

**MİKRODALGAYA MARUZ BIRAKILAN KARBONATLI
KAYAÇLARIN DAYANIMINDA MEYDANA GELEN
DEĞİŞİMLERİN ARAŞTIRILMASI**

**THE INVESTIGATION OF THE CHANGES IN THE
STRENGTH OF CARBONATE ROCKS TREATED WITH
MICROWAVE**

MUHAMMED ÖZBEK

PROF. DR. SAİR KAHRAMAN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Aileme, Ülkeme ve Bütün İnsanlığa.

ÖZET

MİKRODALGAYA MARUZ BIRAKILAN KARBONATLI KAYAÇLARIN DAYANIMINDA MEYDANA GELEN DEĞİŞİMLERİN ARAŞTIRILMASI

Muhammed ÖZBEK

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sair KAHRAMAN

Aralık 2022, 89 Sayfa

Günümüzde hızla artan dünya nüfusunun ihtiyaçları doğrultusunda gereken hammaddelerin hızlı üretimi için cevherlerin ulaşılabilir ve ekonomik olarak üretilmesi büyük önem arz etmektedir. Cevherlerin örtü tabakasının kolay kazılabilir olması, ekonomik üretilmesi hususunda önemli bir parametredir. Kayaçların kazı maliyetleri dayanım ve sertliklerine göre değişmektedir. Ayrıca nüfus artışına bağlı kentlerin büyüyerek metropolleşmesi sonucunda bir yerden bir yere gitmek uzun vakitler sürmekte ve araçların yakıt tüketimleri fazlasıyla artmaktadır. Ulaşım sorunlarının artmasına bağlı olarak alternatif ulaşım sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda yer altı ulaşım sistemleri giderek yaygınlaşmakta ve daha fazlası planlanmaktadır. Önümüzdeki yıllarda şehir içi ve şehirlerarası, hatta ülkeler arasında yapılacak tüneller ile yer altı ulaşım ağlarının genişlemesi beklenmektedir. Bu ve benzeri sebeplerle kayaçların daha kolay ve ekonomik kazılabilmesi amacıyla mikrodalga sistemi kullanarak, planlanan hedeflere daha kısa sürede ve buna bağlı olarak daha az maliyetle ulaşabilmek için bu tez çalışmasında mikrodalga uygulanan

karbonatlı kayaçların dayanımlarındaki farklılıklar üzerine çalışma yapılmıştır. Bu tezde farklı bölgelerden alınmış 8 farklı karbonatlı kayaç üzerinde çalışma yapılmıştır. Kayaçlardan karot alınarak tek eksenli basınç (UCS) ve Brazilian çekme dayanımı (BTS) deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Numuneler kuru ve suya doymun olarak kendi aralarında da iki farklı gruba ayrılmışlardır. Hazırlanan numuneler 6 kW gücündeki mikrodalga fırında 2, 3, 4, 5 ve 6 dakika sürelerinde mikrodalgaya maruz bırakılmışlardır. Yüzey sıcaklıkları kızılötesi termometre yardımıyla ölçülerek not edildikten sonra, sıcak olarak UCS ve BTS deneyleri yapılarak dayanımlarında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. 6 kW güçte 6 dakika boyunca mikrodalgaya maruz bırakılan kayaçların dayanımlarında meydana gelen düşüş yüzdeleri; kuru UCS numunelerinde % 9 ile % 100, doymun UCS numunelerinde % 7 ile % 100, kuru BTS numunelerinde % 16 ile % 63 ve doymun BTS numunelerinde ise % 23 ile % 63 arasında dayanımlarında düşüş olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, mikrodalgaya maruz bırakmanın karbonatlı kayaçların dayanımında önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Karbonatlı kayaçlar, Mikrodalga enerjisi, Tek eksenli basınç dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, Suya doymunluk, Suya doymunluk derecesi

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF THE CHANGES IN THE STRENGTH OF CARBONATE ROCKS TREATED WITH MICROWAVE

Muhammed ÖZBEK

Master of Science, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sair KAHRAMAN

December 2022, 89 pages

Today, it is of great importance that ores are produced economically and accessible for the rapid production of raw materials required in line with the needs of the rapidly increasing world population. The fact that the cover layer of the ores can be easily excavated is an important parameter for its economical production. Excavation costs of rocks vary according to their strength and hardness. In addition, as a result of the growing and metropolitanization of cities due to population growth, it takes a long time to go from one place to another and the fuel consumption of vehicles increases greatly. Alternative transportation systems were needed due to the increase in transportation problems. In line with this need, underground transportation systems are becoming more widespread and more are planned. In the coming years, it is expected that the underground transportation networks will expand with the tunnels to be built within the city and between the cities and even between the countries. For these and similar reasons, in order to reach the planned targets in a shorter time and accordingly with less cost, by using the microwave system in order to excavate the rocks more easily and economically, in this thesis study, the differences in the strength of the carbonate rocks applied to the microwave were studied. In this thesis, 8 different carbonate rocks taken from different regions were studied. The samples were prepared for uniaxial

compressive (UCS) and Brazilian tensile strength (BTS) tests by coring the rocks. The samples were divided into two different groups among themselves as dry and saturated with water. Prepared samples were exposed to microwave in a 6 kW microwave oven for 2, 3, 4, 5 and 6 minutes. After the surface temperatures were measured and noted with the help of an infrared thermometer, UCS and BTS tests were carried out as hot, and the changes in their strength were examined. The percentages of decrease in the strength of the rocks, which were microwaved for 6 minutes at 6 kW power, were observed as follows: It was observed that there was a decrease in strength between 9% and 100% in dry UCS samples, between 7% and 100% in saturated UCS samples, between 16% and 63% in dry BTS samples and between 23% and 63% in saturated BTS samples. In conclusion, it can be said that microwave exposure has a significant effect on the strength of carbonate rocks.

Keywords: Carbonate rocks, Microwave energy, Uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Water saturation, Degree of saturation

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans süreci boyunca her zaman yardımcı olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Sair Kahraman'a,

Tezin kalitesini artırmaya yönelik katkıda bulunan jüri üyeleri Prof. Dr. Mustafa Fener, Prof. Dr. Bahtiyar Ünver, Doç. Dr. Ramazan Çomaklı ve Dr. Öğr. Üyesi Emre Yılmazkaya'ya,

Tez çalışmaları kapsamında tecrübeleri ile yardımda bulunan Masoud Rostami Ghabankandi'ye

Finansal desteklerinden dolayı Avrupa Birliği'ne (ERA-NET/ERA-MIN) ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK proje no: 119M839)'na

Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü bünyesinde bulunan amirlerim ve çalışma arkadaşlarıma,

Ve her daim desteğini esirgemeyen Ailem'e,

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. MİKRODALGA VE KAYAÇLAR ÜZERİNDE ETKİSİ.....	7
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	11
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
4.1. Numune Temini.....	16
4.2. Karot Alımı ve Numune Hazırlama İşlemleri.....	17
4.3. Kayaçların ve Numunelerin Mineralojik Analizi.....	18
4.4. Kayaçların Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	24
4.4.1. Yoğunluk Deneyleri.....	24
4.4.2. Porozite Deneyleri.....	24
4.4.3. Tek Eksenli Basınç Deneyi (UCS).....	25
4.4.4. Brazilian Dolaylı Çekme Deneyi (BTS).....	25
4.5. Numuneler Üzerinde Mikrodalga Uygulaması.....	27
4.6. Mikrodalga Uygulaması Sonrası Mekanik Deneyler.....	28
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	29
5.1. Mikrodalga Uygulamasının Numuneler Üzerinde Sıcaklık Etkisi.....	30
5.2. Mikrodalga Uygulamasının Numunelerin Dayanımlarına Etkisi.....	44
6. SONUÇLAR.....	68
KAYNAKLAR.....	70

EKLER.....	74
Ek 1. Numunelerin Kuru-Doygun Yoğunluk ve Porozite Verileri (Yoğunluk:g/cm ³)	74
Ek 2. Mikrodalga Öncesi Numuneler Üzerinde Yapılan Tek Eksenli Basınç Dayanım (UCS) Deneyi Sonuçları.....	74
Ek 3. Mikrodalga Öncesi Numuneler Üzerinde Yapılan Brazilian Çekme Dayanımı (BTS) Deneyi Sonuçları.....	75
Ek 4. 6 kW Gücünde Mikrodalga Uygulanan Numunelerin Ölçülen Sıcaklıkları ve Tek Eksenli Basınç Dayanımı (UCS) Verileri.....	75
Ek 5. 6 kW Gücünde Mikrodalga Uygulanan Numunelerin Ölçülen Sıcaklıkları ve Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı (BTS) Verileri	82
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Derinkuyu yer altı şehri (Dailynews, 2022).....	1
Şekil 1.2. Mekanize kazı araçlarından sürekli kazıcı (Gainwellengineering, 2022).....	2
Şekil 1.3. Tünel açma makinesi (TBM) sistemi (Bilimseldunya, 2022).....	2
Şekil 1.4. Sert zemin tünel açma makinesi kesici kafası (Robbinstbm, 2022).	3
Şekil 1.5. Yumuşak zemin tünel açma makinesi (Gnsolidscontrol, 2022).	3
Şekil 1.6. Yumuşak ve sert zemin (multi mod) tünel açma makinesi (E-Berk, 2022).....	4
Şekil 1.7. Sert ve orta sert kayalarda kullanılan disk keski örnekleri (Estcutters, 2022).	4
Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum (Rasyonalist, 2021).....	7
Şekil 2.2. Mikrodalgalara gösterdikleri reaksiyona göre malzemeler (Church vd., 1988).	8
Şekil 2.3. Mikrodalganın cisimleri ısıtma mekanizması (Gümüşderelioğlu, 2012).....	9
Şekil 2.4. Mikrodalga ile ısıtma sistemi (Toraman ve Depçi, 2007).	10
Şekil 3.1. Andezit kayacı üzerinde mikrodalga etkisi (2. 10 dk ve 3. 15 dk) (Znamenackova vd., 2003).....	11
Şekil 3.2. 60 sn mikrodalga uygulanması ile numunede oluşan çatlaklar (Hartlieb vd., 2012).....	13
Şekil 3.3. Siyemit üzerinde 60 sn (a) ve 120 sn (b) 6 kW gücünde mikrodalga uygulama sonrası görülen çatlama ve ergime (Kahraman vd., 2020).....	14
Şekil 4.1. Karot alma makinesi ve karot alma işlemi.....	17
Şekil 4.2. Karotların deney standartlarına uygun şekillendirilmesi için kullanılan makine	17
Şekil 4.3. Deney standartlarına uygun hazırlanmış bir kısım numune örnekleri.	18
Şekil 4.4. Niğtaş-1 Kalsit mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).	18
Şekil 4.5. Niğtaş-2 Kalsit mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).	19
Şekil 4.6. Nidaş Kalsit mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).	20
Şekil 4.7. Cevher Kalsit mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).	20
Şekil 4.8. Marmara Mermer mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).....	21
Şekil 4.9. Burdur Yeşilova Kireçtaşı mikro fotoğrafı, paralel nikol (sol) ve çapraz nikol (sağ).	22
Şekil 4.10. Burdur Karamanlı Kireçtaşı mikro fotoğrafı, paralel nikol (sol) ve çapraz nikol (sağ).....	22
Şekil 4.11. Amasya Kireçtaşı mikro fotoğrafı, paralel nikol (sol) ve çapraz nikol (sağ).....	23

Şekil 4.12. Tek eksenli basınç dayanımı makinesi.	25
Şekil 4.13. Nokta yük deney aletinde Brazilian çekme deneyi yapılışı.....	26
Şekil 4.14. 2.45 GHz frekans ve 6 kW güce sahip endüstriyel kapalı tip mikrodalga fırın	27
Şekil 4.15. Kızılötesi termometre ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümü	28
Şekil 4.16. Tez kapsamında deney yapılmış numunelerin bir kısmı.	28
Şekil 5.1. Cevher kalsit (No:4) UCS numuneleri üzerinde mikrodalga sonrası oluşan kızışma.	29
Şekil 5.2. Cevher kalsit (No:4) BTS numunesi mikrodalga sonrası kızışma görünümü.	30
Şekil 5.3. Niğtaş-1 Kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	31
Şekil 5.4. Niğtaş-1 Kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	32
Şekil 5.5. Niğtaş-2 kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	33
Şekil 5.6. Niğtaş-2 kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	33
Şekil 5.7. Nidaş kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	35
Şekil 5.8. Nidaş kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	35
Şekil 5.9. Cevher kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	37
Şekil 5.10. Cevher kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	37
Şekil 5.11. Marmara mermer UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	39
Şekil 5.12. Marmara mermer BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	39
Şekil 5.13. Yeşilova kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	40
Şekil 5.14. Yeşilova kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	41
Şekil 5.15. Karamanlı kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	42
Şekil 5.16. Karamanlı kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	42
Şekil 5.17. Amasya kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	43
Şekil 5.18. Amasya kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.	44
Şekil 5.19. Niğtaş-1 kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	46
Şekil 5.20. Niğtaş-1 kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	46
Şekil 5.21. Niğtaş-2 kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	48
Şekil 5.22. Niğtaş-2 kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	48
Şekil 5.23. Nidaş kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	50
Şekil 5.24. Nidaş kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	51
Şekil 5.25. Cevher kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	52
Şekil 5.26. Cevher kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	53
Şekil 5.27. Marmara mermer UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	54

Şekil 5.28. Marmara mermer BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	55
Şekil 5.29. Yeşilova kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	56
Şekil 5.30. Yeşilova kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.....	57
Şekil 5.31.Karamanlı kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	58
Şekil 5.32. Karamanlı kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.....	59
Şekil 5.33. Mikrodalga sonrası patlayan Amasya kireçtaşı numunelerinden bir kısmı.	60
Şekil 5.34. Amasya kireçtaşı numunesi ince damarlara yönelik yakın çekim görüntüsü.	61
Şekil 5.35. Amasya kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.	61
Şekil 5.36. Amasya kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.....	62
Şekil 5.37. Kuru UCS numuneleri kayaç dayanımı ve dayanım kaybı ilişkisi.	63
Şekil 5.38. Doygun UCS numuneleri kayaç dayanımı ve dayanım kaybı ilişkisi.	64
Şekil 5.39. Kuru BTS numuneleri kayaç dayanımı ve dayanım kaybı ilişkisi.....	64
Şekil 5.40. Doygun BTS numuneleri kayaç dayanımı ve dayanım kaybı ilişkisi.....	65
Şekil 5.41. Kuru numuneler için UCS değerlerinin mikrodalgaya maruz bırakma süresiyle değişimi. (Parantez içindeki rakamlar kayaç numaralarını göstermektedir).....	65
Şekil 5.42. Doygun numuneler için UCS değerlerinin mikrodalgaya maruz bırakma süresiyle değişimi. (Parantez içindeki rakamlar kayaç numaralarını göstermektedir).....	66
Şekil 5.43. Kuru numuneler için BTS değerlerinin mikrodalgaya maruz bırakma süresiyle değişimi. (Parantez içindeki rakamlar kayaç numaralarını göstermektedir).....	66
Şekil 5.44. Doygun numuneler için BTS değerlerinin mikrodalgaya maruz bırakma süresiyle değişimi. (Parantez içindeki rakamlar kayaç numaralarını göstermektedir).....	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Mikrodalga sonrası minerallerin ısı dereceleri (Walkiewicz vd., 1988).	9
Çizelge 4.1. Laboratuvar çalışmasında kullanılan kayaçlar.	16
Çizelge 4.2. Kayaçların majör element yüzdelerini gösteren XRF analizi.....	24
Çizelge 4.3. Mikrodalga uygulanmamış numunelerin ortalama fiziko-mekanik özellikleri.	26
Çizelge 5.1. Niğtaş-1 kalsit numunesi yüzey sıcaklıkları.	30
Çizelge 5.2. Niğtaş-2 kalsit numunesi yüzey sıcaklıkları.	32
Çizelge 5.3. Nidaş kalsit numunesi yüzey sıcaklıkları.	34
Çizelge 5.4. Cevher kalsit numunesi yüzey sıcaklıkları.	36
Çizelge 5.5. Marmara mermer numunesi yüzey sıcaklıkları.	38
Çizelge 5.6. Yeşilova kireçtaşı numunesi yüzey sıcaklıkları.....	40
Çizelge 5.7. Karamanlı kireçtaşı numunesi yüzey sıcaklıkları.	41
Çizelge 5.8. Amasya kireçtaşı numunesi yüzey sıcaklıkları.....	43
Çizelge 5.9. Niğtaş-1 kalsit mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.	45
Çizelge 5.10. Niğtaş-2 kalsit mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.	47
Çizelge 5.11. Nidaş kalsit mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.	49
Çizelge 5.12. Cevher kalsit mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.	51
Çizelge 5.13. Marmara mermer mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.	53
Çizelge 5.14. Yeşilova kireçtaşı mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.....	55
Çizelge 5.15. Karamanlı kireçtaşı mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.	57
Çizelge 5.16. Amasya kireçtaşı kayacı mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.	59
Çizelge 5.17. 6 kW güçte 6 dakika mikrodalga uygulaması sonrası hesaplanan dayanım kayıpları.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ_c	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
σ_t	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı (MPa)
kW	Kilovat
μm	Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece

Kısaltmalar

UCS	Tek Eksenli Basınç Dayanım Deneyi
BTS	Brazilian Dolaylı Çekme Deneyi
K	Kuru
D	Doygun
Sn	Saniye
Dk	Dakika

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinin başlangıcından itibaren öncelikle barınma ve korunma gereksinimlerinden dolayı kayaçların oyularak kullanımı yaygındır (Şekil 1.1). İnsanlar önceleri kolay kazılabilir kayaçları barınak haline getirerek ihtiyaçlarını gidermişlerdir. Yumuşak kayaçlar gerek el yardımıyla gerekse kemiklerden yapılan aletlerle ve taşlarla kazılarak barınmaya uygun hale getirilmiştir. İlerleyen zamanlarda madenlerin keşfiyle kendilerine kazma kürek gibi aletler yaparak kazı işini geliştirmişlerdir. Ancak sert kayaların parçalanması her zaman büyük bir sorun teşkil etmiştir.



Şekil 1.1. Derinkuyu yer altı şehri (Dailynews, 2022).

İnsanların bir araya gelerek topluluklar oluşturmasıyla, birlikte yaşam için köyler, kasabalar, kentler, şehirler, ülkeler kurmuşlardır. Topluluklar arası ulaşımda kullanılacak yollar yapılmış ve dağlardan geçmek için tüneller inşa edilmiştir. Şehirlerin kalabalıklaşmasıyla yer altı ulaşımı amaçlı tüneller de açılmaya başlamıştır. Gelişme seviyeleri ve teknoloji arttıkça, cevherlerin kullanım alanları da genişlemiştir. Bunun sonucunda bu tür yapıların yapılması ve cevherlerin üretilmesi için kayaçların kolay kazınabilir olması önemli bir husus haline gelmiştir.

Makinelerle yapılan kazı işlemlerine mekanize kazı denilmektedir. Günümüzde, kazı işlemlerinin mekanize yöntemlerle yapılması yaygınlaşmaktadır. Mekanize kazı yöntemi genellikle yumuşak kayaçlar ve yumuşak minerallerin (örneğin; kömür, tuz, trona, fosfat, pomza vb.) kazılmasında kullanılmaktadır (Şekil 1.2). Orta sert

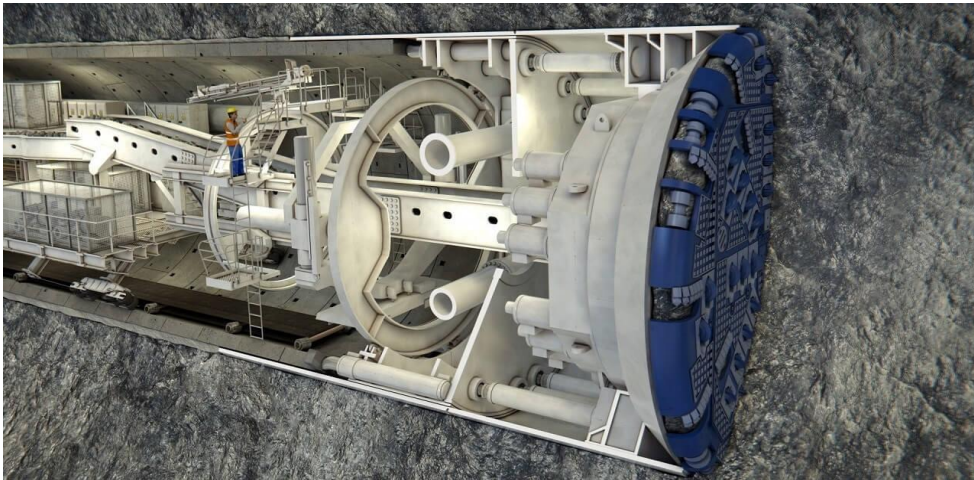
kayaçların/minerallerin kazılma işlemlerinde mekanize kazı makineleri sınırlı olarak kullanılmaktadır. Ancak sert kayaçların/minerallerin kazılmasında tünel açma makineleri (TBM) hariç mekanize kazı makineleri verimli bir şekilde kullanılamamaktadır.



Şekil 1.2. Mekanize kazı araçlarından sürekli kazıcı (Gainwellengineering, 2022).

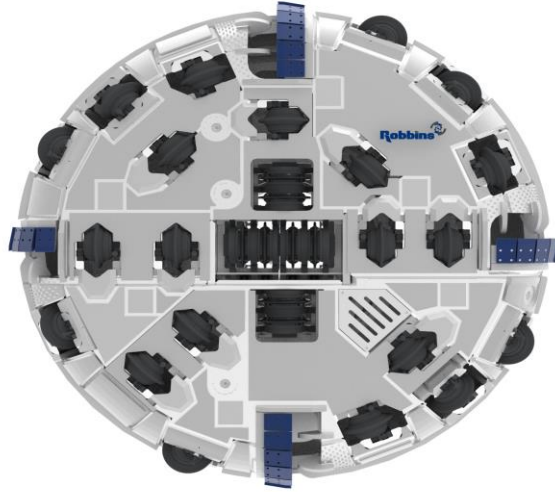
Mekanize kazılarda kullanılan başlıca makineler; TBM' ler, kollu tip galeri açma makineleri, döner ve tamburlu kesiciler, hidrolik kırıcılar, kuyu açma makineleri, makaslı yükleyiciler, pulluklar, sürekli kazıcılar vb. olmak üzere belirtilebilir.

TBM' ler, sert zemin tünel açma makineleri ve yumuşak zemin tünel açma makineleri şeklinde iki temel tipte bulunmaktadır. Tünel açma/kazı işlemlerinde TBM' ler yüksek ilerleme hızı ve güvenli çalışma koşullarını sağlamaktadırlar (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Tünel açma makinesi (TBM) sistemi (Bilimseldunya, 2022).

TBM'lerin kesici kafaları, çalışacağı litolojiye göre tasarlanmaktadır. Sert kayalarda disk kesiciler kullanılırken (Şekil 1.4), yumuşak zeminlerde kanca/çivi kesiciler, kazar taşlar (ripper, scraper) kullanılmakta olup (Şekil 1.5); sert ve yumuşak zemin birlikte bulunduğu ise kesici kafa içerisinde kesiciler karma (multi mod) olarak bulunabilmektedir (Şekil 1.6).



Şekil 1.4. Sert zemin tünel açma makinesi kesici kafası (Robbinstbm, 2022).



Şekil 1.5. Yumuşak zemin tünel açma makinesi (Gnsolidscontrol, 2022).



Şekil 1.6. Yumuşak ve sert zemin (multi mod) tünel açma makinesi (E-Berk, 2022).

Keskilerin yapıldığı malzemeler de zemin türlerine göre değişmekte olup; genellikle keski çelikten yapılmakta, sert ve aşındırıcı kayalarda keski yüzeylerine tungsten karbür parçalar gömülmektedir (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Sert ve orta sert kayalarda kullanılan disk keski örnekleri (Estcutters, 2022).

Sert ve aşındırıcı kayaç kazılarında kullanılan keski maliyetleri kayda değer boyutlarda olmaktadır: Bu sebeple maliyetleri azaltmak amacıyla disk keskinin kayaçla temas eden yüzeylerine tungsten karpit parçacıklar gömülmektedir. Disk keskinin yüzeylerine tutturulan bu parçacıkların aşınmaları sonrasında disk keskinin sökülerek tekrar yüzeylerine parçacıklar tutturulur. Maliyetleri disk keskinin yenisiyle değiştirilmesine göre daha uygun olsa da disk keskinin sökülüp takılma işleminin gerçekleşmesi için TBM'lerin geri çekilmesi gerekmekte, yani keskinin değişimi sırasında kazı faaliyetleri durmakta ve gerçekleştirilen projenin tamamlanma süresini uzatmaktadır.

Sert kayaçlarda gerçekleşen kazı faaliyetlerinde düşük ilerleme hızı, keskinde yüksek aşınma, aşınmaya bağlı parça değişimi maliyetleri ve değişim sırasında faaliyetlerin duraklaması, sayılabilecek temel sorunlar olarak gösterilebilmektedir. Sert kayaç yapısında gerçekleşen çalışmalar için araştırmacılar tarafından yeni yaklaşımlar üzerinde çalışılmakta olup, bu yaklaşımlardan biri de mikrodalga destekli kazı çalışmalarıdır. Hali hazırda mikrodalga destekli kazı hakkında geniş kapsamlı veya yeterince yapılmış çalışma bulunmayıp, teori bakımından alınmış bazı patentler mevcuttur (Lindroth vd.,1991; Ouellet vd.,2013). Mikrodalga destekli kazıya yönelik araştırmalarda mikrodalga uygulanan kayaçların dayanımlarında meydana gelen değişikliklerin incelendiği birtakım çalışmalar olmakla beraber, karbonatlı kayaçlar üzerinde sınırlı bir çalışma dışında herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu tez çalışmasında, mikrodalgaya maruz bırakılan kuru ve suya doymun durumdaki 8 farklı karbonatlı kayacın mikrodalga yüzey sıcaklıkları ölçülmüş ve dayanımlarında meydana gelen değişimler basınç ve çekme deneyleri uygulanarak incelenmiştir. Ayrıca 8 farklı karbonatlı kayaç üzerinde mineralojik ve kimyasal analizler yapılarak mineral içerikleri belirlenerek, elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Tezin 2. bölümünde; mikrodalga hakkında genel bilgiler verilerek mikrodalganın günümüzde kullanım şekli, mikrodalgalara malzemelerin gösterdiği tepkilerden, mikrodalga mekanizmasından ve mikrodalganın cisimleri ve kayaçları ısıtma yöntemi hususunda oluşturulan model sistemden bahsedilmiştir.

Tezin 3. bölümünde; mikrodalgaın mineraller ve kayaçlar üzerine etkileri hususunda önceki yapılan çalışmalar kapsamında literatür incelemesi yapılarak, ilgili yapılan çalışmalardan özetle bahsedilmiştir.

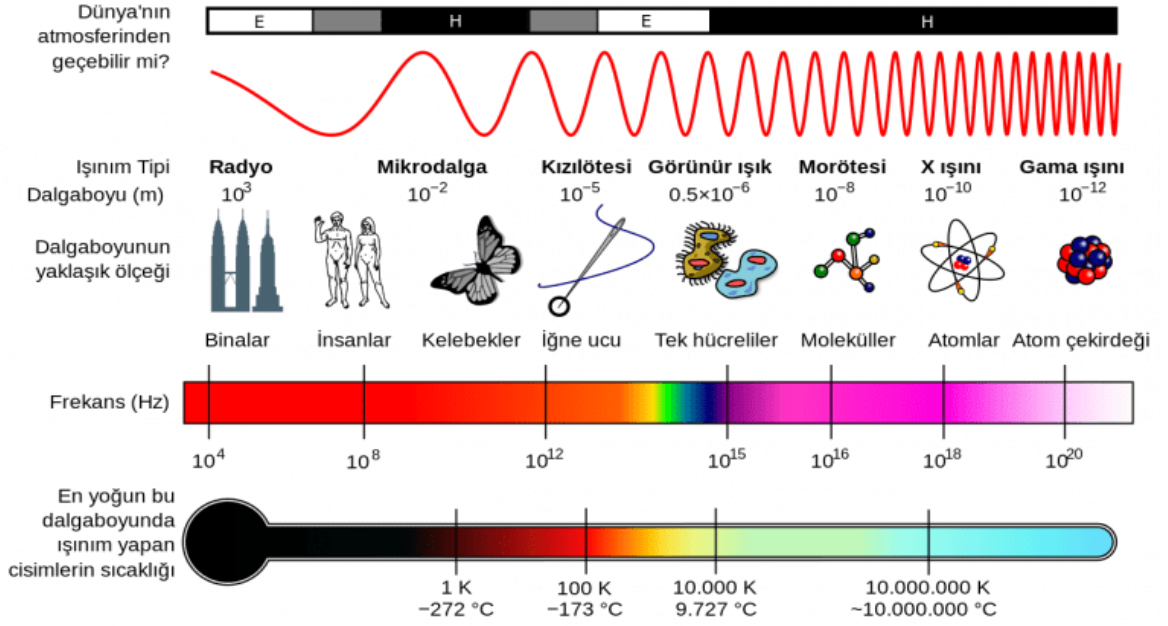
Tezin 4. bölümünde; materyal ve yöntem başlığı altında tez kapsamında kayaç numunelerinin temininden, mineralojik analizlerinden, fiziko-mekanik özelliklerin belirlenmesinden, mikrodalga uygulamasından ve mikrodalga uygulama sonrası gerçekleştirilen mekanik deneylerden bahsedilmiştir.

Tezin 5. bölümünde; kayaçlar ve numuneler üzerinde uygulanan deney bulgularından, analizlerden elde edilen verilerden, veriler sonucunda yapılan hesaplamalardan ve doğrudan yapılan ölçümlerden bahsedilerek değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Tezin 6. bölümünde; tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar belirtilmiş ve bu kapsamda ileride yapılabilecek çalışmalarla ilgili önerilerde bulunulmuştur.

2. MİKRODALGA VE KAYAÇLAR ÜZERİNDE ETKİSİ

Elektromanyetik spektrumda 300 MHz ile 300 GHz frekanslarında ve 1 mm ile 1 m dalga boyları arasında olan ve kızılötesi ışınlar ile radyo dalgaları arasındaki kısmında bulunan ışınlar mikrodalga olarak tanımlanmaktadır (Pozar, 2012).

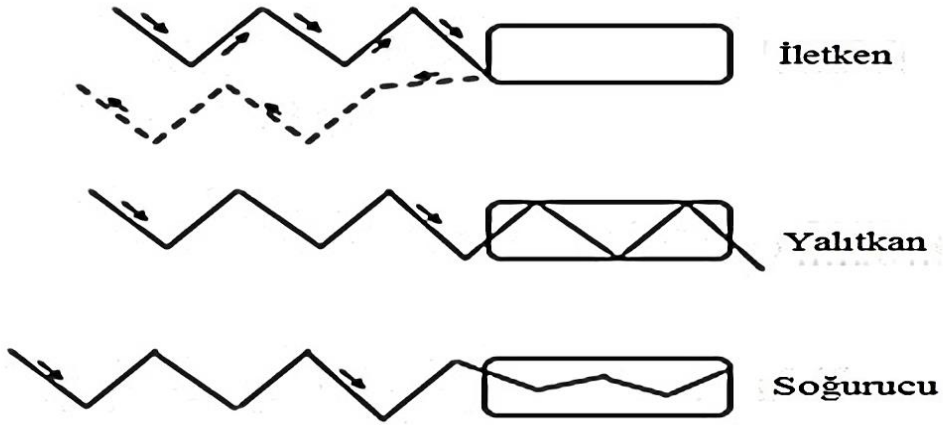


Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum (Rasyonalist, 2021).

İletilen enerji miktarını arttırmak, ışınımın dalga boyunun kısaltılması ve frekansının artırılması ile ilgilidir (Motlagh, 2009). Yaygın olarak kullanılan mikrodalga sistemleri 12,2 cm dalga boyuna ve $1,02 \times 10^{-5}$ eV enerjisine denk gelen 2,45 GHz frekansında çalışmaktadırlar (Jacob vd., 1995).

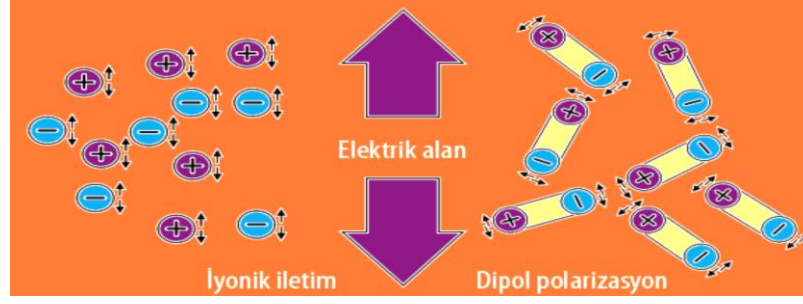
Mikrodalga enerjisi ısıtma ve/veya kurutma amacıyla endüstride birçok alanda uygulanmaktadır. Gıda sanayi, sağlık sektörü, kimya-metalürji, tekstil, mobilya ve kâğıt sanayi mikrodalga sistemlerinin sıklıkla uygulandığı alanlara örnek verilebilir. Mikrodalga sistemi ile ısıtma işleminin süresi, mikrodalga uygulanacak maddenin su içeriğine, yoğunluğuna, kütlesine, elektriksel potansiyeline, enerjiyi depolama yeteneğine ve iyon yüküne göre değişmektedir. Mikrodalgayla ısıtmayı bu parametrelerden farklı olarak mikrodalga frekansı ve gücü, ısıl iletkenlik özellikler ve özgül ısı gibi başka değişkenler de etkiler (Gümüşdereioğlu, 2012).

Mikrodalgalara gösterdikleri tepkilere göre malzemeler; iletkenler, yalıtkanlar ve soğurucular şeklinde 3 kısımda adlandırılırlar. İletkenler, mikrodalgaları yansıtırlar ve ısınmazlar. Yalıtkan malzemeler mikrodalgalardan etkilenmezler, mikrodalgalar yalıtkanların içinden geçerler ve ısınmazlar. Soğurucular ise mikrodalgaları absorbe ederek ısınırlar (Church vd., 1988).



Şekil 2.2. Mikrodalgalara gösterdikleri reaksiyona göre malzemeler (Church vd., 1988).

Mikrodalgaları soğuran cisimler, “Dielektrik Malzeme” şeklinde isimlendirilirler ve bu malzemelerin kendine özgü dielektrik sabitleri vardır. Dielektrik malzemelerde, mikrodalga enerjisi iyonik moleküllerin hareketi ve/veya dipolar moleküllerin rotasyonu ile ısınma meydana getirirler (Şekil 2.3). Bir cismin mikrodalgayla ısınmasında en önemli etken malzemenin dağıtım faktörüdür. Dağıtım faktörü, malzemelerin dielektrik kayıp faktörünün, dielektrik sabitine oranlanmasıyla bulunmaktadır. Dielektrik sabit, malzemelerin içerisine ilerleyen mikrodalgaları, malzemelerin içeride tutma ve geciktirme kapasitesiyle ilişkilidir. Kayıp faktörü ise malzemelerin kendilerine etki eden enerjiiyi ısı olarak dağıtma yeteneği ölçütüdür. Yüksek kayıp faktörü olan malzemelerin mikrodalga enerjisiyle basit bir şekilde ısıtılması mümkündür (Metaxas ve Meredith, 1983). Mikrodalga enerjisini soğuran bir cismin molekülleri saniyede 2.5- 3 milyar kez titreşerek kinetik enerji kazanır ve madde ısınır (Gümüşderelioğlu, 2012).



Şekil 2.3. Mikrodalga enerjisinin malzemeleri ısıtma mekanizması (Gümüşdereliöğü, 2012).

Mineraller ve kayalar da dielektrik malzeme sayılmaktadır. Her mineralin dielektrik sabiti ve kayıp faktörü farklıdır. Dolayısıyla, bir kayacın dielektrik sabiti ve kayıp faktörü, bu kayacı oluşturan minerallerin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Kayaların mineral içeriklerine ek olarak, kayaların dokusal özellikleri (mineral tane boyutu vb.) ve su içeriği ile ortam sıcaklığı ve uygulanan mikrodalga frekansı da dielektrik özellikleri farklılaştırmaktadır (Santamarina, 1989; Peinsitt vd.,2008).

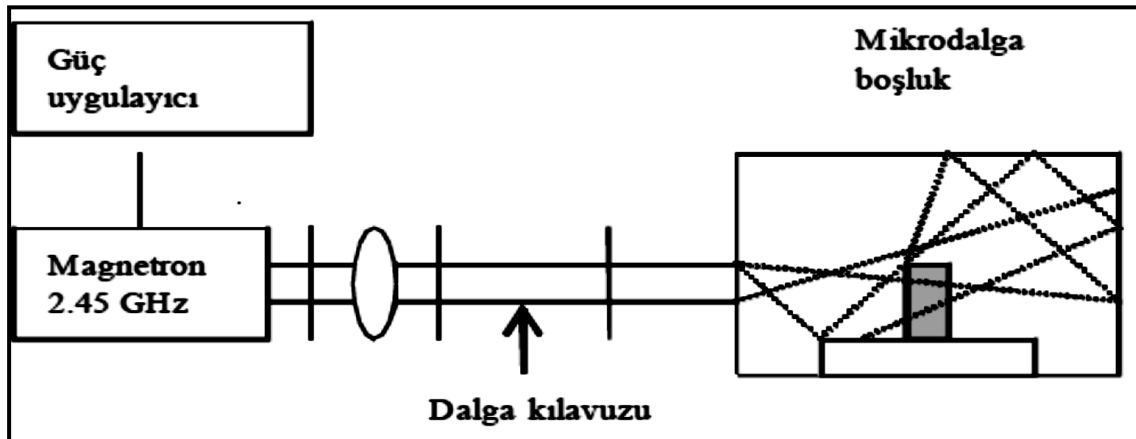
Walkiewicz vd. (1988), 2.45 GHz frekans ve 1 kW güçte farklı minerallerin ısınma derecelerini ölçerek, elde edilen değerlerin birbirinden farklılıklarını göstermişlerdir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Mikrodalga sonrası minerallerin ısı dereceleri (Walkiewicz vd., 1988).

Mineral	Kimyasal Bileşim	Isı (°C)	Süre (dk)
Albit	NaAlSi ₃ O ₈	82	7
Arizonit	Fe ₂ Ti ₃ O ₉	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
Molibdenit	MoS ₂	192	7
Orpiment	As ₂ S ₃	92	4.50
Ortoklaz	KAlSi ₃ O ₈	67	7
Pirit	FeS ₂	1019	6.76
Pirotit	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

Mineraller farklı termal genleşme katsayılarına sahiptirler. Kayaçlara mikrodalga uygulanması sonucunda oluşacak ısınmayla birlikte her mineral farklı termal genleşme ve gerilmeye uğrayacak; dolayısıyla çatlaklar meydana gelecektir. Meydana gelen çatlaklara göre kayaçların veya cevherlerin dayanımları azalmakta ve böylelikle kırılmaları, öğütülmeleri, kazılmaları ve delinmeleri basitleşmektedir. Cevherlerin mikrodalga uygulanması sonrasında oluşacak çatlamlar sonucunda kırma ve öğütme işlemlerini ve başka zenginleştirme proseslerini basitleştirdiği çeşitli kaynaklarda açıklanmaktadır. (Walkiewicz vd. 1991; Haque, 1999; Kingman ve Rowson, 1998; Kingman vd., 2000; Kingman vd.,2004; Jones vd., 2005; Pickles, 2008; Scott vd, 2008; Ruisanchez vd., 2012, vb.).

Mikrodalga enerjisiyle ısıtma sistemi dört temel bileşene sahiptir (Şekil 2.4): Güç kaynağı, magnetron (mikrodalga üretici), dalga kılavuzu ve aplikatör (örneğin fırın). Ek olarak, transformatörler, kondansatörler, rektifiyerler, dalga dağıtıcıları gibi ekstra bileşenler de bulunmaktadır. 2.45 GHz frekansa sahip magnetronların gücü çoğunlukla 0,5 kW ile 10 kW arasında değişkenlik göstermektedir (Haque, 1999). Çok modlu ve tek modlu olmak üzere iki tip aplikatörler bulunmaktadır. Mod, kapalı bir alana verilen elektromanyetik dalgaların elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin dağılma şekli olarak tanımlanmaktadır. Mikrodalga fırın gibi çok modlu kaviteler, birkaç dalga boyu ebadında kapalı metal kabinlerden oluşmaktadırlar. Çok modlu kavitelerde, kabin boyutuna göre küçük cisimlerin ısıtılması zor olmaktadır. Tek modlu kavitelerde, kesit şekli genellikle dikdörtgen veya silindir olmaktadır. Bu tip kaviteler, küçük boyutla sahip olduklarından hem homojen hem de yoğun enerji sağlarlar (Kingman vd., 2004).



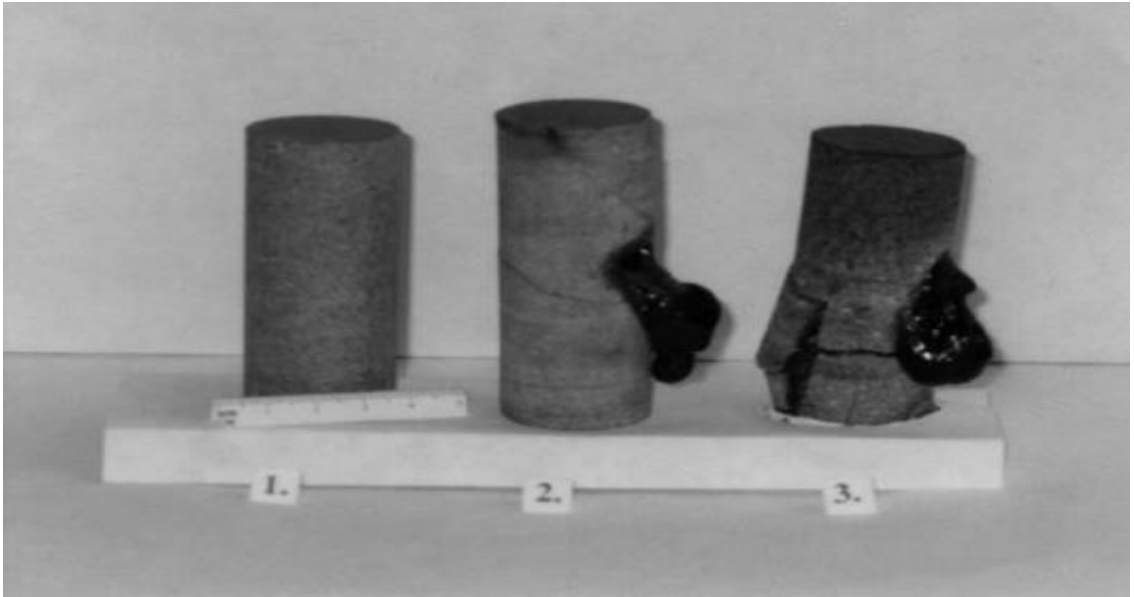
Şekil 2.4. Mikrodalga ile ısıtma sistemi (Toraman ve Depçi, 2007).

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Mikrodalga'nın cevherler ve mineraller üzerinde etkisi konusunda yapılan çalışmalar bir hayli fazla sayıda olmakla birlikte, bu tez çalışmasında karbonatlı kayaların dayanımlarında meydana gelen değişiklikler incelendiğinden cevherler ve mineraller üzerinde yapılan çalışmalara değinilmemiştir.

Kayaçlar üzerinde mikrodalga uygulanarak, kayaçların fiziko-mekanik özelliklerine yönelik çalışmalar uzun yıllar öncesine dayanmamakla birlikte, az çeşitte kayaç üzerinde düşük mikrodalga gücü uygulanarak yapılmıştır. Kayaçların fiziko-mekanik özelliklerine yönelik yeni yeni çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Önceden yapılan çalışmalardan kısaca aşağıda bahsedilmiştir.

Znamenackova vd. (2003), andezit numunelerinin 2.45 GHz frekans ve 1350 W güçte mikrodalga enerjisine 10 dk süre ile maruz bırakıldıklarında çoğunlukla ergidiklerini gözlemlemişlerdir. Daha sonra yapılan XRD analizinde numunelerde ağırlıkça kayıp görülmemiş ve kimyasal olarak değişime uğramadıkları gözlenmiş; ancak amorf hale geldikleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.1. Andezit kayacı üzerinde mikrodalga etkisi (2. 10 dk ve 3. 15 dk) (Znamenackova vd., 2003).

Bazalt kayaç örneklerinin dayanımları üzerinde mikrodalga uygulamasının etkisinin araştıran Satish (2005) ve Satish vd. (2006), numunelere değişik sürelerle, 2.45 GHz frekans ve 150 W güçte mikrodalga uygulamıştır. Sonrasında örneklerin nokta yük dayanımlarını belirlenmiş ve bu verilerden UCS değerlerini kestirmişlerdir. Araştırmada, 360 saniye süreyle mikrodalga uygulanması sonrasında örneklerden bazılarının sıcaklıklarının 115 °C' ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Oldukça az güce sahip mikrodalga enerjisi kullanıldığı halde bazalt kayacının UCS değerinde mikrodalga uygulanma süresiyle orantılı bir şekilde önem arz edebilecek düşmeler gözlenmiştir.

Farklı kayaçların mekanik özellikleri üzerinde mikrodalga uygulanmasının kayaçların mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmada (Motlagh, 2009), 2.45 GHz frekansta, farklı sürelerde ve güçlerde (3 kW' a kadar) mikrodalga uygulanmıştır. 3 kW güç uygulamasında kayaç örneklerinin UCS değerinde ortalama olarak %30 azalma tespit edilmiştir. Çekme dayanımlarında daha yüksek azalmalar gözlenmiş; dayanım azalmaları bazalt örneğinde %80' lere ulaşmıştır.

Bazalt kayaç numuneleri üzerinde mikrodalga uygulanmasının çatlak tokluğuna etkisinin incelendiği çalışmada (Nejati vd., 2012), 2.45 GHz frekanstaki mikrodalga enerjisi 5 kW' a kadar değişen güçler değerlerinde ve değişen sürelerle (30 saniyeye kadar) uygulanmıştır. Araştırma neticesinde, mikrodalga gücü ve uygulama süresinin artırılmasıyla numunelerin sıcaklık derecelerinin yükseldiği ve dolayısıyla çatlak tokluğunun düştüğü ortaya konulmuştur. Diğer yandan, mikrodalga uygulama süresinin artırılmasıyla numunelerde çatlak yoğunluğunda artışlar görülmüştür.

Peinsitt vd. (2008 ve 2010), bazı kayaç örneklerini kuruttuktan ve su ile doyurduktan sonra mikrodalgaya maruz bırakmışlar ve UCS ile sonik hız deneyleri yapmışlardır. 2.45 GHz frekans ve 3 kW güce sahip mikrodalga sistemi kullanılarak yapılan deneylerde, elde edilen veriler öncelikle sıcaklık değerleri bazında yorumlanmıştır. Kurutulmuş örneklere nazaran mikrodalga uygulanan suya doyurulmuş bazalt örneklerinin sıcaklıklarında değişiklik olmazken, granit örneklerinin sıcaklıklarının iki katına, kumtaşı örneklerinin sıcaklıklarının dört katına ulaştığı gözlenmiştir.. Sonrasında, UCS değerlerinin çok değişken olmasından dolayı sonik hız verileri yardımıyla analiz yoluna gidilmiştir. Sonik hız çatlak gelişimlerini tespit etmede etkin bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Kurutulmuş örneklere nazaran mikrodalga

uygulanan doyurulmuş bazalt örneklerinin sonik hız değerleri değişmezken, granit örneklerine ait değerlerde düşüşler gözlenmiştir. Doyurulmuş kumtaşı örnekleri ise mikrodalga enerjisinden aşırı derecede etkilenmiş ve 30 saniyeden sonra parçalanmışlardır.

Hartlieb vd. (2012), mineraloji bakımından homojenlik gösteren kayaların mikrodalgaya maruz bırakıldıklarında etkilenme derecelerini araştırmak amacıyla ince taneli bazalt kayaç numunesini 2.45 GHz frekans ve 3.2 kW gücünde mikrodalgaya maruz bırakmışlardır. Deneylerde, Şekil 3.2' de gösterildiği şekilde örneklerde mikrodalganın etkisiyle çatlaklar oluştuğunu göstermişlerdir. Çalışma kapsamında ortaya konulan bulgulardan birisi de mikrodalga uygulama süresinin artmasıyla örneklerin sonik hızının azalmasıdır.



Şekil 3.2. 60 sn mikrodalga uygulanması ile numunede oluşan çatlaklar (Hartlieb vd., 2012).

Hassani vd. (2016), önceki çalışmalarını (Nekoovaght ve Hassani, 2014; Nejati vd., 2012), daha kapsamlı olarak yayınlamaya, bu çalışmada sonuçlar ayrıca sayısal analizle de değerlendirilmiş ve mikrodalga uygulamasının kayaçların dayanımlarını düşürmede etkili bir metot olduğunu belirtmişlerdir.

Zheng vd. (2017) gabro kayaç numunelerinin 30-120 saniye aralığında 0.5-2 kW gücünde mikrodalga enerjisi uygulanması sonucunda sıcaklık ve P-dalga hızı değişimlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, uygulanan mikrodalga gücünün ve

mikrodalga uygulama süresinin artmasına bağlı olarak ortalama sıcaklığın arttığı ve P-dalga hızının düştüğü gözlemlenmiştir.

Lu vd. (2019), bazalt kayaç numunelerinin 5kW gücünde mikrodalga enerjisi altında ısınma derecelerini ve dayanım değişimlerini incelemiştir. Mikrodalga uygulama süresine bağlı olarak dayanım değerlerinin düştüğü, bazı numunelerin parçalandığı ve bazı numunelerde erimeler olduğu gözlemlenmiştir.

Saygın (2019), magmatik kayaçların mikrodalgaya maruz bırakılması sonucu cerchar aşındırıcılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Magmatik kayaçlar 180 saniye sürede 2 kW ve 6 kW gücünde mikrodalgaya maruz bırakılmış ve kayaçlar üzerinde cerchar aşındırıcılık deneyleri uygulanmıştır. Mikrodalga uygulamasının magmatik kayaçların aşındırıcılık değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Kahraman vd. (2020), magmatik kayaçların mikrodalgaya maruz bırakılması sonucu tek eksenli basınç dayanım deneyi ve brazilian dolaylı çekme dayanım deneyi sonuçlarını değerlendirerek, numunelerin dayanımında meydana gelen değişiklikleri incelemiştir. Mikrodalga sisteminin gücü, kayaçların mineral içeriği ve kayaçlara mikrodalga uygulama süresine bağlı olarak mikrodalganın magmatik kayaçların dayanımında ciddi etkileri olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Siyenit üzerinde 60 sn (a) ve 120 sn (b) 6 kW gücünde mikrodalga uygulama sonrası görülen çatlama ve ergime (Kahraman vd., 2020).

Deyab vd. (2021) tarafından, volkanik kimberlit (VK), hiperbyssal kimberlit (HK) ve granit kayaçları üzerinde 2 kW ve 15 kW güçleri arasında mikrodalga ışıması uygulanarak, mikrodalga ışımasının kaya numuneleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve brazilian dolaylı çekme dayanım (BTS) testleri ile yapılan deneylerde mikrodalga ışımasının sonucu olarak dayanım değerlerinin önemli ölçüde düştüğü gözlenmiştir.

Kahraman vd. (2022), magmatik kayaçlar üzerinde 3 kW ve 6 kW gücünde mikrodalga uygulanmasıyla beraber kesme deneylerinde normal ve kesme kuvvetleri ölçülerek spesifik enerji değerleri hesaplanmıştır. Bazı kayaçların düşük güçte (3 kW) ölçülen optimum spesifik enerji değerlerinin arttığı ve yüksek güçte (6 kW) optimum spesifik enerji değerlerinin azaldığı görülmüştür. Optimum spesifik enerji değerlerinin yüksek güçte (6 kW) %22,5 ile %38,7 arasında azaldığı gözlemlenmiştir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması için izlenen yöntemin aşamaları şu şekildedir:

- 1) Numune temini
- 2) Karot alımı ve numune hazırlama işlemleri
- 3) Mineralojik analiz
- 4) Fiziko-mekanik özelliklerin belirlenmesi
- 5) Numuneler üzerinde mikrodalga uygulaması
- 6) Mikrodalga uygulaması sonrası mekanik deneyler

4.1. Numune Temini

Tez çalışmasında farklı görsel ve yapısal özelliklerde, 8 farklı karbonatlı kayaç üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinde kullanılan numunelerin elde edilmesi için blok şeklindeki karbonatlı kayaçlar maden ocaklarından elde edilmiştir. Laboratuvar deneylerinde kullanılan kayaçların, numune numaraları, türleri ve bölgeleri aşağıda bulunan Çizelge 4.1’ de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Laboratuvar çalışmasında kullanılan kayaçlar.

Numune No	Kayaç Türü	Bölgesi
1	Niğtaş-1 Kalsit	Gümüşler, Niğde
2	Niğtaş-2 Kalsit	Gümüşler, Niğde
3	Nidaş Kalsit	Gümüşler, Niğde
4	Cevher Kalsit	Sazlıca, Niğde
5	Marmara Mermer	Marmara Adası, Balıkesir
6	Yeşilova Kireçtaşı	Yeşilova, Burdur
7	Karamanlı Kireçtaşı	Karamanlı, Burdur
8	Amasya Kireçtaşı	Amasya

4.2. Karot Alımı ve Numune Hazırlama İşlemleri

Tez çalışması kapsamında maden ocaklarından alınan blok kayalardan deneysel çalışmalar yapmak amacıyla Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında karotlar alınmış ve alınan karotlar kesme/düzeltilme işlemine tabi tutulmuştur. Karot makinesi ve NQ (iç çapı 47,6 mm) boyutunda karot işlemi Şekil 4.1’ de görülmektedir.



Şekil 4.1. Karot alma makinesi ve karot alma işlemi.

Karot alma işlemleri tamamlandıktan sonra, yapılacak deney standartlarına uygun olacak şekilde karot kesme ve düzeltme işlemlerinde bulunulmuştur (Şekil 4.2). UCS ve BTS deneyleri için hazırlanan numunelerin bir kısmı Şekli 4.3’ de görülmektedir.



Şekil 4.2. Karotların deney standartlarına uygun şekillendirilmesi için kullanılan makine



Şekil 4.3. Deney standartlarına uygun hazırlanmış bir kısım numune örnekleri.

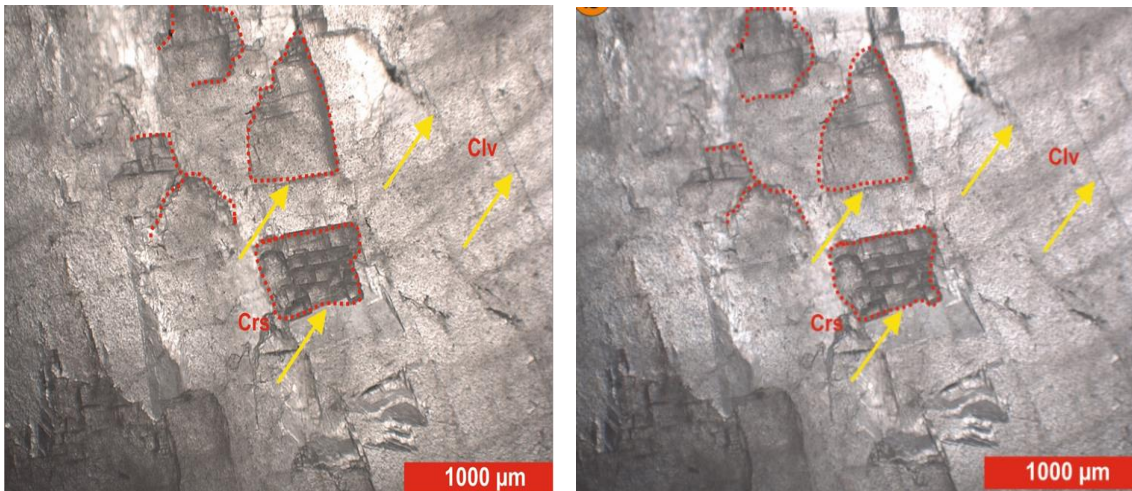
4.3. Kayaçların ve Numunelerin Mineralojik Analizi

Her kayacı en iyi temsil edecek numunelerden ince kesitler hazırlanmış ve mineralojik analiz yapılmıştır. Mineralojik analiz sonuçları aşağıda açıklanmaktadır:

Niğtaş-1 Kalsit

Niğtaş-1 kalsit numunesine ait mikro fotoğraf Şekil 4.4' de verilmiş olup, kayaca ait mineralojik özellikler aşağıda açıklanmaktadır:

- Yapı: Mikro kristalin-kristalin (500-1000 μ) (Crs)
- Doku: Kompakt, tabakasız, mükemmel klivaj (Clv)
- Bileşim: Kalsit (Belirgin sınırlara sahip poligonal kristaller halinde)
- Kayaç adı: Mermer

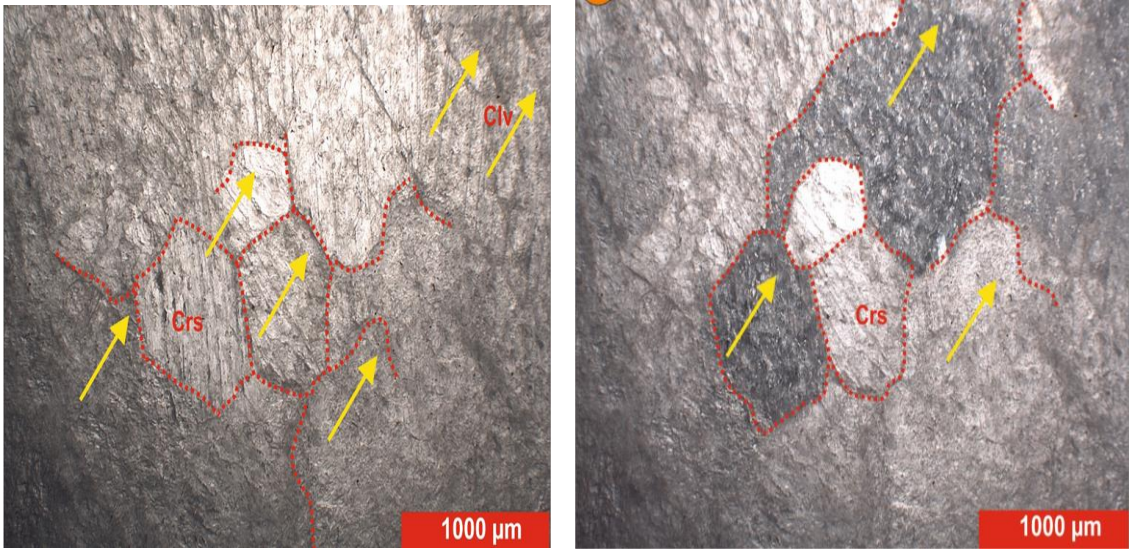


Şekil 4.4. Niğtaş-1 Kalsit mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).

Niğtaş-2 Kalsit

Niğtaş-2 kalsit numunesine ait mikro fotoğraf Şekil 4.5' de verilmiş olup, kayaca ait mineralojik özellikler aşağıda açıklanmaktadır:

- Yapı: Mikro kristalin-kristalin (200-2000 μ) (Crs)
- Doku: Kompakt, tabakasız, mükemmel klivaj (Clv)
- Bileşim: Kalsit (Belirgin sınırlara sahip poligonal kristaller halinde)
- Kayaç adı: Mermer

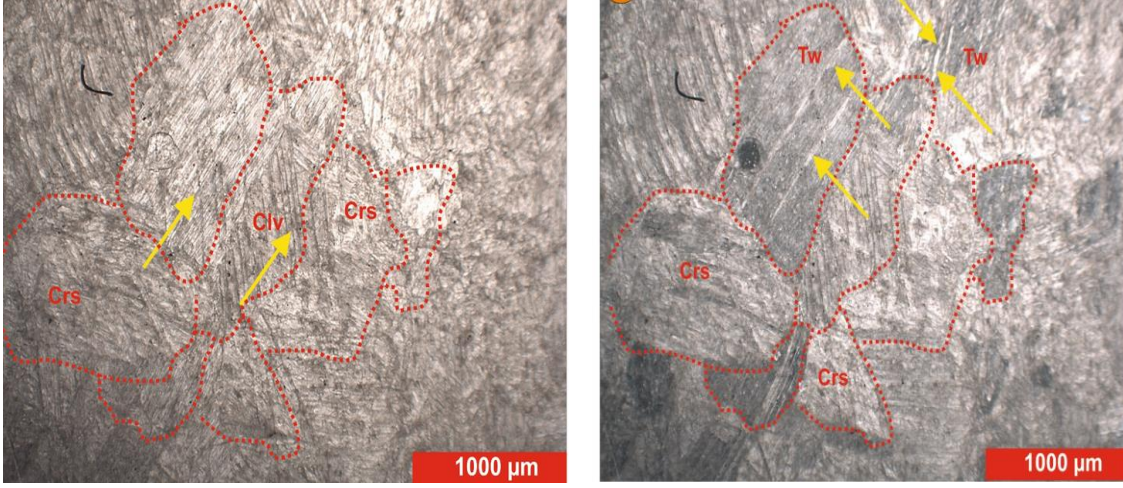


Şekil 4.5. Niğtaş-2 Kalsit mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).

Nidaş Kalsit

Nidaş kalsit numunesine ait mikro fotoğraf Şekil 4.6' da verilmiş olup, kayaca ait mineralojik özellikler aşağıda açıklanmaktadır:

- Yapı: Mikro kristalin-kristalin (200-1500 μ) (Crs)
- Doku: Kompakt, tabakasız, mükemmel klivaj (Clv)
- Bileşim: Kalsit (Belirgin sınırlara sahip poligonal kristaller ve lamelli ikizlenme (Tw) halinde)
- Kayaç adı: Mermer

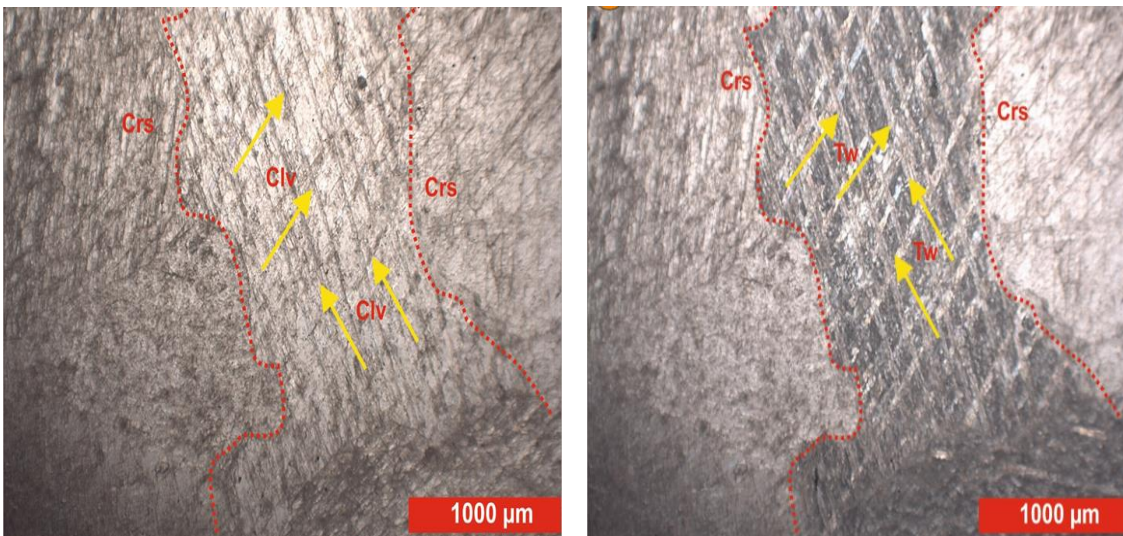


Şekil 4.6. Nidaş Kalsit mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).

Cevher Kalsit

Cevher kalsit numunesine ait mikro fotoğraf Şekil 4.7' de verilmiş olup, kayaca ait mineralojik özellikler aşağıda açıklanmaktadır:

- Yapı: Mikro kristalin-kristalin (1000-4000 μ) (Crs)
- Doku: Kompakt, tabakasız, mükemmel klivaj (Clv)
- Bileşim: Kalsit (Belirgin sınırlara sahip poligonal kristaller ve lamelli ikizlenme (Tw) halinde)
- Kayaç adı: Mermer

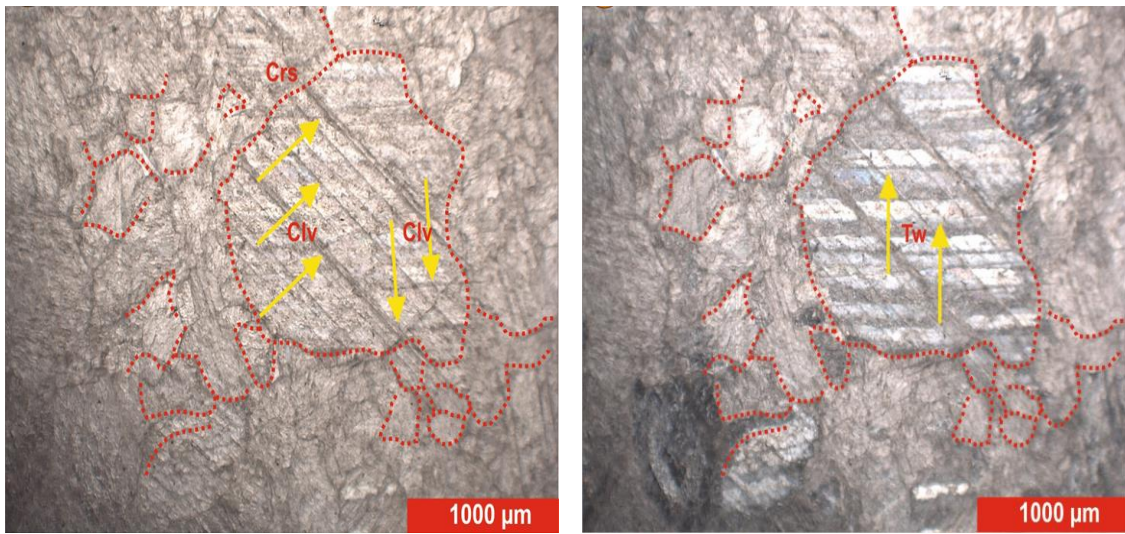


Şekil 4.7. Cevher Kalsit mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).

Marmara Mermer

Marmara mermer numunesine ait mikro fotoğraf Şekil 4.8’ de verilmiş olup, kayaca ait mineralojik özellikler aşağıda açıklanmaktadır:

- Yapı: Mikro kristalin-kristalin (100-1500 μ) (Crs)
- Doku: Kompakt, tabakasız, mükemmel klivaj (Clv)
- Bileşim: Kalsit (Belirgin sınırlara sahip poligonal kristaller ve lamelli ikizlenme (Tw) halinde)
- Kayaç adı: Mermer

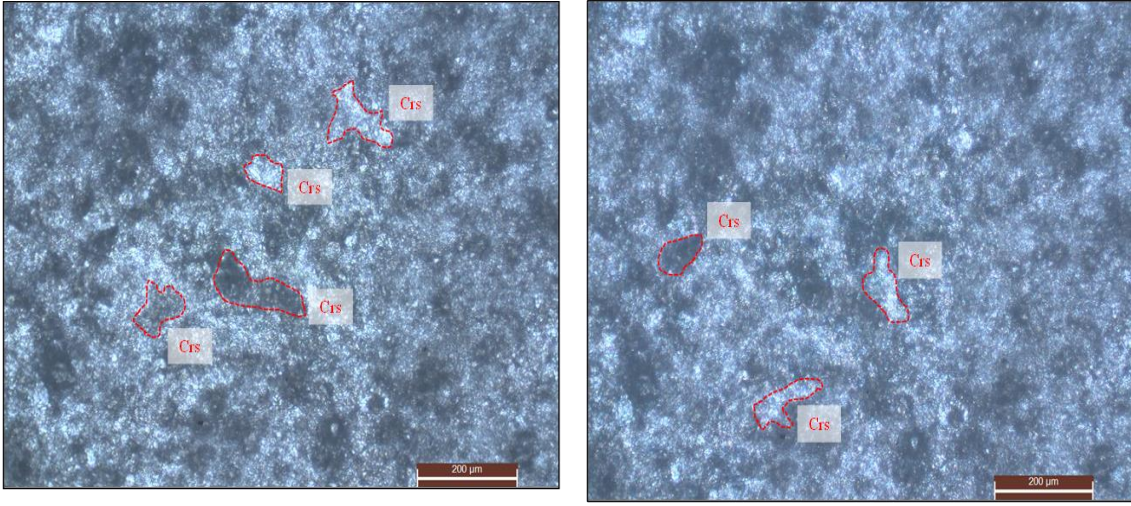


Şekil 4.8. Marmara Mermer mikro fotoğrafı, tek nikol (sol) ve çift nikol (sağ).

Burdur Yeşilova Kireçtaşı

Burdur Yeşilova Kireçtaşı numunesine ait mikro fotoğraf Şekil 4.9’ da verilmiş olup, kayaca ait mineralojik özellikler aşağıda açıklanmaktadır:

- Yapı: Mikro kristalin-kristalin (1000-4000 μ) (Crs)
- Doku: Kompakt, tabakasız
- Bileşim: Kalsit (Kalsit, baskın mineral ve kayacın ana bileşenidir. Çoğunlukla iyi tanımlanmış, sınırları olmayan düzensiz kristaller şeklinde görünmektedir.)
- Kayaç adı: Kireçtaşı

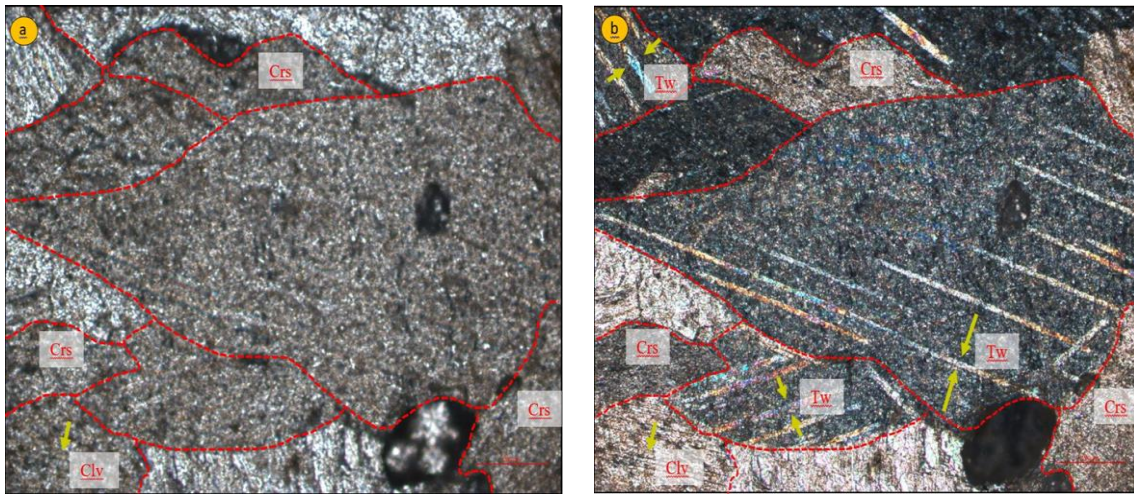


Şekil 4.9. Burdur Yeşilova Kireçtaşı mikro fotoğrafı, paralel nikol (sol) ve çapraz nikol (sağ).

Burdur Karamanlı Kireçtaşı

Burdur Karamanlı Kireçtaşı numunesine ait mikro fotoğraf Şekil 4.10' da verilmiş olup, mineralojik kayaca ait özellikler aşağıda açıklanmaktadır:

- Yapı: Mikro kristalin-kristalin (1000-4000 µ) (Crs)
- Doku: Kompakt, tabakasız
- Bileşim: Kalsit, Dolomit (Kalsit, baskın mineral ve kayacın ana bileşenidir. Çoğunlukla sınırları iyi tanımlanmış (Crs) ve lamelli ikizlenme (Tw) olan poligonal krsitaller şeklinde görünmektedir.)
- Kayaç adı: Kireçtaşı

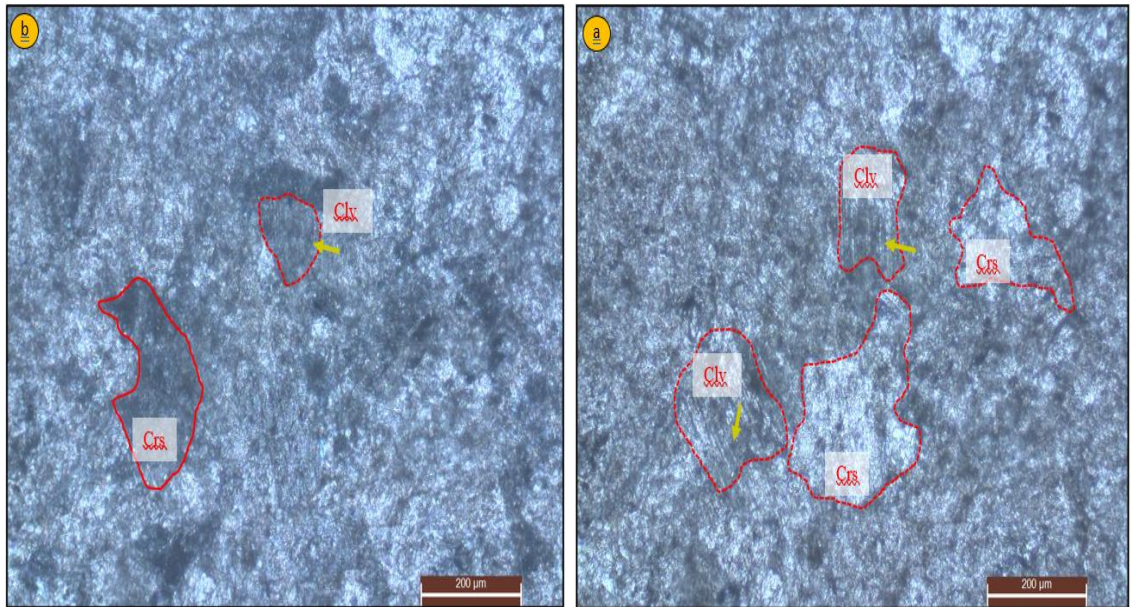


Şekil 4.10. Burdur Karamanlı Kireçtaşı mikro fotoğrafı, paralel nikol (sol) ve çapraz nikol (sağ).

Amasya Kireçtaşı

Amasya kireçtaşı numunesine ait mikro fotoğraf Şekil 4.11’ de verilmiş olup, kayaca ait mineralojik özellikler aşağıda açıklanmaktadır:

- Yapı: Mikro kristalin-kristalin (1000-4000 μ) (Crs)
- Doku: Kompakt, tabakasız
- Bileşim: Kalsit (Kalsit, baskın mineral ve kayacın ana bileşenidir. Çoğunlukla düzensiz granüller kristaller ve iyi tanımlanmış sınırları olmayan klivaj (Clv) şeklinde görünmektedir.)
- Kayaç adı: Kireçtaşı



Şekil 4.11. Amasya Kireçtaşı mikro fotoğrafı, paralel nikol (sol) ve çapraz nikol (sağ)

Yukarıda gösterilen mineralojik analiz sonuçlarında kayaçların bileşimlerinin aynı olması ve mikro-kristalin ve kristalin yapılarının birbirinden uzak olması sonucu mineralojik analiz verileri değerlendirmelerde kullanılmamıştır. Mineralojik analize ilave olarak incelenen kayaçların majör element yüzdelerini belirlemek üzere Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında XRF analizi yaptırılmıştır. Çizelge 4.2’ de görüldüğü gibi, incelenen numuneler arasında majör element bakımından da fazla bir fark bulunmamaktadır.

Çizelge 4.2. Kayaçların majör element yüzdeleri gösteren XRF analizi.

XRF Analiz Sonuçları (%)											
Numune No	Ateş Zayıyatı	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
1	43,6	0,1	54,1	0,1	<0,1	1,0	<0,1	0,1	<0,1	0,7	<0,1
2	43,8	0,1	54,8	<0,1	<0,1	0,6	<0,1	0,1	<0,1	0,3	<0,1
3	43,7	0,1	55,1	<0,1	<0,1	0,5	<0,1	0,1	<0,1	0,4	<0,1
4	43,8	0,1	55,0	<0,1	<0,1	0,5	<0,1	<0,1	<0,1	0,4	<0,1
5	44,0	0,2	52,2	0,1	<0,1	2,8	<0,1	0,1	<0,1	0,5	<0,1
6	44,4	0,1	51,3	0,2	<0,1	3,3	<0,1	0,1	<0,1	0,4	<0,1
7	44,0	0,1	55,2	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	0,1	<0,1	0,2	<0,1
8	44,0	0,2	53,9	0,1	0,1	0,9	<0,1	0,1	<0,1	0,6	<0,1

4.4. Kayaçların Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

ASTM standartlarına göre hazırlanan, bir kısmı Şekil 4.3' de gösterilen numuneler üzerinde yoğunluk, porozite, tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve Brazilian dolaylı çekme dayanımı (BTS) deneyleri yapılmıştır.

4.4.1. Yoğunluk Deneyleri

ISRM veya ASTM standartlarına göre hazırlanan numunelerin boyları ölçülerek hacimleri hesaplanmıştır ve numuneler elektronik hassas tartıda tartılarak kütleleri ölçülmüştür. Hesaplanan numune hacimleri, ölçülen numune kütle değerlerine bölünerek kayaç yoğunlukları bulunmuştur. Her kayaç türü için 3 farklı numune üzerinde hesaplamalar yapılmış olup, ortalama yoğunluk değerleri bulunmuştur (Çizelge 4.3).

4.4.2. Porozite Deneyleri

Kayaçların porozite ölçümleri için ise ISRM veya ASTM standartlarına göre hazırlanan numunelerin boyları ölçülerek hacimleri hesaplanmıştır. Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği bölüm laboratuvarında bulunan endüstriyel fırında, numuneler yaklaşık 100-110 °C' de en az 24 saat fırınlanarak içeriğindeki su oranından arındırıldıktan sonra elektronik hassas tartıda tartılarak kuru halde kütleleri ölçülmüştür. Kuru kütleleri ölçülen numuneler en az 48 saat olacak şekilde su içerisinde bekletilerek suya doymun hale gelmeleri sağlanmıştır. Suyu doymun hale gelen numuneler tartılarak

kütleleri ölçülmüştür. Numunelerin doygun kütleleri ile kuru kütleleri arasındaki fark bulunarak, boşluk hacimleri bulunmuştur, boşluk hacimlerinin numune hacimlerine oranıyla porozite değerleri elde edilmiştir. Her kayaç türü için 3 farklı numune üzerinde hesaplamalar yapılmış olup, ortalama porozite değerleri bulunmuştur (Çizelge 4.3).

4.4.3. Tek Eksenli Basınç Deneyi (UCS)

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarında bulunan dijital göstergeli tek eksenli basınç dayanımı deneyi makinesinde (Şekil 4.12), 47,60 mm çapında ve boy/çap oranı 2,0-2,5 olan, her kayaç türü için en az 5 adet numune üzerinde laboratuvar çalışması gerçekleştirilmiş olup, ortalama dayanım değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.3).



Şekil 4.12. Tek eksenli basınç dayanımı makinesi.

4.4.4. Brazilian Dolaylı Çekme Deneyi (BTS)

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarında bulunan analog göstergeli Nokta yük aletinde düz plakalar ve çekme çenesi (Şekil 4.13) yardımıyla çekme deneyleri yapılmıştır. 47,60 mm çapında ve kalınlığı çap boyutunun yaklaşık yarısı olacak şekilde, her kayaç türü için hazırlanmış olan en az 5 adet numune üzerinde laboratuvar çalışması gerçekleştirilmiş olup, ortalama dayanım değerleri elde edilmiştir. (Çizelge 4.3)



Şekil 4.13. Nokta yük deney aletinde Brazilian çekme deneyi yapılışı.

Deney sonuçları EK-3’ de detaylı olarak verilmiştir. Ortalama deney sonuçları ise Çizelge 4.3’ te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Mikrodalga uygulanmamış numunelerin ortalama fiziko-mekanik özellikleri.

Numune No	Porozite	Yoğunluk (g/cm ³)		UCS (MPa)		BTS (MPa)	
		Kuru	Doygun	Kuru	Doygun	Kuru	Doygun
1	0,33	2,67	2,68	54,2	51,1	5	4,3
2	0,42	2,58	2,59	43,6	37,3	3,8	3,7
3	0,34	2,6	2,6	75,4	73,8	7	6,5
4	0,26	2,65	2,65	43,8	45,2	4	4
5	0,24	2,58	2,58	82,8	80,5	8,4	7
6	0,71	2,59	2,6	107,6	102,7	9,6	8,9
7	1,04	2,61	2,62	107,6	74,1	7	6,9
8	1,66	2,65	2,65	117	108,5	9,2	8,3

4.5. Numuneler Üzerinde Mikrodalga Uygulaması

Numunelere mikrodalga uygulaması, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan 2.45 GHz frekans ve 6 kW güce sahip endüstriyel kapalı tip mikrodalga fırın kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.14). Mikrodalga enerjisi, endüstriyel standart etüvde 105-110 °C' de en az 24 saat kurutulup desikatörde soğutulan numuneler ve en az 48 saat süreyle suya doyurulan numuneler üzerinde 6 kW güçte 2, 3, 4, 5 ve 6 dakikalık değişken sürelerle uygulanmıştır.



Şekil 4.14. 2.45 GHz frekans ve 6 kW güce sahip endüstriyel kapalı tip mikrodalga fırın

Kuru ve suya doymuş numunelerin sırasıyla mikrodalga fırına yerleştirilme öncesinde ve sonrasında kızılötesi termometre ile yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür (Şekil 4.15). Heterojenliğine bağlı olarak numunelerin yüzeylerinde farklı sıcaklık değerleri ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, her numunenin farklı yüzeyleri kızılötesi termometreyle tarandıktan sonra cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanan ortalama sıcaklık değeri kaydedilmiştir.



Şekil 4.15. Kızılötesi termometre ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümü

4.6. Mikrodalga Uygulaması Sonrası Mekanik Deneyler

Mikrodalga uygulaması sonrasında numuneler üzerinde, sıcaklıkları yitirilmeden hızlı bir şekilde tek eksenli basınç dayanımı deneyleri (UCS) ve brazilian dolaylı çekme dayanımı deneyleri (BTS) yapılmıştır. Numunelerin ilk sıcaklıkları, mikrodalga sonrası sıcaklıkları, tek eksenli basınç dayanım değerleri ve brazilian dolaylı çekme dayanım değerleri “Ekler” kısmında tablo halinde gösterilmiştir. Deneyler sonrası numunelere ait bir görüntü Şekil 4.16’ da verilmiştir.

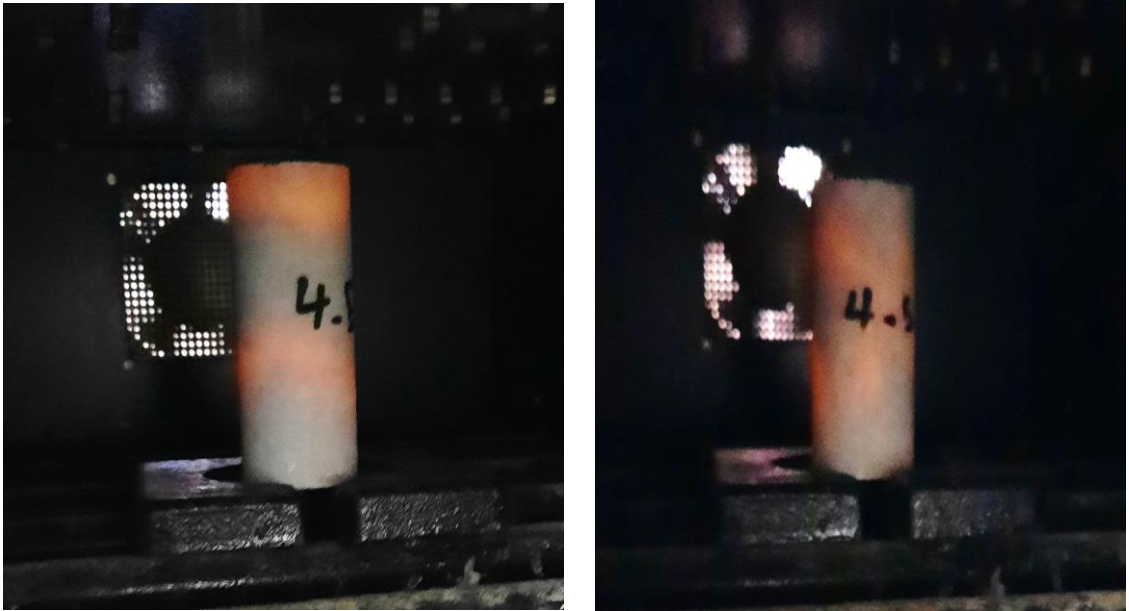


Şekil 4.16. Tez kapsamında deney yapılmış numunelerin bir kısmı.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

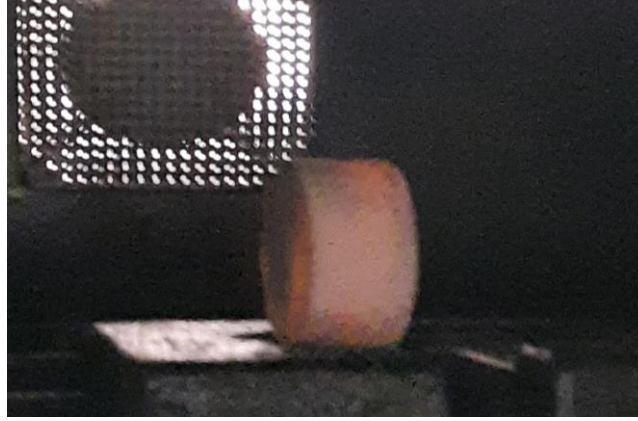
Tez çalışmasının bu safhasında, numuneler üzerinde 2.45 GHz frekans ve 6 kW güce sahip endüstriyel kapalı tip mikrodalga fırında çeşitli sürelerde mikrodalga uygulaması sonrası numunelerin ulaştığı sıcaklıklar ve yapılan deneyler sonucunda dayanımlarında meydana gelen değişiklikler değerlendirilmiştir. 1, 2, 3, 4, 5 ve 8 numaralı numuneler 120, 180, 240, 300 ve 360 saniyelik sürelerde mikrodalga uygulamasına tabi tutulmuşlardır. 6 ve 7 numaralı kayaçlara ait numune sayısının az olmasından dolayı 120, 240 ve 360 saniye boyunca mikrodalga uygulamasına tabi tutulmuşlardır. Her uygulama süresi için en az iki numune üzerinde deney yapılmıştır. Sonuçların çok farklı olması durumunda deney sayısı artırılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır.

Numunelerin heterojenliği ve numuneler içerisinde az miktarda bulunabilen farklı element veya mineraller nedeniyle her kayaca ait numuneler de bile çok farklı sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Hatta bazı numunelerde aşırı ısınmaya bağlı lokal kızarıklıklar görülmüştür. Cevher kalsit kayacına ait UCS numuneleri üzerinde 300 saniye boyunca mikrodalga uygulanması sonrasında oluşan kızarıklar Şekil 5.1' de görülmektedir.



Şekil 5.1. Cevher kalsit (No:4) UCS numuneleri üzerinde mikrodalga sonrası oluşan kızışma.

BTS numuneleri UCS numunelerine göre daha küçük boyutta olduğundan daha homojen bir yapı söz konusudur. Ancak, Şekil 5.2’de görüldüğü üzere BTS numunelerinde de kızarmalar görülmüştür.



Şekil 5.2. Cevher kalsit (No:4) BTS numunesi mikrodalga sonrası kızışma görünümü.

5.1. Mikrodalga Uygulamasının Numuneler Üzerinde Sıcaklık Etkisi

Niğtaş-1 kalsit kayaç türü için ölçülen ilk sıcaklık ve 6 kW gücünde farklı sürelerde mikrodalga uygulaması sonrası ölçülen son sıcaklık değerleri ortalamaları alınarak Çizelge 5.1’ de, grafik olarak Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Niğtaş-1 kalsit numunesi yüzey sıcaklıkları.

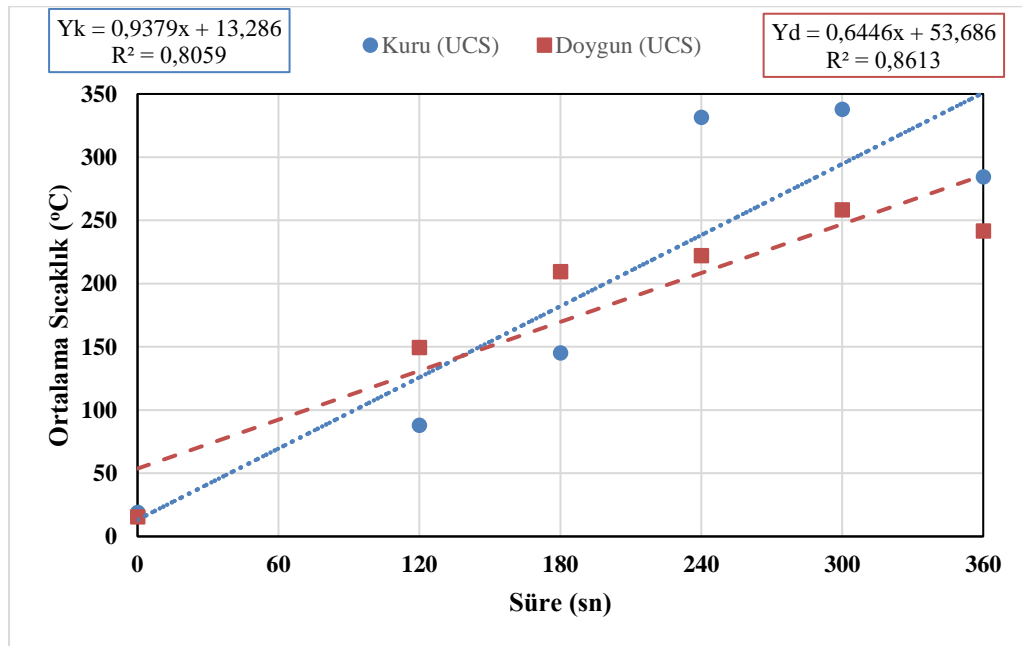
Mikrodalga uygulama süresi	Ortalama Yüzey Sıcaklığı (°C)			
	Kuru (UCS numunesi)	Doymun (UCS numunesi)	Kuru (BTS numunesi)	Doymun (BTS numunesi)
0 sn	19	15	18	16
120 sn	88	149	79	92
180 sn	145	209	150	184
240 sn	331	222	155	147
300 sn	338	258	266	176
360 sn	284	242	198	213

Çizelge 5.1’ de görüldüğü üzere numunelerde sıcaklık artışının mikrodalga uygulama süresi ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Kuru UCS numunesine 300 saniye (5 dakika) mikrodalga uygulaması sonucunda ölçülen ortalama en yüksek yüzey sıcaklığının 338 santigrat dereceye (°C) ulaşması, ancak 360 saniyede (6 dakika) 284

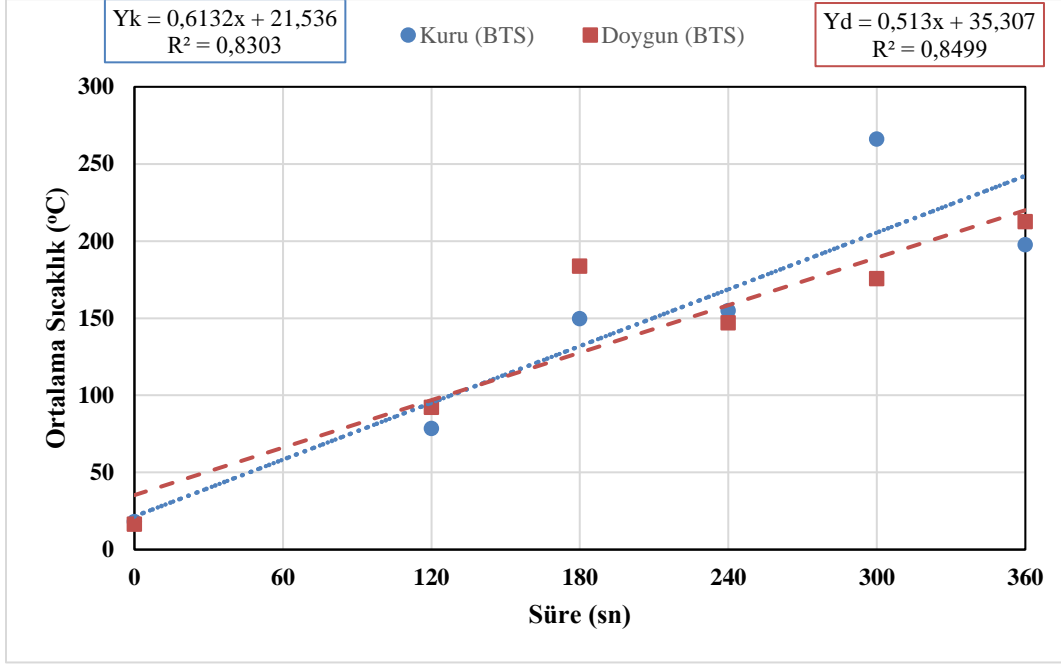
°C' ye düşmesi gibi sonuçların numunelerin heterojen yapıda olması ve mikrodalga ile ısıtmanın homojen olmamasından kaynaklandığı düşünölmektedir.

Walkiewicz vd., (1988) tarafından daha önce yapılan çalışmada Çizelge 2.1' de gösterilen verilerde; mermer kayaç türü üzerinde 1 kW gücünde mikrodalga sistemiyle gerçekleştirilmiş 4,25 dakika mikrodalga uygulanması sonucunda yüzey sıcaklığının 74 °C olarak ölçüldüğü görölmektedir. Bu tez çalışması kapsamında Niğtaş-1 kayaç numunelerinde 6 kW gücündeki mikrodalga sistemiyle 4 dakika mikrodalga uygulaması sonrası numune yüzeyi ortalama 331 °C' ye, 5 dakika sonrası ortalama 338 °C' ye ulaştığı ölçölmüştür. Bu karşılaştırma sonucunda, yüzey sıcaklıklarında ölçölen değerlerin, kullanılan mikrodalga sisteminin gücü ile doğru orantılı olduğu anlaşılmaktadır.

Kuru ve doymun UCS ve BTS numunelerinin yüzey sıcaklıklarının mikrodalga uygulama süresine göre değışimleri sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4' te gösterilmiştir. Mikrodalga uygulama süresi arttıkça yüzey sıcaklığının arttığı görölmektedir. Teorik olarak doymun durumdaki sıcaklıkların kuru durumdaki sıcaklıklara göre daha yüksek olması beklenir. Elde edilen sonuçların teoriyle uyumlu olmamasının nedeninin numunelerin homojen olmaması ve mikrodalga ile ısıtmanın heterojen olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.



Şekil 5.3. Niğtaş-1 Kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.



Şekil 5.4. Niğtaş-1 Kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.

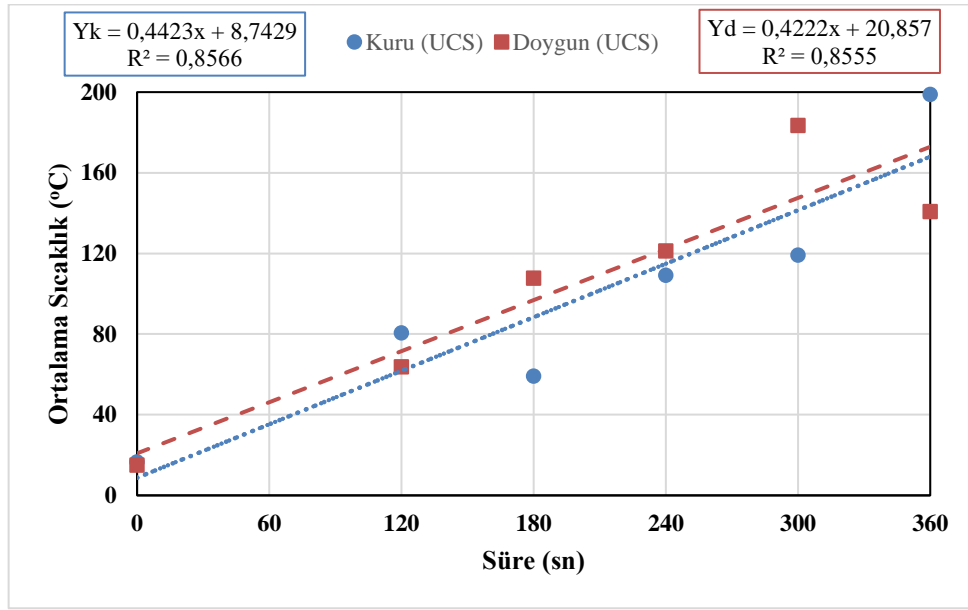
Niğtaş-2 kalsit kayaç türü için ölçülen ilk sıcaklık ve 6 kW gücünde farklı sürelerde mikrodalga uygulaması sonrası ölçülen son sıcaklık değerleri ortalamaları alınarak Çizelge 5.2' de, grafik halinde Şekil 5.5 ve Şekil 5.6' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Niğtaş-2 kalsit numunesi yüzey sıcaklıkları.

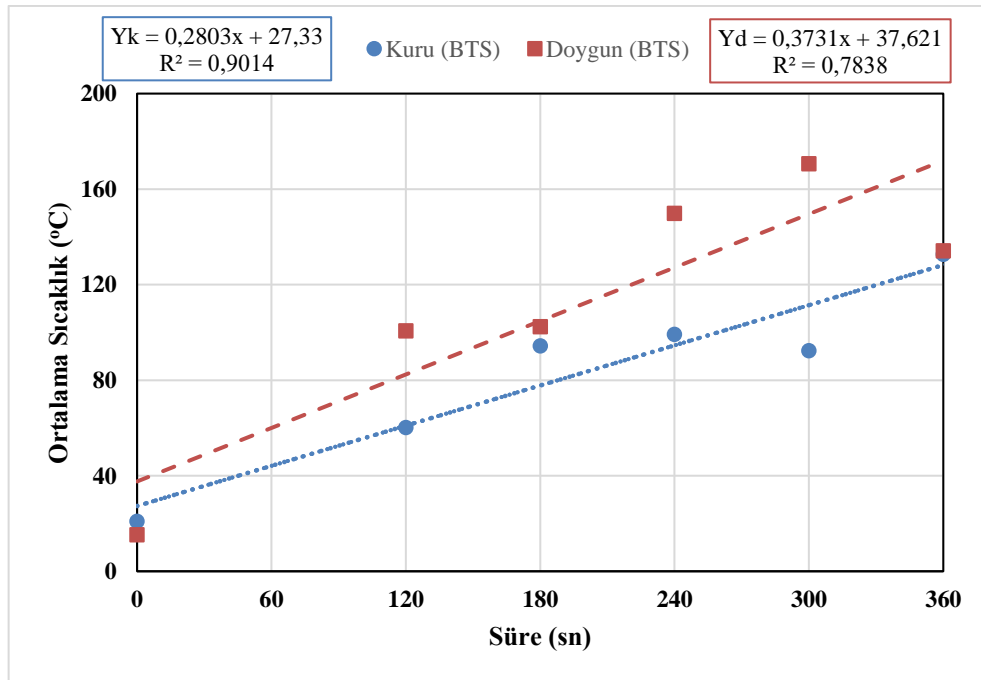
Mikrodalga uygulama süresi	Ortalama Yüzey Sıcaklığı (°C)			
	Kuru (UCS numunesi)	Doymun (UCS numunesi)	Kuru (BTS numunesi)	Doymun (BTS numunesi)
0 sn	17	15	21	15
120 sn	81	64	60	101
180 sn	59	108	95	103
240 sn	109	121	99	150
300 sn	119	183	92	171
360 sn	199	141	133	134

Çizelge 5.2' de verilen değerlerde 6 kW gücünde mikrodalga uygulaması sonucu Niğtaş-2 kalsit kayaç türünde ulaşılan en yüksek ortalama sıcaklığın kuru (UCS) numunesinde 360 saniye mikrodalga uygulanması sonrası 199 °C olduğu doymun (UCS) numunesinde ise en yüksek ortalama sıcaklığın 300 saniye mikrodalga uygulanması sonrasında 183 °C olduğu görülmektedir. Kuru (BTS) numunesinde en yüksek ortalama

sıcaklık 360 saniye mikrodalga uygulama sonrasında 133 °C olarak ölçülmüştür, 180, 240 ve 300 saniye mikrodalga uygulamalarında ölçülen ortalama numune sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Doygun (BTS) numunesinde ise en yüksek ortalama yüzey sıcaklığı 300 saniye mikrodalga uygulaması sonrasında 171 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.5. Niğtaş-2 kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.



Şekil 5.6. Niğtaş-2 kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.

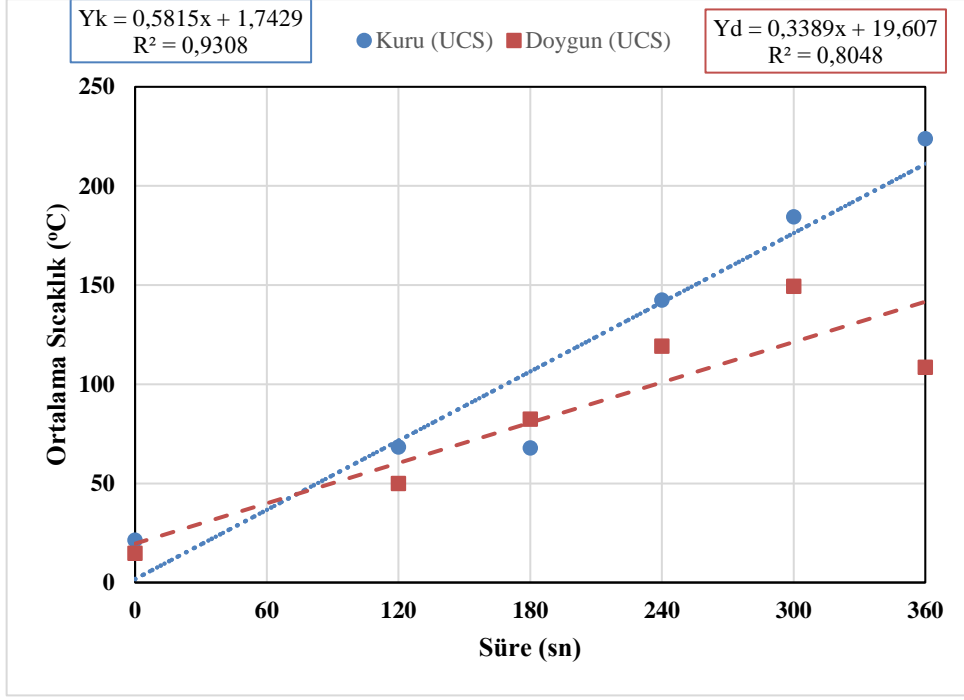
Şekil 5.5’ de bulunan UCS kuru ve doymun numunelerinin farklı sürelerde mikrodalga uygulaması sonrası ölçülen ortalama yüzey sıcaklık grafiği, şekil 5.6’ da ise BTS kuru ve doymun numunelerinin farklı sürelerde mikrodalga uygulama sonrası ölçülen ortalama yüzey sıcaklık grafiği bulunmaktadır. Grafiklerde ölçülen sıcaklık verilerinin doğrusal eğilim çizgileri incelendiğinde, sıcaklık artışının mikrodalga uygulama süresine bağlı doğru orantılı olarak arttığı anlaşılmaktadır. Niğtaş-2 kalsit kayacı ile Niğtaş-1 kalsit kayaç verilerinin birlikte değerlendirilmesi halinde ise Niğtaş-2 kayacının mikrodalgadan daha az etkilendiği, daha az ısındığı gözlemlenmiştir.

Nidaş kalsit kayaç numunelerinde mikrodalga uygulanma süresine göre ölçülen ortalama numune yüzey sıcaklıkları Çizelge 5.3’ de ve grafik şeklinde Şekil 5.7 ile Şekil 5.8’ de gösterilmiştir.

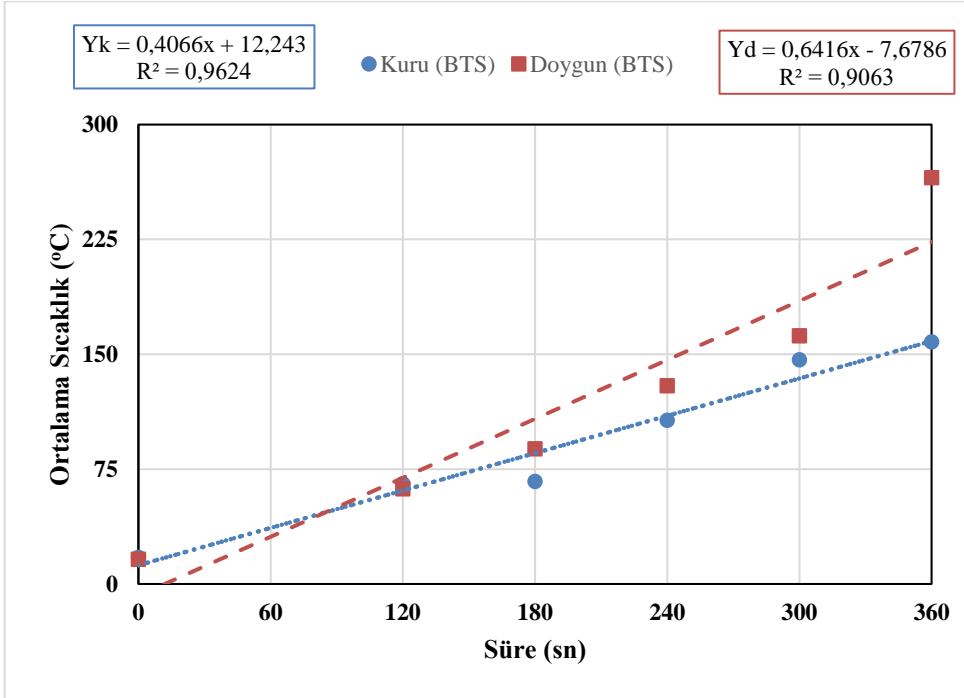
Çizelge 5.3. Nidaş kalsit numunesi yüzey sıcaklıkları.

Mikrodalga uygulama süresi	Ortalama Yüzey Sıcaklığı (°C)			
	Kuru (UCS numunesi)	Doymun (UCS numunesi)	Kuru (BTS numunesi)	Doymun (BTS numunesi)
0 sn	21	15	17	16
120 sn	68	50	66	62
180 sn	68	82	67	88
240 sn	142	119	107	130
300 sn	184	149	146	162
360 sn	224	109	158	266

Çizelge 5.3’ de Nidaş kalsit kayaç kuru (UCS) numunelerinde 360 saniye mikrodalga uygulama sonrası ortalama sıcaklığın 224 °C olduğu, doymun (BTS) numunelerinde ise ölçülen ortalama sıcaklığın en yüksek 360 saniyede 266 °C olduğu görülmektedir.



Şekil 5.7. Nidaş kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.



Şekil 5.8. Nidaş kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8' de bulunan grafikler incelendiğinde sıcaklık artışının süreye bağlı arttığı, UCS numunelerinde kuru numunelerin sıcaklıklarının daha fazla olduğu, BTS numunelerinde doymun numunelerde sıcaklık artışının daha fazla olduğu görülmektedir.

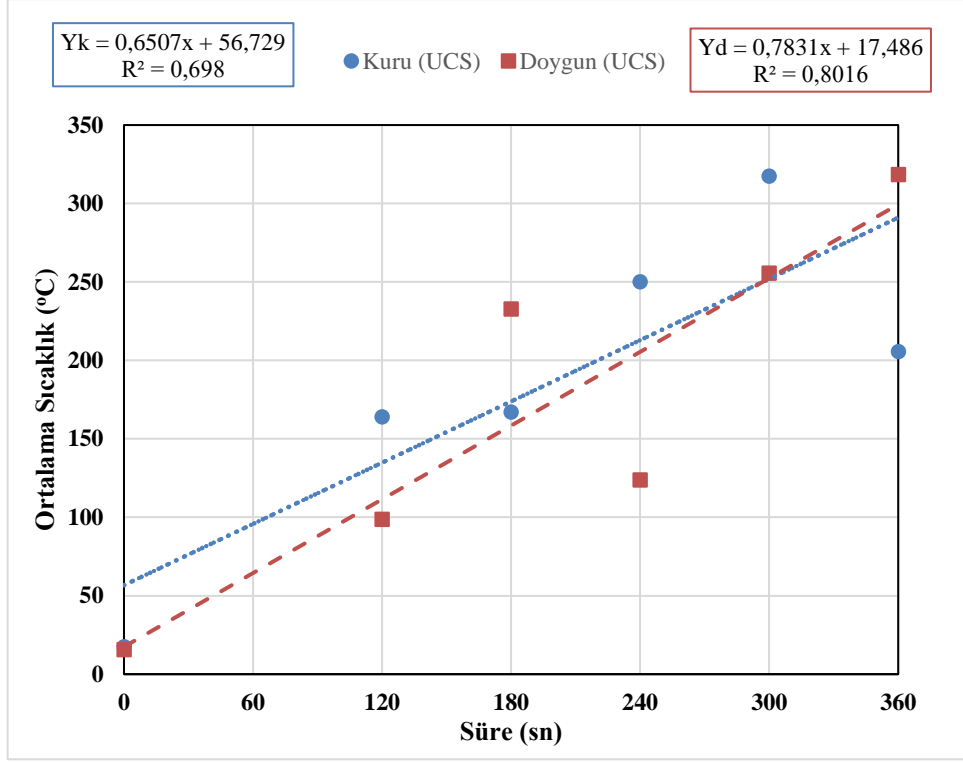
Cevher kalsit kayaç numunelerinde mikrodalga uygulanma süresine göre ölçülen ortalama numune yüzey sıcaklıkları Çizelge 5.4’ de ve grafik şeklinde Şekil 5.9 ile Şekil 5.10’ da gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Cevher kalsit numunesi yüzey sıcaklıkları.

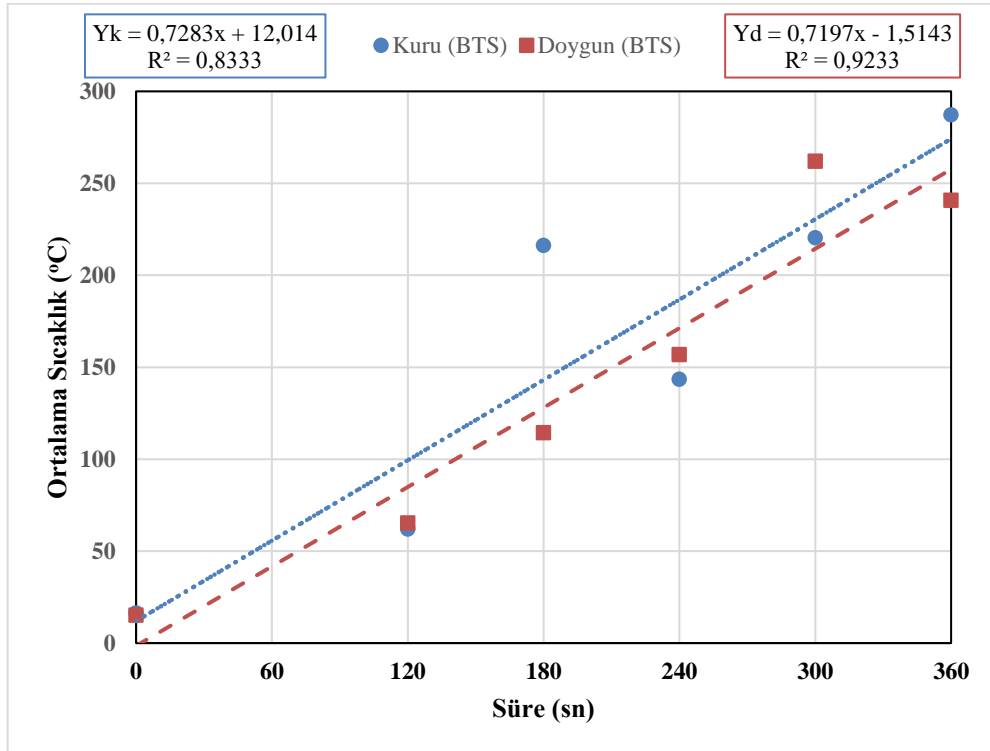
Mikrodalga uygulama süresi	Ortalama Yüzey Sıcaklığı (°C)			
	Kuru (UCS numunesi)	Doygun (UCS numunesi)	Kuru (BTS numunesi)	Doygun (BTS numunesi)
0 sn	18	16	17	15
120 sn	164	99	62	65
180 sn	167	233	216	114
240 sn	250	124	144	157
300 sn	317	256	221	262
360 sn	206	318	287	241

Çizelge 5.4’ de bulunan verilerde ölçümler; kuru UCS numunelerinde 180 saniye ve 360 saniye sürelerinde, doymun UCS numunelerinde 300 saniye ve 360 saniye sürelerinde, kuru BTS numunelerinde 180 saniye, 300 saniye ve 360 saniye sürelerinde, doymun BTS numunelerinde 120 saniye, 180 saniye ve 300 saniye sürelerinde üçer numune üzerinden ortalama alınmıştır. Diğer ölçümler ikişer numune üzerinden ortalama ile hesaplanmıştır.

Kuru UCS numuneleri üzerinde en yüksek ortalama sıcaklık 300 saniye süresinde 317 °C, doymun UCS numunelerinde ise 360 saniye süresinde 318 °C olarak ölçülmüştür. Kuru BTS numunelerinde en yüksek ortalama 360 saniye süresinde 287 °C, doymun BTS numunelerinde ise 300 saniye süresinde 262 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.9. Cevher kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.



Şekil 5.10. Cevher kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.

Şekil 5.9’ da bulunan UCS numuneleri grafiği incelendiğinde; kuru UCS numunelerinde süreye bağlı doğru orantılı sıcaklık artışı olduğu görülmekte olup, 360 saniye süresinde yapılan ölçümlerde düşüş olmasının çizilen doğrusal eğilim çizgisini etkilediği görülmektedir. Doygun UCS de ise 180 saniye ve 240 saniye sürelerinde doğrusal eğilim çizgisini dengeleyen farklılıklar olduğu görülmektedir. Şekil 5.10’ da bulunan BTS numuneleri grafiği incelendiğinde ise; kuru BTS ve doymun BTS numuneleri ölçülen sıcaklıklarına çizilen doğrusal eğilim çizgilerinin paralellik gösterdiği görülmektedir.

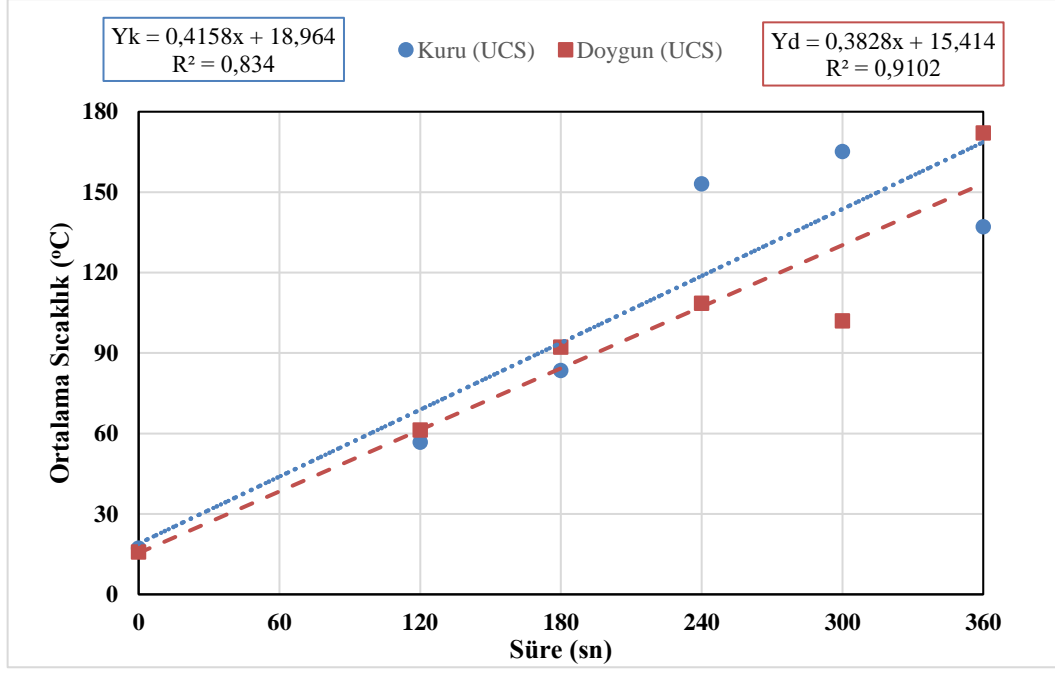
Marmara mermer kayaç numunelerinde mikrodalga uygulanma süresine göre ölçülen ortalama numune yüzey sıcaklıkları Çizelge 5.5’ de ve grafik şeklinde Şekil 5.11 ile Şekil 5.12’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. Marmara mermer numunesi yüzey sıcaklıkları.

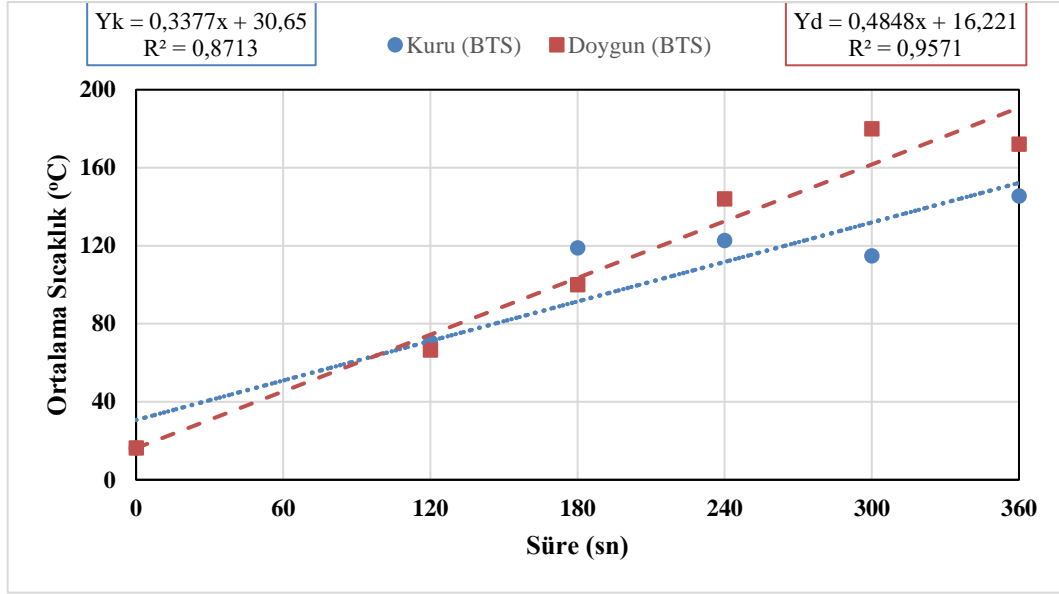
Mikrodalga uygulama süresi	Ortalama Yüzey Sıcaklığı (°C)			
	Kuru (UCS numunesi)	Doygun (UCS numunesi)	Kuru (BTS numunesi)	Doygun (BTS numunesi)
0 sn	17	16	16	16
120 sn	57	61	71	67
180 sn	84	92	119	100
240 sn	153	109	123	144
300 sn	165	102	115	180
360 sn	137	172	146	172

Çizelge 5.5’ de Marmara mermeri numuneleri verilerinde; kuru ve doymun UCS numunelerinin 120 ve 180 saniye sürelerinde, kuru BTS numunelerinin 240 ve 300 saniye sürelerinde, doymun BTS numunelerinde 300 ve 360 saniye sürelerinde üçer numune üzerinden ortalamalar alınmış olup, diğer veriler ikişer numune üzerinden ölçülmüştür.

Çizelge 5.5’ de bulunan veriler incelendiğinde; kuru UCS numunelerinde en yüksek ortalama sıcaklık değeri 300 saniye sonrasında 165 °C, doymun UCS numunelerinde 360 saniye sonrasında 172 °C, kuru BTS numunelerinde 360 saniye sonrasında 146 °C ve doymun UCS numunelerinde 300 saniye sonrasında 180 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.11. Marmara mermer UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.



Şekil 5.12. Marmara mermer BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.

Marmara mermer kayaç numunelerinin ölçülen ortalama sıcaklıklarına çizilen doğrusal eğim çizgilerinin mikrodalga uygulama süresi ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmektedir.

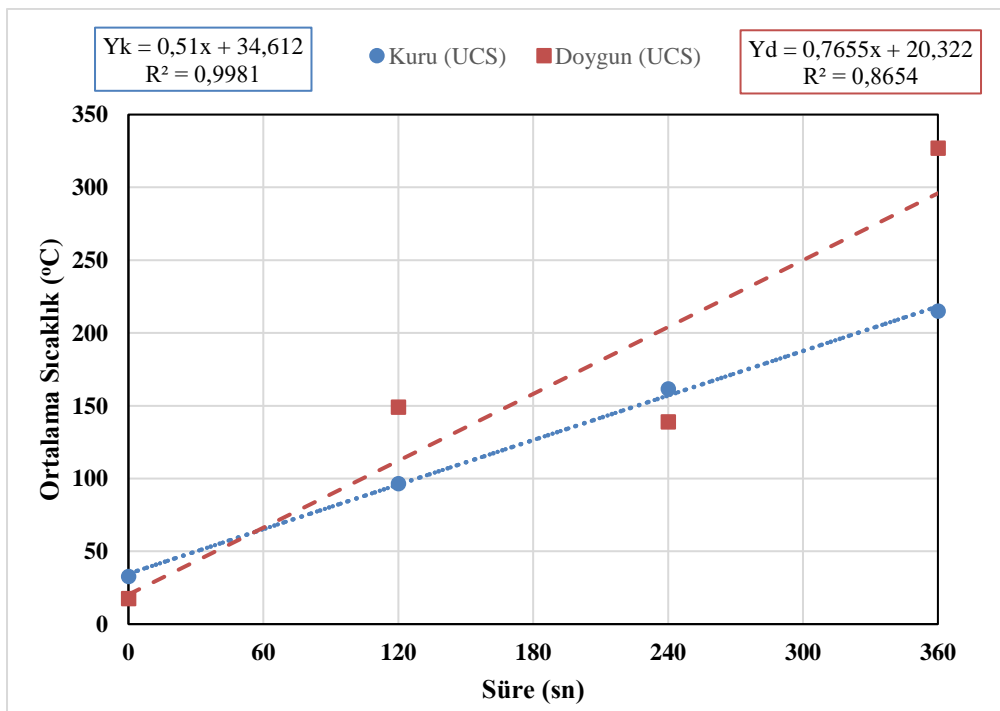
Yeşilova kireçtaşı kayaç numunelerinde mikrodalga uygulanma süresine göre ölçülen ortalama numune yüzey sıcaklıkları Çizelge 5.6' da ve grafik şeklinde Şekil 5.13 ile Şekil 5.14' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Yeşilova kireçtaşı numunesi yüzey sıcaklıkları.

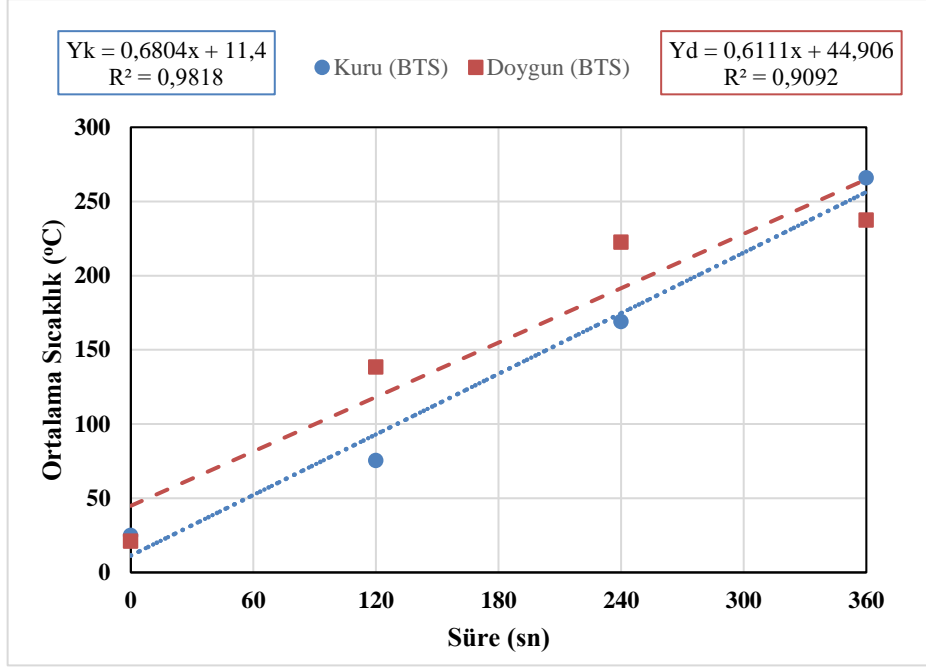
Mikrodalga uygulama süresi	Ortalama Yüzey Sıcaklığı (°C)			
	Kuru (UCS numunesi)	Doymun (UCS numunesi)	Kuru (BTS numunesi)	Doymun (BTS numunesi)
0 sn	33	17	25	21
120 sn	97	149	76	139
240 sn	162	139	169	223
360 sn	215	327	266	238

Çizelge 5.6' da bulunan verilerde; Yeşilova kireçtaşı kayacında numune sayısı sebebiyle 120, 240 ve 360 saniyelik sürelerde mikrodalga uygulaması uygulanmıştır. Ölçülen en yüksek ortalama sıcaklık değeri doymun UCS numunelerinde gerçekleşmiş olup, 360 saniye sonrasında 327 °C ortalama sıcaklık değeri ölçülmüştür.

Şekil 5.13' de Yeşilova-1 kayacı numunelerinde suya doymun UCS numunelerinin, kuru UCS numunelerine oranla daha çok ısındığı görülmektedir. Şekil 5.14' de doğrusal eğilim çizgilerinin incelenmesinde doymun numunelerin doğrusal eğilim çizgileri incelenmesi sonucunda kuru numunelere oranla daha çok ısındığı görülmektedir.



Şekil 5.13. Yeşilova kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.



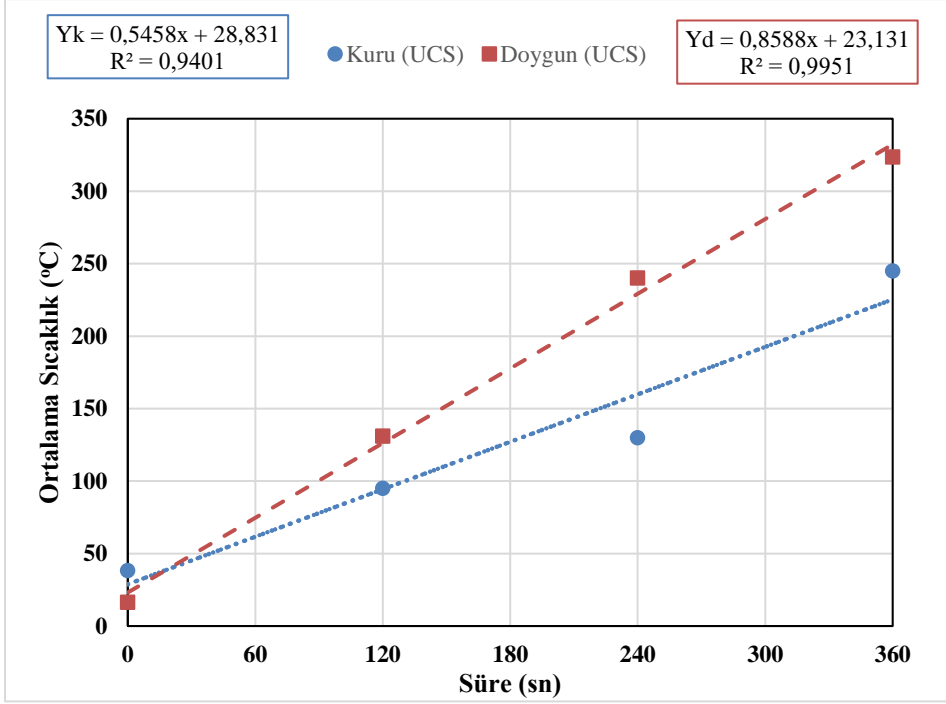
Şekil 5.14. Yeşilova kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.

Karamanlı kireçtaşı kayaç numunelerinde mikrodalga uygulanma süresine göre ölçülen numune yüzey sıcaklıkları Çizelge 5.7' de ve grafik şeklinde Şekil 5.15 ile Şekil 5.16' da gösterilmiştir.

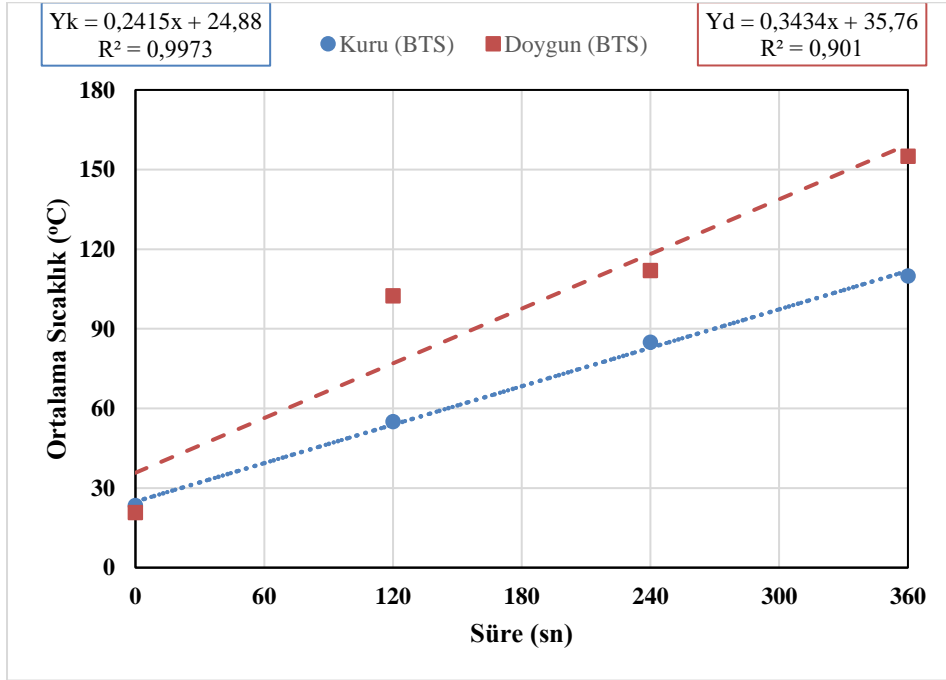
Çizelge 5.7. Karamanlı kireçtaşı numunesi yüzey sıcaklıkları.

Mikrodalga uygulama süresi	Ortalama Yüzey Sıcaklığı (°C)			
	Kuru (UCS numunesi)	Doymun (UCS numunesi)	Kuru (BTS numunesi)	Doymun (BTS numunesi)
0 sn	38	16	23	21
120 sn	95	131	55	103
240 sn	130	240	85	112
360 sn	245	324	110	155

Çizelge 5.7' de bulunan verilerde; Karamanlı kireçtaşı kayacında numune sayısı sebebiyle UCS deneyinde 120, 240 ve 360 saniyelik sürelerde birer numune üzerinden, BTS deneyinde ise 120 ve 240 saniyede ikişer, 360 saniyelik sürelerde birer numune üzerinden mikrodalga uygulaması uygulanmıştır. Yeşilova-2 kayacı numunelerinin ölçülen ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde; doymun UCS numunelerinde ölçülen en yüksek sıcaklığın 360 saniyelik sürede 324 °C olduğu görülmektedir.



Şekil 5.15. Karamanlı kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.



Şekil 5.16. Karamanlı kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.

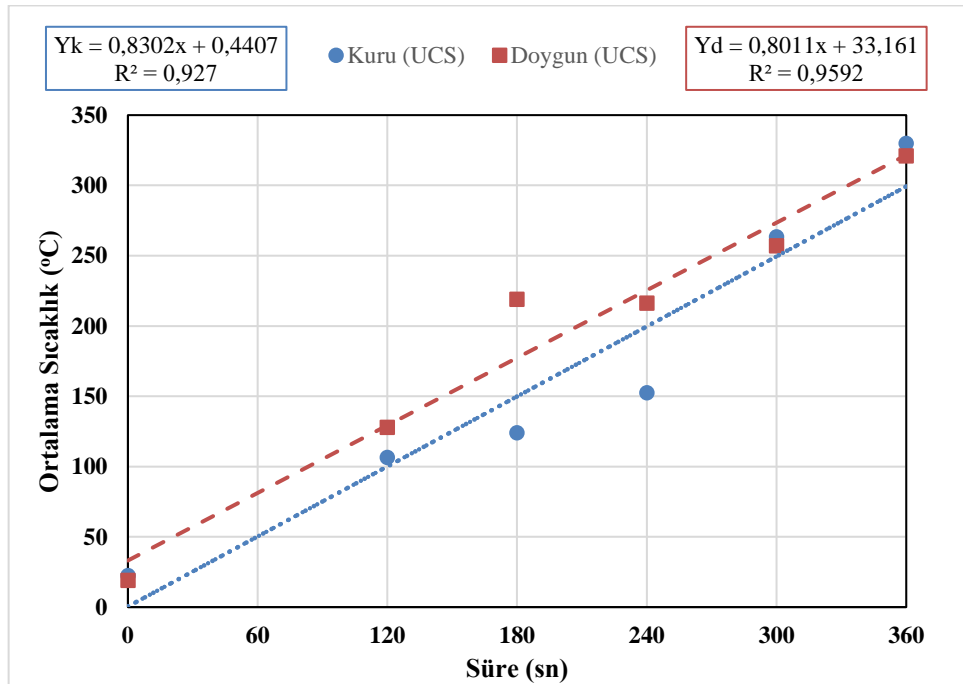
Şekil 5.15 ve şekil 5.16' da bulunan grafiklerde; suya doymuş numunelerin sıcaklık verilerine çizilen doğrusal eğilim çizgilerinin incelenmesi sonucunda mikrodalga uygulamasının sıcaklıklarını arttırmada daha etkili olduğu görülmektedir.

Amasya kireçtaşı kayaç numunelerinde mikrodalga uygulanma süresine göre ölçülen ortalama numune yüzey sıcaklıkları Çizelge 5.8’ de ve grafik şeklinde Şekil 5.17 ile Şekil 5.18’ de gösterilmiştir.

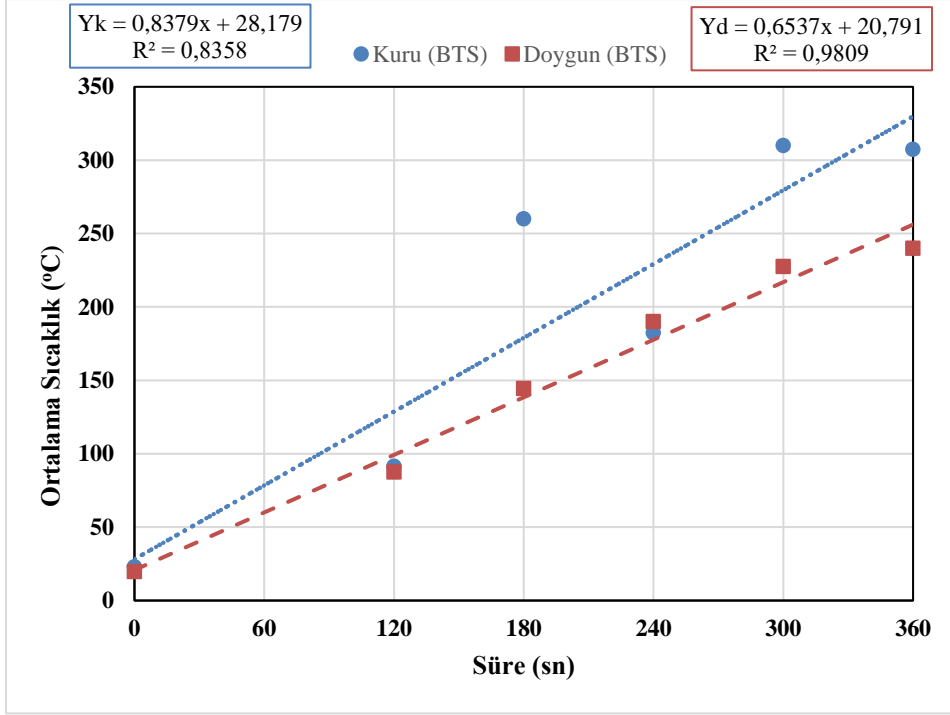
Çizelge 5.8. Amasya kireçtaşı numunesi yüzey sıcaklıkları.

Mikrodalga uygulama süresi	Ortalama Yüzey Sıcaklığı (°C)			
	Kuru (UCS numunesi)	Doygun (UCS numunesi)	Kuru (BTS numunesi)	Doygun (BTS numunesi)
0 sn	23	19	23	20
120 sn	107	128	92	88
180 sn	124	219	260	145
240 sn	153	216	183	190
300 sn	263	257	310	228
360 sn	330	321	308	240

Çizelge 5.8’ de verilen değerlerde; Amasya kireçtaşı numunelerinin mikrodalga uygulaması, kuru UCS kısmında 300 saniye sürede 3 numune üzerinden, doymun UCS kısmında 240 saniye sürede 4 numune üzerinden, 300 ve 360 saniye sürede 3’er numune üzerinden ve doymun BTS kısmında 240 saniye sürede 3 numune üzerinden ölçümler yapılmış olup, fazla ölçüm yapılması numunelerin mikrodalga uygulaması sonrası şekil bütünlüklerini kaybetmelerinden kaynaklanmaktadır. Diğer ölçümler 2’şer numune üzerinden yapılmıştır.



Şekil 5.17. Amasya kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.



Şekil 5.18. Amasya kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve sıcaklık ilişkisi.

Şekil 5.17 ve şekil 5.18’ de bulunan grafiklerin incelenmesi sonucunda mikrodalga uygulama süresi ile sıcaklık artışının doğru orantılı olduğu görülmektedir.

5.2. Mikrodalga Uygulamasının Numunelerin Dayanımlarına Etkisi

Numuneler üzerinde mikrodalga uygulama öncesinde ve belirli sürelerde mikrodalga uygulaması sonrasında tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve brazilian dolaylı çekme dayanım (BTS) deneyleri uygulanması ile hesaplanan ortalama dayanım değerleri bu kısım içerisinde kayalara göre, aşağıda bulunan tablolar ve grafiklerde verilmiştir. Genel tablolar “Ekler” kısmında bulunmaktadır.

Niğtaş-1 kalsit numunesi için, mikrodalga uygulaması öncesi bulunan ortalama dayanımı ve mikrodalga uygulama sürelerine göre bulunan ortalama dayanım değerleri aşağıda bulunan Çizelge 5.9’ da ve mikrodalga uygulama süresiyle dayanım değişim ilişkileri Şekil 5.19 ile Şekil 5.20’ de gösterilmiştir.

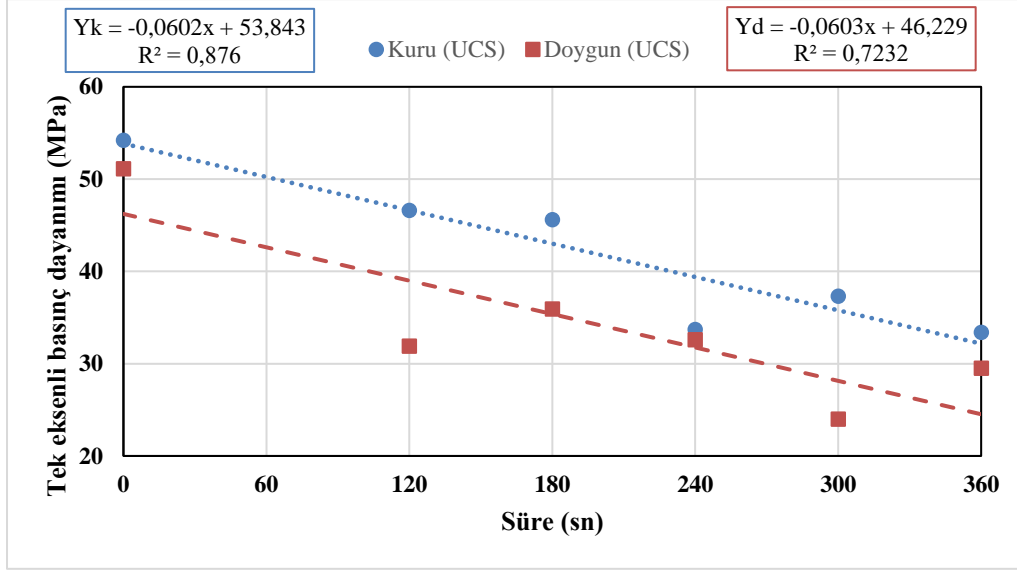
Çizelge 5.9. Niğtaş-1 kalsit mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.

Niğtaş-1 Kalsit	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)			
	Kuru (UCS)	Doygun (UCS)	Kuru (BTS)	Doygun (BTS)
0	54,2	51,1	5,0	4,3
120	46,6	31,9	4,2	3,1
180	45,6	35,9	3,2	3,0
240	33,7	32,6	2,5	2,3
300	37,3	24,0	2,4	2,5
360	33,4	29,5	2,6	2,2

Mikrodalga uygulamadan ölçülen ortalama değerler, kuru UCS ve doymun UCS numunelerinde ölçülen değerlerin birbirinden farklılaşması nedeniyle 8' er numune üzerinde ölçüm yapılarak elde edilmiştir. Ölçülen değerlerin farklılaşması kayaçların heterojen yapıda olmalarından dolayı olduğu düşünülmektedir.

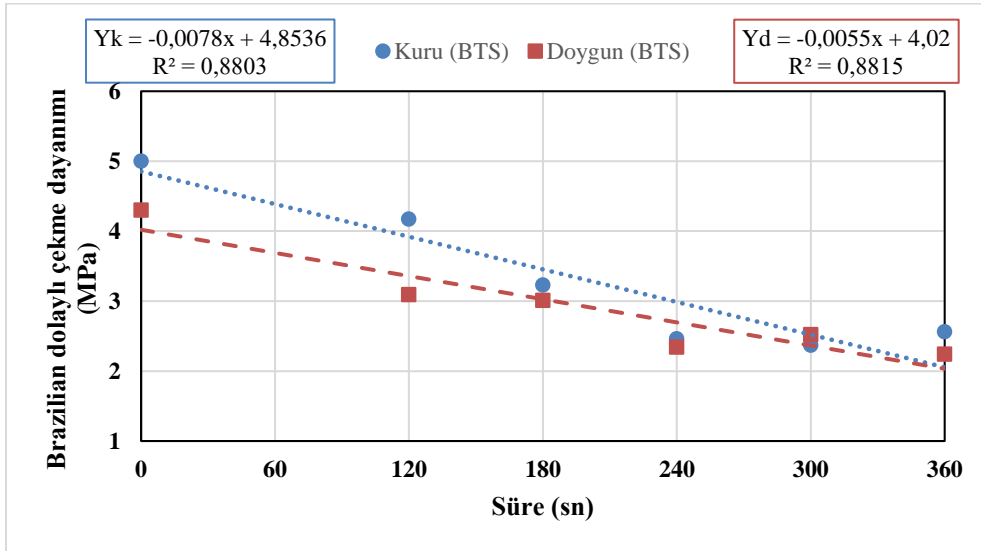
Kuru BTS ve doymun BTS numunelerinde ise mikrodalga uygulaması öncesi ölçülen ortalama değerler 5 numune üzerinden elde edilmiştir. Mikrodalga uygulama aşamasında kuru UCS deneylerinde 120 saniye sürede, kuru BTS deneylerinde 120, 240 ve 360 saniye sürelerinde, doymun BTS deneylerinde 180, 240 ve 360 saniye sürelerinde 3 numune üzerinden ölçümler yapılmış ve ortalama veriler elde edilmiştir, kalan diğer deneylerde 2 numune üzerinden ölçümler yapılmış ve ortalama veriler elde edilmiştir.

Niğtaş-1 kalsit numunelerinde Çizelge 5.9'da görüldüğü üzere, kuru UCS deneyinde dayanım değeri mikrodalga öncesi ölçülen 54,2 MPa'dan 360 saniye mikrodalga uygulama sonrası 33,4 MPa değerinde ölçülmüştür. Şekil 5.19' da bulunan grafikteki doğrusal eğilim çizgisi üzerinden 0 ile 360 saniye sürelerde yapılan hesaplamada dayanım değerinin %40,25 oranında azaldığı hesaplanmıştır. Doymun UCS deneyinde ise mikrodalga öncesi 51,1 MPa, 360 saniye mikrodalga uygulaması sonra 29,5 MPa olarak ölçülmüştür. Doğrusal eğilim çizgisi üzerinden 0 ile 360 saniye süreler arasında dayanım değerinin %46,96 oranında azaldığı hesaplanmaktadır.



Şekil 5.19. Niğtaş-1 kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Niğtaş-1 kalsit numunelerinde Çizelge 5.9' da görüldüğü üzere, kuru BTS deneylerinde dayanım değeri mikrodalga öncesi hesaplanan 5,0 MPa'dan 360 saniye mikrodalga uygulaması sonrası 2,6 MPa olarak hesaplanmıştır. Doygun BTS deneylerinde ise mikrodalga öncesi 4,3 MPa'dan 360 saniye mikrodalga uygulaması sonrasında 2,2 MPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.20'de bulunan grafikten doğrusal eğilim çizgisi baz alınarak yapılan hesaplama sonucunda; kuru BTS deneyi sonucunda 0-360 saniye sonrasında dayanım değerinin %57,85 oranında azaldığı, doymun BTS deneyi sonucunda 0-360 saniye sonrasında dayanım değerinin %49,25 oranında azaldığı hesaplanmıştır.



Şekil 5.20. Niğtaş-1 kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

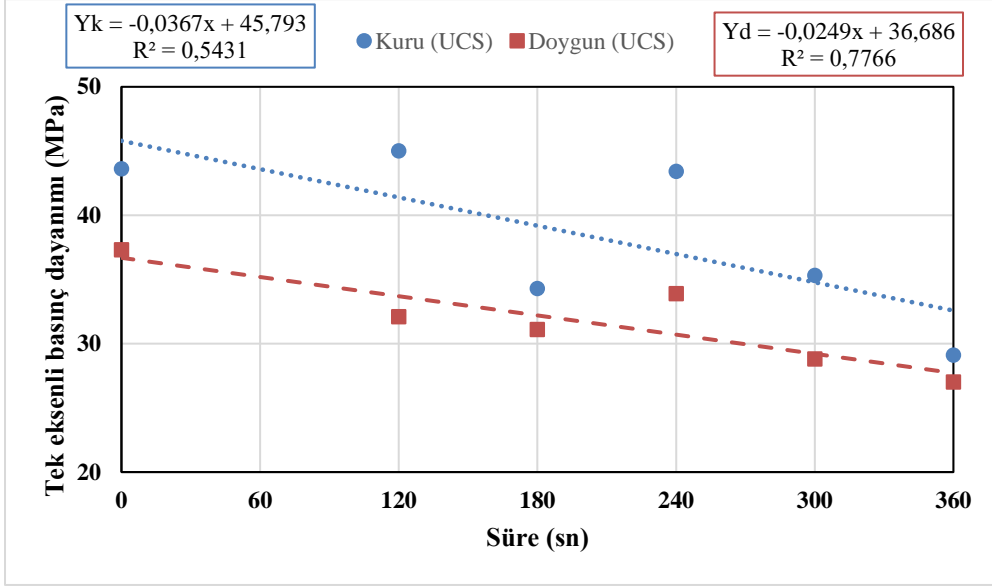
Niğtaş-2 kalsit numunesi için, mikrodalga uygulaması öncesi bulunan ortalama dayanımı ve mikrodalga uygulama sürelerine göre bulunan ortalama dayanım değerleri aşağıda bulunan Çizelge 5.10' da ve mikrodalga uygulama süresiyle dayanım değişim ilişkileri Şekil 5.21 ile Şekil 5.22' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.10. Niğtaş-2 kalsit mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.

Niğtaş-2 Kalsit	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)			
	Süre (sn)	Kuru (UCS)	Doygun (UCS)	Kuru (BTS)
0	43,6	37,3	3,8	3,7
120	45,0	32,1	3,8	2,9
180	34,3	31,1	2,7	2,4
240	43,4	33,9	2,6	2,5
300	35,3	28,8	2,5	2,3
360	29,1	27,0	2,4	2,2

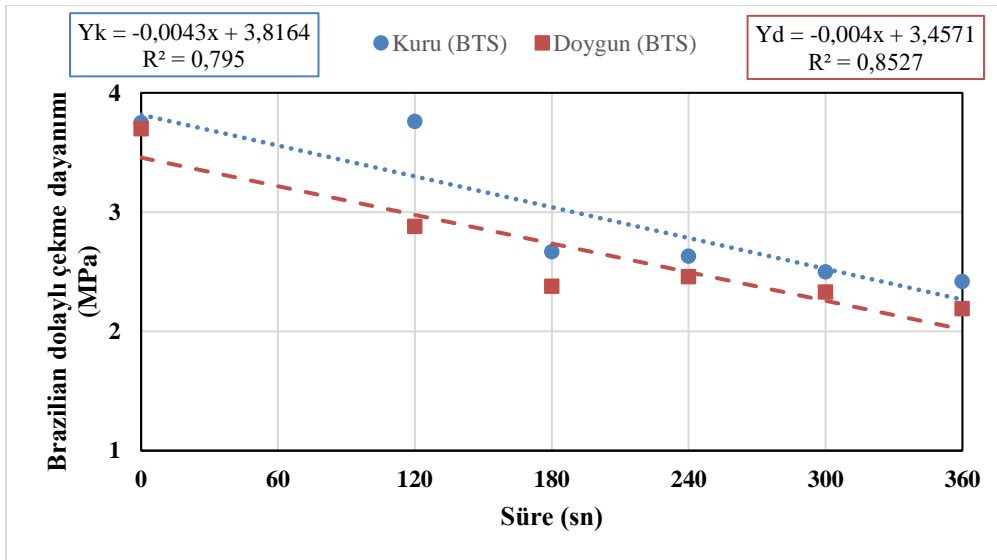
Çizelge 5.10'da Niğtaş-2 kalsit kayaç numunelerinin mikrodalga uygulama öncesi ve sonrasında, mikrodalga uygulama süresine göre dayanımlarında meydana gelen ortalama değişim değerleri verilmiştir. Mikrodalga uygulaması öncesi (0) ölçülen ortalama değerler kuru UCS 7 numune ortalaması ve doymun UCS 6 numune üzerinden ölçülmüştür, BTS numuneleri 5 numune üzerinden ölçülmüştür. Mikrodalga uygulaması sırasında ölçülen değerler UCS (kuru-doygun) kısmında her sürede 2 numune üzerinden ölçülmüştür. Kuru BTS kısmında 300 saniye sürede 2 numune, diğer sürelerde 3 numune üzerinden ölçülmüştür, doymun BTS kısmında ise 120 ve 180 saniye sürelerde 3 numune, diğer sürelerde 2 numune üzerinden ölçülmüştür.

Niğtaş-2 kalsit numunelerinde Çizelge 5.10'da görüldüğü gibi, kuru UCS deneyinde mikrodalga uygulamasından önce 43,6 MPa olarak ortalama ölçülen değer, 360 saniye süresinde mikrodalga uygulaması sonrası 29,1 MPa olarak ölçülmüştür. Doymun UCS kısmında ise 37,3 MPa olarak ölçülen ortalama değer, 360 saniye mikrodalga uygulaması sonrası 27,0 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.21' de bulunan grafik üzerinde çizilen doğrusal eğilim çizgilerinden 0-360 süreleri arasındaki dayanımında meydana gelen azalma; kuru UCS için %28,85 ve doymun UCS için %24,43 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.21. Niğtaş-2 kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Niğtaş-2 kalsit numunelerinde Çizelge 5.10'da bulunan değerlerde olduğu üzere, kuru BTS deneyinde mikrodalga uygulamasından önce 3,8 MPa olarak ortalama ölçülen değer, 360 saniye süresinde mikrodalga uygulaması sonrası 2,4 MPa olarak ölçülmüştür. Doymun BTS kısmında ise 3,7 MPa olarak ölçülen ortalama değer, 360 saniye mikrodalga uygulaması sonrası 2,2 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.22' de bulunan grafik üzerinde çizilen doğrusal eğilim çizgilerinden 0-360 süreleri arasındaki dayanımında meydana gelen azalma; kuru BTS için %40,56 ve doymun BTS için %41,65 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.22. Niğtaş-2 kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Nidaş kalsit numunesi için, mikrodalga uygulaması öncesi bulunan ortalama dayanımı ve mikrodalga uygulama sürelerine göre bulunan ortalama dayanım değerleri aşağıda bulunan Çizelge 5.11’ de ve mikrodalga uygulama süresiyle dayanım değişim ilişkileri Şekil 5.23 ile Şekil 5.24’ de gösterilmiştir.

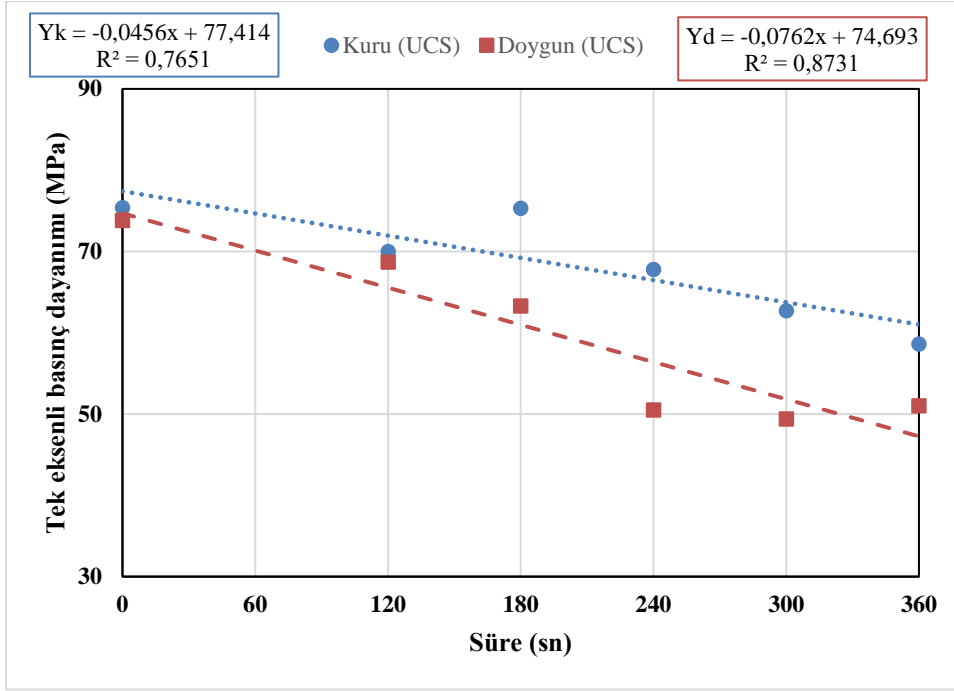
Çizelge 5.11. Nidaş kalsit mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.

Nidaş Kalsit	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)			
	Süre (sn)	Kuru (UCS)	Doygun (UCS)	Kuru (BTS)
0	75,4	73,8	7,0	6,5
120	70,0	68,7	5,8	5,0
180	75,3	63,3	5,6	5,4
240	67,8	50,5	5,3	4,5
300	62,7	49,4	4,6	4,6
360	58,6	51,0	3,7	3,6

Çizelge 5.11’de Nidaş kalsit kayaç numunelerinin mikrodalga uygulama öncesi ve sonrasında, mikrodalga uygulama sürelerine göre dayanımlarında meydana gelen ortalama değişim değerleri bulunmaktadır. Nidaş kalsit numunelerinde mikrodalga uygulaması öncesi (0) ölçülen ortalama değerler; kuru UCS 5 numune ortalaması ve doymun UCS 6 numune ortalaması üzerinden bulunmuştur, kuru ve doymun BTS numuneleri 5 numune ortalaması üzerinden bulunmuştur. Mikrodalga uygulaması sonrasında ölçülen değerler; kuru ve doymun UCS deneylerinde elde edilen değerler 2 numune üzerinden ortalaması alınarak bulunmuştur. Kuru BTS deneylerinde elde edilen veriler 120, 180 ve 360 saniyelik sürelerde 3 numune üzerinden, 240 ve 300 saniyelik sürelerde 2 numune üzerinden ortalaması alınarak bulunmuştur. Doymun UCS deneylerinde 120, 180 ve 300 saniyelik sürelerde 3 numune üzerinden, 240 ve 360 saniyelik sürelerde 2 numune üzerinden ortalaması alınarak bulunmuştur.

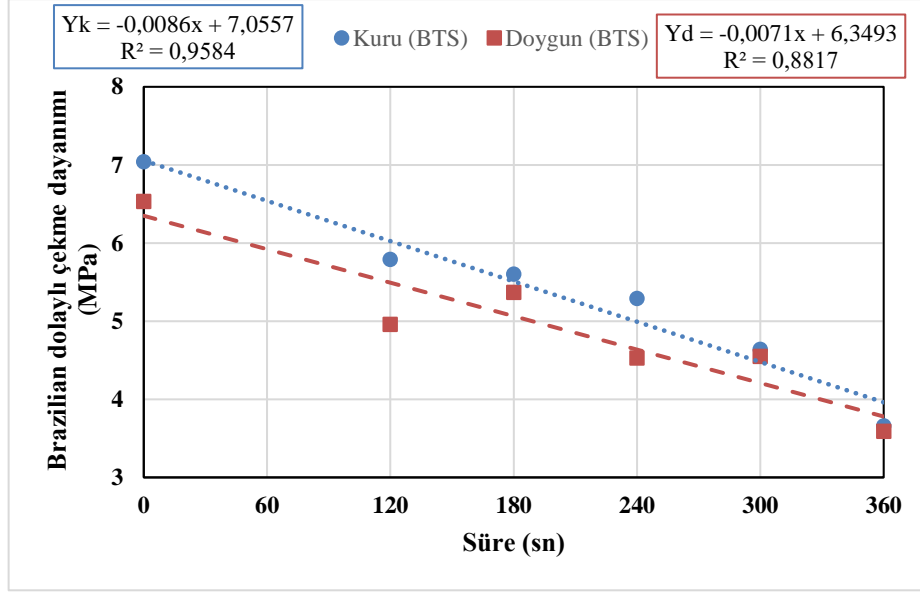
Nidaş kalsit numunelerinde Çizelge 5.11’ de bulunan veriler incelendiğinde; kuru UCS deneylerinde mikrodalga uygulaması öncesi (0) ölçülen ortalama değer 75,4 MPa olduğu, 360 saniye mikrodalga uygulaması sonrasında 58,6 MPa olduğu görülmektedir. Doymun UCS deneylerinde ise mikrodalga uygulama öncesi değer 73,8 MPa olduğu,

360 saniye mikrodalga uygulaması sonrasında 51,0 MPa olduğu görülmektedir. Şekil 5.23' de bulunan grafikteki doğrusal eğilim çizgisine göre Nidaş kalsit kayacının UCS deneyleri sonrasındaki dayanım düşüş oranı; kuru UCS deneyinde %21,21 ve doymuş UCS deneyinde %36,73 olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 5.23. Nidaş kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Nidaş kalsit numuneleri deney sonrası elde edilen Çizelge 5.11'de bulunan değerlerde görüldüğü üzere, kuru BTS deneyinde mikrodalga uygulamasından önce 7,0 MPa olarak ortalama ölçülen değer, 360 saniye süresinde mikrodalga uygulaması sonrası 3,7 MPa olarak ölçülmüştür. Doymuş BTS kısmında ise 6,5 MPa olarak ölçülen ortalama değer, 360 saniye mikrodalga uygulaması sonrası 3,6 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.24' de bulunan grafik üzerinde çizilen doğrusal eğilim çizgilerinden 0-360 süreleri arasındaki dayanımında meydana gelen azalma; kuru BTS için %43,88 ve doymuş BTS için %40,26 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.24. Nidaş kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Cevher kalsit numunesi için, mikrodalga uygulaması öncesi bulunan ortalama dayanımı ve mikrodalga uygulama sürelerine göre bulunan ortalama dayanım değerleri aşağıda bulunan Çizelge 5.12' de ve mikrodalga uygulama süresiyle dayanım değişim ilişkileri Şekil 5.25 ile Şekil 5.26' da gösterilmiştir.

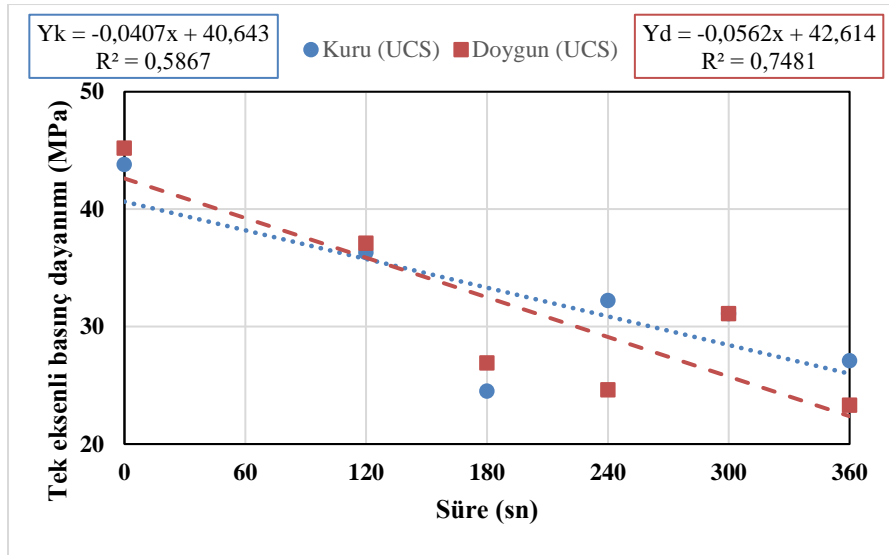
Çizelge 5.12. Cevher kalsit mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.

Cevher Kalsit Süre (sn)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)			
	Kuru (UCS)	Doygun (UCS)	Kuru (BTS)	Doygun (BTS)
0	43,8	45,2	4,0	4,0
120	36,3	37,1	3,2	3,0
180	24,5	26,9	2,1	2,5
240	32,2	24,6	2,0	2,3
300	31,1	31,1	1,9	1,7
360	27,1	23,3	1,6	1,6

Çizelge 5.12'de Cevher kalsit kayaç numunelerinin mikrodalga uygulamasına maruz bırakılmadan ve mikrodalgaya maruz bırakma sonrasında, mikrodalga uygulanma sürelerine göre dayanımlarında meydana gelen ortalama değişim değerleri bulunmaktadır. Cevher kalsit numunelerinde mikrodalga uygulamasına maruz bırakmadan ölçülen ortalama değerler; kuru UCS, doygun UCS, kuru BTS ve doygun BTS numuneleri deneylerinde beşer numune üzerinden ortalama alınarak ölçülmüştür. Mikrodalga uygulamasına maruz bırakılan kısımlarda; kuru UCS numune deneylerinde

180 ve 360 saniyelik sürelerde üçer numune, diğer sürelerde ikişer numune üzerinden; doymun UCS numune deneylerinde 300 ve 360 saniyelik sürelerde üçer numune, diğer sürelerde ikişer numune üzerinden ölçümler yapılmıştır. Kuru BTS deneylerinde 180, 300 ve 360 saniyelik sürelerde üçer numune, diğer sürelerde ikişer numune üzerinden; doymun BTS deneylerinde 120, 180 ve 300 saniyelik sürelerde üçer numune, diğer sürelerde ikişer numune üzerinden ölçümler yapılmıştır.

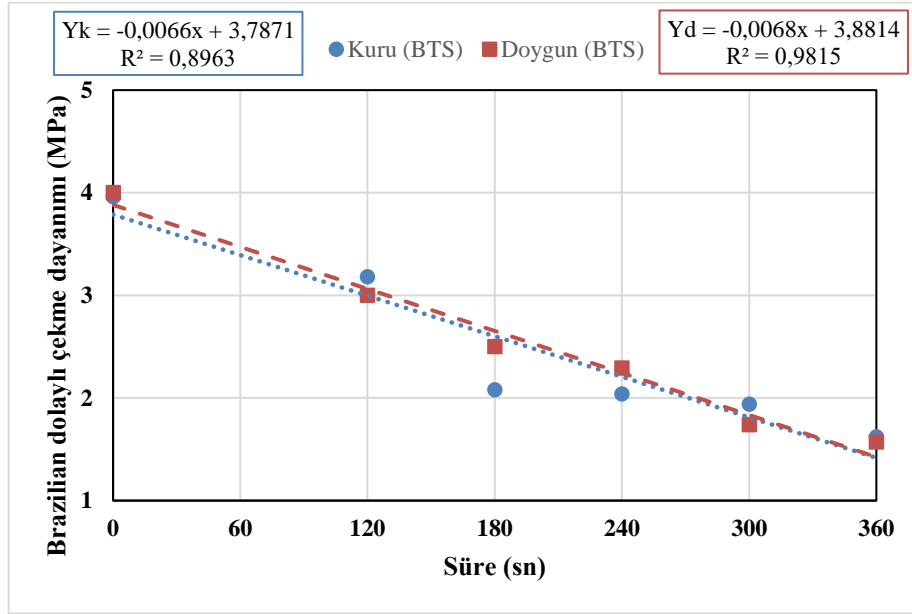
Cevher kalsit kayacının mikrodalga uygulaması kapsamında UCS deneyleri sonrasında elde edilen verilerde Çizelge 5.12’de yapılan incelemede; kuru UCS deneyi kısmında mikrodalga uygulaması öncesi 43,8 MPa olarak ölçülen ortalama dayanım, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında 27,1 MPa olarak ölçülmüştür. Doymun UCS deneyi kısmında mikrodalga öncesi 45,2 MPa olarak ölçülen ortalama dayanım, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası 23,3 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.25’de bulunan grafikte bulunan denklemler ve doğrusal eğilim çizgisine göre hesaplanan 0-360 saniyelik sürelerde dayanım değişim oranına göre; kuru UCS numune %36,05 oranında ve doymun UCS numune %47,48 oranında kayaç dayanımının azaldığı bulunmuştur.



Şekil 5.25. Cevher kalsit UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Cevher kalsit kayaç numunelerinin BTS deneyleri kısmında Çizelge 5.12’de bulunan veriler incelendiğinde; kuru ve doymun BTS kısmında mikrodalga uygulanmadan ölçülen ortalama değerlerin 4,0 MPa olduğu, 360 saniyelik mikrodalga uygulama

sonrasında 1,6 MPa değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir. Şekil 5.26’ da bulunan grafikte bulunan kuru ve doymun verilerine yönelik oluşturulan eğilim çizgisi ve denklemleri kullanılarak, Cevher kalsit kayacının BTS deneyleri sonucunda dayanımında meydana gelen azalma hesaplanmıştır. Kuru BTS için %62,74 ve doymun BTS için %63,07 oranında 0-360 saniye sürede dayanım azalması olduğu bulunmuştur.



Şekil 5.26. Cevher kalsit BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

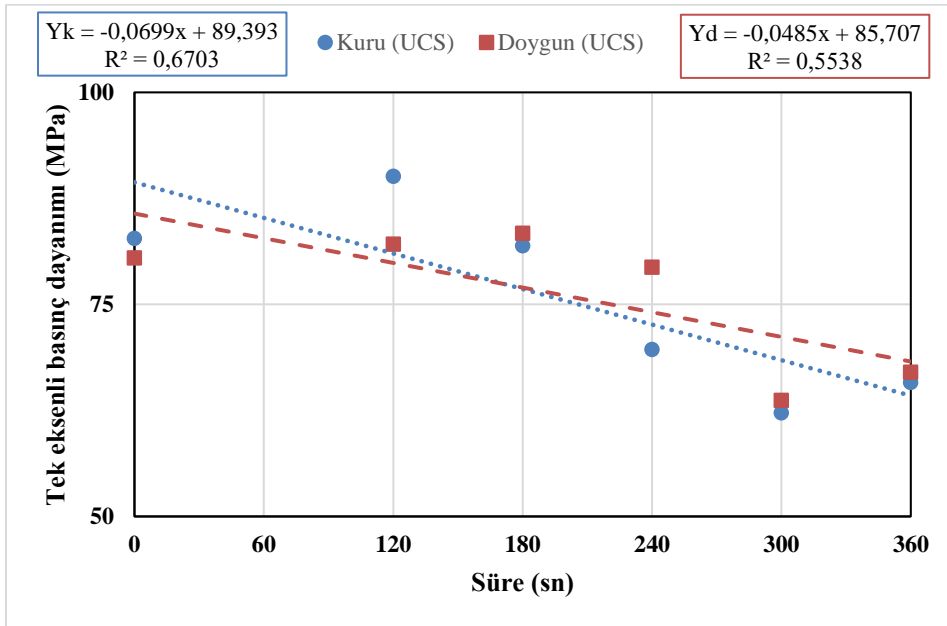
Marmara mermer numunesi için, mikrodalga uygulaması öncesi bulunan ortalama dayanımı ve mikrodalga uygulama sürelerine göre bulunan ortalama dayanım değerleri aşağıda bulunan Çizelge 5.13’ de ve mikrodalga uygulama süresiyle dayanım değişim ilişkileri Şekil 5.27 ile Şekil 5.28’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.13. Marmara mermer mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.

Mar. Mermer	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)				
	Süre (sn)	Kuru (UCS)	Doymun (UCS)	Kuru (BTS)	Doymun (BTS)
	0	82,8	80,5	8,4	7,0
	120	90,1	82,1	6,9	6,4
	180	81,9	83,4	5,0	6,0
	240	69,7	79,4	4,7	4,9
	300	62,2	63,7	4,5	4,3
	360	65,8	67,0	4,2	3,7

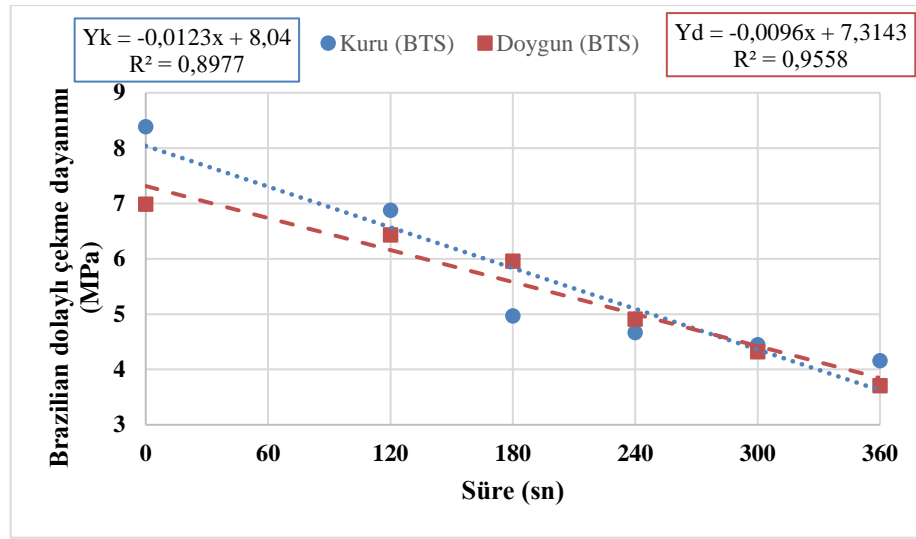
Çizelge 5.13'te Marmara Mermer kayacından elde edilen numuneler üzerinde mikrodalga uygulanmadan ve mikrodalga uygulandıktan sonra UCS ve BTS deneyleri sonucunda elde edilen ortalama dayanım değerleri bulunmaktadır. Marmara mermer numunelerinde mikrodalga uygulamasına maruz bırakmadan ölçülen ortalama değerler; kuru UCS için 8, doymun UCS için 6, kuru BTS ve doymun BTS numuneleri deneylerinde beşer numune üzerinden ortalama alınarak ölçülmüştür. Mikrodalga uygulamasında söz konusu değerlerin ortalamaları; kuru ve doymun UCS numunelerinin 120 ve 180 saniyelik sürelerinde üçer numune üzerinden, diğer sürelerde ikişer numune üzerinden hesaplanmıştır. Kuru BTS numunelerinde 240 ve 300 saniyelik sürelerde, doymun BTS numunelerinde 300 ve 360 saniyelik sürelerde üçer numune üzerinden, diğer sürelerde ikişer numune üzerinden veriler hesaplanmıştır.

Marmara mermer kayacının UCS deneyleri sonucunda elde edilen verilerinde Tablo 5.13'te; kuru UCS numunesinde mikrodalga öncesi 82,8 MPa ölçülen dayanım değeri, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında 65,8 MPa ölçülmüştür. Doymun UCS numunesinde mikrodalga öncesi 80,5 MPa ölçülen dayanım değeri, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında 67,0 MPa olara ölçülmüştür. Şekil 5.27' de bulunan grafik üzerinde çizilen doğrusal eğilim çizgileri ve denklemleri üzerinden yapılan hesaplamada; kuru UCS deneyi sonrasında %28,15 oranında ve doymun UCS deneyi sonrasında %20,37 oranında dayanım azalması olduğu elde edilmiştir.



Şekil 5.27. Marmara mermer UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Marmara mermer kayacının BTS deneyleri sonucunda elde edilen verilerinde Çizelge 5.13'te; kuru BTS numunesinde mikrodalga öncesi 8,4 MPa ölçülen dayanım değeri, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında 4,2 MPa olarak ölçülmüştür. Doymun BTS numunesinde mikrodalga öncesi 7,0 MPa ölçülen dayanım değeri, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında 3,7 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.28' de bulunan grafik üzerinde çizilen doğrusal eğilim çizgiler ve denklemleri üzerinden yapılan hesaplamada; kuru BTS deneyi sonrasında %55,07 oranında ve doymun BTS deneyi sonrasında %47,25 oranında dayanım azalması olduğu bulunmuştur.



Şekil 5.28. Marmara mermer BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

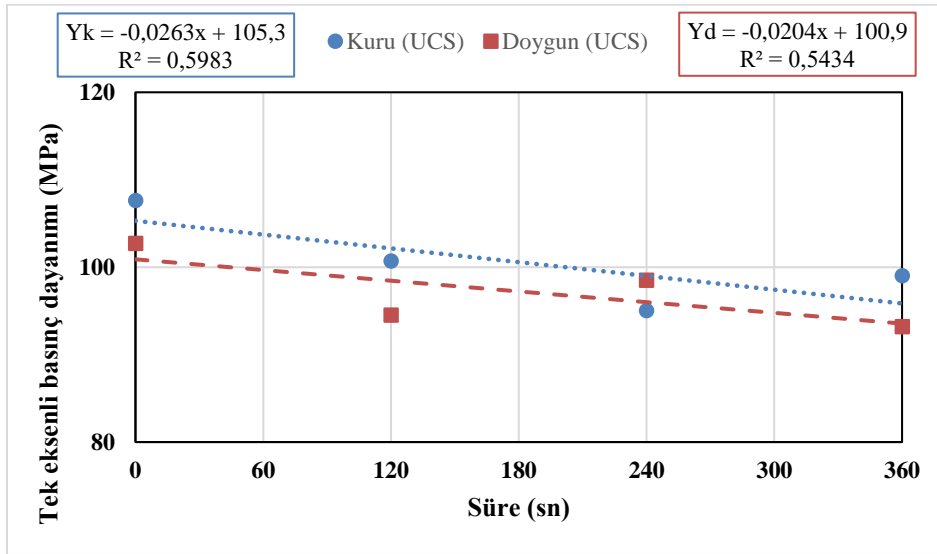
Yeşilova kireçtaşı numunesi için, mikrodalga uygulaması öncesi bulunan ortalama dayanımı ve mikrodalga uygulama sürelerine göre bulunan ortalama dayanım değerleri aşağıda bulunan Çizelge 5.14' te ve mikrodalga uygulama süresiyle dayanım değişim ilişkileri Şekil 5.29 ile Şekil 5.30' da gösterilmiştir.

Çizelge 5.14. Yeşilova kireçtaşı mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.

Yeşilova Kireçtaşı	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)				
	Süre (sn)	Kuru (UCS)	Doymun (UCS)	Kuru (BTS)	Doymun (BTS)
	0	107,6	102,7	9,6	8,9
	120	100,7	94,5	9,7	8,6
	240	95,0	98,5	9,4	6,6
	360	99,0	93,2	7,9	7,3

Çizelge 5.14'te Yeşilova kireçtaşı kayacından elde edilen numuneler üzerinde mikrodalga uygulanmadan ve mikrodalga uygulandıktan sonra UCS ve BTS deneyleri sonucunda elde edilen ortalama dayanım değerleri bulunmaktadır. Değerler ikişer numune üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilmiştir. Numune sayısı sebebiyle mikrodalga uygulamaları 120, 240 ve 360 saniyelik sürelerde uygulanarak yapılmıştır.

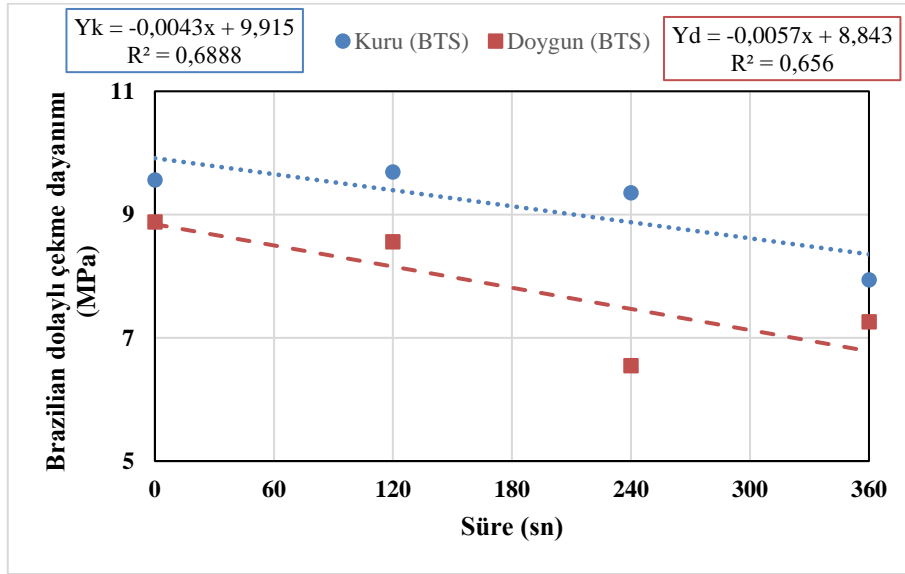
Çizelge 5.14'te bulunan Yeşilova kireçtaşı kayacı deneylerinde ölçülen ortalama verilerde; kuru UCS numunelerinde mikrodalga uygulaması öncesi ölçülen dayanım değeri 107,6 MPa olarak, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası 99,0 MPa olarak ölçülmüştür. Doymun UCS numunelerinde mikrodalga uygulaması öncesi 102,7 MPa olarak ölçülen dayanım değeri, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası 93,2 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.29'da bulunan grafikte elde edilen verilere göre çizilen doğrusal eğilim çizgisi ve denklemi üzerinden yapılan hesaplamada; kuru UCS numunelerinin dayanımında %8,99 ve doymun UCS numunelerinin dayanımında %7,28 oranında azalma meydana geldiği hesaplanmıştır.



Şekil 5.29. Yeşilova kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Yeşilova kireçtaşı numunelerinin BTS deneylerinde; kuru BTS numunelerinin mikrodalga öncesi ölçülen ortalama değer 9,6 MPa olup, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası 7,9 MPa olarak ölçülmüştür. Doymun BTS kısmında mikrodalga öncesi 8,9 MPa olarak ölçülen dayanım değeri, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında 7,3 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.30' da bulunan dayanım verilerine göre

çizilen grafikteki doğrusal eğilim çizgisi ve denklemi üzerinden yapılan hesaplamada; kuru BTS deneyleri sonucunda ölçülen dayanımın 360 saniyelik mikrodalga uygulama sonrasında %15,61 oranında ve doymun BTS deneyleri sonucunda %23,20 oranında azaldığı hesaplanmıştır.



Şekil 5.30. Yeşilova kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Karamanlı kireçtaşı numunesi için, mikrodalga uygulaması öncesi bulunan ortalama dayanımı ve mikrodalga uygulama sürelerine göre bulunan ortalama dayanım değerleri aşağıda bulunan Çizelge 5.15’ de ve mikrodalga uygulama süresiyle dayanım değişim ilişkileri Şekil 5.31 ile Şekil 5.32’ de gösterilmiştir.

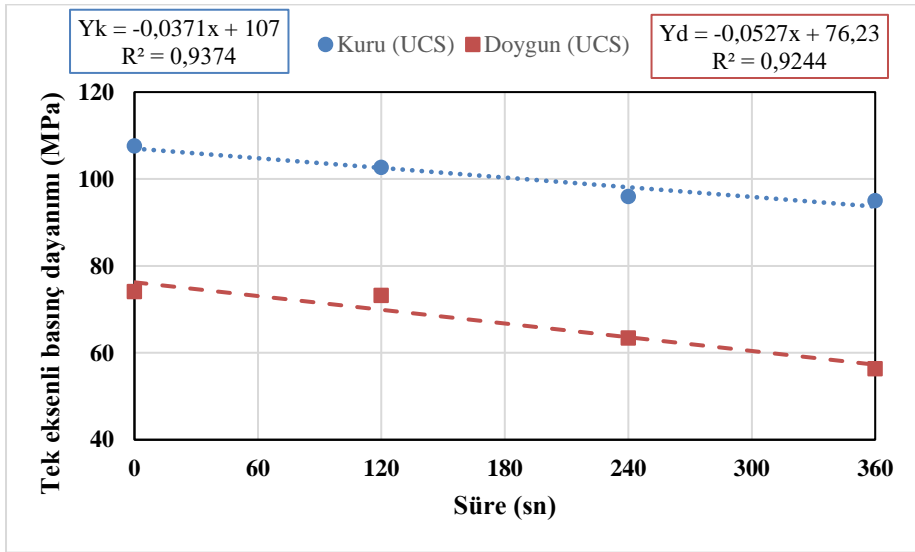
Çizelge 5.15. Karamanlı kireçtaşı mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.

Karamanlı kireçtaşı	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)				
	Süre (sn)	Kuru (UCS)	Doymun (UCS)	Kuru (BTS)	Doymun (BTS)
	0	107,6	74,1	7,0	6,9
	120	102,7	73,2	7,4	5,3
	240	96,0	63,4	5,5	5,3
	360	95,0	56,3	5,6	4,1

Çizelge 5.15’te Karamanlı kireçtaşı kayacından elde edilen numuneler üzerinde mikrodalga uygulanmadan ve mikrodalga uygulandıktan sonra UCS ve BTS deneyleri sonucunda elde edilen ortalama dayanım değerleri bulunmaktadır. UCS ve BTS mikrodalga öncesi değerleri beşer numune üzerinden yapılmış olup, mikrodalga

uygulamasını sonrası ölçülen BTS değerleri ikişer numune üzerinde yapılan deneyler sonucunda, UCS numuneleri birer numune üzerinden elde edilmiştir. Numune sayısı sebebiyle mikrodalga uygulamaları 120, 240 ve 360 saniyelik sürelerde uygulanarak yapılmıştır.

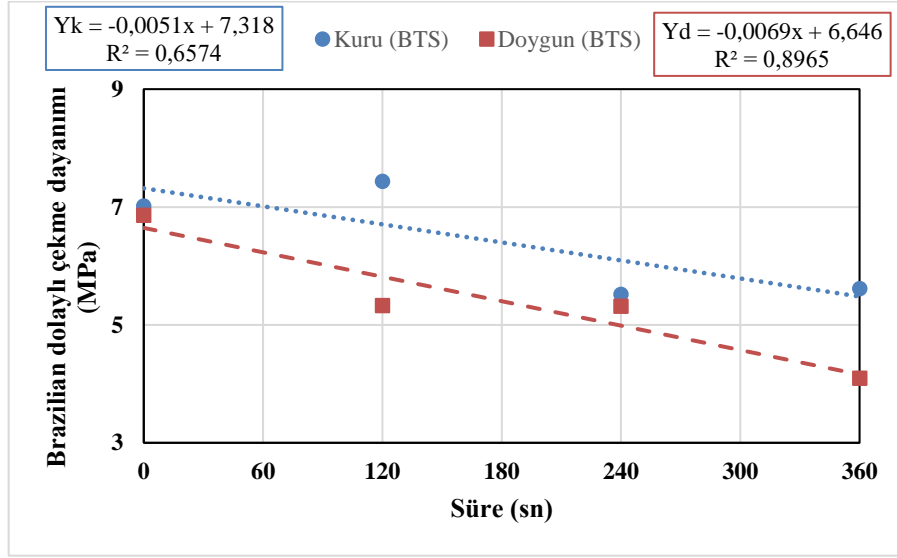
Çizelge 5.15'te bulunan verilerde; mikrodalga uygulama öncesi kuru UCS numunelerinde 107,6 MPa olarak ölçülen dayanım değeri, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası 95,0 MPa olarak ölçülmüştür. Doymun UCS numunelerinde mikrodalga uygulaması öncesi 74,1 MPa olarak ölçülen dayanım değeri, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası 56,3 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.31'de bulunan UCS numuneleri grafiğinde kuru ve doymun numuneler için ayrı ayrı çizilen doğrusal eğilim çizgisi ve denklemleri kullanılarak mikrodalga uygulaması sonrası dayanım azalma oranı hesaplanmıştır. Kuru UCS numunesinde 360 saniye mikrodalga uygulaması sonrası %12,48, doymun UCS numunesinde %24,89 oranında dayanımlarında azalma meydana geldiği bulunmuştur.



Şekil 5.31.Karamanlı kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Çizelge 5.15'te bulunan verilerde; mikrodalga uygulanmadan kuru BTS numunelerinde elde edilen değer 7,0 MPa olarak bulunmuş olup, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında 5,6 MPa olarak bulunmuştur. Doymun BTS numunelerinde mikrodalga uygulanmadan önce 6,9 MPa olarak bulunan değer, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında 4,1 MPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.32'de bulunan grafiklerde

Karamanlı kireçtaşı numunesinin Çizelge 5.15'te bulunan verileri kullanılarak doğrusal eğilim çizgisi ve formülü oluşturulmuştur. Doğrusal eğilim çizgisi ve formüller kullanılarak Karamanlı kireçtaşı kayacı dayanım azalma oranı hesaplanmıştır. Kuru BTS numunelerinde 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası %25,09 oranında ve doygun BTS numunelerinde 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında %37,38 oranında dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 5.32. Karamanlı kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Amasya kireçtaşı numunesi için, mikrodalga uygulaması öncesi bulunan ortalama dayanımı ve mikrodalga uygulama sürelerine göre bulunan ortalama dayanım değerleri aşağıda bulunan Çizelge 5.16' de ve mikrodalga uygulama süresiyle dayanım değişim ilişkileri Şekil 5.35 ile Şekil 5.36' da gösterilmiştir.

Çizelge 5.16. Amasya kireçtaşı kayacı mikrodalga uygulaması ve dayanım ilişkisi.

Amasya kireçtaşı	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)				
	Süre (sn)	Kuru (UCS)	Doygun (UCS)	Kuru (BTS)	Doygun (BTS)
	0	117,0	108,5	9,2	8,3
	120	98,3	105,7	7,3	7,6
	180	94,0	84,0	6,8	6,5
	240	106,0	76,6	6,1	5,4
	300	103,0*	Patladı	5,3	5,4
	360	94,0**	Patladı	4,8	4,8

* Üç numuneden ikisi patladı

**İki numuneden biri patladı

Çizelge 5.16’da Amasya kireçtaşı kayacından elde edilen numuneler üzerinde mikrodalga uygulanmadan ve mikrodalga uygulandıktan sonra UCS ve BTS deneyleri sonucunda elde edilen ortalama dayanım değerleri bulunmaktadır. Mikrodalga öncesi elde edilen UCS ve kuru BTS değerleri beşer numune üzerinden, doygun BTS değerleri altı numune üzerinden bulunmuştur. Mikrodalga uygulanan kuru UCS numunelerinde 300 saniyelik sürede üç numune, diğer sürelerde ikişer numune üzerinden veriler elde edilmiştir. Doygun UCS numunelerinde 120 ve 180 saniyelik sürelerde ikişer numune, 240 saniyelik sürede dört numune, 300 ve 360 saniyelik sürelerde üçer numune üzerinden veriler elde edilmiştir. Kuru BTS numuneleri verileri ikişer numune üzerinden, doygun BTS numune verileri 240 saniyelik sürede üç numune üzerinden, diğer sürelerde ikişer numune üzerinden elde edilmiştir.

Amasya kireçtaşına ait UCS numunelerine 300 ve 360 sn. süreyle mikrodalga uygulama sonrasında 6 adet doygun numunenin hepsi patlamıştır. 5 adet kuru numunenin de 3’ ü patlamıştır (Şekil 5.33).



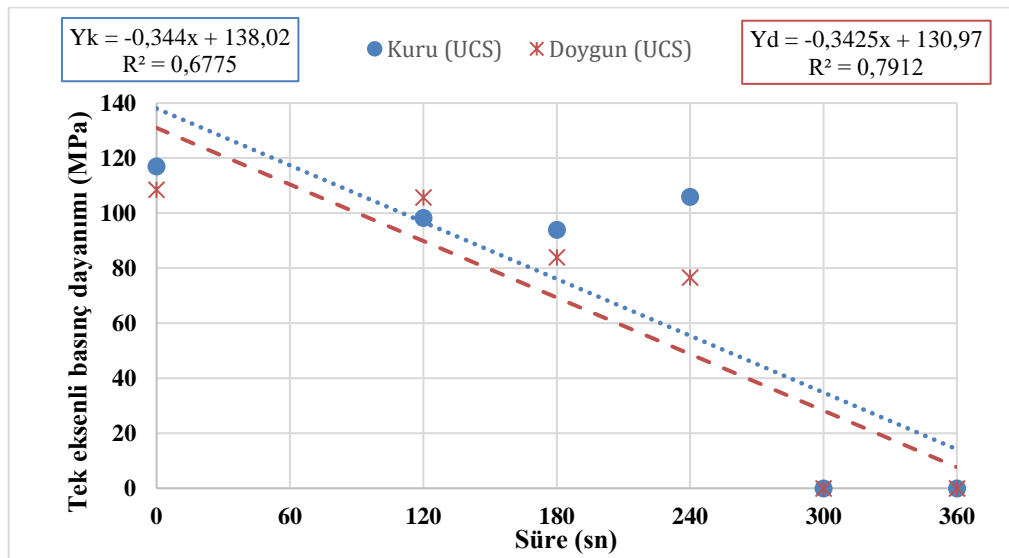
Şekil 5.33. Mikrodalga sonrası patlayan Amasya kireçtaşı numunelerinden bir kısmı.

Numunelerin patlamasına, kayaçta bulunan ince damarlar halinde koyu renkli kalsitten farklı minerallerin (Şekil 5.34) fazla ısınmasının neden olduğu düşünülmektedir.



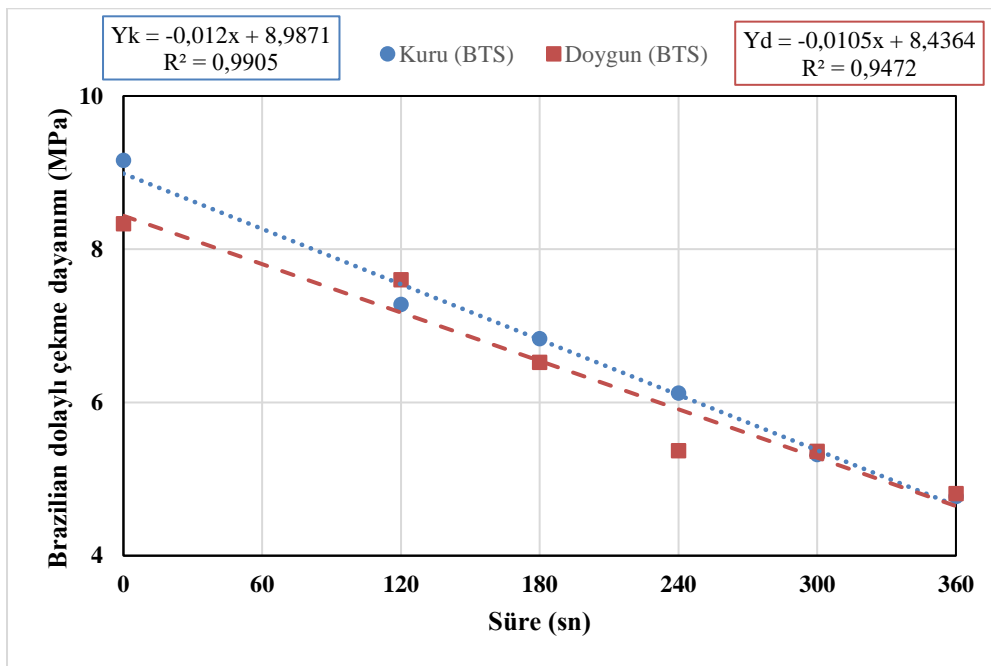
Şekil 5.34. Amasya kireçtaşı numunesi ince damarlara yönelik yakın çekim görüntüsü.

Çizelge 5.16’da bulunan verilerde; mikrodalga uygulaması öncesi ölçülen dayanım değerleri kuru UCS numunelerinde 117 MPa olarak, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası 94,0 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak, 300 ve 360 saniye mikrodalga uygulamalarında beş numuneden üçü patlamıştır. Doymun UCS numunelerinde mikrodalga uygulaması öncesi 108,5 MPa olarak ölçülen dayanım değeri, 240 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası 76,6 MPa olarak ölçülmüştür, 300 ve 360 saniyelik mikrodalga uygulamasında doymun numunelerin hepsi parçalanmıştır. Çizelge 5.16’da bulunan veriler kullanılarak Şekil 5.35’ te doğrusal eğilim çizgileri ve formülleri oluşturulmuştur. Doğrusal eğilim çizgileri ve formülleri kullanılarak 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrasında dayanım değerleri azalma oranı; kuru UCS numuneleri için %87,17 ve doymun UCS numuneleri için %94,14 oranında hesaplanmıştır.



Şekil 5.35. Amasya kireçtaşı UCS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

Çizelge 5.16’da bulunan verilerde; mikrodalga uygulaması öncesi ölçülen dayanım değerleri kuru BTS numunelerinde 9,2 MPa, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonrası 4,8 MPa olarak ölçülmüştür. Doymun BTS numunelerinde mikrodalga uygulaması öncesi 8,3 MPa olarak ölçülen dayanım değeri, 360 saniyelik mikrodalga uygulaması sonra 4,8 MPa olarak ölçülmüştür. Çizelge 5.16’da bulunan veriler sonucunda çizilen Şekil 5.36’da değerler üzerinden doğrusal eğilim çizgileri ve formülü elde edilmiştir. Doğrusal eğilim çizgileri ve formüller yardımıyla 0-360 saniye arasındaki dayanım azalma oranı; kuru BTS için %48,07 oranında ve doymun BTS için %44,81 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.36. Amasya kireçtaşı BTS numuneleri mikrodalga süresi ve dayanım grafiği.

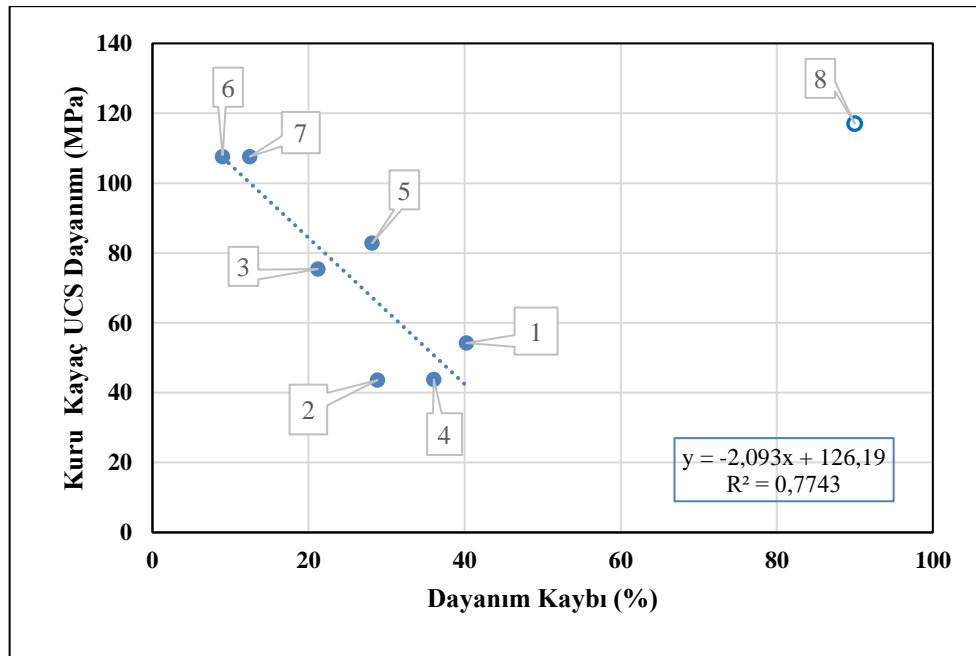
Çizelge 5.17’ de tez çalışması kapsamında incelenen ve deneylerde kullanılan kayaçların 6 kW güçte mikrodalga uygulanması sonrasında hesaplanan dayanım kayıpları toplu halde gösterilmiştir.

Numuneler arasında dayanım farkları olmakla birlikte fiziksel, mineralojik ve kimyasal bakımdan fazla bir fark bulunmamaktadır. Bu bakımdan, mineralojik ve kimyasal veriler analizlerde kullanılamamıştır. Ancak, dayanım kayıpları arasında çok farklılıklar bulunmaktadır. Dayanım kayıpları arasındaki bu farklılıkların, kayaç numunelerinde bulunan safsızlıklar, dokusal özellikler ve dayanımın değişikliklerinden kaynaklandığı

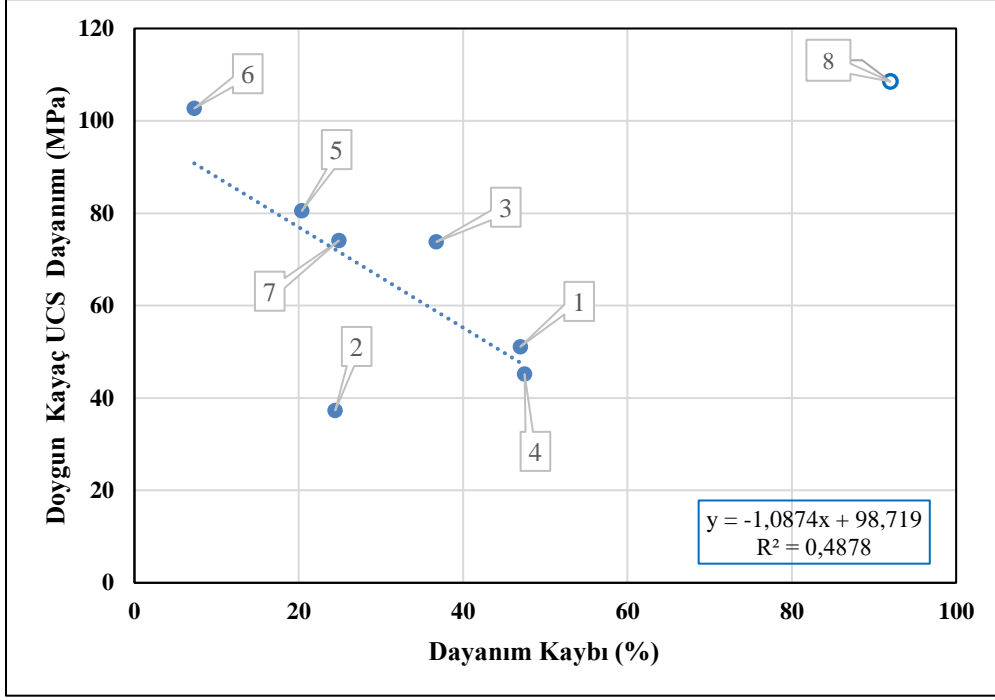
düşünülmektedir. Şekil 5.37 – Şekil 5.40’ da görüldüğü gibi, kayaç dayanımı arttıkça dayanım kaybı azalmaktadır. Kayaç dayanımı ile dayanım kaybı arasında yüksek korelasyonlar bulunmamasının sebebinin, daha önce açıklandığı gibi, dayanım kaybı üzerinde heterojenlikler, safsızlıklar ve dokusal özelliklerin de etkili olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.17. 6 kW güçte 6 dakika mikrodalga uygulaması sonrası hesaplanan dayanım kayıpları.

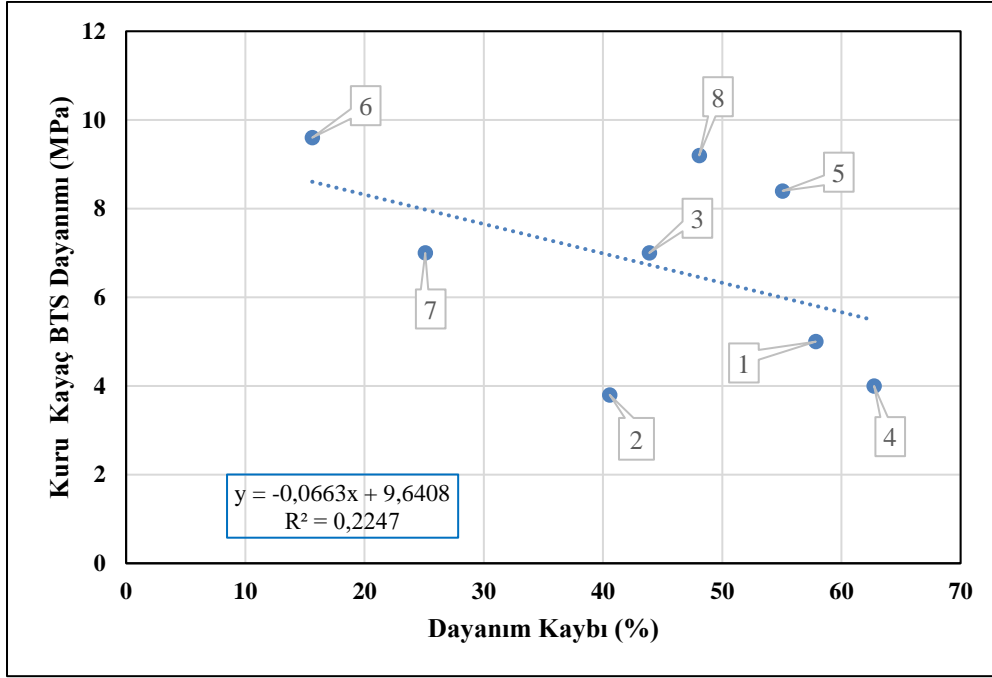
Numune No	Dayanım kaybı (%)			
	Kuru UCS	Doğun UCS	Kuru BTS	Doğun BTS
1	40,25	46,96	57,85	49,25
2	28,85	24,43	40,56	41,65
3	21,21	36,73	43,88	40,26
4	36,05	47,48	62,74	63,07
5	28,15	20,37	55,07	47,25
6	8,99	7,28	15,61	23,20
7	12,48	24,89	25,09	37,38
8	90,00	92,00	48,07	44,81



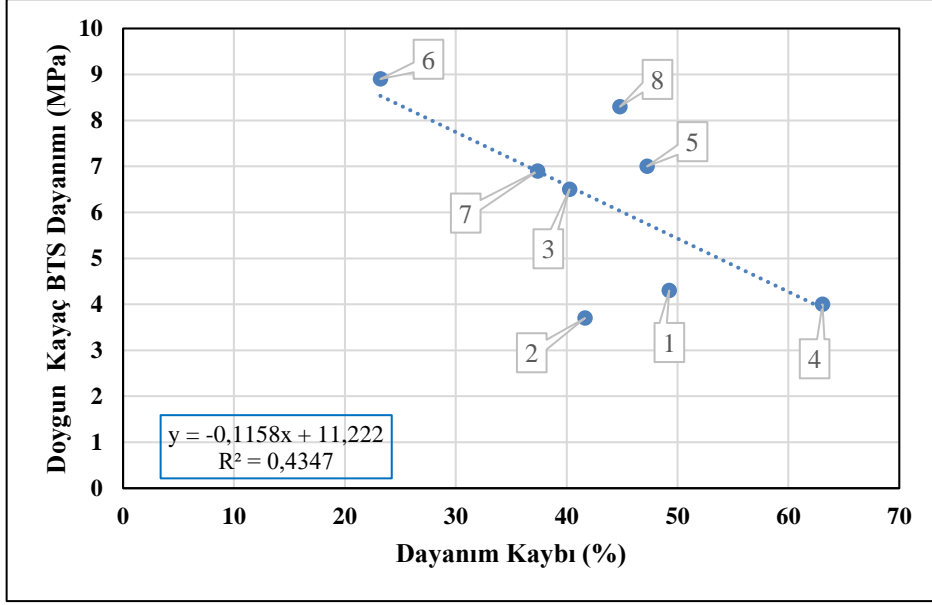
Şekil 5.37. Kuru UCS numuneleri kayaç dayanımı ve dayanım kaybı ilişkisi (Rakamlar kayaç kodlarını göstermektedir. 8 no’ lu kayaç verisi regresyon analizine dâhil edilmemiştir).



Şekil 5.38. Doğun UCS numuneleri kayaç dayanımı ve dayanım kaybı ilişkisi (Rakamlar kayaç kodlarını göstermektedir. 8 no' lu kayaç verisi regresyon analizine dâhil edilmemiştir).

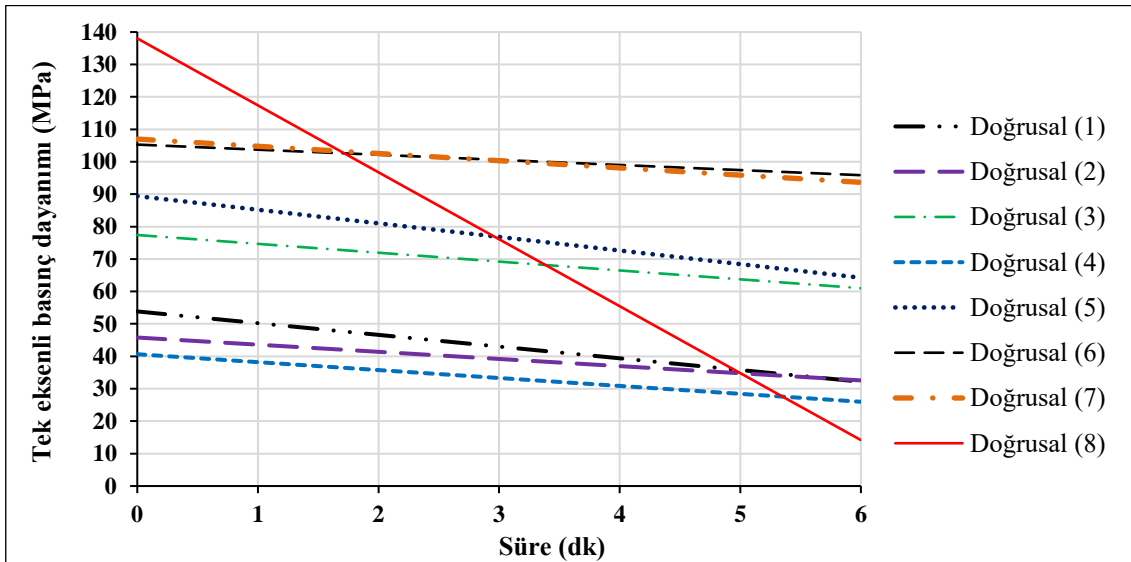


Şekil 5.39. Kuru BTS numuneleri kayaç dayanımı ve dayanım kaybı ilişkisi (Rakamlar kayaç kodlarını göstermektedir.)

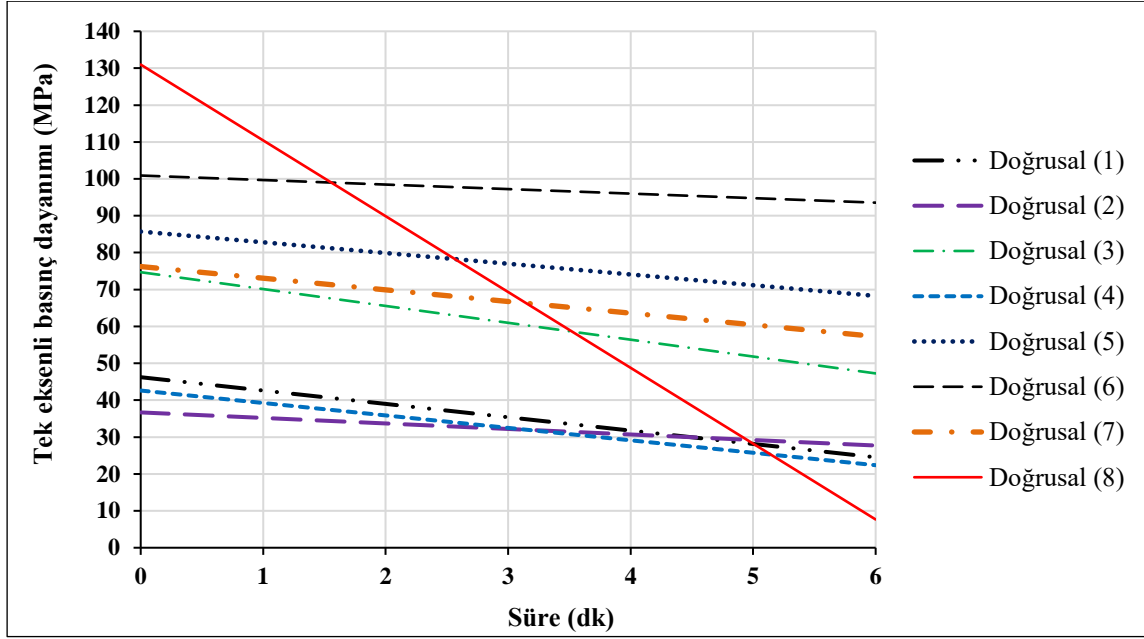


Şekil 5.40. Doygun BTS numuneleri kayaç dayanımı ve dayanım kaybı ilişkisi (Rakamlar kayaç kodlarını göstermektedir.)

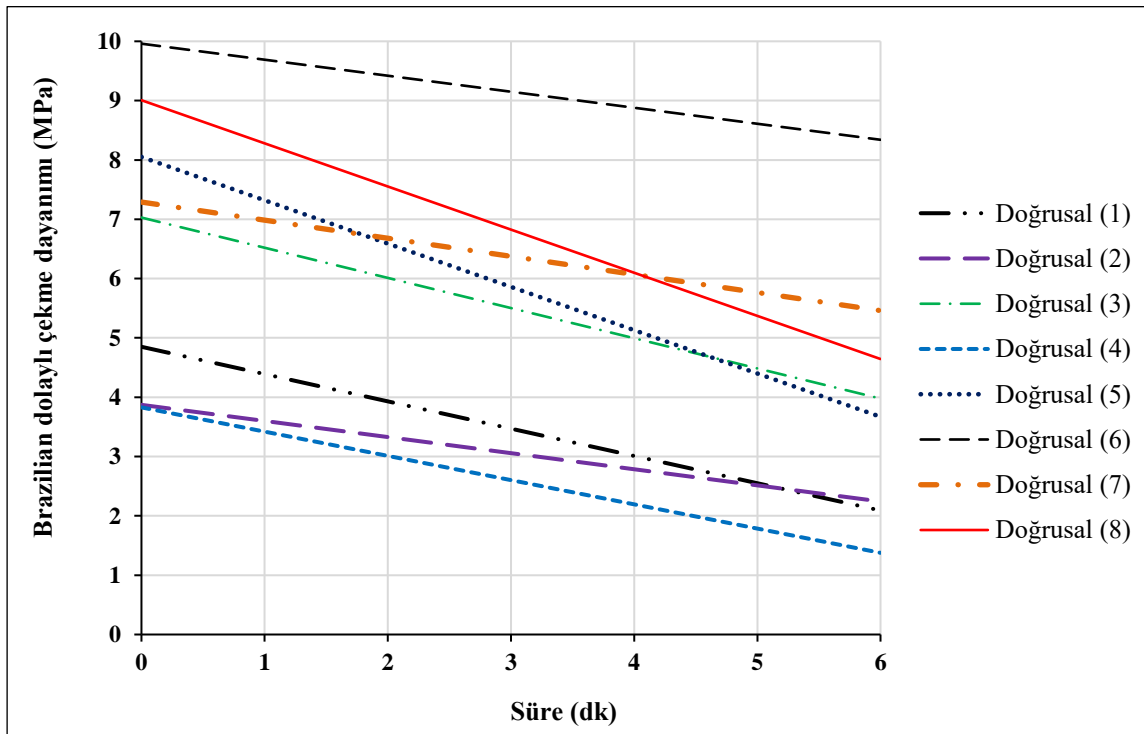
Numunelerdeki dayanım düşmelerinin genel bir değerlendirmesini yapmak amacıyla mikrodalgaya maruz bırakma süresine bağlı olarak UCS ve BTS değişimleri kuru ve doymuş kayaçlar için ayrı ayrı olmak üzere incelenen tüm kayaçlar için toplu olarak Şekil 5.41 – 5.44’ de verilmiştir.



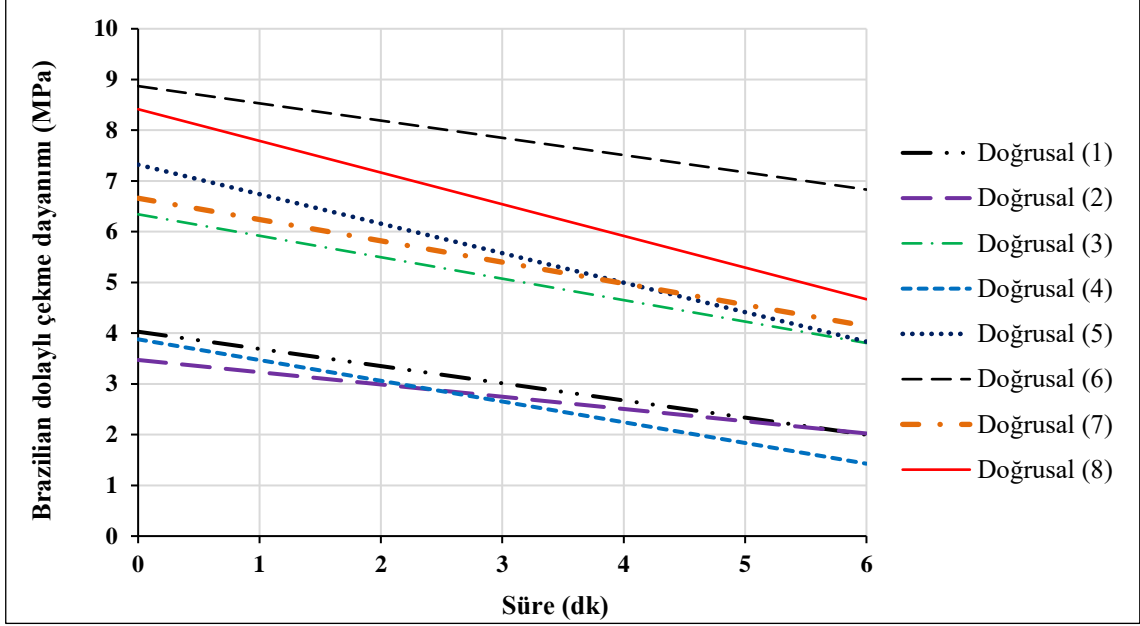
Şekil 5.41. Kuru numuneler için UCS değerlerinin mikrodalgaya maruz bırakma süresiyle değişimi. (Parantez içindeki rakamlar kayaç numaralarını göstermektedir).



Şekil 5.42. Doymun numuneler için UCS değerlerinin mikrodalgaya maruz bırakma süresiyle değişimi. (Parantez içindeki rakamlar kayaç numaralarını göstermektedir).



Şekil 5.43. Kuru numuneler için BTS değerlerinin mikrodalgaya maruz bırakma süresiyle değişimi. (Parantez içindeki rakamlar kayaç numaralarını göstermektedir).



Şekil 5.44. Doymun numuneler için BTS değerlerinin mikrodalgaya maruz bırakma süresiyle değişimi. (Parantez içindeki rakamlar kayaç numaralarını göstermektedir).

Şekil 5.41 – 5.44’ de yukarıda bulunan grafiklerde görüldüğü gibi doğrusal eğimlerin yaklaşık olarak birbirine paralel seyrettiği, kuru ve doymun UCS numunelerinde 8 numaralı kayaçın beşinci ve altıncı dakikalarda patlaması sonucunda eğiminin diğer kayaçlardan farklılık gösterdiği görülebilmektedir.

Genel olarak bakıldığında, tez çalışması kapsamında değerlendirilen 8 karbonatlı kayaç üzerinden değerlendirmede bulunması sonucunda, mikrodalgaya maruz bırakmanın karbonatlı kayaçların dayanımlarını azaltma yönünde etkili olduğu anlaşılmaktadır.

6. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında özetle; 8 farklı karbonatlı kayaca, kuru ve suya doygun olacak şekilde, farklı sürelerde, 6 kW gücünde mikrodalga uygulanması sonrası numunelerin dayanımlarında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Elde edilen bulguların değerlendirilmesiyle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 6 kW gücünde 6 dakikaya kadar yapılan mikrodalga uygulamasında; mikrodalga uygulama süresi ile ölçülen yüzey sıcaklık değerleri doğru orantılı şekilde artmaktadır.
- Mikrodalga uygulamasının süresinin artmasıyla basınç ve çekme değerleri azalmaktadır.
- 6 kW gücün 360 sn. uygulanmasıyla numunelerde çok önemli dayanım kayıpları gözlenmiştir.
- Doygun numunelerin dayanım kayıpları bazı numunelerde kuru numunelere göre daha fazla olurken, bazı numunelerde pek bir fark gözlenmemiştir. Bunun, numunelerin porozitelerinin birbirine yakın olması, numune heterojenliği ve mikrodalga ile ısıtmanın homojen olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Mikrodalga uygulanması sonrasında kayaçlarda gözlenen dayanım kayıplarına bağlı olarak muhtemel mikrodalga destekli kazı uygulamasında da kayaçların kazılabilirliğinin artacağı söylenebilir. Mekanize kazı yöntemlerine mikrodalga sistemlerinin uyarlanarak kullanılması durumunda kazı işlemlerinin daha düşük maliyetle ve daha hızlı bir şekilde tamamlanabileceği öngörülmektedir.

Çalışma sonucunda ortaya çıkan; ileride araştırılması gereken konular aşağıda özetlenmiştir:

- Porozitesi yüksek karbonatlı kayaçlar üzerinde yapılacak benzer çalışmayla, mikrodalga ile ısıtmada porozitenin etkisi ve suya doygunluğun etkisi araştırılmalıdır.
- Mineralojik ve kimyasal bakımdan farklı karbonatlı kayaçların mikrodalga ile ısıtmada nasıl tepki göstereceği incelenmelidir.

- Karbonatlı kayaçların mikrodalga ile ısıtılmasında safsızlıkların etkisi değerlendirilmelidir.
- Mikrodalgaya maruz bırakılan kayaçlar üzerinde dayanım kayıplarına neden olan etkenler incelenmelidir.
- Mikrodalgaya maruz kalan kayaçların molekül yapılarında nasıl bir değişiklik olduğu irdelenmelidir.
- Mikrodalgaya maruz bırakılan kayaçlardaki mikrodalga uygulanması sonrasında yeni gelişecek çatlakların ince kesitlerle araştırılması, nasıl bir çatlak sistemi geliştiği incelenmelidir.
- Daha fazla güce sahip mikrodalga sistemleri ile çalışma gerçekleştirilmesi halinde ise daha düşük sürelerde dayanım kayıplarına neden olacağı öngörülmekte olup, sonraki çalışmalarda daha yüksek mikrodalga gücü kullanılması literatüre katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Bilimseldünya, [https:// www.bilimseldunya.com/wp-content/uploads/2022/03/ Tunel-Acma-Makineleri.jpg](https://www.bilimseldunya.com/wp-content/uploads/2022/03/Tunel-Acma-Makineleri.jpg) (Erişim tarihi: 17 Nisan 2022).
- Church, R.H., Webb, W.E. and Salsman, J.B. 1988. “Dielectric properties of low loss minerals.” USBM Report of Investigations, No. 9194.
- Dailynews, [http:// www.dailynews.lk/2022/03/04/tc/273953/taking-downtown-below-ground](http://www.dailynews.lk/2022/03/04/tc/273953/taking-downtown-below-ground) (Erişim tarihi: 26 Nisan 2022).
- Deyab, S.M., Rafezi, H., Hassani, F., Kermani, M., Sasmito, A.P. 2021. “Experimental investigation on the effects of microwave irradiation on kimberlite and granite rocks”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13, 267-274.
- E-berk, [https:// www.e-berk.com/tunnel-boring-machine/](https://www.e-berk.com/tunnel-boring-machine/) (Erişim tarihi: 17 Nisan 2022).
- Estcutters, [http:// www.estcutters.com//list.asp?classid=8&page=1](http://www.estcutters.com//list.asp?classid=8&page=1) (Erişim tarihi: 26 Nisan 2022).
- Gainwellengineering, [https:// www.gainwellengineering.com/sites/default/files/2021-12/Homepage-banner_1900x820.jpg](https://www.gainwellengineering.com/sites/default/files/2021-12/Homepage-banner_1900x820.jpg) (Erişim tarihi: 26 Nisan 2022).
- Gnsolidscontrol, [https:// www.gnsolidscontrol.com/drilling/soft-ground-tbm/](https://www.gnsolidscontrol.com/drilling/soft-ground-tbm/) (Erişim tarihi: 17 Nisan 2022).
- Gümüşderelioğlu, M. 2012. “Mikrodalgalar ve uygulamaları.” *Bilim ve Teknik*, Temmuz, 38-42.
- Hassani, F., Nekoovaght, P.M., Gharib, N. 2016. “The influence of microwave irradiation on rocks for microwave assisted underground excavation.” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 1e15.
- Haque, K. E. 1999. “Microwave energy for mineral treatment processes - A brief review”, *International journal of mineral processing*, 57, 1-24.
- Hartlieb, P., Leindl, M, Kuchar, F. Antretter, T. Moser, P. 2012. “Damage of basalt induced by microwave irradiation.” *Minerals Engineering*, 31, 82–89.
- Jacob, J; Chia, L. H. L., Boey, F. Y. C. 1995. “Review of thermal and non-thermal interaction of microwave radiation with materials”. *Journal of materials science*, 30(21), 5123-5327.
- Jones, D.A., Kingman, S.W., Whittles D.N., Lowndes, I.S. 2005. “Understanding microwave assisted breakage”, *Minerals Engineering*, 18, 659–669.

- Kahraman, S., Canpolat, A.N. and Fener, M. 2020. "The influence of microwave treatment on the compressive and tensile strength of igneous rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 129:104303.
- Kahraman, S., Sarbangholi, F.S., Balci, C., Fener, M., Karpuz, C., Comakli, R., Unver, B. and Ozcelik, Y. 2022. "The effect of mineralogy on the microwave assisted cutting of igneous rocks", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81:62.
- Kingman, S.W., Rowson, N.A. 1998. "Microwave treatment of mineral", *Minerals Engineering*, 11(11), 1081-1087.
- Kingman, S.W., Vorster, W., Rowson, N.A. 2000. "The Influence of mineralogy on microwave assisted grinding", *Minerals Engineering*, 13, 313-327.
- Kingman, S.W., Jacksona, K., Bradshawb, S.M., Rowsonc, N.A., Greenwood, R. 2004. "An investigation into the influence of microwave treatment on mineral ore comminution.", *Powder Technology*, 146, 176-184.
- Lindroth, D.P., Morrell, R.J., Blair, J.R. 1991. Microwave assisted hard rock cutting. United States Patent No. 5,003,144.
- Lu, G-M., Feng, X.-T., Li, Y.-H., Hassani, F. and Zhang, X. 2019. "Experimental Investigation on the Effects of Microwave Treatment on Basalt Heating.", *Mechanical Strength, and Fragmentation. Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52:2535–2549.
- Metaxas, A. C., Meredith, R. J. 1983." *Industrial microwave heating*", England: Short Run Press.
- Motlagh, P.N. 2009. "An investigation on the influence of microwave energy on basic mechanical properties of hard rocks", MSc. Thesis, Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University.
- Nekoovaght, P., Hassani, F. 2014. "The influence of microwave radiation on hard rocks as in microwave assisted rock breakage applications", *EUROCK 2014*, 27 to 29 May, Vigo, Spain, 95-198.
- Nejati, H., Hassani, F., Radziszewski, P. 2012. "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.

- Ouellet, J., Radziszewski, P., Raghavan, V., Satish, H., Hassani, F. 2013. "Electromagnetic energy assisted drilling system and method". United States Patent No. US 8,550,82.
- Peinsitt, T., Kuchar, F., Moser, P., Kargl, H., Restner, U., Sifferlinger, N. 2008. "Microwave heating of rocks with different water content", Microwave Technology in Minerals Engineering (Microwave Technology 08), November 11-12, Cape Town, South Africa.
- Peinsitt, T., Kuchar, F., Hartlieb, P., Moser, P., Kargl, H., Restner, U., Sifferlinger, N.A. 2010. "Microwave heating of dry and water saturated basalt, granite and sandstone." Int. J. Mining and Mineral Engineering, 2, 18-29.
- Pickles, C. A. 2008." Microwaves in extractive metallurgy: A review of fundamentals", Microwave technology '08, Mei Confrence proceeding, South Africa.
- Pozar, D.M. 2012. "Microwave Engineering". John Wiley & Sons, Inc.
- Rasyonalist, [https:// rasyonalist.org/yazi/elektromanyetik-spektrum-nedir/](https://rasyonalist.org/yazi/elektromanyetik-spektrum-nedir/) (Erişim tarihi: 27 Nisan 2021)
- Robbinstbm, [https:// www.robbinstbm.com/products/tunnel-boring-machines/main-beam/](https://www.robbinstbm.com/products/tunnel-boring-machines/main-beam/) (Erişim tarihi: 17 Nisan 2022).
- Ruisanchez, E., Arenillas, A., Juárez-Perez, E.J., Menendez, J.A. 2012. "Pulses of microwave radiation to improve coke grindability", Fuel, 102, 65–71.
- Santamarina, J. C. 1989. "Rock excavation with microwaves; A literature review." Foundation engineering: current principles and practices proceedings, Evanston, Illinois, 459 - 473.
- Satish, H. 2005. "Exploring microwave assisted rock breakage for possible space mining applications", Mechanical Engineering, Masters of Engineering Thesis, McGill University.
- Satish, H., Ouellet, J., Raghavan, V., Radziszewski, P. 2006. "Investigating microwave assisted rock breakage for possible space mining applications", Mining Technology, 115(1), 34-40.
- Saygın, E. 2019. "Magmatik kayaçları mikrodalgaya maruz bırakmanın cerchar aşındırıcılığı üzerindeki etkilerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi.
- Scott, G., Bradshaw, S.M., Eksteen, J.J. 2008. "The effect of microwave pretreatment on the liberation of a copper carbonatite ore after milling", Int. J. Miner. Process., 85, 121–128.

- Toraman, Ö.Y., Depçi, T. 2007. “Kömürde mikrodalga ile önişlem uygulamaları.” Madencilik, 46, 43-53.
- Walkiewicz, J.W., Kazonich, G., McGill, S.L. 1988. “Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds.” Mineral and metallurgical processing, 5(1), 39-42.
- Walkiewicz, J.W., Clark, T.E., McGill, S.L. 1991. “Microwave-Assisted Grinding”, IEEE Trans. Ind. App., 27(2), 239- 243.
- Zheng, Y.L., Zhang, Q.B. and Zhao J. 2017. “Effect of microwave treatment on thermal and ultrasonic properties of gabbro. Applied Thermal Engineering”, 127, 359–369.
- Znamenackova, I., Lovas, M., Hajek, M., Jakabsky, S. 2003. “Melting of andesite in a microwave oven”, Journal of Mining and Metallurgy, 39 (3-4) B, 549 - 557.

EKLER

Ek 1. Numunelerin Kuru-Doygun Yoğunluk ve Porozite Verileri (Yoğunluk:g/cm³)

Numune No	K. Yoğunluk	Ort. K. Y.	D. Yoğunluk	Ort. D. Y.	Porozite	Ort. Porozite
1	2,66/2,64/2,74	2,67	2,66/2,65/2,72	2,68	0,26/0,51/0,22	0,33
2	2,61/2,58/2,56	2,58	2,61/2,59/2,57	2,59	0,24/0,52/0,50	0,42
3	2,58/2,65/2,57	2,6	2,58/2,65/2,57	2,6	0,51/0,24/0,28	0,34
4	2,65/2,64/2,65	2,65	2,66/2,64/2,65	2,65	0,26/0,26/0,26	0,26
5	2,58/2,58/2,58	2,58	2,58/2,58/2,58	2,58	0,24/0,23/0,24	0,24
6	2,61/2,57/2,59	2,59	2,61/2,58/2,60	2,6	0,48/0,87/0,76	0,71
7	2,61/2,60/2,61	2,61	2,62/2,61/2,63	2,62	0,54/0,59/1,98	1,04

(*K: Kuru *D: Doygun *Y: Yoğunluk *Ort: Ortalama)

Ek 2. Mikrodalga Öncesi Numuneler Üzerinde Yapılan Tek Eksenli Basınç Dayanım (UCS) Deneyi Sonuçları

Mikrodalga Öncesi Numuneler Üzerinde Yapılan Tek Eksenli Basınç Dayanım (UCS) Deneyi Sonuçları				
Numune No	Kuru UCS (MPa)	Kuru UCS (MPa) Ort.	Doygun UCS (MPa)	Doygun UCS (MPa) Ort.
1	48,7/48,4/40,9/40,7/ 36,8/77,5/73,3/66,9	54,2	57,8/44,5/55,1/56,4/62,1/ 39,5/52,7/40,6	51,1
2	39,0/30,5/51,1/33,1/ 50,8/49,3/51,2	43,6	30,2/58,2/32,8/32,0/30,4/ 40,5	37,3
3	72,9/77,5/86,3/69,6/ 70,5	75,4	71,3/71,7/76,2/83,0/75,0/ 65,5	73,8
4	48,0/50,0/37,9/39,8/ 43,5	43,8	42,1/50,9/47,3/42,7/43,1	45,2
5	84,8/70,2/71,9/89,3/ 86,2/101,5/77,4/81,3	82,8	83,0/91,2/91,5/66,3/79,9/ 76,3/75,2	80,5
6	92,3/100,2/109,2/ 120,2/116,0	107,6	115,0/109,9/96,2/101,8/ 90,6	102,7
7	85,0/98,0/115,0/ 125,0/115,0	107,6	61,6/67,1/76,2/68,0/97,5	74,1
8	112,1/116,1/114,0/ 117,0/126,0	117	105,3/120,0/95,0/117,0/ 105,0	108,5

Ek 3. Mikrodalga Öncesi Numuneler Üzerinde Yapılan Brazilian Çekme Dayanımı (BTS) Deneyi Sonuçları

Numune No	Kuru BTS (MPa)	Kuru BTS (MPa) Ort.	Doygun BTS (MPa)	Doygun BTS (MPa) Ort.
1	2,73/6,29/4,71/6,78/4,52	5,01	5,00/6,60/3,30/3,33/3,24	4,29
2	2,92/2,97/5,29/2,63/4,95	3,75	3,87/3,91/4,32/2,54/3,71	3,67
3	8,79/5,92/7,90/5,39/7,17	7,04	6,27/6,99/3,81/7,57/8,00	6,53
4	4,09/4,11/4,08/3,70/3,85	3,96	4,12/4,58/3,69/3,77/3,70	4,04
5	8,34/8,27/10,55/7,27/7,53	8,39	8,98/7,30/6,20/5,79/6,69	6,99
6	8,86/9,36/10,36/9,10/10,12	9,56	7,92/8,41/9,53/8,28/10,26	8,88
7	6,15/8,24/6,67	7,02	6,37/7,19/6,39/7,48	6,86
8	8,64/9,10/7,73/11,23/9,07	9,16	8,58/8,73/8,86/8,56/6,90/8,36	8,33

Ek 4. 6 kW Gücünde Mikrodalga Uygulanan Numunelerin Ölçülen Sıcaklıkları ve Tek Eksenli Basınç Dayanımı (UCS) Verileri

Ek 4 - Numune No 1 Kuru

Niğtaş-1 Kalsit (Kuru UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
1-2-a	120	18,9	95,9	51,3	46,6
1-2-b		18,9	98,1	25,6	
1-2-c		19,6	69,7	63	
1-3-a	180	19,1	205,2	34,4	45,6
1-3-b		18,9	85	56,7	
1-4-a	240	20,5	309,4	35,2	33,8
1-4-b		21,4	353,4	32,3	
1-5-a	300	21,6	332,6	36,2	37,3
1-5-b		20,7	342,8	38,4	
1-6-a	360	20	260,2	25,3	33,5
1-6-b		20,3	308,1	41,6	

Ek 4 - Numune No 1 Doygun

Niğtaş-1 Kalsit (Doygun UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
1-2-a	120	16,8	160,4	35,8	31,9
1-2-b		14	138	28	
1-3-a	180	13,4	210,6	46,4	36,0
1-3-b		15,6	208	25,5	
1-4-a	240	15,3	262,4	37,8	32,6
1-4-b		15,2	181,6	27,4	
1-5-a	300	16,3	281,7	17,6	24,1
1-5-b		16,3	234,4	30,5	
1-6-a	360	16,1	380,2	33,9	29,6
1-6-b		12,6	103	25,2	

Ek 4 - Numune No 2 Kuru

Niğtaş-2 Kalsit (Kuru UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
2-2-a	120	17,4	108,7	40,5	45,0
2-2-b		15,5	52,5	49,5	
2-3-a	180	21,9	61	35,6	34,3
2-3-b		21,7	57,2	33	
2-4-a	240	21,3	83,1	42,8	43,4
2-4-b		16,5	135	44	
2-5-a	300	19,5	138,5	29,4	35,3
2-5-b		15	99,7	41,1	
2-6-a	360	18,7	210,2	35,5	29,1
2-6-b		18	187,3	22,7	

Ek 4 - Numune No 2 Doygun

Niğtaş-2 Kalsit (Doygun UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
2-2-a	120	14,7	66	31,9	32,1
2-2-b		15,3	51	18,7	
2-2-c		14,2	74	45,6	
2-3-a	180	15,1	76,4	29,6	31,1
2-3-b		15,5	138,9	32,6	
2-4-a	240	13,6	83,7	34,4	33,9
2-4-b		16,5	158,7	33,4	
2-5-a	300	13,7	182,4	19,7	28,8
2-5-b		12,7	184,4	37,8	
2-6-a	360	15,1	99,3	17,6	27,0
2-6-b		15,5	182,2	36,3	

Ek 4 - Numune No 3 Kuru

Nidaş Kalsit (Kuru UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
3-2-a	120	21,5	75,8	69,7	70,0
3-2-b		21,3	60,8	70,2	
3-3-a	180	23,2	71,7	82,4	75,3
3-3-b		18,2	64	68,2	
3-4-a	240	18,8	189,8	68,9	67,8
3-4-b		18,1	95	66,7	
3-5-a	300	19,4	243,7	63,0	62,7
3-5-b		17,9	125	62,4	
3-6-a	360	19,3	287,6	56,2	58,5
3-6-b		15,5	160	60,9	

Ek 4 - Numune No 3 Doygun

Nıdaş Kalsit (Doygun UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
3-2-a	120	14,9	51,2	56,0	68,7
3-2-b		14,7	48,8	81,3	
3-3-a	180	14,8	56	62,7	63,3
3-3-b		16,3	108,8	63,9	
3-4-a	240	14,8	129,5	51,5	50,5
3-4-b		14,3	108,8	49,5	
3-5-a	300	15,4	85,4	44,6	49,4
3-5-b		15,1	213,2	54,1	
3-6-a	360	15,4	102,2	50,1	51,0
3-6-b		15,3	115	51,8	

Ek 4 - Numune No 4 Kuru

Cevher Kalsit (Kuru UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
4-2-a	120	17,4	242,8	26,3	36,3
4-2-b		17,5	85	46,3	
4-3-a	180	17,9	252,6	23,3	24,5
4-3-b		17,6	98,4	25,9	
4-3-c		17	150	24,4	
4-4-a	240	17,6	243,6	25,7	32,2
4-4-b		15,4	256,3	38,6	
4-5-a	300	17,1	313,7	31,8	31,1
4-5-b		16,8	320,9	30,4	
4-6-a	360	16,6	330,3	27,2	27,1
4-6-b		17,3	141,1	29,9	
4-6-c		16,8	280	24,2	

Ek 4 - Numune No 4 Doygun

Cevher Kalsit (Doygun UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
4-2-a	120	14,8	80,1	35,8	37,1
4-2-b		16,4	117	38,3	
4-3-a	180	15,3	221,3	26,1	26,9
4-3-b		14,5	254,2	27,7	
4-4-a	240	14,8	124,9	30,9	24,6
4-4-b		15,9	122,4	18,2	
4-5-a	300	15,8	330	38,5	31,1
4-5-b		14,6	275,4	20,5	
4-5-c		14,5	161	34,2	
4-6-a	360	16	400,7	26,9	22,6
4-6-b		16,9	236,1	19,8	
4-6-c		14,3	370	21,1	

Ek 4 – Numune No 5 Kuru

Marmara Mermer (Kuru UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
5-2-a	120	17,4	58,4	101,8	90,1
5-2-b		17	63,7	87,3	
5-2-c		19,8	48	81,1	
5-3-a	180	17,1	90,8	91,8	81,9
5-3-b		17,5	79,8	71,5	
5-3-c		18,1	80	82,5	
5-4-a	240	17,8	132,8	73,1	69,7
5-4-b		13,4	173,4	66,3	
5-5-a	300	17,6	156,7	58,2	62,3
5-5-c		14	173,4	66,3	
5-6-a	360	12,9	119,1	64,2	65,8
5-6-b		18,2	155	67,3	

Ek - 4 Numune No 5 Doygun

Marmara Mermer (Doygun UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
5-2-a	120	15,3	58,6	96,9	82,1
5-2-b		15	50	77,8	
5-2-c		17,1	75,4	71,7	
5-3-a	180	16,4	63,4	77,3	83,4
5-3-b		15,4	150,1	86,5	
5-3-c		14,1	63	86,4	
5-4-a	240	16,9	141,9	85,8	79,4
5-4-b		19,3	75	72,9	
5-5-a	300	16,4	88,9	55	63,7
5-5-c		15,2	115	72,4	
5-6-a	360	16,8	210,5	69,4	67,0
5-6-b		17,5	133,5	64,6	

Ek - 4 Numune No 6 Kuru

Yeşilova Kireçtaşı (Kuru UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
6-2-a	120	34,1	91	105	100,8
6-2-b		36,9	102	96,5	
6-4-a	240	33	145	88	95,1
6-4-b		28	178	102,1	
6-6-a	360	34,9	220	95	99,0
6-6-b		28,8	210	103	

Ek - 4 Numune No 6 Doygun

Yeşilova Kireçtaşı (Doygun UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
6-2-a	120	17	101	100	94,5
6-2-b		16,5	197,3	89	
6-4-a	240	18	140,2	107	98,5
6-4-b		17,9	138	90	
6-6-a	360	17,8	370	81,4	93,2
6-6-b		17,5	284	105	

Ek - 4 Numune No 7 Kuru

Karamanlı Kireçtaşı (Kuru UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
7-2-a	120	36,8	95,3	102,7	102,7
7-4-a	240	37,6	130,1	96	96
7-6-a	360	39,8	245,4	95	95

Ek - 4 Numune No 7 Doygun

Karamanlı Kireçtaşı (Doygun UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
7-2-a	120	16	131	73,2	73,2
7-4-a	240	16,5	240	63,4	63,4
7-6-a	360	16,5	323,5	56,3	56,3

Ek - 4 Numune No 8 Kuru

Amasya Kireçtaşı (Kuru UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
8-2-a	120	25,1	117	104	98,3
8-2-b		22,1	96,5	92,5	
8-3-a	180	19	138,2	100	94,0
8-3-b		20,3	110	88	
8-4-a	240	18,2	170,6	109	106,0
8-4-b		20	135	103	
8-5-a	300	26,5	240	103	34,3
8-5-b		20,3	230,7	Patladı	
8-5-c		28	320	Patladı	
8-6-a	360	27	330,5	94	47,0
8-6-b		25	330,3	Patladı	

Ek - 4 Numune No 8 Doygun

Amasya Kireçtaşı (Doygun UCS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)
8-2-a	120	16,5	125	81,5	105,7
8-2-b		19,1	131	130,0	
8-3-a	180	20	284	63,0	84,0
8-3-b		19,9	154,3	105,0	
8-4-a	240	20,3	235	Patladı	38,3
8-4-b		18,2	180	85,0	
8-4-c		18,4	230	Patladı	
8-4-d		20,5	220,4	68,2	
8-5-a	300	20	284,3	Patladı	0,0
8-5-b		21,3	230	Patladı	
8-5-c		18	255,3	Patladı	
8-6-a	360	19,1	340	Patladı	0,0
8-6-b		19	310	Patladı	
8-6-c		18,3	313	Patladı	

Ek 5. 6 kW Gücünde Mikrodalga Uygulanan Numunelerin Ölçülen Sıcaklıkları ve Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı (BTS) Verileri

Ek - 5 Numune No 1 Kuru

Niğtaş-1 Kalsit (Kuru BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
1-2-a	120	19,7	123,1	3,35	3,96
1-2-b		16,7	56,3	4,57	
1-3-a	180	19,8	158	3,31	3,23
1-3-b		20,7	141,3	3,14	
1-4-a	240	19,9	153,2	1,43	2,46
1-4-b		20,2	195	2,53	
1-4-c		15,8	116,3	3,43	
1-5-a	300	20,7	380,6	2,21	2,37
1-5-b		21,2	151,6	2,53	
1-6-a	360	20,9	98	2,2	2,56
1-6-b		16,8	350	2,72	
1-6-c		17,8	145	2,76	

Ek - 5 Numune No 1 Doygun

Niğtaş-1 Kalsit (Doygun BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
1-2-a	240	16,5	94,2	3,27	3,10
1-2-b		16,3	90,3	2,92	
1-3-a	180	16,5	139,1	3,13	3,02
1-3-b		16,6	320,4	3,04	
1-3-c		14,2	92,1	2,88	
1-4-a	240	16,4	110,4	2,59	2,34
1-4-b		16,5	155,4	1,59	
1-4-c		17,7	175	2,83	
1-5-a	300	17,1	100	2,58	2,52
1-5-b		17,4	251,1	2,46	
1-6-a	360	16,9	240,2	1,88	2,24
1-6-b		16,2	238,4	2,72	
1-6-c		16,8	158,8	2,13	

Ek - 5 Numune No 2 Kuru

Niğtaş-2 Kalsit (Kuru BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
2-2-a	120	21,5	50,8	5,19	3,76
2-2-b		20,6	69,7	3,05	
2-2-c		17,5	71,8	3,05	
2-3-a	180	22,7	78,3	2,43	2,67
2-3-b		22,9	95,2	2,5	
2-3-c		17,9	110	3,07	
2-4-a	240	21,7	98,5	2,9	2,63
2-4-b		22,6	109,3	2,07	
2-4-c		16,5	90	2,92	
2-5-a	300	22,6	109,3	2,32	2,50
2-5-b		16,8	75,6	2,68	
2-6-a	360	20,5	134,4	1,97	2,42
2-6-b		21,3	136,7	2,61	
2-6-c		17,7	127,3	2,69	

Ek - 5 Numune No 2 Doygun

Niğtaş-2 Kalsit (Doygun BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
2-2-a	120	14,5	75,8	2,55	2,88
2-2-b		14,8	175,4	3,29	
2-2-c		17	51,3	2,79	
2-3-a	180	15,5	130,6	1,84	2,39
2-3-b		15,1	121,7	2,56	
2-3-c		16,5	55,3	2,76	
2-4-a	240	14,5	102,9	2,75	2,46
2-4-b		10,5	196,9	2,17	
2-5-a	300	15,8	153,4	2,53	2,33
2-5-b		13,4	187,9	2,13	
2-6-a	360	13,8	126,9	2,36	2,19
2-6-b		17,7	141,4	2,02	

Ek - 5 Numune No 3 Kuru

Nıdaş Kalsit (Kuru BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
3-2-a	120	17,6	69,9	5,74	5,79
3-2-b		17,4	80,4	4,13	
3-2-c		17,3	46,1	7,5	
3-3-a	180	17,5	50	5,48	5,60
3-3-b		18	73,9	6,43	
3-3-c		16,6	77,1	4,89	
3-4-a	240	18,5	94,2	6,08	5,29
3-4-b		18,6	119,7	4,5	
3-5-a	300	18,5	94,2	4,7	4,64
3-5-b		18,6	119,7	4,58	
3-6-a	360	18,2	174,3	4,57	3,66
3-6-b		17,5	180	2,83	
3-6-c		15,3	120	3,59	

Ek - 5 Numune No 3 Doygun

Nidaş Kalsit (Doygun BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
3-2-a	120	15,4	60,2	4,15	4,96
3-2-b		16,9	61,3	5,37	
3-2-c		15,1	65	5,36	
3-3-a	180	15,5	67,4	6,62	5,38
3-3-b		16,3	78,9	5,17	
3-3-c		10,3	141,8	4,34	
3-4-a	240	16,2	138,5	3,9	4,53
3-4-b		16	120,4	5,16	
3-5-a	300	15,9	276,4	3,7	4,55
3-5-b		15,7	139	5,3	
3-5-c		17,4	71,3	4,66	
3-6-a	360	16,7	405,6	3,91	3,59
3-6-b		15,6	125,4	3,26	

Ek - 5 Numune No 4 Kuru

Cevher Kalsit (Kuru BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
4-2-a	120	17,5	76,3	3,86	3,43
4-2-b		15,4	47,6	2,99	
4-3-a	180	17,8	251,6	2,2	2,08
4-3-b		17,7	137,1	1,91	
4-3-c		17	260	2,13	
4-4-a	240	18,3	138,5	2,32	2,04
4-4-b		17,2	148,4	1,75	
4-5-a	300	18,5	162,5	2,18	1,94
4-5-b		16,6	189,1	2,17	
4-5-c		17,5	310	1,46	
4-6-a	360	19	287,3	1,62	2,06
4-6-b		17,7	162,7	2,58	
4-6-c		19,1	275	1,98	

Ek - 5 Numune No 4 Doygun

Cevher Kalsit (Doygun BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
4-2-a	120	15	75	2,29	3,00
4-2-b		15	58	2,94	
4-2-c		15,5	63	3,76	
4-3-a	180	16	70	3,03	2,50
4-3-b		16,1	191,9	2,09	
4-3-c		14,2	81,4	2,38	
4-4-a	240	16,3	180,7	2,64	2,29
4-4-b		16,8	132,9	1,94	
4-5-a	300	16,5	280,4	1,76	1,74
4-5-b		16,5	318,6	2,24	
4-5-c		12,3	187,4	1,21	
4-6-a	360	16,7	302,2	1,46	1,57
4-6-b		10,8	179,3	1,68	

Ek - 5 Numune No 5 Kuru

Marmara Mermer (Kuru BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
5-2-a	120	17	88,9	8,09	6,89
5-2-b		15,8	52,4	5,68	
5-3-a	180	19,1	127,5	4,99	4,98
5-3-b		16	110,3	4,96	
5-4-a	240	17,9	116,2	4,51	4,67
5-4-b		16,9	93,5	4,69	
5-4-c		13,6	158,5	4,81	
5-5-a	300	20	155	4,23	4,45
5-5-b		14,6	74,7	4,9	
5-5-c		17,5	147	4,22	
5-6-a	360	17,6	112,6	4,3	4,17
5-6-b		13,1	178,3	4,03	

Ek - 5 Numune No 5 Doygun

Marmara Mermer (Doygun BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
5-2-a	120	16,4	65,7	7,37	6,44
5-2-b		16,2	67,4	5,5	
5-3-a	180	16,8	93,4	5,87	5,97
5-3-b		17,1	106,5	6,06	
5-4-a	240	16,7	173	3,37	4,91
5-4-b		17	144	6,45	
5-5-a	300	16,6	223,7	3,55	4,32
5-5-b		15,9	146,4	5,87	
5-5-c		17,9	169,8	3,53	
5-6-a	360	16,7	143,4	4	3,71
5-6-b		15	201	3,56	
5-6-c		16,2	110	3,58	

Ek - 5 Numune No 6 Kuru

Yeşilova Kireçtaşı (Kuru BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
6-2-a	120	25,1	79,1	10,45	9,69
6-2-b		27	72,3	8,93	
6-4-a	240	25,2	125	10,84	9,355
6-4-b		24,1	213,1	7,87	
6-6-a	360	25	287	9,24	7,94
6-6-b		24	245	6,64	

Ek - 5 Numune No 6 Doygun

Yeşilova Kireçtaşı (Doygun BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
6-2-a	120	21,1	195,5	9,01	8,555
6-2-b		20	82,2	8,1	
6-4-a	240	21,3	115	7,43	6,55
6-4-b		21,2	330,1	5,67	
6-6-a	360	21,5	235	7,62	7,265
6-6-b		22	240	6,91	

Ek - 5 Numune No 7 Kuru

Karamanlı Kireçtaşı (Kuru BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
7-2-a	120	24	54,9	7,08	7,44
7-2-b		22,2	55,2	7,8	
7-4-a	240	25,1	85,3	5,4	5,53
7-4-b		21	85	5,65	
7-6-a	360	25	110	5,62	5,62

Ek - 5 Numune No 7 Doygun

Karamanlı Kireçtaşı (Doygun BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
7-2-a	120	21,2	130,2	5,14	5,33
7-2-b		21,3	75,6	5,51	
7-4-a	240	21	120,1	5,58	5,33
7-4-b		21,1	104	5,07	
7-6-a	360	20	155	4,1	4,10

Ek - 5 Numune No 8 Kuru

Amasya Kireçtaşı (Kuru BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
8-2-a	120	24,2	90,2	8,53	7,28
8-2-b		25,3	93,1	6,03	
8-3-a	180	21,0	245,8	7,85	6,83
8-3-b		21,6	274,9	5,81	
8-4-a	240	24,3	250,0	5,19	5,75
8-4-b		24,2	210,0	6,30	
8-5-a	300	21,0	510,7	4,46	4,88
8-5-b		24,5	380,0	5,29	
8-6-a	360	25,0	390,0	4,68	4,54
8-6-b		25,1	340,0	4,39	

Ek - 5 Numune No 8 Doygun

Amasya Kireçtaşı (Doygun BTS)					
Numune No	Süre (sn)	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	BTS (MPa)	Ort. BTS (MPa)
8-2-a	120	20,1	80,2	7,76	7,60
8-2-b		20,9	94,8	7,43	
8-3-a	180	19,8	85,0	7,71	6,52
8-3-b		20,2	204,2	5,32	
8-4-a	240	21,1	225,0	Patladı	6,34
8-4-b		21,3	245,2	7,17	
8-4-c		20,0	180,5	5,51	
8-5-a	300	20,1	310,0	5,35	5,67
8-5-b		19,9	220,4	5,98	
8-6-a	360	21,1	235,0	4,90	5,62
8-6-b		21,0	266,0	6,34	

