



Düşük Sıcaklıklı Bir Jeotermal Alanın İnsansız Hava Aracı Termal ve RGB Görüntüleri ile Modellenmesi: Kocabaşlar Jeotermal Alanı Örneği, Kuzeybatı Türkiye
Modeling of a Low-Temperature Geothermal Field Using UAV-based TIR and RGB Images: A Case Study of Kocabaşlar Geothermal Field, Northwestern Türkiye

Deniz Şanlıyüksel Yücel^{1*} , Mehmet Ali Yücel² 

¹ Çanakkale Onsekiz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Çanakkale

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Çanakkale

• Geliş/Received: 21.07.2023 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 12.10.2023 • Kabul/Accepted: 20.10.2023
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 08.12.2023 • Baskı/Printed: 30.01.2024

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Kocabaşlar jeotermal alanı Türkiye'nin kuzeybatısındaki Çanakkale ilinde yer almaktadır. Jeotermal alanda 650 m derinlikte açılmış, sıcaklığı 46 °C olan bir sondaj ve sıcaklığı 38,1 °C olan bir jeotermal kaynak bulunmaktadır. Bu çalışmada ilk kez Kocabaşlar jeotermal alanının çift kameralı insansız hava aracı (İHA) kullanılarak termal ve görünür bant (RGB) kamera görüntüleri ile yüksek çözünürlüklü olarak modellenmesi amaçlanmıştır. Jeotermal alandaki arazi çalışmaları hava sıcaklığının düşük, meteorolojik koşulların görüntü çekimi için uygun olduğu 6 Ocak 2023 tarihinde yapılmıştır. İHA termal ve RGB kamera ile görüntü çekimleri; 40 m sabit yükseklikten 2,5 m/sn hız ve %80 ileri ve %70 yan bindirme oranları ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen toplam 1718 termal ve RGB görüntünün işlenmesi sonucunda Kocabaşlar jeotermal alanının yüksek çözünürlüklü termal (5,25 cm/piksel) ve RGB (1,37 cm/piksel) ortofotoları ve sayısal yüzey modeli (5,47 cm/piksel) üretilmiştir. Üretilen görüntüler coğrafi bilgi sistemleri ortamında görselleştirilmiştir. Jeotermal alanın yüzey sıcaklığının 6 °C ile 38 °C arasında değiştiği saptanmıştır. Kocabaşlar jeotermal alanının İHA teknolojisi ile uzun süreli takip edilerek jeotermal kaynağın kullanım alanlarının geliştirilmesi ve sürdürülebilirliğine katkı sağlanması planlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Coğrafi bilgi sistemleri, jeotermal enerji, insansız hava aracı, ortofoto, termal görüntüleme.

Abstract: Kocabaşlar geothermal field is located in Çanakkale province in northwestern Türkiye. A well was drilled to a depth of 650 m with a temperature of 46 °C. There is also a geothermal spring with a temperature of 38.1 °C. The objective of this study was to model the Kocabaşlar geothermal field for the first time using an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a dual camera to capture high-resolution thermal infrared (TIR) and visible (RGB) images. The UAV survey was conducted on January 6, 2023, when the air temperature was low and the meteorological conditions were favorable for image acquisition. The flight altitude was 40 m above ground level, and the flight speed was 2.5 m/s. Image front and side overlaps were 80% and 70%, respectively. As a result of processing a total of 1718 TIR and RGB images, a high-resolution TIR orthophoto (5.25 cm/pixel), an RGB orthophoto (1.37 cm/pixel), and a digital surface model (5.47 cm/pixel) were generated. The generated images were visualized in Geographic Information Systems software. The surface temperature in the geothermal field varied between 6 °C and 38 °C. The Kocabaşlar geothermal field will be monitored for an extended period using UAV technology in order to contribute to the development and sustainability of the utilization areas for geothermal energy.

Keywords: Geographic information systems, geothermal energy, orthophoto, thermal infrared imaging, unmanned aerial vehicle.

GİRİŞ

Jeotermal enerji, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde jeolojik yapıya bağlı birikmiş ısının oluşturduğu, sıcaklığı sürekli olarak bölgesel atmosferik yıllık ortalama sıcaklığın üzerinde olan, yeryüzüne kırıklar ve çatlaklar boyunca su, buhar ve gaz ile taşınabilen, doğrudan, dolaylı ya da entegre kullanım ile yararlanılabilen doğal kaynak enerjisidir (Akkuş vd., 2005; Şanlıyüksel ve Baba, 2011). Sürdürülebilir, yenilenebilir, meteorolojik koşullardan bağımsız, güvenilir, düşük yatırım maliyetli ve yerli bir enerji kaynağı olan jeotermal enerji, sıcaklığa bağlı olarak geniş bir yelpazede kullanım olanağı sunmaktadır (Wang vd., 2022; Zuffi vd., 2022). Jeotermal enerji, farklı kullanım alanları ile yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir (Tut Haklıdır, 2017). Jeotermal enerjiden elektrik üretimi, ısıtma (konut, termal tesis, sera, yol vb.), termal ve sağlık turizmi, kimyasal madde üretimi (borik asit, sıvı karbondioksit, kuru buz üretimi vb.), endüstriyel uygulamalar (balıkçılık, meyve, sebze kurutma vb.) gibi birçok amaç için yararlanılmaktadır (Akkuş ve Alan, 2016; Xu vd., 2019).

Türkiye jeotermal enerji potansiyeli açısından zengin olup, jeotermal kaynaklar çoğunlukla aktif tektonik hatlar üzerinde ve volkanik etkinliğin yoğun olduğu alanlarda bulunmaktadır (Vengosh vd., 2002; Şanlıyüksel Yücel vd., 2021). Türkiye’de sıcaklığı 20 °C ile 287 °C arasında değişen 460 jeotermal alan ve 2000’den fazla jeotermal ve mineralli su kaynağı tespit edilmiştir (Lund ve Toth, 2021; Mertoğlu vd., 2021). Şener vd. (2022), Türkiye’de sıcaklığı 30 °C’nin üzerinde olan 415 jeotermal alan bulunduğunu ve bu alanların %84’ünün düşük ve orta sıcaklıklı olduğunu belirtmiştir. Son yıllarda jeotermal enerji kullanımı tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de hızla artmaktadır. Jeoloji, hidrojeoloji, jeofizik, jeokimyasal araştırmaların ve sondaj çalışmalarının artması ile jeotermal alanlardaki sıcaklık ve debi değerleri önemli oranda artmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre Haziran 2022

sonu itibarıyla Türkiye’de elektrik üretiminde kullanılan jeotermal enerji kurulu gücü 1686 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı %1,66’dır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022). Türkiye 2021 yılında jeotermal enerji üretiminde dünyada dördüncü ve doğrudan kullanımda ise dünyanın ikinci ülkesi durumundadır (Mertoğlu vd., 2021; Şener vd., 2022).

Türkiye’deki jeotermal potansiyel oluşturan alanların %78’i Batı Anadolu’da bulunmaktadır (Akkuş, 2017). Marmara ile Ege Bölgesi’ni birbirinden ayıran Kaz Dağı (1774 m) iki bölge sınırı arasında kalan en önemli yükseltiye sahiptir. Kaz Dağı ve çevresinin yüksek yağış alması ve tektonik açıdan aktif faylarla çevrili olması, suların derin dolaşımına ve ısınan suların yüzeye sıcak su olarak çıkmasında önemli rol oynamaktadır (Yalçın, 2007). Yalçın ve Sarp (2012), Çanakkale’deki jeotermal kaynakların genellikle Kaz Dağı çevresinde yer alan Kuzey Anadolu Fay Zonu’nun uzantısı olan KD-GB doğrultulu sağ yanal doğrultu atımlı fay sistemlerinden çıktığını ifade etmiştir. Çanakkale’de yüzey sıcaklıkları 23-96,2 °C arasında değişen 14 jeotermal alan bulunmaktadır (Şanlıyüksel Yücel vd., 2013; Marmara vd., 2020). Çanakkale’nin Lapseki ilçesinde Kocabaşlar, Çan ilçesinde Karalıda, Bardakçılar, Çan ve Alibeyçiftliği, Bayramiç ilçesinde Palamutoba ve Külcüler, Yenice ilçesinde Hıdırlar, Biga ilçesinde Kırkgeçit ve Çeltik, Ezine ilçesinde Kestanbol ve Akçakeçili, Ayvacık ilçesinde Tuzla ve Küçükçetmi jeotermal alanları bulunmaktadır. Çanakkale’deki jeotermal kaynaklar elektrik üretimi, termal ve sağlık turizmi, sera ve termal tesis ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. İldeki en yüksek sıcaklık Tuzla jeotermal alanındaki T-1 no’lu sondajda 1982 yılında 814 m derinlikte 174 °C kuyu dibi sıcaklığı olarak tespit edilmiştir (Akkuş vd., 2005). Taşkıran (2023), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından Çanakkale’de toplam derinliği 34829 m olan 45 adet jeotermal sondaj yapıldığını ifade etmiştir. Ayrıca ilde özel sektör tarafından yapılmış

birçok jeotermal sondaj vardır, jeotermal kaynak arama çalışmaları yoğun olarak devam etmektedir.

Jeotermal kaynakların geleneksel olarak aranması, sondaj kuyusu açma ve jeofizik araştırmaları gibi süreçleri içermesi nedeni ile uzun süreli ve maliyetlidir (Sedano-Cibrián vd., 2022). Jeotermal enerjinin gelişen teknolojilerle birlikte potansiyeli artırılabilir. Günümüzde, sensör teknolojileri ile jeotermal kaynakların tespiti, izlenmesi ve geliştirilmesinde uzaktan algılama yöntemlerinden yaygın olarak yararlanılmaktadır. Cisimlerle direkt temas etmeden fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinme bilimi olan uzaktan algılama teknolojileri ile yeryüzünün farklı mekansal, spektral, radyometrik ve zamansal çözünürlüklerde görüntülenmesi ve izlenmesi mümkündür (Kavzaoğlu ve Çölkesen, 2011). İnsansız hava araçları (İHA), içerisinde pilot bulundurmayan, uzaktan operatör yönlendirmesi veya operatör tarafından belirlenen plana göre otonom uçuş gerçekleştiren araçlardır (İzci ve Ulvi, 2021). İHA'lar, uydu görüntülerinin metrik hassasiyetine kıyasla santimetre mertebesinde hassasiyet elde etmeyi mümkün kılarken, insanlı hava araçlarına göre kullanımını daha kolay ve pratiktir, aynı zamanda maliyeti düşüktür (Marwan vd., 2021). İHA'lar ulaşılması zor ve tehlikeli alanlarda uzaktan veri toplama (deprem, yangın, heyelan, sel, volkanik aktivitenin takibi vb.), düzenli olarak izleme ve kontrol etme gibi farklı imkanlar sunarak anında çözüm üretecek gerçek zamanlı veri kontrolünü ve üretimini sağlamaktadır (Harvey vd., 2016; Banerjee vd., 2020). İHA ile elde edilen görüntü verisinden üç boyutlu nokta bulutu, sayısal yüzey modeli (SYM), ortofoto ve üç boyutlu model üretimi gerçekleştirilebilmektedir. İHA teknolojisinin sağladığı güncel bilgiler, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) teknolojisiyle bütünleşince geleneksel yöntemlere kıyasla hedefine daha hızlı, daha ucuz, daha az insan gücüyle ulaşması ve kolay güncelleştirilebilir olması nedeniyle önemli bir üstünlük sağlamaktadır (Sedano-Cibrián vd., 2022).

Dünyada, volkanik faaliyetlerin izlenmesi (Amici vd., 2013; De Beni vd., 2019; Walter vd., 2020), arkeolojik alan haritalarının üretilmesi ve üç boyutlu modellenmesi (Yücel vd., 2018; Manajitprasert vd., 2019; Yücel ve Yılmaz, 2019; Yılmaz ve Yücel, 2020; Yalçiner vd., 2021), heyelanların izlenmesi (Eker vd., 2018; Hastaoğlu vd., 2019; Zeybek ve Şanlıoğlu, 2019), maden ocaklarının üç boyutlu modellenmesi (Yücel ve Turan, 2016; Şanlıyüksel Yücel ve Yücel, 2017; Ulusoy vd., 2017; Xiang vd., 2018; Kun ve Güler, 2019), su örnekleme ve su kalitesinin takibi (Koparan vd., 2018; Banerjee vd., 2020) gibi farklı uygulamalarda İHA teknolojisi kullanımı yaygındır.

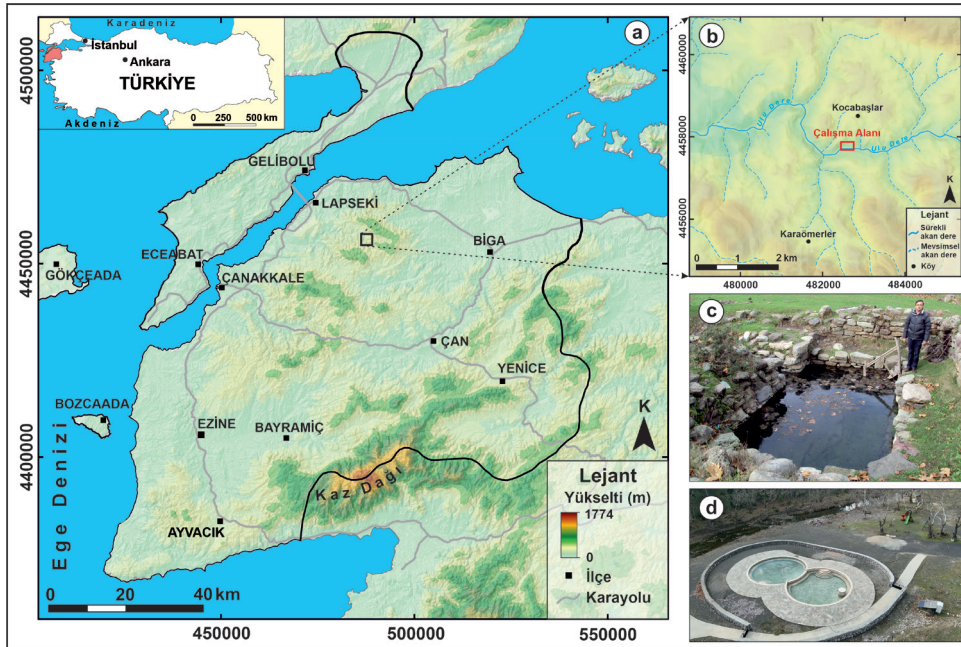
Jeotermal alanların izlenmesi ve jeotermal enerjinin geliştirilmesi konularında termal kameralı İHA kullanımı son yıllarda yoğun olarak çalışılmaktadır (Harvey vd., 2016; Nishar vd., 2016; Chio ve Lin, 2017; Cherkasov vd., 2018; Ólafsson, 2018; Bjornsson vd., 2019; Silvestri vd., 2020; Sedano-Cibrián vd., 2022). İHA termal kamera teknolojisi, atmosferik düzeltmeye gerek kalmadan uydulara kıyasla daha yüksek mekansal çözünürlüklü görüntüler sağlayarak jeotermal alanlarda yüzey sıcaklığının belirlenmesini sağlamaktadır (Silvestri vd., 2020). Türkiye'de termal kameralı İHA kullanılarak jeotermal alanların izlenmesi hakkında yapılmış çalışmaların sayısı azdır. Ulusoy vd. (2022), İHA teknolojisi kullanarak Aksaray'ın güneydoğusunda yer alan Hasandağ'ın yüksek çözünürlüklü termal görüntüler ile termal ortofotosunu (4,8 cm/piksel) oluşturmuş, yüzey sıcaklık değişimini belirlemiş ve fümerol çıkışlarını güvenli olarak tespit etmiştir. Yücel ve Şanlıyüksel Yücel (2023), İHA teknolojisi kullanarak Çanakkale'nin batısında yer alan Kestanbol jeotermal alanının yüksek mekansal çözünürlüklü termal (4,2 cm/piksel) ve görünür bant (RGB, 0,9 cm/piksel) ortofotolarını oluşturmuştur. Jeotermal alanın yüzey sıcaklığının 15 °C ile 75 °C arasında değiştiğini ve jeotermal çıkışlarının KD-GB doğrultulu faya paralel olduğunu ifade etmiştir.

Bu çalışma kapsamında ilk kez Çanakkale'nin kuzeydoğusunda yer alan Kocabaşlar jeotermal alanının yüksek çözünürlüklü termal ve RGB ortofotoları ve SYM oluşturulmuş, jeotermal alanın yüzey sıcaklık dağılımı belirlenmiş, uydu görüntüleri ile jeotermal alandaki zamana bağlı değişim değerlendirilmiş ve düşük sıcaklıklı jeotermal alanın sürdürülebilir gelişimine katkı sağlanması için öneriler sunulmuştur.

Çalışma Alanının Coğrafi Özellikleri

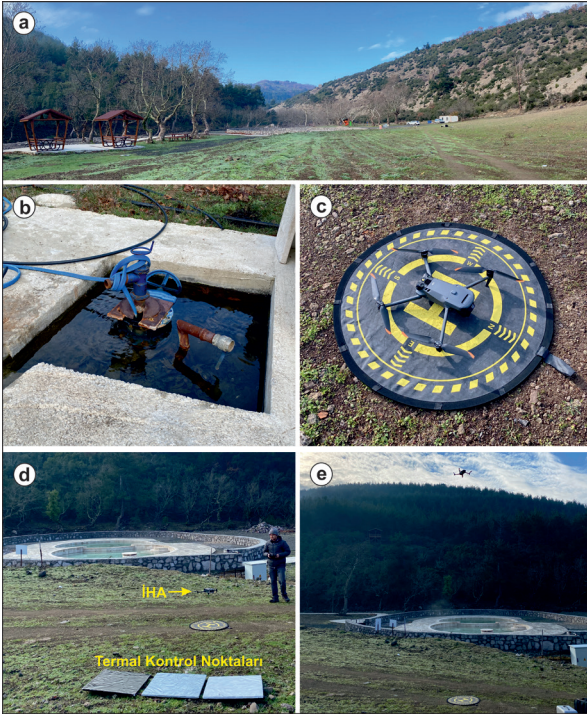
Kocabaşlar jeotermal alanı Çanakkale il merkezine en yakın jeotermal alan olup, il merkezine 45 km, Lapseki ilçe merkezine ise 15 km uzaklıktadır (Şekil 1a). İlçedeki tek jeotermal alandır. Antik dönem adı Lampsakos olan Lapseki, milattan önceki dönemlerden itibaren yerleşim alanı olarak kullanılmıştır ve stratejik bir konuma sahiptir (Öztürk ve Erduran Nemutlu, 2018). Antik çağlardan beri jeotermal kaynaklar insan topluluklarının yerleşiminde

önemli bir rol oynamıştır. Tarihi Kocabaşlar jeotermal alanı Kocabaşlar Köyü'nün yaklaşık 600 m güneyinde Ilıca mevkinde, Ulu Dere kenarında bulunmaktadır (Şekil 1b). Tombul (2015) tarafından Kocabaşlar jeotermal alanının çevresinde 13. ve 14. yüzyıllara ait seramik ve tuğla parçaları bulunduğu belirtilmiştir. Jeotermal alan ulaşım açısından elverişli ve kalabalık yerleşim yerlerinden uzaktır. Jeotermal alanın yakın çevresindeki yerleşim alanları Kocabaşlar ve Karaömerler Köyleri olup, köylerin nüfusu sırasıyla 104 ve 128 kişidir. Jeotermal alandaki jeotermal kaynak halka açık bir havuzda yöre halkı tarafından iptidai koşullarda banyo, içme ve çamaşır yıkamak amacıyla kullanılmıştır (Şekil 1c). 2021 yılında jeotermal alana birleşik daire şeklinde üzeri açık olan iki modern havuz inşa edilmiştir (Şekil 1d). Ayrıca jeotermal alanda oyun parkı, yürüyüş yolu, kamelyalar, otopark vardır ve mesire yeri günübirlik olarak kullanılmaktadır (Şekil 2a).



Şekil 1. a, b). Kocabaşlar jeotermal alanının konumu, **c)** Jeotermal alandaki eski termal havuz (2012 yılı), **d)** Jeotermal alandaki yeni termal havuz (2023 yılı).

Figure 1. a, b) Location map of the study area, **c)** photo of the old geothermal pool in 2012, **d)** photo of the new geothermal pool in 2023.



Şekil 2. a) Jeotermal alanın panoramik görünümü, b) Jeotermal sondaj, c) İHA quadcopter, d) Termal kontrol noktası, e) İHA ile görüntü alma.

Figure 2. a) Panoramic view of Kocabaşlar geothermal field, b) Geothermal well, c) UAV quadcopter, d) Temperature calibration plates, e) UAV image acquisition.

Umurbey Çayı hidrolojik havzasında bulunan Kocabaşlar jeotermal alandaki önemli drenaj sistemi dar ve derin vadiler boyunca doğudan batıya doğru akan Ulu Dere'dir. Ulu Dere'yi besleyen birçok yan dere bulunmaktadır, bunlardan bazıları; güneyden kuzeye akan Bileytaşı Deresi, Aşı Dere ve Somaklı Deresi, kuzeyden güneye akan Aşağı Dere'dir. Jeotermal alanın çevresindeki önemli yükseltiler Dede Tepe (368 m) ve Şaşlık Tepe (332 m)'dir. Jeotermal alan ve çevresinin güncel morfolojisini kazanmasında yapısal unsurların yanı sıra sahadaki jeolojik birimlerin aşınma ve parçalanmaya karşı farklı dayanımları etkili olmuştur. Jeotermal alan bitki örtüsü açısından oldukça zengin olup, çevresinde çam, meşe ve çınar ağaçları ve tarım arazileri bulunmaktadır.

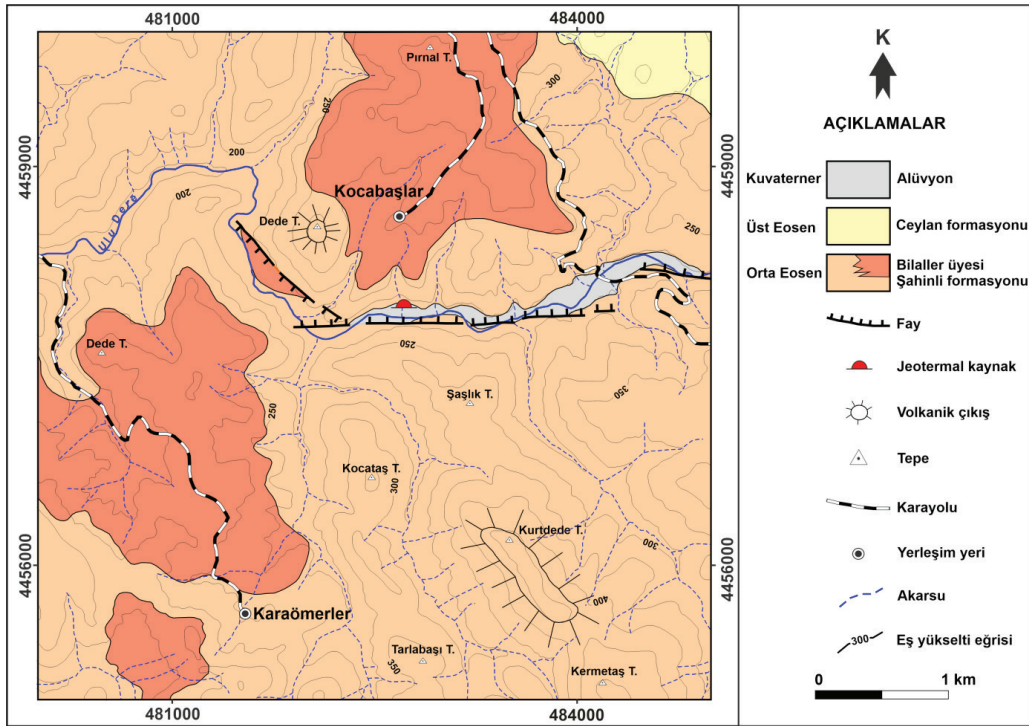
Çanakkale, Akdeniz ve Karadeniz arasında bulunduğu konum itibarı ile iklim açısından "Marmara Geçiş İklimi" özellikleri gösterir (Koçman, 1993). Çanakkale il merkezindeki meteoroloji gözlem istasyonunun 1929-2022 tarihleri arasındaki ölçüm verilerine göre Çanakkale ilinin aylık ortalama sıcaklık değeri 6,3 ile 25,1 °C arasında olup, yıllık ortalama sıcaklık değeri 15,2 °C'dir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023a). En sıcak aylar Temmuz ve Ağustos, en soğuk ay ise Ocak ve Şubat'tır. Son 93 yılın en düşük sıcaklık değeri 2 Şubat 1929 tarihinde -11,5 °C, en yüksek sıcaklık değeri ise 1 Ağustos 2021 tarihinde 39,7 °C olarak saptanmıştır. Çanakkale'nin yıllık toplam yağış miktarı ortalaması 624,4 mm'dir. Yıllık ortalama yağışlı gün sayısı 84'tür. Yağışlar daha çok Kasım, Aralık, Ocak ve Şubat aylarında görülmektedir. Günlük toplam en yüksek yağış miktarı 5 Kasım 1956 tarihinde 137,8 mm olarak belirlenmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Thornthwaite iklim sınıflandırması yağış etkinlik indeksine göre Çanakkale yarı kurak-az nemli, su fazlası kış mevsiminde çok kuvvetli olan iklim sınıfında yer almaktadır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023b).

Çalışma Alanının Jeolojisi ve Hidrojeokimyası

Kocabaşlar jeotermal alanında bazalt, bazaltik andezitik lav ve piroklastikler ile yer yer volkanoklastik kayalardan oluşan Orta Eosen yaşlı Şahinli formasyonu (Dönmez vd., 2005) yüzlek vermektedir (Deniz vd., 2016) (Şekil 3). Formasyon, Akçaalan volkanitlerinin (Siyako vd., 1989) ve Balıklıçeşme formasyonunun (Ercan vd., 1995) harita birimi olarak eş değeridir (Genç vd., 2012). Çalışma sahasında Şahinli formasyonuna ait kayaların alt dokanağı gözlenememiştir. Şahinli formasyonu bazaltları hipokristalin porfirik dokuludur, başlıca fenokristalleri plajiyoklas, klinopiroksen, biyotit, titanit ve opak minerallerden, ikincil mineral olarak ise kalsit, klorit, dolomit ve kuvarstan oluşmaktadır (Dönmez

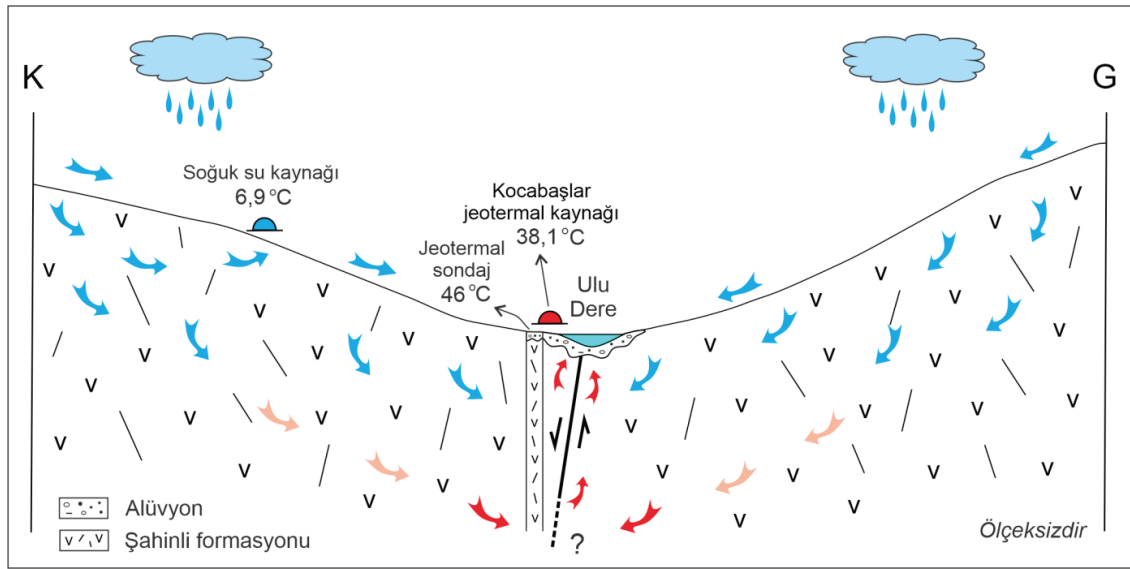
vd., 2005; Genç vd., 2012; Kıray ve Cengiz, 2023). Genellikle bazaltik bileşimli olan volkanik kayalar çok sayıda bazaltik bileşimli daykılarla kesilmiştir (Genç vd., 2012). Şahinli formasyonu içerisindeki volkanoklastik kayalar ile yer yer türbiditik çökeller ve bu çökellerden ayrılamayan egemen olarak bazalt ve yer yer bazaltik andezit bileşimli lavlardan oluşan birim Bilaller üyesi olarak adlandırılmıştır (Dönmez vd., 2005). Bilaller üyesi çalışma alanının kuzey ve doğu-güneydoğu kesimlerinde yüzlek vermektedir. Üst Eosen yaşlı tuf ara katkılı şeyl, kıltaşı-kumtaşı aralanması ve kırıntılı kireçtaşından oluşan Ceylan formasyonu (Ünal, 1967) kendisinden yaşlı birimler üzerinde uyumsuzluk dokanak ile yer alır (Siyako vd., 1989; Dönmez vd., 2005). Formasyon, çalışma alanının kuzeydoğusunda yüzlek vermektedir. Ulu Dere boyunca yüzlek veren tutturulmamış taneli çakıl, kum, silt ve kilden oluşan Kuvaterner yaşlı alüvyon kendisinden yaşlı birimleri uyumsuzlukla örter.

Sarp ve Duman (2008), Kocabaşlar jeotermal alanının Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun batı uzantısı içerisinde bulunduğunu ve genç tektonik hareketlerden etkilendiğini belirtmiştir. Kocabaşlar jeotermal kaynağı Ulu Dere vadisi boyunca uzanan yaklaşık D-B uzanımlı normal fayla ilişkili olarak yüzeye ulaşmaktadır (Sarp vd., 1998; Baba vd., 2007; Sarp ve Duman, 2008; Deniz vd., 2016). Bu fayın güney bloğu yükselmiş, kuzey bloğu düşmüştür (Baba vd., 2007). Ayrıca jeotermal alanının çevresinde birçok küçük ölçekli fay bulunmaktadır. Tektonizmanın etkisi ve kayalarda meydana gelen ayrışma ile volkanik kayaları geçirimli hale getirerek yüzey sularının kayalar içinde özellikle kırık hatları boyunca hareket etmesini sağlamıştır. Yağışlar yoluyla jeotermal alana gelen su kayaların süreksizlikleri boyunca yeraltına süzülüp belirli bir süre derinde dolaşarak jeotermal gradyan ile ısınıp, yüzeye normal fay boyunca jeotermal kaynak olarak ulaşmaktadır (Şekil 4).



Şekil 3. Kocabaşlar jeotermal alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Deniz vd., 2016).

Figure 3. Geological map of the Kocabaşlar geothermal field (Deniz et al., 2016).



Şekil 4. Kocabaşlar jeotermal alanının kavramsal hidrotermal modeli.

Figure 4. The conceptual model of the Kocabaşlar geothermal field.

Kocabaşlar jeotermal alanında az sayıda soğuk su kaynağı bulunmaktadır, kaynakların debileri düşüktür. Baba vd. (2007), Ekim 2005 tarihinde jeotermal alanda bulunan soğuk su kaynağının sıcaklık, elektriksel iletkenlik (EC) ve pH değerlerini sırasıyla 12 °C, 750 µS/cm ve 7,1 olarak ölçmüştür. Soğuk su kaynağının Na⁺ (374 mg/l) ve HCO₃⁻ (732 mg/l) konsantrasyonunun yüksek olduğunu ve Na-Ca-HCO₃-SO₄ su tipinde olduğunu belirtmiştir. Arazi çalışmaları sırasında jeotermal alandaki soğuk su kaynağında sıcaklık değeri 6,9 °C, EC değeri 812 µS/cm ve pH değeri 6,88 olarak ölçülmüştür.

Akkuş vd. (2005), Kocabaşlar jeotermal kaynağının yüzey sıcaklığının 36 °C, debisinin ise 0,35 l/sn olduğunu belirtmiştir. Baba vd. (2007), Kocabaşlar jeotermal kaynağının sıcaklık ve EC değerlerinin sırasıyla 28-33 °C ve 1273-1384 µS/cm olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışma kapsamında Kocabaşlar jeotermal kaynağının sıcaklık, EC, tuzluluk ve pH değerleri sırasıyla 38,1 °C, 1196 µS/cm, %0,4 ve 7,71 olarak ölçülmüştür. Jeotermal sular rezervuarda kaldıkları süre içerisinde su-kayaç etkileşimi

ile kimyasal bileşimini kazanmaktadır (Doğdu, 2004). Kocabaşlar jeotermal kaynağında baskın kation Na⁺, baskın anyon ise SO₄⁻² olup, Na⁺, Ca⁺², SO₄⁻² ve Cl⁻ konsantrasyonu sırasıyla 175 mg/l, 108 mg/l, 429 mg/l ve 104 mg/l olarak belirlenmiştir (Yalçın, 2007). Kation ve anyon dizilimi sırasıyla Na⁺> Ca⁺²> K⁺> Mg⁺² ve SO₄⁻²> Cl⁻> HCO₃⁻ şeklindedir. Jeotermal kaynağın Al, As, B, Br, Mn ve Li konsantrasyonu sırasıyla 21 µg/l, 20,5 µg/l, 489 µg/l, 348 µg/l, 28,02 µg/l ve 99,4 µg/l olarak tespit edilmiştir (Karaca vd., 2013). Jeotermal kaynağın Fe konsantrasyonu 800 µg/l'dir (Sarp vd., 1998).

Kocabaşlar jeotermal alanında 2020 yılında 650 m derinlikte bir jeotermal sondaj kuyusu açılmış (Şekil 2b), sondaj logu ve hidrokimyasal analiz sonuçları Çanakkale İl Özel İdaresi'nden temin edilmiştir. Sondaj kuyusunda ilk 10 m derinlikte alüvyon, sonrasında kuyu sonuna kadar kırıklı çatlaklı altere andezit bulunduğu tespit edilmiştir. Sondaj sırasında ölçülen sıcaklık değeri 46 °C, debi ise 3 l/sn olarak belirtilmiştir. Kasım 2020 tarihli örnekleme sonucunda jeotermal suyun sıcaklık, EC, tuzluluk ve pH değerleri sırasıyla 43,5

$^{\circ}\text{C}$, 1517 $\mu\text{s/cm}$, %0,8 ve 6,5 olarak belirlenmiştir. Jeotermal sondajdan alınan su örneğinin kimyasal analiz sonuçlarına göre Na^+ , Ca^{+2} , SO_4^{-2} ve Cl konsantrasyonu sırasıyla 172 mg/l, 145 mg/l, 470 mg/l ve 149 mg/l olarak saptanmıştır. Jeotermal sondaj günümüzde kullanılmamaktadır.

Jeotermal akışkanın yüzey sıcaklığı rezervuar sıcaklığından daha düşüktür. Jeotermal akışkanın yüzeye doğru hareket ederken soğuk su ile karışması, temasta bulunduğu kayaç ile ısı değişimi ya da örtü kayaç kalınlığının ince olması gibi faktörler suyun sıcaklığının azalmasında etkindir (Doğdu, 2004). Kimyasal analiz sonuçlarına göre uygulanan çeşitli jeotermometre yöntemleri ile jeotermal akışkanın rezervuar sıcaklığının tahmin edilmesi jeotermal araştırmaların önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Kocabaşlar jeotermal kaynağının rezervuar sıcaklığı silis (SiO_2), Na/K ve Na/K/Ca jeotermometreleri kullanılarak sırasıyla 58-65 $^{\circ}\text{C}$, 54 $^{\circ}\text{C}$ ve 57 $^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır (Yalçın, 2007). Baba vd. (2007), Kocabaşlar jeotermal kaynağının rezervuar sıcaklığını Na/K jeotermometresi ile 50-71 $^{\circ}\text{C}$, SiO_2 jeotermometresi ile 71-75 $^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplamıştır.

Karaca vd. (2013), Kocabaşlar jeotermal kaynağından aldıkları örneğin oksijen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) ve döteryum ($\delta^2\text{H}$) içeriğinin sırasıyla % -9,49 ve % -63,58 olduğunu ve kaynağın meteorik kökenli olduğunu ifade etmiştir. Kocabaşlar jeotermal alanındaki soğuk su kaynağı $\delta^{18}\text{O}$ (% -7,99) ve $\delta^2\text{H}$ (% -45,47) içeriğine göre meteorik kökenlidir (Baba vd., 2007). Kocabaşlar jeotermal kaynağının Cl içeriği 78 mg/l ve trityum (T) içeriği 0,25 TU olarak belirlenmiştir (Baba vd., 2007). Baba vd. (2007) tarafından Kocabaşlar jeotermal alanında bulunan soğuk su kaynağında aynı tarihte yapılan örnekleme ile Cl içeriğinin 35 mg/l, T içeriğinin ise 6,7 TU olduğu saptanmıştır. Soğuk su kaynağı güncel yağışlar ile beslenmekte olup, sığ dolaşımıdır. Jeotermal kaynak ise su-

kayaç etkileşim süresi daha fazla, derin dolaşım ve beslenimi 1950 yılından öncedir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Ekipman

Arazi çalışmaları sırasında İHA görüntü çekimi için DJI Mavic 3T (SZ DJI Technology Co., Ltd., Shenzhen, Çin) kullanılmıştır (Şekil 2c). İHA, 920 g (pil, pervaneler ve microSD kart dahil) ağırlığındadır. İHA'ya entegre olan GPS fotogrametrik uçuş planlarının hazırlanmasına ve uçuşların plana uygun gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Rüzgârsız hava koşullarında İHA bir batarya ile 45 dakika uçabilmektedir, rüzgârlı hava koşulları ise uçuş süresini kısaltmaktadır. Ayrıca %15 pil seviyesinin altındaki uçuşların riskli olması nedeni bir pil ile yaklaşık 38 dakika uçuş yapılmaktadır. İHA'nın maksimum uçuş mesafesi 32 km'dir. Kullanılan batarya 335,5 g ağırlığında, 5000 mAh kapasitesinde ve 4 hücreli lityum polimer (Li-Po) özelliğindedir. Kalkış ve iniş sırasındaki maksimum rüzgâr hızı direnci 12 m/sn'dir. İHA'nın algılayıcı sistemi 2 kameradan oluşmaktadır, bunlar: termal kızılötesi (TIR - thermal infrared) ve görünür bant (RGB - red green blue) kameralardır. Termal kameranın diyagonal görüş alanı (DFOV: diagonal field of view) 61 $^{\circ}$ ve 640 \times 512 piksel çözünürlüğe sahiptir. Kameranın spektral aralığı 8-14 μm 'dir. Bu kamera ile -20 ile +150 $^{\circ}\text{C}$ aralığında ± 2 $^{\circ}\text{C}$ hassasiyette sıcaklık ölçümü yapılabilmektedir. Termal kamera 8-bit JPEG ve 16-bit R-JPEG formatta fotoğraf çekmektedir. RGB kamera 84 $^{\circ}$ görüş alanına (FOV), 1/2-inç CMOS genişliğine sahiptir ve 48 MP (8000 \times 6000 piksel) çözünürlüklü görüntü sağlamaktadır. Uçuş sırasında kumanda ekranından çekilen tüm görüntüler takip edilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan İHA sisteminin teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Termal ve RGB İHA sisteminin özellikleri.

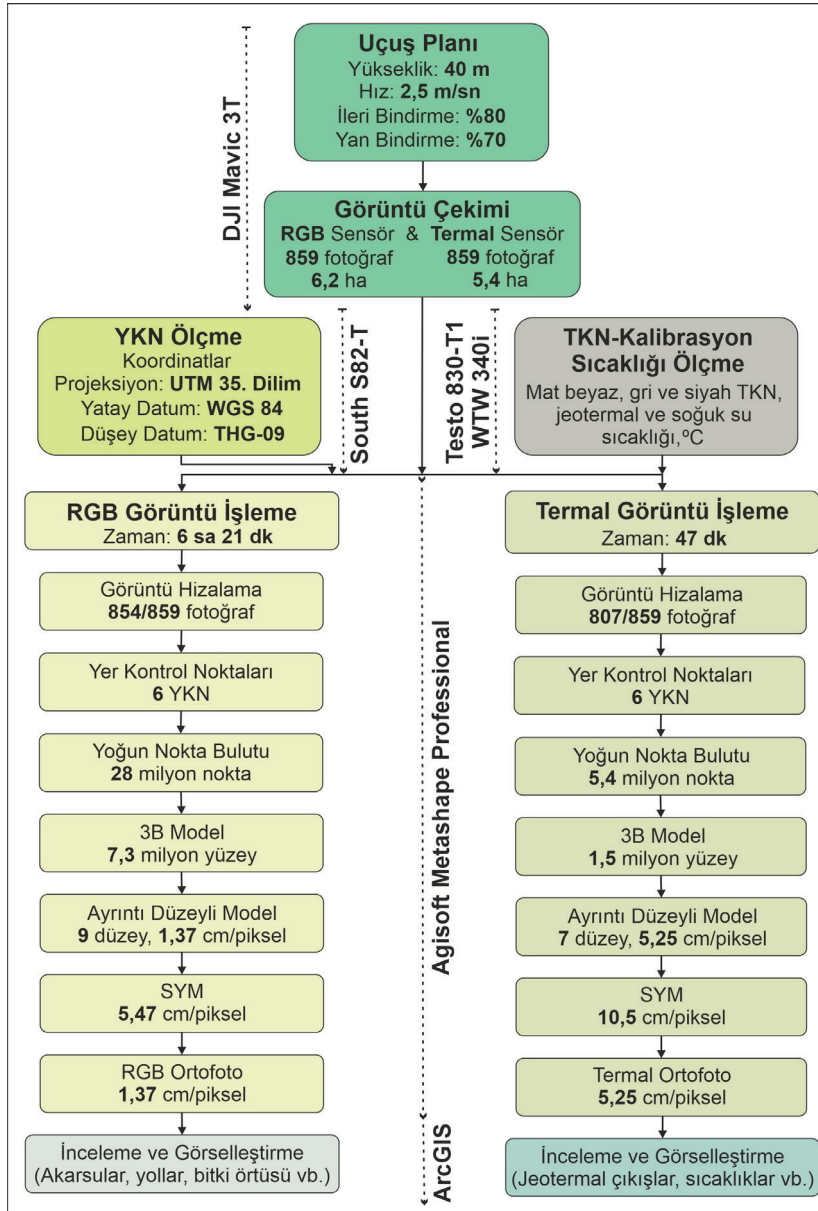
Table 1. The specifications of TIR and RGB UAV systems.

Özellikler	Termal İHA Sistemi	Özellikler	RGB İHA Sistemi
Kamera modeli	DJI Mavic 3T Termal	Kamera modeli	DJI Mavic 3T Wide
Spektral aralık	8–14 µm	Sensör tipi	1/2-inch CMOS
Görüntü hızı	30 Hz	Açıklık	f/2.8
Objektif odak uzaklığı	40 mm	Objektif odak uzaklığı	24 mm
Objektif görüş alanı	61°	Objektif görüş alanı	84°
Görüntü formatı	JPEG (8-bit) R-JPEG (16-bit)	Görüntü formatı	JPEG
Video formatı	MP4 (MPEG-4 AVC/H.264)	Video formatı	MP4 (MPEG-4 AVC/H.264)
Sensör çözünürlüğü	640×512 piksel	Sensör çözünürlüğü	8000×6000 piksel
Maksimum uçuş hızı		15 m/sn (normal mod)	
Boyutlar		347,5×283×107,7 mm	
Ağırlık		920 g	
Li-Po 4S batarya		5000 mAh	
Uçuş süresi		45 dakika (maksimum)	
Uçuş mesafesi		32 km (maksimum)	
Uzaktan kumanda		DJI O3 Enterprise Transmission	
Gimbal model		3 eksenli (eğme, döndürme, kaydırma)	
Uçuş planı uygulaması		DJI Pilot 2	
Görüntü işleme yazılımı		Agisoft Metashape Professional	

Görüntü Çekimi

İHA uçuşları 6 Ocak 2023 tarihinde yapılan arazi çalışması sırasında gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışması sabah saat 9.00’da başlamıştır. Çalışma sırasındaki hava sıcaklığı 7 °C, hava koşulları açık ve rüzgârsızdı. Araziye 6 adet kare, 50×50 cm boyutlarında siyah ve beyaz renkli dama desenli kalın karton yer kontrol noktaları (YKN) homojen olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca araziye termal görüntülerin kalibrasyonu için 3 adet kare, 60×60 cm boyutlarında mat beyaz, gri ve siyah renkli alüminyum folyo ile kaplanmış strafor termal kontrol noktaları (TKN) yerleştirilmiştir (Şekil 2d). İHA fotogrametrisinde elde edilen ürünlerin doğruluğuna etkiyen en önemli parametre YKN’nin sayısı ve arazideki dağılımının homojenliğidir (Şener, 2019). Görüntü

konumlandırmanın santimetre hassasiyetinde olması için YKN koordinatları South S82-T (South Surveying & Mapping Instrument Co., Ltd., Guangzhou, Çin) küresel konumlandırma uydu sistemleri (GNSS) ile belirlenmiştir. Cihaz kinematik ölçmede yatayda 8 mm+1 ppm RMS, düşeyde 15 mm+1 ppm RMS hassasiyete sahiptir. GNSS, Çanakkale CORS istasyonuna bağlanmıştır. GNSS ölçmeleri sonucu koordinatların karekök ortalama hata değerleri yatayda 46 mm, düşeyde 54 mm olarak belirlenmiştir. Yatay koordinatlar UTM 35. dilim (WGS 84), düşey koordinatlar ise Türkiye Hibrit Jeoidi 2009 (THG-09)’ne göre tanımlıdır. RGB ve termal kameralı İHA ile görüntü çekimi ve görüntü işleme aşamaları Şekil 5’te sunulmuştur.



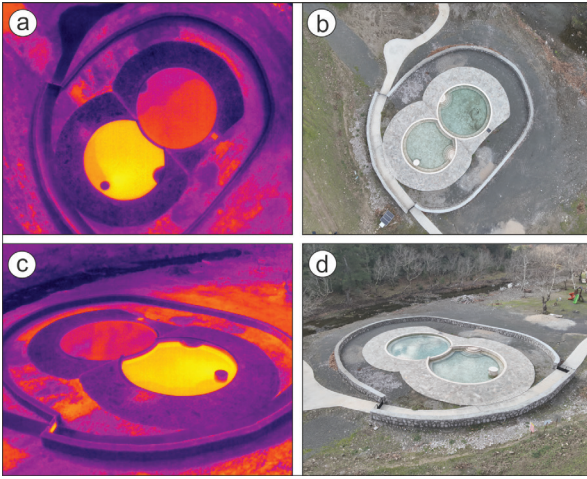
Şekil 5. Çalışmanın adımlarını gösteren iş akış diyagramı.

Figure 5. Overview of the study work flow.

Kocabaşlar jeotermal alanını kapsayan uçuş planı, çevredeki düşey engeller (elektrik direği, ağaç vb.) ve yasal sınırlar dikkate alınarak hazırlanmıştır (Şekil 2e). Uçuş planı İHA kumandasında mevcut olan DJI Pilot 2 uygulaması ile oluşturulmuştur. Uçuş planında İHA, çalışma alanının kısa eksenini boyunca uçurulmuştur. İHA uçuşu 40 m yükseklikten, 2,5 m/sn uçuş hızında

gerçekleştirilmiştir. Görüntüler arası ortak bağ noktalarının eşleştirilmesi amacıyla görüntülerin uçuş yönüne dik olarak birbirleri ile bindirme oranları; ileri (boyuna) ve yan (enine) bindirme sırasıyla %80 ve %70'tir. Görüntü çiftleri arasında hassas eşleştirme sağlanması için, %80 veya daha fazla ileri bindirme, %60 veya daha fazla yan bindirme oranının olması önemlidir (Nex ve

Romandino, 2014). Yüksek bindirme oranları, elde edilecek nokta bulutu yoğunluğunu artırarak, üç boyutlu konum hassasiyetinin artmasına katkı sağlamaktadır (Zeybek ve Şanlıoğlu, 2019). 6,2 ha jeotermal alanda RGB kamera ile 859 görüntü alınmıştır. Termal kameranın görüş alanının daha dar olması sebebi ile 859 termal görüntünün kapsadığı alan 5,4 ha'dır. İHA termal ve RGB kamera çekimleri sabah saat 10.00'da başlamış ve uçuş süresi 36 dakika 9 saniye sürmüştür. Uçuş sırasında 1 pil kullanımı yeterli olmuştur. Ayrıca İHA manuel kumanda edilerek jeotermal alandan termal ve RGB görüntüler alınmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. a, b) Düşey termal ve RGB görüntü, c, d) Oblik (eğik) termal ve RGB görüntü.

Figure 6. a, b) Vertical TIR and RGB image, c, d) Oblique TIR and RGB image.

Radyometrik termal kameralar, termal veriyi görüntüye dönüştürürken cisimlerin sıcaklık değerlerini doğrudan ölçebilen ve kaydedebilen kameralardır. Bu kameralar, elektromanyetik radyasyonu algılamak için özel sensörlere sahiptir ve sıcaklık değerlerini görüntülerdeki piksel değerlerine dönüştürür. Radyometrik termal kameralarda veri hassasiyetinin artırılması için radyometrik kalibrasyon gereklidir. Bu çalışmada TKN, dere suyu sıcaklığı ve termal havuz suyu sıcaklığı termal görüntü kalibrasyonu için

kullanılmıştır. El tipi kızılötesi termometre (Testo 830- T1, Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Almanya) ile beyaz, gri ve siyah renkli TKN'lerin sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Arazide Ulu Dere, termal havuz ve çalışma alanının kuzeyindeki soğuk su kaynağında sıcaklık değerlerinin yanı sıra pH, EC ve tuzluluk değerleri WTW 340i (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten, Weilheim, Almanya) multi parametre ölçer ile belirlenmiştir.

Görüntü İşleme

İHA ile elde edilen görüntülerin işlenmesi ve modellenmesinde Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, St. Petersburg, Rusya) yazılımı ile 2,20 GHz i7 işlemcili ve 32 GB RAM hafızalı dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Agisoft yazılımı, fotogrametrik değerlendirme sürecinde görüntülere Structure from Motion (SfM) (Ullman, 1979) yöntemini uygulamaktadır. SfM, yüksek çözünürlüklü görüntüler üzerinde çalışmayı mümkün kılan, düşük maliyetli ve kullanıcıya görüntü işlemede kolaylık sağlayan bir fotogrametrik yöntemdir (Akay, 2023). Görüntü tabanlı modellemeyi esas alan SfM, kamera parametrelerini ve görüntülerdeki nesnelerin üç boyutlu geometrisini otomatik olarak belirleyerek üç boyutlu model oluşturulmasını sağlar (Snavely vd., 2006; Özcan, 2017). SfM yönteminde İHA görüntüleri değerlendirilirken YKN koordinatları ile konumsal düzeltme getirilir ve üretilen verilerin coğrafi konum hassasiyeti artırılır.

Görüntü işleme aşaması; görüntü hizalama, yoğun nokta bulutu oluşturulması, SYM üretilmesi ve son olarak yüksek çözünürlüklü ortofotoların üretilmesi işlemleri olarak gerçekleştirilmiştir. Görüntü hizalama aşamasında, bulanık görüntüler eşleştirilmede kullanılmadığı için yazılım tarafından çıkarılır. Bu çalışmada termal görüntüler arasından 52 adet ve RGB görüntüler arasından da 5 adet görüntü çıkarılmıştır. Konumları belirlenen YKN'ler görüntü hizalama sonrası yazılıma eklenerek görüntülerin konum hassasiyeti

arttırılmıştır. İHA ile elde edilen görüntü sayısı, veri üretim parametreleri ve donanım özellikleri veri üretim süresini etkilemektedir (Akay, 2023). RGB ve termal görüntülerin veri üretim süresi sırasıyla 6 saat 21 dakika ve 47 dakika sürmüştür. Bu çalışmada RGB ve termal görüntüler için sırasıyla 28 milyon ve 5,4 milyon yoğun nokta bulutu, 7,3 milyon ve 1,5 milyon yüzeyden oluşan 3B SYM, 5,47 cm ve 10,50 cm mekânsal çözünürlüklü SYM ve 1,37 cm ve 5,25 cm mekânsal çözünürlüklü ortofotolar üretilmiştir. Görüntü işleme sonucu elde edilen ortofotoların kartografik olarak görselleştirilmesi (çerçeve, çerçeve koordinatları, gratikül, lejant, kuzey oku, grafik ölçek vb.) için bir CBS yazılımı olan ArcGIS 10,3v (Environmental Systems Research Institute, Inc., Kaliforniya, Amerika) kullanılmıştır.

BULGULAR

İHA RGB kamera ile görüntü çekimi 40 m sabit yükseklikten, 2,5 m/sn hız ve % 80 ileri ve % 70 yan bindirme oranı ile 6,2 ha alanda gerçekleştirilmiştir. Jeotermal alanın güney kesimindeki ani yükselim ve yüksek ağaçların bulunması nedeni ile İHA ile görüntü çekimi jeotermal alanın güneyinde yapılamamıştır. Görüntü çekimi sırasında 859 RGB görüntünün 854'ü kullanılarak yaklaşık 6 buçuk saatlik görüntü işleme sonrasında jeotermal alanın mekânsal çözünürlüğü 1,37 cm/piksel olan RGB ortofotosu elde edilmiştir (Şekil 7). Yüksek çözünürlüklü ortofotoda bitki örtüsünün yarattığı desen, jeolojik birimler, jeotermal sondaj, termal havuz, Ulu Dere, YKN ve TKN'nin konumu, mesire yeri, oyun parkı, bitki örtüsü, ağaçlar, karayolu ve yürüyüş yolu net olarak gözükmemektedir.

Google Earth'de görüntülenen 13 Nisan 2020 tarihli CNES/Airbus uydu görüntüsünde Kocabaşlar jeotermal alanındaki eski havuz görülmektedir (Şekil 8a). Havuzun alanı yaklaşık 11 m² olarak belirlenmiştir. Bu tarihte jeotermal sondajın ve çevre düzenlemesinin yapılmamış

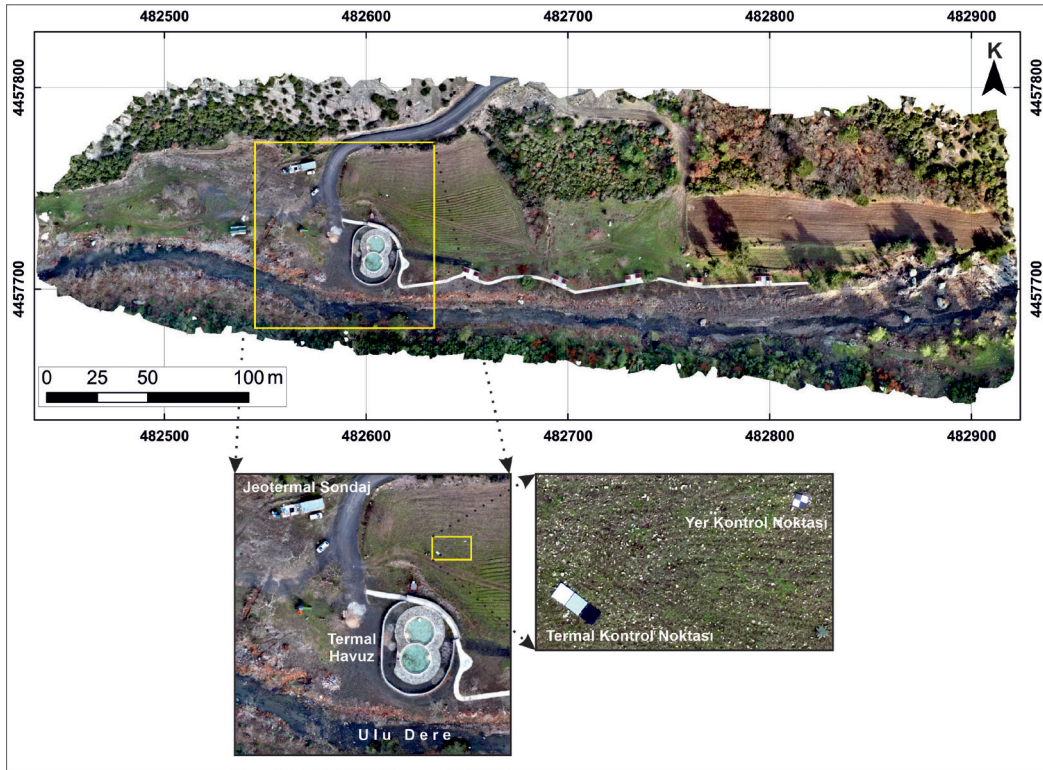
olduğu saptanmıştır. Jeotermal alanın Google Earth'de görüntülenen CNES/Airbus 23 Ekim 2022 tarihindeki uydu görüntüsünde ise jeotermal sondajın yapıldığı, eski havuzun yıkılarak aynı lokasyona daha büyük termal havuzun inşa edildiği ve sahada çevre düzenlemesinin yapıldığı görülmektedir (Şekil 8b). Kocabaşlar Köyü ile jeotermal alan arasındaki stabilize yol yerine yaklaşık 1250 m uzunluğunda asfalt yol ve havuzun çevresinde Ulu Dere'ye paralel olarak 260 m uzunluğunda yürüyüş yolu yapılmıştır. Jeotermal alanların zamana bağlı değişimlerinin izlenmesinde ve değerlendirilmesinde uydu görüntüleri kullanımının önemi büyüktür. Ancak uydu görüntülerinin mekânsal çözünürlüğü 50 cm olup, büyük ölçekli olarak incelenip görüntüye yaklaştıkça coğrafi nesnelere netliği azalmakta, dolayısıyla nesne ayrıntıları belirlenememektedir. Bu çalışmada üretilen 2023 yılı Ocak ayı RGB ortofotosu uydu görüntüsü üzerine eklenmiştir (Şekil 8c). Ortofotoda yeni termal havuzun çevre uzunluğu 50 m, alanı ise 140 m² olarak saptanmıştır. Termal havuzdan daha çok kişinin yararlanması amacıyla alanı yaklaşık 13 kat arttırılmıştır. Ortofotoda YKN ve TKN'nin konumu, yürüyüş yolu, beğcinin kaldığı konteynır, oyun parkı gibi birçok nesne oldukça net olarak görülebilmektedir. Ayrıca jeotermal alanda uydu görüntüleri ile sayısı netleştirilemeyen 10 adet kamelya bulunduğu saptanmıştır.

SYM, dünya yüzeyinin dijital bir temsili olup, bitki örtüsü ve binalar gibi üzerindeki tüm doğal ve insan yapımı nesnelere içerir (Harvey vd., 2014; Chaudhry vd., 2020). Kocabaşlar jeotermal alanı için oluşturulan SYM mekânsal çözünürlüğü 5,47 cm/pikseldir (Şekil 9). Jeotermal alanın SYM'deki deniz seviyesinden yüksekliği 170 ile 211 m arasında olup, çalışma alanındaki en düşük yükselti Ulu Dere'dedir. Jeotermal kaynağın deniz seviyesinden yüksekliği 178 m'dir. Jeotermal alan ve çevresindeki en önemli yükselti volkanik kayalardan oluşmaktadır. SYM'de arazi topografyası, Ulu Dere yatağı, termal havuz, asfalt

ve stabilize yollar, piknik alanı ve zemini kaplayan bitki örtüsü görülmektedir.

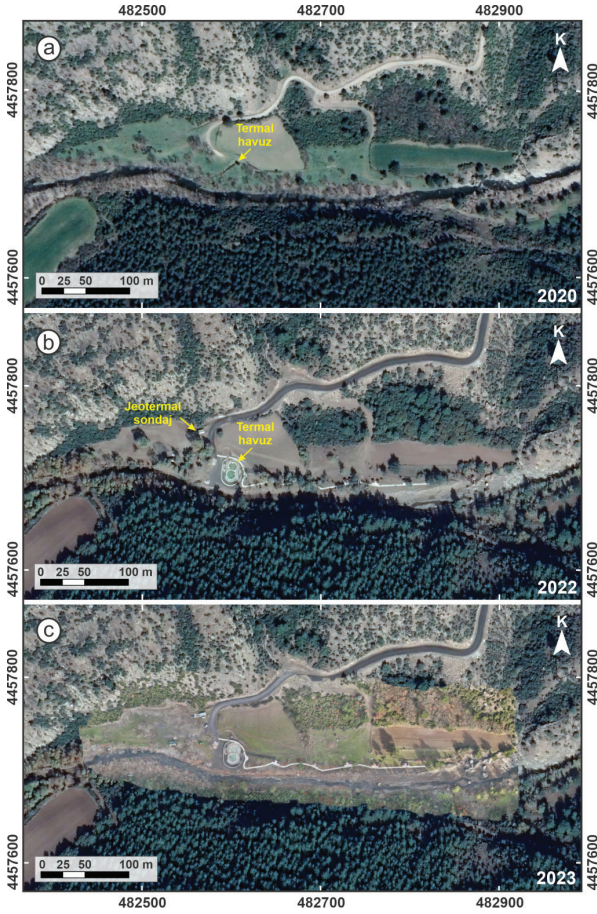
Jeotermal alanın düşük sıcaklıklı olması ve yüzey sıcaklık farkının net olarak tespit edilebilmesi amacıyla arazi çalışmaları Ocak ayında gerçekleştirilmiştir. 40 m sabit yükseklikten 2,5 m/sn hız ve %80 ileri ve %70 yan bindirme oranı ile 5,4 ha alanda 859 termal görüntü alınmıştır. Yaklaşık 47 dakika süren görüntü işleme sonrasında 859 görüntünün 807'si kullanılarak jeotermal alanın mekansal çözünürlüğü 5,25 cm/piksel olan termal ortofotosu elde edilmiştir (Şekil 10). Termal ortofotoda TKN ve YKN'nin konumu net olarak görülmektedir. Arazi çalışmalarında beyaz, gri ve siyah renkli TKN'lerin sıcaklık ortalaması sırasıyla 7,8 °C, 12,6 °C ve 17,9 °C olarak ölçülmüştür. Termal ortofotodaki yüzey sıcaklık değerleri 6 °C ile 38 °C arasındadır. En soğuk bölgeler mor, en sıcak bölgeler ise sarı

renk ile gösterilmiştir. Sıcaklığın en düşük olduğu yer Ulu Dere'dir. Arazide Ulu Dere'deki en düşük sıcaklık değeri 6,2 °C olarak ölçülmüştür. Jeotermal sondajın kullanılmaması nedeni ile sahadaki en yüksek sıcaklıklı yerin havuzdaki jeotermal kaynağın çıkış noktası olduğu tespit edilmiştir. Üstü açık bir havuz olması nedeni ile jeotermal kaynak çıkışından uzaklaştıkça sıcaklık azalmaktadır. Bu nedenle ortofotoda jeotermal çıkışın olmadığı havuzun rengi koyu sarı olarak görülmektedir. Termal havuzun sıcaklık değeri arazide 18,2 °C ile 38,1 °C arasında, ortalama 27,9 °C olarak belirlenmiştir. Ortofotodaki sıcaklık değerleri, arazi çalışması sırasında ölçülen sıcaklık değerleri ile doğrulanmıştır. Termal ortofotoda jeotermal sondajın konumu ve jeotermal kaynağın Ulu Dere'ye deşarj edildiği nokta net olarak gözükmemektedir. Ayrıca Ulu Dere boyunca düşük debili jeotermal çıkışların derede yer yer sıcaklık artışına sebep olduğu saptanmıştır.



Şekil 7. Kocabaşlar jeotermal alanının RGB ortofotosu.

Figure 7. RGB orthophoto of the Kocabaşlar geothermal field.



Şekil 8. a, b) Kocabaşlar jeotermal alanının 2020 ve 2022 yılları Google Earth’de görüntülenen CNES/Airbus uydu görüntüsü, c) 2023 yılı RGB ortofotonun 2022 yılı Google Earth uydu görüntüsüyle karşılaştırılması.

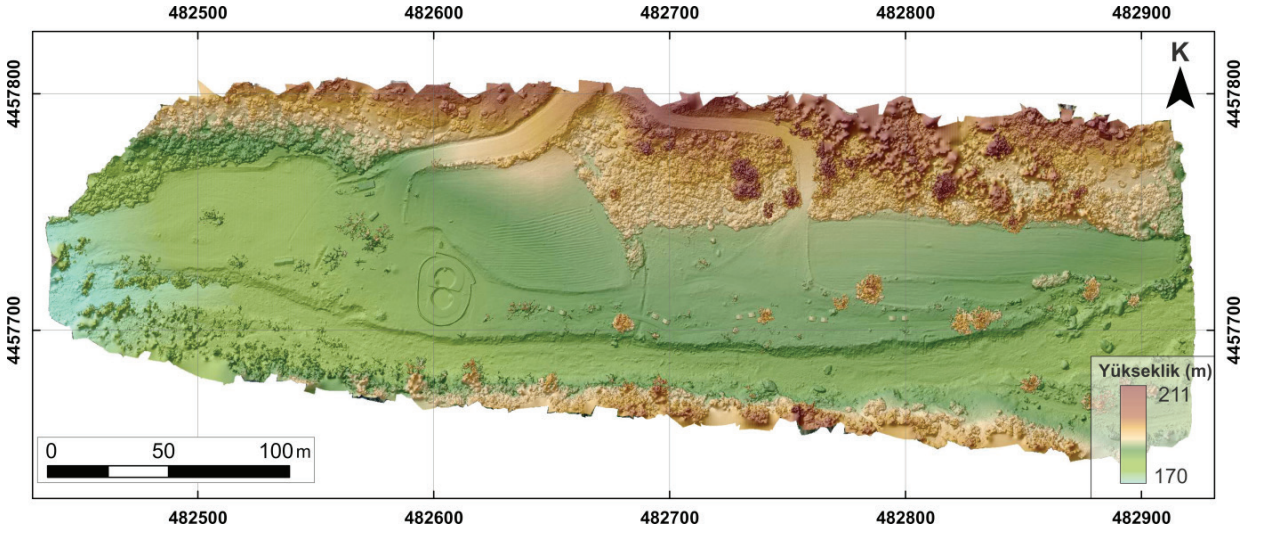
Figure 8. a, b) Aerial imagery (from Google Earth) of Kocabaşlar geothermal field, c) Overlay of UAV-based RGB orthophoto with Google Earth image.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Jeotermal enerji potansiyelinin yüksek olduğu Türkiye’de bu potansiyelin geliştirilmesi ile her sıcaklıktaki kaynağın ekonomiye kazandırılması gerekmektedir. Türkiye, jeotermal kaynak ile denizin bulunduğu nadir ülkelerden olup, termal ve deniz turizminin entegre kullanılabileceği yer olarak Çanakkale ili Lapseki ilçesinde bulunan Kocabaşlar jeotermal alanı önem taşımaktadır. Jeotermal alan, yoğun ağaçlık bir bölgede yüksek

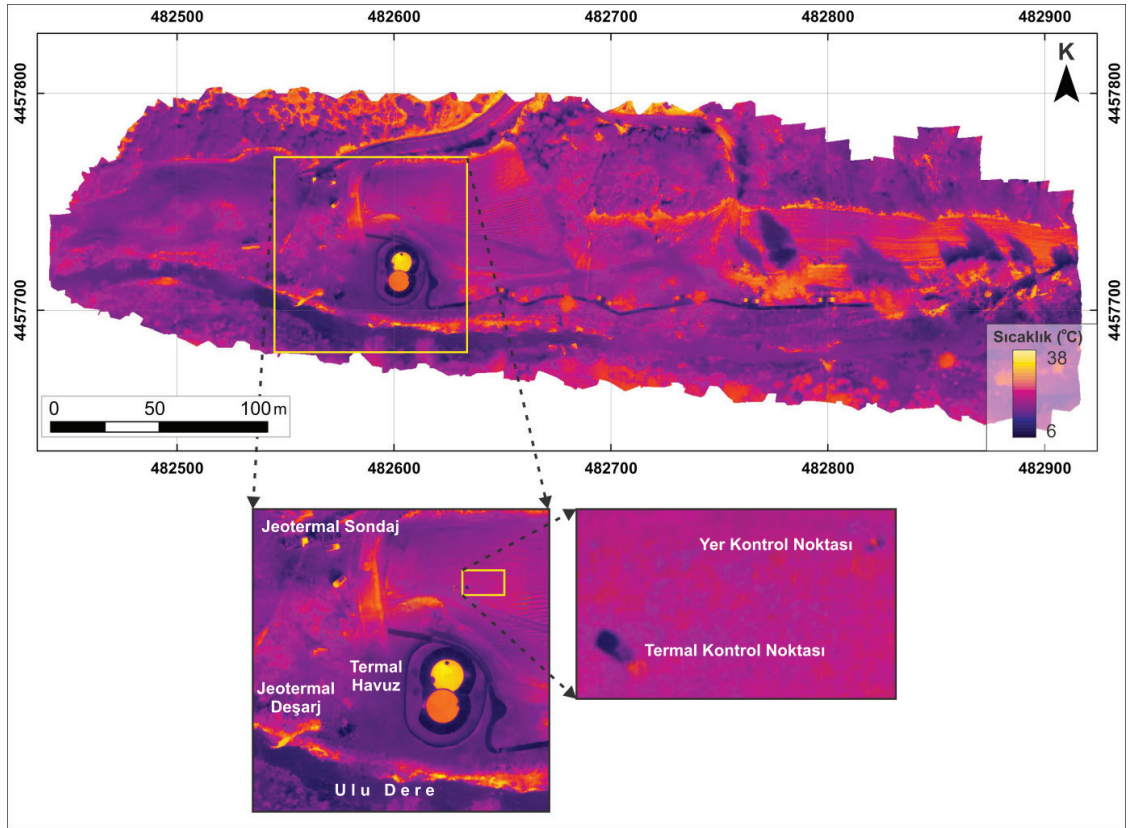
tepelerle çevrili olup, Ulu Dere’nin kenarındadır. Bölgede yapılaşma yoktur, etrafında mesire yeri ve tarım arazileri bulunmaktadır. Jeotermal kaynak yaklaşık D-B uzanımlı normal bir fay boyunca çıkmaktadır. Günümüzde jeotermal alan genellikle yöre halkı tarafından ziyaret edilmektedir. Jeotermal alana termal otel ve bungalov evler inşa edilerek geliştirilmesi planlanmaktadır. Böylelikle jeotermal alandan dört mevsim yararlanılabilecek, sürdürülebilir termal turizm faaliyetleri ile alana gelen yerli ve yabancı turistler bölge istihdamına ve ekonomisine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında İHA teknolojisi kullanılarak Kocabaşlar jeotermal alanının yüksek çözünürlüklü RGB ve termal ortofotoları ve SYM ilk kez oluşturulmuştur. Termal ve RGB kameralardan oluşan entegre İHA sisteminin, jeotermal alanların yüzey özellikleri ve sıcaklık değişimlerine ilişkin haritaların oluşturulmasında hızlı, güvenilir ve uygun maliyetli bir çözüm sunduğu tespit edilmiştir. İHA teknolojisi ile Kocabaşlar jeotermal alanının geliştirilmesi aşamasında ve sonrasında gerçekleşecek sahadaki değişimlerin yüksek çözünürlüklü görüntüler ile takip edilmesi planlanmıştır. İHA termal ve RGB kamera görüntüleri ile Kocabaşlar jeotermal alanının zamana bağlı olarak izlenip modellenmesi ile termal otelin ve bungalov evlerin inşası sırasında ilerlemenin raporlaması için fayda sağlayacak, ekonomik, hızlı ve tekrarlı ölçmeler yapılmasına izin verecektir. Ayrıca jeotermal akışkanın termal otele ve bungalov evlere taşınması sırasında oluşabilecek hasarlı boru hatlarından su kaçaqlarının tespit edilmesi için İHA termal görüntüleme çalışmaları önem taşımaktadır. Kocabaşlar jeotermal alanındaki gelişimin sürdürülebilir izlenmesinde birbirinden farklı birçok veri seti ile bu verilerin bir arada değerlendirilerek yönetilmesi, görüntülenmesi ve mekânsal analizi için İHA teknolojisi ve CBS dinamik yapıllı entegre bilgi teknolojisi olarak kullanılacaktır.



Şekil 9. Kocabaşlar jeotermal alanının sayısal yüzey modeli.

Figure 9. The DSM of the Kocabaşlar geothermal field.



Şekil 10. Kocabaşlar jeotermal alanının termal ortofotosu.

Figure 10. TIR orthophoto of the Kocabaşlar geothermal field.

EXTENDED SUMMARY

Geothermal energy is one of the most renewable, sustainable, and environmentally friendly energy sources. Geothermal energy is independent of daily or seasonal weather fluctuations and the unpredictable fluctuations of international commodity prices (Jolie et al., 2021). Due to its geological and tectonic features, Türkiye has one of the highest geothermal energy potentials in the world, with more than 2000 geothermal and mineral springs (Vengosh et al., 2002; Şanlıyüksel Yücel et al., 2021). Monitoring geothermal springs is crucial for Türkiye to ensure the sustainable development of geothermal energy. Conventional exploration of geothermal energy is a slow process that requires a lot of time and investment and involves drilling, geophysical surveys, and more (Sedano-Cibrián et al., 2022). Unmanned aerial vehicle (UAV) technology enables rapid, cost-effective, real-time monitoring and safe surveying of geothermal fields (Cherkasov et al., 2018; Bjornsson et al., 2019). Using UAVs, it is possible to regularly monitor geothermal fields with sub-centimeter spatial resolution data at both spatial and temporal scales (Nishar et al., 2016).

The surface temperatures of 14 geothermal fields identified within Çanakkale (Northwestern Türkiye) range from 23 to 96.2 °C (Şanlıyüksel Yücel et al., 2013; Marmara et al., 2020). Kocabaşlar geothermal field is located in the northeast of Çanakkale, about 45 km from the city center. The surface temperature of Kocabaşlar geothermal water was measured at 38.1 °C. In this study, for the first time, high-resolution thermal infrared (TIR) and visible (RGB) orthophotos and a digital surface model (DSM) of the low-temperature Kocabaşlar geothermal field were created, and the thermal anomaly was determined using UAV technology. In addition, satellite images were used to evaluate time-dependent changes in the geothermal field.

The Middle Eocene Şahinli formation (Dönmez et al., 2005) consists of basalt, basaltic andesitic lava, pyroclastics, and occasional volcanoclastic rocks and outcrops in the geothermal field. Volcanoclastic rocks, occasional turbiditic sediments, the dominant basalt that cannot be separated from these sediments, and occasionally basaltic andesitic lava within the Şahinli formation are called the Bilaller member (Dönmez et al., 2005). The Bilaller member outcrops in the north and east-southeast sections of the study area. The Ceylan formation, comprising Upper Eocene tuffs with intercalated shale, sandstone and clastic limestone (Ünal, 1967) is located above older units above an unconformity (Siyako et al., 1989; Dönmez et al., 2005). This formation outcrops in the northeast of the study area. Quaternary alluvium present around the Ulu streambed consists of unconsolidated gravel, sand, silt, and clay and unconformably overlies the older units. The main geological structure in the geothermal field is an east-west trending normal fault. This fault serves as a channel through which geothermal fluid flows upward, and it is located south of Ulu stream (Sarp et al., 1998; Baba et al., 2007; Sarp and Duman, 2008; Deniz et al., 2016). There are numerous small-scale faults and fractures in the vicinity of the geothermal field. These fractures and faults play a significant role in the dynamics of local groundwater.

A well was drilled to a depth of 650 m in the Kocabaşlar geothermal field in 2020. The reservoir temperature and flow rate of the geothermal water were measured at 46 °C and 3 L/s, respectively. Kocabaşlar geothermal water is of Na-SO₄ facies. The major cation sequence in geothermal water is Na⁺ > Ca²⁺ > K⁺ > Mg²⁺ with an anion sequence of SO₄²⁻ > Cl⁻ > HCO₃⁻ (Baba et al., 2007). Elevated levels of As (20 µg/L), B (489 µg/L), Br (348 µg/L), Mn (28 µg/L), and Li (99 µg/L) were detected in Kocabaşlar geothermal water (Karaca et al., 2013). The Fe concentration in Kocabaşlar geothermal water was found to be 800 µg/L (Sarp

et al., 1998). Yalçın (2007) calculated the reservoir temperature for Kocabaşlar geothermal water as 58–65 °C, 54 °C, and 57 °C using quartz, Na/K, and Na/K/Ca geothermometers, respectively. In their study, Karaca et al. (2013) determined the oxygen-18 ($\delta^{18}O$) and deuterium (δ^2H) values of Kocabaşlar geothermal water were -9.49‰ and -63.58‰, respectively. They explained that geothermal water is of meteoric origin. Baba et al. (2007) reported that the tritium (T) content of the Kocabaşlar geothermal water was 0.25 TU. The low T value indicates that the geothermal water undergoes deep water circulation, and its residence time dates back to before the 1950s. Meteoric waters recharge the reservoir rock and are heated at depth with an increasing geothermal gradient. Subsequently, they move to the surface through the east-west trending normal fault and emerge as the Kocabaşlar geothermal spring.

The design of the flight plan (including flight parameters, survey date, etc.) is fundamental to conducting the UAV survey. The UAV survey was conducted on January 6, 2023, above the Kocabaşlar geothermal field. During the flight, the sky was clear; the average temperature was approximately 7 °C, and there was no wind. January was selected for the UAV survey due to the cold ground conditions, which allow for improved visibility and modeling of the low-temperature geothermal field. Prior to UAV surveys, six ground control points (GCPs) and three temperature calibration plates (TCPs) were placed in the geothermal field. The GCPs consisted of black and white cross-patterned cardboard measuring 50×50 cm, which are suitable for RGB and TIR image acquisition. A 60×60 cm styrofoam insulation material, wrapped with aluminum foil, was utilized as a TCP for radiometric calibration of the TIR images. The global navigation satellite system (GNSS) was used to accurately record the locations of the GCPs with centimeter-level precision. The horizontal and vertical RMS errors of the survey were less than 46 and 54

mm, respectively. The image acquisition started at 10:00 a.m. The flight was conducted at an altitude of 40 m with a ground speed of 2.5 m/s. The front overlap and side overlap were 80% and 70%, respectively. The UAV flight time lasted approximately 36 minutes over 6.2 ha area. A total of 1718 overlapping images were processed using Agisoft Photoscan commercial photogrammetry software. The coordinates of the 6 GCPs were used to precisely georeference the resulting RGB and TIR orthophotos and DSM. Orthophotos and DSM were cartographically visualized using ArcGIS 10.3v software.

High-resolution TIR orthophoto (5.25 cm/pixel), RGB orthophoto (1.37 cm/pixel), and a DSM (5.47 cm/pixel) were generated for the Kocabaşlar geothermal field. The changes in the geothermal field were evaluated using CNES/Airbus satellite images from 2020 and 2022, displayed on Google Earth. Furthermore, the UAV-based RGB orthophoto was overlaid on satellite images. The RGB orthophoto provided more detailed features with higher resolution for the geothermal field compared to satellite images. The TIR orthophoto revealed thermal anomalies ranging from 6 °C to 38 °C in the Kocabaşlar geothermal field. The geothermal springs are aligned in the east-west direction, and the geothermal anomaly is consistent with the trend of Ulu stream. At depth, the geothermal water may possibly reach temperatures of more than 50 °C, as inferred from solute geothermometry. As the geothermal water rises to the surface, it cools during its ascent due to thermal conduction with the surrounding rocks and mixing with cold water. The findings of this study contribute to the understanding and development of low-temperature geothermal springs. Long-term monitoring of the Kocabaşlar geothermal field using UAV technology will provide valuable insights for the sustainable use and development of geothermal energy in the region.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, görüş ve önerileri için kıymetli hakemlere teşekkürlerini sunar. Yazarlar ayrıca Çanakkale İl Özel İdaresi'ne veri paylaşımı için teşekkür eder.

ORCID

Deniz Şanlıyüksel Yücel  <https://orcid.org/0000-0001-6546-5624>

Mehmet Ali Yücel  <https://orcid.org/0000-0001-6956-5219>

KAYNAKLAR / REFERENCES

- Akay, S. S. (2023). İHA tabanlı 3 boyutlu verilere farklı perspektiflerde bakış: İTÜ Ayazağa Kampüsü. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 4(1), 47-63. <https://doi.org/10.48123/rsgis.1195012>
- Akkuş, İ., Akıllı, H., Ceyhan S., Dilemre, A. & Tekin Z. (2005). *Türkiye jeotermal kaynakları envanteri*. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Envanter Serisi, Ankara, 849 s.
- Akkuş, İ. & Alan, H. (2016). *Türkiye'nin jeotermal kaynakları, projeksiyonlar, sorunlar ve öneriler raporu*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, 76 s.
- Akkuş, İ. (2017). Neden Jeotermal Enerji? Türkiye İçin Önemi, Hedefler ve Beklentiler. *Mavi Gezegen*, 23, 25-39.
- Amici, S., Turci, M., Giammanco, S., Spampinato, L. & Giulietti, F. (2013). UAV thermal infrared remote sensing of an Italian Mud Volcano. *Advances in Remote Sensing*, 2, 358–364.
- Baba, A., Deniz, O. & Şanlıyüksel, D. (2007). Kocabaşlar jeotermal alanı (Lapseki-Çanakkale) ve çevresinin hidrojeokimyasal ve izotopik incelenmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lapseki Sempozyumu*, (s.146–155). Lapseki, Çanakkale, Türkiye.
- Banerjee, B. P., Raval, S., Maslin, T. J. & Timms, W. (2020). Development of a UAV-mounted system for remotely collecting mine water samples. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(6), 385–396. <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1549526>
- Bjornsson, G., Grimsson, G., Sigurdsson, A. & Laenen, V. S. (2019). Thermal mapping of Icelandic geothermal surface manifestations with a drone. *Proceedings of 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, (pp.1–8). Stanford University, Stanford, California.
- Chaudhry, M., Ahmed, A. & Gulzar, Q. (2020). Impact of UAV surveying parameters on mixed urban landuse surface modelling. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), Article 656. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110656>
- Cherkasov, S. V., Farkhutdinov, A. M., Rykovanov, D. P. & Shaipov, A. A. (2018). The use of unmanned aerial vehicle for geothermal exploitation monitoring: Khankala field example. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6(2), 351–362.
- Chio, S. & Lin, C. (2017). Preliminary study of UAS equipped with thermal camera for volcanic geothermal monitoring in Taiwan. *Sensor*, 17(7), Article 1649. <https://doi.org/10.3390/s17071649>
- De Beni, E., Cantarero, M. & Messina, A. (2019). UAVs for volcano monitoring: A new approach applied on an active lava flow on Mt. Etna (Italy), during the 27 February–02 March 2017 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 369, 250–262.
- Deniz, O., Bozcu, M. & Ateş, Ö. (2016). Feasibility study of the Kocabaşlar geothermal field (Lapseki/Canakkale/Turkey). *16th International Multidisciplinary Scientific Conference*, (s.383–387).
- Doğdu, M. Ş. (2004). Jeotermal suların rezervuar sıcaklığının tahmininde kullanılan jeotermometre hesaplamaları için bilgisayar programı. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 28(2), 1-12.
- Dönmez, M., Akçay, A. E., Genç, Ş. G. & Acar, Ş. (2005). Biga Yarımadası'nda Orta-Üst Eosen volkanizması ve denizel ignimbiritler. *MTA Dergisi*, 131, 49-61.
- Eker, R., Aydın, A. & Hübl, J. (2018). Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(1), 28. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6402-8>

- Ercan, T., Satır, M., Steinitz, G., Dora, A., Sarıfakıoğlu, E., Adis, C., Walter, H. J. & Yıldırım T. (1995). Biga Yarımadası ile Gökçeada, Bozcaada ve Tavşan Adalarındaki KB Anadolu Tersiyer volkanizmasının özellikleri. *MTA Dergisi*, 117, 55–86.
- Genç, Ş. C., Dönmez, M., Akçay, A. E., Altunkaynak, Ş., Eyüpoğlu, M. & Ilgar, Y. (2012). Biga Yarımadası Tersiyer volkanizmasının stratigrafik, petrografik ve kimyasal özellikleri. E. Yüzer & G. Tunay (Eds.), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi*, (s.122-162). MTA Özel Yayın Serisi-28, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Harvey, M. C., Pearson, S., Alexander, K. B., Rowland, J. & Wite, P. (2014). Unmanned aerial vehicles (UAV) for cost effective aerial orthophotos and digital surface models (DSM). *New Zealand Geothermal Workshop Proceedings*, (pp.1-4). Auckland, New Zealand.
- Harvey, M. C., Rowland, J. V. & Luketina, K. M. (2016). Drone with thermal infrared camera provides high resolution georeferenced imagery of the Waikite geothermal area, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 325, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.014>
- Hastaoğlu, K., Gül, Y., Poyraz, F. & Kara, B. C. (2019). Monitoring 3D areal displacements by a new methodology and software using UAV photogrammetry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 83, Article 101916. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101916>
- İzci, V. & Ulvi, A. (2021). Yer kontrol noktalarının harita üretimine etkileri. M. Yakar (Ed.), *Proceedings Book of the 1st International Geoinformatics Symposium*, (s.41–47). <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/igss/article/view/11/12>
- Jolie, E., Scott, S., Faulds, J., Chambefort, I., Axelsson, G., Gutiérrez-Negrín, L. C., Regenspurg, S., Ziegler, M., Ayling, B., Richter, A. & Zemedkun, T. M. (2021). Geological controls on geothermal resources for power generation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(5), 324–339. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00154-y>
- Karaca, Z., Şanlıyüksel Yücel, D., Yücel, M. A., Kamacı, C., Çetiner, Z. S., Erenoğlu R. C. & Akçay, Ö. (2013). *Çanakkale ili (Biga Yarımadası) jeotermal kaynakları ve özelliklerinin belirlenmesi, Biga Yarımadası jeotermal bilgi sistemi* (Rapor no: TR22/12/DFD/0011). Güney Marmara Kalkınma Ajansı.
- Kavzaoğlu, T. & Çölkesen, İ. (2011). Uzaktan algılama teknolojileri ve uygulama alanları. *Türkiye'de Sürdürülebilir Arazi Yönetimi Çalıştayı*, (s.1–9). İstanbul.
- Kıray, D. & Cengiz, O. (2023). Kestanelik granitoidinin petrografik ve jeokimyasal özellikleri (Çanakkale, Biga Yarımadası). *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 66(1), 127–148. <https://doi.org/10.25288/tjb.1187739>
- Koçman, A. (1993). *Türkiye iklimi*. Ege Üniversitesi Yayınları, No:72, İzmir, 83s.
- Koparan, C., Koç, A. B., Privette, C. V., Sawyer, C. B. & Sharp, J. L. (2018). Evaluation of a UAV-assisted autonomous water sampling. *Water*, 10(5), Article 655. <https://doi.org/10.3390/w10050655>
- Kun, M. & Güler, Ö. (2019). İnsansız görüntüleme sistemleri ile elde edilen sayısal yüzey modellerinin mermer madenciliğinde kullanımı. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(63), 1005-1013. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2019216328>
- Lund, J. W. & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, Article 101915. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- Manajitprasert, S., Tripathi, N. K. & Arunplod, S. (2019). Three-Dimensional (3D) modeling of cultural heritage site using UAV imagery: A case study of the Pagodas in Wat Maha That, Thailand. *Applied Science*, 9(18), Article 3640. <https://doi.org/10.3390/app9183640>
- Marmara, H., Şanlıyüksel Yücel, D., Özden, S. & Yücel, M. A. (2020). Kestanbol jeotermal akışkanının hidrokimyasının ve çevresel etkilerinin belirlenmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 63(1), 97–116. <https://doi.org/10.25288/tjb.604842>
- Marwan, M., Idroes, R., Yanis, M. & Idroes, G. M. (2021). A low-cost UAV based application for identify and mapping a geothermal feature in ie

- jue manifestation, Seulawah Volcano, Indonesia. *GEOMATE Journal*, 20(80), 135-142. <https://doi.org/10.21660/2021.80.j2044>
- Mertoğlu, O., Şimşek, S. & Başarır, N. (2021). Geothermal Energy Use: Projections and Country Update for Turkey. In *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*, (pp. 1–11). Reykjavik, Iceland.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, (2023a, 20 Temmuz). İllere ait mevsim normalleri, Çanakkale. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=CANAKKALE>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, (2023b, 20 Temmuz). İklim sınıflandırması Çanakkale. <https://mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx?m=CANAKKALE>
- Nex, F. & Romandino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6, 1–15.
- Nishar, A., Richards, S., Breen, D., Robertson, J. & Breen, B. (2016). Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei - Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand. *Renewable Energy*, 86, 1256–1264.
- Olafsson, J. M. (2018). *UAV geothermal mapping in Austurengjar* [Master of Science in Sustainable Energy Science]. Reykjavik University, Iceland.
- Özcan, O. (2017). İnsansız hava aracı (İHA) ile farklı yüksekliklerden üretilen sayısal yüzey modellerinin (SYM) doğruluk analizi. *Mühendislik ve Yer Bilimleri Dergisi*, 2(1), 1–7.
- Öztürk, E. & Erduran Nematlu, F. (2018). Kültürel peyzaj değerlerinin kentsel tasarımda kullanımı: Lapseki (Çanakkale) ilçesi örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 20(1), 14–25.
- Sarp, S., Burçak, M., Yıldırım, T. & Yıldırım, N. (1998). *Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları ile Balıkesir-Havran-Derman kaplıcasının detay jeotermal etüdü ve gradyan sondajları raporu* (Rapor No: 10537). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Sarp, S. & Duman, Ö. (2008). *Çanakkale-Lapseki-Kocabaşlar kaplıca sahası jeotermal enerji aramaları jeoloji ve jeofizik etüt raporu* (Rapor No: 11100). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Ankara. 42 s.
- Sedano-Cibrián, J., Pérez-Álvarez, R., de Luis-Ruiz, J. M., Pereda-García, R. & Salas-Menocal, B. R. (2022). Thermal water prospecting with UAV, low-cost sensors and GIS. application to the Case of La Hermida. *Sensors*, 22(18), Article 6756. <https://doi.org/10.3390/s22186756>
- Silvestri, M., Marotta, E., Buongiorno, M. F., Avvisati, G., Belviso, P., Sessa, E. B., Caputo, T., Longo, V., De Leo, V. & Teggi, S. (2020). Monitoring of surface temperature on Parco delle Biancane (Italian geothermal area) using optical satellite data, UAV and field campaigns. *Remote Sensing*, 12(12), Article 2018. <https://doi.org/10.3390/rs12122018>
- Siyako, M., Bürkan, K. A. & Okay, A. İ. (1989). Biga ve Gelibolu Yarımadalarının Tersiyer jeolojisi ve hidrokarbon olanakları. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 1(3), 183–199.
- Snavely, N., Seitz, S. M. & Szeliski, R. (2006). Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3), 835–846.
- Şanlıyüksel, D. & Baba, A. (2011). Hydrogeochemical and isotopic composition of a low-temperature geothermal source in Northwest Turkey: case study of Kirkgeçit geothermal area. *Environmental Earth Sciences*, 62(3), 529–540. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0545-z>
- Şanlıyüksel Yücel, D., Karaca, Z. & Yücel, M. A. (2013). *Determining hydrogeochemical characteristics of geothermal resources in Biga Peninsula (city of Canakkale), NW Turkey*. International Association of Hydrogeologists 40th International Congress, Perth, Avustralya, 261.
- Şanlıyüksel Yücel, D. & Yücel, M. A. (2017). Terk edilmiş kömür ocaklarında oluşan maden göllerinin hidrokimyasal özelliklerinin belirlenmesi ve insansız hava aracı ile üç boyutlu modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 780–791. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.37431>
- Şanlıyüksel Yücel, D., Özden, S. & Marmara, H. (2021). Hydrochemical and isotopic monitoring of the Kestanbol geothermal field, Turkey and its relationship with seismic activity. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30, 1112–1133. <https://doi.org/10.3906/yer-2105-15>

- Şener, E. (2019). İnsansız hava araçları kullanılarak Süleyman Demirel Üniversitesi Yerleşkesinin yüksek çözünürlüklü ortofoto haritasının hazırlanması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 393–402. <https://doi.org/10.21923/jesd.511561>
- Şener, M. F., Baba, A., Uzelli T., Akkuş, İ. & Mertoğlu, O. (2022). *Türkiye Jeotermal Kaynaklar Strateji Raporu*. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 119 s.
- Taşkıran, L. (2023). Jeotermal enerji alanında yapılan çalışmalar, jeotermal enerji kullanımı, potansiyelimiz ve yeni hedefler. *GT'2023 Türkiye Jeotermal Kongresi Bildiriler Kitabı*, (s.11-23). Ankara.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2022, 17 Ağustos). Yenilenebilir enerji, kaynaklar, jeotermal. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal>
- Tombul, M. (2015). *Çanakkale kültür envanteri, arkeolojik yerleşim alanları ve sanat tarihi yapıları*. T.C. Çanakkale Valiliği, Ege Yayınları, 653 s.
- Tut Haklıdır, F. S. (2017). Batı Anadolu'da yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde gözlenen kabuklaşma türleri ve kabuklaşma oluşumunun kontrolünün sağlanmasında kullanılan sistemler; Kızıldere-II (Denizli) jeotermal güç santrali örneği. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60(3), 363–382. <https://doi.org/10.25288/tjb.325384>
- Ullman, S. (1979). The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London Series B. Biological Sciences*, 203(1153), 405–426.
- Ulusoy, İ., Şen, E., Tuncer, A., Sönmez, H. & Bayhan, H. (2017). 3D multi-view stereo modelling of an open mine pit using a lightweight UAV. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60(2), 223–242. <https://doi.org/10.25288/tjb.303032>
- Ulusoy, İ., Diker, C., Şen, E., Çubukcu, H. E. & Gümüş, E. (2022). Multisource and temporal thermal infrared remote sensing of Hasandağ Stratovolcano (Central Anatolia, Turkey). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 428, Article 107579. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107579>
- Ünal, O. T. (1967). *Trakya jeolojisi ve petrol imkanları* (Rapor no: 391), TPAO (yayımlanmamış).
- Vengosh, A., Helvacı, C. & Karamandere, İ. H. (2002). Geochemical constraints for the origin of thermal waters from western Turkey. *Applied Geochemistry*, 17, 163–183.
- Walter, T. R., Belousov, A., Belousova, M., Kotenko, T. & Auer, A. (2020). The 2019 eruption dynamics and morphology at Ebeko Volcano monitored by unoccupied aircraft systems (UAS) and field stations. *Remote Sensing*, 12, Article 1961. <https://doi.org/10.3390/rs12121961>
- Wang, H., Liu, H., Chen, D., Wu, H. & Jin, X. (2022). Thermal response of the fractured hot dry rocks with thermal-hydro-mechanical coupling effects. *Geothermics*, 104, Article 102464. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102464>
- Xiang, J., Cen, J., Sofia, G., Tian, Y. & Tarolli, P. (2018). Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. *Environmental Earth Sciences*, 77, Article 220. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7383-9>
- Xu, P., Zhang, Q., Qian, H., Li, M. & Hou, K. (2019). Characterization of geothermal water in the piedmont region of Qinling Mountains and Lantian-Bahe Group in Guanzhong Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 78, Article 442. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8418-6>
- Yalçın, T. (2007). Geochemical characterization of the Biga Peninsula thermal waters (NW Turkey). *Aquatic Geochemistry*, 13 (1), 75–93.
- Yalçın, T. & Sarp, S. (2012). *Biga Yarımadası termal sularının jeokimyasal ve jeotermal potansiyeli*. Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi. E. Yüzer ve G. Tunay (Eds.), MTA Özel Yayın Serisi, (s. 289–301). Ankara.
- Yalçın, C., Kurban Y. C., Gündoğdu, E. & Yücel M. A. (2021). Gelibolu Yarımadası savaş arkeojeofiziği çalışmaları: Şahindere Şehitliği ve Lone Pine Anıtı örnek bölgeleri. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 3, 408–422. <https://doi.org/10.28979/jarnas.909872>
- Yılmaz, D. & Yücel, M. A. (2020). Kuzey Troas Bölgesi arkeolojik yüzey araştırmasında İHA görüntüsü tabanlı mekânsal analizlerin kullanımı.

- V. Keleş (Ed.), *Propontis ve Çevre Kültürleri*, (s. 923–933). Zero to Three, İstanbul.
- Yücel, M. A. & Turan, R. Y. (2016). Areal change detection and 3D modeling of mine lakes using high-resolution unmanned aerial vehicle images. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(12), 4867–4878. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2182-7>
- Yücel, M. A., Şanlıyüksel Yücel, D., Yalçiner, C. Ç. & Yılmaz, D. (2018). 3D modelling of historical remains using unmanned aerial vehicle, a case study: Gallipoli Peninsula. *XXVIII International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields*, (pp.101–107). Sofya, Bulgaristan.
- Yücel, M. A. & Yılmaz, D. (2019). Çanakkale ili insansız hava aracı destekli yüzey araştırması. *Anadolu Araştırmaları*, 22, 107–128. <https://doi.org/10.26650/anar.2019.22.633114>
- Yücel, M. A. & Şanlıyüksel Yücel, D. (2023). UAV-based RGB and TIR imaging for geothermal monitoring: a case study at Kestanbol geothermal field, Northwestern Turkey. *Environmetal Monitoring and Assessment*, 195. Article 541. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11182-0>
- Zeybek, M. & Şanlıoğlu, İ. (2019). Topoğrafik yüzey değişimlerinin görüntü işleme teknikleriyle belirlenmesi üzerine bir araştırma. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(2), 350–367. <https://doi.org/10.21324/dacd.531719>
- Zuffi, C., Manfrida, G., Asdrubali, F. & Talluri, L. (2022). Life cycle assessment of geothermal power plants: A comparison with other energy conversion technologies. *Geothermics*, 104, Article 102434. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102434>