



Academic Research Journal of Technical Vocational Schools

artes@cumhuriyet.edu.tr

Founded: 2023

Available online, ISSN: 2822-5880

Publisher: Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Using Hyperspectral Images in Mapping Alteration Minerals

Sedat İnal^{1,a*}, Kaan Şevki Kavak^{2,b}

¹ General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) for Central Anatolia, Sivas, Türkiye

² Department of Geological Engineering, Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 26/12/2023

Accepted: 13/02/2024

ABSTRACT

Geoscientists require fieldwork primarily when investigating underground resources. Surface data is very important for researchers in detecting underground data. Elements and minerals of economic value can be mobilized in rocks enriched either primarily or secondarily through temperature, pressure, and tectonic activities by hydrothermal fluids. Hydrothermal solutions, becoming saturated over time, deposit ore minerals within fractures, faults and discontinuities where they are chemically or physically suitable in geological environments. These dissolution and precipitation processes are also referred to as hydrothermal activities. Consequently, mineral transformations occur in rocks interacting with hydrothermal fluids, leading to the formation of newly created minerals known as alteration minerals (sulfate and clay minerals; such as alunite, kaolinite, sericite and Fe-bearing minerals such as hematite, limonite, etc.). Chemical components such as OH, Al, Mg, Fe, Cl, and CO₃ present in the chemical compositions of minerals exhibit recognizable absorption values in certain sections of the electromagnetic spectrum. Remote sensing (RS) methods provide significant results in mapping these minerals due to their identifiable absorption values in specific segments of the electromagnetic spectrum. RS, along with associated image processing techniques, is applied to potentially prospective areas for mineral deposits. Images from multispectral (Landsat, ASTER, Worldview, etc.) or hyperspectral (Hyperion, PRISMA, HypSIS, etc.) sensors can be used for the purpose. Images are first subjected to some pre-processing such as geometric, radiometric and atmospheric. Afterwards, on the images; Image processing methods such as band ratio (BR), principal component analysis (PCA), minimum noise fraction (MNF) and classification are applied.

Keywords: Hyperspectral imaging, Alteration, Mineral mapping, Classification.

Alterasyon Minerallerinin Haritalamasında Hiperspektral Görüntülerin Kullanılması

Süreç

Geliş: 26/12/2023

Kabul: 13/02/2024

Öz

Yer bilimciler yeraltı kaynaklarını araştırırken öncelikle saha çalışmalarına ihtiyaç duyarlar. Araştırmacılar için yer altı kaynaklarının tespit edilmesinde yüzey verileri oldukça önem taşımaktadır. Ekonomik açıdan değerli olan element ve mineraller hidrotermal akışkanlar tarafından sıcaklık, basınç ve tektonik faaliyetlerle birincil ya da ikincil olarak zenginleştikleri kayalarda mobil hale getirilebilirler. Zamanla doygun hale gelen hidrotermal çözeltiler bünyesindeki cevher minerallerini kimyasal veya fiziksel olarak elverişli jeolojik ortamlarda buldukları kırık, çatlak ve süresizliklerde çökeltirler. Bu çözme ve çökeltme süreçleri hidrotermal faaliyet olarak da adlandırılır. Süreç sonucunda hidrotermal akışkanlarla etkileşime giren kayalarda mineral dönüşümleri gerçekleşir ve yeni oluşan bu minerallere alterasyon mineralleri (alunit, kaolinit, serizit vb. sülfat, kil mineralleri ve hematit, limonit vb. demirli mineraller) adı verilir. Minerallerin kimyasal bileşimlerinde bulunan OH, Al, Mg, Fe, Cl ve CO₃ gibi kimyasal bileşenler elektromanyetik spektrumun belirli bölümlerinde tanınabilir absorpsiyon değerlerine sahip oldukları için bu minerallerin haritalanmasında uzaktan algılama (UA) yöntemleri dikkate değer sonuçlar verir. Maden yatakları açısından önemli bir veri kaynağı olan multispektral (Landsat, ASTER, Worldview vb.) veya hiperspektral (Hyperion, PRISMA, HypSIS vb görüntülerinden elde edilen mineral haritalarına amaca yönelik olarak görüntü işleme yöntemleri uygulanabilir. Görüntüler öncelikle geometrik, radyometrik ve atmosferik gibi bir takım ön işlemlere tabi tutulduktan sonra bant oranlama, temel bileşen analizi (PCA), minimum gürültü bölütlemesi (MNF) ve sınıflama gibi görüntü işleme yöntemleri uygulanır.

Anahtar Kelimeler: Hiperspektral görüntüleme, Alterasyon, Mineral haritalama, Sınıflama.

Copyright



This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

^a sedatinal@gmail.com

^b <https://orcid.org/0000-0002-0727-1351>

^b kaan@cumhuriyet.edu.tr

^b <https://orcid.org/0000-0002-8216-5890>

How to Cite: İnal S, Kavak KŞ, (2023). Using Hyperspectral Images in Mapping Alteration Minerals, Academic Research Journal of Technical Vocational Schools, 2(2):32-38

Giriş

Son yıllarda maden yatakları açısından potansiyeli fazla olan bölgelerinin ortaya çıkarılmasında alterasyon mineral zonlarını haritalamak için uzaktan algılama (UA) yöntemleri tercih edilmektedir. Bu yöntemin kullanılmaya başlanması 1970' li yıllara dayanmaktadır. Yöntemin temeli, uzaya gönderilen uydular aracılığı ile yeryüzüne ait sayısal görüntülerin yer istasyonlarına iletilerek elde edilen verilerin işlenmesi ve yorumlanmasına dayanır. Bu yöntem, bir cisim fiziksel olarak dokunmadan elektromanyetik spektruma duyarlı algılayıcıları kullanarak elde edilen görüntülerden cisim hakkında bilgi edinmeyi amaçlar. Sistem, cisimler üzerine doğal ya da yapay yollarla gönderilen enerjinin yansımaları veya cisimlerden yayılan termal enerjiyi ölçerek cisimler hakkında birbirlerinden ayırt edilmelerini sağlayan veriler elde etmek üzerine kuruludur. UA'nın Landsat ile başlayan döneminde multispektral olarak adlanan ve spektrumun ortalama 0,4 – 2,5 µm aralığında 10' larla ifade edilen görece daha az bant sayısı ve dolayısıyla spektral olarak daha kısıtlı çözünürlüğe sahip olan sistemlerdir. Diğer yandan spektrumun benzer aralığında 100' lerle ifade edilen bant sayıları ile yüksek spektral çözünürlüğe sahip sistemler ise hiperspektral algılayıcı veya sistemler olarak anılmaktadır. Mineral haritalama multispektral sistemlerden hiperspektral sistemlere geçişin gözlemlendiği yeterli ve spektral çözünürlük açısından tatminkâr bant sayısı ve bant aralığı sağlandığında gerçekleşebilir.

Multispektral verilerin yaygın olduğu dönemler olmasına rağmen 1980' li yıllarda havadan görüntüleme spektrometreleri geliştirilmeye başlanmış ve ilk görüntüler jeolojik açıdan iyi bilinen ve yüzeydeki yansıma verilerini maskeleyen herhangi bir bitki örtüsünün bulunmadığı, Cuprit, Nevada (ABD) bölgesinden elde edilmiştir. 1983 -1986 yılları arasında Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından "Airborne Imaging Spectrometer" (AIS) geliştirilerek C-130 tipi bir uçağa yerleştirilen görüntüleme sistemi dar ve kısa aralıklarla görüntü almaya başlamıştır (Kruse ve ark., 1990). AIS, spektrumun 1,2 – 2,4 µm aralığında 128 banttan oluşmaktadır (Vane ve ark., 1984). Çok önemli bir maden sahası olarak bilinen Cuprite, Nevada bölgesinde AIS görüntülerinden kaolinit ve alunite gibi alterasyon mineralleri tespit edilmiştir (Goetz ve ark., 1985; Goetz ve Srivastava, 1985). NASA' nın ikinci nesil görüntü spektrometrelerin ilk örneğini ise 0,41 – 2,45 µm aralığında, yaklaşık 10 nm bant genişliğine sahip, 224 banttan oluşan The Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) adlı sistemi temsil etmekteydi (Porter ve Enmark, 1987). AVIRIS NASA ER-2 uçağına konumlandırılmış, 20 m piksel boyutuna, 10,5 km genişliğinde bir alanı yaklaşık 20 km yükseklikteki uçuşuyla tarayabilmekteydi (Kruse, 2002). Cuprite sahasına ait AVIRIS görüntüler kullanılarak kaolinit, alunite ve budingtonit minerallerine ait spektralar ayırt edilebilmiş fakat sahanın geneliyle ilgili bir haritalama çalışması yapılmamıştır (Vane, 1987). Kısmen NASA' nın

bu başarıları kısmen de maden ve petrol sektörünün talepleri doğrultusunda Jeofizik ve Çevre Araştırmaları Kurumu (GER) 0,4 – 2,4 µm aralığında 63 banta sahip ticari bir görüntüleme spektrometresini (GERIS) geliştirmiştir. GERIS kullanılarak Cuprite bölgesinde; alunite, kaolinit, budingtonit ve hematit minerallerine ait spektralar tespit edilmiştir (Kruse ve ark., 1990). Havadan görüntüleme spektrometre sistemleri sonrasında NASA, 0,4 – 2,45 µm aralığında, 10 nm genişliğinde 242 spektral banda sahip EO-1 Hyperion isimli uydu niteliğindeki görüntüleme spektrometresini 705 km yükseklikteki yörüngeye yerleştirmiştir (Pearlman ve ark., 2003). Hyperion görüntüleri başta Cuprite sahası olmak üzere hem bilimsel hem de ticari olarak birçok çalışmada kullanılmıştır (Dadon ve ark., 2012; Gersman et al., 2008; Hubbard ve ark., 2003; Kruse ve ark., 2003). Günümüze kadar başta Landsat ve ASTER olmak üzere ağırlıklı olarak uydu ve algılayıcı multispektral görüntüleme sistemleri kullanılmıştır. Son yıllarda ise yörüngede ticari ve devlet destekli hiperspektral görüntüleme sistemlerinin (Prisma, Enmap, HypSIS, CHRIS vs.) sayısının artmasıyla hiperspektral veriye de erişim daha kolay sağlandığından maden arama sektöründe de hiperspektral görüntülerin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.

Materyal ve metod

Alterasyon mineralleri uzaktan algılama yöntemleriyle tespit edilirken multispektral veya hiperspektral havadan sistemlere ve uydulara ait görüntüler kullanılabilir. Bu görüntüler üzerinde mineralleri tespit ederken istatistiksel ve özellikle de spektral tabanlı yöntemler kullanılmaktadır. Bu işlemler yapılırken amaç görüntüden en etkili ve doğru veriyi çıkartabilmektir. İstatistiksel görüntüyü oluşturan piksellerin farklı histogram hesaplamalarına göre Gaussian, Equalization ve Linear gibi istatistiksel görüntü zenginleştirme algoritmaları kullanılır (Asokan ve ark., 2020). Ancak bu zenginleştirmelere ilave olarak alterasyon minerallerinin tespit edilmesi için daha çok bant oranlama, görelî bant derinliği, kontrollü sınıflama, temel bileşen analizi ve minimum gürültü bölütleme gibi spektral tabanlı görüntü işleme yöntemleri kullanılmaktadır.

Dünyanın en uzun uydu görüntüleme programlarından birisi olarak 1970' lerin başında National Aeronautics and Space Administration (NASA) ve United States Geological Survey (USGS) ortaklığı ile başlatılan Landsat (Earth Resources Technology Satellite-ERTS) programı 1990' lı yılların sonunda Landsat 7 ile zirveye çıkmış olup günümüzde hala programın son temsilcisi olan Landsat 9 (Çizelge 1) ile hizmet vermeye devam etmektedir. Landsat ile başlayan multispektral algılayıcı sistemler esasen yer bilimleri amaçlanarak tasarlanmış ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) özellikleri ile öne çıkan ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) algılayıcısıyla birlikte oldukça iyi sonuçlar veren araştırmalarda kullanılmışlardır. Multispektral bir diğer UA sistemi olan ASTER, NASA tarafından kontrol edilen Terra uydu platformu üzerinde yer alır. Sistem

Aralık 1999'da fırlatılmış olup halen veri toplamaya devam etmektedir. ASTER algılayıcısı, arazi kullanımı ve örtüsü, kentsel izleme ve ısı haritası çalışmaları, sulak alan, tarım, ormancılık vb. çok sayıda bilimsel disiplinde kullanılmaktadır. Bunlarla birlikte jeolojik çalışmalar olarak litolojik haritalama, mineral zenginleşmeleri ve alterasyon bölgelerinin haritalanmasına yönelik çalışmalarda da kullanılmaktadır.

ASTER algılayıcı bantları 520 – 11650 nm aralığında, 3 adet görünür yakın kızılötesi (VNIR), 6 adet yakın kızıl ötesi (SWIR) ve 5 adet ısı kızı ötesi (TIR) bant olmak üzere toplam 14 banttan oluşan bir multispektral UA sistemidir (Abrams ve Hook, 2002). VNIR 15m, SWIR 30m ve TIR 90m yersel çözünürlüğe sahiptir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Landsat 9 ve ASTER algılayıcı sistemlerinin başlıca özellikleri.

Table 1. The main features of Landsat 9 and ASTER sensor systems.

Landsat 9				ASTER			
Bant	Spektral Bölge	Dalga Boyu (µm)	Çözünürlük (m)	Bant	Spektral Bölge	Dalga Boyu (µm)	Çözünürlük (m)
1	Kıyı / Aerosol	0.433-0.453		1		0.52-0.60	
2	Mavi	0.450-0.515		2	VNIR	0.63-0.69	15
3	Yeşil	0.525-0.600		3N/B		0.78-0.86	
4	Kırmızı	0.630-0.680	30	4		1.60-1.70	
5	NIR	0.845-0.885		5		2.145-2.185	
6	SWIR 1	1.560-1.660		6	SWIR	2.185-2.225	30
7	SWIR 2	2.100-2.300		7		2.235-2.285	
8	Pankromatik	0.500-0.680	15	8		2.295-2.365	
9	Sirrus	1.360-1.390	30	9		2.360-2.430	
10	Termal	10.300-11.300	100	10		8.125-8.475	
11	Termal	11.500-12.500		11		8.475-8.825	
				12	TIR	8.925-9.275	90
				13		10.25-10.95	
				14		10.95-11.65	

1970' lerin başında laboratuvar ortamında tarama amaçlı geliştirilen hiperspektral görüntüleme sistemleri gelişim ve ihtiyaçlar doğrultusunda 1980' lerde havadan sistemlere evrilmiş ve nihayetinde 2000'lerden itibaren yörüngeden görüntü alabilecek sistemlere yerini bırakmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. Önemli hiperspektral algılayıcılar.

Table 2. Important hyperspectral sensors.

Platform / Sensör	Kuruluş / Ülke	Bant Sayısı	Spektral Çözünürlük
EO-Hyperion	NASA/ABD	220	10 nm
Proba-1/CHRIS	ESA	153	1,25 – 11 nm
HypSIS	Hindistan	238	10 nm
PRISMA	ASI / İtalya	239	12 nm
ENMAP	GFZ/DLR/Almanya	228	6,5 – 10 nm

1970' lerin başında ilk hiperspektral görüntüleme spektrometresi "Taramalı Görüntüleme Spektrometresi (SIS), NASA Johnson Uzay Merkezinde kullanılmıştır. 1981 yılında Jeofizik ve Çevre Araştırmaları Şirketi (GER) 0,4 – 2,4 µm aralığında 63 banta sahip ticari bir görüntüleme spektrometresini (GERIS) geliştirmiştir. Sonrasında NASA Jet Propulsion Labortary (JPL), "Havadan Görüntüleme Spektrometresi" ni (AIS) geliştirdi (128 spektrum bandı, 1,2-2,4µm, AIS-1 için 32 piksel ve AES-2 için 64). NASA 1987'den bu yana Havadan Görsel / Kızılötesi Görüntüleme Spektrometresini (Vane ve ark., 1993) AVIRIS (224 bant, 0,4 ila 2,5µm bölge, örnekleme aralığı ve çözünürlük <10

nm)'i kullanmaktadır. Yeni Bin Yıl Programı (New Millenium Programme) çerçevesinde, NASA 2000 yılında "Yer Gözlemciliği" (Earth Observation) EO-1 üzerinde Hyperion'u başlattı. Hyperion (Pearlman ve ark., 2003), Landsat 7 yörüngesi ile bir dakika içinde eşleşmesini sağlayan, 98.7° eğimde 705 km'lik dairesel güneşle senkronize yörüngesinde uçarken, çerçeve (frame) başına 7,5 km ve 100 km alanla 30 m uzamsal çözünürlüklü 220 spektrum bandına (0,4-2,5 µm) ve 10 nm spektral çözünürlüğe sahip bir sistemdir. Avrupa Uzay Ajansı (ESA) 2001 yılında, 0,415-1,050 µm'lik bir spektral aralıkta, 19 adet spektral bant ile 1,25-11 nm'lik bir spektral çözünürlükte ve 14 km'lik bir genişlikte, 20 m'lik bir mekansal çözünürlüğe sahip, Proba-1 üzerinde bulunan Compact High Resolution Görüntüleme Spektrometresi, CHRIS (Barnsley ve ark., 2004) programını yürütmektedir.

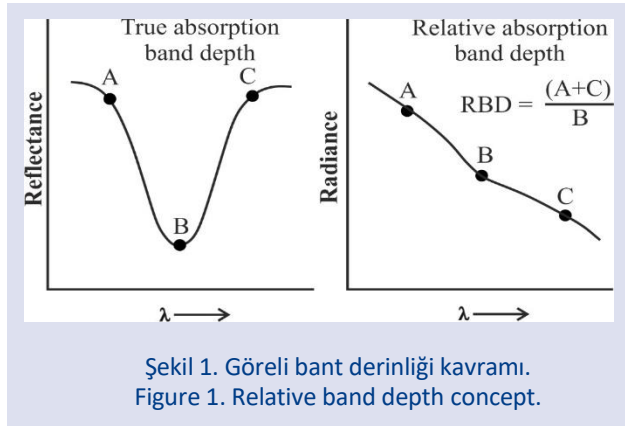
2018 yılında Hindistan 0,45 ila 2,4 µm arasında 326 banttan oluşan Hyper Spectral Imaging Spectrometer (HypSIS) sistemini geliştirmiştir. Başka bir görüntüleme spektrometresi İtalya Uzay Ajansı (ASI) tarafından geliştirilen 0,4 ila 2,5 µm arasında 238 adet banda sahip PRISMA görüntü spektrometresi 2019 yılında yörüngeye yerleştirilmiştir. 2020 yılında Yerbilimciler için Alman Araştırma Merkezi (GFZ) ve Alman Havacılık Merkezi (DLR), Çevresel Haritalama ve Analiz Programı (ENMAP) kapsamında bir hiperspektral uzay aracı geliştirmişlerdir. ENMAP 0,430 ila 0,950 µm (VNIR) ile 0,950 ila 2,400 µm (SWIR) spektrum aralığında, 228 bantlı, 30 km genişlikte bir alanı tarayabilen, 30 m'lik yersel ve 4 günlük zamansal çözünürlüğe sahip bir görüntüleme spektrometresidir.

Görüntü İşleme

İster multispektral isterse hiperspektral sistemlerle elde edilen uzaktan algılama verilerine özel görüntü işlemleri uygulanarak daha fazla bilgi edinimi sağlar. Mineral haritalama açısından oldukça önemli olan yüzeyel alterasyon bölgelerinin ortaya çıkarılmasında kullanılan görüntü işleme yöntemleri şu şekilde sıralanabilir.

Görelî soğurma bant derinliği yöntemi

Görelî soğurma bant derinliği (Relative absorption band-depth; RBD) yöntemi ilk olarak (Brickey ve ark., 1987) ve (Crowley ve ark., 1989) tarafından tanımlanmıştır. Mantiği ise SWIR dalga boyunda spesifik dalga boyundaki soğurma özelliğinin derinliğini tanımlayan oranların kullanımını içerir. Böyle bir görüntü, yansımının minimum olduğu soğurma özelliğinin merkezindeki bir veya birden fazla bantın toplamının bölünmesiyle yaratılır (Şekil 1).



Bir bant oranlama yaklaşımı olan görelî bant derinliği (RBD), benzer şekilde soğurmanın neden olduğu spektral eğrideki görelî düşüş yaklaşımını kullanır. Söz konusu şekle göre B'deki görelî soğurma derinliği $RBD = h_1/h_2$ olarak kabul edilebilir. Spektral oran hesaplaması basit üç noktanın formülüyle gerçekleşir. Pay; spektral eğrinin her iki yükselen omzunda yer alan iki bantın toplamıyken payda ise soğurma değerinin minimum olduğu en yakın noktadaki değeri oluşturur (Crowley ve ark., 1989).

Bu yöntemle serizit, muskovit, illit ve Al-smektit gibi AIOH grubundaki mineraller ASTER görüntülerine ait (B5+B7)/B6 bant kombinasyonu ile ortaya çıkarılabilir (Hewson ve ark., 2005; Kalinowski ve Oliver, 2004; Rowan ve ark., 2005a). Özellikle serizit ve beyaz mikaların vurgulandığı bu analizde 5 ve 6. Bantlar pirofillit ve kaolinitin absorpsiyon aralığını kapsar. ASTER 5. ve 7. bantlar soğurma kenarında yer alırken 6. Bant bu minerallerin 2200 nm değerli AIOH absorpsiyon değeri üzerindedir. Bu işlem sonucunda fenjit, muskovit ve smektit gibi AIOH içeren mineraller amfibol, klorit, epidot ve kalsit gibi AIOH içeren minerallerden ayrılabilir. Alüminyumca fakir muskovit olarak da bilinen fenjite karşılık gelen 5/7 oranı tersine zengin olan kaolinit ve muskovitle karşılaştırıldığında daha yüksek bir yansıma verir ve bu şekilde söz konusu yer altı ve yer üstü maden yataklarının bulunmasına yardımcı olacak yüzeydeki alterasyon mineralleri ortaya çıkarılabilir.

Bant oranlama kombinasyonları ve sınıflama

Kayaçları oluşturan mineraller ve bu mineralleri oluşturan elementler, spektral özelliklerine göre farklı bölgelerde emilir ya da yansıtılırlar. Bu mineral ve elementler RBD' de olduğu gibi emilim yapıldıkları bantlar yansıma yapıldıkları bantlara oranlanarak vurgulanmaktadır (Çizelge 3).

Çizelge 3. ASTER sensörünün yaygın kullanılan bant oranlamaları (Kalinowski ve Oliver, 2004).

Table 3. The commonly used band ratios of the ASTER sensor (Kalinowski and Oliver, 2004).

Hedef	Bant Oranı	Referans
Demir		
Ferrik demir, Fe ³⁺	2/1	Rowan ve ark., 2005b (CSIRO)
Ferroz demir, Fe ²⁺	5/3 + 1/2	Rowan ve ark., 2005b
Karbonat ve mafik mineraller		
Karbonat / klorit / epidot	(7+9)/8	Rowan ve ark., 2005b
Epidot / klorit / amfibol	(6+9)/(7+8)	CSIRO
Silikatlar		
Serizit / muskovit / illit / smektit	(5+7)/6	Rowan ve ark., 2005b (USGS) Hewson ve ark., 2005 (CSIRO)
Alunit / kaolinit / pirofillit	(4+6)/5	Rowan ve ark., 2005b (USGS)
Silis		
Kuarsça zengin kayaç	14/12	Rowan ve ark., 2005b
Silis	(11x11)/10/12	Bierwith, 2002

USGS: United States Geological Survey

CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

Elde edilen oranlama görüntülerinde de vurgulanan mineralleri gösterebilmek için sınıflandırma işlemleri yapılır. Sınıflandırmalar denetimli (supervised) ya da denetimsiz (unsupervised) olarak yapılabilmektedir. Denetimli sınıflandırmalar yapılırken öncelikle hangi algoritmanın kullanılacağı belirlenmelidir (Spectral Angle Mapper; SAM, Binary Encoding; BE vb.). Sonrasında ilgili oran görüntüsünde en fazla yansıma veren pikseller eğitim (training) verileri olarak algoritmaya tanımlanır. İşlemler sonucunda her bir oran görüntü için eşik değerlere göre maksimum yansıma veren pikseller sınıflandırılır. Denetimsiz sınıflandırmada ise herhangi bir eğitim verisi kullanılmaksızın, ortalama piksel değerleri ve uygun bir algoritma (IsoData, K-Means) seçilerek kullanıcının öngördüğü kadar bir sınıflama sayısı elde edilemeye çalışılır.

Şekil 2' de soldaki spektral imzalarla birlikte (A) ve sağdaki sınıflama görüntüleri (B) hiperspektral bir uydu olan Hyperion ve multispektral ASTER görüntülerden elde edilmiştir (Kruse ve Perry, 2007). Araştırmacılar inceleme alanının jeolojik özelliklerine göre hedefledikleri alterasyon minerallerini (kalsit, dolomit, serizit, zeolit ve silis) spektral görüntülerde sınıflamaya çalışırken hem görüntülerin spektral özelliklerinden hem de saha spektrallerinden faydalanmışlardır. Sonuç olarak saha verileriyle de doğruladıkları, spektral görüntülerden yüksek doğruluğa

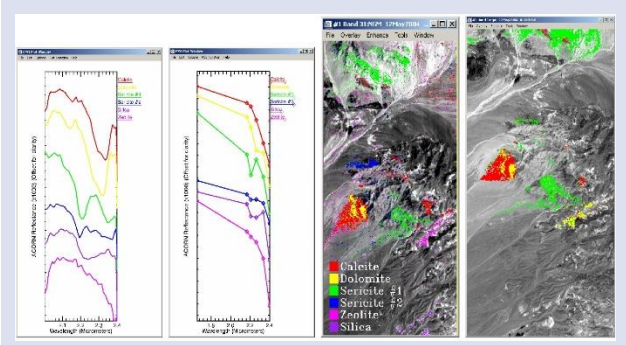
sahip bir alterasyon haritası elde etmişleridir. Bu iki görüntüde de çok net gözükmemektedir ki hiperspektral görüntüden daha fazla sınıf sayısı, daha yüksek doğrulukta elde edilmiştir. Ayrıca üstün görüntüleme yeteneklerinden dolayı hiperspektral görüntüleme sistemleri sondaj karotlarının mineral tanımlamalarında da oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Şekil 3). Hiperspektral görüntüleme ve sonrasında mineral sınıflaması yapılan çalışmada; ferromagnezyen (amfibol, biyotit, klorit, epidot), kil (Mg-smektit, nontronite, kaolinit, Al-smektit), beyaz mika (smektit, illit, serizit) ve kuvars feldispat gibi birincil ve alterasyon minerallerinin haritalamasını yapmışlardır (Michaux, S. ve O'Connor, 2020).

Farklı bileşimlerdeki magmatik kayalar ve bu kayaların sebep oldukları alterasyon minerallerinden; karbonat, Fe-Klorit, turmalin, mika, kaolen, talk gibi mineraller ASTER SWIR bantlarıyla tespit edilebilmektedir (Bierwirth, 2002). Benzer çalışmalarda felsik kayalar spektrumlarında, Al-OH ve Fe+3 ve mafik-ultramafik kayalar spektrumlarında ise Fe+2 ve Fe,Mg-OH mineralleri tespit edilmiştir (Rowan ve ark., 2005b). ASTER uydusunun termal bantlarından (TIR) ise kuvars içeren jeolojik birimlerin bölgesel haritalamaları yapılabilmektedir (Hewson ve ark., 2005). Arjilik (alunit, kaolinit, profillit) ve fillik (serizit, muskovit, illit, simektit) gibi daha çok porfiri bakır cevherleşmeleri ile karakterize olan alterasyon zonlarının haritalandığı çalışmalarda yeni sahalar için çok önemli sonuçlar elde edilmiştir (Mars ve Rowan, 2006).

Minimum gürültü bölütleme (MNF)

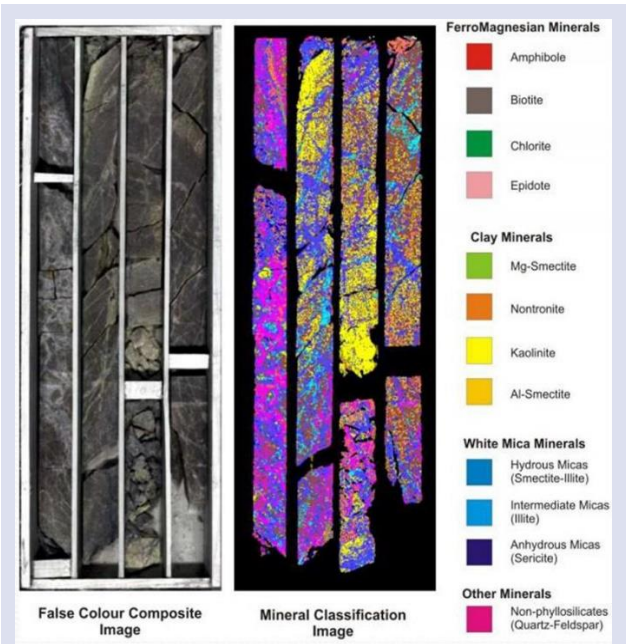
Minimum Gürültü Bölütleme (Minimum Noise Fraction, MNF) görüntü kalitesinde yüksek öneme sahip sinyal-gürültü oranını kullanarak maksimum gürültü içeren bantların tespit edilip, kaldırılarak varyansı yüksek görüntüler elde etme temeline dayanmaktadır. İki ardışık veri azaltma işleminden oluşan bir algoritmadır (Green ve ark., 1988). Birincisi, bir korelasyon matrisi ile temsil edilen verilerdeki gürültü tahminine dayanmaktadır. Bu dönüşüm, verilerdeki gürültüyü varyansa göre ilişkisiz hale getirir (decorrelation) ve yeniden ölçeklendirir. İkinci işlemde ise temel bileşen analizi kullanılarak orijinal korelasyonları hesaba katar ve ham veri kümesindeki tüm bantlardaki varyans hakkında ağırlıklı bilgiler içeren ve gürültüsü azaltılmış bir dizi bileşen oluşturur. Çoğunlukla, bir veri setindeki yüzey yansıtma varyasyonunun çoğu, ilk birkaç bileşende bulunur, geri kalan bileşenlerde ise esas olarak gürültüden kaynaklanan varyans bulunur (Boardman, 1993).

MNF özdeğer grafiği (Şekil 4), MNF dönüşümü yapılmış her bir bant için özdeğerini gösterir. Daha büyük özdeğerler, dönüştürülmüş bantta daha yüksek veri varyansını, başka bir deyişle spektral çeşitliliği gösterir. Özdeğerler 1'e yaklaştığında, gürültü varyanstan ilişkisizlendirilip yeniden ölçeklendirilerek düşük özdeğere sahip çıktı bantlarında sadece gürültü bırakılmış olur. Veri boyutluluğu, özdeğer eğrisinin eğiminin nerede kırıldığını ve değerlerin 1'e yaklaştığını bularak özdeğerlerden belirlenebilir.



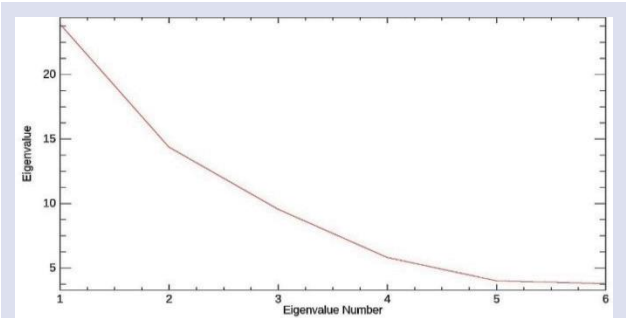
Şekil 2. Hyperion ve ASTER görüntüleriyle elde edilmiş alterasyon minerallerine ait spektral ve sınıflamalar (Kruse ve Perry, 2007).

Figure 2. Alteration mineral spectras and classifications obtained with Hyperion and ASTER images (Kruse and Perry, 2007).



Şekil 3. Sondaj karotlarının hiperspektral görüntüleme sistemleriyle taranması sonucu elde edilmiş mineral haritası (Michaux, S. ve O'Connor, 2020).

Figure 3. The mineral map obtained by scanning drill cores with hyperspectral imaging systems (Michaux, S. ve O'Connor, 2020).



Şekil 4. MNF özdeğer grafiği.

Figure 4. MNF eigenvalue graphic.

Tartışma ve Sonuçlar

Hiperspektral görüntü algılayıcılarından elde edilen veriler multispektral bir veriye göre daha kısa bant aralığı (10 nm) ve daha fazla sayıda bant içerdiği için görüntü işleme ve spektral analizlerle elde edilmek istenen hedefler daha yüksek doğrulukla tespit edilebilmekte. Multispektral algılayıcılara göre çok yüksek bir üstünlük olmakla birlikte veri işleme ve sonuç çıkarma aşamaları için de daha karmaşık süreçleri beraberinde getirmektedir. Multispektral görüntülerde olduğu gibi görelî bant derinliği, bant oranlama ve kombinasyon işlemleri ortak işlemler olmakla birlikte multispektral görüntülerde de amaca yönelik olarak başvurulabilen tekrarlı verileri azaltma ve sadeleştirme yöntemleri hiperspektral görüntüler için büyük önem taşımaktadır.

Hiperspektral görüntülerle sınıflama ve alterasyon haritaları oluşturulurken yüksek doğruluklarının yanında sistemin kullanılmasını kısıtlayan, geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gereken yönleri de vardır. Halen uzaydan veri toplayan hiperspektral sistemlerin sayısının yetersizliği ve hiperspektral verilere erişim en önemli sorunlardan birisidir. Öte yandan yüksek spektral çözünürlüklerine rağmen daha geniş alanları da tarayabilen sistemler son yıllarda hızla gelişmekle birlikte henüz yeterli değildir. Ayrıca yüksek teknoloji ve dolayısı ile yüksek maliyetler ile oluşturulan hiperspektral sistemlerden elde edilen verilerin işlenebilmesi için Hiperspektral UA alanında eğitilmiş insan kaynağının ve bilgi işlem gücünün geliştirilmesi gerekmektedir. Bu ve bunun gibi çalışmalar spektral görüntülerin, özellikle de hiperspektral görüntülerin, maden yataklarının keşfinde çok önemli bir yeri olan alterasyon alanlarının haritalanmasında yüksek doğrulukta sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. UA sistemlerinde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda elde edilen görüntüler gün geçtikçe multispektral görüntülerde olduğu gibi ön işleme gerektirmeyecek ve görüntü işlemeye hazır halde (geometrik, radyometrik, atmosferik düzeltmeler uygulanmış) veriler sunmaya başlamıştır. İlerleyen zamanlarda benzer gelişmelerin, özellikle de atmosferik düzeltmelerin hiperspektral görüntülere de uygulanarak sunulması görüntü işleme sonucunda daha güvenli ve standart sonuçlar alınabilmesini sağlayabilecektir.

Referanslar

Abrams, M., & Hook, S. J. (2002). ASTER User Handbook Version 2. Jet Propulsion, 2003(23/09/2003), 135. Abrams2002NASA.pdf

Asokan, A., Anitha, J., Ciobanu, M., Gabor, A., Naaji, A., & Hemanth, D. J. (2020). Image Processing Techniques for Analysis of Satellite Images for Historical Maps Classification—An Overview. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 4207, 10(12), 4207. <https://doi.org/10.3390/APP10124207>

Barnsley, M. J., Settle, J. J., Cutter, M. A., Lobb, D. R., & Teston, F. (2004). The PROBA/CHRIS mission: A low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7), 1512–1520. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.827260>

Bierwirth, P. N. (2002). Evaluation of ASTER satellite data for geological applications. Consultancy Report to Geoscience Australia.

Boardman, J. W. (1993). Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. JPL, Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop.

Brickey, D., Crowley, J., & Rowan, L. (1987). Analysis of airborne imaging spectrometer data for the Ruby Mountains, Montana, by use of absorption-band-depth images. *JPL Proceedings of The, Undefined*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19880004389>

Crowley, J. K., Brickey, D. W., & Rowan, L. C. (1989). Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: Mineral discrimination using relative absorption band-depth images. *Remote Sensing of Environment*, 29(2), 121–134.

Dadon, A., Karnieli, A., Ben-Dor, E., & Beyth, M. (2012). Examination of spaceborne imaging spectroscopy data utility for stratigraphic and lithologic mapping. <https://cris.bgu.ac.il/en/publications/examination-of-spaceborne-imaging-spectroscopy-data-utility-for-s-10>

Gersman, R., Ben-Dor, E., Beyth, M., Avigad, D., Abraha, M., & Kibreab, A. (2008). Mapping of hydrothermally altered rocks by the EO-1 Hyperion sensor, Northern Danakil Depression, Eritrea. *International Journal of Remote Sensing*, 29(13), 3911–3936. <https://doi.org/10.1080/01431160701874587>

Goetz, A. F. H., & Srivastava, V. (1985). Mineralogical Mapping in the Cuprite Mining District, Nevada. *Proc. of the Airborne Imaging Spectrometer Data Anal. Workshop*.

Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J. E., & Rock, B. N. (1985). Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, 228(4704), 1147–1153. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.228.4704.1147>

Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., & Craig, M. D. (1988). A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implications for Noise Removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(1), 65–74. <https://doi.org/10.1109/36.3001>

Hewson, R. D., Cudahy, T. J., Mizuhiko, S., Ueda, K., & Mauger, A. J. (2005). Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2), 159–172. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2005.04.025>

Hubbard, B. E., Crowley, J. K., & Zimelman, D. R. (2003). Comparative alteration mineral mapping using visible to shortwave infrared (0.4–2.4 μm) Hyperion, ALI, and ASTER imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6 PART I), 1401–1410. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.812906>

Kalinowski, A., & Oliver, S. (2004). ASTER mineral index processing manual. Tech. Rep., Geoscience Australia.

Kruse, F. (2002). Comparison of AVIRIS and Hyperion for Hyperspectral Mineral Mapping.

Kruse, F. A., Boardman, J. W., & Huntington, J. F. (2003). Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6 PART I), 1388–1400. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.812908>

Kruse, F. A., & Perry, S. L. (2007). Regional mineral mapping by extending hyperspectral signatures using multispectral data. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/AERO.2007.353059>

Kruse, F., Kierein-Young, K. S., & Boardman, J. (1990). Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63-channel imaging spectrometer.

- Mars, J. C., & Rowan, L. C. (2006). Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere*, 2(3), 161–186. <https://doi.org/10.1130/GES00044.1>
- Michaux, S., P., & O'Connor, L. (2020). How to Set Up and Develop a Geometallurgical Program- GTK Open Work File Report 72/2019. 245.
- Pearlman, J. S., Barry, P. S., Segal, C. C., Shepanski, J., Beiso, D., & Carman, S. L. (2003). Hyperion, a space-based imaging spectrometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6 PART I), 1160–1173. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.815018>
- Porter, W. M., & Enmark, H. T. (1987). A System Overview Of The Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (Avisis). *Imaging Spectroscopy II*, 0834, 22. <https://doi.org/10.1117/12.942280>
- Rowan, L. C., Mars, J. C., & Simpson, C. J. (2005a). Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2), 105–126. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2004.11.021>
- Rowan, L. C., Mars, J. C., & Simpson, C. J. (2005b). Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2), 105–126.
- Vane, G. (1987). First Results From The Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Imaging Spectroscopy II*, 0834, 166. <https://doi.org/10.1117/12.942296>
- Vane, G., Goetz, A. F. H., & Wellman, J. B. (1984). Airborne imaging spectrometer: A new tool for remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(6), 546–549. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1984.6499168>
- Vane, G., Green, R. O., Chrien, T. G., Enmark, H. T., Hansen, E. G., & Porter, W. M. (1993). The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, 44(2–3), 127–143. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90012-M](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90012-M)