



Alterasyon Mineralleri ve Aktif Tektonizma Arasındaki İlişkinin Görüntü Zenginleştirme Teknikleri ile Belirlenmesi

Firdevs Güzel^{*1}, Gülcan SARP²

^{1,2} Süleyman Demirel Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 32260, ISPARTA, Türkiye

¹(ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3502-4745>)

²(ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5021-4918>)

(Alınış / Received: 16.05.2025, Kabul / Accepted: 27.01.2026, Online Yayınlanma / Published Online: 31.01.2026)

*İlgili yazar ve danışmanı; firdevsguzel3@gmail.com, gulcansarp@sdu.edu.tr

Öz: Bu çalışma, tektonik aktivite ile hidrotermal alterasyon mineralleri arasındaki mekânsal ilişkiyi ortaya koymak ve bu ilişkinin uzaktan algılama teknolojileriyle analiz edilmesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırma alanı olarak, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) içerisinde yer alan Heltepe Fayı seçilmiştir. Heltepe Fayı boyunca gelişen alterasyon zonlarının, fay zonlarıyla ilişkili olarak dağılımı, uzaktan algılama verileriyle değerlendirilmiş ve bu verilerden mineral haritalaması alanında başarılı sonuçlar elde edilen ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) uydusuna ait multispektral görüntüler kullanılmıştır. Çalışmada, ASTER görüntüsünün görünür-yakın kızılötesi (VNIR), kısa dalga kızılötesi (SWIR) bantlarına, Temel Bileşenler Analizi (PCA), Minimum Gürültü Fraksiyonu (MNF) ve Dekorelasyon Germe (DS) olmak üzere üç temel görüntü zenginleştirme teknikleri uygulanmıştır. Bu yöntemlerle elde edilen yeni görüntüler, alterasyon minerallerinin spektral özelliklerine göre yorumlanarak alterasyon dağılım haritaları oluşturulmuştur. Özellikle demir oksitler, hidroksil mineralleri, kil mineralleri (kaolinit, alunit, muskovit), klorit ve karbonat mineralleri (kalsit, epidot vb.) gibi alterasyon göstergeleri PCA bileşenlerinden elde edilen eigenvektör değerleri yardımıyla tanımlanmıştır. Çalışma sonuçları, Heltepe Fayı boyunca mineral alterasyonlarının çoğunlukla fayların uzanımına paralel bir biçimde geliştiğini ve fay hatlarına yaklaştıkça da yoğunlaştığını göstermiştir. Ayrıca bazı alterasyon dağılımlarının fay atımları nedeniyle ötelenmiş olması, tektonik hareketlerin alterasyon süreçleri üzerindeki etkisini doğrudan ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler

Aktif Tektonizma, Alterasyon Mineralleri, Uzaktan Algılama, Görüntü Zenginleştirme Teknikleri, ASTER.

Determination of the Relationship Between Alteration Minerals and Active Tectonism Using Image Enhancement Techniques

Abstract: This study aims to reveal the spatial relationship between tectonic activity and hydrothermal alteration minerals, and to analyze this relationship through remote sensing technologies. The Heltepe Fault, located within the East Anatolian Fault Zone (EAFZ), was selected as the study area. The distribution of alteration zones developed along the Heltepe Fault, in relation to the fault zones, was evaluated using remote sensing data, and multispectral imagery from the ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) satellite—widely reported to yield successful results in mineral mapping—was employed. In the study, three primary image enhancement techniques, namely Principal Component Analysis (PCA), Minimum Noise Fraction (MNF) and Decorrelation Stretch (DS), were applied to the visible-near infrared (VNIR) and shortwave infrared (SWIR) bands of ASTER imagery. The newly generated images were interpreted based on the spectral characteristics of alteration minerals, and alteration distribution maps were produced accordingly. Alteration indicators such as iron oxides, hydroxyl-bearing minerals, clay minerals (kaolinite, alunite, muscovite), chlorite, and carbonate minerals (e.g., calcite, epidote) were identified using eigenvector values derived from PCA components. The results indicate that mineral alterations along the Heltepe Fault predominantly developed parallel to the orientation of the fault zones and

intensified in proximity to the fault traces. Furthermore, the lateral displacement of some alteration zones due to fault movements directly demonstrates the influence of tectonic processes on hydrothermal alteration.

Keywords

Active Tectonism, Alteration Minerals, Remote Sensing, Image Enhancement Techniques, ASTER.

1. Giriş/Introduction

Dünya genelinde artan hammadde ihtiyacı ve stratejik mineral arayışları, keşif yöntemlerinin evrimleşmesini zorunlu kılmıştır. Tarihin ilk dönemlerinden itibaren insanlar, doğadaki minerallere büyük ilgi göstermiştir. Bu ilgi zamanla daha sistematik ve teknolojik yöntemlerle mineral keşiflerine dönüşmüştür. Özellikle 1970'li yıllardan itibaren, uydu tabanlı görüntüleme sistemlerinin gelişmesiyle birlikte yeryüzünde bulunan minerallerin tespiti ve sınıflandırılması uzaktan algılama (UA) yöntemleriyle gerçekleştirilebilir hâle gelmiştir (Rajesh, 2020; Pour vd., 2022; Kalimuthu vd., 2025). Gelişen sensör teknolojisi sayesinde uydular aracılığıyla elde edilen multispektral görüntüler, jeolojik ve hidrotermal alterasyon çalışmalarında sahaya inilmeden önce ön bilgi sağlayarak hem zaman hem de maliyet açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Küresel ölçekte yürütülen mineral arama stratejilerinde, UA teknikleri, mineral alterasyonlarının belirlenmesinde ve haritalanmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Van der Meer vd., 2014; Gholipour vd., 2025). Elektromanyetik spektrumun (EMS) farklı dalga boylarında elde edilen uydu görüntüleri ile yapılan sayısal analizler, alterasyon süreçlerine dair ipuçlarını ortaya koymakta ve bu sayede maden potansiyeli yüksek alanların belirlenmesine olanak tanımaktadır. Özellikle ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) gibi multispektral uydu sistemleri, yakın kızılötesi (VNIR) ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) bant aralıklarıyla alterasyon minerallerinin karakteristik spektral özelliklerini ayırt edebilecek kapasiteye sahiptir (Yamaguchi vd., 1998; Okada, 2021 Nabatian vd., 2025). Bu teknolojik imkânlar, yalnızca alterasyon minerallerinin tespiti ve haritalanmasıyla kalmamış, aynı zamanda yer kabuğunun derinliklerindeki jeodinamik süreçlerin yüzeydeki izlerini sürmeyi de mümkün kılmıştır.

Alterasyon mineralleri, kayalarla hidrotermal sıvılar arasında gerçekleşen kimyasal etkileşimler sonucunda kayaların bileşiminde meydana gelen değişiklikleri ifade eder ve çoğu zaman maden yataklarının göstergesi niteliğindedir (Salem, 2016; Gholipour vd., 2025; Kalimuthu vd., 2025). Ancak bu oluşumlar sadece kimyasal bir süreç değil, aynı zamanda yapısal bir kontrol mekanizmasının da bir ürünüdür. Özellikle faylar, yalnızca yer kabuğundaki kırılmaları ifade etmez, aynı zamanda yer altı sıvılarının hareket ettiği geçirimli kanallar olarak da işlev görür. Bu hareket, fay zonları çevresinde kayaların fiziksel ve kimyasal özelliklerinde birtakım değişiklikler yaratır. Özellikle tektonik olarak aktif bölgelerde, derinlikten gelen ve ısınarak zenginleşen sıvılar, fay zonlarını kanal görevi gören yapısal hatlar gibi kullanarak yüzeye doğru hareket eder ve çevresindeki kayalarla etkileşime girerek yeni mineral fazları oluşturur (Sibson, 1994; Caine vd., 1996). Bu durum, alterasyon zonlarını sanki fayların bir imzası gibi algılanmasını sağlar.

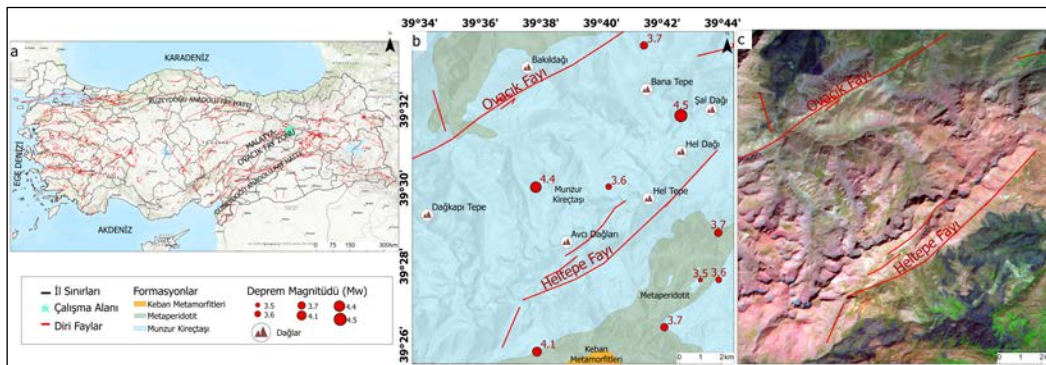
Literatürde, alterasyon minerallerinin tespitinin farklı coğrafi bölgelerdeki uygulamaları geniş yer bulmuştur. Örneğin, Abrams (1984), Arizona'daki açık ocak porfiri bakır yatağı üzerinde Landsat TM 4 görüntülerini kullanarak bant oranlama ve dekorelasyon germe yöntemleriyle yalancı renk kombinasyonları oluşturmuş; elde ettiği sonuçlarla multispektral görüntülerin hidrotermal alterasyon ve demirli minerallerin belirlenmesinde etkili olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada ayrıca, TM görüntülerinin keşfedilmemiş mineral yataklarını bulmada önemli bir araç sunduğunu vurgulamıştır. Rowan vd. (1995), Colorado'da AVIRIS uydu verileriyle gerçekleştirdikleri çalışmada Karıştırma Analizi ve Spektral Açık Haritalama yöntemlerini kullanarak demir alterasyonları ile dolomit, kalsit ve kaolinit gibi mineralleri haritalamış; bu çalışmada bazı minerallerin spektral imzaları net ayırt edilirken, bazıları ise kayaların spektral etkisi nedeniyle karıştığını ifade etmişlerdir. Sabins (1999), Nevada-Goldfield bölgesinde gerçekleştirdiği çalışmada bant oranları, yalancı renk kombinasyonları ve sınıflandırma tekniklerini kullanarak Landsat 7 ETM+ verileriyle demir ve kil alterasyonlarını başarıyla ayırt etmiş ve bu yöntemin mineral haritalamada etkili olduğunu göstermiştir. Ninomiya (2004), ASTER uydu verisinin SWIR bantlarının hidrotermal alterasyon minerallerini, TIR bantlarının ise kuvars ve karbonatları ayırt etme yeteneğinden yararlanarak çeşitli bant indeksleri geliştirmiş; bu indeksler farklı çalışmalarda başarıyla uygulanarak doğruluğu literatürde kabul görmüştür (Rowan vd., 2006; Di Tommaso ve Rubinstein, 2007; Sarp ve Erener, 2008; Pour ve Hashim, 2012; Başıbüyük vd., 2014; İnal ve Kavak, 2024; Güzel ve Sarp, 2025). Kayadibi (2008), yapmış olduğu çalışmada ASTER ve Landsat TM uydu görüntülerinden mineral alterasyonlarının tespitini karşılaştırmalı olarak Bant Oranlama ve Crosta Tekniklerini uygulayarak ele almıştır. Sonuçta ASTER uydu görüntülerinin mineral alterasyonlarının belirlenmesinde daha avantajlı olduğunu ve uygulanan her iki metodun yaklaşık % 50 oranında aynı sonuçları verdiği belirtilmiştir. Shirmard vd. (2020), İran'ın Toroud-Chahshirin bölgesinde yaptıkları bir çalışmada, PCA (Principal Component Analysis-Temel Bileşen Analizi), ICA (Independent Component Analysis-Bağımsız Bileşen Analizi) ve MNF (Minimum Noise Fraction-Minimum Gürültü Fraksiyonu) teknikleri kullanılarak epitermal Cu-Au yataklarına ait hidrotermal alterasyon zonlarını başarıyla tespit etmişlerdir. Güzel ve Sarp (2024), yaptıkları çalışmada Doğu Anadolu Fayı'nın (DAF) Palu segmentinde yer alan mineral alterasyonlarını ASTER uydu görüntülerinden Bant Oranlama, Göreli Bant Derinliği (RBD), Mineral İndeksleri, CROSTA, Kısıtlı Enerji Minimizasyonu (CEM) ve Karışık Ayarlı Eşleşmiş Filtre (MTMF) gibi yöntemlerle tespit etmişler. Bu çalışmada ayrıca alterasyon minerallerinin mekânsal dağılımı ile fay hatları arasındaki ilişki Getis-Ord Gi* istatistiği ile değerlendirilmiş ve mineral alterasyonlarının, aktif fay hatlarına paralel olarak uzandığını ve bu faylar tarafından kısmen sınırlandırıldığını belirlemişlerdir. Jelloulı vd. (2025),

Fas'ın Anti-Atlas bölgesinde ASTER ve OLI verileri kullanılarak litolojik ve mineralojik haritalama gerçekleştirilmiş ve bu çalışmada PCA ve MNF tekniklerinin alterasyon minerallerinin haritalamasındaki etkinliğini vurgulamışlardır.

Yapılan literatür değerlendirmesi, alterasyon minerallerinin belirlenmesi ve mekânsal olarak haritalanmasında, EMS'nin farklı dalga boyu aralıklarında elde edilen UA verileri ile görüntü işleme tekniklerinin önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, mevcut çalışmalar büyük ölçüde açık maden sahaları ve belirgin hidrotermal alanlara odaklanmıştır. Buna karşın, tektonik olarak aktif bölgelerde arazi çalışmalarıyla henüz belirlenmemiş fay sistemlerinin tespitine yönelik uygulamalar hem dünya literatüründe hem de Türkiye özelinde sınırlı sayıdadır (Güzel, 2023). Bu durum göz önüne alındığında, Alp-Himalaya orojenik kuşağında yer alan üzerinde büyük ve yıkıcı depremlerin sıklıkla meydana geldiği Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay Zonları gibi devasa aktif yapıları barındıran tektonik açıdan son derece aktif olan Türkiye, yapısal kontrollerin alterasyon mineralleri üzerindeki etkilerini incelemek için eşsiz bir laboratuvar niteliğindedir. Bu nedenle yürütülen çalışma, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) içerisinde yer alan ve mineral alterasyonlarının yaygın olarak gözlemlendiği Heltepe Fayı ve yakın çevresinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada mineral alterasyonları EMS'nin farklı dalga boyu aralıklarında görüntüleme yapan ASTER uydu görüntülerine Temel Bileşenler Analizi (PCA), Dekorelasyon Germe (DS) ve Minimum Gürültü Fraksiyonu (MNF) gibi görüntü zenginleştirme yöntemleri uygulanarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, aktif bir fay zone boyunca gelişen mineralojik alterasyonların UA verileri ile ayırt edilebilir nitelikte olduğunu ve bu zonların fay doğrultusu ile belirgin bir mekânsal uyum sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle çalışma, Heltepe Fayı ölçeğinde aktif faylara bağlı mineralojik zonlanmanın UA temelli olarak ilk kez sistematik bir biçimde değerlendirilmesini sağlamakta; aktif fayların haritalanmasına katkı sunan ve tektonik ile maden jeolojisi disiplinlerini bütünleştiren tamamlayıcı bir yaklaşım önermektedir.

2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Doğu Anadolu Fay Zonu'nun (DAFZ) bir parçası olan Heltepe ve Ovacık Faylarını içinde barındıran yaklaşık olarak 39°34'–39°44' doğu boylamları ile 39°26'–39°32' kuzey enlemleri arasında konumlanmıştır. Alanın yaklaşık %83'lük kısmı Mezozoik yaşlı Munzur Kireçtaşlarıyla %16'lık kısmı ise Alt Paleozoik yaşlı Metaperidotitle kaplıdır (Şekil 1b). Munzur Kireçtaşı, şelf türü neritik karbonatlardan oluşmakta olup, Orta Triyas–Kampaniyen zaman aralığında kesintisiz olarak çökelmiş; algi, oolitli, biyomikritik, çörtlü ve pelajik özellikler gösteren neritik karbonatlar içermektedir. Birimin üst seviyelerinde pelajik ve sisli kireçtaşları ile yer yer düşük dereceli metamorfizma izleri taşıyan rekristalize ve dolomitik kireçtaşları gözlenmektedir (Tarhan, 2007, 2008). Metaperidotit Birimini oluşturan yapı taşları ise genellikle serpantinleşmiş dünit ve harzburgitlerdir. Tektonik deformasyonlarla bu birimlerin içyapısı bozulmuş, ezilmiş, milonitleşmiş ve serpantinleşmiştir. Birim üzerinde bulunan ve birimi kesen faylar boyunca çıkan sıcak su kaynakları çevresinde genellikle sarımtırak-kızıl kahverenkli listvenit oluşumları gözlenmektedir (Tarhan, 2007; Tarhan, 2008). Alanın %1'lik bölümünde yüzeyleyen Üst Paleozoik-Mezozoyik yaşlı Keban Metamorfikleri; şelf türü kırıntılılar, karbonatlar, volkano-sedimanter kökenli metamorfikler, şist, mermer, metakırıntı ve metabazitler ile temsil edilmektedir. Birim içerisinde ayrıca yer yer otokton ve allokton mermer, rekristalize kireçtaşı, ofiyolitik kırıntı, çakıl ve blokları da yer almaktadır (Tarhan, 2007; 2008). Heltepe Fayı, Avcı Dağları'nın (3345 m) doğu kenarını sınırlayan, KD-GB doğrultulu ve yaklaşık 25 km uzunluğunda sol yanal atımlı aktif bir faydır. Bölgenin aktif buzul aşındırmasına maruz kalması, yüzeydeki morfolojik ifadelerin zayıf gelişmesine neden olmuştur. Ancak 23 Ocak 2003 Pülümür depremi ile ilişkilendirilmesi ve önceki çalışmalar, fayın güncel tektonik aktivitesini doğrulamaktadır (Öztürk, 2009; Kartal vd., 2016; Demirtaş, 2019). Malatya Ovacık Fay Zonu'nun kuzeydoğu kesimini oluşturan Ovacık Fay Zonu ise kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda uzanmakta olup, Elâzığ Havzası'ndan Arapgir'e kadar yaklaşık 110 km uzunluğa sahip, sol yanal doğrultu atımlı bir fay hattıdır (Zabcı vd., 2016). Ovacık Fayı Munzur Dağı ile sınırlandırılmış ve buradan Erzincan Havzasındaki Kuzey Anadolu Fay Zonu ile birleşmiştir. Malatya Fayı ise Nurhak Fay Zonu üzerinden DAFZ'ye bağlanır (Şekil 1-b, c). Fayın aktif olup olmadığı konusu uzun süre tartışılmış olsa da son yıllarda yapılan çalışmalar bu yapının aktif olduğunu ortaya koymuştur (Yazıcı vd., 2018).



Şekil 1. (a)- Çalışma alanının lokasyonu (Fay Hatları Emre vd., 2013'den alınmıştır). (b)- Çalışma alanının sadeleştirilmiş jeoloji haritası (Tarhan, 2007-2008'den alınmıştır). (c)-Çalışma alana ait ASTER uydu görüntüsü RGB-9-3-1 kombinasyonu.

3. Materyal ve Metot/ Material and Method

3.1. ASTER uydu görüntüsü

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) sensörü, jeolojik uygulamalarda özellikle alterasyon minerallerinin haritalanmasında yaygın olarak kullanılan, yüksek spektral çözünürlüğe sahip çok bantlı bir uzaktan algılama sistemidir. NASA ve Japonya Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (METI) iş birliğiyle geliştirilen ASTER, 1999 yılında Terra uydusu üzerinde yörüngeye yerleştirilmiş ve görünür-yakın kızılötesi (VNIR), kısa dalga kızılötesi (SWIR) ve termal kızılötesi (TIR) olmak üzere üç spektral bölgede veri sağlayan sensörlerle donatılmıştır (Fujisada, 1995). Özellikle SWIR bantları (1,6–2,43 μm), kil mineralleri, demir oksitler ve hidrotermal alterasyon zonlarının karakteristik spektral imzalarını ayırt etmede kritik bir role sahiptir. Bu özelliğiyle ASTER, spektral imza farklılıklarını ortaya koyarak alterasyonla ilişkili mineral gruplarının ayırt edilmesine olanak tanır (Yamaguchi ve Naito, 2003). ASTER'in 15 m (VNIR), 30 m (SWIR) ve 90 m (TIR) mekânsal çözünürlüğe sahip bantları hem yüzey morfolojisinin hem de spektral özelliklerin detaylı analizini mümkün kılmaktadır (Tablo 1). ASTER verileri, jeoloji, toprak etütleri, yanardağ izleme, bitki örtüsü ve ekosistem analizleri gibi çok sayıda bilimsel alanda başarıyla kullanılmaktadır (Kahle vd., 1991; Yamaguchi vd., 1998). ASTER'in sunduğu spektral çeşitlilik ve uzamsal duyarlılık, onu özellikle hidrotermal alterasyon zonlarının belirlenmesi açısından vazgeçilmez bir veri kaynağı haline getirmiştir.

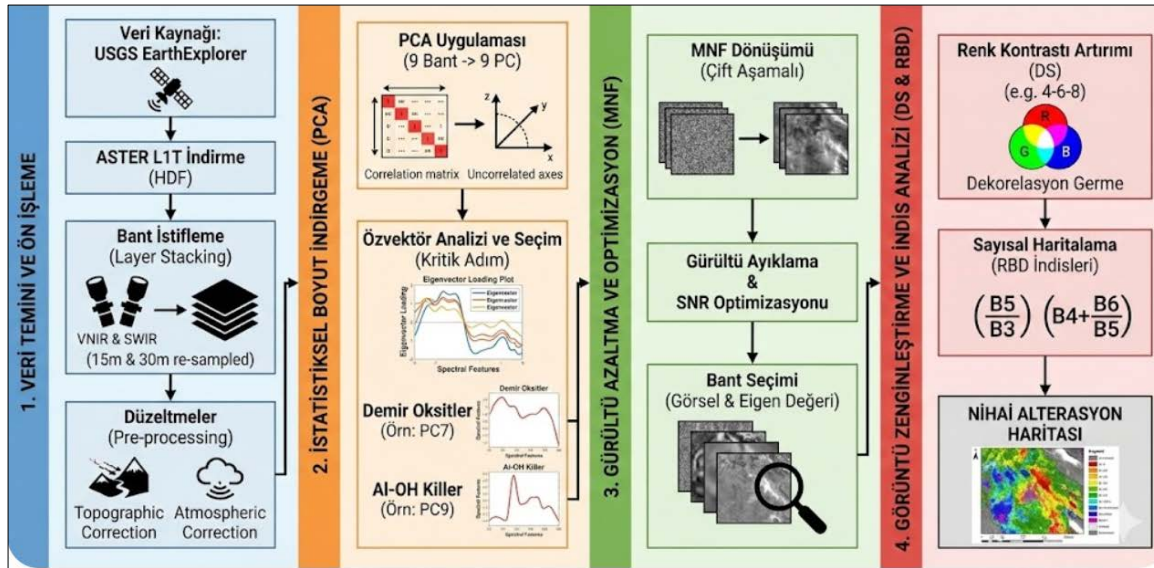
Bu çalışmada, ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu'nun (USGS) EarthExplorer platformu (<https://earthexplorer.usgs.gov>) üzerinden temin edilen ve 28.8.2006 tarihinde çekilen AST_L1T_00308282006081343_20150515223825_104789 görüntüsü kullanılmıştır (Şekil 1-c). Hiyerarşik veri formatında (HDF) olan bu görüntü, alterasyon minerallerinin dağılımının belirlenmesine yönelik spektral analizler için radyometrik ve atmosferik ön düzeltmeleri tamamlanarak VNIR ve SWIR aralığına ait ilk 9 bantı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. ASTER uydusunun teknik özellikleri.

Alt Sistem	Bant Numarası	Spektral Aralık (μm)	Yersel Çözünürlük(m)
Görünür ve Yakın Kızılötesi (VNIR)	B1	0.52-0.60	15
	B2	0.63-0.69	
	B3N	0.78-0.86	
	B3B	0.78-0.86	
Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR)	B4	1.60-1.70	30
	B5	2.145-2.185	
	B6	2.185-2.225	
	B7	2.235-2.285	
	B8	2.295-2.365	
	B9	2.360-2.430	
Termal Kızılötesi (TIR)	B10	8.125-8.475	90
	B11	8.475-8.825	
	B12	8.925-9.275	
	B13	10.25-10.95	
	B14	10.95-11.65	

3.2. Yöntem

Bu çalışmada, aktif faylar ile hidrotermal alterasyon zonları arasındaki mekânsal ilişkinin UA verileri kullanılarak ortaya konulması amacıyla, tekrarlanabilir ve sistematik bir metodolojik yaklaşım izlenmiştir (Şekil 2). İlk aşama veri temini ve ön düzeltme aşaması olup uydu verilerinin spektral analizler için radyometrik ve atmosferik ön düzeltmelerini içermektedir. İkinci aşama istatistiksel boyut indirgeme aşaması olup ASTER uydu görüntülerine PCA analizlerinin uygulanmasını sürecini içermektedir. Üçüncü aşama Gürültü azaltma ve optimizasyon süreçlerini içermekte olup bu aşama ASTER uydu görüntülerine Minimum Gürültü Fraksiyonu (MNF) dönüşümlerinin uygulanmasını içerir. Diğer aşama Görüntü Zenginleştirme ve indis analizlerini içerir. Son aşamada ise belirlenen hidrotermal alterasyon zonları mevcut fay hatları ile ilişkilendirilerek mekânsal değerlendirme sürecini kapsar.



Şekil 2. Çalışmanın iş akış şeması.

Temel Bileşen Analizi (PCA); Multispektral uydu görüntülerinde, özellikle birbirine komşu olan bantlar arasında $r > 0.90$ seviyesini aşan (genellikle %90-98 aralığında) oldukça yüksek korelasyon bulunmaktadır (Richards, 2013; Jensen, 2015). Bu değer, veride ciddi bir bilgi tekrarına neden olarak verinin spektral ayırt ediciliğini gölgeler (Akça ve Doğan, 2002; Gupta, 2003). Bu aşamada devreye giren *Temel Bileşen Analizi (PCA)*, korelasyonlu verileri, birbiriyle ilişkili olmayan (korelasyonsuz) yeni eksenlere dönüştürerek veri boyutunu azaltır ve görüntülerin daha kolay yorumlanmasını sağlar (Akça ve Doğan, 2002; Gupta, 2003; Sümer vd., 2006). PCA sonucunda elde edilen bileşenler (örneğin PC1, PC2 vb.), orijinal bantların taşıdığı varyansı farklı istatistiksel düzlemlere aktarır. Genellikle ilk bileşen (PC1), bölgenin topografyası ve yüzey yansıtma özelliklerini içerirken, sonraki bileşenler daha çok spektral farklılıkları yansıtır (Gupta, 2003). Ayrıca PCA analizinden elde edilen eigenvektör ve eigendeğerler, belirli minerallerin görsel olarak ayırt edilmesine olanak tanır. Örneğin, pozitif eigendeğerler görüntüde parlak tonlar olarak yansırken, negatif değerler koyu tonlarla temsil edilir ve bu sayede hedef mineral veya mineral grupları kolaylıkla seçilebilir (Loughlin, 1991).

Minimum Gürültü Fraksiyonu (MNF); yöntemi ise, verideki gürültüyü azaltmak, boyut sayısını düşürmek ve veri işlemeyi daha verimli hale getirmek amacıyla geliştirilmiş çift aşamalı bir dönüşümdür (Green vd., 1988). İlk aşamada, görüntüdeki rastgele gürültü bileşenleri ayrıştırılarak veriler yeniden ölçeklendirilir ve bantlar arasındaki bağımlılık en aza indirilir. Ardından, ikinci aşamada PCA uygulanarak, bu temizlenmiş veriler üzerinden yeni bileşenler elde edilir. Bu süreç sonunda özdeğeri 1'den büyük olan bileşenler bilgi açısından zengin olurken, 1'e yakın olan bileşenler çoğunlukla gürültüyü temsil eder. Böylece MNF, analiz edilecek görüntülerin kalitesini artırır ve elde edilen bileşenler içerdiği bilgi yoğunluğuna göre sıralanır (Boardman vd., 1995). Literatürde MNF'nin, hiperspektral ve multispektral verilerdeki sinyal-gürültü oranını (SNR) optimize ederek alterasyon alanlarını %15-20 daha net belirlediği rapor edilmiştir (Amer vd., 2016; Asadzadeh ve de Souza Filho, 2016).

Dekorelasyon Germe (DS); yöntemi ilk olarak Taylor'ın 1973 yılında gerçekleştirdiği çalışmalarıyla gündeme gelmiş, ardından Soha ve Schwartz (1978) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, multispektral verilerin renk kontrastını artırarak görsel analizde ayırt ediciliği yükseltmeyi amaçlar. DS, PCA temelli bir yaklaşım olup, veriler arasındaki korelasyonu azaltarak renkler arasındaki farkların daha belirgin hale gelmesini sağlar (Gillespie, 1992; Campbell, 1996). Uygulama dört temel adımdan oluşur: önce kovaryans matrisi ve eigenvektörler hesaplanır, ardından PCA dönüşümü gerçekleştirilir. Daha sonra, kontrast germe işlemi uygulanarak görüntünün dinamik aralığı artırılır ve son adımda ters dönüşümle görüntü, orijinal radyans değerlerine döndürülür. Sonuç olarak, elde edilen görüntü daha canlı renklere ve daha net ayırt edilebilir yapısal özelliklere sahip olur; bu da görsel analizlerin doğruluğunu önemli ölçüde artırır. Bu yöntemle, özellikle birbirine spektral olarak çok yakın olan kil ve karbonat mineralleri arasındaki görsel zıtlık (contrast) %40'a varan oranlarda artırılabilir (Rajendran vd., 2012).

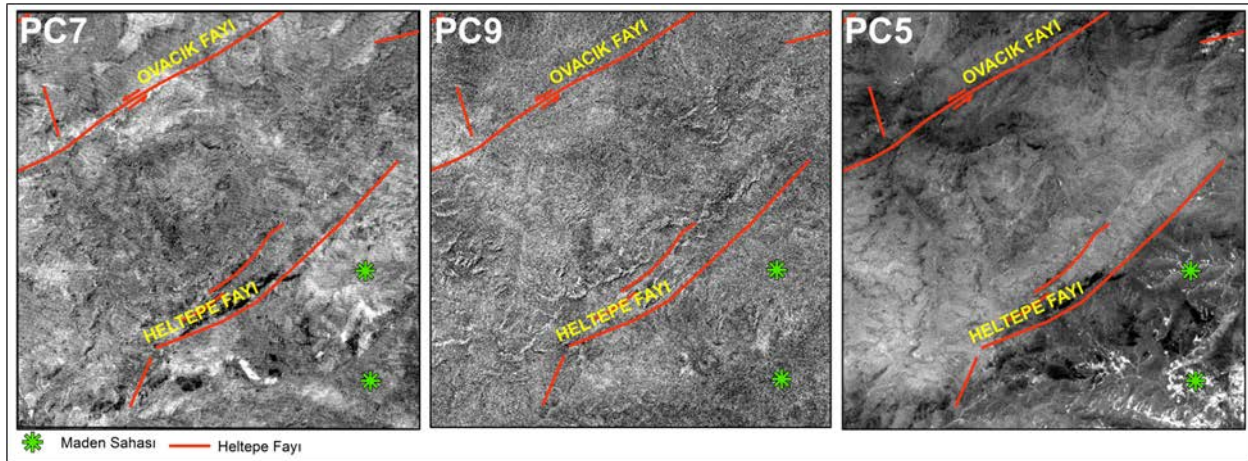
PCA, MNF ve DS her biri farklı açılardan veriyi sadeleştiren ve görsel olarak zenginleştiren bu yöntemler, özellikle karmaşık spektral bilgilerin daha anlaşılır hâle getirilmesinde etkili olmuştur (Singh ve Harrison, 1985; Gillespie vd., 1986; Green vd., 1988; Loughlin, 1991; Pour ve Hashim, 2015a, 2015b; Amer vd., 2016; Rajan Giriya, ve Mayappan, 2019; Khaleghi vd., 2020; Noori vd., 2023; Elghrabawy, 2025). Bu çalışmada kullanılan PCA, MNF ve DS gibi görüntü işleme yöntemleri, ASTER uydu verilerinden elde edilen bilgileri en verimli şekilde değerlendirmek için birbirini tamamlayan önemli araçlar olarak öne çıkmıştır. Bu tekniklerin entegrasyonu, tek başına bir bant oranlamasının sunamayacağı istatistiksel derinliği sağlayarak, Heltepe Fayı gibi aktif tektonik hatlar boyunca gelişen mineralojik değişimlerin saptanmasında yanıma payını minimize etmiştir.

4. Bulgular/Results

Heltepe Fayı ve çevresinde yürütülen uzaktan algılama analizleri sonucunda, bölgedeki hidrotermal alterasyon zonlarının aktif tektonik yapılarla mekânsal olarak doğrudan ilişkili olduğu ve mineral yoğunluğunun fay hatları boyunca lineer bir süreklilik sergilediği saptanmıştır. Bu kapsamda, mineralojik farklılaşmanın spektral olarak ayrıştırılması amacıyla uygulanan yöntemlerden elde edilen bulgular aşağıda detaylandırılmıştır.

Temel Bileşenler Analizi (PCA); Alterasyon minerallerinin tespiti amacıyla, yüksek spektral çözünürlük sağlayan uydu sistemleri etkin şekilde kullanılmaktadır. Bu tespit süreci, elektromanyetik spektrumun görünür-yakın kızılötesi (VNIR), kısa dalga kızılötesi (SWIR) ve termal kızılötesi (TIR) bölgelerinde elde edilen spektral imzaların analizine dayanmaktadır (Sabins, 1999). Çünkü mineraller, elektromanyetik spektrumda kendilerine özgü tanınabilir absorpsiyon özellikleri ile ayırt edilir. VNIR, SWIR ve TIR bantlarında kaydedilen bu özgün spektral özellikler, mineral ayrımı ve tanımlaması açısından temel bir araçtır (Hunt, 1977). Bu izlere örnek olarak demir oksit- hidroksil minerallerinin ASTER uydu verisinin Bant 1-Bant 2 ve Bant 3’de tanınabilir absorpsiyon özellikleri, kaolinit, alunite, muskovit gibi Al-OH mineralleri Bant 5-Bant 6 ve Bant 7’de tanınabilir özellikleri klorit, epidot, kalsit gibi Fe, Mg-OH ve CO₃ taşıyan minerallerin Bant 8 ve Bant 9’da tanınabilir yansımaları gösterir (Ninomiya, 2004; van der Meer vd., 2012; Pour ve Hashim, 2012).

Bu çalışmada ASTER uydu görüntüsünün VNIR ve SWIR bölgelerini kapsayan 9 bandına uygulanan PCA sonucuna eigenvektör değerleri PC 7’de en yüksek değerleri Bant 1 (-0,619) ve Bant 2 (0,437)’den alırken, PC 9’da en yüksek değerleri Bant 5 (0,469) ve Bant 6 (-0,718)’den alır. PC 5’de ise Bant 8 (-0,524) ve Bant 9 (0,612)’de en yüksek değerlere (+,-) sahiptir. PCA Analizinin Eigenvektör değerler Tablo 2’de ve yüksek eigenvektör değerlerini içeren bantlar (PC7-PC9-PC5) Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Uygulanan PCA analizinin yüksek eigenvektör değerleri içeren bantlar.

Tablo 2. ASTER uydusunun 9 bandına uygulanan PCA Analizinin Eigenvektör değerleri.

Eigenvektör	Bant 1	Bant 2	Bant 3	Bant 4	Bant 5	Bant 6	Bant 7	Bant 8	Bant 9
PC 1	0,234	0,299	0,314	0,453	0,342	0,376	0,314	0,248	0,361
PC 2	0,379	0,469	0,601	-0,089	-0,216	-0,228	-0,207	-0,161	-0,313
PC 3	-0,478	-0,42	0,624	0,136	-0,17	-0,147	0,13	0,332	-0,082
PC 4	-0,066	-0,22	0,02	0,615	0,168	0,224	-0,193	-0,513	-0,433
PC 5	0,038	-0,3	0,342	-0,257	0,107	0,091	-0,234	-0,524	0,612
PC 6	0,42	-0,42	0,131	-0,435	0,269	0,336	0,289	0,079	-0,406
PC 7	-0,619	0,437	0,114	-0,36	0,388	0,252	0,069	-0,167	-0,184
PC 8	0,054	-0,08	0,02	-0,002	0,567	-0,18	-0,68	0,414	-0,031
PC 9	0,049	-0,04	-0,01	0,066	0,469	-0,718	0,444	-0,231	0,009

Eigenvektör değerlerine göre PC7-PC9-PC5’in RGB (Kırmızı, Yeşil, Mavi) kanallara atanması sonucunda elde edilen Şekil 4-a’da sunulan PCA tabanlı alterasyon dağılım haritasına göre, Heltepe Fay Hattı ve bu hatta paralel uzanım gösteren ikincil faylar arasında, PC 9 bileşeninde yüksek skorlara sahip olan alunite ve kaolinit alterasyonları yeşil tonlarla görselleştirilmiştir. Ayrıca, Heltepe Fayı’nın kuzeydoğusunda yer alan bölgede, PC 7 bileşeninde kırmızı tonlarda temsil edilen demir oksitlerin yanı sıra, alunite ve kaolinit minerallerinin yoğunlaştığı alanlar da yeşil tonlarla belirgin şekilde görülmektedir. Bu mekânsal dağılım, hidrotermal akışkanların fay hatlarını ana iletim kanalları olarak kullandığını ve mineralleşmenin yapısal kontrole bağlı olarak geliştiğini ortaya koymaktadır.

Minimum Gürültü Fraksiyonu (MNF); ASTER görüntüsünün VNIR ve SWIR bantlarına uygulanan MNF dönüşümü sonucunda, özdeğerleri (eigenvalue) 1'den belirgin şekilde yüksek olan ve toplam veri varyansının büyük bir kısmını temsil eden ilk üç bileşen (MNF1: 56.90, MNF2: 22.22, MNF3: 19.38) analiz için seçilmiştir. Özdeğeri düşük olan (genellikle 1'e yakın) diğer bileşenler, yoğun gürültü içermeleri nedeniyle değerlendirme dışı bırakılmıştır.

MNF1, MNF2, MNF3 bileşenlerinin sırasıyla RGB (Kırmızı, Yeşil, Mavi) kanallara atanması sonucunda elde edilen kompozit görüntüsü (Şekil 4-b), bölgedeki litolojik birimlerin ve yapısal unsurların spektral ayrımını net bir şekilde ortaya koymaktadır. MNF dönüşümü, PCA'den farklı olarak verideki sinyal-gürültü oranını maksimize ettiği için, sadece mineral odaklı değil, genel litolojik unsurlara dayalı bir sonuç üretmiştir.

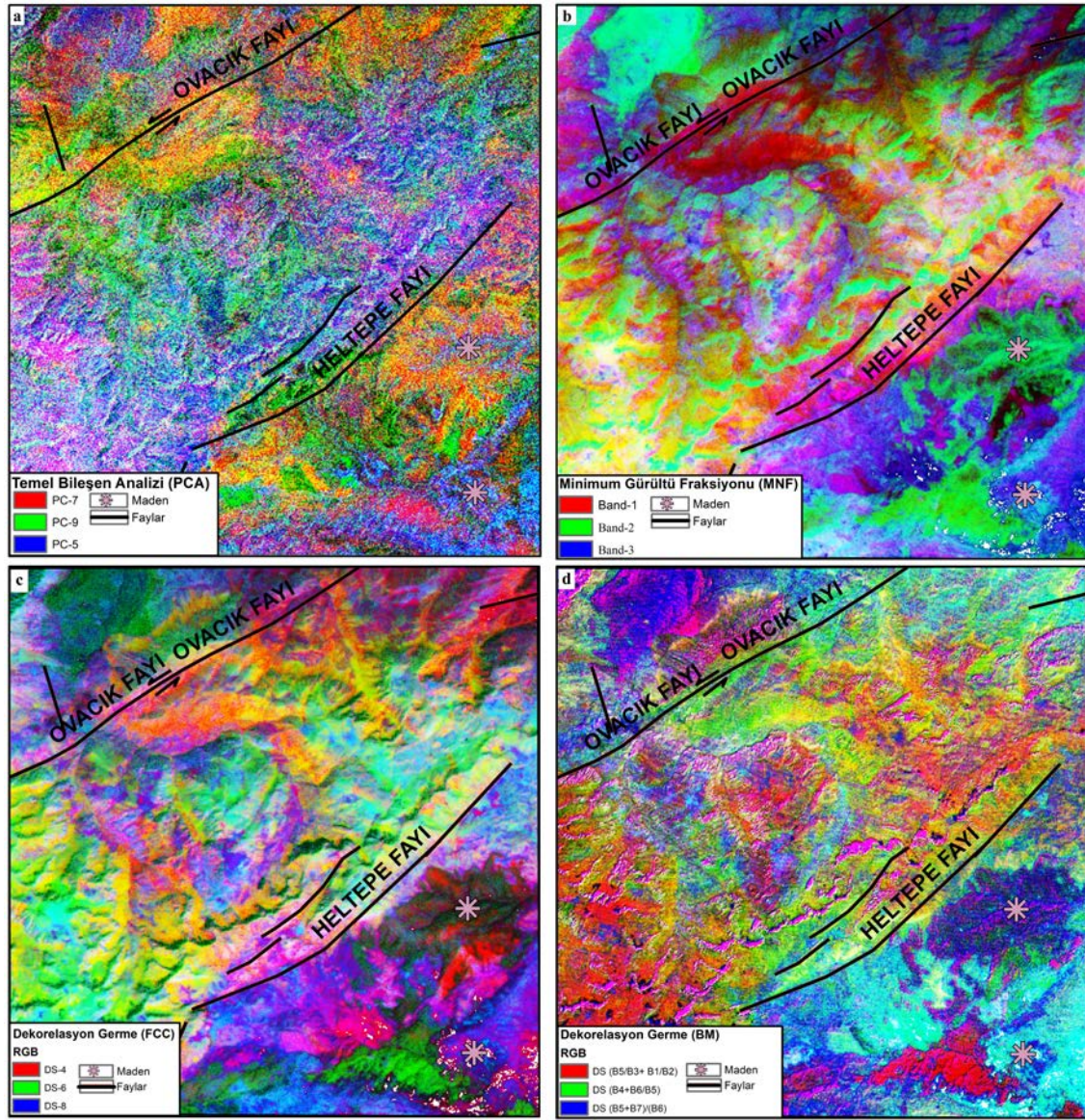
Ovacık ve Heltepe fay hatları boyunca gözlenen alterasyon izleri, spektral yansıma farklılıkları sayesinde çevre birimlerden ayırt edilebilmektedir. Görüntü genelinde izlenen mavimsi-kırmızımsı tonlar, bölgenin genel spektral karakteristiğini yansıtmakla birlikte, özellikle fay zonları boyunca bu tonların daha yoğun ve sürekli bir doku sergilediği gözlemlenmiştir. Ovacık Fayı'nın kuzeydoğusundaki mavimsi-yeşilimsi zon, yapısal kontrol altındaki alterasyonun tipik bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. PCA analizinde elde edilen spesifik mineral lokasyonları ile MNF görüntüsündeki bu yoğunlaşma alanlarının mekânsal olarak örtüştüğü, dolayısıyla MNF'nin alterasyonun yayılım sınırlarını belirlemede tamamlayıcı bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma alanının güneybatısındaki maden sahaları ile MNF bileşimindeki renk anomalilerinin korelasyon göstermesi, yöntemin doğruluğunu desteklemektedir.

Dekorelasyon Germesi (DS); Bantlar ve bant matematiği (oranları) yardımıyla oluşturulan yalancı renk kombinasyonlarına (FCC) Dekorelasyon Germe tekniği uygulanmıştır (Tablo 3). Kullanılan FCC ASTER uydu görüntüsünün 4,6,8 bantlarının RGB (kırmızı-yeşil-mavi) atanması ile alterasyon alanlarını ayırmada başarılı sonuçlar verir (Azizi vd., 2010; Guha vd., 2015; Rajendran ve Nasir, 2017; Canbaz vd., 2018; Fakhari vd., 2019; Rani vd., 2020; El-Desoky vd., 2022; Tripathi ve Govil 2022; Gholipour vd., 2025). Bu yalancı renkli kombinasyonda, propilitik alterasyon mineralleri (epidot, klorit, kalsit, dolomit vb.) yeşil renkte ve çok miktarda Al-OH minerali içeren filik alterasyon alanları (alunit, kaolinit vb.) pembemsi ile sarımsı bir renkte görünür (Azizi vd., 2010; Fakhari vd., 2019). İkinci olarak kullanılan yalancı renk kombinasyonunda Tablo 3'de verilen matematiksel bant oranları ve ilgili kanal atamaları ((B5/B3) + (B1/B2)-R; (B4+B6/B5)-G; (B5+B7) / (B6)-B) kullanılmış olup kırmızı kanal demir oksit, yeşil kanal argilik mineralleri ve mavi kanal ise filik zonları ayırt etmekte kullanılmıştır. Söz konusu kombinasyonlar, literatürde RBD (Relative Absorption Band Depth) analizi olarak tanımlanan uluslararası standartlara dayanmaktadır (Rowan ve Mars, 2003; Hewson vd., 2005; Rowan vd., 2006). Bu sistemde kırmızı kanal demir oksitleri, yeşil kanal Al-OH içerikli argilik mineralleri ve mavi kanal ise filik (serisitik) zonları ayırt etmek için tasarlanmış spektral indisleri temsil eder (Rowan ve Mars, 2003; Pour ve Hashim, 2012).

Tablo 3. DS uygulanan bant kombinasyonları.

Yalancı Renk Kombinasyonu (RGB)	Referans
B4-B6-B8	Azizi vd., 2010
$(B5/B3) + (B1/B2) - (B4+B6/B5) - (B5+B7) / (B6)$	Rowan ve Mars, 2003; Hewson vd. 2005

Şekil 4-c-d'de verilen Dekorelasyon Germesi sonucunda elde edilen FCC göre (B4-R; B6-G; B8-B) Heltepe Fayı'nın kuzey doğusunda pembemsi renkte görülen yoğun bir filik alterasyon alanı tespit edilmiştir. Tespit edilen yoğun filik alterasyonun güneyinde yeşil renkli görülen propilitik alterasyon alanı da net bir şekilde görülmektedir. Heltepe Fayı ve faya uzanan paralel faylar arasında birbirinden farklı alterasyon alanlarının varlığı gözle görülmektedir. Dekorelasyon Germesi sonucunda elde edilen bant oranlarının FCC'ye göre ((B5/B3) + (B1/B2)-R; (B4+B6/B5)-G; (B5+B7) / (B6)-B) örneklem alanında yeşil renk tonları ile ifade edilen ve alanda geniş yayılım gösteren argilik alterasyonları tespit edilmiştir. Dekorelasyon Germesi analizi sonucunda Ovacık Fay hattı üzerinde elde edilen FCC göre sarımsı- turuncumsu renkle ayırt edilen filik alterasyon alanı ile yeşil renk tonları ile ifade edilen ve alanda geniş yayılım gösteren argilik alterasyonları tespit edilmiştir.



Şekil 4. Çalışma alanına uygulanan (a); PCA, (b); MNF ve (c-d); DS analizlerinin sonuçları.

4. Tartışma ve Sonuç/ Discussion and Conclusion

Bu çalışmada, Heltepe Fayı boyunca gelişen hidrotermal alterasyon zonlarının dağılımı ile aktif tektonik yapılar arasındaki ilişki, ASTER multispektral verileri ve üç temel görüntü zenginleştirme tekniği (PCA, MNF, DS) aracılığıyla analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, alterasyon minerallerinin uzamsal dağılımının fay geometrisi ve fay zonlarına yakınlıkla anlamlı bir ilişki sergilediğini ortaya koymuş; böylece yapısal kontrollerin hidrotermal akışkan dolaşımını yönlendirerek mineral alterasyonunun oluşumu ve dağılımında belirleyici rol oynadığı doğrulanmıştır. Bu sonuçlar, fay zonlarının hidrotermal akışkan iletimindeki kanal olma işlevine yönelik literatürdeki temel modellerle (Sibson, 1994; Caine vd., 1996) de uyum içerisindedir. Aktif faylar, yer kabuğunda yüksek geçirgenliğe sahip ikincil kırık sistemleri oluşturarak, derinlikten gelen hidrotermal akışkanların yüzeye ulaşmasını sağlayan iletim zonları olarak işlev görmektedir. Heltepe Fayı çevresinde gözlenen yoğun killeşme ve demir oksit birikimleri, fayın sadece sismik bir kırık olmadığını, aynı zamanda hidrotermal bir kanal görevi görerek kayaların mineralojik kompozisyonunu değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle bazı alterasyon dağılımlarının fay atımları nedeniyle ötelenmiş olması, tektonik hareketlerin alterasyon süreçleri üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, Güzel ve Sarp (2024) tarafından DAF'ın Palu segmentinde yapılan çalışmalarla paralellik göstererek, aktif tektonik yapıların mineralojik parmak izlerinin uzaktan algılama verileri ile tutarlı bir şekilde takip edilebileceğini ispatlamaktadır.

PCA analizinde, spektral bantlar arasındaki varyans dağılımı kullanılarak elde edilen bileşenlerin, alterasyon zonlarını tanımlamada güçlü bir ayırt edicilik sağladığı saptanmıştır. Özellikle PC7, PC9 ve PC5 bileşenlerinde yüksek eigenvektör değerleriyle temsil edilen demir oksitler, Al-OH ve Mg-OH minerallerinin daha önceki çalışmalarda da

vurgulanan PCA tekniğinin bu tür mineral belirleme uygulamalarında etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir (Ninomiya, 2004; Rowan vd., 2006; Pour ve Hashim, 2012). PC bileşenlerinin oluşumunda hedef minerallerin karakteristik soğurma bantlarındaki yüksek eigenvektör, elde edilen anomalilerin mineralojik kökenlerini matematiksel olarak teyit etmektedir.

MNF analizi, düşük sinyal-gürültü oranına sahip bölgelerde bile anlamlı spektral varyasyonların tespit edilmesine olanak sağlamıştır. İlk üç bileşenin (MNF1, MNF2, MNF3) renk kombinasyonu ile elde edilen bulgular, Ovacık ve Heltepe fay zonları boyunca alterasyon yoğunluğunun artış gösterdiğini kanıtlamaktadır. Bu sonuç, Shirmard vd. (2020) ve Noori vd. (2023) tarafından bildirilen MNF'nin bilgi yoğunluğunu artırmadaki başarısıyla tutarlıdır.

DS yöntemiyle oluşturulan yalancı renkli görüntüler ise, özellikle filik ve propilitik alterasyonların görsel olarak net bir biçimde ayırt edilmesini sağlamıştır. Kullanılan bant oranlamalarına dayalı RBD renk kombinasyonları sayesinde, alterasyon türleri renk kontrastları üzerinden yüksek doğrulukla haritalanabilmiştir (Azizi vd., 2010; Fakhari vd., 2019; Gholipour vd., 2025).

Bununla birlikte, çalışmanın sınırlılıkları ve eleştirel değerlendirmesi de gelecek araştırmalar için önem arz etmektedir. Kullanılan uydu verisinin 2006 yılına ait olması, hidrotermal sistemlerin veya yüzey örtüsünün zaman içindeki değişimlerini gözden kaçırma riski barındırmaktadır. Tek zamanlı veri kullanımı, bitki örtüsü döngüsü ve nem oranı gibi değişkenlerin spektral yansıma üzerindeki mevsimsel etkilerini sınırlı düzeyde yansıtmaktadır. Gelecek çalışmalarda, farklı mevsimlere ve yıllara ait çok zamanlı uydu görüntülerinin entegre edilmesi, bitki örtüsü maskeleyişinin azaldığı dönemlerde daha derin ve ayrıntılı mineralojik detayların haritalanmasına imkân sağlayabilir. Ayrıca, farklı zaman serileri üzerinden yapılacak analizler, alterasyon zonlarının zamansal stabilitesini doğrulamak adına kritik önem taşımaktadır. Bununla birlikte, çalışmanın yalnızca ASTER verisiyle sınırlı kalması bir diğer kısıtlamadır; hiperspektral sensörlerin (PRISMA, EnMAP, EMIT vb.) analize dahil edilmesi, minerallerin spektral ayırt edebilirliğini artıracığı için daha detaylı sonuçlar sunabilir. Yapılacak benzer çalışmalarda EMS'nin TIR bölgesine ait görüntülerin analize dahil edilmesiyle özellikle karbonatlı litolojilerdeki kuvars ve kalsit gibi alterasyonları tespit etme potansiyelini artıracaktır. Son olarak, arazi çalışmalarının gerçekleştirilememiş olması, elde edilen UA bulgularının jeolojik ve mineralojik olarak doğrulanmasını kısıtlamaktadır. Arazi gözlemleri, laboratuvar analizleri (XRD, XRF, ASD spektroskopisi vb.) ile desteklenmediği sürece, UA temelli yorumların doğruluk düzeyi sınırlı kalabilir. Bu nedenle, benzer çalışmaların yer kontrol noktaları ve arazi örneklemeleri ile desteklenmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak bu araştırma, Heltepe Fayı örneğinde uzaktan algılama teknolojilerinin jeodinamik süreçlerin ve fay kontrollü hidrotermal alterasyonların anlaşılmasında etkili bir analitik araç olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, aktif fay zonlarının haritalanmasına katkı sağlamakta ve tektonik yapıların yüzeydeki mineralojik yansımalarının uzaktan algılama verileriyle bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Gelecekte çok zamanlı ve çoklu sensör yaklaşımlarının jeofizik, jeokimyasal ve spektral verilerle entegre edilmesi, alterasyon zonlarının daha hassas tanımlanması ve fay zonlarının süreksizliklerinin ortaya konulması açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- Abrams, M. 1984. Landsat-4 Thematic Mapper and Thematic Mapper Simulator data for a porphyry copper deposit. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 50(8), 1171–1173.
- Akça, M. D., ve Doğan, S. 2002. Sayısal görüntülerde ana bileşenler dönüşümü. Harita Dergisi, 69(128), 1–15.
- Amer, R., Kusky, T., El Mezayan, A. 2016. Hydrothermal alteration mapping in the Eastern Desert of Egypt using ASTER data. Ore Geology Reviews, 76, 127–140.
- Asadzadeh, S., ve de Souza Filho, C. R. 2016. A review on spectral processing methods for geological remote sensing. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 47, 69–90.
- Azizi, H., Tarverdi, M. A., Akbarpour, A. 2010. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from East Zanj, Northern Iran. Advances in Space Research, 46(1), 99–109.

- Başbüyük, Z., Kavak, K. Ş., Yalçın, H., Bozkaya, Ö. 2014. Köseadağ Magmatiklerinde (Zara-Sivas) Hidrotermal Alterasyonla İlişkili Kaolin Yataklarının Landsat Etm+ Görüntüsü Kullanılarak Belirlenmesi. Cumhuriyet Yerbilimleri Dergisi. 31(1-2).
- Boardman, J. W., Kruse, F. A., Green, R. O. 1995. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data [Paper presentation]. Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena, CA.
- Caine, J. S., Evans, J. P., Forster, C. B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025–1028.
- Campbell, N. A. 1996. The decorrelation stretch transformation. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10), 1939–1949.
- Canbaz, O., Gürsoy, Ö., Gökce, A. 2018. Detecting clay minerals in hydrothermal alteration areas with integration of ASTER image and spectral data in Köseadağ-Zara (Sivas), Turkey. *Journal of the Geological Society of India*, 91(4), 483-488.
- Demirtaş, R. 2019. Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS) Diri Fayları ve Deprem Etkinlikleri Paleosismolojik Çalışmalar ve Gelecek Deprem Potansiyelleri, DOI: 10.13140/RG.2.2.36608.69125, file:///C:/Users/Erkan%20AVLLAR/Downloads/KAFSfaylar%20(1), Erişim Tarihi: 10.12.2023.
- Di Tommaso, I., ve Rubinstein, N. 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 32(1-2), 275–290.
- El-Desoky, M. M., Abdel-Monem, A. A., Ghoneim, E. M. 2022. Hydrothermal alteration mapping using Landsat 8 and ASTER data in the Egyptian shield. *Remote Sensing*, 14(14), 3456.
- Elghrabawy, O. 2025. Mapping hydrothermal alteration zones of Gebel MU'TIQ area using ASTER and aeromagnetic data in central eastern desert, Egypt. *Journal of Applied Geophysics*, 106027.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1.
- Fakhari, S., Jafarirad, A., Afzal, P., Lotfi, M. 2019. Delineation of hydrothermal alteration zones for porphyry systems utilizing ASTER data in Jebel barez area, SE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 11, 80–92.
- Fujisada, H. 1995. Design and performance of ASTER instrument. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, 2583, 16–25.
- Gholipour, A. M., Nabatian, G., Rastad, E., Asadi, S. 2025. ASTER-based alteration mapping and structural analysis of the Saheb Divan hydrothermal system, NW Iran. *Natural Resources for Sustainable Development*.
- Gillespie, A. R. 1992. Enhancement of multispectral thermal infrared images: Decorrelation contrast stretching. *Remote Sensing of Environment*, 42(2), 147–155.
- Gillespie, A. R., Kahle, A. B., Walker, R. E. 1986. Color enhancement of highly correlated images: I. Decorrelation and HSI contrast stretches. *Remote Sensing of Environment*, 20(3), 209–235.
- 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.
- Guha, A., Ray, R., Gupta, S. 2015. Implementation of reflection spectroscopy-based ASTER indices and principal component transformation for hydrothermal mapping [Paper presentation]. *Proceedings of ISPRS Conference on Remote Sensing Applications*.
- Gupta, R. P. 2003. *Remote Sensing Geology* (2nd ed.). Springer-Verlag.
- Güzel, F. 2023. Uzaktan algılama teknolojileri kullanarak aktif tektonik ile mineral alterasyonu arasındaki ilişkinin belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, 130 s. Isparta.
- Güzel, F., ve Sarp, G. 2024. Evaluation of the tectonic activity of faults with mineral alterations: A case of the East Anatolian Fault-Palu segment, Türkiye. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 175, 149–165.
- Güzel, F., ve Sarp, G. 2025. Tektonik aktivitenin izleri: Fay-alterasyon ilişkisi ve ASTER verileri ile analizi (Ovacık fayı örneği). VII. Uluslararası Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Sempozyumu Tam Metin Bildiriler Kitabı (ss. 141–152).
- 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, 159–172.
- Hunt, G. R. 1977. Spectral Signatures Of Particulate Minerals In The Visible And Near Infrared. *Geophysics*, 42(3): 501-513.

- İnal, S., ve Kavak, K. Ş. 2024. Alterasyon Minerallerinin Haritalamasında Hiperspektral Görüntülerin Kullanılması. *Teknik Meslek Yüksekokulları Akademik Araştırma Dergisi*, 2(2), 32-38.
- Jellouli, A., Chakouri, M., Adiri, Z., El Hachimi, J., Jari, A. 2025. Lithological and hydrothermal alteration mapping using Terra ASTER and Landsat-8 OLI multispectral data in the north-eastern border of Kerdous Inlier, Western Anti-Atlas Belt, Morocco. *Artificial Satellites*, 60(1), 14-36.
- Jensen, J. R. 2015. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson Education.
- Kahle, A. B., Palluconi, F. D., Hook, S. J., Realmuto, V. J., Bothwell, G. 1991. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER). *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 3(2), 144-156.
- Kalimuthu, R., Porwal, A., Pandalai, H. S. 2025. Remote mapping of lineaments and hydrothermal alteration zones related to unconformity-related uranium deposits in the Badami Group of the western Kaladgi basin. *Ore and Energy Resource Geology*, 6, 100189.
- Kartal, R. F., Kadrioglu, F. T., Demirtaş, R. 2016. 3 Aralık 2015 Kiğı-Bingöl Depremi (Mw=5.3), artçı deprem aktivitesi ve bölgenin tektoniği ile ilişkisi [Bildiri]. 69. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara.
- Kayadibi, Ö. 2008. Mineral haritalamada bant oranlama ve Crosta metotları ile elde edilen sonuçların jeoistatistiksel olarak karşılaştırılması [Bildiri]. 2. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu, Kayseri.
- Khaleghi, M., Ranjbar, H., Abedini, A., Calagari, A. A. 2020. Synergetic use of the Sentinel-2, ASTER, and Landsat-8 Data for Hydrothermal Alteration and Iron Oxide Minerals Mapping in a Mine Scale. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 17(3).
- Loughlin, W.P. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(9), 1163-1169.
- Noori, L., Beiranvand Pour, A., Askari, G., Taghipour, N., Pradhan, B., Lee, C. W. 2023. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud-Chahshirin Magmatic Belt, NW Iran. *Remote Sensing*, 15(15), 3745.
- Nabatian, G., Songjian, A., Pour, A. B., Abdollahi, F. 2025. Integration of ASTER imagery and field data for gold exploration. *Earth Science Informatics*, 18, 112-128.
- Ninomiya, Y. 2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII*, SPIE, 5234, 180-190.
- Okada, K. 2021. A Historical Overview of the Past Three Decades of Mineral Exploration Technology. *Nat Resour Res* 30: 2839-2860.
- Öztürk, S. 2009. Deprem tehlikesi ve artçı çok olasılığı değerlendirme yöntemlerinin Türkiye'deki depremlere bir uygulaması Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 346s. Trabzon.
- Pour, A. B., ve Hashim, M. 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 44, 1-9.
- Pour, A. B., ve Hashim, M. 2015a. A review of remote sensing methods for mapping mineralized lithologies and hydrothermal alteration in arid region terrains. *Earth-Science Reviews*, 143, 123-134.
- Pour, A. B., ve Hashim, M. 2015b. Integrating Landsat-8 and ASTER data for mineral exploration in hydrothermal alteration zones, Zapshaneh area, NW Iran. *International Journal of Digital Earth*, 8(10), 839-857.
- Pour, A. B., Park, Y., Hashim, M. 2022. Satellite remote sensing for mineral exploration in hydrothermal alteration zones. *Ore Geology Reviews*, 144, 104850.
- Rajendran, S., Nasir, S., Kusky, T. M., Ghulam, A., El-Ghali, M. A. 2012. Remote sensing based approach for identification of hydrothermal alteration zones in Sabat area, Sultanate of Oman. *International Journal of Remote Sensing*, 33(18), 5802-5837.
- Rajendran, S., ve Nasir, S. 2017. Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of VMS deposits. *Ore Geology Reviews*, 81, 1215-1229.
- Rajan Girija, R., ve Mayappan, S. 2019. Mapping of mineral resources and lithological units: A review of remote sensing techniques. *International Journal of Image and Data Fusion*, 10(2), 79-106.
- Rajesh, H. M. 2020. *Mineral exploration using hyperspectral remote sensing*. Springer.
- Rani, A. J., Shetty, A., Kale, V. S. 2020. Mapping hydrothermal alteration zone through ASTER data in Gadag Schist Belt, India. *Environmental Earth Sciences*, 79, 279.

- Richards, J. A. 2013. Remote sensing digital image analysis: An introduction (5th ed.). Springer.
- Rowan, L. C., Bowers, T. L., Crowley, J. K., Anton-Pacheco, C., Gumiel, P., Kingston, M. J. 1995. Analysis of airborne visible-infrared imaging spectrometer (AVIRIS) data of the Iron Hill, Colorado, carbonatite-alkalic igneous complex. *Economic Geology*, 90(7), 1966–1982.
- Rowan, L. C., ve Mars, J. C. 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 350–366.
- Rowan, L. C., Schmidt, R. G., Mars, J. C. 2006. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 104(1), 74–87.
- Sabins, F. F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14, 157–183.
- Salem, S. M., El Sharkawi, M., El-Alfy, Z., Soliman, N. M., Ahmed, S. E. 2016. Exploration of gold occurrences in alteration zones at Dungash district, Southeastern Desert of Egypt using ASTER data and geochemical analyses. *Journal of African Earth Sciences*, 117, 389–400.
- Sarp, G., ve Erener, A. 2008. Litolojik birimlerin farklı sınıflandırma yöntemleri ile uydu görüntülerinden belirlenmesi. 1.Ulusal Jeolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 22–23 Mayıs, Cumhuriyet Üniversitesi Sivas, Türkiye.
- Shirmard, H., Farahbakhsh, E., Beiranvand Pour, A., Muslim, A. M., Müller, R. D., Chandra, R. 2020. Integration of selective dimensionality reduction techniques for mineral exploration using ASTER satellite data. *Remote Sensing*, 12(8), 1261.
- Sibson, R. H. 1994. Crustal stress, faulting and fluid flow. Geological Society, London, Special Publications, 78(1), 73–84.
- Singh, A., ve Harrison, A. 1985. Standardized principal components. *International Journal of Remote Sensing*, 6(6), 883–896.
- Soha, J. M., ve Schwartz, A. A. 1978. Multispectral histogram normalization contrast enhancement [Paper presentation]. 5th Canadian Symposium on Remote Sensing, Victoria, BC, Canada.
- Sümer, E. Ö., Gürçay, B., Pekesin, B. F., Avcı, K., Koruyucu, M., Dağlıyar, A., Teoman, A., Topçu, T., Özgüner, C. 2006. ASTER uydu verisi uygulamaları: Türkiye'den örnekler (Özel Yayın Serisi-5). Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü.
- Tarhan, N. 2007. 1:100 000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası, Erzincan İ-43 paftası. Jeoloji Etütleri Dairesi.
- Tarhan, N. 2008. 1:100 000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası, Erzincan J-43 paftası. Jeoloji Etütleri Dairesi.
- Taylor, M. M. 1973. Principal components color display of ERTS imagery [Paper presentation]. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351.
- Tripathi, M. K., ve Govil, H. 2022. Regolith mapping and geochemistry of hydrothermally altered, weathered and clay minerals, Western Jahajpur belt, Bhilwara, India. *Geocarto International*, 37(3), 879–895.
- USGS-EarthExplorer. 2022. EarthExplorer database. <https://earthexplorer.usgs.gov> (Erişim Tarihi: 05.03.2022).
- Van der Meer, F. D., van der Werff, H. M. A., van Ruitenbeek, F. J. A. 2014. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32, 32–47.
- Yamaguchi, Y., Kahle, A. B., Tsu, H., Kawakami, T., Pniel, M. 1998. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1062–1071.
- Yamaguchi, Y., ve Naito, C. 2003. Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands. *International Journal of Remote Sensing*, 24(22), 4311–4323.
- Yazıcı, M., Zabcı, C., Sançar, T., Natal'in, B. A. 2018. The role of intraplate strike slip faults in shaping the surrounding morphology: The Ovacık Fault (eastern Turkey) as a case study. *Geomorphology*, 321, 129–145.
- Zabcı, C., Sançar, T., Yazıcı, M., Tikhomirov, D., Ivy-Ochs, S., Vockenhuber, C., Akçar, N. 2016. Ovacık fayının morfolojik temelli kayma hızı: Anadolu'nun iç deformasyonu hakkında düşünceler [Bildiri]. Aktif Tektonik Araştırma Grubu (ATAG) Çalıştayı, Denizli.