (NQ çaplı) hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri.

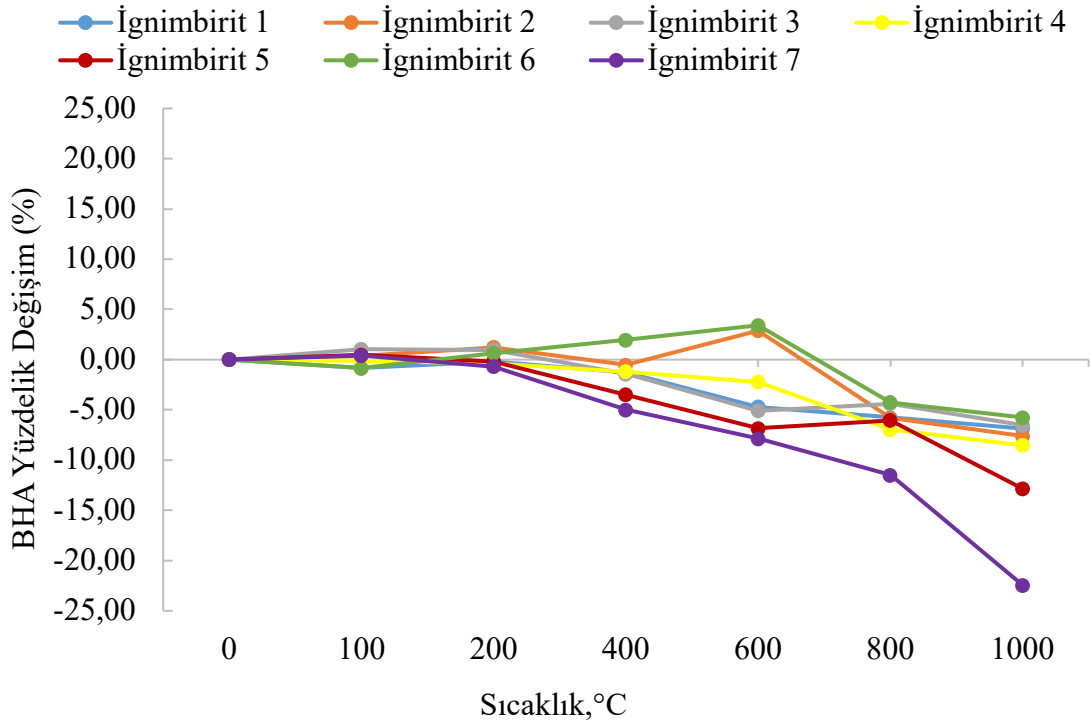
Örnek No	Örnek Sayısı	100°C			200°C			400°C			600°C			800°C			1000°C		
		Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)
İgnimbirit 1	30	14.39	14.85	14.60	14.41	15.46	14.96	14.43	14.92	14.63	13.90	14.21	14.01	13.59	14.17	13.96	13.43	13.90	13.71
İgnimbirit 2	30	14.98	15.65	15.13	14.56	15.13	14.96	14.58	15.18	14.87	14.36	16.76	15.37	13.57	14.62	14.05	12.97	14.11	13.62
İgnimbirit 3	30	14.73	14.88	14.56	14.33	14.95	14.53	14.35	14.49	14.46	12.25	14.53	13.78	13.43	14.46	13.77	13.31	13.69	13.49
İgnimbirit 4	30	14.96	15.13	15.04	15.08	15.65	15.38	14.73	15.47	14.94	14.09	15.43	14.91	13.95	14.33	14.17	13.50	14.25	13.83
İgnimbirit 5	30	16.20	17.62	16.62	16.18	16.85	16.39	14.75	16.69	15.79	14.81	15.94	15.39	14.22	16.11	15.36	13.35	14.85	14.19
İgnimbirit 6	30	14.69	15.39	14.97	15.35	15.66	15.45	14.86	16.75	15.65	14.71	17.34	15.74	14.22	15.29	14.62	13.80	14.95	14.43
İgnimbirit 7	30	16.72	17.20	17.07	16.30	14.42	16.93	15.23	17.32	16.20	14.31	16.55	15.74	13.62	16.41	15.02	13.77	15.63	14.90

Çizelge 4. 11. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden (NX çaplı) hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri.

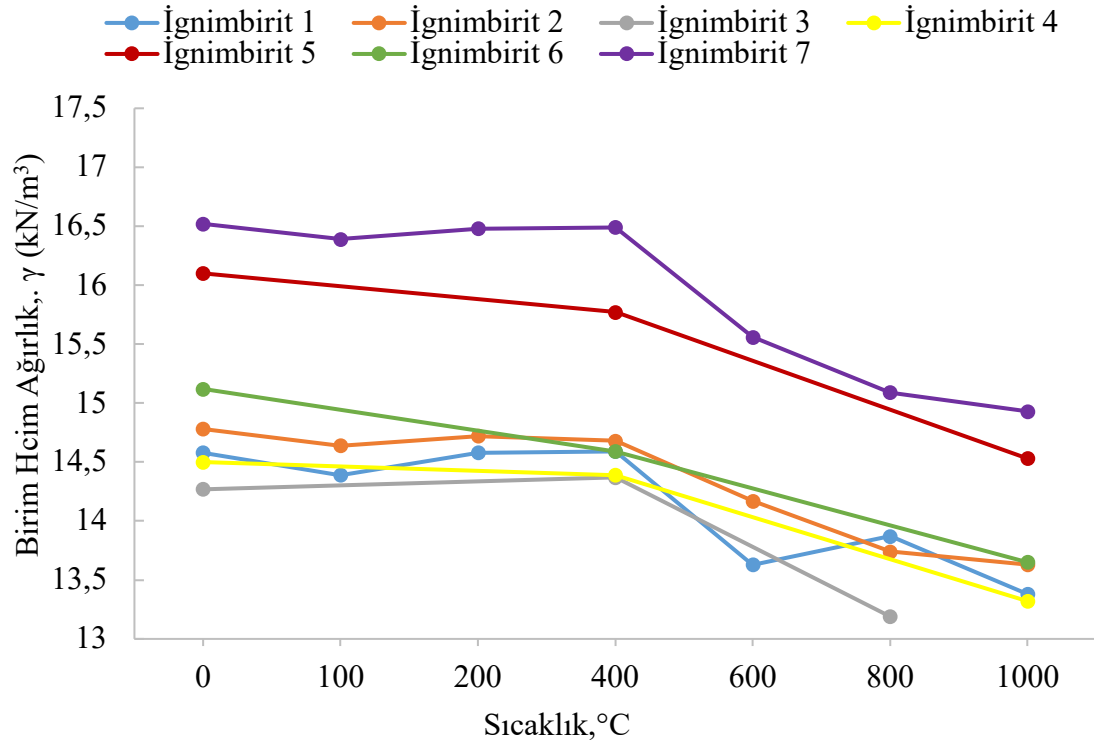
Örnek No	Örnek Sayısı	100°C			200°C			400°C			600°C			800°C			1000°C		
		Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)	Min. γ (kN/m ³)	Maks γ (kN/m ³)	Ort. γ (kN/m ³)
İgnimbirit 1	18	14.24	14.57	14.39	13.76	15.09	14.58	13.97	14.98	14.59	13.53	13.69	13.63	13.66	14.04	13.87	13.26	13.50	13.38
İgnimbirit 2	18	14.47	14.86	14.64	14.50	14.88	14.72	14.49	14.87	14.68	13.94	14.33	14.17	13.52	14.02	13.74	13.48	13.85	13.63
İgnimbirit 3	5	-	-	-	-	-	-	14.25	14.46	14.37	-	-	-	13.06	13.31	13.19	-	-	-
İgnimbirit 4	4	-	-	-	-	-	-	14.04	14.73	14.39	-	-	-	-	-	-	13.18	13.46	13.32
İgnimbirit 5	6	-	-	-	-	-	-	15.48	15.90	15.77	-	-	-	-	-	-	14.40	14.65	14.53
İgnimbirit 6	6	-	-	-	-	-	-	13.64	15.16	14.59	-	-	-	-	-	-	13.56	13.69	13.65
İgnimbirit 7	18	16.35	16.43	16.45	16.55	16.43	16.48	16.40	16.59	16.49	15.48	15.70	15.56	15.08	15.13	15.09	14.65	15.13	14.93



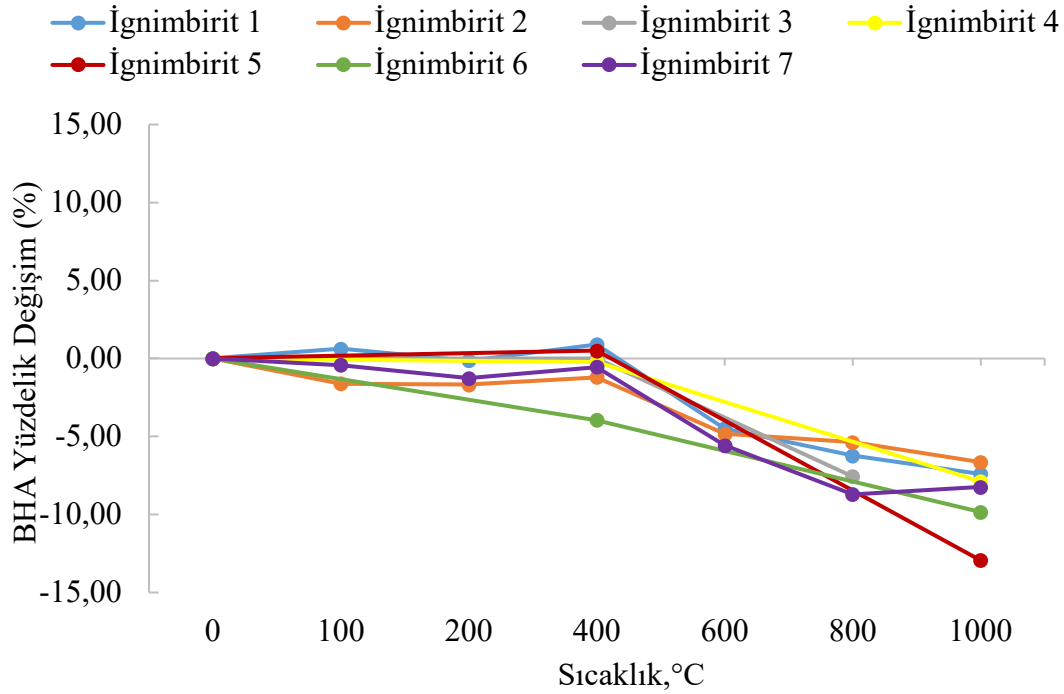
Şekil 4. 4. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı BHA değişimi (NQ çaplı örneklerde).



Şekil 4. 5. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı BHA'larındaki yüzdelik değişim (NQ çaplı örneklerde).



Şekil 4. 6. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı BHA değişimi (NX çaplı örneklerde).



Şekil 4. 7. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı BHA'larındaki yüzdelik değişim (NX çaplı örneklerde).

4.2.3. Özgöl Ağırlık ve Boşluk Oranının Sıcaklıkla Değişimi

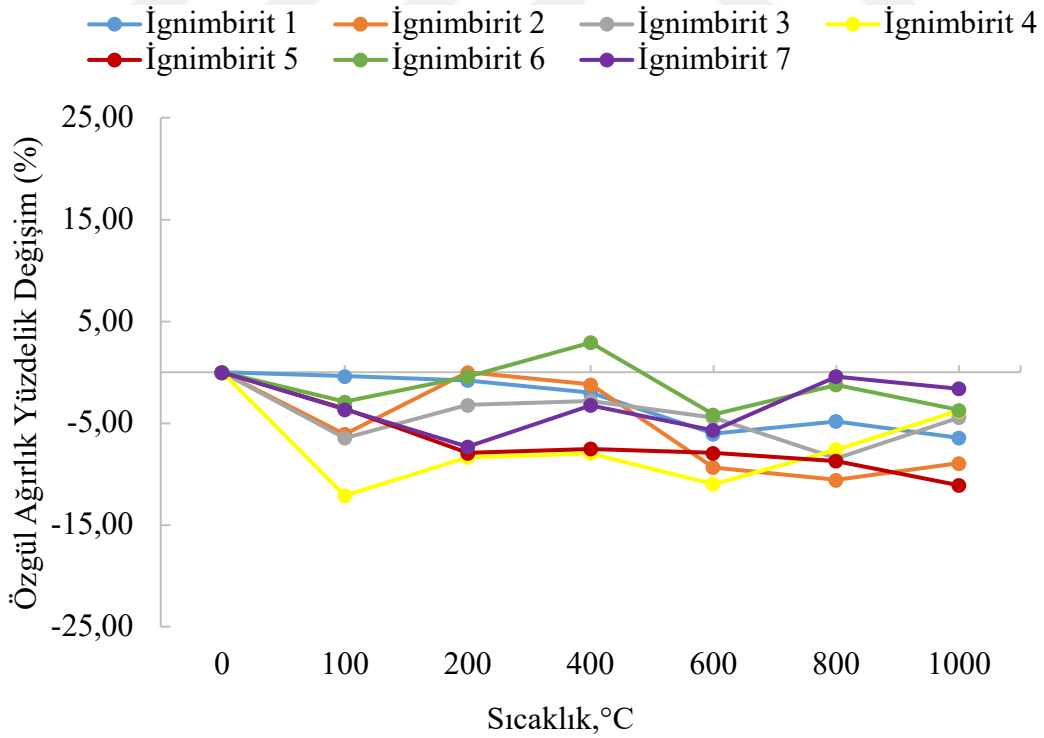
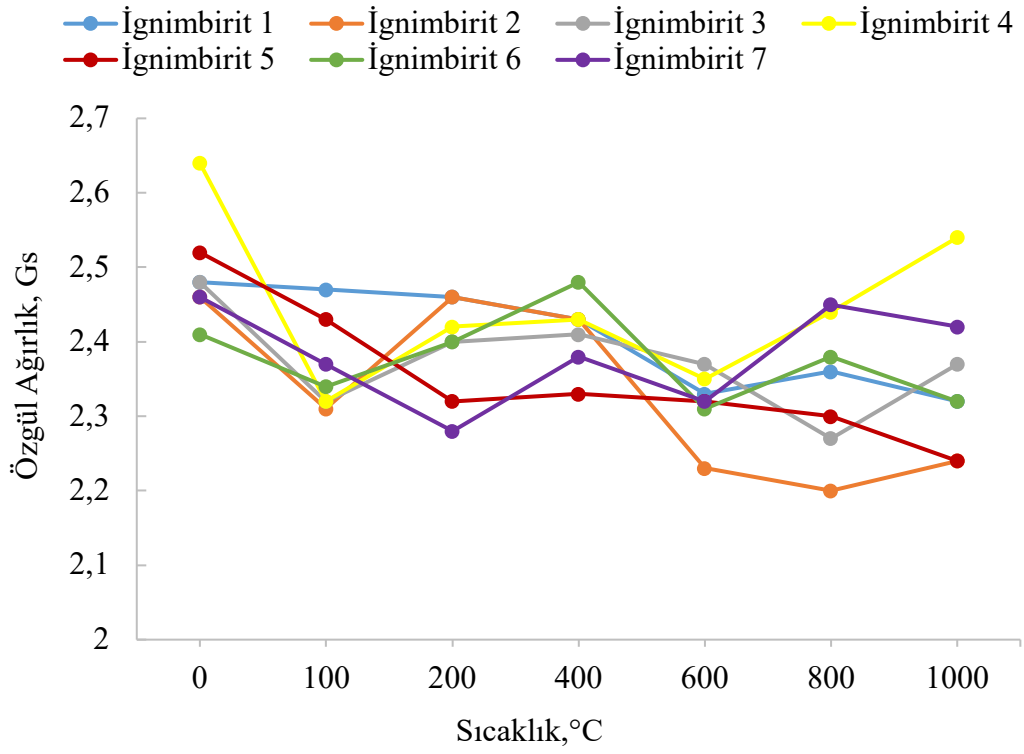
Özgöl ağırlığın sıcaklıkla değişimini incelemek için 7 farklı ignimbirit örneğinde farklı sıcaklıklara maruz kalmış örnekler için piknometre deneyleri yapılarak özgöl ağırlık değerleri hesaplanmış olup, elde edilen veriler ve fiziksel özellikler arasındaki dönüşüm eşitliklerinden yararlanılarak boşluk oranı (e) değerleri de belirlenmiştir. Örnek gruplarının boşluk oranı ve özgöl ağırlık değerleri Çizelge 4. 12 ve Çizelge 4. 13'te, bu değerlerin sıcaklıklara bağlı değişimi Şekil 4. 8 ve Şekil 4. 10'da verilen grafiklerde, yüzdelik değişim grafikleri ise Şekil 4. 9 ve Şekil 4. 11'de sunulmuştur. Bu veriler ışığında, İgnimbirit 1 için, 600°C'den 800°C'ye kısmi bir artış (2.33'den 2.36'ya) olsa da 1000°C'de %6 oranında özgöl ağırlık azalırken boşluk oranı 1000 °C'de %3 oranında arttığı (0.65'den 0.67'ye) gözlenmiştir. İgnimbirit 2 için, 200°C'den sonra özgöl ağırlık değerleri %10 oranında azalırken, boşluk oranı değerleri 200°C'de 0.61 iken 600°C'de 0.42'ye düşerek %30 oranında azalmıştır. Fakat 800°C ve 1000°C'lerde boşluk oranında %20'lik bir artış gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklar bazı minerallerin erimesine ve gazların serbest kalmasına yol açarak gözenekliliği artırabilir ve malzemenin yoğunluğunu azaltabilir. İgnimbirit 3'te ise, 400°C'de 2.41 olan özgöl ağırlık 1000°C'de 2.37 düşerek %6 azalmış, boşluk oranı ise 1000°C'de 0.73 değeri ile %5 artış göstermiştir. İgnimbirit 4 için, ısıya maruz bırakılmamış örneklerin özgöl ağırlık değeri 2.64 iken, 600°C'ye kadar olan sıcaklıklarda bu değer 2.35'e düşerek %10 oranında azalmıştır. Aynı sıcaklık aralığında boşluk oranı %20 azalmıştır. Ancak, 800°C'de özgöl ağırlık 2.44'e ve 1000°C'de 2.54'e yükselerek %4'lük bir artış göstermiştir. Boşluk oranı ise 1000°C'de, ısıtılmamış örneğe kıyasla (0.7'den 0.8'e) %14 oranında artmıştır. İgnimbirit 5 örneğinde 200°C'den sonra sıcaklık artıkça boşluk oranı %10 artış gözlenirken, özgöl ağırlıkta %8'lik bir düşüş (200 ve 800°C'de) eğilimi vardır. İgnimbirit 6 için, 400°C'ye kadar boşluk oranında %7 oranında bir azalma ve özgöl ağırlığında %3'lük artış gözlemlenirken, 800°C'ye ulaşıldığında boşluk oranı %7 artmış ve özgöl ağırlık değerleri düşmüştür. İgnimbirit 7 de ise, daha yüksek sıcaklıklarda (200°C'den 800°C'ye kadar) boşluk oranında %50 oranında belirgin bir artış ve özgöl ağırlıkta bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, malzemenin termal genleşme ve bozunma süreçlerine bağlı olarak gözenekliliğin artması ve dolayısıyla özgöl ağırlığın azalmasıyla açıklanabilir.

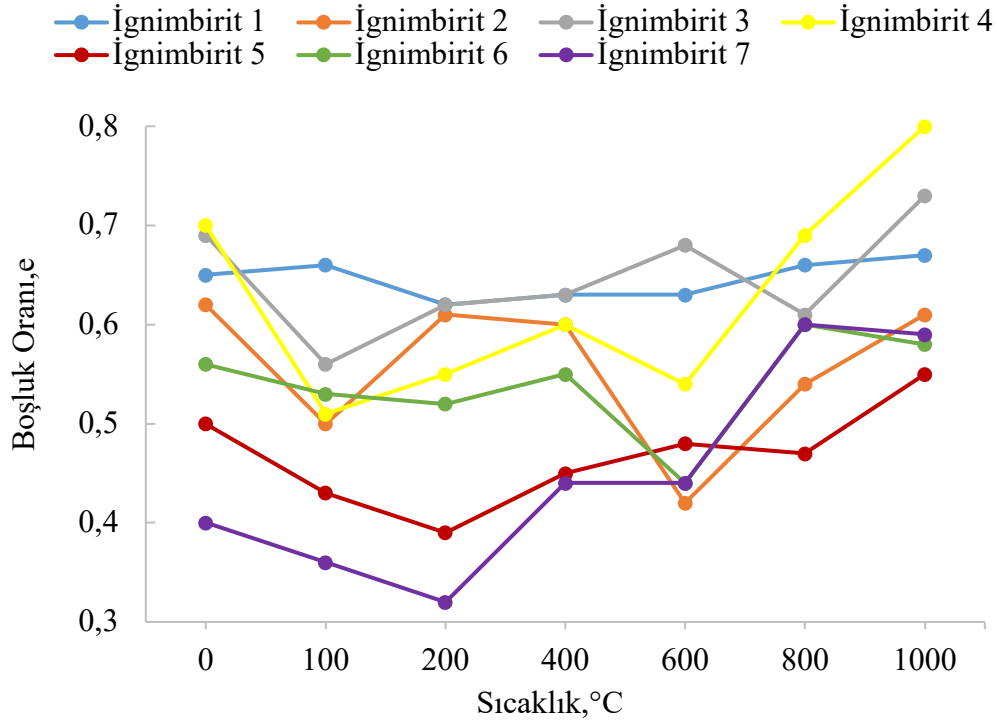
Çizelge 4. 12. Farklı sıcaklıklara maruz kalmış ignimbirit örneklerinden hesaplanan özgül ağırlık değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	100°C			200°C			400°C			600°C			800°C			1000°C		
		Min. Gs	Maks. Gs	Ort. Gs	Min. Gs	Maks. Gs	Ort. Gs	Min. Gs	Maks. Gs	Ort. Gs	Min. Gs	Maks. Gs	Ort. Gs	Min. Gs	Maks. Gs	Ort. Gs	Min. Gs	Maks. Gs	Ort. Gs
İgnimbirit 1	21	2.42	2.57	2.47	2.40	2.51	2.46	2.33	2.53	2.43	2.29	2.36	2.33	2.34	2.38	2.36	2.27	2.38	2.33
İgnimbirit 2	21	2.28	2.38	2.31	2.28	2.71	2.46	2.40	2.46	2.43	2.16	2.27	2.22	2.15	2.24	2.20	2.16	2.24	2.24
İgnimbirit 3	21	2.33	2.34	2.32	2.26	2.52	2.40	2.35	2.46	2.41	2.32	2.40	2.37	2.22	2.33	2.27	2.35	2.46	2.37
İgnimbirit 4	21	2.31	2.33	2.32	2.39	2.48	2.43	2.42	2.45	2.43	2.23	2.46	2.35	2.38	2.47	2.44	2.33	3.00	2.54
İgnimbirit 5	21	2.36	2.46	2.43	2.27	2.31	2.32	2.24	2.41	2.33	2.24	2.4	2.32	2.24	2.37	2.30	2.14	2.38	2.24
İgnimbirit 6	21	2.29	2.39	2.34	2.28	2.51	2.40	2.45	2.50	2.48	2.27	2.34	2.31	2.28	2.43	2.38	2.28	2.42	2.32
İgnimbirit 7	21	2.28	2.49	2.37	2.20	2.36	2.28	2.34	2.45	2.38	2.26	2.39	2.31	2.36	2.54	2.45	2.35	2.45	2.42

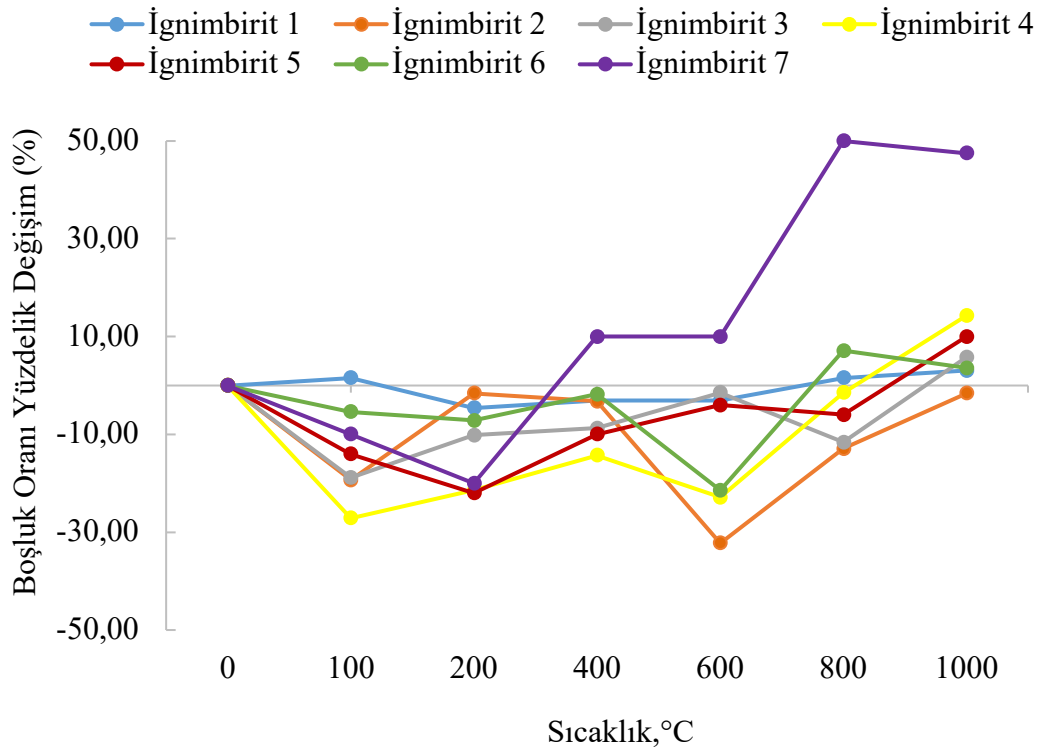
Çizelge 4. 13. Farklı sıcaklıklara maruz kalmış ignimbirit örneklerinden hesaplanan boşluk oranı değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	100°C			200°C			400°C			600°C			800°C			1000°C		
		Min.e	Maks.e	Ort.e	Min.e	Maks.e	Ort.e	Min.e	Maks.e	Ort.e	Min.e	Maks.e	Ort.e	Min.e	Maks.e	Ort.e	Min.e	Maks.e	Ort.e
İgnimbirit 1	21	0.63	0.72	0.66	0.58	0.65	0.62	0.56	0.70	0.63	0.61	0.66	0.63	0.64	0.67	0.66	0.63	0.67	0.67
İgnimbirit 2	21	0.48	0.52	0.50	0.50	0.77	0.61	0.58	0.62	0.60	0.38	0.45	0.42	0.50	0.57	0.54	0.56	0.67	0.61
İgnimbirit 3	21	0.54	0.57	0.56	0.52	0.70	0.62	0.59	0.66	0.63	0.65	0.70	0.68	0.58	0.66	0.61	0.68	0.79	0.73
İgnimbirit 4	21	0.51	0.52	0.51	0.53	0.58	0.55	0.59	0.61	0.60	0.47	0.61	0.54	0.65	0.71	0.69	0.63	1.12	0.80
İgnimbirit 5	21	0.40	0.45	0.43	0.38	0.43	0.39	0.39	0.50	0.45	0.42	0.53	0.48	0.43	0.51	0.47	0.48	0.65	0.55
İgnimbirit 6	21	0.50	0.57	0.53	0.45	0.59	0.52	0.54	0.57	0.55	0.41	0.46	0.44	0.53	0.63	0.60	0.54	0.64	0.58
İgnimbirit 7	21	0.31	0.43	0.36	0.27	0.37	0.32	0.42	0.49	0.44	0.41	0.49	0.44	0.54	0.66	0.60	0.55	0.61	0.59





Şekil 4. 10. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı boşluk oranı değişimi.



Şekil 4. 11. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı boşluk oranı değerlerinin yüzdelik değişimi.

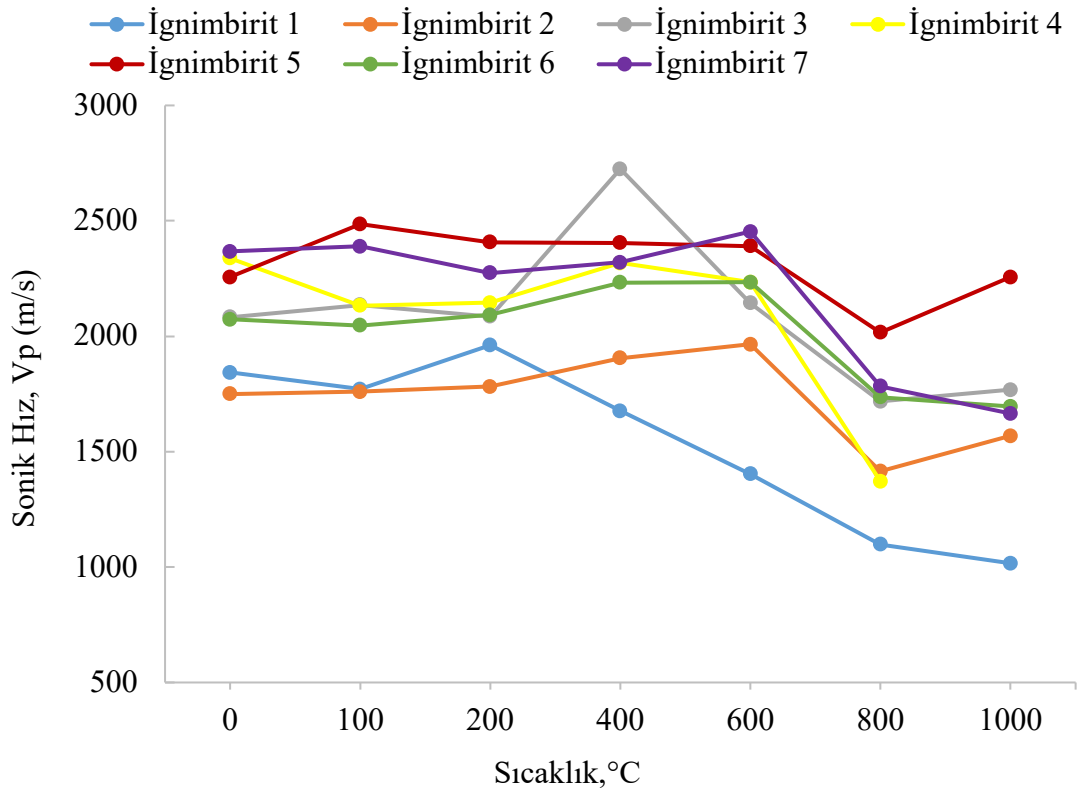
4.2.4. P- Dalga Hızının Sıcaklıkla Değişimi

Kayaçların termal genleşme özelliklerini ve sıcaklık değişimlerinin çatlak gelişimi üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla, 7 farklı ignimbirit örneğinde P-dalgası hızı (V_p) ölçülmüş ve çıkan sonuçlara (Çizelge 4. 14) göre sıcaklık artışlarının ignimbiritin iç yapısı ve dayanım özellikleri üzerindeki etkileri hakkında fikir edinilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4. 12’de sıcaklığa bağlı V_p hızlarındaki değişimi gösteren grafik ve Şekil 4. 13’de bu değerlerin sıcaklığa bağlı yüzdelik değişim grafikleri verilmiştir. İgnimbirit 1 için, ısıtılmamış örneğe kıyasla 400°C’ye kadar V_p hızları %10 oranında azalırken, daha yüksek sıcaklıklarda, özellikle 800°C’de %40’lık bir düşüş yaşanmıştır. Benzer şekilde İgnimbirit 2’de, 100°C’den 200°C’ye sıcaklık artışı ile V_p hızı hafifçe artmıştır. Ancak, 400°C ve 600°C’ye geçildiğinde V_p hızında %12’lik belirgin bir artış meydana gelmiştir. 800°C’de P-dalga hızı %20 oranında düşmüş, 1000°C’de ise bu değerler %10 oranında artmıştır. İgnimbirit 3 örneğinde, 200°C’den 400°C’e geçildiğinde V_p hızı %30 oranında artarken, 600°C’den 800°C’deki aralıkta %15’lik bir azalma gözlenmiştir. 1000°C’de ise bu değerle az da olsa artış gözlenmiştir. İgnimbirit 4’te ise 600°C’ye kadar ısıtılmamış örneklerle kıyasla değerlerde belirgin bir değişim gözlenmezken, 600°C’de için 2233.3 m/s ölçülen P-dalga hızı 800°C’de 1371.6 m/s’ye düşerek %40 oranında azalmıştır. İgnimbirit 5 örneği için, 400°C’ye kadar sıcaklık arttıkça V_p hızı bir miktar artmıştır. 200°C’den 400°C’e geçildiğinde, V_p hızında belirgin bir değişiklik olmazken, 400°C’den 800°C’ye kadar olan aralıkta V_p hızı %10’lük bir düşüş sergilemiş ve 1000°C’de bir miktar artmıştır. İgnimbirit 6’da, 600°C’ye kadar olan V_p hızlarına bakıldığında %7 ‘lik bir artış gözlenirken, 800°C ve 1000°C’de V_p hızı %16 oranında azalmıştır. İgnimbirit 7’de, 600°C’ye kadar olan sıcaklık seviyelerinde ısıtılmamış örneklerle kıyasla P-dalga hızında belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Ancak, 800°C’de P-dalga hızında %20 oranında bir azalma meydana gelmiş ve bu azalma üzerine 1000°C’de ek olarak %10’luk bir düşüş daha gerçekleşmiştir. Sıcaklık arttıkça, özellikle 800°C’de P-dalgası hızının azaldığı gözlenmiştir. Bu sıcaklık, ignimbiritin V_p hızı için eşik değeri olarak kabul edilebilir. Kayacın içindeki suyun buharlaşması ve artan kırık sayısı ile birlikte kırık yoğunluğu ve gözenekliliğin arttığı düşünülebilir. P-dalgaları, gaz ortamlarda katı ve sıvı ortamlara kıyasla daha düşük hızlarda hareket eder; bu durumda, boşluklar P-dalgalarının ilerlemesini engelleyici bir etki yaratır ve bu da gözeneklilikteki artışın P-dalgası hızını azaltmasına neden olur.

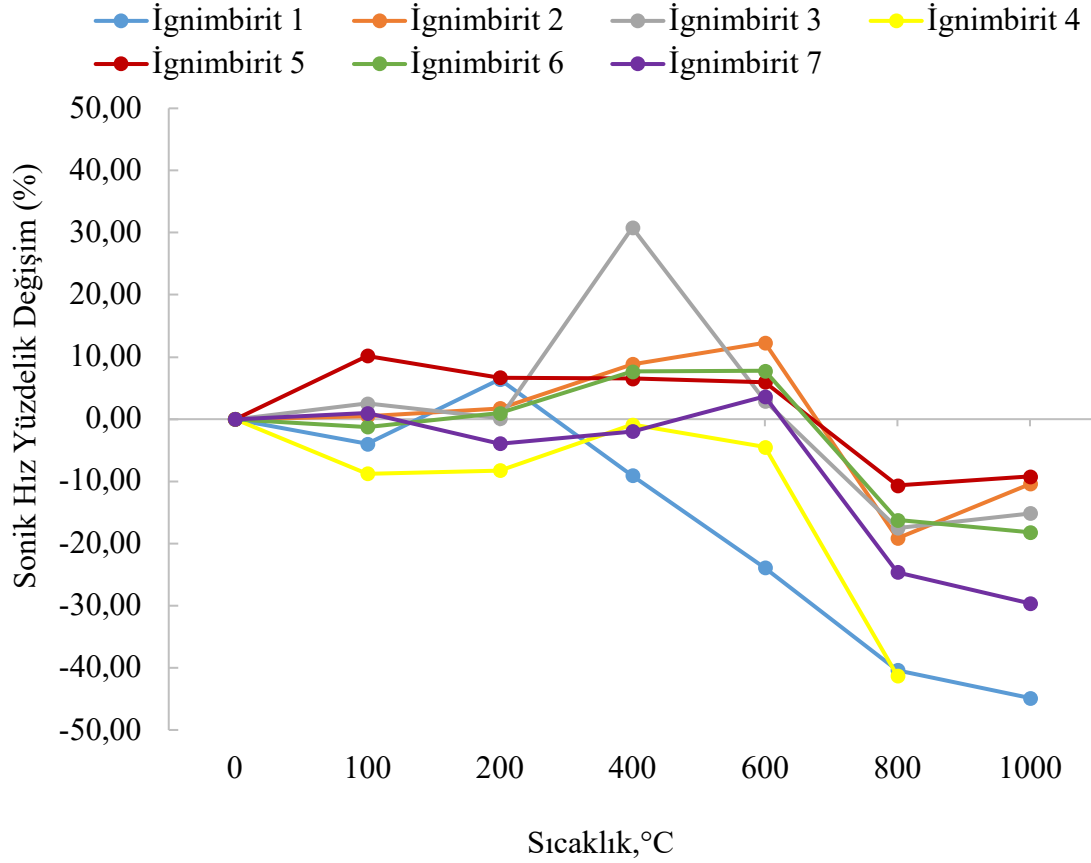
Çizelge 4. 14. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden hesaplanan Sonik P Dalga Hızı (V_p) değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	100°C			200°C			400°C			600°C			800°C			1000°C		
		Lort (mm)	Tp	Vp(m/s)	Lort (mm)	Tp	Vp(m/s)	Lort (mm)	Tp	Vp(m/s)	Lort (mm)	Tp	Vp(m/s)	Lort (mm)	Tp	Vp(m/s)	Lort (mm)	Tp	Vp(m/s)
İgnimbirit 1	7	121.8	68.8	1770.3	121.41	61.9	1961.4	121.34	72.4	1676.0	118.82	84.7	1402.8	119.30	108.6	1098.5	118.72	116.8	1016.4
İgnimbirit 2	7	113.12	64.3	1759.3	123.08	69.1	1781.2	108.58	57.0	1904.9	108.50	55.2	1965.6	114.33	80.8	1415.0	110.42	70.4	1568.5
İgnimbirit 3	7	120.43	56.4	2135.3	122.03	58.5	2086.0	155.86	57.2	2724.8	120.28	56.1	2144.0	119.92	69.8	1718.1	120.72	68.3	1767.5
İgnimbirit 4	6	118.38	55.5	2133.0	119.91	55.9	2145.1	122.79	53.0	2316.8	121.27	54.3	2233.3	119.19	86.9	1371.6	-	-	-
İgnimbirit 5	6	122.8	49.4	2485.8	117.94	49.0	2406.9	122.135	50.8	2404.2	122.185	51.1	2391.1	116.73	57.9	2016.1	119.66	53.1	2255.9
İgnimbirit 6	7	120.78	59.0	2047.1	121.17	57.9	2092.7	120.98	54.2	2232.1	119.99	53.7	2234.5	115.99	66.8	1736.4	115.48	68.1	1695.7
İgnimbirit 7	7	120.69	50.5	2389.9	120.31	52.9	2274.3	120.63	52	2319.8	119.73	48.8	2453.5	119.33	66.9	1783.7	121.73	73.1	1665.3

Liu ve ark. (2015), sıcaklık artışının P-dalgası hızını düşürmesinin önemli bir sebebi olarak gözeneklilik artışı olduğunu belirtmişlerdir. 7 ignimbirit örneği için belirlenen boşluk oranı değerlerinde 200°C'den sonra artış gözlenmiş olup, bu artışın örneğin içeriğinde bulunan jipsin yaklaşık 100°C'de su kaybederek kalsine jipse, 160°C-200°C'de tamamen su kaybetmesi ile anhidrit formuna dönüşmesi (Doleželová ve ark., 2018) boşluk oranında artışa sebep olmuş olabilir. Artan boşluk oranı ile bu sıcaklık aralığında P-dalga hızı azalmıştır. Benzer şekilde 800°C ve 1000°C sıcaklıklarında boşluk oranı artarken (bkz. Şekil 4.11) P-dalga hızlarında meydana gelen düşüş, gözenekliliğin P-dalga hızları üzerindeki etkisini doğrular niteliktedir. Bununla birlikte, grafikler incelendiğinde bazı anomaliler görülmektedir. Bunun nedeni olarak, örnekler her ne kadar özdeş kabul edilse de ideal anlamdam özdeş olmaması ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4. 12. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Sonik P dalga hızı (Vp) değişimi.



Şekil 4. 13. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Vp değerlerinin yüzdelerik değişimi.

4.2.5. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının (UCS) Sıcaklıkla Değişimi

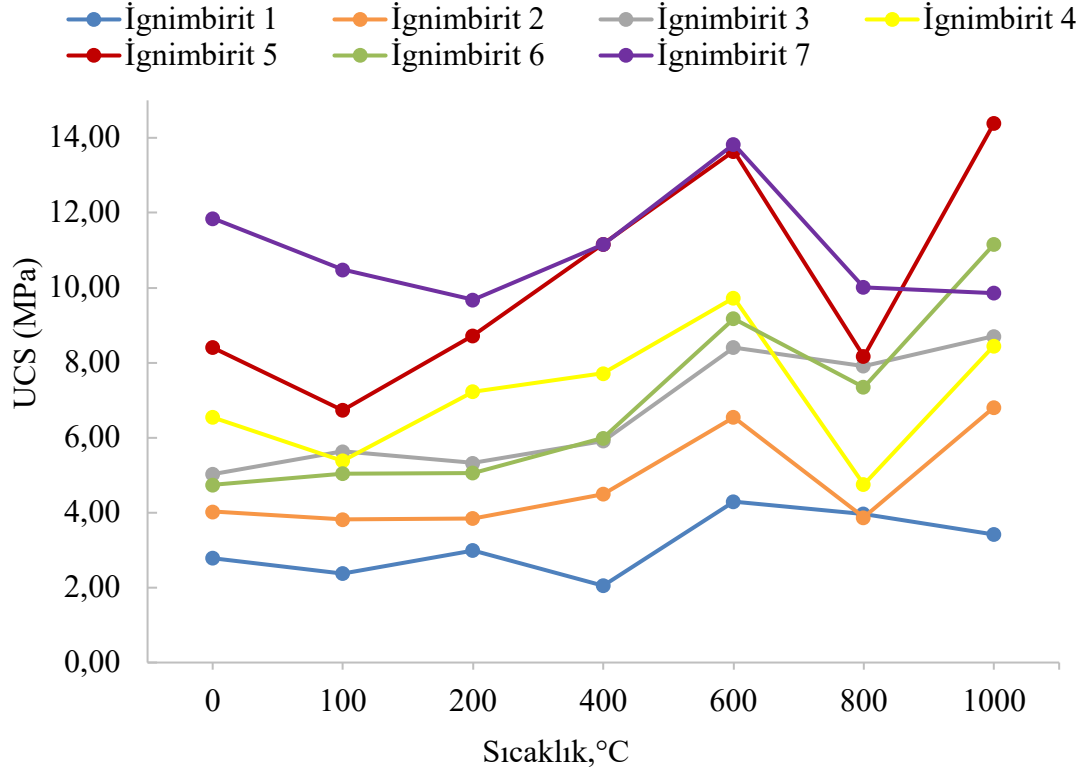
Farklı sıcaklıklarda ısıtılmış ignimbirit örneklerinde tek eksenli yükleme koşulunda dayanımları tayin edilmiştir (Çizelge 4. 15). Şekil 4. 14'te farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış örneklerden elde edilen ortalama UCS değerlerini göstermektedir. Şekil 4. 15'te ise bu değerlerin ısı etkiye maruz kalmamış örneklerdeki dayanım değerlerinden yüzdelerik olarak değişimlerini göstermektedir. Bu şekillerde verilen grafikler incelendiğinde, İgnimbirit 1 için, 400°C'ye kadar belirgin bir değer farklılığı gözlemlenmezken, 400°C'de ısıtılmamış örneğe kıyasla dayanımı %26 oranında düşmüştür. 600°C'de sıkışma dayanımı %30'luk bir artış (4.29 MPa) sergilerken, 800°C'de ortalama UCS değeri 3.97 MPa'a düşmüş ve 1000°C'de bu düşüş devam etmiştir. İgnimbirit 2 örneği için, 400°C'ye kadar değerlerde dalgalanmalar gözlenmiştir, ancak 600°C'de dayanım 6.55 MPa'a yükselerek yaklaşık %60 oranında artmıştır.

Bununla birlikte, 800°C'de ani bir düşüşle dayanım 3.87 MPa'a gerilemiş ve yaklaşık %40 oranında azalmıştır. 1000°C'de ise dayanım 6.81 MPa'a yükselerek, 3.87 MPa'a göre yaklaşık %76 oranında bir artış göstermiştir. Benzer şekilde, İğnimbirit 3 örneğinde de 400°C'ye kadar belirgin bir değişim gözlenmezken, 600°C'de dayanımı (5.03 MPa'dan 8.41 MPa'a) %67 oranında artmıştır. Ancak 800°C'de bu değerlerde bir düşüş kaydedilmiştir. Bununla birlikte, 1000°C'de ortalama basınç dayanımı değerleri, 800°C'ye kıyasla %10 oranında artmıştır. İğnimbirit 4 örneğinde, sıkışma dayanımının genel olarak 100°C'den 600°C'ye kadar artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak, İğnimbirit 2 ve 3 örneklerinde olduğu gibi, bu grupta da 800°C'de dayanım, 600°C'ye kıyasla yaklaşık %50 oranında azalmıştır. 1000°C'ye çıkıldığında ise dayanım tekrar artmış ve 800°C'de 4.75 MPa olan dayanım, bu sıcaklıkta 8.45 MPa'a yükselmiştir. İğnimbirit 5 örneği için sıcaklık artışıyla birlikte genel olarak sıkışma dayanımında bir artış gözlenmiştir. Ancak, 600°C'den 800°C'ye kadar sıcaklık arttığında, sıkışma dayanımında %40 oranında bir azalma meydana gelmiştir (13.64 MPa'dan 8.17 MPa'a). Buna karşın, 1000°C'de sıkışma dayanımı 14.39 MPa'a yükselerek ısıtılmamış örneğe kıyasla %11 oranında bir artış göstermiştir. İğnimbirit 6 örneğinde ısı etkiye maruz bırakılmamış örneğe kıyasla 600°C'ye kadar dayanım %93 artmıştır (4.74 MPa'dan 9.18 MPa'a). Ancak, 800°C'de bu değer 7.35 MPa'a düşmüştür. Diğer 4 grup örnekte olduğu gibi İğnimbirit 6 örneğinde de 1000°C'de dayanım (11.16 MPa) 800°C'ye oranla bir artış göstermiştir. Son olarak İğnimbirit 7 örneğinde 600°C'ye kadar olan sıcaklıklarda belirlenen ortalama sıkışma dayanım değerlerinde dalgalanmalar gözlenirken, 600°C'de artan dayanım 800°C'de %28 oranında azalmıştır. Bu azalma 1000°C'de de devam ederek dayanım ısıtılmamış örneğe oranla %17 azalmıştır.

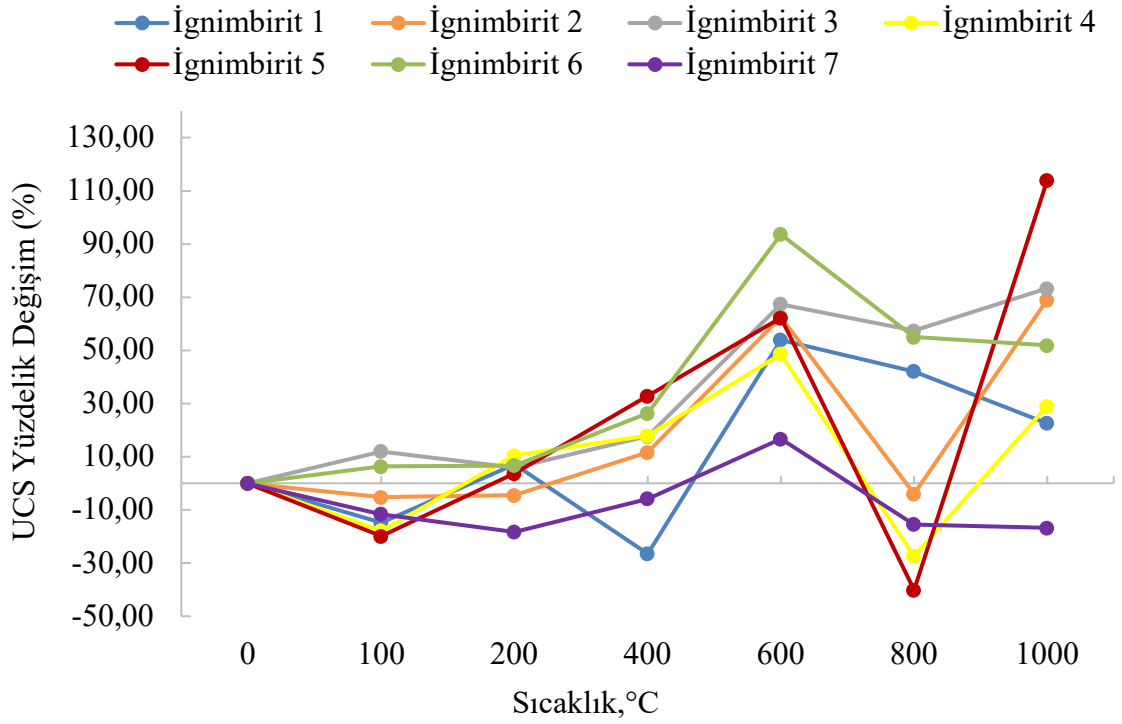
Yukarıdaki paragraflarda yapılan değerlendirmeler sonucunda 5 örnek için (İğnimbirit 2, 3, 4, 5, ve 6) 800°C'de elde edilen UCS değerlerinde belirgin bir azalma olurken, 1000°C'de ise artış saptanmıştır. Elde edilen diğer veriler ile karşılaştırıldığında mineral içeriklerinde kil grubu mineral olan kaolinin, bu örnek gruplarında yüksek oranda olduğu gözlenmiştir (bkz. Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3).

Çizelge 4. 15.Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden hesaplanan UCS (MPa) değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	100°C			200°C			400°C			600°C			800°C			1000°C		
		Min.σc (MPa)	Maks.σc (MPa)	Ort. σc (MPa)	Min.σc (MPa)	Maks.σc (MPa)	Ort. σc (MPa)	Min.σc (MPa)	Maks.σc (MPa)	Ort. σc (MPa)	Min.σc (MPa)	Maks.σc (MPa)	Ort. σc (MPa)	Min.σc (MPa)	Maks.σc (MPa)	Ort. σc (MPa)	Min.σc (MPa)	Maks.σc (MPa)	Ort. σc (MPa)
İgnimbirit 1	24	1.68	3.86	2.38	2.08	3.78	2.99	1.24	2.67	2.05	3.21	5.93	4.29	2.64	5.23	3.97	2.67	3.93	3.42
İgnimbirit 2	24	3.12	4.52	3.82	2.11	5.25	3.85	2.88	6.37	4.50	5.21	8.33	6.55	3.40	4.72	3.87	4.89	9.66	6.81
İgnimbirit 3	25	4.41	6.24	5.63	4.11	6.79	5.32	5.01	7.28	5.91	5.167	11.53	8.41	6.16	9.06	7.91	7.03	11.09	8.71
İgnimbirit 4	25	5.06	6.02	5.38	4.49	10.29	7.23	6.71	8.71	7.72	5.90	13.16	9.73	2.64	7.22	4.75	5.36	11.77	8.45
İgnimbirit 5	25	5.63	7.75	6.73	7.14	10.57	8.72	8.10	14.01	11.17	10.60	16.49	13.64	6.29	10.15	8.17	12.11	16.93	14.39
İgnimbirit 6	23	3.64	5.81	5.04	4.14	5.67	5.06	4.89	8.37	5.99	7.47	13.29	9.18	5.89	8.98	7.35	8.68	14.38	11.06
İgnimbirit 7	25	6.92	12.55	10.48	7.30	11.55	9.68	9.40	13.40	11.16	11.10	18.11	13.83	7.23	13.09	10.01	5.52	16.31	9.86

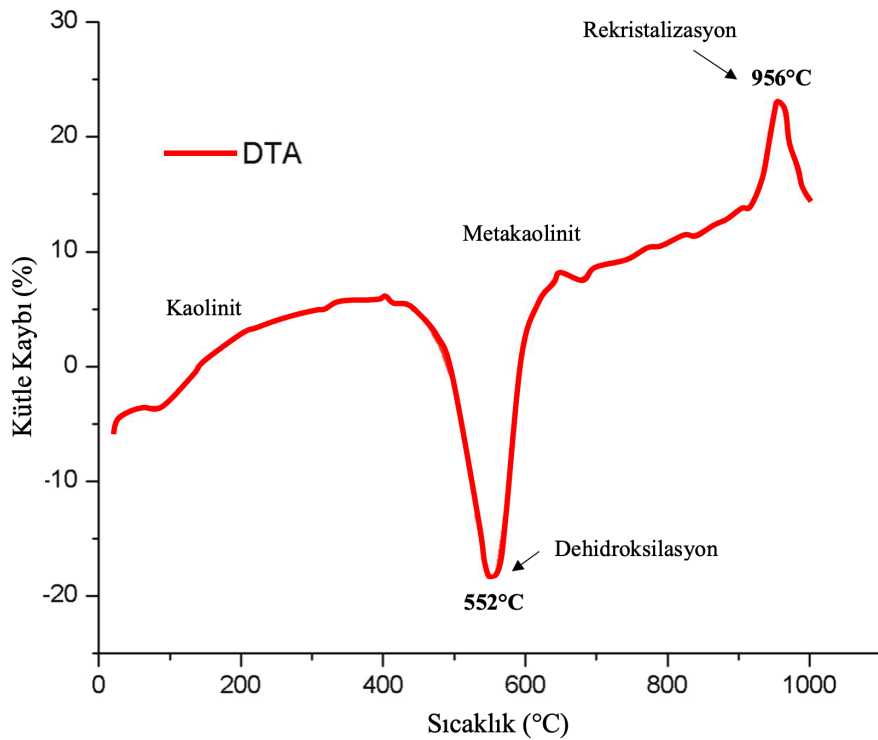


Şekil 4. 14. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı UCS değişimi.



Şekil 4. 15. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı UCS değerlerinin yüzdellik değişimi.

Tironi ve ark. (2014)'de çalışmasında, kaolinit gibi minerallerin kalsinasyon sıcaklıklarını termal analiz yöntemleriyle belirlemiş olup, bu yöntemle minerallerin dehidroksilasyon ve dönüşüm süreçlerini izlemek için Diferansiyel Termal Analiz (DTA) kullanmıştır. Kaolin, alüminyum oksit, silisyum dioksit ve sudan oluşur. Isı uygulandığında, kaolin öncelikle yaklaşık 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda, gözeneklerde ve yüzeylerde emilen suyun serbest kalması gerçekleşir. 200 ile 450 °C arasında, ön-dehidrasyon sürecine bağlı bir kütle kaybı meydana gelir ve 450-650 °C sıcaklık aralığında, kaolinitin dehidroksilasyonu gerçekleşerek, kaolinitin yapısı bozulur ve amorf metakaolin oluşur. Metakaolin, amorf bir alüminosilikat yapıdadır ve yüksek sıcaklıklara (yaklaşık 1000 °C) maruz kaldığında, yeniden kristallenerek mullit adı verilen yeni bir mineral yapısı oluşturur (Şekil 4. 16). Bu, metakaolinin yeniden kristallenmesiyle gerçekleşen bir süreçtir ve mullit, dayanıklı ve sert bir seramik faz olarak bilinir (Illic ve ark, 2010). Balek ve ark. (1986) tarafından yapılan Emanasyon Termal Analizi (ETA) 'da, kaolinitin maksimum yapısal düzensizlik sıcaklığı yaklaşık 700°C olarak belirlenmiştir. Daha kötü kristalleşmiş kaolinit içeren killer için bu sıcaklık yaklaşık 750°C'dir. 850°C'de, kaolinin yapısal düzensizliğinin azaldığı ve daha düzenli bir yapı kazandığı belirtilmiştir.



Şekil 4. 16. Kaolinitik kilin DTA eğrisi (Illic ve ark., 2010'dan değiştirilmiştir).

Bu tez kapsamında, incelenen ignimbirit örneklerinde 600°C'de dayanım artışının, örneklerdeki kaolin oranıyla ilişkili olduğu görülmektedir. Kaolinin metakaoline dönüşme sıcaklığının yaklaşık 450-650°C arasında olduğu, farklı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Bu nedenle, 600°C'de gözlenen dayanım artışının, kaolinin bu dönüşüm sıcaklıklarında metakaoline dönüşmesiyle ilgili olduğu değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, 1000°C'de dayanım artışının metakaolinin rekristalizasyon süreciyle mullit adı verilen yeni bir mineral fazının oluşumuyla ilişkili olabileceği literatürde öne sürülmektedir. Özellikle 600°C ve 1000°C'de, ignimbiritlerin mineral yapısındaki değişimleri incelemek için XRD analizi yapılması kaolinin metakaoline, ardından mullit fazına dönüşümü bu analizle belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu sıcaklık aralığında dayanım artışının, kayacın içindeki mineral dönüşümünden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. İgnimbirit 7 örneğinde, kaolin oranının (%19.34) diğer örneklerle kıyasla daha düşük olduğu ve 1000°C'de dayanımda bir azalma gözlemlendiği belirlenmiştir. Ancak, İgnimbirit 1 örneğinde bu modelin öngördüğü davranışın dışında bir durum gözlenmiştir. Yüksek kaolin oranına rağmen, 1000°C'de dayanımda küçük bir azalma meydana gelmiştir. İgnimbirit 1 ve 7'nin mineral içeriklerine bakıldığında, İgnimbirit 7'nin kuvars ve kaoline ek olarak farklı mineraller içermesi, İgnimbirit 1'de yalnızca kuvars ve kaolinin bulunması, bu farklılığın olası bir nedeni olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan, yüksek kaolin oranı ve yüksek sıcaklıkta meta-kaolinin yeniden kristallenme dönüşümünün, diğer örneklerdeki dayanım artışına katkıda bulunmuş olabileceği düşünülmektedir.

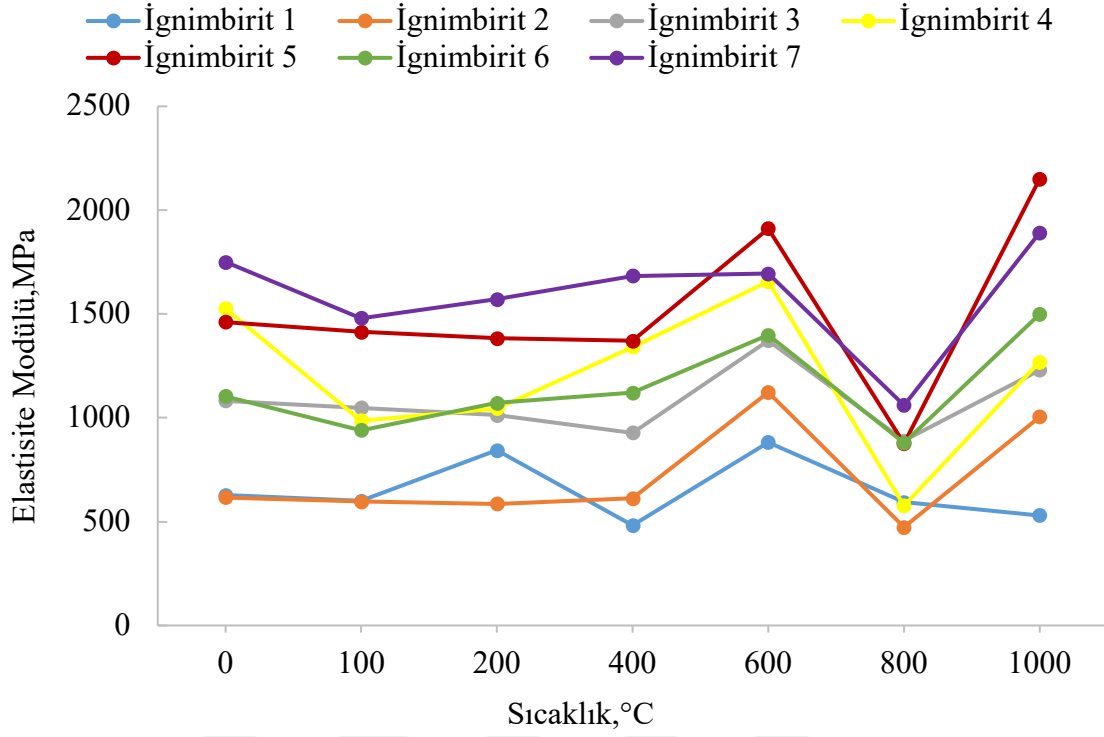
Ayrıca, P-dalga hızı ve ayrıntısına 6. Bölümde değinilen Elektron Mikroskop görüntülerinden elde edilen veriler, 800°C'de tüm örneklerde dayanımın azalmasını desteklemektedir. Nitekim, 800°C'de tüm örneklerde Vp hızında bir azalma tespit edilmiştir. SEM görüntülerinde ise 800°C'de çatlak gelişimi gözlenmiş olup, çatlak oluşumu ise boşluk oranını artırarak Vp hızındaki düşüşü doğrular niteliktedir. Ayrıca, 1000°C'de SEM görüntülerinde, örneklerin %70'ini oluşturan kül matriksin ergiyerek sinterlenmesi, dayanım artışına katkıda bulunan bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

4.2.1. Elastisite Modülünün Sıcaklıkla Değişimi

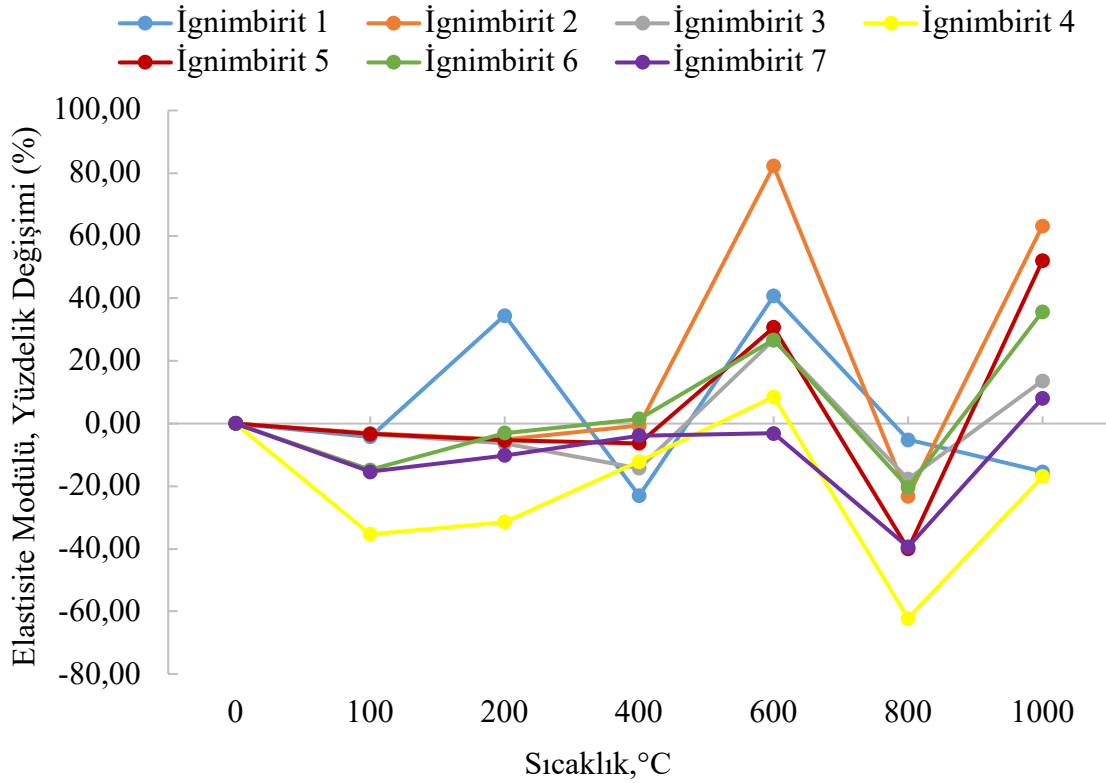
Farklı sıcaklıklarda ısıtılmış ignimbirit örneklerinde tek eksenli yükleme koşulunda “gerilme- birim deformasyon” eğrilerinden ortalama elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4. 16). Elastisite modüllerinin belirlendiği örneklerin gerilme- birim deformasyon grafikleri Ek-2 ‘de sunulmuştur. Şekil 4. 17’de verilen grafik her örnek için ilgili sıcaklıktaki ortalama elastisite modülü değerleri olup, Şekil 4. 18’de ise bu değerlerin yüzdelik değişimleri grafiği verilmiştir. İgnimbirit 1 için, 400°C’ye kadar değerlerde dalgalanmalar görülse de 600°C’de elastisite modülü ısıtılmamış örneğe kıyasla %40 oranında artmıştır (626.60 MPa’dan 881.64 MPa’a). Ancak 800°C’de 594 MPa’a düşerek yaklaşık %35 oranında elastisite modül değeri azalmıştır. Özellikle 600°C’den 800°C’ye geçişteki düşüş, malzemenin termal olarak zayıfladığını işaret edebilir. İgnimbirit 1 örneğinde, 1000°C’de elastisite modülündeki değer düşmeye devam etmiştir. Bu durum, dayanımda gözlemlenen azalmanın, Vp hızındaki düşüş ve artan boşluk oranıyla ilişkili olduğunu gösterebilir. İgnimbirit 2 örneği için, 400°C’ye kadar elastisite modüllerinde belirgin bir değişim gözlenmezken, 600°C’de bu değerler %82,75 oranında artmıştır. İgnimbirit 2 örneği için bu sıcaklık aralığında dayanımın artması, 500-800°C arasında kaolinin kimyasal formülündeki suyu da bırakması ve mineralojik yapısında değişiklikler meydana gelmesiyle ilişkilendirilebilir. 800°C’de %57,80’lik bir düşüş gözlemlenmiş, bu da mikro çatlaklar ve boşlukların artışı işaret etmektedir. 1000°C’de ise modül %112,78 artmış, bu da sinterlenme sürecinin tamamlanmasıyla malzemenin yapısal stabilitesinin sağlandığını gösterebilir. Benzer şekilde İgnimbirit 3 örneği de 400°C’ye kadar değerlerde dalgalanmalar olsa da, 600°C’de %26 oranında elastisite modülü artmış olup bu değer 800°C’de azalmıştır. 1000°C’de ise tek eksenli sıkışma dayanımında olduğu gibi İgnimbirit 3 örneği için hem dayanım hem de elastisite modülü artmıştır. Aynı şekilde İgnimbirit 4, 5, 6, ve 7 nolu örneklerinde 600°C’de elastisite modüllerinde belirgin bir artış yaşanmıştır. 800°C’de bu değerler %20 ile %60 oranında azalırken, 1000°C’de elastisite modülleri tamamında yükselmiştir.

Çizelge 4. 16. Farklı sıcaklıklara maruz kalmış ignimbirit örneklerinden hesaplanan Elastisite Modülü değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	100°C			200°C			400°C			600°C			800°C			1000°C		
		Min. E (MPa)	Maks.E (MPa)	Ort. E (MPa)	Min. E (MPa)	Maks. E (MPa)	Ort. E (MPa)	Min. E (MPa)	Maks. E (MPa)	Ort. E (MPa)	Min. E (MPa)	Maks. E (MPa)	Ort. E (MPa)	Min. E (MPa)	Maks. E (MPa)	Ort. E (MPa)	Min. E (MPa)	Maks. E (MPa)	Ort. E (MPa)
İgnimbirit 1	18	434.59	765.14	599.87	544.70	1141.41	843.06	341.76	622.62	482.19	844.74	918.54	881.64	372.88	782.141	594.09	433.54	662.54	530.15
İgnimbirit 2	20	485.11	662.17	596.39	523.33	646.92	585.13	433.83	885.06	612.18	894.90	1350.96	1122.93	442.93	517.96	473.34	798.66	1272.16	1090.24
İgnimbirit 3	18	891.59	1140.30	1047.73	973.12	1053.85	1013.48	615.70	1229.10	922.40	1036.40	1571.48	1371.89	685.46	1031.95	890.15	833.74	1572.08	1230.39
İgnimbirit 4	21	717.37	1299.76	986.58	810.81	1280.70	1045.85	978.15	1531.20	1371.89	1312.10	1820.87	1656.93	292.827	947.876	576.98	486.88	1625.73	1268.43
İgnimbirit 5	21	1293.9	1544.90	1414.24	1144.12	1609.41	1382.90	1166.87	1573.58	1370.23	1548.62	2326.55	1911.36	581.51	1149.45	876.37	2037.76	2246.09	2157.06
İgnimbirit 6	20	932.14	949.06	940.60	1041.72	1100.45	1071.08	994.38	1246.04	1120.21	1021.06	1697.47	1398.66	671.29	1174.78	879.26	1051.32	1852.46	1499.09
İgnimbirit 7	20	1345.52	1613.68	1479.60	1525.44	1636.63	1571.55	1611.84	1754.05	1682.95	1534.39	1810.28	1694.67	762.99	1352.23	1059.87	1136.47	2465.98	1891.13



Şekil 4. 17. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Elastisite Modülü (MPa) değişimi.



Şekil 4. 18. İgnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı Elastisite Modülü değerlerinin yüzdelik değişimi.

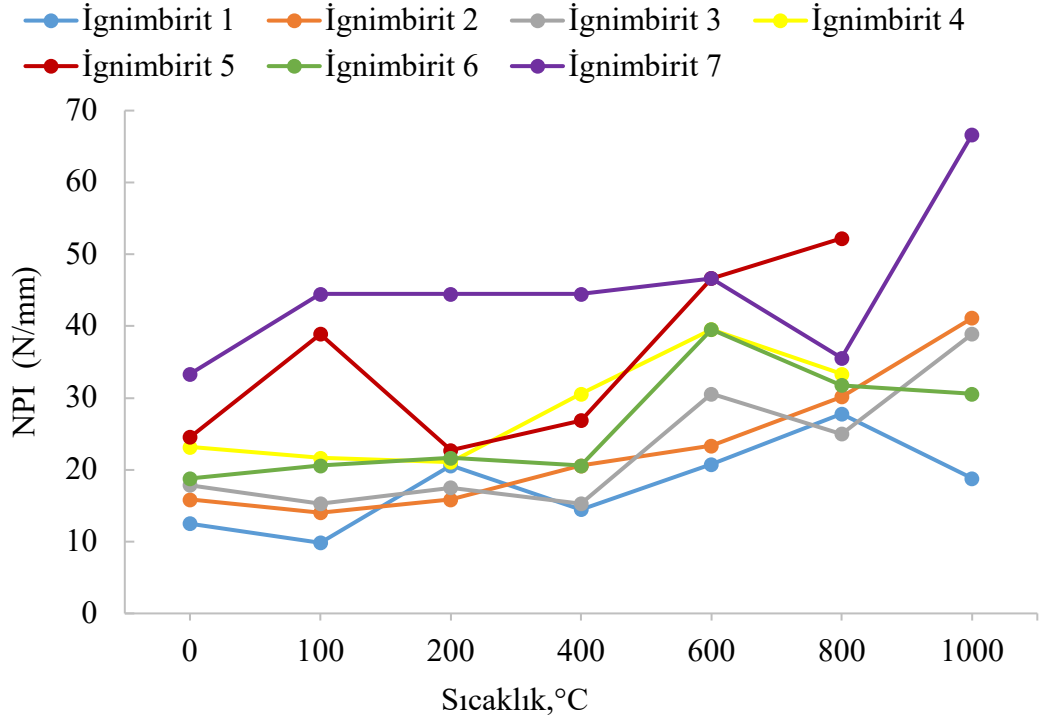
4.2.2. İğne Penetrasyonunun Sıcaklıkla Değişimi

İgnimbirit örneklerinde sıcaklık değişiminin etkisini değerlendirmek amacıyla İğne Penetrometresinden de yararlanılmış ve iğne penetrometre indeksi (NPI) değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler, farklı sıcaklık koşullarındaki dayanım değişimlerini analiz etmek için gerçekleştirilmiş olup, ortalama NPI değerleri Çizelge 4. 17’de sunulmuştur. Şekil 4. 19’ da verilen sıcaklığa bağlı NPI değerlerindeki değişimi gösteren grafik, Şekil 4. 20’de ise bu değerlerin sıcaklığa bağlı yüzdelik değişim grafikleri verilmiştir. İgnimbirit 1 için, NPI değerleri 200°C’den 800°C’ye doğru artmaktadır. Özellikle 600°C’den 800°C’ye kadar %68 oranında belirgin bir artış gözlenirken, 1000°C’de NPI değeri %32 azalmıştır. İgnimbirit 2 örneği için, NPI değerleri 200°C’den 1000°C’ye doğru genel olarak artmakta olup, ısıtılmamış örneğin 15.87 N/mm olan NPI değeri 1000°C’de 41.11 N/mm olarak %159 artmıştır. İgnimbirit 3 için, 400°C’ye kadar NPI değerlerinde dalgalanmalar olsa da 600°C’de %70 oranında bir artış olurken, 800°C’de %30 azalmış ve 1000°C’de tekrar artış eğilimi sergileyerek ısıtılmamış örnek ile kıyaslandığında %118 artış göstermiştir. İgnimbirit 4 için ise, NPI değerleri 100°C’den 600°C’ye artarken 800°C’de düşüş eğilimi göstermiştir. Özellikle 200°C’de 21.06 N/mm olan değer 600°C’de 39.52 N/mm olarak %60 oranında belirgin bir artış görülürken, 800°C’de NPI değerleri %34 oranında bir azalmıştır. İgnimbirit 5 için, 100°C’den 200°C’ye doğru %41 oranında NPI değerleri azalma eğilimi göstermektedir. Ancak, 200°C’de 22.73 N/mm olan değer, 800°C’de 52.22 N/mm değerini alarak ilksel durumuna göre %122 oranında NPI değerleri artmaktadır. İgnimbirit 6 örneği için, NPI değerleri 100°C’den 200°C’ye doğru hafif bir artış göstermektedir. Ancak, 200°C ile 400°C arasında %7 oranında bir düşüş yaşanmıştır. Daha sonra, 400°C ile 600°C arasında %100’lük belirgin bir artış olup, 800°C ve 1000°C’de ise arasında hafif bir düşüş gözlenmiştir. Son olarak İgnimbirit 7 için, NPI değerleri 100°C’den 200°C’ye ve 400°C’e kadar 44.44 N/mm NPI değeri ile sabit kalmaktadır. Daha sonra, 600°C’ye doğru hafif bir artış göstermiştir. Ancak 800°C’de 35.56 değeri ile %34 oranında belirgin bir düşüş yaşarken bu değer 1000°C ‘de 66.67 N/mm olmuş ve %93’lük bir artış eğilimi sergilemiştir.

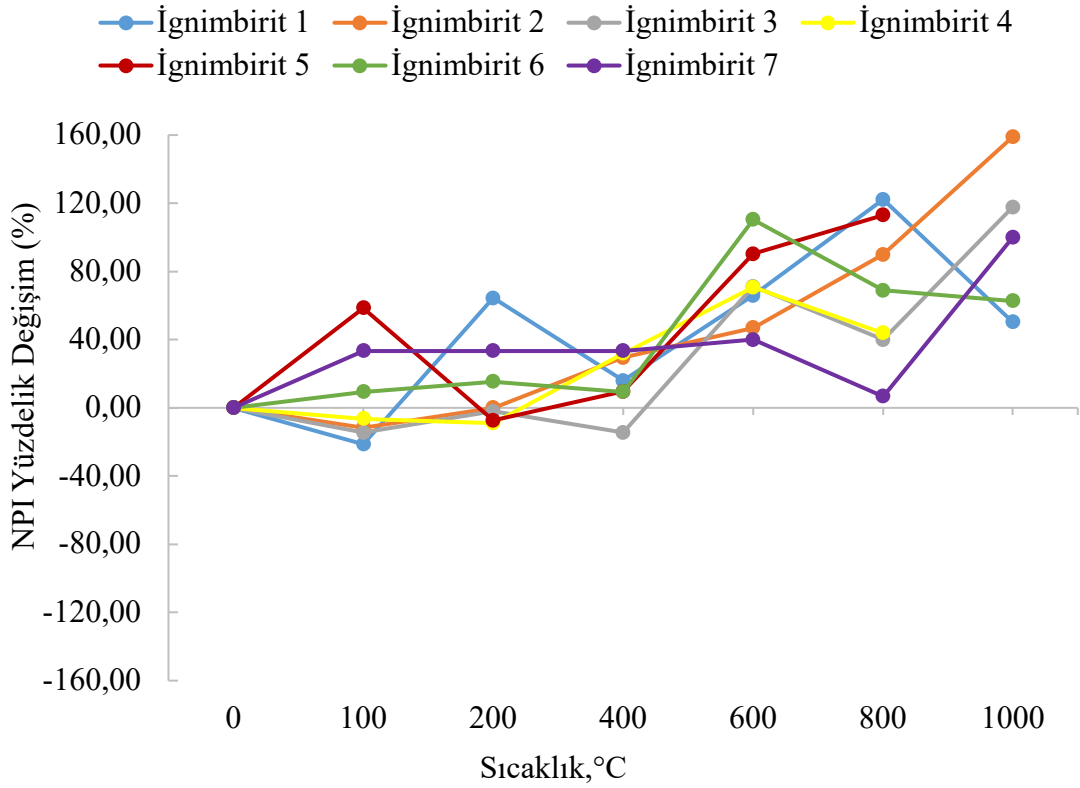
Çizelge 4. 17. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden NPI (N/mm) değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	100°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
		Ortalama İğne Penetrasyon İndeksi (N/mm)					
İgnimbirit 1	6	9.83	20.56	14.48	20.74	27.78	18.79
İgnimbirit 2	6	14.02	15.87	20.56	23.33	30.16	41.11
İgnimbirit 3	6	15.28	17.49	15.28	30.56	25.00	38.89
İgnimbirit 4	5	21.67	21.06	30.56	39.52	33.33	-
İgnimbirit 5	5	38.89	22.73	26.85	46.67	52.22	-
İgnimbirit 6	6	20.56	21.67	20.56	39.52	31.75	30.56
İgnimbirit 7	6	44.44	44.44	44.44	46.67	35.56	66.67

Genel olarak bakıldığında sıcaklık artışına bağlı olarak bir miktar dalgalanma olmakla birlikte dayanımın arttığı görülmektedir. Ancak, incelenen örneklerin tamamının ignimbirit olduğu ve her ne kadar bu sonuçların ortalama değerleri alınsa da NPI değerleri belirlenirken iğnenin, birimin içerisinde bulunan pomza, kül matriks veya boşluklara isabet etmesi olasılığının, sonuçların UCS sonuçlarından bir miktar farklılık göstermesinin ve değerlerdeki anomalilerin sebebi olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4. 19. İğnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı NPI değişimi.



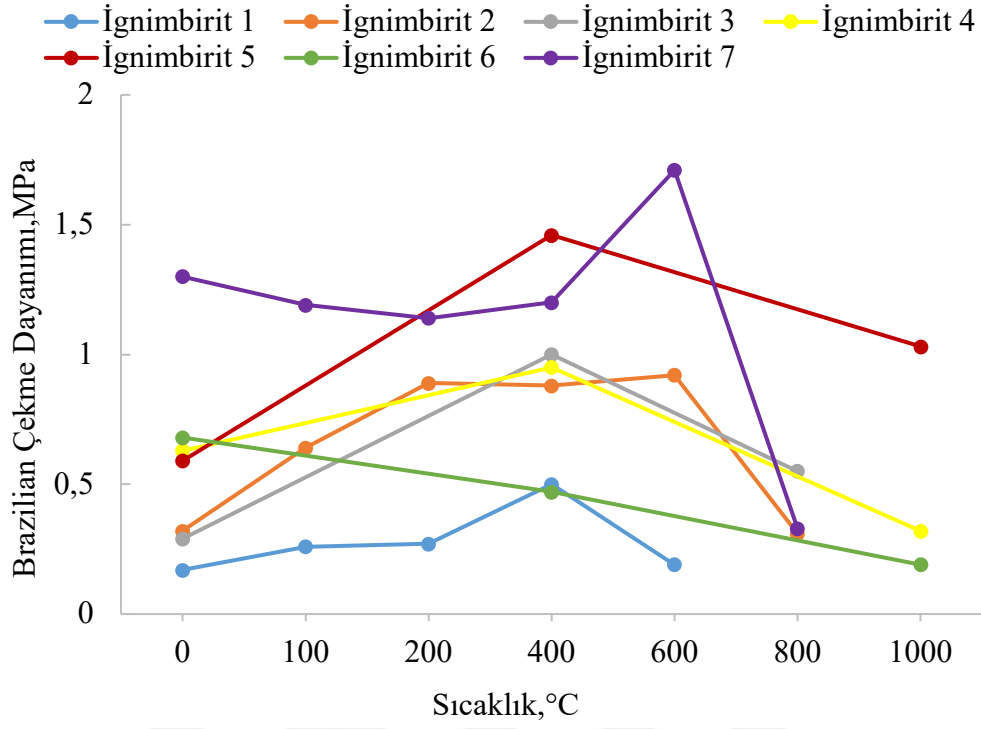
Şekil 4. 20. İğnimbirit örneklerinin sıcaklığa bağlı NPI değerlerinin yüzdelik değişimi.

4.2.3. Brazilian Çekme Dayanımının Sıcaklıkla Değişimi

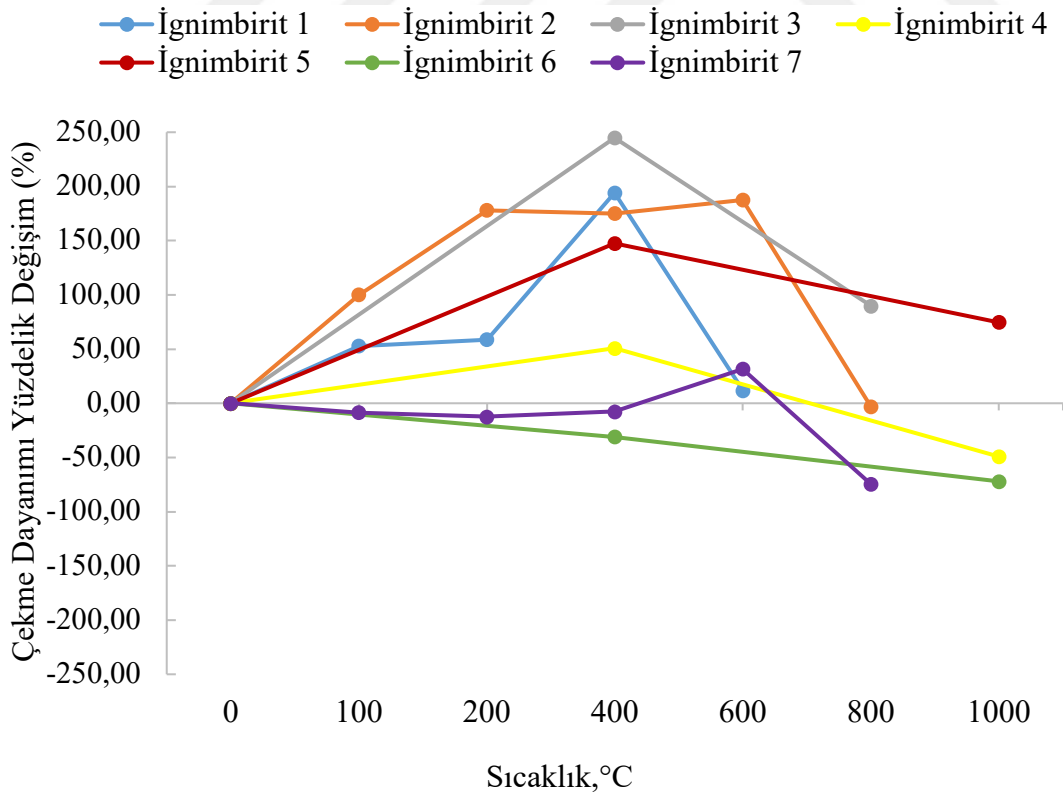
Brazilian deney yöntemi kullanarak ignimbiritlerin çekilme dayanımının (σ_t) tayini amacıyla farklı sıcaklıklara maruz kalmış örneklerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Düzensiz şekilde kırılan örnekler çıkarılmış ve veriler Çizelge 4. 18'de sunulmuştur. Şekil 4. 21'de örneklerin sıcaklığa bağlı çekme dayanımlarındaki değişimi, Şekil 4. 22'de ise bu değerlerin sıcaklığa bağlı yüzdelik değişim grafikleri verilmiştir. Bu veriler ışığında, İgnimbirit 1 için brazilian çekme dayanımı ısı etkiye maruz bırakılmamış örnekte 0.17 MPa iken, 200°C'de 0.26 MPa olarak %59 oranında artış göstermiştir. 400°C'de (0.50 MPa) çekme dayanımında %200'e varan bir artış yaşanırken, 600°C' (0.19 MPa) de dayanımı düşmüştür. İgnimbirit 2 için 600°C'ye kadar çekme dayanımında ısıya maruz bırakılmamış örneğe kıyasla %187 oranında bir artış gözlenirken 800°C'de çekme dayanımı 0.31 MPa'a düşmüş ve %185'lik azalma gerçekleşmiştir. İgnimbirit 3 için üç farklı sıcaklık kademesinde deneyler gerçekleştirilmiş olup ısıtılmamış örnek için çekme dayanımı 0.29 MPa iken, 400°C'de bu değer 1 MPa'a yükselmiş ve %240 oranında çekme dayanımı artmıştır. Fakat bu değer 800°C'de 0.55 MPa'a düşmüştür. Benzer şekilde, İgnimbirit 4, İgnimbirit 5 ve İgnimbirit 6 örnekleri için yalnızca oda sıcaklığında, 400°C ve 1000°C'de ölçümler yapılmıştır. Oda sıcaklığında değeri 0.63 MPa olan İgnimbirit 4 örneği, 400°C'de 0.95 MPa'a yükselerek %51 oranında bir artış sergilerken, 1000°C'de bu değer 0.32 MPa'a düşerek %49 oranında bir azalma yaşanmıştır. İgnimbirit 5 için, 400°C'de ısıtılmamış örneğe kıyasla çekilme dayanımı 1.46 MPa'a kadar artmış ve %147'lik bir artış sergilemiş olup, 1000°C'de bu değer 1.03 MPa'a düşmüştür. İgnimbirit 6 örneği için ise, sıcaklık arttıkça çekilme dayanımı genel olarak azalmıştır. Isıtılmamış örnekte 0,68 MPa olan değer, 1000°C'de 0.19 MPa'a düşerek %72'lik bir azalma göstermiştir. Son olarak İgnimbirit 7 örneği için, brazilian çekilme dayanımı, sıcaklık artışıyla 400°C'ye kadar azalmış, daha sonra 600°C'de 1.71 MPa değeri ile %31 oranında artmıştır. Özellikle oda sıcaklığı ile 200°C arasında bir düşüş gözlenirken, 200°C ile 600°C arasında dayanımın hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür. Ancak, 600°C ile 800°C 0.33 MPa değeri ile %70 oranında bir düşüş görülmüştür. Genel olarak ignimbiritlerin çekilme dayanımının sıcaklık artışıyla birlikte arttığı görülmektedir, ancak örnek sayısının az olması nedeniyle özellikle 600 – 1000°C arasındaki sıcaklıklarda değişimin ve/veya olası anomalilerin belirlenmesi tam olarak mümkün olamamıştır.

Çizelge 4. 18. Farklı sıcaklıklarda ignimbirit örneklerinden hesaplanan σ_t değerleri.

Örnek No	Örnek Sayısı	100°C			200°C			400°C			600°C			800°C			1000°C		
		Min. σ_t (MPa)	Maks. σ_t (MPa)	Ort. σ_t (MPa)	Min. σ_t (MPa)	Maks. σ_t (MPa)	Ort. σ_t (MPa)	Min. σ_t (MPa)	Maks. σ_t (MPa)	Ort. σ_t (MPa)	Min. σ_t (MPa)	Maks. σ_t (MPa)	Ort. σ_t (MPa)	Min. σ_t (MPa)	Maks. σ_t (MPa)	Ort. σ_t (MPa)	Min. σ_t (MPa)	Maks. σ_t (MPa)	Ort. σ_t (MPa)
İgnimbirit 1	10	0.16	0.34	0.26	0.16	0.39	0.27	0.44	0.59	0.50	0.16	0.21	0.19	-	-	-	-	-	-
İgnimbirit 2	14	0.58	0.70	0.64	0.83	0.95	0.89	0.78	1.05	0.88	0.86	0.99	0.92	0.21	0.40	0.31	-	-	-
İgnimbirit 3	4	-	-	-	-	-	-	0.74	1.13	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İgnimbirit 4	3	-	-	-	-	-	-	0.83	1.07	0.95	-	-	-	-	-	-	-	-	0.32
İgnimbirit 5	5	-	-	-	-	-	-	1.24	1.61	1.46	-	-	-	-	-	-	0.80	1.26	1.03
İgnimbirit 6	3	-	-	-	-	-	-	0.24	0.69	0.47	-	-	-	-	-	-	-	-	0.19
İgnimbirit 7	11	0.95	1.43	1.19	0.57	1.65	1.14	1.07	1.37	1.20	1.70	1.72	1.71	-	-	-	-	-	-



Şekil 4. 21. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı σ_t değişimi.



Şekil 4. 22. İgnimbirit örneklerinde sıcaklığa bağlı σ_t değerlerinin yüzdelik değişimi.

4.3. Genel Değerlendirmeler

Yedi grup ignimbirit üzerinde, farklı sıcaklıklarda fiziksel ve mekanik özellikleri belirlemeye yönelik gerçekleştirilen deneyler sonucunda, birim hacim ağırlık değerlerinin sıcaklık arttıkça genel olarak düştüğü ve bu düşüşün en belirgin gözlemlendiği sıcaklığın 600°C olduğu değerlendirilmiştir. Özgül ağırlık değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmezken, literatürde de bahsedildiği gibi yaklaşık 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda, gözeneklerde ve yüzeylerde emilen suyun serbest kalması ve kaolinin 200 ile 450 °C arasında, ön-dehidrasyon sürecine bağlı bir kütle kayıpları yaşaması bu aralıklarda azalmaların olmasıyla ilişkilendirilebilir. Boşluk oranı ise 200°C'den sonra biraz düşmekle birlikte, 800 ve 1000°C'e doğru ilk haline benzer bir değer almaktadır. Fakat yüksek sıcaklıkların ignimbiritlerin mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri, sinterlenme, yeniden kristallenme ve gözenek oranındaki değişimlerin mekanik dayanımı nasıl etkilediğini anlamak için ayrıntılı olarak incelenmesi gereklidir. P-dalga hızının 600°C'ye kadar sabit kaldığı değerlendirilmiş, ancak 800°C'de bu değer düşmesi ve aynı sıcaklık aralığında boşluk oranında artış eğilimi gözlemlenmesi, boşluk oranı ile P-dalga hızı arasında bir ilişki olabileceğine işaret etse de bazı anomaliler görülmüştür.

Tek eksenli basınç dayanımı, genel olarak 400°C'ye kadar küçük değişikliklerle sabit kalmış, 600°C'de artış göstermiş olup, 800°C'de ise bir önceki sıcaklığa göre azalarak, ısıtılmamış halindeki değere yaklaşmış ve 1000°C'de tekrar bir artış sergilemiştir. Bu durumun, mineral içeriğinde bulunan kaolinin metakaoline dönüştükten sonra yeniden kristallenmesi sonucu mineral yapısındaki değişikliklerden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca, mineral değişimlerinden kaynaklandığı düşünülen bu dayanım artışını değerlendirmek amacıyla, Kapadokya bölgesi dışındaki ocaklardan elde edilebilecek farklı ignimbiritlerde mineral içerikleri analiz edilebilir. Çünkü bu tez kapsamında, tek bir ocaktan alınan ve farklı dönemlerde çökelmiş olduğu düşünülen, çeşitli renklerdeki ignimbiritler incelenmiş olup, benzer mineral içeriğindeki değişiklikler dikkate alınmıştır. Fakat mineral içerikleri değiştiğinde ignimbirit yapı taşında durumun nasıl değiştiğinin değerlendirilmesi önemlidir.

800°C'de P-dalga hızının (V_p) azalması, çatlak gelişimi ile ilişkilendirilmiş olup, bu durumun detayları 6. Bölümde sunulan elektron mikroskop görüntülerinde ele alınmıştır. Bu görüntülere göre, 800°C'de çatlak gelişiminin meydana geldiği ve bu durumun malzeme dayanımını olumsuz yönde etkileyebileceği değerlendirilmiştir.

Bununla birlikte, 1000°C'de kül matrisinin sinterlenmesi ise dayanımı artırıcı bir etken olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, NPI değerlerinin ısıtılmamış örneğe kıyasla sıcaklık arttıkça artış göstermesi, örneklerin daha gevrek hale geldiğini ve iğnenin daha zor nüfuz ettiğini düşündürmektedir. Elastik modül ise UCS ile benzer bir davranış sergilemiştir. Çekilme dayanımı değerlerinin 400°C'ye kadar artış gösterdiği tespit edilmiştir, ancak sınırlı sayıda örnek nedeniyle bu eğilimin genelleştirilebilmesi konusunda belirsizlikler mevcuttur.

İgnimbiritlerin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği, yapılan deneysel çalışmaların sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, belirli avantajlar ve sınırlamalarla değerlendirilmelidir. Yüksek sıcaklık dayanımı açısından, ignimbirit örneklerinin 1000°C'ye kadar yapısal dayanımlarını koruyabilmesi ve bazı durumlarda dayanım artışı göstermesi, bu malzemelerin yangın gibi yüksek sıcaklıkların söz konusu olduğu senaryolarda avantajlı olabileceğini göstermektedir. Özellikle, 1000°C'de mineral yapısında meydana gelen sinterlenme ve yeniden kristallenme gibi değişiklikler, malzemenin mekanik dayanımını artırıcı etkiler yaratmıştır. Bununla birlikte, dayanım dalgalanmaları ve anomaliler de dikkat edilmesi gereken noktalar olarak öne çıkmaktadır. 600°C'de dayanımın artması, ancak 800°C'de azalması gibi sıcaklık aralıklarında gözlemlenen dalgalanmalar, malzemenin yüksek sıcaklık altında beklenmedik davranışlar sergileyebileceğini ve yapıların güvenliği açısından olumsuz sonuçlar doğurabileceğini işaret etmektedir. Bu dalgalanmaları anlamak için, 600°C, 800°C ve 1000°C arasında daha sık deneyler yapılması önemli olup, malzemenin bu sıcaklıklardaki davranışının netleşmesinde yardımcı olabilir. Ayrıca, NPI değerlerinin sıcaklıkla artış göstermesi malzemenin daha gevrek hale geldiğini, bu durumun ise çatlama ve kırılma risklerini artırabileceğini düşündürmektedir. Yangın koşullarında ignimbirit gibi malzemelerin termal şoklara karşı performansını anlamak için 1000°C'nin ötesinde, 1200°C'ye kadar deneyler yapılması, malzemenin ani sıcaklık değişimleri nedeniyle oluşan gerilme ve çatlama ile ilişkisini daha net ortaya koyabilir. Bu sıcaklıkta yapılacak deneylerde, malzemenin aşırı sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığını değerlendirerek yapı güvenliğine önemli katkılar sağlayabilir. Son olarak ise, gözenek oranının 800°C ve 1000°C'de artış göstermesi, malzemenin yangın sonrası performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir ve uzun süreli dayanıklılık açısından bir zayıflık olarak değerlendirilebilir.

5. DEFORMASYON VE ÇATLAK İLERLEME AŞAMALARININ SICAĞLIKLA DEĞİŞİMİ

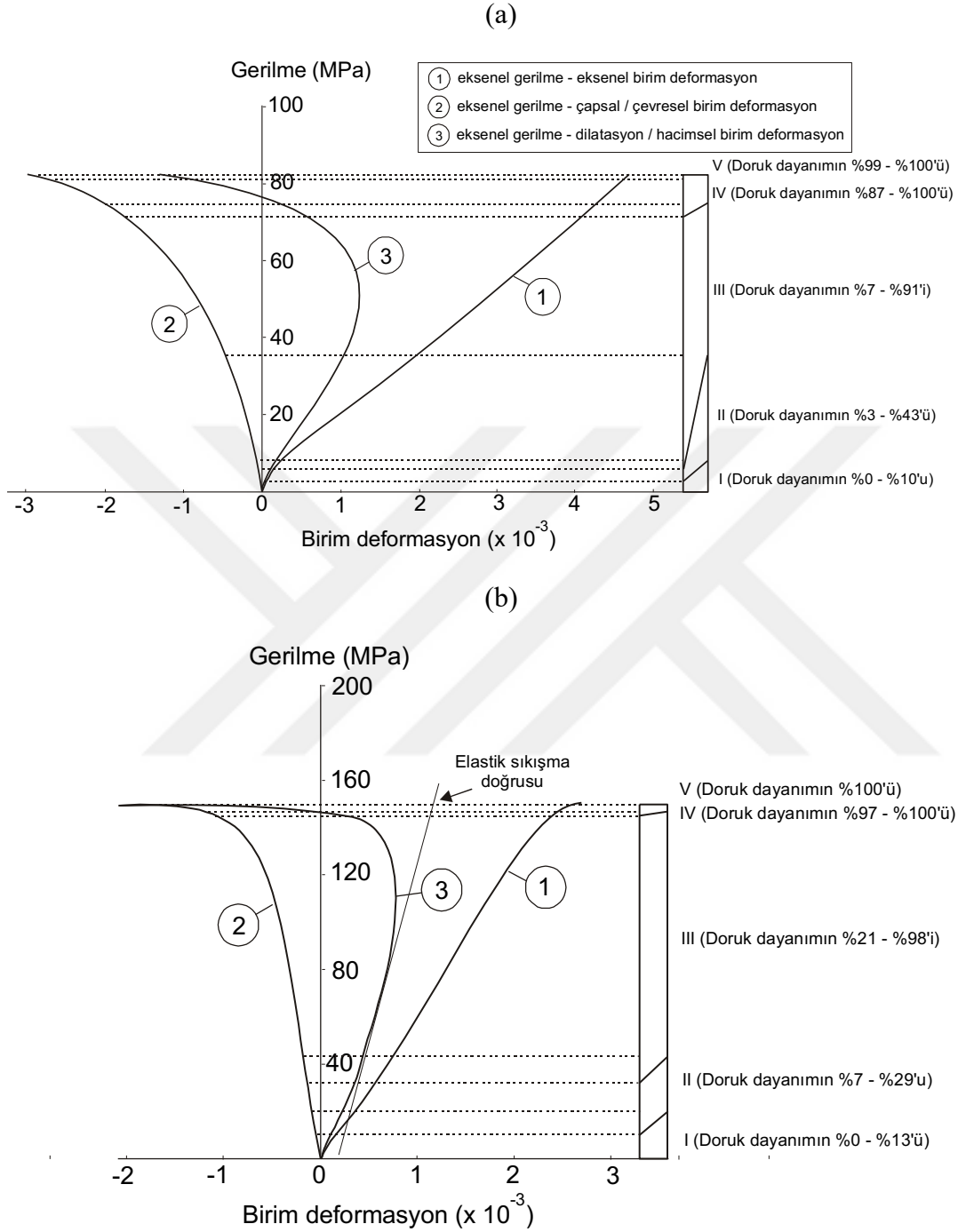
Kayaların gerilmeye bağlı olarak deformasyon ve çatlak ilerleme aşamaları 1960'lı yıllardan itibaren bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Bieniawski, 1967; Ohnaka ve Mogi, 1982; Martin ve Chandler, 1992; Eberhardt ve ark. 1998 ve 1999; Diederichs, 2004). Bu bölümde öncelikle kayalardaki deformasyon ve çatlak gelişimi aşamalarının belirlenmesine yönelik yapılmış çalışmalara kısaca değinilmiş ve daha sonra tez çalışması kapsamında yapılan deneyler ve elde edilen bulgular ile değerlendirmelere yer verilmiştir.

5.1. Deformasyon ve Çatlak İlerleme Aşamalarının Belirlenmesine İlişkin Yaklaşımlar

Bieniawski (1967) laboratuvar çalışmalarına dayanarak kırılğan kayaların artan sıkışma gerilmesi altında yenilme sürecine kadar ve sonrası için 5 aşama tanımlamıştır. Bunlar, çatlak kapanması, doğrusal elastik deformasyon, çatlak ilerlemesinin başlangıcı ve duraylı çatlak ilerlemesi, kritik enerjinin açığa çıkması ve duraysız çatlak ilerlemesi ile yenilme ve yenilme sonrası aşamalarıdır. Sonraki yıllarda Ohnaka ve Mogi (1982) tarafından çatlak ilerlemesi aşamalarıyla gerilme artışına bağlı olarak Akustik Emisyon (AE) aktivitesi ilişkilendirilmiştir. Araştırmacıların Bieniawski (1967) tarafından önerilen 5 aşama için Mannari graniti ve Shinkomatsu andezitinden elde ettikleri gerilme - birim deformasyon grafikleri ile farklı deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları Şekil 5. 1'de, bu seviyelerin AE ile ilişkilendirilmiş açıklamaları ise Çizelge 5. 1'de sunulmuştur.

Eberhardt ve ark. (1998 ve 1999), çatlak ilerleme seviyelerinin sadece birim deformasyon – gerilme verisiyle belirlenmesinin yeterli olmadığını, Ohnaka ve Mogi (1981: Ohnaka ve Mogi 1982'den) tarafından önerildiği gibi AE aktivitesiyle birlikte yapılan değerlendirmelerin daha doğru sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır. Araştırmacılar, tek eksenli sıkışma yüklemesi altında kırılğan kayalar için deformasyon ve çatlak gelişimi aşamalarını, çatlak kapanması, elastik deformasyon, çatlak başlangıcı, ikincil/sistemik çatlama, çatlak birleşmesi ve çatlak hasarı olarak önermişlerdir (Çizelge 5. 2).

Bu öneriler, AE aktivitesinin yanı sıra eksenel, yanal ve hacimsel sıkılık eğrilerinin analizine dayandırılmıştır.



Şekil 5. 1. (a) Shinkomatsu andeziti ve (b) Mannari graniti için tipik gerilme – birim deformasyon eğrileri ve bunların I – V no.lu aşamalarla ilişkileri (Ohnaka ve Mogi, 1982 - Tuncay 2006'dan alınmıştır).

Çizelge 5. 1. Yenilme anına kadar oluşan deformasyon süreçleri (Ohnaka ve Mogi, 1982 -Tuncay 2006’dan alınmıştır).

Aşama	AE Aktivitesi	Kırılma/Deformasyon Süreci
I	Ani AE aktivitesi	Yükleme eksenine büyük açılarda konumlanmış çatlakların kapanımı, kaynaşmış kısımlarının ve pürüzlülüklerinin kırılması
II	Az miktarda AE aktivitesi	Örnek, çok sayıda çatlak ilerlemesi/gelişimi için yeterli büyüklükte gerilmenin etkisinde değil
III	AE aktivitesinde artış (eksponansiyel)	Yeni çatlakların ilerlemesi/gelişimi ve yükleme eksenine küçük açılarda konumlanmış çatlakların (boşlukların) açılması (dilatancy başlangıcı)
IV	AE aktivitesinde önemli düzeyde artış (eksponansiyel-eğim daha da artar)	Çatlaklar arası etkileşim
V	AE aktivitesinin çok hızlı bir yükseliş göstermesi	Çatlakların hızla birleşimi sonucu yenilme kırığının oluşması

Diederichs ve ark. (2004) tarafından, çatlak başlangıç eşik gerilme değerinin (σ_{ci1}), birim deformasyon ölçümlerinden kestirilebilmekle birlikte, AE aktivitesinden daha doğru belirlenebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca araştırmacılar, bu eşik gerilme değerinin kayanın yerinde dayanımı için gerçek bir alt sınırı temsil ettiği, çatlak birleşimi eşik gerilme değerinin (σ_{cs}) ise yerinde dayanım için gerçek üst sınırı temsil ettiğini belirtmişlerdir. Bir başka ifadeyle uzun süreli duraylılık koşulları dikkate alındığında bu sınır değerler, süreye de bağlı olarak nihai dayanımı ifade eden gerilme değerleridir.

Tuncay (2009), Kapadokya bölgesinde farklı formasyonlar içinde yer alan ignimbiritlerde açılmış yeraltı boşluklarının girişlerinde ya da içlerinde sistematik süreksizliklerle sınırlanmış bazı kaya bloklarının zamana bağlı bir kopma yüzeyinin gelişmesiyle düştüğünü göstermiştir. Söz konusu ek kırığın gelişmesine neden olan gerilmelerin, ignimbiritlerin çekilme dayanımlarından çok daha düşük olduğunu ve nemli koşullarda çatlak başlangıcı ve/veya ikincil çatlak ilerlemesi eşik gerilme değerlerine (σ_{ci2}) yakın olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı söz konusu eşik gerilme seviyelerini, ignimbirit örnekleri üzerindeki çekilme deneylerinden elde ettikleri AE Aktivitesi – Gerilme verisini Eberthardt ve ark. (1999) ve Diederichs ve ark. (2004) tarafından önerildiği gibi

yorumlayarak tespit etmiştir. Sonuç olarak, söz konusu çalışmada seçilen duraysızlıkların kopma yüzeyini oluşturan çatlağın uzun sürede ilerlemesi/yayılmasıyla geliştiğini, kısa süreli laboratuvar deneyleri ve AE tekniğinden yararlanılarak Kapadokya bölgesindeki ignimbiritlerin uzun süreli dayanımına ilişkin bilgi edinilebileceğini vurgulamıştır.

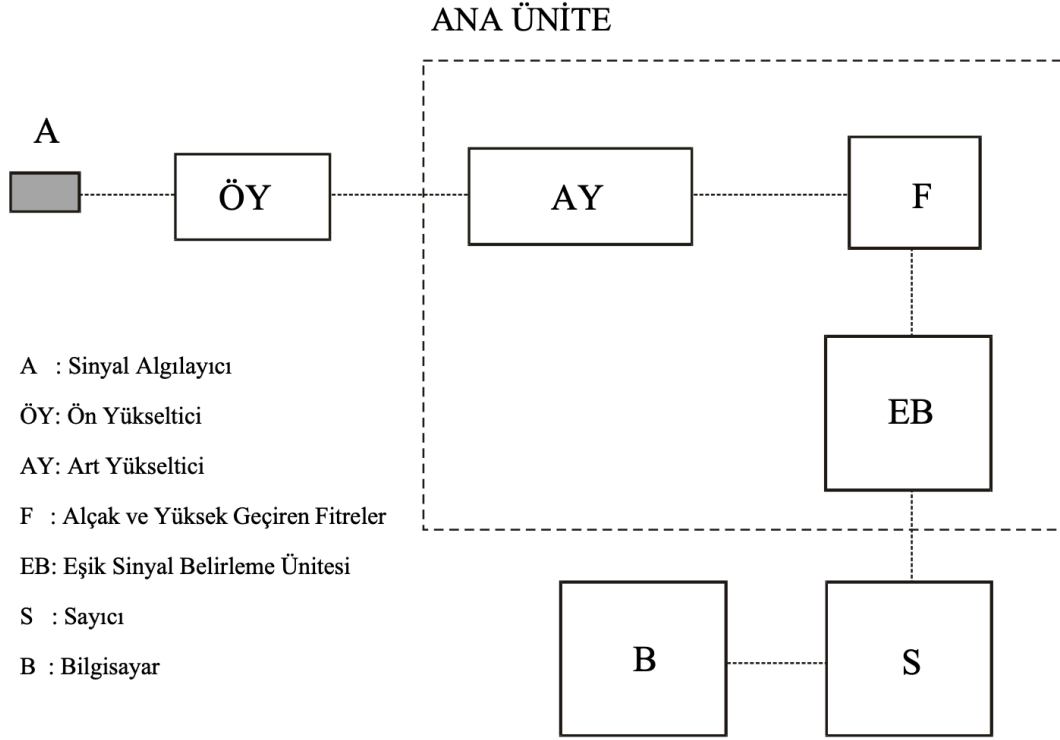
Çizelge 5. 2. Eberhardt et al. (1999) tarafından önerilen deformasyon ve çatlak ilerlemesi aşamaları (Tuncay, 2006'dan alınmıştır).

Aşama		Tanımlama
I	Çatlak kapanımı	Eksenel birim deformasyon eğrisinin eğrisellikten doğrusal hale geçtiği noktaya (σ_{cc}) kadar olan davranış.
II	Doğrusal elastik deformasyon	Hacimsel sıkılık eğrisinin doğrusal davranış gösterdiği kısım.
III	Birincil çatlak ilerlemesi	Hacimsel sıkılık eğrisinin doğrusal davranıştan en fazla saptığı ilk nokta başlangıcına (σ_{ci1}) karşılık gelmekte. AE aktivitesinin belirgin olarak yükseldiği ilk gerilme seviyesiyle başlamakta.
IV	İkincil çatlak ilerlemesi	Hacimsel sıkılık eğrisinde belirgin kırılmaların oluşmasıyla başlayan (σ_{ci2}) aşama. Çatlak ilerlemesi başlangıcından sonra AE aktivitesindeki ilk önemli artışın gözlemlendiği seviyeyle başlamakta.
V	Çatlak birleşimi	Eksenel birim deformasyonun doğrusallıktan saptığı seviye (σ_{cs}) ile başlayan aşama. Hacimsel sıkılık eğrisinde büyük düzensizlikler gözlenir. Ayrıca, AE aktivitesinde değişiklik var.
VI	Çatlak hasarı	Hacimsel birim deformasyon eğrisinin döndüğü seviye, ya da hacimsel sıkılık eğrisinde pozitiften negatif değerlere geçildiği seviye ile başlayan aşama (σ_{cd}).

5.2. Farklı Sıcaklıklara Maruz Bırakılmış İgnimbiritlerin Çatlak İlerleme Aşamalarının Belirlenmesi

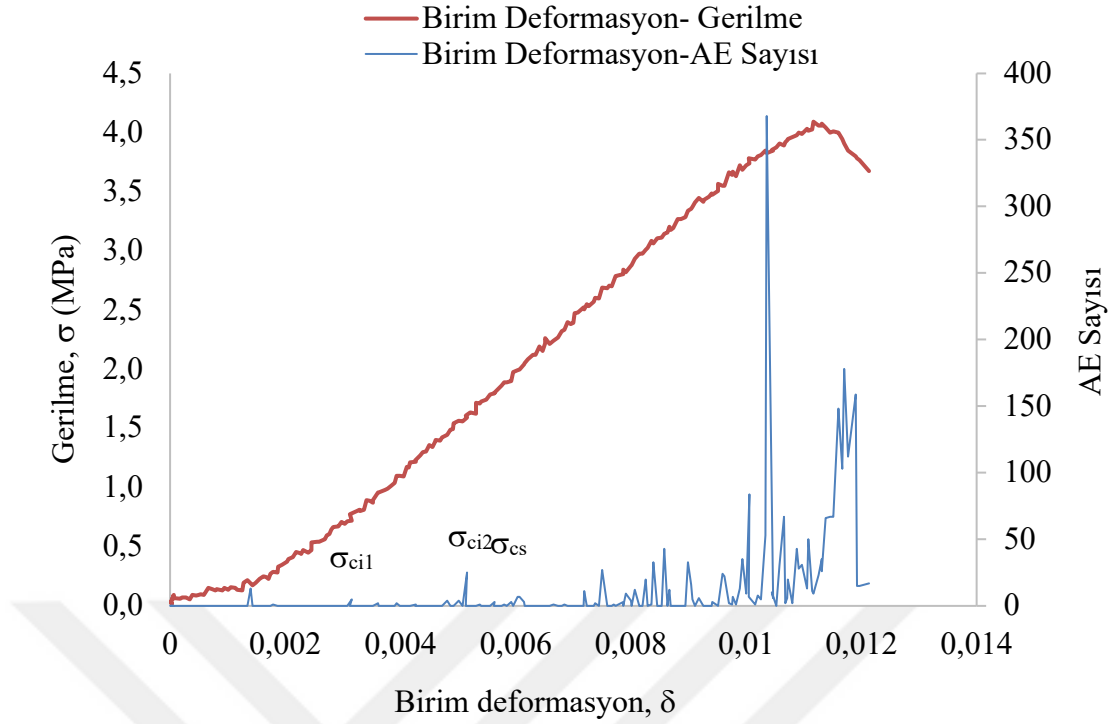
1. Bölüm’de değinildiği gibi, sıcaklığın yapıtaşı olarak kullanılan ignimbiritlerin kısa süreli dayanımlarının yanı sıra nispeten uzun süreli dayanımlarına etkisinin de araştırılması tez kapsamında planlanmıştır. Çatlak başlangıcı gerilme seviyesi veya ikincil çatlak gelişimi gerilme seviyesinin (σ_{ci2}) kayaların uzun süreli koşullardaki dayanımının alt sınırını, çatlak birleşimi gerilme seviyesinin de üst sınırını oluşturduğu, bu seviyelerin belirlenerek uzun süreli dayanım hakkında bilgi edinilebileceği de Diederichs ve ark. (2004) ve Tuncay (2009) tarafından vurgulanmıştır. Bu araştırmacılar tarafından önerilen ve uygulanan yaklaşım dikkate alınarak söz konusu gerilme seviyelerinin belirlenmesi amacıyla, sıcaklık etkisine maruz kalmamış örneklerin yanı sıra farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış ignimbiritlerden birer adet olmak üzere toplam 45 örnekte yapılan tek eksenli sıkışma deneyinde AE ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 600°C’de, İgnimbirit 1 ve İgnimbirit 2 gruplarından birer örnek, bilgisayardan kaynaklanan bir sorun nedeniyle deneye tabi tutulamamıştır. 800°C’de, İgnimbirit 4’ten bir örnek ve 1000°C’de İgnimbirit 5’ten bir örnekte ise, ısıtma işleminden sonra deney için uygun koşulları sağlamadığı için AE deneyleri gerçekleştirilememiştir. Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde bulunan ve deneylerde kullanılan Parametrik AE deney sistemi şematik olarak Şekil 5. 2’de gösterilmiştir. AE sistemi, 150 kHz hakim frekans hassasiyetinde piezoelektrik malzeme içeren bir algılayıcı, ön yükseltici (preamplifier) art yükseltici (postamplifier), alçak ve yüksek geçiren filtreler, eşik sinyal belirleme ünitesi ile sayıcıdan oluşmaktadır. Eşik seviyeyi geçen her bir AE sinyali sayıcı tarafından tespit edilerek bilgisayara aktarılmaktadır. Burada parametrik AE sisteminin çalışma prensibine ilişkin özet bilgi sunulmuş olup, daha ayrıntılı bilgiye Tuncay ve ark. (2002)’dan ulaşılabilir.

Tez kapsamındaki deneylerde AE sistem bileşenleri; ön yükseltici 40 dB, art yükseltici 30 dB, yüksek geçiren filtre 100 kHz, alçak geçiren filtre 1 MHz, eşik sinyal belirleme seviyesi 100-200 mvolt, sayıcı zaman dilimi 125 msn ve bilgisayarda görüntülenme zamanı: 2 sn olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 5. 2. AE sisteminin şematik gösterimi (Tuncay, 2006'dan alınmıştır).

45 örnekte yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı – AE deneyinden elde edilen birim deformasyona karşılık gerilme ve AE aktivitesi değişimi grafikleri Ek-3'de verilmiştir. 2 no'lu ignimbiritten alınan ve 800 °C sıcaklığa maruz bırakılmış karot örneğindeki grafik ve çatlak ilerleme aşamalarının (σ_{ci1} , σ_{ci2} , σ_{cs}) belirlenmesi Şekil 5. 3'te örnek olarak gösterilmiştir. Çizelge 5. 3'te ise, tüm AE deneylerinde belirlenen çatlak ilerleme aşamaları eşik gerilme değerleri örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımlarıyla birlikte sunulmuştur. Bazı deneylerde yer yer arka plan gürültüsünün yükselmesi nedeniyle ideal Birim deformasyon – AE grafikleri elde edilememiştir. Bu nedenle, ikincil çatlak ilerlemesi eşik gerilme seviyesinin net olarak belirlenmesi mümkün olmamıştır. Bununla birlikte, uzun süreli stabilite yönünden alt ve özellikle üst sınır gerilme değerlerinin belirlenmesinin önemli olduğu düşünülerek, Çizelge 5.3'te sadece bu değerler (σ_{ci1} ve σ_{cs}) ve bunların belirlendiği örneklerin doruk dayanımlarına (UCS) oranları verilmiştir. Deneylerin birer örnekte yapılması nedeniyle, bu eşik seviyelerin ısıya maruz bırakılmamış örnekte belirlenenlere kıyasla değişimi yerine oransal (σ_{ci1}/UCS ve σ_{cs}/UCS) değerlendirmeye gidilmesi tercih edilmiştir.

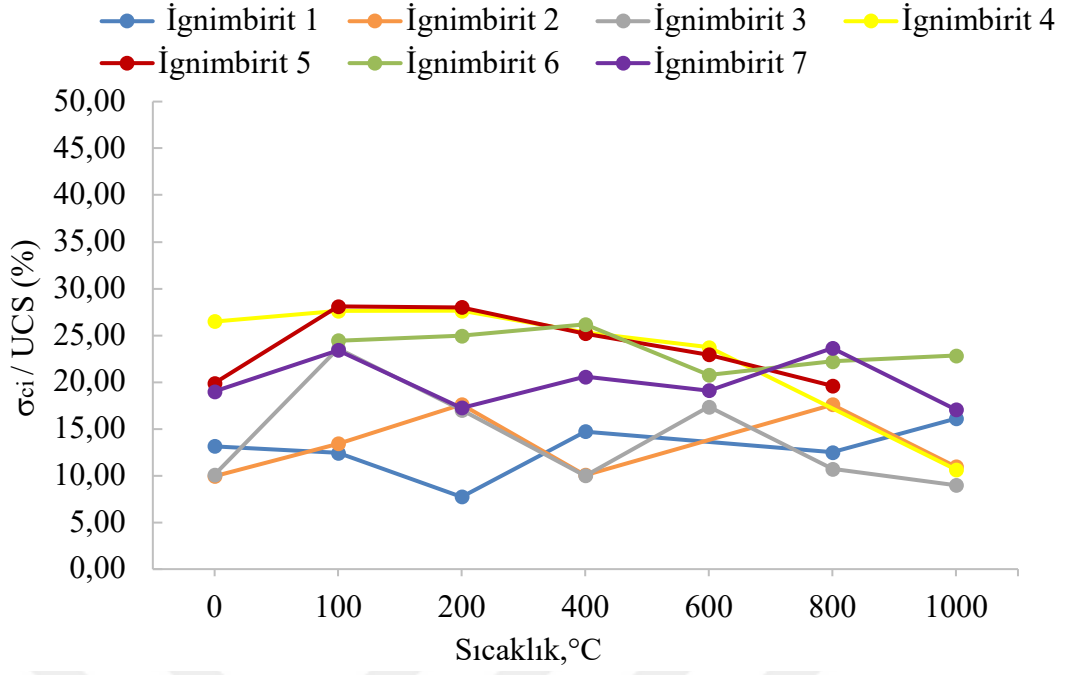


Şekil 5. 3. Birim deformasyona karşılık gerilme ve AE aktivitesindeki değişime tipik bir örnek.

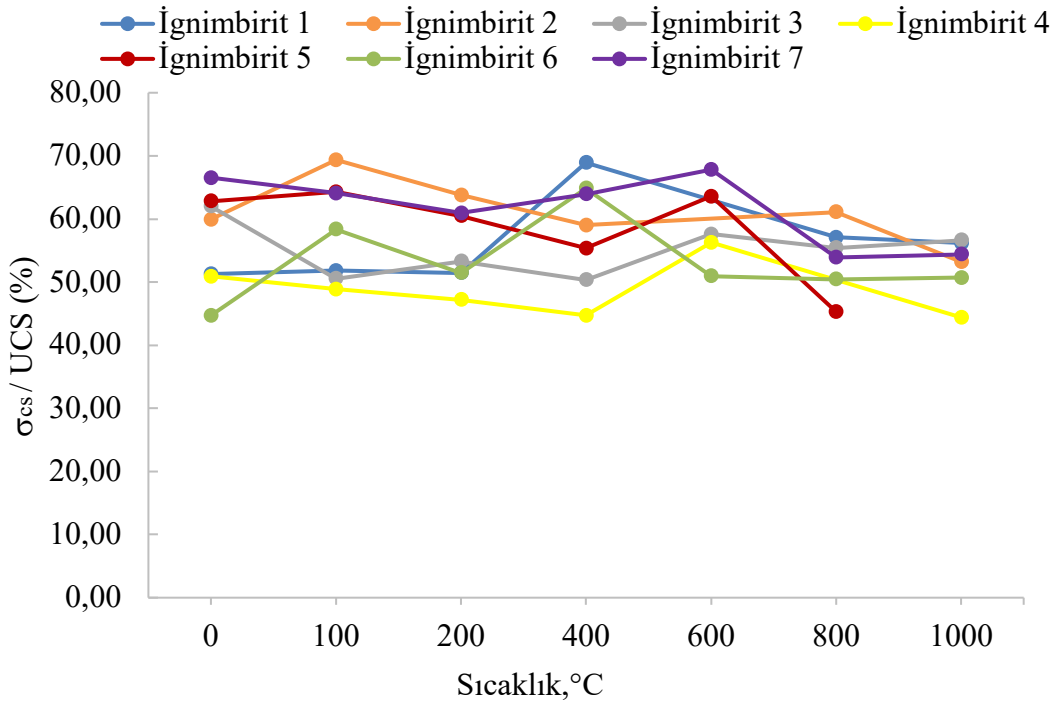
Şekil 5. 4 ve Şekil 5. 5'te sırasıyla ilksel çatlak başlangıcı ile çatlak birleşimi eşik gerilme seviyelerinin UCS değerlerine oranları ile sıcaklık arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında, yedi örnek için ilksel çatlak başlangıcı gerilme seviyelerinin UCS değerlerinin %10'u ile %25'i (yaklaşık ortalama % 18) arasında değiştiği görülmektedir (bkz. Şekil 5.4). Örnek bazında bakıldığında ise, sıcaklığa bağlı olarak net bir oransal değişimden bahsetmek mümkün değildir. Bu nedenle, ignimbritlerin UCS değerlerinin sıcaklıkla değişimiyle benzer bir davranışın ilksel çatlak başlangıcı gerilme seviyeleri için de geçerli olduğu söylenebilir. Çatlak birleşimi gerilme seviyelerinin UCS'ye oranlarının sıcaklıkla değişimini gösteren Şekil 5.5 incelendiğinde, bu oranın genel olarak %45 ile %65 arasında (yaklaşık ortalama % 55) değiştiği görülmektedir. Örnek bazında bakıldığında ise, UCS'nin sıcaklıkla değişimine paralel olarak çatlak birleşimi gerilme seviyelerinin değiştiğini söylemek mümkündür. İgnimbrit yapı malzemelerinin nispeten uzun süreli duraylılığı için bir değerlendirme yapıldığında, farklı sıcaklıklardaki UCS değerlerinin yaklaşık yarısı kadarlık gerilme değerlerinin kritik olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 5. 3. Sıcaklığa bağlı olarak ilksel çatlak gelişimi ve çatlak birleşmesi eşik gerilme değerleri (σ_{ci1} ve σ_{cs}) ve bunların deneylerde belirlenen UCS değerlerine oranları.

Örnek No	Sıcaklık (°C)	UCS (MPa)	σ_{ci1} (MPa)	σ_{ci1}/UCS (%)	σ_{cs} (MPa)	σ_{cs}/UCS (%)
1.35	0	2.36	0.31	13.14	1.21	51.27
1.10	100	1.93	0.24	12.44	1.00	51.81
1.15	200	3.11	0.24	7.72	1.60	51.47
1.20	400	2.18	0.32	14.70	1.50	68.91
1.33	800	2.64	0.33	12.48	1.51	57.11
1.39	1000	2.67	0.43	16.10	1.50	56.18
2.3	0	3.22	0.32	9.94	1.93	59.94
2.10	100	3.43	0.46	13.41	2.38	69.36
2.8	200	3.92	0.69	17.60	2.50	63.78
2.18	400	2.88	0.29	10.07	1.70	59.03
2.21	800	4.09	0.72	17.59	2.50	61.08
2.30	1000	5.56	0.61	10.97	2.96	53.21
3.5	0	4.36	0.44	10.10	2.70	61.99
3.14	100	5.94	1.40	23.58	3.00	50.53
3.10	200	5.23	0.89	17.00	2.79	53.30
3.21	400	5.01	0.50	9.99	2.52	50.33
3.26	600	11.53	2.00	17.35	6.64	57.61
3.32	800	6.16	0.66	10.72	3.41	55.39
3.40	1000	7.03	0.63	8.96	3.98	56.63
4.5	0	4.72	1.25	26.51	2.40	50.89
4.10	100	5.36	1.48	27.62	2.62	48.89
4.15	200	4.49	1.24	27.62	2.12	47.22
4.20	400	6.71	1.70	25.34	3.00	44.71
4.24	600	8.05	1.91	23.73	4.53	56.27
4.35	1000	5.36	0.57	10.63	2.38	44.40
5.5	0	8.45	1.68	19.88	5.31	62.82
5.15	100	7.15	2.01	28.10	4.60	64.30
5.10	200	7.14	2.00	28.01	4.32	60.50
5.23	400	8.09	2.04	25.21	4.48	55.36
5.28	600	14.25	3.27	22.94	9.06	63.57
5.36	800	8.83	1.73	19.59	4.00	45.30
6.5	0	4.83	-	-	2.16	44.71
6.12	100	5.81	1.42	24.43	3.39	58.33
6.10	200	5.05	1.26	24.95	2.60	51.48
6.18	400	4.89	1.28	26.18	3.17	64.83
6.26	600	7.85	1.63	20.76	4.00	50.96
6.32	800	7.47	1.66	22.21	3.77	50.45
6.37	1000	9.33	2.13	22.84	4.73	50.72
7.5	0	10.52	2.00	19.01	7.00	66.54
7.15	100	12.55	2.94	23.43	8.04	64.06
7.10	200	10.32	1.78	17.25	6.29	60.95
7.19	400	10.89	2.24	20.58	6.96	63.94
7.24	600	14.39	2.75	19.11	9.76	67.82
7.30	800	8.59	2.03	23.63	4.63	53.90
7.34	1000	5.52	0.94	17.04	3.00	54.39



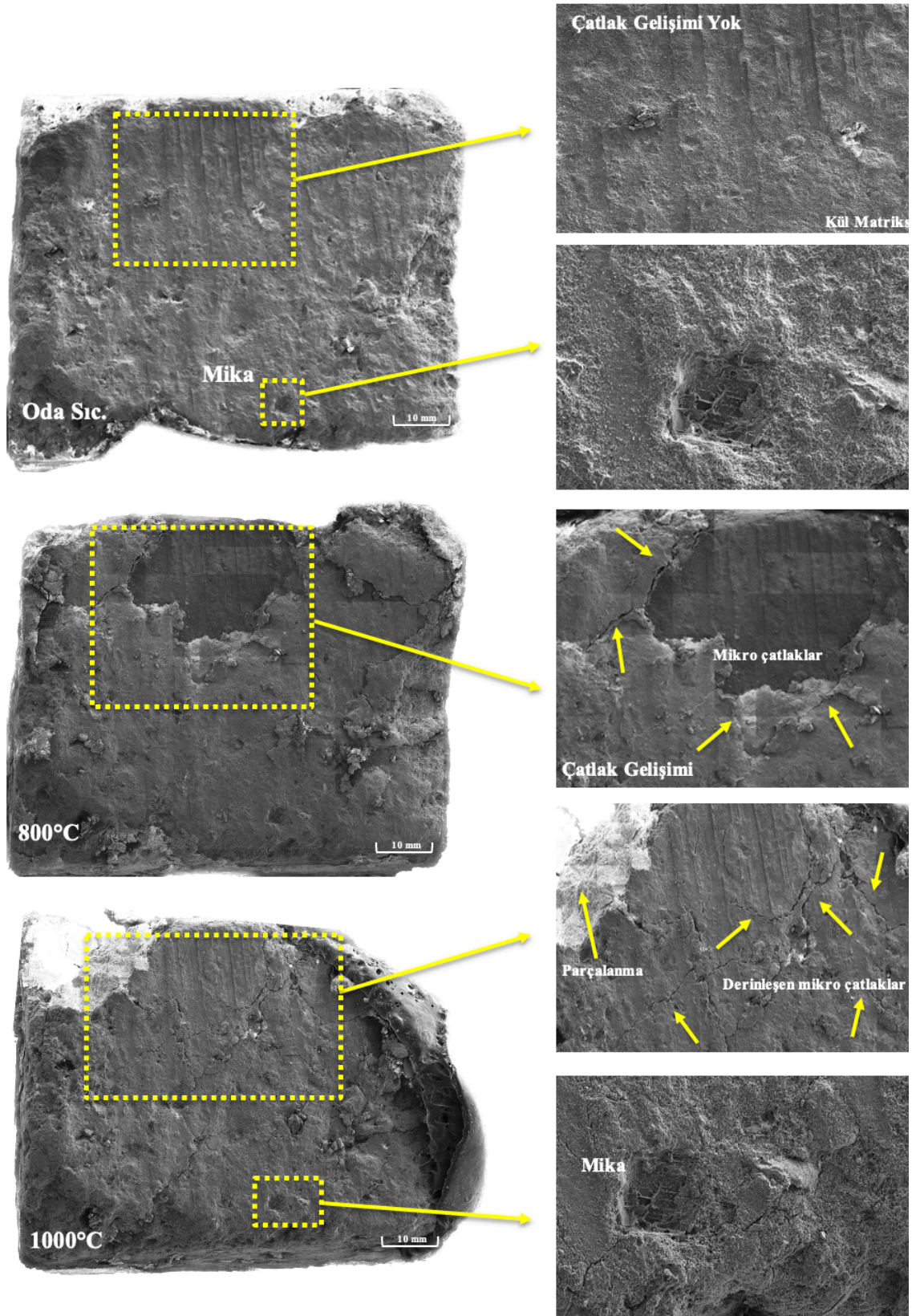
Şekil 5. 4. İlkse çatlak gelişimi eşik gerilme değeri UCS'ye oranlarının (σ_{ci} / UCS) sıcaklıkla değişimi.



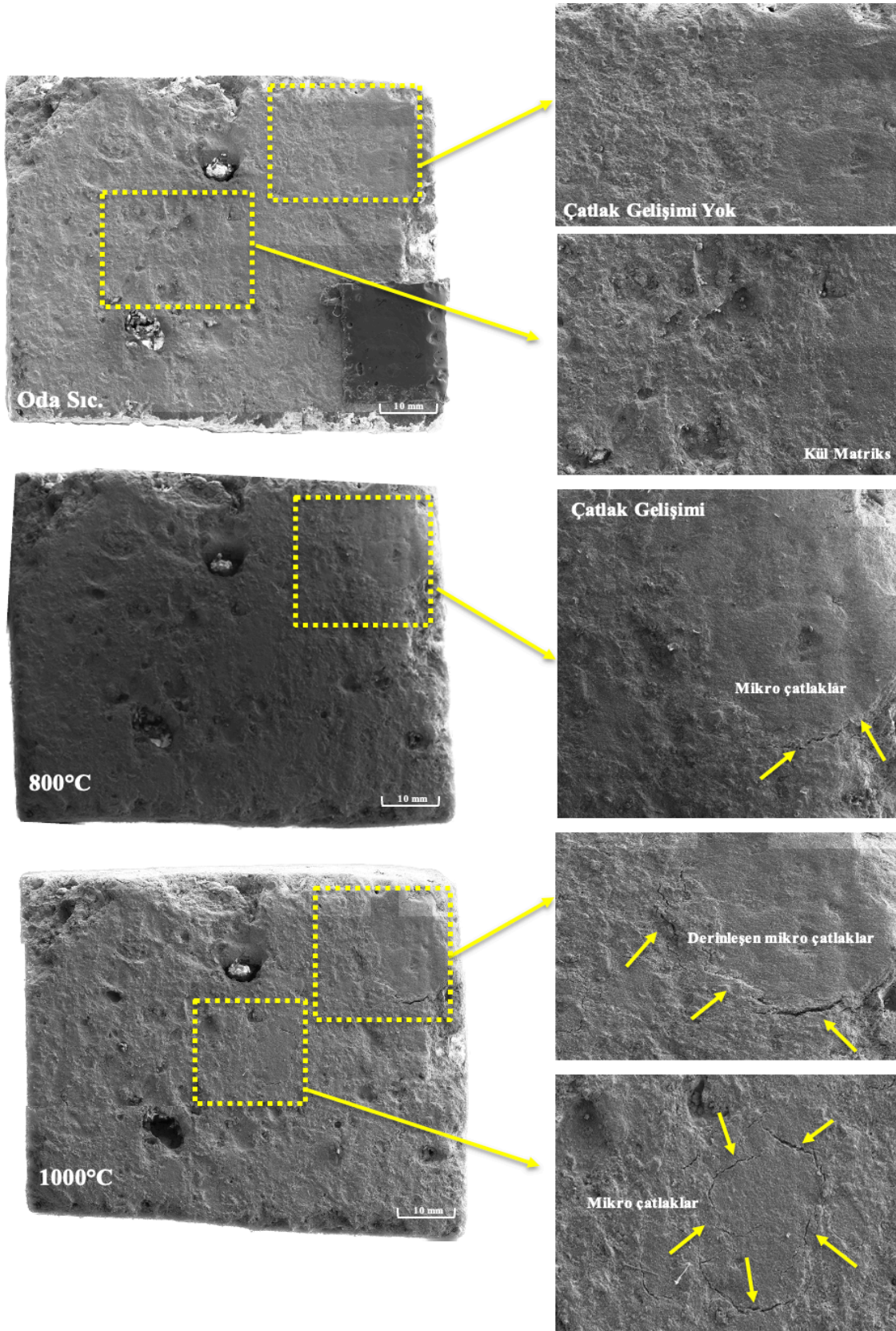
Şekil 5. 5. Çatlak birleşimi eşik gerilme değeri UCS'ye oranlarının (σ_{cs} / UCS) sıcaklıkla değişimi.

6. SICAKLIĞIN İGNİMBİRİT ÖRNEKLERİNDEKİ ETKİSİNİN ELEKTRON MİKROSKOBU İLE İNCELENMESİ

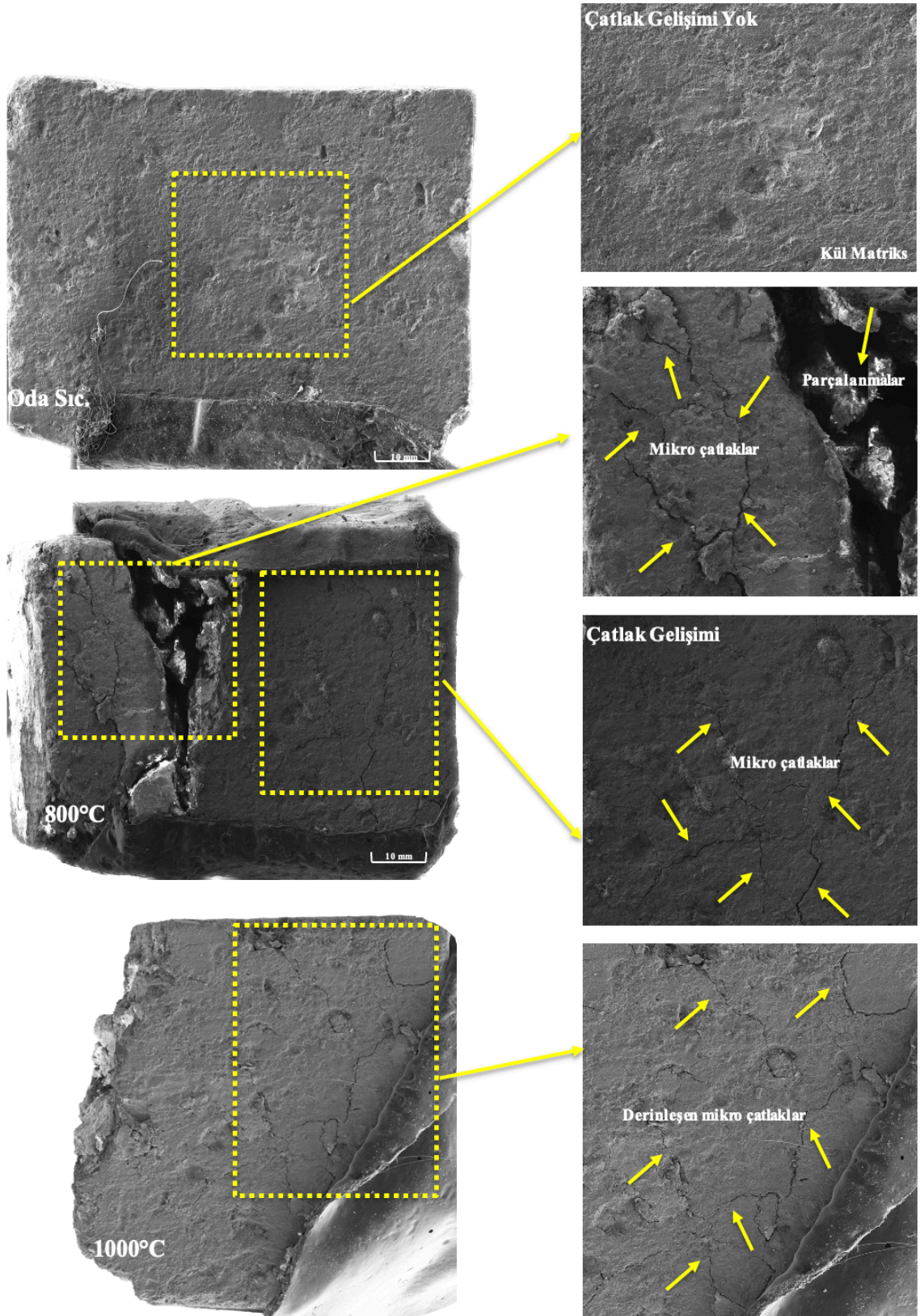
Farklı sıcaklıklarda örneklerin mineralojik değişimini ve çatlak gelişimini görmek amacıyla, Hacettepe Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (HÜNİTEK) Tescan GAIA3 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak seçilen 3 grup örnek için analizler yapılmıştır. Analizler sırasındaki çalışma koşulları; örnekler öncesinde yaklaşık 5 nm karbon buharıyla kaplanmış olup, ivmelendirici gerilim 15 kV, demet akımı 150 pA ve çalışma mesafesi 15 mm şeklindedir. Yaklaşık her bir numune için 100 ila 150 münferit görüntü alınıp, panoramik görüntüleri oluşturulmuştur. Seçilen örnekler (İgnimbirit 2, 3 ve 7), 1 cm x 1 cm boyutlarında küp şeklinde hazırlanmış olup, 800°C ve 1000°C sıcaklıklarda fırında ısıtılmıştır. Oda sıcaklığındaki örnekler ile birlikte, toplam üç sıcaklık için değerlendirmeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, oda sıcaklığındaki her üç örnek içinde mineralojik bileşimlerinde gözlenen kristaller ve kayaç içeriğinin büyük bir kısmını kaplayan volkan camı/ kül matriks net bir şekilde görülmüştür. İgnimbirit 2 için 800°C'de yavaş yavaş kül matriksinde ayrılmalar başlamış olup mikro çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Fakat oda sıcaklığındaki örnekte gözlenen mineraller bu sıcaklıktan etkilenmemiştir. 1000°C'de oluşan çatlaklar derinleşmesine rağmen mineral sınırlarında değişim olmamıştır. Kül matriks yüksek ısı nedeniyle belli bölgelerde pekişmeye başladığı görülmüştür. 800°C'de iri küller görülürken 1000°C'de bu küller kabuk şeklinde oluşumlara dönüşmüştür (Şekil 6. 1). İgnimbirit 3 için 800°C'de termal çatlaklar gelişmeye başlamış olup ısıya maruz kalmamış örnekte gözlenen sınırlar net bir şekil gözlenememiştir. 1000°C'de ise mevcut çatlaklar genişlemeye başlamış olup kül matriksinde sınırlar kaybolmaya başlamıştır. Bu sıcaklıkta kül matriksin ergimesi ve kaynaklanmaya başladığı söylenebilir (Şekil 6. 2). İgnimbirit 7 örneğinde ise sıcaklığa maruz kalmamış örnekte iri kristaller ve kül matriksi gözlenirken, 800°C'de kül matriksin sınırları kaybolmaya ve termal çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Bu sıcaklıkta örnekte meydana gelen deformasyonlar gözlenmiş ve örneğin bir kısmı bu sıcaklıkta parçalanmıştır. 1000°C'de çatlaklar büyümüş, ancak kül matriksin tane boyunun incelendiği ve kaynaklanma özelliği gösterdiği dikkati çekmiştir. Mineraller bu sıcaklıkta düzgün sınırlarını korumuştur (Şekil 6. 3).



Şekil 6. 1. İgnimbirit 2 örneği için oda sıcaklığı, 800 ve 1000°C’lerde çekilen SEM görüntüleri.



Şekil 6. 2. İgnimbirit 3 örneği için oda sıcaklığı, 800 ve 1000°C’lerde çekilen SEM görüntüleri.



Şekil 6. 3. İğnimbirit 7 örneği için oda sıcaklığı, 800 ve 1000°C’lerde çekilen SEM görüntüleri.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, ısı etkiye tabi tutulmuş ignimbirit örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin çeşitli sıcaklık koşullarında nasıl değiştiği araştırılmış ve aşağıda ana bulgular özetlenmiştir.

1. Mineralojik değerlendirmeler sonucunda, ignimbirit örneklerinin mineralojik bileşimlerinin plajiolaz, kuvars, biyotit, killeşmiş feldispatlar, kayaç parçaları ve yaklaşık %60-70 oranında kül matriksi/volkan camından oluştuğu tespit edilmiştir. XRD analizleri neticesinde, örneklerde yüksek oranda kaolinit bulunduğu gözlemlenmiş olup, bu minerallerin yanı sıra, bazı örneklerde simektit ve illit gibi diğer kil mineralleri de gözlenmiştir. Ancak, kaolinitin oranı diğer kil minerallerine kıyasla belirgin şekilde daha yüksektir.
2. Sıcaklık artışıyla renk değişimleri belirginleşmiştir. 400°C'de renk koyulaşırken, 1000°C'de koyu pembe ve morumsu tonlar gözlenmiştir. Bu değişimler, minerallerin yüksek sıcaklıklarda kimyasal reaksiyonlarla dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Kuvars içeriği yüksek örneklerde renk değişiminin daha az belirgin olduğu görülmüştür.
3. Sıcaklık artışının ignimbiritlerin birim hacim ağırlığını azalttığı tespit edilmiştir. Bu azalma, mineral yapılarında sıcaklığa bağlı bozulmaları işaret etmektedir. Bulgular, ignimbiritlerin termal etkiler altında fiziksel özelliklerinin değiştiğini göstermektedir.
4. Sıcaklık arttıkça özgül ağırlık değerlerinde genel olarak bir azalma ve boşluk oranında bir artış gözlenmiştir. Özgül ağırlık, yüksek sıcaklıklarda sinterleme ve erime süreçleri nedeniyle düşerken, boşluk oranı bu süreçler nedeniyle artış göstermiştir. İgnimbirit örneklerinin farklı sıcaklık koşullarında mineralojik değişimlerin etkisiyle özgül ağırlık ve boşluk oranlarında meydana gelen değişimler, malzemelerin termal duraylılığını etkilemiştir. Boşluk oranındaki artışlar, uzun süreli düşünüldüğünde sıcaklığa maruz kalan ignimbiritlerin bozunmaya karşı daha hassas olabileceğini düşündürmektedir.
5. P-dalgası hız ölçümleri, sıcaklık artışıyla birlikte ignimbirit örneklerinde belirgin bir azalma olduğunu göstermiştir. Özellikle 800°C ve üzerindeki sıcaklıklarda, P-dalgası hızında önemli düşüşler gözlenmiş olup bu duruma malzemenin

gözenekliliğinde ve çatlak oluşumunda artışa işaret etmektedir. Bu sıcaklık, malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkileyen kritik bir eşik olarak değerlendirilmektedir.

6. Farklı sıcaklıklarda test edilen ignimbirit örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımları üzerinde yapılan analizler, genel olarak sıcaklığın malzeme dayanımını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Özellikle 600°C'ye kadar dayanımda artışlar gözlenirken, 800°C'de birçok örnekte 600°C'deki değerlere nazaran dayanım düşüşü gözlenirken, 1000°C'de dayanım genellikle artış göstermiştir. Bu bulgular, kaolinin termal dönüşümünün ignimbiritlerin dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini anlamada önemli bir rol oynamaktadır. 600°C'de kaolinin metakaoline dönüşümü, kayaçların mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşmeye neden olurken, 1000°C'deki artışın daha da belirginleşmesi, metakaolinin yeniden kristallenmesinden kaynaklanabilir.
7. 600°C'de elastisite modülünde bir artış gözlenmiş olup, bu durum malzemenin bu sıcaklık aralığında daha rijit hale geldiğini göstermektedir. Ancak, 800°C'de elastisite modülünde bir düşüş yaşanmış, bu durum malzemenin termal zayıflaması ve artan gözenekliliğin etkisiyle ilişkilendirilmiştir. 1000°C'de ise elastisite modülü yeniden artmıştır, bu da yüksek sıcaklıklarda malzemenin yapısal stabilitesinin sağlandığı ve sinterlenmenin etkisi olarak değerlendirilmiştir.
8. NPI değerlerinin sıcaklık arttıkça artış göstermesi, örneklerin daha gevrek hale geldiğini göstermiştir. Bu durum, ignimbiritlerin sıcaklık değişimlerine verdiği tepkiyi ve yapısal değişimlerin etkilerini ortaya koyabilir.
9. Çekilme dayanımları genellikle artışlar göstermiş, ancak sıcaklık arttıkça bu değerler bazı örneklerde düşüş göstermiştir. Özellikle 400°C'de dayanımda önemli artışlar olurken, yüksek sıcaklıklarda ise değişkenlikler ve düşüşler yaşanmıştır. Bu bulgular, örneklerin mineral içeriği ve sıcaklık etkileriyle ilişkilidir, ancak sınırlı örnek sayısı nedeniyle genel geçerlilikleri dikkatle değerlendirilmelidir.
10. Akustik Emisyon tekniğinden yararlanılarak belirlenen ilksel çatlak başlangıcı ve çatlak birleşimi eşik gerilme seviyelerinin sıcaklıkla değişiminin UCS değerlerinin değişimine paralel ve bu seviyelerin sırasıyla UCS değerlerinin yaklaşık %18'i ve %55'si civarında olduğu tespit edilmiştir.

Uzun süreli duraylılık açısından bir değerlendirme yapıldığında, farklı sıcaklıklardaki UCS değerlerinin yaklaşık yarısı kadarlık gerilme değerlerinin kritik olduğu anlaşılmaktadır.

11. Farklı sıcaklıklarda yapılan SEM analizleri, İgnimbirit örneklerinin mineralojik bileşim ve çatlak gelişimindeki değişimleri ortaya koymuştur. 0°C'de volkan camı ve kül matriksi belirgin iken, 800°C ve 1000°C'de çatlaklar derinleşmiş ve kül matriksi değişime uğramıştır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda, kül matriksi yer yer pekişmiş veya kabuk şeklinde oluşumlar göstermiştir.

İgnimbiritlerin yapı malzemesi olarak kullanımı, yüksek sıcaklıklara karşı genel olarak dayanıklılık gösterse de bazı riskler barındırdığı düşünülmektedir. 1000°C'ye kadar dayanımlarını koruyabilmeleri, bu malzemeleri yangın senaryolarında avantajlı kılabilir. Ancak, sıcaklıkla birlikte gözlenen dayanım dalgalanmaları ve gözenek artışı, malzemenin bozunmaya karşı daha hassas olabileceğini düşündürmektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular göz önüne alındığında, gelecekte yapılacak benzer araştırmalar için aşağıdaki hususların dikkate alınması önerilmektedir.

1. Yüksek sıcaklıkların ignimbiritlerin mikro-yapısal özellikleri üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmelidir. Bu, özellikle sinterlenme, yeniden kristallenme ve gözenek oranındaki değişikliklerin malzemenin mekanik dayanımı üzerindeki etkilerini anlamaya yardımcı olacaktır.
2. Yüksek sıcaklıkta, özellikle 600°C ve 1000°C gibi kritik sıcaklıklarda, ignimbiritlerin mineral yapısındaki değişiklikleri incelemek için XRD analizi yapılmalıdır. Özellikle kaolinin metakaoline ve metakaolinin mullit fazına dönüşümü gibi kritik mineral faz değişimlerinin bu analizle detaylandırılması önemlidir.
3. Kapadokya bölgesi dışındaki ocaklardan alınacak ignimbirit örneklerinin mineral içeriklerinin analiz edilmesi önerilmektedir. Bu tezde, yalnızca tek bir ocaktan alınan ve farklı dönemlerde oluşmuş ignimbiritler değerlendirilmiştir. Mineral içeriğindeki değişikliklerin ignimbiritlerin performansını nasıl etkilediğini belirlemek için daha geniş bir örnekleme yapılması önem taşımaktadır.

4. Sıcaklık aralıklarında yaşanan dayanım dalgalanmalarının nedenlerini anlamak için daha kapsamlı deneyler yapılmalıdır. Özellikle, 600°C, 800°C ile 1000°C arasında daha sık aralıklarla yapılan deneyler, malzemenin bu sıcaklıklardaki davranışını netleştirebilir. Bu dalgalanmaların yapı güvenliği üzerindeki potansiyel etkileri daha fazla araştırılmalı ve mühendislik uygulamaları için uygun değerlendirme kriterleri geliştirilmelidir.
5. Ignimbiritlerin uzun vadeli performansı ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığı üzerine daha fazla araştırma yapılmalıdır. Özellikle, malzemenin atmosferik koşullara (nem, asidik yağmurlar, donma-çözülme döngüleri) ve yangın sonrası kimyasal değişimlere karşı nasıl tepki verdiği incelenebilir. Bu çalışmalarda kullanılan sıcaklık deneyleri genellikle sabit laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Gelecekte, bu deneylerin farklı nem oranları, basınçlar ve gaz atmosferleri altında yapılması, gerçek dünya koşullarını daha iyi simüle edebilir.
6. Termal şok, malzemenin aniden yüksek sıcaklıklara maruz kalması ve ardından hızlı bir şekilde soğuması sonucunda oluşan gerilme ve çatlama ile ilişkilidir. Bu etkiler, malzemenin yapısal bütünlüğünü zayıflatabilir ve dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir. Yangın koşullarında ignimbirit gibi malzemelerin bu tür termal şoklara karşı nasıl performans gösterdiğini anlamak için, bu tür durumları simüle eden deneyler yapılması önerilir. Özellikle 1000°C'ye kadar yapılan deneylerin ötesinde, 1200°C'ye kadar termal şok deneyleri gerçekleştirilerek malzemenin aşırı sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığı değerlendirilebilir. Bu deneyler, malzemenin yangın senaryolarında nasıl davrandığına dair daha kapsamlı bilgiler sağlayarak yapıların güvenliğine yönelik önemli katkılar sunabilir.

8. KAYNAKLAR

- Allison, R. J. A non-destructive method of determining rock strength, *Earth Surface Processes and Landforms*; 13, 729- 736 pp, **1988**.
- Allison, R. J., and Bristow, G. E. The effects of fire on rock weathering: some further considerations of laboratory experimental simulation; *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 24, Issue 8 , 707 – 713 pp, **1999**.
- Altuğ, M. Sıcaklığın Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Kayaçlar Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Niğde, **2012**.
- ASTM. Inorganic index to the powder diffraction file. Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Philadelphia, **1972**.
- Atarlar, C., Ersoy, H., Karahan, M., Sünnetci, M.O. Yüksek Sıcaklıklara Maruz Kalan Kalkarenitlerin Fiziksel ve Dayanım Özelliklerindeki Değişimin Araştırılması. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 45, 29-40, **2020**.
- Aydar, E. et al. Correlation of ignimbrites in the central Anatolian volcanic province using zircon and plagioclase ages and zircon compositions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213-214, **2012**.
- Balek, V., Murat, M. The emanation thermal analysis of kaolinite clay minerals. *Thermochim Acta*, 282(283), 385–97, **1986**.
- Bieniawski, Z.T. Mechanism of brittle fracture of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 4(4), 395-430, **1967**.
- 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.*, 167, 117–127, **2013**.
- Cobîrzan, N., Thalmaier, G., Balog, A.-A., Constantinescu, H., Ceclan, A., and Nasui, M. Volcanic Tuff as Secondary Raw Material in the Production of Clay Bricks, *Materials*, 14, 6872, **2021**.

- David, C., Menéndez, B., Darot, M. Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36 (4), 433–448, **1999**.
- Diederichs, M.S., Kaiser, P.K., Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 41(5), 785-812, **2004**.
- Dimitriyev, A. P., Kusyayev, L. S., Protasov, Y. I., and Yamschichikov, V. S. *Physical Properties of Rocks at High Temperature*, Moskva, Nedra, **1969**.
- Doleželová, M., Scheinherrová, L., Krejsová, J., Vimmrov, A. Effect of high temperatures on gypsum-based composites. *Construction and Building Materials*, 168, 82-90, **2018**.
- Duclos, R., Paquet, J. High-temperature behaviour of basalts – role of temperature and strain rate on compressive strength and K_{Ic} toughness of partially glassy basalts at atmospheric pressure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts* 28, 71–76, **1991**.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., Read, R.S. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 222-233. **1998**
- Eberhardt, E., Stimpson, B., Stead, D. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(2), 81-99, **1999**.
- Fredrich, J.T., Wong, T. F. Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 91 (B12), 12743–12764, **1986**.
- 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**.
- Ghassemi, A. A Review of Some Rock Mechanics Issues in Geothermal Reservoir Development. *Geotech. Geol. Eng.*, 30, 647–664, **2012**.

- Gündoğdu, M. N. Neojen yaşlı Bigadiç sedimanter baseninin jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Enstitüsü, Ankara, **1982** (yayımlanmamış).
- Gibb, S.E. High-temperature, very deep geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste? *Waste Management* 19, 207–211, **1999**.
- Hajpál, M. Changes in sandstones of historical monuments exposed to fire or high temperature. *Fire Technol.*, vol. 38, no. 4, pp. 373–382, **2002**.
- Hajpál, M and Török, Á. Petrophysical and mineralogical studies of burnt sandstones. 2nd International Ph.D. Symposium in Civil Engineering, **1998**.
- 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**.
- Heap, M. J., Baud, P., Meredith, P. G., Vinciguerra, S., and Reuschlé, T. The permeability and elastic moduli of tuff from Campi Flegrei, Italy: implications for ground deformation modelling, *Solid Earth*, 5, 25–44, 2014.
- Heap, M.J., Kushnir, A.R.L., Griffiths, L., Wadsworth, F.B., Marmoni, G.M., Fiorucci, M., Martino, S., Baud, P., Gilg, H.A., Reuschlé, T. Fire resistance of the Mt. Epomeo Green Tuff, a widely-used building stone on Ischia Island (Italy). *Volcanica*, 1 (1), pp.33 – 48, **2018**.
- Heap, M.J., Lavallée, Y., Laumann, A., Hess, K.U., Meredith, P.G. And Dingwell, D.B. How tough is tuff in the event of fire? *Geology*, 40 (4), 311–314, **2012**.
- Jones, D.A., Lelyveld, T., Mavrofidis, S., Kingman, S., Miles, N. Microwave heating applications in environmental engineering—a review. *Resour. Conserv. Recycl.* 34 (2), 75–90, **2002**.
- ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods for 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**.
- İBB, 2024. İstanbul Büyükşehir Belediyesi İtfaiye Daire Başkanlığı Yangın ve Kazalarla Mücadele Eğitim Kitabı. https://itfaiye.ibb.gov.tr/img/111657432020_7851983905.pdf, (Erişim tarihi: **15 Mart 2024**)

- Innocenti, F., Mazzuoli, R., Pasquarè, G., Radicati Di Brozolo, F. and Villari, L. The Neogene calcalkaline volcanism of Central Anatolia: geochronological data on Kayseri—Nigde area, *Geological Magazine*, 112 (1975) 349.
- Ilic, B.R., Mitrovic, A.A., Milicic, L.R. Thermal Treatment of Kaolin Clay to Obtain Metakaolin. *Hemijska Industrija*, 64, 351-356, **2010**.
- Keshavarz, M., Pellet, F. L., and Loret, 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**.
- Kieslinger, A. Principle factors in weathering of natural building stones, *Conference On the Weathering of Stones, ICOMOS, Paris*, **1968**.
- Karapınar, D. Isıl Etkiye Maruz Kalmış Granit ve Mermer Örneklerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Değişiminin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, 93s, **2017**.
- Korkanç, M. İgnimbiritlerin Jeomekanik Özelliklerinin Yapı Taşı Olarak Kullanımına Etkisi: Nevşehir Taşı. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 31 (1), **2007**.
- Li, Y.H., Lu, G.M., Feng, X.T., Zhang, X.W. The influence of heating path on the effect of hard rock fragmentation using microwave assisted method. *Chinese J. Rock Mech. Eng.* 36 (6), 1460–1468, **2017**.
- Li, L.C., Tang, C.A., Wang, S.Y., Yu, J. A coupled thermo-hydrologic-mechanical damage model and associated application in a stability analysis on a rock pillar. *Tunn. Undergr. Space Technol*, 34, 38–53, **2013**.
- 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**.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. 1 / 500 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Kayseri K0635 Paftası, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, **2002**.
- Mao, X.-b, Zhang, L.-y, Li, T.-z, Liu, H.-s. Properties of failure mode and thermal damage for limestone at high temperature. *Mining Science and Technology* 19, 290–294, **2009**.

- 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**.
- Martin, C.D., Chandler, N.A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, 31(6), 643-659, **1994**.
- Nevşehir Kent Haber, <https://www.nevsehirkenthaber.com/haberleri/yangin> (Erişim tarihi: **15 Mart 2024**).
- Martin, C.D., Chandler, N.A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, 31(6), 643-659, **1994**.
- Ohnaka, M., Mogi, K. Frequency characteristics of acoustic emissions in rock under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure. *Journal of Geophysical Research*, 87 (B5), 3873-3884, **1982**.
- Pasquare, G. Geology of the Senozoic Volkanic Area of Central Anatolia. *Atti della Accad Naz Lincei, Roma*, 9 pp, 55-204, **1968**.
- Pasquarè, G., Poli, S., Vezzoli, L. and Zanchi, A. Continental arc volcanism and tectonic setting in Central Anatolia, Turkey, *Tectonophysics*, 146 pp, 217-230, **1988**.
- Ranjith, P. G., Viete, 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**.
- Rao, Q.-h, Wang, Z., Xie, H.-f, Xie, Q. Experimental study of properties of sandstone at high temperature. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)* 14 (s1), 478–483, **2007**.
- Rutqvist, J. The geomechanics of CO₂ storage in deep sedimentary formations. *Geotech. Geol. Eng.*, 30, 525–551, **2012**.
- Saiang, C. M. Influence of heat on the physical and mechanical properties of selected rock types, pp. 15–22, **2011**.

- 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**.
- Sengun, N. Influence of thermal damage on the physical and mechanical properties of carbonate rocks, *Arab J Geosci.*, pp. 5543–5551, **2014**.
- Sert, M., Özkahraman, H.T. The Importance of Welded Tuff Stones in Construction Industry According to Their Physico-Mechanical Properties. *Harran Üniversitesi Dergisi*, 01 p.8-18, **2016**.
- Şimşek, O. Nevşehir (Kavak) Yöresi Vişne Renkli İgnimbiritin Duvar Kaplamasında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 25(1) : 281-289, **2022**.
- Temel, A. Kapadokya Eksplozif Volkanizmasının Petrolojik ve Jeokimyasal Özellikleri, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 208s, **1992**.
- 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**.
- Tironi, A., Trezza, M.A., Scian, A.N., Irassar, E.F. Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 117, 547-556, **2014**.
- Toprak, M. U., and Arslanbaba, M. A. Possibility of using Kütahya Volcanic Tuff as building stone: Microstructural evaluation and strength enhancement through heat treatment, *Construction and Building Materials*, 110, 128–134, **2016**.
- Tuncay E. Akustik emisyon (yayılma) tekniğinin arazi gerilmelerinin belirlenmesinde uygulanabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, 206s, **2006**.
- Tuncay, E. Rock rupture phenomenon and pillar failure in tuffs in the Cappadocia region (Turkey). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 1253-1266, **2009**.

- Tuncay, E., Ulusay, R. Akustik Emisyon (Yayılma) (AE) tekniği: 1- AE'nin temel ilkeleri ve kaya mühendisliğindeki uygulama alanları. *Yerbilimleri*, 25, 65-82, **2002**.
- Ulusay, R. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Güncellenmiş ve Genişletilmiş 5. Baskı, 458 p, **2010**.
- Ulusay, R., Aydan Ö., Ergüler, Z.A., Ngan-Tillard, D.J.M., Seiki, T., Verwaal, W., Sasaki, Y., Sato, A. ISRM Suggested method for the needle penetration test, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 1073-1085, **2014**.
- Ünal, M., Berber, E., Yatağan, İ.ve Akkurt, S. Yüksek sıcaklığın yapı taşlarının dayanımı üzerineki etkisinin ultrasonik ölçümler ile kestirilmesi, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 1-2, **2007**.
- Xu, T., Yuan, Y., Heap, M.J., Zhou, G.-L., Perera, M.S.A., & Ranjith, P.G. Microwave-assisted damage and fracturing of hard rocks and its implications for effective mineral resources recovery. *Minerals Engineering*, 160, 106663, **2021**.
- Xu, X.L., Gao, F., Shen, X. M., Xie, H.P. Mechanical characteristics and microcosmic mechanisms of granite under temperature loads. *Journal of China University of Mining and Technology* 18, 413–417, **2008**.
- Yang, S. Q., Tian, W. L., Ranjith, P. G. Failure mechanical behavior of Australian Strathbogie granite at high temperatures: Insights from particle flow modeling. *Energies*, 10(6), 756, **2017**.
- Ye, G.L., Nishimura, T., and Zhang, F. Experimental study on shear and creep behaviour of green tuff at high temperatures, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 19–28, **2015**.
- Zhang, L.Y., Mao, X.B., Lu, A. H. Experimental study of on the mechanical properties of rocks at high temperature. *Science in China Series E-Technological Sciences* 52, 641–646, **2009**.
- 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**.

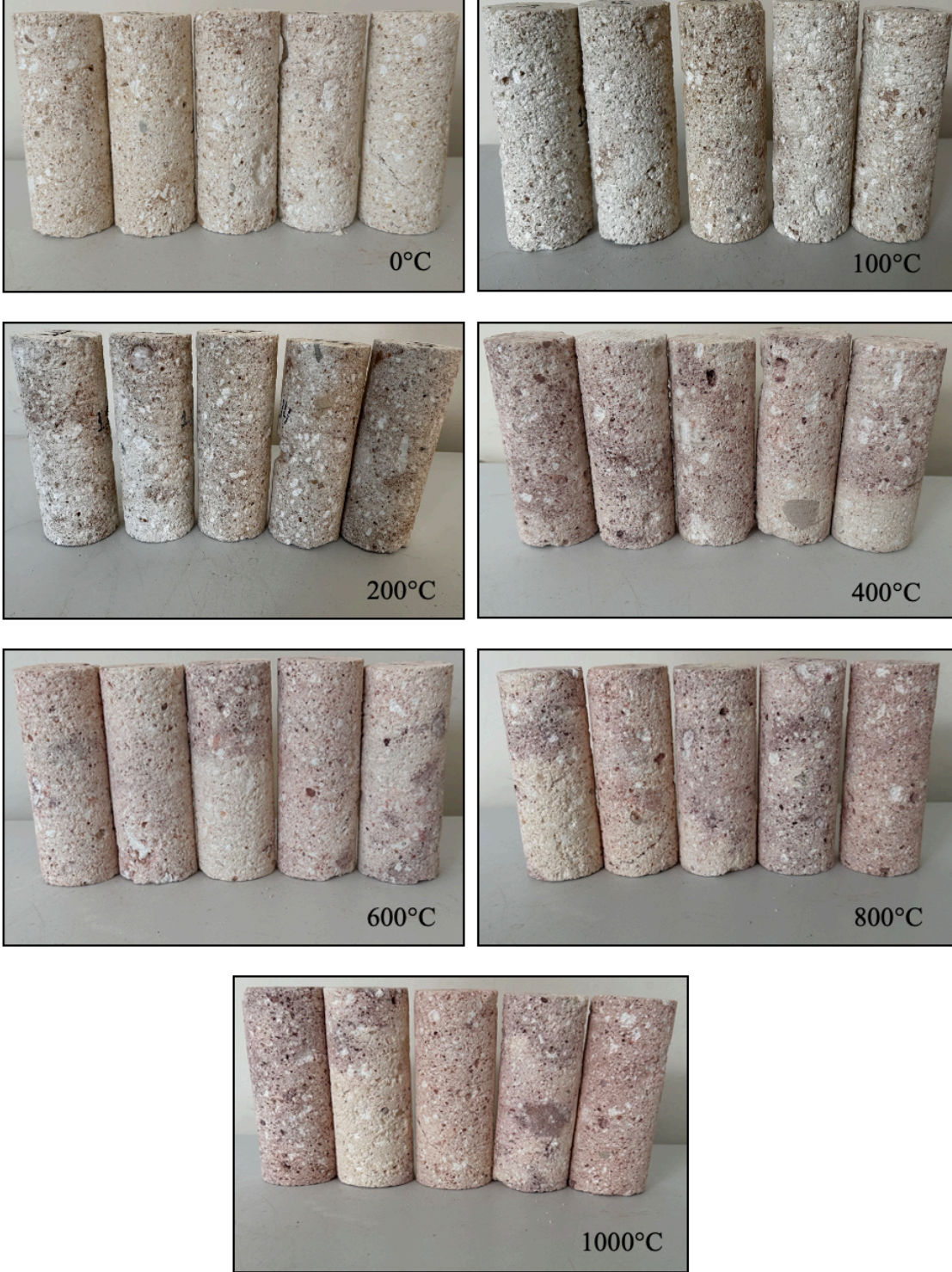
- Zhang, L., Liu, L., Jia, H., Zhi, S., Wang, T. Thermal-mechanical-damage coupling model for thermal spallation in rock. 11th Conference of Asian Rock Mechanics Society, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 861(2), **2021**.
- Zhang, W., Sun, Q., Hao, S., Wang, B. Experimental study on the thermal damage characteristics of limestone and underlying mechanism. Rock Mechanics and Rock Engineering, 49, 2999–3008, **2016**.
- Zheng, Y.L., Zhang, Q.B., Zhao, J. Effect of microwave treatment on thermal and ultrasonic properties of gabbro. Appl. Therm. Eng. 127, **2017**



EKLER

EK-1. Sıcaklığa Bağlı Olarak 7 Farklı İğnimbirit Örneğindeki Renk Değişimleri

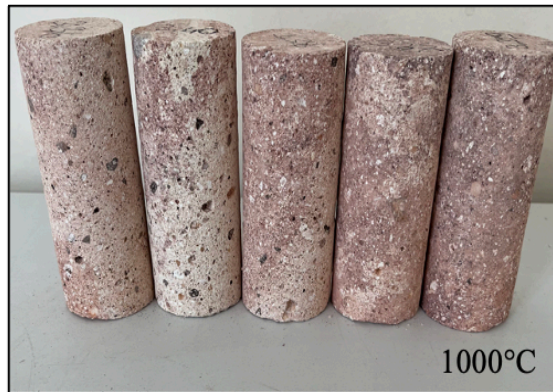
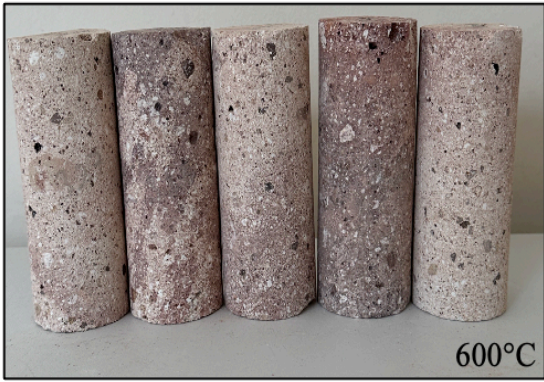
EK-1a: İğnimbirit 1 örneğine ait 0-1000°C arasındaki renk değişimini gösteren fotoğraflar.



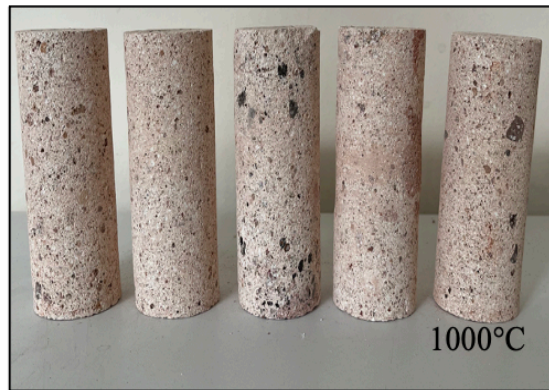
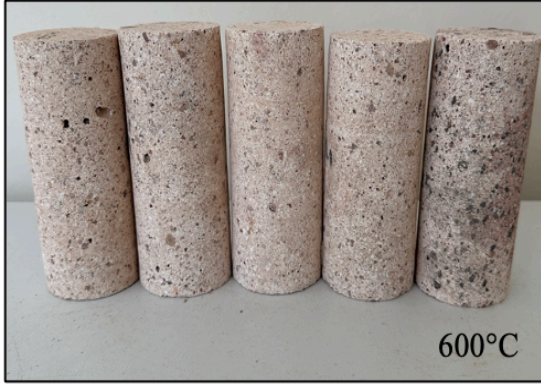
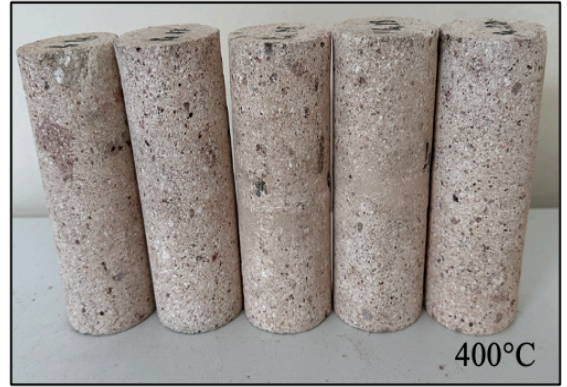
EK-1b: İgnimbirit 2 örneğine ait 0-1000°C arasındaki renk değişimini gösteren fotoğraflar.



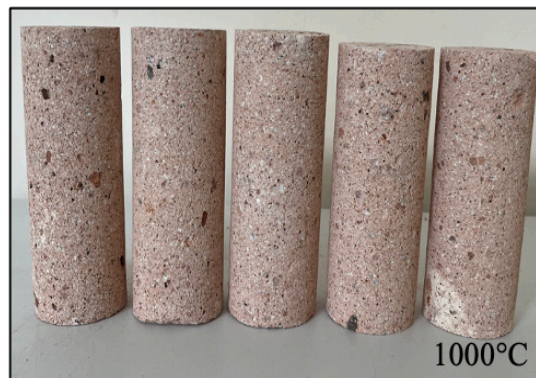
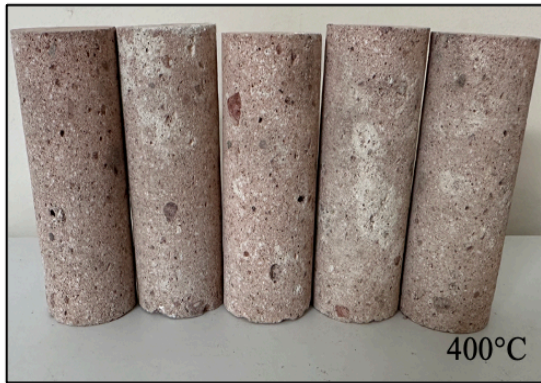
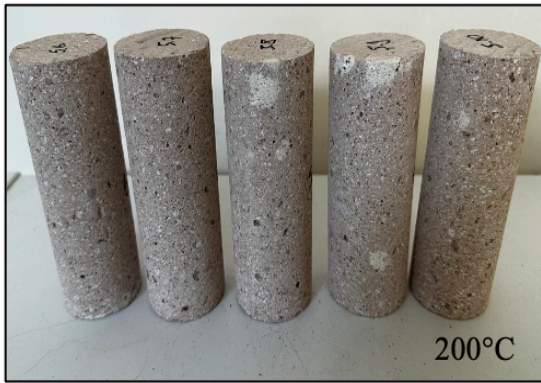
EK-1c: İgnimbirit 3 örneğine ait 0-1000°C arasındaki renk değişimini gösteren fotoğraflar.



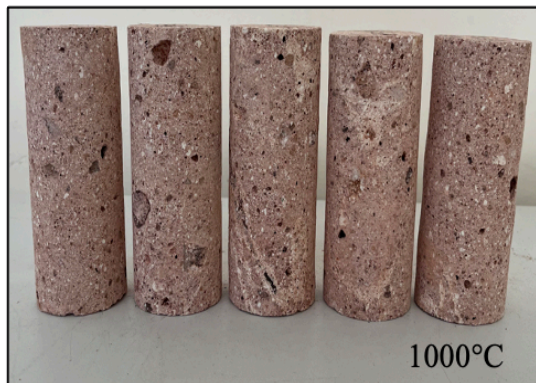
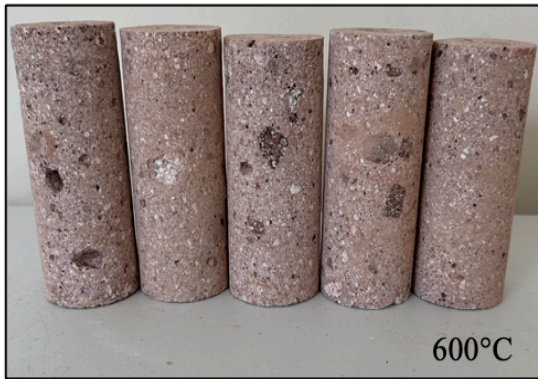
EK-1d: İğnimbirit 4 örneğine ait 0-1000°C arasındaki renk değişimini gösteren fotoğraflar.



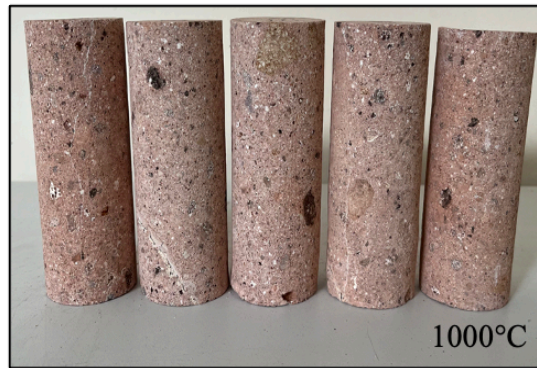
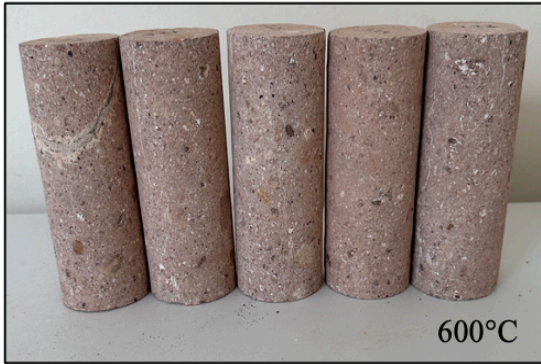
EK-1e: İğnimbirit 5 örneğine ait 0-1000°C arasındaki renk değişimini gösteren fotoğraflar.



EK-1f: İgnimbirit 6 örneğine ait 0-1000°C arasındaki renk değişimini gösteren fotoğraflar.



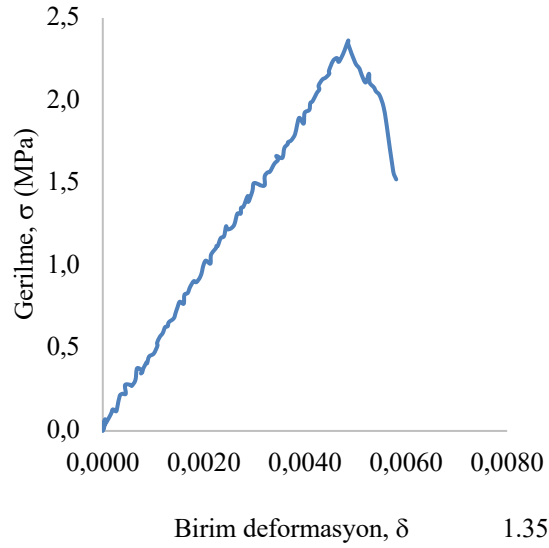
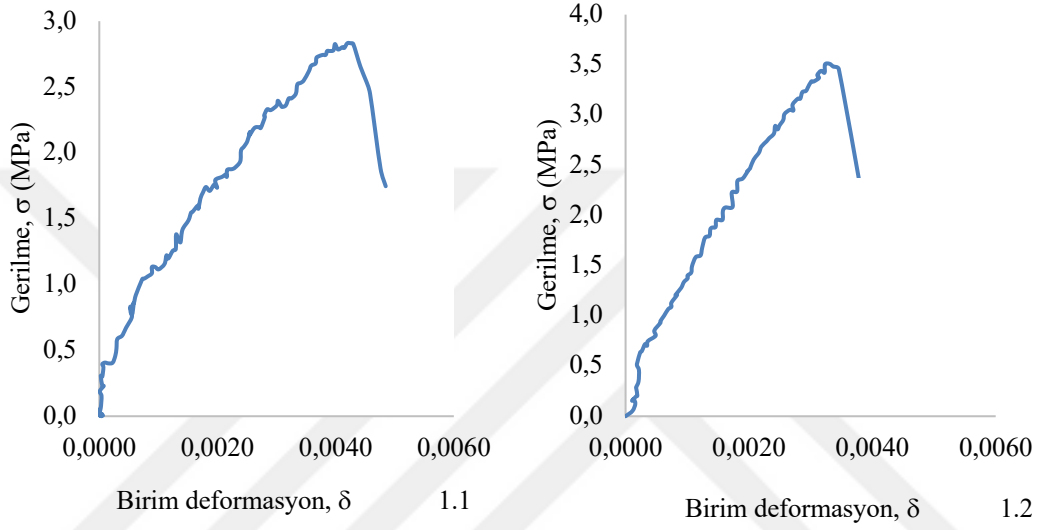
EK-1g: İgnimbirit 7 örneğine ait 0-1000°C arasındaki renk değişimini gösteren fotoğraflar.



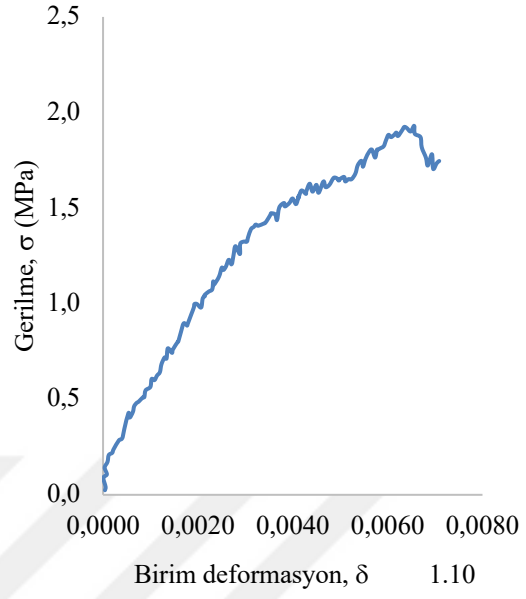
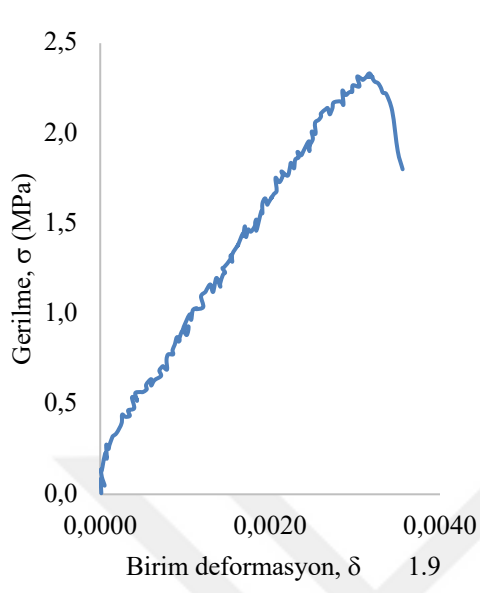
Ek-2. Elastisite Modüllerin Hesaplandığı Örneklerin Gerilme- Birim Deformasyon Grafikleri

Ek-2a: İğnimbirit 1 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ Grafikleri.

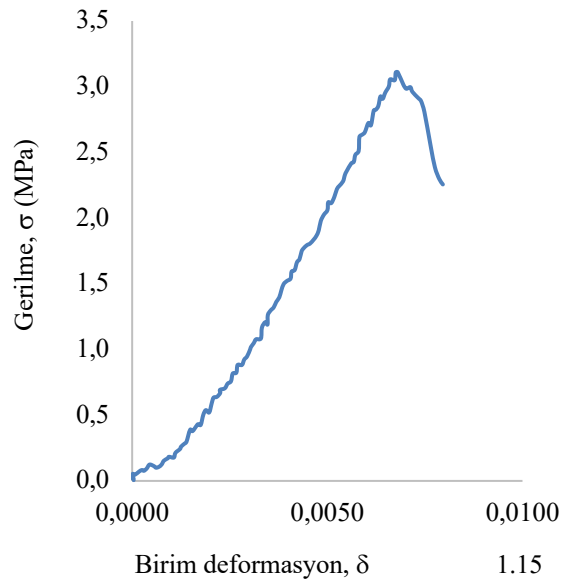
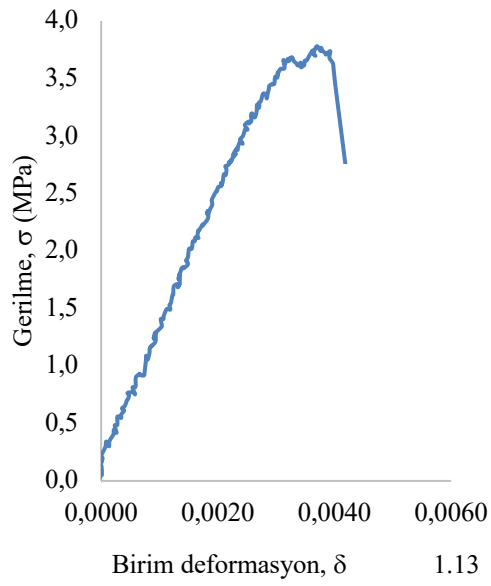
0°C



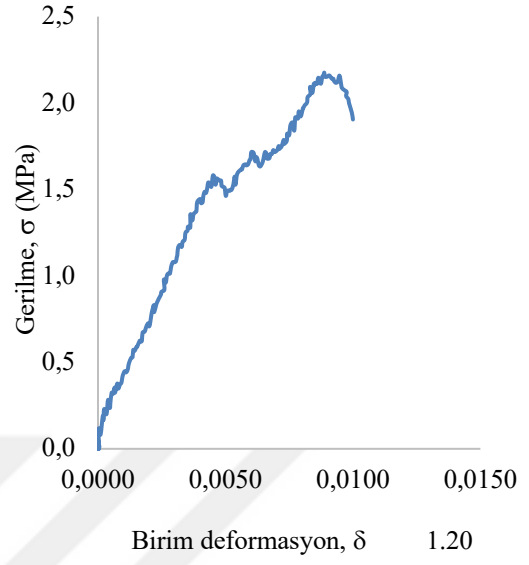
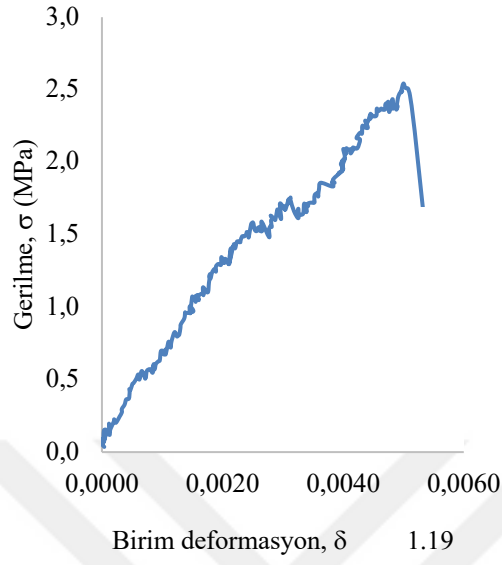
100°C



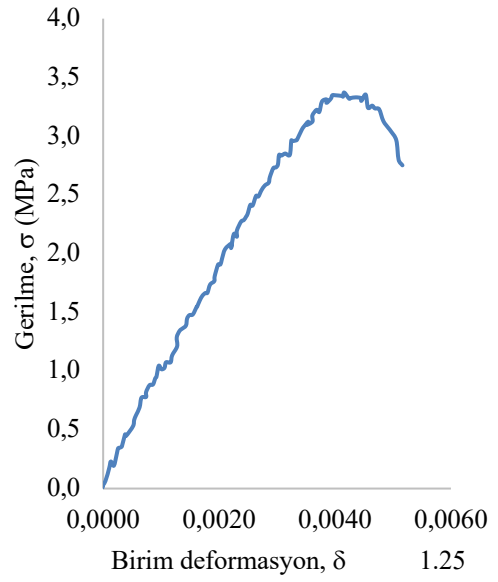
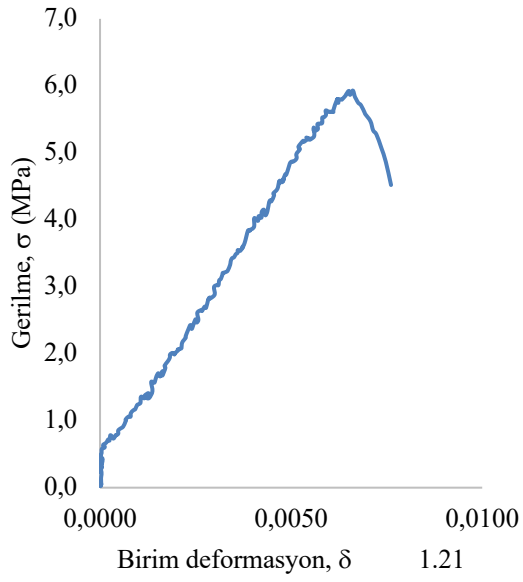
200°C



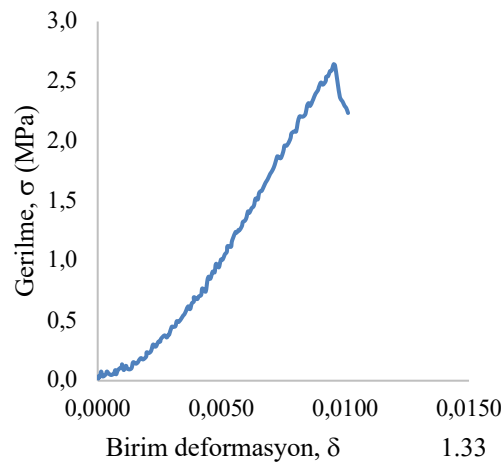
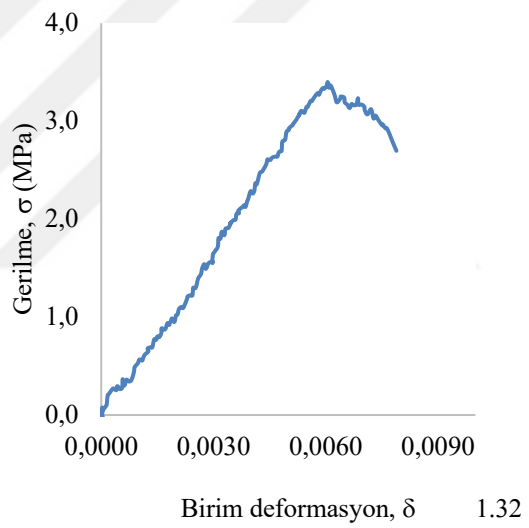
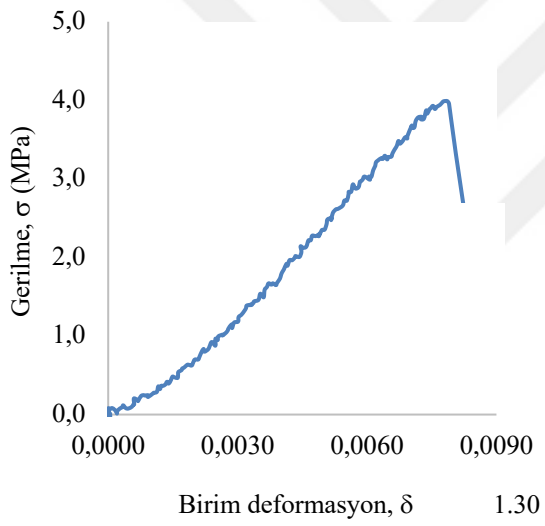
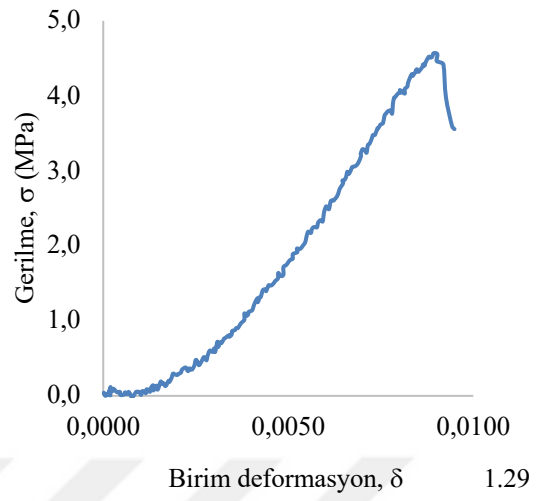
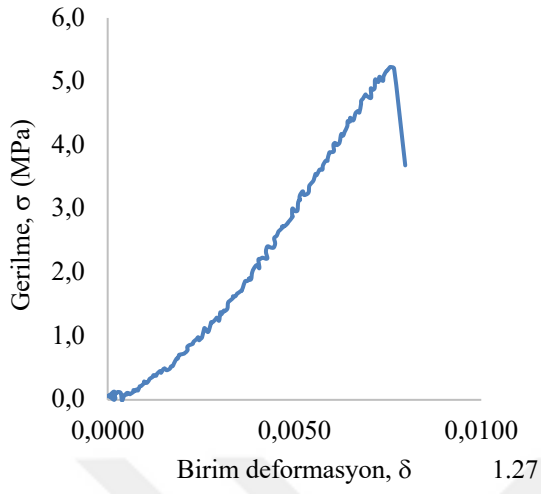
400°C



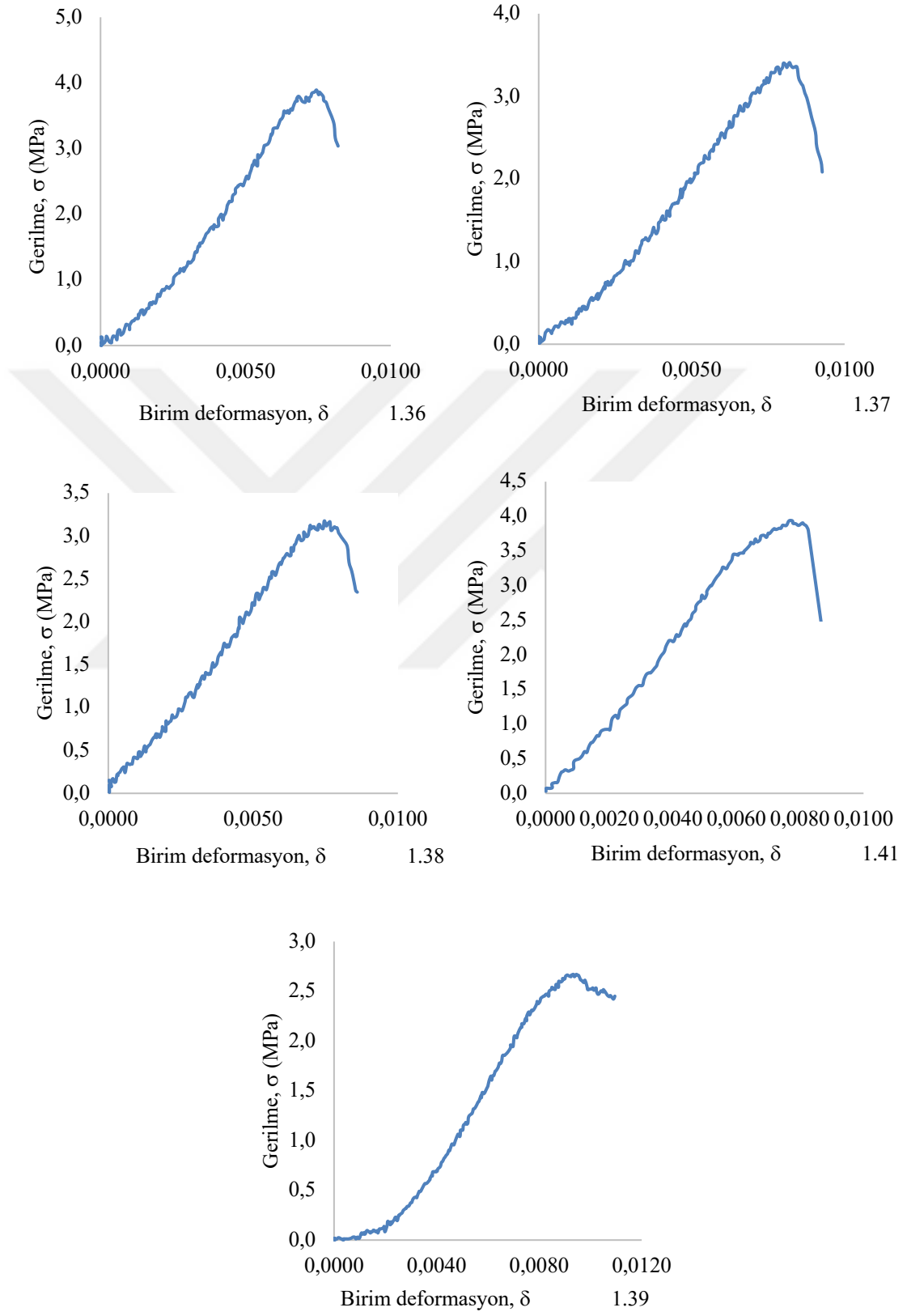
600°C



800°C

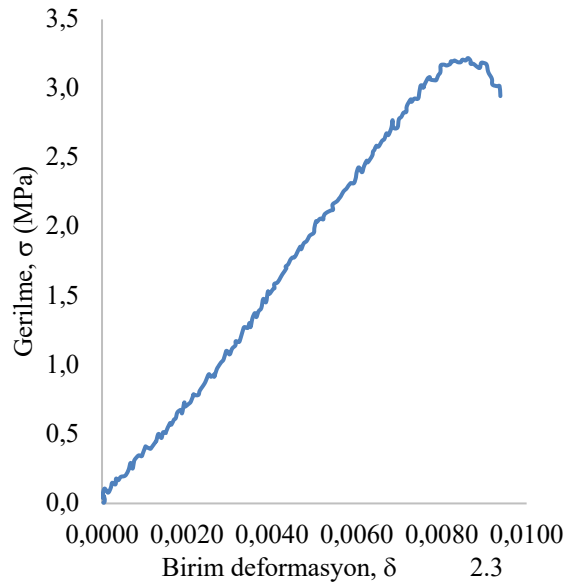
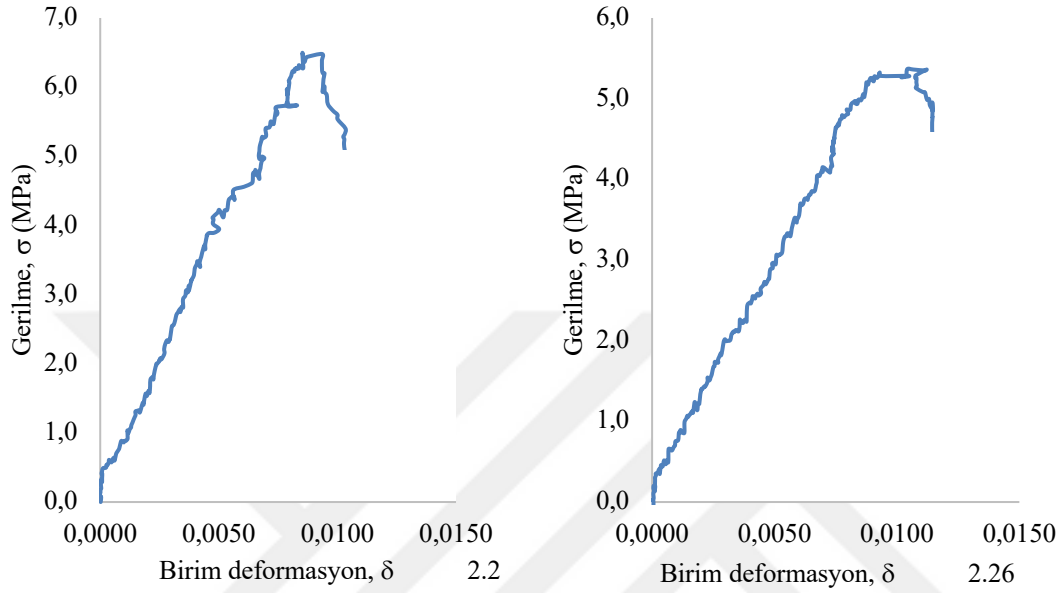


1000°C

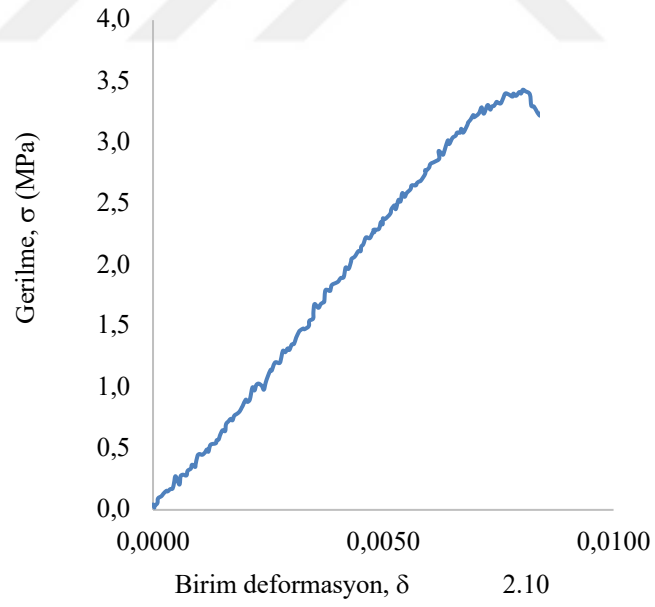
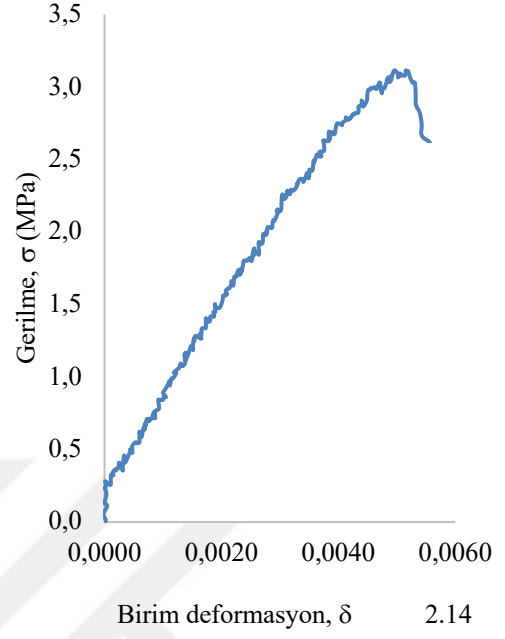
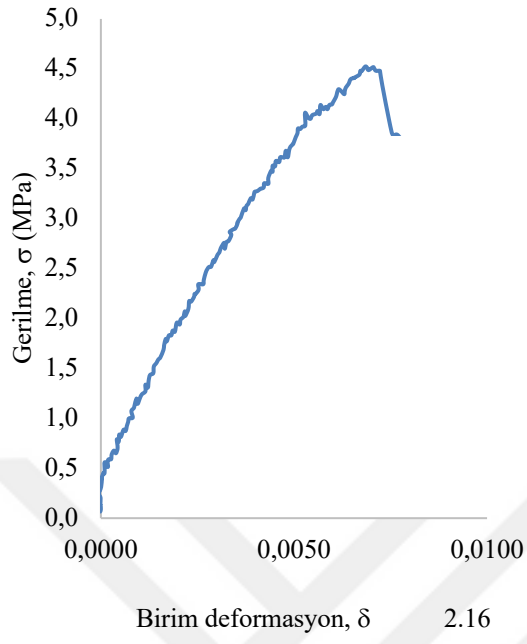


Ek-2b: İğnimbirit 2 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ Grafikleri.

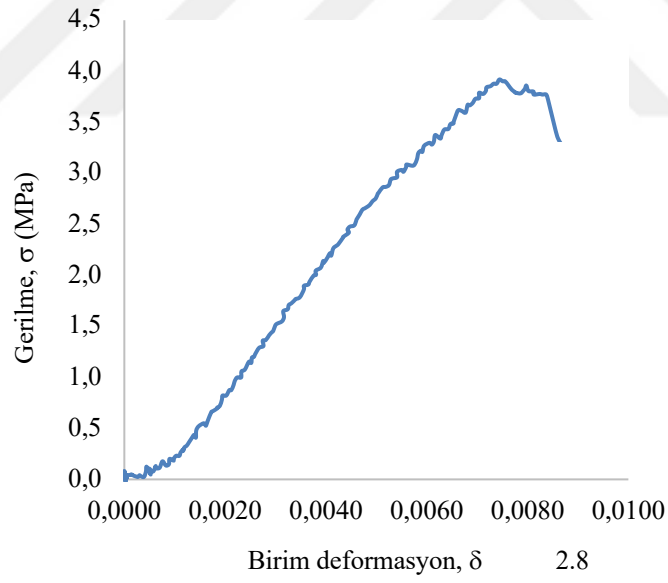
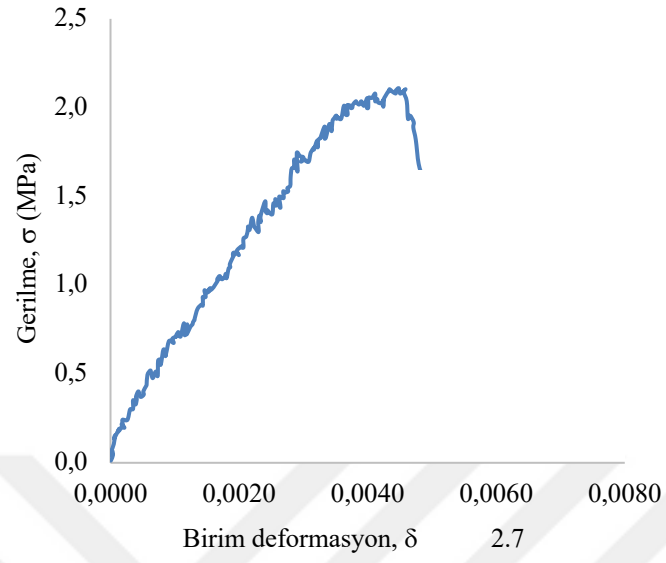
0°C



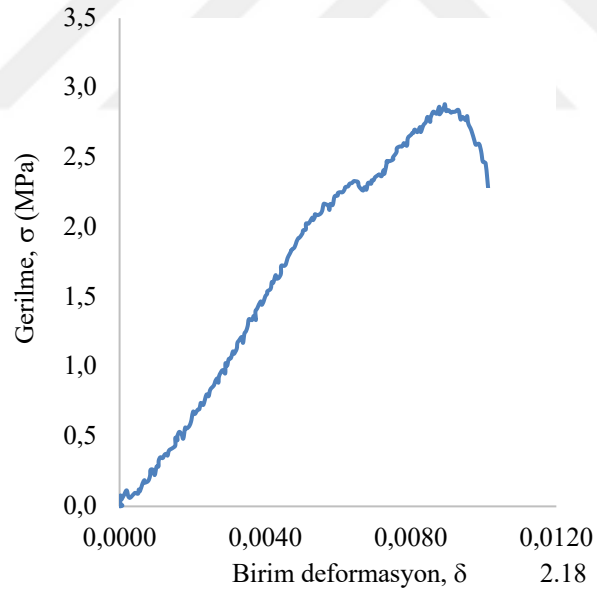
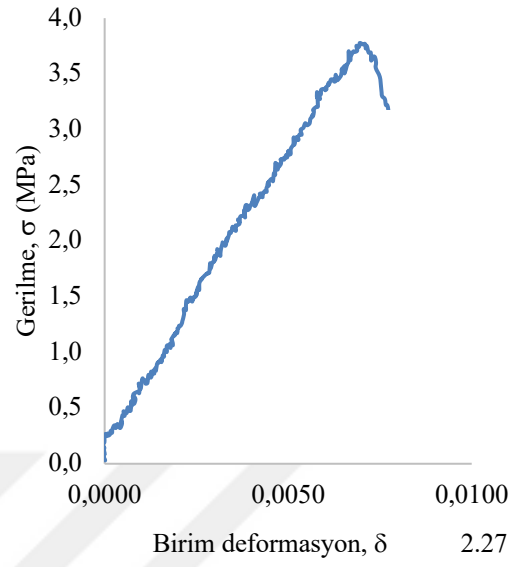
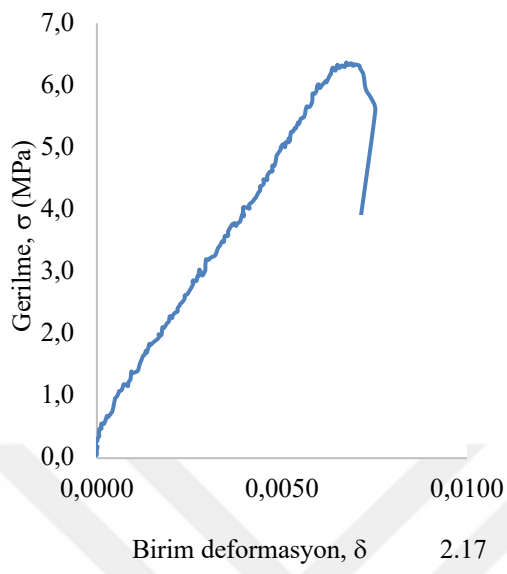
100°C



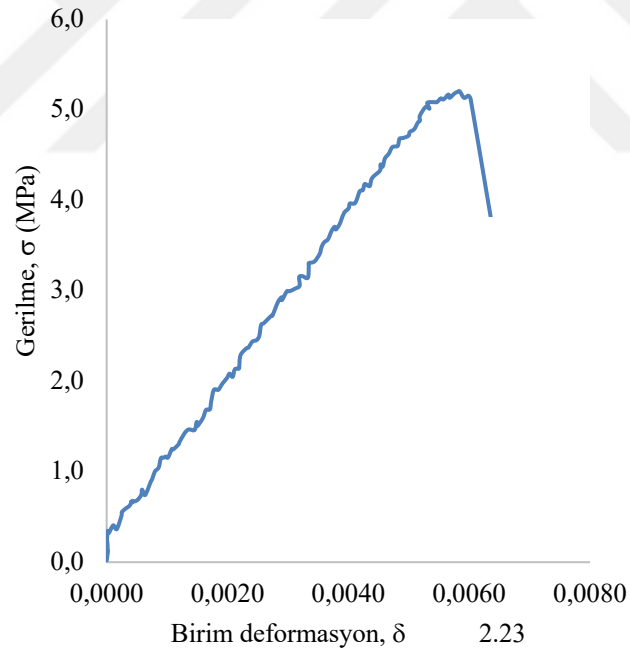
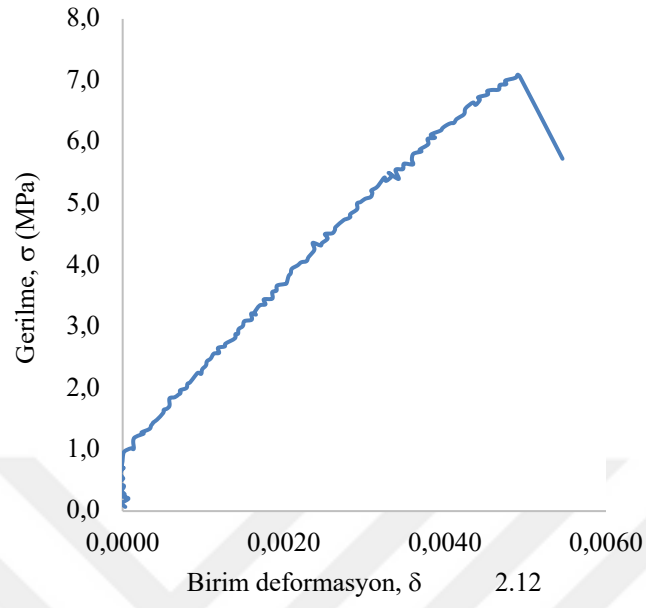
200°C



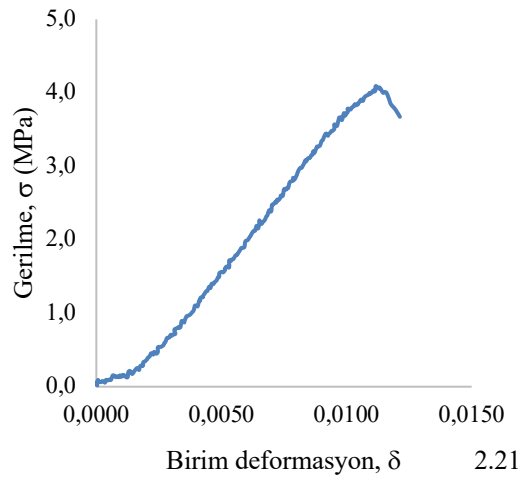
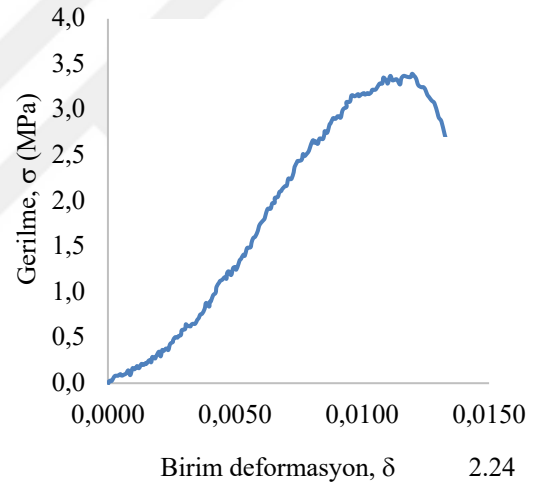
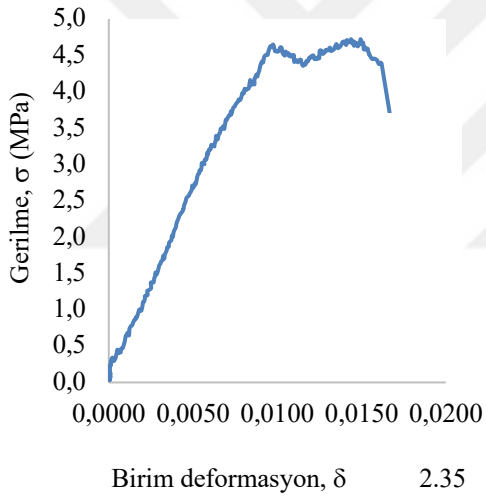
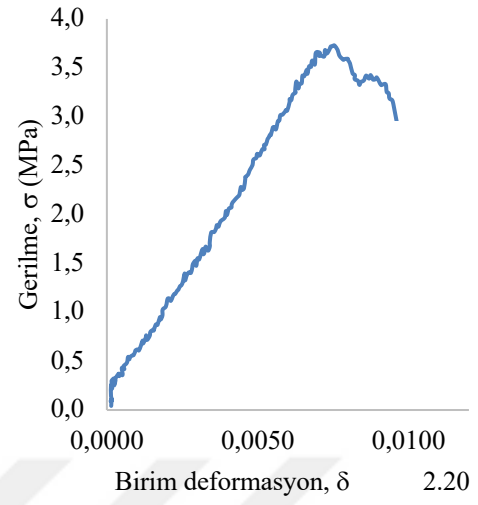
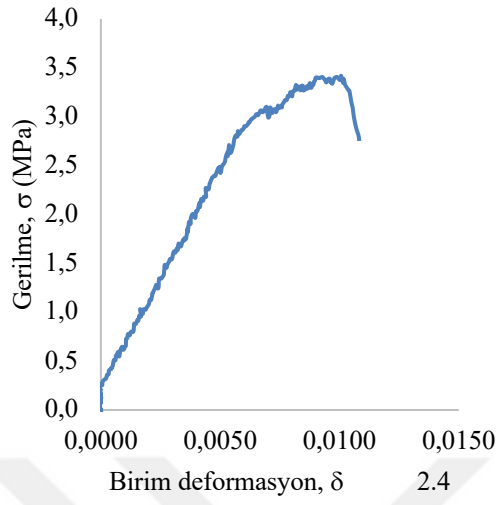
400°C



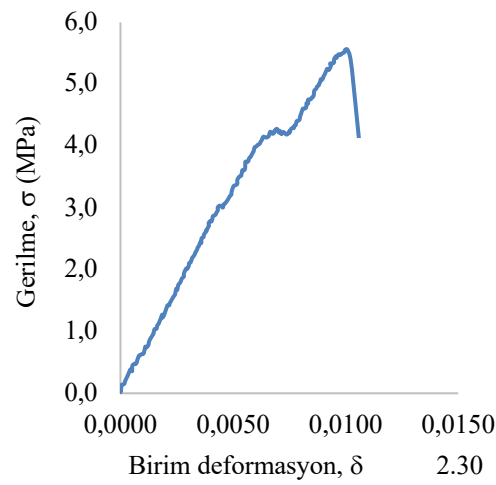
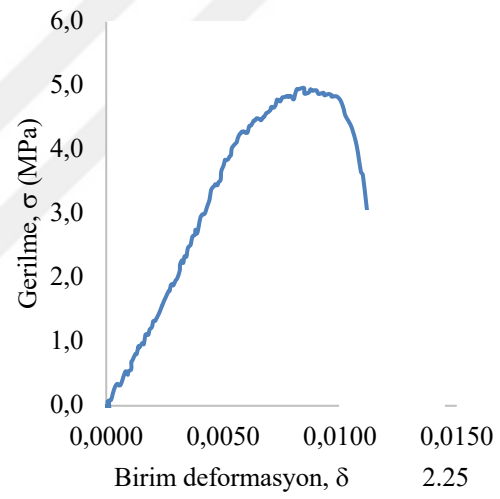
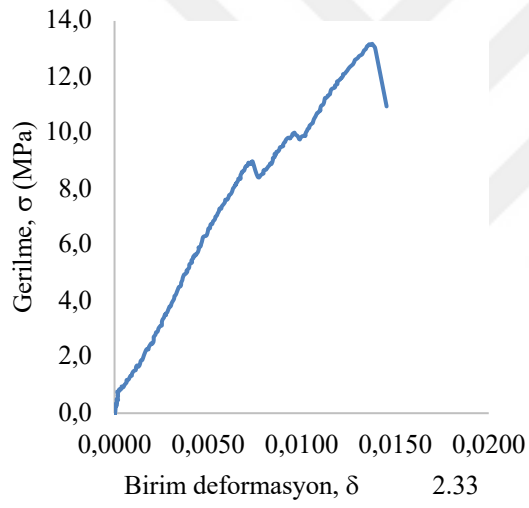
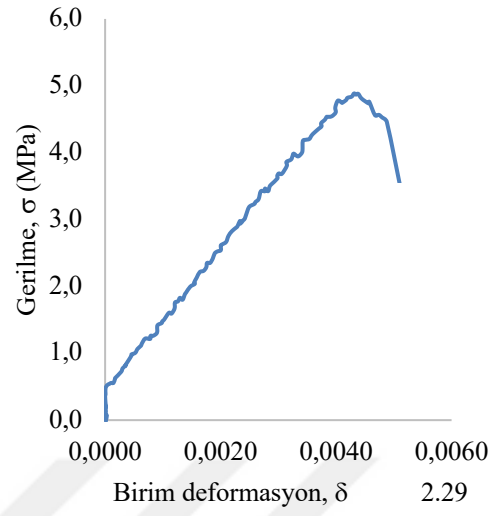
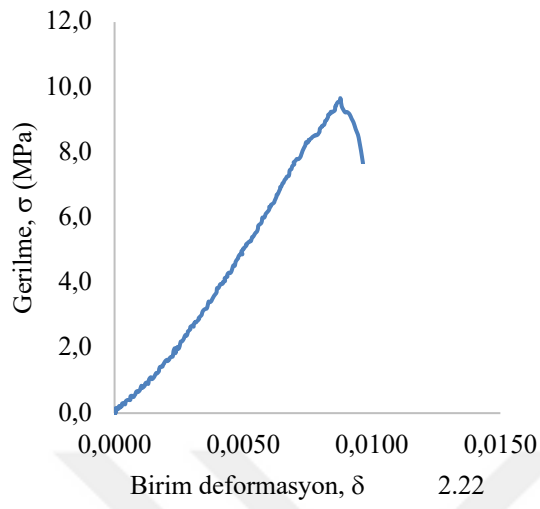
600°C



800°C

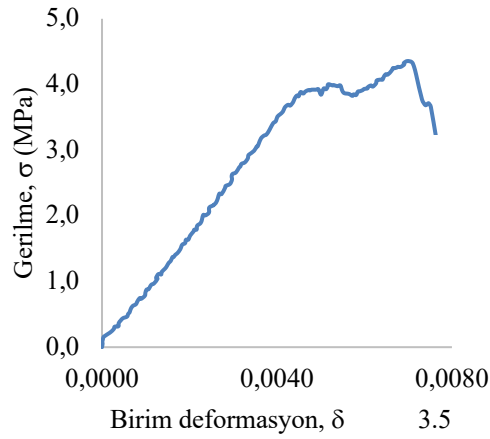
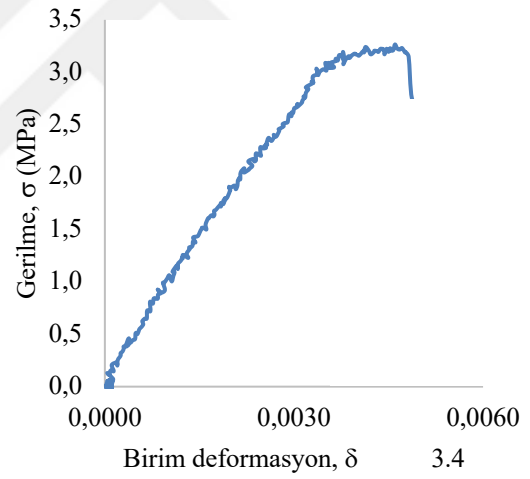
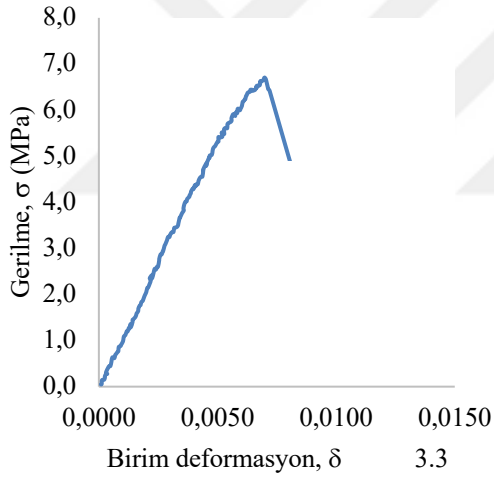
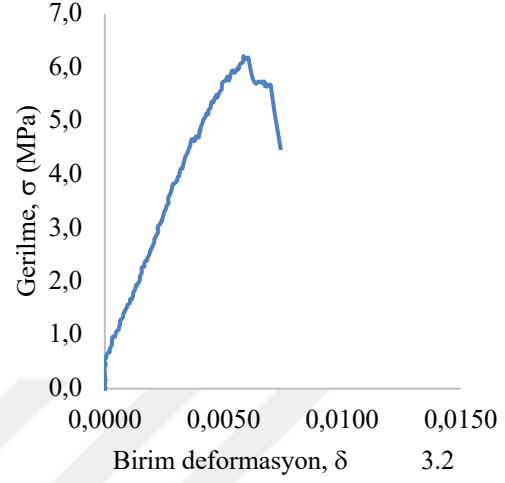
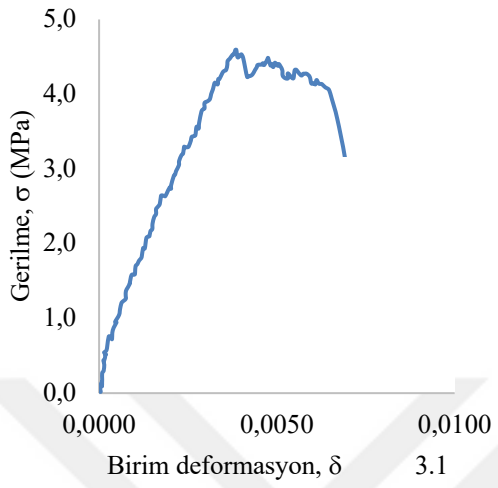


1000°C

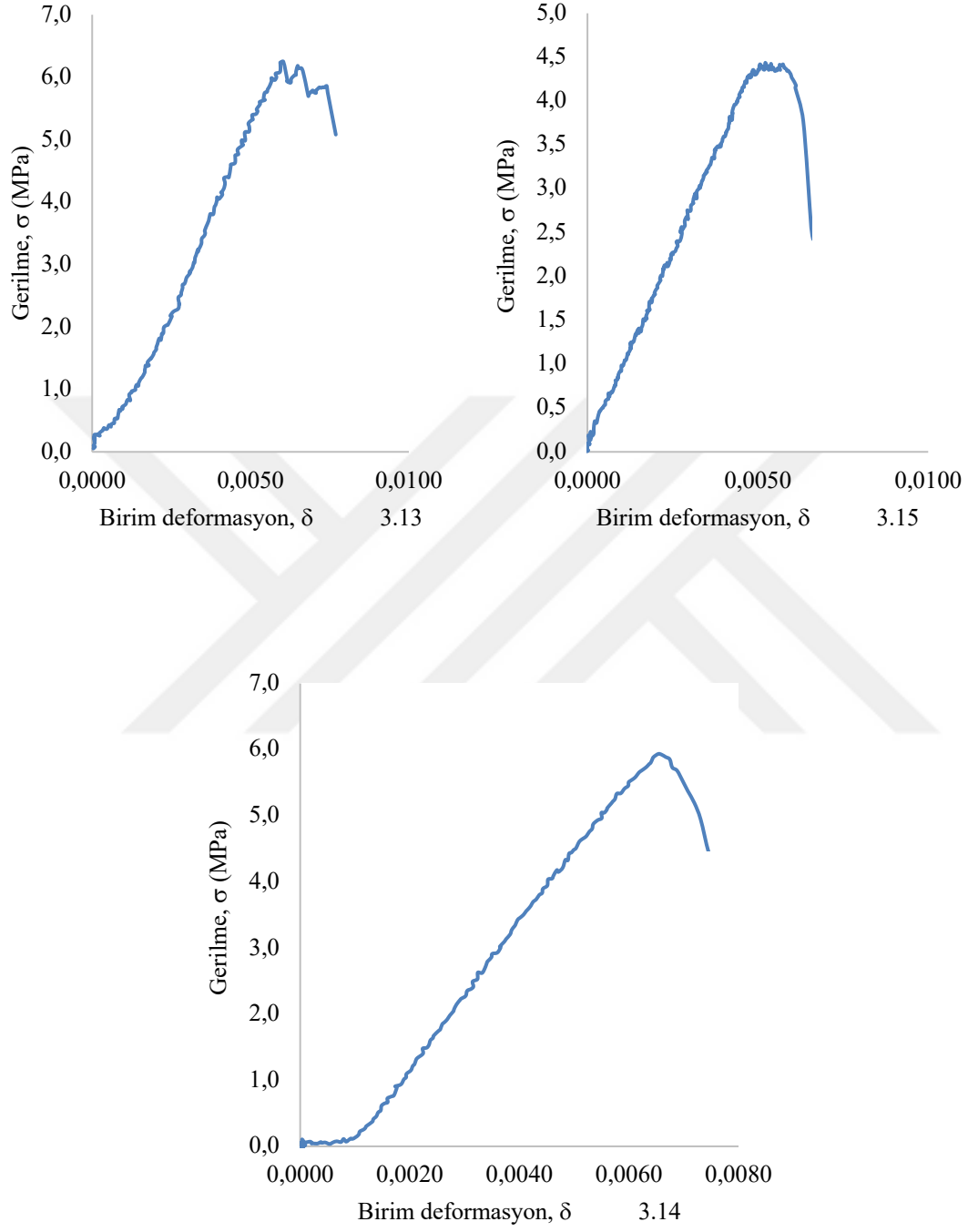


Ek-2c: İğnimbirit 3 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ Grafikleri.

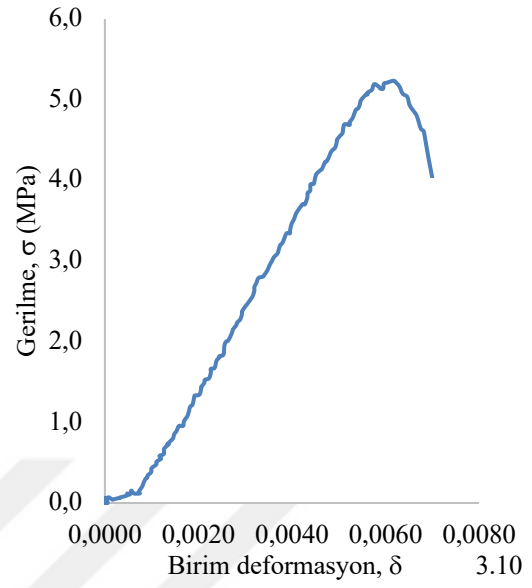
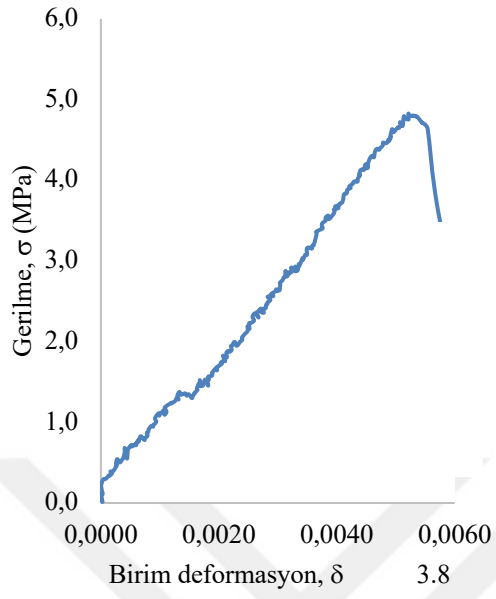
0°C



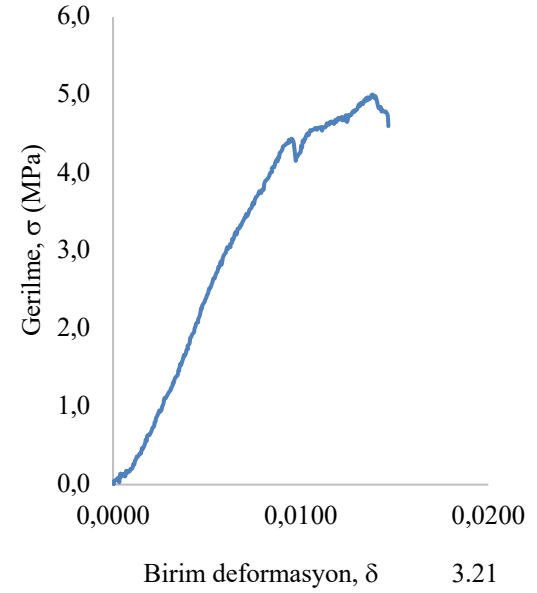
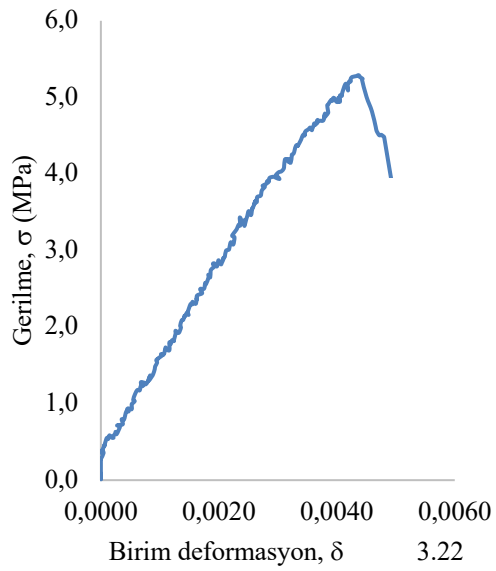
100°C



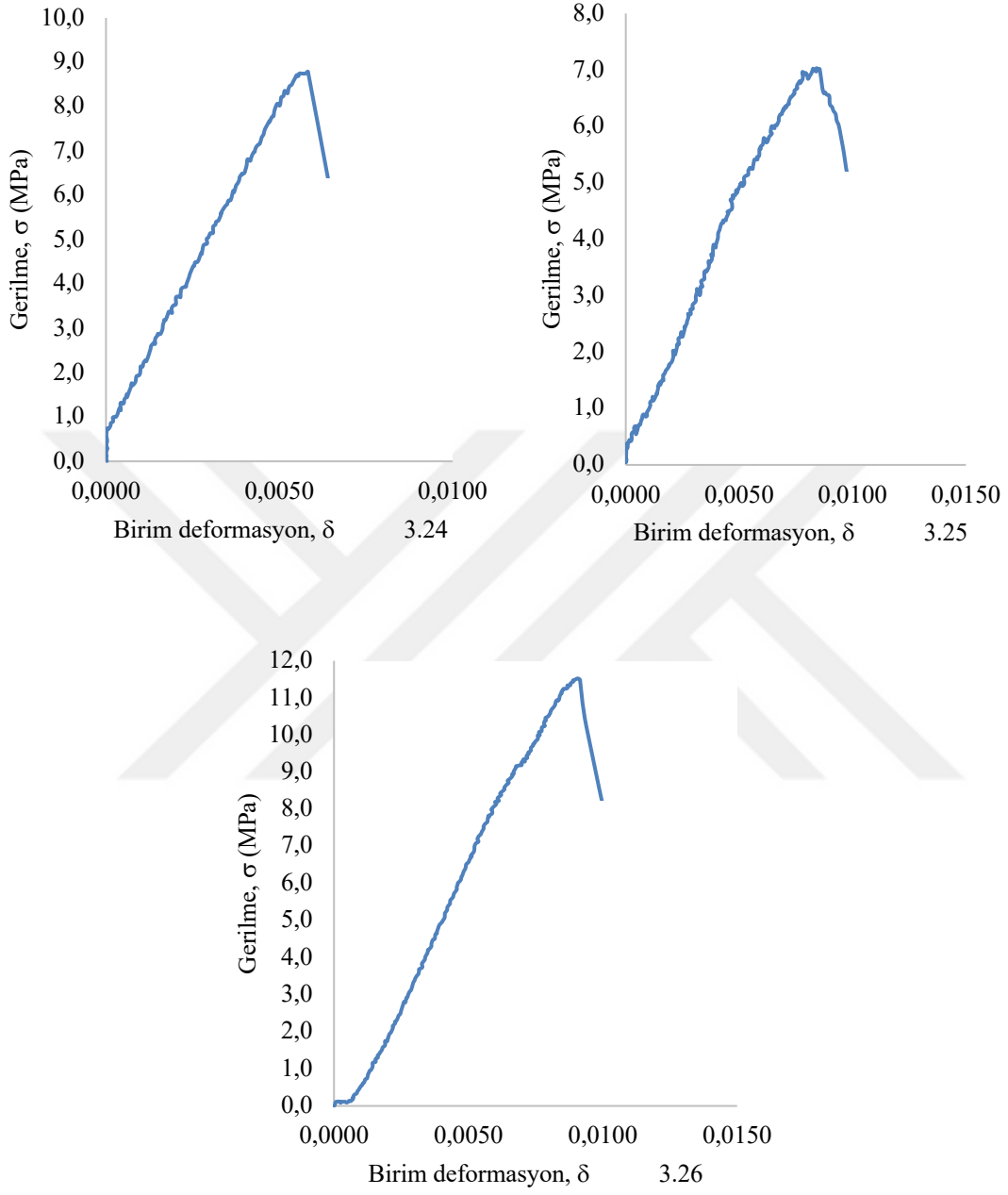
200°C



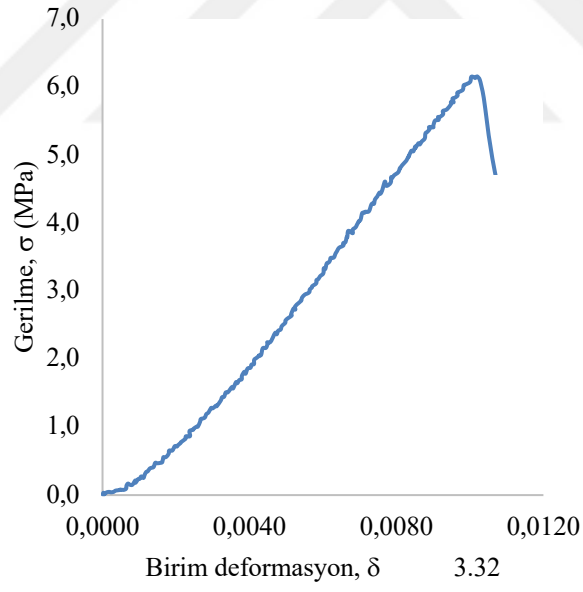
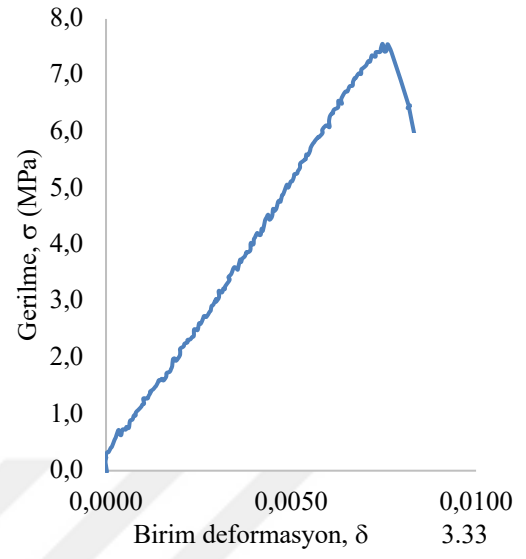
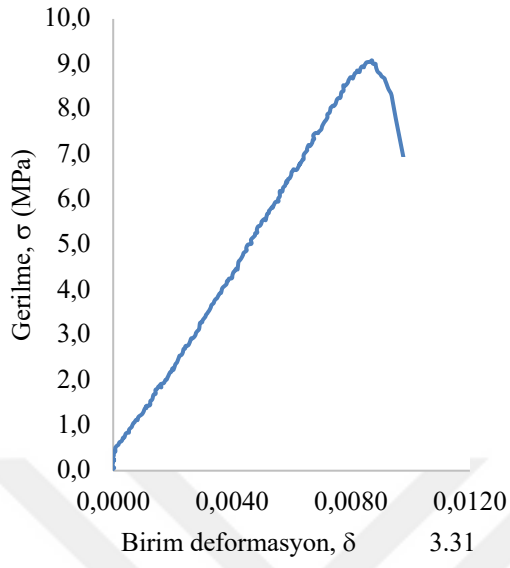
400°C



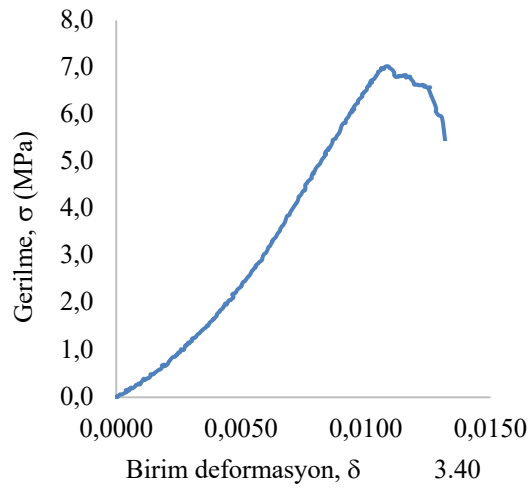
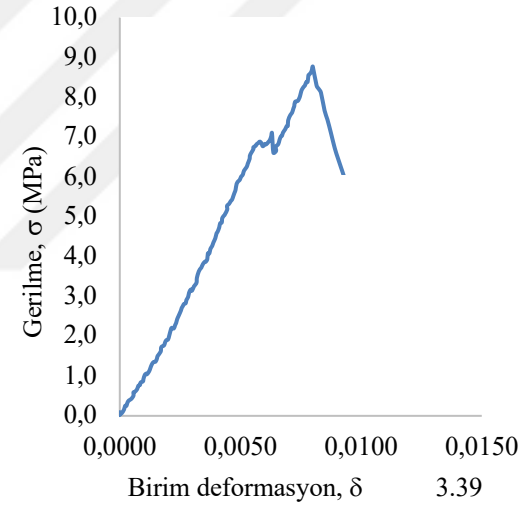
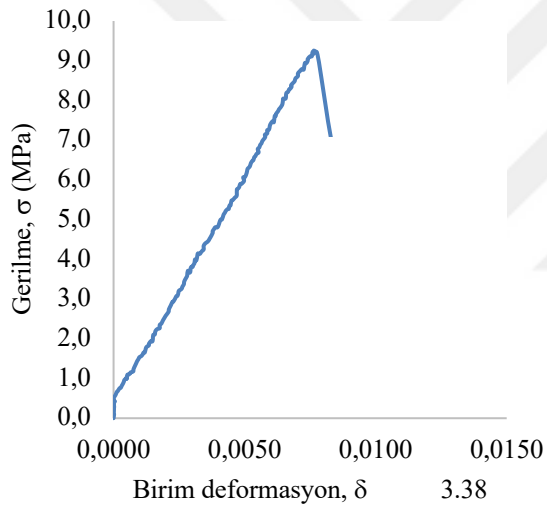
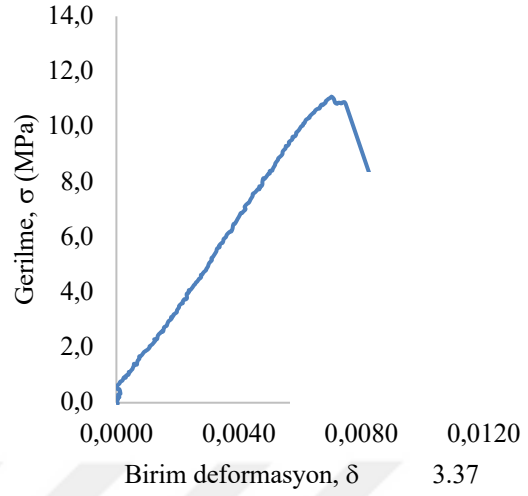
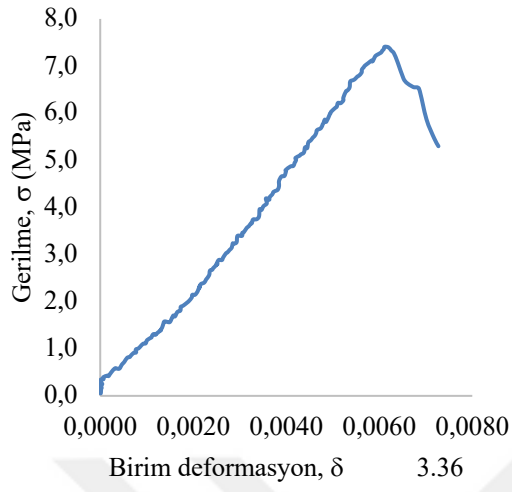
600°C



800°C

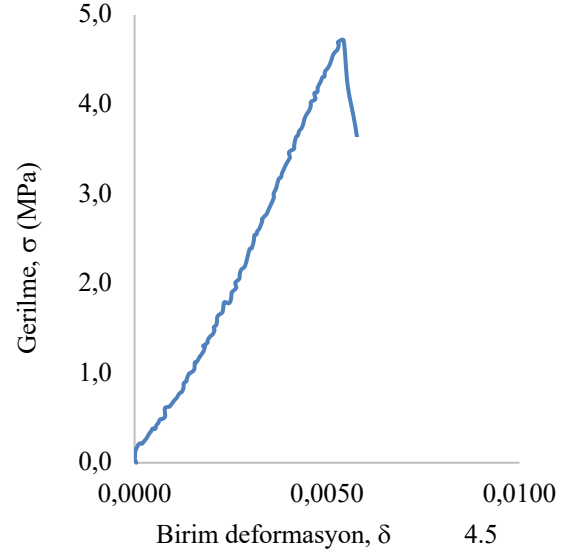
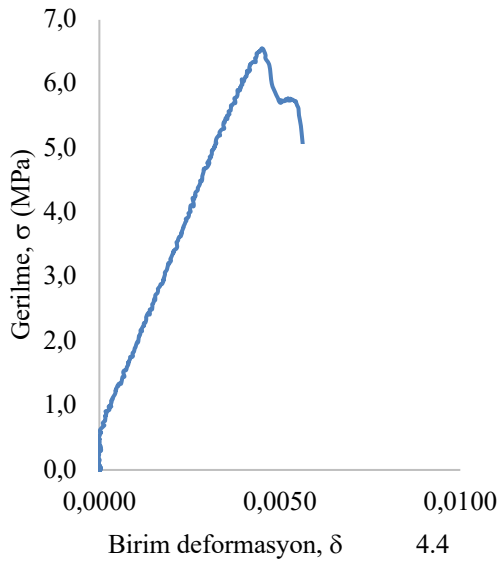
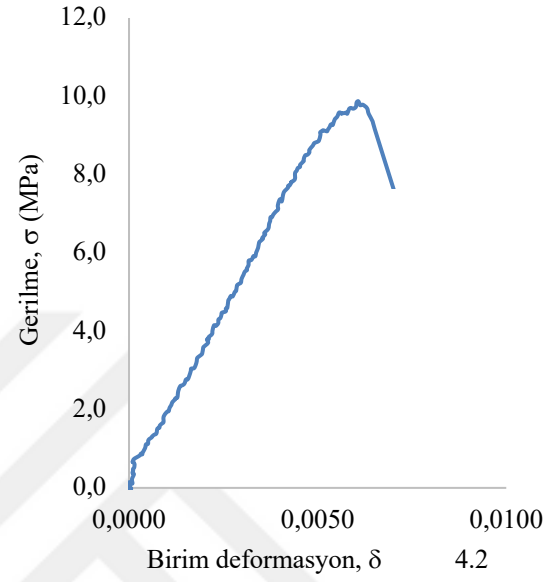
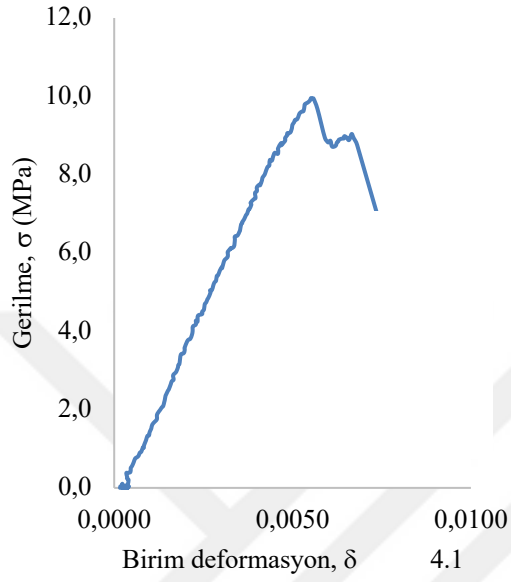


1000°C

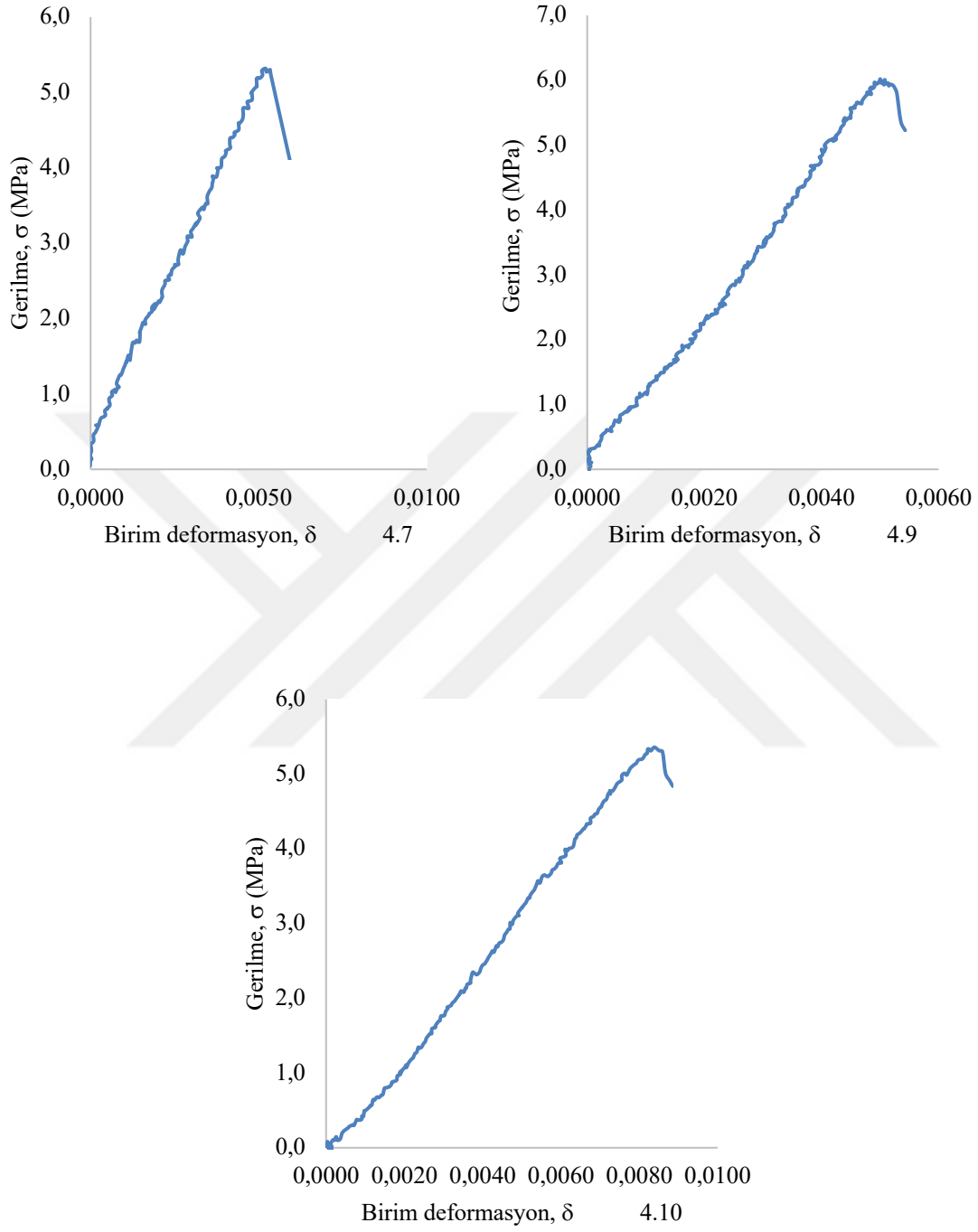


Ek-2d: İğnimbirit 4 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ Grafikleri.

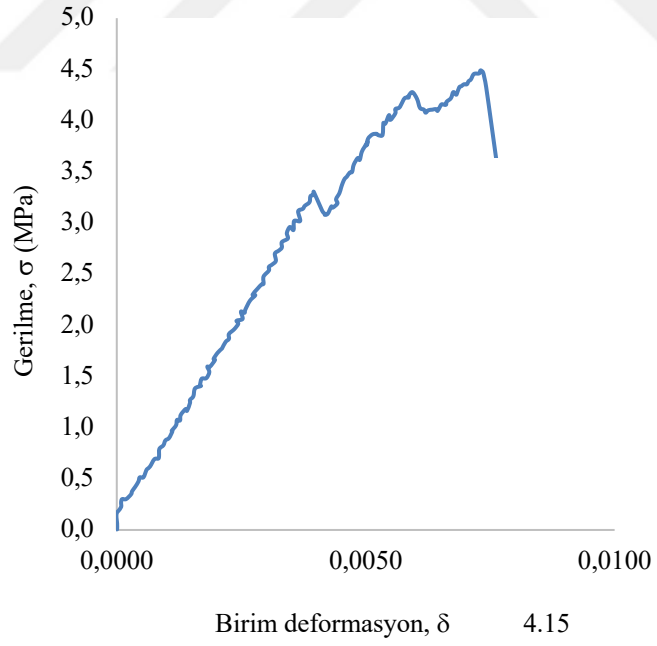
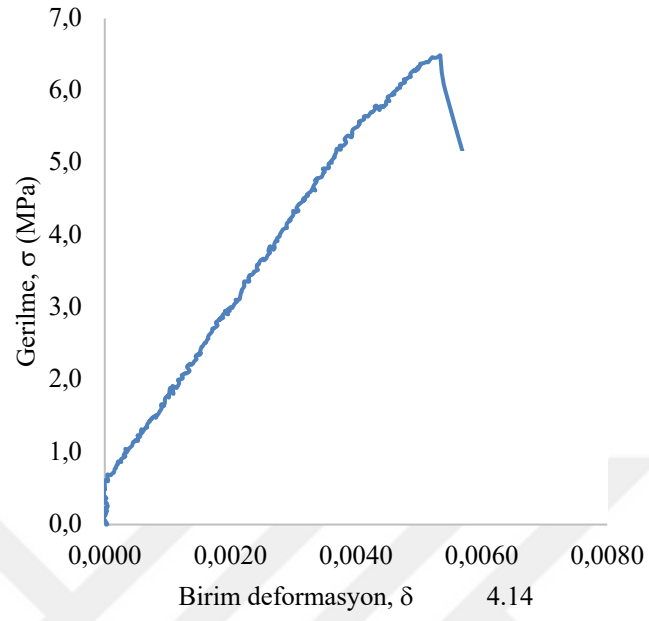
0°C



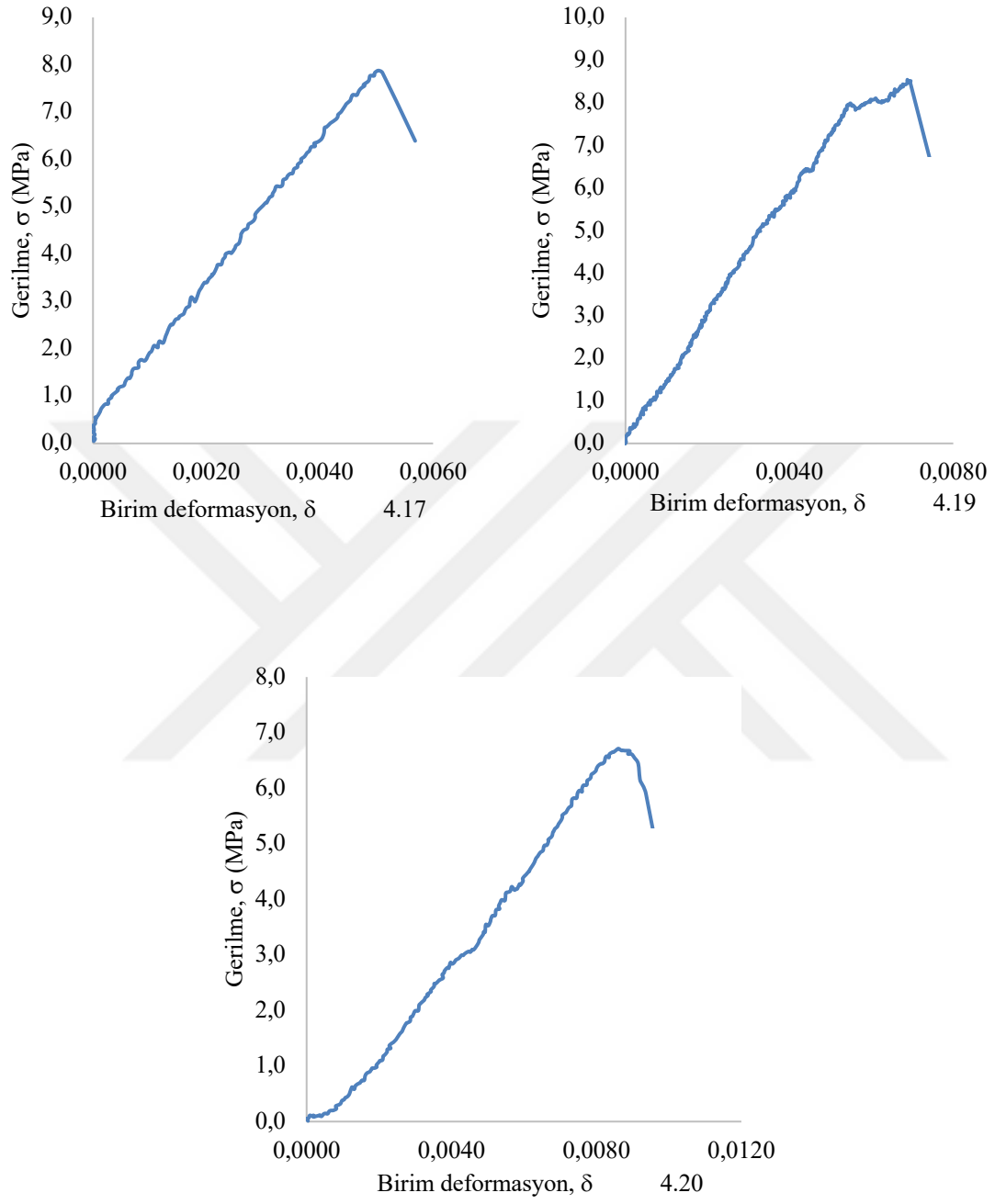
100°C



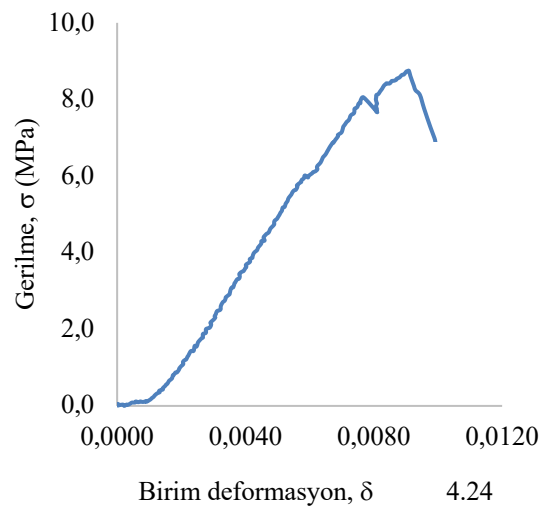
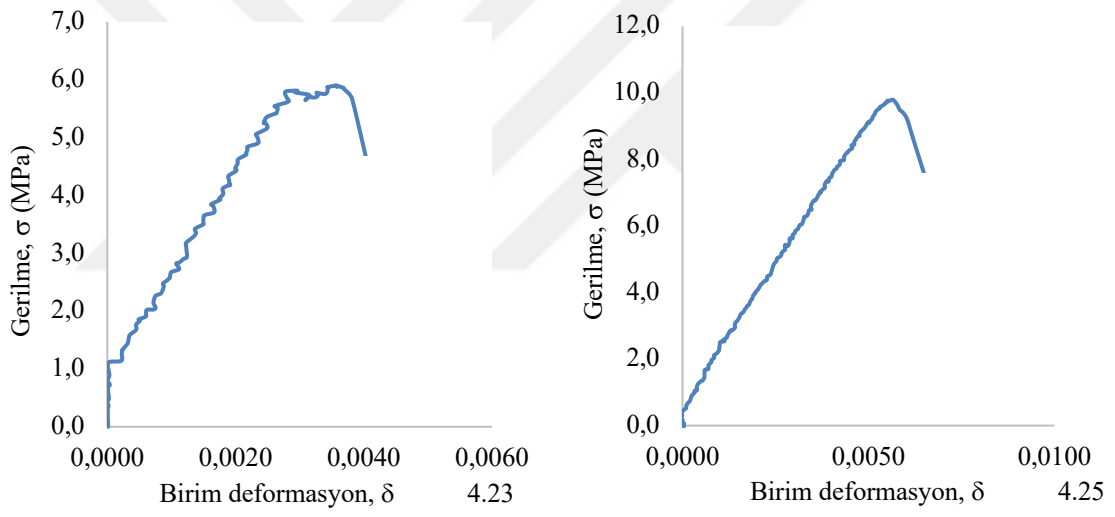
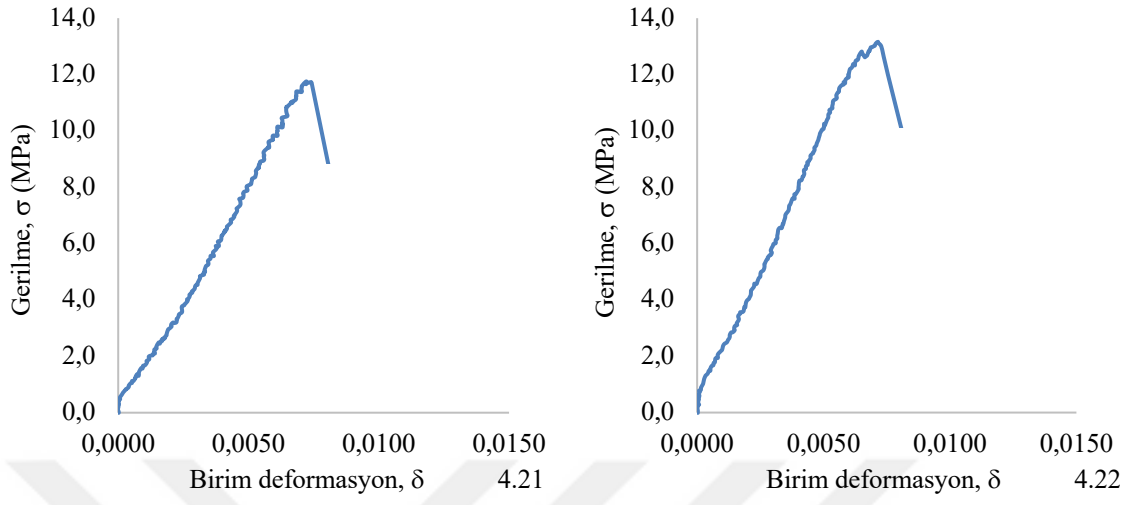
200°C



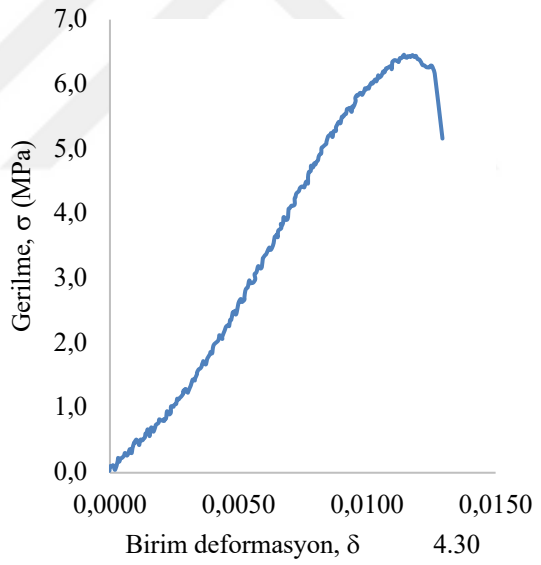
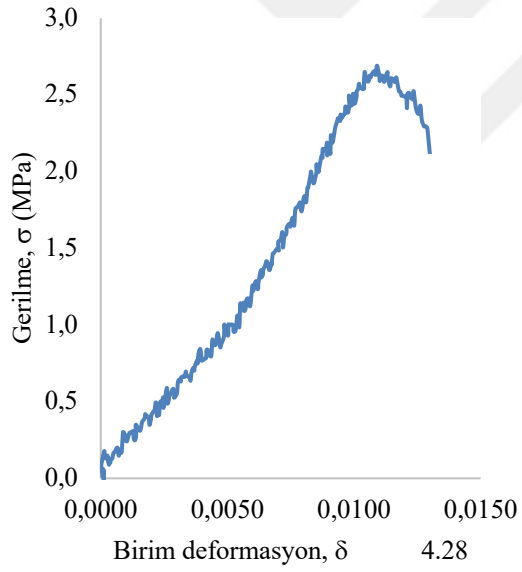
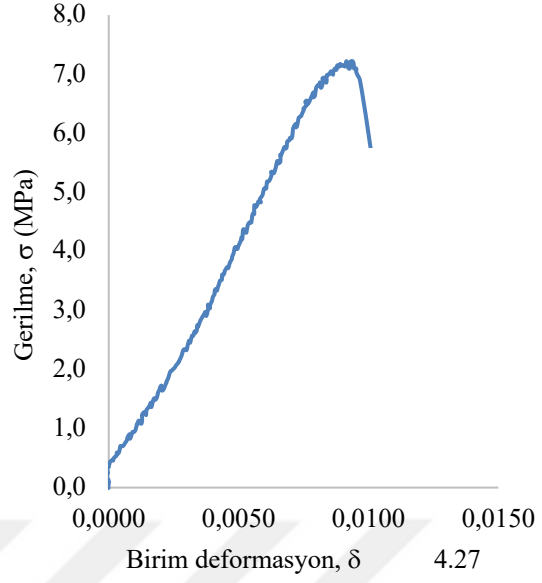
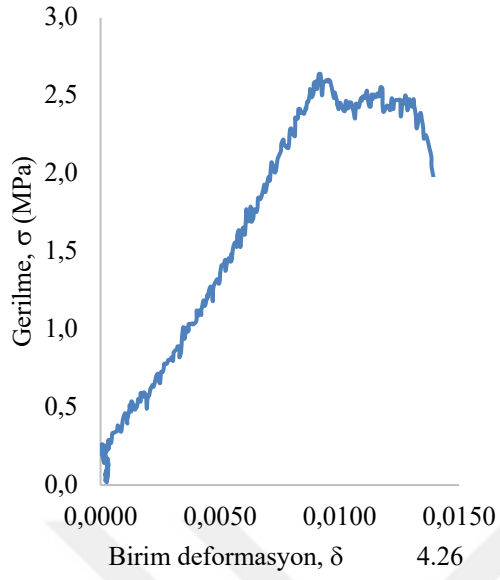
400°C



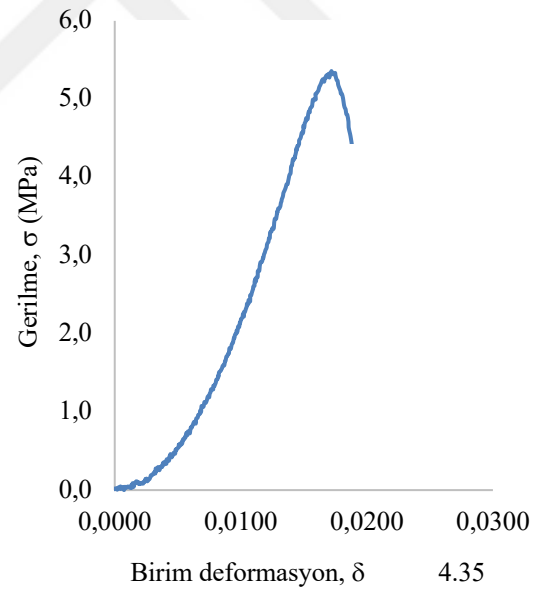
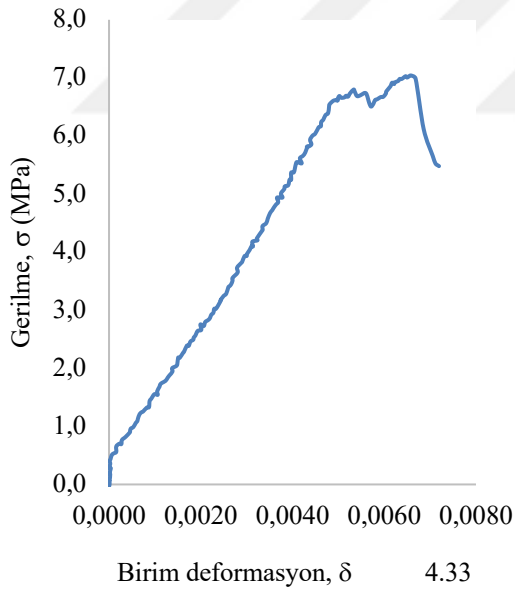
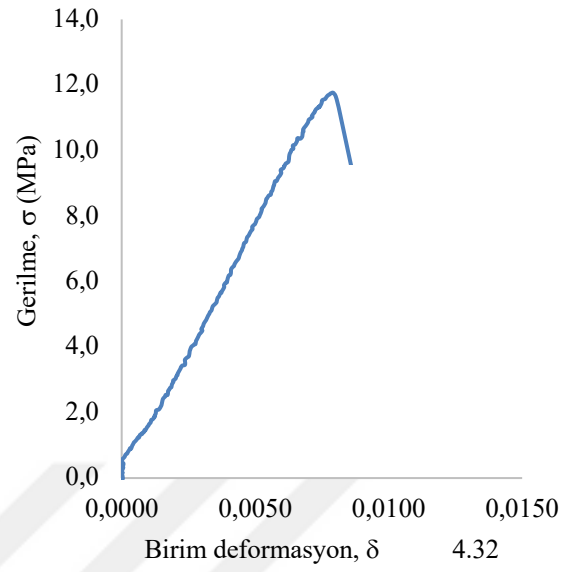
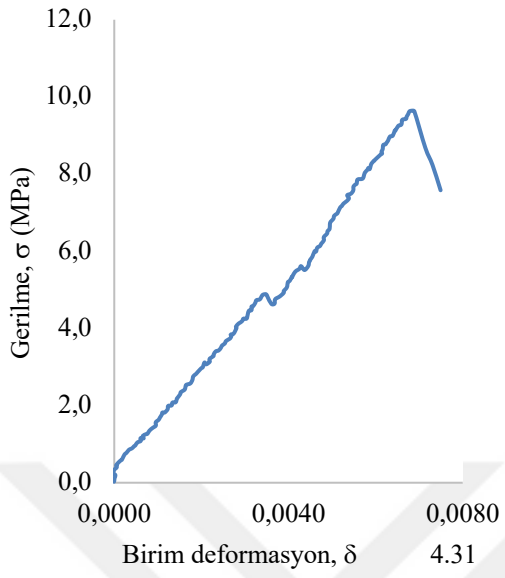
600°C



800°C

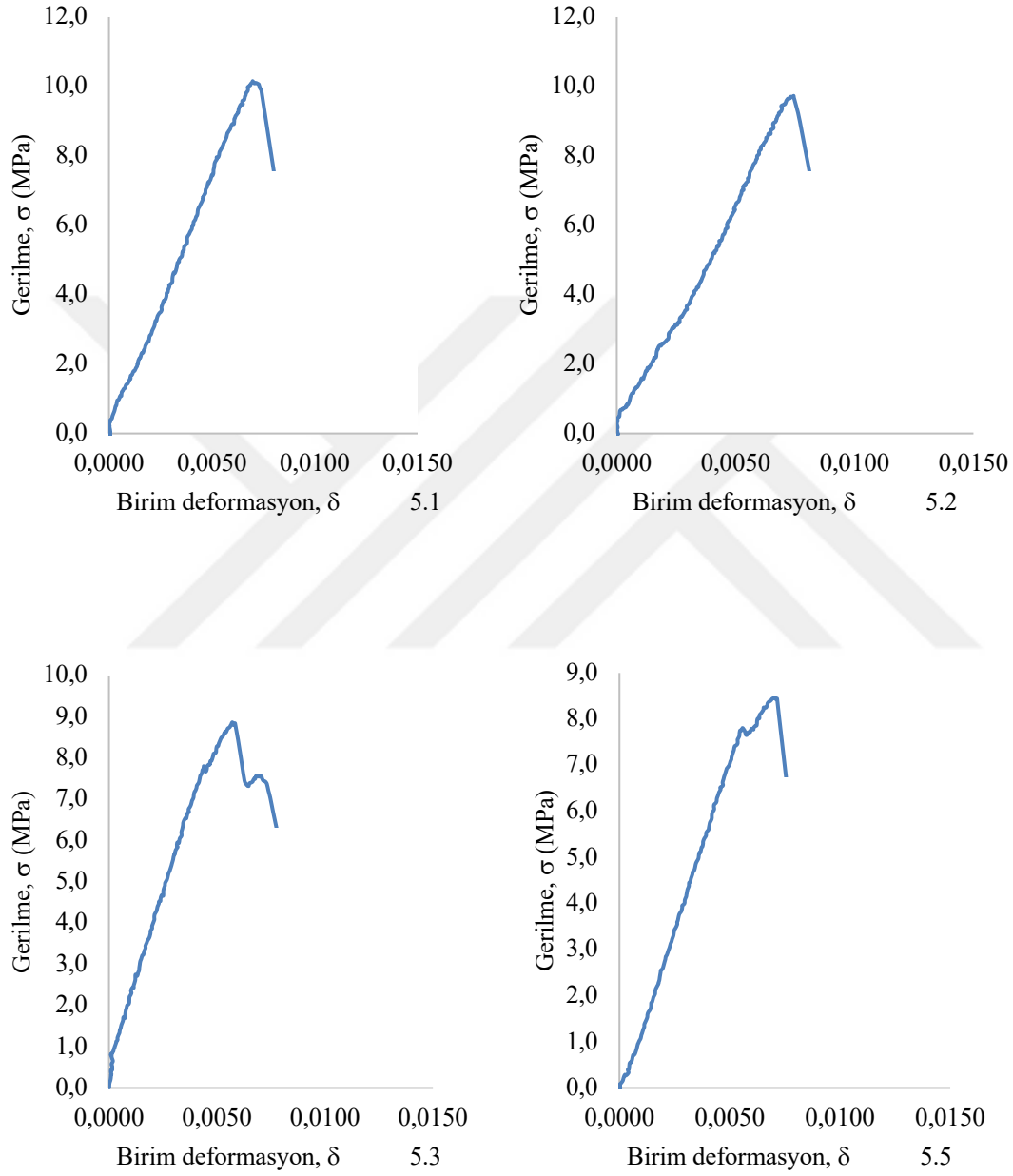


1000°C

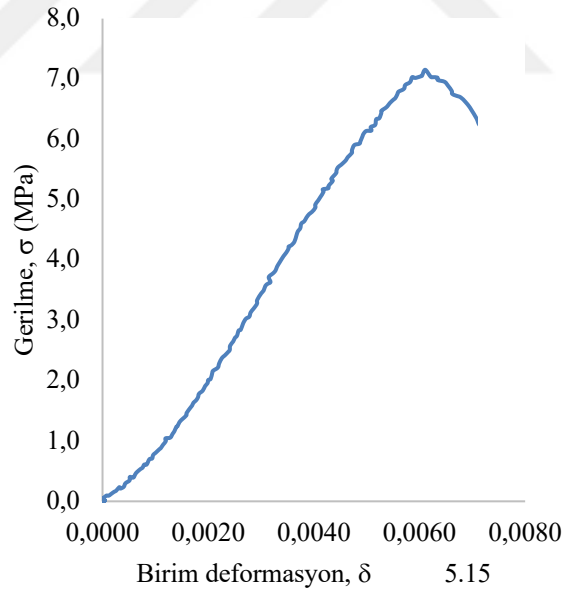
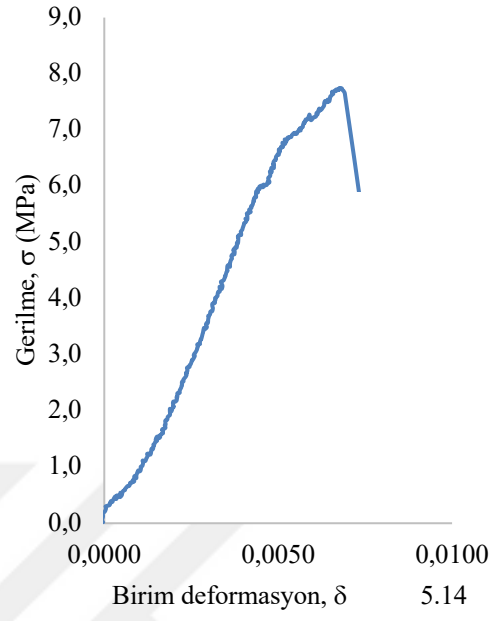
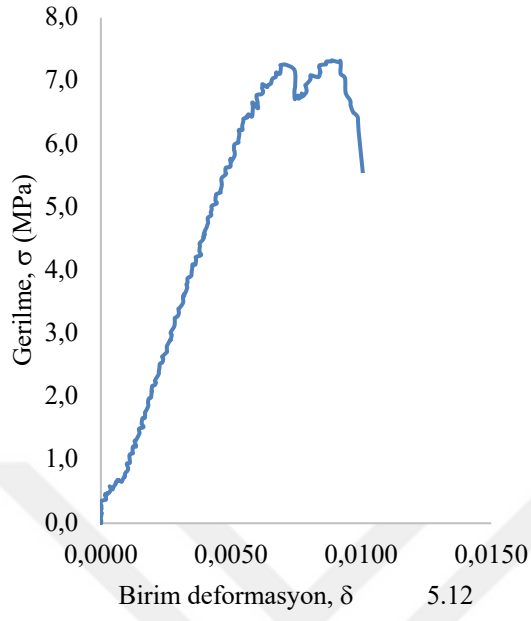


Ek-2e: İğnimbirit 5 örneğine ait 0-800°C arasındaki σ - δ Grafikleri.

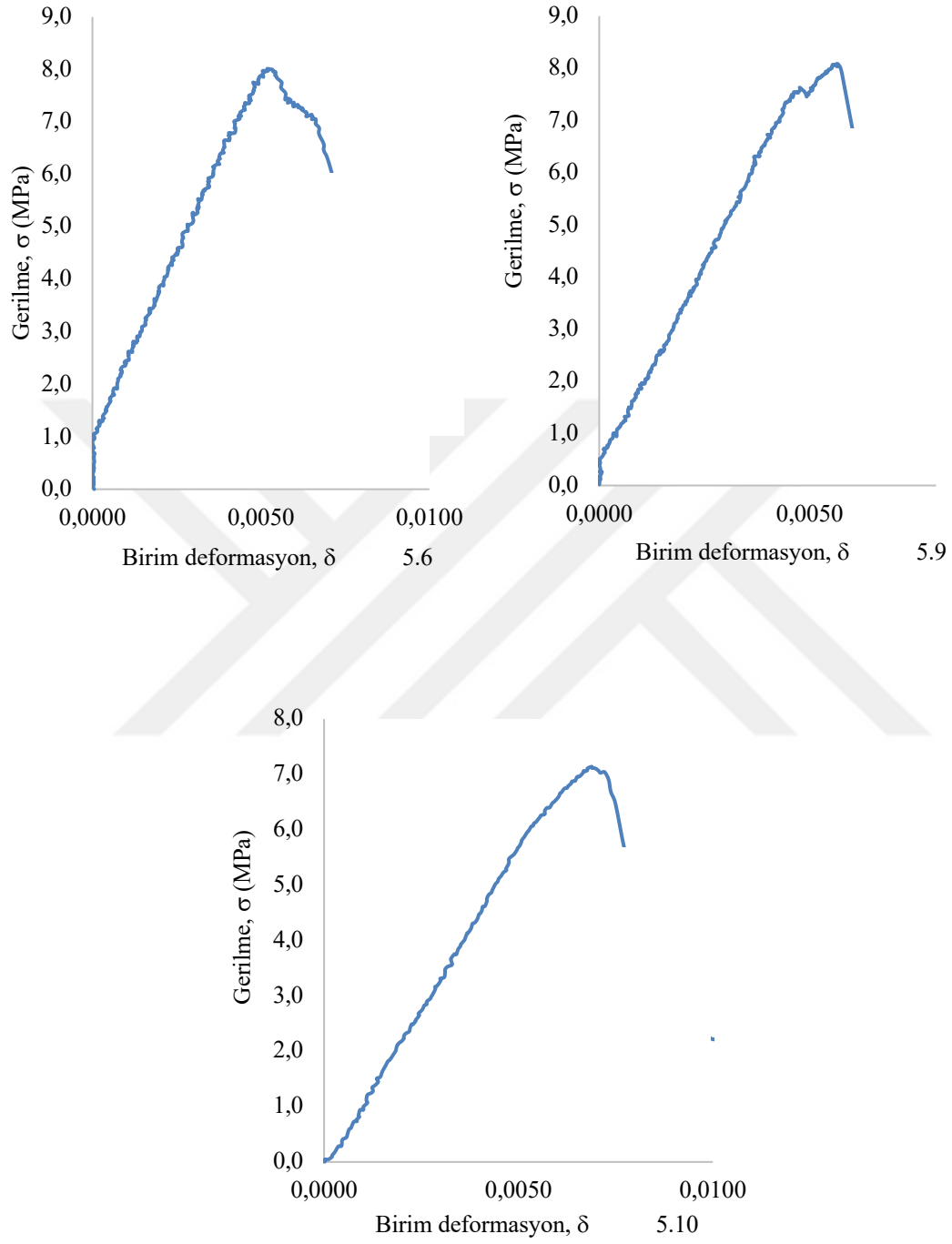
0°C



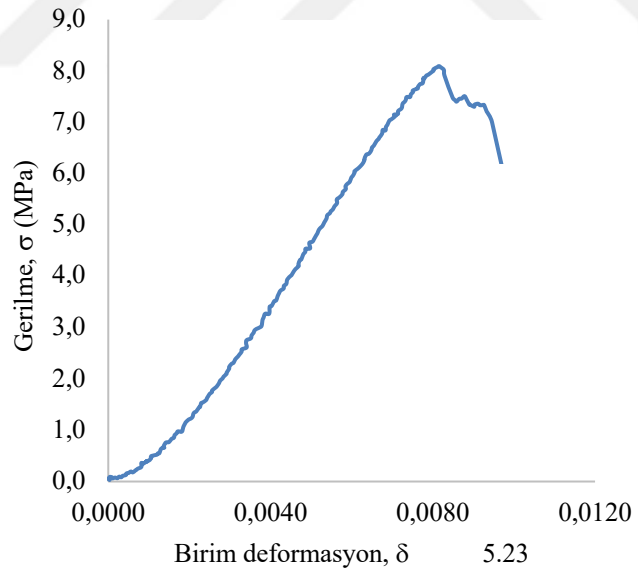
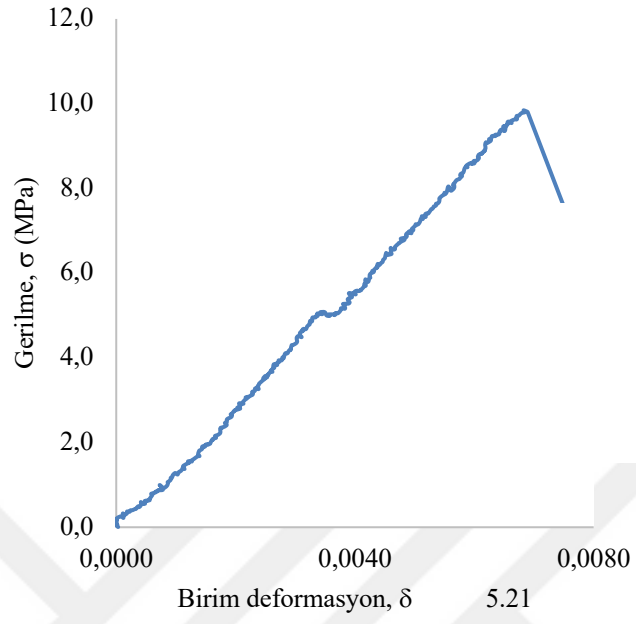
100°C



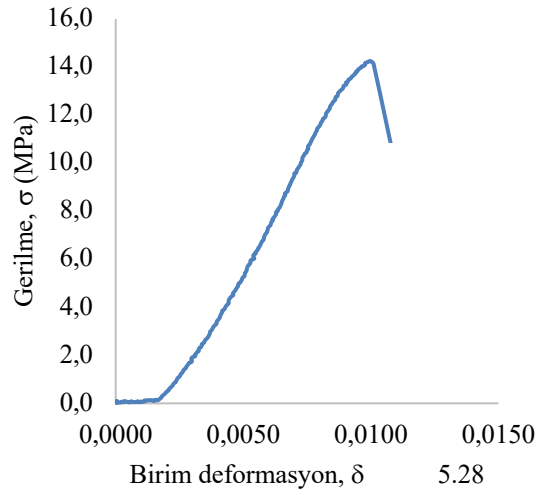
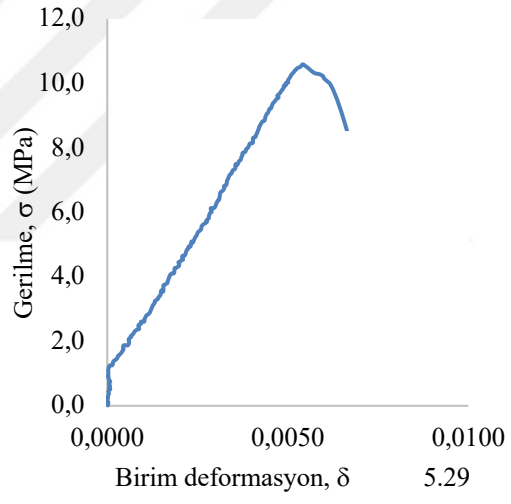
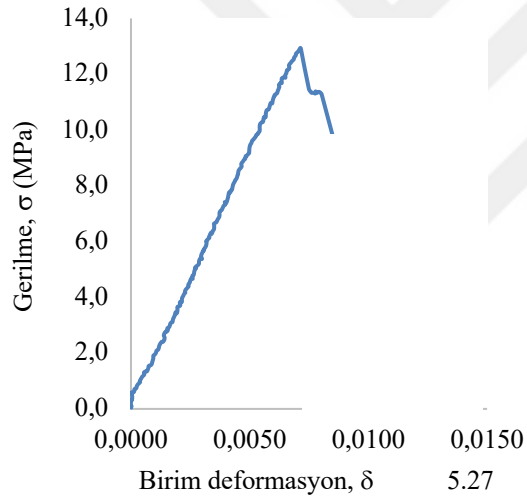
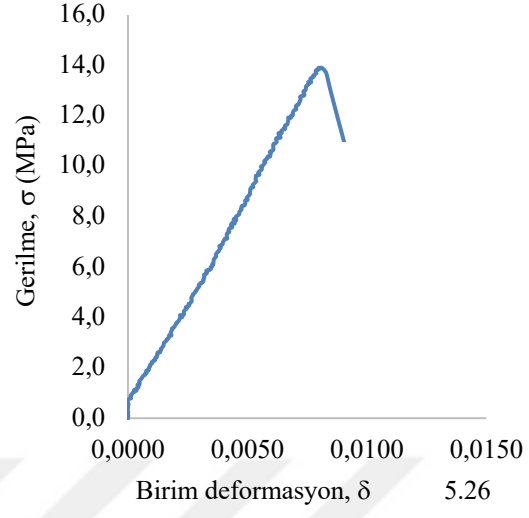
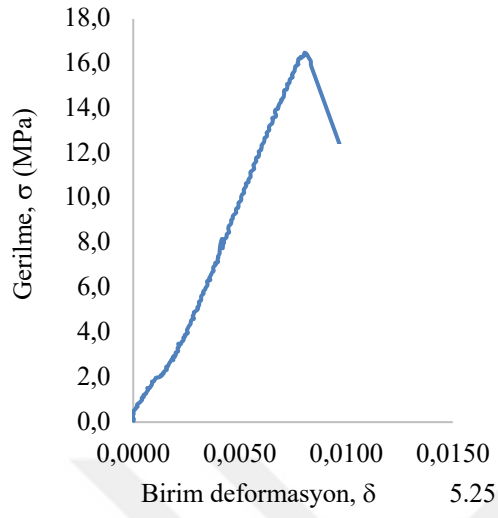
200°C



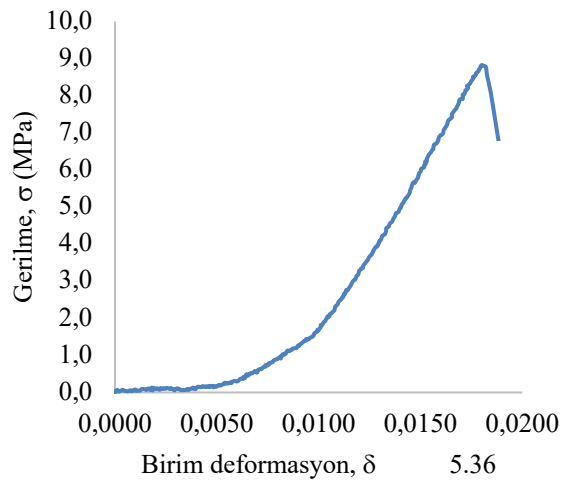
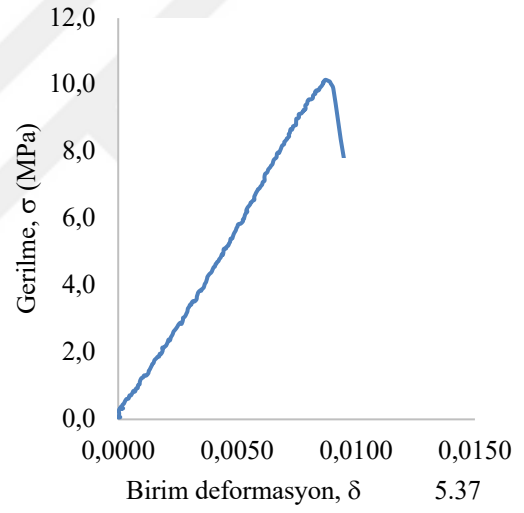
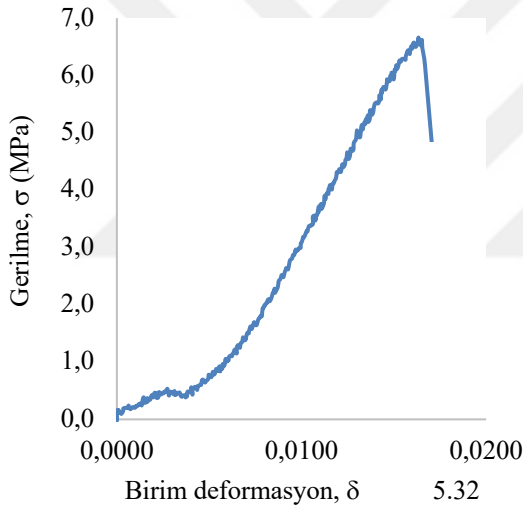
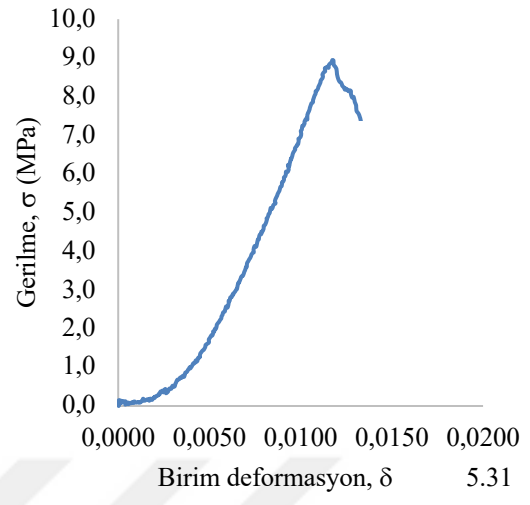
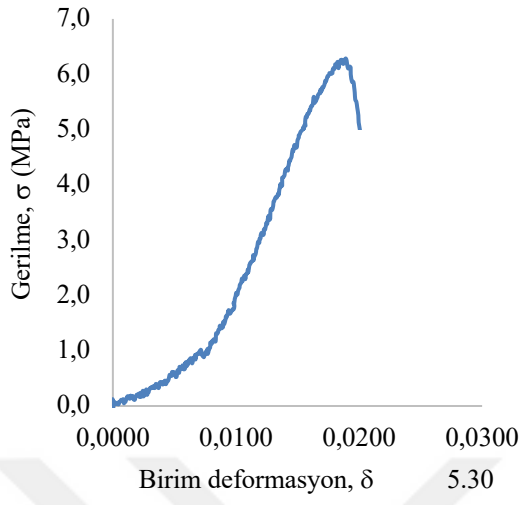
400°C



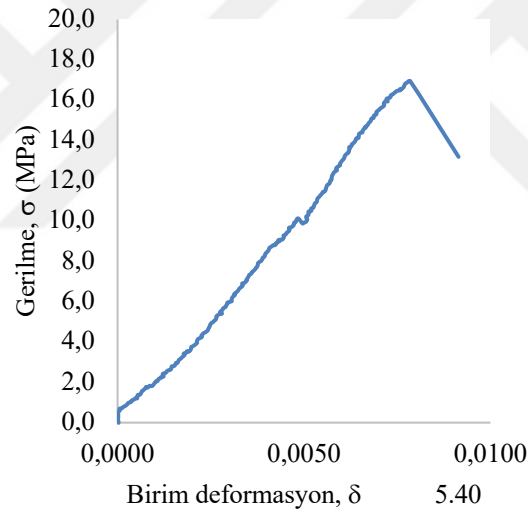
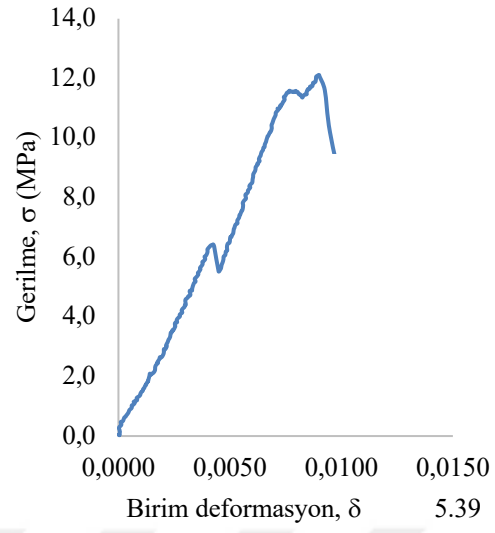
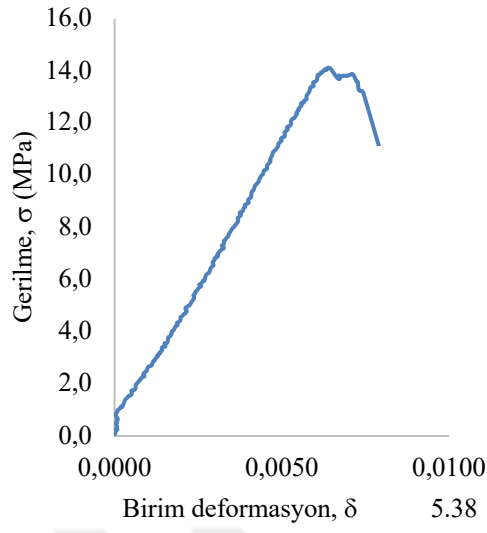
600°C



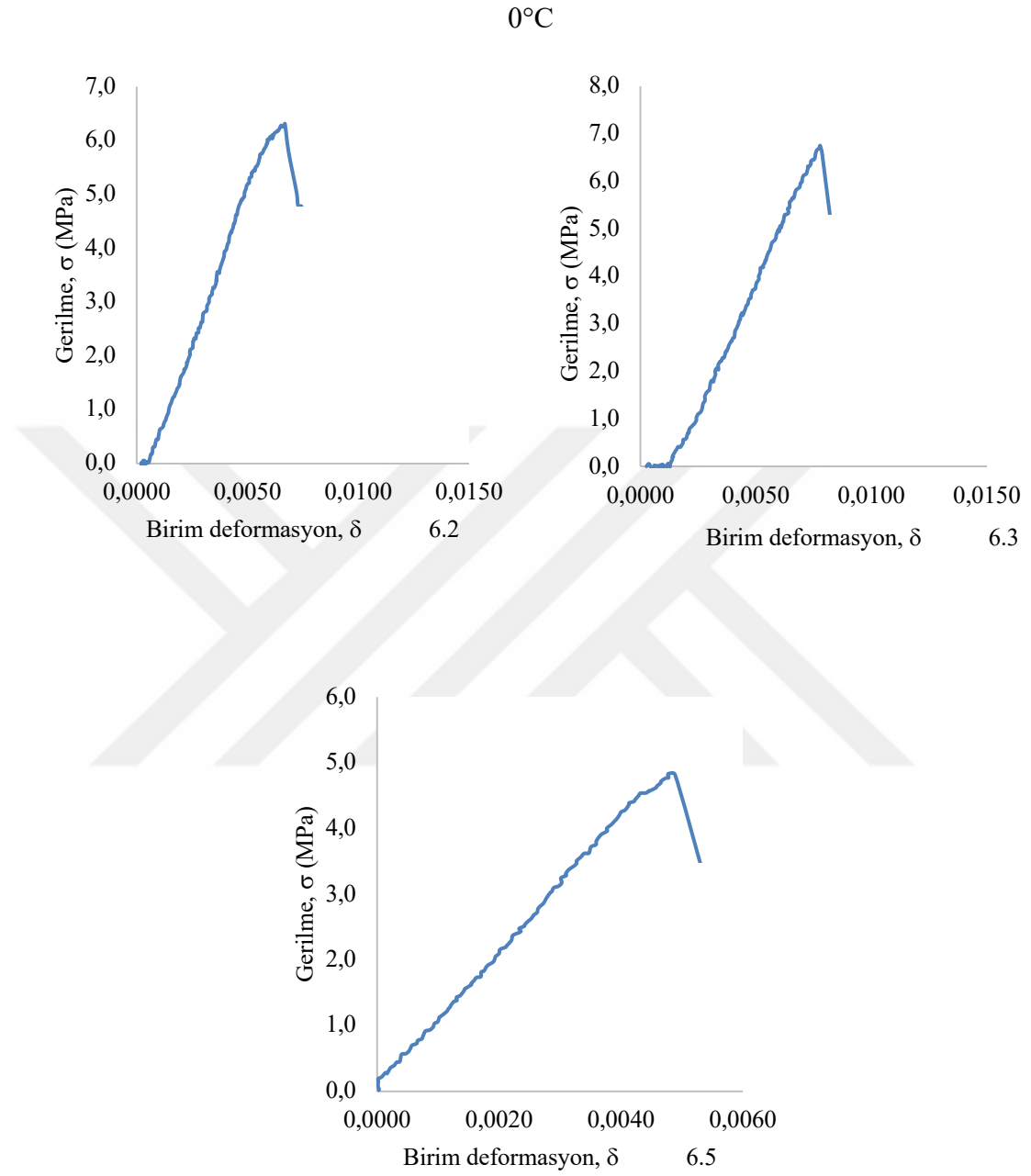
800°C



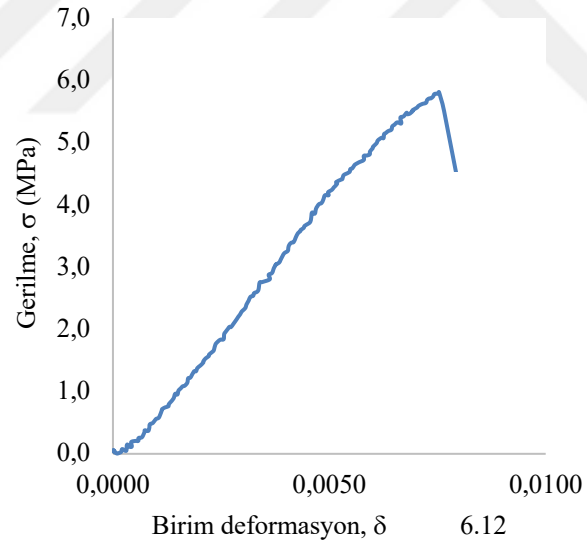
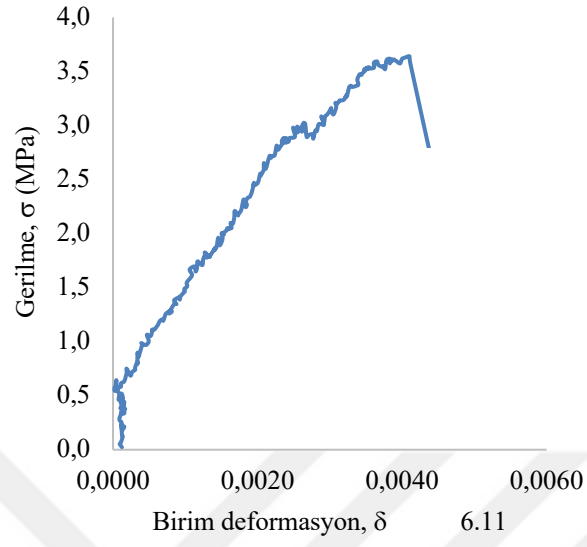
1000°C



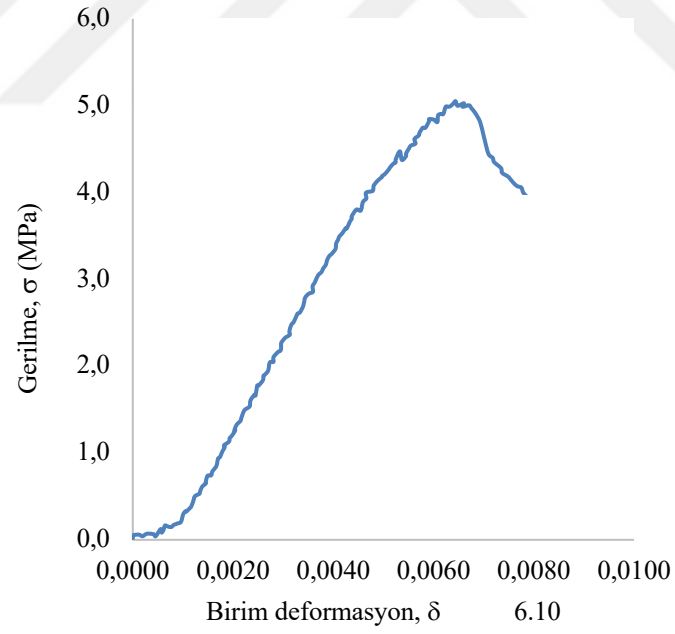
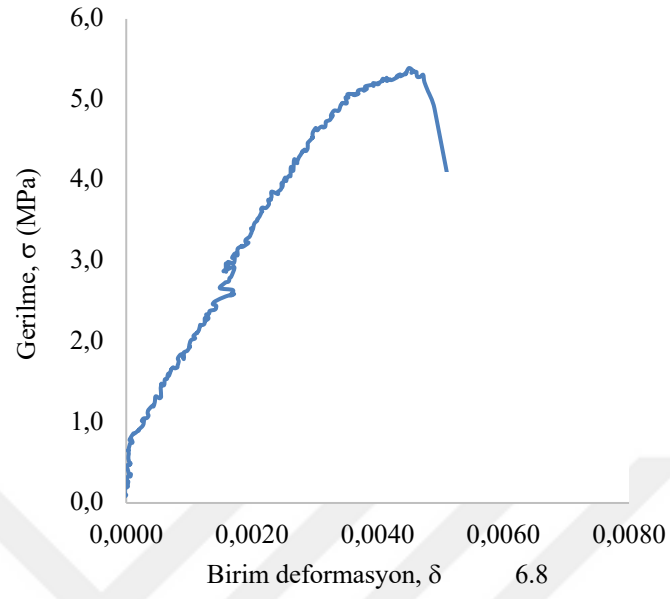
Ek-2f: İgnimbirit 6 örneğine ait 0-800°C arasındaki σ – δ Grafikleri.



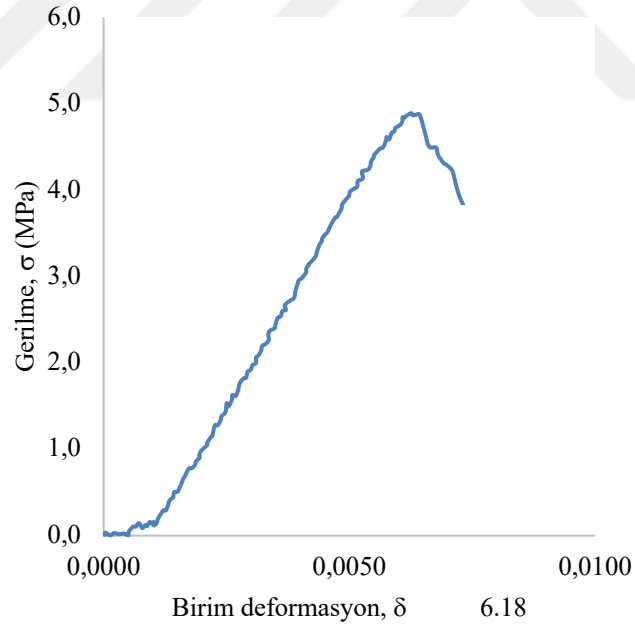
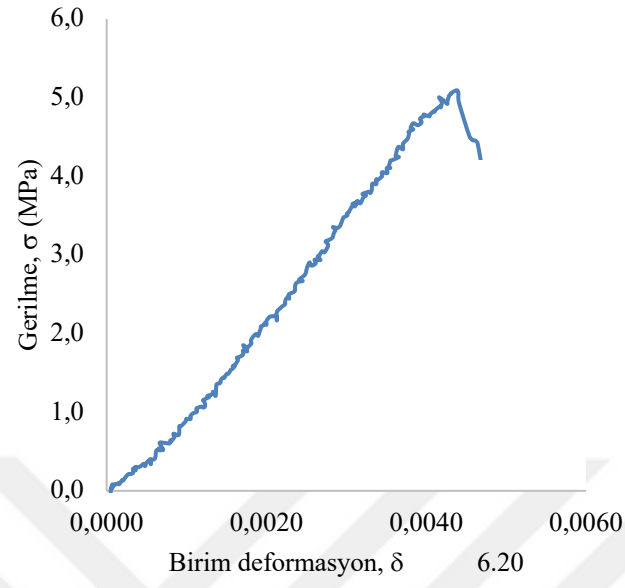
100°C



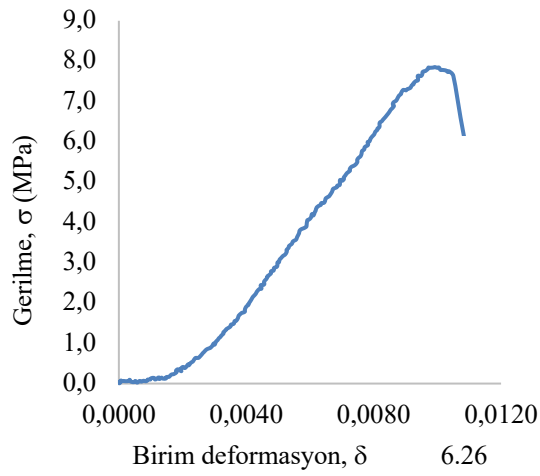
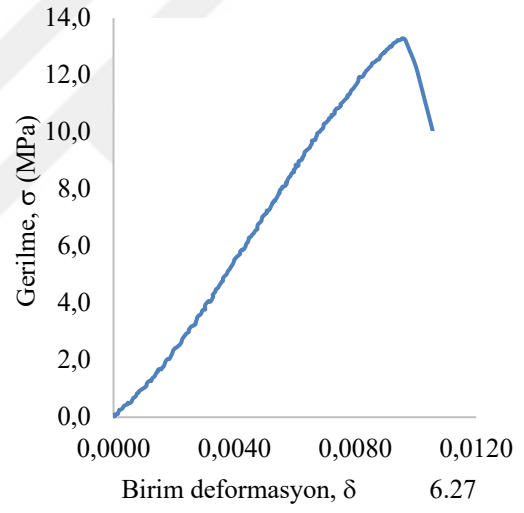
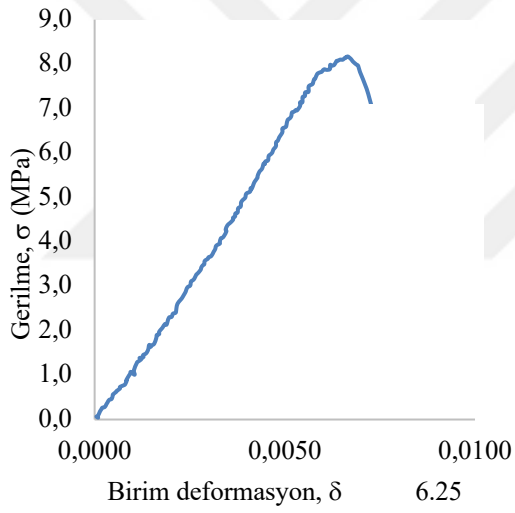
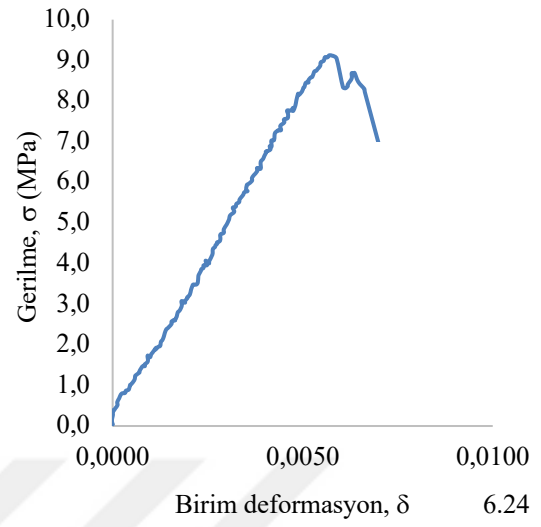
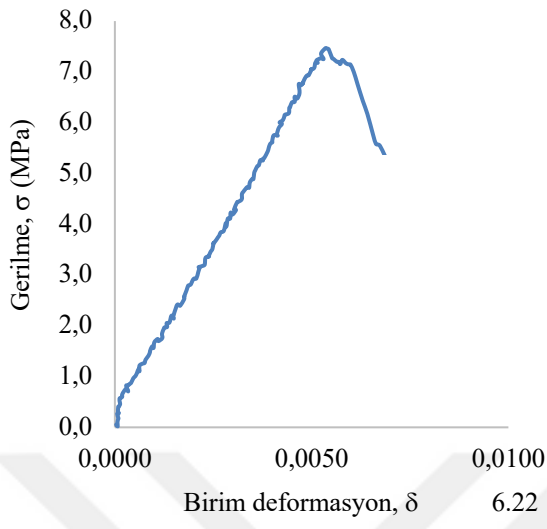
200°C



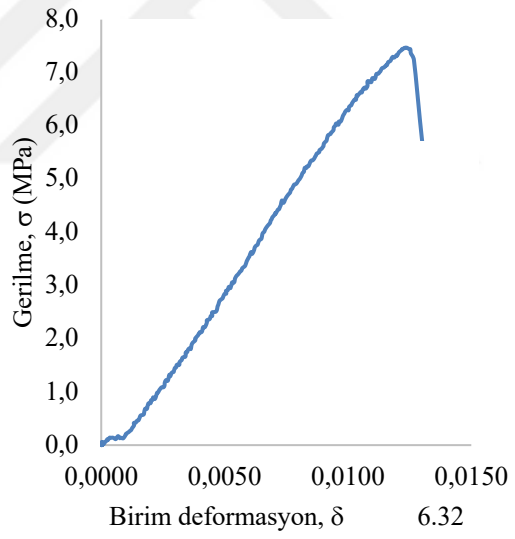
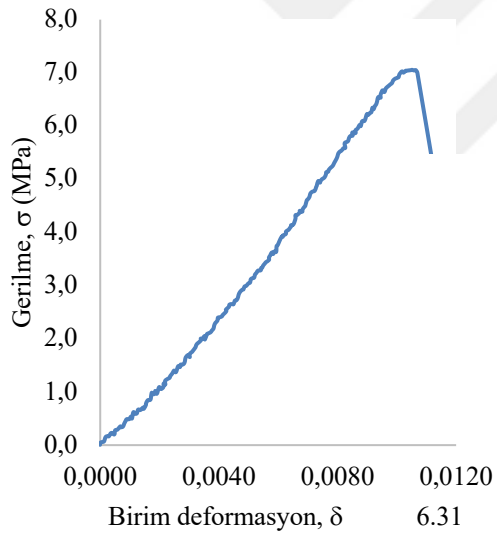
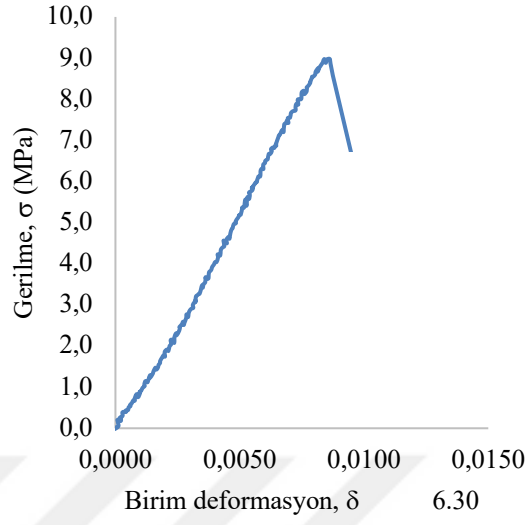
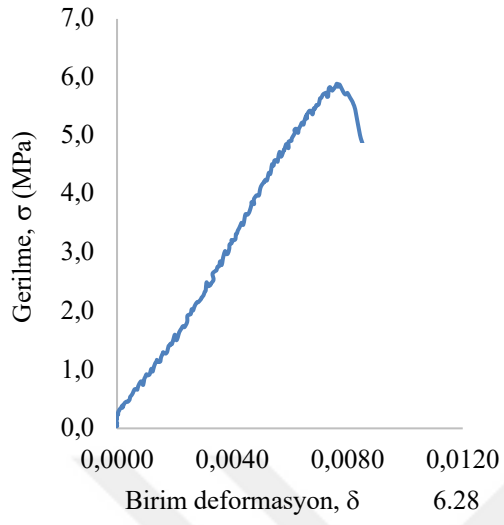
400°C



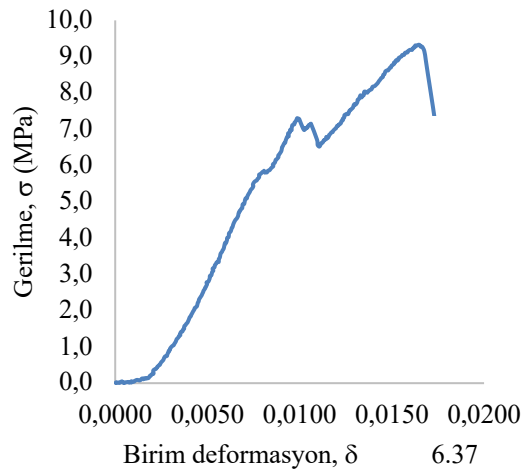
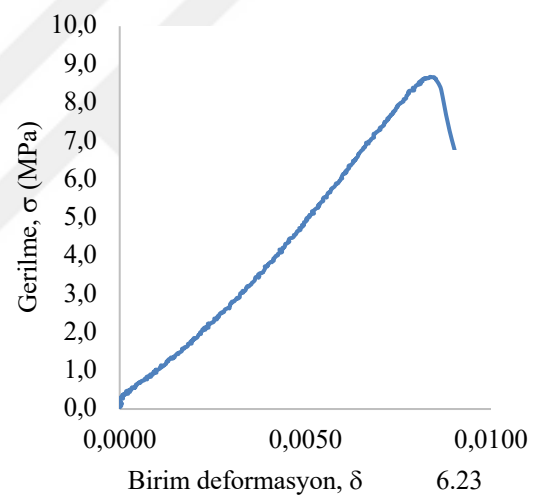
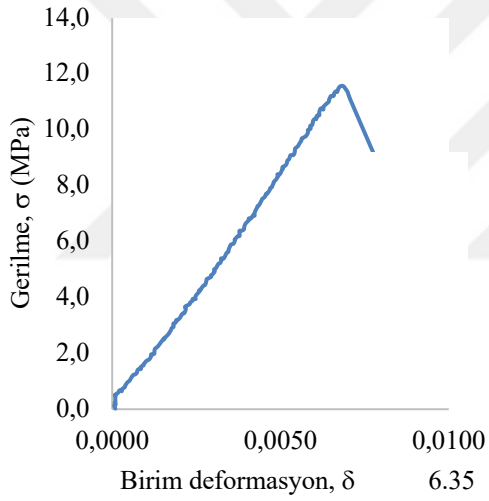
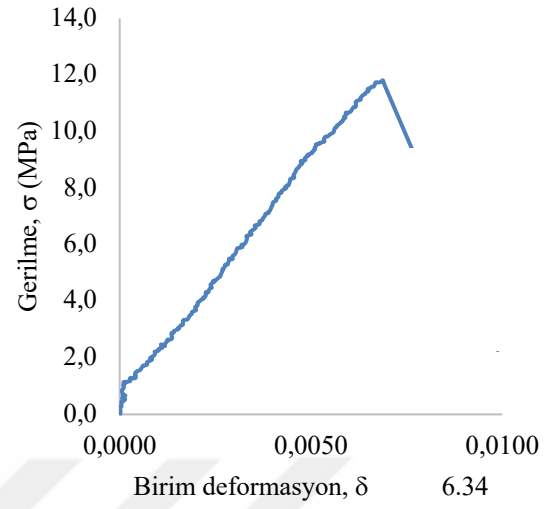
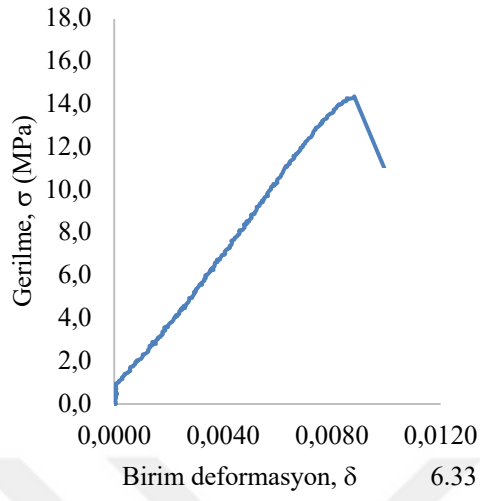
600°C



800°C

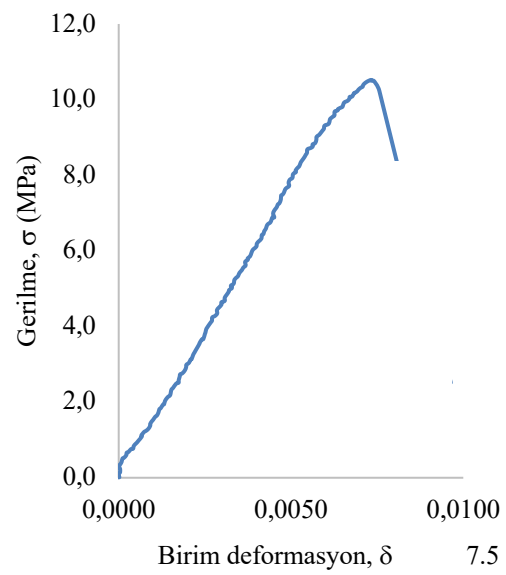
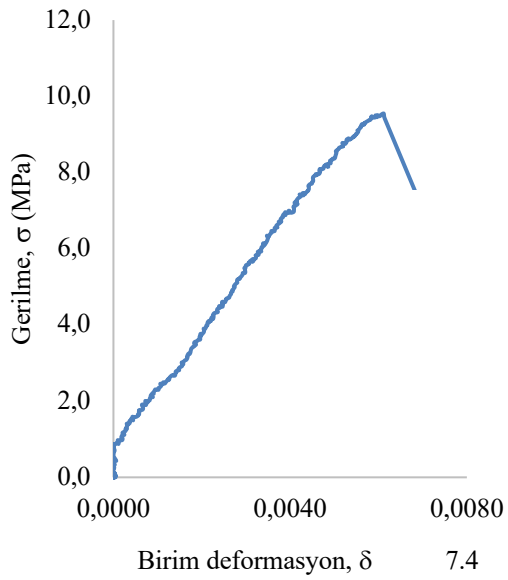
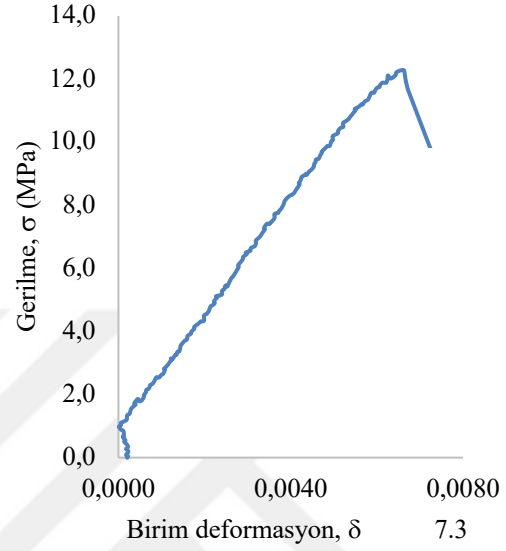
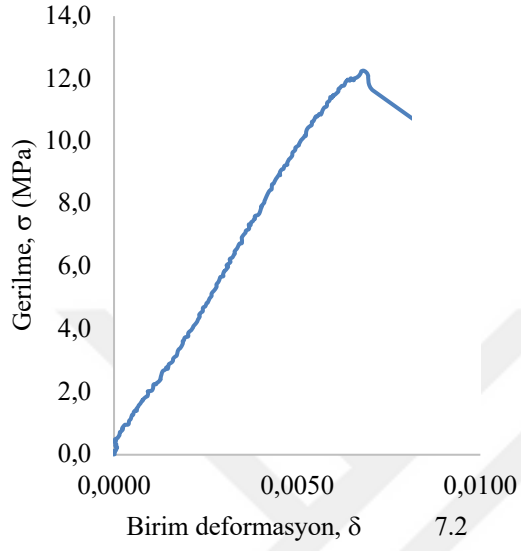


1000°C

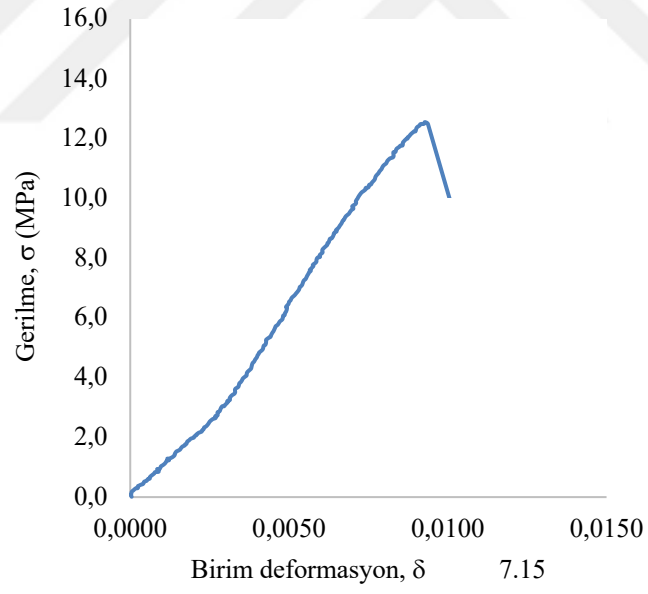
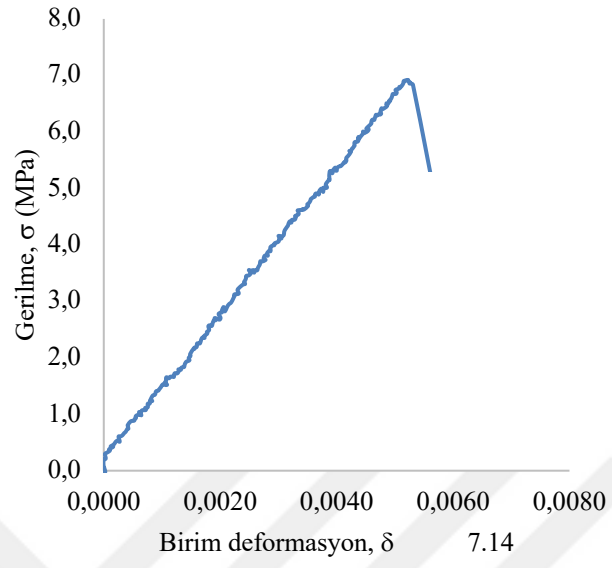


Ek-2g: İğnimbirit 7 örneğine ait 0-800°C arasındaki σ - δ Grafikleri.

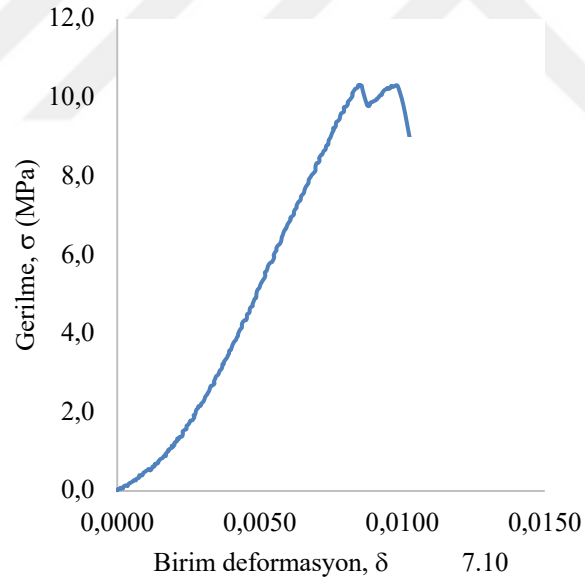
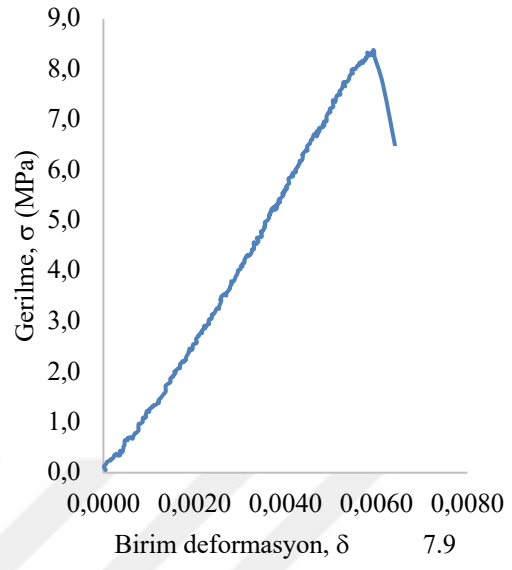
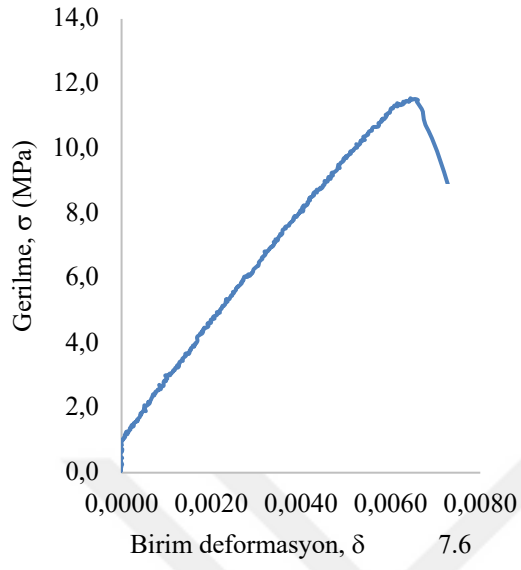
0°C



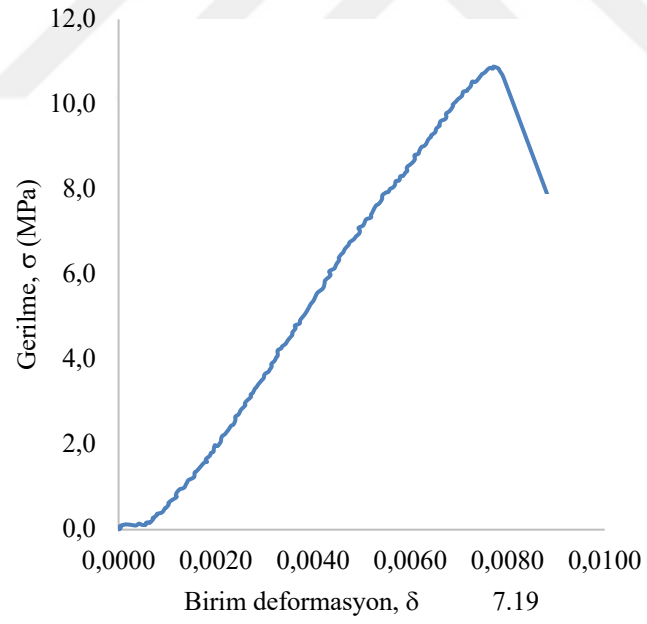
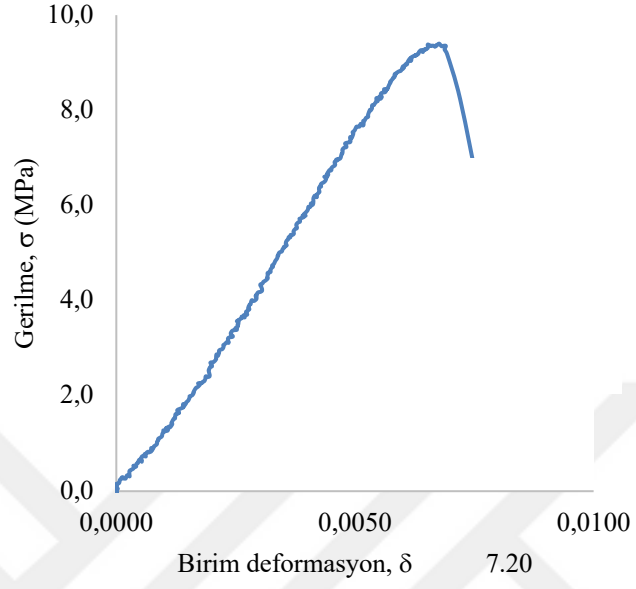
100°C



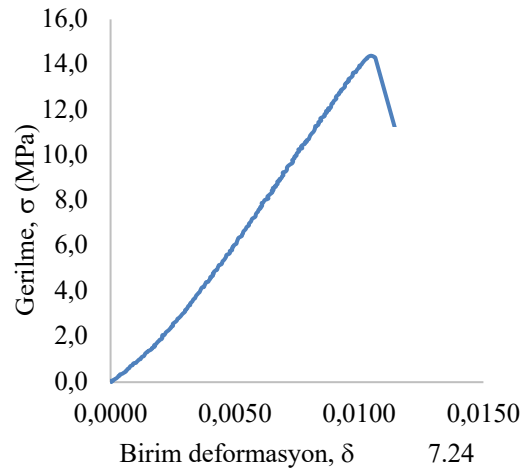
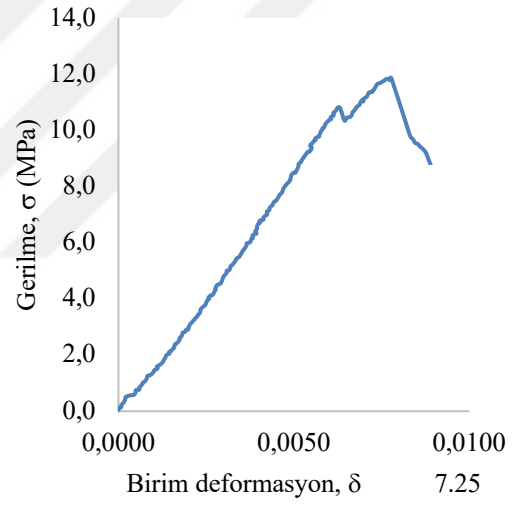
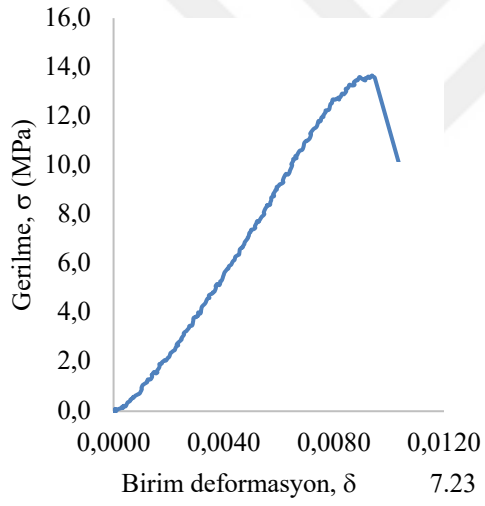
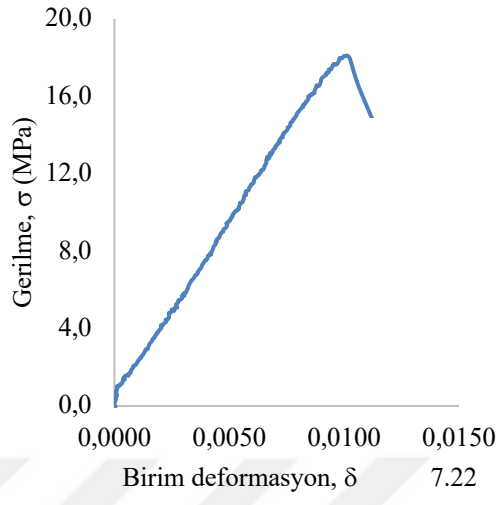
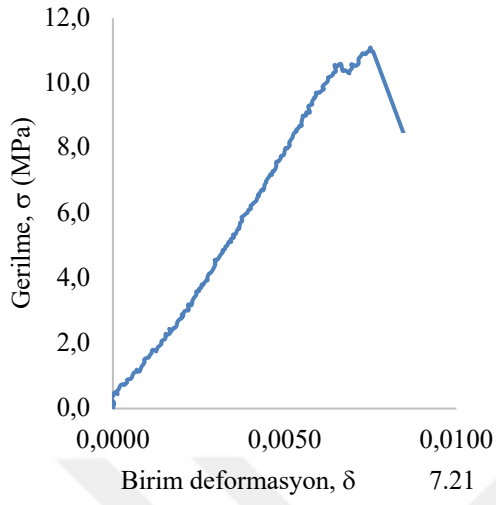
200°C



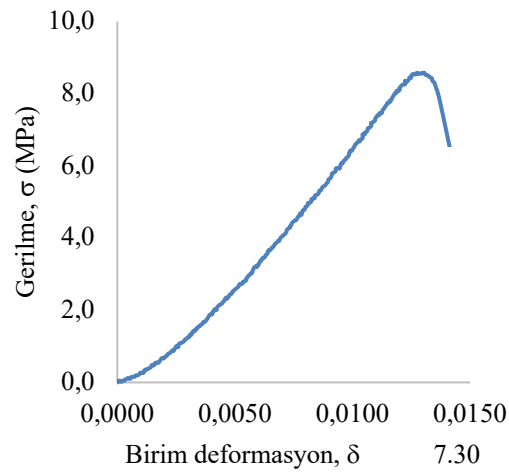
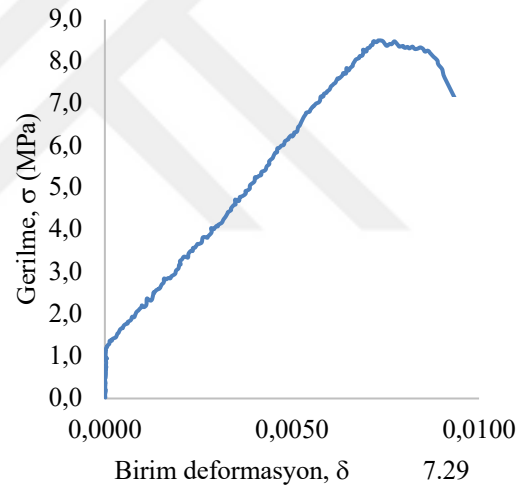
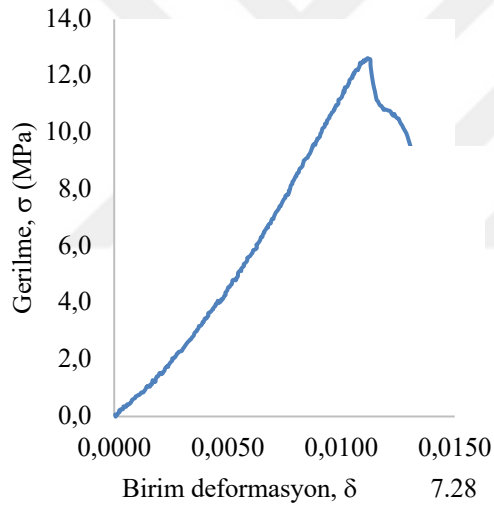
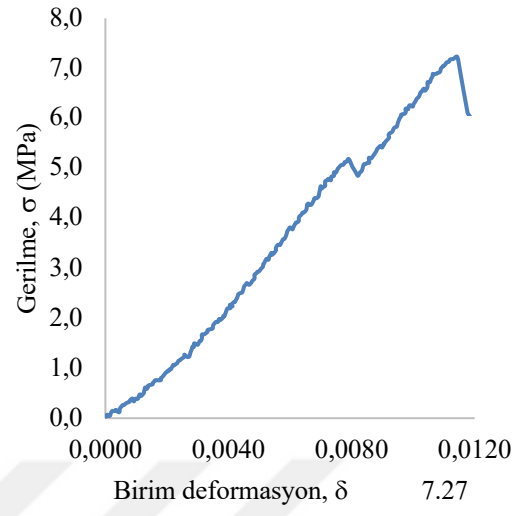
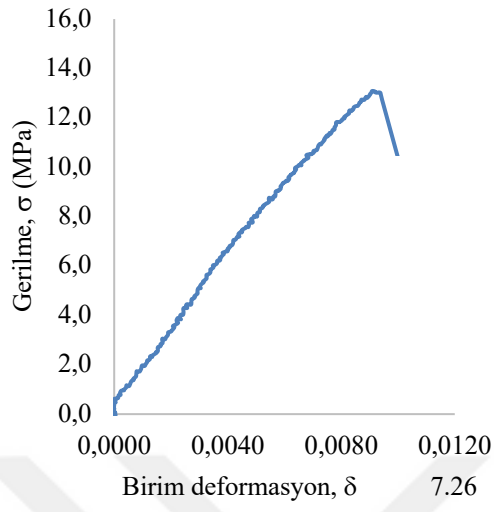
400°C



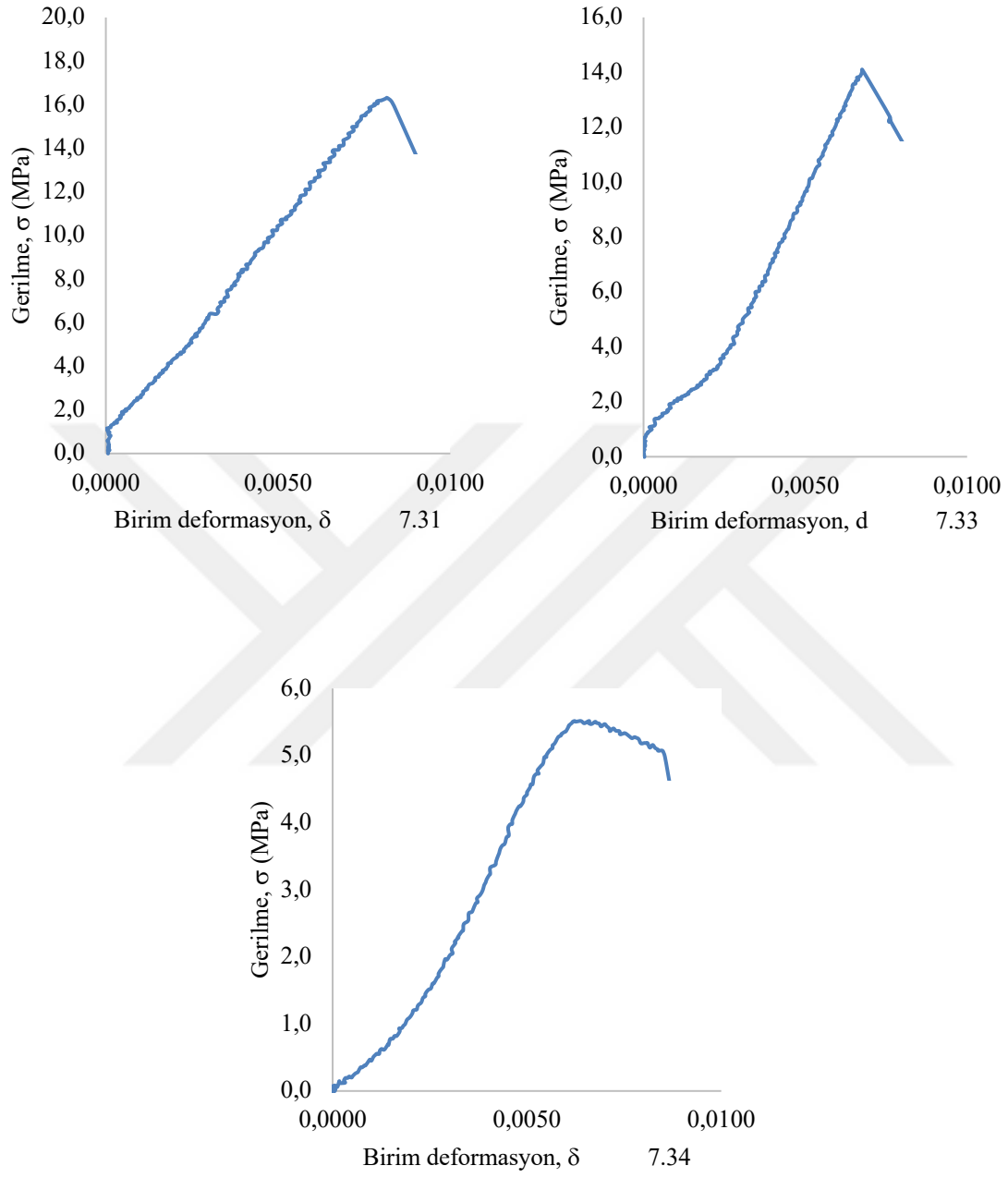
600°C



800°C

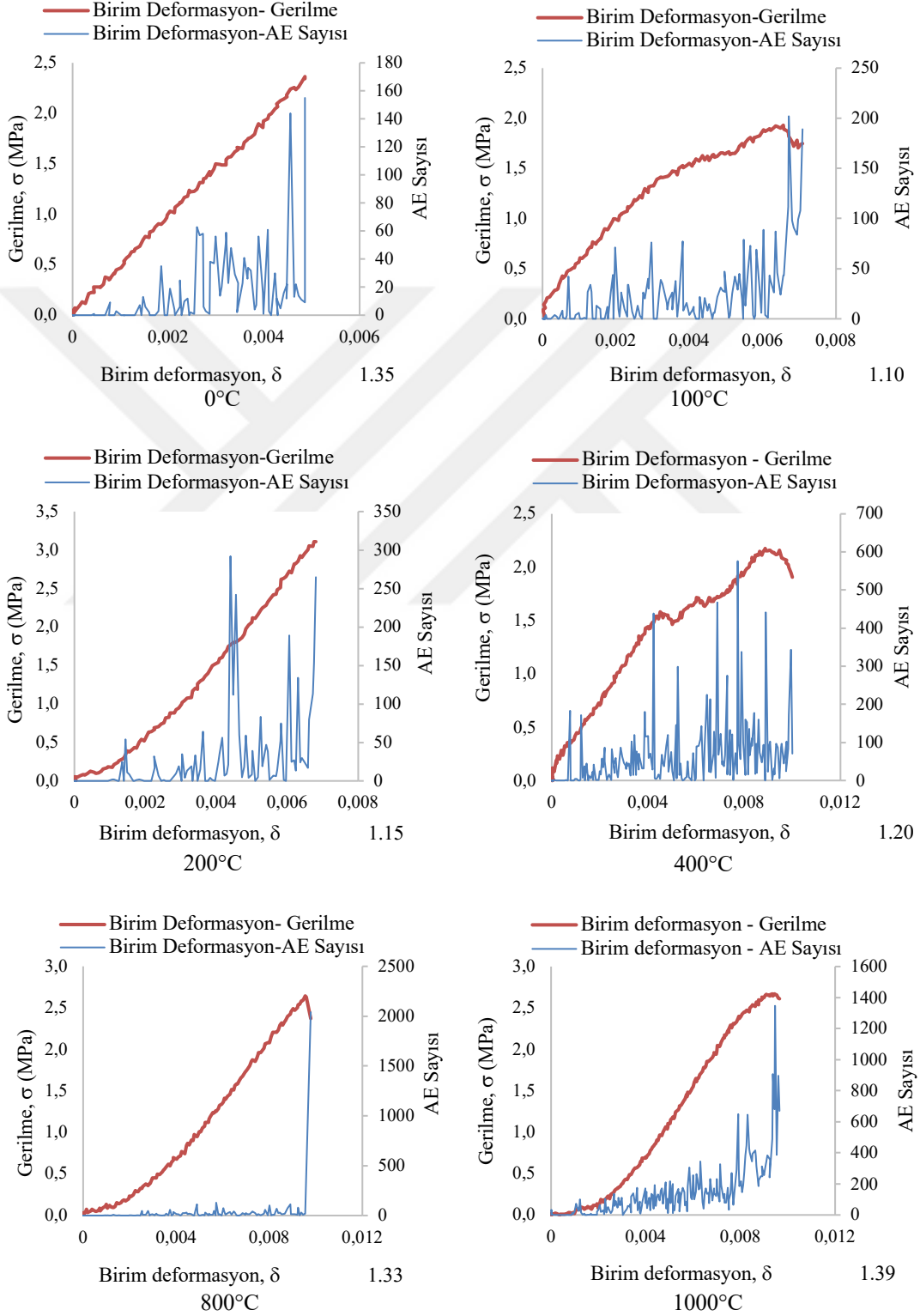


1000°C

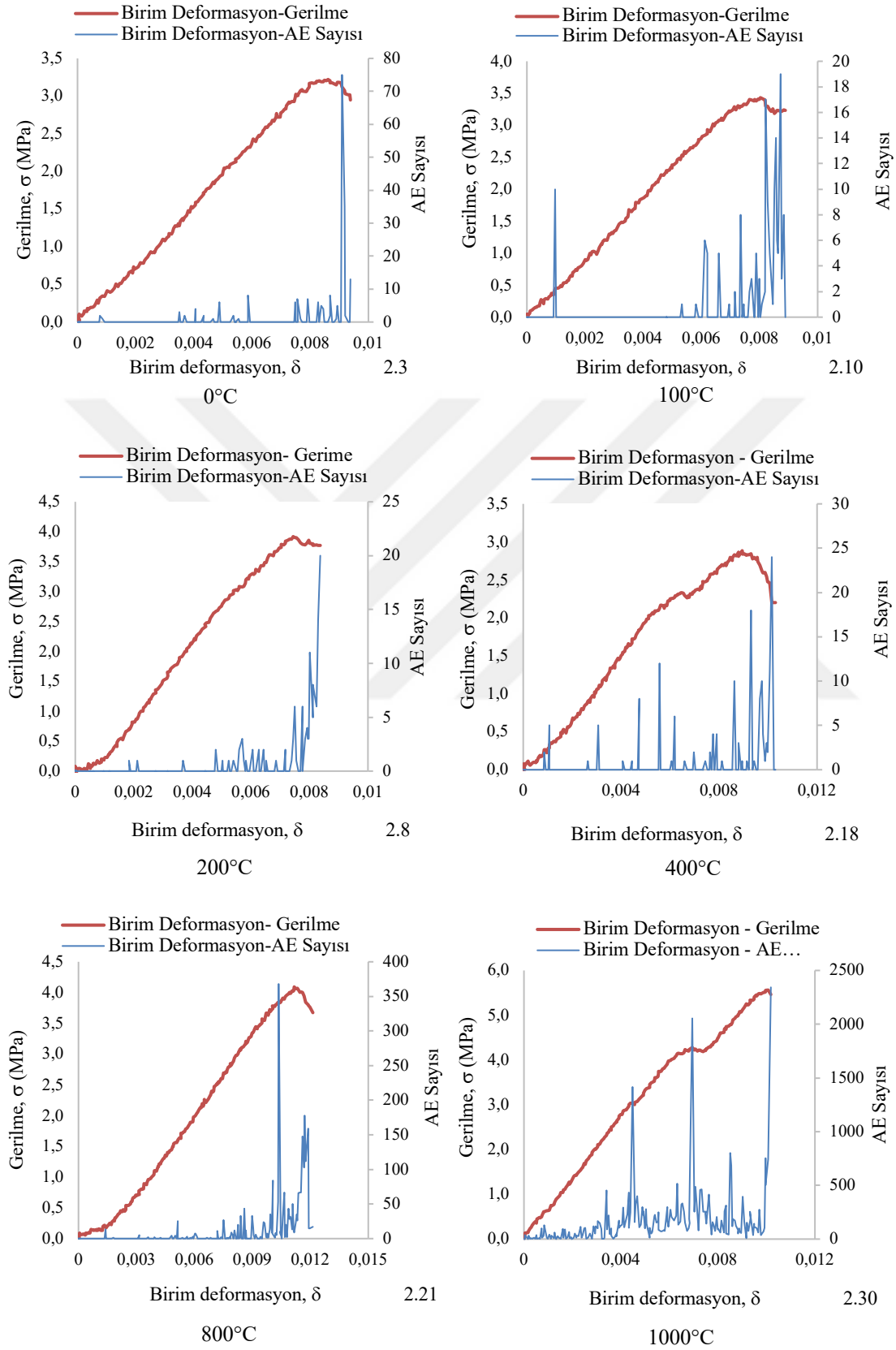


EK-3. İğnimbirit Örneklerinin Farklı Sıcaklıklarda Gerçekleşen Gerilme- Birim Deformasyon -AE Sayısı Grafikleri

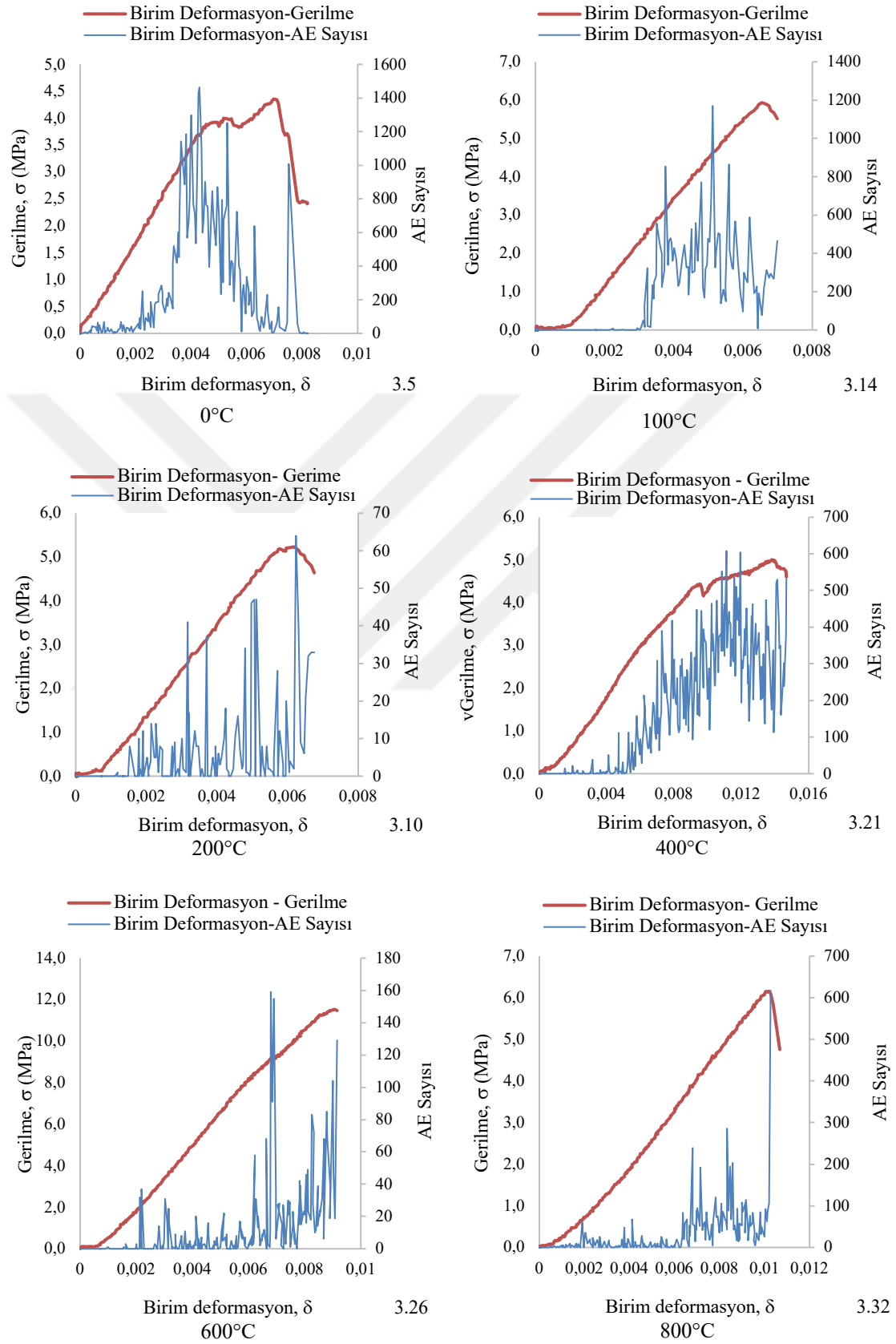
Ek-3a: İğnimbirit 1 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ - AE Grafikleri.

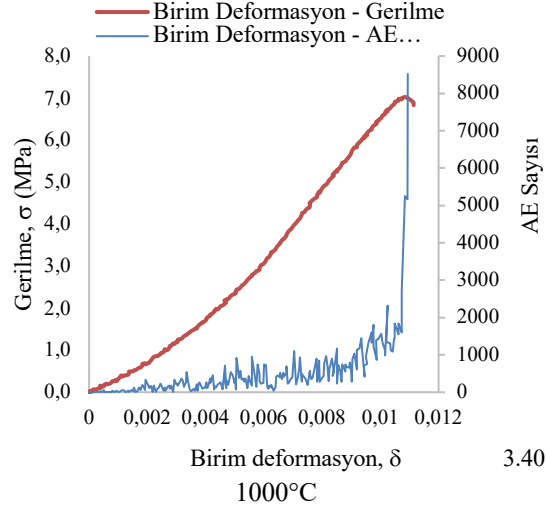


Ek-3b: İğnimbirit 2 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ - AE Grafikleri.

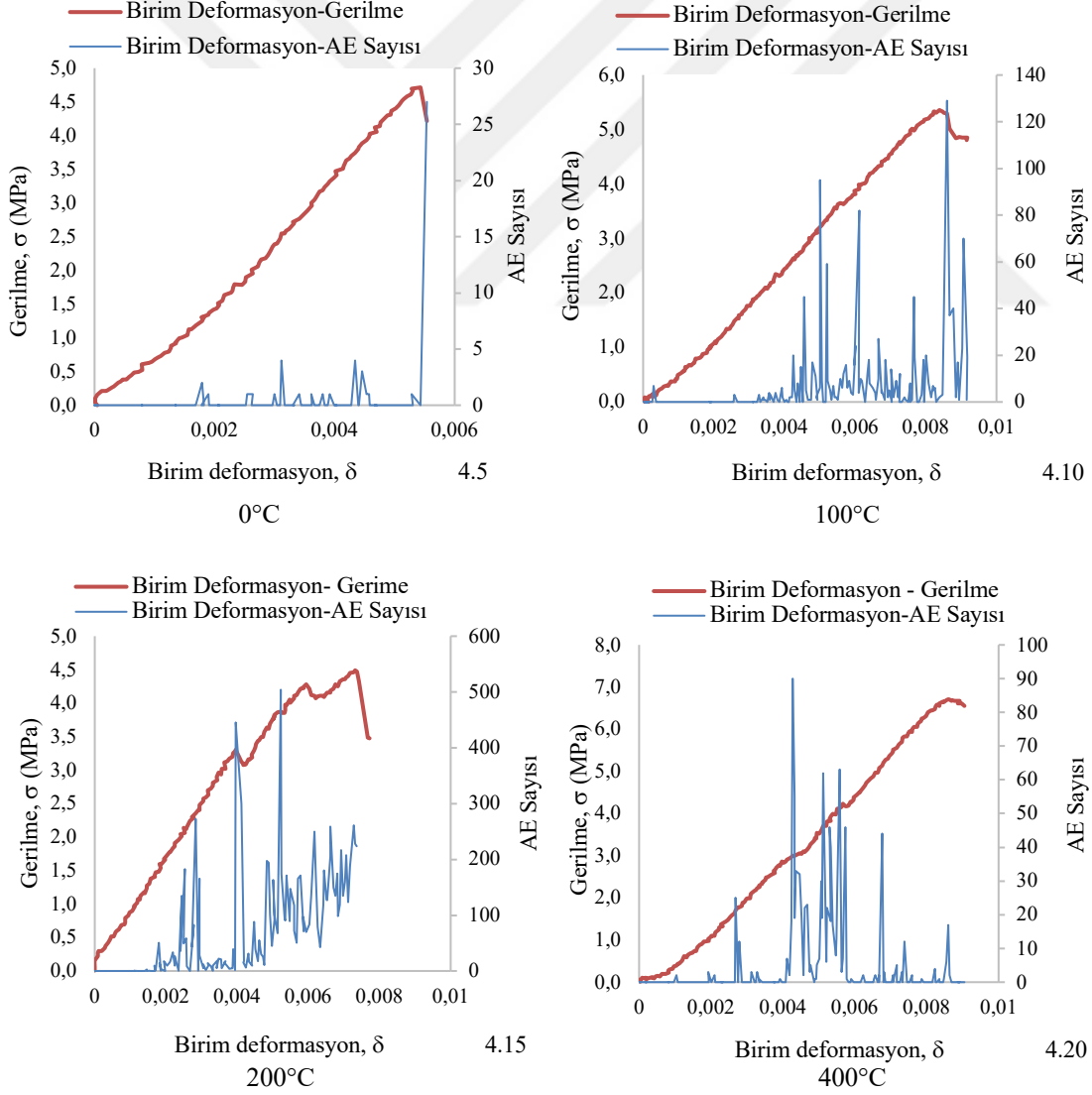


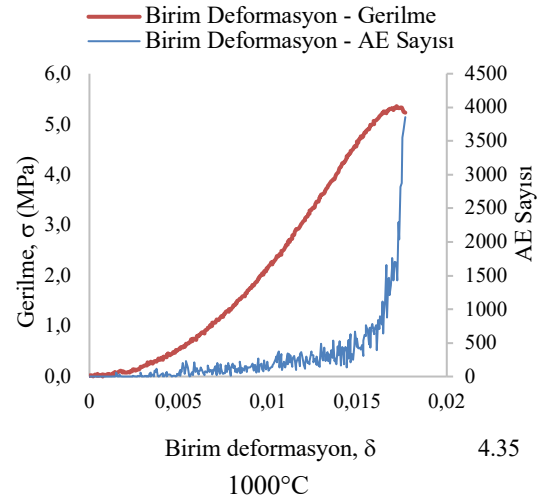
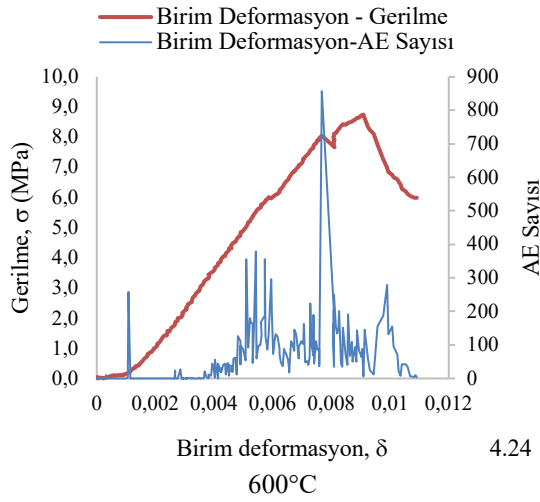
Ek-3c: İğnimbirit 3 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ - AE Grafikleri.



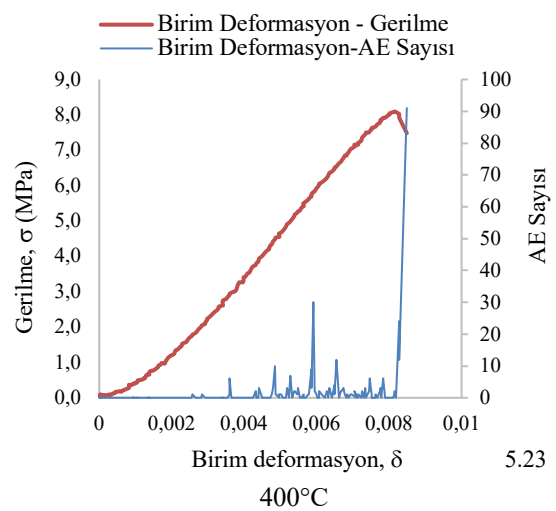
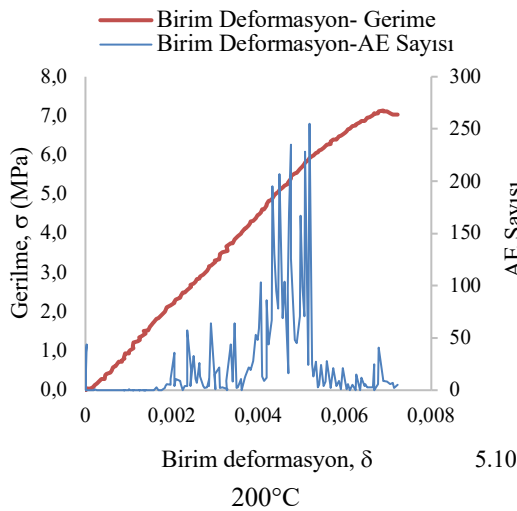
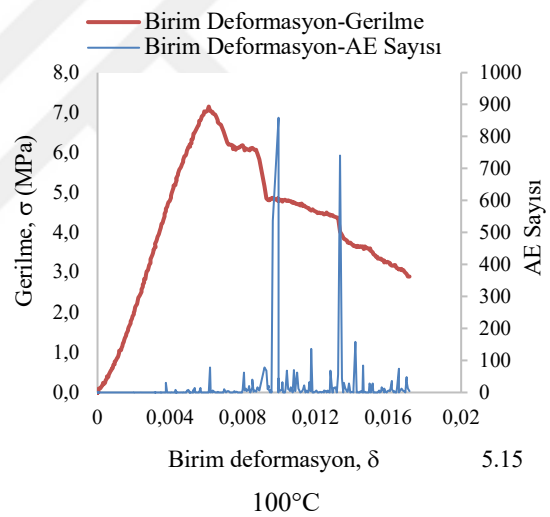
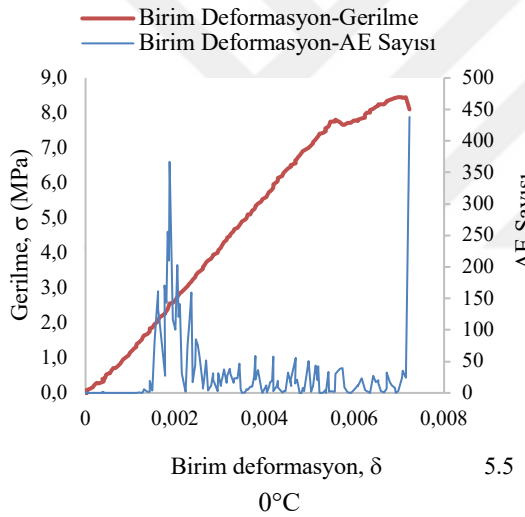


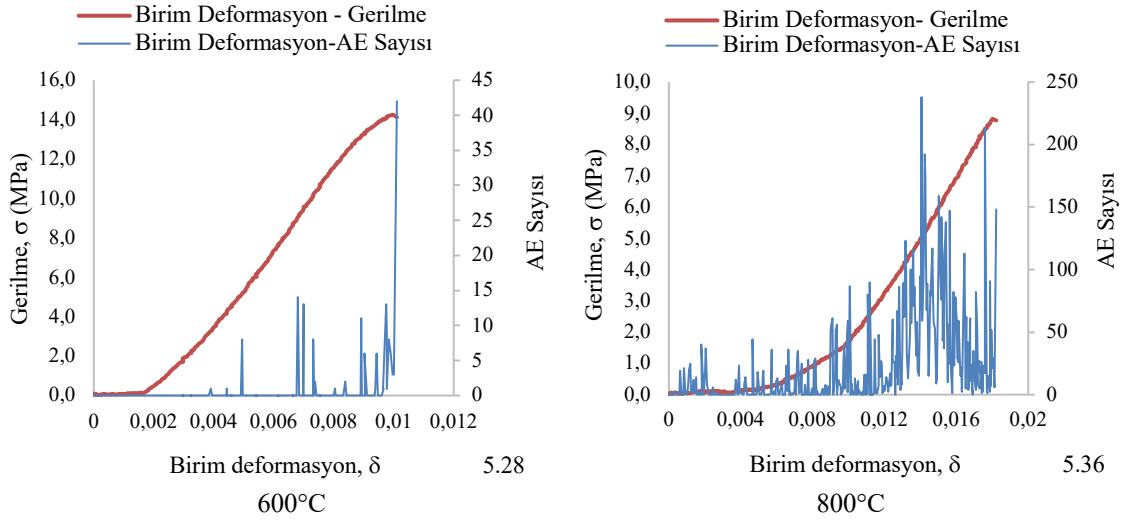
Ek-3d: İğnimbirit 4 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ - AE Grafikleri.



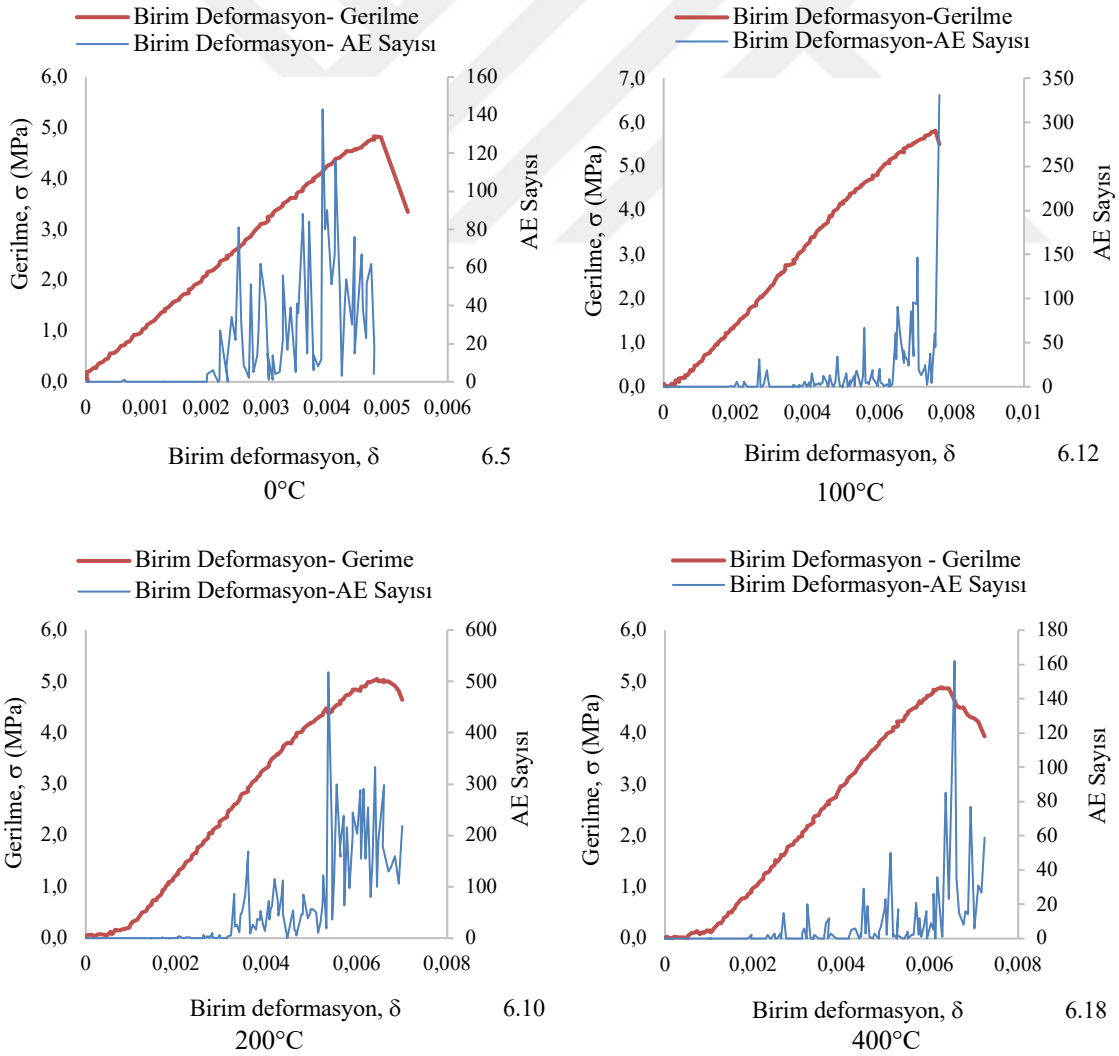


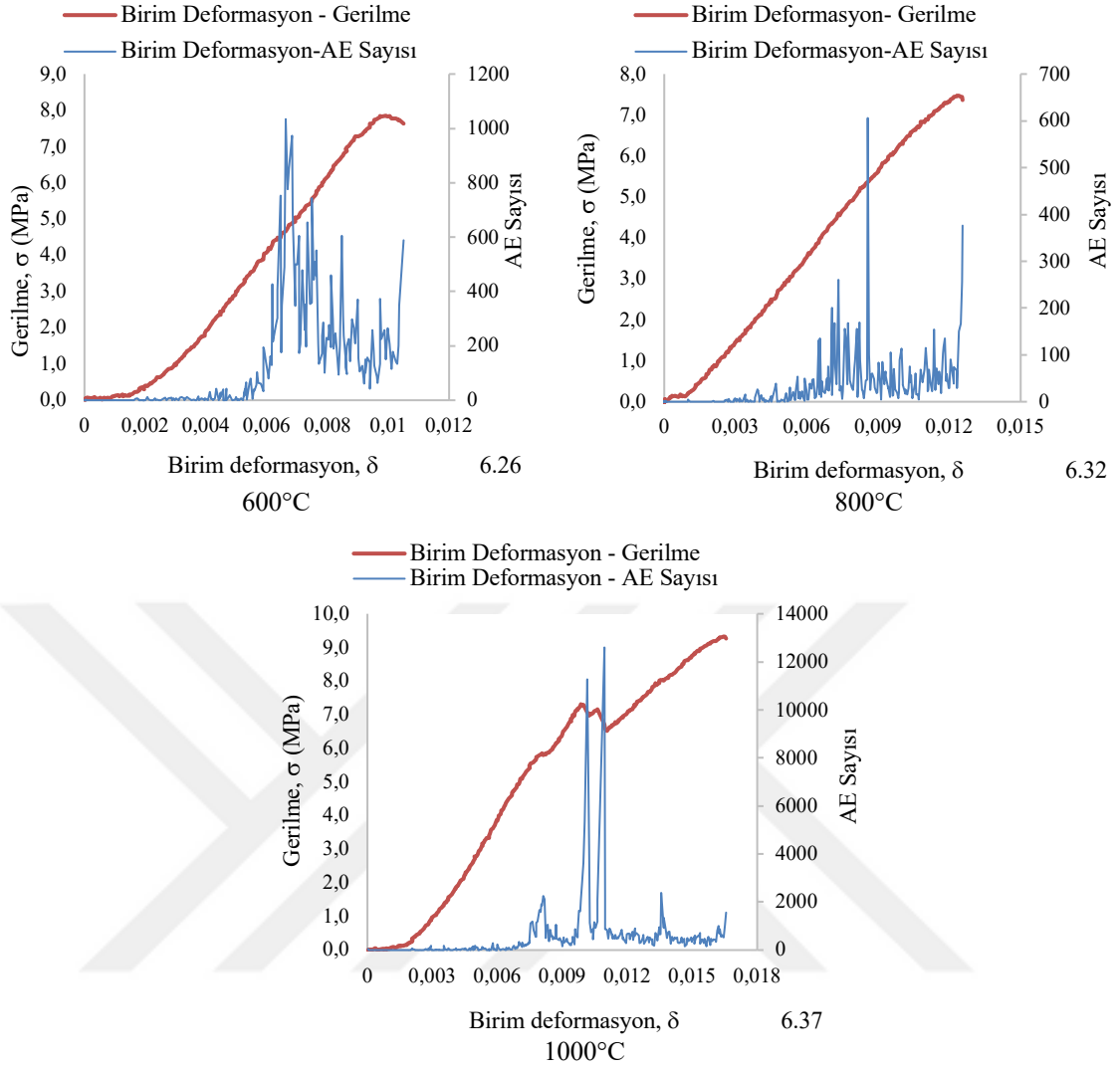
Ek-3e: İğnimbirit 5 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ - AE Grafikleri.





Ek-3f: İğnimbirit 6 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ - AE Grafikleri.





Ek-3g: İğnimbirit 7 örneğine ait 0-1000°C arasındaki σ - δ - AE Grafikleri.

