

## Orhaneli Ofiyolitinin Karbondioksit Saklama Potansiyelinin Araştırılması: Deneyel Bulgular

Hatice Ünal Ercan<sup>1</sup>, Gönenç Göcmengil<sup>2\*</sup>, Fatma Gülmez Yıldırım<sup>3</sup>, Mustafa Topkafa<sup>1</sup>,  
Ömer Ündül<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Konya, Türkiye

<sup>2</sup>Faikhbey Mescidi Sokak, İzzet Bey Apartmanı, No20a, Acibadem-Kadıköy, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul Türkiye

hunalercan@ktun.edu.tr<sup>ID</sup>, \*gonengocmengil@gmail.com<sup>ID</sup>, gulmez@itu.edu.tr<sup>ID</sup>, mtopkafa@ktun.edu.tr<sup>ID</sup>,  
undul@itu.edu.tr<sup>ID</sup>

Makale gönderme tarihi:05.04.2022, Makale kabul tarihi: 26.04.2022

### Öz

Çağımızda iklim ve ekoloji krizleri ile mücadele etmek için karbon emisyonlarının azaltılması adına yenilikçi çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Son 30 yıllık dönemde gerçekleştirilen öncü teorik çalışmalar, atmosfer-litosfer etkileşim süreçlerinin doğal bir sonucu olarak oluşan karbonat minerallerinin, atmosferik karbondioksitin kalıcı bertarafı bakımından büyük potansiyel taşıdığını göstermiştir. Bununla birlikte, atmosferik karbondioksitin jeolojik bertarafını hedefleyen yerel uygulamaların başarıyla gerçekleştirilmesi için, başta karbonatlaşmanın hangi kaya türlerinde ve hangi koşullarda en etkili biçimde gerçekleştirilebileceğine dair yaklaşımlarda bulunmak adına literatürdeki pek çok eksiliğin giderilmesine ihtiyaç vardır.

Alp-Himalaya orojenik kuşağında yer alan Türkiye, Tetis okyanusunun kalıntılarını temsil eden ofiyolit ve ofiyolitik yığışım karmaşaları bakımından oldukça zengin bir coğrafyadır. Kuzeybatı Anadolu'da Bursa-Orhaneli civarında geniş alanlarda gözlenen Orhaneli ofiyoliti tipik bir ofiyolit istifinin bazik-ultrabazik litolojilerini oluşturan dünit, harzburjit, klinopiroksenit, gabro ve serpantinlerin yanısıra, değişik boyutlarda kireçtaşı ve şist blokları ile radyolarit ve tüflerden meydana gelir. Mostra ölçeğinde çeşitli ayrışma profilleri ve alterasyon dereceleri sergileyen dünit başlıca olivin + ortopiroksen, magnetit, serpantin, talk, spinel ve kil minerallerinden oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Orhaneli ofiyoliti dünitlerinden derlenen numuneler üzerinde kesikli reaktör düzeneğinde, CO<sub>2</sub> tutma potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla reaksiyon deneylerine tâbi tutulmuşlardır. Kırıntılı ve blok olarak hazırlanan dünit örneklerinde farklı pH2-pH4 'ya sahip asit çözeltileri ilave edilerek bu çözeltilerden karbondioksit gazı geçirilmiştir. Deney örneklerinden yapılan mineralojik, petrografik, mikromorfolojik ve kimyasal analizler, numune yüzeyleri ile mikro süreksizlikler boyunca şiddetli alterasyon zonlarının gelişimi ve bu zonlarda manyezit ve siderit gibi Mg- ve Fe- karbonat minerallerinin kristallendiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, Orhaneli ofiyolitinin mostra ölçeğinde CO<sub>2</sub> saklama potansiyelinin olabileceği ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Karbondioksit saklama, kesikli reaksiyon deneyi, Orhaneli Ofiyoliti, SEM-EDX, XRD

## Investigation of Carbon Dioxide Storage Potential of Orhaneli Ophiolite: Experimental Findings

### Abstract

In our age, innovative solutions are needed to reduce carbon emissions to combat climate and ecology crises. Pioneering studies in the last 30 years have shown that carbonate minerals, which theoretically form as a natural result of atmosphere-lithosphere interaction processes, have great potential for permanent disposal of atmospheric carbon dioxide. However, there is a need for local studies in order to make approaches about which rock types and under which conditions secondary carbonation can be performed most effectively for applications of geological removal of atmospheric carbon dioxide.

Turkey, located in the Alpine-Himalayan orogenic belt, has widely distributed ophiolitic series and accretionary complexes that contain mafic-ultramafic lithologies representing the remnants of Tethys ocean(s). The Orhaneli ophiolite around Bursa, NW Anatolia, comprises of the characteristic lithologies for ophiolitic series such as dunite, harzburgite,

Research article/Araştırma makalesi  
 DOI: 10.29132/ijpas.1098481

clinopyroxenite, gabbro and serpentinites as well as various size of schist and limestone blocks with radiolarite chert and tuffs. Dunite samples, exhibiting different weathering profiles and alteration degrees, have a general mineralogical composition of olivine, orthopyroxene, magnetite, serpentine, talc, spinel and clay minerals. Within the scope of this study, batch reactor experiments were carried out on samples collected from the Orhaneli (Bursa) ophiolitic rocks to assess their potential in CO<sub>2</sub> trapping. Dunite samples were prepared as dual sets of clastic and block for reaction experiments with two different acid solutions: pH2-pH4. Mineralogical, petrographic, micromorphological and chemical findings from the experimental samples revealed the development of alteration zones covering surfaces of clast and blocks and discontinues dominated by Mg- and Fe-carbonate minerals. The findings indicate that the dunite lithologies of Orhaneli ophiolite may exhibit a high potential for CO<sub>2</sub> storage in field scale.

**Keywords:** Carbon dioxide storage, batch reaction experiment, Orhaneli Ophiolite, SEM-EDX, XRD

## GİRİŞ

Günümüzde, küresel iklim değişikliğinin doğrudan ve dolaylı etkileri sonucunda, dünya çapında farklı ülkeler çeşitli protokolleri hayata geçirerek, antropojenik karbondioksit emisyonlarını azaltmak amacıyla gerekli teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesi için uygun politik ve ekonomik zemini yaratmayı hedeflemektedir. Her geçen gün artan küresel enerji talebi nedeniyle, enerji üretimi ve atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı katlanarak artmaktadır. Son 30 yılda karbondioksit emisyonlarını azaltmak adına yönetilen jeotermal enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi farklı "yeşil" enerji türlerine ciddi anlamda yatırım yapılsa da CO<sub>2</sub> salınımları küresel iklim parametrelerinde rekorlar kırmaktadır. 2022 yılı itibariyle dünyadaki ortalama CO<sub>2</sub> konsantrasyonu tespit eden Havai Mauna Loa istasyonu 419.24 ppm CO<sub>2</sub> oranlarını tespit etmiştir. İklim değişikliğini tetikleyen karbon salınımlarında dünyada 15'inci sırada olan Türkiye, 2020 yılında yılda 366 milyon ton karbon salınımı gerçekleştirmiştir (IEA, 2022).

Paris İklim Anlaşması ile hedeflendiği üzere, 2030 yılına kadar küresel sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlandırmak istenmektedir ve bu değerler ancak atmosferik CO<sub>2</sub>'in yakalanması ve kalıcı olarak depolanması (KYD) uygulamaları ile mümkün görünmektedir. Bu nedenle KYD son yıllarda önemli bir araştırma konusuna dönüşmüştür (Pires ve diğ., 2011; Haszeldine ve diğ., 2018; Gabrielli ve diğ., 2020, Hanssen ve diğ., 2020, Gadikota, 2021). Genel olarak KYD üç farklı ana mekanizma ile gerçekleştirilebilir: i) biyolojik depolama başlıca orman, çim örtüsü ve toprakta ve deniz suyunda doğal yollarla karbondioksit depolanması ii) atmosferin karbondan arındırılmasını sağlayan teknolojilerin kullanılması ve iii) karbondioksitin jeolojik ortamlarda kalıcı olarak hapsedilmesi.

Bu çalışmanın konusunu oluşturan karbondioksitin jeolojik depolanması (KJD) süreçleri, atmosferik karbondioksitin, jeolojik bir ortamda kararlı karbonat minerallerine dönüştürülerek uzun süreli (teorik olarak sonsuza dek) depolanmasını sağlaması bakımından diğer yöntemlerden farklılık sunar (Chizmeshya ve diğ., 2005). Yöntem temelde karmaşık kaya-akışkan reaksiyonlarının taklit edilmesini esas almakta olup, bazen binlerce, bazen de milyonlarca yılda gerçekleşen jeolojik süreçlerdir (Kelemen ve diğ., 2011, DePaolo ve Cole, 2013).

Karbonatlar, deniz, kara ve tatlı su ortamlarında ve jeolojik zamanın büyük bir bölümünde var olan minerallerdir (Reeder, 1983). İki değerlikli iyonların karbonatları (örneğin Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>) tortul kayalarda birincil mineraller olarak yaygın olarak veya ikincil mineraller olarak metamorfik ve magmatik kayalarda ise genellikle daha az miktarda bulunur. En yaygın karbonat mineralleri ise, kalsit [CaCO<sub>3</sub>], siderit [FeCO<sub>3</sub>], manyezit [MgCO<sub>3</sub>], rodokrosit [MnCO<sub>3</sub>] ve dolomit [CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] tir (Reeder, 1983). Tüm bu karbonat mineralleri uygun teknolojik yöntemler kullanılarak çok kısa sürede çöktirmektedir (Haszeldine ve diğ., 2018). KJD uygulamalarında jeolojik zamanda doğal olarak gelişen reaksiyonlar taklit edilir. Bu ekso termik reaksiyonlar başlıca, doğada serbest halde bulunan magnezyum oksit (MgO) ve kalsiyum oksit (CaO) ile CO<sub>2</sub>'in birleşmesi sonucunda karbonat minerallerinin oluşmasıdır.



Süperkritik fazdaki CO<sub>2</sub>'nin yeraltı kayac oluşumlarına enjekte edilmesiyle, kayaçla tepkimeye girecek hafif asidik bir çözelti oluşturulacak ve ikincil

Research article/Araştırma makalesi  
 DOI: 10.29132/ijpas.1098481

minarellerin çözünme hızı arttırılacaktır. Bu süreçte kayaçların içerisine CO<sub>2</sub> enjeksiyonu, yerinde mineralizasyona neden olacaktır. KJD uygulamalarında fiziksel, kimyasal ve hidrolojik özelliklere ait bilgiler, rezervuar kayaçların çok fazlı akış ve reaktif kimyasal taşıma simülasyonlarını yürütmek için kritik öneme sahiptir. Kayaçlardaki mineralizasyon oranlarını belirlemek için gereken kritik veri, Ca, Mg, Fe ve Mn gibi önemli karbonat minerali oluşturan katyonların çözeltiye salınımıdır. Yerinde karbonat mineral çökmesini belirleme ve mineralizasyon kinetiğini anlama, jeolojik ayrışma koşullarını anlama gibi parametrelerin en doğru şekilde tanımlanmasını gerektirir (Schaefer ve McGrail, 2019).

Günümüzde, dünya çapındaki KYD teknolojileri kullanılarak yaklaşık 40 milyon ton/yıl CO<sub>2</sub> depolanmaktadır, fakat hedeflenen küresel sıcaklık artış değerlerine ulaşmak için 2050 yılına kadar 5.6 gigaton/yıl depolama yapılması gerektiği öngörülmekte ve bu nedenle büyük ölçekli depolama çözümü yaratılması hedeflenmektedir (Global CCS Institute, 2020). Atmosferik karbondioksitin, jeojik ortamlarda depolanması (KJD) uygulamaları bu hedefe ulaşmak için önemli bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Bu uygulamalar için uygun jeolojik ortamlar, başlıca petrol ve gaz rezervuarları, derin tuzlu su akiferleri, terkedilmiş kömür madenleri, sedimanter kaya grupları ve mafik-ultramafik kayalar olarak sınıflanabilir (Metz ve diğ., 2005; Ketzer ve diğ., 2012). Tüm bu ortamlar içinde, mafik-ultramafik kaya grupları, uzun dönem (CO<sub>2</sub>'nin uzun jeolojik süreler boyunca hapsolmesi) KJD uygulamaları bakımından çok daha yüksek potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, bu uygulamaların başarıyla gerçekleştirilebilmesi için, kaya numunelerinin mostra ölçekli fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tanımlanması başta olmak üzere, KJD potansiyellerinin belirlenmesi için deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulur. Bu nedenle uygulamaların yapılacağı alanlara özgü yerel çalışmalar tamamlanmalıdır.

Ülkemizde, geniş alanlarda yüzlek veren ofiyolitik kayalar (Robertson, 2002) KJD uygulamaları bakımından ele alan çalışmalar bulunmamaktadır. Okyanus ortası sırtlarda ve yitim üstü zonlarda gelişmiş olan ofiyolitik mafik/ultramafik kayaçlar okyanus tabanlarında ve orojenik alanlarda kıtaların üstüne yerleşmiş farklı karmaşık kaya gruplarını bünyesinde barındıran kaya

paketlerinde yer almaktadır (Moore, 1982). Ayrıca silisyum içeriği düşük olan volkanik kayalar da (bazalt, pikrit, komatayit gibi) mafik-ultramafik kaya sınıfına girmektedir. Bu kayaç gruplarında yaygın olarak bulunan mineraller plajiyoklas, piroksen ve olivindir. Olivin KYD uygulamalarında en hızlı tepkime veren mineral grubu olup, adı yapısındaki baskın iki değerlikli metal katyonunun kimliği ile belirlenir. Mg olivin forsterit, Fe olivin fayalit ve Mn olivin teforit olarak adlandırılır. Forsterit ve fayalit tam bir katı çözelti oluşturur, ancak yer yüzeyinde en yaygın bulunan olivin, iki değerlikli metal odacıklarına sahip olan ve ~%10 Fe<sup>2+</sup> içeren forsteritik olivindir (Oelkers ve diğ., 2015). Forsterit iki değerlikli metal-oksijen bağlarının göreceli zayıflığı nedeniyle en hızlı çözünen silikat mineralleri arasındadır (Velbel, 1999) ve çözünme yalnızca iyonik Mg-O bağlarının kırılmasıyla ilerler. Bu mineralin (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) karbonasyonu sonucu CO<sub>2</sub>'yi çevresel olarak uyumlu ve stabil bir mineral olan manyezite (MgCO<sub>3</sub>) dönüşümü oldukça kolaydır ve bu nedenle bölgesel olarak karbon depolama uygulamaları için büyük oranda tercih edilir (Chizmeshya ve diğ., 2005). Forsteritik olivinin çözünme hızlarını etkileyen başlıca faktörlerin 1) pH, 2) su aktivitesi, 3) sıcaklık ve 4) mineral-sıvı ara yüzey alanı olduğu görülmektedir (Oelkers ve diğ., 2018).

Bu çalışma kapsamında, literatürde pek çok çalışmaya konu olmuş Orhaneli ofiyolitine ait dunit örnekleri, kesikli reaktör düzeneğinde CO<sub>2</sub> çözeltisi ile tepkimeye sokulmuş ve reaksiyonlar sonucunda gelişen mineral türleri, bunların yayımlıları, Orhaneli ofiyolitinde yer alan dunitlerin KJD uygulamaları için potansiyelleri irdelenmiştir.

## ORHANELİ OFİYOLİTİ

Anadolu ve çevresi milyonlarca yıllık jeolojik evrimi boyunca Tetis okyanusal levhasının yok olması ve buna bağlı olarak tektonik blokların birbirine kenetlenmesi ile günümüzdeki haline kavuşmuştur (Ketin, 1966). Bu kenet bölgelerinde yer alan ve farklı okyanusal alanların kalıntılarını içeren suture zonlarının en önemlilerinden biri İzmir-Ankara-Erzincan suture zonu olarak öne çıkmaktadır. Bu alanda yer alan yığılım karmaşaları ve ofiyolitik kayaçlar uzun mesafeler boyunca takip edilebilmektedir (Şengör ve Yılmaz, 1981). Tetis okyanus tabanında oluşum, tektonik olarak Anadolu levhasının üzerine itilme ve karaların üzerinde de

Research article/Araştırma makalesi  
 DOI: 10.29132/ijpas.1098481

alterasyon süreçlerine maruz kalma sonucunda ofiyolitik kayalar çoklu bir deformasyon evrimine ve mineralleşme sürecine sahiptir (Robertson, 2002). Orhaneli Ofiyoliti masif mafik-ultramafik kaya gruplarına ve yığılma prizması parçalarına sahip olup, çoklu ofiyolit gelişim süreçleri ve mineralizasyon koşullarını anlama adına ideal bir kesit sunmaktadır (Ündül ve Tuğrul 2012; Uysal ve diğ., 2015).

Orhaneli ofiyoliti Tetis okyanusal kuşağında Kretase döneminde oluşmuş olup, farklı manto-ergiyik etkileşimi belgeleyen kimyasal süreçlerden etkilenmiştir (Uysal ve diğ., 2015; Akbulut, 2018). Okyanus tabanında gerçekleşen serpantinizasyon ve yüzeylendikten sonra gelişmiş olan alterasyon ve mineralizasyon süreçlerini de bünyesinde barındırmaktadır (Ündül ve Tuğrul 2012). Jeolojik açıdan İzmir-Ankara-Erzincan sutür zonunun batı kesiminde, Bursa güneyinde kalmakta olan Orhaneli ofiyoliti, başlıca ultramafik kümülatlar (kromit içeren dünit, verlit, lertzolit, harzburjit, piroksenit kayaları) ve daha az oranda kümülat gabro ve gabronoritlerden meydana gelmektedir (Sarıfakıoğlu ve diğ., 2009; Uysal ve diğ., 2015). Bu birim diyabaz dayklarınca kesilmekte, daha sonraki dönemlerde ise daha genç Eosen yaşlı granitik kayalarca sokuluma uğramaktadır (Harris ve diğ., 1994).

Serpantinleşme, sıvı kaybetme ve hacim genişlemesi süreçleri ile ofiyolitik kayalar, özellikle dünitik kayalar, mineraller arasındaki boşlukları ve sıvı-kaya etkileşimi ile oluştuklarından sonra da aktif bir mineralizasyon sistemi olarak çalışmaktadırlar (Kelemen ve diğ., 2020). Orhaneli ofiyoliti bu süreçlerin meydana geldiği ve doğal süreçlerin hızlı bir şekilde taklit edilebileceği ideal bir ortam olarak göze çarpmaktadır (Ündül ve Tuğrul, 2012). Bunun yanı sıra, Orhaneli ofiyolitinin Tunçbilek termik santraline yakın olması, ülkemizde termik santrallere yakın olan mafik-ultramafik kayaların karbon yakalama potansiyellerinin ortaya konması açısından önemli bir fırsat olarak öne çıkmaktadır.

Orhaneli ofiyolitinin karbon yakalama potansiyelini anlamak adına, Orhaneli ofiyolitinden elde edilmiş örnekler üzerinde petrografik çalışmalar, kesikli reaksiyon deneyleri, SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) ve XRD (X-Işını Difraktometresi) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde bu çalışmaların sonuçları verilecek ve Orhaneli ofiyolitinin karbon saklama potansiyeli tartışılacaktır.

## DENEYSEL YÖNTEMLER

### Başlangıç Malzemeleri

Saha çalışmalarında, Bursa Orhangazi Çınarcık Barajı dolaylarından yüzlek veren Orhaneli ofiyolite ait birimlerin, farklı ayrışma özellikleri gösteren seviyelerinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla derlenen sondaj karot (3 x 10 cm) numuneleri arasından mostra özelliklerine göre ayrılmamış halde bulunan, siyahımsı koyu yeşil renkli dünit örnekleri seçilmiştir. Örnek lokasyonları Ündül ve Tuğrul (2012)'de verilmektedir. Bu örneklerin seçilme sebebi, zaten altere olmuş olan örneklerle deney yapmama amacını taşımaktadır. Karot örnekleri arasında, ilksel petrografik inceleme ve mineralojik analizlere göre en az oranda alterasyona uğramış olan belirlenerek, kayaç-akışkan deneyleri için başlangıç malzemesi olarak seçilmiştir. Numune, olivin ve ortopiroksen ile spinel grubu opak mineraller bulundurur ve holokristalen-adkümülat doku sergiler. Tek nikelde, şeffaf-soluk yeşil ve camsı olarak izlenen olivinler forsterit olarak tanımlanmıştır. Tane sınırları ve çatlaklar boyunca serpantinleşme ve elek dokusunun gelişimi tipiktir. Alterasyona bağlı olarak, kısmen talk ve kil minerallerinin de geliştiği gözlenir.

Dünit numuneleri blok (1 cm<sup>3</sup>) ve kırıntı (1-5 mm) haline getirilerek ve pH 2 ve pH 4 olan sulu çözeltiler olacak şekilde ikili deney seti hazırlanmıştır. Tüm blok ve kırıntılı numuneler, aseton (x 1) ve distile su (x 3) ile yıkamaya tabi tutularak kirlilik ve tozdan arındırılmıştır (Tablo1). pH2 ve pH4' deki sulu çözeltiler hidroklorik asit (HCl) çözeltisi kullanılarak hazırlanmıştır.

### Deney Düzenegi

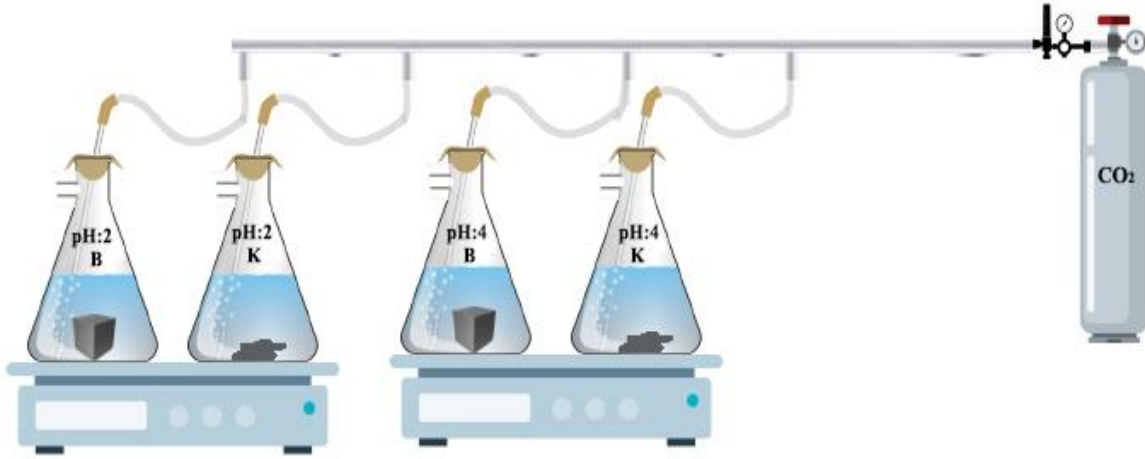
Kesikli reaktör düzeneginde yapılan kayaç-akışkan reaksiyon deneyleri, Konya Teknik Üniversitesi, Kimya Teknolojisi Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzenegi için dört erlen içine ayrı ayrı blok ve kırıntılı numuneler konulmuştur. Her bir kırıntılı ve blok örneğinin bulunduğu erlenlerin içine 100 ml farklı pH'lara sahip asit çözeltileri ilave edilerek akış hızı 1 ml/dk olan karbondioksit gazı geçirilmiş (Şekil 1) ve oda sıcaklığında manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Farklı pH'ların seçimi asitlik ve bazlık oranlarının kayalarda yapacağı tepkiler ve eski deneysel çalışmalar gözetilerek seçilmiştir. Deney 10 gün boyunca devam etmiş ve 10. günün sonunda karbondioksit gazı geçişi kapatılarak çözeltilerin pH

Research article/Araştırma makalesi  
DOI: 10.29132/ijpas.1098481

ölçümleri yapılmıştır. Numuneler oda sıcaklığında kurutulup XRD ve SEM-EDX analizleri için hazırlanmıştır.

**Tablo 1.** Karbon depolama deneylerinde kullanılan ultramaşık kayaların pH aralığını, numune yapısını ve deneyde kullanılan miktarını gösterir tablo

pH aralığı	Numune yapısı	Miktar (gr)
2	Blok (1 cm <sup>3</sup> )	~ 3.1
2	Kırıntılı (1-5 mm)	~ 4
4	Blok (1cm <sup>3</sup> )	~ 3.1
4	Kırıntılı (1-5 mm)	~ 4



**Şekil 1.** Kesikli reaktör düzeneği. Kısaltmalar: B: blok numune, K: Kırıntılı numune

### Analitik Yöntemler

Örneklere meydana gelen elementel, mineralojik ve kristalografik değişimler için çeşitli inceleme ve analizler gerçekleştirilmiştir. Birincil ve deneye girmiş numunelerde özellikle mineralojik farklılaşmayı ve değişimin büyüklüğünü değerlendirmek için hem düz hem de çapraz polarize ışık kullanan Leica DM4500P polarizasyon mikroskobu kullanarak, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mineraloji Petrografi Laboratuvarı'nda incelenmiştir.

Ayrıntılı mineralojik ve morfolojik tanımlamalar için XRD ve SEM-EDX aletleri kullanılmıştır. XRD çekimleri, Selçuk Üniversitesi, İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde, Bruker D8 Advance model cihazda, CuK $\alpha$  radyasyonu, 40 mA, 40 kV çalışma koşullarında, 0,005° tarama hızında,

0,1 sn zamanda, 0,2 mm slit aralığında ve LynxEye dedektör kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Örneklerin mikro-morfolojik özellikleri, Selçuk Üniversitesi, İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde'nde ZEISS EVO LS 10 model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak tespit edilmiştir. SEM'in çalışma koşulları, her bir element için 15 kV hızlandırma gerilimi, 5-15 mA akım ve 10-20 s sayma süresidir. Au kaplama işlemi, 2 mbar, 15 mA ve 50 s çalışma koşulları altında bir SPI-MODULE® püskürtmeli kaplayıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve ~ 150 Å kaplama kalınlığı sağlanmıştır.

## SONUÇLAR

### Karbon Reaksiyon Deney ve Gözlemleri

Yıkayıp, kurutulmuş blok ve kırıntı haldeki dünit örnekleri (Şekil 2a,b) pH2 ve pH4 çözeltilerinin bulunduğu erlenlerin içerisine yerleştirilmiş ve düzenekten karbondioksit gazı geçirilmeye başlanmıştır. Deneyler 10 gün boyunca devam etmiş çözeltilerin pH sınırın sabit tutulması için her gün pH ölçümü yapılmıştır. Çözeltilerin pH seviyelerinde meydana gelen değişiklikler tespit edildikten sonra pH seviyelerinde yeniden düzenleme hidroklorik asit kullanılarak yapılmıştır. Deneyin başlatıldığı günden itibaren her iki deney grubuna ait örneklerde ve çözeltilerde belirgin renk değişikliği meydana gelmiştir. Blok örneklerin renkleri önce yeşil deney sonunda ise kahverengi olmuştur (Şekil 2c,e). pH 2 deney grubunun çözeltilerinde renk değişimi daha belirgin olarak gerçekleşmiştir. Beklendiği üzere kırıntılı örneklerde hem numunelerde hemde çözeltilerde renk değişimi blok örneklere oranla daha hızlı ve fazla miktarda gerçekleşmiştir (Şekil 2d,f). Kırıntılı örnekler blok örneklere oranla daha koyu kahverengidir.

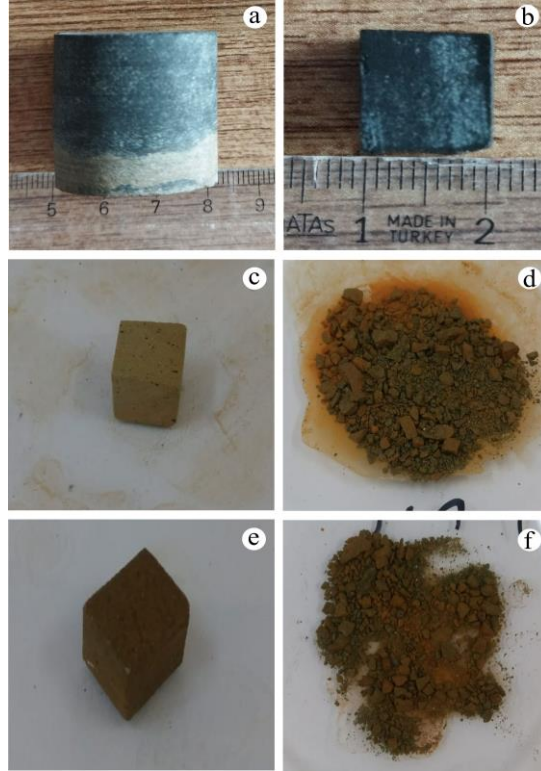
Deneyin 10. günü tamamlandıktan sonra deney düzeneği kapatılmış ve deney sonlandırılmıştır. Örnekler oda sıcaklığında iki gün kurutulmuş ve blok

örneklerinde meydana gelen değişimin kalınlığının belirlenmesi için bloklar kırılmıştır. Her iki numunede de farklılaşmanın numune yüzeyinden içe doğru yaklaşık 1 mm'lik bir kalınlıkta meydana geldiği tespit edilmiştir.

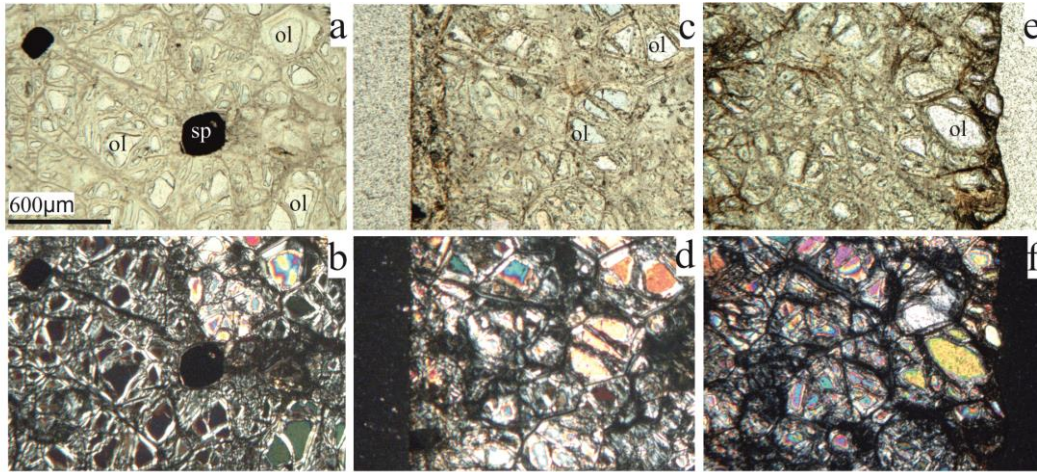
### Petrografik Bulgular

Başlangıç malzemesi olarak kullanılan dünit örneğinde olivinlerin tek ve çift nikol görüntülerinin oldukça temiz ve alterasyon izleri taşımadıkları gözlenmiştir (Şekil 3a,b). Deneylere tabi tutulan örneklerin yüzeyinde koyu kırmızımsı-kahve rengi ile belirgin bir iddingsit zarfın geliştiği gözlenmiştir. Blok numunelerde bu zarf, örnek yüzeyinden itibaren, yüzey morfolojisine bağlı olarak değişken olmakla birlikte, azami 50 µm kalınlık sergilemektedir (Şekil 3c-f). Kırıntılı numunelerde, kırıntıların yüzeyinden içeri doğru koyu kahverengiden, açık kahve, kahvemsı bej renge tedrici bir geçiş olduğu gözlenir (Şekil 4). Ayrıca, ikincil mineralizasyon gelişiminin sadece kırıntı yüzeylerinde sınırlı kalmayıp, muhtemelen kırma işlemine bağlı olarak kayada ve minerallerde oluşan ayrık süreksizlikler ve çatlaklar boyunca geliştiği de gözlenmiştir. Özellikle forsterit tanelerinin çevresinde ve çatlaklarda koyu renkli mineral gelişimi tipiktir (Şekil 4 a,c).

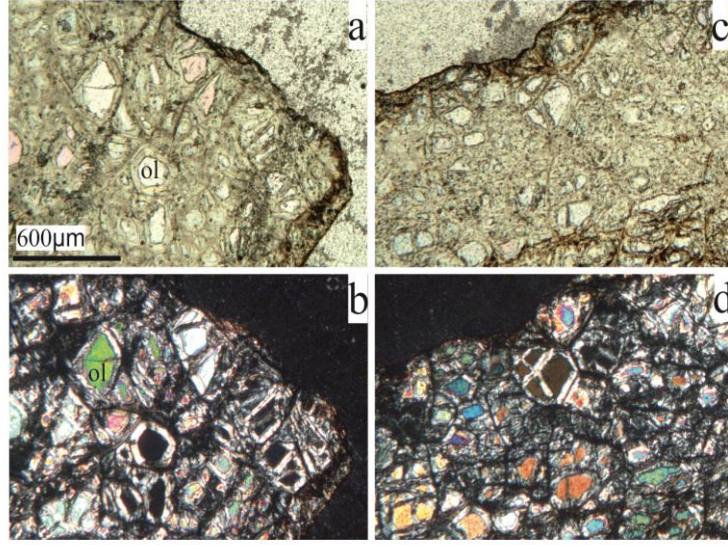
Research article/Araştırma makalesi  
DOI: 10.29132/ijpas.1098481



**Şekil 2.** Orhaneli ofiyolitine ait dünit kayasının karbon deneyi öncesi ve sonrası görüntüleri a) Dünit karotu b) karbon deneyine girmemiş blok numune c) pH2 de işlem görmüş blok numune d) pH2 de işlem görmüş kırıntılı numune e) pH4 de işlem görmüş blok numune f) pH4 de işlem görmüş kırıntılı numune



**Şekil 3.** Başlangıç malzemesi olarak kullanılan dünit örneğinde olivinlerin a) tek ve b) çift nikolde genel görünümü. pH4 çözelti ile tepkimeye sokulan dünit blokunun c) tek nikol ve d) çift nikolde görünümü. pH2 çözelti ile tepkimeye sokulan dünit blokunun e) tek ve f) çift nikolde görünümü (4x büyütme) (Kısaltmalar: ol, olivin; sp, spinel).



**Şekil 4.** Reaksiyon deneylerine tâbi tutulan kırıntılı dünit numunelerinde gelişen reaksiyon zonlarının genel görünümleri a) pH4 çözelti ile tepkimeye sokulan kırıntılıların tek nikol ve b) çift nikol görünümleri c) pH2 çözelti ile tepkimeye sokulan kırıntılıların tek nikol ve d)çift nikol görünümleri (Kısaltmalar: ol, olivin)

#### Mineralojik Bulgular

Kesikli reaksiyon sistemi ile gerçekleştirilen akışkan: Kaya oranı ve süre varyasyonlarına dayalı olan dünit karbon depolama deneylerinde dahi kolaylıkla gözlemlenebilecek kapsamda makroskopik ve mikroskobik değişiklikler gerçekleşmiştir (Şekil 4). İki ana bölüme ayrılmış deney düzeneğine yerleştirilmiş kırıntılı ve blok örnekler üzerinde meydana gelen değişim ve ikincil mineral kristallenmeleri XRD çözümlenmelerinde tespit edilmiştir ve SEM analizlerine ait mikromorfolojik görüntülerde farklı mineral formlarında görüntülenmiştir.

Yapılan XRD çözümlenmelerinde başlangıç (P1) örneğinin mineralojik bileşiminin serpantin grubuna ait antigorit ( $Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$ ) ve lizardit ( $Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$ ) ile olivin grubuna ait forsterit ( $Mg_2SiO_4$ ) mineralleri tespit edilmiştir (Şekil 5). Deney örneklerinin XRD çözümlenmelerinde ise karbonik asitle muamele gören dünit minerallerinin mineralojik bileşiminde meydana gelen alterasyon ve ikincil kristal oluşumlarını ortaya konulmuştur (Şekil 5). Bu numunelerin tamamında P1 örneğinde olduğu gibi antigorit, lizardit, forsterit mineralleri tespit edilmiş olup bu minerallere ikincil karbonat mineralleri eşlik etmektedir (Şekil 5).

Tespit edilen bu ikincil karbonat mineralleri, kesikli reaksiyon deneylerinin ürünleri olan siderit ( $FeCO_3$ ) ve magnesit ( $MgCO_3$ ) mineralleridir. pH2 -

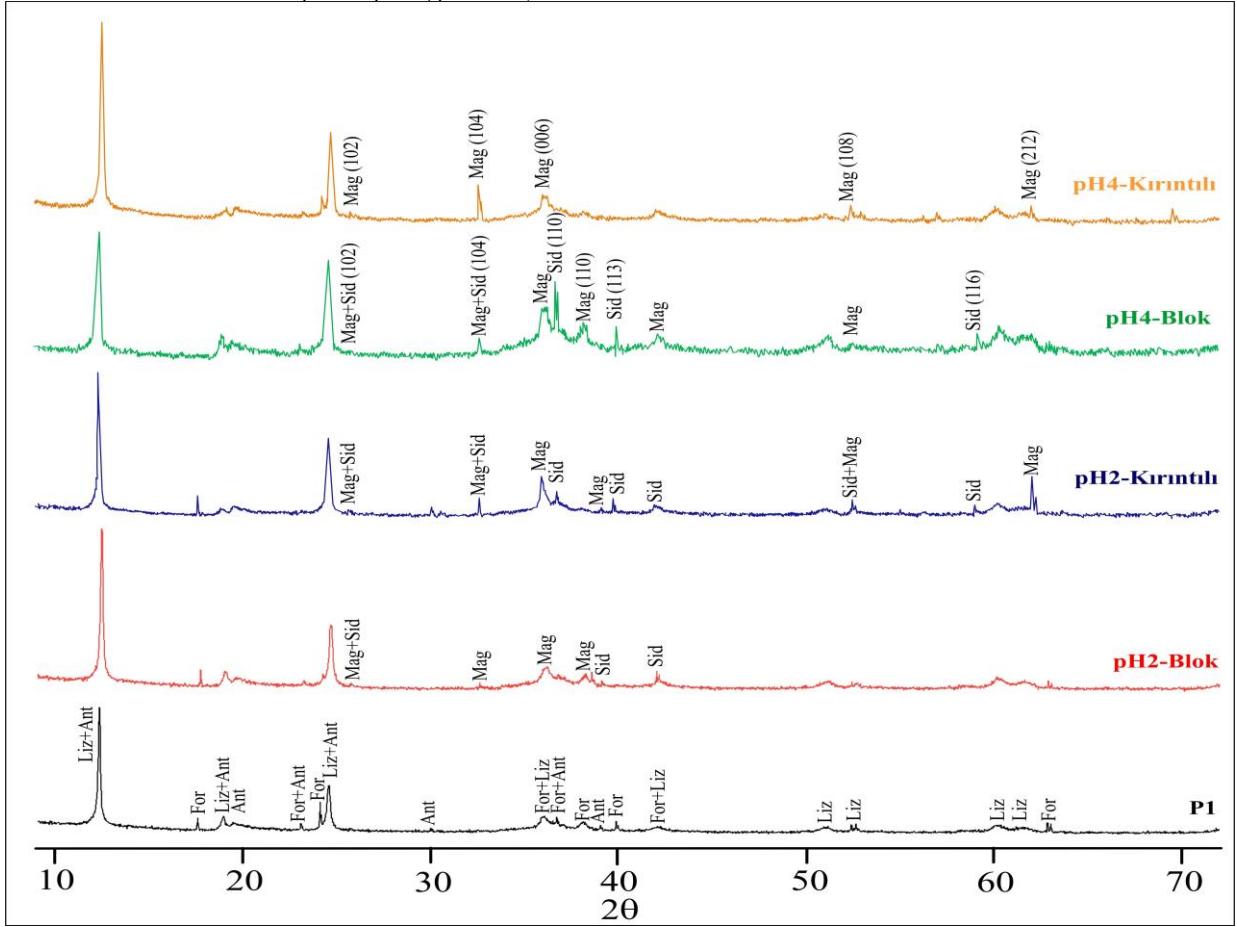
blok ve -kırıntılı numunelerinde magnesit mineraline ait (104), (110), (204) düzlemleri, siderit mineraline ait (102), (110), (212) yüzeylerine ait pikler tespit edilmiştir. pH4 -blok -kırıntılı numunesine ait X-ışınları çözümlenmelerinde magnesit mineraline ait (102), (104), (110), (202), (116) ve (108) düzlemleri ve siderit mineraline ait (102), (104), (110), (108), (204), (116) yüzeylerine ait pikler tespit edilmiştir (Şekil 5).

Yapılan SEM ve EDX incelemeleri ile örneklerin mikromorfolojik özellikleri ortaya konmuş ve elementel içerikleri belirlenmiştir. P1 örneğine ait SEM görüntüsünde forsterit minerali görüntülenmiştir (Şekil 6a). Bu mineralden alınan EDX verilerinden elde edilen Mg, Fe, Si ve O elementel bileşim değerleri sırasıyla 21.36 %, 3.77%, 14.77% ve 56.74% olarak belirlenmiştir (Şekil 6a). EDX analizinde P1 örneğinin C içeriği ise 4.26% olarak tespit edilmiştir. pH2-blok numunesinin SEM incelemelerinde gelişmiş güzel çatlaklar bulunan olivin minerali tespit edilmiştir bu örnekte karbonat minerali gözlenmemiştir (Şekil 6b). Yapılan EDX analizinde ise elementel bileşiminin P1 örneğinden farklı Mg, Fe, Si, O ve C elementel içeriğe sahip olduğu ve elementel bileşim değerlerinin sırasıyla 9.36 %, 3.71%, 7.08%, 75.49% ve 4.06% olduğu ölçülmüştür (Şekil 6b). pH2-kırıntılı örneğine ait SEM analizlerinden elde edilen görüntülerde ışınal ikincil magnesit minerali tespit edilmiştir ve EDX

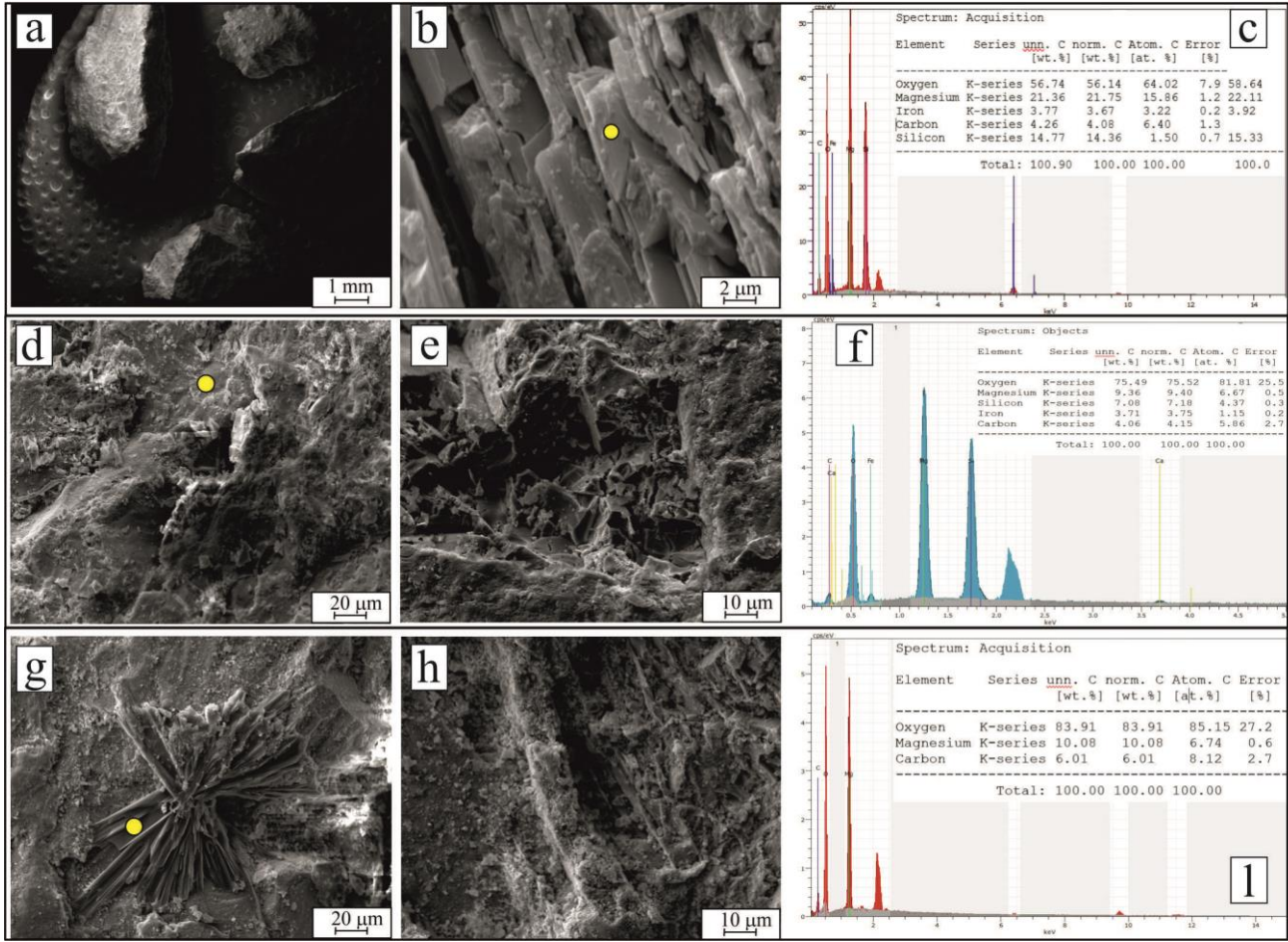


Research article/Araştırma makalesi  
DOI: 10.29132/ijpas.1098481

analizin de Mg, O ve C element içerikleri 10.08%,  
83.91% ve 6.01% olarak ölçülmüştür (Şekil 6c).



**Şekil 5.** Dünit ve karbon depolama deneyine girmiş örneklerin X-ışınları kırınımı çözümlenmeleri. P1 örneği, reaksiyona sokulmamış örneği temsil etmektedir. For: Forsterit, Ant: Antigorit, Liz: Lizardit, Mag: Magnesit, Sid: Siderit



**Şekil 6.** Örnekler için SEM görüntüleri ve EDX verileri, a) Sol: distile su ve aseton ile yıkanmış kurutulmuş örnekler. b) P1 örneği forsterit minerali mikromorfolojik görüntüsü. c) EDX analiz sonucu, d ve e) Sol ve Orta: pH2-Blok örneğine forsterit mineraline ait görüntüler. f) EDX analiz sonucu, g) Sol: pH2-Kırıntılı örneğine ışınal magnesit minerali görüntüsü. h) Aynı örneğe ait mikrokristalen Fe-veya Mg- karbonat çökeltileri. i) Işınal magnesit mineraline ait EDX analiz sonucu. Sarı noktalar EDX analizinin yapıldığı noktaları göstermektedir

Ayrıca örnek yüzeyi boyunca yayılmış özşekilsiz ikincil mineral oluşumlarından yapılan EDX analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. pH4-blok numunesinin SEM gözlemlerinde olivin minerali tespit edilmiş olup mineral yüzeyinde ikincil mineral oluşumlarının oldukça sınırlı geliştiği gözlenmiştir. Bu örnekten elde edilen EDX ölçümlerinden Mg, Fe, Si, O ve C element içeriklerinin sırasıyla 8.09%, 2.84%, 5.39%, 78.93% ve 4.75% olduğu belirlenmiştir (Şekil 7a). pH4-kırıntılı örneğine ait SEM görüntülerinden olivin minerali üzerinde özşekilsiz mineral kümeleri ve özşekilli kübik yapılar belirlenmiştir. Kristallerden yapılan EDX ölçümlerinde bu minerallerin Mg, Fe, Si, O ve C elementel bileşiminin sırasıyla 7.82%,

4.07%, 6.75%, 76.98% ve 5.01% olduğu belirlenmiştir. Kübik kristallerden yapılan EDX ölçümlerinde ise Mg, O ve C element içeriklerinin sırasıyla 12.12%, 80.31% ve 7.57% olduğu ölçülmüştür (Şekil 7b).

## TARTIŞMA

Deney örneklerinde yapılan makroskobik gözlemlerde oldukça belirgin yüzey değişikliği meydana geldiği belirlenmiştir. Siyahımsı renkli kayacın önce yeşil sonra ise kahverengiye dönüşümü aşamalı olarak tespit edilmiştir (Şekil 2). Bu deneyin başlangıç aşamasında ve devamında gerçekleşen reaksiyonların ve element salınımının farklı olduğunu ortaya koymaktadır ki bu forsterit mineral

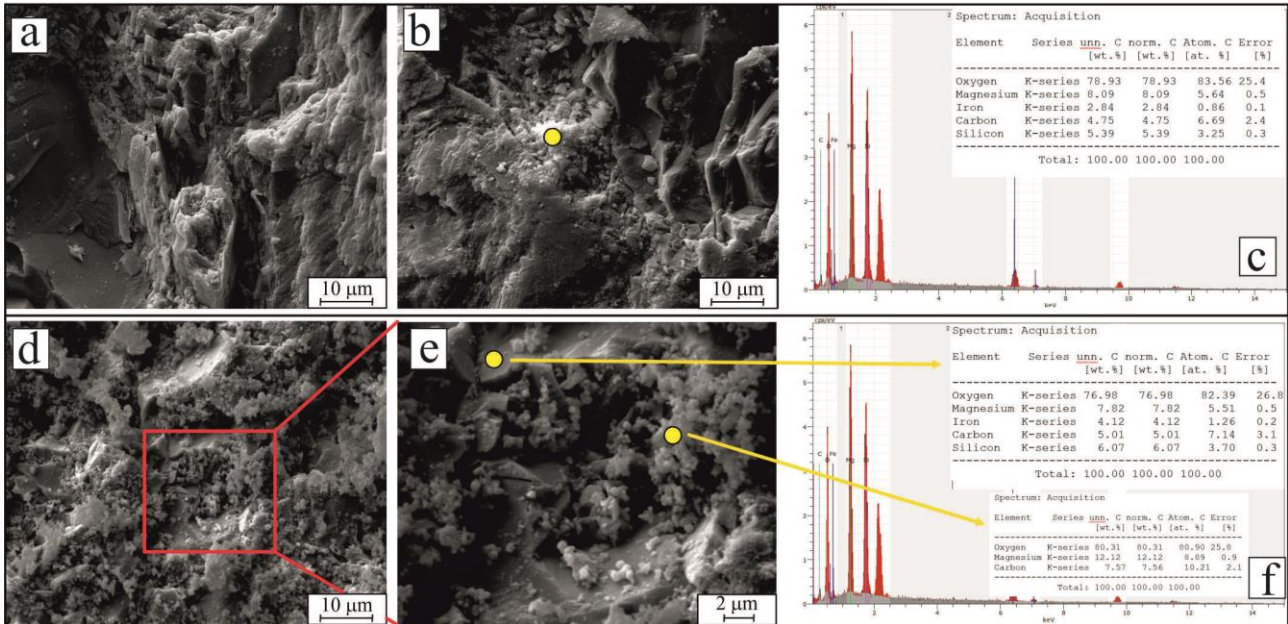
Research article/Araştırma makalesi  
DOI: 10.29132/ijpas.1098481

yüzeylerinin reaktivitesinin uzamsal olarak heterojen oluşundan kaynaklanır (Oelkers ve diğ., 2018). Deneyden beklendiği üzere, alterasyon gelişimi daha asidik çözeltiliye kıyasla pH4 örneklerinde daha düşük gerçekleşmiştir. Ayrıca kırıntılı örnekler için SEM görüntüleri olivinlerde belirgin çözünme izleri ve çukurların geliştiğini ortaya çıkarmıştır. Artan yüzey alanı ve düşük pH, numunelerin minerallerin daha hızlı bir şekilde çözünmesine neden olmuştur. Forsterik olivin çözünme hızları üzerinde yapılan deneyler de bunu kanıtlar şeklinde düşük pH ve artan mineral-sıvı ara yüzeyinin olivin minerali üzerinden element salınımını artırdığını göstermektedir (Oelkers ve diğ., 2018).

XRD ve SEM analizleri de petrografik incelemeleri ile oldukça tutarlı olup olivin minerali ile serpantin mineralleri ve eser miktarda ikincil mineraller tanımlanmıştır. Tespit edilen ikincil mineraller olasılıkla deneylerle ilişkili olarak gelişen ve kimyasal çökeltim ürünü olan magnetit ve siderit mineralleridir. SEM gözlemlerinde, olivin mineralinin yanında amorf veya mikrokristalin Mg-veya -Fe karbonatların bir karışımı olan, ayırt edilebilir bir şekilde sahip olmayan kristaller gözlenmiştir. Belirgin kristal şekillerin oldukça az

gözlenmesine rağmen EDX çözümlerinden elde edilen yüksek Mg, Fe, O element içerikleri de potansiyel olarak XRD ölçümlerinde tanımlanan Mg-ve Fe- karbonatlara ait verileri desteklemektedir. Ayrıca EDX analizlerinden elde edilen bir diğer önemli sonuç ise, P1 örneğine kıyasla deney örneklerinin C ve O element içeriklerinin daha yüksek oluşudur. C ve O elementlerindeki bu artış olası karbonat minerallerinin tutunumunu işaret ettiği yönünde yorumlanmıştır.

Olivin gibi silikat minerallerinin sulu çözeltiler ile etkileşimi durumunda oluşacak ikincil mineraller, bu minerallerin yapısında bulunan metal-oksijen bağlarının türüne bağlıdır (Brantley, 2008; Schott ve ark., 2009). Örneklerde tespit edilen forsterit yapısı magnezyum atomları ile bağlanan silikon-oksijen tetrahedrallerinden oluşur. Forsterit iki değerlikli metal-oksijen bağlarının görece zayıflığı nedeniyle en hızlı çözünen silikat mineralleri arasındadır ve çözünme yalnızca iyonik Mg-O bağlarının kırılmasıyla ilerler (Velbel, 1999). Özetle, forsteritik olivin yapısında bulunan deney örneklerinde Mg-O ve kısmen Fe-O ikamelerin hâkim olduğu ve karbonik asitle muamele ile Fe ve Mg -O çiftlerin etkilendiği ve çözeltiliye geçtiği söylenebilir.



Şekil 7. Örneklere ait SEM görüntüleri ve EDX verileri, a) pH4-Blok örneği forsterit minerali SEM görüntüsü. b) Forsterit minerali üzerinde gelişmiş özşekilsiz kristal kümesi, c) Kristal kümelerine ait EDX analiz sonucu, d ve e) Sol-

Research article/Araştırma makalesi  
 DOI: 10.29132/ijpas.1098481

orta: pH4-Kırıntılı örneği forsterit minerali üzerinde mikrokristalen Fe-veya Mg- karbonat çökelleri görüntüsü. f) pH4-Kırıntılı EDX analiz sonucu. Sarı noktalar EDX analizinin yapıldığı noktaları göstermektedir

## SONUÇLAR

Kuzeybatı Anadolu'da Bursa ili civarında yayılım gösteren Orhaneli ofiyolitinden alınan dünite ait kırıntılı ve blok örnekleri üzerinde pH2 ve pH4'te CO<sub>2</sub> gazı geçirilerek bu kayacın karbon depolama potansiyeli araştırılmıştır. Deney öncesi ve deneyden sonra uygulanan XRD ve SEM-EDX incelemeleri sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Genel olarak karbon depolama çalışmalarında gereken iki değerlikli katyonlar için potansiyel bir kaynak malzeme olan forsteritik olivin mineralinde meydana gelen değişim ve mineralden Mg ve Fe elementlerinin çözeltilmeye salınımı ile ilişkili Mg- ve Fe- karbonat minerallerinin çökelişi literatürde açıklananlarla uyumludur.

Orhaneli ofiyolitine ait dünitin üzerinde gerçekleştirilen CO<sub>2</sub>-deneyleri sonucunda elde edilen mineralojik, mikromorfolojik ve kimyasal sonuçları birleştirilerek, CO<sub>2</sub>'nin mevcut mineral topluluğu üzerinde oldukça etkili olduğu ve sıvı-kayaçların etkileşimleri sonucunda CO<sub>2</sub>'in karbonatlaşırabilmesi için muhtemelen potansiyel bir kaynak malzeme olduğunu ortaya koymaktadır.

Söz konusu veriler Orhaneli ofiyolitinin mineralojik olarak karbon depolama çalışmaları için yüksek potansiyel taşıdığını göstermekte olup, Türkiye'de termik santrallere yakın arazilerde konumlanmış olan mafik-ultramafik alanların karbon depolama potansiyelleri detaylı saha ve laboratuvar çalışmaları ile belirlenmelidir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar bu makale ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması bildirmemektedir.

## ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİĞİ BEYANI

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

## KAYNAKLAR

Agrawal, A. K., Mehra, A. (2020). Dunit carbonation in batch-tubular reactor, Environmental Science and Pollution Research, 1-7 31439-31445.  
 Akbulut, M. (2018). Investigation of silicate micro-inclusions from Orhaneli and Harmancik chromitites (NW Turkey): New ultrahigh-pressure evidence from

Western Tethyan ophiolitic chromitites. Ofioliti, 43(1), 1-22.  
 DePaolo, D. J., Cole, D. R. (2013). Geochemistry of geologic carbon sequestration: an overview, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 77(1), 1-14.  
 Elidemir, S., Güleç, N. (2018). Geochemical characterization of geothermal systems in western Anatolia (Turkey): implications for CO<sub>2</sub> trapping mechanisms in prospective CO<sub>2</sub>-EGS sites, Greenhouse Gases: Science and Technology, 8(1), 63-76.  
 Harris, N. B., Kelley, S., & Okay, A. I. (1994). Post-collision magmatism and tectonics in northwest Anatolia. Contributions to Mineralogy and Petrology, 117(3), 241-252.  
 Gadikota, G. (2021). Carbon mineralization pathways for carbon capture, storage and utilization, Communications Chemistry, 4(1), 1-5.  
 Gabrielli, P., Gazzani, M., & Mazzotti, M. (2020). The role of carbon capture and utilization, carbon capture and storage, and biomass to enable a net-zero-CO<sub>2</sub> emissions chemical industry. Industrial & Engineering Chemistry Research, 59(15), 7033-7045.  
 Hanssen, S. V., Daioglou, V., Steinmann, Z. J. N., Doelman, J. C., Van Vuuren, D. P., & Huijbregts, M. A. J. (2020). The climate change mitigation potential of bioenergy with carbon capture and storage. Nature Climate Change, 10(11), 1023-1029.  
 Haszeldine, R. S., Flude, S., Johnson, G., & Scott, V. (2018). Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2119), 20160447.  
 IEA (2022), Global Energy Review: CO<sub>2</sub> Emissions in 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>.  
 Kelemen, P. B., Matter, J. (2008). In situ carbonation of peridotite for CO<sub>2</sub> storage, Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(45), 17295-17300.  
 Kelemen, P. B., Matter, J., Streit, E. E., Rudge, J. F., Curry, W. B., Blusztajn, J. (2011). Rates and mechanisms of mineral carbonation in peridotite: natural processes and recipes for enhanced, in situ CO<sub>2</sub> capture and storage, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 39, 545-576.  
 Kelemen, P. B., McQueen, N., Wilcox, J., Renforth, P., Dipple, G., Vankeuren, A. P. (2020). Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO<sub>2</sub> removal from air: Review and new insights, Chemical Geology, 550, 119628.

Research article/Araştırma makalesi  
DOI: 10.29132/ijpas.1098481

- Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun tektonik birlikleri. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 66(20).
- Ketzer J.M., Iglesias R.S., Einloft S. (2012). Reducing Greenhouse Gas Emissions with CO<sub>2</sub> Capture and Geological Storage, In: Chen WY., Seiner J., Suzuki T., Lackner M. (eds) Handbook of Climate Change Mitigation. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7991-9\\_37](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7991-9_37)
- Kwak, J. H., Hu, J. Z., Hoyt, D. W., Sears, J. A., Wang, C., Rosso, K. M., Felmy, A. R. (2010). Metal carbonation of forsterite in supercritical CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O using solid state <sup>29</sup>Si, <sup>13</sup>C NMR spectroscopy, The Journal of Physical Chemistry C, 114(9), 4126-4134.
- Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H. (Eds.). (2005). Carbon dioxide capture and storage: special report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press.
- Park, A. H. A., Fan, L. S. (2004). CO<sub>2</sub> mineral sequestration: physically activated dissolution of serpentine and pH swing process, Chemical Engineering Science, 59(22-23), 5241-5247.
- Pires, J. C. M., Martins, F. G., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Simões, M. (2011). Recent developments on carbon capture and storage: an overview. Chemical engineering research and design, 89(9), 1446-1460.
- Robertson, A. H. (2002). Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region. Lithos, 65(1-2), 1-67.
- Sarifakioğlu, E., Özen, H., Winchester, J. A. (2009). Whole rock and mineral chemistry of ultramafic-mafic cumulates from the Orhaneli (Bursa) ophiolite, NW Anatolia. Turkish Journal of Earth Sciences, 18(1), 55-83.
- Uysal, I., Akmaz, R. M., Kapsiotis, A., Demir, Y., Saka, S., Aycı, E., & Mueller, D. (2015). Genesis and geodynamic significance of chromitites from the Orhaneli and Harmancık ophiolites (Bursa, NW Turkey) as evidenced by mineralogical and compositional data. Ore Geology Reviews, 65, 26-41.
- Ündül, Ö., ve Tuğrul, A. (2012). The influence of weathering on the engineering properties of dunites. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45(2), 225-239.