

**MAGMATİK KAYAÇLARI MİKRODALGAYA MARUZ
BIRAKMANIN CERCHAR AŞINDIRICILIĞI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATING THE EFFECTS OF MICROWAVE
TREATMENT ON THE CERCHAR ABRASIVITY FOR
IGNEOUS ROCKS**

EGEMEN SAYGIN

Prof. Dr. Sair KAHRAMAN
Tez Danışmanı

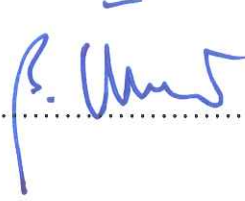
Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2019

EGEMEN SAYGIN' ın hazırladığı “Magmatik Kayaçları Mikrodalgaya Maruz Bırakmanın Cerchar Aşındırıcılığı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER

Başkan



Prof. Dr. Sair KAHRAMAN

Danışman



Prof. Dr. Yılmaz ÖZÇELİK

Üye




Doç. Dr. Mustafa FENER

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Emre YILMAZKAYA

Üye



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

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Ailem'e

ETİK

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

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

beyan ederim.

17.06.2019

EGEMEN SAYGIN



YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

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

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

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

17 / 06 / 2019

(İmza)

EGEMEN SAYGIN

E. Saygin

ÖZET

MAGMATİK KAYAÇLARI MİKRODALGAYA MARUZ BIRAKMANIN CERCHAR AŞINDIRICILIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Egemen SAYGIN

Yüksek Lisans, MADEN MÜHENDİSLİĞİ Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sair KAHRAMAN

Haziran 2019, 75 sayfa

Kayaç kazı teknolojilerindeki önemli gelişmelere rağmen, sert ve aşındırıcı kayaçların kazılmasında halen düşük ilerleme hızı ve yüksek keski aşınması gibi bazı problemler bulunmaktadır. Özellikle aşındırıcı kayaç kazısında keski aşınmaları, maliyeti arttırma yanında keski değişimi esnasındaki duraklamalardan dolayı ilerleme hızını da düşürmektedir. Dolayısıyla keski aşınmalarının azaltılması kazı teknolojisi bakımından önem arz etmektedir. Kayaç aşındırıcılığını ölçmede sıklıkla kullanılan ve keski tüketimini tahmin etmeye de yarayan en yaygın yöntemlerden birisi Cerchar aşındırıcılık deneyidir. Bu tez çalışmasında, mikrodalgaya maruz bırakmanın magmatik kayaçların Cerchar aşındırıcılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada magmatik kayaçlar (granit, siyenit ve gabro) üzerinde mikrodalga uygulanmadan önce 9 farklı numune üzerinde Cerchar aşındırıcılık deneyleri yapılmıştır. Sonra 180s süreyle 2 kW ve 6 kW güçte mikrodalgaya maruz bırakılmış numuneler üzerinde Cerchar aşındırıcılık deneyleri tekrarlanmıştır. Daha sonra, mikrodalgaya maruz bırakılmamış ve bırakılmış kayaçların Cerchar aşındırıcılık değerleri karşılaştırılmıştır. Magmatik kayaçları mikrodalgaya maruz bırakmanın aşındırıcılık indeks değerini düşürdüğü görülmüştür. Deneye tabi tutulan kayaçlar için,

uygulanan mikrodalga gücü ve aşındırıcılık indeksi arasında ters orantı olduğu saptanmıştır. Ayrıca, mikrodalga enerjisinin kayaca etki derecesinin kayacın mineral içeriğine bağlı olduğu gerçeği dikkate alınarak, elde edilen sonuçlar numunelerin mineralojisi açısından değerlendirilmiştir. Bir kayaç numunesinde metalik mineral yüzdesi (%2 manyetit, %3 pirit) çok az bile olsa mikrodalgaya maruz bırakılan kayacın sıcaklığını çok arttırdığı (~900 °C) ve aşındırıcılığını düşürdüğü (~%60) gözlenmiştir. Sonuç olarak, uygulanan mikrodalga enerjisi ve maruziyet süresine bağlı olarak mikrodalgaya maruz bırakmanın magmatik kayaçların aşındırıcılığı üzerinde önemli etkileri vardır.

Anahtar Kelimeler: Cerchar Aşındırıcılığı, Mikrodalga Enerjisi, Magmatik Kayaçlar, Mineralojik Bileşim.

ABSTRACT

INVESTIGATING THE EFFECTS OF MICROWAVE TREATMENT ON THE CERCHAR ABRASIVITY FOR IGNEOUS ROCKS

Egemen SAYGIN

Master of Science, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sair KAHRAMAN

June 2019, 75 pages

Despite the significant advances in rock excavation technologies, the excavation of hard and abrasive rocks has still some problems such as low penetration rate and high tool wear. Especially in the abrasive rock excavation, in addition to the high cost, the tool wear result in low advance rate due to downtimes during the replacement of tools. Therefore, the reduction of cutter wear is important in terms of excavation technology. One of the most common methods used to measure rock abrasiveness and to estimate cutter consumption is the Cerchar abrasiveness test. In this thesis, the effects of microwave treatment on the Cerchar abrasivity of magmatic rocks were investigated. First, Cerchar abrasion tests were performed on the 9 different magmatic rocks (granite, syenite and gabbro) without microwave treatment. Then, Cerchar abrasivity experiments were repeated on the samples exposed to microwave irradiation at 2 kW and 6 kW for 180s. After that the Cerchar abrasivity values of the untreated and treated by microwave were compared. It was seen that the treatment by microwave decreased the abrasivity values. It was found that there was an inverse relation between the applied microwave power and the abrasiveness index for the

tested rocks. Moreover, considering the fact that the degree of influence of microwave energy on the rocks depends on the mineral content of the rock, the obtained results were evaluated by taking into consideration the mineralogy of the samples. It was observed that even if the percentages of metallic minerals in a rock sample are too low (2% magnetite, 3% pyrite), they increase the temperature of the rock (~900 °C) and decrease its abrasivity (~60%). Concluding remark is that microwave treatment has important effect on the abrasivity of igneous rocks depending on the applied power and exposure duration.

Keywords: Cerchar abrasivity, Microwave energy, Igneous rocks, Mineralogical composition.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması kısmi olarak 216M003 no'lu TUBİTAK projesi kapsamında yürütülmüştür.

Bu nedenle TUBİTAK'a,

Tez çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen, tez çalışmamın her aşamasında yol gösteren, yönlendiren ve tecrübesiyle karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemi sağlayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Sair Kahraman'a,

Yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Bahtiyar Ünver'e, Prof. Dr. Yılmaz Özçelik'e, Doç. Dr. Mustafa Fener'e ve Dr. Öğr. Üyesi Emre Yılmazkaya'ya,

Tez çalışmalarım esnasında bana destek olan Faraz Shoaee'ye ve A. Niyazi Canpolat'a,

Yüksek lisans öğrenim boyunca çalışmalarımı gerçekleştirmek için bana her konuda yardımcı olan Sayın Genel Müdürüm Savaş Şahin'e,

Her zaman yanımda olan ve gösterdikleri özverileri sayesinde karşılaştığım bütün zorlukları aşmama yardım eden anneannem, dedem, annem ve babama,

Tez çalışmalarım süresince bana desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Av. Şükran Büşra Pesen'e

Gizli kahramanlardan Dünder Akın'a,

En içten duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
2.1 Mikrodalga ve Uygulamaları	7
2.2 Mikrodalğanın Kayaçların Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	12
3. KAYAÇ AŞINDIRICILIĞI	19
3.1 Schimazek Aşınma İndeksi.....	19
3.2 Cerchar Aşındırıcılık Testi.....	19
3.3 Cerchar Aşındırıcılık Testi Parametreleri	21
3.3.1 Pin (uç) Sertliği	21
3.3.2 Çizik Uzunluğu	21
3.3.3 Test Tekrarı.....	22
3.3.4 Gerilme Etkisi	22
3.3.5 Numunenin Yüzey Durumu.....	23
3.3.6 Petrografik ve Jeomekanik Özellikler	24
3.3.7 Pin Hareket Hızı ve Sonuçlar Üzerine Etkisi	25
3.3.8 CAI Ölçüm Cihazları ve Metotları	26
3.2.9 Cerchar Aşındırıcılık İndeksini Etkileyen Diğer Parametreler.....	27
3.4 NTNU Kayaç Delinebilirliği Test Sistemi (SINTEF)	27
3.5. LCPC Aşındırıcılık Testi	28
4. MATERYAL VE YÖNTEM	30
4.1 Numune Temini	30
4.2 Kayaçların Mineralojik ve Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	31
4.3 Sıcaklık Ölçümü	37
4.5 Mikrodalgaya Maruz Bırakma Sonrası Aşındırıcılık Deneyleri.....	41
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
5.1 Mikrodalgaya Maruz Bırakma ile Yüzey Sıcaklığı İlişkisi	43

5.2 Mikrodalga Gücü ile Cerchar Aşındırıcılık İndeksi ilişkisi	52
5.3 Mikrodalga Gücü ve Aşındırıcılık Kaybı İlişkisi	58
6. SONUÇLAR	62
KAYNAKLAR	64
EKLER	68
Ek 1. Numunelerin Yüzey Sıcaklık Ölçüm Sonuçları	68
Ek 2. Cerchar Deney Sonuçları	71
Ek 3. Tez Çalışması Orjinallik Raporu	74
ÖZGEÇMİŞ	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Mikrodalgaya maruz bırakılan minerallerin yüzey sıcaklıkları [14].....	11
Çizelge 4.1. Deneylede kullanılan kayaçlar ve lokasyonları.	30
Çizelge 4.2. Numunelerin mineral içerikleri [40].	36
Çizelge 4.3. Test edilen kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri [40].	37
Çizelge 4.4. Numunelerin ortalama sıcaklık değerleri.	38
Çizelge 4.5. Numunelerin ortalama Cerchar aşındırıcılık değerleri.....	40
Çizelge 5.1. Mikrodalgaya maruz bırakılan numunelerin aşındırıcılık kayıpları.	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Yumuşak zeminlerde kullanılan TBM.	1
Şekil 1.2. Sert kayaçların kazısında kullanılan tünel açma makinesi.	2
Şekil 1.3. Disk keski örnekleri.	2
Şekil 1.4 Birincil ve ikincil keski aşınması [1].	3
Şekil 1.5 Keskinin bozunması ve gövdede oluşan deformasyonlar [1]	3
Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum.	7
Şekil 2.2. Mikrodalga enerjisine karşı gösterdikleri reaksiyona göre malzemeler [11].	10
Şekil 2.3. Mikrodalga ısıtma sisteminin dört ana bileşeni [16].	12
Şekil 2.4. Numuneyi mikrodalgaya maruz bırakma süresine göre kayacın basınç dayanımı değişimi [18].	13
Şekil 2.5. Nokta yük deneyinde görülen lokal kırıklar [18].	13
Şekil 2.6. Barre graniti için 3kW mikrodalgaya maruz bırakma süresine göre basınç dayanımı değişimi [19].	14
Şekil 2.7. Kireçtaşı için 3kW mikrodalgaya maruz bırakma süresine göre çekme dayanımı değişimi [19].	14
Şekil 2.8. Mikrodalgaya maruz bırakma süresinin yüzey sıcaklığına olan etkisi[20].	15
Şekil 2.9. Mikrodalgaya maruz bırakılan doygun bazalt numunelerinin ultrasonik hız değerleri [22].	16
Şekil 2.10. 60s mikrodalgaya maruz bırakma sonrası gelişen çatlaklar [23].	17
Şekil 2.11. 60s mikrodalgaya maruz bırakılan numunede gelişen çatlakların ince kesit [23].	17
Şekil 3.1. Cerchar testi cihazları [30].	20
Şekil 3.2. Pin ucu görünümü ve aşınma ölçümü [38].	27
Şekil 3.3. SINTEF aşındırıcılık testi.	28
Şekil 3.4. LCPC aşındırma test cihazı [39].	29
Şekil 4.1. Rosa Well (Granit) numunesinin mikrofotografı: a) Kayacın genel görüntüsü (çapraznikol, 4x), b) Ortoklazlarda gözlenen pertitik doku ve kuvars mikrokristalleri, (çapraz nikol, 4x).	31
Şekil 4.2. Rosa Miho (Granit) numunesinin mikrofotografı: a) Kayacın genel görüntüsü ve biyotit segregasyonu (çapraz nikol, 4x), b) kayanın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).	32

Şekil 4.3. Volga Blue (Siyenit) numunesinin mikrofotoğrafı: a) Kayacın genel görüntüsü ve hidrobiyotitleşme, (paralel nikol, 4x), b) kayanın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).....	32
Şekil 4.4. Nublado (Granit) numunesinin mikrofotoğrafı: a) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).	33
Şekil 4.5. Jungle Green (Siyenit) numunesinin mikrofotoğrafı: a) Kayacın genel görüntüsü ve turmalin mineralleri, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü ve nefelin mineralleri, (çapraz nikol, 4x).....	33
Şekil 4.6. Steppe Yellow (Granit) numunesinin mikrofotoğrafı: a) Kayacın genel görüntüsü ve pertitik yapı, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).	34
Şekil 4.7. Nero Turka (Gabro)numunesinin mikrofotoğrafı: a) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü ve subofitik doku, (çapraz nikol, 4x).....	34
Şekil 4.8. Kaman Rosa (Granit)numunesinin mikrofotoğrafı: a) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).	35
Şekil 4.9. Kozak Granit (Granit)v numunesinin mikrofotoğrafı: a) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).	35
Şekil 4.10. Numunelerin ısı derecelerinin kızılötesi termometre ile ölçülmesi.	37
Şekil 4.11. West tipi Cerchar aşındırıcılık deney aleti deney aleti.	38
Şekil 4.12. Cerchar uçları ve deney numuneleri.	39
Şekil 4.13. Cerchar uçlarının aşınması ve mikroskop altındaki görüntüsü.	39
Şekil 4.14. Cerchar aşındırıcılık deneyi sonrası bazı numunelerin görünüşleri.	41
Şekil 4.15. Numunelerin genel görünüşü.	41
Şekil 4.16. Deneyleerde kullanılan 6 kW güce sahip mikrodalga fırın.	42
Şekil 5.1. Rosa Well (Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.....	43
Şekil 5.2. Rosa Miho (Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.....	44
Şekil 5.3. Steppe Yellow (Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.	45
Şekil 5.4. Nublado (Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.....	46

Şekil 5.5. Kaman Rosa(Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.....	46
Şekil 5.6. Granit (Kozak) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.....	47
Şekil 5.7. Siyenit numunesinin 6kW mikrodalga enerjisine maruz bırakılmasının ardından erime ve çatlaması.....	48
Şekil 5.8. Volga Blue (Siyenit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.....	48
Şekil 5.9. Jungle Green (Siyenit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.....	49
Şekil 5.10. Nero Turka (Gabro)numunesinin mikrodalgaya maruz bırakıldıktan sonra çatlaması.....	50
Şekil 5.11. Nero Turka (Gabro)numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.....	51
Şekil 5.12. Numunelerin(Siyenit, gabro, granit) mikrodalgaya maruz bırakılmadan ve bırakıldıktan sonraki yüzey sıcaklıkları.....	51
Şekil 5.13. Rosa Well (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.....	52
Şekil 5.14. Rosa Miho (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.....	53
Şekil 5.15. Kozak Granit (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.....	53
Şekil 5.16. Steppe Yellow (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.....	54
Şekil 5.17. Nublado (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.....	55
Şekil 5.18. Kaman Rosa (Granit)Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.....	55
Şekil 5.19. Volga Blue (Siyenit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.....	56
Şekil 5.20. Jungle Green (Siyenit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.....	57
Şekil 5.21. Nero Turka (Gabro)Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.....	57
Şekil 5.22. Farklı güçlerde mikrodalga enerjisi uygulamanın cerchar'a olan etkisi.....	58
Şekil 5.23. Mikrodalga gücü – kayaç aşındırıcılığı ilişkisi.....	59
Şekil 5.24. 6 kW mikrodalga uygulandıktan sonra Cerchar aşındırıcılık indeksi ve yüzey sıcaklığı ilişkisi.....	60

1. GİRİŞ

Madencilik ve inşaat sektöründe kayaç kazısı en önemli operasyonlardan biridir. Mekanize kazı uygulamaları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Türkiye’de son yıllarda otoyol, metro ve tünellere ağırlık verilmesiyle birlikte mekanize kazının önemi gittikçe artmaktadır. Ancak, mekanize kazı makinelerinde önemli teknolojik gelişmelere rağmen özellikle sert ve aşındırıcı kayaçların kazılmasında düşük kazı hızı ve yüksek keski aşınması yüksek maliyetler ortaya çıkarmaktadır. Sert kayaçlarda kazıyı kolaylaştırmaya yönelik bazı araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırma yöntemlerinden birisi de mikrodalga destekli kazıdır. Mikrodalga destekli kazıya zemin hazırlamak amacıyla, kayaçları mikrodalga enerjisine maruz bırakmanın mekanik davranışlar üzerindeki etkileri konusunda az sayıda çalışma bulunmaktadır.

Makineler kullanılarak yapılan kazı mekanize kazı olarak ifade edilmektedir. Mekanize kazı madencilikte yumuşak minerallerin kazısında uygulanmaktadır. Örneğin kömür, fosfat ve tuz mineralleri orta sertlikte kayaçlarda mekanize kazı uygulaması kısıtlıdır. Sert kayaçların kazısında tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) ve kuyu açma makineleri dışında kazı makineleri kullanılamamaktadır. Yumuşak kayaç/zemin ve sert kayaç kazılarında kullanılan TBM örnekleri Şekil 1.1 ve 1.2’ de görülmektedir.



Şekil 1.1. Yumuşak zeminlerde kullanılan TBM.



Şekil 1.2. Sert kayaçların kazısında kullanılan tünel açma makinesi.

Sert kayaçlarda kullanılan TBM'lerde keski olarak disk keski kullanılmaktadır. Alaşımli çelikten imal edilen keski tekli, ikili veya çoklu olabilmektedir. Çok sert ve aşındırıcı kayaçlar için tungsten karbür gömme dişlere sahip keski tercih edilmektedir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Disk keski örnekleri.

Sert ve yumuşak kayalarda kullanılmak üzere 2 farklı türde tünel açma makinası mevcuttur. Günlük ilerleme hızları 30 ile 40 metredir. Yumuşak mineral ve kayaların kazısında genellikle roadheader kullanılmaktadır. Seçimli kazı ve maden galerilerinin açılmasında genellikle roadheader tercih edilmektedir.

Bahsedildiği üzere yaygın bir kullanıma alanına sahip tam cepheli tünel açma makineleri ve sabanlar(roadheader) ile mekanize kazı esnasında düşük ilerleme hızı ve yüksek keski aşınması ciddi bir problemdir.

Bu amaçla keski aşınmasını azaltılması ve keski uçlarındaki aşınmanın azaltılması göz önüne alınarak kayaları mikrodalgaya maruz bırakmanın sert kayaların aşındırıcılık üzerine olan etkisi çalışılmıştır.

Delgi ve kazı çalışmalarında kayaç aşındırıcılığı en önemli konulardan bir tanesidir. Proje süresi ve maliyetini doğrudan etkilemektedir. Kısa sürede kesici uçların aşınması projedeki maliyetin artmasına ve uç değişimi zaman kaybına neden olmaktadır [1]. Aşındırıcılığı yüksek kayaların kazısında kesici uçların aşınmasının yanı sıra tünel açma makinasında (TMB) aşınan gövde 1.4 ve 1.5'te verilmiştir [1].



Şekil 1.4 Birincil ve ikincil keski aşınması [1]



Şekil 1.5 Keski bozunması ve gövdede oluşan deformasyonlar [1]

Diğer bir önemli sorun ise aşındırıcı kayaçların yüksek dayanımı olduğu gözlenmiştir. Bu durumda sürekli kazılarda (TMB-Disc Cutter) disk kesici uçlarda yüksek aşınma problemi ile karşı karşıya kalınmıştır. Disk kesici uçlardaki aşınma hızlı bir şekilde başlayıp tüm kesici uçların aşınması ile devam etmektedir. Sonuç olarak kesici uçlarda aşınma mekanizmasının iyi anlaşılması proje süresi ve maliyet hesapları için en önemli parametredir.

Kayaç mineralojisinin kesici uçlar üzerindeki etkilerine yönelik birtakım çalışmalar yapılmıştır. Araştırmacılar kayaçtaki kuvars içeriği ve kuvars eşitliğine (EQC) odaklanmışlardır. Kuvars içeriği Cerchar Aşındırıcılık İndeksi ile ilişkili en önemli parametredir [2]. Bunun yanı sıra CAI i değerlendirmek için EQC tek başına yeterli değildir. [3] Ayrıca yapılan başka bir çalışmada kayaçların kuvars içeriği ile CAI değeri arasında doğrusal bir ilişki olduğu ortaya konmuştur. EQC ile CAI arasındaki ilişkinin kuvars ile CAI arasındaki ilişkidən çok olduğunu ortaya konulmuştur [4].

Aşındırıcılık terimi bir kayacın veya toprağın kesici uçlar üzerindeki aşındırma potansiyelidir. Kesici uç aşınmasında kayaç aşındırıcılığının yanı sıra birçok parametre vardır. [4]

- Kayaç/toprak özellikleri (dayanım, sertlik, kırılma, mineral içeriği, mineral sertliği, tane boyutu ve şekli, malzemenin matris türü)
- Kesici uç özellikleri (Kesici uç karakteri, sertliği, dayanımı, geometrisi)
- Kazı işlemi parametreleri (kesici uç pozisyonu, eğim açısı, kazı hızı, soğutma, sıcaklık, baskı ayarı)

Tünel Açma Makinesi üzerindeki aşınma türleri birincil aşınma ve ikincil aşınma olarak 2'ye ayrılabilir. Birincil aşınma beklendiği üzere kesici diskin dış çevresinde olmaktadır. İkincil aşınma ise disk kesicinin diğer bölümlerinde planlanmamış olarak gerçekleşmektedir. Bu durum özellikle blok halinde olan kayaçlardan ve disk kesicinin etrafındaki malzeme akışından kaynaklanmaktadır. Özellikle aşındırıcı zemin koşullarında EPB veya mixshield TBM kazısı esnasında kesici diskin ömrünü ikincil aşınma belirleyebilir [5]. Aşındırıcılığı yüksek olan formasyonlarda genellikle disk kesici uçların etrafında ve gövdesinde aşınmalar oluşur.

Bu çalışmada, kayaç kesme testi esnasında magmatik kayaçları mikrodalgaya maruz bırakmanın Cerchar aşındırıcılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Farklı magmatik kayaçlar (granit, siyenit ve gabro) üzerinde önce mikrodalga uygulanmadan Cerchar aşındırıcılık deneyleri yapılarak Cerchar aşındırıcılık indeksi (CAI) hesaplanmıştır. Daha sonra 2 kW ve 6 kW olmak üzere iki farklı güçte mikrodalgaya maruz bırakılmış numuneler üzerinde Cerchar aşındırıcılık deneyleri tekrarlanmıştır. Mikrodalgaya maruz bırakılmamış ve bırakılmış kayaçların Cerchar aşındırıcılık değerleri karşılaştırılmıştır. Mikrodalgaya maruz bırakılmamış ve bırakılmış kayaçların Cerchar aşındırıcılık değerleri karşılaştırılmıştır. Magmatik kayaçları mikrodalgaya maruz bırakmanın Cerchar aşındırıcılık indeks değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Aynı kayaca uygulanan mikrodalga gücü ve aşındırıcılık indeksi arasında ters orantı olduğu saptanmıştır. Tüm bu çalışmalar farklı magmatik kayaçlara uygulanarak mikrodalganın cerchar aşındırıcılığı üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Ayrıca, mikrodalga enerjisinin kayaca etki derecesinin kayacın mineral içeriğine bağlı olduğu gerçeği dikkate alınarak, kayaçların mineral içeriklerinin uygulanan mikrodalga enerjisine bağlı olarak Cerchar aşındırıcılığında oluşabilecek değişim üzerinde etkili olduğuna varılmıştır.

Sert kayaç kazısında düşük kazı oranı ve keski uçlarındaki yüksek aşınması en önemli sorunların başında gelmektedir. Bu problemlerin çözülüp geliştirilmesi için farklı metotlar denenmiştir. Bu tez çalışmasında mikrodalgaya maruz bırakılan 9 farklı magmatik kayaç numunesinin Cerchar Aşındırıcılığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Öncelikle yapılan çalışmalarda numuneler farklı bölgelerden toplanmış ve hazırlanmıştır. Farklı güçlerde ve sürelerde mikrodalgaya maruz bırakılarak yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Aynı kayaç türündeki numunenin mikrodalgaya maruz bırakılmadan ve mikrodalgaya maruz bırakıldıktan sonraki CAI değeri ve aşındırıcılığı hesaplanmıştır. Genellikle mikrodalga enerjisinin ve maruz bırakılma süresinin artmasıyla kayacın aşındırıcılığının düştüğü gözlemlenmiştir. CAI değerinin farklı oranlarda düşmesi ve farklı yüzey sıcaklıkları ile ilgili oluşan sonuçlar numunelerin mineral içeriği ile ilgili doğrudan ilişkilidir. Mikrodalga enerjisine maruz bırakılan numuneler de mikrodalga enerjisine ve maruz bırakılması süresine bağlı olarak çatlama-erimeler gözlenmiştir. Bu durum numunenin mineral içeriği ile ilişkilidir. Numunede bulunan metalik mineral içeriği numunenin sıcaklığını kolaylıkla arttırmaktadır. Yapılan çalışmalar ve değerlendirmeler sonucunda mikrodalga enerjisinin CAI değeri üzerinde etkisi

mikrodalga maruz bırakılma süresi, mikrodalga gücü ve mineralojiye bağlı olarak değişmektedir.

Tezin 2. Bölümünde, magmatik kayaçların cerchar aşındırıcılığı deneyi üzerindeki etkisi ile ilgili detaylı bir literatür araştırması yapılarak bununla ilgili olan çalışmalara yer verilmiştir. Mikrodalga ve uygulamaları genel olarak açıklanmış olup mikrodalgaın kayaçların mekanik özelliklerine olan etkisi vurgulanmıştır.

Tezin 3. Bölümünde kayaç aşındırıcılığı üzerinde durulmuş ve en yaygın kayaç aşındırıcılık deney yöntemleri açıklanmıştır. Bunlar en yaygın kullanılanlar Schimazek aşınma indeksi, Cerchar aşındırıcılık testi NTNU Kayaç Delinebilirliği Testi ve LCPC aşındırma testlerinden bahsedilmiştir. Tez için en önemli aşındırıcılık testlerinden biri olan Cerchar Aşındırıcılık Testi geniş olarak açıklanmıştır. Deneyin yönteminden bahsedilerek CAI hesaplanması açıklanmıştır.

Tezin 4. Bölümünde tez aşamasında uygulanacak olan yöntemin adımları sırasıyla açıklanmıştır. Numune temini, kayaçların fiziksel-mekanik ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi, aşındırıcılık deneyleri ve mikrodalgaya maruz bırakma sonrası aşındırıcılık deneylerinin sonuçları açıklanarak yapılan çalışmalar kayaçların mikrodalgaya maruz bırakılarak ve bırakılmadan cerchar aşındırıcılığı üzerine olan etkisi değerlendirilmiştir.

Tezin 5. bölümünde yapılan tüm çalışmalardan elde edilen veriler ve sonuçlar toplanarak farklı güçlerde ve sürelerde mikrodalgaya maruz bırakılan farklı türdeki kayaçların cerchar aşındırıcılığındaki değişimler açıklanmıştır. Yapılan analiz ve değerlendirmelerden bahsedilmiştir.

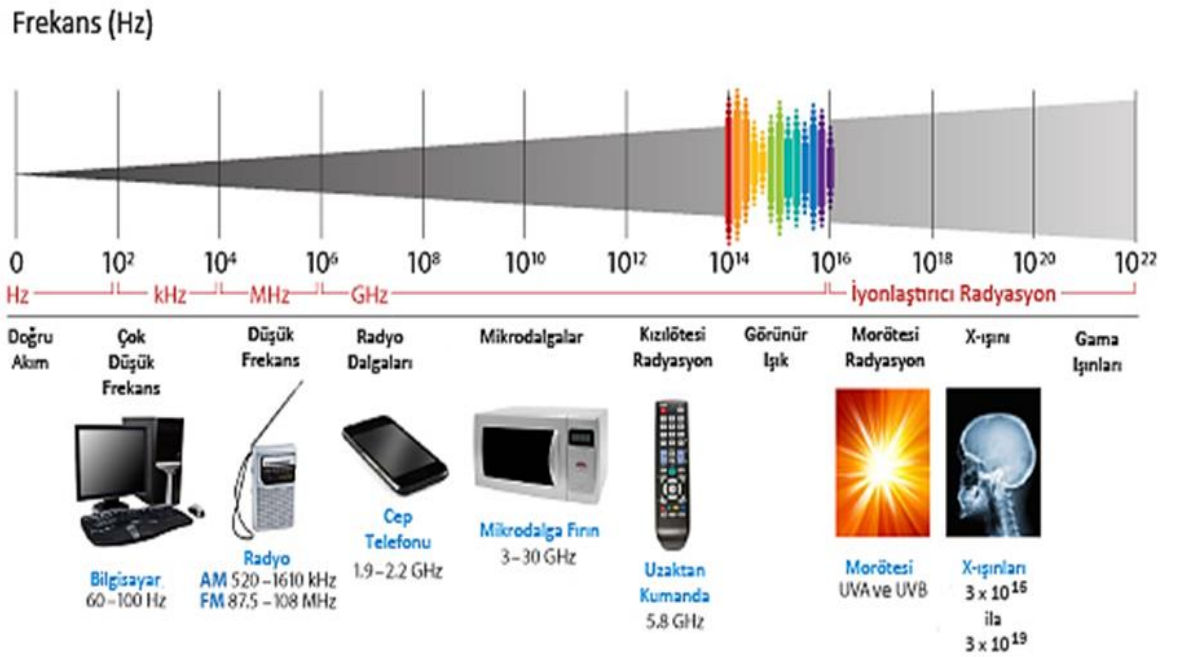
Tezin 6. bölümünde elde edilen tüm sonuçlar açıklanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde pratik uygulaması olmayan sadece teorik uygulamaları olan mikrodalga destekli kazı ve delme ile ilgili bazı patentler bulunmaktadır [6]. Ayrıca, matkapsız olarak sadece mikrodalga enerjisi ile mikro-delme konusunda da bir patent bulunmaktadır [7]. Diğer yandan, mikrodalga destekli delme konusunda birkaç çalışma bulunmaktadır [8]. Kazı ve delme konusundaki çalışmalar tez konusuyla doğrudan ilişkili olmadığından burada bu çalışmalardan bahsedilmemiştir. Aşağıda önce mikrodalga ve uygulamaları konusunda genel bazı bilgiler verilmiş, daha sonra tez konusuyla doğrudan ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir.

2.1. Mikrodalga ve Uygulamaları

Radyo dalgaları alanı ve mikrodalga mühendisliği genellikle 100 MHz ile 1000 GHz frekans aralığındaki dalgaları kapsar. Elektromanyetik spektrumun 300 MHz ile 300 GHz frekans ve 1 m ile 1mm dalga boyu aralığı mikrodalga olarak tanımlanır (Şekil 2.1.). Endüstride en yaygın kullanılan frekans 2.45 GHz olup, bu değer 12.2 cm dalga boyu ve 1.02×10^{-5} eV enerjiye karşılık gelmektedir [9].



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum.

Mikrodalga ile ısıtma veya kurutma işleminin birçok endüstriyel uygulaması vardır. Gıda, tıp, kimya, metalürji, tekstil, kâğıt, seramik endüstrisi mikrodalga'nın yaygın olarak kullanıldığı alanlara örnek olarak verilebilir. Mikrodalga ile ısıtma işleminin süresi, ısıtılacak maddenin su içeriğine, yoğunluğuna, kütesine, dielektrik sabitine (elektriksel potansiyel, enerjiyi depolama yeteneği) ve iyon yüküne bağlıdır. Mikrodalga ile ısınmayı bu faktörler dışında mikrodalga'nın çalışma frekansı, gücü, ısıl iletkenlik özellikleri ve özgül ısı gibi başka parametreler de etkiler [10].

Mikrodalga enerjisine karşı gösterdikleri reaksiyona göre (Şekil 2.2) malzemeler iletkenler, yalıtkanlar ve soğurucular olmak üzere üç gruba ayrılırlar [11]. İletkenler, mikrodalgayı yansıtırlar ve ısınmazlar. Mikrodalga etki etmeksizin içlerinden geçtiğinden yalıtkanlar da ısınmazlar. Soğurucular ise, mikrodalga'nın bir kısmını absorbe ederler (soğururlar) ve ısınırlar. Mikrodalgayı absorbe eden malzemeler, "Dielektrik Malzeme" olarak adlandırılırlar ve bu malzemeler bir dielektrik sabite sahiptirler. Bu malzemelerde, mikrodalgalar iyonik parçaların hareketi ve/veya dipolar parçaların rotasyonu ile moleküler harekete yol açarak ısınma oluştururlar. Bir malzemenin mikrodalga ile ısıtılması büyük oranda o malzemenin dağıtım faktörüne bağlıdır. Dağıtım faktörü ise, malzemenin dielektrik kayıp faktörünün dielektrik sabitine oranıdır. Dielektrik sabit, içerisinden geçen mikrodalgayı malzemenin geciktirme veya tutma kapasitesine bağlıdır. Kayıp faktörü de, malzemenin enerjiyi ısı olarak dağıtma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Dolayısıyla, yüksek kayıp faktörüne sahip malzemeler mikrodalga ile kolaylıkla ısıtılabilir [12].

Kayaçların mikrodalgaya maruz bırakılarak ısınması, 2.45 GHz frekansta yüksek elektrik alanı altında mikrodalga enerjisini absorbe etmesi ile ilişkilidir. Kayacın absorbe ettiği mikrodalga enerjisinin miktarı aşağıda belirtilmiştir.

$$\epsilon = \epsilon_1 - j\epsilon_{11} = \epsilon_0 (\epsilon_{T1} - j\epsilon_{e\eta1}) \quad (1)$$

ϵ_0 = Boşluğun dielektrik sabiti (F/m)

ϵ_{T1} = Malzemenin bağıl dielektrik sabiti

$\epsilon_{e\eta1}$ = Dielektrik kayıp faktörüdür.

Dielektrik sınıflandırmasına giren kayaçlar mikrodalga enerjisine maruz bırakıldığında mineral içeriğine bağlı olarak sıcaklık artışı meydana gelir. Mineralin içinde bulunan serbest, bağlı veya kendi çevresinde dönen dipollerin hareketleri sonucunda bir iç elektrik alanı oluşur. Mineralin iç yapısındaki gerçekleşen dipol hareketine karşı gösterilen direnç, kayıplara neden olur. Elastik, içsel ve sürtünme nedeniyle oluşan bu elektrik alanı etkisi azalır ve bunun sonucunda mikrodalga enerjisi uygulanan kayaç üzerinde ısınma meydana gelir.

Dipol hareketlerine karşı gösterilen dirence bağlı olan kayıplar şu şekilde hesaplanır:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_T} = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_T \epsilon_0} \quad (2)$$

σ = Elektriksel iletkenlik (S/m)

f = Frekans (Hz)

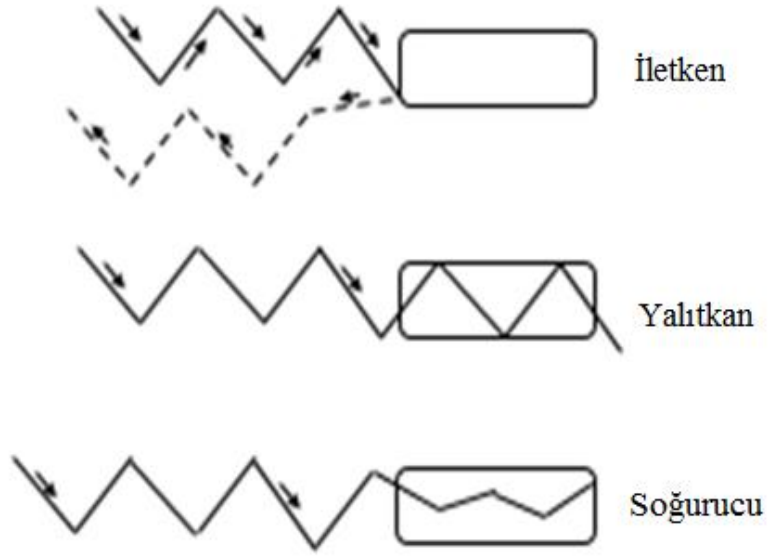
ϵ_0 = Boşluğun dielektrik sabiti (F/m)

ϵ_T = Malzemenin bağıl dielektrik sabiti

ϵ_{eff} = Malzemenin dielektrik kayıp faktörüdür.

$\tan \delta$ kayacın absorbe ettiği mikrodalgayı ısıya dönüştürme kapasitesini de ifade eder. Frekans ise enerjinin kayaca işleme derinliği ile ilişkilidir. İşleme derinliği arttıkça frekans azalır.

Kayacın nem içeriği, sıcaklığı, yoğunluğu ve kimyasal yapısı dielektrik özelliğine etki eder. Nem oranının artması ile birlikte absorbe ettiği enerji miktarı artarak yüzey sıcaklığı artar. Kayaçlar mikrodalgaya maruz bırakıldığında enerjinin iç kısımlara aktarılması gerekmektedir. Dielektrik sabiti (ϵI) ve kayıp faktörü (ϵII) mikrodalğanın absorbe edilme derinliğinin hesaplanmasını sağlar.



Şekil 2.2. Mikrodalga enerjisine karşı gösterdikleri reaksiyona göre malzemeler [11].

Kayaçlar ve mineraller de dielektrik malzeme grubuna girmektedir. Mineraller farklı dielektrik sabite ve kayıp faktörüne sahip olduğundan bir kayacın dielektrik sabiti ve kayıp faktörü, bu kayacı oluşturan minerallere bağlıdır. Ayrıca, kayacın dokusal özellikleri (mineral tane boyutu, hamur oranı gibi) ve su içeriği ile ortam sıcaklığı ve uygulanan mikrodalga frekansı da dielektrik özellikleri etkilemektedir [13]. 2.45GHz frekans ve 1kW güçte farklı minerallerin ısınma dereceleri ölçülmüş ve sonuçların çok farklı olduğunu görülmüştür [14]. Çizelge 2.1'e göre mikrodalgaya maruz bırakılan bazı minerallerin yüzey sıcaklıkları görülmektedir.

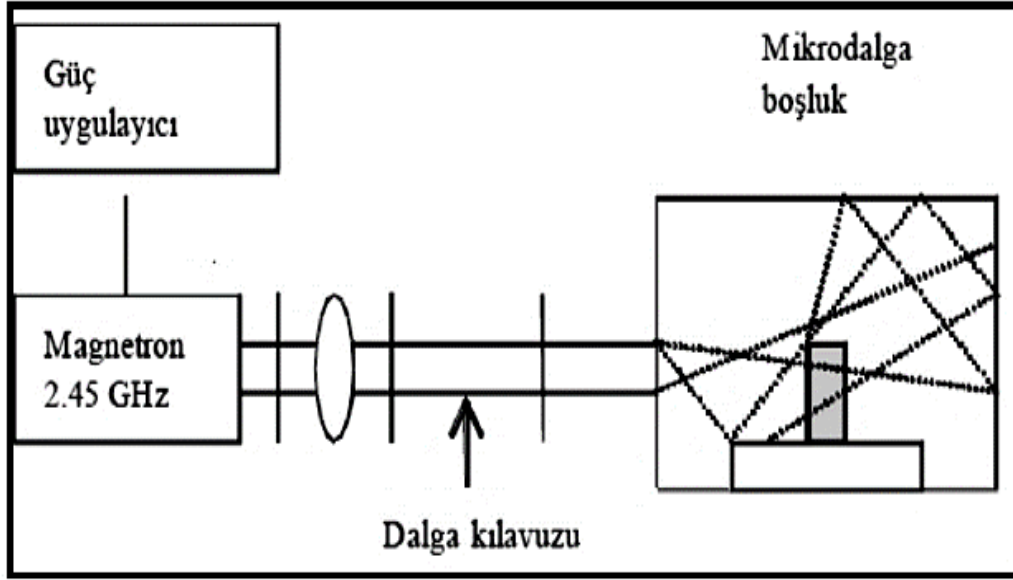
Her mineral farklı termal genleşme katsayısına sahiptir. Kayacın mikrodalgaya maruz bırakılmasıyla ısınmaya bağlı olarak her mineral farklı termal gerilmeye uğrayacak ve neticede çatlaklar oluşacaktır. Oluşan çatlaklara bağlı olarak kayacın dayanımı düşmekte ve böylece kırılması, öğütülmesi, kazılması ve delinmesi kolaylaşmaktadır. Cevherleri mikrodalgaya maruz bırakmanın çatlamlara bağlı olarak kırma ve öğütmeyi veya diğer bazı cevher zenginleştirme işlemlerini kolaylaştırdığı literatürde belirtilmektedir [14].

Çizelge 2.1. Mikrodalgaya maruz bırakılan minerallerin yüzey sıcaklıkları [14].

Mineral	Kimyasal Bileşim	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)
Albit	NaAlSi ₃ O ₈	82	7
Arizonit	Fe ₂ O ₃ .3TiO ₂	290	10
Kalkosit	Cu ₂ S	746	7
Kalkopirit	CuFeS ₂	920	1
Kromit	FeCr ₂ O ₄	155	7
Zinober	HgS	144	8
Galen	PbS	956	7
Hematit	Fe ₂ O ₃	182	7
Magnetit	Fe ₃ O ₄	1258	2.75
Mermer	CaCO ₃	74	4.25
Molibden	MoS ₂	792	7
Orpiment	As ₂ S ₃	92	4.5
Ortoklaz	KAlSi ₃ O ₈	67	7
Pirit	FeS ₂	1019	6.76
Pirotin	Fe _{1-x} S	886	1.75
Kuvars	SiO ₂	79	7
Sfalerit	ZnS	87	7
Tetrahedrit	Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	151	7
Zirkon	ZrSiO ₄	52	7

Temel olarak mikrodalga ısıtma sistemleri dört ana bileşenden oluşur: Güç kaynağı, magnetron (mikrodalga üretici), kılavuz (dalga kanalı) ve aplikatör (örneğin fırın). İlave olarak, transformator, rektifiyer, dalga dağıtıcı gibi yardımcı elemanlar da bulunur. 2.45GHz frekansa sahip magnetronların gücü genellikle 500W ile 10kW arasında değişmektedir. Çoğunlukla endüstriyel amaçlı kullanılan 0.915GHz frekanslı magnetronların gücü ise 75kW' a kadar olabilmektedir [15]. Mikrodalga aplikatörleri çok modlu kavite ve tek modlu kavite olmak üzere iki çeşittir. Mod, kapalı bir alana verilen elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin dağılım şekli olarak tanımlanır. Yaygın olarak kullanılan çok modlu kavite (örneğin mikrodalga fırınlar), birkaç dalga boyu genişliğinde metal kabinlerden oluşurlar. Bu tip kaviteelerde, kabine

kıyasla boyutu küçük malzemelerin ısıtılması zordur. Tek modlu kaviteleler ise genellikle dikdörtgen veya silindirik kesitli olup, küçük boyutlu olmalarından dolayı homojen ve yoğun bir enerji sağlarlar [16].



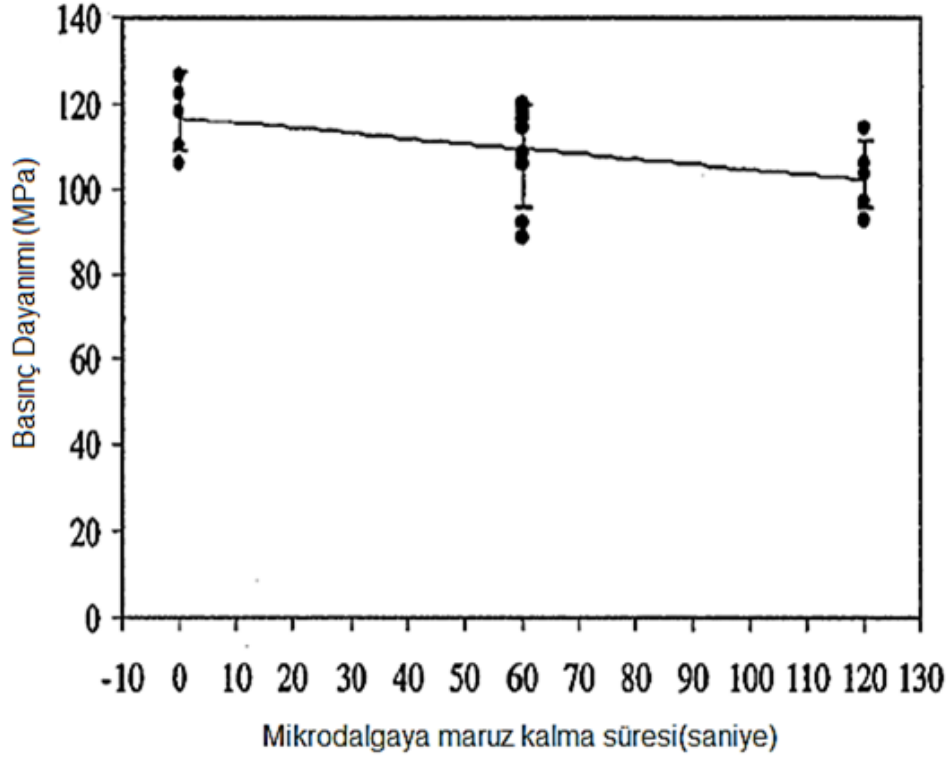
Şekil 2.3. Mikrodalga ısıtma sisteminin dört ana bileşeni [16].

2.2. Mikrodalganın Kayaçların Mekanik Özelliklerine Etkisi

Andezitler üzerinde mikrodalga uygulamanın etkisinin incelendiği bir çalışmada, üç andezit numunesinin çok modlu kavitede 2.45GHz frekansta 1350W gücündeki mikrodalga enerjisine 10 dk maruz bırakıldığında tamamen eridiği gözlemlenmiştir. Daha sonra yapılan X-ray analiziyle numunelerin ağırlık kaybı olmadan temel kimyasal yapılarını koruduklarını, ancak amorf bir yapıya dönüştükleri görülmüştür [17].

Bazalt numuneleri üzerinde mikrodalga enerjisinin etkisi incelendiği bir çalışmada, numuneler farklı sürelerde 2.45GHz frekansta ve 150W güçte mikrodalgaya maruz bırakılmıştır. Daha sonra numuneler üzerinde nokta yük deneyleri yapılmış ve bu değerlerden tek eksenli basınç dayanımı değerleri tahmin edilmiştir. Deneylerde 360s süre ile mikrodalgaya maruz bırakmada bazı numunelerin sıcaklığının 115°C' ye kadar arttığı gözlemlenmiştir. Deneylerde düşük güçte mikrodalga uygulanmasına rağmen kayacın basınç dayanımında mikrodalga uygulama süresine bağlı olarak önemli sayılabilecek düşüşler görülmüştür (Şekil 2.4). Diğer yandan, 180 ve 360s mikrodalgaya maruz

birakılan numunelerde nokta yük deneyinde uç altında lokal kırıklar gözlenmiştir (Şekil 2.5). Bu durum, termal gerilmelere bağlı olarak numunelerde çatlak oluşumlarından kaynaklanmaktadır [18].

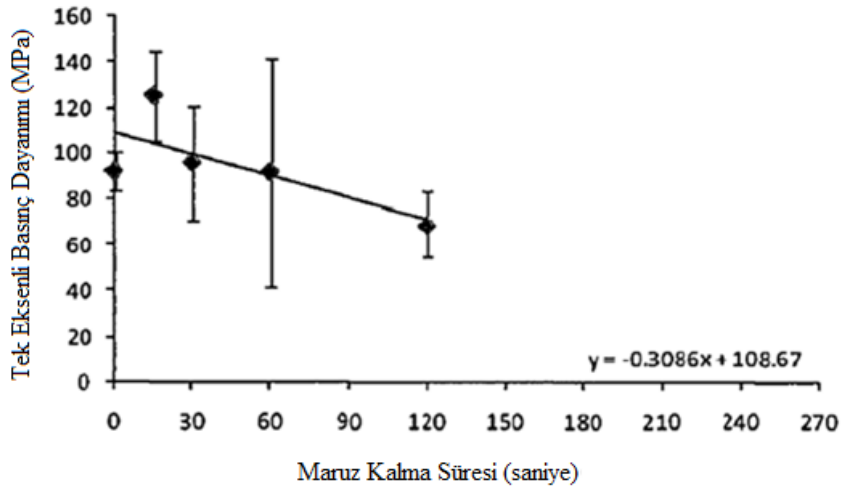


Şekil 2.4. Numuneyi mikrodalgaya maruz bırakma süresine göre kayacın basınç dayanımı değişimi [18].

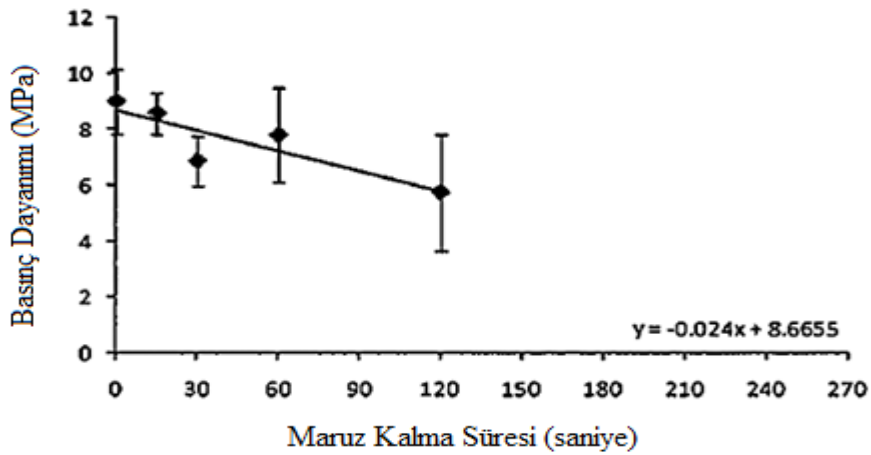


Şekil 2.5. Nokta yük deneyinde görülen lokal kırıklar [18].

Farklı kayaçları mikrodalgaya maruz bırakmanın kayacın mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmada 2.45GHz frekansta mikrodalga farklı süre (240s' ye kadar) ve güçlerde (3kW'a kadar) uygulanmıştır [19]. 3kW güçte kayaçların basınç dayanımının yaklaşık %30 azaldığı görülmüştür. Çekme dayanımlarındaki düşüşlerin daha fazla olduğu, hatta bazaltta %80'lere ulaştığı görülmüştür. Örnek olarak Şekil 2.6 ve 2.7'de dayanım değerlerindeki düşüşleri gösteren grafikler verilmiştir. Ayrıca, kayaçların Cerchar aşındırma değerlerinde de yaklaşık %30 azalmalar olduğu gözlenmiştir.

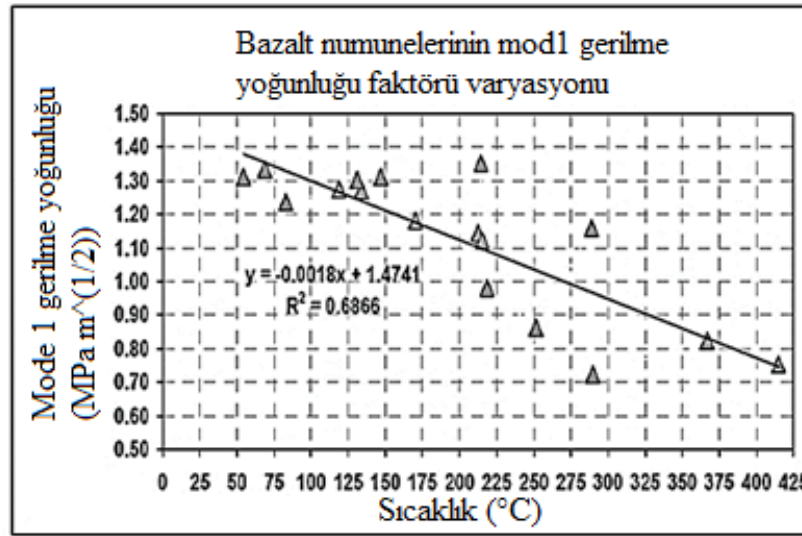


Şekil 2.6. Barre graniti için 3kW mikrodalgaya maruz bırakma süresine göre basınç dayanımı değişimi [19].



Şekil 2.7. Kireçtaşı için 3kW mikrodalgaya maruz bırakma süresine göre çekme dayanımı değişimi [19].

Nejati [20] bazalt numuneleri üzerinde mikrodalgaya maruz bırakmanın çatlak tokluğuna etkisini incelenmiş, 2.45GHz frekansa sahip mikrodalga fırın ile 5kW' a kadar farklı güçlerde ve farklı sürelerde (30 s' ye kadar) mikrodalga enerjisi uygulamışlardır. Deneyler sonucunda, mikrodalga gücünün ve maruz bırakma süresinin artmasıyla kayacın ısınma derecesinin arttığı ve buna bağlı olarak da çatlak tokluğunun azaldığı görülmüştür (Şekil 2.8.). Ayrıca, mikrodalgaya maruz bırakma süresinin artmasıyla numunelerdeki çatlak yoğunluğunun arttığı da gözlemlenmiştir. Diğer önemli bir bulgu, yüksek güçlerde kısa süreli mikrodalgaya maruz bırakmanın çatlak tokluğu üzerinde daha etkin olduğudur.

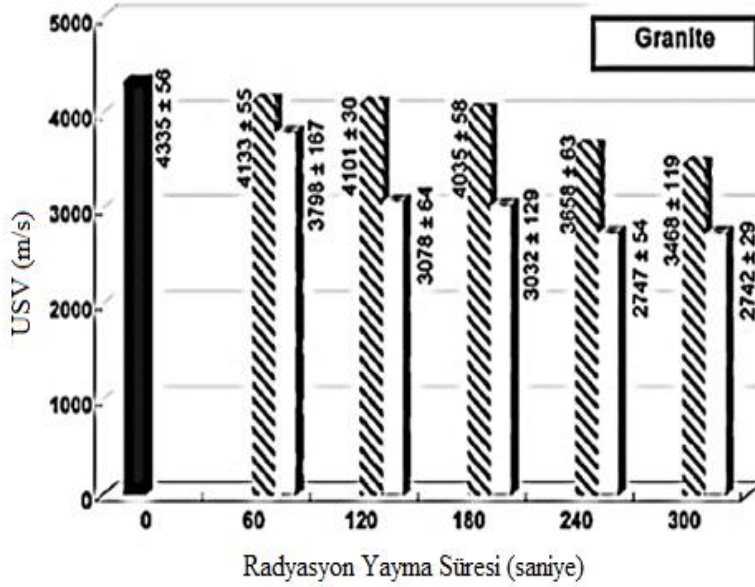


Şekil 2.8. Mikrodalgaya maruz bırakma süresinin yüzey sıcaklığına olan etkisi[20].

Detaylı bilgi verilmeyen makalede bazı kayaçların 2.45GHz frekans ve 900W güce sahip magnetron ile mikrodalgaya maruz bırakıldığı, ancak kayaçların dayanımlarında fark edilebilir bir düşüşün gözlemlenmediği ifade edilmiştir [21]. Çalışmada, sonuç olarak kayacı kırmak için daha yüksek güce gerek duyulabileceği ifade edilmiştir.

Kumtaşı, granit ve bazalt numuneleri kuru ve suya doymuş şartlarda mikrodalgaya maruz bırakılıp ve her iki durum için basınç dayanımı ve ultrasonik hız karşılaştırması yapılmıştır [22]. Deneylerde 2.45GHz frekansta 3kW mikrodalga enerjisi uygulanmıştır. Deney sonuçları önce ısınma derecelerine göre değerlendirilmiştir. Kuru numunelere kıyasla mikrodalgaya maruz bırakılan doymuş bazalt numuneleri ısısında bir artış görülmezken, granitin iki kat, kumtaşının ise dört kat fazla ısındığı görülmüştür. Daha

sonra, tek eksenli basınç deneyi sonuçlarının çok değişken olması nedeniyle ultrasonik hıza göre değerlendirme yapılmıştır. Kuru duruma kıyasla mikrodalgaya maruz bırakılan doymun bazalt numunelerinin ultrasonik hız değerlerinde bir değişim görülmezken, granit numunelerine ait değerlerde düşme görülmüştür (Şekil 2.9.). Doymun kumtaşı numuneleri ise mikrodalgadan çok fazla etkilenmiş ve 30s' den sonra kırılmışlardır. Makalede, bu çalışmanın bir ön araştırma olduğu, konuyla ilgili detaylı çalışmaların yapılması gerektiği ifade edilmiştir.



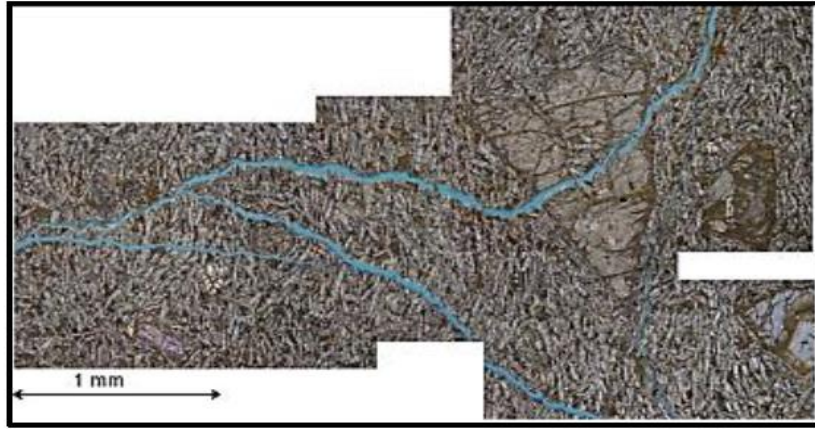
Şekil 2.9. Mikrodalgaya maruz bırakılan doymun bazalt numunelerinin ultrasonik hız değerleri (Siyah çubuk mikrodalgasız, taranmış çubuklar kuru, beyaz çubuklar doymun numuneler içindir) [22].

Mineralojik olarak homojen kayalarda mikrodalgaya maruz bırakmanın etkisini incelemek için ince taneli (<100 µm) bazalt örneğini 2.45GHz frekansta 3.2kW güce sahip mikrodalga enerjisine maruz bırakmışlardır. Deneyler sonucunda mikrodalga etkisiyle Şekil 2.10. de görüldüğü gibi eksenel ve radyal çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir [23]. Ayrıca, ince kesit görüntüsünün Şekil 2.11. incelenmesiyle, çatlakların tane sınırlarını takip etmediği, hatta taneleri kestiği ortaya konulmuştur. Çalışmada elde edilen diğer bir bulgu, mikrodalgaya maruz bırakma süresinin artması ile numunenin P-dalga hızının düşmesidir [24].

Hassani vd. [25] önceki çalışmalarını [26] daha kapsamlı olarak yakın zamanda yayınlamışlardır. Bu yayında önceki çalışmalardan farklı olarak nümerik modelleme de yapılmış ve mikrodalganın kaya dayanımını azaltmada etkin bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 2.10. 60s mikrodalgaya maruz bırakma sonrası gelişen çatlaklar [23].



Şekil 2.11. 60s mikrodalgaya maruz bırakılan numunede gelişen çatlakların ince kesit görünümü [23].

Literatür araştırmasından çıkarılabilecek sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Mikrodalgaya maruz bırakmanın kayaların mekanik özellikleri ve çatlak gelişimi etkilerine yönelik çalışmalar oldukça yeni ve sınırlıdır. Ancak, McGill Üniversitesi'nde özellikle delme ve kesmeye yönelik çalışmalara altyapı oluşturacak araştırmaların son yıllarda hızlandığı literatürden anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, bu konunun önem arz ettiği açıktır.

- Yukarıda bahsedildiği gibi, çalışmalarda 3kW veya daha düşük güçte mikrodalga uygulanmıştır. Sadece Nejati tarafından bazalt üzerinde 5kW'a kadar mikrodalga gücü uygulanmış ve yüksek güçlerde kısa süreli mikrodalgaya maruz bırakmanın çatlak tokluğu üzerinde daha etkin olduğu ifade edilmiştir. Dolayısıyla 3kW' dan daha yüksek mikrodalga güçlerinde farklı kayalar üzerinde deneyler yapılmalıdır.
- Deneyler çoğunlukla bazalt ve andezitler üzerinde yapılmıştır. Motlagh [19] gnays, granit, gabro ve kireçtaşı gibi kayalar üzerinde de deneyler yapmıştır. Ancak, mikrodalga etkisi mineral içeriğine bağlı olduğundan, aynı kayaç türünün (örneğin granit) farklı lokasyonlara ait farklı mineral içerik ve yüzdesine sahip örneklerinin mikrodalgaya karşı tepkisi farklı olacaktır. Dolayısıyla, bir kayaç türünün veya grubunun farklı mineral içerik ve yüzdesine sahip örnekleri için ayrı ayrı araştırma yapılmalıdır.
- Mikrodalga etkisiyle çatlak gelişiminin kayaç dokusuyla ilişkisine dair sadece bazalt için çalışma mevcuttur. Çalışmanın özellikle taneli kayalar için de yapılması ve mineral içeriklerinin de göz önüne alınması gerekmektedir.
- Ayrıca, yüksek mikrodalga gücünde oluşabilecek yüksek ısı etkisiyle minerallerde herhangi bir değişim olup-olmadığı da araştırılmalıdır.
- Kayacı mikrodalgaya maruz bırakmanın mekanik özelliklere etkisinde suya doygunluğun önemi sadece birer çeşit bazalt, granit ve kumtaşında araştırılmıştır [22]. Bu araştırmaya ait makalede de ifade edildiği gibi konuyla ilgili daha detaylı çalışmalar yapılmalıdır. Yani, farklı yörelere ait farklı kayaç türleri üzerinde araştırmalara devam edilmelidir. Söz konusu çalışmada araştırılmayan bir konu da kayacın porozitesi ile mikrodalga etkisi arasındaki ilişkidir. Muhtemelen, porozitesi yüksek kayaların su emme oranı yüksek olacağı için mikrodalgadan etkilenme derecesi de daha yüksek olacaktır. Dolayısıyla, bu konu da araştırılması gereken bir husustur.

Literatürde sadece bir çalışmada [19] 3kW mikrodalga uygulayarak bazı kayaların CAI değerlerinde yaklaşık %30 azalmalar olduğu ifade edilmiştir. Sınırlı olan bu çalışma dışında konuyla ilgili başka araştırmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında farklı olarak 9 farklı numune üzerinde (granit, siyenit, gabro) çalışılmıştır. Kayaç numuneleri farklı güçlerde (2kW ve 6kW) mikrodalgaya maruz bırakılarak mikrodalga enerjisinin CAI üzerinde olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, kayaların mineral içeriğinin mikrodalga ilişkisi ve aşınmaya olan etkisi üzerinde de durulmuştur.

3. KAYAÇ AŞINDIRICILIĞI

Kayaçların aşındırıcılığını belirleyebilmek için farklı laboratuvar deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu deney yöntemleriyle farklı kayaçların aşındırıcılık kapasiteleri ortaya hesaplanabilmektedir. En yaygın aşındırıcılık deney yöntemleri aşağıda özetlenmiştir:

3.1. Schimazek Aşınma İndeksi

Schimazek aşınma indeksi (F) bir disk keski kullanılarak sedimanter kayaçlar üzerinde yapılan aşınma deneyleri sonucunda bulunmuştur. F değeri, kayaçtaki kuvars ve diğer aşındırıcı minerallerin miktarı, bunların boyutları ve kayacın çekme dayanımı yardımıyla hesaplanır [28].

$$F = Q_{eq} \cdot d \cdot BTS \quad (3)$$

F = Schimazek aşınma indeksi (N/mm)

Q_{eq} = Eşdeğer kuvars içeriği (%)

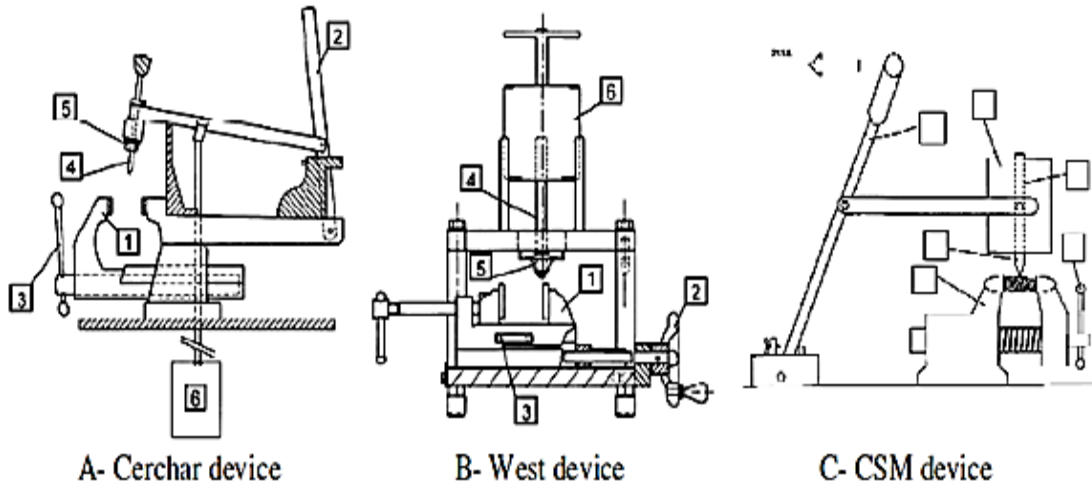
d = Ortalama tane boyutu (mm)

BTS = Brazilian çekme dayanımı (MPa)

3.2. Cerchar Aşındırıcılık Testi

Cerchar aşındırıcılık testi, kayaç aşındırıcılığı için kullanılan laboratuvar ölçekli çok yaygın bir test yöntemidir. Cerchar testi 1970 yıllarında Cerchar Enstitüsü'nde geliştirilmiştir [29]. Bu deneyde kayaç yüzeyi çelik alaşımdan yapılmış keskin bir uç tarafından çizilir. Uç kayaca 90°'lik açıyla durur ve test boyunca 70 N'luk sabit bir yük uygulanır. CAI, deney ucunun kayacın yüzeyinde 10 mm ilerleyip çizmesi sonucu hesaplanır. Cerchar aşındırıcılık indeks değerleri 0.5 ve 5.0 arasındadır. 0.5'ten küçük ise yumuşak kayaçlar (şist, kalker), 5.0'dan büyük ise sert kayaçlar için (kuvarsit) kullanılır. Uygulamada farklı prensipte çalışan Cerchar Testi Cihazları bulunmaktadır [30]. Bu cihazlar Şekil 3.1.' de görülmektedir. Bunlardan biri Laboratoire du Centre d'Etudes ve Recherches des Charbonnages (Cerchar) de France tarafından önerilen ilk nesil makinedir

(Şekil 3.1.A). Diğer cihaz West tipi olup, İngiltere'deki bir şirket (Ergotech) tarafından pazarlanmaktadır(Şekil 3.1.B). Üçüncü tip cihaz, Colorado'daki yerel bir makine atölyesi tarafından üretilmiştir ve bu testi yapan Kuzey Amerika'daki ilk laboratuvar olarak Colorado School of Mines'te (CSM) kullanılmıştır (Şekil 3.1.C). CSM cihazı, CAI test makinesinin ilk nesil sürümüne çok benzemektedir. Testler için başka yerel tasarımlar da vardır, ancak bunlar daha önce bahsedilenlere az çok benzemektedir.



Şekil 3.1. Cerchar testi cihazları [30].

CAI testi kayaç aşındırıcılığının laboratuvarında ölçümü için en sık kullanılan testlerden biridir. Test prosedürünün resmi bir açıklaması, testteki tek resmi standardı Fransız standardı olan NF P 94-430-1 olarak verilmiştir [29] ve öncelikle İngiliz ve Fransız kömür endüstrisinde ve ardından tünellerde de kullanılmaya başlamıştır.

Cerchar testi için farklı cihazlar olmakla birlikte, genel olarak, hepsinde numuneyi tutan bir mengene bulunur ve 90 derecelik koni uçlu çelik pin, 70N sabit yük altında kayanın üzerine konularak hareket ettirilir. Çevirici kol, kayaç yüzeyini çizmek için pimi numunenin üzerinde hareket ettirmek ve pimin konik ucunun sabit yük altında 10 mm boyunca hareket ederek aşınmasını sağlamak için kullanılır. Bu nedenle, Cerchar endeksi yüksek stres aşınma testi olarak sınıflandırılabilir. Pinin ucunda oluşan aşınma, mikroskop kullanılarak 1/10 mm olarak ölçülür. Her 1/10 mm bir birim olarak kabul edilir. Her testten sonra uçlar tekrar bilenerek veya yeni uçlar kullanılarak farklı testler yapılır.

Cerchar deney seti kullanımını hızlı, kolay ve ucuzdur. Sahada da kullanılabilir. Fakat bunlarla birlikte deney sonuçlarını etkileyen farklı parametreler vardır. Bu parametreler üç ayrı kategoride sınıflandırılabilir:

- Ekipman, aletler ve test prosedürü
- Kayaç örnekleri ve test yüzeyinin durumu
- Aşınmış yüzey ölçüm prosedürü (düz aşınma)

3.3. Cerchar Aşındırıcılık Testi Parametreleri

Orijinal Cerchar cihazında pimlerin hareket hızı 10 mm/sn'dir. Buna karşılık, West tipi cihazında test hızı 1 mm / sn olup, daha iyi kontrol edilebilir. West tipinde, kolun hızlı bir şekilde kontrolsüz hareketi ile pimin numunenin üzerinden atlama olasılığı daha düşüktür.

3.3.1. Pin (uç) Sertliği

Standart olarak test uçlarının Rockwell sertliği HRC 54–56 olmalıdır. 55 HRC sertleştirilmiş 115CrV4 takım çeliğinin kullanılması önerilmiştir [30]. Ayrıca, kullanılan pimleri tekrar keskinleştirirken özel dikkat gösterilmesi gerektiği belirtilmiştir. Hızlı bir şekilde keskinleştirmeden kaynaklanan yüksek sıcaklıklar pim ucunun sertliğini etkileyebileceği için bu tür işlemlerin dikkatli yapılması gerekmektedir.

3.3.2. Çizik Uzunluğu

Orijinal Cerchar test prosedürlerinde belirtilen, kaya numunesinin çizilme mesafesi 10 mm olarak tanımlanmıştır. Çeşitli uzunluklarda (1,2,3,5,7 ve 10 mm) kullanarak bazı testler yapılmıştır [29]. Pimin ilk yatay hareketi (≈ 1 mm) içinde koni ucunun ölü yük ve yatay harekete karşı direnç nedeniyle deforme olma ve kopma eğiliminde olduğu ve düz bir uç oluştuğu sonucuna varmışlardır. Testin başında oluşan bu düz alan, kayadaki aşındırıcı madde miktarına bağlı değildir. Pimlerin ucundaki deformasyon bozukluğundan kaynaklanmaktadır. Deformasyon büyüklüğü kayacın dayanımı ve pin malzemesi ile ilgilidir.

Ayrıca, 1 mm kayma mesafesi ile ilgili Cerchar endeksinin, çoğu kaya türü için 10 mm kayma mesafesindeki nihai Cerchar endeksinin yaklaşık üçte ikisi olduğu gözlemlenmiştir. Cerchar endeksinin yaklaşık %30'u, son 9 mm kayma mesafesine karşılık gelen aşınma etkisine bağlanabilir.

Aynı kayaç örnekleri üzerinde farklı test uzunluklarına sahip bir dizi test gerçekleştirilmiştir [30]. Elde edilen sonuçlar pim aşınmasının yaklaşık %70'inin pin çizme uzunluğunun ilk milimetresi boyunca gerçekleştiğini, CAI'nin yaklaşık %85'inin 2 mm'den sonra ve CAI'deki değişimin sadece % 15'inin son 8mm de sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Bu bulgunun tek olumlu etkisi, CAI'deki çizilme uzunluğunun değişmesinden kaynaklanan sapmaların test uzunluğundaki değişiklik 10 ± 0.5 mm arasında tutulduğunda çok önemli olmayacağıdır.

3.3.3. Test Tekrarı

Cerchar ince taneli, homojen kaya numuneleri için 2-3 tekli testi yeterli görmekte ve sadece 1 mm'den büyük tane büyüklüğüne sahip örnekler için beş veya daha fazla test önermektedir. West kaya aşındırıcılığı için makul bir ortalama değer vermek üzere tek bir kaya numunesinde birkaç ölçüm yapılması gerektiğini önermektedir. Uygulamada, her bir örnek için beş testin yeterli olacağı belirtilmektedir. Plinninger [30] testlerinde beş pin kullanılmıştır. Stanford [32] her test için yedi pim kullanmış ve hesaplamalarındaki en yüksek ve en düşük ölçümlerini hariç tutarak hesaplamalarını yapmıştır.

3.3.4. Gerilme Etkisi

Gerilmenin Cerchar test sonuçları üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada, testte kullanılan Cerchar pini gibi bir ucun, gerçek uygulamada (yani yeraltında veya delme sırasında) bir kaya bloğunun yüzeyini çizmesiye, laboratuvarındaki kayaların üzerine çizilmesinden farklı şekilde aşınacağı varsayımından yola çıkılmıştır. Aradaki fark ile,

CAI sonuçlarının yerinde kaya yüzeyindeki gerilme koşullarını ortaya koyması beklenmiştir [33].

Hoek'in hücrelerinde çevre basıncı altında (farklı adımlarda 2.5 ila 12 MPa arasında) dört farklı kaya türünden 12 örnek test edilmiştir. Her bir kaya tipinin ve her kaya numunesinin, çevre basıncı altında daha yüksek bir CAI değeri ile yanıt verdiği görülmüştür. Bununla birlikte, ortam koşulu altında CAI değeri ne kadar düşükse, CAI'deki artış o kadar belirgin görünmektedir. CAI'nın kaya gözenekliliğinin bir işlevi olarak görülebileceği sonucuna da varılmıştır. 1 MPa çevre basıncı için kayaların porozitesi CAI artışı ile ilişkilendirilmiş ve doğrusal bir ilişki ortaya konulmuştur [33].

3.3.5. Numunenin Yüzey Durumu

West [34] tarafından kayacın deney yapılacak yüzeyinin düz olmasının gerektiği önerilmiştir. Yumuşak kayalar için yüzey törpülenerek düz yüzeylerin oluşturulması, sert kayalar için ise numunenin elmas testereyle kesilmesiyle düz bir yüzeyin oluşturulması gerekmektedir.

Numune yüzeyinin yatay veya hafif eğimli olması Cerchar aşındırıcılık indeksi açısından önem taşımaktadır. Pimin eğimli yüzey boyunca hareket ettirmek için daha yüksek kuvvet gerekir ve bu nedenle daha yüksek CAI değeri elde edilir.

Sert kayaç numunelerinde pin hareketi kayacın pürüzsüz yüzeye doğru kayma eğiliminde olduğu bu nedenle minimum aşınma ve düşük aşındırıcılık indeks değeri kaydedildiği belirtilmiştir. Yumuşak kayaç numunelerinde, pin kayaç yüzeyindeki girintili çıkıntılı olan yüzeye kayma eğilimindedir. Bu durumun kayaç aşındırıcılığı indeksi üzerindeki etkisi çok fazla görülmemektedir. Hem parlatılmış kayaç numuneleri hem de pürüzlü kayaç numune yüzeylerinde yapılan testlerde aşındırıcılık indeks değerinde büyük değişiklikler olmadığı gözlemlenmiştir [29].

Plinninger [30] testlerini hem kırılmış pürüzlü kayaç yüzeylerinde hem de testere ile kesilmiş kayaç yüzeylerinden gerçekleştirmiştir. Düşük CAI değerine sahip kayaçlarda İki farklı yüzeyde gerçekleştirdiği Cerchar testlerinde Cerchar aşındırıcılık indeksi değerlerinin hemen hemen eşit olduğu sonucuna varmıştır. Aşındırıcılığı yüksek kayaçlarda yaptığı deneylerde kırılmış yüzeylerin Cerchar aşındırıcılık indeks değeri, testere ile kesilmiş düzgün yüzeyin Cerchar aşındırıcılık indeks değerinden 0.5 daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir.

Rostami [38] düzgün kesilmiş ve kırılmış kaba yüzeylerde CAI ölçümleri gerçekleştirmiştir. Kaba yüzeylerde yapılan testlerin aşındırıcılık indeks değerleri, düzgün kesilmiş yüzeylerde yapılan aşındırıcılık indeks değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Kayaç sertliği ve aşındırıcılığı arttıkça düzgün ve kaba yüzeylerde yapılan Cerchar kayaç aşındırıcılığı testlerinde kaba yüzeylerin CAI değeri ile düzgün kesilen yüzeylerin CAI değeri arasındaki fark artmaktadır.

3.3.6. Petrografik ve Jeomekanik Özellikler

[West 34] kuvars içeriği bilinen 31 farklı kayaç numunesinde Cerchar aşındırıcılık testi uygulanmıştır. Numunelerin mukavemeti iki numune hariç 24 ile 92 MPa arasında değişmektedir. Kayaç aşındırıcılığının kuvars içeriği ile doğrudan ilişkisi olduğu ve kuvars miktarının artması sonucu CAI değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Kayaç yapıcı minerallerin aşındırıcılığını belirlemek için mono mineralli kayaçlar ve büyük tek kristalleri test ederek Cerchar aşındırıcılık indeksini kayaçların mineralojik bileşimiyle ilişkilendirilmiştir. Aşındırıcılık değerlerini bilerek, kayacın teorik bir Cerchar İndeksini hesaplamanın ve ölçülen değerlerle karşılaştırmanın mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan CAI değerleri arasındaki farklılıklar, diğer faktörlerin etkisini göstermektedir. Minerallerin CAI aşındırıcılığını ölçtüktan sonra, 36 kayaç numunesinde Cerchar testleri yapılmıştır ve tahmin edilen CAI değerlerinden bazı sapmalar bulunmuştur. Bu sapma, Cerchar testinin sert kayaçların aşındırıcılığını fazla ve yumuşak kayaların aşındırıcılığını az belirlenmesine bağlanmıştır [35].

Kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı gibi 29 tortul kayaç örneğinin petrografik analiz ve aşınma indeksleri çalışılmıştır. Kayaç aşındırıcılığının kayaç içerisindeki kuvars ve diğer aşındırıcı minerallerin, ortalama kuvars tanecik büyüklüğünün, çimento tipinin bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Kayaç dayanımının kayaç aşındırıcılığı üzerindeki etkisinin daha az önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır [36].

Hem yumuşak hem de sert kayaçlarda geniş kapsamlı testler gerçekleştirilmiş ve kayaç dayanımının, CAI değerleri üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, kayaç dayanımının aşındırıcılıkta baskın olduğu için Cerchar “Aşınma” endeksi terimini kullanmanın yanlış olduğu öne sürülmüştür [29].

Benzer şekilde dört kayaç türü üzerinde birçok test yapılmış ve Cerchar aşındırıcılık indeksi ile ne kuvars içeriği ne de eşdeğer kuvars içeriği arasında anlamlı bir korelasyon bulunmadığı sonucuna varılmıştır [37]. Ayrıca geniş bir aşınma ve mukavemet yelpazesine sahip 109 örnek üzerinde Cerchar testi gerçekleştirmiştir. Yalnızca Eşdeğer Kuvars İçeriğinin, CAI Testiyle ölçülen aşınma değerlerini etkin bir şekilde açıklamaya uygun olmadığı sonucuna varmışlardır.

3.3.7. Pin Hareket Hızı ve Sonuçlar Üzerine Etkisi

Yapılan çalışmalarda pin hareket hızı konusunda farklı sonuçlar da elde edilmiştir. Kaya numunesinde pinin 1 saniyede 10 mm ilerlemesi gerektiği belirtilmiştir. Michalakopoulos ve diğerlerinin [31] yaptığı çalışmada pin kayaç numunesi üzerinde 1 mm/sn hızlı ilerletilerek aşınma deneyleri yapılmıştır.

Yapılan farklı pin hareket hızı test sonuçlarında pin hareket hızının Cerchar aşındırıcılık indeksi değerlerinde büyük etkisi olabileceği görülmüştür. Kayaç numune yüzeyinin pürüzlü veya iri mineraller içermesi sonucunda pin hareketi esnasında bu durum pinin sıçramasına sebep olabilir ve test sonuçlarını doğrudan etkileyebilir. Bu durumda pin hareket hızı düşürülmelidir.

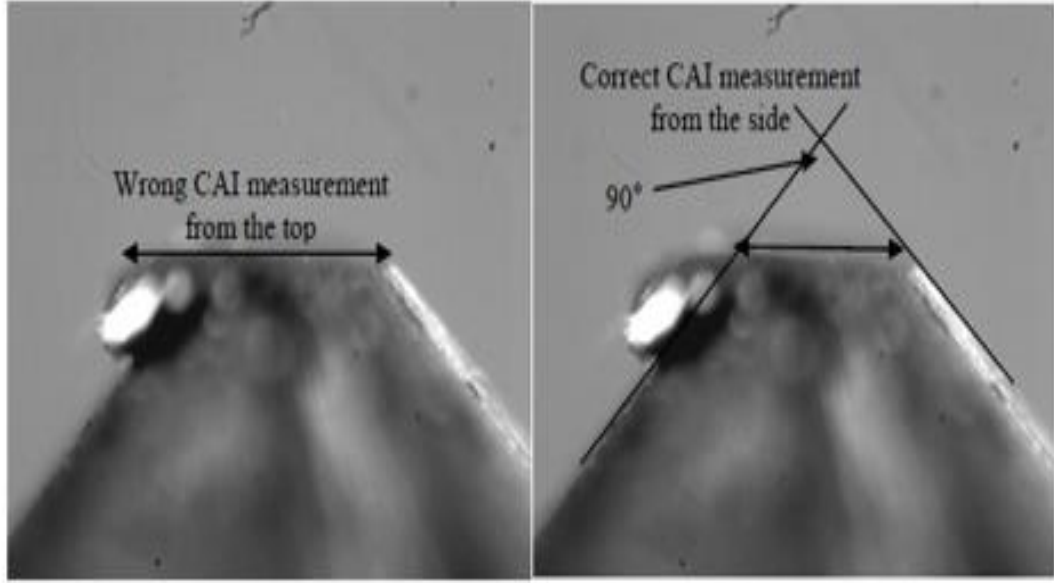
Yapılan kısıtlı test sonuçlarında yavaş pin hareket hızının aşınmanın %40 daha fazla olduğunu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kullanılan Cerchar test düzeneği ve pin sertliği deney sonuçlarını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Pin hareket hızının yüksek olduğu testlerde aşınmanın daha düşük olduğu vurgulanmıştır [38].

3.3.8. CAI Ölçüm Cihazları ve Yöntemleri

Cerchar pin üzerinde oluşan aşınmayı okumak için mikroskop kullanılmasını önermektedir. Ancak okuma prosedürü ve mikroskop konusunda ayrıntılı bir açıklama bulunmamaktadır. Pin ucunda oluşan aşınmanın hassasiyetle okunması CAI değerleri açısından çok önemlidir.

Yapılan farklı çalışmalarda okumalarda mikroskop önerilerinde bulunulmuştur. En az 24 kez büyütme özelliğine sahip mikroskop kullanılması belirtilmiştir. Diğer bir araştırmacı tarafından ise 50 kez büyütebilen yansıtımlı ışık mikroskobu kullanılarak aşınma miktarının okunup değerlendirilmesini önerilmiştir [30].

Üstten pinin görüntülenme ile ilgili zorlukların, son zamanda geliştirilen Norveç SINTEF'te geliştirilen yeni ölçüm tekniği ile önemli ölçüde azaltılabileceğini belirtilmiştir. Bu sistem, pinin dijital mikroskop fotoğraflarının analizini içerir ve aşınmayı pinin yan kısmından gösterir. Farklı kişilerin kullanımında sonuçlarda iyi bir korelasyon elde edilmiştir. Bu sistemde, gerçek ölçüm yapılmadan önce pinin doğru duruş açısı belirlenir. Doğru açının belirlenmesi pin ucunda oluşan aşınmanın başlangıç ve bitiş noktasının belirlenmesi açısından önemlidir [38]. Şekil 3.2'de bu tekniği kullanarak aşınma çapının ölçülmesi için mikroskop kullanımı altında pim ucunun yandan görünüşünü göstermektedir.



Şekil 3.2. Pin ucu görünümü ve aşınma ölçümü [38].

3.2.9. Cerchar Aşındırıcılık İndeksini Etkileyen Diğer Parametreler

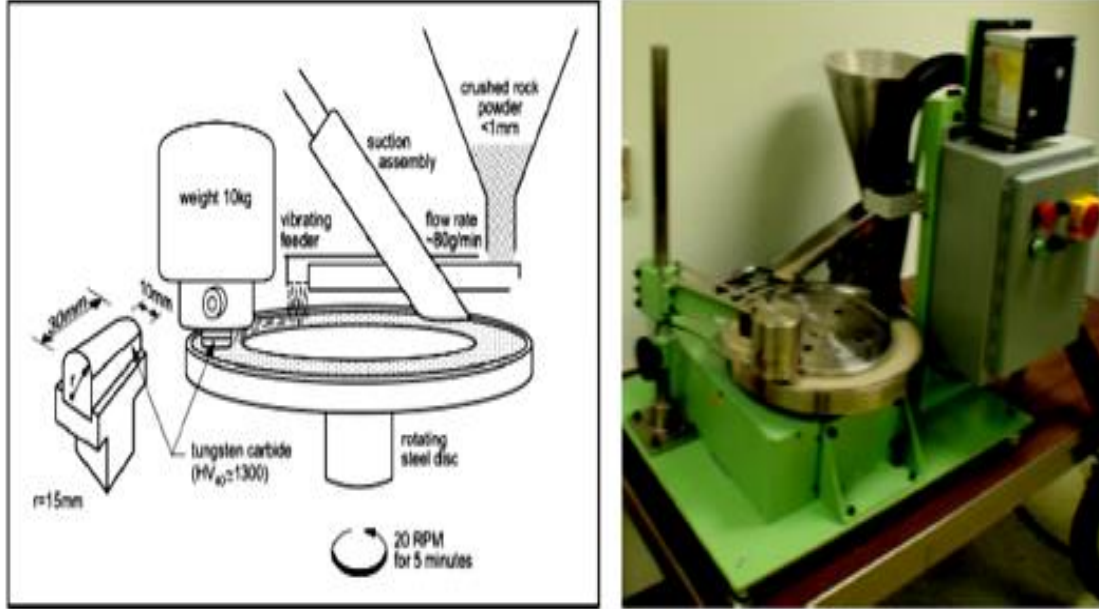
Yapılan diğer çalışmalarda Cerchar Aşındırıcılık indeksi değerlerinin kayaç porozitesiyle ters orantılı olarak etkilenebileceği sonucuna varılmıştır. Kayaç aşındırıcılığının çimento malzemesinin türüne ve derecesine bağlı olduğunu belirlemiştir. Çimentolanma derecesi %50'den yüksek kayaçların aşındırıcılığı yüksek, %50'den düşük olan kayaçların aşındırıcılığının düşük olduğu görülmüştür [19].

Young Modülü ve eşdeğer kuvars içeriğiyle ilgili çalışmalar yapılarak klasik kaya mekaniği parametreleri ile CAI yorumlamanın uygun olduğu sonucuna varılmıştır. CAI'nin kayaçtaki aşındırıcı mineral içeriğinin etkisinin çok önemli olduğu gözlemlenmiştir [30].

3.4. NTNU Kayaç Delinebilirliği Test Sistemi (SINTEF)

Bu test yöntemi Norveç Üniversitesinde (NTNU) 1960 yılında geliştirilmiş olup, üç ayrı test ve indeksin kombinasyonudur. Bu testlerden biri Aşındırma Testidir. Aşındırma Değerleri (AV/AVS) zamana bağlı olarak tungsten karbit kesicinin kayaç tozuyla aşınması ile ilişkilidir. Aşınma değeri (AV) 2 ile 4 arasında tungsten karbit kesici ucun

her 5 dakikada bir tartılarak miligram cinsinden kaybettiği miktardır. 100 tur uygulanarak bu test gerçekleştirilir. AVS testi AV testi ile aynı olup sadece her 1 dakikada miligram cinsinden kaybedilen miktardır. 20 tur uygulanarak test yapılır. Şematik olarak testin gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. SINTEF aşındırıcılık testi.

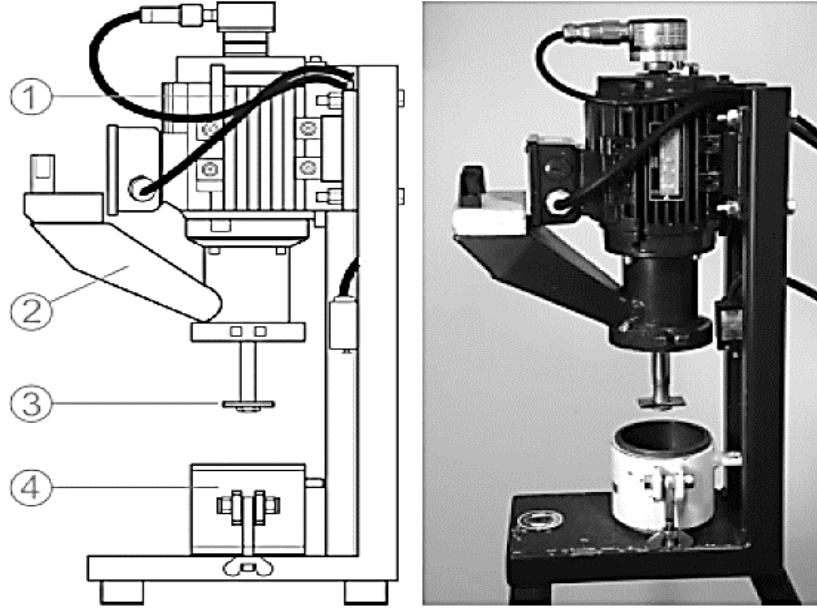
3.5. LCPC Aşındırıcılık Testi

LCPC testi Fransa'da (Frenc Standard AFNOR P18-579, 1990) aşındırıcılık ve kırılgenlik testi olarak geliştirilmiştir. Deney aleti Şekil 3.4' de görülmektedir. Bu testte kayaç örnekleri kırılmış ve elenmiş olmalıdır. İç çapı 93 mm olan silindire toplam ağırlığı 500 g olan hazırlanmış test örneği doldurulur. 50x25x5 mm ölçülerinde dikdörtgen çelik karıştırıcı ile dakikada 4500 tur ile 5 dakika boyunca döndürülür. Tane boyutu analizi test öncesi ve sonrası yapıp karşılaştırılmalıdır [39]. Karıştırıcı yumuşak çelikten (Rockwell B 60-75) üretilmiş olmalıdır. Aşındırma katsayısı (ABR) karıştırıcının ağırlık kaybı ile ilişkilidir ve şu şekilde hesaplanır.

$$ABR = \frac{(P_0 - P)}{G_0} \quad (4)$$

Burada,

P_0 : Test öncesi karıştırıcının ağırlığı (g), P : Test sonrası karıştırıcının ağırlığı (g), G_0 : örnek numunenin ağırlığı (t)



Şekil 3.4. LCPC aşındırma test cihazı [39].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez aşamasında uygulanan yöntemin adımları aşağıda sıralanmıştır:

- 1) Numune temini
- 2) Kayaçların fiziko-mekanik ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi
- 3) Aşındırıcılık deneyleri
- 4) Mikrodalgaya maruz bırakma sonrası aşındırıcılık deneyleri

4.1. Numune Temini

Deneylerde kullanılmak üzere farklı mineral ve dokuya sahip 9 adet magmatik kayaç seçilmiştir. Çizelge 4.1.' de görüldüğü gibi, kayaçlar 6 adet granit, 2 adet siyenit ve 1 adet gabrodan oluşmaktadır. Granitler seçilirken farklı mineral içeriği ve farklı tane büyüklüklerine sahip olmalarına dikkat edilmiştir. Diğer bir husus, numunelerin Türkiye'den ve Dünya'dan farklı lokasyonlara sahip olduğudur.

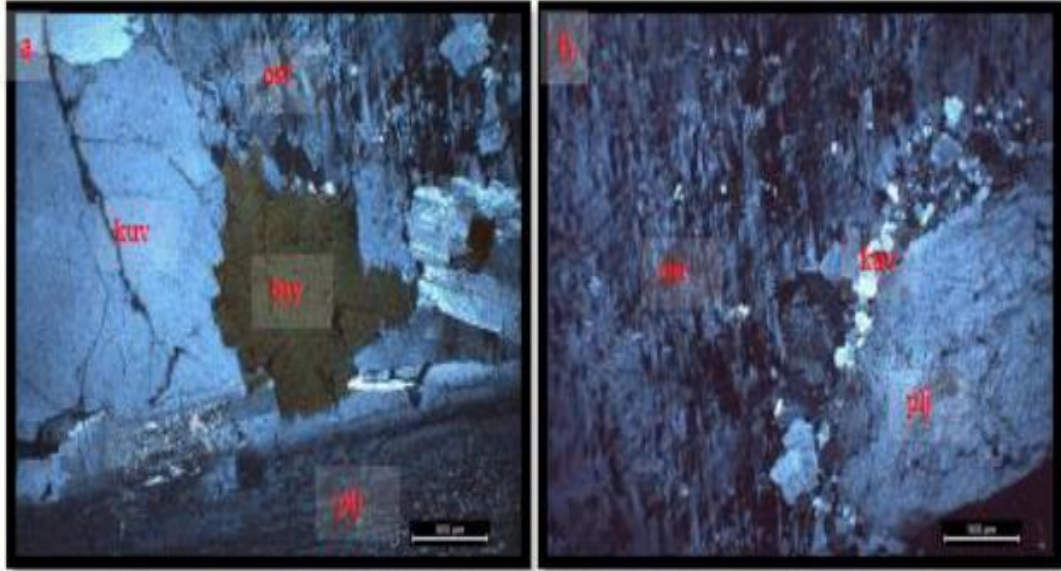
Çizelge 4.1. Deneylerde kullanılan kayaçlar ve lokasyonları.

Kayaç kodu	Kayaç cinsi	Lokasyon
1	Rosa Well (Granit)	İspanya
2	Rosa Miho (Granit)	İspanya
3	Steppe Yellow (Granit)	Mısır
4	Nublado (Granit)	İspanya
5	Kaman Rosa (Granit)	Türkiye
6	Kozak Granit (Granit)	Türkiye
7	Volga Blue (Siyenit)	Ukrayna
8	Jungle Green (Siyenit)	Mısır
9	Nero Turka (Gabbro)	Türkiye

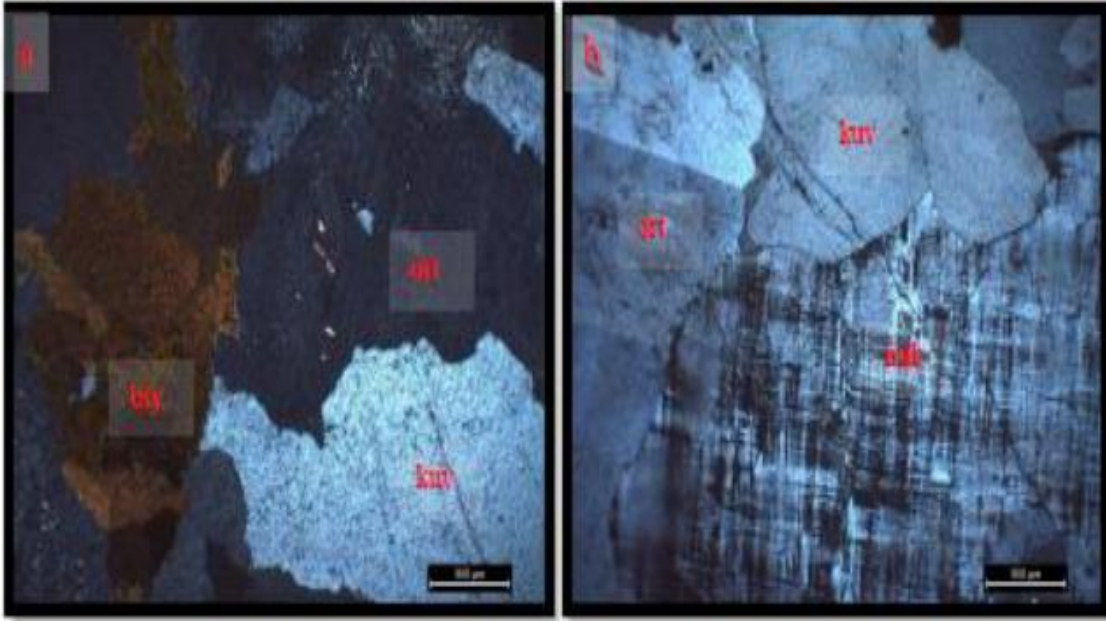
4.2. Kayaçların Mineralojik ve Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

İnce kesitlerin hazırlanması için numuneleri temsil edecek ~20x30x30 mm boyutlarında örnekler elmas uçlu disk kullanılarak kesilmiştir. Elde edilen prizmatik örneklerin geniş yüzeyleri sırasıyla 400 ve 800 mesh SiC toz ile döner tabla üzerinde düzlenmiştir. Örnekler, aşındırıcı tozların temizlenmesi ve kurutulmasını takiben araldit epoksi kullanılarak lam yüzeylerine yapıştırılmıştır. 24 saatlik kurlenme süreci sonunda Buehler Petro-Thin hassas kesme cihazı ile ~ 200 µ kalınlığında kesilen ince kesitler, hassas aşındırma cihazında ~ 30 µ kalınlığa sahip olacak şekilde inceltilmiştir. Struers LaboPol 35 parlatma cihazında 9 µ elmas süspansiyon ile son kez aşındırılan ve düzlenen ince kesit yüzeyleri üzerine araldit epoksi kullanılarak lameller kapatılmıştır. Numuneyi tam temsil etmesi bakımından iri kristalli numuneler için 2 adet ince kesit hazırlanmıştır.

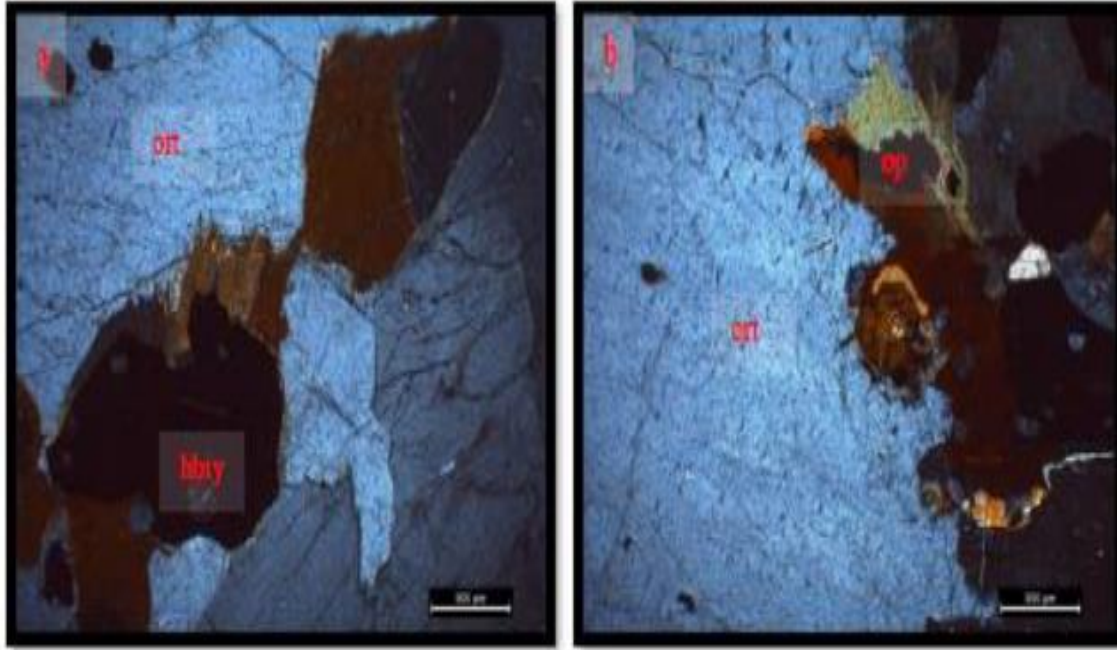
Hazırlanan ince kesitler, mineralojik içeriğinin ve petrografik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla alttan aydınlatmalı polarizan mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Görüntüleme çalışmaları ise mikroskop ile tümleşik kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İnce kesit görüntüleri Şekil 4.1-9' da görülmektedir.



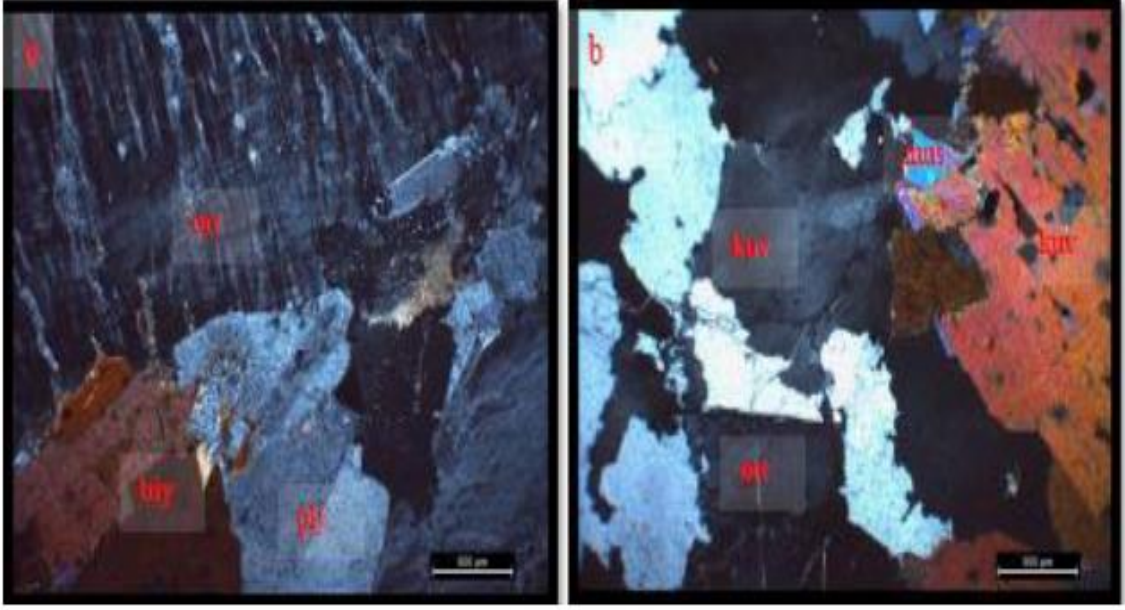
Şekil 4.1. Rosa Well (Granit) numunesinin mikrofotografı: a) Kayacın genel görüntüsü (çapraznikol, 4x), b) Ortoklazlarda gözlenen pertitik doku ve kuvars mikrokristalleri, (çapraz nikol, 4x).



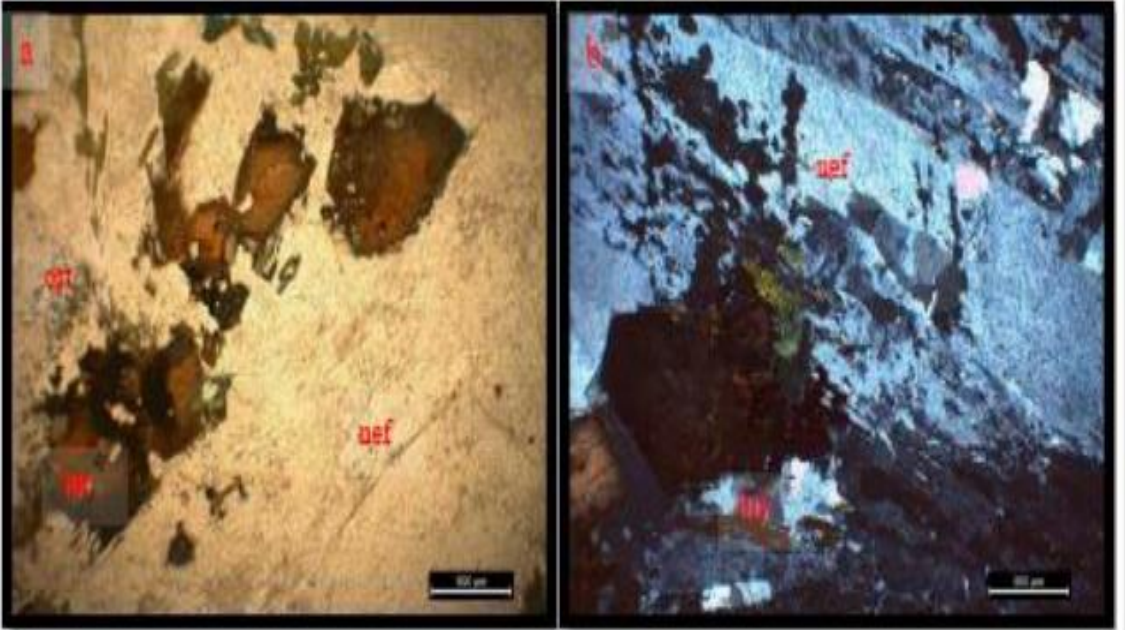
Şekil 4.2. Rosa Miho (Granit) numunesinin mikrofotografı: a) Kayacın genel görüntüsü ve biyotit segregasyonu (çapraz nikol, 4x), b) kayanın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).



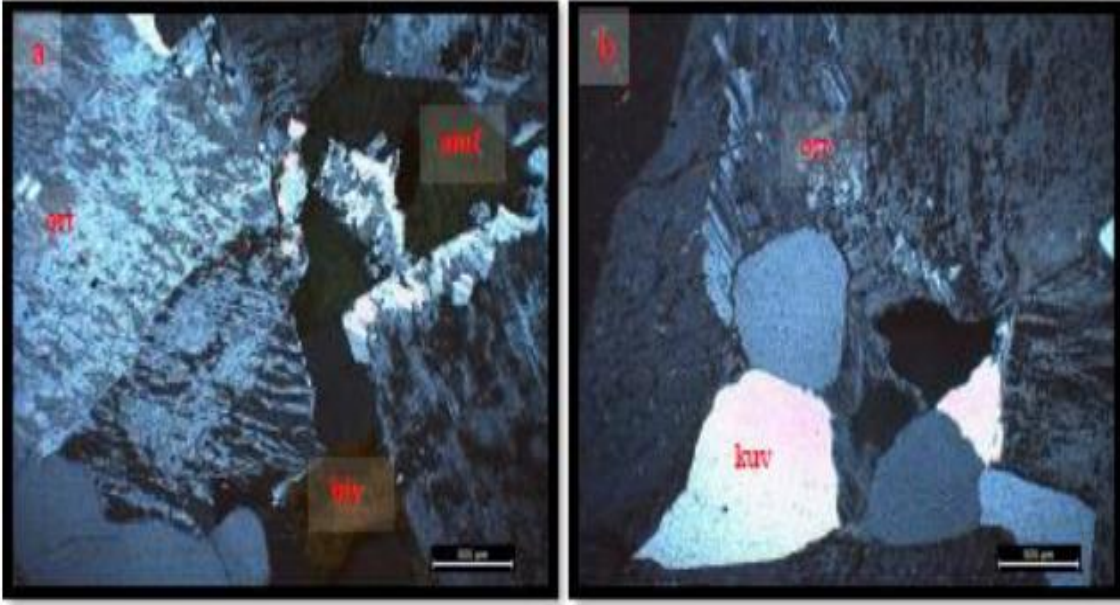
Şekil 4.3. Volga Blue (Siyenit) numunesinin mikrofotografı: a) Kayacın genel görüntüsü ve hidrobiyotitleşme, (paralel nikol, 4x), b) kayanın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).



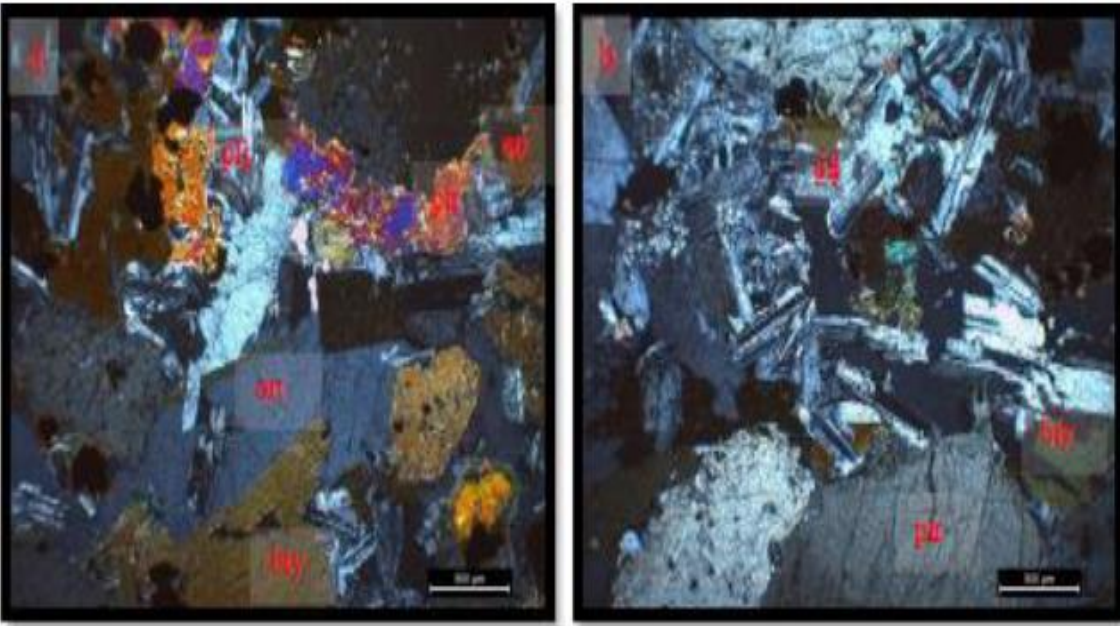
Şekil 4.4. Nublado (Granit) numunesinin mikrofotoğrafı: a) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).



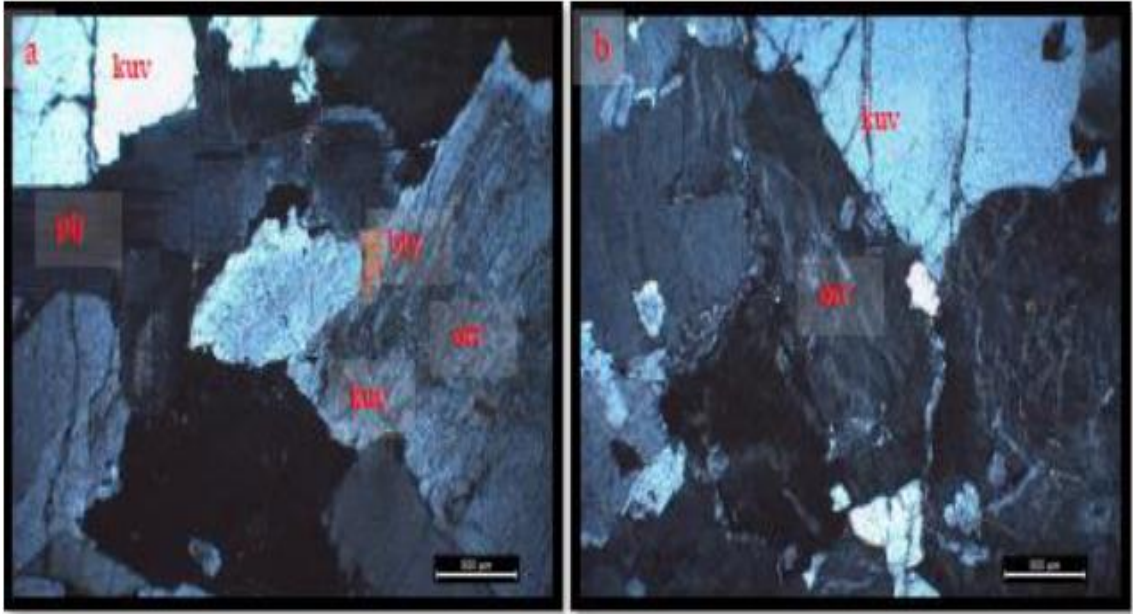
Şekil 4.5. Jungle Green (Siyenit) numunesinin mikrofotoğrafı: a) Kayacın genel görüntüsü ve turmalin mineralleri, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü ve nefelin mineralleri, (çapraz nikol, 4x).



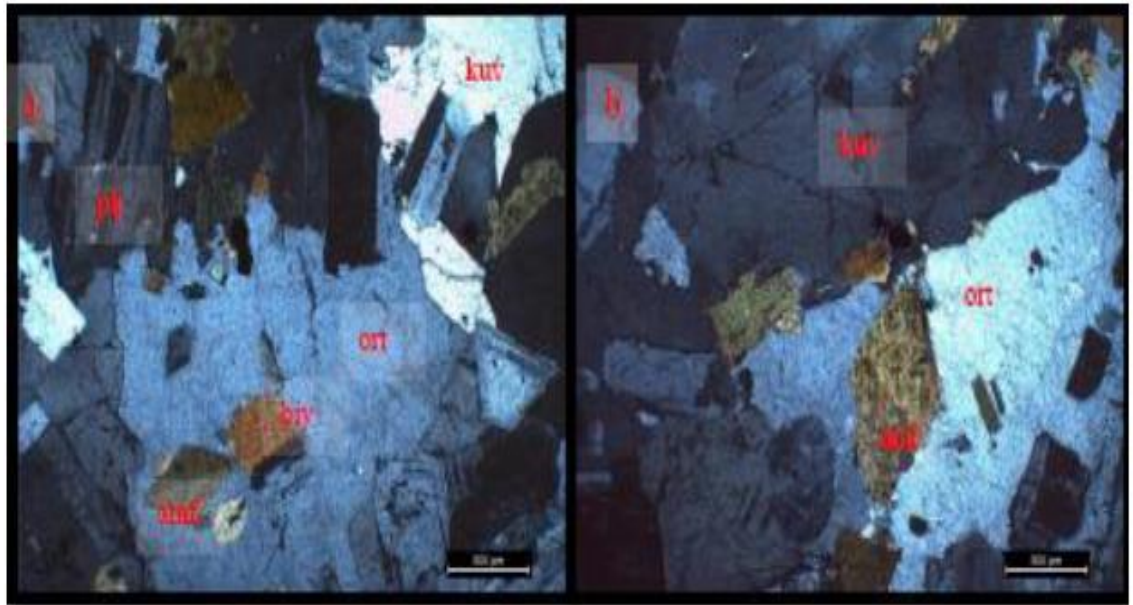
Şekil 4.6. Steppe Yellow (Granit) numunesinin mikrofotografı: a) Kayacın genel görüntüsü ve peritik yapı, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).



Şekil 4.7. Nero Turka (Gabbro) numunesinin mikrofotografı: a) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü ve subofitik doku, (çapraz nikol, 4x).



Şekil 4.8. Kaman Rosa (Granit) numunesinin mikrofotografı: a) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).



Şekil 4.9. Kozak Granit (Granit) numunesinin mikrofotografı: a) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x), b) Kayacın genel görüntüsü, (çapraz nikol, 4x).

Numunelerin mineral içerik ve yüzdeleri nokta sayım yöntemiyle belirlenmiştir. Her kayaca ait mineral yüzdeleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Numunelerin mineral içerikleri [40].

Mineral Türü	Kayaç Kodları ve Mineral İçeriği (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kuvars	15	27	23	19	28	12	-	-	-
Ortoklaz	45	26	36	28	41	25	70	35	13
Plajiyoklaz	11	12	18	15	18	32	-	8	27
Mikroklin	4	3		15	-	-	-	-	-
Biyotit	9	12	8	11	9	16	12	8	7
Hidrobiyotit	5	-	-	-	-		3	-	-
Muskovit	-	-	-	8	-	-	-	-	-
Amfibol	-	-	3	-	-	13	-	-	4
Serisit	4	9		4			4	3	-
Klorit	4	8	2		4	2		2	4
Titanit	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Piroksen	1		4	-	-		6	-	42
Epidot		3	4	-	-	-	-	-	3
Nefelin	-	-		-	-	-	-	32	-
Turmalin	-	-		-	-	-	-	6	-
Garnet	-	-		-	-	-	-	6	-
Kalsit	-	-	2	-	-	-	-	-	-
Pirit	-	-	-	-	-	-	3	-	-
Magnetit	-	-	-	-	-	-	2	-	-

Deneylerde kullanılan kayaç numuneleri, gerçekleştirilen bir projeden geriye kalan kayaçlara ait olduklarından fiziko-mekanik deneyler tekrarlanmamıştır [40]. Kayaçların bazı fiziksel-mekanik özelliklerinin deney sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Test edilen kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri [40].

Kayaç kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Porozite (%)	Brazilian çekme dayanımı (MPa)	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
1	2.57	1.35	6.86	115.01
2	2.58	1.06	8.43	129.13
3	2.49	1.21	8.22	152.70
4	2.65	1.19	8.68	131.46
5	2.50	2.17	4.38	95.51
6	2.62	1.27	10.06	141.32
7	2.64	1.97	8.64	116.32
8	2.63	1.24	10.82	204.89
9	3.00	0.51	12.98	197.70

4.3. Sıcaklık Ölçümü

Mikrodalgaya maruz bırakıldıktan sonra numuneler fırından çıkarılır çıkarılmaz ulaştıkları yüzey sıcaklık dereceleri infrared (kızılötesi) termometre ile uzaktan ölçülmüştür (Şekil 4.10.). Kullanılan kızılötesi termometrenin lazer ışınları numune üzerinde gezdirilerek çok sayıda ölçüm yapılmış ve cihazın otomatik hesapladığı ortalama sıcaklık dereceleri kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçlarının detayı EK-1’de, ortalamaları Çizelge 4.4.’ de verilmiştir.



Şekil 4.10. Numunelerin ısı derecelerinin kızılötesi termometre ile ölçülmesi.

Çizelge 4.4. Numunelerin ortalama sıcaklık değerleri.

Kayaç kodu	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası ortalama sıcaklık (°C)	
		2kW için	6kW için
1	8.0	60.9	169.7
2	9.2	52.9	106.1
3	11.9	81.5	200.8
4	9.8	48.2	122.1
5	10.0	51.1	207.4
6	10.9	86.4	341.7
7	9.1	388.6	928.3
8	8.8	72.5	511.9
9	8.2	353.1	645.1

4.4. Aşındırıcılık Deneyleri

Numunelerin aşındırıcılıkları West tipi Cerchar aleti kullanılarak belirlenmiştir. Deneyler Brazilian çekme deneyinde kırılmış numunelerin pürüzlü yüzeyleri kullanılarak yapılmıştır. West tipi deney aletinin (Şekil 4.11) kullanıldığı aşındırıcılık deneylerinde ISRM [41] yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.12’de deneylerde kullanılan numuneler ve cerchar uçları verilmiştir.

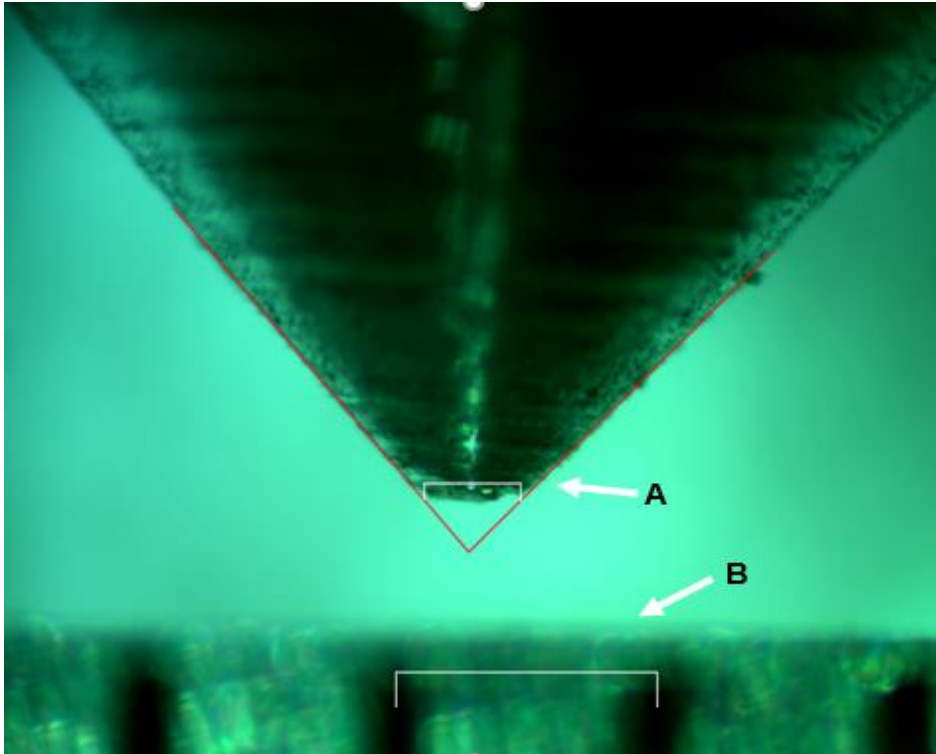


Şekil 4.11. West tipi Cerchar aşındırıcılık deney aleti deney aleti.



Şekil 4.12. Cerchar uçları ve deney numuneleri.

Şekil 4.13.' de Cerchar deneyi sonrası aşınmış bir ucun görüntüsü örnek olarak verilmiştir. Şekilde A ile ucun aşınmış kısmı, B ile 1 mm uzunluğa sahip ölçek gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Cerchar uçlarının aşınması ve mikroskop altındaki görüntüsü.

Önce mikrodalgaya maruz bırakılmamış numunelerde deneyler her kayaç için en az 5 defa tekrarlanmıştır. Daha sonra, 2 ve 6kW güçlerde mikrodalgaya maruz bırakılmış numunelerde her güç grubu için 6' şar adet numunede deneyler en az 5 defa olmak üzere yapılmıştır. Numune yetersizliğinden dolayı Steppe Yellow (Granit) kayacı için 6kW grubunda 4 numunede deney yapılabilmektedir. Numunelerin Cerchar aşındırıcılık ortalama değerler Çizelge 4.5'de verilmiştir. Detaylar EK-2'de verilmiştir.

Şekil 4.14'de deney sonrası bazı numune örnekleri verilmiştir. Şekil 4.15' ise numunelerin genel görünüşü sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Numunelerin ortalama Cerchar aşındırıcılık değerleri.

Kayaç Kodu	Ortalama Cerchar değeri	Mikrodalga sonrası ortalama Cerchar değeri	
		2kW için	6kW için
1	3.5	3.1	2.9
2	4.5	3.0	2.6
3	4.5	3.5	3.0
4	4.0	2.8	2.0
5	4.2	3.6	3.0
6	3.6	3.4	3.2
7	3.7	2.0	1.2
8	4.2	3.5	2.6
9	3.4	2.7	2.3



Şekil 4.14. Cerchar aşındırıcılık deneyi sonrası bazı numunelerin görünüşleri.



Şekil 4.15. Numunelerin genel görünüşü.

4.5. Mikrodalgaya Maruz Bırakma Sonrası Aşındırıcılık Deneyleri

Deneylerde Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan 2.45 GHz frekansa sahip endüstriyel kapalı tip mikrodalga fırın kullanılmıştır (Şekil 4.16). Fırının maksimum gücü 6kW olup; 1-6kW arasında ayarlanabilir özelliktedir.

Deney numuneleri, 2 ve 6kW güçlerde 180s süreyle mikrodalgaya maruz bırakılmıştır. Ortalama değerleri kullanarak daha sağlıklı sonuçlar elde etmek amacıyla her kayaç çeşidi için 2 ve 6kW güçlerde 3' er adet numune üzerinde Cerchar aşındırıcılık deneyleri yapılmıştır. Ortalama değerler Çizelge 4.5'de, detaylar ise EK 2' de verilmiştir.



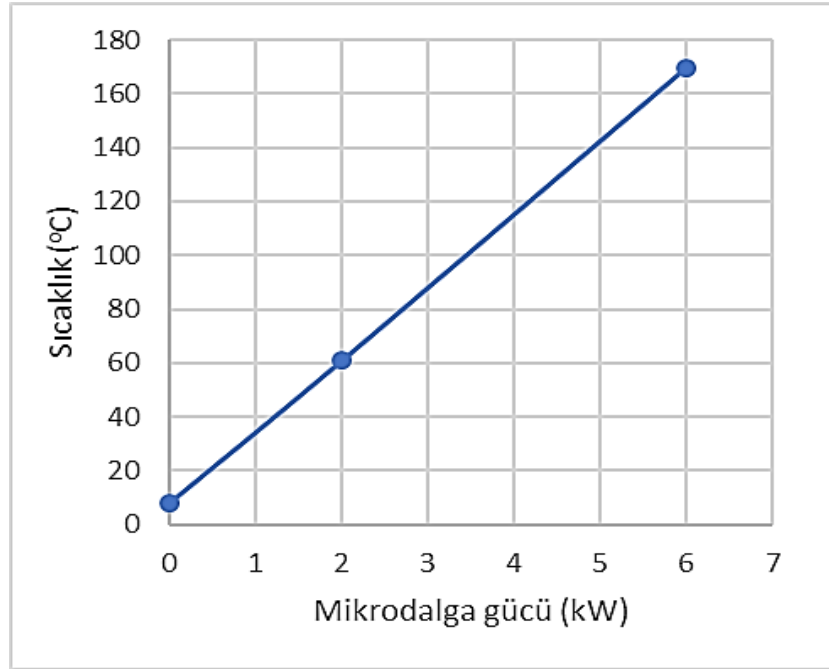
Şekil 4.16. Deneylerde kullanılan 6 kW güce sahip mikrodalga fırın.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Numunelerin 180s süreyle 2 ve 6kW gücünde mikrodalgaya maruz bırakılmaları sonucu ölçülen yüzey sıcaklıkları ve Cerchar aşınma indeks değerlerinin analizi aşağıda yapılmıştır.

5.1. Mikrodalgaya Maruz Bırakma ile Yüzey Sıcaklığı İlişkisi

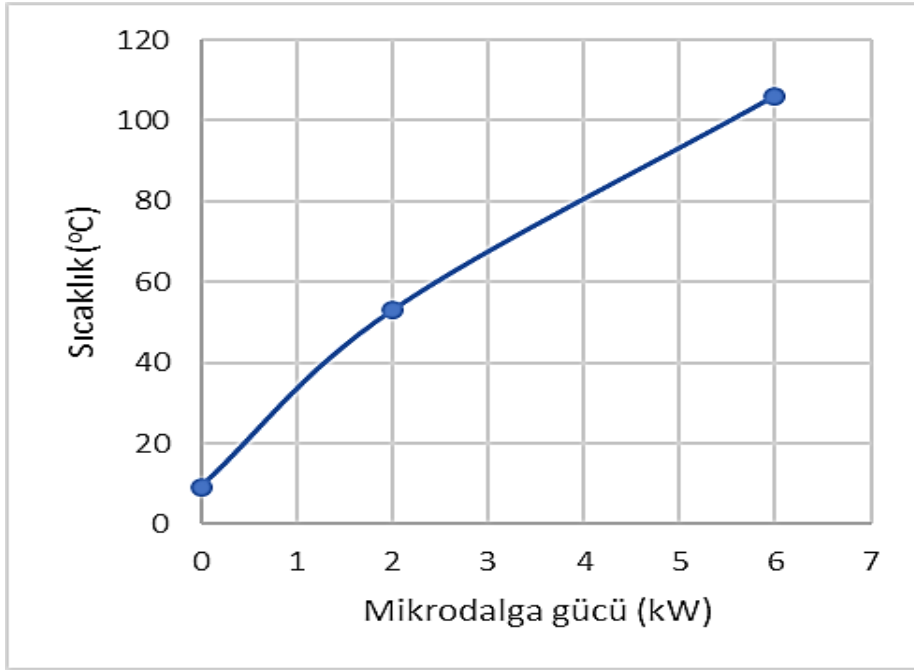
Şekil 5.1’de Rosa Well (Granit) numunelerine 2kW ve 6kW mikrodalga enerjisi uygulanması ile yüzey sıcaklığı arasındaki ilişki verilmiştir. 2kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonra yüzey sıcaklığı 61°C olurken, 6kW mikrodalga enerjisine maruz bırakıldıktan sonra yüzey sıcaklığı 170°C’ye ulaşmıştır. Şekil 5.1’ de görüldüğü gibi, artan mikrodalga gücüne bağlı olarak numune sıcaklığı doğrusal olarak artmaktadır.



Şekil 5.1. Rosa Well (Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.

Rosa Well (Granit) numunesinin mineral içeriklerine bakıldığında %15 kuvars, %45 ortoklaz içermektedir. Kuvars ve ortoklaz mikrodalga enerjisi metalik minerallere göre daha az absorbe etmektedir. Bu nedenle mikrodalga enerjisi uygulandığında Rosa Well (Granit) numunesinin yüzey sıcaklığı düşük kalmıştır.

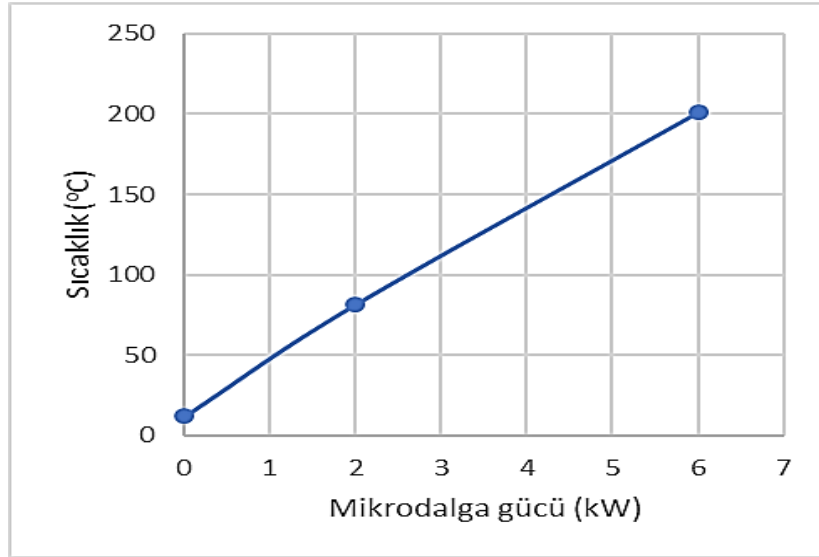
Rosa Miho (Granit) numunelerinin yüzey sıcaklığı 2kW-6kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonraki değişimleri Şekil 5.2’de verilmiştir. 2kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonra yüzey sıcaklığı ortalama 52.9 °C olarak ölçülmüştür. 6kW güç altında ise sıcaklık 106.1 C° ye çıkmıştır. 2kW’ a kadar güç artışına bağlı olarak sıcaklık artışı hızlı olurken, 2kW’ dan sonra sıcaklık artışının biraz daha yavaş olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2. Rosa Miho (Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.

Rosa Minho (Granit) kayaç numunelerinin yüksek oranda (%15) kuvars minerali içermesi, bu kayacın mikrodalga enerjisini absorbe etmesini düşürmüştü ve yüzey sıcaklıkları diğer kayaç numunelerine göre daha düşük kalmıştır

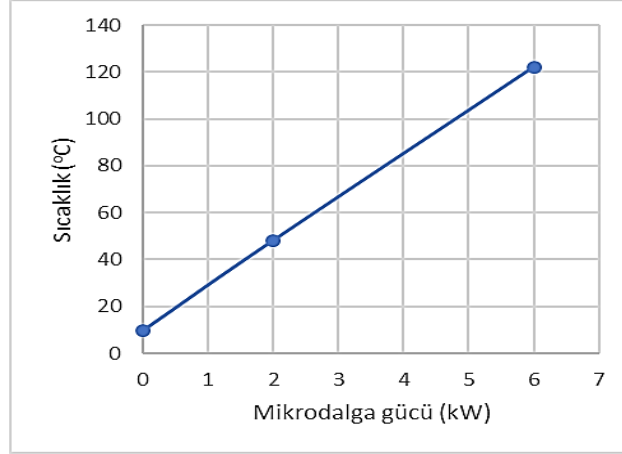
Steppe Yellow (Granit) numunelerinin mikrodalga enerjisi ve sıcaklık ilişkisini Şekil 5.3'te verilmiştir. 2kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan yüzey sıcaklığı ortalama 81.5 °C olduğu görülmüştür. Uygulanan 6kW güç sonrasında numune sıcaklığı 200.8 °C'ye ulaşmıştır. Mikrodalga gücünün artışıyla birlikte numune sıcaklığının doğrusala yakın olarak arttığı görülmüştür.



Şekil 5.3. Steppe Yellow (Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.

Steppe Yellow (Granit) numunelerinin mineral içerikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Feldspat ve kuvars içeriğinin %20'lerin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu minerallerin mikrodalgayı daha az absorbe etmesinden dolayı ortalama yüzey sıcaklığı 200 °C olarak ölçülmüştür. Bir numunenin yüzey sıcaklığı 245°C'ye ulaşmıştır. Mineral içeriğine bakıldığında Rosa Well ve Rosa Minho'dan farklı olarak %3 amfibol minerali içermektedir. Amfibol, metalik iyonlara sahip olduğundan mikrodalgadan daha fazla etkilenmektedir.

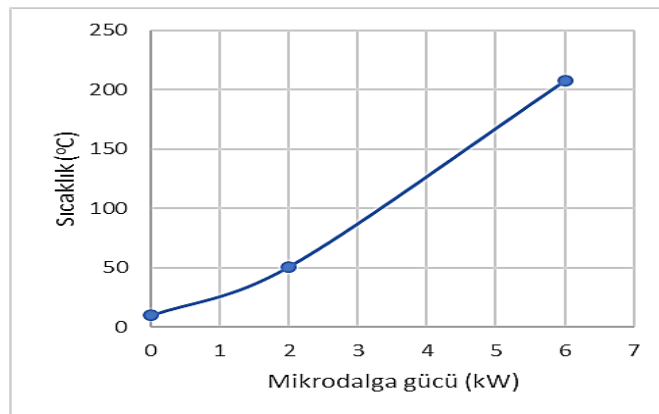
Şekil 5.4'de görüldüğü gibi, 2kW mikrodalga enerjiye maruz bırakıldıktan sonra Nublado (Granit) numunelerinin yüzey sıcaklığı 48.2°C olarak ölçülmüştür. Bu kayaç numuneleri için 6kW gücünde mikrodalga uygulanması sonunda 122.1 °C sıcaklığa ulaşılmıştır. Numune sıcaklığı mikrodalga gücünün artışına paralel olarak doğrusal olarak artmaktadır.



Şekil 5.4. Nublado (Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.

Sıcaklık ölçümleri 3 numunede tekrarlanmıştır. Yüzey sıcaklığı ölçümlerinin detayları EK-1’de verilmiştir. Mikrodalga absorbe kapasitesi düşük olan mineraller (%19 kuvars, %28 ortoklaz, %15 plajiolaz, %11 biyotit) içeriğinden dolayı yüzey sıcaklığının 120°C’yi geçmediği görülmüştür.

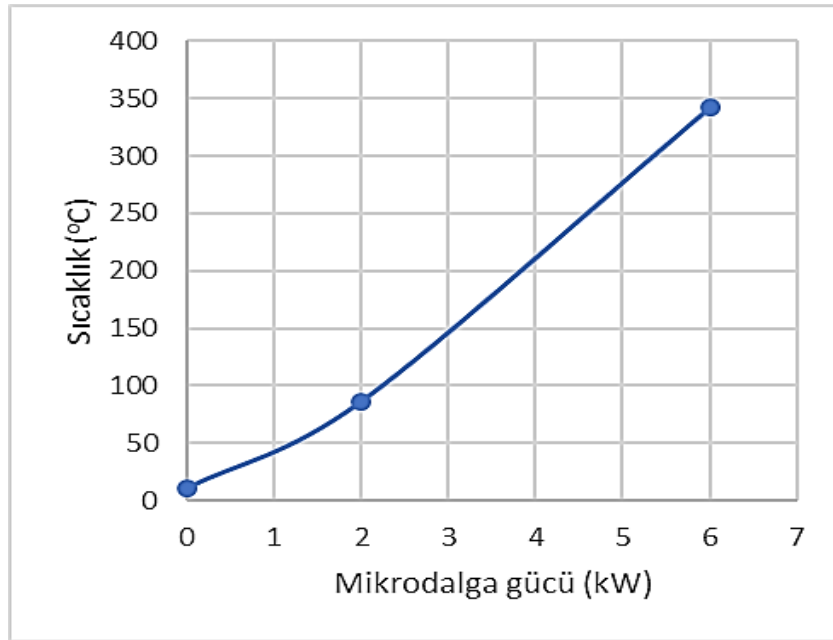
2kW ve 6Kw mikrodalga enerjisi altında Kaman Rosa (Granit) numunelerinin yüzey sıcaklığına ait grafik Şekil 5.5’te gösterilmiştir. 2kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonra ortalama yüzey sıcaklığı 51.1°C’ye ulaşmıştır. 6kW gücünde mikrodalga enerjisi uygulandığında ise 207.4°C sıcaklık değeri elde edilmiştir.



Şekil 5.5. Kaman Rosa(Granit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.

2kW'a kadar güç artışına bağlı olarak sıcaklık artışı yavaş olmakla birlikte, 2kW'dan sonra sıcaklık artışının daha hızlı olduğu görülmüştür. Mineral içeriği açısından kuvars (%28) oranının yüksek olması, mikrodalga enerjisini soğurmasını azaltmış ve yüzey sıcaklığı düşük kalmıştır.

Bir diğer granit numunesi olan Kozak Granit numunelerinin sıcaklık-mikrodalga gücü grafiği şekil 5.6'da verilmiştir. 180 saniye 2kW mikrodalga enerjisi uygulaması sonunda ortalama 86°C' olmuştur. 6kW gücünde mikrodalga enerjisi uygulandığında ise 341.7°C' ye ulaşan sıcaklık değeri okunmuştur. Sıcaklık artışı, 2kW' a kadar güç artışı ile birlikte yavaş olurken, 2kW' dan sonra daha hızlı olmuştur.

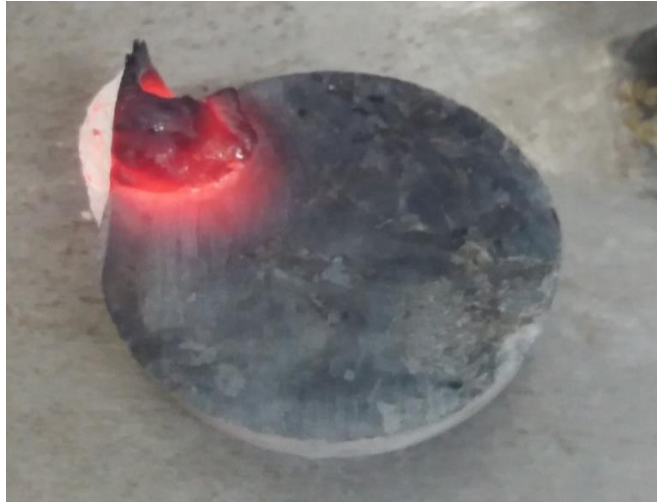


Şekil 5.6. Granit (Kozak) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.

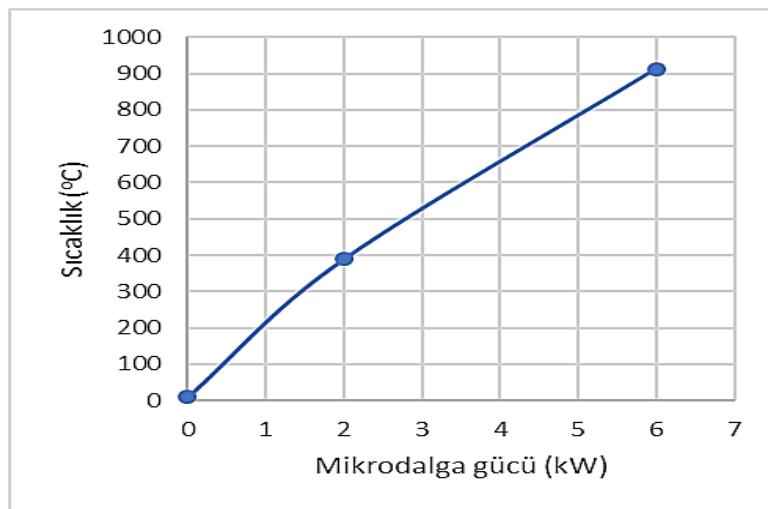
Kuvars ve feldspat mineralleri mikrodalga enerjisini az absorbe etmektedir [41]. Granitler de, çoğunlukla kuvars ve feldspat minerallerinden oluştuğundan dolayı düşük güçte mikrodalga absorbe kapasiteleri zayıftır ve az ısınırlar. Test edilen granit numunelerinden Kozak Graniti 6kW güçte 406.3°C ile en yüksek sıcaklığa ulaşmıştır. Diğer granit numunelerinde ise sıcaklık değerleri 6kW güçte 150°C - 350°C arasında değişmiştir. Kozak Granitinde yüksek sıcaklığa ulaşılması, %13 amfibol minerali içermesinden

kaynaklanmaktadır. Amfibol, demir, magnezyum ve alüminyum gibi metalik iyonlara sahip olduğundan dolayı mikrodalga enerjisini çok absorbe etmektedir.

Şekil 5.8’de verilen Volga Blue (Siyenit) numunelerinin ortalama sıcaklığı, 2kW gücündeki mikrodalga enerjisi için 389°C’dir. 6kW gücünde numunelerde metalik minerallerin aşırı ısınmasından (Yaklaşık 900°C) kaynaklanan ergimeler Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



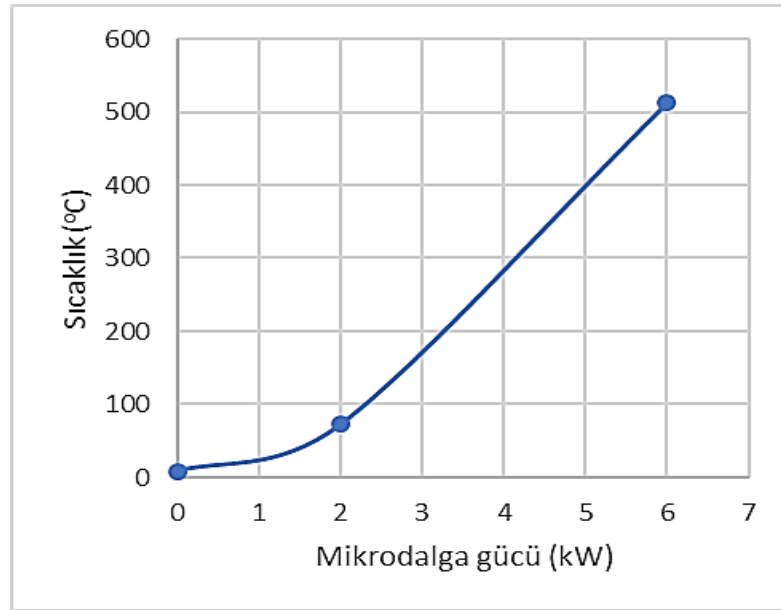
Şekil 5.7. Siyenit numunesinin 6kW mikrodalga enerjisine maruz bırakılmasının ardından erime ve çatlaması.



Şekil 5.8. Volga Blue (Siyenit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.

2kW güçte bile bazı Volga Blue (Siyenit) örneklerinin sıcaklığı önemli derecede artmıştır. Bunun nedeni, bu kayacın pirit (%3) ve manyetit (%2) gibi metalik minerallere sahip olması nedeniyle güçlü bir mikrodalga absorbe edici olmasıdır. [42]. Bu kayaçtaki metalik minerallerin yüzdeleri çok düşük olmasına rağmen yüzey sıcaklığı çok artmıştır. Metalik minerallere ek olarak, bu Volga Blue (Siyenit) metalik iyonlara sahip olan % 6 piroksen mineraline sahiptir. Piroksen minerali de güçlü bir mikrodalga emicidir [43].

Şekil 5.9'de verilen bir diğer Jungle Green (Siyenit) numunelerinin 2kW mikrodalga enerjisi altında ortalama sıcaklığı 73°C'ye ulaşırken, 6kW gücündeki mikrodalga enerjisi altında ise sıcaklığı ortalama 512°C olmuştur. 2kW güçte oldukça düşük bir sıcaklık artışı görülmesine rağmen, 2 kW' dan sonra hızlı bir artışla sıcaklık 6kW güç altında 500°C civarına ulaşmaktadır.



Şekil 5.9. Jungle Green (Siyenit) numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.

Çizelge 4.2.'de gösterildiği gibi, Jungle Green (Siyenit) %6 turmalin ve %6 garnet mineralleri içerir. Bu mineraller alüminyum, demir, magnezyum ve krom gibi metalik elementlere sahip olduklarından mikrodalga enerjisini absorbe etme kapasiteleri yüksektir. Öte yandan, siyenitin (Jungle Green) sıcaklığının Volga Blue (Siyenit)

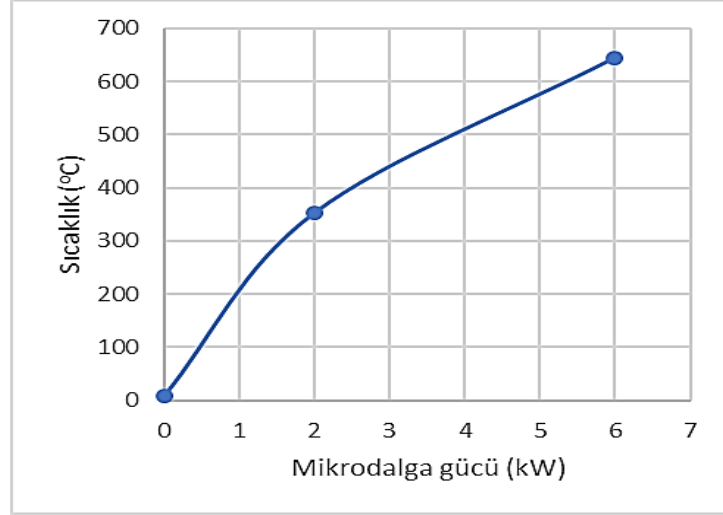
örneğinde olduğu kadar yüksek olmaması, yüksek nefelin içeriğinden (%32) kaynaklanmaktadır. Nefelinin mikrodalga enerjisini absorbe etme kapasitesi zayıftır.

Nero Turka (Gabro)örneklerinin mikrodalga-sıcaklık grafiği şekil 5.11’de verilmiştir. 2kW enerji uygulandığında ortalama 353°C' ye yükselmiştir. Mikrodalga gücünün 6kW olarak uygulanmasında ise sıcaklık ortalama 645°C olmuştur. Bir numunenin sıcaklığı 763.4°C'ye ulaşmış ve bu numunede çatlama gözlenmiştir (Şekil 5.10)



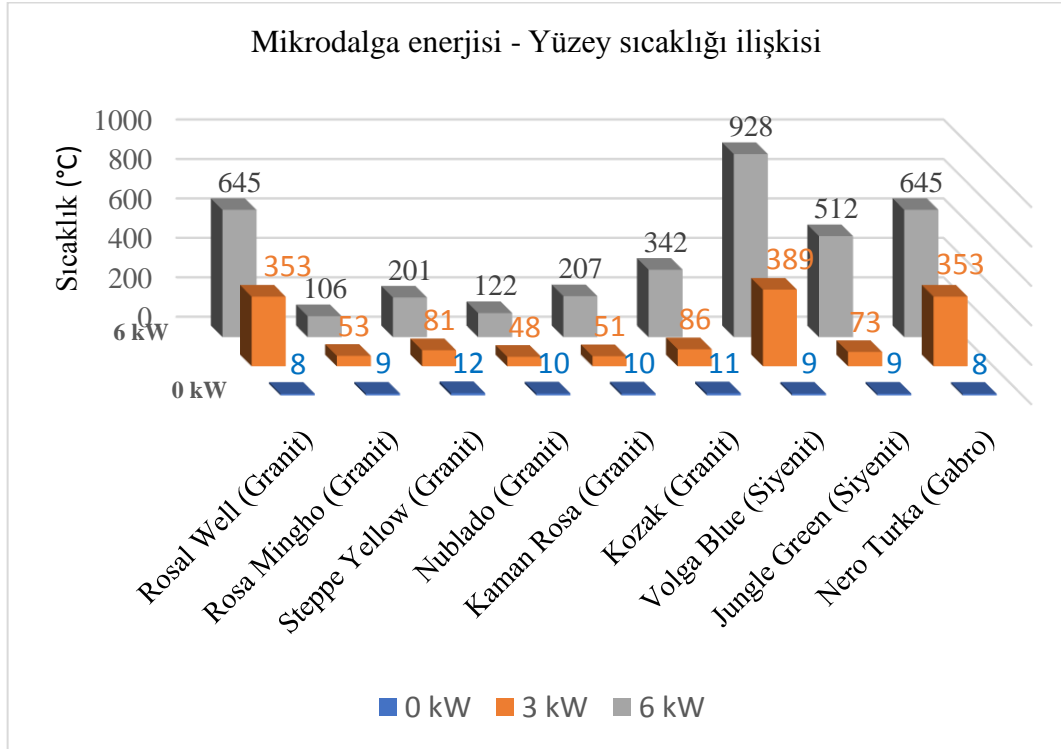
Şekil 5.10. Nero Turka (Gabro)numunesinin mikrodalgaya maruz bırakıldıktan sonra çatlaması.

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi, 2kW güçte Nero Turka (Gabro)numunesinin sıcaklığı hızlı bir artış göstermektedir. 2kW güçten sonra sıcaklık artışı çok hızlı olmasa da hızlı bir şekilde artmaktadır. Nero Turka (Gabro)sıcaklığının mikrodalga gücüne bağlı olarak hızla artarak yüksek bir seviyeye yükselmesi, iyi bir mikrodalga emici olan piroksen mineralinin yüksek oranda (%42) varlığından kaynaklanmaktadır [43].



Şekil 5.11. Nero Turka (Gabro)numunelerinin farklı mikrodalga güçlerinde (2-6kW) yüzey sıcaklıkları.

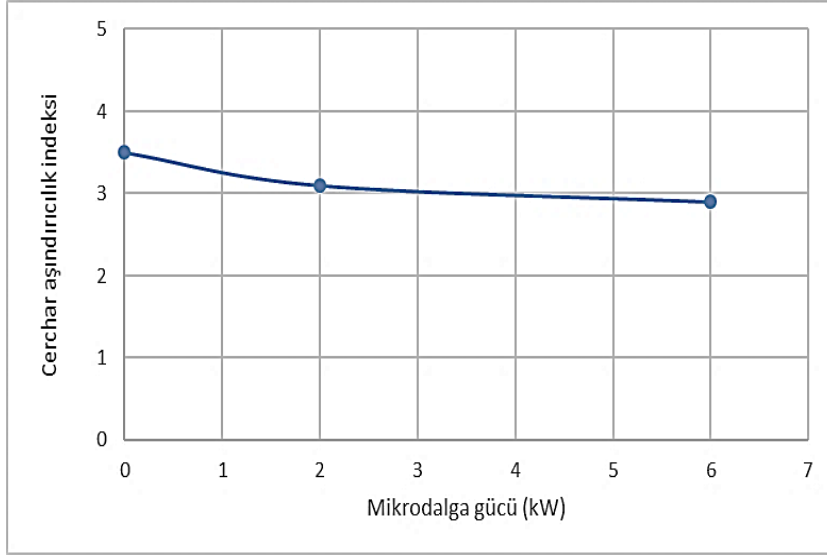
Granit, siyenit ve gabro numunelerine uygulanan 2kW ve 6kW mikrodalga enerjisi sonucunda yukarıda belirtildiği gibi mineral içeriklerine bağlı olarak yüzey sıcaklıklarında farklılıklar görülmüştür. 9 numunenin mikrodalga – yüzey sıcaklığı ilişkisi şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12. Numunelerin(Siyenit, gabro, granit) mikrodalgaya maruz bırakılmadan ve bırakıldıktan sonraki yüzey sıcaklıkları.

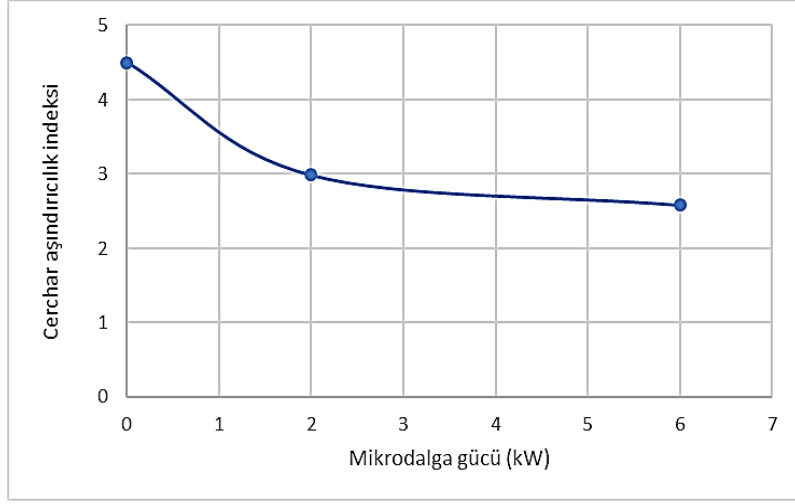
5.2. Mikrodalga Gücü ile Cerchar Aşındırıcılık İndeksi İlişkisi

Şekil 5.13’de görüldüğü gibi Rosa Well (Granit) numuneleri için mikrodalgaya maruz bırakılmayan numunelerin CAI değeri 3.5 olarak ölçülmüştür. 2kW mikrodalgaya maruz bırakılan numunelerin CAI değerinin 3.1’e düştüğü gözlemlenmiştir. 6kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonra ise bu değer 2.9 olarak hesaplanmıştır. Rosa Well (Granit) numuneleri üzerinde yapılan deneylerden sonra mikrodalga enerjisinin büyüklüğü arttıkça CAI değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.



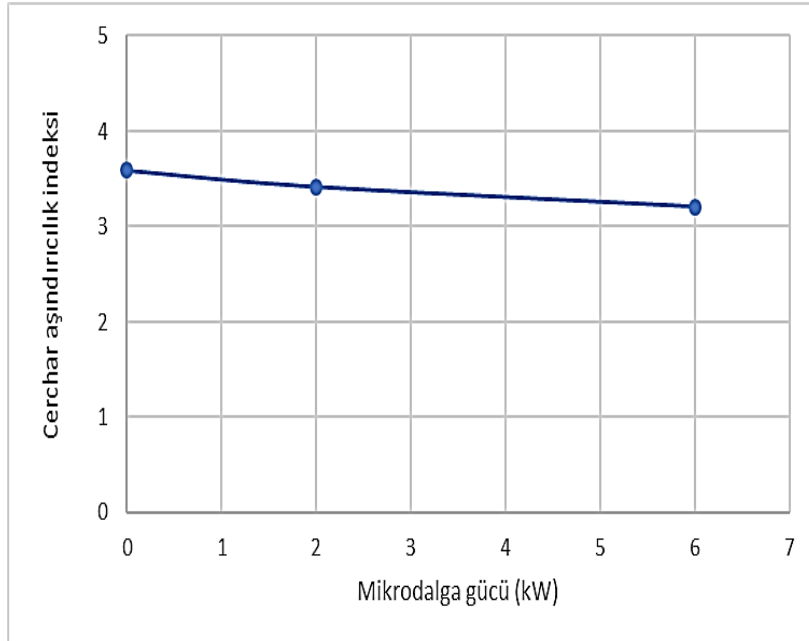
Şekil 5.13. Rosa Well (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.

Rosa Miho (Granit) numunelerinde yapılan deneylerde mikrodalgaya maruz bırakılmadan önce CAI değeri 4.5 olarak Şekil 5.14’te verilmiştir. 2kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonra yapılan Cerchar deneyi sonucunda CAI değeri 3.0’ e düşmüştür. Mikrodalga enerjisinin 6kW uygulandığında ise CAI değeri 2.6 olarak hesaplanmıştır.



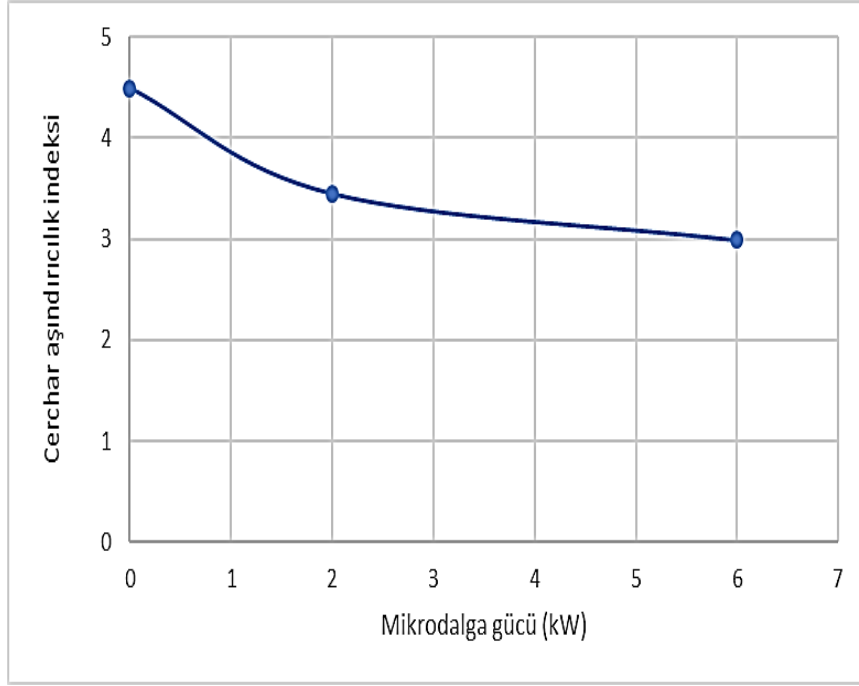
Şekil 5.14. Rosa Miho (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.

Kozak (Granit) mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi Şekil 5.15'te verilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan deneylerde mikrodalga uygulamadan CAI değeri 3.6 olarak hesaplanmıştır. Ardından numuneler 2 kW mikrodalga enerjisine maruz bırakılmış ve CAI değerinin 3.4'e düştüğü gözlemlenmiştir. Uygulanan 6kW mikrodalga enerjisinden sonra CAI değeri 3.2 olmuştur.



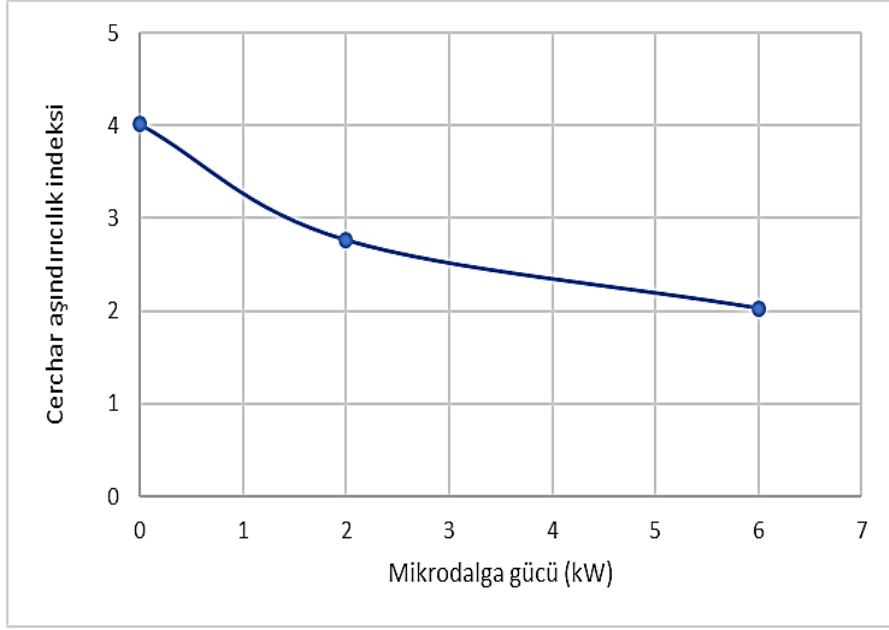
Şekil 5.15. Kozak Granit (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.

Şekil 5.16’te bir diğer Steppe Yellow (Granit)’ a ait mikrodalgaya maruz bırakılmamış ve 2-6kW mikrodalgaya maruz bırakıldıktan sonra numuneler üzerinde yapılan deneylerin cerchar aşındırıcılık indeksi değerleri verilmiştir. Steppe Yellow numunesi 2kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonra CAI değeri 3.5’e düşmüştür. Bu değer 6kW mikrodalga enerjisine maruz bırakıldıktan sonra 3.0 olarak hesaplanmıştır.



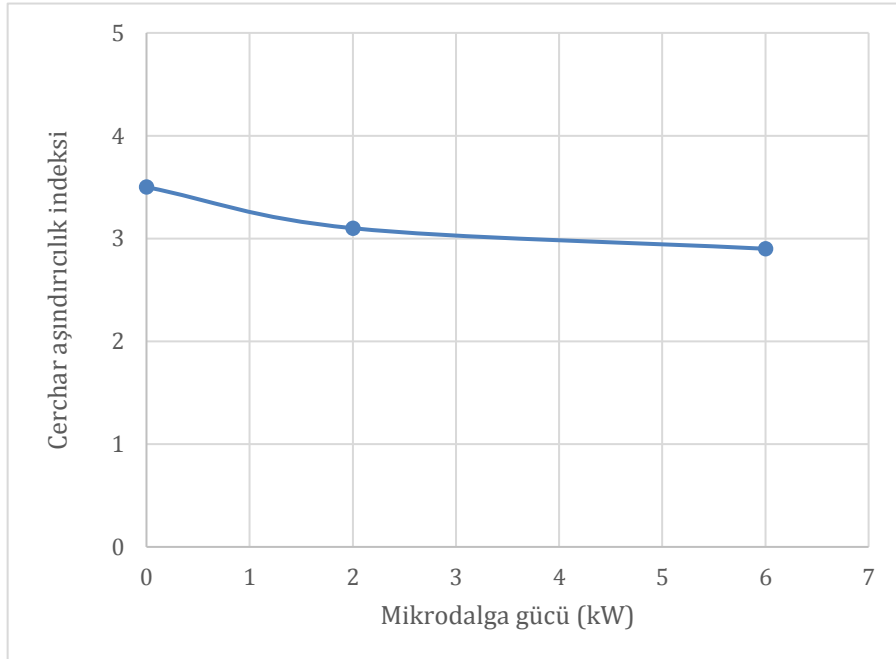
Şekil 5.16. Steppe Yellow (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.

Şekil 5.17’de Nublado (Granit) numunelerinin ortalama CAI değeri mikrodalgaya maruz bırakılmadan 4.0 olarak görülmektedir. Bu değer 2kW’da 2.8 ve 6kW güçte 2.0 olarak saptanmıştır.



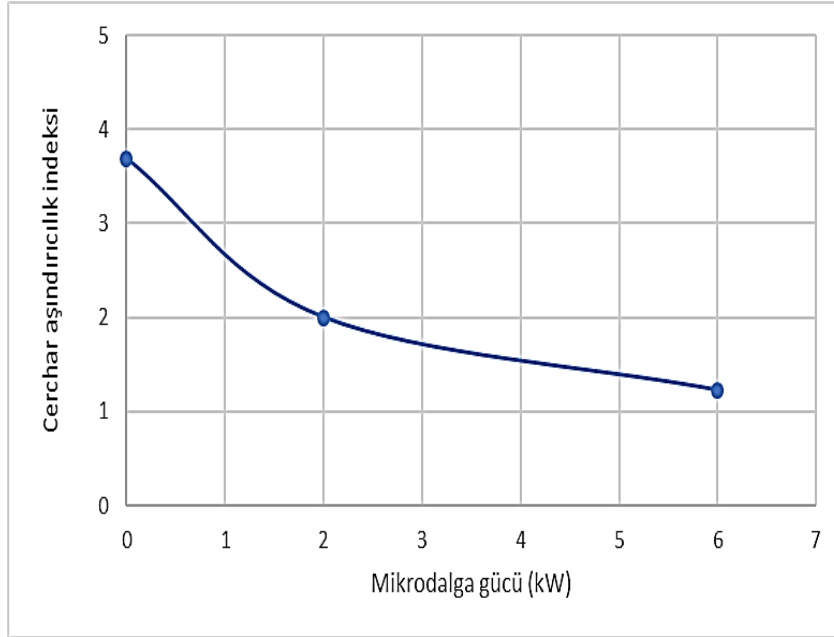
Şekil 5.17. Nublado (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.

Kaman Rosa (Granit) numunelerinin mikrodalgaya maruz bırakılmadan önce ve sonra ortalama CAI değerleri Şekil 5.18’de verilmiştir. Mikrodalga uygulanmadan aşındırıcılık indeksi 4.2 olarak hesaplanırken, 2kW mikrodalgaya maruz bırakıldıktan sonra CAI değeri 3.6’ ya düşmüştür. Mikrodalga gücü 6kW olarak uygulandığında CAI değeri 3.0 olarak saptanmıştır.



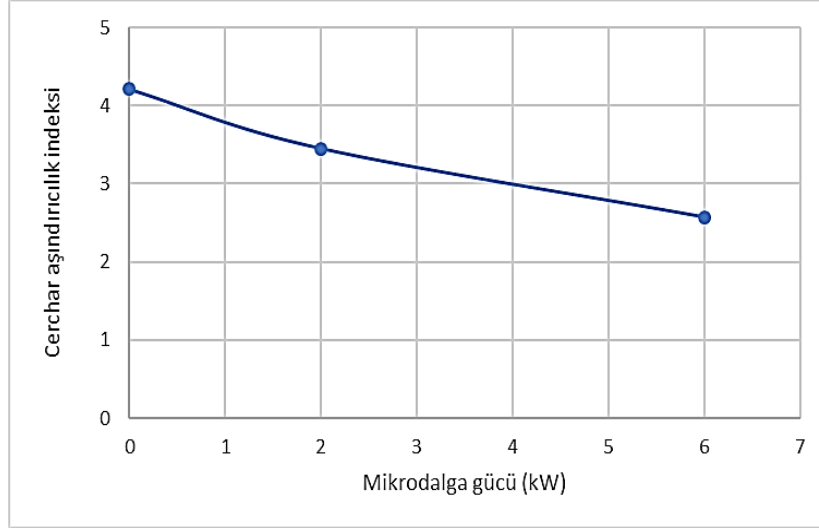
Şekil 5.18. Kaman Rosa (Granit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.

Volga Blue (Siyenit) numunelerinin mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi Şekil 5.19.'te verilmiştir. Volga Blue (Siyenit) numunelerinin mikrodalgaya maruz bırakılmadan önce CAI değeri 3.7 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 2kW mikrodalga enerjisine maruz kaldıktan sonra 2.0' ye, 6kW mikrodalga enerjisine maruz kaldıktan sonra 1.2'ye düşmüştür. Mineral içeriği bakımından pirit (%3) ve magnetit (%2) bulunduran bu kayacın numuneleri 2kW güç de bile yüksek ısıya ulaşmış olup, 6kW mikrodalgaya maruz kalmasının ardından numunelerde ergime ve çatlama gözlenmiştir. Yüksek ısı ve çatlama kayacı zayıflattığından kayacın aşındırıcılık değerlerinde çok fazla düşüşler gözlenmiştir. Diğer numuneler ile arasında bir değerlendirme yapılırsa, mikrodalgasız ve 6kW mikrodalgaya maruz bırakıldıktan sonra uygulanan CAI deneyleri arasındaki fark en fazla Siyenitte (Volga Blue) gözlemlenmiştir.



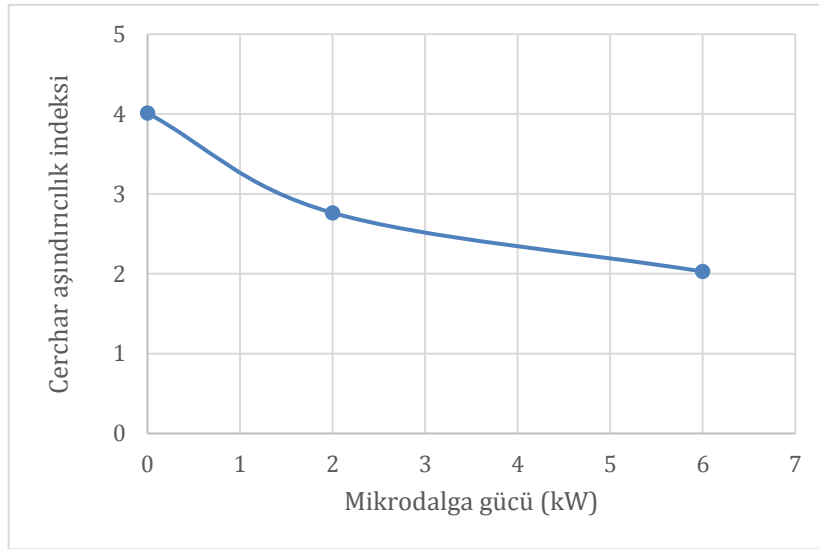
Şekil 5.19. Volga Blue (Siyenit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.

Siyenit (Jungle Green) numuneleri üzerinden yapılan deneylerde mikrodalgaya maruz bırakılmadan CAI değeri 4.2 olarak hesaplanmıştır. CAI değerleri, 2kW mikrodalga enerjisine maruz bırakılma sonucunda 3.5 ve 6kW mikrodalga enerjisine maruz bırakılma sonucunda 2.6 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.20). Bu siyenit türünde de uygulanan mikrodalga gücüne bağlı olarak CAI değerinde önemli derecede azalma görülmüştür.



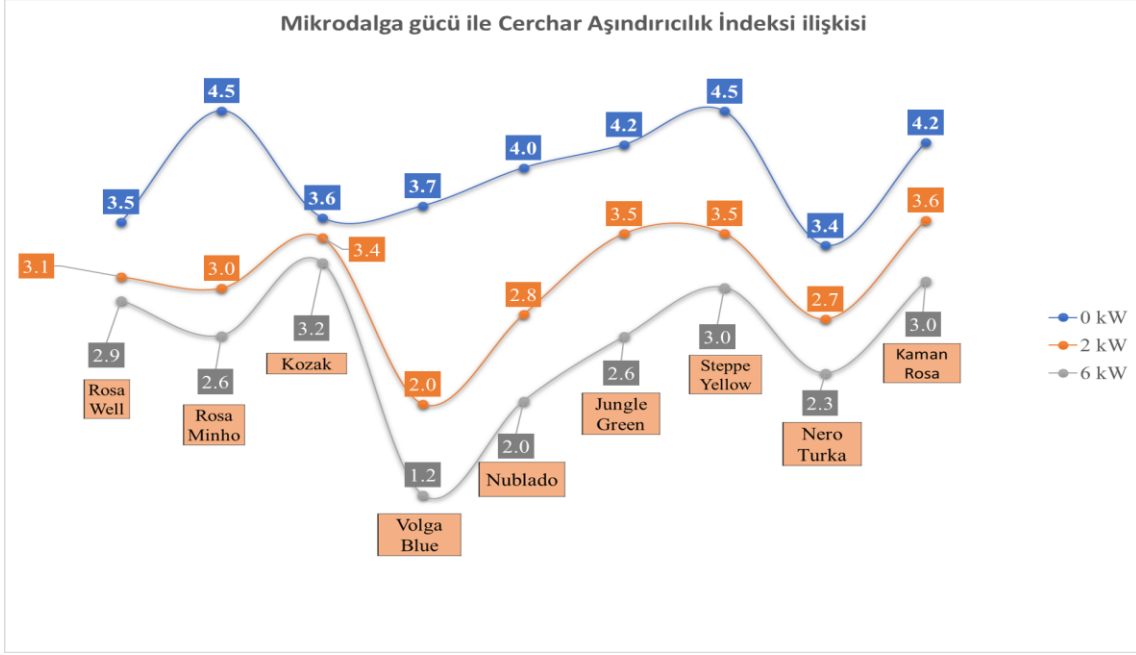
Şekil 5.20. Jungle Green (Siyenit) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.

Nero Turka (Gabro) numunelerinin mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişki Şekil 5.21’de verilmiştir. Nero Turka (Gabro)numuneleri üzerinde yapılan CAI deneylerinde mikrodalgasız olarak yapılan ölçümlerde CAI değeri 3.4 olarak saptanmıştır. 2kW mikrodalga gücü altında 2.7 ve 6kW mikrodalga gücü altında bu değer 2.3’e düşmüştür.



Şekil 5.21. Nero Turka (Gabro) Mikrodalga gücü ile CAI değeri ilişkisi.

Şekil 5.22’de 9 farklı kayaç numunesinin 9 mikrodalga gücü ile cerchar aşındırıcılık indeksi arasındaki ilişki tek grafik üzerinde verilmiştir. Kayaçların 0kw, 2kW v 6kW mikrodalgaya maruz bırakılması sonucu, uygulanan güç ile CAI değerlerindeki düşüş görülmektedir.



Şekil 5.22. Farklı güçlerde mikrodalga enerjisi uygulamanın cerchar'a olan etkisi.

5.3. Mikrodalga Gücü ve Aşındırıcılık Kaybı İlişkisi

Deneye tabi tutulan kayaların mikrodalgaya maruz bırakılmaları sonrası aşındırıcılıklarındaki değişimin genel bir değerlendirmesini yapmak için aşındırıcılık kayıpları hesaplanmıştır. Çizelge 5.1.'de 2kW ve 6kW mikrodalga enerjisine maruz bırakılan numunelerin aşındırıcılık kayıpları yüzde olarak verilmiştir.

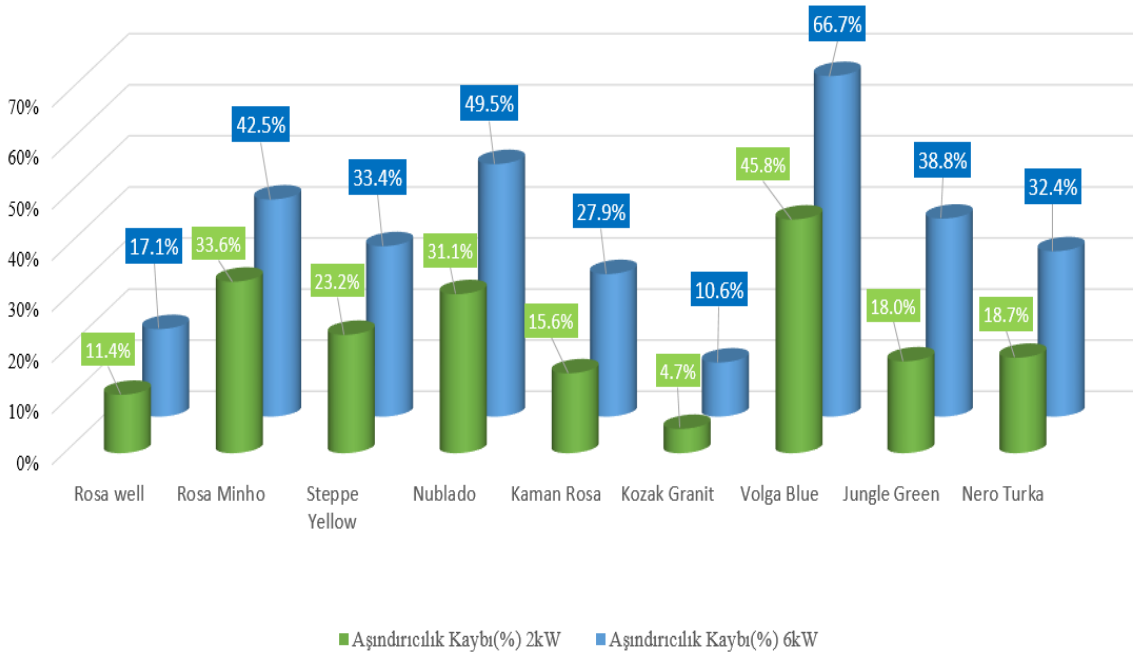
Çizelge 5.1. Mikrodalgaya maruz bırakılan numunelerin aşındırıcılık kayıpları.

Kayaç Kodu	Türü	Aşındırıcılık Kaybı (%)	
		2kW	6kW
1	Rosa Well	11.43	17.14
2	Rosa Minho	33.58	42.52
3	Steppe Yellow	23.17	33.37
4	Nublado	31.14	49.45
5	Kaman Rosa	15.64	27.91
6	Kozak	4.75	10.60
7	Volga Blue	45.75	66.70
8	Jungle Green	17.98	38.78
9	Nero Turka	18.68	32.39

Aşındırıcılık kaybı en fazla Siyenitte (Volga Blue) hesaplanmıştır. 2kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonra aşındırıcılık kaybı %45.75 olmuştur. 6kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonra aşındırıcılık kaybı %66.1'e çıkmıştır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, pirit ve manyetit ve piroksen içeriğine bağlı olarak bu kayaca ait numunelerin sıcaklığı 2kW mikrodalga gücünde bile yüksek seviyelere yükselmiş ve numunelerde çatlama ve ergimeler gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak da aşındırıcılık kaybı bu numunelerde en fazla olmuştur.

Granit numuneleri içerisinde aşındırıcılık kaybı en fazla Nublado (Granit) örneğinde görülmüştür. 2kW mikrodalga enerjisi uygulandıktan sonra aşındırıcılık kaybı %31.14 iken, 6kW mikrodalgaya maruz bırakıldıktan sonra bu değer %49.45 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.23'de 9 numunenin kayaç aşındırıcılığı aynı grafik üzerinde verilerek görsel olarak daha iyi açıklanmaya çalışılmıştır.

Mikrodalga Gücü ve Aşındırıcılık Kaybı İlişkisi

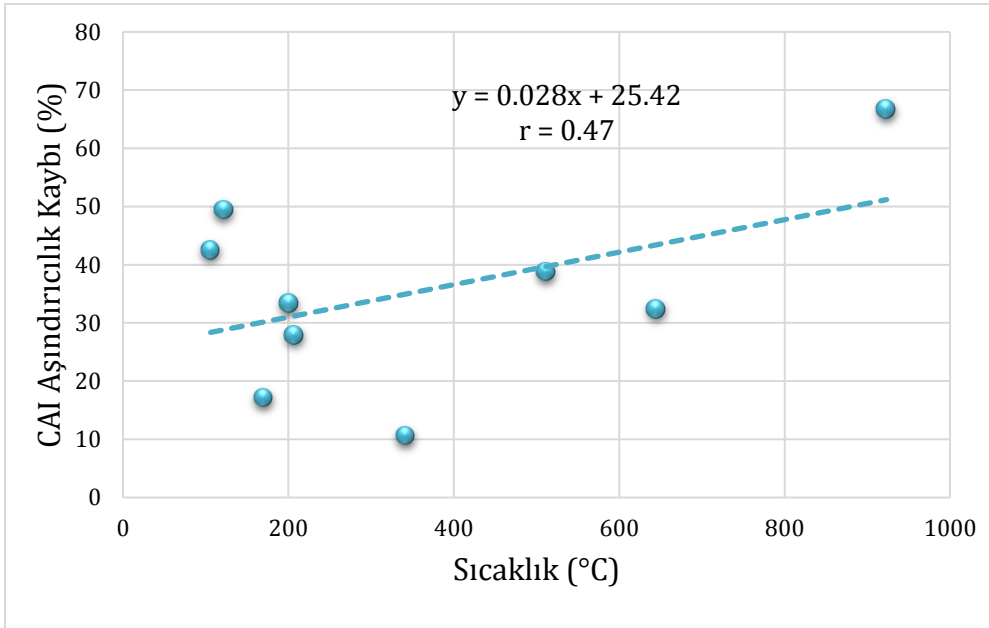


Şekil 5.23. Mikrodalga gücü – kayaç aşındırıcılığı ilişkisi.

Numunelerin ulaştığı yüzey sıcaklık değerleri ile aşındırıcılık kayıpları arasında bir ilişki olup olmadığını görmek için Şekil 5.24' de verilen grafik çizilmiştir. İki parametre arasında zayıf bir korelasyon olduğu görülmektedir. Korelasyonun zayıflığı numunelerin

heterojenliğinden kaynaklanıyor olabilir. Ek-1’ de görülebileceği gibi, her kayaca ait üçer numunenin sıcaklık değerleri arasındaki farklar genellikle fazladır. Bir kayaca ait iki numunenin mineral yüzdesinin değişmesi durumunda ulaşacağı sıcaklık derecesi de değişmektedir.

Diğer bir husus, bu çalışmada iç sıcaklıklar ölçülemese de numunelerin iç sıcaklıklarının yüzey sıcaklıklarından farklı olmasıdır. Bazalt üzerinde yapılan bir araştırmada yüzey sıcaklığı 250°C iken iç sıcaklığın 440 °C’ye ulaştığı görülmüştür [23]. Yüzey sıcaklıkları aynı olan iki kayacın mineralojik ve dokusal farklılıktan dolayı iç sıcaklıkları farklı olabilir ve dolayısıyla sıcaklıktan etkilenmeye bağlı aşındırma özelliklerindeki değişiklikler farklı olabilir. Şekil 5.23’te verilen korelasyonun iyi olmamasının bir nedeni de numunelerin iç sıcaklıkları olabilir.



Şekil 5.24. 6 kW mikrodalga uygulandıktan sonra Cerchar aşındırıcılık indeksi ve yüzey sıcaklığı ilişkisi.

Mikrodalgaya maruz bırakılan kayaların aşındırıcılık kayıpları ile ilgili literatürde sadece bir çalışma mevcuttur. Motlagh [19] tarafından yapılan çalışmada, gabro, kireçtaşı, gnays, granit, granofir ve mafik granofir numuneleri 3kW güçte ve farklı sürelerde (240s’ ye kadar değişen) mikrodalgaya maruz bırakılmış ve CAI aşındırıcılık deneyleri yapılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesiyle gabro ve kireçtaşının CAI

değerlerinin değişmediği, diğer kayalarda ise yaklaşık %30 aşındırıcılık kayıpları olduğu açıklanmıştır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada kullanılan gabro numunesinde önemli derecede aşındırıcılık kaybı olmuştur. İki çalışma arasındaki fark, test edilen gabro örneklerinin mineral içeriğinden kaynaklanmaktadır. Motlagh [19]' in kullandığı gabro mikrodalgayı az absorbe eden %40 hornblend minerali içerirken, bu çalışmada kullanılan gabro mikrodalgayı çok absorbe eden %42 piroksen minerali içermektedir. Bu çalışmada kullanılan gabro dışındaki diğer kayaların aşındırıcılık kayıplarının bir kısmı %30 üzerinde, bir kısmı da altındadır. Uyumsuzluklar muhtemelen kayaların mineral içeriklerinin değişik olması ile uygulanan mikrodalga gücü ve maruziyet süresinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, 9 farklı kayaç türü 2kW ve 6kW güçlerinde mikrodalgaya maruz bırakılarak kayaçların yüzey sıcaklıklarında, Cerchar aşındırıcılık değerlerinde ve aşındırıcılık kayıplarında meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Yapılan çalışma ve deney sonuçlarının analiziyle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 9 farklı kayaç numunesinin 2kW ve 6kW güçlerde mikrodalgaya maruz bırakılması sonucu yüzey sıcaklıklarında ve CAI değerlerinde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Mineral içeriği olarak benzerlik gösteren granit numunelerinde bile farklılıklar gözlenmiştir. Bunun asıl nedeni kayaçların mineralojik içeriğinden kaynaklanmaktadır. Kayaç türlerinde bulunan ve mikrodalga enerjisini absorbe etme kapasitesi yüksek metalik mineral veya diğer bazı mineraller önem taşımaktadır. Örneğin, test edilen bazı granitler kadar yalıtkan mineral (Ortoklaz) içeren Volga Blue (Siyenit) kayacı sadece %2 manyetit ve %3 piritten dolayı granitlere kıyasla mikrodalgadan çok daha fazla etkilenmiştir.
- Aynı kayaca ait numunelerde farklı yüzey sıcaklıkları ve CAI değerleri hesaplanmıştır. Bu durumun, özellikle iri kristalli kayaçlarda herhangi bir kayaç türüne ait bir numunedeki mineral yüzdesinin diğer numunenin mineral yüzdesinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Numunelere uygulanan mikrodalga gücünün artmasıyla CAI değerlerinin düştüğü ve kayaç aşındırıcılığının azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, bir kayaç cinsi veya grubu için konuyla ilgili oran vermek mümkün değildir. Oranlar her kayaç için mineral içeriğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.
- Numunelerin yüzey sıcaklık değerleri ile aşındırıcılık kayıpları arasında bir korelasyon bulunmaktadır. Ancak, bu korelasyon kuvvetli değildir. Bunun nedeninin bir kayaç türüne ait numunelerin sıcaklıklarının farklı seviyelere çıkması ve numunelerin iç sıcaklıklarının yüzey sıcaklıklarından farklı olmasından kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır.

Tüm değerlendirmeler göz önüne alındığında magmatik kayalara mikrodalga enerjisi uygulamanın kayaç aşındırıcılığının düşmesinde önemli derecede etkisi olduğu gözlenmiştir. Kayaç aşındırıcılığının azalması ile kazı projelerinin süre/maliyet parametreleri arasında doğrudan ilişki kurulabilir.

Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve analiz edilmesine bağlı olarak tez konusuyla ilgili ileride yapılabilecek çalışmalar aşağıda verilmiştir:

- Mikrodalga destekli kazı uygulamalarında, bu çalışmada uygulanan sürelerden çok daha kısa sürede kayacın zayıflatılması veya çatlatılmasına gerek duyulacaktır. Bu amaçla özellikle granitler için daha yüksek güçlerde ve tek modlu kavite şeklinde yoğunlaştırılmış mikrodalga enerjisi uygulanmalıdır.
- Kayaçların mikrodalgaya maruz bırakılmasında su içeriğinin etkisi olduğu bilinmektedir. Ancak, konuyla ilgili kısıtlı birkaç çalışma vardır. Mikrodalga destekli kazılarda arazi şartlarında kayaç önemli derecede su içeriğine sahip olabilir. Bu nedenle, mikrodalgaya maruz bırakmada su içeriğinin etki derecesi hakkında çalışmalar yapılmalıdır.
- Her mineral farklı kristal yapılarına sahiptir. Mikrodalğanın kayaca etkisi konusunda minerallerin kristal yapıları da etkili olabileceğinden bu konu da araştırılmalıdır.
- Kayaçları oluşturan mineraller farklı termal genişleme katsayılarına sahiptir. Mikrodalga ile ısıtma sonrası termal genişlemeye bağlı olarak kayaçlarda görülebilecek mikro ve makro çatlak oluşumlarının mekanizmasını anlayabilmek için minerallerin termal genişmeleri hakkında araştırmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Nilsen B., Dahl F., Holzhäuser J. and Raleigh P. Abrasivity Testing for Rock and Soils. *Tunnels and Tunnelling International*, pp. 47–49, **2006**.
- [2] West G. Rock Abrasiveness Testing for Tunnelling: Technical Note. *Int. J of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol 26, No.2,99. 151–160, **1989**.
- [3] Plinninger R, Kasling H, Thuro K, Spaun G Testing condition sand geomechanical properties influencing the Cerchar abrasive-ness index (CAI) value. *Int J Rock Mech Min Sci* 40:259–263, **2003**.
- [4] Verhoef P.N.W. Towards the Prediction of Rock Excavation Machine Performance. *Bull. of Eng Geol and the Environment*, Springer Verlag, Vol. 57, No.1, pp. 3–15, **1998**.
- [5] Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., Raleigh, P. New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling, in: Traylor, M.T., Townsend, J.W. (Eds.), *Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, Toronto, Canada, pp. 104–116, **2008**.
- [6] Lindroth, D.P., Morrell, R.J., Blair, J.R. Microwave assisted hard rock cutting. United, States Patent No. 5,003,144. **1991**.
- [7] Jerby, V. Dikhtyar, "Method and device for drilling, cutting, nailing and joiningsolid non-conductive materials using microwave radiation, pp. 6–114, **2000**.
- [8] Lindroth, D.P., Berglund, W.R., Morrell, R.J., Blair, J.R. "Microwave-assisted drilling in hard rock", *Tunnels and Tunnelling*, 25(6), 24 - 27, **1993**.
- [9] Pozar, D.M. "Microwave Engineering". John Wiley & Sons, Inc, **2012**.
- [10] Gümüşderelioğlu, M. "Mikrodalgalar ve uygulamaları." *Bilim ve Teknik*, Temmuz, 38-42, **2012**.
- [11] Church, R.H., Webb, W.E. and Salsman, J. B. "Dielectric properties of low loss minerals." *USBM Report of Investigations*, No. 9194, **1988**.
- [12] Metaxas, A. C., Meredith, R. J. "Industrial microwave heating", England: Short Run Press, **1983**.
- [13] Santamarina, J. C. "Rock excavation with microwaves; A literature review." *Foundation engineering: current principles and practices proceedings*, Evanston, Illinois, 459 - 473, **1989**.
- [14] Walkiewicz, J.W., Kazonich, G., McGill, S.L. "Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds." *Mineral and metallurgical processing*, 5(1), 39-42, **1988**.

- [15] Haque, K. E. "Microwave energy for mineral treatment processes - A brief review", *International journal of mineral processing*, 57, 1-24, **1999**.
- [16] Kingman, S.W., Jacksona, K., Bradshawb, S.M., Rowsonc, N.A., Greenwood, R. "An investigation into the influence of microwave treatment on mineral ore comminution", *Powder Technology*, 146, 176-184, **2004**.
- [17] Znamenackova, I., Lovas, M., Hajek, M., Jakabsky, S. "Melting of andesite in a microwave oven", *Journal of Mining and Metallurgy*, 39 (3-4) B, 549 - 557, **2003**.
- [18] Satish, H. "Exploring microwave assisted rock breakage for possible space mining applications", *Mechanical Engineering, Masters of Engineering Thesis, McGill University*, **2005**.
- [19] Motlagh, P.N. "An investigation on the influence of microwave energy on basic mechanical properties of hard rocks", *MSc. Thesis, Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University*, **2009**.
- [20] Nejati, H., Hassani, F., Radziszewski, P. "Experimental Investigating of Fracture Toughness Reduction and Fracture Development in Basalt Specimens under Microwave Illumination", *Earth and Space 2012: Proc. the 13th ASCE Aerospace Division Conf. on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, California, April 15-18*, 325-334, **2012**.
- [21] Feng, G., Wang, Z., Wei, Z. "The Development of the Microwave Assisted Rock Breaking Device", *Advanced Materials Research*, 900, 627-630, **2014**.
- [22] Peinsitt, T., Kuchar, F., Moser, P., Kargl, H., Restner, U., Sifferlinger, N. "Microwave heating of rocks with different water content", *Microwave Technology in Minerals Engineering (Microwave Technology 08)*, November 11-12, Cape Town, South Africa, **2008**.
- [23] Hartlieb, P., Leindl, M, Kuchar, F. Antretter, T. Moser, P. "Damage of basalt induced by microwave irradiation." *Minerals Engineering*, 31, 82–89, **2012**.
- [24] Hassani, F., Nekoovaght, P.M., Gharib, N. "The influence of microwave irradiation on rocks for microwave assisted underground excavation". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 (2016) 1-15, **2016**.
- [25] Nekoovaght, P., Hassani, F. "The influence of microwave radiation on hard rocks as in microwave assisted rock breakage applications", *EUROCK 2014*, 27 to 29 May, Vigo, Spain, 195-198, **2104**.
- [26] Nejati, H., Hassani, F., Radziszewski, P. "Experimental Investigating of Fracture Toughness Reduction and Fracture Development in Basalt Specimens under Microwave Illumination", *Earth and Space 2012: Proc. the 13th ASCE Aerospace Division Conf. on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, California, April 15-18*, 325-334, **2012**.
- [27] Peinsitt, T., Kuchar, F., Hartlieb, P., Moser, P., Kargl, H., Restner, U., Sifferlinger, N.A. "Microwave heating of dry and water saturated basalt, granite and

- sandstone.” *Int. J. Mining and Mineral Engineering*, 2, 18-29, **2010**.
- [28] Schimazek, J., Knatz, H. Der einfluss des gesteinsaufbaus auf die schnittgeschwindigkeit und den meisselverschlers von Streckenvortriebsmaschinen 274-278, 1970. 274-278, **1970**.
- [29] Al-Ameen, SI., Waller, MD. The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar abrassive index. *Eng. Geo.*, 4(36):293-301, **1994**.
- [30] Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., Spaun, G. Testing conditions and geomechanical properties influencing the Cerchar abrasiveness index (CAI). Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40:259-263, **2003**.
- [31] Michalakopoulos et. al, 2006, and Rostami et al. Classification of rock abrasivity based on the range of measured Cerchar Index, **2005**.
- [32] Stanford, J., Hagan, P. An assessment of the impact of stylus metallurgy on Cerchar abrasiveness index. *Coal Operators’ Conference*, pp: 348-355, Australia. **2009**.
- [33] Alber, M. Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 23:351–359, **2008**.
- [34] West, G. A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measures sediments. *Int. J. Min. Geol. Eng.*, 4:73-78, **1986**.
- [35] Suana, M., Peters, T. The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography. *Rock Mech.*, 15(1):1-6, **1982**.
- [36] Yarali, O. and Yasar, E. and Bacak, G. and Ranjith, P. A study of rock abrasivity and tool wear in Coal Measures Rocks. *Int J of Coal Geo.*:74, 53-66, **2008**.
- [37] Alber, M., Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23:351-359, **2008**.
- [38] Rostami, J., Özdemir, L., Bruland, A., Dahl, F. Review of issues related to Cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates. In: *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, pp: 738-751, Seattle, WA, USA, **2005**.
- [39] Thuro, K. , Singer, J. , Kasling, H. , Bauer, M., Determining abrasivity with LCPC Test. *Geomechanik und Tunnelbau*, 179-188, **2009**.
- [40] Kahraman, S. Mikrodalgaya maruz bırakmanın granitik kayaçlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması, TÜBİTAK projesi (216M003), **2018**.
- [41] ISRM, Suggested method for determining the abrasivity of rock by the Cerchar Abrasivity Test, *The ISRM Suggested Method for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, [Edt], R. Ulusay, Springer, **2015**.

- [42] Chen, T.T. Dutrizac, J.E., Haque, K.E., Wyslouzil, W., and Kashyap, S. Relative transparency of minerals to microwave radiation, *Canadian Metallurgical Quarterly*, pp. 349–351, **1988**.
- [43] Walkiewicz, J.W., Kazonich, G. & McGill, S.L.. Microwave heating characteristics of minerals and compounds, *Minerals and Metallurgical Processing*, 39, 39-42, **1988**.

EKLER

Ek 1. Numunelerin Yüzey Sıcaklık Ölçüm Sonuçları

Rosa Well (Granit)						
Numune no	İlk sıcaklık (°C)	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası sıcaklık (°C)			
			2kW	Ortalama	6kW	Ortalama
A	8.9	8.0	85.9	60.9	162.7	169.7
B	7.1		41.6		157.2	
C	7.9		55.3		189.1	

Rosa Miho (Granit)						
Numune no	İlk sıcaklık (°C)	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası sıcaklık (°C)			
			2kW	Ortalama	6kW	Ortalama
A	11.3	9.2	46.9	52.9	98.3	106.1
B	7.9		48.5		104.9	
C	8.3		63.4		115.2	

Steppe Yellow (Granit)						
Numune no	İlk sıcaklık (°C)	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası sıcaklık (°C)			
			2kW	Ortalama	6kW	Ortalama
A	13.2	11.9	63.7	81.5	245.7	200.8
B	10.6		99.2		155.9	

Ek 1'den devam

Nublado (Granit)						
Numune no	İlk sıcaklık (°C)	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası sıcaklık (°C)			
			2kW	Ortalama	6kW	Ortalama
A	12.2	9.8	55.8	48.2	105.6	122.1
B	8.4		43.1		118.7	
C	8.9		45.7		141.9	

Granit (Kaman Rosa)						
Numune no	İlk sıcaklık (°C)	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası sıcaklık (°C)			
			2kW	Ortalama	6kW	Ortalama
A	9.3	10.0	46.7	51.1	176.4	207.4
B	8.9		51.2		215.8	
C	11.8		55.4		230.1	

Kozak Granit (Granit)						
Numune no	İlk sıcaklık (°C)	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası sıcaklık (°C)			
			2kW	Ortalama	6kW	Ortalama
A	9.5	10.9	75.2	86.4	295	341.7
B	12.1		88.3		323.7	
C	11.2		95.6		406.3	

Ek 1'den devam

Volga Blue (Siyenit)						
Numune no	İlk sıcaklık (°C)	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası sıcaklık (°C)			
			2kW	Ortalama	6kW	Ortalama
A	7.9	9.1	403.2	388.6	894.3	928.3
B	8.1		407.6		978.1	
C	11.3		355.1		912.5	

Jungle Green (Siyenit)						
Numune no	İlk sıcaklık (°C)	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası sıcaklık (°C)			
			2kW	Ortalama	6kW	Ortalama
A	7.9	8.8	55.6	72.5	655.7	511.9
B	8.3		96.4		498.4	
C	10.2		65.5		381.6	

Gabro (Nero Turka)						
Numune no	İlk sıcaklık (°C)	Ortalama ilk sıcaklık (°C)	Mikrodalga sonrası sıcaklık (°C)			
			2kW	Ortalama	6kW	Ortalama
A	7.5	8.2	286.4	353.1	763.4	645.1
B	8.7		373.4		510.3	
C	8.5		399.5		661.6	

Ek 2. Cerchar Deney Sonuçları

Rosa Well (Granit)								
Mikrodalga Uygulanmadan			Mikrodalga Gücü					
			2kW			6kW		
Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI
1.1	0.39	3.55	A1	0.32	3.08	A1	0.41	2.88
1.2	0.33		A2	0.21		A2	0.27	
1.3	0.30		B1	0.34		B1	0.32	
1.4	0.39		B2	0.33		B2	0.41	
1.5	0.37		C1	0.31		C1	0.17	
			C2	0.34		C2	0.15	

Rosa Miho (Granit)								
Mikrodalga Uygulanmadan			Mikrodalga Gücü					
			2kW			6kW		
Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI
2.1	0.35	4.50	A1	0.29	2.99	A1	0.29	2.59
2.2	0.38		A2	0.36		A2	0.37	
2.3	0.51		B1	0.34		B1	0.27	
2.4	0.46		B2	0.28		B2	0.24	
2.5	0.54		C1	0.26		C1	0.18	
			C2	0.26		C2	0.21	

Granit(Steppe Yellow)								
Mikrodalga Uygulanmadan			Mikrodalga Gücü					
			2kW			6kW		
Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI
4.1	0.21	4.01	A1	0.24	2.76	A1	0.18	2.03
4.2	0.48		A2	0.33		A2	0.21	
4.3	0.49		B1	0.26		B1	0.23	
4.4	0.42		B2	0.30		B2	0.14	
4.5	0.40		C1	0.30		C1	0.16	
			C2	0.23		C2	0.29	

Ek 2'den devam

Granit(Nublado)								
Mikrodalga Uygulanmadan			Mikrodalga Gücü					
			2kW			6kW		
Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI
4.1	0.21	4.01	A1	0.24	2.76	A1	0.18	2.03
4.2	0.48		A2	0.33		A2	0.21	
4.3	0.49		B1	0.26		B1	0.23	
4.4	0.42		B2	0.30		B2	0.14	
4.5	0.40		C1	0.30		C1	0.16	
			C2	0.23		C2	0.29	

Granit (Kaman Rosa)								
Mikrodalga Uygulanmadan			Mikrodalga Gücü					
			2kW			6kW		
Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI
8.1	0.42	4.23	A1	0.38	3.57	A1	0.23	3.05
8.2	0.46		A2	0.53		A2	0.27	
8.3	0.38		B1	0.28		B1	0.34	
8.4	0.48		B2	0.33		B2	0.31	
8.5	0.38		C1	0.33		C1	0.38	
			C2	0.30		C2	0.29	

Kozak Granit (Granit)								
Mikrodalga Uygulanmadan			Mikrodalga Gücü					
			2kW			6kW		
Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI
9.1	0.27	3.59	A1	0.30	3.42	A1	0.29	3.21
9.2	0.40		A2	0.34		A2	0.35	
9.3	0.35		B1	0.39		B1	0.31	
9.4	0.40		B2	0.40		B2	0.31	
9.5	0.37		C1	0.34		C1	0.33	
			C2	0.28		C2	0.33	

Ek 2'den devam

Siyenit (Volga Blue)								
Mikrodalga Uygulanmadan			Mikrodalga Gücü					
			2kW			6kW		
Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI
3.1	0.35	3.69	A1	0.13	2.00	A1	0.10	1.23
3.2	0.31		A2	0.20		A2	0.17	
3.3	0.32		B1	0.28		B1	0.10	
3.4	0.46		B2	0.22		B2	0.11	
3.5	0.40		C1	0.24		C1	0.10	
			C2	0.12		C2	0.15	

Siyenit (Jungle Green)								
Mikrodalga Uygulanmadan			Mikrodalga Gücü					
			2kW			6kW		
Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI
5.1	0.46	4.21	A1	0.34	3.45	A1	0.17	2.58
5.2	0.44		A2	0.36		A2	0.39	
5.3	0.31		B1	0.43		B1	0.28	
5.4	0.45		B2	0.39		B2	0.27	
5.5	0.45		C1	0.28		C1	0.23	
			C2	0.28		C2	0.20	

Gabro (Nero Turka)								
Mikrodalga Uygulanmadan			Mikrodalga Gücü					
			2kW			6kW		
Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI	Kod	CAI	Ort. CAI
7.1	0.38	3.35	B1	0.28	2.72	A1	0.21	2.27
7.2	0.32		B2	0.26		A2	0.31	
7.3	0.38		C1	0.37		B1	0.16	
7.4	0.32		C2	0.22		B2	0.30	
7.5	0.26		D1	0.25		C1	0.22	
			D2	0.25		C2	0.16	



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

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 20/06/2019

Tez Başlığı / Konusu: Magmatik Kayaçları Mikrodalgaya Maruz Bırakmanın Cerchar Aşındırıcılığı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 69 sayfalık kısmına ilişkin, 11/06/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 8 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimededen daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

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

Gereğini saygılarımla arz ederim.

20.06.2019
Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Egemen SAYGIN
Öğrenci No: N16126053
Anabilim Dalı: Maden Mühendisliği
Programı:
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Sair KAHRAMAN
(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri:

Adı Soyadı : Egemen Saygın
Doğum Yeri : Bergama
Medeni Hali : Bekar
E-Posta : egemen.saygin@gmail.com
Adres : Fatih Mahallesi Tuna Caddesi No:20 Bergama/İzmir

Eğitim:

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği (2011-2015)

Yabancı Dil ve Düzeyi:

İngilizce	: Okuma: İyi	Yazma: İyi	Konuşma: İyi
Almanca	: Okuma: Orta	Yazma: Orta	Konuşma: Orta
Arapça	: Okuma: Başlangıç	Yazma: Başlangıç	Konuşma: Başlangıç

İş Deneyimi:

Loesche(Germany), Demir Export(Soma), Amak(Saudi Arabia)

Deneyim Alanları:

Yeraltı Planlama

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi:

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar:

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumuna Katıldığı Toplantılar:

-