

## Doğrultu atımlı sistemlerde gelişen havzaların jeotermal enerji bakımından incelenmesi için örnek bir çalışma: Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu fay sistemleri havza örnekleri

Önder KAYADİBİ<sup>1</sup>, Şule GÜRBOĞA<sup>2</sup>,  
Hafize AKILLI<sup>3</sup>, Serap ARIKAN<sup>1</sup>,  
Akın KÜRÇER<sup>2</sup>, Sevilay TAN<sup>1</sup>,  
Macit KARADAĞLAR<sup>3</sup>, Halim MUTLU<sup>4</sup> ve  
Orhan TATAR<sup>5</sup>

### 1. Giriş

Enerji, insanların eskiden beri en temel ihtiyaçlarından birisidir. Sanayileşme, kalkınma, teknolojik gelişme ve artan nüfus ile birlikte Ülkemizde ve dünyada enerjiye olan talep giderek artmaktadır. Fosil yakıtların yenilenememesi ve rezervlerinin tükenmesi, maliyetlerinin yüksekliği, çevreye olan olumsuz etkileri gibi sebepler, alternatif enerji kaynaklarının aranmasına yol açmıştır. Jeotermal enerji, yenilenebilir, sürdürülebilir, düşük maliyetli, temiz, düşük CO<sub>2</sub> emisyonu, çevreye olumsuz etkilerinin oldukça az olması ve çok amaçlı ısıtma uygulamaları için uygun olması sebebiyle önemli enerji kaynaklarından birini oluşturmaktadır.

Bilindiği gibi Ülkemiz, petrol ve doğal gaz gibi fosil enerji ihtiyacını büyük oranda dış kaynaklardan sağlamaktadır. Bu sebeple enerji ihtiyacımızın yerli kaynaklardan karşılanma imkanlarının titizlikle araştırılması, alternatif enerji kaynaklarının bulunması ve ülke ekonomisine kazandırılması büyük önem arz etmektedir. Güneş, rüzgar, jeotermal, hidroelektrik enerjileri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının arttırılması, enerji kaynaklarımızı çeşitlendirmek ve enerji ihtiyacımızı karşılamak açısından gereklidir. Bu anlamda jeotermal enerji, önemli bir potansiyel oluşturmaktadır.

Günümüzde uydu verileri ve coğrafi bilgi sistemi (CBS) araç ve yöntemlerinden, jeotermal arama ve değerlendirme çalışmalarından üretime kadar birçok aşamada yararlanılmaktadır. Bunlar; yüzey sıcaklık değerleri (Land surface temperature-LST) ile jeotermal ısı akısı (Geothermal heat flux-GHF) değerlerinin hesaplanması, jeotermal kaynaklar ile ilişkili hidrotermal alterasyon anomali alanlarının ve minerallerinin belirlenmesi, fay ve fay sistemi gibi tektonik yapıların ortaya çıkarılması, jeotermal rezervuarlarındaki değişimlerin belirlenmesi ve izlenmesi ve jeotermal enerji açısından potansiyel

olası hedef alanların modellenmesi olarak özetlenebilir (Van der Meer vd., 2014; Gutiérrez vd., 2012; Mia vd., 2018; Vaughan vd., 2003, 2012; Kruse, 2012; Calvin ve Pace, 2016; Giordano vd., 2013; Reinisch vd., 2020; Wang vd., 2014).

Son yıllarda dünyadaki jeotermal enerji aramalarının kıta-ıçi aktif doğrultu atımlı fay zonları üzerinde gelişen çek-ayır (pull-apart) havzalarda yoğunlaştığı dikkat çekmektedir (Bennett, 2011; Muraoka vd., 2010; Flautz ve Hintz, 2015). Kıta-ıçi doğrultu atımlı fay sistemleri, litosferden yer yüzeyine kadar gelişmiş derin yapılar oldukları için, yer içindeki ısıyı sığ derinliklere kadar kolaylıkla aktarabilen doğal taşıyıcılarıdır. Bu tür ısı akısının artış gösterdiği alanlar, özellikle doğrultu atımlı fayların sıçrama (releasing step-over) yaptığı ve kabuktaki genişleme etkisinin ortaya çıktığı çek-ayır havzalardır (pull-apart basins). Çek-ayır havzalar, bir doğrultu atımlı fay sistemi içerisinde yer kabuğunun en ince olduğu ve bu nedenle astenosferden yükselen manto malzemesinin sığ derinliklere kadar sokulabildiği potansiyel jeotermal alanlardır (Wu vd., 2009).

Türkiye, jeolojik gelişim tarihçesi boyunca, Gondvana ve Lavrasya kıtaları arasında kalmış ve en az üç okyanusal havzanın açılıp-kapandığı bir yapısal ortamda yer almıştır (Göncüoğlu vd., 2010). Türkiye ve yakın çevresinin güncel tektoniği, Alpin orojenezi tarafından kontrol edilir (Göncüoğlu vd., 2010). Geç Alpin tektonik hareketlerine bağlı olarak gelişen Alp-Himalaya Orojenik Kuşağı içerisinde yer alan Türkiye ve yakın çevresi, sahip olduğu özel jeotektonik konumu nedeniyle çok sayıda aktif fay ve genç volkanizmaya ev sahipliği yapmaktadır. Türkiye bu özellikleri nedeniyle, jeotermal enerji potansiyeli bakımından Avrupa'nın birinci ülkesi ve kurulu güç bakımından ise dünyanın dördüncü ülkesi konumundadır (ETKB, 2021).

Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS) ve Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) Doğu Akdeniz bölgesinin en önemli aktif doğrultu atımlı fay sistemlerindedir. KAFS, Gondvana ve Lavrasya levhalarını birbirinden ayıran eski bir çarpışma zonu üzerine yerleşmiş ve günümüzde Anadolu ile Karadeniz mikro levhalarını birbirinden ayıran aktif, sağ yanal doğrultu atımlı bir yapısal unsurdur

<sup>1</sup> Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Uzaktan Algılama ve CBS Koordinatörlüğü, Ankara.

<sup>2</sup> Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Aktif Tektonik ve Deprem Araştırmaları Koordinatörlüğü, Ankara.

<sup>3</sup> Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi, Ankara.

<sup>4</sup> Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara.

<sup>5</sup> Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas.

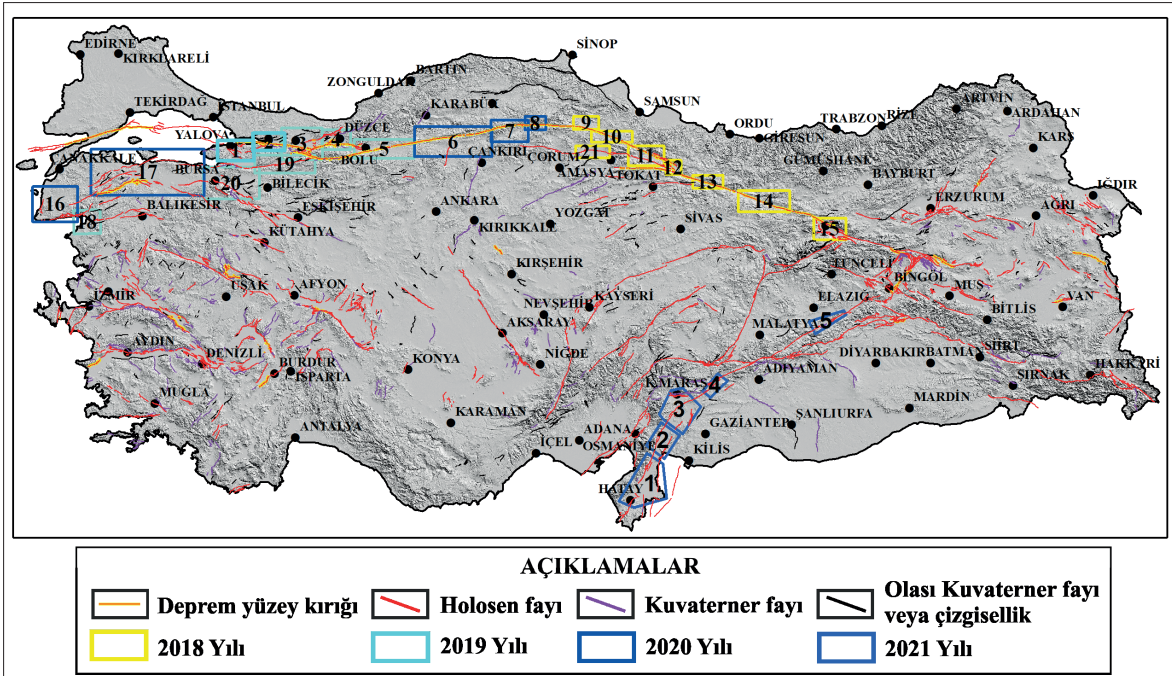
(Şengör vd., 2005). Doğu Anadolu’da Karlıova üçlü eklem noktasından başlar ve yaklaşık 1200 km uzunluğunda bir çizgisel zon boyunca Adapazarı’nın doğusuna kadar ulaşır. Buradan itibaren gelişen gerilme durumlarının da etkisiyle kuzey ve güney kol olmak üzere iki kola ayrılarak büyük ölçekli bir at kuyruğu yapısı (horse-tail structure) meydana getirir (Barka ve Gülen, 1988; Barka, 1992). Kuzey kol, Sapanca Gölü üzerinden Marmara Denizi’ne daha sonra Saroz Körfezi üzerinden Kuzey Ege Denizi’ne doğru uzanır. Güney kol, Marmara Denizi güney kıyısına koşut olarak B-D doğrultusunda Kapıdağ Yarımadası’na kadar uzanır ve buradan itibaren GB’ya doğru dönerek KD-GB doğrultusunda birkaç aralı-aşmalı (en-echelon) fay ile Biga Yarımadası’nı kat eder ve Edremit Körfezi üzerinden Ege Denizi’ne ulaşır. KAFS’nin tarif edilen bu ana kollarından başka bir de Anadolu mikro levhası içerisine doğru GB yönünde uzanan, Ezinepazarı-Sungurlu, Merzifon-Esençay, Almus fayları gibi yan kolları (splay faults) bulunmaktadır (Barka, 1992). Orta ve Doğu Anadolu Bölgesi ise, Afrika-Arabistan ve Avrasya levhaları arasındaki kıtasal çarpışmanın sonrasında gelişen kıta-içi volkanik faaliyetlerin etkin olduğu bölgelerdir. KAFS ve DAFS üzerinde bazıları çek-ayır karakterde oluşmuş çok sayıda havza bulunmaktadır (Şengör vd., 2005). Bu havzalarda bilinen sıcak su kaynakları, önemli jeotermal kaynak potansiyelleri bulunduğu işaret etmektedir. Söz konusu havzaların jeotermal enerji potansiyellerini değerlendirmek ve yeni

jeotermal kaynakları ülke ekonomisine kazandırmak oldukça önem arz etmektedir.

Bu kapsamda Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi bünyesinde “Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Doğu Anadolu Fay Zonu Boyunca Gelişmiş Havzaların Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Yöntemleri ile İncelenmesi” başlıklı proje 2018 yılında başlatılmıştır. Çalışmanın amacı, KAFS ve DAFS boyunca gelişmiş havzaların (KAFS: 21 havza ve DAFS: 5 havza) jeotermal enerji potansiyellerinin uzaktan algılama ile başlayan jeolojik, tektonik ve hidrojeolojik vb. çalışmalar ile devam eden ve tüm verilerin CBS ortamında değerlendirildiği bir çalışma ortaya koymaktır. Bu sayede, detay etütler (gaz ölçümleri, jeofizik vb.) için olası potansiyel hedef alanların belirlendiği örnek bir çalışma yapılması amaçlanmıştır.

## 2. Çalışma Alanları

Projenin çalışma alanlarını, KAFS ve DAFS boyunca gelişmiş bazıları çek-ayır karakterde olan havzalar oluşturmaktadır. Proje kapsamında, 21 tanesi KAFS ve 5 tanesi DAFS üzerinde olmak üzere 26 havza çalışılmıştır (Şekil 1 ve Çizelge 1). Proje çalışmaları kapsamında, KAFS üzerinde 2018 yılında; Erzincan, Suşehri (Sivas), Reşadiye (Tokat), Niksar (Tokat), Taşova (Amasya)-Erbaa (Tokat), Havza-Ladik (Samsun), Vezirköprü (Samsun) ve Merzifon-



Şekil 1- Çalışma alanlarının yıllara göre çalışma planını gösteren yer buldurular haritası. Rölyef haritası, “Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)” sayısal yükseklik verilerinden hazırlanmıştır (Diri faylar: Emre vd., 2013, SRTM: USGS, 2021).

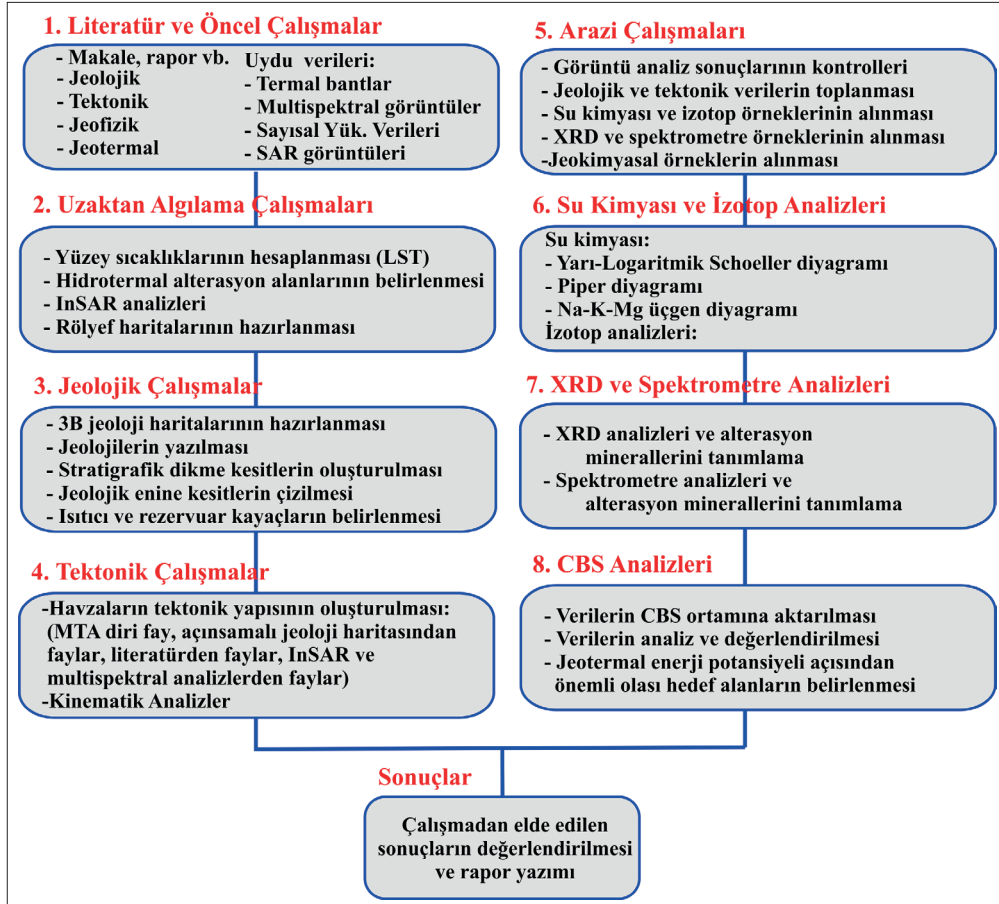
Çizelge 1- Çalışılan havzaların yıllara göre dağılımı.

2018	2019	2020	2021
Erzincan H.	Bolu-Yeniçağ H.	Manyas (Balıkesir) H.	Kırkhan (Hatay) Havzası
Suşehri (Sivas) H.	Sakarya H.	Çerkeş-Kurşunlu (Çankırı) H.	İslahiye (Gaziantep) H.
Reşadiye (Tokat) H.	Düzce H.	Kargı (Çorum) H.	Kahramanmaraş Havzası
Niksar (Tokat) H.	Pamukova (Sakarya) H.	Tosya (Kastamonu) Havzası	Gölbaşı (Adıyaman) H.
Taşova-Erbaa (Tokat) H.	Edremit (Balıkesir) H.	Yalova Havzası	Sivrice (Elazığ) Havzası
Havza-Ladik (Samsun) H.	Yenişehir (Bursa) H.	Gölcük (İzmit) Havzası	
Vezirköprü (Samsun) H.		Bayramiç (Çanakkale) H.	
Merzifon (Amasya) H.			

Suluova (Amasya) havzalarında, 2019 yılında; Bolu-Yeniçağ, Sakarya, Düzce, Pamukova (Sakarya), Edremit (Balıkesir) ve Yenişehir (Bursa) havzaları, 2020 yılında ise Manyas (Balıkesir), Çerkeş-Kurşunlu (Çankırı), Kargı (Çorum), Tosya (Kastamonu), Yalova, Gölcük (İzmit) ve Bayramiç (Çanakkale) havzalarında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 2021 yılında ise DAFS üzerinde yer alan Kırkhan (Hatay), İslahiye (Gaziantep), Kahramanmaraş, Gölbaşı (Adıyaman) ve Sivrice (Elazığ) havzalarında çalışmalar yürütülmüştür.

### 3. Proje Kapsamında Uygulanan Yöntemler: Uzaktan Algılama, Jeoloji, Tektonik, Hidrojeoloji, CBS Çalışmaları

Uzaktan algılama analizleri, jeolojik verilerin derlenmesi ve arazi gözlemleri ile bütünleştirilmesi, tektonik ve hidrojeolojik çalışmalar, proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların ana başlıklarını oluşturmaktadır. Model çalışmanın son aşamasında ise elde edilen tüm alansal veri katmanları, coğrafi bilgi sistemi (CBS) ortamında değerlendirilerek sonuçlar üretilmektedir (Şekil 2). Şekil 2'de sunulan



Şekil 2- Çalışmanın akış şeması.

akış şemasında yapılmış çalışmalara dair detaylı aşamalar yer almakta olup, her havza için bu akış şeması esas alınarak proje çalışmaları yürütülmüştür.

### 3.1. Literatür ve Öncel Çalışmalar

Çalışma alanlarına ait literatürde yer alan verilerin temini ve incelenmesi, mevcut jeolojik ve tektonik haritaların sağlanması ve/veya çalışmanın amaçlarına uygun olanlarının sayısallaştırılması, jeotermal verilerin temini çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan ASTER (gece ve gündüz çekim), Landsat 7 ETM+ ve Landsat 8 multispektral uydu görüntüleri, ALOS Palsar-1 yapay açıklıklı radar (Synthetic Aperture Radar-SAR) görüntüleri ile SRTM sayısal yükseklik verileri temin edilmiştir.

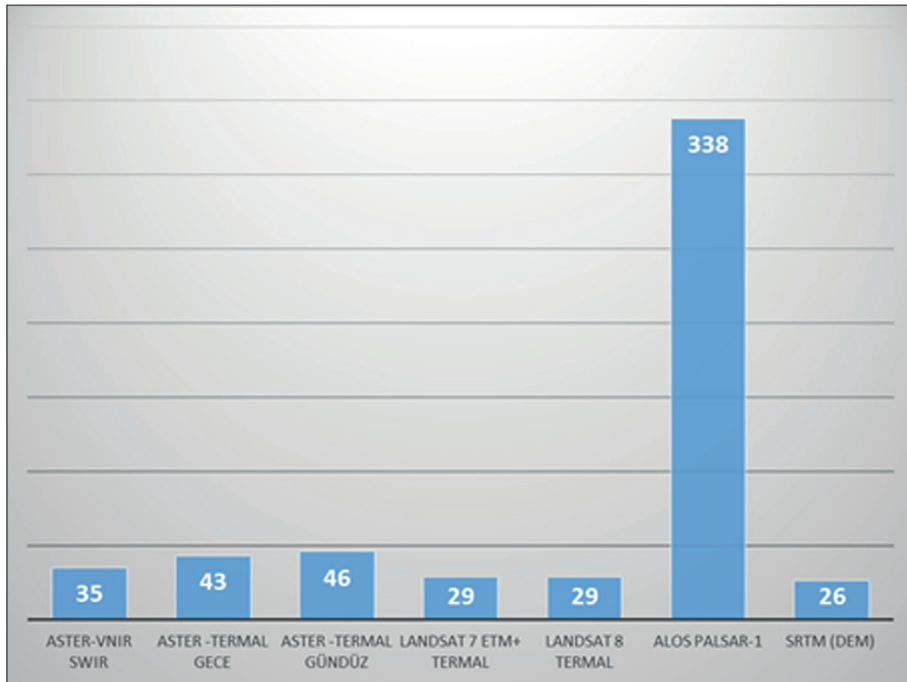
### 3.2. Uzaktan Algılama Çalışmaları

Çalışmanın amaç, kapsam ve hedefleri doğrultusunda üç grup uzaktan algılama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bunlar; yüzey sıcaklık değerlerinin hesaplanması, jeotermal kaynaklar ile ilişkili hidrotermal alterasyon anomali alanlarının ve minerallerinin belirlenmesi ve SAR görüntülerinin interferometrik analizleridir. Bu analizlerde görünür-yakın ve kısa dalga kızılötesi (VNIR-SWIR) ASTER, ASTER termal (gece/gündüz çekim), Landsat 7 ETM+ termal, Landsat 8 TIRS, ALOS Palsar-1 görüntüleri ile SRTM sayısal yükseklik verilerinden (DEM) oluşan çok sayıda uydu verisi kullanılmıştır (Şekil 3).

#### 3.2.1. Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Hesaplanması

Günümüzde Landsat 7 ETM+, Landsat 8 ve ASTER gibi multispektral görüntülerin termal bantları, yüzey sıcaklığını belirlemeye olanak sağlamaktadır (Abrams, 2000; Pieri ve Abrams, 2005; Coolbaugh vd., 2007; Srivastava vd., 2009; Qin vd., 2011; Gutiérrez vd., 2012). Jeotermal arama ve değerlendirme çalışmalarında kullanılan en önemli uzaktan algılama araçlarından birisi, uydu verilerinin termal bantlarından yüzey sıcaklık değerlerinin (Land surface temperature-LST) hesaplanmasıdır. ASTER, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8, MODIS gibi uydu verilerinin termal bantlarından hesaplanan yüzey sıcaklık haritalarından, birçok jeotermal enerji arama ve değerlendirme çalışmasında yararlanılmıştır (Van der Meer vd., 2014; Calderón-Chaparro ve Vargas-Cuervo, 2019; Norini vd., 2015; Hulley vd., 2012).

Proje kapsamında jeotermal enerji açısından olası hedef alanları belirlemek amacıyla uydu verilerinin termal bantlarından LST değerleri hesaplanmıştır. Çalışma alanlarını oluşturan tüm havzalar için ASTER-gece çekim, ASTER-gündüz çekim, Landsat 7 ETM+ ve Landsat 8 uydu verilerinin termal bantlarından hesaplanan dört adet yüzey sıcaklık haritası hazırlanmıştır. Daha sonra ASTER-gündüz çekim, Landsat 7 ETM+ ve Landsat 8 LST haritalarının en yüksek 10 değerlerinin ortalamasına ait gündüz çekim termal bantlardan hesaplanan ortalama LST haritaları üretilmiştir.



Şekil 3- Çalışmada kullanılan uydu verileri.

### 3.2.2. Hidrotermal Alterasyon Anomali Alanlarının Haritalanması

1972 yılında ilk Landsat uydusunun fırlatılmasından günümüze kadar multispektral görüntüler ve 1980'lerin başlarından itibaren AVIRIS, Hyperion, HyMap gibi hiperspektral görüntüler, hidrotermal alterasyon anomali alanlarını belirlemek için yaygın olarak kullanılmıştır (Abrams ve Hook, 1995; Hubbard vd., 2003; Hewson vd., 2005; Van der Meer vd., 2012; Ferrier vd., 2002; Rowan vd., 2003; Crosta vd., 1998; Rowan vd., 2000; Kruse vd., 1993; Zadeh vd., 2014; Bedini, 2011). Ayrıca termal bantların yayma (emissivity) verilerinden, kayaç ve mineralleri tanımlamak ve haritalamak amacıyla birçok çalışmada yararlanılmıştır (Hook vd., 1999; Vaughan, vd., 2003, 2005).

Bu çalışmada jeotermal sistemler ile ilişkili hidrotermal alterasyon anomali alanlarını haritalamak için ASTER görüntülerinin görünür/yakın kızılötesi (VNIR) ile kısa dalga kızılötesi (SWIR) dalga boyu bölgesindeki spektral bantları kullanılmıştır. Bant oranlama metodu kullanılarak; Al-OH içeren mineraller (Kil mineralleri, muskovit vb.), alunit/kaolinit, silisleşme, demiroksit/hidroksit mineralleri (hematit, götit vb.) ile CaCO<sub>3</sub> (Karbonat mineralleri)/Mg-OH (klorit, epidot vb.) içeren minerallere ait beş grup anomali haritası oluşturulmuştur.

### 3.2.3. InSAR Analizleri

InSAR, SAR görüntülerinin faz karşılaştırmalarını esas alır. InSAR, tüm hava koşullarında, gece-gündüz, geniş alanları kapsayan (binlerce km<sup>2</sup>), yüksek alansal çözünürlük (1 m'ye kadar) ve yüksek ölçüm kabiliyetine sahip (santimetreden daha küçük) ve hiç bir yer cihazına gereksinim olmadan yeryüzeyindeki deformasyonları zamansal ve alansal ölçekte belirlemek ve ölçmek için kullanılan güçlü ve etkili bir uzaktan algılama tekniğidir (Zebker ve Goldstein, 1986; Massonnet vd., 1993;1995, Ferretti, vd., 2001; Zhang, vd., 2012).

Proje kapsamında havzalardaki yüzeysel deformasyonları (çökme, yükselme vb.) belirlemek amacıyla SAR görüntülerinin interferometrik analizlerinden yararlanılmıştır. Temin edilebilen tüm ALOS Palsar-1 SAR görüntü grupları, çok-zamanlı InSAR (Multi-temporal InSAR-MTI) metodlarından birisi olan "Küçük Temel Alt Kümesi İnterferometri (Small Baseline Subset-SBAS)" metodu kullanılarak analiz edilmiştir.

### 3.3. Jeolojik Çalışmalar

Bir jeotermal sistemde ısıtıcı, rezervuar ve örtü kayaçlarının tanımlanması ve kalınlıklarının

belirlenmesi, jeotermal kaynak oluşumu için oldukça önemlidir. Bu sebeple çalışılan havzaların jeolojik özelliklerini ortaya koymak amacıyla başlıca beş temel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar;

1. MTA 1:100.000 ölçekli açınmalı jeoloji haritaları, 1:25.000 ölçekli MTA Türkiye Jeoloji Veri Tabanı (TJVT) verileri, MTA raporları, Ulusal ve Uluslararası makaleler, Kuzey Anadolu Fay Atlası, Doğu Anadolu Fay Atlası gibi mevcut yayınlardaki jeoloji haritaları düzenlenerek havzaların sayısal yükseklik modellerinden (DEM) üretilen rölyef haritası üzerinde gösterilen üç boyutlu 1:100.000 ölçekli jeoloji haritaları hazırlanmaktadır.
2. Havzaların jeolojisi, mevcut 1:100.000 ölçekli açınmalı jeoloji haritaları ve diğer literatür verileri (MTA raporları, makaleler vb.) kullanılarak yazılmaktadır.
3. Havzaların jeoloji haritaları ve literatür çalışmaları dikkate alınarak birimlere ait adlandırma, litolojik özellikler, kalınlık, yaş, ortam vb. bilgiler ışığında havzaların stratigrafik dikme kesitleri oluşturulmaktadır.
4. Daha sonra dikme kesitler üzerinde hidrojeolojik analiz sonuçlarına göre jeotermal sistemde rezervuar ve ısıtıcı olabilecek birimler ayırt edilmektedir.
5. Mevcut veriler ile hazırlanmış ve düzenlenmiş olan jeoloji haritası üzerinde havzaları jeotermal sistem açısından temsil eden jeolojik enine kesitleri (havzaların kavramsal modeli) hazırlanmaktadır.

### 3.4. Tektonik Çalışmalar

Bilindiği gibi fay ve fay sistemleri gibi tektonik yapılar, jeotermal sistemler için suların dolaşımını ve yeraltında ısı transferini sağlayan en önemli bileşenlerdendir. Bu çalışmada, her havza için aşağıdaki tektonik çalışmalar yürütülmüştür:

#### 3.4.1. Tektonik Yapı Haritaları

Başta 1:25.000 ölçekli MTA diri fay haritaları olmak üzere, 1:100.000 ölçekli açınmalı jeoloji haritalarında ve 1:25.000 ölçekli MTA Türkiye Jeoloji Veri Tabanı (TJVT) haritalarında, KAF Atlası'nda, DAF Atlası'nda ve makalelerde yer alan fay haritaları bütünleştirilmekte ve arazi çalışmaları ile belirlenen faylar da eklenerek havzaların tektonik yapı haritaları oluşturulmaktadır.

Arazi gözlemleri sırasında literatürde yer almayan fayların da haritaya çizilmesi ve envantere girmesi sağlanmaktadır. Eksik olan fayların güncellenmesi

jeotermal sistemlerin tam olarak ortaya konması için büyük önem taşımaktadır.

### 3.4.2. Gerilme Analizleri (Kinematik Analizler)

Havzalardaki egemen sıkışma ve genişleme yönlerini belirlemek için kinematik analizler yapılmakta ve değerlendirmeler sonucunda havzada yüzeye sıcak su getirecek kırık ve çatlak sistemleri belirlenmektedir. Böylece, havzalara ilişkin gerilme yönleri belirlenerek fay ve fay sistemlerinin yeraltı suyu taşıma potansiyelleri değerlendirilmektedir. Fay düzlemleri üzerinden alınan kayma verilerinin Angelier (TECTO) programı kullanılarak gerilme analizleri yapılmaktadır. Bir havzada gelişen tüm fay ve fay sistemleri ile diri faylar yüzeye akışkan taşıma kapasitesine sahip olmayabilir. Bu potansiyelin ortaya konması için, güncel sıkışma-genişleme rejiminin ortaya konması ve fay geometrileri ile ilişkisinin araştırılması gerekir. Bu nedenle, arazi gözlemleri sırasında elde edilen veriler, gerilme analizleri sayesinde akışkan getirme potansiyelleri bakımından incelenmektedir.

### 3.5. Hidrojeolojik Çalışmalar

Çalışma alanlarını oluşturan havzalarda hidrojeolojik çalışmalar kapsamında ise kimyasal örnekleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Örnekleme yapılırken uzaktan algılama çalışmaları sonucunda elde edilen anomali sahaları ve mevcut sıcak su noktaları baz alınmıştır. Her su noktasından üçer adet örnekleme yapılmıştır. İkişer adet su örneği, majör anyon-kasyon ve iz element analizleri için yüksek yoğunluklu poliüretan kaplarda toplanmıştır. Duyarlı izotop analizleri (Tritiyum, Döteryum ve Oksijen-18), DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Laboratuvarları'nda analiz edilmiştir. Alınan sıcak ve soğuk su örneklerinin su kimyası ve duyarlı izotop analiz sonuçları, çeşitli diyagramlarda değerlendirilerek her havzadaki kaynakların oluşumu, kökeni, izotopik ve hidrokimyasal özellikleri ile su-kayaç ilişkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

### 3.6. Diğer Çalışmalar

Jeotermal sistemler ile ilişkili hidrotermal alterasyon minerallerini belirlemek amacıyla hidrotermal alterasyon alanlarından alınan örneklerin spektrometre ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Alınan örneklerin spektrometre ölçümleri, laboratuvarında ASD Fieldspec Pro spektrometre kullanılarak yapılmıştır. Spektral analizleri ile alterasyon mineralleri tanımlanmaktadır. Ayrıca aynı örneklerin XRD analizleri yapılarak spektrometre analiz sonuçlarının doğrulaması yapılmaktadır.

### 3.7. Arazi Çalışmaları

Proje kapsamında her havzada kısa süreli arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmalarında;

1. Görüntü analiz sonuçlarının (yüzey sıcaklık haritaları, hidrotermal alterasyon anomali haritaları ve InSAR analizleri) arazi kontrolleri yapılmış,
2. Jeolojik bilgiler toplanmış,
3. Tektonik bilgiler toplanmış ve havzayı kontrol eden fayların kinematik özellikleri hakkında bilgiler elde etmek için fay kayma veri ölçümleri tamamlanmış,
4. Hidrojeolojik çalışmalar kapsamında su kimyası/ izotop analizleri için sıcak ve soğuk suların örnekleri alınmış,
5. Jeotermal sistemler ile ilişkili hidrotermal alterasyon minerallerini belirlemek için spektrometre ve XRD analizleri için örnekler alınmıştır.

### 3.8. CBS Analizleri

Proje kapsamında uzaktan algılama, jeolojik, tektonik, hidrojeolojik ve diğer çalışmalar sonucunda çok sayıda alansal veri katmanı üretilmiştir. CBS, yüzey sıcaklık haritaları, hidrotermal alterasyon anomali haritaları, InSAR analiz sonuçları, litolojik birimler, kinematik analiz sonuçları ve tektonik özellikler, hidrojeolojik özellikler arasındaki alansal ilişkileri birlikte bütünsel şekilde değerlendirmek ve analiz etmek için oldukça yararlı araç ve metodlar sağlamaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmalar sonucunda üretilen tüm alansal veri katmanları, CBS sistemleri ortamında birleştirilerek analiz edilmekte, değerlendirilmekte ve gaz ölçümleri, jeofizik, sondaj gibi maliyeti yüksek detay etütleri için jeotermal enerji açısından potansiyeli yüksek, uygun olası hedef alanlar belirlenmeye çalışılmaktadır.

## 4. Sonuç ve Değerlendirme

Proje kapsamında, uzaktan algılama analizleri, jeolojik, tektonik ve hidrojeolojik veri toplama ve analizlerinin yapılması ve elde edilen tüm verilerin CBS ortamında birleştirilmesi, değerlendirilmesi ve yorumlanması metodolojisi uygulanmıştır. Böylelikle uygulanan model ile örnek bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Kullanılan metodolojik yaklaşımın daha sonra yapılacak jeotermal arama ve değerlendirme çalışmalarına yenilikçi ve yönlendirici bir model oluşturacağı düşünülmektedir. Proje kapsamında jeotermal enerji arama ve değerlendirme çalışmaları için gerekli temel altlık verilerin üretilmesi planlanmıştır. CBS ortamındaki detay etütleri (gaz

ölçümleri, jeofizik, sondaj vb.) için jeotermal enerji potansiyeli açısından önemli olası hedef alanların (prospect) sınırlandırılmasına yardımcı olacak haritalar hazırlanmaktadır. Ayrıca proje çalışmaları, uzaktan algılama ve CBS sistemleri metot ve yaklaşımlarının doğru kullanıldığında maliyet, zaman ve emek bakımından sağladığı yararları göstermiştir.

## Değerlenen Belgeler

- Abrams, M. 2000. ASTER: data products for the high spatial resolution imager on NASA's EOS-AM1 platform. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 847-861.
- Abrams, M., Hook, S. J. 1995. Simulated Aster Data for Geologic Studies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33, 692-699.
- Barka, A. A. 1992. The North Anatolian Fault Zone. *Annales Tectonicae* 6, 164-195.
- Barka, A. A., Gülen, L. 1988. New constraints on age and total offset of the North Anatolian fault zone: Implications for tectonics of the eastern Mediterranean region. *Special Publication Middle East Technical University, Ankara*.
- Bedini, E. 2011. Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data, *Advances in Space Research* 47, 1, 60-73.
- Bennett, S.E.K. 2011. Geothermal Potential of Transtensional Plate Boundaries, *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 35, p. 703-707.
- Calderon-Chaparro, R.A., Vargas-Cuervo, G. 2019. Determination of Hydrothermal Prospects in Paipa Geothermal Region (Boyacá, Colombia) Using Remote Sensing and Field Data. *Earth Sciences Research Journal* 23, 265-282. 10.15446/esrj.v23n4.77810.
- Calvin, W., Pace, E. 2016. Mapping alteration in geothermal drill core using a field portable spectroradiometer. *Geothermics* 61. 10.1016/j.geothermics.2016.01.005.
- Coolbaugh, F., Kratt, C., Fallacaro, A., Calvin, W.M., Taranik, J.V. 2007. Detection of geothermal anomalies using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA. *Remote Sensing of Environment* 106, 3, 350-359.
- Crosta, A.P., Sabine, C., Taranik, J.V. 1998. Hydrothermal Alteration Mapping at Bodie, California, Using AVIRIS Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment* 65, 3, 309-319.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F. 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye.
- ETKB. 2021. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Web adresi : <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-jeotermal>.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE T. Geoscience Remote Sensing*, 39, 8-20.
- Ferrier, G., White, K., Griffiths, G., Bryant, R., Stefouli, M. 2002. The mapping of hydrothermal alteration zones on the island of Lesbos, Greece using an integrated remote sensing dataset. *International Journal of Remote Sensing* 23-2, 341-356.
- Flautz, A., Hintz, V. 2015. Favorable Tectonic and Structural Settings of Geothermal Systems in the Great Basin Region, Western USA: Proxies for Discovering Blind Geothermal Systems. *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia*.
- Giordano, G., Pinton, A., Cianfarra, P., Baez, W., Chiodi, A., Viramonte, J., Norini, G., Groppelli, G. 2013. Structural control on geothermal circulation in the Cerro Tuzgle-Tocomar geothermal volcanic area (Puna Plateau, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 249, 77-94. 10.1016/j.jvolgeores.2012.09.009.
- Göncüoğlu, M.C. 2010. Türkiye Jeolojisine Giriş: Alpin ve Alpin öncesi tektonik birliklerin jeodinamik evrimi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Monografi Serisi 5, Ankara.
- Gutierrez, F., Lemus, M., Parada, M., Benavente, O., Aguilera, F. 2012. Contribution of ground surface altitude difference to thermal anomaly detection using satellite images: Application to volcanic/geothermal complexes in the Andes of Central Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 237-238. 69-80. 10.1016/j.jvolgeores.2012.05.016.
- Hewson, R., Cudahy, T., Mizuhiko, S., Ueda, K., Mauger, A. 2005. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment* 99. 159-172. 10.1016/j.rse.2005.04.025.
- Hook, S.J., Abbott, E.A., Grove, C., Kahle, A.B., Palluconi, F.D. 1999. Use of multispectral thermal infrared data in geological studies, In: Rencz, A.N. (Ed.), 3rd ed. *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*, 3, 59-110, Wiley, New York.
- Hubbard, B., Crowley, J., Zimelman, D. 2003. Comparative alteration mineral mapping using visible to shortwave infrared (0.4-2.4 µm) Hyperion, ALI, and ASTER imagery. *Geoscience and Remote*

- Sensing, *IEEE Transactions on* 41, 1401-1410. 10.1109/TGRS.2003.812906.
- Hulley, G., Hughes, C., Hook, S. 2012. Quantifying uncertainties in land surface temperature and emissivity retrievals from ASTER and MODIS thermal infrared data. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 117, 23113-, doi:10.1029/2012JD018506.
- Kruse, F.A. 2012. Mapping surface mineralogy using imaging spectrometry. *Geomorphology* 137, 1, 41-56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.032>.
- 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*, Vol. 41, (1388-1400).
- Massonnet, D., Feigl, K. L. 1995. Discrimination of geophysical phe-nomena in satellite radar interferograms, *Geophysical Research Letters*, 22,1537–1540, doi:10.1029/95GL00711.
- Massonnet, D., Rabaute T. 1993. Radar interferometry: limits and po-tential, *IEEE T. Geoscience and Remote Sensing*, 31, 455–464.
- Mia, Md. B., Fujimitsu, Y., Nishijima, J. 2018. Monitoring of Thermal Activity at the Hatchobaru–Otake Geothermal Area in Japan Using Multi-Source Satellite Images-With Comparisons of Methods, and Solar and Seasonal Effects. *Remote Sensing* 10, 1430. 10.3390/rs10091430.
- Muraoka, H., Takahashi, M., Sundhoro, H., Dwipa, S., Soeda, Y., Momita, M., Shimada, K. 2010. Geothermal Systems Constrained by the Sumatran Fault and Its Pull-Apart Basins in Sumatra, Western Indonesia, *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*.
- Norini, G., Groppelli, G., Sulpizio, R., Carrasco-Núñez, G., Davila-Harris, P., Pelliccioli, C., Zucca, F., De Franco, R. 2015. Structural analysis and thermal remote sensing of the Los Humeros Volcanic Complex: Implications for volcano structure and geothermal exploration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 301, 221-237. 10.1016/j.jvolgeores.2015.05.014.
- Pieri, D., Abrams, M. 2005. ASTER observations of thermal anomalies preceding the April 2003 eruption of Chikurachki volcano, Kurile Islands, Russia. *Remote Sensing of Environment* 99, 1–2, 84–94.
- Qin, Q., Zhang, N., Nan, P., Chai, L. 2011. Geothermal area detection using Landsat ETM+ thermal infrared data and its mechanistic analysis-A case study in Tengchong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13, 4, 552-559.
- Reinisch, E., Cardiff, M., Kreemer, C., Akerley, J., Feigl, K. 2020. Time-series Analysis of Volume Change at Brady Hot Springs, Nevada, USA using Geodetic Data from 2003 – 2018. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125. 10.1029/2019JB017816.
- Rowan, L.C., Crowley, J.K., Schmidt, R.G., Ager, C.M., Mars, J.C. 2000. Mapping hydrothermally altered rocks by analyzing hyperspectral image (AVIRIS) data of forested areas in the Southeastern United States. *Journal of Geochemical Exploration* 68, 3, 145-166.
- Rowan, L., Hook, S., Abrams, M., Mars, J. 2003. Mapping Hydrothermally Altered Rocks at Cuprite, Nevada, Using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a New Satellite-Imaging System. *Economic Geology* 98, 1019-1027. 10.2113/gsecongeo.98.5.1019.
- Srivastava, P.K., Majumdar, T.J., Bhattacharya, A.K. 2009, Surface Temperature Estimation in Singhbhum Shear Zone of India using Landsat-7 ETM+ Thermal Infrared Data. *Advances in Space Research* 43, 10, 1563-1574.
- SRTM:USGS.2021.<https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Şengör, A.M.C., Tüysüz, O., İmren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon X., Rangin, C. 2005. The North Anatolian fault: A new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 1-75.
- Van der Meer, F., Hecker, C., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., de Wijkerslooth, C., Wechsler, C. 2014. Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 33, 255-269. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.007>.
- Van der Meer, F., Van der Werff, H., Ruitenbeek, F.J.A., Hecker, C., Bakker, W., Noomen, M., Meijde, M., Carranza, E.J., de Smeth, B., Woldai, T. 2012. Multi-and Hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14, 112-128. 10.1016/j.jag.2011.08.002.
- Vaughan, R., Lowenstern, J., Keszthelyi, L., Jaworowski, C., Heasler, H. 2012. Mapping temperature and radiant geothermal heat flux anomalies in the yellowstone geothermal system using ASTER thermal infrared data. *Transactions - Geothermal Resources Council* 36, 1403-1409.
- Vaughan, R., Calvin, W., Taranik, J. 2003. SEBASS hyperspectral thermal infrared data: Surface emissivity measurement and mineral mapping.



- Remote Sensing of Environment 85, 48-63. 10.1016/S0034-4257(02)00186-4.
- Vaughan, R., Hook, S., Calvin, W., Taranik, J. 2005. Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images. Remote Sensing of Environment 99, 140-158. 10.1016/j.rse.2005.04.030.
- Wang, Q., Mwirigi M.M., Kinoshita, I. 2014. A GIS-Based Approach in Support of Spatial Planning for Renewable Energy: A Case Study of Fukushima, Japan. Sustainability 6. 2087-2117. 10.3390/su6042087.
- Wu, J., McClay, K., Whitehouse, P., Dooley, T. 2009. 4D analogue modeling of transtensional pull-apart basins. Marine and Petroleum Geology 26. 1608-1623. 10.1016/j.marpetgeo.2008.06.007.
- Zadeh, M.H., Tangestani, M.H., Roldan, F.V., Yusta, I. 2014. Sub-pixel mineral mapping of a porphyry copper belt using EO-1 Hyperion data. Advances in Space Research, 53, 3, 440-451.
- Zebker, H. A., Goldstein, R. M. 1986. Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations, Journal of Geophysical Research, 91, 4993-4999.
- Zhang, L.Y., Li, N., Liu, M. 2012. "On the Basic Concept of Smart Tourism and Its Theoretical System", Tourism Tribune, 27(5), 66-73.