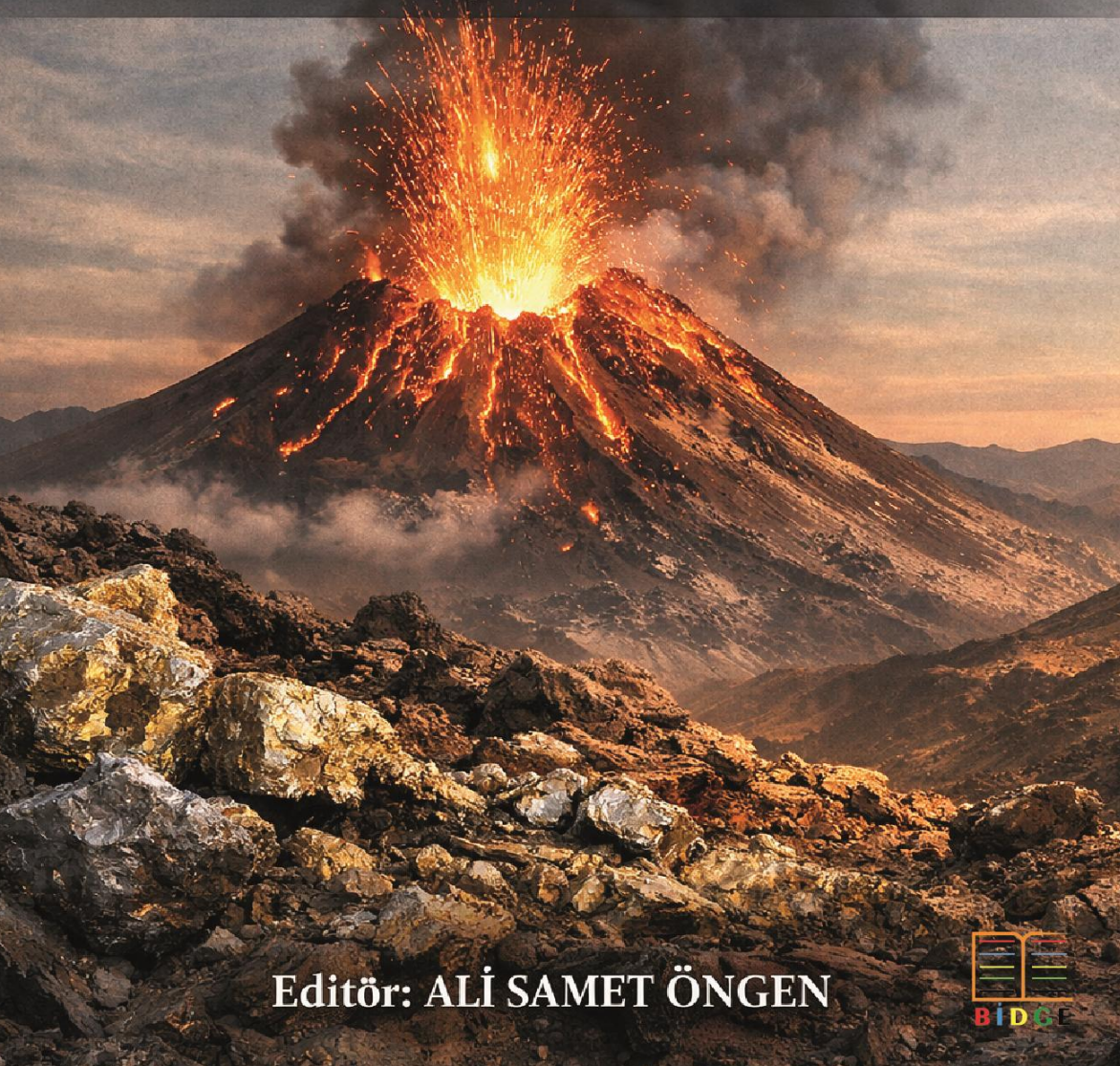


YER BİLİMLERİNDE
TEMATİK YAKLAŞIMLAR:
MAGMATİK SİSTEMLER
VE
CEVHERLEŞME MODELLERİ



Editör: ALİ SAMET ÖNGEN



BİDGE Yayınları

Yer Bilimlerinde Tematik Yaklaşımlar: Magmatik Sistemler ve
Cevherleşme Modelleri

Editör: Ali Samet Öngen

ISBN: 978-625-8995-06-0

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 22.03.2026

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

OFİYOLİTİK BİRİMLERDE MANYEZİTLEŞME SÜREÇLERİ: OLUŞUM MODELLERİ VE MİNERALOJİK KARAKTERİZASYON	4
İREM AKSOY	4
METALİK MADEN ARAMACILIĞINDA BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK YENİLİKLER: MİNERAL SİSTEMLERİ, VERİ BİLİMİ VE İLERİ DÜZEY ARAMA YAKLAŞIMLARI.....	32
İREM AKSOY	32
TİJEN ÜNER	32
METAMORFİK MASİFLERDE DEMİR CEVHERLEŞMESİ VE ÇOK EVRELİ OLUŞUM MODELLERİ:BİTLİS MASİFİ (GÖRENTAŞ-ÇATAK, VAN).....	61
TİJEN ÜNER	61
RİYOLİTİK MAGMALAR VE LAV AKINTILARI: FİZİKSEL SÜREÇLER, MORFOLOJİK DİNAMİKLER VE LİTOLOJİK ÖZELLİKLERİ.....	82
RECEP UĞUR ACAR	82
VOLKANİK KAYAÇLARLA İLİŞKİLİ MADEN YATAKLARI VE CEVHERLEŞMELER:.....	105
RECEP UĞUR ACAR	105

OFİYOLİTİK BİRİMLERDE MANYEZİTLEŞME SÜREÇLERİ: OLUŞUM MODELLERİ VE MİNERALOGİK KARAKTERİZASYON

İREM AKSOY¹

Giriş

Manyezit ($MgCO_3$), doğada çoğunlukla ultramafik kayaların alterasyonu ile ilişkili olarak gelişen ve magnezyumun en önemli karbonat minerallerinden biri olarak kabul edilen stratejik bir hammaddedir. Teorik bileşimi yaklaşık %47,8 MgO ve %52,2 CO_2 olan bu mineral, yüksek ergime sıcaklığı, kimyasal kararlılığı ve refrakter özellikleri nedeniyle uzun yıllar boyunca özellikle refrakter sanayisinin temel girdilerinden biri olmuştur (Pohl, 1990). Bununla birlikte, manyezit günümüzde yalnızca ekonomik ve endüstriyel açıdan değil, aynı zamanda küresel karbon döngüsü, su-kayaç etkileşimleri ve karbon yakalama ve depolama teknolojileri (CCS) bağlamında da önemli bir jeokimyasal araştırma konusu haline gelmiştir (Power ve ark., 2013).

Ultramafik kayalarla ilişkili manyezit oluşumları, özellikle ofiyolitik birimlerde yaygın olarak gözlenmekte ve çoğu durumda

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9969-0627

serpantinleşme, karbonatlaşma ve hidrotermal alterasyon süreçleriyle yakın ilişki göstermektedir. Bu nedenle manyezit yatakları, yalnızca ekonomik jeoloji açısından değil, aynı zamanda manto kökenli kayaçların yüzeye yerleşmesini takiben geçirdiği ikincil dönüşümlerin anlaşılması bakımından da önemli kayıtlar sunmaktadır. Özellikle peridotitik kayaçların CO₂ bakımından zengin akışkanlarla etkileşimi sonucunda gelişen manyezitleşme süreçleri, doğal karbon mineralizasyonunun en dikkat çekici örneklerinden birini oluşturmaktadır (Kelemen ve ark., 2011).

Türkiye, geniş ofiyolitik kuşakları ve bunlar içerisinde gelişmiş önemli manyezit oluşumları ile bu konuda dikkate değer bir jeolojik laboratuvar niteliğindedir. Özellikle Eskişehir-Kütahya-Bilecik (EKB) provensi, kriptokristalin manyezit yataklarının gelişimi bakımından hem ulusal hem de uluslararası ölçekte öne çıkan alanlardan biridir (Kahya ve Kuşcu, 2014; Ece, Matsubaya ve Çoban, 2005). Bu yönüyle Türkiye’deki ofiyolit ilişkili manyezit oluşumları, mineralojik çeşitlilikleri, dokusal özellikleri ve oluşum mekanizmaları bakımından ayrıntılı biçimde değerlendirilmesi gereken önemli doğal sistemlerdir.

Kristal Yapı ve Sınıflandırma

Manyezit (MgCO₃), kalsit izoyapısal grubunun bir üyesi olup trigonal kristal sisteminde, R-3c uzay grubunda kristallenir. Kristal yapısı, CO₃²⁻ gruplarının Mg katmanları ile c eksenini boyunca düzenli biçimde ardalanmasından oluşur (Reeder, 1983). Bu yapısal özellik, manyezitin fiziksel ve optik özelliklerinin yanı sıra, diğer karbonat mineralleriyle olan ilişkisini de belirlemektedir.

Manyezit yatakları, literatürde başlıca dokusal ve genetik özelliklerine göre iki ana grupta ele alınmaktadır. Bunlardan ilki kriptokristalin manyezitlerdir. Bu tip yataklar, genellikle “mat”, “porselenimsi” veya kompakt dokulu olarak tanımlanmakta; optik mikroskop altında ayırt edilmesi güç, son derece ince taneli

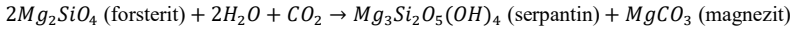
kristallerden oluşmaktadır. Kristal boyutları çoğunlukla 1–10 µm arasında değişmekte olup, bu dokusal özellik hızlı çökelme kinetiği ve sınırlı kristal büyümesi ile ilişkilendirilmektedir (Abu-Jaber ve Kimberley, 1992). Kriptokristalin manyezitler çoğu zaman yüksek saflıkta gelişmekte ancak çökelme ortamındaki silis aktivitesine bağlı olarak opal-CT, sepiyolit ve kuvars gibi fazlarla birlikte bulunabilmektedir (Yeniyol, 1982). İkinci grup ise kristalin ya da spatik manyezitlerdir. Bu tip yataklar genellikle iri kristalli, rombohedral dilinimli ve makroskobik olarak kalsiti andıran bir görünüme sahiptir. Kristalin manyezitler sıklıkla dolomit ve kireçtaşı gibi karbonatlı kayaçların bölgesel metamorfizma, metasomatizma veya hidrotermal süreçler sonucunda magnezyumca zenginleşmesiyle oluşmaktadır (Möller, 1989). Bu tür oluşumlarda Fe-Mg yer değiştirmesi yaygın olup siderit-manyezit katı çözelti serisine doğru gelişebilen bileşimsel değişimler, cevherin endüstriyel kalitesini doğrudan etkileyebilmektedir.

Ofiyolitler ve Karbonatlaşma Jeokimyası

Manyezit yatakları ile ofiyolitik istiflerin ultramafik üyeleri arasında güçlü bir mekânsal ve genetik ilişki bulunmaktadır. Özellikle dünit ve harzburgit gibi olivin ve piroksen bakımından zengin peridotitler, manyezitleşme için uygun jeokimyasal zemin sağlamaktadır. Bu kayaçların yüzey ve yüzeye yakın koşullarda CO₂ içeren akışkanlarla etkileşimi sonucunda gelişen karbonatlaşma süreçleri, ultramafik kayaçların ikincil dönüşümünde temel bir rol oynamaktadır. Türkiye’de Eskişehir-Kütahya-Bilecik provansı, Neotetis evrimi sırasında yerleşmiş ultramafik kayaçlar içinde gelişen kriptokristalin manyezit oluşumları bakımından en karakteristik örneklerden birini sunmaktadır (Kahya ve Kuşcu, 2014; Ece, Matsubaya ve Çoban,2005).

Ultramafik kayaçalarda manyezitleşme çoğu zaman serpantinleşme ile ya da onu izleyen aşamalarda gelişmektedir. Bu

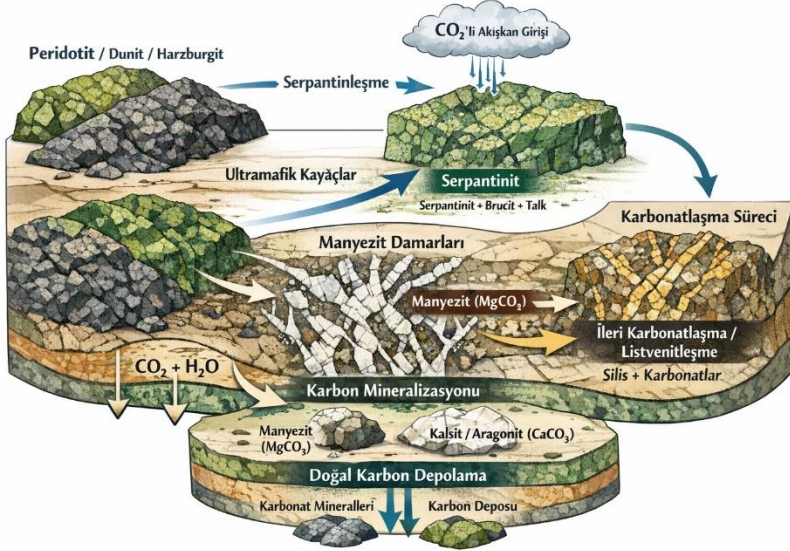
bağlamda temel süreç, Mg bakımından zengin silikat minerallerinin CO₂ taşıyan akışkanlarla reaksiyona girmesiyle karbonat minerallerine dönüşmesidir. Özellikle forsteritik bileşimli olivinin hidratasyon ve karbonatlaşma reaksiyonları, manyezit oluşumunun anlaşılmasında önemli bir başlangıç noktasıdır. Bu süreç basitleştirilmiş biçimde aşağıdaki reaksiyonla gösterilebilir:



Düşük sıcaklık koşullarında, meteorik suların derine süzülmesi, CO₂ ile zenginleşmesi ve ultramafik kayalarla reaksiyona girmesi sonucunda damar tipi manyezit oluşumları gelişebilmektedir. Bu model, özellikle kırık ve çatlak sistemlerinin yaygın olduğu peridotitik kayalarda gözlenen kriptokristalin manyezit damarlarını açıklamada yaygın biçimde kullanılmaktadır (Zedef ve ark., 2000). Buna karşılık sisteme giren CO₂ akısının artması ve akışkan-kayaç etkileşiminin ilerlemesi durumunda, yalnızca primer ultramafik mineraller değil, daha önce oluşmuş serpantin mineralleri de bozunarak manyezit + kuvars birlikteliğine dönüşebilmektedir. Bu ileri derece karbonatlaşma, çoğu zaman listvenitleşme olarak tanımlanmakta ve silikat minerallerinin karbonat ve silis fazlarına büyük ölçüde dönüşmesiyle karakterize edilmektedir. Eskişehir ve çevresindeki birçok sahada gözlenen yoğun alterasyon zonları bu sürecin tipik örneklerini sunmaktadır (Beinlich ve ark., 2020). Ofiyolitik birimlerde ultramafik kayaların serpantinleşme, damar tipi manyezitleşme, ileri karbonatlaşma/listvenitleşme ve doğal karbon mineralizasyonu arasındaki ilişkiler kavramsal olarak Şekil 1’de özetlenmiştir.

Şekil 1: Ofiyolitik birimlerde ultramafik kayaların CO₂’li akışkanlarla etkileşimi sonucu gelişen serpantinleşme, damar tipi

manyezitleşme, ileri karbonatlaşma/listvenitleşme ve doğal karbon mineralizasyonu süreçlerini gösteren kavramsal şema



Modern jeokimyasal yaklaşımlar açısından bakıldığında, ultramafik kayaçların karbonatlaşması atmosferik veya akışkan kökenli CO₂'nin kalıcı olarak mineral fazlar içinde tutulduğu doğal sistemler olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle ofiyolit ilişkili manyezitleşme süreçleri, doğal karbon mineralizasyonunun anlaşılması ve yapay karbon depolama uygulamalarının geliştirilmesi açısından önemli doğal analogiler sunmaktadır (Kelemen ve ark., 2011).

Bu bölümde, ofiyolitik birimlerde gelişen manyezitleşme süreçleri jeolojik, jeokimyasal ve mineralojik açılardan bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Öncelikle manyezit oluşumuna zemin hazırlayan ultramafik kayaçların alterasyon süreçleri ve karbonatlaşma mekanizmaları, klasik oluşum modelleri çerçevesinde değerlendirilecektir. Ardından, manyezit yataklarının mineralojik karakterizasyonuna ilişkin temel ölçütler; doku, kristal

yapı, eşlik eden mineral toplulukları ve jeokimyasal göstergeler ışığında tartışılacaktır.

Bölümün bir diğer amacı, özellikle ofiyolit ilişkili manyezit oluşumlarının yalnızca ekonomik jeoloji bağlamında değil, aynı zamanda doğal karbon tutulum sistemleri olarak da yeniden değerlendirilmesidir. Bu kapsamda saha gözlemleri, mineralojik veriler ve modern termodinamik modelleme yaklaşımlarının birlikte kullanılmasıyla manyezitleşmenin oluşum koşulları daha kapsamlı biçimde yorumlanacaktır. Özellikle Türkiye'nin ofiyolitik kuşakları içinde yer alan yatakların, küresel ölçekte tanımlanan benzer sistemlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu çerçevede bölüm, hem ofiyolit ilişkili manyezit yataklarının oluşum mekanizmalarına ilişkin mevcut bilgiyi sentezlemeyi hem de mineralojik karakterizasyon verilerinin bu süreçlerin yorumlanmasındaki rolünü ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Jeolojik Çerçeve ve Tektonik Konum

Manyezit yataklarının oluşumu, büyük ölçüde okyanusal litosfer kalıntıları olan ofiyolitik birimlerin kıtasal kenarlara yerleşmesi ve bu yerleşimi izleyen alterasyon, kırılma ve akışkan dolaşımı süreçleriyle ilişkilidir. Bu bağlamda manyezitleşme, yalnızca uygun litolojik bileşimin varlığına değil, aynı zamanda yapısal süreksizliklerin gelişimine, akışkan dolaşım yollarının oluşmasına ve ultramafik kayaçların alterasyon derecesine bağlı olarak şekillenmektedir. Özellikle peridotitik kayaçların magnezyum bakımından zengin mineralojik bileşimi, karbonatlaşma reaksiyonları için gerekli kimyasal altyapıyı sağlarken, fay ve çatlak sistemleri bu reaksiyonların gerçekleşmesini mümkün kılan akışkan dolaşımını denetlemektedir.

Ana Kayaç İlişkileri: Peridotitler, Dünitler ve Serpantinleşme

Manyezit yatakları, çok büyük ölçüde ultramafik kayalarla, özellikle de üst manto kökenli peridotitlerle mekânsal ve genetik ilişki içerisinde. Bu kayalar, manyezitleşme reaksiyonlarında kullanılan magnezyumun temel kaynağını oluşturmaktadır (Abu-Jaber ve Kimberley, 1992). Ofiyolitik istifler içinde yer alan dunit ve harzburgit gibi ultramafik kayalar, mineralojik bileşimleri ve alterasyona verdikleri tepkiler bakımından manyezit oluşumu üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

Dunitler, büyük ölçüde olivinden oluşmaları nedeniyle manyezitleşme açısından en elverişli ana kayalardan biridir. Özellikle forsteritçe zengin dunitlerde magnezyumun karbonat fazına aktarılması, daha düşük silis katkısı ile gerçekleştiğinden, yüksek saflıkta kriptokristalin manyezit oluşumları için uygun bir jeokimyasal ortam gelişebilmektedir. Buna karşılık harzburgitlerde piroksen, özellikle enstatit içeriğinin artması, alterasyon ve karbonatlaşma süreçleri sırasında sisteme daha fazla silis kazandırmakta; bu durum ise kuvars, opal-CT veya sepiyolit gibi eşlik eden fazların gelişmesine ve cevher saflığının azalmasına yol açabilmektedir (Yeniyol, 1982).

Serpantinleşme, manyezitleşme ile çoğu zaman eş zamanlı gelişen ya da onu önceleyen temel alterasyon süreçlerinden biridir. Olivin ve piroksen gibi primer ultramafik minerallerin su ile reaksiyona girmesi sonucunda serpantin mineralleri gelişirken, kayalar bünyesinde önemli hacim artışları meydana gelmektedir. Bu hacim artışı, peridotit kütlelerinde yaygın mikro-çatlak sistemlerinin oluşmasına neden olmakta ve böylece CO₂ bakımından zengin akışkanların kayalar içerisine daha etkin biçimde nüfuz etmesini sağlamaktadır. Bu nedenle serpantinleşme yalnızca bir alterasyon süreci değil, aynı zamanda sonraki karbonatlaşma ve manyezitleşme evrelerini kolaylaştıran yapısal bir hazırlık aşaması olarak da değerlendirilmektedir (Kelemen ve Matter, 2008).

Tektonik Kontrol: Fay Zonları ve Hidrotermal Akışkan Dolaşımı

Manyezit cevherleşmeleri üzerinde yapısal kontrol son derece belirgindir. Ana kayaç bileşimi gerekli kimyasal zemini sağlamakla birlikte, manyezitin damarsal ya da stockwork karakterli oluşumu çoğu zaman gevrek deformasyonla gelişen kırık, çatlak ve fay sistemleri tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle manyezitleşme süreçlerinde yapısal süreksizlikler, akışkan dolaşımı ve çökelme mekanizmaları birlikte ele alınmalıdır.

Bölgesel ölçekli fay zonları ve bunlarla ilişkili ikincil kırık sistemleri, akışkanların ultramafik kayaçlara girişinde ve reaksiyon ortamına ulaşmasında başlıca yolları oluşturmaktadır. CO₂ bakımından zengin hidrotermal ya da meteorik kökenli akışkanların bu yapılar boyunca dolaşımı sırasında basınç, sıcaklık ve kimyasal denge koşullarında meydana gelen değişimler, manyezitin çatlak dolgusu şeklinde çökmesini teşvik etmektedir (Pohl, 1990). Bu nedenle damar tipi manyezit oluşumları çoğu zaman belirli kırık sistemleriyle doğrudan ilişkilidir.

Yapısal kontrolün yoğun olduğu sahalarda, cevherleşmenin geometrisi deformasyon desenine bağlı olarak değişmektedir. Daha sınırlı ve doğrusal süreksizlikler boyunca damar tipi oluşumlar gözlenirken, kırıkların sıklaştığı, birbirini kestiği ya da ağsal bir yapı oluşturduğu zonlarda stockwork tipi cevherleşmeler gelişebilmektedir. Türkiye'deki birçok ofiyolit ilişkili manyezit sahasında gözlenen damar ve ağsı cevher geometrileri, bu yapısal denetimin belirgin örneklerini sunmaktadır (Zedef ve ark., 2000; Kahya ve Kuşcu, 2014).

Dünyadan ve Türkiye'den Seçilmiş Örnekler

Ofiyolit ilişkili manyezit yatakları, küresel ölçekte özellikle büyük orojenik kuşaklar boyunca yayılım göstermekte ve çoğu

zaman ultramafik kayaçların yüzeylediği tektonik olarak etkin alanlarla ilişki sunmaktadır. Alp-Himalaya kuşağı ve ona bağlı ofiyolit toplulukları, bu tür oluşumların en belirgin şekilde izlendiği başlıca jeolojik alanlardandır. Farklı bölgelerde tanımlanan manyezit yatakları, litolojik özellikler, akışkan bileşimi, alterasyon derecesi ve yapısal kontrol açısından bazı farklılıklar göstermekle birlikte, genel olarak ultramafik ana kayaç varlığı, kırık-çatlak sistemleri boyunca gelişen akışkan dolaşımı ve karbonatlaşma süreçleri gibi ortak denetleyiciler tarafından şekillenmektedir.

Avusturya'daki Kraubath sahası, klasik damar tipi manyezit oluşumlarının iyi bilinen örneklerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu sahada cevherleşme, yapısal süreksizlikler boyunca gelişmiş hidrotermal akışkan dolaşımı ile ilişkilendirilmiş ve damar tipi geometrinin belirgin olduğu bir model ortaya konmuştur (Pohl, 1990). Yunanistan'ın Chalkidiki bölgesinde ise kriptokristalin karakterli manyezit oluşumları tanımlanmış olup, bu yataklar özellikle ince taneli dokusal özellikleri ve ultramafik kayaçlarla olan yakın ilişkileri bakımından dikkat çekmektedir (Dabitzias, 1980). Bu örnekler, ofiyolit ilişkili manyezitleşmenin yalnızca tek bir oluşum mekanizmasına indirgenemeyeceğini; buna karşılık farklı jeolojik ortamlarda benzer litolojik ve yapısal koşullar altında gelişebildiğini göstermektedir.

Türkiye, geniş ofiyolit kuşakları ve bu kuşaklar boyunca gelişmiş çok sayıda manyezit oluşumu ile, ofiyolit ilişkili karbonatlaşma süreçlerinin incelenmesi bakımından önemli bir konuma sahiptir. Konya-Helvacıçı sahası, damarsal ve yer yer sedimanter özellikler gösteren manyezit oluşumlarıyla dikkat çekmekte ve özellikle düşük sıcaklıklı akışkan dolaşımı ile ilişkili modeller açısından önem taşımaktadır (Zedef ve ark., 2000). Bununla birlikte, Türkiye'deki en dikkat çekici ofiyolit ilişkili manyezit alanları Eskişehir-Kütahya-Bilecik provensinde yer almaktadır (**Kahya ve Kuşcu, 2014; Ece, Matsubaya ve**

Çoban,2005). Bu bölge, yalnızca rezerv büyüklüğü bakımından değil, aynı zamanda yüksek saflıkta kriptokristalin manyezit oluşumlarının gelişmiş olması nedeniyle de ayrıcalıklı bir yere sahiptir. Ayrıca, Kütahya çevresindeki volkanik kayalar üzerinde yürütülen petrografik ve jeokimyasal çalışmalar, bölgenin çok bileşenli ve karmaşık bir jeolojik evrime sahip olduğunu göstermekte; bu durum, ofiyolit ilişkili cevherleşmelerin daha geniş bir bölgesel yerbilimsel çerçeve içinde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Özkul ve ark., 2021).

Eskişehir ve Kütahya çevresi, Tavşanlı Zonu ve İzmir-Ankara-Erzincan Sütur Kuşağı ile ilişkili ultramafik kütlelerin geniş yüzeylemelerine ev sahipliği yapmaktadır. Üst Kretase’de yerleşen bu ofiyolitik birimlerin daha sonraki tektonik evrim süresince kırık ve fay sistemleriyle parçalanması, akışkan dolaşımı için uygun yapısal yolların gelişmesini sağlamıştır. Bu nedenle bölgedeki manyezitleşme, yalnızca uygun ana kayaç bileşimine değil, aynı zamanda çok evreli deformasyon süreçlerine bağlı olarak gelişen yapısal denetime de güçlü biçimde bağımlıdır (Okay, 1984). Nemli, Margı, Dutluca ve Emiroğlu (Okay.,1984; Ece ve ark.,2005; Kahya ve Kuşcu.,2014) gibi sahalarda gözlenen damar ve stockwork tipli cevherleşmeler, bu yapısal kontrolün sahadaki en belirgin yansımalarını oluşturmaktadır. Özellikle Emiroğlu sahası, büyük ölçekli stockwork ve damar tipi manyezit oluşumlarının birlikte izlendiği önemli örneklerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Eskişehir-Kütahya-Bilecik provensindeki yatakların bir diğer önemli özelliği, kriptokristalin manyezitin yüksek saflık derecesi ve buna eşlik eden nispeten sınırlı safsızlık fazlarıdır (**Kahya ve Kuşcu, 2014; Ece, Matsubaya ve Çoban,2005).** Bu durum, ana kayanın mineralojik bileşimi, akışkan-kayaç etkileşiminin derecesi ve çökelme koşullarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Dunitik kayaların yaygınlığı, magnezyumun karbonat fazına aktarılmasını

kolaylaştırırken; yapısal süreksizlikler boyunca ilerleyen CO₂ bakımından zengin akışkanlar, çok sayıda damar ve ağsı cevher geometrisinin gelişmesine olanak tanımıştır (Yeniyol, 1982). Bu yönüyle bölge, hem ofiyolit ilişkili manyezit yataklarının oluşum mekanizmalarının anlaşılması hem de karbonatlaşma süreçlerinin doğal örnekler üzerinden değerlendirilmesi açısından önemli bir doğal laboratuvar niteliği taşımaktadır.

Sonuç olarak, dünyadaki ve Türkiye'deki örnekler birlikte değerlendirildiğinde, ofiyolit ilişkili manyezit yataklarının gelişiminde ana kayanın ultramafik bileşimi, serpantinleşme derecesi, kırık-fay sistemlerinin varlığı ve CO₂'li akışkan dolaşımı temel belirleyiciler olarak öne çıkmaktadır. Orta Anadolu'da Ankara çevresindeki Edige ve Yakacık sahaları da, İzmir–Ankara–Erzincan Sütur Kuşağı boyunca gelişen ultramafik kayaç ilişkili manyezit oluşumlarının önemli örnekleri arasında değerlendirilebilir. Edige sahasında manyezit cevherleşmesi serpantin ve serpantinleşmiş ultramafik kayaçlar içinde, başlıca harzburjit ve dünit ana kayaçlarla ilişkili olarak tanımlanmıştır. Yakacık bölgesinde ise Kapaklı üyesine ait serpantinitle içinde damar, ağsal (stokvörk) ve kuvarslı manyezit damarları belirlenmiştir. Bu iki saha, Ankara çevresinde de ofiyolit ilişkili manyezitleşmenin yalnızca bölgesel olarak var olduğunu değil, aynı zamanda farklı yapısal ve mineralojik görünüm sergilediğini göstermektedir (Eren Köroğlu ve ark., 2023; Koca ve ark., 2026). Bununla birlikte, Türkiye'de özellikle Eskişehir-Kütahya-Bilecik provansı, kriptokristalin manyezit oluşumlarının gelişimi, yapısal denetimi ve mineralojik özellikleri bakımından küresel ölçekte karşılaştırmalı çalışmalara olanak sağlayan başlıca alanlardan biri olarak değerlendirilebilir (**Kahya ve Kuşcu, 2014; Ece, Matsubaya ve Çoban, 2005**).

Manyezitleşme Mekanizmaları ve Oluşum Tipleri

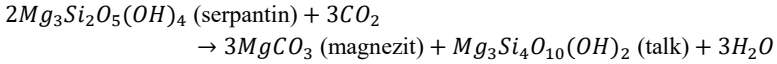
Manyezit oluşumu, farklı jeolojik ortamlarda gelişebilmekle birlikte, başlıca iki temel oluşum çerçevesi içerisinde ele alınmaktadır. Bunlardan ilki, ultramafik kayaçların CO₂ bakımından zengin akışkanlarla etkileşimi sonucunda gelişen ve çoğu zaman kriptokristalin dokulu manyezit oluşumlarıyla temsil edilen süreçtir. İkincisi ise karbonat kayaçların magnezyumca zengin akışkanlarla metasomatik olarak yer değiştirmesi sonucu oluşan ve genellikle kristalin ya da spatik karakter gösteren manyezit tipidir. Bu iki ana oluşum mekanizması, cevherin dokusal özellikleri, mineral parajenezi, saflık derecesi ve jeokimyasal bileşimi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Ultramafik Kaynaklı Kriptokristalin Manyezit Oluşumu

Ultramafik kayaçlarla ilişkili manyezit yatakları, çoğunlukla dunit ve harzburgit gibi Mg bakımından zengin peridotitlerin CO₂ içeren akışkanlarla etkileşimi sonucunda gelişmektedir. Bu tür yataklar özellikle ofiyolitik kuşaklarda yaygındır ve çoğu zaman damar ya da stockwork tipi cevherleşmeler şeklinde gözlenir. Literatürde, bu oluşumları açıklamak amacıyla birbirini dışlamayan iki temel model öne sürülmüştür. Bunlardan ilki, meteorik suların derin dolaşımı modelidir. Bu modele göre atmosferik veya yüzeysel kaynaklı CO₂ taşıyan sular, fay ve çatlak sistemleri boyunca derinlere süzülmekte, ultramafik kayaçlarla etkileşime girerek Mg bakımından zenginleşmekte ve uygun fizikokimyasal koşullar altında tekrar yüzeye yakın seviyelerde manyezit olarak çökelmektedir (Abu-Jaber ve Kimberley, 1992). Özellikle çatlak kontrollü damar tipi oluşumlar, bu model ile uyumlu biçimde yorumlanmaktadır. İkinci model ise düşük sıcaklıklı hidrotermal akışkan modelidir. Bu yaklaşımda, magmatik, metamorfik ya da derin dolaşımlı akışkanların CO₂ bakımından zengin bileşimi ön plana çıkmakta; bu akışkanların ultramafik birimlerle etkileşimi sonucu geniş alanlara yayılmış ağsı (stockwork) ya da yoğun damarsal manyezit oluşumları gelişebilmektedir. Özellikle büyük

rezervli bazı yatakların açıklanmasında bu modelin daha uygun olduğu ileri sürülmektedir (Zedef ve ark., 2000).

Jeokimyasal açıdan bakıldığında, ultramafik kaynaklı manyezitleşme çoğu zaman serpantinleşme ile yakın ilişki göstermektedir. İlk aşamada primer olivin ve piroksen mineralleri hidrasyon yoluyla serpantin minerallerine dönüşmekte; daha sonraki evrede ise serpantin, CO₂ bakımından zengin akışkanlarla reaksiyona girerek manyezit, talk ve/veya silis fazları oluşturabilmektedir. Bu süreç, basitleştirilmiş biçimde aşağıdaki reaksiyonla ifade edilmektedir:

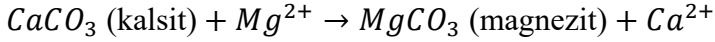


Bu reaksiyon dizisi, ultramafik kayaların ilerleyen karbonatlaşma evrelerinde manyezit oluşumunun serpantin bozunması ile ilişkili olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte doğal sistemlerde süreç çoğu zaman tek bir reaksiyonla sınırlı olmayıp, akışkan bileşimi, silis aktivitesi ve açık/kapalı sistem davranışına bağlı olarak farklı mineral toplulukları gelişebilmektedir.

Sedimanter-Metasomatik Kökenli Kristalin Manyezit Oluşumu

Kristalin ya da spatik manyezit oluşumları, çoğunlukla önceden var olan karbonat kayaların — özellikle kireçtaşı ve dolomitlerin — magnezyumca zengin akışkanlarla metasomatik etkileşimi sonucunda gelişmektedir. Bu tür oluşumlarda temel süreç, mevcut karbonat minerallerinin kısmen ya da tamamen yer değiştirmesiyle manyezitin oluşmasıdır (Möller, 1989). Bu nedenle söz konusu yataklar, ultramafik kayalarla ilişkili kriptokristalin manyezitlerden hem dokusal hem de oluşumsal açıdan belirgin biçimde ayrılmaktadır.

Basitleştirilmiş biçimde bu yer değiştirme süreci şu şekilde gösterilebilir:



Bu tip yataklar genellikle daha iri kristalli, rombohedral dilinimli ve makroskobik olarak daha belirgin kristal dokular sunmaktadır. Kristal boyutunun büyük olması, çoğu zaman yavaş ilerleyen metasomatik süreçler, görece uzun süreli akışkan-kayaç etkileşimi ve daha dengeli büyüme koşulları ile ilişkilendirilmektedir. Bu oluşumlar özellikle orojenik kuşaklarda, metamorfik ve hidrotermal süreçlerin etkin olduğu ortamlarda gelişebilmekte ve yüksek akışkan basıncıyla orta sıcaklık koşullarında stabilize olabilmektedir. Bu nedenle kristalin manyezit yatakları, yalnızca ana kayaç özellikleriyle değil, aynı zamanda metasomatizmanın şiddeti, akışkanın bileşimi ve deformasyon geçmişiyle de yakından ilişkilidir.

Manyezitleşmeyi Denetleyen Başlıca Fizikokimyasal Parametreler

Manyezit oluşumu, yalnızca uygun magnezyum kaynağı ve CO₂ varlığı ile açıklanabilecek basit bir süreç değildir. Çökelme ve mineral kararlılığı; akışkan bileşimi, sıcaklık, basınç, pH ve sistemin açık ya da kapalı karakteri gibi çok sayıda fizikokimyasal değişken tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle manyezitleşme, farklı jeolojik ortamlarda farklı ürünler verebilen hassas bir denge süreci olarak değerlendirilmelidir. Bu parametrelerden biri CO₂ fugasitesidir (f_{CO_2}). Sistemdeki CO₂ etkinliği yeterince yüksek olmadığına, ultramafik kayaçların alterasyonu serpantinleşme düzeyinde kalabilmekte; buna karşılık CO₂ etkinliğinin artması durumunda karbonat minerallerinin, özellikle manyezitin, kararlılığı belirgin biçimde artmaktadır. Bu nedenle karbonatlaşma derecesi üzerinde CO₂ fugasitesi temel bir denetleyici olarak kabul edilmektedir.

Sıcaklık ve basınç koşulları da manyezit oluşumunu belirleyen başlıca etkenler arasındadır. Kriptokristalin manyezit oluşumlarının çoğu düşük sıcaklıklı sistemlerle ilişkilendirilirken, kristalin manyezit oluşumları daha yüksek sıcaklık ve daha uzun süreli akışkan-kayaç etkileşimleri ile bağlantılı olarak değerlendirilmektedir. Özellikle düşük sıcaklıklı damarsal oluşumlar ile metasomatik kristalin oluşumlar arasındaki dokusal farklar, bu fizikokimyasal koşulların cevher dokusu üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Bir diğer önemli parametre ise ortam pH'sıdır. Alkali koşullar altında Mg'nin karbonat fazında çökmesi kolaylaşmakta ve özellikle yüksek pH değerleri, çözeltideki karbonat türlerinin kararlılığını artırarak manyezit oluşumunu desteklemektedir. Bununla birlikte doğal sistemlerde pH etkisi çoğu zaman tek başına değil, CO₂ basıncı, sıcaklık, iyon aktivitesi ve çözelti bileşimi ile değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak manyezitleşme, litolojik uygunluk kadar akışkan bileşimi ve fizikokimyasal koşulların birlikte elverişli hale gelmesini gerektiren çok aşamalı bir süreçtir. Bu nedenle farklı manyezit tiplerinin yorumlanmasında yalnızca mineralojik veriler değil, aynı zamanda yapısal, jeokimyasal ve termodinamik göstergelerin birlikte ele alınması gerekmektedir.

Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikler

Manyezit yataklarının mineralojik bileşimi ve jeokimyasal özellikleri, cevherleşme süreçlerinin yorumlanmasında temel veri kaynaklarından biridir. Mineral parajenezi, doku özellikleri, element dağılımları ve duraylı izotop bileşimleri; akışkanın bileşimi, çökme sıcaklığı, su-kayaç etkileşiminin derecesi ve sistemin açık ya da kapalı karakteri hakkında önemli bilgiler sunar. Bu nedenle

manyazit yataklarının değerlendirilmesinde yalnızca makroskopik cevher özellikleri değil, petrografik, mineralojik ve izotopik verilerin birlikte ele alınması gerekir (Schroll, 2002; Lugli, Morteani, ve Blamart, 2002).

Mineral Parajenezi ve Dokusal zellikler

Ofiyolit ilişkili kriptokristalin manyazit yataklarında parajenez çoğu zaman görece sade olmakla birlikte, sistemin karbonatlaşma derecesine ve silis aktivitesine bağlı olarak daha karmaşık topluluklar da gelişebilmektedir. Eskişehir bölgesindeki damar ve stockwork tipi oluşumlarda magnezitin başlıca karbonat fazı olduğu; cevherin çoğunlukla mikritik, yer yer mikrosparitik dokular sunduğu ve bazı örneklerde ikincil kalsit ile dolomitin eşlik ettiği gösterilmiştir (Ece, Matsubaya, ve oban, 2005; Kahya ve Kuşcu, 2014). Bu dokusal özellikler, çökelmenin düşük sıcaklıklı ve kırık kontrollü akışkan sistemleri altında gerçekleştiğini düşündürmektedir.

Ankara çevresindeki güncel çalışmalar da bu parajenez çeşitliliğini desteklemektedir. Edige sahasında XRD ve SEM-EDS verileri, kriptokristalin ve rombohedral magnezitin dolomit, kuvars, kalsit ve kil mineralleri ile bulunduğunu; ayrıca olivin, piroksen, serpantin, kromit ve demir oksitlerin ana kayaç mirasını yansıttığını göstermektedir. Yakacık bölgesinde ise damar tipi manyezitlere kuvars, klorit, dolomit ve serpantin eşlik ederken, ağsal (stokvörk) manyezitlerde kuvars, serpantin, olivin, kalsit ve dolomit birlikteliği tanımlanmıştır. Aynı çalışmada kil minerallerinin klorit, simektit ve kaolinitten oluştuğu; ayrıca bazı örneklerde olivinden kemererite dönüşümün Raman spektroskopisi ile desteklendiği belirtilmiştir (Eren Köroğlu ve ark., 2023; Koca ve ark., 2026).

Doku verileri aynı zamanda çok evreli bir cevherleşme sürecine de işaret etmektedir. Stockwork tipi yataklarda yoğun çatlak ağları boyunca gelişen mikrokristalin manyazit, akışkan dolaşımının

yapısal denetim altında olduğunu gösterirken, ileri derece karbonatlaşma koşullarında kuvars, talk ve karbonat fazlarının birlikte geliştiği listvenitik birliktelikler de ortaya çıkabilmektedir. Bu tür parajenezler, ultramafik kayaçların yalnızca serpantinleşmediğini, ilerleyen evrelerde yoğun karbonatlaşma ile yeniden düzenlendiğini göstermektedir (Beinlich ve ark., 2020).

Element Jeokimyası

Manyezitlerin kimyasal bileşimi, oluşum koşullarının ve yan kayaç etkisinin değerlendirilmesinde önemli bir göstergedir. Özellikle Fe ve Ca içerikleri, cevherin saflığı ve akışkan-kayaç etkileşiminin niteliği hakkında bilgi sağlar. Kriptokristalin manyezitler çoğu zaman daha saf bileşimler sunarken, daha iri kristalli ya da metasomatik karakterli tiplerde Fe'nin Mg yerine geçmesiyle daha demirli bileşimler gelişebilir. Lugli ve arkadaşları (2002), spartik manyezitlerde Fe-zengin bileşimlerin, farklı akışkan evreleri ve metasomatik süreçlerle ilişkili olabileceğini göstermiştir.

Benzer biçimde Ca artışı da sistemin karbonatlı yan kayaçlarla etkileşimini veya ikincil kalsit-dolomit gelişimini yansıtabilir. Eskişehir sahalarında rapor edilen ikincil kalsit ve dolomit birlikteliği, cevherleşmenin tek aşamalı bir çökeltmeden ziyade değişen akışkan kimyası altında gelişen çok evreli bir süreç olduğunu göstermektedir (Kahya ve Kuşcu, 2014). Daha genel ölçekte değerlendirildiğinde, element jeokimyası ile petrografik verilerin birlikte kullanılması, ultramafik ana kayaktan türeyen magnezyumun hangi koşullarda karbonat fazına aktarıldığını anlamada anahtar rol oynamaktadır (Schroll, 2002).

Ankara çevresindeki veriler de bu yorumu desteklemektedir. Edige sahasında ultramafik kayaçların MgO içerikleri %33,3–37,2 ve SiO₂ içerikleri %37,3–42,9 arasında değişmekte olup, düşük CaO ve Al₂O₃ değerleri birlikte değerlendirildiğinde peridotitik, özellikle de harzburgit-dünit kökenli bir sistemle uyumlu görünmektedir.

Yakacık bölgesinde ise manyezit örneklerinde MgO değerleri %12,70–49,74, SiO₂ değerleri %0,2–64,00 ve Fe₂O₃ değerleri %0,33–5,35 arasında değişmekte; ayrıca bazı fay zonu örneklerinde Ni ve Co zenginleşmesi ultramafik ana kayanın jeokimyasal etkisini açıkça yansıtmaktadır (Eren Köroğlu ve ark., 2023; Koca ve ark., 2026).

Duraylı İzotop Verileri ($\delta^{13}\text{C}$ Ve $\delta^{18}\text{O}$)

Duraylı karbon ve oksijen izotopları, manyezitleşme süreçlerinde rol oynayan karbonun kaynağını ve çökelme koşullarını belirlemede en güçlü araçlardan biridir. Schroll (2002), magnezit yataklarının genetik yorumunda $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ verilerinin temel önem taşıdığını vurgulamış; Lugli ve arkadaşları (2002) ise izotop verilerinin petrografi, REE ve akışkan kapanımı verileriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu yaklaşım, izotop verilerinin tek başına değil, daha geniş bir jeokimyasal bağlam içinde yorumlanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Türkiye’deki ofiyolit ilişkili manyezit oluşumları için en önemli izotop çalışmalarından biri Kahya ve Kuşcu’ya (2014) aittir. Bu çalışmada Eskişehir’deki Süleymaniye, Margı ve Tutluca manyezitlerinin $\delta^{13}\text{C}$ değerlerinin yaklaşık olarak -2.7 ile -11.2‰, $\delta^{18}\text{O}$ değerlerinin ise 27.4 ile 30.8‰ arasında değiştiği; karbon kaynağının atmosferik karbon, çözülmüş inorganik karbon, tatlı su karbonatı ve kısmen manto kökenli CO₂ katkısını içerebileceği belirtilmiştir. Aynı çalışma, bu yatakların yüzeye yakın, düşük basınç-düşük sıcaklık koşullarında oluştuğunu ve ortalama çökelme sıcaklığının yaklaşık 37 °C olduğunu ileri sürmektedir (Kahya ve Kuşcu, 2014). Bu bulgular, Eskişehir yöresindeki kriptokristalin manyezitlerin düşük sıcaklıklı akışkan sistemleriyle ilişkili olduğu yorumunu güçlü biçimde desteklemektedir.

Ankara çevresindeki iki farklı saha, ofiyolit ilişkili manyezitleşmenin tek tip bir akışkan rejimiyle açıklanamayacağını göstermektedir. Edige sahasında $\delta^{13}\text{C}$ değerlerinin $-13,62\%$ ile $-10,54\%$, $\delta^{18}\text{O}$ değerlerinin ise düşük sıcaklıklı ve sığ derinlik koşullarını işaret eden aralıklarda olması, organik maddece zengin sediman katkısı ile meteorik sulardan etkilenmiş bir oluşumu desteklemektedir. Buna karşılık Yakacık bölgesinde manyezitlerin $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ değerleri ile Jura yaşlı kireçtaşlarının izotop bileşimleri birlikte değerlendirildiğinde, karbon ve oksijen için önemli kaynaklardan birinin kireçtaşlarının dekarbonasyonu olduğu; ayrıca yüzey sularının derin dolaşımı, erken–orta Miyosen volkanizmasının ısıtıcı etkisi ve kısmi magmatik CO_2 katkısının birlikte rol oynadığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle Türkiye’deki ofiyolit ilişkili manyezit yatakları, yalnızca klasik meteorik dolaşım modeliyle değil, yer yer karbonat katkılı ve karma hidrotermal sistemler çerçevesinde de ele alınmalıdır (Eren Köroğlu ve ark., 2023; Koca ve ark., 2026).

Güneybatı Türkiye’deki damar-stockwork ve sedimanter magnezit-hidromagnezit oluşumları üzerine yapılan Zedef ve arkadaşlarının (2000) çalışması da, duraylı izotop verilerinin genetik ayırım açısından ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, farklı manyezit tiplerinin aynı bölgesel çerçeve içinde dahi farklı akışkan rejimleri ve karbon kaynakları altında gelişebileceğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla duraylı izotop verileri, manyezitleşmenin yalnızca sıcaklık ve akışkan kökenini değil, aynı zamanda farklı oluşum modelleri arasındaki ayrımı da açıklamada temel bir araçtır (Zedef ve ark., 2000).

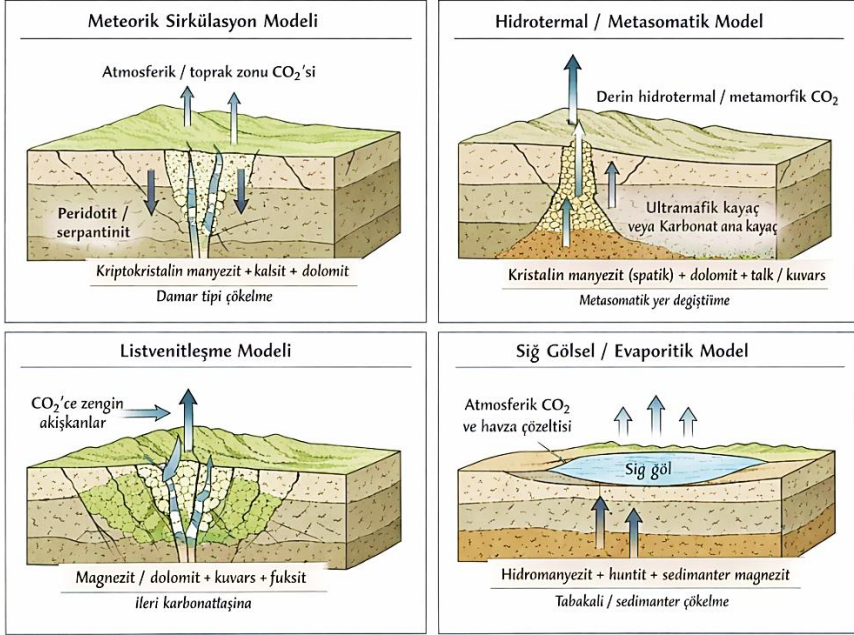
Cevherleşme Modelleri

Manyezit yataklarının oluşumunu açıklayan modeller, başlıca akışkanın kaynağı, dolaşım derinliği, kayaç-akışkan etkileşiminin niteliği ve çökmenin gerçekleştiği fizikokimyasal koşullara göre ayrılmaktadır. Ancak doğal sistemlerde bu modeller

çoğu zaman birbirinden tamamen bağımsız değildir; tersine, özellikle ofiyolitik kuşaklarda meteorik dolaşım, hidrotermal katkı, metasomatik yer değiştirme ve ileri derece karbonatlaşma süreçleri aynı cevherleşme sistemi içinde farklı evreler halinde gelişebilmektedir. Bu nedenle manyezit oluşumlarının yorumlanmasında tek bir modele dayalı açıklamalar yerine, saha ilişkileri, doku özellikleri, mineral parajenezi ve izotop verilerini birlikte kullanan bütüncül bir yaklaşım daha uygun görünmektedir (Schroll, 2002; Zedef ve ark., 2000; Lugli ve ark., 2002). Manyezit yataklarının başlıca oluşum modelleri, akışkan kaynağı, ana kayaç, çökelme zonu ve ürün mineral toplulukları açısından karşılaştırmalı olarak Şekil 2’de özetlenmiştir.

Şekil 2: Manyezit yataklarının başlıca oluşum modellerini karşılaştıran kavramsal şema. Meteorik sirkülasyon, hidrotermal/metasomatik oluşum, listvenitleşme ve sığ gölsel/evaporitik çökelim modelleri; akışkan yönü, CO₂ kaynağı, ana kayaç, çökelme zonu ve ürün mineral toplulukları açısından

karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Kavramsal şema ölçekli değildir



Meteorik Sirkülasyon Modeli

Meteorik sirkülasyon modeli, özellikle ultramafik kayalar içinde gelişen damar ve stockwork tipi kriptokristalin manyezit yataklarını açıklamada en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biridir. Bu modele göre yüzey kökenli sular, atmosferik ve/veya toprak zonundan türeyen CO_2 'yi alarak fay ve çatlak sistemleri boyunca derine doğru süzülme; burada ultramafik kayalarla etkileşime girerek Mg bakımından zenginleşmekte ve daha sonra uygun basınç, sıcaklık ve pH koşullarında yeniden çökerek manyezit damarlarını oluşturmaktadır. Ultramafik kayalara bağlı damar tipi manyezitlerin kökenine ilişkin klasik değerlendirmelerde bu model temel bir çerçeve olarak sunulmuştur (Abu-Jaber ve Kimberley, 1992). Türkiye'de özellikle Güneybatı Anadolu'daki damar-stockwork tipi yataklar için Zedef ve arkadaşları (2000), Eskişehir

yöresi için ise Kahya ve Kuşcu (2014), düşük sıcaklıklı ve yüzeye yakın koşullarda gelişen bir akışkan dolaşımını destekleyen izotop bulguları sunmuştur. Eskişehir örneklerinde çökelme sıcaklığının yaklaşık 37°C olarak tahmin edilmesi, bu modelin özellikle kriptokristalin manyezitler açısından güçlü bir açıklama sunduğunu göstermektedir. Edige sahasına ait güncel izotop ve mineralojik veriler de, düşük sıcaklıklı ve meteorik sulardan etkilenmiş bir manyezitleşme modelini desteklemektedir (Koca ve ark., 2026).

Hidrotermal-Metasomatik Model

Hidrotermal-metasomatik model, daha çok kristalin ya da spatik manyezit oluşumlarını ve karbonatlı ana kayalarda yer değiştirme yoluyla gelişen cevherleşmeleri açıklamaktadır. Bu modelde Mg bakımından zengin, sıcak ve çoğu zaman tuzlu akışkanların kırık sistemleri boyunca dolaşarak mevcut karbonat kayalarla reaksiyona girdiği ve onları kısmen ya da tamamen manyezite dönüştürdüğü kabul edilir. Lugli ve arkadaşlarının (2002) Burano Evaporitleri üzerindeki çalışması, kırık dolgusu ve replacive magnezitin birlikte bulunduğu sistemlerde hidrotermal-metasomatik bir modelin geçerli olduğunu; sıcak ve Mg-zengin akışkanların dolostonları yer yer tamamen spartik manyezite dönüştürebildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Rubian yatağı üzerinde yapılan çalışma da karbonatça zengin ana kayalarda hidrotermal/metasomatik yer değiştirme modelini desteklemektedir (Kilias ve ark., 2006). Bu nedenle kristalin manyezit oluşumları, yalnızca bir çökelme ürünü olarak değil, çoğu durumda yapısal olarak odaklanmış akışkan dolaşımının yönettiği metasomatik dönüşüm ürünleri olarak değerlendirilmelidir. Yakacık bölgesinde önerilen yüzey sularının derin dolaşımı, volkanizmanın ısıtıcı rolü, kireçtaşlarının dekarbonasyonu ve kısmi magmatik CO₂ katkısı ise, bazı sahalarda klasik meteorik modele göre daha karmaşık bir hidrotermal-karbonat katkılı sistemin geçerli olabileceğini göstermektedir (Eren Köroğlu ve ark., 2023).

Listvenitleşme ile İlişkili Model

Listvenitleşme ile ilişkili model, ultramafik kayaların ileri derecede karbonatlaşması sonucunda gelişen ekstrem alterasyon zonlarını temel alır. Bu süreçte serpantinit ya da peridotit, yüksek CO₂ etkinliği altında yaygın biçimde karbonat ve silis fazlarına dönüşmekte; sonuçta başlıca magnezit + kuvars ± dolomit ± fuksit içeren listvenitik topluluklar oluşmaktadır. Oman ofiyoliti üzerinde yürütülen çalışmalar, geniş ölçekli karbonatlaşmanın serpentiniti yaygın olarak listvenit topluluğuna dönüştürdüğünü ve bu topluluğun magnezit-kuvars-fuksit bileşimiyle tanımlandığını göstermiştir (Beinlich ve ark., 2020). Daha sonraki çalışmalar da listvenitlerin çoğunlukla magnezit ve kuvarsın baskın olduğu, yer yer dolomit ve Fe-hidroksitlerin eşlik ettiği tam karbonatlaşmış peridotitler olduğunu doğrulamıştır (Okazaki ve ark., 2021). Bu model, manyezitleşmenin yalnızca damar dolgusundan ibaret olmadığını, bazı sistemlerde ultramafik ana kayanın bölgesel ölçekte karbonatlaşarak neredeyse bütünüyle yeniden düzenlenebildiğini göstermesi bakımından önemlidir.

Sığ Gölsel/Evaporitik Model

Sığ gölsel ya da evaporitik model, manyezit ve özellikle hidromagnezit oluşumlarının ultramafik kayaların ayrışmasıyla taşınan Mg bakımından zengin suların kapalı havzalarda çökmesiyle geliştiğini öne sürmektedir. Bu model, damarsal cevherleşmelerden farklı olarak stratiform, gölsel ya da yüzeye yakın sedimanter bir birikimi ifade eder. Zedef ve arkadaşlarının (2000) Güneybatı Türkiye’de damar-stockwork, sedimanter manyezit ve hidromagnezit oluşumlarını birlikte ele alan çalışması, aynı bölgesel ultramafik çerçeve içinde hem kırık kontrollü hem de sedimanter çökme senaryolarının gelişebildiğini göstermiştir. Ayrıca Türkiye’de yaşayan hidromagnezit stromatolitleri üzerine yapılan çalışma (Braithwaite, ve Zedef.,1996), göl sularındaki Mg

ve karbonatın ultramafik kayalardan geçiş sırasında özöldüğünü ve ökөлmenin biyolojik/evaporatif süreçlerle ilişkili olabildiğini göstermiştir. Bu nedenle sıg gösel model, özellikle güncel ya da genç Mg-(hidro)karbonat oluşumlarının anlaşılmasında önemli bir doğa analoji sunmaktadır.

Genel Değerlendirme

Ofiyolitik birimlerle ilişkili manyezit yatakları, yalnızca ekonomik jeoloji açısından değil, aynı zamanda su-kayaç etkileşimi, karbonatlaşma mekanizmaları ve doğa karbon mineralizasyonu bakımından da çok boyutlu sistemlerdir. Bu bölümde ele alınan veriler, manyezitleşmenin basit bir alterasyon ürünü olarak değil; ana kayaç bileşimi, serpantinleşme derecesi, yapısal denetim, akışkan kökeni ve fizikokimyasal koşulların birlikte çalıştığı karmaşık bir süreç olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle ofiyolit ilişkili kriptokristalin manyezit yatakları, düşük sıcaklıklı akışkan sistemleri, kırık kontrollü ökölme ve yüksek saflıkta karbonat gelişimi bakımından önemli örnekler sunmaktadır.

Türkiye’deki ofiyolit kuşakları, özellikle Eskişehir-Kütahya-Bilecik provensi, bu süreçlerin hem klasik cevher jeolojisi hem de güncel karbon yönetimi perspektifiyle birlikte incelenebileceği başlıca alanlar arasında yer almaktadır (**Kahya ve Kuşcu, 2014; Ece, Matsubaya ve oban,2005**). Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmaların yalnızca saha jeolojisi ve cevher kalitesine değil; izotop jeokimyası, akışkan kapanımı, termodinamik modelleme ve karbon mineralizasyonu potansiyeline de odaklanması yararlı olacaktır. Böyle bir yaklaşım, manyezit yataklarını yalnızca ekonomik bir kaynak olarak değil, aynı zamanda jeodinamik evrim ve iklim odaklı yerbilimleri araştırmaları açısından da önemli kayıt sistemleri olarak değerlendirmeye imkân sağlayacaktır.

Kaynakça

Abu-Jaber, N. S., ve Kimberley, M. M. (1992). Origin of ultramafic-hosted vein magnesite deposits. *Ore Geology Reviews*, 7(3), 155–191. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(92\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0169-1368(92)90004-5)

Braithwaite, C. J. R., ve Zedef, V. (1996). Hydromagnesite stromatolites and sediments in an alkaline lake, Salda Golu, Turkey. *Journal of Sedimentary Research*, 66(5), 991–1002.

Beinlich, A., Plümper, O., Boter, E., Müller, I. A., Kourim, F., Ziegler, M., Harigane, Y., Lafay, R., ve Kelemen, P. B. (2020). Ultramafic rock carbonation: Constraints from listvenite core BT1B, Oman Drilling Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(6), e2019JB019060. <https://doi.org/10.1029/2019JB019060>

Dabitzias, S. G. (1980). Petrology and genesis of the Vavdos cryptocrystalline magnesite deposits, Chalkidiki Peninsula, northern Greece. *Economic Geology*, 75(8), 1138–1151. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.75.8.1138>

Ece, Ö. I., Matsubaya, O., ve Çoban, F. (2005). Genesis of hydrothermal stockwork-type magnesite deposits associated with ophiolite complexes in the Kütahya-Eskişehir region, Turkey. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen*, 181(2), 191–205.

Eren Koroğlu, H., Akıska, E., Karakaş, Z., ve Akıska, S. (2023). Yakacık (KB-Ankara) bölgesi manyezit damarlarının oluşumu ve kökeni. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 66(2), 223–256. <https://doi.org/10.25288/tjb.1242468>

Kahya, A., ve Kuşcu, M. (2014). Source of the mineralizing fluids in ultramafic related magnesite in the Eskişehir area, northwest Turkey, along the İzmir-Ankara Suture: A stable isotope

study. Turkish Journal of Earth Sciences, 23(1), 1–15.
<https://doi.org/10.3906/yer-1302-12>

Kelemen, P. B., ve Matter, J. (2008). In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105(45), 17295–17300.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0805794105>

Kelemen, P. B., Matter, J., Streit, E. E., Rudge, J. F., Curry, W. B., ve Blusztajn, J. (2011). Rates and mechanisms of mineral carbonation in peridotite: Natural processes and recipes for enhanced, in situ CO₂ capture and storage. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 39, 545–576.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-092010-152509>

Kiliyas, S. P., Pozo, M., Bustillo, M., Stamatakis, M. G., ve Calvo, J. P. (2006). Origin of the Rubian carbonate-hosted magnesite deposit, Galicia, NW Spain: Mineralogical, REE, fluid inclusion and isotope evidence. Mineralium Deposita, 41, 713–733.
<https://doi.org/10.1007/s00126-006-0075-5>

Koca, B., Akıska, E., Karakaş, Z., ve Akıska, S. (2026). Geochemical and isotopic signatures of ultramafic-hosted magnesite deposit: A case study of the Edige region (Ankara-Central Anatolia). Turkish Journal of Earth Sciences, 35(1), 42–64.
<https://doi.org/10.55730/1300-0985.2004>

Lugli, S., Morteani, G., ve Blamart, D. (2002). Petrographic, REE, fluid inclusion and stable isotope study of magnesite from the Upper Triassic Burano Evaporites (Secchia Valley, northern Apennines): Contributions from sedimentary, hydrothermal and metasomatic sources. Mineralium Deposita, 37, 480–494.
<https://doi.org/10.1007/s00126-001-0251-6>

Möller, P. (Ed.). (1989). Magnesite: Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-carbonates. Gebrüder Borntraeger.

Okay, A. I. (1984). Distribution and characteristics of the northwest Turkish blueschists. In J. E. Dixon ve A. H. F. Robertson (Eds.), The geological evolution of the Eastern Mediterranean (Geological Society Special Publication No. 17, pp. 455–466). Geological Society of London.

Okazaki, K., Michibayashi, K., Hatakeyama, K., Abe, N., Johnson, K. T. M., Kelemen, P. B., ve the Oman Drilling Project Science Team. (2021). Major mineral fraction and physical properties of carbonated peridotite (listvenite) from ICDP Oman Drilling Project Hole BT1B inferred from X-ray CT core images. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(12), e2021JB022719. <https://doi.org/10.1029/2021JB022719>

Özkul, C., Acar, R. U., ve Demirbilek, M. (2021). Petrography and geochemistry of Bahatlar volcanites (Emet-Kütahya). *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(6), 744–755. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.32847>

Pohl, W. (1990). Genesis of magnesite deposits—Models and trends. *Geologische Rundschau*, 79(2), 291–299. <https://doi.org/10.1007/BF01830626>

Power, I. M., Harrison, A. L., Dipple, G. M., Wilson, S. A., Kelemen, P. B., Hitch, M., ve Southam, G. (2013). Carbon mineralization: From natural analogues to engineered systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 77(1), 305–360. <https://doi.org/10.2138/rmg.2013.77.9>

Reeder, R. J. (1983). Crystal chemistry of the rhombohedral carbonates. In R. J. Reeder (Ed.), *Carbonates: Mineralogy and*

chemistry (Reviews in Mineralogy, Vol. 11, pp. 1–47). Mineralogical Society of America.

Schroll, E. (2002). Genesis of magnesite deposits in the view of isotope geochemistry. *Boletim Paranaense de Geociências*, 50, 59–68. <https://doi.org/10.5380/geo.v50i0.4158>

Yeniyol, M. (1982). The problems of the genesis of the Yunak (Konya) magnesites, their evaluation and the petrogenesis of the surrounding rocks. *Istanbul Earth Sciences Review*, 3, 21–51.

Zedef, V., Russell, M. J., Fallick, A. E., ve Hall, A. J. (2000). Genesis of vein stockwork and sedimentary magnesite and hydromagnesite deposits in the ultramafic terranes of southwestern Turkey: A stable isotope study. *Economic Geology*, 95(2), 429–445. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.2.429>

METALİK MADEN ARAMACILIĞINDA BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK YENİLİKLER: MİNERAL SİSTEMLERİ, VERİ BİLİMİ VE İLERİ DÜZEY ARAMA YAKLAŞIMLARI

**İREM AKSOY²
TİJEN ÜNER³**

Giriş

Metalik maden jeolojisi son otuz yılda önemli bir kavramsal ve metodolojik dönüşüm sürecine girmiştir. Yirminci yüzyıl boyunca keşif faaliyetleri büyük ölçüde yüzey jeoloji haritalaması, jeokimyasal anomali takibi ve iki boyutlu jeofizik kesit yorumlarına dayanmış; bu yaklaşım özellikle yüzeye yakın, yüksek tenörlü ve belirgin alterasyon göstergelerine sahip yatakların keşfinde başarılı olmuştur. Ancak küresel ölçekte “kolay keşfedilebilir” yatakların azalması, arama faaliyetlerini daha karmaşık jeolojik ortamlara ve örtü altındaki sistemlere yöneltmiştir (Schodde, 2017). Bu durum, metalik maden jeolojisinde yalnızca teknik değil, aynı zamanda

² Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9969-0627

³ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6059-9148)

epistemolojik bir yeniden yapılanmayı zorunlu kılmıştır. Bu dönüşümün arkasındaki en güçlü itici faktörlerden biri küresel enerji dönüşümüdür. Elektrifikasyon, yenilenebilir enerji sistemleri ve batarya teknolojileri; bakır, nikel, kobalt, lityum ve nadir toprak elementleri gibi metallerin talebini belirgin biçimde artırmıştır (IEA, 2021). Özellikle bakır ve nikel gibi iletkenlik ve enerji depolama açısından kritik metaller, düşük karbonlu enerji altyapısının temel girdileri hâline gelmiştir. Bu talep artışı, daha düşük tenörlü, daha derin ve teknik olarak daha zorlayıcı yatakların ekonomik değerlendirmeye alınmasını gerektirmektedir (Ali ve ark., 2017). Dolayısıyla arama stratejileri artık yalnızca jeolojik potansiyele değil; maliyet, risk ve sürdürülebilirlik parametrelerine de dayanmaktadır.

Geleneksel yatak tipolojisi yaklaşımı, cevherleşmeyi belirli morfolojik ve mineralojik özelliklere göre sınıflandıran bir çerçeve sunmuştur. Bununla birlikte bu yaklaşım, cevher oluşumunu kontrol eden bölgesel jeodinamik süreçleri bütüncül biçimde açıklamakta sınırlı kalmıştır. Bu bağlamda mineral sistemleri yaklaşımı, cevher oluşumunu bir süreç zinciri olarak ele alarak disipline yeni bir perspektif kazandırmıştır (Wyborn ve ark., 1994). Mineral sistemleri modeli; metal kaynağı, ısı ve enerji girdisi, akışkan dolaşımı, yapısal/stratigrafik kontrol ve çökelme mekanizmalarını entegre bir sistem içinde değerlendirir. Bu yaklaşım, özellikle porfiri bakır (Cu)–altın(Au) yatakları ve Demir Oksit Bakır Altın (Iron Oxide Copper Gold-IOCG) gibi büyük ölçekli sistemlerde bölgesel hedefleme stratejilerinin geliştirilmesinde etkili olmuştur (McCuaig ve Hronsky, 2014). Teknolojik ilerlemeler bu kavramsal dönüşümü destekleyen temel araçları sağlamıştır. Uydu tabanlı hiperspektral sistemler, yüzey alterasyon minerallerinin yüksek spektral çözünürlükle haritalanmasına olanak tanımakta; insansız hava aracı (UAV) platformları ise saha ölçeğinde esnek veri üretimi sağlamaktadır (Thompson ve ark., 1999). Jeofizik alanında üç

boyutlu ters çözüm (3D inversion) tekniklerinin gelişimi, gömülü kütlelerin geometrisinin daha güvenilir biçimde modellenmesini mümkün kılmıştır (Li ve Oldenburg, 1996). Elektromanyetik ve magnetotellürik yöntemler, kabuk ölçekli iletkenlik yapılarını ortaya koyarak derin hidrotermal sistemlerin izlenmesine katkı sağlamaktadır.

Veri üretimindeki artış, arama süreçlerinde veri bilimi ve makine öğrenmesi uygulamalarının önemini artırmıştır. Mineral olasılık haritalama (MPM) yöntemleri, çoklu veri katmanlarını istatistiksel veya makine öğrenmesi algoritmalarıyla entegre ederek potansiyel alanları nicel biçimde değerlendirmektedir (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2009). Bununla birlikte makine öğrenmesi uygulamalarında model genellenebilirliği, veri kalitesi ve açıklanabilirlik gibi konular hâlen aktif tartışma alanlarıdır. Güncel eğilim, fizik-temelli jeolojik bilgi ile veri odaklı yöntemlerin hibrit kullanımına yönelmektedir.

Modern keşif faaliyetleri yalnızca teknik başarı ile değerlendirilemez. Çevresel etki, karbon ayak izi, toplumsal kabul ve yatırımcı beklentileri arama projelerinin başarısında belirleyici hâle gelmiştir. Sürdürülebilir madencilik ve ESG kriterleri, finansman kararlarında doğrudan etkili olmakta; bu durum arama stratejilerinin planlama aşamasından itibaren çevresel ve toplumsal parametreleri içermesini gerektirmektedir (Franks ve ark., 2014).

Bu kitap bölümünün amacı, metalik maden jeolojisinde son dönemde ortaya çıkan kavramsal ve metodolojik dönüşümü literatür ışığında değerlendirmek ve güncel araştırma yaklaşımlarını bütüncül bir çerçevede tartışmaktır. Bölüm; mineral sistemleri perspektifi, teknolojik yenilikler, veri bilimi uygulamaları ve derin/örtülü sistemlerin keşfi ile sürdürülebilirlik boyutlarını entegre biçimde ele almaktadır.

Kavramsal Dönüşüm: Mineral Sistemleri Yaklaşımı

Metalik maden jeolojisindeki güncel dönüşüm, arama stratejilerinin yalnızca teknik araçlar düzeyinde değil, kavramsal çerçeve düzeyinde de yeniden yapılandığını göstermektedir. Yirminci yüzyıl boyunca baskın olan yatak-tipi merkezli yaklaşım, cevherleşmeleri morfolojik ve mineralojik özelliklerine göre sınıflandırmış; porfiri, VMS, epitermal ve SEDEX gibi oluşumlar üzerinden arama rehberleri üretmiştir. Bu yaklaşım keşif başarısına önemli katkılar sağlamakla birlikte, cevher oluşumunu kontrol eden bölgesel jeodinamik süreçleri bütüncül biçimde modellemede sınırlı kalmıştır (McCuaig ve Hronsky, 2014).

Yatak Sınıflandırmasından Süreç Temelli Yaklaşım

Yatak sınıflandırma yaklaşımı esasen tanımlayıcıdır; belirli litolojik birliktelikler, alterasyon tipleri ve metal birliktelikleri üzerinden analoji kurar. Ancak arama faaliyetlerinin örtü altına ve daha derin kabuk seviyelerine kayması, yüzey göstergelerinin azaldığı ortamlarda analojiye dayalı hedeflemenin etkinliğini azaltmıştır. Bu durum, cevherleşmeyi yalnızca “son ürün” olarak değil, onu oluşturan süreçlerin toplamı olarak ele alan bir modele gereksinim doğurmuştur.

Mineral sistemleri yaklaşımı bu gereksinime yanıt olarak geliştirilmiştir (Wyborn ve ark., 1994). Bu yaklaşımda cevherleşme; metal kaynağı, ısı akısı, akışkan üretimi ve dolaşımı, geçirgenlik yapısı ve kimyasal/termal tuzak mekanizmalarının etkileşimi sonucu ortaya çıkan bir sistem çıktısıdır. Böylece arama stratejileri, yüzeyde gözlenen alterasyon zonlarından başlayarak kabuk ölçeğinde ısı ve akışkan akışının izlenmesine kadar genişler. Bu kapsamda mineral sistemleri modeli iki temel avantaj sunar:

- Bölgesel ölçekli hedef daraltma (target reduction)
- Belirsizliklerin süreç temelli parametreler üzerinden nicelleştirilebilmesi

Mineral Sistemlerinin Temel Bileşenleri ve İşleyişi

Mineral sistemleri yaklaşımı, cevherleşmeyi tekil bir jeolojik olay olarak değil, birbiriyle ilişkili süreçlerin oluşturduğu bütüncül bir sistem olarak ele alır. Bu sistemin oluşumu ve sürdürülebilirliği, belirli temel bileşenlerin bir araya gelmesine bağlıdır. Bu bileşenler genel olarak metal kaynağı, ısı ve enerji girdisi, akışkan üretimi ve dolaşımı, geçirgenlik (yapısal ve stratigrafik kontrol) ile çökeltme (tuzaklanma) mekanizmaları olarak tanımlanmaktadır. Bu unsurların her biri tek başına gerekli ancak yeterli değildir; ekonomik bir cevherleşmenin oluşabilmesi için bu bileşenlerin zaman ve mekân açısından uyumlu bir şekilde etkileşmesi gerekmektedir.

Metal kaynağı, cevherleşmeye katılan elementlerin kökenini temsil eder ve genellikle manto kaynaklı magmatik süreçler veya kabuksal yeniden mobilizasyon ile ilişkilidir. Isı ve enerji girdisi, magmatik intrüzyonlar veya derin kabuk süreçleri aracılığıyla akışkanların hareketini ve metal taşınımını kontrol eder. Akışkan dolaşımı, metallerin çözünmesi, taşınması ve yeniden çökeltmesi süreçlerinde merkezi bir rol oynar. Bu dolaşımın etkinliği büyük ölçüde geçirgenlik mimarisi tarafından belirlenir; fay sistemleri, kırık zonları ve litolojik sınırlar akışkan akışını yönlendiren başlıca yapısal unsurlardır. Son olarak çökeltme mekanizmaları, basınç-sıcaklık değişimleri, redoks koşulları ve kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla metalin ekonomik konsantrasyonlara ulaşmasını sağlar.

Mineral sistemleri yaklaşımı, bu bileşenlerin uzaysal ve zamansal ilişkilerini analiz ederek arama stratejilerinin yalnızca yüzey göstergelerine değil, sistemin bütünlüğüne odaklanmasını sağlar. Bu bağlamda temel soru, belirli bir alanda tekil anomalilerin varlığından ziyade, söz konusu mineral sisteminin çalışıp çalışmadığının değerlendirilmesidir.

Kritik Metaller ve Arz Güvenliği

Enerji dönüşümü, metal talep projeksiyonlarını önemli ölçüde değiştirmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın raporlarına göre temiz enerji teknolojilerinin yaygınlaşması, bakır ve nikel talebinde belirgin artışlara yol açacaktır (IEA, 2021). Lityum ve nadir toprak elementleri ise özellikle batarya teknolojileri nedeniyle stratejik önem kazanmıştır. Bu metallerin başlıca kullanım alanları ve arama zorlukları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Kritik metallerin başlıca kullanım alanları ve arama zorlukları

Metal	Temel kullanım alanı	Jeolojik ortam	Başlıca arama zorlukları
Cu	Elektrik iletimi, enerji altyapısı	Porfiri, IOCG	Derin gömülülük, düşük tenör, büyük hacimli sistemler
Ni	Batarya, paslanmaz çelik	Laterit, magmatik sülfidik	Kalın ayrışma örtüsü, lateritleşme, jeokimyasal maskeleme
Li	Enerji depolama (batarya)	Pegmatit, tuzlu göller (salar)	Düşük tenör, geniş alan yayılımı, hidrojeokimyasal değişkenlik
REE	Mıknatıslar, elektronik, temiz enerji teknolojileri	Karbonatit, alkali intrüzyonlar, iyon adsorpsiyon killeri	Karmaşık metalurji, düşük konsantrasyon, mineralojik çeşitlilik

Belirsizlik ve Olasılıksal Yaklaşımın Arama Stratejilerine Etkileri

Modern arama faaliyetleri yüksek sermaye gerektirir ve keşif başarı oranları göreceli olarak düşüktür. Bu nedenle belirsizlik yönetimi, mineral sistemleri yaklaşımının önemli bileşenlerinden

biri olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel keşif stratejileri çoğunlukla belirli anomalilerin varlığına dayalı deterministik yorumlara dayanırken, mineral sistemleri yaklaşımı cevherleşme süreçlerini oluşturan bileşenlerin olasılıksal olarak değerlendirilmesine olanak tanır (Carranza, 2009; Bonham-Carter, 1994). Bu çerçevede bir hedef alanın değerlendirilmesi yalnızca yüzeyde gözlenen anomalilere değil, sistemin temel bileşenlerinin birlikte bulunup bulunmadığına odaklanır. Örneğin bir bölgede metal kaynağına ilişkin jeokimyasal göstergeler, ısı kaynağına işaret eden magmatik veriler ve geçirgenlik mimarisine ilişkin yapısal analizler birlikte değerlendirilerek mineral sisteminin bütünlüğü sorgulanır. Bu yaklaşım, keşif sürecinde “anomali var mı?” sorusundan ziyade “mineral sistemi çalışıyor mu?” sorusuna odaklanılmasını sağlar.

Mineral sistemleri perspektifi, arama projelerinde birkaç önemli değişimi beraberinde getirmiştir:

- Lokal anomaliden bölgesel modellemeye geçiş
- İki boyutlu kesit yorumlarından üç boyutlu kabuk ölçekli modellere geçiş
- Deterministik yorumdan olasılıksal değerlendirme yaklaşımlarına geçiş
- Disiplinlerarası veri entegrasyonunun arama projelerinde temel bir gereklilik hâline gelmesi

Bu dönüşüm, veri bilimi, sayısal modelleme ve üç boyutlu jeolojik modelleme tekniklerinin keşif süreçlerine entegrasyonunu da teşvik etmiştir. Dolayısıyla mineral sistemleri yaklaşımı yalnızca kavramsal bir çerçeve sunmakla kalmayıp, aynı zamanda veri yoğun ve disiplinler arası keşif stratejilerinin gelişimine de zemin hazırlamaktadır.

Keşifte Teknolojik Gelişmeler

Mineral sistemleri yaklaşımının benimsenmesi, arama stratejilerinde ölçek genişlemesini de beraberinde getirmiştir. Bu genişleme yalnızca kavramsal düzeyde değil, veri üretim ve modelleme teknolojilerinde de karşılık bulmuştur. Modern keşif projeleri artık yüzey jeolojisi ile sınırlı değildir; çok spektralli ve hiperspektralli uzaktan algılama sistemleri, yüksek çözünürlüklü hava jeofiziği ve üç boyutlu ters çözüm algoritmaları, yer kabuğunun hem yüzey hem de derin yapısını entegre biçimde analiz etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu teknolojik gelişmeler, mineral sistemleri yaklaşımının gerektirdiği çok ölçekli veri analizini destekleyerek, yüzey mineralojisi ile derin jeolojik yapıların birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Hiperspektral Uzaktan Algılama

Hiperspektral görüntüleme sistemleri, elektromanyetik spektrumun görünür-kısa dalga kızılötesi (VNIR–SWIR) ve bazı durumlarda termal kızılötesi (TIR) bantlarında yüzlerce dar bantta veri üretir. Bu yüksek spektral çözünürlük, minerallerin kristal yapılarına bağlı olarak ortaya çıkan karakteristik absorpsiyon özelliklerinin ayrıntılı biçimde tanımlanmasına olanak tanır. Kayaç ve minerallerin spektral özellikleri, atomik ve moleküler titreşim süreçleriyle doğrudan ilişkili olup uzaktan algılama verilerinin jeolojik yorumlanmasının fiziksel temelini oluşturur (Clark, 1999). Özellikle hidrotermal alterasyon mineralleri (illit, muskovit, alunit, kaolinit, klorit ve epidot) belirgin spektral imzalar sergilemekte ve bu özellikler mineral haritalama çalışmalarında etkin biçimde kullanılmaktadır (Kruse ve ark., 2003; van der Meer ve ark., 2012; Thompson ve ark., 1999).

Porfiri ve epitermal sistemlerde alterasyon zonlarının uzaysal dağılımı, cevherleşme merkezinin konumuna ilişkin kritik bilgiler sağlar. Argilik, filik ve potasik alterasyon zonlarının ayırt edilmesi,

erken aşama hedefleme açısından stratejik öneme sahiptir. Bu bağlamda hiperspektral veriler, klasik jeolojik haritalamanın nicel, tekrarlanabilir ve operatör bağımlılığını azaltan bir uzantısı olarak değerlendirilmektedir (van der Meer ve ark., 2012).

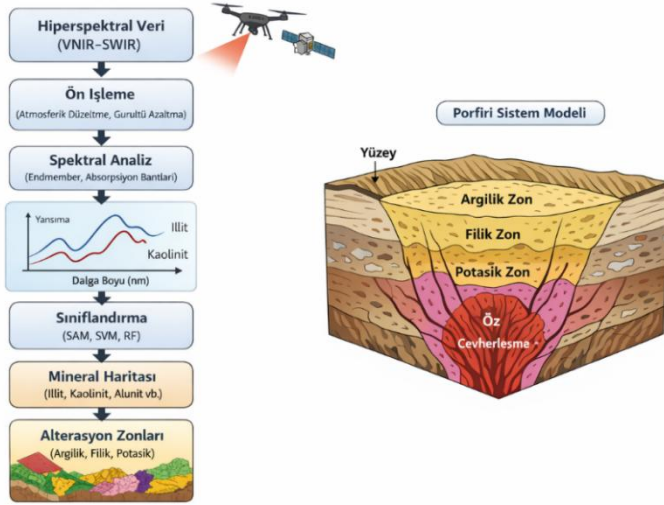
Son yıllarda özellikle insansız hava aracı (UAV) tabanlı sistemlerin gelişimi, saha ölçeğinde yüksek mekânsal çözünürlükte veri üretimini mümkün kılmıştır. UAV platformları, uydu sistemlerine kıyasla daha esnek veri toplama imkânı sunarak küçük ölçekli alterasyon zonlarının ayrıntılı biçimde haritalanmasına olanak tanımaktadır (Thompson ve ark., 1999). Şekil 1’de gösterildiği üzere, UAV tabanlı hiperspektral veri setleri, mineral dağılımının yüksek çözünürlükte modellenmesine ve alterasyon zonlarının sınıflandırılmasına katkı sağlamaktadır. Hiperspektral veri analiz süreci genellikle aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- Atmosferik düzeltme
- Gürültü azaltma ve bant seçimi
- Uç üye (endmember) çıkarımı
- Sınıflandırma (SAM, SVM, Random Forest vb.)
- Saha doğrulaması

Bu iş akışı, ham spektral verinin jeolojik olarak anlamlı mineral haritalarına dönüştürülmesini sağlar. Bununla birlikte hiperspektral verilerin bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Yüzey örtüsü, ayrışma zonları ve bitki örtüsü spektral sinyali maskeleyebilir. Ayrıca spektral özellikleri benzer olan minerallerin ayrımı, yüksek spektral çözünürlük ve gelişmiş sınıflandırma algoritmaları gerektirir. Bu nedenle hiperspektral veriler tek başına değerlendirilmek yerine, jeolojik haritalama, jeokimyasal analizler ve jeofizik veri setleri ile entegre edilmelidir. Bu tür çoklu veri entegrasyonu, mineral sistemleri yaklaşımıyla uyumlu olarak yüzey

mineralojisi ile derin jeolojik süreçlerin birlikte yorumlanmasına olanak tanır.

Şekil 1: Hiperspektral uzaktan algılama kavramsal iş akışı ve porfiri sistemlerde alterasyon zonlarını gösteren diyagram (Clark, 1999; van der Meer ve ark., 2012 ve Thomson ve ark., 2016’ dan değiştirilerek alınmıştır)



Hava Jeofiziği ve Yüksek Çözünürlüklü Sensörler

Hava manyetiği ve gravite ölçümleri, bölgesel ölçekli yapısal ve litolojik farklılıkların belirlenmesinde uzun süredir kullanılan temel jeofizik yöntemlerdir. Bu yöntemler, özellikle kabuk ölçekli yapıların ve litolojik sınırların belirlenmesinde önemli bilgiler sağlamaktadır (Dentith ve Mudge, 2014). Günümüzde sensör hassasiyetindeki artış ve düşük irtifa uçuş teknikleri sayesinde hava jeofiziği verileri daha yüksek mekânsal çözünürlükte elde edilebilmekte ve bu durum örtü altı hedeflerin belirlenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda farklı jeofizik yöntemler, mineral sistemlerinin yüzeyden derin köklerine kadar

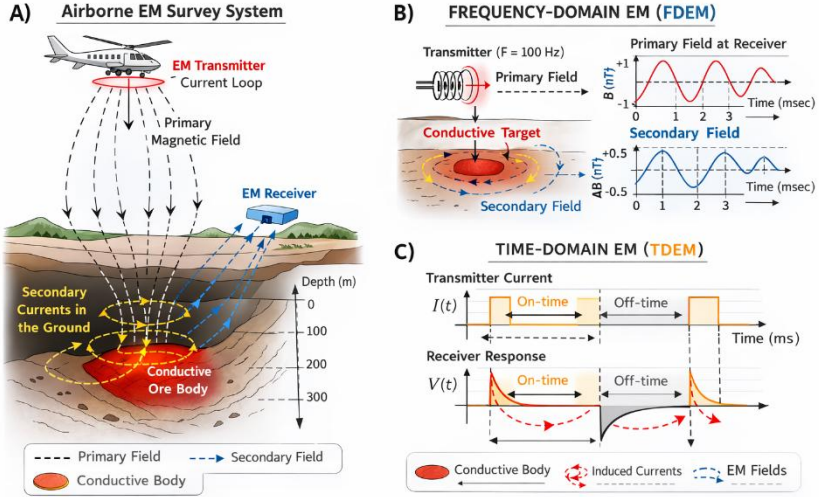
izlenmesine olanak tanıyan tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilmektedir (Şekil 2).

Elektromanyetik (EM) yöntemler, iletken sülfidik cevherleşmelerin doğrudan tespitinde etkili araçlardır. Zaman alanlı elektromanyetik (TDEM) ve frekans alanlı elektromanyetik (FDEM) sistemler, farklı derinlik aralıklarında veri üreterek yeraltındaki iletkenlik dağılımının belirlenmesine olanak tanır (Nabighian ve ark., 2005). Bu yöntemler özellikle VMS ve magmatik sülfidik sistemlerin aranmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Magnetotellürik (MT) yöntemler ise daha derin kabuk seviyelerinde elektriksel iletkenlik yapısını ortaya koyarak hidrotermal sistemlerin derin köklerinin izlenmesine katkı sağlamaktadır. MT verileri, litosferik ölçekli yapıların ve magmatik sistemlerin anlaşılmasında önemli bilgiler sunmaktadır (Simpson ve Bahr, 2005).

Bu jeofizik yöntemler, mineral sistemleri yaklaşımla uyumlu olarak yüzey mineralojisi ile derin jeolojik yapıların birlikte değerlendirilmesine olanak tanır. Böylece arama stratejileri, yalnızca yüzey anomalilerine değil, sistemin derin köklerine ve bölgesel jeodinamik kontrollerine odaklanmaktadır (McCuaig ve Hronsky, 2014). Hava jeofiziği yöntemleri, mineral sistemlerinin yüzeyden derin kabuk seviyelerine kadar izlenmesine olanak tanıyan tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilmektedir (McCuaig ve Hronsky, 2014).

Şekil 2: Hava elektromanyetik (EM) yöntemlerinin temel prensiplerini gösteren şematik diyagram: (A) hava EM sisteminin genel çalışma prensibi, (B) frekans alanı elektromanyetik (FDEM) yöntemi ve (C) zaman alanı elektromanyetik (TDEM) yöntemi (Nabighian ve ark., 2005; Simpson ve Bahr, 2005; USGS kaynaklarından değiştirilerek alınmıştır).



Üç Boyutlu Ters Çözüm (3D Inversion) ve Jeolojik Modelleme

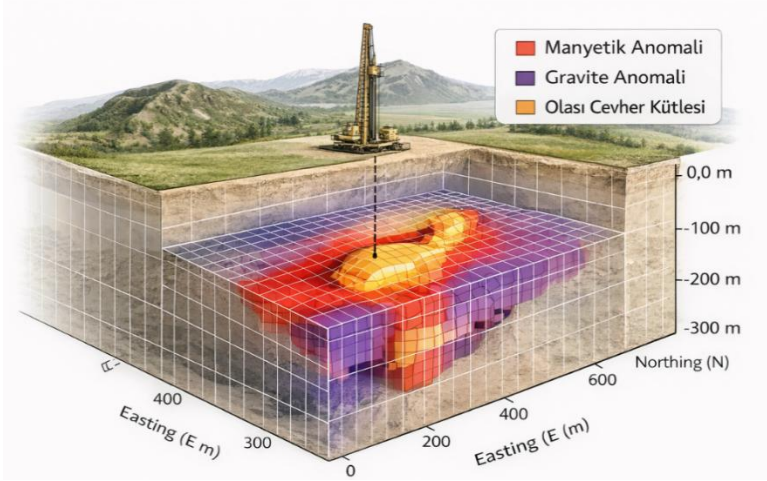
Jeofizik verilerin yorumlanmasında son yıllardaki en önemli gelişmelerden biri, üç boyutlu ters çözüm (3D inversion) algoritmalarının yaygınlaşmasıdır (Li ve Oldenburg, 1996). Ters çözüm yaklaşımı, ölçülen jeofizik alanın altında yatan fiziksel parametre dağılımının (örneğin manyetik duyarlılık veya yoğunluk) hesaplanmasını amaçlar. Matematiksel olarak bu süreç, gözlenen veri ile model tahmini arasındaki farkın minimize edilmesine dayanır ve genellikle düzensizleştirme (regularization) terimleri içerir.

Üç boyutlu ters çözüm teknikleri sayesinde:

- Gömülü kütlelerin geometrisi daha gerçekçi biçimde modellenebilir
- Sondaj hedefleri daha düşük belirsizlikle belirlenebilir
- Jeolojik ve jeofizik veriler ortak bir model ortamında entegre edilebilir

Bu bağlamda ters çözüm sonuçları, yüzeyde ölçülen jeofizik anomalilerin derin jeolojik yapı ile ilişkilendirilmesini sağlar. Özellikle manyetik ve gravite verilerinin birlikte değerlendirilmesi, yoğunluk ve manyetik özelliklerin uzaysal dağılımını ortaya koyarak olası cevherleşme zonlarının belirlenmesine katkı sağlar (Li ve Oldenburg, 1996; Dentith ve Mudge, 2014). Bu süreç şekil 3'te kavramsal olarak gösterilmektedir. Yüzeyde llen manyetik ve gravite anomalilerinin üç boyutlu ters çözümü sonucunda, yeraltındaki olası cevher kütlesinin geometrisi modellenebilmekte ve bu model sondaj hedeflerinin belirlenmesinde doğrudan kullanılabilmektedir. Bu tür üç boyutlu modeller, keşif projelerinde belirsizliğin azaltılmasına ve riskin daha etkin yönetilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca modern modelleme yazılımları, jeolojik haritalama, sondaj verileri ve jeofizik sonuçlarını aynı üç boyutlu ortamda birleştirerek "jeolojik dijital ikiz" oluşturmayı mümkün kılmaktadır. Bu entegrasyon, disiplinler arası yorumlama sürecini güçlendirmekte ve keşif stratejilerinin daha sistematik biçimde geliştirilmesine olanak tanımaktadır (McCuaig ve Hronsky, 2014).

Şekil 3: Manyetik ve gravite verilerinin üç boyutlu ters çözümü (3D inversion) sonucunda elde edilen jeolojik model: yüzeyde ölçülen anomalilerin ters çözümü ile yeraltındaki olası cevher kütesinin geometrisinin belirlenmesi (Li ve Oldenburg, 1996; Dentith ve Mudge, 2014)



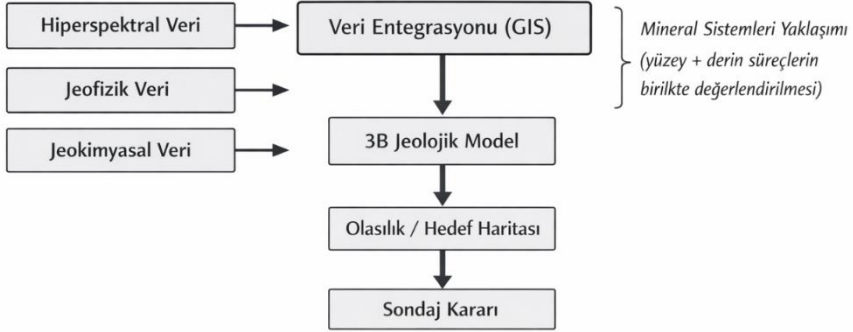
Veri Entegrasyonu ve Çoklu Ölçekli Yaklaşım (revize)

Teknolojik dönüşümün en önemli bileşenlerinden biri veri entegrasyon kapasitesidir. Modern maden aramacılığı, farklı ölçek ve disiplinlerden elde edilen veri setlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektiren veri yoğun bir süreç hâline gelmiştir. Hiperspektral veriler yüzey mineralojisini, jeofizik yöntemler derin fiziksel özellikleri, jeokimyasal veriler ise element dağılımını temsil etmektedir. Bu veri katmanlarının birlikte değerlendirilmesi, mineral sistemleri yaklaşımıyla uyumlu çok ölçekli bir analiz imkânı sunar (McCuaig ve Hronsky, 2014). Bu bağlamda Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) ve üç boyutlu modelleme yazılımları, farklı veri türlerinin aynı mekânsal referans sistemi içinde entegre edilmesini sağlayan temel araçlardır. Uzaktan algılama verilerinin işlenmesi, veri hazırlama, ön işleme, sınıflandırma ve doğrulama aşamalarını içeren sistematik iş akışları çerçevesinde gerçekleştirilmektedir (Acar ve Zengin, 2023).

Bu entegrasyon, yüzey gözlemlerinden derin kabuk yapılarına kadar uzanan çok ölçekli bir yorumlama çerçevesi sunarak potansiyel hedef alanların daha güvenilir biçimde belirlenmesine katkı sağlar (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2009).

Modern keşif süreçlerinde veri hazırlama, modelleme, doğrulama ve hedefleme aşamaları birbirine bağlı bir iş akışı içinde yürütülmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, farklı veri türleri arasındaki ilişkilerin daha etkin biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Şekil 4’te bu çok katmanlı veri entegrasyonu süreci kavramsal olarak gösterilmektedir. Bu tür çok katmanlı veri analizleri, veri bilimi ve makine öğrenmesi yöntemlerinin keşif süreçlerine entegrasyonunu da beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda sayısal hedefleme ve makine öğrenmesi yaklaşımları bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Şekil 4: Veri entegrasyonu, 3B modelleme ve olasılıksal hedefleme sürecini gösteren kavramsal iş akışı (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2009; McCuaig ve Hronsky, 2014).



Veri Bilimi Ve Sayısal Hedefleme Yaklaşımları

Mineral sistemleri yaklaşımının benimsenmesi ve çoklu veri üretimindeki artış, metalik maden aramacılığını veri yoğun bir disipline dönüştürmüştür. Günümüzde bir arama projesi; jeolojik haritalar, sondaj verileri, jeokimyasal analizler, hava jeofiziği verileri, uydu görüntüleri ve yapısal veri setleri gibi farklı ölçeklerde çok sayıda veri katmanı içermektedir. Bu veri hacmi, geleneksel sezgisel yorumlama yöntemleriyle etkin biçimde analiz edilmesi güç olan karmaşık veri ortamları oluşturmuştur. Bu bağlamda veri bilimi, istatistiksel modelleme ve makine öğrenmesi yaklaşımları modern keşif stratejilerinin temel bileşenleri hâline gelmiştir. Veri bilimi uygulamaları, farklı veri katmanlarının mekânsal ve istatistiksel ilişkilerini analiz ederek potansiyel cevherleşme alanlarının nicel olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşımlar, keşif süreçlerinde belirsizliğin azaltılmasına ve arama yatırımlarının daha etkin biçimde yönlendirilmesine katkı sağlamaktadır (Carranza, 2009; Cracknell ve Reading, 2014).

Mineral Olasılık Haritalaması (Mineral Prospectivity Mapping, MPM)

Mineral olasılık haritalaması (MPM), belirli bir bölgede cevherleşme olasılığını nicel olarak değerlendirmeyi amaçlayan mekânsal modelleme yaklaşımıdır (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2009). Bu yaklaşımın temel varsayımı, bilinen maden yataklarının jeolojik, jeokimyasal ve jeofizik özelliklerinin benzer jeolojik ortamlarda tekrar edebileceğidir.

MPM yöntemleri genel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır:

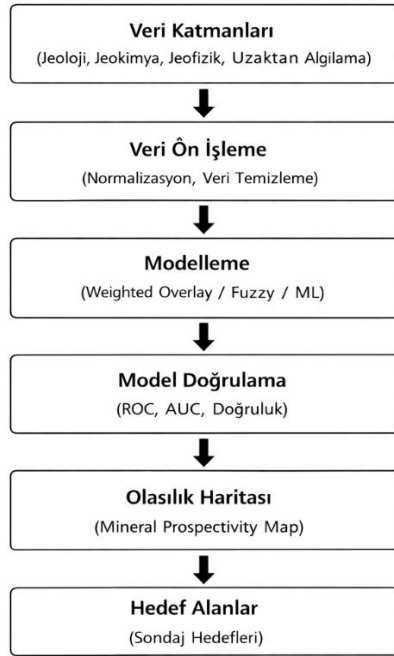
- Bilgi odaklı (uzman temelli) yöntemler
- Ağırlıklı örtüşüm (Weighted Overlay)
- Bulanık mantık (Fuzzy Logic)
- Analitik hiyerarşi süreci (AHP) Veri odaklı (istatistiksel/algoritmik) yöntemler
- Lojistik regresyon
- Ağırlıklı kanıt yöntemi (Weights-of-Evidence)
- Makine öğrenmesi algoritmaları

Bilgi odaklı yöntemler büyük ölçüde uzman yorumuna dayanırken, veri odaklı yöntemler bilinen yatak konumlarından istatistiksel ilişkiler türetmektedir. Güncel eğilim, her iki yaklaşımın birlikte kullanıldığı hibrit modelleme stratejilerine yönelmektedir (Carranza, 2009).

Mineral olasılık haritalama süreci; veri hazırlama, model oluşturma (eğitim), model doğrulama ve potansiyel harita üretimi aşamalarından oluşmaktadır. Bu süreçte farklı veri katmanları mekânsal analiz ortamında entegre edilerek cevherleşme olasılığı

haritaları elde edilmektedir. Bu iş akışı Şekil 5'te kavramsal olarak gösterilmektedir.

Şekil 5: Mineral olasılık haritalaması (MPM) sürecine ilişkin iş akış şeması: çoklu veri katmanlarının hazırlanması, modelleme, model doğrulama ve cevherleşme olasılığı haritasının üretilmesi aşamalarını göstermektedir (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2009)



Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Makine öğrenmesi algoritmaları, doğrusal olmayan ve karmaşık veri ilişkilerini modelleme kapasitesi nedeniyle maden aramacılığında giderek daha yaygın kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, özellikle çok değişkenli ve yüksek boyutlu veri setlerinin analizinde önemli avantajlar sağlamaktadır (Cracknell and Reading, 2014; Carranza, 2009).

Makine öğrenmesi yaklaşımları, mineral sistemleri perspektifi ile uyumlu olarak, farklı veri katmanları arasındaki gizli örüntülerin (patterns) ortaya çıkarılmasına ve potansiyel cevherleşme alanlarının tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Keşif çalışmalarında en yaygın kullanılan algoritmalar şunlardır:

Random Forest (RF): Topluluk öğrenmesi (ensemble learning) temelli bir yöntem olup çok sayıda karar ağacının birleşiminden oluşur. Gürültülü veri setlerine karşı dayanıklıdır ve değişken önem sıralaması üretme kapasitesine sahiptir.

Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine, SVM): Özellikle küçük ve orta ölçekli veri setlerinde yüksek sınıflandırma başarısı göstermektedir. Uzaktan algılama verileri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, özellikle Support Vector Machine (SVM) algoritmasının yüksek doğruluk sağladığı gösterilmiştir (Acar ve ark., 2025). Karmaşık veri dağılımlarını ayırmada etkilidir.

Gradyan Artırma Yöntemleri (Gradient Boosting, XGBoost vb.): Zayıf öğrencilerin ardışık biçimde iyileştirilmesine dayanır ve yüksek tahmin doğruluğu sağlayabilmektedir. Özellikle çok değişkenli veri setlerinde güçlü performans gösterir.

Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks, ANN; Convolutional Neural Networks, CNN): Yüksek boyutlu ve uzaktan algılama verilerinde güçlü örüntü tanıma kapasitesine sahiptir. Özellikle hiperspektral veri analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu algoritmaların performansı büyük ölçüde eğitim veri setinin kalitesine bağlıdır. Maden aramacılığında önemli bir problem, bilinen yatak sayısının sınırlı olması nedeniyle pozitif örnek sayısının düşük kalmasıdır. Bu durum veri setlerinde sınıf dengesizliği (class imbalance) sorununa yol açabilmektedir. Bu nedenle model performansının değerlendirilmesinde yalnızca doğruluk (accuracy) değil, ROC eğrisi ve AUC gibi metriklerin

kullanılması önerilmektedir (Hastie ve ark., 2009). Yaygın olarak kullanılan algoritmaların temel özellikleri ve uygulama alanları Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 2: Yaygın makine öğrenmesi algoritmalarının karşılaştırılması

Algoritma	Avantaj	Sınırlılık	Uygun kullanım
Random Forest	Gürültüye dayanıklı, değişken önemi	Aşırı uyum (overfitting) riski	Bölgesel hedefleme
SVM	Küçük veri setlerinde güçlü	Parametre duyarlılığı	Orta ölçekli analiz
Gradient Boosting	Yüksek doğruluk	Hesaplama maliyeti	Karmaşık veri
ANN / CNN	Güçlü örüntü tanıma	Düşük yorumlanabilirlik	Hiperspektral veri

Model Doğrulama ve Performans Değerlendirme

Makine öğrenmesi uygulamalarında en kritik aşamalardan biri model doğrulama ve performans değerlendirme sürecidir. Keşif projelerinde model performansı genellikle aşağıdaki metriklerle değerlendirilmektedir:

- ROC eğrisi (Receiver Operating Characteristic)
- AUC değeri (Area Under Curve)
- Karmaşıklık matrisi (confusion matrix)
- Kesinlik-duyarlılık analizi (precision-recall)

Bu metrikler, uzaktan algılama temelli sınıflandırma çalışmalarında model performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Acar ve ark., 2025). ROC eğrisi, doğru pozitif oranı ile yanlış pozitif oranı arasındaki ilişkiyi gösterirken, AUC değeri modelin ayırt edicilik gücünü özetleyen bir ölçüttür. AUC değerinin 0.5'e yakın olması modelin rastgele tahmine yakın

olduğunu, 1'e yaklaşması ise yüksek ayırt edicilik gücünü ifade eder (Hastie ve ark., 2009).

Bununla birlikte maden aramacılığında yüksek AUC değeri her zaman ekonomik bir keşif anlamına gelmez. Model sonuçlarının mutlaka jeolojik bağlam içinde değerlendirilmesi gerekmektedir (Carranza, 2009).

Son yıllarda mekânsal bağımlılığın etkisini dikkate almak amacıyla mekânsal çapraz doğrulama (spatial cross-validation) yöntemleri önerilmektedir. Klasik rastgele veri bölme yaklaşımları, mekânsal otokorelasyon nedeniyle model performansını olduğundan yüksek gösterebilmektedir. Bu nedenle veri setlerinin mekânsal bloklara ayrılarak doğrulanması, daha gerçekçi performans değerlendirmesi sağlamaktadır (Roberts ve ark., 2017). Model performansının değerlendirilmesinde kullanılan temel metrikler ve özellikleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3: Makine öğrenmesi modellerinin performans değerlendirilmesinde kullanılan temel metrikler ve özellikleri

Metrik	Açıklama	Avantaj	Sınırlılık
ROC-AUC	Ayırt edicilik gücü	Model karşılaştırma	Ekonomik anlamı sınırlı
Precision–Recall	Pozitif sınıf başarıları	Dengesiz veri için uygun	Yorumu zor
Confusion Matrix	Sınıflandırma hataları	Detaylı analiz	Tek başına yeterli değil
Spatial CV	Mekânsal doğrulama	Gerçekçi performans	Daha karmaşık

Belirsizlik ve Olasılıksal Yaklaşımlar

Mineral sistemleri yaklaşımıyla uyumlu olarak modern keşif stratejileri deterministik değil, olasılıksal değerlendirmelere dayanmaktadır. Bu bağlamda Bayesyen istatistik (Bayesian

statistics), ön bilgi (prior knowledge) ile veri temelli kanıtı birleştirerek güncellenmiş olasılık dağılımlarının elde edilmesine olanak tanımaktadır (Bonham-Carter, 1994).

Bayesyen yaklaşım özellikle veri miktarının sınırlı olduğu durumlarda uzman bilgisinin modele entegre edilmesine imkân sağlar. Bu yaklaşımda model çıktıları, “hedef var/yok” şeklindeki ikili sınıflandırmalardan ziyade sürekli olasılık değerleri olarak ifade edilir. Bu tür olasılıksal hedefleme yaklaşımları, mineral sistemlerinin bileşenlerinin birlikte bulunma olasılığını değerlendirmeye imkân tanır ve keşif riskinin daha etkin yönetilmesini sağlar (Carranza, 2009).

Bu bağlamda üretilen olasılık haritaları:

- Keşif yatırımlarının önceliklendirilmesi
- Sondaj hedeflerinin belirlenmesi
- Risk–getiri analizlerinin yapılması

açısından önemli karar destek araçlarıdır.

Derin ve Örtülü Sistemlerin Keşfi ve Sürdürülebilirlik

Yüze yakın ve yüksek tenörlü yatakların büyük ölçüde keşfedilmiş olması, metalik maden aramacılığını giderek daha karmaşık ve örtü altında kalan sistemlere yöneltmiştir. Günümüzde yeni keşiflerin önemli bir kısmı kalın sedimanter örtü altında veya önemli derinliklerde konumlanmaktadır. Bu durum, arama stratejilerinin yüzey anomalilerinden litosfer ölçeğinde jeodinamik süreçlerin analizine doğru evrilmesine neden olmuştur (Schodde, 2017).

Derin ve örtülü sistemlerin keşfi, mineral sistemleri yaklaşımının doğal bir uzantısıdır. Bu yaklaşım, cevherleşmenin yalnızca lokal jeolojik koşullarla değil, bölgesel tektonik ve magmatik süreçlerle kontrol edildiğini vurgular. Bu nedenle modern

keşif projeleri, yüzey verilerinin yanı sıra derin kabuk yapısını temsil eden jeofizik ve jeodinamik veri setlerini içeren çok ölçekli analizlere dayanmaktadır (Groves ve ark., 2005).

Örtü Altı Sistemler ve Derin Keşif Yaklaşımları

Örtü altı (blind) cevherleşmeler, yüzeyde doğrudan jeolojik veya jeokimyasal göstergeler sunmayan sistemlerdir. Bu tür ortamlarda klasik yüzey temelli yöntemler sınırlı kalmakta ve entegre jeofizik ile jeodinamik yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır.

Özellikle porfiri Cu–Au ve Demir Oksit Bakır Altın (IOCG) sistemlerinde örtü kalınlığı yüzlerce metreyi aşabilmektedir. Bu nedenle aşağıdaki yöntemler kritik önem taşımaktadır:

- Manyetik ve gravite ters çözüm (inversion) teknikleri
- Elektromanyetik (EM) yöntemler
- Magnetotellürik (MT) ölçümler
- Pasif sismik görüntüleme

Bu yöntemler, yüzeyde gözlenemeyen magmatik ve hidrotermal sistemlerin dolaylı jeofiziksel göstergelerinin belirlenmesine olanak tanır. Bu bağlamda jeofizik veriler, mineral sistemlerinin derin köklerinin izlenmesinde temel araçlar olarak değerlendirilmektedir (Dentith ve Mudge, 2014).

Litosferik Kontroller, Belirsizlik ve Risk Yönetimi

Derin keşif stratejilerinde litosferik mimari merkezi bir rol oynamaktadır. Kabuk kalınlığı, eski tektonik sınırlar ve kraton kenarları, büyük ölçekli metalik sistemlerin oluşumunu kontrol eden temel jeodinamik unsurlar arasında yer almaktadır (Groves ve ark., 2005).

Derin keşif faaliyetleri yüksek maliyet ve belirsizlik içerdiğinden, risk yönetimi kritik bir bileşendir. Bu nedenle modern

arama projelerinde aşamalı risk azaltma yaklaşımı benimsenmektedir:

- Bölgesel jeodinamik analiz
- Hava jeofiziği ve uzaktan algılama
- Üç boyutlu ters çözüm modelleme
- Hedefli sondaj

Bu yaklaşım, keşif sürecinde belirsizliğin sistematik olarak azaltılmasına ve yatırım riskinin daha etkin yönetilmesine olanak tanımaktadır.

Sürdürülebilirlik ve Gelecek Perspektifi

Modern keşif faaliyetleri yalnızca teknik başarı ile değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik performansı ile değerlendirilmektedir. Bu bağlamda Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) kriterleri, arama projelerinin planlanmasında belirleyici hâle gelmiştir (Franks ve ark., 2014).

Sürdürülebilir keşif yaklaşımı üç temel boyuta dayanmaktadır:

- Çevresel: karbon ayak izi, su yönetimi
- Sosyal: toplumsal kabul ve paydaş katılımı
- Yönetişim: şeffaflık ve etik yönetim

Buna ek olarak dijitalleşme, keşif süreçlerinde yeni bir paradigma oluşturmaktadır. “Jeolojik dijital ikiz” yaklaşımı, farklı veri türlerinin üç boyutlu model ortamında entegre edilmesine olanak tanıyarak gerçek zamanlı analiz ve olasılıksal modelleme imkânı sunmaktadır. Bu gelişmeler, gelecekte keşif projelerinin daha veri odaklı, sistem temelli ve sürdürülebilir biçimde yürütülmesini sağlayacaktır.

Sonuçlar

Metalik maden aramacılığı, son yıllarda kavramsal ve teknolojik açıdan önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Keşif faaliyetleri, yüzey göstergelerine dayalı yaklaşımlardan, litosfer ölçeğinde süreç temelli modellemelere evrilmiştir. Bu dönüşümün merkezinde mineral sistemleri yaklaşımı yer almakta; cevherleşme, metal kaynağı, akışkan dolaşımı ve yapısal kontrol gibi bileşenlerin etkileşimi içinde değerlendirilmektedir.

Hiperspektral uzaktan algılama, hava jeofiziği ve üç boyutlu ters çözüm teknikleri, örtü altı sistemlerin daha güvenilir biçimde modellenmesini mümkün kılmıştır. Bu teknolojiler, çoklu veri entegrasyonu ile kullanıldığında keşif etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Veri bilimi ve makine öğrenmesi yaklaşımları, mineral olasılık haritalama uygulamaları ile hedef alanların nicel olarak belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Ancak model genellenebilirliği veri kalitesi gibi konular hâlen önemli araştırma alanlarıdır.

Derin ve örtü altı sistemlerin keşfi yüksek belirsizlik ve maliyet içermektedir. Bu nedenle jeodinamik analizler, jeofizik modelleme ve olasılıksal yaklaşımlar keşif sürecinin temel bileşenleri hâline gelmiştir. Aynı zamanda sürdürülebilirlik ve Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) kriterleri, arama projelerinin planlanmasında giderek daha belirleyici olmaktadır.

Sonuç olarak metalik maden aramacılığı, veri yoğun, sistem temelli ve disiplinler arası bir yapıya dönüşmektedir. Gelecekte keşif başarısı, jeolojik bilgi ile veri bilimi ve sürdürülebilirlik yaklaşımlarının entegrasyonuna bağlı olacaktır.

Kaynakça

Acar, R.U., Zengin, E., Öngen, A.S., 2025. Machine learning-based temporal change detection of land use and land cover changes in the Tunçbilek open pit coal mine region using PlanetScope imagery. NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.14(3), 1001-1013

Acar, R. U., Zengin, E. (2023). Performance assessment of Landsat 8 and Sentinel-2 satellite images for the production of time series land use/land cover (LULC) maps. Journal of Scientific Reports-A, (53), 1–15.

Ali, S. H., Giurco, D., Arndt, N., Vidal, O., Nickless, E., Brown, G., Demetriades, A., Kinnird, J., Durrheim, R., Enriquez, M.A., Littleboy, A., Meinert, L.D., Oberhansli, R., Salem, J., Shoodde, R., Scheider, G., Takovleva, N., 2017. Mineral supply for sustainable development requires resource governance. Nature, 543, 367–372. <https://doi.org/10.1038/nature21359>

Bonham-Carter, G. F., 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon.

Carranza, E. J. M. 2009. Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Elsevier.

Clark, R.N., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, in: Rencz, A.N. (ed.), Remote Sensing for the Earth Sciences, v. 3. John Wiley, New York, pp. 3–58.

Cracknell, M. J., Reading, A. M. (2014). Geological mapping using machine learning. Earth-Science Reviews, 139, 62–77.

Dentith, M., Mudge, S. T. (2014). Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Cambridge University Press.

Franks, D. M., Davis, R., Bebbington, A. J., Ali, S. H., Kemp, D., ve Scurrah, M. (2014). Conflict translates environmental and

social risk into business costs. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 111(21), 7576–7581.

Groves, D. I., Vielreicher, R.M., Goldfarb, R.J., Condie, K.C (2005). Lithospheric controls on the distribution of mineral systems. McDonald, I., Boyce, A. J., Butler, I. B., Herrington, R. J. ve Polya, D. A. (eds) 2005. Mineral Deposits and Earth Evolution. Geological Society, London, Special Publications, 248, 71–101. 0305-8719

Hastie, T., Tibshirani, R., ve Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). Springer.

Hronsky, J. M. A., Groves, D. I. 2008. Science of targeting: Definition, strategies, targeting and performance measurement. Australian Journal of Earth Sciences, 55(1), 3–12.

International Energy Agency (IEA). (2021). The role of critical minerals in clean energy transitions. IEA.

Kruse, F.A., Boardman, J.W., Huntington, J.F., 2003. Comparison of airborne hyperspectral data and EO1 Hyperion for mineral mapping. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41, 1388–1400.

Li, Y., ve Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. Geophysics, 61(2), 394–408.

McCuaig, T. C., ve Hronsky, J. (2014). The mineral system concept: The key to exploration targeting. Society of Economic Geologists Special Publication, 18, 153–175.

Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., Ruder, M. E. (2005). The

historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 33ND–61ND.

Roberts, D. R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M. S., Elith, J., Guillerá-Arroita, G., Dormann, C. F. (2017). Cross-validation strategies for data with spatial structure. *Ecography*, 40(8), 913–929.

Schodde, R. (2017). Discovery trends: The problem of finding new mineral deposits. *SveP Global Market Intelligence Report*.

Simpson, F., Bahr, K. (2005). *Practical magnetotellurics*. Cambridge University Press.

Thompson, A.J.B., Hauff, P.L., Robitaille, J.A., 1999. Alteration mapping in exploration; application of short-wave infrared SWIR spectroscopy. *SEG Newsletter* 39, 16–27.

Van der Meer, F.D.; van der Werff, H.M.A.; van Ruitenbeek, F.J.A.; Hecker, C.A.; Bakker, W.H.; Noomen, M.F.; van der Meijde, M.; Carranza, E.J.M.; de Smeth, J.B.; Woldai, T. 2012. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 14, 112–128

Wyborn, L. A. I., Heinrich, C. A., Jaques, A. L. (1994). Australian Proterozoic mineral systems: Essential ingredients and mappable criteria. *Proceedings of the Australian Institute of Mining and Metallurgy*, 1, 109–115.

METAMORFİK MASİFLERDE DEMİR CEVHERLEŞMESİ VE ÇOK EVRELİ OLUŞUM MODELLERİ: BİTLİS MASİFİ (GÖRENTAŞ- ÇATAK, VAN)

TİJEN ÜNER⁴

Giriş

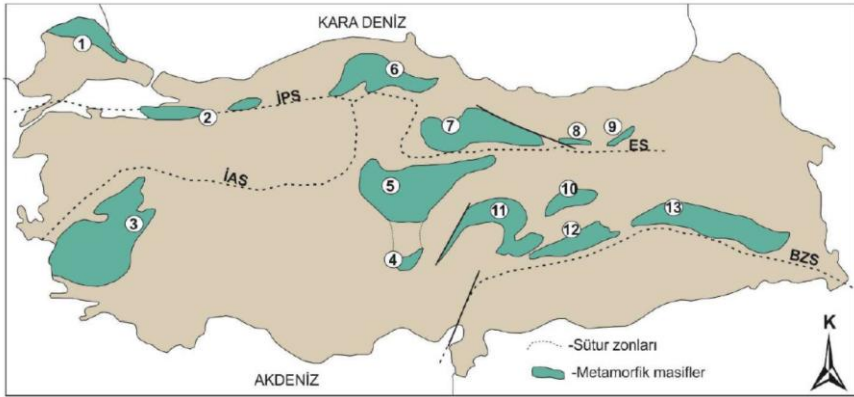
Masifler, stratigrafik olarak iki ya da daha fazla karmaşığın bir arada bulunduğu, ilksel ilişkilerini büyük ölçüde koruyan, yaygın metamorfik ve magmatik kayaç topluluklarını ifade eden jeolojik birimlerdir. Genellikle birkaç kilometreden onlarca kilometreye varan boyutlara sahip olan bu yapılar, bulundukları orojenik kuşak içerisinde çevre kayaçlara göre daha yüksek topoğrafya ve daha dirençli litolojilerle ayırt edilir (Yılmaz, 1991; Göncüoğlu ve Turhan, 1985). Masifler çoğunlukla adlandırıldıkları bölgenin jeolojik evrimini yansıtan temel kayaç topluluklarını temsil etmekte olup, çok evrelî metamorfizma, deformasyon ve magmatik olayların izlerini bünyelerinde barındırırlar.

Anadolu, farklı tektonik kuşaklara ait çok sayıda metamorfik masifin yüzeylendiği nadir bölgelerden biridir. Güney kuşak

⁴ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6059-9148)

metamorfik toplulukları içerisinde yer alan Menderes, Kırşehir, Niğde ve Bitlis masifleri; uzun süreli tektonik evrimleri, farklı metamorfizma derecelerini temsil eden kayaç birlikleri ve karmaşık yapısal özellikleriyle dikkat çekmektedir (Yılmaz, 1971; Boray, 1975) (Şekil 1). Bu masiflerde genellikle yüksek dereceli metamorfik kayalardan oluşan bir çekirdek ile bunu çevreleyen orta–düşük dereceli metamorfik örtü birimleri ayırt edilmektedir.

Şekil 1: Anadolu’da gözlenen önemli metamorfik masifler: 1. Istranca Masifi, 2. Armutlu metamorfiti, 3. Menderes Masifi, 4. Niğde masifi, 5. Kırşehir masifi, 6. Kargı Masifi, 7. Tokat masifi, 8. Agvanis masifi, 9. Pulur masifi, 10. Malatya masifi, 11. Engizek masifi, 12. Pötürge masifi, 13. Bitlis masifi (Yılmaz 1991’den değiştirilerek alınmıştır)



Metamorfik masifler, yalnızca yapısal ve petrolojik özellikleriyle değil, aynı zamanda önemli maden yataklarına ev sahipliği yapmalarıyla da ekonomik ve metalojenik açıdan büyük önem taşımaktadır. Masiflerde; demir, bakır, krom, kurşun–çinko, altın ve mangan gibi çeşitli cevherleşmeler gözlenebilmektedir (Temur, 1997; Küpeli, 1998). Dünyada Prekambriyen yaşlı bantlı demir formasyonları ile ilişkili Kanada Kalkanı, Güney Afrika Kaapvaal Kratonu ve Batı Avustralya masifleri bu tür metalojenik birlikteliklere klasik örnekler sunmaktadır (Gross, 1980; Klein,

2005). Türkiye’de ise Menderes ve Bitlis masifleri, metamorfik ortamlarla ilişkili demir ve diğer metal cevherleşmeleri açısından öne çıkan alanlardır.

Demir cevherleşmeleri, masif ortamlarında farklı oluşum mekanizmalarına bağlı olarak gelişebilmektedir. Bu cevherleşmeler erken magmatik süreçlerden, volkanik–sinsedimanter birikimlere, metamorfik yeniden kristalleşme ve ikincil zenginleşme süreçlerine kadar geniş bir yelpazede değerlendirilmektedir (Evans, 1993). Metamorfik masiflerde gözlenen demir yatakları çoğunlukla hematit, manyetit, götit ve siderit gibi minerallerden oluşmakta; deformasyon, akışkan dolaşımı ve kimyasal sedimantasyon süreçleriyle önemli ölçüde yeniden şekillenmektedir.

Bu bağlamda, Doğu Anadolu’nun en önemli metamorfik birimlerinden biri olan Bitlis Masifi, hem çok evreli metamorfik gelişimi hem de barındırdığı demir cevherleşmeleri ile dikkat çekmektedir (Göncüoğlu ve Turhan, 1985; Yılmaz ve ark., 1981). Bu bölümde, Van Gölü’nün güneydoğusunda, Çatak (Van) ilçesi kuzeyinde yer alan Görentaş Köyü ve çevresinde yüzeyleyen Bitlis Masifi’ne ait metamorfik kayaçların jeolojik ve petrolojik özellikleri ele alınmakta; gözlenen demir cevherleşmesi masif ölçeğinde ve bölgesel metalojenik evrim çerçevesinde tartışılmaktadır.

Bölgesel Jeolojik Çerçeve

Bitlis Masifi, Anadolu’da Neotetis Okyanusu’nun güney kolu boyunca gelişen Anatolid–Torid platformunun doğu kesiminde yer almakta olup, Bitlis–Zagros Kenet Kuşağı’nın batı bölümünü oluşturmaktadır. Bu kuşak, Arap Platformu ile Anadolu levhası arasındaki yakınsama ve çarpışma süreçlerinin ürünü olan karmaşık tektonik birlikleri içermektedir (Ricou, 1971; Ricou ve ark., 1975).

Bitlis Masifi’nin temeli, Pan-Afrikan/Baykaliyen yaşlı Prekambriyen kayaçlardan oluşmakta; bu temel üzerine Paleozoyik

yaşı metasedimanter istifler ve Mezozoyik karbonat platformu çökelleri gelmektedir (Yılmaz, 1971; Göncüoğlu ve Turhan, 1985). Geç Kretase döneminde Neotetis Okyanusu'nun kapanmasına bağlı olarak gelişen ofiyolit yerleşimleri, masifin metamorfik evrimi üzerinde belirleyici rol oynamış; ofiyolit napları altındaki kayaçlar yüksek basınç/düşük sıcaklık (YB/DS) metamorfizmasına maruz kalmıştır (Şengör ve Yılmaz, 1981).

Bölgesel ölçekte Bitlis Masifi, yapısal olarak Alt Nap ve Üst Nap olmak üzere iki ana tektonik dilim halinde değerlendirilmektedir. Alt nap, ağırlıklı olarak Alt Paleozoyik–Kampaniyen yaşı metasedimanter kayaçlardan oluşurken; Üst nap ofiyolitik, volkanik ve sedimanter birlikleri içermektedir (Göncüoğlu ve Turhan, 1985; Perinçek, 1979). Bu nap yapıları, Geç Eosen–Miyosen aralığında gelişen bindirme ve sürüklenme tektoniği ile bugünkü konumlarına yerleşmiştir.

Bitlis–Zagros Kenet Kuşağı, kıta–kıta ve kıta–okyanusal litosfer yakınsamasının çok evreli ve karmaşık bir ürünüdür. Kuşak boyunca gözlenen yoğun tektonik dilimlenme, bindirme fayları ve doğrultu atımlı diri faylar, masif içerisindeki kayaçların ilksel konumlarını büyük ölçüde değiştirmiştir (Göncüoğlu ve Turhan, 1985). Bu tektonik süreçler, yalnızca metamorfik evrimi değil, aynı zamanda bölgede gözlenen cevherleşmelerin konum ve karakterini de önemli ölçüde kontrol etmiştir.

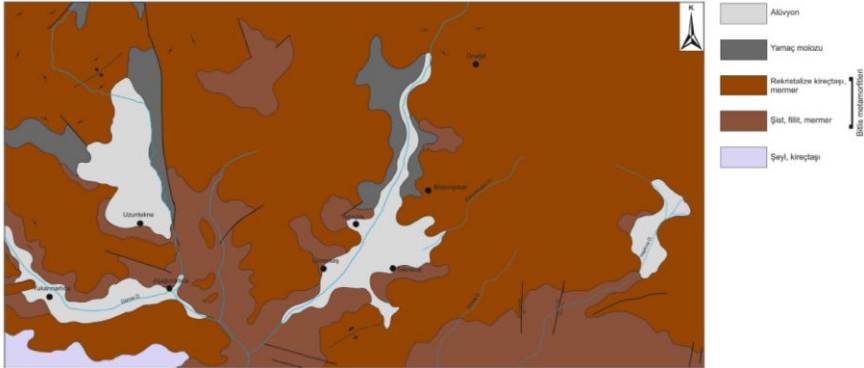
Jeoloji

İnceleme alanı, Van Gölü'nün güneydoğusunda, Çatak (Van) ilçesi kuzeyinde yer almakta olup Van L50 paftası içerisinde bulunmaktadır. Bölge jeolojisi, Güneydoğu Anadolu Orojenik Kuşağı'nın önemli bileşenlerinden biri olan Bitlis Masifi'ne ait metamorfik kayaçlar tarafından temsil edilmektedir. Çalışma alanında, Bitlis–Pötürge–Malatya nap sistemine ait metamorfik birimler yaygın olarak yüzeylenmektedir (Şekil 2).

Bölgedeki temel litolojik birimleri Bitlis metamorfitlerine ait ayrılmamış şist, fillit, kuvarsit, mermer ve rekristalize kireçtaşı birimleri oluşturmaktadır. Bu birimler, karmaşık tektonik süreçler sonucu gelişmiş naplanma ve dilimlenme yapıları içerisinde yer almakta olup, bölgesel ölçekte kuzeyden güneye doğru bindirme ilişkileri sergilemektedir. Metamorfik kayalar, yer yer ofiyolitik ve volkanosedimanter birimler tarafından tektonik olarak üzerlenmektedir.

Metakarbonat birimleri, çalışma alanı içerisinde en geniş yayılım gösteren litolojilerdir. Bu birimler genellikle masif dokulu, kirli beyaz–krem renkli olup, saha gözlemlerinde metakarbonat karakteri açık biçimde izlenmektedir (Şekil 3). Mermer ve rekristalize kireçtaşı birimleri, yoğun kırık ve çatlak sistemleri içermekte; bu yapılar boyunca kuvars, karbonat ve demir minerallerinin dolgu yaptığı gözlenmektedir. Bu özellikler, hem deformasyon hem de akışkan dolaşımı açısından elverişli bir ortamın varlığına işaret etmektedir.

Şekil 2: Çalışma alanında gözlenen birimlerin jeoloji haritası



Şekil 3: Çalışma alanında gözlenen metakarbonat mermer birimlerinin yakından görünümü



Biyotit şist ve kuvarsit birlikleri, çalışma alanında belirgin foliyasyon ve yönlenme sunan birimler olarak dikkat çekmektedir. Şistler yer yer kıvrımlı yapılar sergilemekte, kuvarsitler ise masif bloklar ya da damarlar halinde gözlenmektedir (Şekil 4). Bu litolojik birliktelik, sedimanter protolitlerin bölgesel metamorfizma ve deformasyon süreçleriyle yeniden kristalleştiğini göstermektedir. Özellikle kuvarsitler içerisinde kırık ve çatlaklar boyunca gelişmiş demir oksit mineralleri, cevherleşme ile litolojik–yapısal kontrol arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.

Şekil 4: Çalışma alanında gözlenen a)Biyotit şistler ve b) kuvarsit blokları



Çalışma alanındaki litolojik dağılım ve yapısal özellikler birlikte değerlendirildiğinde, Bitlis Masifi'nin çok evreli metamorfik ve tektonik gelişiminin yerel ölçekte net biçimde izlenebildiği anlaşılmaktadır. Bu jeolojik çerçeve, bölgede gözlenen demir cevherleşmelerinin konum, biçim ve mineralojik özelliklerinin anlaşılmasında temel bir kontrol unsuru oluşturmaktadır.

Petrolojik Özellikler

Metamorfik kayaçların petrolojik özellikleri, protolit bileşimi, maruz kaldıkları basınç–sıcaklık koşulları, deformasyon derecesi ve metamorfizma sonrası gelişen akışkan dolaşımı süreçleri tarafından kontrol edilmektedir (Yardley, 1989; Bucher ve Grapes, 2011). Metamorfik ortamlarda yaygın olarak gözlenen doku ve mineral birlikleri, metamorfizma derecesinin yanı sıra tektonik rejim ve zamanlamaya ilişkin önemli ipuçları sunmaktadır.

Genel olarak metamorfik kuşak ve masiflerde, düşük dereceli koşullarda fillitik ve şistoz dokular, orta dereceli koşullarda lepidogranoblastik dokular, daha yüksek derecelerde ise granoblastik ve gnaysik dokular gelişmektedir. Bu dokulara eşlik eden mineral toplulukları, kayaçların geçirdiği ilerleyici (prograd) ve gerileyici (retrograd) metamorfizma evrelerinin ayırt edilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle klorit, serizit ve opak minerallerin

gelişimi, retrograd metamorfizmanın yaygın göstergeleri arasında yer almaktadır.

Metamorfik kayalarda gözlenen kırık, çatlak ve foliyasyon düzlemleri, akışkan dolaşımı için elverişli ortamlar oluşturarak cevherleşme süreçlerinde kritik rol oynamaktadır. Bu yapılar boyunca gerçekleşen mineral çökelimleri, birincil metamorfik mineralojinin yanı sıra ikincil mineral birliklerinin gelişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle petrolojik özelliklerin değerlendirilmesi, cevherleşme mekanizmalarının anlaşılması açısından temel bir öneme sahiptir.

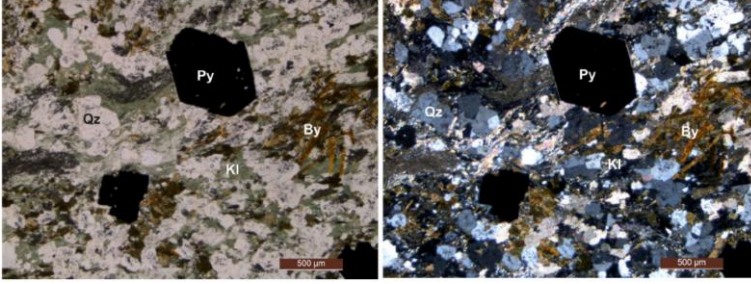
Bu genel petrolojik çerçeve doğrultusunda, aşağıda Bitlis Masifi içerisinde yer alan Görentaş (Çatak/Van) yöresinde gözlenen metamorfik kayaların petrolojik özellikleri örnek alan olarak ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

Görentaş (Çatak/Van) Metamorfitlerinin Petrolojisi

Biyotit Şistler

Biyotit şistler genel olarak lepidogranoblastik dokuya sahiptir (Şekil 5). Başlıca mineraller kuvars, plajiyoklaz, feldispat ve biyotit olup, aksesuar mineral olarak apatit gözlenmektedir. Plajiyoklaz ve feldispatlarda serisitleşme, biyotitlerde opasitleşme yaygındır. Kayaç içerisinde özşekilli pirit ve klorit minerallerinin varlığı, retrograd metamorfizma etkisini işaret etmektedir.

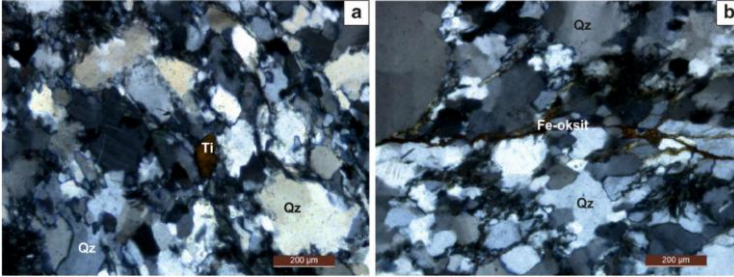
Şekil 5: Çalışma alanında gözlenen lepidoblastik dokulu biyotit şist (Qz: kuvars, Bu: Biyotit, Feld: Feldispat mineralleri, Py: pirit)



Kuvarsitler

Kuvarsitler büyük ölçüde (> %90) kuvarstan oluşmakta ve granoblastik doku sergilemektedir. İri taneli kuvars porfiroblastları ve dalgalı sönme özelliği, deformasyon ve yeniden kristalleşme süreçlerini yansıtmaktadır. Kuvarsitlerde kırık ve çatlaklar boyunca demir oksit minerallerinin gelişimi yaygındır (Şekil 6).

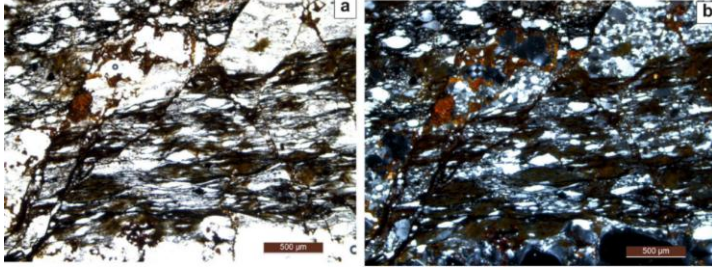
Şekil 6: Çalışma alanında gözlenen kuvarsitler içerisinde gözlenen a) titanit minerali, b) demir oksit mineralleri



Metakarbonatlar

Mermer ve rekristalize kireçtaşı birimleri genellikle ince taneli kalsit minerallerinden oluşmaktadır. Kayaçlar kırıklı bir yapı sunmakta; bu kırıklar boyunca kuvars, karbonat ve yer yer siderit dolguları izlenmektedir. Kılcal çatlaklarda demir oksit boyamaları, cevherleşme ile ilişkili ikincil süreçlere işaret etmektedir (Şekil 7).

Şekil 7: Çalışma alanı içerisinde gözlenen metakarbonat mineralleri içerisinde gelişmiş demir oluşumları



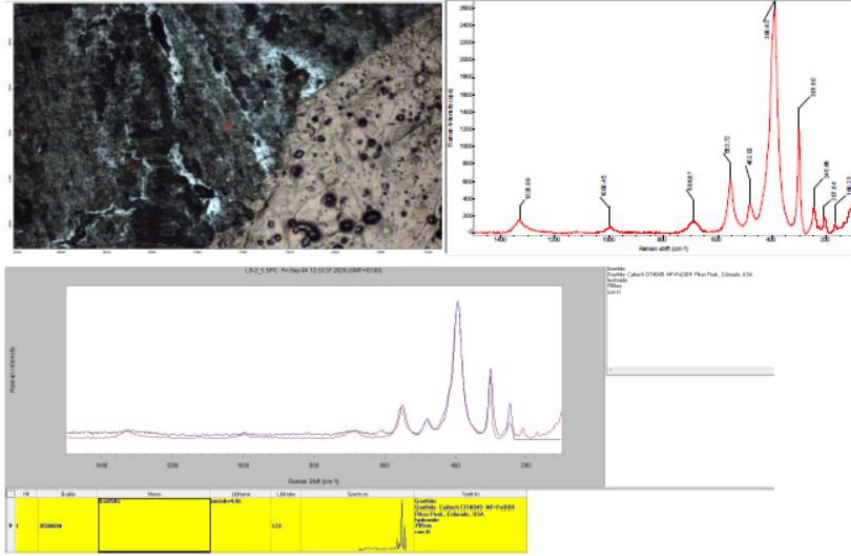
Raman Spektroskopisi ile Mineralojik Doğrulama

Petrolojik incelemelerde tanımlanan mineral fazlarının doğrulanması ve özellikle alterasyon ile dönüşüm süreçlerinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla Raman spektroskopisi kullanılmıştır. Raman spektroskopisi, mineral tanımlamalarının tahribatsız olarak yapılmasına olanak sağlaması ve ince taneli ya da optik olarak ayırt edilmesi güç fazların belirlenmesinde etkin bir yöntem olması nedeniyle metamorfik ve cevherleşme çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Görentaş (Çatak/Van) yöresine ait metamorfitler üzerinde gerçekleştirilen Raman analizleri, incekesit gözlemleriyle belirlenen mineral birliklerini büyük ölçüde desteklemektedir. Silikat mineralleri içerisinde filogopit, biyotit ve albit fazlarının tanımlanması, kayaçların orta-düşük dereceli metamorfizma koşullarında geliştiğini ve metamorfizma sonrası alterasyon süreçlerinden etkilendiğini göstermektedir (Şekil 8). Özellikle filogopit ve biyotit minerallerinin birlikte bulunması, prograd metamorfizma evresini izleyen gerileyici (retrograd) süreçlerin varlığına işaret etmektedir.

Demir minerallerine yönelik Raman bulguları, cevherleşme ile ilişkili dönüşüm süreçlerinin anlaşılmasında önemli veriler sunmaktadır. Hematit ve götit fazlarının belirlenmesi, demir

Şekil 9: Çalışma alanı içerisinde gözlenen götit minerallerinin spektroskopik karakteristiği



Jeokimya

Demir cevherleşmelerinin jeokimyasal özellikleri, oluşum ortamı, cevherleşme tipi ve sonraki jeolojik süreçlere bağlı olarak önemli değişkenlikler göstermektedir. Genel olarak demir cevherleri yüksek Fe_2O_3 veya FeO içerikleri ile karakterize olup, eşlik eden SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve MgO oranları cevherleşmenin sedimanter, volkanik–sinsedimanter, hidrotermal veya süperjen kökenli olup olmadığına dair önemli ipuçları sunmaktadır. Bu bağlamda, demir cevherleşmelerinde ana oksit dağılımları kadar iz element davranışları da oluşum ve yeniden zenginleşme süreçlerinin anlaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır.

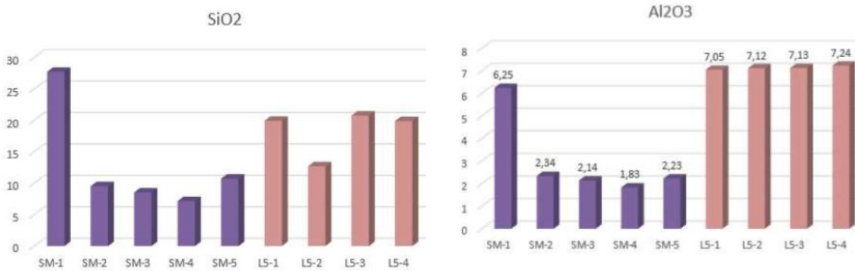
Birçok demir yatağında, cevherleşmenin ilerleyen evrelerinde Fe içeriğinin artışına karşılık Si, Ca ve Mg gibi elementlerin görece olarak azaldığı bilinmektedir. Buna karşın, yan kayaçlarla güçlü etkileşim gösteren sistemlerde SiO_2 ve Al_2O_3

değerleri yüksek kalabilmekte; bu durum cevher–yan kayaç ilişkisini ve litolojik kontrolü yansıtmaktadır. Zn, Mn, Ni ve benzeri iz elementler ise gerek birincil çökelim koşullarını gerekse daha sonraki yeniden mobilizasyon ve oksidasyon süreçlerini ortaya koyan tamamlayıcı göstergeler olarak değerlendirilmektedir.

Bu genel jeokimyasal çerçeve doğrultusunda, Görentaş (Çatak/Van) yöresinde gözlenen demir cevherleşmelerine ait ana oksit ve iz element verileri değerlendirilmiştir. Görentaş cevherlerine ait jeokimyasal bulgular, Fe_2O_3 içeriklerinin geniş bir aralıkta değiştiğini ve yüksek değerler sunduğunu göstermektedir. Bu durum, çalışma alanındaki cevherleşmenin demir açısından belirgin biçimde zenginleşmiş bir karaktere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Görentaş yöresindeki cevher örneklerinde SiO_2 ve Al_2O_3 içeriklerindeki değişimler, cevherleşmenin yan kayaç bileşimi ile yakın ilişkisini yansıtmaktadır. (Şekil 10) Özellikle kuvarsit ve metapelitik birimlerle ilişkili örneklerde artan Si ve Al değerleri, cevher–yan kayaç etkileşiminin jeokimyasal bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, cevherleşmenin yalnızca birincil çökelim süreçleriyle değil, aynı zamanda yapısal ve litolojik kontrol altında geliştiğini göstermektedir.

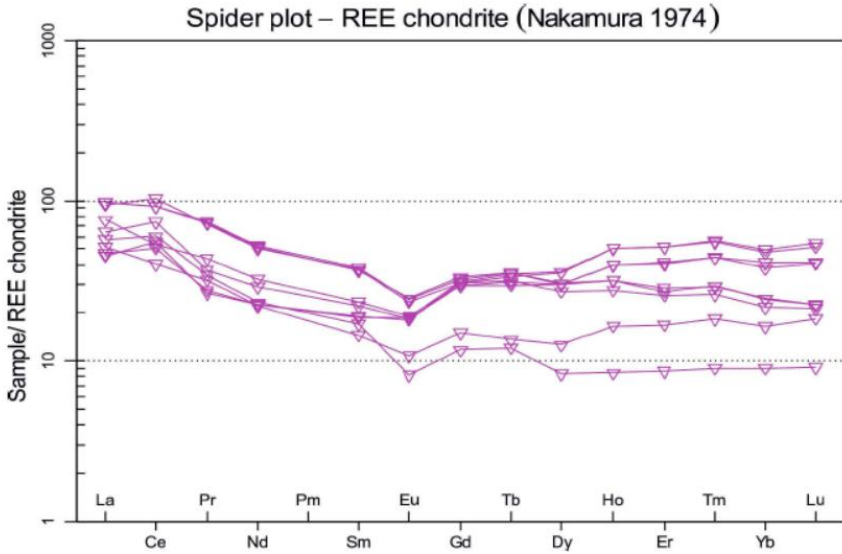
Şekil 10: Çalışma alanına ait demir oluşumlarından alınan örneklerle ait SiO_2 ve Al_2O_3 değerlerinin histogram gösterimi



İz element dağılımları, Görentaş demir cevherleşmesinin çok evreli bir gelişim sürecine sahip olduğuna işaret etmektedir. Mn, Zn, Ni ve W gibi elementlerin bazı örneklerde görece olarak zenginleşmesi, cevherleşmenin kimyasal sedimantasyon, yeniden mobilizasyon ve ikincil zenginleşme süreçlerinin birlikte etkisi altında şekillendiğini düşündürmektedir (Şekil 11). Bu jeokimyasal özellikler, Görentaş yöresindeki demir cevherleşmelerinin Prekambriyen yaşlı volkanik–sinsedimanter kökenli birincil birikimlerin, daha genç tektonik ve metamorfik evrelerde yeniden düzenlenmesiyle oluştuğu yönündeki yorumları desteklemektedir.

Sonuç olarak, Görentaş demir cevherleşmesine ait jeokimyasal veriler, Bitlis Masifi genelinde gözlenen metalojenik evrimle uyumlu, çok evreli ve yan kayaç kontrollü bir cevherleşme modelini ortaya koymaktadır.

Şekil 11: Çalışma alanında gözlenen birimlerin kondrite göre normalize edilmiş diyagramı



Tartışma: Demir Cevherleşmesi İçin Kavramsal Bir Oluşum Modeli

Demir cevherleşmelerinin oluşumu, birincil çökelim süreçlerinden başlayarak metamorfizma, deformasyon ve akışkan-kayaç etkileşimlerini içeren çok evreli bir jeolojik gelişim sonucunda şekillenmektedir. Özellikle metamorfik masiflerde gözlenen demir yatakları, yalnızca tek bir oluşum mekanizması ile açıklanamayacak kadar karmaşık bir evrim sunmaktadır. Bu nedenle demir cevherleşmelerinin değerlendirilmesinde, genel metalojenik modeller ile yerel jeolojik ve jeokimyasal verilerin birlikte ele alınması gerekmektedir (Gross, 1980; Evans, 1993; Klein, 2005).

Genel metalojenik yaklaşımlar, birçok masifte demir cevherleşmelerinin kökenini Prekambriyen yaşlı volkanik-sinsedimanter ortamlarda gelişen birincil demir birikimlerine bağlamaktadır. Bantlı demir formasyonları ve benzeri kimyasal sedimanter ürünler, bu tür birincil çökelimlerin tipik örneklerini oluşturmakta; daha sonraki orojenik süreçler sırasında metamorfizma ve deformasyona uğrayarak mineralojik ve jeokimyasal açıdan yeniden düzenlenmektedir (Gross, 1980; Klein, 2005).

Metamorfizma süreci, demir minerallerinin yeniden kristalleşmesi ve dönüşümü üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Prograd metamorfizma evrelerinde demir mineralleri daha stabil fazlara yönelirken, retrograd metamorfizma ve buna eşlik eden akışkan dolaşımı süreçleri sırasında oksidasyon, hidrasyon ve yeniden çökelim mekanizmaları etkin hale gelmektedir. Bu evrede siderit-hematit-götit dönüşümleri yaygın olarak gözlenmekte ve ikincil zenginleşme süreçleri cevherin tenör ve dağılımını önemli ölçüde etkilemektedir (Evans, 1993; Bucher ve Grapes, 2011).

Genel oluşum modeli çerçevesinde değerlendirildiğinde, Görentaş (Çatak/Van) yöresindeki demir cevherleşmesi, Bitlis

Masifi'nin uzun süreli tektonik ve metamorfik evrimi ile doğrudan ilişkili görünmektedir. Petrolojik bulgular ve Raman spektroskopisi verileri, bölgede demir minerallerinin siderit–hematit–götit dönüşümünü içeren çok evreli bir mineralojik gelişim sergilediğini ortaya koymaktadır.

Jeokimyasal veriler, Görentaş cevherleşmesinin yan kayaç kontrollü bir karakter taşıdığını açık biçimde ortaya koymaktadır. SiO_2 ve Al_2O_3 içeriklerindeki değişimler, cevherleşmenin özellikle kuvarsit ve metapelitik birimler ile olan ilişkisini yansıtmakta; iz element dağılımları ise kimyasal sedimantasyon, yeniden mobilizasyon ve ikincil zenginleşme süreçlerinin birlikte etkili olduğunu düşündürmektedir. Bu jeokimyasal özellikler, cevherleşmenin yapısal ve litolojik kontrol altında geliştiğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, Görentaş yöresindeki demir cevherleşmesi; (i) volkanik–sinsedimanter kökenli birincil demir birikimleri, (ii) bölgesel metamorfizma ve deformasyon, (iii) retrograd evrede gelişen akışkan dolaşımı ve (iv) ikincil oksidasyon–zenginleşme süreçlerinin ardışık ve birbirini tamamlayan etkileri altında gelişmiş çok evreli bir oluşum modeli ile açıklanabilmektedir. Bu model, Bitlis Masifi genelinde gözlenen demir cevherleşmeleri için de temsil edici bir çerçeve sunmaktadır.

Görentaş (Çatak/Van) Demir Cevherleşmesi İçin Önerilen Oluşum Modeli

Bu çalışmada elde edilen jeolojik, petrolojik, Raman spektroskopisi ve jeokimyasal veriler birlikte değerlendirildiğinde, Görentaş yöresindeki demir cevherleşmesinin çok evreli ve karmaşık bir oluşum süreci sonucunda geliştiği anlaşılmaktadır. Önerilen oluşum modeli, aşağıda özetlenen ardışık evreler çerçevesinde açıklanabilir:

(1) Birincil çökelim evresi: Prekambriyen dönemde, volkanik–sinsedimanter bir ortamda kimyasal sedimantasyon süreçleri ile birincil demirce zengin birikimler oluşmuştur. Bu evrede çökelmiş demir, büyük ölçüde karbonatlı ve/veya silikatlı sedimanter istifler içerisinde dağılmış durumdadır.

(2) Bölgesel metamorfizma ve deformasyon evresi: Bitlis Masifi'nin orojenik evrimi sırasında bu birincil demir birikimleri bölgesel metamorfizmaya maruz kalmış; eş zamanlı deformasyon süreçleri ile kayaçlarda foliyasyon, kıvrımlanma ve kırık–çatlak sistemleri gelişmiştir. Bu evrede demir mineralleri yeniden kristalleşmiş ve daha dengeli fazlara dönüşmüştür.

(3) Retrograd metamorfizma ve akışkan dolaşımı evresi: Metamorfizmanın ilerleyen safhalarında gelişen retrograd koşullar altında, kırık ve foliyasyon düzlemleri boyunca yoğun akışkan dolaşımı gerçekleşmiştir. Bu akışkanlar, demirin yeniden mobilizasyonuna ve siderit, hematit ve götit gibi mineral fazlar arasında dönüşümlere neden olmuştur.

(4) İkincil zenginleşme ve oksidasyon evresi: Yüzeye yakın koşullarda etkili olan oksidasyon ve hidrasyon süreçleri, demir minerallerinin tenör açısından zenginleşmesine yol açmıştır. Bu evrede özellikle hematit ve götit mineralleri baskın hale gelmiş, cevherleşme yerel olarak ekonomik değerlere ulaşmıştır.

Önerilen bu çok evreli oluşum modeli, Görentaş yöresindeki demir cevherleşmesinin litolojik ve yapısal kontrol altında geliştiğini, birincil kökenli demirin daha sonraki metamorfik ve hidrotermal süreçlerle yeniden düzenlenerek bugünkü konum ve karakterini kazandığını ortaya koymaktadır. Bu model, Bitlis Masifi genelinde gözlenen benzer demir cevherleşmelerinin anlaşılmasına da katkı sağlayacak niteliktedir.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, Bitlis Masifi içerisinde yer alan Görentaş (Çatak/Van) yöresine ait metamorfik kayalar ve bunlarla ilişkili demir cevherleşmeleri jeolojik, petrolojik, Raman spektroskopisi ve jeokimyasal veriler birlikte değerlendirilerek incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

Çalışma alanı, Bitlis Masifi'nin çok evreli tektonik ve metamorfik gelişimini yansıtan metapelitik, metasilislastik ve metakarbonat birimlerden oluşmakta olup, bu birimler karmaşık yapısal özellikler sergilemektedir.

Petrolojik incelemeler, Görentaş yöresindeki kayaların orta–düşük dereceli bölgesel metamorfizma koşullarında geliştiğini; retrograd metamorfizma ve akışkan dolaşımı süreçlerinin kayaç dokusu ve mineralojisi üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir.

Raman spektroskopisi bulguları, incekesit gözlemleriyle tanımlanan mineral fazlarını doğrulamakta ve özellikle demir minerallerinin siderit–hematit–götit dönüşümünü içeren çok evreli bir mineralojik gelişime işaret etmektedir.

Jeokimyasal veriler, Görentaş demir cevherleşmesinin Fe bakımından zenginleşmiş bir karakter sunduğunu; SiO_2 ve Al_2O_3 değişimlerinin yan kayaç bileşimi ve litolojik kontrol ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

İz element dağılımları, cevherleşmenin yalnızca birincil çökelim süreçleriyle sınırlı olmadığını; yeniden mobilizasyon ve ikincil zenginleşme süreçlerinin etkin rol oynadığını göstermektedir.

Tüm verilerin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, Görentaş yöresindeki demir cevherleşmesinin birincil volkanik–sinsedimanter demir birikimlerinin, Bitlis Masifi'nin orojenik evrimi

sırasında metamorfizma, deformasyon, akışkan dolaşımı ve yüzeysel oksidasyon süreçleri ile yeniden şekillenmesi sonucu oluştuğu anlaşılmaktadır.

Bu sonuçlar, Görentaş demir cevherleşmesinin Bitlis Masifi genelinde gözlenen benzer demir yatakları için temsil edici bir örnek sunduğunu ve bölgenin metalojenik evriminin anlaşılmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi (Proje No: FYL-2020-8820) nin katkılarıyla hazırlanmıştır.

Kaynakça

Boray, A. (1975). Türkiye'nin metamorfik masifleri ve jeolojik evrimi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 18, 1–20.

Bucher, K., ve Grapes, R. (2011). Petrogenesis of Metamorphic Rocks (8th ed.). Springer, Berlin.

Evans, A. M. (1993). Ore Geology and Industrial Minerals (3rd ed.). Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Göncüoğlu, M. C., ve Turhan, N. (1985). Bitlis Metamorfik Kuşağı'nın jeolojisi ve evrimi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 28, 1–17.

Gross, G. A. (1980). A classification of iron formations based on depositional environments. Canadian Mineralogist, 18, 215–222.

Klein, C. (2005). Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. American Mineralogist, 90, 1473–1499.

Küpeli, Ş. (1998). Türkiye'deki demir yataklarının metalojenik özellikleri. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 120, 45–60.

Perinçek, D. (1979). Bitlis Masifi'nin stratigrafisi ve tektoniği. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 22, 33–44.

Ricou, L. E. (1971). Le croissant ophiolitique péri-arabe: une ceinture de nappes mises en place au Crétacé supérieur. Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique, 13, 327–350.

Ricou, L. E., Marcoux, J., Poisson, A., ve Baudin, F. (1975). L'évolution structurale de la région du Taurus oriental et du Zagros. Bulletin de la Société Géologique de France, 7, 553–562.

Şengör, A. M. C., ve Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181–241.

Temur, S. (1997). Metamorfik ortamlarda cevherleşme tipleri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 50, 21–34.

Yardley, B. W. D. (1989). *An Introduction to Metamorphic Petrology*. Longman, London.

Yılmaz, Y. (1971). Etude géologique de la région de Bitlis. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*, 76, 1–35.

Yılmaz, Y. (1991). Türkiye'nin jeolojik evrimi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 113, 1–27.

Yılmaz, Y., Şengör, A. M. C., ve Genç, Ş. C. (1981). Ophiolite emplacement and the evolution of the eastern Anatolian orogen. *Geological Society of America Bulletin*, 92, 271–283.

RİYOLİTİK MAGMALAR VE LAV AKINTILARI: FİZİKSEL SÜREÇLER, MORFOLOJİK DİNAMİKLER VE LİTOLOJİK ÖZELLİKLERİ

RECEP UĞUR ACAR⁵

Giriş

Riyolitik Magmaların Doğası, Fiziksel ve Reolojik Özellikleri

Riyolit, magmatik evrimin en ileri aşamalarını temsil eden, kimyasal sınıflandırmada ağırlıkça yüzde 68'in üzerinde SiO₂ (silika) içeren ve asidik karakter sergileyen silisik bir volkanik kayadır. Yerkabuğundaki sıg magma odalarında uzun süreli fraksiyonel kristallenme, asimilasyon ve kabuksal ergime (anateksi) süreçleri sonucunda oluşan bu magmaların yüzeye ulaşma sıcaklıkları, mafik ve bazaltik sistemlere kıyasla oldukça düşük olup genellikle 750° ile 850° aralığında seyretmektedir (Cas ve Wright, 1988; McBirney ve Murase, 1984). Magmanın yapısındaki yüksek silikat oranı, silikat tetrahedrallerinin üç boyutlu, güçlü ve kompleks bir ağ oluşturmaya ve magmanın yoğun bir şekilde polimerize olmasına yol açar. Bu karmaşık polimerizasyon ağı, riyolitik magmaların viskozitesini ve akma dayanımını (yield strength)

⁵ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-0420-6263

olağanüstü derecede yükselterek volkanik sistemin akış dinamiklerini temelden şekillendirir (Cas ve Wright, 1988; Dingwell, 1996).

Akışkanlık Dinamikleri ve Gelişmiş Viskozite Modellemeleri

Silikat eriyiklerinin kayma viskozitesi (shear viscosity), magmanın kabuk içindeki yükselimi, balonlaşma (vesiculation) kapasitesi, parçalanma (fragmentation) eşiği ve sonuç olarak volkanik patlamanın stilini belirleyen en kritik fiziksel özelliktir (Dingwell, 1996; Sparks, 2004). Newtonsal (Newtonian) olmayan akış davranışı sergileyen riyolitik magmalar, tipik olarak Bingham plastiği özellikleri gösterir; yani magmanın deforme olup akmaya başlaması için uygulanan kesme geriliminin (shear stress) belirli bir akma dayanımı (T_0) eşiğini aşması gerekmektedir (Cas ve Wright, 1988; Hulme, 1974).

Geçmiş on yıllarda viskozite hesaplamaları basit Arrhenius denklemlerine dayandırılırken, güncel termodinamik laboratuvar çalışmaları, silisik eriyiklerin yüksek derecede Arrhenius dışı (non-Arrhenian) sıcaklık bağımlılığı gösterdiğini kesin olarak ortaya koymuştur (Giordano, Russell, ve Dingwell, 2008; Hess ve Dingwell, 1996). Bu doğrultuda, sıcaklık ve bileşimin viskoziteye etkisini hesaplamak için literatürde geniş çapta kabul gören Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) denklemi kullanılmaktadır (Dingwell, 1996; Giordano ve ark., 2008):

Denklem 1: VTF Denklemi

$$\log n = A + \frac{B}{T - C}$$

Burada n viskoziteyi, T sıcaklığı, A yüksek sıcaklık viskozite limitini (evrensel olarak yaklaşık -4.55 civarı kabul edilir), B ve C ise eriyiğin kimyasal yapısına bağlı yapısal aktivasyon parametrelerini ifade eder (Giordano ve ark., 2008). Hess ve

Dingwell (1996) ile sonrasında Giordano ve ark. (2008) tarafından geliştirilen ampirik modeller, uçucu bileşenlerin (özellikle H₂O ve F) polimerize silikat ağları üzerindeki bağ kırıcı (network modifying) etkisini matematiksel olarak kanıtlamıştır (Giordano ve ark., 2008; Hess ve Dingwell, 1996; Zhang, Xu, ve Liu, 2003). Magmanın bünyesinde çözünmüş halde bulunan su ve diğer uçucu gazlar, bu silikat bağlarını kırarak polimerizasyon derecesini düşürür, T_g (camsı geçiş sıcaklığı) değerini aşağı çeker ve magmanın kırılabilirliğini (melt fragility) azaltır (Cas ve Wright, 1988; Giordano ve ark., 2008).

Klor (Cl) ve flor (F) gibi halojenlerce zengin peralkali riyolit magmalarında (pantellerit ve komenditler) viskozite, ağ değiştirici alkali katyonların bolluğu nedeniyle standart kalk-alkali riyolitlere göre yüzlerce kat daha düşük seviyelerde ölçülebilir (Cas ve Wright, 1988; Schipper ve ark., 2019). Son yıllarda Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks, ANN) kullanılarak yapılan çok değişkenli modellemelerde, magmanın tüm kimyasal uzayı taranarak suyun polimerizasyonu kırma kapasitesinin logaritmik ölçekte ne kadar dramatik olduğu (bazen viskoziteyi 10⁵ faktörüne kadar düşürdüğü) yüksek hassasiyetle doğrulanmıştır (Langhammer ve ark., 2022). Bu denli yüksek viskoziteye ve akma dayanımına sahip kıvamlı kütleler yüzeyde son derece yavaş ilerler. Magmanın ivmelenememesi nedeniyle, Reynolds sayısının her zaman kritik türbülans sınırının çok altında kalması sonucu akış rejimi neredeyse her zaman türbülanssız, laminar akış (laminar flow) karakterindedir (Cas ve Wright, 1988). Bu laminar hareketin kayalarda bıraktığı en belirgin fiziksel iz, riyolitik lavlarda kusursuz bir şekilde korunan akma bantlanması (flow banding) yapılarıdır.

Püskürme Mekanizmaları ve Dinamik Rejim Geçişleri

Karasal ortamda gerçekleşen riyolitik lav püskürmeleri coğrafi ve yapısal bağlamda büyük ölçüde geniş kaldera sistemleriyle, bimodal rift alanlarıyla ve bu tektonik çöküntüleri çevreleyen dairesel fay hatlarıyla ilişkilidir (Cas ve Wright, 1988; Lipman, 1984). Volkanik aktivitenin karakteri, magmanın içerdiği çözünmüş gazların magmadan ayrışma (eksolüsyon) hızı ile magmanın kanaldaki tırmanma hızı arasındaki dinamik dengeye bağlıdır. Geleneksel modellere göre, riyolitik püskürmelerin devasa plinian kül bulutları üreten şiddetli piroklastik patlamalarla başladığı, gaz basıncının düşmesinin ardından ise gazı alınmış taze magmanın yüzeye yavaşça çıkmasıyla masif lav gövdelerinin inşa edildiği varsayılır (Cas ve Wright, 1988; Lipman, 1984). Ancak modern volkanolojik bulgular, patlamalı (explosive) ve efüzif (effusive) rejimler arasındaki geçişin tek yönlü olmadığını, oldukça karmaşık, döngüsel ve hatta eşzamanlı mekanizmalar barındırdığını kanıtlamaktadır (Gonnermann ve Manga, 2003; Tuffen, Dingwell, ve Pinkerton, 2003).

Sünek Kırılgan Rejim Döngüleri ve Magmatik Köpük Geçirgenliği

Riyolitik magma yüzeye doğru tırmanırken çevre basıncının düşmesiyle uçucu maddeler çözünürlüklerini yitirir ve mikroskobik gaz kabarcıkları çekirdeklenerek hızla büyümeye başlar. Magmatik köpük (foam) halini alan riyolitin parçalanarak yıkıcı bir patlamaya dönüşüp dönüşmeyeceği, magmanın o anki geçirgenliğine (permeability) bağlıdır. Gonnermann ve Manga (2003) tarafından öne sürülen modellere göre, eğer magma köpüğü içindeki kabarcıklar birleşerek birbirine bağlı mikro kanallar oluşturursa, sistem yüksek bir geçirgenlik kazanır ve içsel gaz basıncı pasif bir şekilde dışarı kaçarak (outgassing) tahliye edilir (Gonnermann ve Manga, 2003; Woods ve Koyaguchi, 1994). Bu durum, bol gazlı bir

magmanın bile patlamadan yüzeye efüzif bir lav akıntısı olarak ulaşmasını sağlar.

Magma içindeki kesme gerilimi (shear stress) oranları magmanın sünek (ductile) deformasyon kapasitesini aşarsa, riyolitik kütle kırılgan (brittle) bir şekilde parçalanarak faylanır (Gonnermann ve Manga, 2003; Tuffen ve ark., 2003). Bu kırılma anında gazlar aniden boşalır ve yerel patlamalar meydana gelir. Ancak gerilim azaldığında, kırılan parçalar yüksek sıcaklık altında tekrar birbirine kaynayarak (welding) sünek akış rejimine döner. Bu döngüsel geçiş (brittle to viscous deformation cycles), Obsidian Dome (Kaliforniya) gibi genç riyolitik lavların yüzeyinde gözlemlenen tansiyonel kırık dizgeleri ve kırık yüzeylerindeki gaz çıkışı izleriyle kanıtlanmış olup, tek bir püskürme olayı içinde efüzif lav akıntılarının patlamalı olaylarla nasıl eşzamanlı ilerleyebildiğini açıklar (Castro ve ark., 2012; Gonnermann ve Manga, 2003).

İkinci Kaynama (Second Boiling) ve Cordon Caulle 2011 Modeli

Volkanoloji literatüründe devrim yaratan ve insanlık tarihinde ilk kez bir riyolit lav akıntısının aletsel gözlemlerle canlı olarak izlendiği 2011 ile 2012 Puyehue Cordón Caulle (Şili) püskürmesi, riyolitik yerleşim dinamikleri hakkındaki birçok eski paradigmayı yıkmıştır (Farquharson, James, ve Tuffen, 2015; Tuffen, James, Castro, ve Schipper, 2013). Aylar süren bu aktivitede, efüzif lav çıkışı ile havaya kül püskürten plinian/sub-plinian patlamalar eşzamanlı olarak devam etmiştir (Castro ve ark., 2012; Schipper ve ark., 2019).

İlerleyen lavın iç kısımlarında (core) çevresel soğumaya tepki olarak başlayan izobarik kristallenme, kalan artık eriyik içindeki uçucu elementlerin doygunluk sınırını hızla aşmasına neden olur. Bu duruma ikinci kaynama (second boiling) adı verilir (Farquharson ve ark., 2015; Schipper ve ark., 2019). İkinci kaynama neticesinde, lav gövdesinin içinde geç evre vezikülasyon (late-stage vesiculation)

başlar ve lavın iç basıncı olağanüstü derecede artar (Farquharson ve ark., 2015). Yüksek viskoziteli magma kütesinin yarattığı bu muazzam içsel basınç, sadece gazların çatlaklardan sızarak ikincil patlamalar yaratmasına neden olmakla kalmaz (Farquharson ve ark., 2015; Tuffen ve ark., 2013), aynı zamanda lavın dıştaki sert kabuğunu parçalayarak ileride incelenecek olan ikincil lav loblarının (breakouts) oluşumunu tetikler (Farquharson ve ark., 2015; Schipper ve ark., 2019). Ek olarak, bu geç evre kristallenmesi flor (F) ve klor (Cl) gibi halojenlerin lav gövdesinden hidrotermal fumeroller yoluyla uzun yıllar boyunca salınmasını sağlar (Schipper ve ark., 2019).

Yüzey Morfolojileri ve Kantitatif Parametreler

Yüzeye çıkan riyolit magması, vizkozitesine, akma dayanımına, püskürme hızına (effusion rate) ve altındaki topoğrafyaya bağlı olarak karakteristik volkanik formlar inşa eder. Bu yapılar ölçek, akış mesafesi ve özellikle geometrik görünüm oranlarına (aspect ratio, Yükseklik/Yarıçap veya Kalınlık/Genişlik oranları) göre sınıflandırılır (Cas ve Wright, 1988; Fink, 1983).

Klasik akışkanlar mekaniğinde, bir lavın yayılma şekli lavın içsel akma dayanımının (yield strength, T_o), hidrostatik basınca karşı koymasıyla dengelenir (Hulme, 1974). Bu denge hali şu kantitatif formülle (scaling law) ifade edilir:

Denklem 2: Kantitatif Yayılma Denklemi

$$r=0.323\frac{T_o}{pgh^2}$$

Burada r domun veya akıntının yarıçapını, h maksimum yüksekliğini, p lavın yoğunluğunu ve g yerçekimi ivmesini temsil eder (Hulme, 1974). Bu matematiksel gerçeklik, riyolitlerin neden yayvan kalkanlar oluşturmak yerine dar alanlara hapsedilmiş kalın kütleler oluşturduğunu açıklar. Riyolitik lavların başlıca morfolojik sınıflamaları ile bu formların reolojik ve geometrik özellikleri Tablo

1'de özetlenmiş olup detayları şunlardır (Fink, 1983; Huppert, Shepherd, Sigurdsson, ve Sparks, 1982):

- **Domlar (Domes):** Dar bir alandan yüzeye çıkan, yanal olarak çok az yayılabilen, oldukça dik yamaçlı ve dışbükey (konveks) tepeciklerdir (Huppert ve ark., 1982). Çoğunlukla 1:1 ile 1:5 gibi oldukça yüksek görünüm oranlarına sahiptirler (Huppert ve ark., 1982). İç basınçla şişerek (endojenik) veya yüzeyden üst üste katmanlar halinde taşarak (eksojenik) büyürler.
- **Mesa Lavları (Mesa Lavas):** Domlara kıyasla radyal olarak biraz daha fazla yayılan (1:10 ile 1:20 görünüm oranları), üst yüzeyleri nispeten düz ve plato benzeri bisküvi biçimli kütlelerdir (Huppert ve ark., 1982). La Primavera volkanik kompleksindeki devasa riyolit yapıları buna tipik örnektir.
- **Coulee'ler (Coulées):** Topoğrafik eğimin lavı belirli bir yöne kanalizetmesi veya püskürmenin asimetric ilerlemesi sonucu dairesel planını kaybedip dil şeklinde uzayan hacimli lav akıntılarıdır (Cas ve Wright, 1988; Loney, 1968). Kalınlıkları 50 ile 100 metreyi aşarken boyları kaynak noktasından itibaren kilometrelerce uzayabilir (Loney, 1968).
- **Kriptodomlar (Cryptodomes):** Magma yüzeye tam olarak ulaşmadığında, genellikle kaldera göllerinin tabanındaki su doymuş sedimanların veya hidrotermal alterasyon zonlarının içine sokulum yaparak yeraltı kubbe yapıları inşa eder (Cas ve Wright, 1988; Fink, 1983). Yüzeyi yukarı doğru kubbeleştirirler.

Tablo 1: Riyolitik lav akıntılarının morfolojik formları, ortalama silika eğilimleri, reolojik durumları ve büyüme karakterleri

Morfolojik Form	Ortalama Silika Eğilimi	Hakim Reolojik Durum	Özellik	Akış/Büyüme Karakteri
Dom	Çok Yüksek (> 72)	Maksimum Viskozite/Yüksek T_0	Çok Yüksek	Merkezi yığılma, dik yamaç molozlanması.
Mesa Lavası	Yüksek ve Çok Yüksek	Yüksek Viskozite/Orta T_0	Orta ve	Radyal yayılma, düzleştirilmiş üst plato.
Coulee	Yüksek	Yüksek Viskozite/Topoğrafik Akış	Orta	Tek yönlü ilerleme, boylamasına sıkışma.

Kıtasal bazalt taşkınları (flood basalts) ile ilişkili olarak patlayan Columbia Nehri Riyolitleri (Columbia River Rhyolites) gibi nadir örneklerde, devasa kabuksal magma rezervuarlarından kaynaklanan silisik magmalar yüzlerce kilometrekareye yayılan devasa efüzif riyolit tabakaları oluşturabilir, ancak bunlar dünya genelinde olağan dışı volüm anomalileridir (Benson ve Kittleman, 1968).

Akıntı İçi Dinamikler, İkincil Loblar (Breakouts) ve Yüzey Yapıları

Geleneksel olarak riyolit lavlarının akış mesafesinin tamamen viskozitelerine bağlı olduğu (viscosity controlled) düşünülmektedir. Ancak güncel yüksek çözünürlüklü uydu ve fotogrametri verileri ile Cordón Caulle üzerinde yapılan 3D modellemeler, riyolit akıntılarının ilerleyen evrelerinde tıpkı bazaltlar gibi soğuma sınırlı (cooling limited) bir rejime evrildiğini kanıtlamıştır (Farquharson ve ark., 2015; Isom ve ark., 2023; Tuffen ve ark., 2013).

Lav akıntısı ilerlerken dış yüzeyi havayla temas ederek hızla soğur ve metrelerce kalınlıkta, hareket etmeyen rijit bir kabuk (crust) oluşturur (Farquharson ve ark., 2015). Bu sert kabuk, içerideki hala sıcak ve akışkan olan lavın önünü keser. Fakat ikinci kaynama kaynaklı geç evre vezikülasyonun yarattığı yüksek iç basınç ve termal olarak izole kalmış koridorlardan devam eden magma transferi, bu kabuğun dayanım mukavemetini kırar (Farquharson ve ark., 2015).

İkincil Lob (Breakout) Evrimi ve Sınıflandırılması

Riyolitik lavlarda ilk kez sistematik olarak tanımlanan bu kabuk çatlaması ve içeriden taze lav fışkırması olayına İkincil Lob (Breakout) adı verilir (Farquharson ve ark., 2015). Breakout oluşumu, lav akıntısının nihai ayak izini (footprint) genişletir ve volkanik risk analizleri için kritik bir unsurdur (Farquharson ve ark., 2015). Şişme ve parçalanma derecesine göre breakout yapıları dört morfolojik evreye ayrılır (Farquharson ve ark., 2015):

1. **Kubbeli (Domed):** Çoğunlukla lokal vezikülasyon sonucu oluşan, kabuğun çatlamadan esneyip yukarı doğru yuvarlak bir şişkinlik oluşturduğu pürüzsüz evre.
2. **Taçaıpraksı (Petaloid):** Şişmenin artmasıyla kabuğun radyal olarak çatladığı ve yarıklardan dışarı lavın çiçek yaprakları gibi taştığı evre.
3. **Molozlu (Rubbly):** Genişlemenin sürekli olması nedeniyle yüzey kabuğunun tamamen parçalanarak kaos halinde otobreşasyon (autobrecciation) ürettiği karmaşık doku.
4. **Yarık Çatlaklı (Cleft-split):** En büyük şişme loblarının, mafik lavlardaki 'tumulus' yapılarına benzer şekilde derin merkezi yarıklarla ikiye ayrıldığı en ileri deformasyon şekli (Farquharson ve ark., 2015; Schipper ve ark., 2019).

Ogıvler (Ogives) ve Rampa Yapılarının Kinematığı

Lav akıntısının en üst kesimlerinde akış yönüne doğru içbükey kavisler çizen, aralarındaki mesafe onlarca metreyi bulabilen devasa eşmerkezli yüzey sırtlarına ogiv adı verilir (Cas ve Wright, 1988; Fink, 1980a). Fink (1980) gibi klasik teorisyenler, ogivleri soğuk ve sert yüzey kabuğu ile alttaki akışkan lav arasındaki viskozite zıtlığından doğan bir yüzey buruşması (surface folding/buckling) olarak tanımlamıştır (Fink, 1980a). Ancak en güncel alan analizleri ve sayısal modeller, bu devasa sırtların basit kıvrımlardan ziyade, lavın akış cephesindeki molozlara çarparak yavaşlaması sonucu oluşan şiddetli boylamasına sıkışmanın bir eseri olduğunu göstermektedir (Isom ve ark., 2023; Smith ve Houston, 1994). Lav gövdesi kendi içinde makaslama (shear) düzlemleri yaratarak geriye dönük eğimli rampa yapılarını (ramp structures) inşa eder (Cas ve Wright, 1988; Hall, 1978). Yüzeyde kıvrım gibi algılanan ogivler, aslında bu derin kırılğan (brittle) bindirme faylarının yüzeydeki manifestasyonlarıdır (Fink, 1980a; Isom ve ark., 2023). Bu esnada, tabandaki düşük yoğunluklu pomza tabakaları üstlerindeki ağır masif riyolit/obsidyen katmanını delerek pomza diapipleri halinde yukarı tırmanır (Cas ve Wright, 1988).

Litolojik Çeşitlilik, Dokusal Evrim ve Sferülitik Büyüme

Riyolit lavları, makroskobik ve mikroskobik ölçekte olağanüstü bir dokusal heterojenliğe sahiptir. Bu farklılıklar, kimyasal içeriğin ötesinde, magmanın soğuma hızı, içerdği uçucu miktarı ve katılaşma sırasındaki termodinamik rotası tarafından belirlenir (Cas ve Wright, 1988).

Camsı Geçiş: Obsidyen ve Perlit

Riyolitik lavların dış kenarları ve üst yüzeyleri, ortamla temas ettiğinde hızla soğur. Riyolit muazzam viskozitesi, eriyik içindeki atomların difüzyonunu ve mineral çekirdeklenmesini (nucleation) neredeyse tamamen bloke eder (Dingwell, 1996). Kristal büyümesinin gerçekleşmemesi sonucunda, termodinamik açıdan amorf ve kararsız bir volkanik cam olan obsidyen meydana gelir (Dingwell, 1996; Friedman, Long, ve Smith, 1963). Siyah, kahverengi veya yeşilimsi renklerdeki obsidyen, mineral içermediği için camsı parlaklığa sahiptir ve mükemmel konkoidal (istiridye kabuğu benzeri) kırıklar sunar (Friedman ve ark., 1963). Ancak volkanik cam jeolojik zaman bağlamında kararsızdır. Zamanla yüzey sularını veya yeraltı nemini bünyesine katarak hidrasyon geçirir. Su emen cam hacimsel olarak genişler ve mikroskobik ölçekte yüz binlerce dairesel çatlak üreterek (perlitik çatlaklar) inci parlaklığında, ufalanan gri perlit seviyelerine dönüşür (Cas ve Wright, 1988). Daha uzun vadede ise kayaç, amorf camın yerini mikroskobik kuvars ve feldspat kristallerinin aldığı devitrifikasyon (camın bozunarak kristalleşmesi) sürecine girerek taşı riyolite evrilir (Cas ve Wright, 1988).

Yüksek Sıcaklık Kristalizasyonları: Sferülitler ve Litofizler

Hızlı soğuma şartlarında aşırı doymuş (supercooled) hale gelen camsı yapılar içerisinde termal streslerin bir sonucu olarak sferülit (spherulite) adı verilen kristalizasyon modülleri gelişir (Cas ve Wright, 1988; Lofgren, 1971a). Sferülitler, genellikle alkali

feldspat (sanidin veya anortoklaz) ve silika polimorflarının (kristobalit veya tridimit) mikroskobik iğnemsli lifler halinde bir çekirdek etrafında ışınsal olarak dışa doğru büyümesiyle oluşan küresel mineral kümeleridir (Lofgren, 1971a, 1971b). Eğer bu iğnemsli lif büyümesi, magmadan henüz ayrılmış ve genişlemekte olan bir gaz boşluğunun (vezikül) etrafını sararsa, veya boşlukta hapsolan buhar fazı çevresine eşmerkezli ikincil mineraller çökelerse, içleri boşluklu ve genellikle bir gül goncasını andıran yaprakçıklı litofiz (lithophysae) adı verilen formlar ortaya çıkar (Lofgren, 1971a; McArthur, Cas, ve Orton, 1998). Literatürde popüler bir süs taşı olarak bilinen kar tanesi obsidyeni (snowflake obsidian), koyu renkli camsı matriks içerisinde büyüyen ve sıklıkla kristobalit liflerinden oluşan beyaz sferülit kümelerinin estetik bir tezahürüdür (Dingwell, 1996; McArthur ve ark., 1998).

Megalosferülitler, Retrograd Çözünürlük ve Türkiye'deki Örnekler

Bazı özel koşullarda sferülitlerin çapı onlarca santimetreyi aşarak Megalosferülit halini alır. Riyolitik magmalar, soğudukça bünyesinde daha fazla çözünmüş su tutabilme özelliği olan nadir bir termodinamik kapasiteye, yani retrograd çözünürlük (retrograde solubility) özelliğine sahiptir (Watkins ve ark., 2009).. Lav soğurken oluşan çatlaklardan içeri giren hidrotermal sular, yerel olarak Camsı Geçiş Sıcaklığını (Glass Transition Temperature, T_g) düşürür. Bu durum, normalde camlaşarak donması gereken düşük sıcaklıklarda bile halihazırda oluşmuş olan az sayıdaki kristal çekirdeğinin büyümeye devam etmesine olanak tanıyarak devasa sferülitler üretir (Watkins ve ark., 2009).

Kapadokya (Orta Anadolu) ve Doğu Anadolu volkanik provinsleri, riyolitik lavların bu dokusal özelliklerinin haritalandığı devasa laboratuvarlardır (Güllü ve Deniz, 2022). Nevşehir Acıgöl kaldera kompleksindeki obsidyen akıntıları içinde yapılan konfokal

Raman spektroskopisi ve jeotermometre araştırmaları, sferülitlerin 600°C ile 650°C arasındaki T_g (camsı geçiş) sınırlarında, plajiyoklaz (oligoklaz andezin) ve kristobalit fazlarıyla kristalleştiğini net olarak saptamıştır (Güllü ve Deniz, 2022). Bitlis'te yer alan Nemrut Kalderası ise 1441 yılına kadar süren son derece taze riyolitik ve trakitik lav çıkışlarına ev sahipliği yapar (Sumita ve Schmincke, 2013). Kantaşı, Güzelsu ve Taşharman bölgelerindeki lav lobları ve obsidyen akıntıları, riyolitik akma bantlanmalarının, buruşuk (wrinkled) üst yüzeyleerin ve efüzif obsidyen pomza ardalanmalarının mükemmel örneklerini barındırarak UNESCO jeopark ağı standartlarında jeositler oluşturmaktadır (Güllü ve Deniz, 2022; Sumita ve Schmincke, 2013).

Sualtı ve Buzaltı (Subglacial) Riyolit Püskürmeleri

Riyolitik magmaların okyanusların derin abisal havzalarında veya kilometrelerce kalınlıktaki kıtasal buzul örtüleri altında püskürmesi, karasal emsallerinden tamamen farklı termodinamik, hidrostatik ve akışkanlar dinamiği koşulları yaratır. Karasal ortamdaki sığ basınçların aksine, muazzam su ve buzul basıncı volkanik ürünlerin hem morfolojisini hem de dokusunu radikal biçimde değiştirir.

Havre 2012 Derin Deniz Püskürmesi ve Hidrostatik Basıncı Dinamikleri

Kermadec Yayı'nda yer alan Havre denizaltı volkanında 2012 yılında gerçekleşen tarihi riyolit püskürmesi, derin deniz (yaklaşık 900 metre derinlik) silisik volkanizmasının anlaşılmasında uzun süredir kabul gören modelleri yıkan kritik bir olaydır (Jutzeler ve ark., 2014; Manga ve ark., 2018). Eski kavramsal modeller, abyssal derinliklerdeki devasa hidrostatik basıncın, magmatik gazların özünürölükten çıkıp (eksolüsyon) genleşmesini tamamen durduracağını ve patlamalı ufalanmayı (fragmentation) engelleyeceğini öngörüyordu (Manga ve ark., 2018). Ancak Havre

2012 vakası göstermiştir ki, 900 metre derinliğe denk gelen yüksek basınç, viskozite ve deformasyon hızı (strain rate) arasındaki ilişkiyi değiştirerek magma kanalı içindeki kırılgan (brittle/explosive) parçalanmayı engellemiş olsa da, vezikülasyonu tamamen durduramamıştır (Carey ve ark., 2018; Manga ve ark., 2018). İçinde hala önemli miktarda çözünmüş su barındıran (dolayısıyla vizkozitesi nispeten düşük kalan) magma, efüzif (sakin akışlı) bir biçimde okyanus tabanına çıkmıştır (Manga ve ark., 2018). Buna rağmen serbest kalan gaz kabarcıkları, lav kütesinin özgül ağırlığını deniz suyunun altına düşürerek magma yüzeyinden metrelerce çapta devasa süngerimsi sıcak pomza bloklarının kopmasına neden olmuştur (Manga ve ark., 2018). Okyanus yüzeyine fırlayan ve şok soğumayla sünger dokularını kilitleyen bu bloklar, sular üstünde yüzen devasa Pomza Salları (Pumice Rafts) inşa ederek 400 kilometrekarelik bir alanı kaplamış ve rüzgarlarla tüm Pasifik'e dağılmıştır (Jutzeler ve ark., 2014; Manga ve ark., 2018). Gazı az, suyu hızlı emen iri bloklar ise batarak deniz tabanında emsalsiz dev pomza yatakları oluşturmuştur (Manga ve ark., 2018). Yüksek eğimli kaldera duvarlarına tutunan efüzif akıntılar ise, sualtı topoğrafyasına uyum sağlayarak dar lav dilleri ve taban domları meydana getirmiştir (Carey ve ark., 2018; Manga ve ark., 2018). Karasal ortam koşulları ile derin deniz ortam koşullarının magmatik akış hızı ve parçalanma tipleri üzerindeki belirleyici farklılıkları Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2: Karasal ve derin deniz ortamlarındaki çevresel basınç ile magmatik akış hızının parçalanma tipleri ve nihai ürünler üzerindeki etkisi.

Çevresel Ortam	Atmosfer/Su Basıncı	Magmatik Akış Hızı (Strain Rate)	Parçalanma Tipi ve Nihai Ürün
Karasal (Subaerial)	Düşük (~0.1 MPa)	Yüksek	Şiddetli kanal içi kırılma (Plinian Kül/İgnimbrit)
Derin Deniz (Örn. Havre, 900m)	Yüksek (~9.0 MPa)	Düşük ve Dengeli	Efüzif çıkış, kopan iri bloklar (Yüzen Pomza Salları)

Hiyaloklastitler ve Peperit Oluşumu

Derin sualtı riyolit lavlarının soğuk okyanus suyuyla direkt teması, muazzam ısıl şok (thermal shock) ve içsel gerilme (tensile) stresleri yaratır. Bu şok etkisi, lav gövdesinin dış kabuğunun aniden büzülmesine ve ince kıymıklar, kırık cam parçacıkları veya köşeli bloklar halinde ufalanmasına yol açar. Magmanın suyla termal etkileşimi sonucu patlamasız olarak gelişen bu parçalanma sürecine ve oluşan kayaca hiyaloklastit (hyaloclastite) adı verilir (Cas ve Wright, 1988; Manga ve ark., 2018). Magma tamamen su sütununa açılmak yerine henüz tam katılaşmamış, suya doymun ve yüksek gözenekliliğe sahip deniz tabanı sedimanları (örneğin çamur veya kum tabakaları) içine sokulum yaparsa, durum daha da karmaşıklaşır. Magmanın yüksek ısısı sediman içindeki gözenek suyunu hızla kaynatarak buharlaştırır (White, 2000). Yerel buhar basıncı artışı, sıvılaşma (liquefaction) ve akışkanlaşma (fluidization) sayesinde sediman ve parçalanmış magma (juvenil klastlar) birbirine karışarak melez, karmaşık bir kayaç olan Peperit (Peperite) dokusunu oluşturur (Cas ve Wright, 1988; Skilling, White, ve McPhie, 2002; White, 2000). Riyolitik magmaların yüksek viskozitesi ile akışkanlaşmış sedimanlar arasındaki yoğunluk farkları, Rayleigh-Taylor kararsızlıkları (instabilities) yaratarak

akışkan alevsı yapılar (fluidal diapirs) veya keskin köşeli bloklu peperit dokuları meydana getirir (Skilling ve ark., 2002). Eğer riyolitik peperitler düşük basınçlı sıg deniz ortamlarında oluşmuşsa, magmanın şok soğumadan önce veziküllenmeye (gaz kabarcığı oluşturmaya) vakit bulmasıyla, stratigrafik analizlerde intrüzyon zamanlamasını belirlemede kritik öneme sahip olan pomzamsı peperit (pumiceous peperite) fasiyeslerini yaratırlar (Gifkins, Allen, ve McPhie, 2005; Skilling ve ark., 2002).

Buzulaltı (Subglacial) Volkanizma ve Termo Mekanik Geri Beslemeler

Riyolitik magmaların İzlanda'daki Torfajökull kompleksi gibi kalın buzul kütleleri altında püskürmesi, magma ısısı ile buzulun deformasyon dinamikleri arasında karmaşık termo mekanik geri besleme (feedback) döngüleri kurar (Tuffen, Gilbert, ve McGarvie, 2001). Püskürmenin karakterini ve üretilen volkanik ürünü (intruzif hiyaloklastit veya patlamalı tefra) belirleyen ana unsur efüzyon hızı (magma çıkış debisi) ile buzul örtüsünün Nye Yasası (buzun kendi hidrostatik ağırlığı altındaki sünek deformasyonu) çerçevesindeki kapanma hızının rekabetidir (Furnes, Fridleifsson, ve Atkins, 1980; Tuffen ve ark., 2001).

- **İntrüzif / Efüzif Geçiş:** Eğer magma çıkış hızı nispeten düşükse, magmanın buzu eritme hızı, buzulun ağırlığıyla eriyen boşluğu (kaviteyi) kapatma hızından daha yavaş kalır. Buzul, tıpkı yoğun bir macun gibi boşluğu doldurarak volkanik baca üzerine çöker (ductile roof closure). Lav, buzun fiziksel baskısı altında kalarak kendi içinde boğulur ve magmatik ısının sadece düşük verimlilikle ($f_i \sim 0.1$) transfer edilebildiği masif şok soğuma breşi (quench hyaloclastite) ve riyolitik lav lobları inşa eder (Furnes ve ark., 1980; Tuffen ve ark., 2001).

- **Patlamalı (Explosive) Püskürme:** Eğer magma çıkış hızı yüksekse, salınan devasa ısı buzu çok hızlı bir şekilde eriterek magmatik bacanın hemen üzerinde eriyik suyu veya buharla dolu geniş bir magara (gap/cavity) açar (Tuffen ve ark., 2001). Yukarı tırmanan taze riyolit kütlesi bu devasa yeraltı su/buhar havuzuyla şiddetle etkileşime girerek yoğun freatomagmatik tefra üreten patlamalara dönüşür (Tuffen ve ark., 2001). Isı transfer verimliliğinin maksimuma çıktığı bu rejimde, hacmen artan sistem buzulun yüzeyinde dairesel göçüklere (ice cauldron) ve zaman zaman felaket boyutlarındaki buzulaltı taşkınlarına (jökulhlaup) yol açar (Furnes ve ark., 1980; Tuffen ve ark., 2001).

Sonuç

Riyolitik magmalar, salt yüksek silikatlı ve yüksek viskoziteli temel betimlemelerinin çok ötesinde, atomik ölçekten kıtasal ölçeğe kadar değişen olağanüstü kompleks fiziksel, reolojik ve termodinamik kurallara tabi olan dinamik sistemlerdir.

Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) temelli modern modellemeler ve yapay sinir ağları analizleri, magmanın içindeki mikroskobik su ve halojen varyasyonlarının tüm akış rejimini logaritmik olarak nasıl tasarladığını kanıtlamıştır.

Püskürme evrelerindeki patlamalı ve efüzif sınırları arasındaki çizginin net olmadığı, geçirgenlik (permeability) gelişimine bağlı olarak kırılğan ve sünek deformasyon döngülerinin aynı sistem içinde art arda veya eşzamanlı yaşanabildiği görülmüştür. İkinci kaynama (second boiling) fenomeninin itici gücü ile oluşan ikincil loblar (breakouts) ve ogiv rampa makaslama yapıları, riyolit akıntıların ömürlerinin sonlarında bile yıkıcı potansiyeller barındıran soğuma sınırlı (cooling limited) davranışlar sergilediğini göstermiştir.

Mikroskobik ölçekte ise hızlı soğuma kaynaklı camsı geçişler (obsidyen), devitrifikasyon ve özellikle sferülitik büyüme mekanizmaları litolojinin kaderini tayin etmektedir. Retrograd çözünürlükle T_g (camsı geçiş) değerlerinin düşmesi devasa megalosferülit oluşumlarına imkan tanırken, Kapadokya (Acıgöl) ve Nemrut gibi lokaliteler bu magmatik laboratuvarın en taze kanıtlarını sunmaktadır.

Son olarak, sualtı ve buzulaltı riyolit püskürmeleri (Havre 2012, Torfajökull), hidrostatik basınç ve buzul deformasyon hızı ile efüzyon hızı arasındaki dinamik dengelerin (Nye Yasası), nihai volkanik ürünün kimliğini (yüzen pomza salları, masif hiyaloklastitler veya freatomagmatik tefalar) nasıl tek başına değiştirebildiğini ortaya koymuştur. Magma ve yaş sedimanların melez etkileşiminden doğan peperitler ise sedimanter magmatik sınırı flulaştırmaktadır. Bu çok boyutlu parametreler; riyolitik yapıların geçmiş jeolojik kayıtlarda doğru yorumlanması, güncel volkanik krizlerde efüzif süreçler sırasında bile oluşabilecek sekonder patlama risklerinin hesaplanması ve volkanik tehlike (hazard mitigation) modellerinin iyileştirilmesi açısından elzem veriler sunmaktadır.

Kaynakça

Benson, G. T., ve Kittleman, L. R. (1968). Geometry of flow layering in silicic lavas. *American Journal of Science*, 266(4), 265-276.

Carey, R. J., Wysamai, A., ve Jutzeler, M. (2018). Submarine eruptions and their consequences. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 350, 1-20.

Cas, R. A. F., ve Wright, J. V. (1988). Volcanic successions modern and ancient: A geological approach to processes, products and successions. Springer.

Castro, J. M., Bindeman, I. N., Tuffen, H., ve Schipper, C. I. (2012). Explosive origin of silicic lava: textural and water-isotope evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 329, 91-99.

Dingwell, D. B. (1996). Volcanic dilemma: flow or blow?. *Science*, 273(5278), 1054-1055.

Farquharson, J. I., James, M. R., ve Tuffen, H. (2015). Examining rhyolite lava flow dynamics through photo-based 3D reconstructions of the 2011–2012 lava flowfield at Cordón Caulle, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 336-348.

Fink, J. H. (1980a). Surface folding and viscosity of rhyolite flows. *Geology*, 8(5), 250-254.

Fink, J. H. (1983). Structure and emplacement of a rhyolitic obsidian flow: Little Glass Mountain, Medicine Lake Highland, northern California. *Geological Society of America Bulletin*, 94(3), 362-380.

Friedman, I., Long, W., ve Smith, R. L. (1963). Viscosity and water content of rhyolite glass. *Journal of Geophysical Research*, 68(24), 6523-6535.

Furnes, H., Fridleifsson, I. B., ve Atkins, F. B. (1980). Subglacial volcanics-on the formation of acid hyaloclastites. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8(1), 95-110.

Gifkins, C., Allen, R. L., ve McPhie, J. (2005). Apparent welding textures in altered pumice-rich rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 142(1-2), 29-47.

Giordano, D., Russell, J. K., ve Dingwell, D. B. (2008). Viscosity of magmatic liquids: A model. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1-4), 123-134.

Gonnermann, H. M., ve Manga, M. (2003). Explosive volcanism may not be an inevitable consequence of magma fragmentation. *Nature*, 426(6965), 432-435.

Güllü, B., ve Deniz, K. (2022). Nature and crystallization stages of spherulites within the obsidian: Acıgöl (Cappadocia-Nevşehir, Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 31(6), 545-562.

Hall, S. H. (1978). The stratigraphy of northern Lipari and the structure of the Rocche Rosse rhyolite flow and its implications. Unpublished B.Sc. thesis, University of Leeds.

Hess, K. U., ve Dingwell, D. B. (1996). Viscosities of hydrous leucogranitic melts: A non-Arrhenian model. *American Mineralogist*, 81(9-10), 1297-1300.

Hulme, G. (1974). The interpretation of lava flow morphology. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 39(2), 361-383.

Huppert, H. E., Shepherd, J. B., Sigurdsson, H., ve Sparks, R. S. J. (1982). On lava dome growth, with application to the 1979 lava extrusion of the Soufrière of St. Vincent. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 14(3-4), 199-222.

Isom, S. L., Andrews, G. D. M., Kenderes, S., ve Whittington, A. G. (2023). Making sense of brittle deformation in rhyolitic lavas: Insights from Obsidian Dome, California, USA. *Geosphere*, 19(2), 431-447.

Jutzeler, M., McPhie, J., Allen, S. R., ve Proussevitch, A. A. (2014). Pumice rafts and the deep submarine eruption of Havre volcano. *Nature Communications*, 5(1), 3660.

Langhammer, L., ve ark. (2022). Modeling viscosity of volcanic melts with artificial neural networks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(1), e2021GC010041.

Lipman, P. W. (1984). The roots of ash flow calderas in western North America: Windows into the tops of granitic batholiths. *Journal of Geophysical Research*, 89(B10), 8801-8841.

Lofgren, G. (1971a). Spherulitic textures in glassy and crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research*, 76(23), 5635-5648.

Lofgren, G. (1971b). Experimentally produced devitrification textures in natural rhyolitic glass. *Geological Society of America Bulletin*, 82(1), 111-124.

Loney, R. A. (1968). Flow structure and composition of the Southern Coulee, Mono Craters, California—A pumiceous rhyolite flow. *Geological Society of America Memoir*, 116, 415-440.

Manga, M., Fauria, K. E., Lin, C., Mitchell, S. J., Jones, M., Conway, C. E.,... ve Tani, K. (2018). The pumice raft-forming 2012 Havre submarine eruption was effusive. *Earth and Planetary Science Letters*, 489, 49-58.

McArthur, A. N., Cas, R. A. F., ve Orton, G. J. (1998). Distribution and significance of spherulites in ignimbrites. *Bulletin of Volcanology*, 60(4), 245-256.

McBirney, A. R., ve Murase, T. (1984). Rheological properties of magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 12(1), 337-357.

Schipper, C. I., Castro, J. M., Kennedy, B. M., Christenson, B. W., Aiuppa, A., Alloway, B.,... ve Tuffen, H. (2019). Halogen (Cl, F) release during explosive, effusive, and intrusive phases of the 2011 rhyolitic eruption at Cordon Caulle volcano (Chile). *Volcanica*, 2(1), 73-90.

Skilling, I. P., White, J. D. L., ve McPhie, J. (2002). Peperite: a review of magma-sediment mingling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 114(1-2), 1-17.

Smith, J. V., ve Houston, E. C. (1994). Folds produced by gravity spreading of a banded rhyolite lava flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63(1-2), 89-94.

Sparks, R. S. J. (2004). The fluid dynamics of volcanic eruptions. Flow, turbulence and combustion, 72(4), 455-467.

Sumita, I., ve Schmincke, H. U. (2013). Impact of volcanism on the evolution of Lake Van (eastern Anatolia) III: The Nemrut ignimbrite. *Bulletin of Volcanology*, 75, 714.

Tuffen, H., Dingwell, D. B., ve Pinkerton, H. (2003). Repeated fracture and healing of silicic magma generate flow banding and earthquakes?. *Geology*, 31(12), 1089-1092.

Tuffen, H., Gilbert, J. S., ve McGarvie, D. W. (2001). Products of an effusive subglacial rhyolite eruption: Bláhnúkur, Torfajökull, Iceland. *Bulletin of Volcanology*, 63(3), 179-190.

Tuffen, H., James, M. R., Castro, J. M., ve Schipper, C. I. (2013). Exceptional mobility of an advancing rhyolitic obsidian flow at Cordon Caulle volcano in Chile. *Nature Communications*, 4(1), 2709.

Watkins, J. M., DePaolo, D. J., Huber, C., ve Ryerson, F. J. (2009). Liquid-vapor partitioning of oxygen isotopes during boiling of water and its implication for the isotopic signature of geothermal systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 283(1-4), 168-177.

White, J. D. L. (2000). Subaqueous eruption-fed density currents and their deposits. *Precambrian Research*, 101(2-4), 87-109.

Woods, A. W., ve Koyaguchi, T. (1994). Transitions between explosive and effusive eruptions of silicic magmas. *Nature*, 370(6491), 641-644.

Zhang, Y., Xu, Z., ve Liu, Y. (2003). Viscosity of hydrous rhyolitic melts inferred from kinetic experiments, and a new viscosity model. *American Mineralogist*, 88(11-12), 1741-1752.

VOLKANİK KAYAÇLARLA İLİŞKİLİ MADEN YATAKLARI VE CEVHERLEŞMELER:

RECEP UĞUR ACAR¹

Giriş

Yerkabuğunun jeolojik evrimi boyunca magmatizma ve buna bağlı volkanik faaliyetler, elementlerin konsantrasyon olarak ekonomik değere sahip maden yataklarını oluşturmada en kritik rolü oynamıştır. Magmatik sistemlerdeki cevher oluşumu, mantodaki kısmi ergimeden başlayıp kabuktaki nihai kristalleşmeye kadar uzanan çok aşamalı ve karmaşık fizikokimyasal süreçleri içerir (Naldrett, 2004). Magma odasından yüzeye doğru yükselen silikat ergiyikleri, hem ısı bir motor işlevi görerek çevredeki meteorik ve formasyon sularını harekete geçirir hem de bünyelerinde barındırdıkları su, karbondioksit, kükürt ve halojenler (klor, flor) gibi uçucu bileşenleri serbest bırakarak cevher taşıyıcı hidrotermal ve pnömatolitik çözeltilerin ana kaynağını oluştururlar (Boudreau, 2019; Gümüş, 1974).

Volkanik kayaçlarla ilişkili maden yatakları, oluştukları derinlik, basınç, sıcaklık ve tektonik ortama bağlı olarak büyük bir

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-0420-6263

çeşitlilik gösterir. Bu yataklar; magmanın doğrudan kristalleşmesiyle oluşan magmatik sülfid yataklarından (Naldrett, 2004), deniz tabanında volkanik ekshalasyonlarla çökelen volkanojenik masif sülfid (VMS) yataklarına (Barrie ve Hannington, 1999; Galley ve ark., 2007), kıtasal ortamlarda sığ derinliklerde gelişen epitermal altın-gümüş sistemlerinden (Gültekin ve Örgün, 1993; Hedenquist ve Lowenstern, 1994), volkano-tortul havzalarda çökelen borat yataklarına kadar geniş bir spektruma yayılır. Volkanik kayaçlar bu sistemlerde yalnızca pasif bir ev sahibi rolü üstlenmezler; aynı zamanda cevherleşmeyi sağlayan akışkanların kimyasal evrimini kontrol eden, metallerin ve kükürdün sağlandığı aktif kaynak kayalardır (Akbulut ve ark., 2016; Barrie ve Hannington, 1999).

Bu bölüm, volkanik ve subvolkanik kayaçlarla genetik ilişki sunan cevherleşme sistemlerini, magmatik-hidrotermal evrimin aşamalarını, akışkan kimyasını ve yapısal kontrollerini derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır. Küresel çaptaki tipik metalojenik modellerin (Noril'sk, Voisey's Bay, Bushveld) yanı sıra, Türkiye'nin farklı tektonik birliklerinde yer alan karakteristik yataklar (Murgul, Lahanos, Karadere, Mayıslar, Kaymaz, Kırka) akışkan kapanımı, izotop jeokimyası ve stratigrafik veriler ışığında ayrıntılı olarak analiz edilecektir.

Magmatik-Hidrotermal Sistemlerin Temelleri ve Pnömatolitik Evre

Magma odalarındaki kristalleşme süreci Bowen reaksiyon serisine uygun olarak ilerlerken, erken evrede kristalleşen susuz silikat minerallerinin (olivin, piroksen, plajiyoklaz) ergiyikten ayrılmasıyla, kalıntı magmada su ve uçucu elementlerin (Cl, F, S, CO₂) konsantrasyonu giderek artar (Boudreau, 2019; Gümüş, 1974). Bu kalıntı magma, litostatik basınca ve kendi içindeki uçucu derişimine bağlı olarak belirli bir doygunluk noktasına ulaştığında

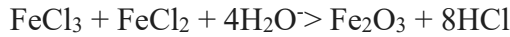
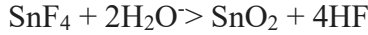
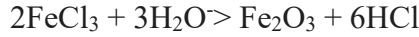
akışkan fazın silikat ergiyiğinden ayrışması (eksolsüyon) gerçekleşir ve magmatik-hidrotermal sistemin temelleri atılır (Gümüş, 1974). Bu evre, magmanın bileşimsel değişimleri, faz durumları ve fiziksel parametrelerindeki dalgalanmalar ile kontrol edilir.

Pnömatolitik ve Hidrotermal Çözeltilerin Fizikokimyası

Kökenleri ne olursa olsun, sıcaklıkları 50°C ile 400°C arasında olan sıcak sulu çözeltiler hidrotermal çözeltiler; sıcaklıkları 400°C ile 500°C arasında değişen (çeşitli çalışmalarda bu aralık 400°C - 600°C veya 350°C - 800°C olarak da genişletilebilmektedir) doğal, sıcak buharlı ve sulu çözeltiler ise pnömatolitik çözeltiler olarak tanımlanmaktadır (Gümüş, 1974). Son yıllarda sıcak çözeltilerle ilişkili tüm maden yataklarının geniş bir "hidrotermal yataklar" şemsiyesi altında incelenmesi eğilimi yaygınlaşmış olsa da pnömatolitik evrenin fizikokimyasal dinamikleri metasomatizma ve cevher taşınımı açısından kendine has, kritik özellikler barındırır (Gümüş, 1974).

Pnömatolitik evrede iç basınçlar magmatik sistemin en üst düzeyine ulaşır, çözeltilerin pH'ı asidiktir ve ortam büyük oranda sıcak buhar fazı (Kolay Uçucu Bileşenler - KUB buhar fazı) ile karakterize edilir (Gümüş, 1974). Kolay uçucuların yarattığı bu muazzam iç basıncın, sistemin üzerindeki dış basıncı (litostatik basınç) aşması durumunda, yan kayaçlarda şiddetli patlamalar, hidrolik çatlatmalar ve çeşitli boyutlarda breşleşmeler meydana gelir (Gümüş, 1974). Magmatik kristalleşmenin gabrodan granitlere uzanan ana hattının büyük oranda tamamlandığı bu safhada ortamda geriye kalan uçucular başlıca HF, H₃BO₃, HCl, H₂S ve H₂O gibi bileşiklerden oluşur (Gümüş, 1974). Bu kuvvetli asitler, artık magmadan ayrılıp çevre kayaçlara doğru hareket ederken içlerinde yüksek konsantrasyonlarda metal taşırlar.

Pnömatolitik uçucu fazda (gaz fazında) halojenürler (klorür ve florür bileşikleri) şeklinde taşınan metaller, reaksiyona uygun fizikokimyasal bariyerlerle karşılaştıklarında oksit veya sülfür formunda çökelirler. Cevherleşme süreçlerinin temelini oluşturan tipik kimyasal reaksiyon denklemleri şu şekildedir (Gümüş, 1974):



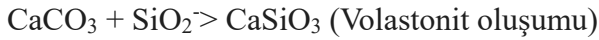
Bu reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan yüksek eritme ve çözme özelliğine sahip HF ve HCl gibi asitler, yan kayaçlarda metasomatik reaksiyonlara girerek derin mineralojik ve hacimsel alterasyonlara yol açar (Gümüş, 1974).

Metasomatizma: Greyzenleşme ve Skarn Oluşumları

Pnömatolitik dönemde uçucu elementlerin yüksek hareket kabiliyeti, yan kayaçlarda büyük çaplı kimyasal kütle transferlerine ve yer değişimlerine (metasomatizma) neden olur. Yan kayaçlarda meydana gelen bu değişiklikler, getirilen çözeltilerin niteliği ve yankayacın cinsi ile doğrudan ilişkilidir (Gümüş, 1974).

Alüminosilikatlı kayaçlarda, özellikle feldspat minerallerinin ayrışarak yerini kuvars ve mika (muskovit, lepidolit, zinvaldit) oluşumuna bırakması "greyzenleşme" olarak adlandırılır (Gümüş, 1974). Greyzen zonlarında turmalin, topaz, flüorit ve apatit gibi tali gang minerallerine sıklıkla kasiterit (SnO_2), volframit, molibdenit, şeelit, beril ve bizmutinit gibi ekonomik cevher mineralleri eşlik eder (Gümüş, 1974). İngiltere'deki Cornwall kalay yatakları ve Almanya'daki Attenberg yatakları bu türün klasik küresel

örnekleridir (Gümüş, 1974). ABD Colorado'daki Climax molibden yatakları da benzer pnömatolitik evre zenginleşmelerini yansıtır. Eğer pnömatolitik çözeltiler karbonatlı kayaçlarla (kireçtaşı, dolomit, karbonatlı marnlar) reaksiyona girerse, "Pirometazomatik" veya "Skarn" (Taktit) tipi yataklar meydana gelir (Gümüş, 1974). Granatlar, piroksenler ve amfiboller gibi kalsiyum-magnezyum silikat mineralleri bu yatakların ayırt edici özelliğidir. Skarn oluşumu sırasında izokimyasal metamorfizmayı magmatik sıvıların ortama girmesiyle gelişen reaksiyon skarnları izler. Örneğin:



Türkiye'den Sivas Pınargözü demir yatağı, Malatya Hasançelebi skapolitfels-manyetit yatağı, Sivas-Divriği demir yatakları, Elazığ-Keban kurşun-çinko yatakları, Bursa-Uludağ şeelit yatakları ve Balıkesir-Ayazmant demir yatakları bu evrenin farklı magmatik-metasomatik ürünlerini temsil eden en iyi bölgesel örneklerdir (Gümüş, 1974).

Volkanojenik Masif Sülfid (VMS) Yatakları

Volkanojenik masif sülfid (VMS) yatakları, deniz tabanında veya deniz tabanının hemen altındaki sığ derinliklerde, subvolkanik faaliyetlerle ilişkili hidrotermal çözeltilerden çökelen, büyük oranda baz metaller (Cu, Zn, Pb) ile değerli metaller (Au, Ag) barındıran stratiform sülfid yığılımlarıdır (Barrie ve Hannington, 1999; Galley ve ark., 2007).

Tektonik Ortamlar ve Hidrotermal Çökelim Mekanizmaları

VMS yataklarının bulunduğu bölgelerin tümü, graben çöküntü alanlarının oluşumuna, derin denizel ortam şartlarına ve manto kökenli mafik magmanın kabuğa sokulumuna yol açan büyük

kabuksal açılma (ekstansiyonel) rejimleri ile ilişkilidir (Galley ve ark., 2007). Tektonik ortamlar ağırlıklı olarak okyanus-içi yayılma merkezleri, kıtasal veya okyanusal ada yayları, yay-gerisi (back-arc) havzalar, yay-içi riftler ve kıtasal rift zonlarıdır (Barrie ve Hannington, 1999). Günümüzde deniz tabanlarında devam eden aktif hidrotermal sistemler; örneğin Kızıldeniz Atlantis II Deep, Juan de Fuca Rifti orta vadisi ve Orta Atlantik Rifti Trans-Atlantik Jeotermal alanı (TAG), geçmişteki VMS oluşumlarının eşzamanlı laboratuvarları niteliğindedir (Günay ve Çavdar, 2024).

Derinlere süzülen soğuk deniz suyu, subvolkanik magma odası tarafından ısıtılır. Isınan bu deniz suyu çevresindeki volkanik ve tortul kayaçlardan süzülürken metalleri ve kükürdü çözerek bünyesine katar (leaching). Yüksek sıcaklıklı (300°C - 400°C), asidik ve metal yüklü bu akışkanlar deniz tabanına ulaştığında çok soğuk (~2°C), alkali derin deniz suyu ile ani olarak karışır ve bünyelerindeki sülfid minerallerini hızla çökeltirerek masif sülfid bacalarını (black smokers) oluştururlar (Akbulut, 2020).

VMS Yataklarının Morfolojik Yapısı ve Sınıflandırılması

Tipik bir VMS yatağı iki ana bölümden oluşur (Akbulut, 2020):

1. **Masif Cevher Lensi (Mound/Lens):** Deniz tabanında çökelmiş, kütlece %40'tan fazla sülfid minerali (sfalerit, galen, pirit, kalkopirit) içeren tabakamsı bölümdür.
2. **Kök/Beslenme Zonu (Feeder/Stockwork Zone):** Masif lensin hemen altında yer alan, hidrotermal akışkanların deniz tabanına yükseldiği fay ve kırık hatlarını temsil eden ağsal (stokvörk) cevher zonudur.

VMS yatakları barındırdıkları metal içeriklerine ve volkanik litolojiye göre beş ana gruba ayrılır (Akbulut, 2020; Barrie ve Hannington, 1999). Tablo 1'de bu alt tiplerin özellikleri ve Türkiye'deki bölgesel karşılıkları özetlenmektedir.

Tablo 1: VMS Alt Tipleri ve Özellikleri (Barrie ve Hannington, 1999; Akbulut, 2020 temel alınarak)

VMS Alt Tipi	Baskın Tektonik Ortam	Baskın Volkanik Litoloji	Karakteristik Metaller	Türkiye'den Örnekler
Kuroko-tipi	Ada Yay / Yay-Gerisi Havza	Felsik-Bimodal Volkanitler	Cu, Zn, Pb, Ag, Au	Doğu Pontidler (Murgul, Lahanos, Çayeli)
Kıbrıs-tipi	Okyanus Ortası Sirt / Ofiyolitik	Mafik Volkanitler (Bazalt)	Cu, Zn, Co	Ergani (Elazığ)
Bimodal-Mafik	İlkel Yay / Kıtasal Rift	Mafik ve Felsik Karışık	Cu, Zn, (Pb, Au)	Orta Karadeniz (Küre) yatakları
Besshi-tipi	Okyanusal Rift / Tortul Havza	Pelitik Tortullar ve Mafik Tüfler	Cu, Zn, Co, Ag	(Türkiye'de belirgin örneği azdır)
Pelitik-Mafik	Olgun Yay-Gerisi Havza	Kara Kayıtlı Tortullar (Şeyl)	Cu, Zn, Pb, Ag	(Norveç ve İberya'da yaygındır)

Türkiye'deki VMS Yatakları: Pontid Metalojenik Kuşağı

Türkiye'nin kuzeydoğusunda yer alan Doğu Pontid Metalojenik Kuşağı, Üst Kretase yaşlı ada yayı volkanizması sırasında gelişmiş dünya çapında önemli Kuroko-tipi VMS cevherleşmelerini barındırır (Akbulut, 2020). Bu yatakların oluşumu, iki farklı volkanik evre arasında gelişmiş olan şiddetli denizaltı hidrotermal aktivitesine dayanmaktadır.

Bölgede yer alan yataklardan Murgul, tipik bir VMS sisteminin ağsal (stokvörk) ve saçınımlı beslenme kanalını (feeder zone) temsil eden Cu-tipi (bakır) zengin devasa bir kök zonudur (Akbulut, 2020). Buna karşın, Giresun civarındaki Lahanos ve Rize'deki Çayeli yatakları, reküranslar (tekrarlanmalar) gösteren parajenezle karakterize edilen Cu-Zn tipi denizaltı masif sülfat tepeliklerini (mound) mükemmel bir şekilde yansıtır (Akbulut, 2020). Ayrıca Orta Karadeniz'de yer alan Küre yatakları (Zeybek, Hanönü, Gökırmak, Cozoğlu) Jura döneminde bimodal-mafik tip VMS cevherleşmelerini temsil eder ve yaklaşık 25 Mt rezerv barındırırlar (Günay ve Çavdar, 2024).

Pontid VMS Yataklarının Akışkan Kapanım ve İzotop Verileri

Doğu Karadeniz VMS yatakları (Murgul, Akarşen, Çayeli, Kanköy ve Lahanos) üzerinde yapılan sıvı kapanım ve duraylı izotop (O-H-S-C) çalışmaları, bu sistemlerin kökeni hakkında net veriler sunmaktadır (Akbulut ve ark., 2016):

- Sıvı Kapanım: Hidrotermal sıvıların homojenleşme sıcaklıklarının 225°C ile 300°C arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu çözeltilerin tuzluluk oranları ortalama %10 eşdeğer NaCl civarında olup, sistemde belirgin miktarda CaCl_2 ve FeCl_2 de tespit edilmiştir.
- İzotop Verileri: Sülfürlü minerallerin (pirit, kalkopirit) $\delta^{34}\text{S}$ değerleri -5 ile +6 arasında, sülfatların (barit) ise +18 ile +19.1 arasındadır. Sıfıra yakın sülfür izotop değerleri kükürdün magmatik kökenli olduğuna işaret eder. Kuvars O-izotop ($\delta^{18}\text{O}$ VSMOW) oranları +8.7 ile +12.4, akışkanların $\delta^{18}\text{O}$ oranları -1.5 ile +2.9 ve δD değerleri -2 ile +33 arasındadır. Kalsit C-O izotop oranları ($\delta^{13}\text{C}$ VPDB) ise -0.85 ila +2.48'dir. Bu veriler, yatakların deniz suyunun modifiye olmasıyla geliştiğini tartışmasız bir şekilde doğrular.

Epitermal Sistemler ve Altın-Gümüş Cevherleşmeleri

Epitermal yataklar, yerkabuğunun sığ derinliklerinde (ilk 1-2 kilometre) ve düşük-orta sıcaklıklarda (150°C - 300°C) çökelen, köken olarak subvolkanik magmatik-hidrotermal sistemlere bağlı cevherleşmelerdir (Gültekin ve Örgün, 1993). Altın yataklarının genel tenörleri düşük (tonda 2-3 gram civarı) olmakla birlikte, cevherleşme çok geniş alanlara yayılabildiği için yüksek tonajlı işletilebilir rezervler sunarlar (Gültekin ve Örgün, 1993).

Epitermal altın yataklarının gelişim mekanizması bütünüyle volkanik bir sistem içinde düşünülmektedir (Gültekin ve Örgün, 1993). Derinlerdeki bir magma, yüzeyden süzülen meteorik suları ısıtarak konveksiyon hücreleri yaratır. Isınan sular (hidrotermal çözeltiler) volkanik temeli yıkayarak metalleri çözer ve faylar, makaslama zonları veya geçirgen volkanik tabakalar boyunca yüzeye çıkarken sıcaklık/basınç düşmesiyle altın, gümüş, antimon gibi elementleri damar (filon) ağları içine çökeltirler (Gültekin ve Örgün, 1993).

Yüksek ve Düşük Sülfidasyonlu Sistemlerin Dinamikleri

Epitermal yataklar iki ana gruba ayrılır (Gültekin ve Örgün, 1993):

1. Yüksek Sülfidasyon (HS-High Sulfidation): Doğrudan magmadan ayrılan gazların (SO₂, HCl, HF, H₂S) yüzeye yakın meteorik sulara karışmasıyla oluşan sistemlerdir. Akışkanlar ileri derecede asidik (pH<2) ve oksitlidir. İleri arjilik alterasyon, kovuklu silis (vuggy silica) ve alünit oluşumu tipiktir.
2. Düşük Sülfidasyon (LS-Low Sulfidation): Magmatik sıvıların yeraltı sularıyla daha derinlerde karışıp nötrale olduğu (pH 5-6) sistemlerdir. Çökelim genelde fay zonlarında akışkanın ani basınç kaybıyla kaynaması (boiling) sonucu oluşur. Adülyarya ve serisit alterasyonları tipiktir (Gültekin ve Örgün, 1993).

Türkiye'den Epitermal Sistem Örnekleri

Batı Anadolu (Karadere Düşük Sülfidasyon Yatağı): Balıkesir-İzmir sınırındaki Kozak magmatik kompleksi içinde yer alan Karadere yatağı, Erken-Orta Miyosen yaşlı volkanik-subvolkanik kayalar ve andezitik domlar içine yerleşmiş düşük sülfidasyon (LS) tipi bir epitermal yataktır (Gültekin ve Örgün, 1993). Cevherli damarlar şeker dokulu (sugary), yer yer bıçağımsı (bladed) kuvarslardan oluşur.

Sıvı kapanım incelemeleri, ilk evreyi temsil eden şeker dokulu kuvarslarda 300°C sıcaklık ve %7 NaCl eşdeğeri tuzluluk; son evreyi temsil eden rekristalize kuvarslarda ise 180°C sıcaklık ve %0.3 NaCl eşdeğeri çok düşük tuzluluk değerleri vermiştir. Bıçaksı kuvars yapıları, sistemde altının çökmesi için en güçlü tetikleyici olan "kaynama (boiling)" mekanizmasının gerçekleştiğinin kesin kanıtıdır. Oksijen ve hidrojen izotopları, suların derinlerde ısınıp magmatik sularla karıştığını doğrular.

Listvenitler ve Altın Cevherleşmeleri (Kaymaz Örneği): Volkanik ve subvolkanik magmatik sistemlerin etki alanında gelişen bir diğer önemli epitermal mineralizasyon ortamı, ultramafik kayaların (serpantinitlerin) yoğun hidrotermal alterasyonu sonucu oluşan listvenitlerdir (Gültekin ve Örgün, 1993). Kastamonu Karadağ masifindeki ofiyolit dizileri ve Tavşanlı Zonu'nda bulunan Eskişehir-Kaymaz altın yatağı (Damdamca, Karakaya) buna klasik örnektir (Gültekin ve Örgün, 1993). Kaymaz Granitinin sokulumu ile ısınan çözeltiler, serpantinitleri listvenitleştirerek manyetit, millerit, arsenopirit, pirit ve altın parajenezini çökelttirmiştir.

Polimetalik Cevherleşmeler ve Subvolkanik Sistemler

Sığ derinliklere yerleşen subvolkanik intrüzyonların (granitoyidler) çevresinde porfiri sistemlerden epitermal sistemlere geçişi yansıtan polimetalik cevher ağları gözlenir.

Eskişehir-Sarıcakaya (Mayıslar) Polimetalik Sistemi

Eskişehir-Sarıcakaya (Mayıslar Köyü) bölgesindeki polimetalik cevherleşme, Kretase yaşlı Dağköplü melanjına ait ultramafik kayalar ile Eosen yaşlı Meyildere andezitik volkanitleri içine tektonik evrelerle yerleşmiştir (Parlak ve Sayılı, 2004). Bölgede yüzeyleyen volkanitler, daha önce varlığı bilinmeyen Tersiyer yaşlı "Mayıslar Granitoyiti" tarafından kesilmektedir.

Altere andezitler içinde serisitleşme, killeşme, silisleşme ve turmalinlerce zenginleşme görülür. Cevher mikroskopisi çalışmalarında, oksitli minerallerin yanı sıra pirotin, pirit, kalkopirit, galen, sfalerit, arsenopirit ve fahlerz gibi sülfürlü mineraller belirlenmiştir. Toprak jeokimyası analizlerinde maksimum 1000 ppb Au, 13 ppm Ag, 400 ppm Sb, >1000 ppm As ve 4350 ppm Zn elde edilmiştir.

Alterasyon Zonları ve Akışkan Evrimi

Mayıslar sahasındaki kuvars ve kalsit kristallerindeki sıvı kapanım çalışmaları, hidrotermal sistemin termal ve kimyasal evrimini ortaya koyar (Parlak ve Sayılı, 2004):

- Erken Evre (Kuars-I): 470°C-370°C arasında yüksek homojenleşme sıcaklıklarına ve %27 ile %41 arasında değişen çok yüksek NaCl eşdeğeri tuzluluklara sahiptir. Bu değerler, henüz seyreltilmemiş magmatik tuzlu suları yansıtır.
- Geç Evre (Kuars-II ve Kalsit): Sıcaklık 370°C ile 110°C arasına (genellikle 270°C ve altı) düşerken, tuzluluk oranları dramatik şekilde gerileyerek %7 NaCl eşdeğeri ve daha altındaki değerlere inmiştir.

Bu evrim, sıvıların seyreldiğini ve sistemin epitermal aralığa geçiş yaptığını, cevher minerallerinin bu geç evrede çökeldiğini ispatlamaktadır (Parlak ve Sayılı, 2004).

Magmatik Sülfid Yatakları ve Katmanlı İntrüzyonlar

Magmatik sistemlerin çok daha derin kökleri doğrudan magmatik sülfid yataklarını oluşturur (Naldrett, 2004). Bu yataklar hidrotermal çözeltilerden ziyade, silikat ergiyiklerinin fizikokimyasal reaksiyonları sonucu oluşan sülfid ergiyiklerinin (karışmaz faz/immiscibility) sıvı fazdan ayrışmasıyla meydana gelir (Naldrett, 2004).

Sülfid Karışmazlığı ve Magmatik Bölümleme

Magmatik sistemlerde cevher oluşumu mantodaki kısmi ergimeden (partial melting) başlar. Magma yeterince kükürt içeriyorsa (örneğin asimilasyonla dışarıdan kükürt alınmışsa), ana silikat magması içinde ağır bir sülfid sıvısı damlacıklar halinde ayrışır (Naldrett, 2004). Magmadaki Cu, Ni, Co ve Platin Grubu Elementleri (PGE), kalkofil eğilimleri nedeniyle silikat fazını terk edip bu sülfid damlacıklarına şiddetle partisyone olurlar (Naldrett, 2004). Magma/sülfid oranını ifade eden R-faktörü, bu yatakların tenörünü belirleyen en büyük etkidir.

Komatit ve Taşkın Bazalt İlintili Sistemler

- Komatit İlişkili Yataklar: Arkeen döneminde aşırı magnezyumlu komatit lavları yeryüzüne çıkmıştır. Batı Avustralya'da Kambalda, Mt Clifford ve Perseverance gibi dünyanın en zengin nikel yatakları bu volkanik lav sistemlerinde yer alır (Naldrett, 2004). Lav akıntıları içindeki ince taneli olivin ortokümülatlarda gözlenen yarı-küresel sülfid damlacıkları, volkanik kaynaktaki sıvı karışmazlığının en somut kanıtıdır.
- Taşkın Bazalt İlişkili Yataklar (Noril'sk Örneği): Rusya Sibiryası'daki Noril'sk-Talnakh yatağı, kıtasal riftleşme

alanlarında devasa taşkın bazalt volkanizmasının beslenme kanallarında oluşmuştur (Naldrett, 2004). Magmanın yeraltı evaporit tabakalarını asimile ederek dışarıdan yüklü miktarda ağır kükürt ($\delta^{34}\text{S}$) alması sonucu devasa masif Ni-Cu-PGE sülfid kütleleri oluşmuştur.

Volcano-Sedimanter ve Ekshalatif Yataklar

Hidrotermal ve volkanik faaliyetlerin yüzeye veya gölsel (laküstrin) havzalara deşarj olması, volkano-sedimanter maden yataklarının oluşumunu sağlar.

Borat Yatakları: Kırka Örneği

Türkiye'nin dünya rezervlerinde birinci sırada yer aldığı borat yatakları, Neojen dönemindeki yoğun kıtasal volkanik faaliyetlerle genetik ilişkilidir. Eskişehir-Seyitgazi bölgesindeki Sarıkaya (Kırka) borat yatakları, Neojen yaşlı gölsel-volkanik fasiyesli tortullar içinde bulunur.

Miyosen havzalarında fay çatlaklarından yükselen borik asit ve sodyum içeren sıcak volkanik gazlar ve sıvılar (ekshalasyonlar), doğrudan sığ göl havzalarına karışmıştır. Bu mineralce zengin akışkanlar, volkanik çamur ve küllerle birleşerek kurak iklim şartlarında buharlaşmış; boraks, uleksit ve inyoit gibi minerallerin tabana primer (birincil) olarak çökmesini sağlamıştır. Gömülme ile artan sıcaklık ve basınç altında, primer boratlardan kolemanit, meyerhoferit ve tunelit gibi sekonder (ikincil) borat mineralleri rekristalize olmuştur.

Sonuç

Volkanik kayalara bağlı maden yatakları, magmanın doğuşundan itibaren sahip olduğu uçucu içeriğine (H₂O, CO₂, Cl, F, S), yükselim hızına ve yerleştii tektonik çevrenin (okyanus tabanı, kıtasal rift, kıta içi sığ derinlik, göl havzası) fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre son derece heterojen ve çok boyutlu yapılar sunar.

Doğu Karadeniz (Murgul, Lahanos) ve Orta Karadeniz'de (Küre) okyanus tabanında püsküren volkanizmalar, termal motor işlevi görerek devasa hidrotermal konveksiyon hücreleri yaratır ve büyük ölçekli VMS yataklarını oluşturur. İzotop verileri ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$, δD), bu sistemlerin modifiye deniz suyunu kullandığını kanıtlar. Diğer taraftan, Karadere, Mayıslar ve Kaymaz örneklerinde görüldüğü üzere kıtasal alanlardaki Eosen-Miyosen magmatizması, sığ derinliklerde meteorik suların kaynamasıyla (boiling) pH-sıcaklık değişimleri yaratarak epitermal polimetallik altın/gümüş damar cevherleşmelerine neden olur.

Sonuç olarak cevher yatakları; magmatik ısının, kabuksal sıvıların (deniz suyu, göl suyu, meteorik sular), termodinamik bariyerlerin (basınç düşüşü, kaynama) ve yapısal süreksizliklerin muazzam bir eşgüdüm içinde çalıştığı entegre yeryüzü mekanizmalarının nihai ürünüdür.

Kaynaklar

Akbulut, M. (2020). Murgul ve Lahanos Volkanojenik Masif Sulfid (VMS) Cevherleşmelerinin Cevher Mineralojisi (KD Türkiye): Doğu Pontidlerin zıt uçlarında yer alan iki cevherleşmenin karşılaştırması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 22(64), 117-136.

Akbulut, M., Oyman, T., Çiçek, M., Selby, D., Özgenç, İ., ve Tokçae, M. (2016). Petrography, mineral chemistry, fluid inclusion microthermometry and Re–Os geochronology of the Küre volcanogenic massive sulfide deposit (Central Pontides, Northern Turkey). Ore Geology Reviews, 76, 1-18.

Barrie, C. T., ve Hannington, M. D. (1999). Classification of volcanic-associated massive sulfide deposits based on host-rock composition. Reviews in Economic Geology, 8, 1-11.

Boudreau, A. (2019). Hydromagmatic Processes and Platinum-Group Element Deposits in Layered Intrusions. Cambridge University Press.

Galley, A. G., Hannington, M. D., ve Jonasson, I. R. (2007). Volcanogenic massive sulphide deposits. Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods, 5, 141-161.

Gültekin, A. H., ve Örgün, Y. (1993). Magmatik Süreçlerde Altının Davranışı. Bilimsel Madencilik Dergisi, 32(1), 25-35.

Gümü, A. (1974). Metalik Maden Yatakları (Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayın No: 4). KTÜ Yer Bilimleri Fakültesi.

Günay, K., ve Çavdar, B. (2024). Orta Karadeniz masif sulfid yataklarının tektonomagmatik oluşum ortamları. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 37, 1-10.

Hedenquist, J. W., ve Lowenstern, J. B. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370(6490), 519-527.

Naldrett, A. J. (2004). *Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration*. Springer.

Parlak, B., ve Sayılı, İ. S. (2004). Mayıslar Sahası (Sarıcakaya-Eskişehir) Polimetal Cevherleşmeleri Alterasyon Zonları İçindeki Kuvars ve Kalsitlerde Sıvı Kapanım Verileri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 47(2), 111-123.

