

YER BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ÜZERİNE ÇEŞİTLİ ÇALIŞMALAR

Editör
MUZAFFER ÖZBURAN



BİDGE Yayınları

**YER BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ÜZERİNE ÇEŞİTLİ
ÇALIŞMALAR**

Editör: MUZAFFER ÖZBURAN

ISBN: 978-625-372-766-6

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 26.06.2025

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



ÖNSÖZ

Yerbilimleri disiplini, teknolojik gelişmelerin ve bilimsel merakın etkisiyle her geçen gün daha fazla çeşitlenmekte ve derinleşmektedir. Bu kitap, jeoloji ve mühendisliğin kesişiminde yer alan dört farklı konuyu bir araya getirerek hem geleneksel hem de çağdaş yaklaşımların sentezini sunmayı hedeflemektedir. Amaç, yalnızca belirli alanlarda bilgi sunmak değil; aynı zamanda bu disiplinler arası geçişkenliği gözler önüne sermek ve araştırmacılara bütüncül bir bakış açısı kazandırmaktır.

Kitabın ilk bölümü, madencilik sektörünün karşı karşıya kaldığı en kritik çevresel sorunlardan biri olan kömürün kendiliğinden yanması olgusunu ele almaktadır. Uzaktan algılama teknolojilerinin bu zorlu süreçte sunduğu çözüm olanakları, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarıyla birlikte değerlendirilerek, modern izleme tekniklerine dair kapsamlı bir perspektif sunulmaktadır.

İkinci bölümde, heyelanlar gibi yıkıcı yer şekli değişimlerinin nedenleri ve izleme yöntemleri detaylandırılmaktadır. Uzaktan algılama sistemlerinin (özellikle SAR ve LiDAR gibi aktif sensörlerin) bu alandaki rolü, afet yönetimi ve erken uyarı sistemleri bağlamında değerlendirilmektedir. Böylece, doğal afetlerin anlaşılması ve yönetilmesine yönelik teknolojik katkılar irdelenmektedir.

Üçüncü ve dördüncü bölümler, magmatik kayaların alterasyon süreçleri ve ofiyolitlerle ilişkili lisvenit oluşumlarına odaklanmaktadır. Mafik ve ultramafik kayalarda görülen alterasyon tipleri hem petrografik hem de jeokimyasal açıdan incelenirken; lisvenit oluşumuna dair bölgesel örnekler ve bu oluşumların ekonomik potansiyeli tartışılmaktadır. Bu bölümler, hem akademik araştırmalar hem de maden kaynaklarının değerlendirilmesine yönelik uygulamalı çalışmalar açısından önemli veriler sunmaktadır.

Bu eser, uzaktan algılama tekniklerinden jeokimyasal analizlere, afet izleme yöntemlerinden ekonomik maden oluşumlarına kadar uzanan

geniş yelpazesiiyle lisansüstü öğrenciler, akademisyenler ve sektördeki uzmanlar için faydalı bir kaynak olmayı hedeflemektedir. Kitabın oluşmasında katkı sunan tüm yazarlarımıza içtenlikle teşekkür eder; bu çalışmanın yer bilimlerine gönül veren herkese ilham verici bir yol gösterici olmasını dilerim.

DOÇ. DR. MUZAFFER ÖZBURAN

KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ

İçindekiler

KÖMÜR YANGINLARININ TESPİTİ VE İZLENMESİNDE UZAKTAN ALGILAMA YÖNTEMLERİNİN ROLÜ	6
RECEP UĞUR ACAR	6
ÖZER ÖREN	6
HEYELANLAR ve UZAKTAN ALGILAMA UYGULAMALARI	49
ALİ SAMET ÖNGEN	49
RECEP UĞUR ACAR	49
MAFİK VE ULTRAMAFİK KAYAÇLARDA ALTERASYON SÜREÇLERİ: PETROGRAFİ, JEOKİMYA VE JEODİNAMİK ANLAM	81
TİJEN ÜNER	81
İREM AKSOY	81
LİSVENİT OLUŞUMU VE EKONOMİK POTANSİYELİ	105
İREM AKSOY	105
TİJEN ÜNER	105

KÖMÜR YANGINLARININ TESPİTİ VE İZLENMESİNDE UZAKTAN ALGILAMA YÖNTEMLERİNİN ROLÜ

**RECEP UĞUR ACAR¹
ÖZER ÖREN²**

Giriş

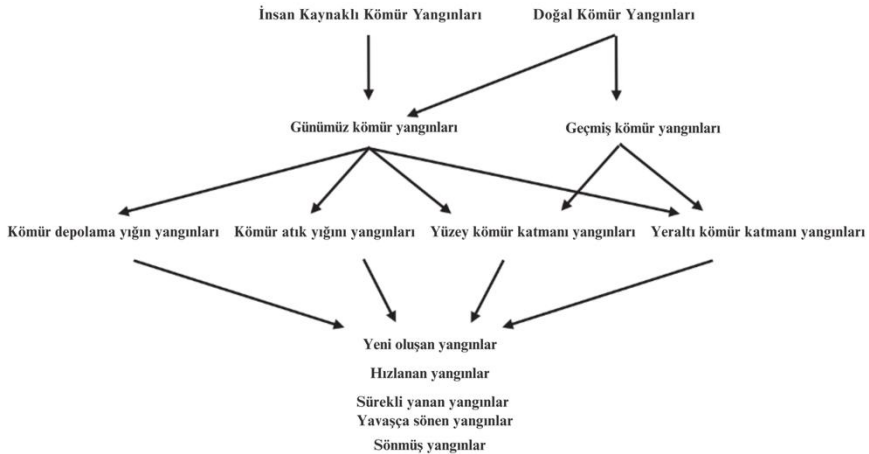
Dünya genelinde kömüre dayalı enerji teknolojilerinin yoğun bir şekilde kullanılması ve özellikle son yıllarda dünyanın en önemli gündem maddesi haline gelmiş olan küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi konuların merkezini oluşturması, sera gazı yayılımı, iş sağlığı ve güvenliği konusundaki bilincin gün geçtikçe artması gibi nedenlerden dolayı kömürün kendiliğinden yanması konusu halen araştırmacıların yoğun ilgisi ile karşı karşıyadır. Kendiliğinden yanma özellikle madencilik alanında can ve mal kaybına sebebiyet vermesinin yanında sera gazı emisyonu ile tehlikeli eser elementler gibi çevresel felaketlere neden olan bir doğa olayıdır (Carras J. N. et al., 2009). Kömür stokları da dahil olmak üzere termal güç istasyonlarında uzun süreli depolamalarda, açık işletmelerde,

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

² Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-4629-1718

yeraltındaki eski üretim bölgelerinde, döküm sahalarında ve hatta uzun mesafeli kargo gemisi ya da tren gibi nakliye koşullarında dahi bu sorun ile karşılaşılabilir (Arısoy, Beemish & Çetegen, 2006; Fierro et al., 1999; Pone et al., 2007). Kömür, havanın oksijeni ile teması geçtiğinde okside olmakta ve bu oksitlenme sonucu ısıveren bir reaksiyon oluşmaktadır. Eğer reaksiyon sonucu açığa çıkan ısı, bulunan ortamdan uzaklaştırılabilirse bu durum “düşük sıcaklık oksidasyonu” olarak adlandırılmaktadır. Fakat ısı dağıtılamaz ya da uzaklaştırılmazsa “self-heating” adı verilen aşama gerçekleşmektedir (Pis et al., 1996). Bu aşamada ortam ısısı giderek yükselmekte ve buna paralel olarak da kömürün sıcaklığı artmaya devam etmektedir. Kömürün eşik değerinin aşılmasıyla da kendiliğinden yanma olayı ortaya çıkmaktadır (Zhu et al., 2013). Genel olarak bakıldığında, ocak yangınları kişisel hatalar dışında kömürün kendi doğal mekanizması ve kendiliğinden yanma prosesinin sonucunda oluşan tutuşma ile ortaya çıkmaktadır. Şekil 1’de kömür ocaklarında meydana gelen yangınların sınıflaması gösterilmiştir (Kuenzer & Stracher, 2012).

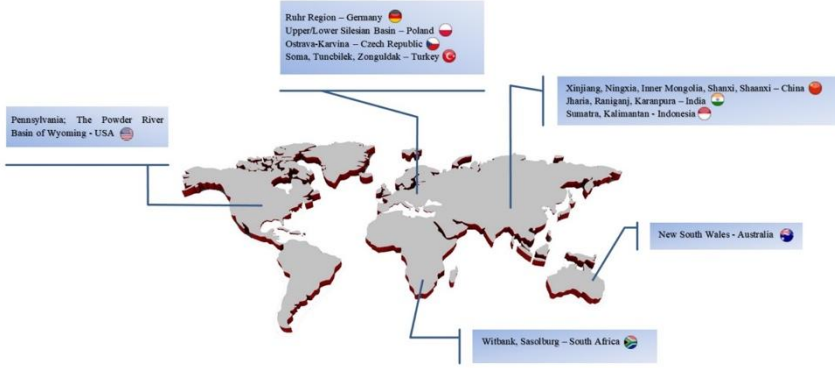
Şekil 1 Kömür yangınlarının oluşum, yaş, konum ve yanma evresine göre sınıflandırılması



Kendiliğinden yanma kaynaklı ocak yangınları; özellikle Çin, Amerika, Hindistan, Avustralya ve Almanya gibi kömür üreticisi ülkelerde başlıca sorun olarak göze çarpmaktadır (Muduli, Jana, & Mishra, 2018). Dünya üzerinde kendiliğinden yanma kaynaklı birçok yangın vakası envantere girmiştir. Polonya’da 1947-1966 yılları arasında kömür ocaklarında meydana gelen yangınların %80’i kendiliğinden yanma sonucu gerçekleşmiştir (Wachowicz, 2008). Çin’deki maden ocaklarında gaz emisyonlarının %40-60’ı ile yeraltı yangınlarının %60’tan fazlası kendiliğinden yanma sonucunda oluşmaktadır (Xia et al., 2016). Çin’de bulunan kömür madenlerinin %56’sının kendiliğinden yanma riski taşıdığı ifade edilirken, bu yangınlar neticesinde her yıl 20 milyon ton kömür yok olmaktadır (Kong et al., 2017). Aynı şekilde Almanya’nın Ruhr havzasında yılda 10’dan fazla yangının kendiliğinden yanma kaynaklı çıktığı belirtilmiştir (R. V. K. Singh, 2013). Hindistan’daki kömür yangınlarının ana merkezleri olan Jharia, Raniganj, Karanpura, Bokaro, Ib-valley, Talcher, Chirimiri, Singrauli and Singareni gibi kömür sahalarından özellikle Jharia ve Raniganj bölgesindeki yangınların yaklaşık olarak %70’inin kendiliğinden yanma merkezli olduğu rapor edilmiştir (Mohalik, Lester, Lowndes, & Singh, 2016)(Nimaje & Tripathy, 2016). Avustralya’da sadece New South Wales bölgesinde 1960-1991 yılları arasında 125 kendiliğinden yanma olayı meydana gelmiştir (L. Wang et al., 2015). 1970-1990 arası dönemde Güney Afrika’da rapor edilen 254 yangının üçte birinin kendiliğinden yanmadan kaynaklandığı öne sürülmüştür (Liang, Zhang, Ren, Wang, & Song, 2017). Özellikle Witbank ve Sasolburg kömür sahalarının kendiliğinden yanmaya yatkın oldukları dile getirilmiştir (Pone et al., 2007), (Onifade & Genc, 2018). Azalan kömür madencilik faaliyetlerine rağmen Çek Cumhuriyeti’nin Ostrava-Karvina kömür maden sahasında 1995-2002 yılları arasındaki periyotlarda kendiliğinden yanma sonucu oluşan 105, 2004-2006 arasında ise 54 olay kayıtlara geçmiştir

(Taraba & Michalec, 2011) (Taraba et al., 2014). Dünyanın en büyük kömür üreticilerinden biri olan Amerika’da, 1990-1999 yıllarında açık işletme, yeraltı ve kömür hazırlama tesislerinde kendiliğinden yanma sonucu toplam 71 yangın meydana gelmiştir. Bu değer o yıllar arasında meydana gelen tüm ocak yangınlarının %16’sını oluşturmaktadır (De Rosa, 1999). Endonezya’da 1997 yılında turba depolarında gerçekleşen kendiliğinden yanma olayı, geniş ölçekte orman yangınlarına sebebiyet vermiştir (Nugroho, McIntosh, & Gibbs, 1998). Son dönemlerde yaşanmış olan en trajik maden kazalarından biri Türkiye’nin Soma ilçesinde 13 Mayıs 2014 yılında meydana gelmiştir. Bu feci maden kazası, maden ocağının ana girişine 2000 m mesafede olan ve 270 m derinlikteki eski bir üretim panosunda kendiliğinden yanma sonucu çıkan bir yangından kaynaklanmıştır. Bu yangın daha sonra yeni üretim panolarındaki bant konveyör, ağaç tahkimat ve elektrik kablolarına sıçramış, ocak havalandırmasına karışan duman ve zehirli gazlar neticesinde 301 madenci hayatını kaybetmiştir (Spada & Burgherr, 2016). Yıllık 35000 ton katı akıt depolayan İsveç’te (W Hogland, Bramryd, & Persson, 1996); 1988-1989 yılları arasında 217 kendiliğinden yanma kaynaklı yangın rapor edilmiştir (William Hogland & Marques, 2003). Dünya genelinde kendiliğinden yanma problemi ile karşılaşmış belli başlı ülkeler ve bu ülkelere ait yanma bölgeleri Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2 Dünya genelindeki önemli kendiliğinden yanma bölgeleri



Madencilik sektöründe kendiliğinden yanma sonucu ortaya çıkan olumsuz etkiler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ham & Ham, 2005);

- Patlama sonrası travma ve CO zehirlenmesi nedeniyle ölümler,
- Afetten sağ kurtulanlarda zihinsel bozukluklar,
- Maden kapanmaları,
- Ekipman kaybı,
- Üretim kaybı,
- İtibar ve pazar konumu kaybı,
- Yönetimin dikkatinin dağılmasının maliyetleri,
- İyileştirme ve kurtarma önlemlerinin maliyetleri,
- Topluluklardaki aksaklıkların maliyeti,
- Önleyici tedbirlerin maliyetleri,
- İzleme sistemlerinin maliyetleri,

- Kendiliğinden yanma yönetim sistemi geliştirme maliyetleri ve
- İlgili eğitim maliyetleri.

Geçmişten günümüze kadar maddi ve manevi kayıplara yol açan, çok sayıda insanın ölümüne sebep olan kendiliğinden yanma olayının ve kömür oksidasyonunun nedenlerinin kesin bir şekilde ortaya konulması, yanma mekanizmasının aydınlatılması ve kendiliğinden yanmanın doğabilecek her türlü olumsuz sonucunun iyi bir şekilde kestirilerek gerekli önlem ve tedbirlerin alınması hayati önem taşımaktadır.

Kömürün kendiliğinden yanması süreçlerinin tespitinde geleneksel yöntemlerin çeşitli ekonomik, coğrafi ve teknik sınırlamaları bulunmaktadır. Geleneksel tespit yöntemleri arasında yerinde ölçümler, sondaj çalışmaları, gaz analizi ve termal sensörlerin doğrudan kullanımı gibi teknikler yer almakta olup, bu yöntemlerin uygulanabilirliği birçok faktöre bağlı olarak kısıtlanabilmektedir.

Öncelikle, geleneksel yöntemlerin ekonomik sınırlamaları göz önünde bulundurulduğunda, bu tekniklerin uygulanması için yüksek maliyetli ekipman ve iş gücü gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Yerinde ölçüm yöntemleri için saha ekiplerinin düzenli olarak bölgeye gitmesi gerekliliği, yakıt, işçilik ve ekipman bakım maliyetlerini artırmaktadır. Bunun yanı sıra, kömür damarlarının derinliği ve genişliği nedeniyle sondaj çalışmaları oldukça pahalı olup, özellikle büyük ölçekli maden alanlarında çok sayıda sondaj noktası gerekmektedir. Ayrıca, gaz analizi ve termal ölçümler için özel ekipmanların edinilmesi, kalibrasyonu ve düzenli bakımı ek maliyetler doğurmaktadır.

Ekonomik faktörlerin yanı sıra, arazi koşulları da geleneksel tespit yöntemlerinin etkinliğini sınırlandıran önemli etmenlerdendir.

Kömür sahaları zaman zaman dağlık, engebeli veya yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda bulunabildiğinden bu lokasyonlara ulaşım ve ölçüm süreçleri verimsiz olabilmektedir. Ayrıca, eski veya terk edilmiş maden sahalarında çökme riski, zehirli gaz birikimi ve yüksek sıcaklık gibi güvenlik riskleri mevcuttur. Bununla birlikte, yoğun yağış, kar ve aşırı sıcaklık gibi olumsuz hava koşulları da ölçümlerin yapılması konusunda kısıtlayıcı etki sahibi olabilmektedir.

Ayrıca geniş araziler içerisinde yayılım gösterebilen kömür oluşumları da geleneksel yöntemlerin etkinliğini sınırlayan bir diğer önemli faktördür. Büyük ölçekli kömür sahalarında sıcak noktaların tespit edilmesi için yüzlerce ölçüm noktası belirlenmesi gerekmekte olup, bu durum saha çalışmalarının maliyetini ve süresini önemli ölçüde artırmaktadır.

İfade edilen bu gibi sınırlamalar değerlendirildiğinde geleneksel yöntemler dışında, günümüzde insansız hava araçları (İHA) ve uydu görüntüleme sistemleri gibi yeni teknolojiler aracılığı ile gelişen uzaktan algılama yöntemleri de kömür yangınlarının tespitinde verimli ve kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır.

Kömür yangınlarının yüzeyde oluşturduğu termal ve spektral değişimler, uzaktan algılama teknolojilerinin bu alandaki potansiyelini ortaya koymaktadır. Özellikle VNIR (Görünür-Yakın Kızılötesi) ve SWIR (Kısa Dalga Kızılötesi) bant aralıkları sayesinde, yanma nedeniyle oluşan yüzey renk değişimleri, küleşme etkileri ve nem oranındaki farklılıklar tespit edilebilmektedir. Bu bantlar, bitki örtüsü sağlığı ve yüzey malzeme ayrımı gibi dolaylı göstergeler üzerinden yangın etkilerinin izlenmesine imkân sunar. Ancak kömür yangınlarının en belirgin ve doğrudan belirtisi, yer altındaki oksidasyon süreçlerinden kaynaklanan ısı salımıdır. Bu nedenle, bu çalışmada özellikle termal kızılötesi (TIR) sensörlerin sunduğu veriler ve bu verilerin yangınların erken tespiti ve

izlenmesindeki rolü üzerinde durulacaktır. Termal sensörler, yer altındaki sıcaklık anomalilerini haritalandırarak görünür yüzeyde herhangi bir belirti ortaya çıkmadan önce bile yangın potansiyelini belirlemeye olanak tanımaktadır.

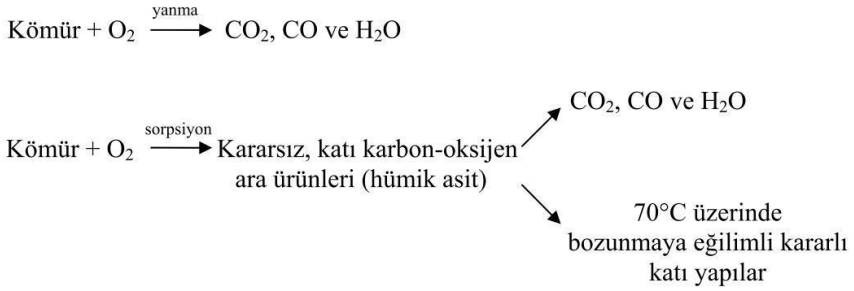
Bu çalışma da uzun yıllardır arazi ve laboratuvar çalışmaları gibi geleneksel yöntemlere ek olarak kullanılan uzaktan algılamanın kömür yangınlarının tespiti amacı ile kullanımı avantaj ve dezavantajları incelenecektir.

Kömürlerde Kendiliğinden Yanma Mekanizması

Kömürlerin kendiliğinden yanma mekanizmaları üzerinde 17. yüzyıldan beri çalışmalar yapılmaktadır. Bu olayı açıklamak üzerine birbirinden farklı teoriler geliştirilmiştir. Bu teorilerden bazıları; pirit teorisi, bakteri teorisi, fenil reaksiyonu, serbest radikal reaksiyonu, hidrojen reaksiyonu, aktivasyon grup reaksiyonu ve kömür – oksijen etkileşimi teorisidir. Bu teoriler arasında araştırmacılar tarafından en çok kabul gören yaklaşım kömür – oksijen etkileşimi teorisidir (QI, WANG, ZHONG, GU, & XU, 2010). Bu teoriye göre kömür ve oksijen arasında gelişen reaksiyonlar “direct yanma” ve “kemisorpsiyon” olmak üzere 2 ana aşamada gerçekleşmektedir. “Direct yanma” adı verilen bu aşamada; kömür oksijen arasında gerçekleşen reaksiyon neticesinde CO, CO₂ ve H₂O gibi oksidasyon ürünleri açığa çıkmaktadır (Carras & Young, 1994); (Haihui Wang, Dlugogorski, & Kennedy, 2003b). “Kemisorpsiyon” aşaması ise; birbirini izleyen 4 alt aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar şu şekilde özetlenebilir: 1) oksijenin fiziksel adsorpsiyonu, sıcaklıkta artış; 2) kimyasal adsorpsiyon (50°C üzeri), oksijenetik hidrokarbonların ya da peroksi bileşiklerin üretimi; 3) altere olmamış kömürün eş zamanlı oksidasyonu ile birlikte kendiliğinden yanma sıcaklığına ulaşıldığında (70°C üzeri) oksijenetik hidrokarbonların bozulması ve 4) tipik olarak tutuşma eşiği olarak tanımlanan 150°C’den yüksek sıcaklıklara neden olması

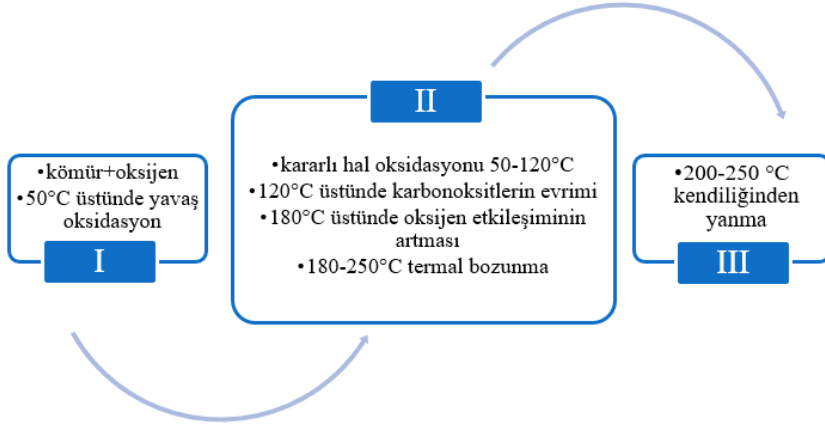
durumunda kendiliğinden yanma adı verilen olayın ortaya çıkması (Gürdal et al., 2015). Bu eşik değeri kömür rankına bağlı olarak 130 °C dolaylarında bir sıcaklık değerine sahip olabildiği gibi rank azaldıkça bu değerin de düştüğü gözlemlenmektedir. Özellikle 60-80 °C sıcaklıklar kritik değerler olarak kabul görmektedir (Wang et al., 2015). Şekil 3'te kömür oksidasyonunda gerçekleşen genel reaksiyon aşamaları görülmektedir (Wang, Dlugogorski, & Kennedy, 2003).

Şekil 3 Kömür oksidasyonunda gerçekleşen reaksiyon aşamaları



Kömür oksidasyonunun ilk aşaması kömür yüzeyindeki aktif bölgelerdeki oksijenin kimyasal olarak tutunması (kemisorpsiyon) ile meydana gelmektedir. 40°C'nin altında gerçekleşen bu reaksiyon aşamasında kömür ve oksijen molekülleri arasındaki etkileşim kömür gözenekleri içindeki oksijenin fiziksel adsorpsiyonundan kaynaklanmaktadır (Nelson & Chen, 2007). Şekil 4'te sıcaklığa bağlı olarak kömür oksidasyonunda meydana gelen değişim aşamaları gösterilmektedir (Nalbandian, 2010).

Şekil 4 Kendiliğinden yanmada reaksiyon fazları



Kömür ve oksijen molekülleri arasındaki reaksiyon dizileri sürecin genelinde endotermik bir nitelik gösterse de, düşük sıcaklıklarda ekzotermik karakterdedir (Shi, Wang, Deng, & Wen, 2005). Bu reaksiyon aşamaları neticesinde farklı özelliklere sahip karbon – oksijen bileşikleri oluşmaktadır. Bu bileşikler “kararsız”, “kararlı” ve “reaktif olmayan” olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir. Peroksijen, hidroperoksit ve hidroksil türleri kararsız bileşikler oluştururken; kararlı bileşikler karbonil ya da karboksil içeren türler temsil etmektedir. Reaktif olmayan bileşikler ya da diğer adı ile hümitik asitler; anhidritler, eterler ya da esterler olarak tanımlanmaktadır. Sonraki aşamalarda bahsedilen kararsız oksijenli bileşikler ayrışarak gaz ürünlerine ve kararlı bileşiklere dönüşmektedir. Kararlı bileşiklerin de bozulmasıyla birlikte oksidasyon için yeni aktif bölgeler oluşmaktadır (Wang, Dlugogorski, & Kennedy, 2003).

Kendiliğinden Yanmayı Etkileyen Faktörler

Kömürlerin kendiliğinden yanmasını etkileyen sayısız faktör bulunmakla beraber genel sınıflamada bu faktörler iç ve dış faktörler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Tablo 1). İç faktörler çoğunlukla

kömür ve kömür damarının fiziksel ve jeolojik özelliklerini içerirken dış faktörler ise kömürün üretim yöntemi ve atmosferik koşullarından oluşmaktadır (Güney, 1968).

Tablo 1 Kendiliğinden yanmayı etkileyen faktörler

İç (endojen) faktörler		Dış (ekzojen) faktörler	
Kömür özellikleri	Jeolojik özellikler	Atmosferik koşullar	Madencilik ile ilgili faktörler
Kömürleşme derecesi	Damar kalınlığı	Sıcaklık	Üretim yöntemi
Petrografik yapı	Damar eğimi	Nem	İlerleme hızı
Nem içeriği	Göçme özelliği	Oksijen derişimi	Topuk koşulları
Mineral madde içeriği	Fay ve arızalar		Tavan koşulları
Tane boyutu	Derinlik		Taban yolu koşulları
Pirit içeriği	Jeotermik gradyan		Hava kaçakları
Fiziksel özellikler			Kömür kayıpları
Bakteriler			Çalışılmış sahalar
			Dolgu
			Havalandırma basıncı
			Hava nemliliği

İç faktörler

Kömürleşme derecesi

Yapısı itibari ile heterojen bir malzeme olan kömürün fiziksel ve teknolojik özellikleri kömür oksidasyonunda farklı etkiler yaratabilmektedir. Kömür sınıflamasında sıklıkla kullanılan kömürleşme derecesi kendiliğinden yanmada belirleyici bir özelliktir. Özellikle düşük ranklı kömürler daha fazla nem, reaktif

oksijen ve uçucu maddeye sahip olduklarından dolayı kendiliğinden yanma açısından riskli bir yapıya sahiptir (Ramlu, 1991).

Pirit varlığı

Kömür içerisindeki pirit (FeS_2) konsantrasyonu %2 'den fazla olması durumunda kendiliğinden yanma riski artar. Kömür bünyesindeki pirit oksidasyon sonucu şişer ve bu şişme sonucunda oluşan iç kırıklanmalar neticesinde kömür yüzeyinde oksidasyon için yeni reaktif yüzeyler meydana gelir. Piritin ısıl iletkenliği kömüre oranla 3 kat daha fazladır. Bundan dolayı oksidasyon sonucu açığa çıkan ısı kömürün bünye sıcaklığının daha hızlı artmasına neden olur (Durucan & Güyagüler 1985).

Tane boyutu

Kömür oksidasyonu ve bunun sonucunda meydana gelen kendiliğinden yanma prosesi genel olarak düşünüldüğünde kömürün yüzeyinde ve gözeneklerinde gerçekleşen bir olaydır. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda; kömürün tane boyutunun küçülmesi sonucu yüzey alanının arttığı ve oksijen ile temas edecek ek yüzeylerin oluşmasına fırsat vermesinden dolayı kendiliğinden yanmayı arttırıcı rol üstlendiği ifade edilmiştir (Akgün & Arısoy, 1994; Ren, Edwards, & Clarke, 1999).

Kömürün petrografik özellikleri

Yapısı itibariyle heterojen bir madde olan kömürde, metamorfizma sonucu farklı yapıda oluşumlar meydana gelmektedir. Oluşan bu bant görünümündeki yapılara litotip, litotipleri oluşturan ve sadece mikroskopik yollarla görülebilen mikro ölçekteki yapılara ise maseral adı verilmektedir. Kömürlerin kendiliğinden yanma yatkınlıkları içerdikleri vitren düren klaren füsün içeriğine göre değişir. Vitren içeriği yüksek kömürler kendiliğinden yanmaya daha yatkındır. Yapılan araştırmalarda vitrinitin kömürün rankından bağımsız olarak kendiliğinden yanma

açısından en reaktif maseral olduğu ifade edilmiştir (Barış, Kızgut, & Didari, 2012).

Uçucu madde içeriği

Kömürde artan uçucu madde miktarı oksidasyon oranının artmasına neden olur. Yapılan çalışmalarda 38 uçucu maddeye sahip kömürler 18 uçuculu kömürlere göre 3 kat daha hızlı oksitlendiği tespit edilmiştir (Schmidt & Elder, 1940).

Nem içeriği

Kömürdeki nem içeriğinin oksidasyona ve kendiliğinden yanmaya etkileri üzerinde farklı görüşler ileri sürülmektedir. Genel olarak araştırmacılar tarafından kömürün oksijen tüketiminin maksimum olduğu değer için kritik bir nem aralık değerinin var olduğu; bu nem aralığının aşağısında ya da yukarısında olan kömürler için oksijen tüketim oranlarının azaldığı ifade edilmiştir (Wang, Dlugogorski, & Kennedy, 2003). Bu teoriye karşı çıkan ve söz konusu testlerin altere olmuş kömürler üzerinde gerçekleştiğini iddia eden çalışmalarda bulunmaktadır (Beamish & Hamilton, 2005). Yohe (1958), kömürdeki nem içeriğinin oksidasyona herhangi bir etkisinin bulunmadığını ve esas olarak kömürleşme derecesinin kendiliğinden yanma üzerinde belirleyici olduğunu ifade etmiştir (Yohe, 1958).

Dış faktörler

Kömürlerin oksidasyonunda ve buna bağlı olarak meydana gelen kendiliğinden yanma davranışında sadece kömürün bünye özellikleri etkili olmamaktadır. Kömür oksidasyonu, kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri ile birlikte atmosferik koşullardan başlayan ve kömürün üretim yöntemine göre eşitlenebilen çok geniş yelpazeli ekzotermik bir reaksiyondur. Bu başlık altında kömürün içsel özellikleri haricinde oksidasyonda ve kendiliğinden yanmada etkili olan parametrelere değinilmeye çalışılacaktır.

Şüphesiz ki kömürün kendiliğinden yanmasında en önemli etkenlerden bir tanesi kömürün oluştuğu havza itibari ile gösterdiği jeolojik yapı değişikliğidir. Bazı durumlarda aynı kömür damarına mensup fakat farklı damar kalınlığındaki kömürler arasında dahi kendiliğinden yanma süreci farklı bir aşamada ilerleyebilmektedir. Genel olarak kömür damarının kalınlığı arttıkça kömürün ısı iletkenliği azalmakta ve kömürdeki ısı birikimi fazlalaşabilmektedir. Kalın kömür damarlarının kazısında sıkça uygulanan blok göçertmeli yöntemlerde, göçük kısmında üretilmeden terk edilmiş kırıklı yapıya sahip kömür parçaları kendiliğinden yanmaya zemin hazırlamaktadır (Gill & Browning, 1971; Mahadevan & Ramlu, 1985; Morris & Atkinson, 1986). Literatürde 5 m’den fazla kalınlığa sahip kömür yataklarının kendiliğinden yanmaya daha yatkın olduğu ifade edilmiştir (Banerjee, 1985). Rus araştırmacılar ise; 1,5 m’den daha az kalınlığa sahip damarlarda riskin az, 3 m’den fazla olan damarlarda ise kendiliğinden yanmaya yatkınlığın yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Karpuz et al., 2000).

Artan derinlikle birlikte kömürün kendiliğinden yanma riski de paralel şekilde artmaktadır. Derin ocaklarda kömür üzerine binen kaya basıncı, bırakılan topukların ve özellikle kazı anındaki kömür parçalarının kırılmasına ve çatlamasına yol açmaktadır. Bu kırık ve çatlaklar kömürün oksijen ile teması için serbest yüzeyler oluşturmaktadır (Kural, 1988). Bunun dışında derinliğin artması sonucunda jeotermal gradyanın da buna bağlı olarak artacağı, bu artış neticesinde kömür ve çevre kayaçların ısisının fazlalaşacağı ve bunun da kendiliğinden yanma için uygun bir ortam hazırlayacağı literatürde belirtilmiştir (Didari, 1986). Genel olarak, 30-100 °C arasındaki sıcaklıklarda her 10 °C’lik sıcaklık artışı neticesinde kömürün oksidasyon hızı ortalama 2,2 kat artmaktadır (Erkan, 1964).

Ocak içerisindeki atmosferik koşullar açısından incelendiğinde, kendiliğinden yanma üzerinde havadaki nem

miktarının etkisi de kendiliğinden yanmayı etkileyen parametreler arasında gösterilmektedir. Kömür yüzeyine etkiyen nemli havanın kuru havadan 2,5 kat daha fazla ısı ürettiği ifade edilmiştir [50]. Havadaki nemin kısmi basıncının yüksek olması durumunda kömür ve atmosferik hava arasında nem alışverişi olmakta ve yoğunlaşma sırasında açığa çıkan ısı kömürün sıcaklığının artmasına ve kendiliğinden yanma riskinin yükselmesine neden olabilmektedir(Kural, 1998). Ayrıca havadaki nemin %10-40 arasında olduğu koşulda oksijen moleküllerinin kömüre tutunma oranının en düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir (Küçük, Kadioğlu, & Gülaboğlu, 2003).

Kendiliğinden yanma sonuç olarak, kömürün hava ile temas etmesi neticesinde oluşan bir reaksiyondur. Bundan dolayı ocak içerisine gönderilen hava miktarı kendiliğinden yanma davranışı ve seyri açısından hayati bir öneme sahiptir. Rus araştırmacılar %17'den fazla oksijen derişimine sahip 0,1 – 0,9 m/dk akış oranındaki havalandırmanın riskli olduğunu ifade etmişlerdir [49]. Yuan ve Smith (2011) farklı havalandırma oranları (100 – 500 cm³/dk) için kömürden salınan CO ve CO₂ oranlarını belirlemişler ve artan hava miktarı ile birlikte Graham oranının da artış gösterdiğini farklı ortam sıcaklıkları için tespit etmişlerdir(Yuan & Smith, 2011). Havalandırma tipi de kendiliğinden yanmayı arttırıcı ya da azaltıcı bir etki olarak karşımıza çıkabilmektedir. Emici havalandırma özellikle göçük bölgesinde kalan kömürlere oksijenin ulaşmaması açısından üfleyici havalandırmaya göre daha avantajlıdır. Ocak içerisindeki hava miktarını ve dağılımını kontrol etmek amacı ile yapılan hava kapıları ve regülatörler yüksek basınç farklılıklarına yol açmakta ve bu basınç farkları sonucu oluşan hava kaçakları kendiliğinden yanmaya neden olabilmektedir (Didari, 1986).

Kendiliğinden yanma ile maden ocağında kullanılan üretim yöntemi arasında da belirli ilişkiler söz konusudur. Bu nedenle

maden ocağı üretime geçmeden kullanılacak yöntemin seçiminde kendiliğinden yanma tehlikesi göz önünde bulundurularak fizibilite yapılmalıdır. Genellikle ülkemiz kömür madenciliğinde sıkça kullanılan uzunayak yönteminin uygulanma biçimine göre kendiliğinden yanma farklı sonuçlar doğurabilmektedir. İlerletimli uzunayak yöntemi göçük arkasında kalan kömürlerin sürekli hava akımına maruz kalmasından dolayı geri dönüşlü yöntemle kıyasla kendiliğinden yanma açısından daha tehlikeli bir yöntemdir. Geri dönüşlü yöntemde taban yolları kömürün içerisinde olduğundan hava kaçacak herhangi bir yol bulamamakta ve böylece hava kaçakları minimuma indirgenebilmektedir. Topuklu yöntem uygulanan kömür ocaklarında ise, topukların tavan basıncına dayanamayarak kırık ve çatlaklar oluşturması kendiliğinden yanma için uygun zeminin oluşmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı fizibilite aşamasında bırakılacak topuk boyutları ve geometrisinin dikkatli bir çalışma yapılarak seçilmesi gerekir (Küçük et al., 2003; Kural, 1988; Yılmaz, 2002; Yuan & Smith, 2011).

Kendiliğinden Yanmanın Tespitinde Kullanılan Yöntemler

Geçmişten günümüze kadar madenciliğin her alanında ciddi kayıplara neden olmuş kendiliğinden yanma olayı; uzun yıllardır bilim adamları ve araştırmacılar tarafından farklı yöntem, metot ve ampirik yaklaşımlar ile tespit edilmeye çalışılmakta, kömür oksidasyonu prosesinin işleyişini anlamak ve doğurduğu sonuçları minimize etmek için gerek laboratuvar gerekse de saha şartları altında birçok uygulama yapılmaktadır. Kendiliğinden yanma yatkınlığını belirlemek için kullanılan yöntemler laboratuvar teknikleri ve pratik yöntemler olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Soytürk, 1992).

Laboratuvar teknikleri

Bu kategori altında yapılan çalışmalarda genel olarak, belirli bir debide hava kömür numunesinin okside olması için dizayn edilen

hücre ya da reaktör içerisine gönderilmekte ve sabit ya da artan sıcaklıklarda programlanmış ısıtma kabinlerinde kömür numunesinin sıcaklık değişimleri gözlenmektedir. Özellikle yöntem ve uygulamanın basit oluşu, ekonomik anlamda kullanışlı olması ve yapılan deneylerin kısa süreç içinde sonuç vermesi bu tekniklerin popülerliğini yıllar boyunca devam ettirmesine neden olmuştur. Ayrıca bu deney düzeneklerine eklenen gaz ölçüm cihazları ile birlikte yanma sırasında açığa çıkan gazlar online olarak takip edilebilmektedir. Bu yöntemlere izotermal ve adyabatik kalorimetre (Beamish & Hamilton, 2005; H Wang, 2002), dinamik oksidasyon yöntemi (Kaymakçı, 1998), pota ısıtma yöntemi (Bowes & Cameron, 1971), olupinski yöntemi (Zubíček, 2008), DTA, TGA ve DSC gibi termal analiz metotları (Garcia, Garcia, & Garcia, 1999; Kök, 2005; Pis et al., 1996) ile tutuşma sıcaklığı metodu (Ören, 2021) örnek olarak gösterilebilir.

Pratik yöntemler

Bu yöntemler daha önceden edinilmiş deneyimlere, çevre koşullarına ve yanma olaylarının sıklıklarına göre sınıflandırılırlar. Bu yöntemlerden en bilineni kuluçka periyodu sınıflamasıdır. Kuluçka periyodu, bir panoda kömürün kazılmaya başlamasından sonra ilk kızışma belirtilerinin gözlenmeye başladığı zamana dek geçen süre olarak tanımlanmaktadır (Yılmaz & Atalay, 1990). Düşük kaliteli kömürler için kuluçka periyodu 3 – 6 ay, yüksek kalitedeki kömürler için ise 9 – 18 ay arasındadır. Kuluçka periyoduna kömürlerin kendiliğinden yanma risk tablosu Tablo 2’de verilmiştir (Singh, Demirbilek, & Turney, 1984).

Tablo 2 Kuluçka periyoduna göre risk sınıflaması.

Kuluçka periyodu (ay)	Risk indeksi	Damar sınıflandırması
0 – 3	>40	çok yüksek riskli
3 – 9	20 – 40	Yüksek risk
9 – 18	10 – 20	Orta risk
> 18	1 – 10	Düşük risk

Bunun haricinde Olpinski tarafından S1’den S7’e kadar isimlendirilen yedi farklı temel madencilik parametresini [kömürün kendiliğinden ısınma hassasiyeti (Szb), gkte terk edilen kömür (S1), alışma metodu (S2), havalandırma metodu (S3), gkteki hava kaçakları (S4), kömür damarının nemi (S5), damarın derinliğı (S6), havalandırma yoğunluğı / derecesi (S7)] içeren indekste geliştirilmiştir. Bu indekse göre sistemdeki muhtemel yangın riski (Ps) Eşitlik 1 vasıtası ile hesaplanmakta ve “Ps” değıeri 120’den aşağı bir değıerde ise genel olarak sistemin kendiliğinden yanma riski olmadığı şeklinde yorum yapılmaktadır (Banerjee, 1985).

$$Ps=Szb+(S1+S2+S3+S4+S5+S6+S7) \quad (1)$$

Uzaktan Algılama ve Kömür Yangınlarında Kullanımı

Uzaktan algılama, fiziksel temas olmadan, elektromanyetik spektrumun belirli dalga boylarını kullanarak yeryüzü, atmosfer veya okyanuslardaki nesneler, olaylar veya süreçler hakkında veri toplama ve analiz etme bilimidir (Jong, Meer, & Clevers, 2004; Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015; Ray, 2013; Santosh & Sundaresan, 2014; Wright, Lillesand, & Kiefer, 1980). Bu yöntem, genellikle uydu ve hava platformlarındaki sensörler aracılığıyla veri toplayarak, doğıal ve beşer çevrenin izlenmesi, analizi ve haritalanması için kullanılır (Avtar et al., 2020; Chuvieco, 2020; Manfreda et al., 2018; Roy, Behera, & Srivastav, 2017; Toth & Jzkw, 2016). Uzaktan algılama, gelişen dünyada ortaya çıkan

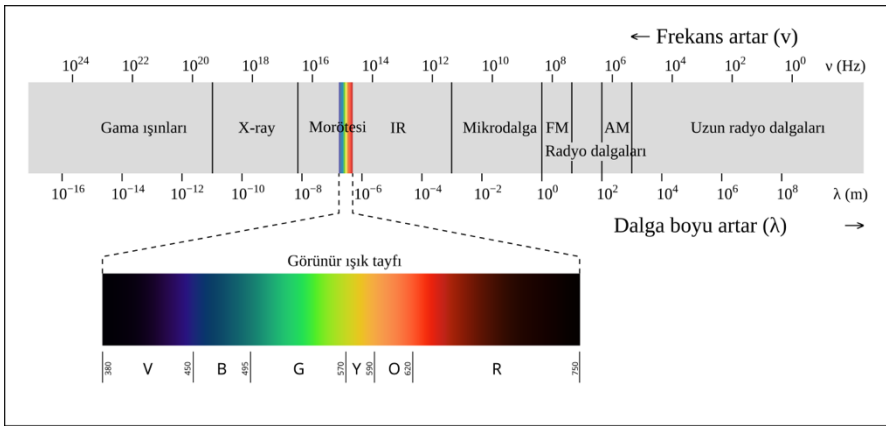
teknolojik ilerlemelere paralel olarak şekillenmiş ve bilimsel araştırmalarda önemli bir araç haline gelmiştir. İlk olarak 19. yüzyılın ortalarında, hava balonlarından çekilen fotoğraflarla başlayan uzaktan algılama çalışmaları, 20. yüzyılda uçaklardan yapılan hava fotoğrafçılığı ile gelişmiştir (Argyrou & Agapiou, 2022; Giardino, 2011; Soltani, 2011; Zalewski, 2004). İkinci Dünya Savaşı sırasında hava fotoğrafçılığı, askeri istihbarat için yoğun bir şekilde kullanılmış ve görüntü yorumlama teknikleri ilerlemiştir. 1957'de Sovyetler Birliği'nin Sputnik 1 uydusunu fırlatmasıyla uzay tabanlı uzaktan algılamanın temelleri atılmış, 1972'de ise NASA tarafından fırlatılan Landsat-1, yeryüzünü sistematik olarak görüntüleyen ilk uydu olmuştur (Chuvieco, 2020). 1980'lerden itibaren dijital görüntüleme sistemlerinin gelişmesiyle birlikte multispektral ve hiperspektral sensörler yaygınlaşmış, yüksek çözünürlüklü uydular uzaktan algılamada yeni bir dönemi başlatmıştır. Günümüzde radar, lidar ve termal görüntüleme gibi farklı algılama teknolojileri kullanılarak geniş bir yelpazede çevresel izleme, afet yönetimi ve doğal kaynakların takibi gibi alanlarda uzaktan algılama etkin bir şekilde uygulanmaktadır.

Bu yöntem temel olarak elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimi sonucu elde ettiği verileri inceler ve farklı dalga boylarında yayılan veya yansıyan radyasyonun sensörler tarafından algılanması ve analiz edilmesi prensibine dayanır. Elektromanyetik spektrumun görünür, kızılötesi ve mikrodalga bölgeleri, uzaktan algılama uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.

Elektromanyetik spektrum, gama ışınları gibi en kısa dalga boylarından radyo dalgaları gibi en uzun dalga boylarına kadar uzanan dalga boyuna göre farklı bölgelere ayrılır (Finkenthal et al., 1996; Sankaran & Ehsani, 2014; Vollmer, 2021). Her bölge, farklı fiziksel özellikler ve madde ile etkileşimler ile karakterize edilir. Spektrum, gama ışınlarını (0,01 nanometreden daha kısa dalga boylarına sahip), X ışınlarını (0,01–10 nanometre), ultraviyole (UV)

radyasyonu (10–400 nanometre), görünür ışığı (400–700 nanometre), kızılötesi radyasyonu (700 nanometre–1 milimetre), mikrodalgaları (1 milimetre–1 metre) ve radyo dalgalarını (1 metreden uzun) içerir. Kızılötesi bölge içinde, her biri uzaktan algılama, astronomi ve diğer bilimsel alanlarda belirli uygulamalara sahip olan yakın kızılötesi (NIR), kısa dalga kızılötesi (SWIR), orta dalga kızılötesi (MWIR) ve uzun dalga kızılötesi (LWIR) dahil olmak üzere daha fazla alt bölüm vardır.

Şekil 5 Elektromanyetik spektrumun basitleştirilmiş gösterimi



Kaynak: (Janga, Asamani, Sun, & Cristea, 2023)

Uzaktan algılama sistemleri bu bahsi geçen elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinden gelen enerjiye dayanarak veri toplamaktadır. Elektromanyetik spektrumun farklı dalga boylarında yayılan enerji, yüzey malzemeleriyle etkileşime girerek yansıma, emilim ve iletim gibi çeşitli süreçlere uğrar. Bu bağlamda, her yüzey malzemesinin farklı dalga boylarında kendine özgü bir yansıtma davranışı sergilediği gözlemlenir. Spektral yansıtma özellikleri olarak adlandırılan bu davranış, her malzemenin belirli dalga boylarında ne kadar ışınım yansıttığını veya emdiğini gösteren karakteristik bir eğri ile ifade edilir (Finkenthal et al., 1996; Joshi & Kumar, 2003).

Spektrum içerisindeki bu farklı dalga boyları, yüzey sıcaklıklarının, malzeme özelliklerinin ve fiziksel değişimleri tespit edebilme yeteneklerine dayanarak kömür yangınları gibi doğal ve insan kaynaklı olayların izlenmesine önemli katkılar sunar. Özellikle kısa dalga kızılötesi (SWIR), termal kızılötesi (TIR) ve mikrodalga bölgesinde ölçüm yapan sentetik açıklıklı radar (SAR) sistemleri, bu tür olayların belirlenmesinde farklı mekanizmalarla çalışan tamamlayıcı veri kaynaklarıdır.

Kısa dalga kızılötesi (SWIR) bölgesi, yaklaşık 1,4 μm ile 2,5 μm dalga boyu aralığında yer almaktadır ve yüksek sıcaklıklarla doğrudan ilişkilendirilebilecek spektral özelliklere sahiptir. SWIR, özellikle su içeriğiyle duyarlı bir etkileşim sergileyerek yangın bölgelerinde nem kaybına bağlı spektral değişimleri ortaya koyabilir. Ayrıca SWIR bantları, yüksek sıcaklıkların neden olduğu yansıma ve emilim farklılıklarını tespit ederek yüzeydeki aktif yangın alanlarını görünür spektrumdan daha etkili bir şekilde belirleyebilir. Kömür yangınları sebebi ile yanan alanlar (yüzey yangını ise), genellikle optik sensörler tarafından zor algılanan duman veya kül örtüsüyle gizlenmiş olabilir. Ancak SWIR bantları, atmosferik aerosol ve su buharının etkilerini büyük ölçüde azaltarak doğrudan yüzey sıcaklık değişimlerini gözlemlemeye olanak tanır. Bunun yanı sıra, yangın sebebi ile yakın çevrede gelişen yüzey örtüsündeki değişimin de spektral imzalarını da ayırt edebilir.

Termal kızılötesi (TIR) bölgesi elektromanyetik spektrumda, yaklaşık olarak 8 μm ile 15 μm arasındaki dalga boylarını kapsayan bir bölgedir. Bu aralık, görünür ışık spektrumunun hemen dışında yer alır ve ısı yayılımıyla doğrudan ilişkilidir. TIR bölgesi, genellikle Dünya yüzeyindeki ısıyı ölçmek ve yüzeyin sıcaklık haritasını oluşturmak için kullanılır, çünkü tüm sıcak nesneler, sıcaklıklarıyla orantılı olarak termal kızılötesi ışıınım yayar. Bu bölgedeki enerji, malzemelerin yayılan termal radyasyonuna bağlı olduğundan, sıcaklık farklarını tespit etmek ve yüzey malzemelerinin termal

özelliklerini belirlemek için kullanılır. Ayrıca, spektral bantların bu özellikleri, yüzeyde meydana gelen yüksek sıcaklık sebepli olayların tespitinde kritik bir rol oynar. TIR bantları, yüzeydeki sıcaklık anomalilerini belirleyerek yer altı kömür yangınlarının varlığını tespit etmekte önemli bir rol oynar. Yer altındaki yanan kömür damarları, uzun süre boyunca yüzeyde sıcaklık değişimlerine neden olabilir ve bu durum, termal sensörler aracılığıyla gözlemlenebilir. TIR bölgesinde yapılan ölçümler, farklı sıcaklık seviyelerindeki bölgeleri haritalayarak yangının konumu, yayılma yönü ve yoğunluğu hakkında detaylı bilgi sağlayabilir.

Sentetik açıklıklı radar (SAR) verileri, kömür yangınlarıyla ilişkili arazide meydana gelebilen deformasyonları tespit etmek için güçlü bir araçtır. Mikrodalga spektrumunda çalışan SAR sistemleri, yüzeyde meydana gelen çöküntülerin (subsidence) belirlenmesini sağlayarak yer altı kömür yangınlarının dolaylı göstergelerini ortaya çıkarabileceği sebebi ile direkt olarak kömür yangını tespiti adına kullanılsa da dolaylı olarak faydalı tespit imkânı sağlayabilmesi adına kritiktir. Kömür damarlarının uzun süre yanması sonucu, yüzeyde boşluklar oluşabilir ve zamanla toprağın çökmesine neden olabilir. Bu süreç, milimetre ölçeğinde hassasiyetle çalışan SAR interferometri (InSAR) teknikleri kullanılarak izlenebilir. Ayrıca, radar sinyalleri atmosferik ve meteorolojik koşullardan büyük ölçüde bağımsız olduğundan oldukça avantajlı veri kaynaklarıdır.

Çalışmamızın ana konusunu oluşturan kömür yangınlarının tespitinde, uydu ve hava tabanlı platformlar aracılığıyla yüksek çözünürlüklü multispektral ve hiperspektral görüntüleme sensörlerinden yararlanılmaktadır. Bu sensörler, kömür yangınlarının tespiti için uygun olan çeşitli spektral bantlarda veriler sağlayarak, yangının izlenmesi ve etkilerinin haritalanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Kömür Yangınlarında Kullanılabilen Uzaktan Algılama Platformları ve Sensörleri

Uzaktan algılama sistemleri, elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinden enerji toplayarak yeryüzünü ve atmosferi analiz etmeye olanak tanır. Bu sistemler temel olarak pasif ve aktif olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Pasif sensörler, doğal enerji kaynaklarından gelen elektromanyetik radyasyonu algılayarak çalışırken, aktif sensörler kendi ürettikleri sinyali yeryüzüne gönderip geri yansıyan sinyali analiz eder. Her iki sensör türü de uzaktan algılama uygulamalarında farklı avantajlar sunduğundan, kullanım alanlarına bağlı olarak birbirlerini tamamlayıcı nitelikte değerlendirilir.

Pasif Sensörler

Pasif sensörler, Güneş gibi harici bir enerji kaynağından gelen elektromanyetik radyasyonu algılayarak çalışır. Bu tür sensörler, genellikle optik ve kızılötesi spektrumlarında faaliyet gösterir ve yeryüzünün yansıttığı veya yaydığı radyasyonu ölçerek yüzey malzemeleri hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Pasif sensörlerin çalışabilmesi için yeterli seviyede doğal ışınım gereklidir; bu nedenle, çoğu pasif sistem yalnızca gündüz saatlerinde veri toplayabilir. Bununla birlikte, termal kızılötesi (TIR) sensörleri gibi bazı pasif sistemler, nesnelerin kendilerinin yaydığı radyasyonu ölçerek gece saatlerinde de veri elde edebilir.

Pasif sensörlerin temel avantajı, yeryüzü malzemelerinin doğal spektral yansıma ve yayılma özelliklerini ölçerek malzeme ayrımı, vejetasyon analizi, su varlığı tespiti, arazi örtüsü değişimi ve çevresel izleme gibi geniş bir uygulama yelpazesine olanak tanımasıdır. Örneğin, görünür ve yakın kızılötesi (VNIR) spektrumunda çalışan multispektral ve hiperspektral görüntüleme sistemleri, bitki örtüsünün sağlığını değerlendirmek, jeolojik haritalama yapmak ve su kalitesini izlemek için kullanılır. Özellikle

Landsat, ASTER ve MODIS gibi uydu sistemleri, geniş alanlardan düzenli olarak pasif sensör verileri toplayarak uzun vadeli çevresel değişimleri analiz etmede önemli bir rol oynar.

Bunun yanı sıra, termal kızılötesi (TIR) sensörler, yüzey sıcaklıklarını belirlemek ve termal anomalileri tespit etmek için kullanılır. Landsat 8 TIRS, ASTER TIR ve MODIS sensörleri, aktif volkanların izlenmesi, kentsel ısı adalarının belirlenmesi, yer altı kömür yangınlarının tespit edilmesi ve hidrotermal alanların haritalanması gibi uygulamalarda kritik rol oynar.

Landsat serisi uydular, uzun vadeli çevresel izleme ve doğal afetlerin tespiti için kritik öneme sahip olup, özellikle kömür yangınlarının belirlenmesinde büyük rol oynayan kısa dalga kızılötesi (SWIR) ve termal kızılötesi (TIR) bantlarını içermektedir. 1984 yılından itibaren faaliyet gösteren Landsat 5 Thematic Mapper (TM), 1999 yılında devreye giren Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), 2013 yılında başlatılan Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) ve Termal Kızılötesi Sensörü (TIRS), geniş spektral aralıkları ile farklı yüzey özelliklerini analiz etmeye imkân tanır.

Landsat sensörleri içinde SWIR bantları, yüksek sıcaklık kaynaklarının ve nem içeriğinin tespitinde kritik bir rol oynar. Özellikle SWIR-1 (1.55–1.75 μm) ve SWIR-2 (2.08–2.35 μm) bantları, yanan kömür yataklarını ve yangın sonrası yüzeyde meydana gelen değişiklikleri belirlemek için kullanılır. SWIR, kömür yangınlarının bulunduğu bölgelerde, sıcak yüzeylerden gelen radyasyonu algılayarak yüksek sıcaklıklı anomalilerin tespit edilmesine olanak tanır. Ayrıca, SWIR bantları yanmış ve yanmamış bölgelerin spektral ayrımını sağlayarak, yangının etkilediği alanların haritalanmasını kolaylaştırır.

Landsat serisinin termal kızılötesi (TIR) bantları ise doğrudan yüzey sıcaklığını ölçerek aktif kömür yangınlarını tespit

etmek için güçlü bir araç sunar. Landsat 5 TM ve Landsat 7 ETM+ sistemlerinde tek bir termal bant bulunurken, Landsat 8 TIRS sensörü iki ayrı termal bant (10.6–11.19 μm ve 11.5–12.51 μm) içermektedir. TIRS'in sunduğu bu çift bantlı yapı, atmosferik etkilerin düzeltilmesiyle daha hassas yüzey sıcaklığı ölçümleri yapmayı mümkün kılar. Kömür yangınları genellikle yüksek sıcaklıklara sahip olduğu için bu bantlar, yangın merkezlerini belirlemek, yangının yayılım hızını analiz etmek ve ısı kaynaklarını ayırt etmek için kullanılır.

Landsat sensörleri, farklı zaman dilimlerinde alınan görüntülerle kömür yangınlarının zaman içindeki gelişimini takip etmek açısından büyük avantaj sağlar. 16 günlük tekrar ziyaret süresi, yangınların dinamik doğasını izlemek ve uzun vadeli etkilerini değerlendirmek için uygun bir zaman ölçeği sunar. Ancak, Landsat serisi optik sensörler içerdiğinden bulut örtüsünden etkilenebilir ve yoğun duman altında yüzeyin görüntülenmesi zorlaşabilir. Bu nedenle, Landsat verileri genellikle radar sistemleriyle (örneğin Sentinel-1 gibi SAR sensörleri) veya diğer termal sensörlerle tamamlanarak daha kapsamlı analizler yapılır.

Landsat serisinin yanı sıra, kömür yangınlarının tespitinde önemli olan bir diğer platform Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) sistemidir. ASTER, özellikle termal bantlardaki yüksek çözünürlüğü ile dikkat çeker. 2000 yılından itibaren Terra uydusu üzerinde faaliyet gösteren ASTER, 14 spektral banda sahip olup, 8-12 μm arasındaki termal bantları (TIR) sayesinde yüzey sıcaklıklarını yüksek hassasiyetle belirleyebilir. Ayrıca, SWIR bantları sayesinde mineraloji analizleri yaparak kömür yataklarının spektral imzasını ortaya koyabilir ve yangın sonrası meydana gelen kimyasal değişimleri izleyebilir.

Kömür yangınlarının geniş ölçekli tespitinde kullanılan bir diğer önemli sistem Moderate Resolution Imaging

Spectroradiometer (MODIS) sensörüdür. NASA'nın Terra ve Aqua uydularına entegre edilen MODIS, geniş spektral kapsamı ve günlük tekrar ziyaret süresiyle geniş alanlardaki yangınları izleme açısından büyük bir avantaj sağlar. MODIS, aynı zamanda duman ve atmosferik aerosollerin dağılımını ölçerek yangının çevresel etkilerini değerlendirmeye de yardımcı olur.

Bu uzaktan algılama sistemleri, kömür yangınlarının tespitinde farklı avantajlar sunar. Landsat serisi, yüksek mekansal çözünürlüğü ile küçük ölçekli yangınların detaylı analizini yaparken, ASTER yüksek termal hassasiyeti ile sıcaklık değişimlerini belirleyebilir. MODIS ise geniş alanları kapsayan hızlı veri sağlama yeteneğiyle aktif yangınları izlemek için uygundur. Tüm bu sistemler bir arada kullanıldığında hem yangının mevcut durumu hem de uzun vadeli çevresel etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilir.

Aktif Sensörler

Aktif sensörler, kendi ürettikleri elektromanyetik sinyali hedef yüzeye gönderip geri yansıyan enerjiyi algılayarak çalışan sistemlerdir. Bu sensörler, pasif sistemlerin aksine harici bir ışık kaynağına bağımlı değildir ve bu nedenle gece ve gündüz her türlü hava koşulunda veri toplayabilir. Aktif sensörler genellikle radar (mikrodalga), lidar (lazer) ve sonar (akustik dalgalar) gibi teknolojileri kullanarak üç boyutlu yüzey modelleri oluşturabilir, arazi deformasyonlarını izleyebilir ve atmosferik parametreleri ölçebilir.

Sentetik açıklıklı radar (SAR) sistemleri, mikrodalga dalgalarını kullanarak yüzey yapıları hakkında yüksek hassasiyetli veriler elde edebilir. SAR sensörleri, bulut örtüsünün ve atmosferik engellerin etkisini en aza indirerek zorlu çevresel koşullarda bile güvenilir veri toplayabilir. Sentinel-1, ALOS PALSAR ve RADARSAT gibi radar sistemleri, arazi deformasyonlarının

ölçülmesi, toprak nemi tespiti, orman yapılarının analizi ve deniz buzlarının izlenmesi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle InSAR (Interferometric SAR) tekniği, milimetre ölçeğinde hassasiyetle yüzey deformasyonlarını tespit edebilir ve kömür madenleri çevresindeki çökmeleri veya deprem sonrası arazi değişimlerini haritalamak için kullanılır.

Aktif sensörlerin en önemli avantajlarından biri, pasif sistemlerin sınırlamalarını aşarak gece ve gündüz bağımsız veri toplayabilme yeteneğidir. Özellikle radar sistemleri, zorlu hava koşullarında bile çalışabilir ve büyük ölçekli doğal afetlerin izlenmesi, tarımsal verim analizleri ve arazi kullanımı değişikliklerinin belirlenmesi gibi uygulamalarda güçlü bir araç olarak öne çıkar. Bununla birlikte, aktif sistemlerin veri işleme süreçleri pasif sistemlere kıyasla daha karmaşık olup, büyük hacimli verilerin yorumlanması için ileri düzey algoritmalar gerektirmektedir.

Radar sensörleri, özellikle Sentinel-1, ALOS PALSAR ve TerraSAR-X gibi aktif mikrodalga sensörlerine sahip uzaktan algılama platformları, kömür yangınlarının tespitinde tamamlayıcı bir rol oynar. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) teknolojisini kullanan bu sensörler, meteorolojik koşullardan bağımsız olarak gece ve gündüz gözlem yapabilme yeteneği sayesinde optik sensörlerin erişemediği alanlarda da veri sağlayabilir. SAR sensörlerinin sunduğu yüzey deformasyonu analizi ve arazi değişikliklerinin izlenmesi gibi yetenekler yangınların yüzey yapısında ve zemin stabilitesinde yol açtığı değişimleri anlamak açısından büyük bir avantaj sağlar. Radar sensörleri, doğrudan yangın sıcaklığını ölçemese de, yangın sonrası arazi değişimlerini, çökmeleri ve topografik bozulmaları tespit etmek açısından güçlü bir tamamlayıcı veri kaynağı sunar.

Optik sensörlerin (Landsat, ASTER, MODIS gibi) sağladığı SWIR ve TIR verileriyle birleştirildiğinde, kömür yangınlarının neden olduğu yüzey değişimleri daha iyi analiz edilebilir. Özellikle çok zamanlı SAR görüntüleri kullanılarak, yangın öncesi ve sonrası yüzey değişimleri karşılaştırılabilir ve yangının etkisi uzun vadede izlenebilir.

Bu bağlamda, SAR ve optik sensörlerin entegrasyonu, kömür yangınlarının hem doğrudan hem de dolaylı etkilerinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Yangının aktif olduğu bölgelerin SWIR ve TIR sensörleri ile belirlenmesi, ardından SAR tabanlı deformasyon analizleri ile yangının yüzey ve yer altı yapıları üzerindeki etkilerinin haritalanması, çok yönlü bir izleme sisteminin temelini oluşturur.

Bu farklı spektral bantlar ve radar verileri, kömür yangınlarının tespitinde birbirini tamamlayıcı bilgiler sağladığı için birlikte kullanıldığında en yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebilir. Örneğin, SWIR ile yangın alanlarının belirlenmesi, TIR ile sıcaklık anomalilerinin ölçülmesi ve SAR ile yüzey deformasyonlarının izlenmesi, yangının hem yüzeyde hem de yer altındaki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. Bu sistemlerin birlikte değerlendirilmesi, kömür yangınlarının erken tespitini ve yayılmasının izlenmesini mümkün kılarak çevresel etkilerin azaltılmasına ve risk yönetimine katkıda bulunur.

Uzaktan Algılama Teknolojilerinin Avantajları ve Sınırlamaları

Uzaktan algılama, kömür yangınlarının tespitinde birçok avantaja sahiptir. Öncelikle, geniş alanları kapsayabilmesi sayesinde kömür ocaklarında ve terk edilmiş maden sahalarında yangınların erken evrede belirlenmesine olanak tanımaktadır. Termal görüntüleme, kızılötesi spektroskopisi ve hiperspektral analiz gibi teknikler sayesinde yüzey sıcaklık değişimleri hassas bir şekilde ölçülebilmekte ve yeraltı yanma süreçlerinin dolaylı göstergeleri

tespit edilebilmektedir. Ayrıca, uzaktan algılama sistemleri, hava koşullarından bağımsız olarak düzenli veri sağlayabilmekte ve zaman serisi analizleri yapılarak yangın eğilimleri belirlenebilmektedir.

Bununla birlikte, uzaktan algılamanın da bazı teknik ve operasyonel sınırlamaları bulunmaktadır. Uydu görüntüleme sistemleri belirli bir zaman aralığında veri sağlayabildiğinden, sürekli izleme gerektiren yangın süreçlerinde anlık tespitler yetersiz kalabilmektedir. Bulut örtüsü ve atmosferik koşullar özellikle optik ve termal sensörlerin doğruluğunu etkileyebilirken, yüksek çözünürlüklü verilerin işlenmesi büyük veri analiz teknikleri gerektirmektedir. Ayrıca, uzaktan algılama verilerinin yerinde doğrulama ile desteklenmesi gerekliliği, saha çalışmaları ile entegrasyon ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır.

Kömür Yangınlarının Önlenmesine Yönelik Uzaktan Algılama Bazlı Stratejiler

Uzaktan algılama tabanlı yaklaşımlar, kömür yangınlarının yalnızca tespitinde değil, aynı zamanda önlenmesinde de kritik bir rol oynayabilir. Önleyici stratejiler kapsamında, yangın risk analizlerinin yapılması ve yüksek riskli alanların belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, geçmiş yıllara ait termal görüntüler ve hava durumu verileri kullanılarak kömür ocaklarında yangın oluşum eğilimleri tespit edilebilir ve riskli bölgeler belirlenerek önleyici müdahaleler geliştirilebilir.

Buna ek olarak, insansız hava araçları (İHA) ve yer tabanlı sensörler ile sürekli izleme yapılması, sıcaklık anomalilerinin erken tespitini sağlayarak yangın başlamadan önce gerekli önlemlerin alınmasına olanak tanıyabilir. Jeotermal gradyan analizi ve hiperspektral görüntüleme gibi ileri teknikler kullanılarak, kömür sahalarındaki gaz emisyonları ve ısı transferi süreçleri izlenebilir,

böylece yangın riskine karşı daha proaktif bir yaklaşım geliştirilebilir.

Gelecekte, yapay zekâ ve büyük veri analitiği ile entegre edilen uzaktan algılama sistemleri, yangın tahmini ve risk yönetimi süreçlerini daha da optimize edebilir. Makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak zaman serisi analizleri yapılabilir, böylece yangınların oluşum dinamikleri daha iyi anlaşılabilir. Ayrıca, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile uzaktan algılama verilerinin entegrasyonu sayesinde yangın yönetim haritaları oluşturulabilir ve acil müdahale planları geliştirilebilir.

Sonuç olarak, uzaktan algılama tabanlı yaklaşımlar, kömür yangınlarının tespitinde ve önlenmesinde devrim niteliğinde gelişmeler sunmaktadır. Ancak, bu sistemlerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için sensör teknolojilerinin geliştirilmesi, veri analiz süreçlerinin iyileştirilmesi ve geleneksel saha çalışmalarıyla entegrasyonunun sağlanması gerekmektedir. Gelecekte, yapay zeka destekli analizler ve daha yüksek çözünürlüklü sensörler ile bu yöntemlerin yangın yönetiminde daha da etkin hale gelmesi beklenmektedir.

Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Kömürün kendiliğinden yanması, çevresel, ekonomik ve sağlık açısından ciddi riskler barındıran bir olgudur. Geleneksel tespit yöntemleri maliyet, erişilebilirlik ve teknik sınırlamalar nedeniyle yangınların erken evrede tespit edilmesini ve etkili müdahale edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu noktada, uzaktan algılama teknolojileri, geniş alanları kapsama kapasitesi, tekrarlanabilir ölçümler sağlaması ve insan müdahalesine gerek kalmadan sürekli veri toplayabilmesi sayesinde önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Uydu görüntüleme sistemleri, insansız hava araçları (İHA) ve hiperspektral analizler gibi yöntemler, yer seviyesinde ölçüm yapmanın zor olduğu alanlarda dahi yüksek

doğrulukla yangın tespiti ve izleme imkânı sunmaktadır. Ancak, bu teknolojilerin de belirli sınırlamaları bulunmaktadır ve gelişmiş veri analiz teknikleriyle desteklenmesi gerekmektedir.

Kaynakça

Akgün, F., & Arisoy, A. (1994). Effect of particle size on the spontaneous heating of a coal stockpile. *Combustion and Flame*, 99(1), 137–146. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)90085-X)

Argyrou, A., & Agapiou, A. (2022). A Review of Artificial Intelligence and Remote Sensing for Archaeological Research. *Remote Sensing*, 14(23), 6000. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs14236000>

Arisoy A Çetegen E, B. B. (2006). Modelling Spontaneous Combustion of Coal. *Turkish J*, 30, 193–201.

Avtar, R., Komolafe, A. A., Kouser, A., Singh, D., Yunus, A. P., Dou, J., ... Kurniawan, T. A. (2020). Assessing sustainable development prospects through remote sensing: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100402. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100402>

Banerjee, S. C. (1985). *Spontaneous combustion of coal and mine fires*. . Rotterdam: A.A. Balkema.

Baris, K., Kizgut, S., & Didari, V. (2012). Low-temperature oxidation of some Turkish coals. *Fuel*, 93, 423–432. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.066>

Beamish, B. B., & Hamilton, G. R. (2005). Effect of moisture content on the R70 self-heating rate of Callide coal. *International Journal of Coal Geology*, 64(1–2), 133–138. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.03.011>

Bowes, P. C., & Cameron, A. (1971). Self-heating and ignition of chemically activated carbon. *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology*, 21(9), 244–250. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/jctb.5020210902>

Carras, J. N., & Young, B. C. (1994). Self-heating of coal and related materials: Models, application and test methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 20(1), 1–15. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0360-1285(94)90004-3)

Carras J. N., Day S. J., Saghafi A., & Williams D. J. (2009). Greenhouse gas emissions from low-temperature oxidation and spontaneous combustion at open-cut coal mines in Australia. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 161–168. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.12.001>

Chuvieco, E. (2020). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. CRC Press. Retrieved from <https://doi.org/10.1201/9780429506482>

De Rosa, M. I. (1999). Analysis of Mine Fires for All USA Underground and Surface Coal Mining Categories. *Niosh*.

Didari, V. (1986). Yeraltı ocaklarında kömürün kendiliğinden yanması ve risk indeksleri. *Madencilik Dergisi*, 25(4).

Erkan, H. (1964). Kömürün depolanması. *Madencilik*, 3, 12–13.

Fierro V Romero C Andrés J. Arriaga A Schmal D et al., M. J. (1999). Prevention of spontaneous combustion in coal stockpiles: Experimental results in coal storage yard. *Fuel Process Technol*, 59, 23–34. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(99\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(99)00005-3)

Finkenthal, D., Greco, B., Halsey, R., Pena, L., Rodecker, S., Simms, B., ... Schissel, D. P. (1996). Introduction to the electromagnetic spectrum. *General Atomic*, 46.

Garcia, P., H. P. J., M. F., Garcia, P., H. P. J., M. F., & Garcia, P., H. P. J., M. F. (1999). The use of differential scanning

calorimetry to identify coals susceptible to spontaneous combustion. *Thermochimica Acta*, 336, 41–46.

Giardino, M. J. (2011). A history of NASA remote sensing contributions to archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 38(9), 2003–2009. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.09.017>

Gill, F., & Browning, E. (1971). *Spontaneous combustion in coal mines*. Colliery Guardian.

Güney, M. (1968). Certain factors affecting the oxidation and spontaneous combustion of coal. *University of Nottingham, Mining Department Magazine*, 20, 71–80.

Gürdal, G., Hoşgörmez, H., Özcan, D., Li, X., Liu, H., & Song, W. (2015). The properties of Çan Basin coals (Çanakkale—Turkey): Spontaneous combustion and combustion by-products. *International Journal of Coal Geology*, 138, 1–15. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.COAL.2014.12.004>

Güyağüler, T., & Durucan, Ş. (1985). *Yeraltı Kömür Madenciliğinde Çevre Sorunları ve Kontrol Yöntemleri*. Ankara: ILO/Türk-iş Maden İşçileri Sendikası Yayını.

Ham, B., & Ham, B. (2005). A Review of Spontaneous Combustion Incidents A Review of Spontaneous Combustion Incidents, 237–242.

Hogland, W, Bramryd, T., & Persson, I. (1996). Physical, biological and chemical effects of unsorted fractions of industrial solid waste in waste fuel storage. *Waste Management & Research*, 14, 197–210. Retrieved from <https://doi.org/10.1177/0734242X9601400209>

Hogland, William, & Marques, M. (2003). Physical, biological and chemical processes during storage and spontaneous

combustion of waste fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(1), 53–69. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00025-9)

Janga, B., Asamani, G., Sun, Z., & Cristea, N. (2023). A Review of Practical AI for Remote Sensing in Earth Sciences. *Remote Sensing*, 15(16), 4112. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs15164112>

Jong, S. M. de, Meer, F. D. van der, & Clevers, J. G. P. W. (2004). Basics of Remote Sensing. In S. M. De Jong & F. D. Van der Meer (Eds.), *Remote Sensing Image Analysis: Including The Spatial Domain* (pp. 1–15). Dordrecht: Springer Netherlands. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2560-0_1

Joshi, A. W., & Kumar, A. (2003). What can we learn from the electromagnetic spectrum? *Resonance*, 8(3), 8–25. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/BF02835801>

Karpuz, C., Güyagüler, T., Bağcı, S., Bozdağ, T., Başarır, H., & Keskin, S. (2000). Linyitlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlık derecelerinin tespiti: Bölüm I – Risk sınıflaması derlemesi. *Madencilik Dergisi*, Eylül / Aralık, 3–13.

Kaymakçı, E. (1998). *Zonguldak havzası kömür damarlarına uygulanabilecek bir kendiliğinden yanmaya doğal yatkınlığı değerlendirme tekniğinin geliştirilmesi* (Doktora tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi.

Kök, M. V. (2005). Temperature-controlled combustion and kinetics of different rank coal samples. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 79(1), 175–180. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10973-004-0581-6>

Kong, B., Li, Z., Yang, Y., Liu, Z., & Yan, D. (2017). A review on the mechanism, risk evaluation, and prevention of coal spontaneous combustion in China. *Environmental Science and*

Pollution Research, 24(30), 23453–23470. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0209-6>

Küçük, A., Kadioğlu, Y., & Gülaboğlu, M. Ş. (2003). A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air. *Combustion and Flame*, 133, 255–261.

Kural, O. (1988). *Kömür kimyası ve teknolojisi*.

Kural, O. (1998). *Kömür özellikleri, teknolojisi ve çevre ilişkileri*. Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş.

Liang, Y., Zhang, J., Ren, T., Wang, Z., & Song, S. (2017). Application of ventilation simulation to spontaneous combustion control in underground coal mine: A case study from Bulianta colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.IJMST.2017.12.005>

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=AFHDCAAQBAJ>

Mahadevan, V. , & Ramlu, M. (1985). Fire risk rating of coal mines due to spontaneous heating. *Journal of Mines, Metals and Fuels. Journal of Mines, Metals and Fuels*, 3, 217–231.

Manfreda, S., McCabe, M. F., Miller, P. E., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallinis, G., ... Toth, B. (2018). On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sensing*, 10(4), 641. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs10040641>

Mohalik, N. K., Lester, E., Lowndes, I. S., & Singh, V. K. (2016). Estimation of greenhouse gas emissions from spontaneous combustion/fire of coal in opencast mines–Indian context. *Carbon*

Management, 7(5–6), 317–332. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/17583004.2016.1249216>

Morris, R., & Atkinson, T. (1986). Geological and mining factors affecting spontaneous heating of coal. *Mining Science and Technology*, 3, 217–231.

Muduli, L., Jana, P. K., & Mishra, D. P. (2018). Wireless sensor network based fire monitoring in underground coal mines: A fuzzy logic approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 435–447. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2017.11.003>

Nalbandian, H. (2010). *Propensity of coal to self-heat*.

Nelson, M. I., & Chen, X. D. (2007). Recent experimental work on the self-heating and spontaneous combustion of coal. *Geology of Coal Fires: Case Studies from Around the World: Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 18(August), 31–83. Retrieved from [https://doi.org/10.1130/2007.4118\(04\)CITATIONS](https://doi.org/10.1130/2007.4118(04)CITATIONS)

Nimaje, D. S., & Tripathy, D. P. (2016). Characterization of some Indian coals to assess their liability to spontaneous combustion. *Fuel*, 163, 139–147. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2015.09.041>

Nugroho, Y. S., McIntosh, A. C., & Gibbs, B. M. (1998). Using the crossing point method to assess the self-heating behavior of Indonesian coals. *Symposium (International) on Combustion*, 27(2), 2981–2989. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(98\)80158-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80158-6)

Onifade, M., & Genc, B. (2018). A review of spontaneous combustion studies – South African context. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 0930(May), 1–21. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1466402>

Ören, Ö. (2021). Experimental study on the simultaneous effect of long-term water immersion and pyrite content on spontaneous combustion liability of Ömerler coals (Kütahya, Western Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(17), 1759. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08201-0>

Pis, J. , de la P. G., Fuente, E., Morán, A., & Rubiera, F. (1996). A study of the self-heating of fresh and oxidized coals by differential thermal analysis. *Thermochimica Acta*, 279, 93–101.

Pone, J. D. N., Hein, K. A. A., Stracher, G. B., Annegarn, H. J., Finkleman, R. B., Blake, D. R., ... Schroeder, P. (2007). The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa. *International Journal of Coal Geology*, 72(2), 124–140. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.COAL.2007.01.001>

Pone JDN Stracher GB Annegarn HJ Finkleman RB Blake DR et al., H. K. A. A. (2007). The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa. *Int J Coal Geol*, 72, 124–140. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.COAL.2007.01.001>

QI, X., WANG, D., ZHONG, X., GU, J., & XU, T. (2010). Characteristics of oxygen consumption of coal at programmed temperatures. *Mining Science and Technology (China)*, 20(3), 372–377. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60210-6](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60210-6)

Ramlu, M. A. (1991). *Mine Disasters and Mine Rescue*. Rotterdam: A.A. Balkema.

Ray, S. S. (2013). Basics of remote sensing. *Remote Sensing Image Analysis: Including the Spatial Domain*, 1–15.

Ren, T. X., Edwards, J. S., & Clarke, D. (1999). Adiabatic oxidation study on the propensity of pulverised coals to spontaneous

combustion. *Fuel*, 78(14), 1611–1620. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00107-6)

Roy, P. S., Behera, M. D., & Srivastav, S. K. (2017). Satellite Remote Sensing: Sensors, Applications and Techniques. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 87(4), 465–472. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0428-8>

Sankaran, S., & Ehsani, R. (2014). Introduction to the Electromagnetic Spectrum. In A. Manickavasagan & H. Jayasuriya (Eds.), *Imaging with Electromagnetic Spectrum: Applications in Food and Agriculture* (pp. 1–15). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-642-54888-8_1

Santosh, K. M., & Sundaresan, J. (2014). Remote Sensing Basics. In J. Sundaresan, K. M. Santosh, A. Déri, R. Roggema, & R. Singh (Eds.), *Geospatial Technologies and Climate Change* (pp. 279–290). Cham: Springer International Publishing. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-319-01689-4_17

Schmidt, L. D., & Elder, J. L. (1940). Atmospheric Oxidation of Coal at Moderate Temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry*, 32(2), 249–256. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/ie50362a021>

Shi, T., Wang, X., Deng, J., & Wen, Z. (2005). The mechanism at the initial stage of the room-temperature oxidation of coal. *Combustion and Flame*, 140(4), 332–345. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2004.10.012>

Singh, R. N., Demirbilek, S., & Turney, M. (1984). Kömürün kendiliğinden yanma risk indeksinin maden dizaynı, depolama ve deniz nakliyatına uygulanması. In *Türkiye 4. Kömür Kongresi* (pp. 203–221).

Singh, R. V. K. (2013). Spontaneous Heating and Fire in Coal Mines. *Procedia Engineering*, 62, 78–90. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2013.08.046>

Soltani, A. (2011). Embodied Airborne Imagery: Low-Altitude Urban Filmic Topography. Retrieved from <https://doi.org/10.14236/ewic/EVA2011.22>

Soytürk, T. (1992). *Tunçbilek kömürlerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Spada, M., & Burgherr, P. (2016). An aftermath analysis of the 2014 coal mine accident in Soma, Turkey: Use of risk performance indicators based on historical experience. *Accident Analysis & Prevention*, 87, 134–140. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2015.11.020>

Symposium, I. I., Heat, C., & May, T. (2015). No Title, (x), 1–12.

Taraba, B., & Michalec, Z. (2011). Effect of longwall face advance rate on spontaneous heating process in the gob area – CFD modelling. *Fuel*, 90(8), 2790–2797. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.03.033>

Taraba, B., Michalec, Z., Michalcová, V., Blejchař, T., Bojko, M., & Kozubková, M. (2014). CFD simulations of the effect of wind on the spontaneous heating of coal stockpiles. *Fuel*, 118, 107–112. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2013.10.064>

Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22–36. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>

Vollmer, M. (2021). Physics of the Electromagnetic Spectrum. In *Electromagnetic Technologies in Food Science* (pp. 1–32). Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119759522.ch1>

Wachowicz, J. (2008). Analysis of underground fires in Polish hard coal mines. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(3), 332–336. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60070-X](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60070-X)

Wang, H. (2002). Thermal decomposition of solid oxygenated complexes formed by coal oxidation at low temperatures. *Fuel*, 81(15), 1913–1923. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00122-9)

Wang, H., Dlugogorski, B. Z., & Kennedy, E. M. (2003a). Analysis of the mechanism of the low-temperature oxidation of coal. *Combustion and Flame*, 134(1–2), 107–117. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(03\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(03)00086-5)

Wang, H., Dlugogorski, B. Z., & Kennedy, E. M. (2003b). Analysis of the mechanism of the low-temperature oxidation of coal. *Combustion and Flame*, 134(1–2), 107–117. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(03\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(03)00086-5)

Wang, Haihui, Dlugogorski, B. Z., & Kennedy, E. M. (2003a). Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(6), 487–513. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00042-X)

Wang, Haihui, Dlugogorski, B. Z., & Kennedy, E. M. (2003b). Pathways for Production of CO₂ and CO in Low-Temperature Oxidation of Coal. *Energy & Fuels*, 17(1), 150–158.

Wang, L., Ren, T., Nie, B., Chen, Y., Lv, C., Tang, H., & Zhang, J. (2015). Development of a spontaneous combustion TARPs system based on BP neural network. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(5), 803–810. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.07.016>

Wright, J., Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (1980). Remote Sensing and Image Interpretation. *The Geographical Journal*, 146(3), 448. Retrieved from <https://doi.org/10.2307/634969>

Xia, T., Zhou, F., Wang, X., Zhang, Y., Li, Y., Kang, J., & Liu, J. (2016). Controlling factors of symbiotic disaster between coal gas and spontaneous combustion in longwall mining gobs. *Fuel*, 182, 886–896. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2016.05.090>

Yılmaz, A. İ. (2002). *Eynez yeraltı ocağı havalandırma sisteminin ocak yangınlarına etkisi* (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Yılmaz, A. O., & Atalay, T. (n.d.). TTK Armutçuk Müessesesinde kendiliğinden yanma olayının araştırılması. In *Türkiye 7. Kömür Kongresi* (pp. 399–410).

Yohe, G. R. (1958). *Oxidation of Coal, Report of Investigations 207*. Illinois State Geological Survey.

Yuan, L., & Smith, A. C. (2011). CO and CO₂ emissions from spontaneous heating of coal under different ventilation rates. *International Journal of Coal Geology*, 88(1), 24–30. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.07.004>

Zalewski, E. F. (2004). Remote Sensing. In *digital Encyclopedia of Applied Physics*. Wiley. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/3527600434.eap397.pub2>

Zhu, H., Song, Z., Tan, B., & Hao, Y. (2013). Numerical investigation and theoretical prediction of self-ignition characteristics of coarse coal stockpiles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(1), 236–244. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.11.006>

Zubiček, V. (2008). Assessment of susceptibility of coal to spontaneous combustion in OKR. *Geoscience Engineering*, 4, 1–9.

HEYELANLAR ve UZAKTAN ALGILAMA UYGULAMALARI

ALİ SAMET ÖNGEN¹
RECEP UĞUR ACAR²

Giriş

Heyelan, bir kaya, zemin veya moloz kütlesinin, yerçekimi etkisiyle kaydırıcı kuvvetlerin, kaymaya engel olan kuvvetlerden büyük olması neticesinde yamaçtan aşağı şekilde hareket etmesi olarak tanımlanmaktadır. Heyelanlar ani bir şekilde gelişebileceği gibi, zaman içerisinde gelişen ve ilerleyen nitelikte olabilir. Doğal afetlerin tümünde olduğu gibi heyelanlarda da risk analizini doğru yapmak kritik öneme sahiptir. Risk analizinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için heyelanların türlerini belirlemek gerekmektedir. Bu doğrultuda, hareketin türünü, malzemenin türünü ve deformasyon biçimini dikkate alarak oluşturulan ve Varnes (1978) tarafından önerilen heyelan sınıflama sistemi literatürde yer alan en önemli sınıflama sistemidir (Tablo1).

¹Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-4019-715

²Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-0420-6263

Tablo 1: Heyelan sınıflama sistemi

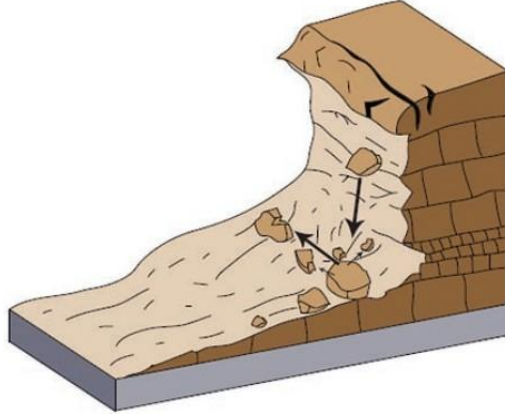
HAREKETİN TİPİ		MALZEMENİN TÜRÜ	
		KAYAÇLAR	ZEMİNLER
			İri taneli İnce Taneli
DÜŞME		Kaya Düşmesi	Moloz Düşmesi Zemin Düşmesi
DEVİRİLME		Kaya Devrilmesi	Moloz Devrilmesi Zemin Devrilmesi
Kayma	Dönel	Kaya Kayması	Moloz Kayması Zemin Kayması
	Yanal		
YAYILMA		Kaya Yayılması	Moloz Yayılması Zemin Yayılması
AKMA		Kaya akması (Derin Krip)	Moloz Akması Zemin Akması (Toprak Kribi)
KARIŞIK		İki veya daha fazla hareket türü	

Kaynak: (Varnes, 1978).

Varnes (1978) sınıflama sistemi heyelanları altıana başlık altında toplamaktadır:

Düşme (Fall): Kaya kütlelerinin, genellikle dik yamaçlardan yerçekimi etkisiyle ani şekilde düşmesiyle oluşur (Şekil 1). Bu tür heyelanlarda yer değiştirme genellikle serbest düşme şeklindedir. Düşme türü heyelanda, kayma yoktur veya hiç denecek kadar azdır. Hareket, yüzey boyunca dik bir yamaçtan zemin/kayanın veya her ikisinin de kopmasıyla başlar. Daha sonra malzeme düşerek ve yuvarlanarak iner.

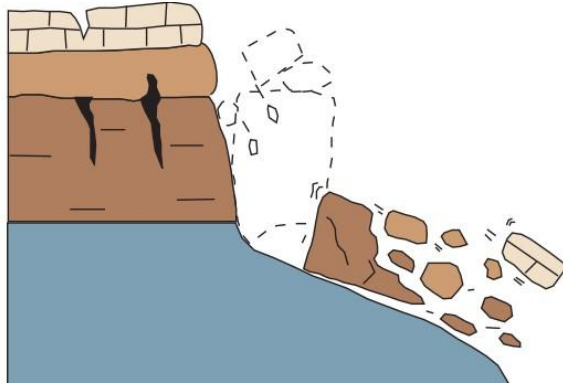
Şekil 1: Düşme türü heyelan



Kaynak: (Cruden vd. 1996, Highland & Bobrowsky, 2008 tarafından değiştirilerek)

Devrilme (Topples): Kaya bloklarının ve/veya zemin kütlelerinin dönme hareketiyle devrilmesi şeklinde meydana gelir (Şekil 2 ve Şekil 3). Yatay veya hafif eğime sahip tabakalarda meydana gelir. Kaya birimi içerisindeki çatlaklarda bulunan su veya buzdan kaynaklı da meydana gelebilir.

Şekil 2: Devrilme türü heyelan



Kaynak: (Cruden vd. 1996, Highland & Bobrowsky, 2008 tarafından değiştirilerek).

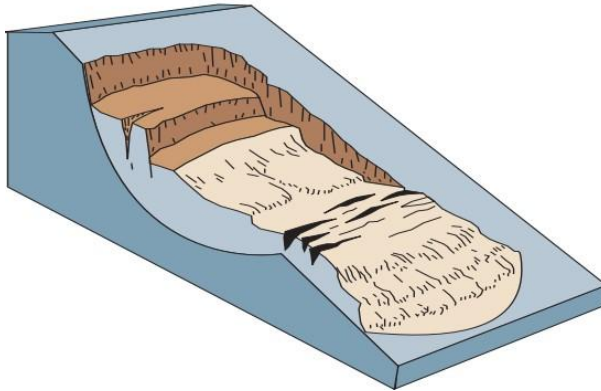
Şekil 3: Devrilme türü heyelan örneği



(Kaynak: G. Bianchi Fasan, akt. Highland & Bobrowsky, 2008)

Kayma (Slide): Zemin veya kaya kütlelerinin belirli bir kayma yüzeyi boyunca hareket etmesi neticesinde meydana gelen heyelan türüdür (Şekil 4). Kaymalar dairesel ve düzlemsel olmak üzere ikiye ayrılır. Kayan malzemenin hacmi kayma alanının başladığı alandan itibaren hareket devam ettikçe büyür.

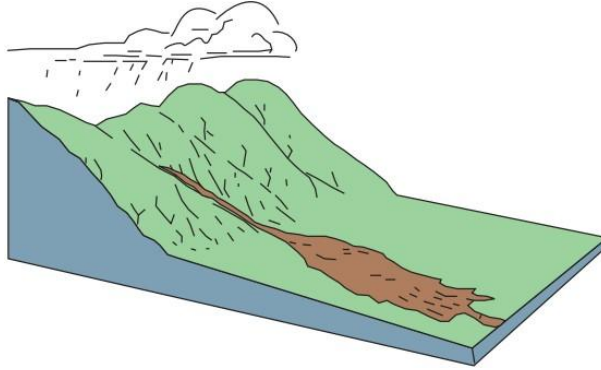
Şekil 4: Kayma türü heyelan



Kaynak: (Cruden vd. 1996, Highland & Bobrowsky, 2008 tarafından değiştirilerek).

Akmalar (Flow): Kohezyonu zayıf olan malzemenin suya doygun hale geldikten sonra akışkan davranış göstermesi neticesinde meydana gelmektedir (Şekil 5). Zemin akması, moloz akması ve kaya akması olmak üzere üç türdür. Su içeriğine, akışkanlığa, hareketin gelişimine bağlı olarak kayma türü heyelandan akma türü heyelana doğru geçiş vardır (Highland & Bobrowsky, 2008).

Şekil 5: Akma türü heyelanın şematik gösterimi



Kaynak: (Cruden vd. 1996, Highland & Bobrowsky, 2008 tarafından değiştirilerek).

Sürüklenme (Creep): Yamacı oluşturan zemin veya kayanın fark edilemeyecek kadar yavaş, aşağı doğru hareket eden ve genellikle yıllar süren deformasyonlardır (Şekil 7). Zemin üzerinde hafif dalga benzeri düzensizlikler, eğilmiş ağaç gövdeleri, eğilmiş direk ve hizası bozulmuş çit yapıları gibi unsurlar en önemli belirteçleridir.

Yayılma (Spread): Kohezif zemin malzemesinin veya kaya kütlelerinin, altta yatan daha zayıf birimler üzerinde yanal yönde hareketi neticesinde oluşur. Yayılmalar, altta yatan malzemenin sıvılaşması veya akışı sonucu ortaya çıkabilir. Yayılma türleri arasında blok yayılmaları, sıvılaşma yayılmaları ve yanal yayılmalar bulunur (Highland & Bobrowsky, 2008).

Varnes (1978) sınıflamasının ana amacı, heyelan türlerinin fiziksel özelliklerini belirlemek ve bu doğrultuda söz konusu heyelana uygun bir stratejiyle müdahale etmektir. Örneğin düşme tipi bir heyelan ani şekilde meydana gelirken, sürüklenme tipi heyelanlar yukarıda bahsedildiği gibi yıllar süren deformasyonlar neticesinde gelişmektedir ve erken uyarı sistemleri ile izlenmeyi gerektirmektedir. Bu sebepten, heyelan izlemelerinde kullanılacak olan uzaktan algılama yöntemi, heyelan türüne göre seçilmelidir. Örneğin, radar interferometrisi (InSAR) sürüklenme veya yavaş kayan zeminler için uygun bir yöntem iken düşme gibi aniden meydana gelebilecek heyelanları algılamakta sınırlıdır.

Heyelan Nedenleri ve Tetikleyici Faktörler

Heyelanlar jeolojik, hidrojeolojik, topografik ve insan kökenli faktörlerin bir araya gelmesiyle oluşan faktörlerdir. Bu faktörler hazırlayıcı faktörler (pre-disposing) ve tetikleyici faktörler (triggering) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hazırlayıcı faktörler (zayıf zemin yapısı, jeolojik formasyonlar, eğimli topoğrafya, bitki örtüsü kaybı, zemin gözenekliliği ve su tutma kapasitesi) bir ortamı heyelan meydana gelmesine elverişli hale getirirken, tetikleyici faktörler (yoğun yağış ve ani su doygunluğu, depremler, kar erimeleri, insan kökenli faaliyetler) ise hareketin başlamasına neden olan sebeplerdir (Highland & Bobrowsky, 2008). Heyelanların meydana gelmesini önlemek ve heyelan sonucu meydana gelen etkilerin azaltılması için hazırlayıcı ve tetikleyici faktörlerin ayrı ayrı analiz edilmesi gereklidir. Uzaktan algılama yöntemleri kullanılarak bu faktörlerin mekânsal dağılımı analiz edilebilir. Ayrıca heyelan risk ve duraylılık haritaları oluşturulabilir. Örneğin heyelanı tetikleyici faktörlerden biri olan yağış yoğunluğun için Sentinel-1 uydusu verileri kullanılabilir. Yine tetikleyici faktörlerden olan insan kökenli faaliyetler için Landsat uydu verileri kullanılarak arazi

kullanımı durumu değerdendirilebilir. Bu sayede karmaşık heyelan süreçleri birçok açıdan değerdendirilebilir.

Erken Uyarı Belirtileri ve Riskli Alanlar

Heyelanlar çoğu zaman aniden gelişen hareketler gibi gözükseler de aslında zaman içerisinde belirli işaretler heyelanın meydana geleceğine işaret etmektedir. Bu işaretlerin zamanında ve doğru bir şekilde izlenmesi, belirlenmesi ve yorumlanması, heyelanların can ve mal kaybı üzerindeki olası etkilerini önleme noktasında kritik öneme sahiptir. Özellikle gelişme mekanizması yavaş olan heyelanlarda bu belirteçler önceden belirlenip yorumlanabilir. Yüzeyde görülen çatlaklar, eğilmiş ağağlar ve direkler, ev/istinat duvarlarında meydana gelen çatlaklar, kayma çizgileri, yüzey kabarması ve çökme bu belirteçlerdir ve aşağıda kısaca açıklanmıştır:

Yüzeyde Görülen Çatlaklar: Yüzeyde gözle görülebilen çatlaklar zemin malzemesinin gerilmeye maruz kaldığına ve bunun sonucunda hareketin başladığına işaret eder.

Eğilmiş Ağağlar ve Direkler: Olası heyelan bölgesinde önceden yer alan ağaç, direk gibi yapıların eğilmiş olması bölgede hareketin başladığını gösterir.

Duvarlarda Çatlaklar: İstinat duvarı, ev gibi yapıların duvarlarında meydana gelen çatlaklar ve yapısal deformasyonlar kütle hareketinin güçlü bir işaretidir.

Yüzey Kabarması veya Çökme: Bölge topoğrafyasında normal olmayan yükselişler ve oturmalar gelişim evresinde olan bir heyelana işaret etmektedir.

Kayma Çizgileri: Yamaç üzerinde kütle hareketine bağlı olarak gelişen kayma çizgileri, su çıkışı olan çizgiler önemli belirteçtir.

Bu belirteçler gerek yerinde gözlem gerekse uzaktan algılama yöntemleriyle süreç içerisinde tespit edilebilir. LiDAR sensörler ile yapılan topografik incelemeler milimetrik hassasiyetteki hareketleri bile yakalayabilmektedir. Yine Sentinel-1 verileri ile zaman içerisinde bölgedeki yer değiştirmeler ortaya konabilir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı yazılımların desteği ile heyelan için önemli olan faktörler puanlanarak heyelan risk haritaları oluşturulabilir. Tüm bu işlemler heyelanların can ve mal kaybı üzerindeki etkisini minimize etme noktasında oldukça önemlidir. Bu verilerin sürekli olarak takip edilmesi ve işlenmesiyle erken önlemler alınabilir. Bu süreç afet yönetiminin önemli bir bileşenidir.

Heyelan İzlemenin Önemi

Doğal afetler dünya üzerinde büyük can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. Heyelanlar da insan sağlığı ve ekonomi üzerinde önemli etkileri olan doğal afetlerdir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) verileri ülkemizde farklı bölge ve şehirlerde heyelanların meydana geldiğini, evlerin ve yerleşim yerlerinin boşaltıldığını ve ekonomik olarak olumsuz tablolarla karşılaştığımızı göstermektedir. Dolayısıyla Türkiye gibi dağlık ve eğimli arazileri çok olan ülkelerde büyük sonuçlara sebep olan afetlerin etkilerinin azaltılması için heyelanların izlenmesi ve erken uyarı sistemleri büyük önem arz etmektedir. Heyelan izlemeleri sadece heyelanların etkilerinin azaltılması için değil aynı zamanda riskli alanların belirlenmesi, arazi kullanım planı, afet yönetimi ve olası mühendislik projelerinin yer seçimi noktasında önemli rol üstlenmektedir. Heyelanların tespit edilmesine yönelik günümüze kadar uygulanan geleneksel yer ölçüm yöntemleri (inklinometre, piyezometre, vb.) heyelan davranışlarını anlamada oldukça yararlı olmuşturlardır. Ancak bu yöntemlerin yüksek maliyetleri, sınırlı bölgede uygulanmaları, bakım ihtiyaçları nedeniyle geniş ölçekteki

alanlara uygulanabilirlikleri oldukça sınırlıdır. Uzaktan algılama teknolojileri bu noktada çok önemli çözümler sunmakta ve heyelan izleme çalışmaları sürekli, etkin ve hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.

Bölümün Amacı ve Kapsamı

Bu kitap bölümünün amacı, heyelanların önceden izlenmesi ve erken uyarı sistemleri üzerinde uzaktan algılama uygulamalarının öneminin açıklanması, bu uygulamaların risk değerlendirme ve afet yönetimi konularında bileşen olarak yer almasının süreçte oynadığı aktif rolün ele alınmasıdır. Ayrıca optik, LiDAR, radar gibi uzaktan algılama platformlarının heyelan izleme sürecindeki uygulamalarının karşılaştırmalı olarak sunulması amaçlanmıştır.

Uzaktan Algılamanın Rolü

Uydular, insansız hava araçları, hava araçları aracılığıyla olası heyelan bölgesindeki çeşitli veriler (topoğrafik değişimler, su/nem oranı, yüzeyde meydana gelen hareketler vb.) elde edilerek heyelan risk durumları uzaktan algılama yöntemleri hassas biçimde analiz edilebilmektedir. Bu sebeple uzaktan algılama teknolojileri, heyelanların izlenmesi, duyarlılık haritalarının oluşturulması ve modellenmesi etkin, pratik ve önemli rol üstlenmektedir (Wasowski & Bovenga, 2014). SAR (sentetik açıklıklı radar) sistemiyle aktif bir heyelanda meydana gelen küçük ölçekte hareketler ve yer değiştirmeler tespit edilebilmektedir. Yine InSAR (Interferometric SAR), SBAS (Small Baseline Subset) gibi algoritmalar, zaman içerisinde heyelanlarda meydana gelen hareketlerin oldukça hassas bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır. Yine optik uydular (örn.: ASTER, Landsat, Sentinel vb.) ile heyelanlarla ilişkili birçok parametre analiz edilebilmektedir.

Uzaktan algılama yöntemlerinin en önemli avantajlarından biri gözlenmesi ve ulaşılması güç yerlerin analizine imkân tanınmasıdır. Yine geniş alanların pratik bir şekilde analiz edilebilmesi bu teknolojilerin önemli bir avantajıdır. Geçmişte meydana gelen heyelanlara ait veriler, heyelanların zaman içerisindeki değişimleri ve riskler bu teknolojilerle değerlendirilebilir. Bu teknolojilerle hem mevcut hem de gelecekteki riskler ortaya koyulabilmektedir. Bu sayede günümüzde uzaktan algılama verileri; Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı yazılımların desteğiyle alan analizleri yapılarak, mühendislik projeleri için yer seçimi, güvenli yapılaşma gibi noktalarda yol gösterici olmakta, afet yönetimi süreçlerine de doğrudan katkı sunmaktadır.

Heyelanların İzlenmesinde Kullanılan Uzaktan Algılama Yöntemleri

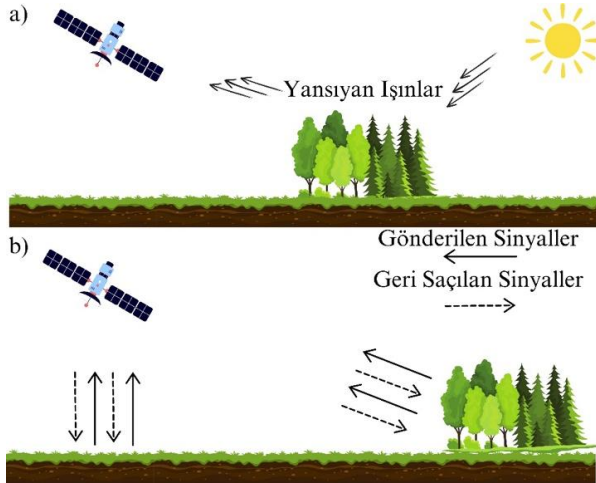
Uzaktan algılama teknolojileri, heyelanların anlaşılması ve izlenmesi süreçlerinde önemli ilerlemeler sağlamış; afet yönetimi ve mühendislik bilimlerindeki yaklaşımları büyük ölçüde geliştirmiştir (Arca, 2012; Demirel & Türk, 2022; Mohan, Singh, Kumar, & Dwivedi, 2021; Shano, Raghuvanshi, & Meten, 2020; Van Asch, Corominas, Greiving, Malet, & Sterlacchini, 2014; Van Westen, 2013; Zeybek & Şanlıoğlu, 2013). Uygulanacak tekniğin seçimi; afet sonrası hızlı hasar haritalaması gibi acil durum analizlerinden, bir yamacın uzun dönemli ve milimetrik düzeydeki deformasyonlarının izlenmesine kadar, çalışmanın hedeflerine göre belirlenmektedir. Bu kapsamda kullanılan uzaktan algılama sistemleri genel olarak pasif ve aktif olmak üzere iki temel gruba ayrılır (Şekil 6) (Gupta, 2018; Jensen, 2009).

Pasif sistemler, güneş ışığı gibi harici bir enerji kaynağından gelen elektromanyetik radyasyonu algılar; sadece gün ışığında çalışabilirler (Kogut, 2025). Bu sistemlerin başlıca örneği olan optik görüntüleme teknolojileri, heyelan sonrası arazi örtüsü

değişikliklerinin belirlenmesi, zamansal karşılaştırmalar ve görsel yorumlama açısından önemli avantajlar sunar (Demirel & Türk, 2022).

Buna karşılık, aktif sistemler kendi enerjisini üretip hedefe yönlendirerek, yansıyan sinyalleri algılar. Bu sayede gece-gündüz ve her türlü hava koşulunda veri toplayabilirler. Radar (SAR) sistemleri, bu gruba ait olup özellikle interferometrik yöntemlerle (InSAR) yüzey deformasyonlarını milimetre düzeyinde izleme imkânı sağlar. LiDAR teknolojisi de bir diğer aktif sistemdir; yüksek hassasiyetli sayısal yükseklik modelleri oluşturma kapasitesiyle heyelan hacim hesaplamaları ve topoğrafik analizlerde sıklıkla tercih edilir.

Şekil 6: (a) Pasif uzaktan algılama: Güneş kaynaklı ışık sinyalleri ölçülür. (b) Aktif uzaktan algılama: Sensörlerin yaydığı sinyallerin yansımaları ölçülür



Kaynak: (Janga vd., 2023).

Optik Uzaktan Algılama

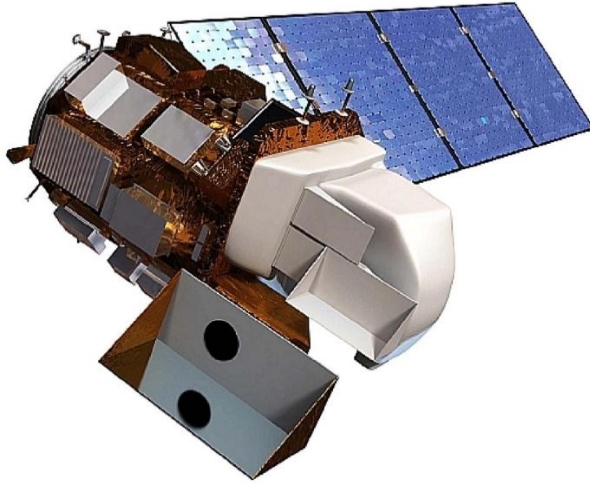
Landsat-1'in 1972'de fırlatılmasından bu yana, optik uzaktan algılama teknolojileri, heyelan çalışmalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (MacDonald & Grubbs, 1975; Mantovani, Soeters, & Van Westen, 1996). Bu teknolojiler, yeryüzünün farklı parametreleri hakkında sistematik ve geniş alanları kapsayan bilgiler sunarak heyelanların ve diğer yüzeysel değişimlerin incelenmesine olanak tanır. Günümüzde, farklı dalga boylarında ve frekanslarda çalışan, çeşitli mekansal, zamansal ve spektral çözünürlükler sunan sensörlerin varlığı, farklı geometri, stil ve kinematiğe sahip heyelanların incelenmesini mümkün kılmaktadır (Casagli, Intrieri, Tofani, Gigli, & Raspini, 2023; Xu et al., 2023). Modern heyelan analizleri, elektromanyetik spektrumun çok bantlı (multispektral) görüntülerden yararlanmaktadır (Lin, Wang, Yang, & Yang, 2017).

Görünür (Visible), yakın kızılötesi (Near Infrared-NIR) ve kısa dalga kızılötesi (Shortwave Infrared-SWIR) spektrumda elde edilen uydu görüntüleri, genellikle bölgesel ölçekte analizlerle heyelan envanter haritaları üretmek için yaygın olarak kullanılmıştır (Lu et al., 2021; Vecchiotti, Tilch, & Kociu, 2021; Zhu, Qiu, & Ye, 2022). Landsat (Şekil 7), ASTER, SPOT, Sentinel ve PlanetScope gibi çok bantlı uydu platformları, Dünya yüzeyinden yansıyan veya yayılan elektromanyetik radyasyonu tespit edip ölçebilen pasif sensörlere sahiptir. Bu sensörler, Dünya'yı yörünge izine dik olarak gözlemler ve güneşle eşzamanlı yörüngeleri takip ederler. Bu yörünge seçimi, Dünya yüzeyindeki güneş ışığı açısının tutarlı bir şekilde korunmasını sağlar; bu da farklı tarihlerde çekilen görüntülerin doğrudan ve güvenilir bir şekilde karşılaştırılmasına olanak tanır. Bu özellik, örneğin bir heyelanın geçmiş aktivitesini yeniden oluşturmaya çalışırken, farklı gölge açıları ve ışık koşulları için düzeltme yapma ihtiyacını en aza indirdiği için önemlidir. Heyelan araştırmalarında kullanılacak bahsi geçen bu uydu

verilerinin seçiminde dikkate alınması gereken birkaç temel özellik vardır. Bunlar mekansal, zamansal, spektral ve radyometrik çözünürlük olarak bilinir.

Mekansal çözünürlük, yerde ayırt edilebilen en küçük nesnenin boyutunu tanımlar ve genellikle piksel başına metre cinsinden ifade edilir. Örneğin, Landsat (30 m) ve Sentinel-2 (10-20 m) gibi orta çözünürlüklü veriler bölgesel envanterler için uygunken, PlanetScope (3-4 m) ve WorldView (<1m) gibi çok yüksek çözünürlüklü veriler gerilme çatlakları gibi küçük detayların tespiti için gereklidir.

Şekil 7: Pasif Uzaktan Algılama Sistemlerinden olan Multispektral sensör taşıyan Landsat 8 uydu platformuna ait bir görünüm.



Zamansal çözünürlük veya yeniden ziyaret süresi, bir uydunun aynı konumu tekrar ziyaret etmesi için geçen süredir ve uydular arasında oldukça değişkendir. Bu süre, WorldView ve PlanetScope takımyıldızları için günlük bazda olabileceği gibi, Landsat gibi uydular için ise 16 güne kadar çıkabilir. Ancak

günümüzde Landsat-8/9 ve Sentinel-2A/2B gibi uyduların yeniden ziyaret aralığı 2.3 güne kadar sürmektedir.

Spektral çözünürlük, bir sensörün yakalayabildiği spektral bantların sayısını ve genişliğini ifade eder. Çok bantlı (multispektral) sensörler genellikle 3-10 ayrı bantta veri toplarken, pankromatik (PAN) sensörler daha geniş bir spektrumu tek bir gri tonlamalı bantta ancak daha yüksek mekânsal çözünürlükte yakalar.

Radyometrik çözünürlük, sensörün yansıyan enerjideki ince farklılıkları tespit etme yeteneğidir ve daha yüksek bit değerleri (örneğin 12-bit), toprak nemi veya bitki örtüsü stresi gibi özelliklerdeki en ufak değişimlerin bile ayırt edilmesine olanak tanır.

Farklı uydu platformlarının mevcut olması, büyük bir heyelan olayının ardından veya yüksek deformasyon döneminde, heyelan aktivitesini izlerken ve olası bir göçmeyi tahmin ederken zamanında bulutsuz çok bantlı görüntü elde etme olasılığını artırır. Bununla birlikte, hava koşulları (özellikle bulutlar ve kar örtüsü) ve gün ışığı, iklim bölgesine ve mevsime bağlı olarak uygun görüntülerin elde edilmesini hala engelleyici faktörler olarak öne çıkmaktadır. Genel olarak, dağlık alanlar ve nemli iklimlere ve yağışlı mevsimlere sahip bölgelerden elde edilen görüntüler zaman zaman elverişsiz sonuçlar verebilmektedir. Bu gibi bölgelerde meydana gelebilecek heyelanların eğim, nem ve meteorolojik etkiler sebebi ile meydana gelme olasılığının daha yüksek olması uydu teknolojileri ile yapılacak olan çalışmalar için bir engel teşkil edebilmektedir.

Radar (SAR) ile Uzaktan Algılama

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), pasif optik sensörlerden farklı olarak kendi enerji kaynağını kullanan aktif bir uzaktan algılama sistemidir ve mikrodalga bandında çalışır (Cascini, Fornaro, & Peduto, 2010; Cigna, Del Ventisette, Liguori, & Casagli,

2011; Mohan et al., 2021). Bu özelliği sayesinde SAR, güneş ışığına ya da açık hava koşullarına bağlı olmaksızın gece-gündüz ve her türlü hava koşulunda veri toplayabilir. Özellikle bulutluluk oranının yüksek olduğu, sık yağış alan bölgelerde meydana gelen heyelanların izlenmesi açısından bu teknoloji önemli avantajlar sunar. SAR sistemleri, yüzeye mikrodalga sinyalleri göndererek geri yansıyan sinyallerin genlik (amplitüd) ve faz (faz) bileşenlerini kaydeder (Meng et al., 2024; Rosen et al., 2000a; Yiğit, 2019). Genlik, yüzeyin fiziksel özellikleri örneğin pürüzlülük ve yansıtıcılık hakkında bilgi sağlarken, faz bileşeni sensör ile hedef yüzey arasındaki mesafedeki çok küçük değişiklikleri hassas biçimde tespit etmeye olanak tanır (Amitrano, Di Martino, Di Simone, & Imperatore, 2024). Bu iki bilgi, yer yüzeyinde meydana gelen hareketlerin izlenmesinde tamamlayıcı rol oynar. Yavaş ilerleyen ve küçük ölçekli yer hareketlerinin belirlenmesinde en hassas yöntemlerden biri İnterferometrik SAR (InSAR) tekniğidir (Bekaert, Handwerger, Agram, & Kirschbaum, 2020; Rosen et al., 2000b). Bu yöntem, aynı bölgeye ait farklı tarihlerde elde edilmiş en az iki SAR görüntüsünün karşılaştırılmasına dayanır. Eğer bu iki görüntü arasında zemin hareket etmişse, bu fark sinyalin faz bileşeninde bir kayma olarak kendini gösterir. Oluşan faz farkları, interferogram adı verilen görsel desenlerde renkli halkalar şeklinde ifade edilir ve bu sayede yüzey deformasyonları yüksek duyarlılıkla haritalanabilir. Bu yaklaşımın diferansiyel versiyonu olan DInSAR, geniş alanlardaki deformasyonları tespit etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Crosetto et al., 2020; Fornaro, Paucullo, & Serafino, 2009). Ancak atmosferik koşulların değişkenliği ve yüzey özelliklerinin zaman içinde değişmesi gibi etmenler, sinyal kalitesini düşürebilmekte ve yorumlama güvenilirliğini sınırlayabilmektedir. Bu sınırlılıkların aşılması amacıyla geliştirilen Çok Zamanlı InSAR (MTInSAR) yöntemleri, onlarca hatta yüzlerce SAR görüntüsünü bir arada analiz ederek daha kararlı ve uzun vadeli deformasyon verileri

üretir. Bu kapsamda öne çıkan iki temel yaklaşım Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR) ve Small Baseline Subset (SBAS) teknikleridir (X. Chen, Tessari, Fabris, Achilli, & Floris, 2021; Giorgini et al., 2023; Hussain et al., 2025; Tao et al., 2025). Bu yöntemler, zaman içinde radar sinyalinin düzenli biçimde yansıtan sabit hedef noktalarını örneğin binalar ya da kaya yüzeyleri gibi tanımlayarak, atmosferik etkileri modelleyip gürültüyü azaltır. Böylece milimetre ölçeğinde yer değiştirme zaman serileri oluşturulabilir. Sentinel-1 (Şekil 8) gibi düzenli ve ücretsiz veri sağlayan uydu sistemleri sayesinde bu teknikler, geniş alanlı heyelan izleme çalışmalarında ve erken uyarı sistemlerinde yaygın olarak kullanılabilir hale gelmiştir (Barra et al., 2016; Béjar-Pizarro et al., 2017; Mondini et al., 2019; Santangelo, Cardinali, Bucci, Fiorucci, & Mondini, 2022).

Şekil 8: Aktif Uzaktan Algılama Sistemlerinden olan SAR sistemi taşıyan Sentinel-1 uydu platformuna ait bir görünüm.



Ancak heyelan hareketi, InSAR tekniklerinin hassasiyet sınırlarını aşacak kadar hızlı gerçekleşiyorsa örneğin günde ya da saatte santimetre-mertebesinde yer değiştirmeler söz konusuysa bu

durumda faz bilgisi yetersiz kalır ve genlik verisine dayalı yöntemlere başvurulur. Genlik tabanlı ofset izleme (offset tracking) ve benek izleme (speckle tracking) teknikleri, iki SAR görüntüsünün parlaklık desenlerini karşılaştırarak yer yüzeyindeki büyük ölçekli yer değiştirmeleri ölçer. Her ne kadar bu yöntemler InSAR kadar hassas olmasa da büyük deformasyonları algılayabilmeleri ve hem alçalan hem yükselen yörünge verileri kullanılarak hareketin üç boyutlu (doğu-batı, kuzey-güney, düşey) bileşenlerinin elde edilebilmesi gibi önemli avantajlara sahiptir. Tüm bu güçlü yönlerine rağmen SAR teknolojisinin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle uyduların yanal bakış açısı nedeniyle, dik eğimli yamaçlarda gölgelenme (shadow) ve yığılma (layover) gibi geometrik bozulmalar ortaya çıkabilir (Kim, Jung, & Lu, 2025; Ren et al., 2021a, 2021b; Shi et al., 2024). Bu durum, radarın belirli alanlardan veri toplayamamasına yol açar. Ayrıca, SAR sinyali yalnızca uydu ile hedef yüzey arasındaki görüş hattı (Line-of-Sight) doğrultusundaki hareketlere duyarlıdır; bu nedenle, örneğin kuzey-güney yönlü hareketlerin tespiti sınırlı kalabilir. Diğer yandan, yoğun bitki örtüsü radar sinyalinin zemine ulaşmasını engelleyebilir ve bu da özellikle ormanlık alanlarda veri kalitesini düşüren dekoherasyon sorununu beraberinde getirir. Bu nedenlerle SAR tabanlı analizlerin, optik görüntüler, topografik veriler ve arazi gözlemleri gibi farklı veri kaynaklarıyla birlikte, bütüncül bir değerlendirme sürecinin parçası olarak kullanılması önerilmektedir.

LiDAR (Işık Tespiti ve Mesafe Tayini)

LiDAR (Light Detection and Ranging), bir yüzeye lazer darbeleri göndererek ve yansıyan ışığın sensöre geri dönme süresini ölçerek mesafeyi belirleyen aktif bir uzaktan algılama tekniğidir (Shah Alam & Oluoch, 2021; Wang, 2020a). Bu yöntem, yeryüzünün, bitki örtüsünün ve insan yapımı yapıların son derece hassas ve yüksek çözünürlüklü üç boyutlu (3D) modellerini

oluşturan yoğun bir nokta bulutu üretir. LiDAR, özellikle dengesiz yamaçların izlenmesinde, yüzeyin ayrıntılı sayısal modellerini sağladığı için heyelan araştırmalarında devrim yaratmıştır (Zhong et al., 2020). Bu modeller, bir olayın hacmini hesaplamak, farklı zamanlarda alınan taramaları karşılaştırarak yer değiştirme alanlarını izlemek ve diğer mekansal veriler için bir temel oluşturmak amacıyla kullanılır.

LiDAR (Light Detection and Ranging) sistemleri, yüzey şekillerini yüksek doğruluk ve çözünürlükle haritalamak için kullanılan aktif uzaktan algılama teknolojileridir (W. Chen, Li, Wang, Chen, & Liu, 2014; DuCarme, 2019; Simpson & Hutchinson, 2005; Wang, 2020b). Bu sistemler, önceden belirlenmiş bir desen doğrultusunda dar bir lazer ışını gönderir ve hedefe ulaşan lazer darbelerinin geri dönüş süresine (time-of-flight) dayalı olarak mesafe hesaplamaları yapar. Lazer sinyalinin hedef yüzeye çarpıp sensöre geri dönme süresi, hedefin sensöre olan uzaklığını milimetre hassasiyetinde belirlemeye olanak tanır. LiDAR teknolojisinin esnekliği, farklı taşıyıcı platformlara entegre edilebilmesini mümkün kılar; bu da çeşitli mekânsal ve operasyonel gerekliliklere yanıt verebilecek bir sistem mimarisi sunar.

Yersel LiDAR sistemleri (Terrestrial Laser Scanning – TLS), sabit bir konumdan çalışır ve özellikle dik, sarp ve erişimi zor yamaçların detaylı incelenmesinde tercih edilir (Frayssines & Hantz, 2009; Mah, Samson, McKinnon, & Thibodeau, 2013). Alet merkezli sabit bir referans sistemine dayalı çalışmaları, karmaşık konumlandırma düzeltmeleri ihtiyacını azaltır ve yüksek doğrulukta topoğrafik veri üretimi sağlar. Öte yandan, Hava Kaynaklı LiDAR sistemleri (Airborne Laser Scanning – ALS), uçaklar, helikopterler ya da İnsansız Hava Araçları (İHA) gibi platformlara monte edilerek geniş alanların hızlı ve etkin bir şekilde taranmasına imkân tanır. Bu sistemlerin mekânsal çözünürlüğü, platformun uçuş yüksekliği, hızı

ve tarama yoğunluğuna bağlı olarak birkaç santimetreden birkaç desimetreye kadar değişebilir.

LiDAR teknolojisinin heyelan analizlerindeki en önemli avantajlarından biri, yoğun bitki örtüsünü "delme" yeteneğidir. Lazer darbeleri, bitki örtüsünün yaprakları arasından geçerek zemine ulaşabilir ve sensörler, tek bir darbeden birden fazla yansımayı (multiple returns) algılayabilir. İlk yansımalar genellikle ağaç tepelerinden, son yansımalar ise toprak yüzeyinden gelir. Bu özellik, özellikle ormanlık bölgelerde, çıplak arazi yüzeyinin yüksek hassasiyetle modellenmesini mümkün kılar. Böylelikle, geleneksel yöntemlerle veya daha düşük çözünürlüklü uzaktan algılama verileriyle tespit edilemeyen heyelan izleri, yüzey çatlakları, küçük kabarmalar ve deformasyonlar detaylı şekilde ortaya konabilir.

LiDAR verilerinin heyelan çalışmaları kapsamında kullanımı çok yönlüdür. En yaygın kullanım alanlarından biri, yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model – DEM) üretimidir. Bu modeller, heyelan geçmişinin incelenmesi, potansiyel riskli bölgelerin belirlenmesi ve hassas morfolojik analizlerin yapılmasında kritik öneme sahiptir. Ayrıca, farklı zamanlarda toplanan LiDAR verilerinin karşılaştırılmasıyla yüzeydeki küçük değişiklikler hassas biçimde izlenebilir; bu da aktif heyelanların hareket hızının belirlenmesi ve kayan/biriken malzemenin hacminin hesaplanmasında değerli bilgiler sunar. Bununla birlikte, eğim, bakı, pürüzlülük gibi topoğrafik parametrelerin LiDAR verilerinden yüksek doğrulukla elde edilebilmesi, şev stabilitesi analizlerinin ve heyelan duyarlılık haritalarının güvenilirliğini önemli ölçüde artırır.

LiDAR teknolojisi, özellikle bitki örtüsünün yoğun olduğu ya da erişimin güç olduğu bölgelerde detaylı zemin verisi elde etme konusunda eşsiz avantajlar sunar (W. Chen et al., 2014). Bununla birlikte, bazı sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır.

Özellikle hava kaynaklı taramaların maliyetleri yüksektir ve verilerin işlenmesi özel yazılımlar, teknik bilgi ve zaman gerektirir. Ayrıca, yoğun yağmur, sis ya da düşük görüş koşulları, lazer darbelerinin yayılımını olumsuz etkileyerek veri kalitesinde düşüşe neden olabilir. Bu nedenlerle LiDAR, tek başına değil; çoğunlukla optik ve radar temelli diğer uzaktan algılama teknikleriyle entegre edilerek, daha kapsamlı ve güvenilir bir heyelan izleme ve analiz yaklaşımının parçası olarak değerlendirilir.

Çoklu Kaynaklı Veri Entegrasyonu ve Gelecek Perspektifleri

İncelenen optik, radar (SAR) ve LiDAR teknolojileri kaynakları verilerin her biri, heyelan analizinde önemli katkılar sağlamaktadır. Ancak bu karmaşık doğa olayının bütüncül bir biçimde anlaşılması, genellikle tek bir veri kaynağının sunduğu bilgiyle sınırlı kalır. En etkili ve güvenilir sonuçlar, farklı uzaktan algılama sistemlerinin zayıf yönlerini birbirlerinin güçlü yanlarıyla tamamladığı çoklu yaklaşımlarıyla elde edilir. Bu bütünleşik analizlerde, farklı veri türleri birbirini destekleyerek daha derinlemesine ve güvenilir yorumlara olanak tanır.

Örneğin, sürekli ve yavaş ilerleyen bir yer hareketinin tespiti için, bulutlu hava koşullarından etkilenmeyen ve milimetrik hassasiyette deformasyon ölçebilen SAR interferometrisi (InSAR) ideal bir başlangıç noktasıdır. SAR verileriyle belirlenen potansiyel riskli alanlar, daha sonra yüksek çözünürlüklü optik uydu görüntüleri kullanılarak görsel olarak doğrulanabilir; bu sayede heyelan tacı, gerilme çatlakları veya bitki örtüsündeki bozulmalar gibi morfolojik unsurlar detaylı bir şekilde haritalanabilir. Özellikle ormanlık alanlarda, bitki örtüsünü “delerek” zemindeki mikro-topografik detayları ortaya çıkarabilen LiDAR verileri ise şev stabilitesi analizleri için gereken eğim, bakı ve yüzey pürüzlülüğü gibi kritik topoğrafik parametreleri eşsiz bir hassasiyetle sağlar. Bu katmanlı

analiz süreci, heyelanın hem mevcut durumunu hem de gelecekteki olası davranışını değerlendirmek için güçlü bir çerçeve sunar.

Bu türden çok kaynaklı veri bütünleştirme çalışmaları, yalnızca görsel yorumlamalarla sınırlı kalmayıp, sayısal analizlerin de temelini oluşturur. Farklı sensörlerden elde edilen veriler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında bir araya getirilerek mekânsal analizler için tematik katmanlara dönüştürülür. Örneğin; LiDAR veya stereo optik görüntülerden türetilen eğim, bakı ve pürüzlülük haritaları; Landsat ve Sentinel-2 gibi optik uydulardan elde edilen arazi örtüsü, bitki örtüsü yoğunluğu (NDVI) ve zamansal değişim bilgileri; ASTER veya hiperspektral sensörlerle haritalanan jeolojik birimler ve alterasyon zonları gibi veriler, heyelanları hazırlayan çevresel koşulları nicel olarak ortaya koymak açısından kritik rol oynar.

Bu tematik katmanlar, heyelan envanteri verileriyle birlikte değerlendirildiğinde, günümüzün gelişmiş analiz araçlarıyla mekânsal olasılık modellerine dönüştürülebilir. Özellikle istatistiksel analizler ve makine öğrenmesine dayalı yöntemler, farklı faktörlerin heyelan oluşumundaki göreceli etkilerini öğrenme kapasitesine sahiptir. Rastgele Orman (Random Forest) ve Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine) gibi algoritmalar, geçmişteki heyelanlara ait verilerden öğrenerek, gelecekte heyelan meydana gelme olasılığı yüksek olan alanları gösteren duyarlılık haritaları üretir. Bu haritalar, karar vericiler için bilimsel dayanaklı ve mekânsal olarak ayrıntılı bilgi sunar; böylece arazi kullanım planlaması, ulaşım hatlarının yönlendirilmesi ve afet risk azaltım stratejileri gibi uygulamalarda etkili biçimde kullanılabilir.

Teknolojideki gelişmeler, uzaktan algılamayı yalnızca geçmiş verileri analiz eden statik bir araç olmaktan çıkarıp, gerçek zamanlı izleme ve erken uyarı sistemlerinin temel bileşenlerinden biri hâline getirmektedir. Özellikle Sentinel-1 gibi sık tekrar

frekansına sahip radar uyduları, belirli bölgelerde birkaç günde bir güncellenen deformasyon verileri sağlayarak, yavaş ilerleyen heyelanların neredeyse canlı olarak izlenmesine olanak tanımaktadır. Bu süreklilik, yağış ölçerler, inklinometreler ve GPS istasyonları gibi yer tabanlı sensör ağlarıyla birlikte çalıştığında, kritik eşik değerlerinin aşılması durumunda otomatik uyarılar üretebilen operasyonel sistemlerin altyapısını oluşturur.

Yakın gelecekte, yapay zekâ ve derin öğrenme algoritmalarının bu süreçlerde daha aktif kullanılması beklenmektedir. Uydu arşivlerinden elde edilen çok yıllık veri kümelerinin bu yöntemlerle taranması sayesinde, insan gözünün fark edemeyeceği desenlerin, öncül belirtilerin ve mekânsal örüntülerin belirlenmesi mümkün olacaktır. Ayrıca NASA ve ISRO iş birliğiyle geliştirilen NISAR gibi yeni nesil radar uyduları, L-bandı SAR verisi sağlayarak, özellikle yoğun bitki örtüsü altında dahi yer hareketlerinin daha etkili bir şekilde izlenmesine olanak tanıyacaktır. Tüm bu gelişmeler, heyelan riskinin izlenmesi, yönetimi ve bu afetlere yönelik hazırlık çalışmalarında hem bilimsel hem de uygulama düzeyinde yeni ufuklar açmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada ele alınan uzaktan algılama teknolojileri, heyelanların anlaşılması, izlenmesi ve risk yönetimi açısından sahip oldukları potansiyelle afet yönetimi literatüründe giderek daha merkezi bir yer edinmektedir. Heyelanlar, karmaşık jeodinamik süreçlerin bir ürünü olarak hem mekânsal hem zamansal olarak değişken özellikler gösterdiğinden, bu olayların etkin bir şekilde analiz edilmesi için çok kaynaklı, yüksek çözünürlüklü ve farklı fiziksel prensiplere dayalı verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, pasif (multispektral) ve aktif (Sentetik Açıklıklı Radar - SAR ve LiDAR) sistemlerin birbirini tamamlayıcı özellikleri, bütüncül bir analiz yaklaşımını gerekli kılmaktadır.

Pasif multispektral sistemler, özellikle Landsat, Sentinel-2 ve benzeri uydular aracılığıyla elde edilen görüntülerle arazi örtüsü, bitki sağlığı, nem içeriği ve yüzey değişimleri gibi tematik bilgilerin zamansal karşılaştırmasına olanak sağlar. Bu sistemler, heyelanların neden olduğu morfolojik değişimlerin geniş alanlar ölçeğinde takibi açısından değerlidir. Öte yandan, aktif sistemlerden SAR, özellikle İnterferometrik SAR (InSAR) tekniği ile bulutluluk, gece-gündüz farkı gibi atmosferik ve optik sınırlamalardan etkilenmeden, milimetrik düzeyde yüzey deformasyonlarını izleyebilmektedir. Bu yönüyle InSAR, yavaş gelişen kütle hareketlerinin erken tespitinde kritik rol oynamakta, erken uyarı sistemlerinin kurulmasına bilimsel zemin hazırlamaktadır. LiDAR ise yüksek yoğunluklu nokta bulutu verileriyle karmaşık topoğrafik yapıları detaylı biçimde ortaya koymakta ve özellikle bitki örtüsüyle kaplı alanlarda, yüzeyin gerçek morfolojisinin modellenmesini mümkün kılarak heyelan hacmi, eğim analizi ve kırık-zon ilişkileri gibi çok sayıda mühendislik parametresinin analizinde üstünlük sağlamaktadır.

Bu üç temel veri kaynağının birlikte ve senkronize kullanımı, çok katmanlı bir değerlendirme sürecinin temelini oluşturmaktadır. Multispektral görüntüler, riskli alanların ön tanımlanmasında; SAR verileri, bu alanlardaki yüzey hareketlerinin zamansal takibinde; LiDAR verileri ise detaylı üç boyutlu modelleme ve morfolojik analizlerde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yaklaşımla, her bir sistemin sınırlılıkları, diğer sistemlerin avantajlarıyla dengelenmekte; ortaya çıkan sinerji, tekil bir sistemle elde edilmesi güç olan kapsamlı analizlerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Günümüzde gelişen veri işleme teknolojileri, özellikle yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı analiz yöntemlerinin uzaktan algılama verileriyle entegrasyonunu da giderek artırmaktadır. Bu sayede çok boyutlu veri kümeleri daha hızlı, hassas ve otomatik

biçimde değerlendirilerek, heyelan duyarlılık ve risk haritaları daha güvenilir şekilde üretilmektedir. Ayrıca, Sentinel-1 gibi yüksek tekrar frekansına sahip SAR misyonları ile neredeyse gerçek zamanlı deformasyon izleme mümkün hale gelmiş; bu tür verilerin yer tabanlı sensörlerle entegre edilmesiyle bölgesel erken uyarı sistemlerinin etkinliği önemli ölçüde artırılmıştır.

Sonuç olarak, heyelanların mekânsal davranışlarının doğru biçimde anlaşılması ve afet risklerinin azaltılmasına yönelik sürdürülebilir stratejilerin geliştirilmesi, uzaktan algılama teknolojilerinin birbirini tamamlayan bir bütünlük içerisinde kullanılmasıyla mümkün olmaktadır. Önümüzdeki dönemde, yeni nesil uydu sistemlerinin (örneğin NISAR, Tandem-L) ve daha güçlü yapay zekâ uygulamalarının kullanımının artmasıyla, bu entegratif yaklaşımın hem doğruluğu hem de operasyonel faydası daha da artacak; böylece can ve mal güvenliğinin sağlanmasına yönelik karar destek sistemlerine bilimsel katkı daha da güçlenecektir.

KAYNAKLAR

Amitrano, D., Di Martino, G., Di Simone, A., & Imperatore, P. (2024). Flood Detection with SAR: A Review of Techniques and Datasets. *Remote Sensing*, 16(4), 656. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs16040656>

Arca, D. (2012). Afet Yönetiminde Coğrafi Bilgi Sistemi ve Uzaktan Algılama. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(2), 53–61.

Barra, A., Monserrat, O., Mazzanti, P., Esposito, C., Crosetto, M., & Scarascia Mugnozza, G. (2016). First insights on the potential of Sentinel-1 for landslides detection. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(6), 1874–1883. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1171258>

Béjar-Pizarro, M., Notti, D., Mateos, R. M., Ezquerro, P., Centolanza, G., Herrera, G., ... Fernández, J. (2017). Mapping Vulnerable Urban Areas Affected by Slow-Moving Landslides Using Sentinel-1 InSAR Data. *Remote Sensing*, 9(9), 876. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs9090876>

Bekaert, D. P. S., Handwerger, A. L., Agram, P., & Kirschbaum, D. B. (2020). InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: An application to Nepal. *Remote Sensing of Environment*, 249, 111983. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111983>

Casagli, N., Intrieri, E., Tofani, V., Gigli, G., & Raspini, F. (2023). Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 51–64. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00373-x>

Cascini, L., Fornaro, G., & Peduto, D. (2010). Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. *Engineering Geology*, 112(1–4), 29–42. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.01.003>

Chen, W., Li, X., Wang, Y., Chen, G., & Liu, S. (2014). Forested landslide detection using LiDAR data and the random forest algorithm: A case study of the Three Gorges, China. *Remote Sensing of Environment*, 152, 291–301. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.004>

Chen, X., Tessari, G., Fabris, M., Achilli, V., & Floris, M. (2021). Comparison Between PS and SBAS InSAR Techniques in Monitoring Shallow Landslides (pp. 155–161). Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-030-60311-3_17

Cigna, F., Del Ventisette, C., Liguori, V., & Casagli, N. (2011). Advanced radar-interpretation of InSAR time series for mapping and characterization of geological processes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(3), 865–881. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/nhess-11-865-2011>

Crosetto, M., Solari, L., Mróz, M., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., Frei, M., ... Andersen, H. S. (2020). The Evolution of Wide-Area DInSAR: From Regional and National Services to the European Ground Motion Service. *Remote Sensing*, 12(12), 2043. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs12122043>

Cruden, D.M., and Varnes, D.J., 1996, Landslide types and processes, in Turner, A. Keith, and Schuster, Robert L. eds. Landslides—Investigation and mitigation: Transportation Research Board, Special report no. 247, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., p. 36–75.

Demirel, Y., & Türk, T. (2022). Optik uydu görüntüleri yardımıyla heyelan alanlarında meydana gelen kütle hareketlerinin incelenmesi: Koyulhisar örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(1), 7–16. Retrieved from <https://doi.org/10.53030/tufod.1084630>

DuCarme, J. (2019). Developing effective proximity detection systems for underground coal mines. In *Advances in Productive, Safe, and Responsible Coal Mining* (pp. 101–119). Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101288-8.00003-1>

Fornaro, G., Pauciuolo, A., & Serafino, F. (2009). Deformation monitoring over large areas with multipass differential SAR interferometry: a new approach based on the use of spatial differences. *International Journal of Remote Sensing*, 30(6), 1455–1478. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01431160802459569>

Frayssines, M., & Hantz, D. (2009). Modelling and back-analysing failures in steep limestone cliffs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(7), 1115–1123. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.06.003>

Giorgini, E., Orellana, F., Arratia, C., Tavasci, L., Montalva, G., Moreno, M., & Gandolfi, S. (2023). InSAR Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Small Baseline Subset (SBAS) Techniques for Ground Deformation Measurement in Metropolitan Area of Concepción, Chile. *Remote Sensing*, 15(24), 5700. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs15245700>

Gupta, S. (2018). Active and Passive Remote Sensing.

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. T. (2008). The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides (USGS Circular 1325). Reston, VA: U.S. Geological Survey.

Hussain, S., Pan, B., Hussain, W., Sajjad, M. M., Ali, M., Afzal, Z., ... Tariq, A. (2025). Integrated PSInSAR and SBAS-InSAR analysis for landslide detection and monitoring. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 139, 103956. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.103956>

Janga, B., Asamani, G., Sun, Z., & Cristea, N. (2023). A Review of Practical AI for Remote Sensing in Earth Sciences. *Remote Sensing*, 15(16), 4112. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs15164112>

Jensen, J. R. (2009). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective 2/e*. Pearson Education. Retrieved from https://books.google.com.tr/books?id=ge_nwDX-HBEC

Kim, J., Jung, H.-S., & Lu, Z. (2025). Ground surface displacement measurement from SAR imagery using deep learning. *Remote Sensing of Environment*, 318, 114577. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114577>

Kogut, P. (2025). Uzaktan Algılama Türleri: Dünyayı Değiştiren Teknoloji. Web Sayfası. Erişim Tarihi: 18.06.2025.

Lin, J., Wang, M., Yang, J., & Yang, Q. (2017). Landslide Identification and Information Extraction Based on Optical and Multispectral UAV Remote Sensing Imagery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 57, 012017. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1755-1315/57/1/012017>

Lu, P., Shi, W., Wang, Q., Li, Z., Qin, Y., & Fan, X. (2021). Co-seismic landslide mapping using Sentinel-2 10-m fused NIR narrow, red-edge, and SWIR bands. *Landslides*, 18(6), 2017–2037. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01636-2>

MacDonald, H. C., & Grubbs, R. S. (1975). NASA Lyndon B. Johnson Space Center . In *NASA Earth Resources Survey Symposium Vol. 1-B* .

Mah, J., Samson, C., McKinnon, S. D., & Thibodeau, D. (2013). 3D laser imaging for surface roughness analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58, 111–117. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.08.001>

Mantovani, F., Soeters, R., & Van Westen, C. J. (1996). Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15(3–4), 213–225. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00071-C](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00071-C)

Meng, L., Yan, C., Lv, S., Sun, H., Xue, S., Li, Q., ... Yan, X. (2024). Synthetic Aperture Radar for Geosciences. *Reviews of Geophysics*, 62(3). Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2023RG000821>

Mohan, A., Singh, A. K., Kumar, B., & Dwivedi, R. (2021). Review on remote sensing methods for landslide detection using machine and deep learning. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(7). Retrieved from <https://doi.org/10.1002/ett.3998>

Mondini, A. C., Santangelo, M., Rocchetti, M., Rossetto, E., Manconi, A., & Monserrat, O. (2019). Sentinel-1 SAR Amplitude Imagery for Rapid Landslide Detection. *Remote Sensing*, 11(7), 760. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs11070760>

Ren, T., Gong, W., Bowa, V. M., Tang, H., Chen, J., & Zhao, F. (2021a). An Improved R-Index Model for Terrain Visibility Analysis for Landslide Monitoring with InSAR. *Remote Sensing*, 13(10), 1938. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs13101938>

Ren, T., Gong, W., Bowa, V. M., Tang, H., Chen, J., & Zhao, F. (2021b). An Improved R-Index Model for Terrain Visibility Analysis for Landslide Monitoring with InSAR. *Remote Sensing*, 13(10), 1938. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs13101938>

Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000a). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333–382. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/5.838084>

Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000b). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333–382. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/5.838084>

Santangelo, M., Cardinali, M., Bucci, F., Fiorucci, F., & Mondini, A. C. (2022). Exploring event landslide mapping using Sentinel-1 SAR backscatter products. *Geomorphology*, 397, 108021. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108021>

Shah Alam, M., & Oluoch, J. (2021). A survey of safe landing zone detection techniques for autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs). *Expert Systems with Applications*, 179, 115091. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115091>

Shano, L., Raghuvanshi, T. K., & Meten, M. (2020). Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review. *Geoenvironmental Disasters*, 7(1), 18. Retrieved from <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0>

Shi, C., Zuo, X., Zhang, J., Zhu, D., Li, Y., & Bu, J. (2024). Accuracy Assessment of Geometric-Distortion Identification Methods for Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar Imagery in Highland Mountainous Regions. *Sensors*, 24(9), 2834. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s24092834>

Simpson, M. L., & Hutchinson, D. P. (2005). IMAGING | Lidar. In *Encyclopedia of Modern Optics* (pp. 169–178). Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B0-12-369395-0/00720-X>

Tao, R., Lau, A., Mossefin, M. E., Kong, G., Nordal, S., & Pan, Y. (2025). Monitoring of ground displacement-induced railway anomalies using PS-InSAR techniques. *Measurement*, 248, 116863. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116863>

Van Asch, T., Corominas, J., Greiving, S., Malet, J.-P., & Sterlacchini, S. (Eds.). (2014). *Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance* (Vol. 34). Dordrecht: Springer Netherlands. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6769-0>

Van Westen, C. J. (2013). Remote sensing and GIS for natural hazards assessment and disaster risk management. *Treatise on Geomorphology*, 3(15), 259–298.

Vecchiotti, F., Tilch, N., & Kociu, A. (2021). The Use of TERRA-ASTER Satellite for Landslide Detection. *Geosciences*, 11(6), 258. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/geosciences11060258>

Wang, Z. (2020a). Review of real-time three-dimensional shape measurement techniques. *Measurement*, 156, 107624. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107624>

Wang, Z. (2020b). Review of real-time three-dimensional shape measurement techniques. *Measurement*, 156, 107624. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107624>.

Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry:

Current issues and future perspectives. *Engineering Geology*, 174, 103–138. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.003>

Xu, Q., Zhao, B., Dai, K., Dong, X., Li, W., Zhu, X., ... Ge, D. (2023). Remote sensing for landslide investigations: A progress report from China. *Engineering Geology*, 321, 107156. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107156>

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and control* (pp. 11–33). Washington, DC: Transportation Research Board, National Academy of Sciences.

Yiğit, E. (2019). Yapay açıklıklı radar görüntüleme algoritmalarının karşılaştırılması. *Turkish Journal of Remote Sensing*, 1(1), 1–7. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/tuzal/issue/50531/644282>

Zeybek, M., & Şanlıoğlu, İ. (2013). *Heyelanların İzlenmesinde Yersel Lazer Tarama Tekniklerinin Kullanılması Üzerine Araştırmalar*.

Zhong, C., Liu, Y., Gao, P., Chen, W., Li, H., Hou, Y., Ma, H. (2020). Landslide mapping with remote sensing: challenges and opportunities. *International Journal of Remote Sensing*, 41(4), 1555–1581. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1672904>

Zhu, Z., Qiu, S., & Ye, S. (2022). Remote sensing of land change: A multifaceted perspective. *Remote Sensing of Environment*, 282, 113266. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113266>

MAFİK VE ULTRAMAFİK KAYAÇLARDA ALTERASYON SÜREÇLERİ: PETROGRAFİ, JEOKİMYA VE JEODİNAMİK ANLAM

TİJEN ÜNER⁵
İREM AKSOY⁶

Giriş

Mafik ve **ultramafik kayaçlar**, mineral bileşimlerine göre sınıflandırılan magmatik kayaçlardır. **Mafik kayaçlar**, %45–52 arasında silika (SiO_2) içerir ve bol miktarda **piroksen**, **plajiolaz** ve az miktarda **olivin** gibi minerallerden oluşur. **Bazalt**, **gabro** ve **diyabaz** tipik örnekleridir. **Ultramafik kayaçlar** ise genellikle %45'ten daha az silika içerir ve büyük ölçüde **olivin**, **ortopiroksen** ve **klino-piroksen** gibi mafik minerallerden oluşur; **peridotit**, **harzburjit**, **dunit** ve **wehrlit** en yaygın örnekleridir (Winter, 2010; Deer et al., 2013).

Bu kayaç grupları, yer kabuğunda, manto ve alt kabuk kesimlerinde yaygın olarak bulunur. Özellikle okyanus litosferinin

⁵ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6059-9148

⁶ Arş. Gör. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9969-0627

bileşenleri olan ofiyolitik dizilerde, yay ile ilişkili volkanizmada ve yay ardı sistemlerinde yüzeylenerek jeodinamik süreçlerin anlaşılmasında önemli veriler sunarlar (Coleman, 1977; Shervais, 2001). Ancak yüzeye çıktıklarında ya da yer kabuğunun üst kesimlerinde bulunduklarında, çeşitli fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kalarak **alterasyon** (bozulma/dönüşüm) süreçlerine girerler.

Alterasyon, bir kayaçta meydana gelen mineralojik ve kimyasal değişimleri ifade eden genel bir terimdir. Bu süreçler, hidrotermal sıvılar, atmosferik koşullar, deniz suyu, yeraltı suyu ya da magmatik gazların etkisiyle gerçekleşebilir (Alt et al., 1986; Pirajno, 2009; Beane, 1982; Lowell & Guilbert, 1970). **Mineral alterasyonu**, bir mineralin kimyasal bileşiminin veya kristal yapısının doğal süreçlerle değişmesi anlamına gelir. Bu değişim, mineralin dış şeklini koruyarak da gerçekleşebilir (**psödomorf**). Alterasyon, **metamorfizma** ve **hava etkisiyle ayrışma (weathering)** süreçlerinden farklıdır; ancak bu süreçler alterasyonu destekleyebilir. Mafik ve ultramafik kayaçlarda görülen alterasyon tipleri, yalnızca mineraloji ve petrografi açısından değil, aynı zamanda jeokimyasal element taşınımı, ekonomik metal zenginleşmeleri ve tektonik geçmişin yeniden kurulması açısından da büyük öneme sahiptir (Evans, 2004).

Bu bölümde, **mafik ve ultramafik kayaçlarda yaygın olarak gözlenen alterasyon türleri** detaylı bir şekilde ele alınacak; özellikle **serpantinleşme, rodenjitleşme, propilitik alterasyon, hidrotermal değişim süreçleri ve metasomatik etkiler** üzerinde durulacaktır. Ayrıca bu alterasyon süreçlerinin jeokimyasal göstergeleri, indeksler aracılığıyla (örn. CIA, PIA) ve görsel diyagramlarla desteklenerek açıklanacaktır.

Alterasyonun Kontrol Edici Faktörleri

Mafik ve ultramafik kayaçların alterasyonu, yalnızca kayaç bileşimiyle değil, aynı zamanda içinde bulundukları çevresel ve tektonik koşullarla da doğrudan ilişkilidir. Alterasyonun şekli, şiddeti ve mineralojik sonuçları, bir dizi fiziksel ve kimyasal parametre tarafından kontrol edilir. Bu faktörlerin anlaşılması, alterasyon süreçlerinin kökenini ve zamanlamasını doğru yorumlayabilmek açısından kritik öneme sahiptir (Evans, 2004; Frost & Beard, 2007).

Sıcaklık ve Basınç

Alterasyonun gerçekleşme biçimi büyük ölçüde sıcaklık ve basınca bağlıdır. Yüksek sıcaklık koşulları altında, özellikle 300–500 °C aralığında gerçekleşen serpantinleşme gibi süreçler, düşük sıcaklıklı alterasyonlara göre daha hızlı ve yaygın mineral değişimlerine neden olabilir (Guillot & Hattori, 2013). Basınç ise, özellikle derinlik ve tektonik konumla birlikte, sıvıların dolaşımını ve mineral stabilitesini etkiler.

Akışkan Bileşimi ve pH

Alterasyonu tetikleyen en önemli etkenlerden biri de akışkanların bileşimidir. Deniz suyu, meteoritik sular, magmatik sıvılar ya da metamorfik kökenli akışkanlar farklı derecelerde mineral çözünürlüğü ve yeniden kristalleşme sağlar. Örneğin, yüksek pH'lı bazik akışkanlar serpantin ve klorit gibi Mg-Fe zengin minerallerin oluşumunu desteklerken, düşük pH'lı asidik akışkanlar silisleşme ve alüminli fazların oluşumunu teşvik eder (Pirajno, 2009; Beane, 1982; Cathelineau & Nieva, 1985).

Kayaç Mineralojisi ve Yapısal Özellikler

Kayaç içeriğindeki **olivin**, **piroksen** ve **plajioklaz** gibi minerallerin reaktivitesi, alterasyonun hızını ve ürünlerini belirler.

Örneğin, olivin magnezyum açısından zengin olduğundan kolayca serpentine dönüşebilir. Ayrıca çatlaklar, faylar ve mikroyapılar, akışkanların taşınmasını kolaylaştırarak lokal alterasyon zonları oluşturabilir (Bach et al., 2006).

Zaman (Alterasyon Süresinin Uzunluğu)

Alterasyonun süresi de mineral dönüşümünü doğrudan etkiler. Kısa süreli hidrotermal sistemlerde yüzeysel alterasyonlar gözlenirken, uzun süreli düşük sıcaklık etkileri altında daha derinlemesine kimyasal değişimler meydana gelir. Bu durum, özellikle ofiyolit komplekslerinde gözlenen farklı serpantin fazlarının (lizardit vs antigorite) oluşumuyla kendini gösterir (Evans, 2004).

Alterasyon türleri

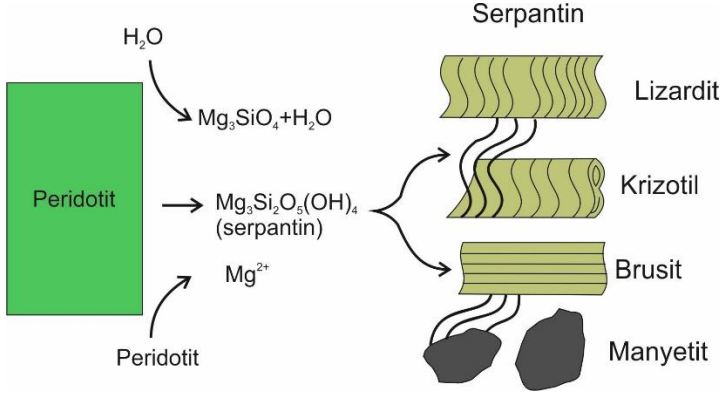
Serpantinleşme

Serpantinleşme, özellikle ultramafik kayalar (başta peridotit, harzburgit ve dunit olmak üzere) içerisinde bulunan olivin ve piroksen gibi minerallerin suyla reaksiyona girerek serpantin grubu minerallere dönüşmesiyle gerçekleşen yaygın bir alterasyon sürecidir. Bu dönüşüm, lizardit, krizotil ve antigorit gibi serpantin minerallerinin oluşumunu içerir ve başta okyanus kabuğu, dalma-batma zonları ve ofiyolit kompleksleri olmak üzere çeşitli tektonik ortamlarda karakteristik bir süreç olarak karşımıza çıkar (Evans, 2004; Bach et al., 2006).

Serpantinleşme reaksiyonları içinde en yaygın olanı olivin üzerinden gerçekleşir. Bu süreçte Mg_2SiO_4 ile H_2O 'nun reaksiyona girmesi sonucunda $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ (serpantin minerali) ve Fe_3O_4 (manyetit) oluşur (Şekil 1). Reaksiyon esnasında hidrojen iyonlarının tüketilmesi pH'ın yükselmesine neden olurken, aynı zamanda hidrojen gazı üretimi de gözlemlenebilir. Bu yönüyle

serpantinleşme, hidrotermal sistemlerde yaşamın kökeniyle ilişkili olabilecek bir kimyasal enerji kaynağı olarak değerlendirilmiştir (Russell et al., 2010).

Şekil 1: Peridotitlerin serpantinleşmesinin şematik anlatımı



Ortaya çıkan serpantin minerallerinin özellikleri sıcaklık koşullarına bağlı olarak farklılık gösterir. Düşük sıcaklıklarda (100–300 °C) stabil olan lizardit yaygın olarak gözlenirken, lifsi yapısıyla karakterize olan krizotil genellikle damar dolgularında gelişir. Antigorite ise 300 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda daha stabil bir mineral fazı oluşturur. Bu mineraller sıklıkla brusit, manyetit ve yer yer klorit ile birlikte bulunur. Özellikle manyetit oluşumu, kayalarda hem hacim artışına (%20–40) hem de manyetizasyonun belirginleşmesine neden olur.

Petrografik açıdan, serpantinleşmiş kayalarda olivin tanelerinin yerini lifsi-serpantin mineralleri alırken, manyetit varlığına bağlı olarak opak zonlar gelişir. Jeokimyasal olarak, bu süreç Mg/Si oranında artışa ve Al içeriğinde azalmaya neden olur. Ayrıca, Serpantinleşme sırasında uçucu bileşiklerin tutulması nedeniyle LOI (Loss on Ignition) değeri genellikle %10–14 arasında yükselir.

Bu dönüşüm süreci, sadece mineralojik değil, aynı zamanda jeodinamik ve ekonomik açılardan da büyük önem taşır. Yitim zonlarında suyun taşınımında kritik bir rol oynayan serpantinleşme, aynı zamanda kabuk-manto etkileşimlerinin modellenmesinde, chrysotile formundaki asbest oluşumlarında, hidrotermal ortamlarda Co–Ni–Cr gibi metallerin zenginleşmesinde ve karbon mineralizasyonu ile hidrojen üretimi gibi yenilenebilir enerji potansiyeli taşıyan süreçlerde etkili olmaktadır (Klein et al., 2009).

Rodenjitleşme

Rodenjitleşme, serpantinleşmiş ultramafik kayalarla temas halindeki gabro, diyabaz ve bazaltik bileşimli kayaların, yüksek pH değerine sahip serpantinli sıvılarla metasomatik etkileşimi sonucu gelişen önemli bir alterasyon sürecidir. Bu süreç sonucunda oluşan kayalar "rodengit" olarak adlandırılır. Özellikle ofiyolit komplekslerinde ve yitim zonlarında, gabro–peridotit kontağı boyunca ya da serpantinleşmiş ultramafik kayaları kesen diyabaz dayklarının çevresinde yaygın olarak gözlenir. Rodenjitleşme genellikle 150–300 °C sıcaklık aralığında, pH'nın yaklaşık 10–11 olduğu ve Ca etkinliğinin yüksek olduğu koşullarda meydana gelir.

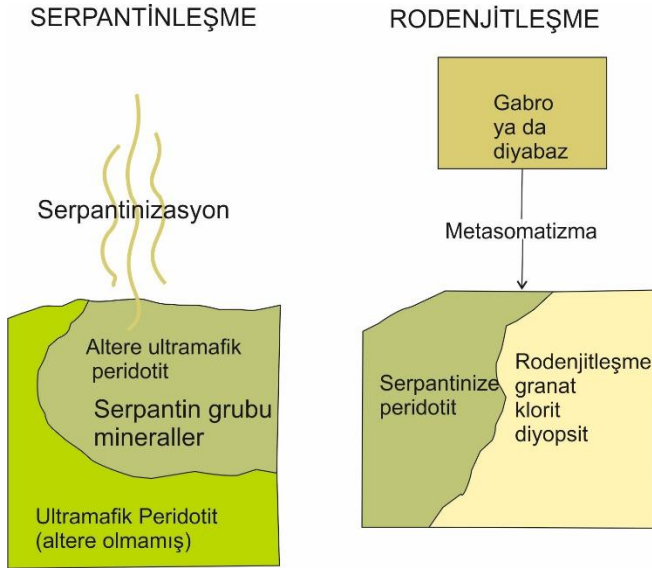
Bu alterasyon sürecinde, serpantinleşme sırasında oluşan bazik, kalsiyum açısından zengin sıvılar, gabro gibi kayaları kimyasal olarak değiştirerek Ca içeriği yüksek yeni minerallerin oluşumuna neden olur (Şekil 2). Özellikle plajioklaz minerallerinin serpantinli sıvılarla etkileşimi, grossular (Ca–Al granatı), diopsit, vesuvianit ve klorit gibi yeni fazların gelişmesine yol açar. Tipik bir reaksiyon bu dönüşümü şöyle yansıtır:

Plajioklaz + Serpantinli sıvı → Grossular + Diopsit + Vesuvianit + Klorit.

Bu süreçte gerçekleşen jeokimyasal değişiklikler dikkat çekicidir. Özellikle Si, Na ve K gibi elementler sistemden

uzaklaştırılırken, Ca, Al ve Fe mobil hale gelir. Mg ise genellikle sabit kalır. Rodenjitleşme ile birlikte tipik olarak gelişen mineraller arasında grossular, diopsit, vesuvianit, epidot, klorit, hidrogranat ve yer yer prehnit yer alır. Bu mineral topluluğu, düşük sıcaklıkta ve yüksek pH'da gerçekleşen sıvı–kayaç etkileşimlerinin karakteristik ürünleri olarak değerlendirilir.

Şekil 2: ultramafik peridotitlerin önce serpantinleşmesi daha sonrasında da diyabaz daklarıyla alterasyona uğrayarak rodenjitleşmesini gösteren şematik çizim.



Petrografik olarak, rodenjitler çoğunlukla bantlı veya masif yapılar sergiler. Granat ve epidot damarları belirgin bir şekilde gelişmiş olup, ince kesitlerde genellikle granat + klorit + diopsit paragenesi baskındır. Jeokimyasal açıdan bakıldığında, Ca ve Al mobilitesinde belirgin bir artış gözlenirken, Na ve K içerikleri azalmış, Mg oranı ise genellikle sabit kalmıştır. Silisyum miktarı çoğunlukla sabit kalmakla birlikte bazı örneklerde hafif azalmalar da görülebilir.

Rodenjitler, yitim zonlarında gerçekleşen metasomatik süreçlerin doğrudan izini taşımaları bakımından önemlidir. Aynı zamanda ofiyolitlerdeki sıvı-kayaç etkileşimlerini anlamada temel veri kaynaklarından biridir. CO₂ ve H₂O gibi uçucu bileşiklerin döngüsüyle ilişkilendirilen bu süreçler, yüksek pH koşullarının jeokimyasal etkilerini anlamak açısından da kritik bir rol oynar.

Kloritleşme

Kloritleşme, mafik ve ultramafik bileşimli kayalarda yaygın olarak gözlenen ve özellikle Fe-Mg açısından zengin minerallerin-başlıca biyotit, amfibol ve piroksenin- klorit grubu minerallere dönüşmesiyle gerçekleşen önemli bir alterasyon türüdür. Bu süreç, hidrotermal sistemler, metamorfik geçiş zonları ve metasomatik ortamlarda gelişerek, çeşitli jeolojik bağlamlarda karakteristik petrografik ve kimyasal izler bırakır.

Kloritleşme genellikle su ile zenginleştirilmiş ortamlarda meydana gelir. Örneğin biyotit amfibolyada piroksen gibi silikat mineralleri, hidrotermal akışkanlarla etkileşime girdiklerinde klorit minerallerine dönüşürken, potasyum ve silisyum gibi elementler sistemden uzaklaştırılır. Piroksen de Fe-Mg açısından zengin bir mineral olup, hidrotermal ya da düşük dereceli metamorfik ortamlarda klorit minerallerine dönüşebilir. Bu durumda reaksiyon örneği şu şekilde revize edilebilir:

Piroksen + H₂O → Klorit + SiO₂ + (Fe²⁺, Mg²⁺) çözeltiye geçebilir

Bu reaksiyon, piroksenin kimyasal bileşimine bağlı olarak değişiklik gösterebilir (örneğin ortopiroksen veya klinopiroksen olmasına göre), fakat genel olarak Fe-Mg kloritlerin (özellikle chamosit veya clinochlor) oluşumuna yol açar. Ayrıca, bu dönüşüm sırasında çözünebilen Fe²⁺, Mg²⁺ ve SiO₂'nin bir kısmı ortamdan

uzaklaştırılabilir veya diğer minerallerin kristallenmesine katkı sağlayabilir.

Ortaya çıkan klorit mineralleri, bileşimlerine göre sınıflandırılır. Fe bakımından zengin olanlar *chamosit*; Mg yönünden zengin olanlar ise *clinochlor* olarak adlandırılır. Bu mineraller çoğunlukla serisit, epidot ve kuvars gibi fazlarla birlikte bulunur. Kloritler, yeşil renkleri, levha-dokuları ve mikrolitik kristal alışimlarıyla ayırt edilirler. Mikroskop altında ise pleokroizm ve düşük röliyef gibi optik özellikleriyle tanınırlar. Piroksen ve amfibol minerallerinin kenarlarında gelişen klorit zonları, alterasyonun petrografik olarak en belirgin göstergeleri arasında yer alır.

Jeokimyasal olarak, kloritleşmiş bölgelerde SiO_2 , Na ve K miktarlarında azalma görülürken, FeO ve MgO içerikleri sabit kalabilir veya hafif artış gösterebilir. Al_2O_3 mobil hale gelebilirken, kayacın uçucu madde içeriğini temsil eden LOI (Loss on Ignition) değeri artar ve bu süreç K/Na oranının düşmesiyle de karakterize edilir.

Kloritleşme, yalnızca petrografik açıdan değil, aynı zamanda jeolojik ve ekonomik bağlamda da önemlidir. Özellikle hidrotermal alterasyon zonlarının belirlenmesinde kritik bir gösterge olan klorit, porfiri tipi maden sistemlerinde serisit–klorit zonunun tanınmasında kullanılır. Ayrıca, orta dereceli metamorfik fasiyeslerde yaygın olarak gözlenir ve Cu–Fe gibi ekonomik öneme sahip metallerin taşınımı ve yeniden çökmesi süreçlerinde etkili olabilir.

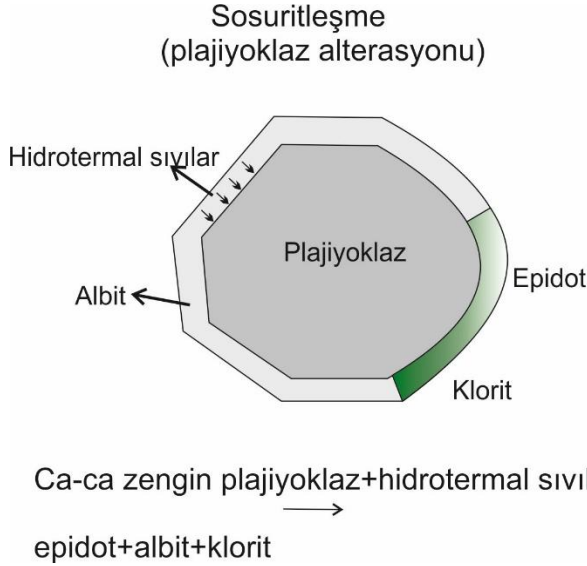
Sosuritleşme ve Serisitleşme

Plajiolaz minerallerinin alterasyonu, düşük dereceli metamorfik koşullar ve hidrotermal akışkanlarla etkileşim sonucu farklı mineral dönüşümleriyle gerçekleşen karmaşık jeokimyasal süreçleri içerir. Bu süreçler arasında özellikle iki önemli alterasyon türü dikkat çeker: **Sosuritleşme** ve **serisitleşme**. Her iki süreç de,

gerek jeodinamik ortamlarda gerçekleşen mineral değişimleri açısından gerekse ekonomik maden yataklarının tanımlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Sosuritleşme, başta gabro, diyabaz ve bazalt gibi mafik bileşimli kayalarda bulunan kalsiyumca zengin plajioklazların, yeşilist fasiyesi koşullarında — yaklaşık 250 ila 450 °C arasında — epidot, albit, klorit ve prehnit gibi yeni minerallere dönüşmesiyle karakterize edilir (Şekil 3). Bu dönüşüm, hidrotermal sıvıların etkisiyle plajioklaz yapısındaki Ca ve Na'nın yeniden dağılmasıyla gerçekleşir. Bu elementlerden sodyum albitin kristal kafesine entegre olurken, kalsiyum daha çok epidot oluşumunda rol oynar. Alüminyum, kısmen mobil olup yeni oluşan epidot ve klorit minerallerine bağlanırken, silisyum genellikle sabit kalır ya da kuvars fazı olarak çökelir. Potasyum ise sistemden uzaklaştırılırken, stronsiyum gibi iz elementler mobil hale geçerek sistem dışına taşınabilir. Bu süreç sonunda epidot, albit, klorit ve yer yer prehnit gibi mineraller gelişir. Petrografik olarak, Sosuritleşme geçirmiş plajioklazlarda granüler veya mozaik dokulu epidot gelişimi, albitleşmiş kenarlar ve kırıklı dokular yaygın olarak gözlenir. İnce kesitlerde ise epidot, klorit, kuvars ve albit birlikteliği tipiktir. Mikroskop altında, epidot yüksek röliyeyle dikkat çekerken, albit daha mat bir görünüme sahiptir. Jeokimyasal açıdan bu alterasyon; Na₂O içeriğinde artış, CaO ve Sr'da düşüş, LOI'de ise artış ile karakterizedir. Bu değişimler, hidrotermal sıvıların kimyasal bileşimi ve kayalarla etkileşim süresine bağlı olarak farklılık gösterebilir.

Şekil 3: Plajiyoklaz minerallerinin sosuritleşmesinin şematik çizimi.



Buna karşılık, serisitleşme daha çok felsik bileşimli kayalar ile biyotit gibi Al bakımından zengin mineralleri içeren mafik kayalarda yaygın olarak gözlenen bir alterasyon türüdür. Bu süreç, plajiyoklaz, K-feldispat ve biyotitin, ince taneli beyaz mika grubu mineraller olan serisit, muskovit ya da illit lehine dönüştüğü bir reaksiyonla tanımlanır. Serisitleşme, asidik karakterli hidrotermal akışkanlarla ilişkili olup, özellikle porfiri tipi Cu, epitermal Au–Ag ve volkanik masif sülfür (VMS) yataklarının alterasyon zonlarında yaygın olarak gözlenir. Plajiyoklazın çözünmesiyle başlayan bu süreçte, potasyum açısından zengin sıvılar minerale yeniden girerek serisit oluşumunu tetiklerken, eşlik eden reaksiyonlarla kuvars, klorit ve hematit gibi fazlar da gelişebilir. Sürecin ileri evrelerinde kaolinit gibi alterasyon ürünleri gözlenebilir. Jeokimyasal olarak, serisitleşme sırasında K_2O içeriği belirgin şekilde artar; Na_2O ve CaO ise düşer. Al_2O_3 miktarı genellikle sabit kalır ya da hafifçe artar. Silisyum içeriği kuvars oluşumuna bağlı olarak değişkenlik gösterebilirken, LOI değeri bu süreçte artış eğilimi gösterir.

Petrografik düzeyde, serisitleşmiş plajiyoklaz mineralleri ipeksi parlaklıkta serisit kümeleriyle tanınır. Mikroskop altında lifsi dokular, muskovit benzeri pleokroizm ve yüksek çift kırılma gibi özellikler serisitin ayırt edilmesinde kullanılır. Serisitleşmiş alanlarda feldspatlar bulutlu ve opak bir görünüme kavuşur, serisit birikimleri ise çoğunlukla kristal kenarlarında veya çatlak zonlarında yoğunlaşır.

Tablo: Sosuritleşme ve serisitleşme olaylarının karşılaştırmalı tablosu

Özellik	Sosuritleşme	Serisitleşme
Ortam	Mafik kayalar	Felsik/mafik kayalar
Sıcaklık	250-450°C	150-300°C
Temel reaksiyon	Ca-Plajiyoklaz→ epidot+albit+klorit	Ca-Na plajiyoklaz →serisit+kuvars
pH	Nötr-hafif bazik	asidik
Element taşınımı	Ca, Na, Sr taşınımı	K artışı, Na-Ca kaybı
Ortam	Ofiyolit, Düşük dereceli metamorfizma	Porfiri, epitermal, VMS sistemleri

Her iki alterasyon süreci de yalnızca mineralojik bir dönüşümü temsil etmekle kalmaz, aynı zamanda jeodinamik sistemlerdeki sıvı-kayaç etkileşimlerinin izlerini taşır. Sosuritleşme, ofiyolit serilerinde alterasyon paternlerinin anlaşılmasında ve porfiri sistemlerde derin alterasyon zonlarının izlenmesinde önemli veriler sunarken, serisitleşme filon kenar zonlarının tanımlanması ve Cu–Au taşınım yollarının belirlenmesinde jeokimyasal bir gösterge olarak kullanılır. Ayrıca, her iki süreç de ortamın pH'ı, sıcaklık koşulları, element mobilitesi ve akışkan bileşimi gibi temel parametrelerin çözülmesinde jeolojik modellemeye katkı sağlar.

Albitleşme

Albitizasyon, plajioklaz, K-feldispat ve diğer feldispat minerallerinin sodyumca zengin hidrotermal sıvılarla etkileşerek albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) lehine dönüşmesiyle gerçekleşen önemli bir alterasyon türüdür. Bu süreç genellikle felsik ve orta mafik intrüzif kayalarda, albit granitlerinde ve metamorfitleerde görülür ve hem hidrotermal hem de metasomatik sistemlerde gelişebilir. Albitizasyon sıklıkla serisitleşme ve kloritleşme gibi diğer alterasyon türleriyle birlikte gözlemlenir. Tipik olarak, kalsiyumca zengin plajioklaz minerali sodyum iyonlarının etkisiyle albit minerallerine dönüşür; bu süreçte plajioklazdaki kalsiyum uzaklaşırken yerine sodyum girer. Oluşan albit mineralleri genellikle epidot, klorit ve kuvars gibi eşlikçi fazlarla birlikte bulunur. Petrografik olarak albit, ince taneli, opak olmayan ve düşük ikizlenmeli bir yapı sergiler; düşük röliyef, zayıf pleokroizm ve düşük çift kırılma özellikleriyle ayırt edilir. Mozaikleşmiş veya mikrogranüler doku biçimlerinde gelişen albit zonları, genellikle primer feldispatların içinde veya damar kenarlarında yoğunlaşır. Jeokimyasal olarak albitizasyon sürecinde Na_2O içeriği artarken, CaO ve K_2O azalır ya da sabit kalır; Al_2O_3 ise genellikle değişmeden kalır. Ayrıca, Sr içeriğinde azalma gözlemlenir; bu, plajioklazın sistemden uzaklaşmasıyla ilişkilidir. Bu alterasyon türü, sodyum metasomatizmasının belirgin bir göstergesi olup, uranyum-toryum mineralizasyonları, kalay-volfram filonları ve alkali ile peralkalin magmatik sistemlerle bağlantılıdır. Ayrıca karbonatit-alkali kompleksler, tersiyer dönem granitoyit intrüzyonları ve kuvars damar zonlarında yaygın şekilde gözlenir. Ofiyolitlerde ise, serpantinleşmiş ultramafik birimlere yakın konumlanan gabroik kayalarda gelişmesiyle bilinir. Böylece albitizasyon, hem jeolojik evrim sürecinin anlaşılmasında hem de ekonomik açıdan önemli maden yataklarının belirlenmesinde kritik bir rol oynar.

Epidotlaşma

Epidotlaşma, kayalardaki özellikle plajiolaz, amfibol ve piroksen gibi kalsiyum ve alüminyum içeren minerallerin, hidrotermal alterasyon etkisiyle epidot ($\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$) minerali lehine dönüşmesiyle karakterize edilen yaygın bir alterasyon türüdür. Bu süreç, genellikle orta sıcaklık aralığında, yaklaşık 250 ila 400 °C'de, kalsiyum ve alüminyumca zengin hidrotermal akışkanların etkisiyle gelişir ve özellikle mafik kayalar ile bunların metamorfik eşleniklerinde, örneğin bazalt, gabro ve diyabaz gibi kayalarda yaygın olarak gözlemlenir. Aynı zamanda porfiri sistemler, Volkanik Kaynaklı Masif Sülfür (VMS) yatakları ve ofiyolitik kompleksler gibi jeodinamik ortamlarda da epidotlaşma önemli bir alterasyon evresi olarak karşımıza çıkar. Alterasyon sürecinde epidot, yüksek röliyepli ve ortorombik yapıya sahip, renkli bir mineral olarak ortaya çıkar ve genellikle klorit, albit, kuvars ile birlikte bulunur; zaman zaman aktinolit veya titano-manyetit gibi mineraller de eşlik edebilir. Plajiolazın kalsiyum ve alüminyum içeriği, epidot kristalleşmesini desteklerken, bu dönüşüm sırasında feldispat ve amfibol gibi minerallerin parçalanması epidotun gelişimine olanak tanır. Eğer epidot kristalizasyonu yoğunlaşırsa, damarsal zonlar veya yaygın matriks alterasyonu şeklinde mineral dağılımları gözlenebilir.

Jeokimyasal açıdan epidotlaşma süreci, kalsiyum oksit (CaO) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) içeriğinin epidot fazının oluşmasıyla korunmasını ya da artmasını sağlar. Buna karşın, feldispatların çözünmesi nedeniyle sodyum oksit (Na_2O) ve potasyum oksit (K_2O) oranları azalır. Hidratlı minerallerin oluşmasıyla birlikte kayıplar (LOI) artarken, stronsiyum (Sr) konsantrasyonları plajiolazın çözünmesi sebebiyle azalabilir (Bird et al., 2004). Silisyum dioksit (SiO_2) ise serbest kuvars olarak ayrışabilir veya hareketli kalabilir; bu da epidotlaşma sırasında

gözlenen mineraloji ve kimyasal denge üzerinde etkili olur. pH genellikle nötr ile hafif alkali aralığında seyretmektedir. Ayrıca, epidotlaşma derecesinin ve evresinin belirlenmesinde isokon analizleri ile özellikle kalsiyum ve alüminyum davranışı detaylı biçimde incelenir.

Petrografik olarak epidot, çoğunlukla yeşilimsi-sarımsı tonlarda, yüksek röliyeveli ve tanecikli bir yapıya sahiptir; bazen damarsal formasyonlar şeklinde de görülebilir. Plajiolaz kristallerinde, çatlaklarda veya mikrolit olarak ince dağılmış epidot mineralleri, kimi zaman ise plajiolazın tamamen epidotla yer değiştirmesi sıkça rastlanan görüntülerdir. Polarizan mikroskop altında epidot minerali zayıf pleokroizm gösterirken, yüksek çift kırılma özelliğine sahiptir ve genellikle ince mozaik doku yapısında bulunur. Sıklıkla epidot ve klorit minerallerinin birlikte olduğu parajenezler de gözlenir.

Jeolojik ve jeodinamik açıdan epidotlaşma, orta dereceli hidrotermal sistemlerde akışkan hareketini ve etkileşimini ortaya koyan önemli bir göstergedir. Porfiri bakır ve altın yataklarında potasik alterasyon zonunun alt sınırlarını belirleyebilirken, ofiyolitik komplekslerde gabro, peridotit ve serpantinleşmiş kayaların sınır bölgelerinde epidotlaşma zonları gelişir. Ayrıca, greenschist fasiyesi metamorfik kuşaklarında epidot-klorit zonları yaygın şekilde bulunur. Epidot damarlanması, kayaç geçirgenliği ve hidrotermal sıvı geçiş yolları hakkında değerli bilgiler sunarak, hem jeolojik süreçlerin hem de mineral yataklarının oluşum mekanizmalarının anlaşılmasında kritik bir rol oynar.

Jeokimyasal Göstergeler ve Alterasyon İndeksleri

Alterasyon süreçlerinin tanımlanması ve kantitatif olarak değerlendirilmesi, kayaç-akışkan etkileşiminin evrimini anlamak açısından büyük önem taşır. Mineralojik gözlemler alterasyonun

varlığını gösterse de, bu süreçlerin derecesi ve yayılımı ancak jeokimyasal verilerin analiziyle güvenilir biçimde ortaya konabilir. Bu amaçla, **mobil–immobil element davranışları, majör ve iz element oranları**, ve çeşitli **alterasyon indeksleri** kullanılır (Gresens, 1967; Grant, 1986). Bunlar aşağıda özetlenmiştir:

Element Davranışı: Mobil vs. İmmobil

Jeokimyasal alterasyon değerlendirmelerinde en yaygın yaklaşım, elementlerin taşınıp taşınmadığının belirlenmesidir. Bu amaçla değerlendirmeler aşağıdaki tabloda özetlenmektedir.

Tablo: Belirli elementlerin alterasyon sırasındaki davranışları

Element Grubu	Genel davranış	Açıklama
Al, Ti, Zr, Nb, Y	İmmobil	Kristal yapı içinde sabit kalan, alterasyon sırasında sistemde korunur
Na, K, Ca, Mg	Mobil	Feldspat, amfibol ve klorit minerallerinden ayrılarak taşınabilir
Si	Değişken	Silisleşme sırasında çözünür veya çökelir
Fe, Mn	Hafif mobil	Redoks koşullarına bağlı olarak mobilite kazanabilir

Mobiliteye bağlı olarak **kütle değişim hesaplamaları, isocon diyagramları** ve **alterasyon indeksleri** uygulanır. Bu indeksler ve açıklamaları aşağıda sunulmaktadır.

Isocon Diyagramları

Grant (1986) tarafından geliştirilen bu yaklaşımlar, bir kayada alterasyon öncesi ve sonrası bileşimleri kıyaslayarak hacimsel değişimi ve element mobilitesini kantitatif olarak hesaplar.

- Alterasyona uğramamış protolitin bileşimi y eksenine, altere kayaç bileşimi x eksenine yerleştirilir.
- İmmobil elementler doğrusal bir “isocon” üzerinde sıralanır.
- Bu doğruya göre **pozitif sapmalar zenginleşmeyi, negatif sapmalar kaybı** gösterir.
- Yaygın olarak kullanılan immobiller: **Ti, Zr, Al, Nb, Y**

CIA – Chemical Index of Alteration (Nesbitt & Young, 1982):

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO * + Na_2O + K_2O} \times 100$$

- CaO*, karbonat ve apatit dışı Ca’yi ifade eder.
- Orijinal feldispatın ayrışma derecesini gösterir.
- %50: taze feldispat, %100: tamamen altere olmuş (kaolinit, gibbsit vb.)
-

CIA Değeri	Yorum
< 50	Taze kayaç
50–60	Zayıf alterasyon
60–80	Orta dereceli alterasyon
>80	Kuvvetli alterasyon

PIA – Plagioclase Index of Alteration (Fedo et al., 1995):

$$PIA = \frac{Al_2O_3 - K_2O}{Al_2O_3 + CaO * + Na_2O - K_2O} \times 100$$

Özellikle plajioklaz alterasyonunu izlemek için geliştirilmiştir. PIA değeri > 60 ise ileri düzey feldispat ayrışmasını işaret etmektedir.

Bazı element oranları, belirli alterasyon süreçlerini tanımlamak için kullanılır:

Oran	Yorum
K ₂ O/Na ₂ O	Potasik alterasyon artışı (ör. serisitleşme)
MgO/Fe ₂ O ₃	Kloritleşme, epidotlaşma
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	Silikatça zenginleşme, alterasyon düzeyi
CaO/Na ₂ O	Albitizasyon ve epidotlaşma izleyicisi
Sr/Nb, Sr/Zr	Plajioklaz bozunması göstergesi
Rb/Sr	Serisitleşme göstergesi

A–CN–K Üçgen Diyagramı

Nesbitt & Young (1984) tarafından geliştirilen bu diyagramda:

- A: Al₂O₃
- CN: CaO* + Na₂O
- K: K₂O

Alterasyon düzeyine göre noktalar CN'den A'ya kayar. Serisitleşme durumunda **K yönüne**, yoğun leşleşme veya kaolinleşmede **A köşesine** ilerlenir.

Termodinamik ve Kinetik Temeller

Mineral alterasyonu süreçlerinin anlaşılması, bu reaksiyonların termodinamik ve kinetik prensiplerine dayanmaktadır. Termodinamik, bir sistemin enerji durumunu ve reaksiyonların gerçekleşebilirliğini belirlerken, kinetik reaksiyon hızlarını ve dolayısıyla sürecin mekaniğini kontrol eder (Brantley et al., 2008).

Alterasyonun Termodinamik Temeli

Alterasyon reaksiyonları, mineral ve sıvı fazların kimyasal potansiyellerine bağlıdır. Bir reaksiyonun gerçekleşebilmesi için Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG) negatif olmalıdır (Drever, 1997). Örneğin, serpantinleşme gibi ultramafik kayaç alterasyonlarında, yüksek pH'lı hidrotermal sıvılarla etkileşim sonucunda minerallerin stabilize olması bu termodinamik koşullara bağlıdır.

Sıcaklık ve Basınç Etkisi

Sıcaklık, reaksiyon hızlarını artırdığı gibi, mineral fazlarının kararlılık sınırlarını da değiştirir (Spear, 1993). Düşük sıcaklıklarda kinetik engeller daha belirginken, yüksek sıcaklıklar mineral dönüşümlerini hızlandırır. Basınç ise özellikle derin metamorfik ve ofiyolitik ortamlarda mineral dengelerini etkiler.

Reaksiyon Kinetiği

Alterasyonun kinetiği, minerallerin çözünme hızları, sıvıların hareketi ve mineral yenilenme mekanizmaları ile kontrol edilir. Örneğin, kloritleşme ve Sosuritleşme gibi süreçlerde minerallerin dönüşüm hızları, ortamın pH'sı ve sıvı-mineral temas alanına bağlı olarak değişir (Beane, 1982; Yardley, 1989).

Alterasyon Zonları ve Alan İlişkilendirmesi

Alterasyon zonları, kayaçların hidrotermal ve metasomatik süreçlerle değişime uğradığı belirli mineral ve kimyasal bileşim farklılıkları gösteren bölgeler olarak tanımlanır. Bu zonlar, madencilik ve jeodinamik çalışmalarda önemli göstergelerdir (Pirajno, 2009).

Zonal Alterasyon Yapısı

Hidrotermal sistemlerde tipik olarak içten dışa doğru sıcaklık ve kimyasal bileşim değişikliklerine bağlı alterasyon zonları gelişir. Örneğin, porfiri sistemlerde potasik (serisit–feldispat) zonu merkezde, propilitik (klorit–epidot) zonu ise dış kısımlarda gözlenir (Lowell & Guilbert, 1970).

Zonal Mineral Paragenezisi

Her zon, karakteristik mineral birlikteliklerine sahiptir. Serpantinleşme ve rodenjitleşme ultramafik çevrelerde gelişirken, sosuritleşme genellikle mafik kayaçlarda yaygındır. Serisitleşme ise genellikle felsik ve potasyumca zengin alanlarda görülür (Yardley, 1989).

Alan İlişkilendirmesi ve Haritalama

Jeolojik haritalama ve petrografik analizlerle alterasyon zonlarının sınırları belirlenebilir. Bu zonlar, mineralizasyon potansiyeli ve sıvı hareket yönünün yorumlanmasında kritik bilgiler sağlar (Rollinson, 1993). Örneğin, Troodos ofiyolitinde Sosuritleşme zonları, magmatik ve hidrotermal akışkanların etkileşim tarihçesini yansıtır.

Sonuç

Bu çalışmada ele alınan rodenjitleşme, kloritleşme, Sosuritleşme, serisitleşme ve albitizasyon alterasyon süreçleri,

mafik ve ultramafik kayaçların hidrotermal ve metasomatik rejimler altında geçirdiği kompleks mineralojik ve kimyasal dönüşümlerin temelini oluşturmaktadır. Rodenjitleşme, yüksek alkalinite ve CaO zengin hidrotermal sıvıların etkisiyle primer minerallerin Ca-kalsiyum silikatlar ve serpantin minerallerine dönüşümünü tetiklerken; kloritleşme, Fe-Mg açısından zengin minerallerin klorit grubuna dönüşümüne yol açarak hidrotermal akışkanların kimyasal evrimi hakkında önemli ipuçları sunmaktadır.

Sosuritleşme, plajiolazların hidrotermal etkilerle Ca, Na ve Al elementlerinin yeniden dağılımı sonucu epidot ve klorit benzeri minerallerle ikame edilmesini ifade etmekte olup, düşük derece metamorfik ve metasomatik süreçlerin etkilerini ortaya koymaktadır. Serisitleşme, özellikle K-feldispat içeren kayaçlarda hidrotermal akışkanların potasyum zenginleşmesine bağlı olarak gelişen mikalı alterasyonunu temsil ederken, albitizasyon Na-aktivitesinin artmasıyla feldispatların albite dönüşümüne neden olmaktadır.

Sonuç olarak, hidrotermal alterasyonların kayaçların mineralojik ve kimyasal yapısını radikal biçimde değiştirdiği, bu değişimlerin jeotermal sistemlerin dinamikleri ve metalik mineralizasyon süreçlerinin tetikleyicisi olduğu söylenebilir. Bu nedenle, alterasyon minerallerinin ve ilişkili jeokimyasal göstergelerin kapsamlı incelenmesi, hem jeolojik süreçlerin mekansal-zamansal çözümlemesinde hem de ekonomik amaçlı sondaj ve arama faaliyetlerinde vazgeçilmez bir araçtır.

Kaynakça

Alt, J.C., Honnorez, J., Laverne, C., & Emmermann, R. (1986). Hydrothermal alteration of a 1 km section through the upper oceanic crust, Deep Sea Drilling Project Hole 504B: Mineralogy, chemistry, and evolution of seawater–basalt interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B10), 10309–10335.

Bach, W., Garrido, C.J., Paulick, H., Harvey, J., & Rosner, M. (2006). Seawater–peridotite interactions: First insights from ODP Leg 209, MAR 15°N. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, Q12E05.

Beane, R.E. (1982). Hydrothermal alteration in silicate rocks. In: Titley, S.R. (Ed.), *Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America* (pp. 117–137). University of Arizona Press.

Bird, D. K., Spieler, A. R. (2004, January 1st) Epidote in Geothermal Systems. Reviews in Mineralogy and Geochemistry Vol. 56. Mineralogical Society of America p.235-300. doi: 10.2138/gsrmg.56.1.235

Brantley, S.L., Liermann, L.J., & White, A.F. (2008). "Kinetics of mineral dissolution and precipitation." In: *Holland, H.D., & Turekian, K.K. (eds.) Treatise on Geochemistry*, Vol. 7, Elsevier, pp. 611–634.

Cathelineau, M., & Nieva, D. (1985). A chlorite solid solution geothermometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 2565–2574.

Coleman, R.G. (1977). *Ophiolites: Ancient oceanic lithosphere?* Springer-Verlag.

Deer, W.A., Howie, R.A., & Zussman, J. (2013). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals* (3rd ed.). Mineralogical Society.

Drever, J.J. (1997). *The geochemistry of naturel waters: surface and groundwater environments*. Prentice hall.

Evans, B.W. (2004). The serpentinite multisystem revisited: Chrysotile is metastable. *International Geology Review*, 46, 479–506.

Fedo, C.M., Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23 (10): 921–924.

Frost, B.R., & Beard, J.S. (2007). On silica activity and serpentinization. *Journal of Petrology*, 48, 1351–1368.

Grant, J.A. (1986). The isocon diagram: A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81, 1976–1982.

Gresens, R.L. (1967). Composition–volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, 2, 47–65.

Guillot, S., & Hattori, K. (2013). Serpentinites: Essential roles in geodynamics, arc volcanism, sustainable development, and the origin of life. *Elements*, 9, 95–98.

Klein, F., Bach, W., McCollom, T.M., & Beard, J.S. (2013). Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Lithos*, 112, 110–124.

Lowell, J.D., & Guilbert, J.M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65, 373–408.

Nesbitt, H.W., & Young, G.M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717.

Nesbitt, H.W., & Young, G.M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1523–1534.

Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer.

Rollinson, H. (2014). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman.

Russell, M.J., Hall, A.J., & Martin, W. (2010). Serpentinization as a source of energy at the origin of life. *Geobiology*, 8, 355–371.

Shervais, J.W. (2001). Birth, death, and resurrection: The life cycle of suprasubduction zone ophiolites. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(5).

Winter, J.D. (2010). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd ed.).

Yardley, B.W.D. (2020). *An Introduction to Metamorphic Petrology*. Longman Earth Science Series

LİSVENİT OLUŞUMU VE EKONOMİK POTANSİYELİ

İREM AKSOY⁷
TİJEN ÜNER⁸

Giriş

Ofiyolitler, okyanusal kabuk ve üst mantoya ait kayaç topluluklarının, levha tektoniği süreçleri sonucunda kıtasal kenarlara veya dağ kuşakları içerisine yerleşmiş kalıntıları olarak tanımlanır. Bu kayaç toplulukları, milyonlarca yıl önce var olmuş okyanusların ve bu okyanusların oluşum ve kapanım süreçlerinin anlaşılmasında kilit rol oynarlar. Tipik bir ofiyolit istifi (Şekil 1), alttan üste doğru şu birimleri içerir: (Dilek & Furnes, 2011; Coleman, 1977; Moores, 1982; Nicolas, 1989)

- Üst Manto Kayaçları: Genellikle tektonik dilimler halinde bulunan, harzburgit, dünit ve lertzolit gibi peridotit türlerinden oluşur. Bu kesim, ofiyolit in en derin kısmını temsil eder.

⁷ Arş. Gör. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9969-0627

⁸ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6059-9148)

- Gabroik Kayaçlar: Manto kayaçlarının üzerinde yer alan, tabakalı ve masif gabrolardan oluşur. Bunlar, okyanus ortası sırtlarındaki magma odalarının katılaşmış ürünleridir.
- Levha Daykları (Sheeted Dike Complex): Gabroların üzerinde, birbirine paralel veya yarı paralel olarak yerleşmiş %100 diyabaz dayklarından oluşan birimdir. Okyanus tabanının yayılma merkezlerinde magma intrüzyonunu temsil eder.
- Volkanik Kayaçlar: İstifin en üstünde yer alan, genellikle yastık yapılı bazaltik lavlar ve bunlarla ilişkili pelajik sedimanter kayaçlardan (radyolarit, çört vb.) oluşur.

Ofiyolitler, sadece eski okyanusal litosferin yapısını ve bileşimini yansıtmakla kalmaz, aynı zamanda okyanus ortası sırtları, yitim zonları ve kıta-kıta çarpışma bölgeleri gibi çeşitli jeodinamik ortamların evrimini anlamak için de eşsiz doğal laboratuvarlardır (Dilek & Furnes, 2011; Pearce, 2003; Shervais, 2001).

Ofiyolitlerde Alterasyonun Genel Bir Bakışı

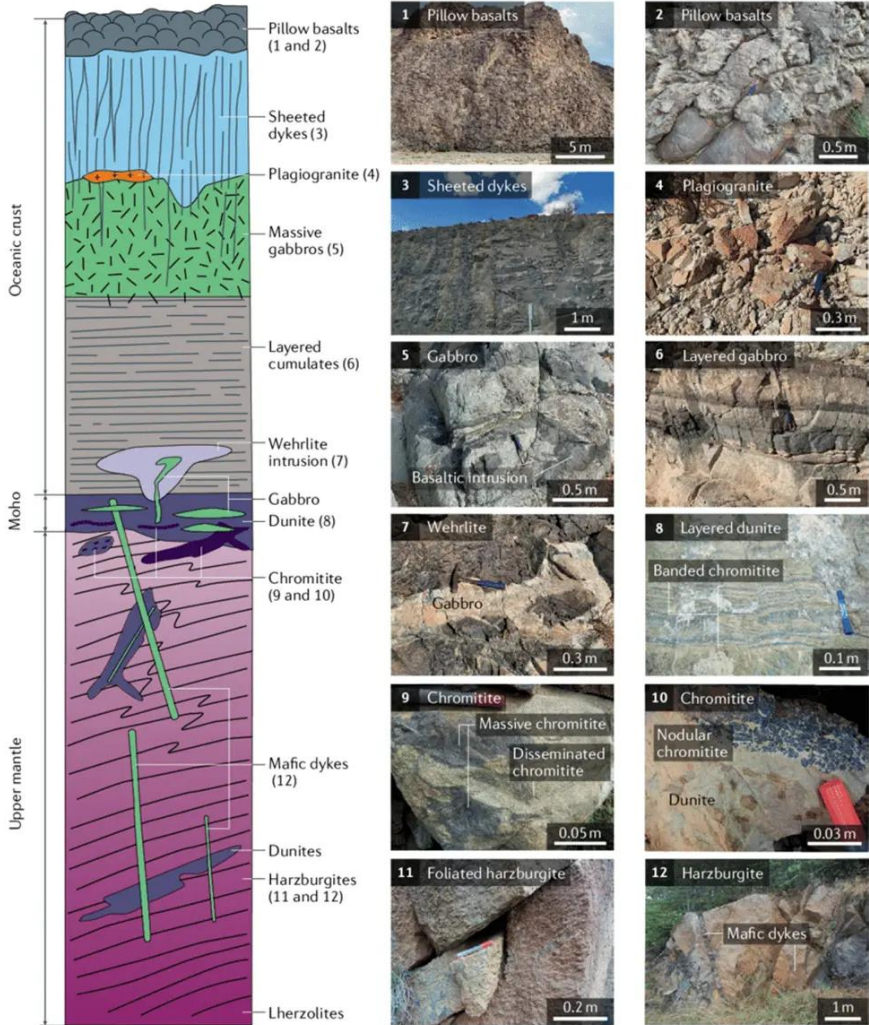
Ofiyolitik kayaçlar, okyanus tabanında oluşumlarından başlayarak kıtasal kabağa yerleşmeleri (obdüksiyon) ve sonrasındaki tektonik ve metamorfik süreçlere kadar çeşitli evrelerde su-kayaç etkileşimine maruz kalırlar. Bu etkileşimler, alterasyon olarak adlandırılan ve kayaçların orijinal mineralojik, kimyasal ve fiziksel özelliklerinde önemli değişikliklere yol açan süreçleri tetikler (Alt & Teagle, 2003; Früh-Green et al., 2004; Bach et al., 2006).

Ofiyolitlerde görülen başlıca alterasyon süreçleri arasında serpantinizasyon, rodingitleşme, splitizasyon ve bu bölümün ana odağını oluşturan listvenitleşme sayılabilir. Bu süreçler, hem kayaçların jeokimyasal evrimini hem de içerdikleri potansiyel ekonomik maden yataklarının oluşumunu doğrudan etkiler. Özellikle hidrotermal akışkanların dolaşımıyla ilişkili olan bu

alterasyonlar, çeşitli metallerin taşınması, çökmesi ve zenginleşmesi için uygun koşullar yaratabilir.

Şekil 1 Tipik bir ofiyolit istifi.

Numara etiketleri, Umman (Semail), Türkiye (Pozantı–Karsanti) ve Arnavutluk (Mirdita) ofiyolitlerinden alınmış örnek alan fotoğraflarına karşılık gelmektedir.



Kaynak: Yang et. al. 2021

Listvenitleşme: Oluşumu, Özellikleri ve Önemi

Listvenitleşme, yer kabuğunda, özellikle ultramafik ve mafik kayaların yoğun karbonatlaşma ve silisleşme süreçleri sonucunda meydana gelen, karakteristik mineralojik ve kimyasal bir alterasyondur. Bu süreç, sadece jeolojik merak konusu olmakla kalmaz, aynı zamanda dünya genelindeki birçok altın ve stratejik metal yatağının oluşumuyla doğrudan ilişkili olması nedeniyle büyük ekonomik öneme sahiptir (Halls & Zhao, 1995). Listvenitlerin anlaşılması, bu tür cevherleşmelerin aranması ve değerlendirilmesi için hayati öneme sahiptir.

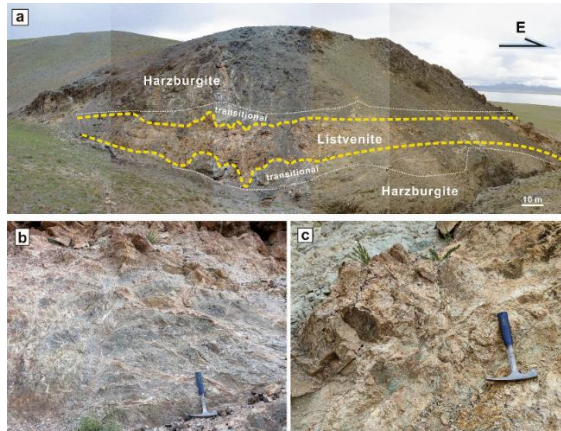
Listvenitler, çoğunlukla serpantinleşmiş peridotitler olmak üzere, ultramafik (magnezyum ve demirce zengin, silisçe fakir) veya mafik (gabro, bazalt gibi) kayaların, CO₂ bakımından zengin hidrotermal akışkanlarla şiddetli etkileşimi sonucu oluşan kayalardır. Bu alterasyon sırasında, orijinal kayaların birincil mineralleri neredeyse tamamen bozunur ve yerini karbonat mineralleri (magnezit, dolomit, ankerit, kalsit) ile kuvars (veya kalsedon) gibi ikincil minerallere bırakır. Listvenitler, sıklıkla içerdikleri kromlu muskovit olan fuksit mineralinden dolayı karakteristik yeşilimsi renkleriyle tanınırlar ve bu renk, arazi çalışmaları sırasında önemli bir ayıraçtır.

Farklı Araştırmacılar Tarafından Yapılan Tanımlamalar ve Terminoloji Karmaşası: "Listvenit" terimi, ilk kez 19. yüzyılın ortalarında Rusya'daki Ural Dağları'nda, altın cevherleşmesiyle ilişkili olarak tanımlanmıştır. Rus jeolog G.P. Gorsky'nin çalışmalarıyla daha da popülerleşmiştir. Ancak, zamanla bu terimin kullanımı genişledikçe bazı terminolojik belirsizlikler ortaya çıkmıştır. Bazı araştırmacılar, listvenitleri katı bir şekilde yalnızca serpantinitleşmenin alterasyonu sonucu oluşan kayalarla sınırlarken, diğerleri gabro veya bazalt gibi farklı protolitlerden türeyen benzer karbonat-silis alterasyonlu kayaları da bu geniş kategoriye dahil

etmiştir. Bu durum, "listvenit" teriminin bazen yalnızca mineralojik bir tanım olarak, bazen de genetik bir terim olarak kullanılmasına yol açmıştır. (Halls & Zhao, 1995; Groves et al., 1998; Kornilova et al., 2010)

Günümüzde genel kabul gören anlayış, listvenitlerin temel olarak serpantinleşmiş ultramafik kayaların ileri düzeyde karbonatlaşması ve silisleşmesi ile oluştuğu yönündedir (Şekil 2). Ancak, karbonat ve silis oranlarındaki farklılıklar veya ikincil minerallerin varlığına göre "kuvars-magnezit listvenit", "talk-karbonat listvenit" gibi daha spesifik alt terimler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alt terimler, alterasyonun yoğunluğu ve hakim mineralojisine göre listvenitlerin farklı tiplerini ayırt etmeye yardımcı olur. Örneğin, talkın varlığı genellikle silisin daha sınırlı olduğu alterasyon koşullarına işaret ederken, kuvarsın baskınlığı daha yüksek silis aktivitesini gösterir.

Şekil 2. Listvenitleşmenin farklı evrelerini ve konak kayaçlarla ilişkileri. (a) Harzburgitler içerisinde ve geçiş zonunda gelişmiş listvenit zonu; (b) geçiş zonunda gözlenen ofikarbonat birikimi; (c) tipik masif listvenit dokusu.



Kaynak: Ji, C., Zhang, K.J. & Yan, LL (2023)

Listvenitlerin Mineralojisi

Listvenitlerin mineralojisi, protolit kayaçların bileşimine, hidrotermal akışkanların kimyasına ve alterasyonun sıcaklık-basınç koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterse de belirli mineraller listvenitler için ayırt edici niteliktedir.

Ana Mineraller:

- Kuvars (SiO_2) veya Kalsedon: Silisleşme süreçlerinin birincil ürünleridir ve listvenitlerin önemli bir hacmini oluştururlar. Genellikle mikrokristalin formda, amorf silisin kristalleşmesiyle veya daha büyük kristaller halinde damarlar içinde bulunurlar. Kayaçlara sertlik ve kırılganlık kazandırır.
- Karbonat Mineralleri: Listvenitlerin "karbonatlaşmış" olmasının temel nedeni bu minerallerdir.
 1. Magnezit (MgCO_3): Magnezyumca zengin ultramafik protolitlerden (özellikle serpantinlerden) türeyen listvenitlerde en yaygın karbonat mineralidir. Genellikle beyazdan griye, bazen sarımsı kahverengiye kadar değişen renklerde olabilir.
 2. Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): Kalsiyum içeren akışkanlarla etkileşim veya Ca içeren protolitlerden türeyen listvenitlerde magnezite eşlik edebilir.
 3. Ankerit ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg},\text{Mn})(\text{CO}_3)_2$): Demir içeren bir karbonat minerali olup, genellikle altın cevherleşmesi ile ilişkili listvenitlerde bulunur. Rengi genellikle kahverengimsi veya sarımsıdır ve oksidasyona duyarlıdır.
 4. Kalsit (CaCO_3): Daha nadir olmakla birlikte, özellikle kalsiyum açısından zengin akışkanlar veya protolitlerin

varlığında, genellikle geç evre dolgularında veya damarcıklarda görülebilir.

İkincil ve Aksesuar Mineraller:

- Fuksit ($K(Al,Cr)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$): Listvenitlere karakteristik parlak yeşil rengini veren önemli bir indikatör mineralidir. Krom içeren serpantinlerin alterasyonu sırasında oluşur ve listvenitlerin tanınmasında ve haritalanmasında kilit rol oynar. Fuksit, genellikle ince taneli pullar halinde bulunur ve bazen serisit ile birlikte görülebilir.
- Pirit (FeS_2) ve Diğer Sülfidler: Çok yaygındır ve listvenitlerin ekonomik önemini doğrudan belirler. Pirit, genellikle kübik veya dissemine taneler halinde bulunur ve altının ana konakçı minerallerinden biridir. Diğer sülfidler arasında arsenopirit ($FeAsS$) (altın için önemli bir indikatör), kalkopirit ($CuFeS_2$), sfalerit (ZnS), galen (PbS), millerit (NiS) ve diğer nikel sülfidler bulunabilir. Bu sülfidlerin varlığı, genellikle listvenitleşmenin cevherleşme potansiyeline sahip olduğunu gösterir.
- Klorit: Alterasyonun daha düşük dereceli aşamalarında veya protolitin tamamen karbonatlaşmadığı bölgelerde (örn. alterasyon zonlarının dış kısımlarında) görülebilir. Genellikle serpantin kalıntıları veya ferromagnezyen minerallerin alterasyon ürünüdür.
- Talk ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$): Özellikle silis aktivitesinin nispeten düşük olduğu veya kısmi alterasyonun yaşandığı durumlarda talk ve karbonat mineralleri ağırlıkta olabilir. Talk, kayalara kaygan bir his verir.

- Serpantin Kalıntıları: Alterasyonun tam olarak tamamlanmadığı listvenitlerde, orijinal serpantin minerallerinin kalıntıları gözlenebilir. Bu kalıntılar, protolitin belirlenmesine yardımcı olabilir.
- Kromit (FeCr_2O_4): Ultramafik protolitin dayanıklı bir kalıntı minerali olarak listvenitler içinde korunabilir. Kromit, listvenitlerin orijinal kaynağının ultramafik olduğunu gösteren önemli bir göstergedir.
- Altın (Au): Genellikle sülfid mineralleri (özellikle pirit ve arsenopirit) içinde mikroskobik kapanımlar halinde veya daha az yaygın olarak serbest altın olarak, listvenitler içinde ekonomik olarak önemli miktarlarda bulunabilir.

Listvenit Türlerine Göre Mineralojik Farklılıklar

Listvenitler, baskın mineralojik bileşimlerine göre çeşitli tiplere ayrılır:

- Kuvars-Magnezit Listvenitler: En yaygın ve tipik listvenit türüdür. Kuvars ve magnezitin baskın olduğu, fuksit ve pirit içeren formlardır. Genellikle en yüksek altın cevherleşmesi potansiyeline sahiptirler.
- Talk-Magnezit Listvenitler: Silis aktivitesinin göreceli olarak düşük olduğu koşullarda, talk ve magnezitin hakim olduğu listvenitlerdir. Bunlar genellikle alterasyon zonunun dış veya geçiş kısımlarında bulunur.
- Ankerit-Kuvars Listvenitler: Özellikle demirce zengin akışkanların varlığında veya daha fazla CO_2 aktivitesi altında ankeritin önemli miktarlarda bulunduğu listvenitlerdir.

- Piritli Listvenitler: Makroskobik olarak görülebilen yüksek oranda pirit içeren listvenitlerdir. Altın cevherleşmesi için doğrudan bir göstergedirler.

Listvenitleşme Süreçleri ve Jeokimyası

Listvenitleşme, kayaçların ve akışkanların karmaşık etkileşimini içeren, kendine özgü bir dizi jeokimyasal reaksiyonla karakterize edilen dinamik bir süreçtir.

Listvenitlerin oluşumu için birincil kaynak kayaçlar, genellikle serpantinleşmiş peridotitlerdir. Peridotitler, manto kökenli ultramafik kayaçlar olup, yeryüzüne yakın koşullarda su ile etkileşime girerek serpantin minerallerine dönüşürler. Bu serpantinleşme, listvenitleşmeden önce gerçekleşen önemli bir ön alterasyon sürecidir. Serpantin minerallerinin yüksek magnezyum ve silis içeriği, listvenitleşme için gerekli hammaddeyi sağlar. Daha az yaygın olsa da gabrolar veya bazaltlar gibi mafik kayaçlar da bazı listvenit oluşumlarının protoliti oluşturabilir; ancak bu durumlarda mineralojik bileşimde farklılıklar (örn. daha az magnezit, daha fazla klorit) görülebilir.

Listvenitleşmenin en belirleyici özelliği, alterasyona neden olan akışkanların yüksek CO₂ içeriğidir. Bu karbondioksitli hidrotermal akışkanlar, kayaçlarla reaksiyona girerek karbonat minerallerinin (özellikle magnezit) ve kuvarsın çökmesini tetikler. Akışkanların kökeni çeşitlilik gösterebilir ve genellikle tek bir kaynaktan ziyade karmaşık bir etkileşimden beslenir:

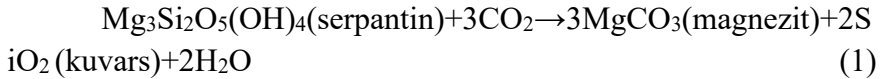
- Metamorfik Akışkanlar: Derin kabuksal seviyelerde, karbonatlı kayaçların (kireçtaşı, dolomit) metamorfizması sırasında meydana gelen dekarbonatlaşma reaksiyonları, önemli miktarda CO₂ salınımına neden olabilir. Bu CO₂ bakımından zengin akışkanlar, fay sistemleri boyunca yükselerek listvenitleşmeyi tetikleyebilir.

- **Magmatik Akışkanlar:** Yakındaki granitoid veya diğer silisik intrüzyonlardan türeyen magmatik sular, önemli miktarda CO₂ ve diğer uçucu bileşenleri (örn. S, Cl) taşıyabilir. Bu akışkanlar, alterasyon için gerekli ısıyı ve kimyasal bileşenleri sağlayabilir.
- **Meteorik Sular:** Yüzeyden sızan meteorik sular (yağmur suyu, deniz suyu), yer altında ısınarak ve kayaçlarla etkileşime girerek CO₂ ile zenginleşebilir. Bu akışkanlar, hidrotermal dolaşım sistemlerine katılarak alterasyonda rol oynar. Özellikle ofiyolitik bölgelerdeki kırıklar boyunca derinlere sızabilirler.
- **Karma Kaynaklar:** Çoğu durumda, listvenitleşmeye neden olan akışkanlar, yukarıda bahsedilen kaynaklardan gelen suların karma bir kökenidir. Bu, akışkan kimyasının ve dolayısıyla alterasyon ürünlerinin karmaşıklığını artırır.

Kimyasal Reaksiyonlar: Listvenitleşmenin temelinde, serpantin minerallerinin CO₂ ve SiO₂ (veya H₂O) varlığında karbonat ve kuvars minerallerine dönüşümü yatar. Bu reaksiyonlar, magnezyum silikatların, magnezyum karbonatlara ve silise dönüşümünü içeren bir dizi çözünme-çökelme sürecidir.

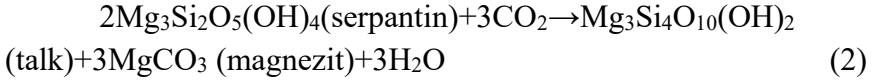
Örnek Reaksiyonlar:

- Serpantin + Karbondioksit → Magnezit + Kuvars + Su



Bu reaksiyon, serpantinlerin silisçe zengin ve CO₂ bakımından zengin akışkanlarla etkileşiminde en yaygın ve belirgin listvenitleşme sürecini temsil eder. Alterasyon zonlarının çekirdek kısımlarında, silis ve magnezyum karbonatın birlikte çökmesini gösterir.

- Serpantin + Karbondioksit → Talk + Magnezit + Su (silika eksikliği durumunda)



Bu reaksiyon, akışkanlarda veya protolitte silis aktivitesinin nispeten düşük olduğu durumlarda veya alterasyonun erken evrelerinde meydana gelebilir. Bu durum, talk bakımından zengin listvenitlerin veya alterasyon zonlarının dış kısımlarının oluşumuna yol açar.

- Piroksen/Olivin + Karbondioksit → Karbonat + Kuvars + (Demir oksitler)

Ultramafik kayalar doğrudan (serpantinleşme olmadan) listvenitleşmeye maruz kalırsa veya serpantinleşme tamamlanmamışsa, piroksen ve olivin gibi birincil mineraller de doğrudan karbonatlaşabilir.

Element Mobilizasyonu ve Zenginleşmesi: Listvenitleşme, kayaların ana, iz ve nadir toprak element jeokimyasında derinlemesine değişikliklere neden olur:

- *Uzaklaşan Elementler:* Reaksiyonlar sırasında, kayalardan H₂O uzaklaşır ve akışkanlara katılır. Mg'nin bir kısmı magnezit olarak stabilize olsa da, bir kısmı da akışkanlarla taşınabilir. Alüminyum (Al) ve Titanyum (Ti) gibi hareketliliği düşük elementler genellikle yerinde kalır ve bu nedenle protolitin belirlenmesinde kullanılabilirler.
- *Taşınan ve Çökelen Elementler:* Listvenitleşme, özellikle silis (Si) ve potasyum (K) gibi elementlerin taşınmasını ve çökmesini teşvik eder (K, fuksit oluşumuyla ilişkili olarak). En önemlisi, bu hidrotermal sistemler, altın (Au), gümüş (Ag), arsenik (As), antimon (Sb), cıva (Hg), volfram (W) ve bor (B)

gibi değerli ve stratejik metallerin taşınması ve knelmesi için son derece elverişli jeokimyasal ortamlar yaratır. Krom (Cr) genellikle fuksit içinde stabilize olurken, nikel (Ni) ve kobalt (Co) gibi elementler sülfit minerallerine katılabilir.

Altın ve diğer değerli metallerin taşınması ve knelmesi için uygun jeokimyasal koşullar: Altın ve diğer değerli metallerin hidrotermal akışkanlar içinde taşınması, genellikle klorür ve/veya tiyosülfat kompleksleri gibi ligandlarla ilişkilidir. kelmeleri ise akışkanların pH'ındaki düşüş (akışkanların CO₂ ile etkileşerek asidikleşmesi), Eh'ındaki (redoks potansiyeli) değişimler (zellikle indirgeyici koşulların oluşumu), sıcaklık düşüşleri ve kayaçlarla reaksiyonlar (sülfit oluşumu gibi) gibi faktörlere bağlıdır. Özellikle pirit ve arsenopirit gibi sülfit minerallerinin oluşumu, altının çözeltiden ayrılarak bu minerallerin kristal kafesleri içine girmesi veya mikroskobik serbest altın taneleri olarak knelmesi için kritik bir mekanizma sağlar. Listvenitlerin yüksek demir sülfür içeriği ve indirgeyici ortamı, bu cevherleşme için ideal koşulları sunar.

P-T Koşulları: Listvenitleşme genellikle düşük-orta sıcaklık (100–350°C) aralıklarında gerçekleşir. Bu sıcaklık aralığı, CO₂ bakımından zengin akışkanların etkin olduğu ve karbonat minerallerinin (zellikle magnezit) termodinamik olarak kararlı olduğu koşullardır. Basınç koşulları ise oluşum ortamına göre değişiklik gösterebilir; ancak genellikle kabuksal derinliklerde (düşük-orta basınç, 0.5–3 kbar) meydana gelir. Bu koşullar, tipik olarak sığ ve orta derinliklerdeki fay sistemleri boyunca meydana gelen hidrotermal aktivite ile uyumludur. (Halls & Zhao, 1995; Zheng et al., 2007; Kornilova et al., 2010)

Listvenit Türleri ve Sınıflandırması

Listvenitler, mineralojik bileşimlerine, gelişim evrelerine ve alterasyon zonlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Bu

sınıflandırmalar, sahadaki alterasyon desenlerini anlamak, cevherleşme potansiyelini değerlendirmek ve arama stratejileri geliştirmek için hayati önem taşır.

Mineralojik Bileşime Göre Sınıflandırmalar: Bu sınıflandırmalar, listvenitin baskın mineralojik bileşenlerine odaklanır ve arazi ile laboratuvar çalışmalarında kolaylıkla ayırt edilebilirler:

- *Kuvars-Magnezit Listvenitler:* En yaygın ve tipik listvenit türüdür. Kuvars ve magnezitin eşit veya baskın oranlarda bulunduğu, genellikle fuksit ve pirit içeren formlardır. Bu türler, genellikle alterasyonun en yoğun olduğu ve cevherleşmenin en yüksek potansiyele sahip olduğu bölgeleri işaret eder.
- *Talk-Magnezit Listvenitler:* Silis aktivitesinin göreceli olarak düşük olduğu veya kısmi karbonatlaşmanın yaşandığı koşullarda talk ve magnezitin hakim olduğu listvenitlerdir. Bunlar genellikle alterasyon zonunun dış veya geçiş kısımlarında bulunur ve protolitin tam olarak listvenitleşmediğini gösterir.
- *Ankerit-Kuvars Listvenitler:* Özellikle demirce zengin akışkanların varlığında veya daha fazla CO₂ aktivitesi altında ankeritin önemli miktarlarda bulunduğu listvenitlerdir.
- *Kalsit-Magnezit Listvenitler:* Magnezit ile birlikte belirgin miktarda kalsit içeren nadir tiplerdir.
- *Piritli Listvenitler:* Makroskobik olarak görülebilen yüksek oranda pirit içeren listvenitlerdir. Altın cevherleşmesi için doğrudan bir göstergedirler ve çoğu zaman cevher zonunun çekirdeğini oluştururlar.

Gelişim Evrelerine veya Alterasyon Zonlarına Göre Sınıflandırmalar

Listvenitleşme, genellikle bir alterasyon zonu içerisinde kademeli bir süreç olarak gelişir. Bu zonlar, protolitten (serpantinit) tamamen listvenitleşmiş çekirdek kısma doğru değişen mineralojik ve kimyasal özellikler gösterir. Bu "Listvenit Zonu" kavramı, alterasyonun yoğunluğunu ve karakterini belirten bir dizi iç içe geçmiş zonu ifade eder:

- *Serpantinit (Protolit)*: Alterasyonun başlangıcı, genellikle az veya hiç karbonatlaşma içermeyen, orijinal serpantinleşmiş ultramafik kayaç. Genellikle yeşil-siyah renkte ve lifli yapıda olabilir.
- *Talk-Karbonat Zonu (Geçiş Zonu)*: Serpantinit dış zonu çevreleyen bu bölgede, serpantin talk ve karbonat minerallerine (genellikle magnezit) kısmi dönüşümü başlar. Kayaçların rengi genellikle daha açık yeşile döner ve yer yer talkın kaygan hissi hissedilebilir. Bu zon, listvenitleşmenin ilk aşamalarını gösterir.
- *Klorit-Karbonat Zonu (Nadir Geçiş Zonu)*: Bazı durumlarda, özellikle protolitin mafik kayaçlar olduğu veya akışkan kimyasının farklı olduğu yerlerde, talk-karbonat zonu ile kuvars-karbonat zonu arasında klorit ve karbonat minerallerinin (özellikle dolomit veya ankerit) baskın olduğu bir geçiş zonu gelişebilir.
- *Kuvars-Karbonat Zonu (Tamamen Listvenitleşmiş Çekirdek)*: Listvenitleşmenin en yoğun ve tamamlanmış olduğu çekirdek zonudur. Burada kayaç, neredeyse tamamen kuvars ve karbonat minerallerinden (magnezit, ankerit) oluşur. Fuksit bolluğu, bu zonun parlak yeşil rengini vurgular. Pirit ve diğer sülfid mineralleri bolca bulunur. Bu zon, genellikle en yüksek altın

cevherleşmesi potansiyeline sahiptir ve madencilik açısından en ilgi çekici kısımdır.

Bu zonsal gelişim, hidrotermal akışkanların kayalarla reaksiyon kinetiği, akışkan/kayaç oranı ve akışkan kimyasının zaman içindeki evrimi ile yakından ilişkilidir.

Listvenitlerin Oluşum Ortamları ve Tektonik Konumları

Listvenitler, yeryüzünün belirli jeodinamik ve tektonik ortamlarında yaygın olarak bulunurlar. Bu oluşumlar, hidrotermal akışkanların hareketi için gerekli yapısal kontrol ve CO₂ kaynaklarının varlığına sıkı sıkıya bağlıdır.

Büyük Fay Zonları, Makaslama Zonları ve Kabuksal Ölçekli Kırık Sistemleri Boyunca Oluşum: Listvenitler, hemen hemen her zaman büyük ölçekli fay ve makaslama zonları boyunca oluşur. Bu yapılar, CO₂ bakımından zengin hidrotermal akışkanlar için derin kabuksal seviyelerden yüzeye doğru kolayca hareket edebilecekleri mükemmel kanallar görevi görürler. Tektonik hareketler (faylanma, makaslama), kayaları kırarak ve parçalayarak akışkanların nüfuz edebileceği geniş yüzey alanları oluşturur. Bu kırılma, akışkan-kayaç etkileşiminin verimliliğini artırır. Ayrıca, fay zonları, farklı kayaç türlerini bir araya getirerek (örn. ultramafikler ve karbonatlı sedimanlar) akışkan kimyası için uygun koşulları sağlayabilir.

Ofiyolitlerin Kıtasal Kabukla Tektonik Teması (Obdüksiyon, Çarpışma Sonrası Ortamlar): Listvenitlerin en tipik ve yaygın oluşum ortamlarından biri, okyanusal kabuk parçalarının (ofiyolitlerin) kıtasal kabuk üzerine bindirilmesi (obdüksiyon) veya kıtasal çarpışma sonrası tektonik ortamlardır. Bu jeodinamik süreçler sırasında:

- Ofiyolitik ultramafik kayaçlar (serpantinitler) tektonik olarak sıkışır ve yoğun bir şekilde kırılır. Bu kırıklar, hidrotermal akışkanlar için yol açar.
- CO₂ kaynakları genellikle metamorfik reaksiyonlardan (çarpışma zonlarındaki karbonatlı sedimanların metamorfizması) veya sık kabukta magmatik intrüzyonlarla ilişkili volkanik outgassing'den gelir. Bu akışkanlar, fay sistemleri boyunca yükselerek serpantinitleri listvenitlere dönüştürür.
- Örnek olarak, Türkiye'deki birçok altın yatağı (örn. Artvin, Eskişehir bölgeleri), ofiyolitik karmaşıkların kıtasal kabukla tektonik teması sonucu oluşan listvenit zonlarıyla ilişkilidir.

Granitoyid İntrüzyonları ile İlişkili Durumlar (Akışkan ve Isı Kaynağı Olarak): Bazı durumlarda, listvenit oluşumu, yakındaki granitoyid veya diğer silisik intrüzyonlarla ilişkilendirilebilir. Bu intrüzyonlar:

- Alterasyon için gerekli ısıyı sağlar ve hidrotermal dolaşım sistemlerini harekete geçirir.
- Potansiyel olarak CO₂ ve diğer uçucu bileşenleri taşıyan magmatik akışkanları sağlayabilir.
- İntrüzyon çevresinde gelişen kırık sistemleri, bu akışkanların yükselmesi ve ultramafik kayaçlarla etkileşime girmesi için yollar sunar. Bu tip oluşumlar, magmatik ve hidrotermal süreçlerin birleşimini yansıtır.

Metamorfizma Sırasında CO₂ Salınımı ile İlişkili Listvenitleşmeler: Özellikle karbonatlı kayaçların metamorfizması sırasında meydana gelen dekarbonatlaşma reaksiyonları (örn. kalsit + kuvars → vollastonit + CO₂), önemli miktarda CO₂ salınımına neden olabilir. Bu CO₂ bakımından zengin metamorfik akışkanlar,

metamorfik zonlar içinde veya bu zonlara yakın ultramafik kayaçlarla etkileşime girerek listvenitleşmeyi tetikleyebilir. Bu senaryo, özellikle orojenik kuşaklardaki derin kabuksal süreçlerde gözlenir.

Listvenitlerin jeolojik konumu, hem cevher aramacılığı hem de jeolojik süreçlerin anlaşılması açısından büyük önem taşır. Bu kayaçlar, genellikle eski subduksiyon ve çarpışma zonlarının izlerini taşır ve bu nedenle levha tektoniği süreçlerinin anlaşılmasına da katkıda bulunurlar.

Listvenitler ve Diğer Alterasyon Ürünlerinin Ekonomik Potansiyeli

Yer kabuğundaki ultramafik ve mafik kayaçların hidrotermal alterasyonu sonucu oluşan listvenitler, kendine özgü mineralojik ve jeokimyasal özellikleriyle dikkat çeker. Bu alterasyon süreçleri, belirli elementlerin mobilize edilerek ve yeniden çökelerek konsantre hale gelmesini sağlayarak, dünya genelinde çeşitli metalik ve endüstriyel mineral yataklarının oluşumuna doğrudan veya dolaylı olarak katkıda bulunur. Bu bölümde, özellikle altın ve cıva gibi değerli metaller açısından listvenitlerin kritik rolünü ve ilişkili diğer ekonomik kaynakları daha derinlemesine inceleyeceğiz.

Listvenitlerle İlişkili Altın (Au) Mineralizasyonu

Listvenitler, jeokimyasal ve mineralojik olarak, özellikle orojenik kuşaklardaki önemli maden yataklarının birçoğuna ev sahipliği yapma potansiyeline sahiptir.

Listvenitler, özellikle ofiyolitik karmaşıkların fay ve makaslama zonlarında yer alan orojenik altın yataklarının önemli bir tipi olarak kabul edilir. Bu tür yataklara literatürde sıklıkla "listvenit tipi altın yatakları" adı verilir ve dünya altın üretiminde önemli bir paya sahiptirler. Altın, bu sistemlerde çeşitli şekillerde bulunabilir:

- *Serbest Altın:* Mikro veya makroskobik boyutlarda, kayaç matrisi içinde veya damar dolgularında serbest, elemental altın taneleri halinde bulunur. Bu tür altınlar, bazen gözle görülebilir ve cevher zenginleştirme açısından nispeten daha kolay ayrılabilirler.
- *Sülfür Mineralleri İçinde Kapanımlar:* En yaygın bulunuş şekli, pirit (FeS_2) ve arsenopirit (FeAsS) gibi sülfür minerallerinin kristal kafesleri içinde katı çözelti halinde veya mikron/submikron boyutlarda kapanımlar (refrakter altın) olarak bulunur. Bu tür altın, genellikle ileri cevher işleme teknolojileri gerektirir ve zenginleştirilmesi daha zordur. Altın, bu sülfür mineralleri hidrotermal akışkanlardan çökelirken onlarla birlikte çözeltiden ayrılarak kayaç içinde konsantre olur. Arsenopirit, pirit ve diğer sülfürler, altının yanı sıra, cevherleşmeyle ilişkili As, Sb, Hg gibi diğer jeokimyasal anomali elementlerini de içerebilir.

Altın Zenginleşmesini Kontrol Eden Kritik Faktörler:

Listvenitlerdeki altın mineralizasyonu, karmaşık jeokimyasal ve fiziksel süreçlerin birleşimine bağlıdır:

- *Akışkanın CO_2 ve H_2S İçeriği:* Listvenitleşmeyi sağlayan hidrotermal akışkanlar, yüksek CO_2 ve H_2S içeriğine sahiptir. Altın, bu akışkanlar içinde genellikle klorür kompleksleri (örn. $\text{Au}(\text{HS})_2$) veya tiyosülfat kompleksleri (örn. $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_{23}$) halinde taşınır. Akışkanın CO_2 ile reaksiyonu (karbonatlaşma), akışkanın pH'ını düşürerek altın taşıyan bu komplekslerin kararsızlaşmasına neden olabilir. Yüksek H_2S (hidrojen sülfür) aktivitesi ise sülfür minerallerinin (pirit, arsenopirit) oluşumu ve altının onlarla birlikte çökmesi için hayati öneme sahiptir.
- *Basınç-Sıcaklık Düşüşleri:* Hidrotermal akışkanlar, yer kabuğundaki fay ve kırık sistemleri boyunca yukarı doğru

hareket ettikçe, üzerlerindeki litostatik ve hidrostatik basınçta ve sıcaklıkta önemli düşüşler yaşarlar. Bu düşüşler, akışkanların altını çözeltide tutma kapasitesini azaltarak, altının doygunluğa ulaşmasına ve dolayısıyla çözeltiden çökmesine neden olur. Özellikle "kaynama" (boiling) veya "gaz giderme" (degassing) gibi ani basınç düşüşleri, CO₂ gibi uçucuların ayrılmasına ve altının hızlı çökmesine yol açabilir.

- *Akışkan-Kayaç Etkileşimi:* Ultramafik kayalarla (serpantinitle) hidrotermal akışkanların etkileşimi, akışkan kimyasını kökten değiştirir. Serpantin minerallerinden Fe²⁺ gibi iyonların akışkana salınımı ve sülfür aktivitesindeki değişimler, akışkanın redoks potansiyelini (Eh) düşürerek daha indirgeyici koşullar yaratır. Bu indirgeyici ortam, Au'nun metalik formda veya sülfidlerle birlikte çökmesi için idealdir. Ayrıca, alterasyon süreciyle oluşan yeni mineraller (örn. karbonatlar), altının yüzey adsorpsiyonu veya kapanımı için ek yüzey alanları sağlayabilir.
- *pH Değişimleri:* CO₂'nin serpantin mineralleri ile reaksiyonu (karbonatlaşma), akışkanların başlangıçtaki nötr veya hafif bazik pH'ından daha asidik bir pH'a doğru düşüşüne neden olur. Bu pH değişimi, altın taşıyan klorür veya tiyosülfat komplekslerinin kararsızlaşması ve altının çözeltiden çökmesi için kritik bir tetikleyicidir.
- *Sülfid Oluşumu ve Silisleşme:* Listvenitlerde yaygın olarak görülen pirit ve arsenopirit gibi sülfid minerallerinin bol miktarda oluşumu, altının bu mineraller tarafından "yakalanması" için geniş bir yüzey alanı ve kimyasal mekanizma sağlar. Silisleşme (kuvars oluşumu) ise, akışkandaki silisin doygunluğa ulaşmasıyla gerçekleşir ve altının çökmesiyle aynı evrede meydana gelebilir.

Dünyadan ve Türkiye'den Altın Yatağı Örnekleri:

Dünya Genelinde: Ural Dağları'ndaki (Rusya) Bereznjakovskoye ve Svetlinskoye yatakları; Kazakistan'daki Atasü Yatağı; Hindistan'daki Kolar Gold Field; İtalya'daki Piedmont bölgesi; İspanya'daki Ortue de Piron; Çin'deki Qinling ve Tibet Ofiyolit Kuşağı; Kanada ve ABD'nin çeşitli bölgelerindeki ofiyolitik kuşaklar, önemli listvenit tipi altın yataklarına ev sahipliği yapar. Bu yataklar, genellikle bölgesel ölçekli fay sistemleri boyunca uzanan, kilometrelerce takip edilebilen geniş alterasyon zonları olarak karşımıza çıkar.

Türkiye'den Örnekler: Türkiye, aktif tektonik yapısı ve geniş ofiyolitik karmaşıkları nedeniyle önemli listvenit tipi altın yatağı potansiyeline sahiptir. Özellikle Artvin (Ceratepe, Madenköy), Eskişehir (Kaymaz), Bursa (Mustafakemalpaşa), Balıkesir (İvrindi), Sivas (Divriği), ve Kars (Kağızman) gibi bölgelerde listvenitlerle ilişkili altın mineralizasyonları tespit edilmiştir. Bu yataklar genellikle tektonik zonlarla kontrol edilen, damar, damarcık ağı (stockwork) veya saçılım tipi cevherleşmeler olup, özellikle bindirme fayları ve makaslama zonlarının kesişim noktalarında yüksek tenörlü cevherleşmeler görülebilir. (Yılmaz & Yıldırım, 2005; Yücel & Temel, 2010; Öztürk et al., 2013; Erler et al., 2011)

Listvenitleşme ve Maden Aramalarında Kullanımı

Listvenitler, sadece jeolojik bir merak konusu olmaktan öte, özellikle orojenik altın, cıva ve diğer stratejik metal yataklarının aranmasında kritik öneme sahip doğal kılavuzlardır. Bu kayaçların karakteristik mineralojik, jeokimyasal ve yapısal özellikleri, maden arama programları için vazgeçilmez ipuçları sunar.

Listvenit zonlarının tespiti ve detaylı incelenmesi, maden aramacılığında "pusula" görevi görür. Özellikle serpantinitlerin yaygın olduğu ofiyolitik arazilerde, listvenitleşmiş zonların

belirlenmesi, değerli metal cevherleşmesinin potansiyel yerlerini daraltmaya yardımcı olur.

- Listvenit Zonlarının Tespiti, Özellikle Altın ve Cıva Aramalarında Önemli Bir Yol Göstericidir: Listvenitler, CO₂ bakımından zengin hidrotermal akışkanların serpantinitle etkileşimi sonucu oluştuğundan, bu akışkanlar genellikle altın ve cıva gibi metalleri de beraberinde taşır. Bu nedenle, listvenit zonları, bu metallerin konsantre olabileceği ana lokasyonlardır. Geniş alanlarda yüzeyleyen listvenitler, bölgesel ölçekte arama hedeflerini belirlemede ilk adımı oluşturur. (Yücel & Temel, 2010; Hedenquist et al., 2000; Large et al., 2007)
- Fuksit Varlığı (Parlak Yeşil Renk) Gibi Görsel İpuçları: Fuksit (kromlu muskovit), listvenitlere karakteristik parlak yeşil rengini veren bir mineraldir. Bu renk, sahada listvenitleşmiş kayaçları hızla tanımanın en kolay ve etkili görsel ipucudur. Prospektörler ve jeologlar, arazide bu "kromlu yeşil" renklenmeyi arayarak potansiyel cevherleşme zonlarını tespit edebilirler. Bu görsel belirteç, diğer alterasyon türlerinden (örn. kloritizasyon) ayırt edilmelerini sağlar. (Halls & Zhao, 1995; Groves et al., 1998; Kornilova et al., 2010)
- Jeokimyasal Anomaliler (Au, As, Sb, Hg, Ag, W): Listvenitleşme süreci, altın (Au) başta olmak üzere, arsenik (As), antimon (Sb), cıva (Hg), gümüş (Ag) ve tungsten (W) gibi elementlerin mobilizasyonuna ve zenginleşmesine neden olur. Bu elementler, listvenit zonlarında ve çevresindeki topraklarda, sedimanlarda ve akarsu tortullarında jeokimyasal anomaliler oluşturur. Bu anomaliler, sistemli jeokimyasal örnekleme programları (toprak, dere sedimanı, kayaç yongası örnekleme) ile tespit edilerek, potansiyel cevherleşmelerin yeri hakkında değerli bilgiler sağlar. Özellikle Au-As-Sb-Hg birlikteliği,

listvenit tipi altın yatakları için güçlü bir jeokimyasal imza olarak kabul edilir.

- Uzaktan Algılama ve Jeofizik Yöntemlerin Listvenit Zonlarının Haritalanmasındaki Rolü: Modern maden aramacılığında uzaktan algılama ve jeofizik yöntemler, geniş alanların etkin bir şekilde taranmasında önemli rol oynar:
- Uzaktan Algılama (Spektral Analizler): Uydu ve hava tabanlı sensörler (örn. ASTER, Landsat, Hyperion) kullanılarak yapılan spektral analizler, kayaç ve toprak yüzeyindeki mineralojik değişimleri tespit etmeye olanak tanır. Karbonat mineralleri (magnezit, dolomit) ve silika (kuvars) gibi listvenitlerin ana bileşenleri, kendilerine özgü spektral imzalar sergiler. Bu imzaların haritalanması, arazideki listvenit zonlarının ve dolayısıyla potansiyel cevherleşmelerin uzaktan belirlenmesini sağlar. Fuksit gibi kromlu mika mineralleri de belirgin spektral yansıma özelliklerine sahiptir.
- Jeofizik Yöntemler:
 1. Manyetometre: Serpantinitler genellikle yüksek manyetik anomaliye sahipken, listvenitleşme sırasında manyetit demir karbonatlara dönüşmesiyle manyetiklikte önemli bir azalma (manyetik boşluk) meydana gelir. Bu manyetik değişimler, manyetometre ölçümleriyle haritalanarak listvenit zonlarının sınırlarını çizebilir.
 2. İndüklenmiş Polarizasyon (IP) ve Rezistivite: Listvenitler genellikle pirit gibi sülfür mineralleri içerdiğinden, IP yöntemleri ile elektrik yük depolama yetenekleri (polarizasyon) ve iletkenlikleri (düşük rezistivite) tespit edilebilir. Bu yöntemler, sülfürlü cevherleşmenin varlığını ve dağılımını belirlemek için etkili araçlardır.

3. Gravite: Listvenitlerin yoğunluğu, orijinal serpantinitlerden farklılık gösterebilir. Gravite ölçümleri, yoğunluk kontrastlarına dayalı olarak listvenit kütlelerini haritalamaya yardımcı olabilir.

Yapısal Kontrollerin Önemi

Listvenitler, neredeyse istisnasız olarak yapısal olarak kontrol edilen oluşumlardır. Bu durum, maden aramalarında yapısal jeolojinin kritik bir araç haline gelmesini sağlar:

- *Fay ve Makaslama Zonlarının Haritalanması Kritik Öneme Sahiptir:* Hidrotermal akışkanlar, yer kabuğunda en kolay hareket edebilecekleri yolları, yani fayları, makaslama zonlarını ve kırık sistemlerini kullanır. Bu yapılar, hem akışkanların derinlerden yüzeye doğru yükselmesini sağlayan kanal görevi görür hem de kayaçların kırılması ve alterasyon için geniş yüzey alanı yaratması yoluyla akışkan-kayaç etkileşimini artırır. Bu nedenle, maden aramacılığında ilk aşamalardan itibaren detaylı yapısal haritalama, potansiyel listvenit ve ilişkili cevherleşme zonlarının belirlenmesinde olmazsa olmazdır.
- *Fayların Kesim Noktaları ve Bükülme Alanları:* Özellikle farklı yönlerdeki fayların kesişim noktaları veya fay zonlarının bükülme, çatallanma (splay) gibi geometrik değişim gösterdiği alanlar, akışkan akışının yavaşladığı ve basınç-sıcaklık değişimlerinin tetiklendiği "açık alanlar" oluşturur. Bu tür yapısal süreksizlikler, minerallerin ve dolayısıyla altının yoğun bir şekilde çökeldiği ve ekonomik cevherleşmelerin oluştuğu ana lokasyonlardır.
- *Gerilme Çatlakları ve Kırık Ağları (Stockwork):* Fay zonları içinde gelişen gerilme çatlakları ve yoğun kırık ağları (stockwork), hidrotermal akışkanların kayaç içerisine yayılmasına ve geniş alterasyon zonlarının oluşmasına izin

verir. Bu tür alanlarda saçılmış cevherleşmeler gelişebilir ve hacimli madencilik potansiyeli sunar.

Listvenitlerin maden aramacılığında kullanımı, yalnızca bir kayaç türünü tanımakla kalmayıp, aynı zamanda karmaşık jeolojik süreçleri, akışkan-kayaç etkileşimlerini ve yapısal kontrolleri anlama becerisini gerektirir. Bu bilgi, arama programlarının verimliliğini artırarak, değerli metal kaynaklarının keşfedilmesine önemli katkı sağlar.

Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma boyunca ele alınan alterasyon süreçleri, özellikle ofiyolitik karmaşıklar gibi tektonik açıdan dinamik ortamlarda kayaçların geçirdiği dönüşümleri ve bu dönüşümlerin jeolojik ile ekonomik sonuçlarını ortaya koymuştur. Serpantinleşme ve listvenitleşme, ofiyolitlerin evriminde temel roller oynayan, ancak çok farklı sonuçlara yol açan iki ayrı alterasyon tipidir.

Serpantinleşme, okyanusal kabuğun ve üst mantonun su ile etkileşimi sonucu meydana gelen ve peridotitlerin serpantin minerallerine dönüşümüyle karakterize olan yaygın bir süreçtir. Jeolojik olarak, okyanusal kabuğun hidrotermal sistemlerini, levha tektoniği süreçlerini ve manto-kabuk etkileşimlerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Ekonomik açıdan ise, serpantinitler doğrudan magnezit, talk, kromit gibi endüstriyel minerallerin ve dolaylı olarak nikel lateritleri gibi önemli metal yataklarının ana kayaçlarıdır. Ayrıca, bazı serpantin türleri süs taşı olarak da değer taşır.

Buna karşın, listvenitleşme, serpantinleşmiş ultramafik kayaçların karbonatlaşma ve silisleşmeyle ileri derecede altere olmasıdır. Bu süreç, yeryüzünün farklı tektonik ortamlarında, özellikle fay ve makaslama zonları boyunca, CO₂ bakımından zengin hidrotermal akışkanların etkisiyle gerçekleşir. Listvenitler, jeolojik olarak, eski hidrotermal sistemlerin ve ilişkili tektonik

hareketlerin önemli birer göstergesidir. Kayaçların mineralojik ve kimyasal bileşimlerinde meydana gelen köklü değişimler, listvenitleri diğer alterasyon türlerinden ayırır ve onları benzersiz birer hedef haline getirir.

Listvenitleşme, özellikle orojenik altın yatakları için kilit bir rol oynamaktadır. Hidrotermal akışkanların CO₂ ve H₂S içeriği, akışkan-kayaç etkileşimleri, basınç-sıcaklık düşüşleri ve pH değişimleri gibi faktörler, altının çözeltilerden ayrılarak pirit ve arsenopirit gibi sülfid mineralleri içinde veya serbest olarak çökmesini tetikler. Bu nedenle, listvenitler, altın aramalarında en önemli hedef kayaçlardan biridir ve dünya genelinde birçok büyük altın yatağının ana konakçısıdır.

Altının yanı sıra, listvenitler cıva (Hg), arsenik (As), antimon (Sb), gümüş (Ag) ve volfram (W) gibi diğer değerli ve stratejik metaller için de potansiyel barındırır. Bu elementler, aynı hidrotermal sistemin farklı zonlarında veya farklı jeokimyasal koşullar altında altınla birlikte veya ayrı olarak konsantre olabilirler. Listvenitlerin içerdiği fuksit gibi görsel ipuçları ve Au-As-Sb-Hg gibi jeokimyasal anomaliler, maden aramacılığı için doğrudan ve etkili kılavuzlar sunar.

Sonuç olarak, ofiyolitik arazilerdeki serpantinleşme ve özellikle listvenitleşme süreçlerinin detaylı bir şekilde anlaşılması, sadece temel jeolojik süreçlere ışık tutmakla kalmaz, aynı zamanda gelecekteki metal madenciliği aramalarında yeni ve ekonomik yatakların keşfedilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu kayaçların doğru bir şekilde tanınması, haritalanması ve jeokimyasal olarak değerlendirilmesi, etkin ve verimli maden arama stratejilerinin geliştirilmesinde anahtar rol oynayacaktır.

Kaynakça

Alt, J. C., & Teagle, D. A. H. (2003). Hydrothermal alteration of upper oceanic crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(10).

Alt, J. C. (1995). Sub-seafloor processes in mid-ocean ridge hydrothermal systems. *Geophysical Monograph*, 91, 85–114.

Bach, W., Paulick, H., Garrido, C. J., & Ildefonse, B. (2006). Unraveling the sequence of serpentinization. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7(5).

Coleman, R. G. (1977). *Ophiolites: Ancient oceanic lithosphere?* Springer-Verlag.

Dilek, Y., et al. (2007). Tectonic evolution of ophiolites. *Lithos*, 96(1–2), 1–20.

Dilek, Y., & Furnes, H. (2011). Ophiolite genesis and global tectonics. *GSA Bulletin*, 123(3–4), 387–411.

Erler, A., Yılmaz, H., & Akar, Y. (2011). Geology and gold mineralization potential of the Artvin region. *MTA Dergisi*, 142, 55–75.

Früh-Green, G. L., et al. (2004). Serpentinization of oceanic peridotites. *Geol. Soc. London, Special Publications*, 219(1), 119–136.

Goldfarb, R. J., et al. (2005). Orogenic gold and geologic time. *Ore Geology Reviews*, 27(1–4), 113–190.

Groves, D. I., et al. (1998). Orogenic gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5), 7–27.

Halls, C., & Zhao, R. (1995). Listvenite and related rocks: perspectives on terminology and mineralogy with reference

to an occurrence at Cregganbaun, Co. Mayo, Republic of Ireland. *Mineralium Deposita*, 30, 303–313.

Hedenquist, J. W., et al. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13, 245–277.

Henley, R. W., & Berger, B. R. (1986). Epithermal gold deposits—styles, characteristics, and exploration. *SEG Reviews*, 6, 23–59.

Hedenquist, J. W., et al. (2000). Epithermal gold: World-class deposits and models. *SEG Special Publications*, 13, 141–175.

Ji, C., Zhang, KJ. & Yan, LL. (2023). Hydrothermal metasomatism and solid-phase transfer in petrogenesis of listvenite: the Meso-Tethyan ophiolite, central Tibet, China. *Contrib Mineral Petrol* 178, 4

Kornilova, V. A., et al. (2010). Listvenitization processes and gold mineralization. *Russian Geology and Geophysics*, 51(4), 481–490.

Large, R. R., et al. (2007). Geochemistry of hydrothermal pyrite. *Economic Geology*, 102(2), 207–226.

Moores, E. M. (1982). Origin and emplacement of ophiolites. *Reviews of Geophysics*, 20(2), 735–760.

Nicolas, A. (1989). *Structure of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere*. Springer.

Öztürk, H., et al. (2013). Petrology and gold mineralization in Eskişehir-Kaymaz. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22(2), 135–153.

Pearce, J. A. (2003). Supra-subduction zone ophiolites. *Geol. Soc. London, Special Publications*, 218(1), 269–293.

Shervais, J. W. (2001). Birth, death, and resurrection: The life cycle of supra-subduction zone ophiolites. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2(4).

Yang, J., Wu, W., Lian, D. et al. (2021). Peridotites, chromitites and diamonds in ophiolites. *Nat Rev Earth Environ* 2, 198–212

Yılmaz, H., & Yıldırım, N. (2005). Eskişehir-Kaymaz altın yatakları. *MTA Dergisi*, 131, 1–20.

Yücel, Ö., & Temel, A. (2010). Artvin Cerattepe yatakları. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 53(1), 77–92.

Zheng, J., et al. (2007). High-Mg carbonate alteration in ultramafic rocks. *Lithos*, 95(1–2), 165–178.

YER BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ÜZERİNE ÇEŞİTLİ ÇALIŞMALAR

