



Yerbilimleri, 2020, 41 (3), 247-297, DOI:10.17824/yerbilimleri.814748  
Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni  
Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

## Termal kızılötesi uydu görüntülerinden yüzey sıcaklığı ve ısı akısı hesapları: Türkiye'deki, yakın çevresindeki ve Dünya'daki volkanlardan örnekler

*Surface temperature and heat flux calculations using thermal infrared satellite  
imagery: Volcanoes in Turkey, its close proximity and worldwide examples*

İNAN ULUSOY <sup>1</sup>, CANER DİKER <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hacettepe Üniversitesi, Beytepe Kampüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800, Çankaya / Ankara, Türkiye

Geliş (received): 22 Ekim (October) 2020 Kabul (accepted) : 6 Aralık (December) 2020

### ÖZ

Yeryüzünde jeotermal girdiye bağlı sıcaklık anomalileri, fümeroller, buhar bacaları, bacaların etrafında alterasyon mineralizasyonları, buhar/gaz emisyonu ve yerin sıcak olduğu alanların varlığı ile belirgin hale gelir. Termal kızılötesi (TIR) uydu görüntüleri yeryüzünün ısı durumunu incelemeye ve gözlemlemeye olanak vermektedir. Kızılötesi tayftaki uydu görüntülerinden geniş alanlar için hassas 'yüzey sıcaklığı' hesaplamaları yapmak olanaklıdır. Yüzey sıcaklığı görüntüleri özellikle dağlık bölgelerde tek başına yorumlaması zor görüntülerdir. Öyle ki, gece çekilmiş termal uydu görüntüleri dahi gündüzden artakalan güneş ısını gece geç saatlere kadar kaydedebilir. Dolayısıyla TIR görüntüler topoğrafik düzeltme yapılarak kullanılmalıdır. Topoğrafik düzeltme sonucunda elde edilen görüntüler 'yüzey sıcaklığı anomalisi' görüntüleridir. Yüksek irtifa atmosferik sıcaklık verisi ile birlikte TIR uydu görüntülerinden 'ışyan bağlı ısı akısı' hesaplamak mümkündür. Yüzey sıcaklığı anomalisi görüntüleriyle birlikte ışyan bağlı ısı akısı görüntüleri ısı analizlerde ve jeotermal haritalamalarda oldukça kullanışlı görüntülerdir.



İnan ULUSOY inan@hacettepe.edu.tr

İNAN ULUSOY ORCID 0000-0002-6343-9921  
CANER DİKER ORCID 0000-0002-9733-0633

Anadolu'dan, yakın çevresinden ve Dünya'dan örneklerle volkanlarda yüzey sıcaklığı anomalisi ve ışıyan bağlı ısı akısının ne gibi sonuçlar verdiğini ve farklı şiddetteki ısı volkanik faaliyetin bu sonuçları ne ölçekte çeşitlendirdiğini irdeledik. Gerekli düzeltmeler ve işlemlerden sonra, TIR görüntülerinden hesaplanan yüzey sıcaklığı ile gerçek yeryüzü sıcaklığına dair kestirimde bulunmak mümkündür.

**Anahtar Kelimeler:** Termal anomali, TIR, ASTER, ısı akısı, Anadolu, Türkiye.

## **ABSTRACT**

*Thermal anomalies on the ground surface related with the geothermal input become evident with fumaroles, vapour vents, alteration mineralizations around these vents, vapour/gas emissions and hot grounds. Thermal infrared (TIR) satellite imagery allows investigation and monitoring of the thermal state of the earth surface. It is possible to make precise 'surface temperature' calculations for large areas using satellite imagery recording the thermal spectrum. Surface temperature imagery is hard to interpret solely, especially in mountainous areas. Even, thermal imagery acquired during nighttime can preserve relict solar heat till late hours after the sunset. Consequently, the TIR satellite images should be used with topographic correction. Imagery derived after topographic correction is called as 'surface temperature anomaly' images. With the contribution of upper-air temperature data, it is possible to calculate 'relative radiant heat flux' using TIR satellite images. Together with surface temperature anomaly images, relative radiative heat flux images are very powerful images for thermal analysis and geothermal mapping. Results of surface temperature anomaly and relative radiative heat flux calculations for worldwide examples, volcanoes from Anatolia and close proximity and the variety of the results depending on the intensity of the volcanic activity have been explicated. After necessary corrections and processes, surface temperature derived from TIR imagery may be used to estimate the real surface temperature.*

**Keywords:** Thermal anomaly, TIR, ASTER, heat flux, Anatolia, Turkey.

## GİRİŞ

Tüm maddeler gündüz ve gece boyunca Termal Kızılötesi (TIR) dalga boylarında (3 – 15  $\mu\text{m}$ ) enerji yayarlar; termal ışımanın gece, uydu (veya hava) görüntüleri ile kaydedilmesi, önemli keşif imkânları sunar (Sabins, 1997). 1950'li yıllarda askeri amaçlı araştırmalar ve yatırımlar ile başlayan termal görüntüleme (Sabins, 1997), jeotermal enerjiyi nicel tespit potansiyeli ile önemli bir jeofiziksel veri sunar. Termal görüntü alan uzaktan algılama uyduları genellikle 10,5 – 12,5  $\mu\text{m}$  arasındaki kızılötesi dalga boyunu kaydeder. Günümüzde termal aralıkta, çeşitli zamansal ve mekânsal çözünürlükte görüntü sunan uydu ve cihazlar bulunmaktadır (ör. ASTER, MODIS, Landsat, Sentinel). Termal görüntüler, mineralojik haritalamada, gaz ve gaz bulutu konsantrasyonu çalışmalarında, buharlaşma hesaplarında, zirai çalışmalarda, kent ısı-adası haritalama ve iklim çalışmalarında tutarlı ve sürekli veri sunmaktadır. Yeryüzü sıcaklığının nicel tespit potansiyeli, termal uydu görüntülerini volkanolojik, jeotermal ve nemlilik ile ilgili uzaktan algılama çalışmalarında vazgeçilmez bir veri seti haline getirmektedir.

Volkanik bacaların etrafındaki fümeroller ve sıcak/nemli yeryüzü, aktif volkanik ve hidrotermal sistemlerin düşük dereceli belirteçleridir. Yeraltındaki magmatik sistem ile fiziksel bir bağlantı olan baca sıcaklıkları, magmatik sisteme dair nicel çıkarımlar yapabilmemize izin verir ve magma derinliği, hacmi, kütle akısı veya enerji bütçesi gibi sisteme dair hesaplamalar yapabilmemize olanak verir (Harris ve Stevenson, 1997). Termal uzaktan algılama baca sıcaklıklarını yerel, havadan veya uydu üzerine yerleştirilmiş cihazlarla düzenli ve güvenli takip imkânı sağlar (Harris ve Stevenson, 1997). Bu temelde, farklı uydular üzerindeki kayıtçılarla kaydedilen TIR uydu görüntüleri jeotermal ve volkanik aktivitenin incelenmesinde (ör. Coolbaugh vd., 2007; Vaughan vd., 2008; van der Meer vd., 2014; Ramsey ve Flynn, 2020) ve volkanik bacalar etrafında ışıyan ısı akısının hesaplanmasında (ör. Gaonac'h vd., 1994; Harris ve Stevenson, 1997; Ganas vd., 2010; Vaughan vd., 2012; Ulusoy, 2016) kullanılabilecek önemli veri setleri sunmaktadır.

Türkiye’de termal uzaktan algılama ile ilgili çalışmalar bu tayf aralığının nicel jeofiziksel veri üretme potansiyelinin aksine çok sınırlıdır. Yer ve iklim bilimlerinin çeşitli alanlarında (ör. Yürür, 2006; Çelik ve Kalkan, 2012; Şener, 2016; Şekertekin, 2019; Akyürek, 2020) ve volkanoloji, jeotermal enerji alanında (ör. Ulusoy vd., 2008; Çapar, 2009; Ulusoy vd., 2012; Diker, 2014; Ulusoy, 2016; Erenoğlu vd., 2019) bu konuda çok az çalışma göze çarpmaktadır. Özellikle Türkçe kaynakçada metodolojik kavramların irdelendiği ve/veya uygulama niteliğindeki çalışmalar yok denecek kadar azdır. Nicel yeryüzü sıcaklığının, gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra tüm ülke çapında yüksek zamansal/uzamsal çözünürlükte ve doğrulukta hesaplanabileceği, uluslararası ücretsiz ve kolay erişimin olduğu geniş bir veri setinin kullanımını yaygınlaştırmanın önemli olduğunu düşünmekteyiz. Bu veri setlerinin doğru kullanımı, ülkemiz topraklarında yeryüzü sıcaklığının küresel ısınmayla birlikte nerede ve ne hızda ilerlediğini bize gösterebilir. Jeotermal alanların tespiti, volkanik sıcak noktaların takibi, deprem hareketliliği ile yeryüzü sıcaklığı ilişkisi TIR görüntüleri ile gözlemlenebilir.

Bu çalışmanın ilgi alanı, ana hedefin etrafında birkaç parçaya bölünmüş durumdadır. İlk hedef, metodolojik kavramın basit bir özetle iyi anlatılmasıdır. Termal Kızılötesi görüntü işleme ve analizlerinde dikkat edilmesi gereken ve ülkemizde uygulamada çok da dikkate alınmayan teorik esasların örneklenerek anlatımı, teorik arka plan hakkında araştırmacılara temel bir fikir vermeyi hedeflemektedir. İkinci hedef, Doğu Anadolu’da Holosen boyunca yayımlı/patlayıcı aktivite gerçekleştirmiş volkanların termal anomali ve ısı akısı görüntülerinin oluşturulmasıdır. Sonuçlar, bilinen ve ölçülen sıcak kaynaklarla karşılaştırılmıştır. Üçüncü hedef, Holosen’de aktiviteleri bilinen Anadolu’ya komşu aktif volkanların incelenmesi ve sonuçların daha önceki çalışmalarda uydu gözlemleri ile kıyaslanmasıdır. Son kısım, mevzubahis metodolojinin güncel olarak tüm Dünya’da devam etmekte olan çeşitli şiddetteki volkanik aktiviteye duyarlılığını nicelleme amacını gütmektedir.

İncelenen volkanların güncel termal durumlarını nicel olarak analiz edebilmek için ASTER cihazının görüntülediği Termal kızılötesi tayf kullanılmıştır. Yeryüzü sıcaklığını, yüzey sıcaklık anomalisini ve ışıyan bağıl ısı akısını hesaplayabilmek

için ASTER gece görüntüleri tercih edilmiştir. Uygulamada, termal görüntülerin atmosferik düzeltmesini takiben sıcaklık ve emisivite görüntüleri birbirinden ayrılmış ve daha sonra yeryüzü sıcaklığı ASTER'in 5 TIR bandı kullanılarak hesaplanmıştır. Yüzey sıcaklığı görüntülerine topoğrafik düzeltme uygulanmıştır. Işıyan bağıl ısı akısı, topoğrafik düzeltmesi yapılmış olan yüzey sıcaklığı anomali görüntüleri, emisivite, buhar basıncı ve yüksekliğe bağlı hava sıcaklığı verileri kullanılarak hesaplanmıştır.

## **TEMEL KAVRAMLAR VE TEORİK ARKA PLAN**

Termal uydu görüntüleri ile yapılan geniş alanlı ve detaylı yeryüzü sıcaklığı analizlerinde gözetilmesi gereken birtakım temel kavramlardan söz etmek mümkündür. Bu temel kavramlar teorik arka planın iyi bilinemediği durumlarda yanlış jeolojik/termal yorumlara yol açabileceği gibi, iyi bilindiği takdirde de görüntü yorumlamada bir avantaj olarak kullanılabilir niteliktedir. Termal uzaktan algılamada doğrudan belirleyici nitelikteki bu temel kavramlardan en önemli üçü topoğrafik etki, termal çaprazlanma ve emisivitedir. Takip eden kısımda bu ana etkenler ayrı ayrı maddeler halinde detaylandırılmıştır. Bunlara ek olarak termal görüntülere termal terslenme (ör., Eneva ve Coolbaugh, 2009) ve göl-etkisi (ör., Niziol, 1987) gibi meteorolojik kaynaklı tali etkiler de tesir edilebilir.

### **Topoğrafik Etki**

Termal uydu görüntülerini etkileyen temel faktörlerden biri topoğrafik etkidir. Topoğrafik etki üç bileşenden oluşur. Bunlar, yükseklik etkisi, bakı etkisi ve eğim etkisidir (Watson, 1975; Minnaert, 1941; Smith vd., 1980; Teillet vd., 1982; Mayer vd., 1993; Florinsky vd., 1994; bakı ve eğim etkileri bir arada, aydınlanma etkisi olarak da isimlendirilmektedir). Bu etkilerden birincisi, yükseklik gradyanı (lapse-rate), bilindik bir olgudur; troposferde yükseklik arttıkça hava sıcaklığı lineer bir

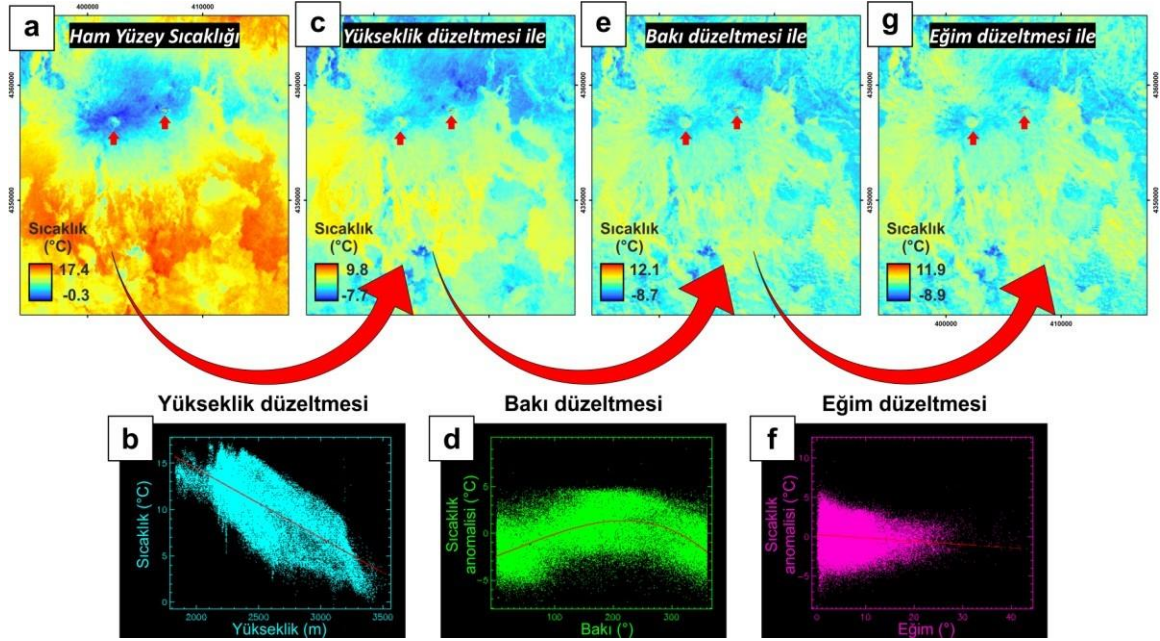
şekilde azalır. Bu lineer azalmanın tipik ortalama miktarı  $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$  civarında gözlenir (Warner ve Chen, 2001; Eneva ve Coolbaugh, 2009); değer, bölgeden bölgeye, mevsimden mevsime ve iklimden iklime ufak değişiklikler gösterebilir. Atmosferik yükseklik etkisi, yeryüzü sıcaklığını da önemli ölçüde etkileyen bir etkendir ve yeryüzü sıcaklığı da atmosferik yükseklik etkisi değerlerine paralel şekilde azalır. Görüntüyü etkileyen ikinci büyük topoğrafik etki bakı etkisidir. Güneşin doğrudan baktığı yamaçlar, güneş görmeyen yamaçlara göre daha fazla ısınacaktır. Diğer bir topoğrafik etki de eğim etkisidir. Güneş ışınlarının geliş açısına dik eğimi yeryüzü parçaları daha fazla ısınırken, güneş ışınlarının geliş açısına eğik bakan yeryüzü parçaları nispeten daha az ısınır. Buna karşın eğime bağlı sıcaklık farkının gece gündüz arasında değişiklik gösterebileceği bilinmelidir.

Gündüz çekilen termal görüntülerde topoğrafik etki oldukça belirgindir ve dolayısıyla düzeltilmesi zaruridir. Gündüz görüntülerinde topoğrafik etkiyi düzeltmek amacıyla geliştirilmiş çok sayıda yöntem vardır. Bunlardan en bilinenleri kosinüs düzeltmesi (Smith vd., 1980; Teillet vd., 1982) ve kosinüsdüzeltilmesi temelli diğer düzeltme yöntemleridir (yani Minaert düzeltmesi, c- düzeltmesi ve piksel temelli c-düzeltilmesi; Minnaert, 1941; Smith vd., 1980; Holben ve Justice, 1980; Teillet vd., 1982). Gündüz termal uydu görüntüsünün çekildiği tarih ve saat bilindiği için güneşin gökyüzündeki konumu da bilinmektedir. Bu bilgiye ek olarak topoğrafik yükseklik, bakı ve eğimin bilindiği durumda, yani örneğin bir sayısal yükseklik modeli mevcutsa, aydınlanma etkisi basit bir eşitlik ile gündüz termal görüntüsünden silinebilir. Lakin bu tip düzeltmelerin bazılarının dezavantaj olarak tanımlanabilecek sonuçları olduğu da bilinmektedir; örneğin kosinüs düzeltmesinin aşırı düzeltme yaptığı bilinmektedir (Mayer vd., 1993; Nichol vd., 2006). Örneğin, düzeltme yönteminin güneş görmekte olan güneybatı yamaçları düzeltirken zıt (kuzeydoğu) yamaçlarda gözlenen sıcaklık değerlerini fazladan artırdığı bilinmektedir.

Gece çekilen termal görüntülerde güneşin kayaçlar üzerindeki artık ısısının korunmaya devam ettiği (Elachi, 1987; Watson, 1973; Coolbaugh vd., 2007), hatta bu etkinin bir sonraki gün doğumuna kadar sürebileceği bilinmektedir (Coolbaugh vd., 2007). Gece görüntülerinde belirli bir güneş ışını açısından söz edilemeyeceğinden topoğrafik düzeltme için klasik yöntemlerden farklı düzeltmelere ihtiyaç vardır (Coolbaugh vd., 2007; Ulusoy vd., 2012). Ulusoy vd.

(2012) bu amaçla hem gece hem de gündüz TIR görüntülerinde kullanılabilecek bir normalizasyon yöntemi önermektedir. Üç aşamalı bir regresyon metodu ile yükseklik, bakı ve eğim etkilerini normalize eden STcorr kodu (Ulusoy vd., 2012) gece TIR görüntülerindeki topoğrafik imzayı yok eder (van der Meer, 2014; Pavlidou vd., 2016; Ulusoy, 2016; Lemma, 2019; Hewson vd., 2020).

Gece uydu görüntüsünden yüzey sıcaklığı hesaplandıktan sonra, elde edilen sıcaklık görüntüsünde en belirgin etki topoğrafik etkidir. Şekil 1a'da Tendürek Dağı'nın gece termal uydu görüntüsünden hesaplanmış yüzey sıcaklığı görüntüsü görülmektedir. Tipik olarak yükseklik arttıkça azalan yüzey sıcaklığı bu görüntüde en belirgin örgüdür (Şekil 1a'da kırmızı oklar volkanın zirvesindeki iki zirve kraterini işaret etmektedir). Ulusoy vd. (2012)'un üç aşamalı regresyon çözümlemesi ilk aşamada yüksekliğe karşı bir sıcaklık grafiği (Şekil 1b) oluşturularak en iyi çakışma doğrusu ile görüntü üzerinde bir regresyon işlemi gerçekleştirilerek yükseklik etkisini normalize eder. Üretilen yükseklik etkisi düzeltilmiş görüntü (Şekil 1c) kuzey yarımkürede tipik olarak güney ve güneybatı yamaçların kuzey ve kuzeybatı yamaçlara göre görünür oranda (Şekil 1d: bu görüntü için değer yaklaşık +3 °C civarındadır) daha sıcak gözleneceği bir görüntüdür. Bunun nedeni gün boyu güneş görmüş olan güney ve batı yamaçlardaki kayaçların daha fazla ısınmış olmasıdır. Bu görüntü, bakıya göre oluşturulan ikinci bir grafik (Şekil 1d) üzerinden 2. veya 3. dereceden polinomal bir en iyi çakışma eğrisi ile yine bir regresyon işlemi uygulanarak çözülür (Şekil 1e). Bakı düzeltmesi yapılmış görüntüde artakalan tek topoğrafik etki eğim etkisidir. Eğim yine 1. dereceden bir polinom ile regresyon kullanılarak düzeltilir (Şekil 1f,g). Üç topoğrafik etkinin de düzeltildiği bu son görüntü (Şekil 1g) Yüzey Sıcaklığı Anomalisi ( $\Theta$ ) olarak isimlendirilir ve kilit görüntülerden biridir.  $\Theta$  görüntüsü topoğrafik etkinden arındırılmış, düşük dereceli termal anomalilerin görünürlüğünün arttığı, termal uzaktan algılama için kullanışlı bir görüntü türüdür.



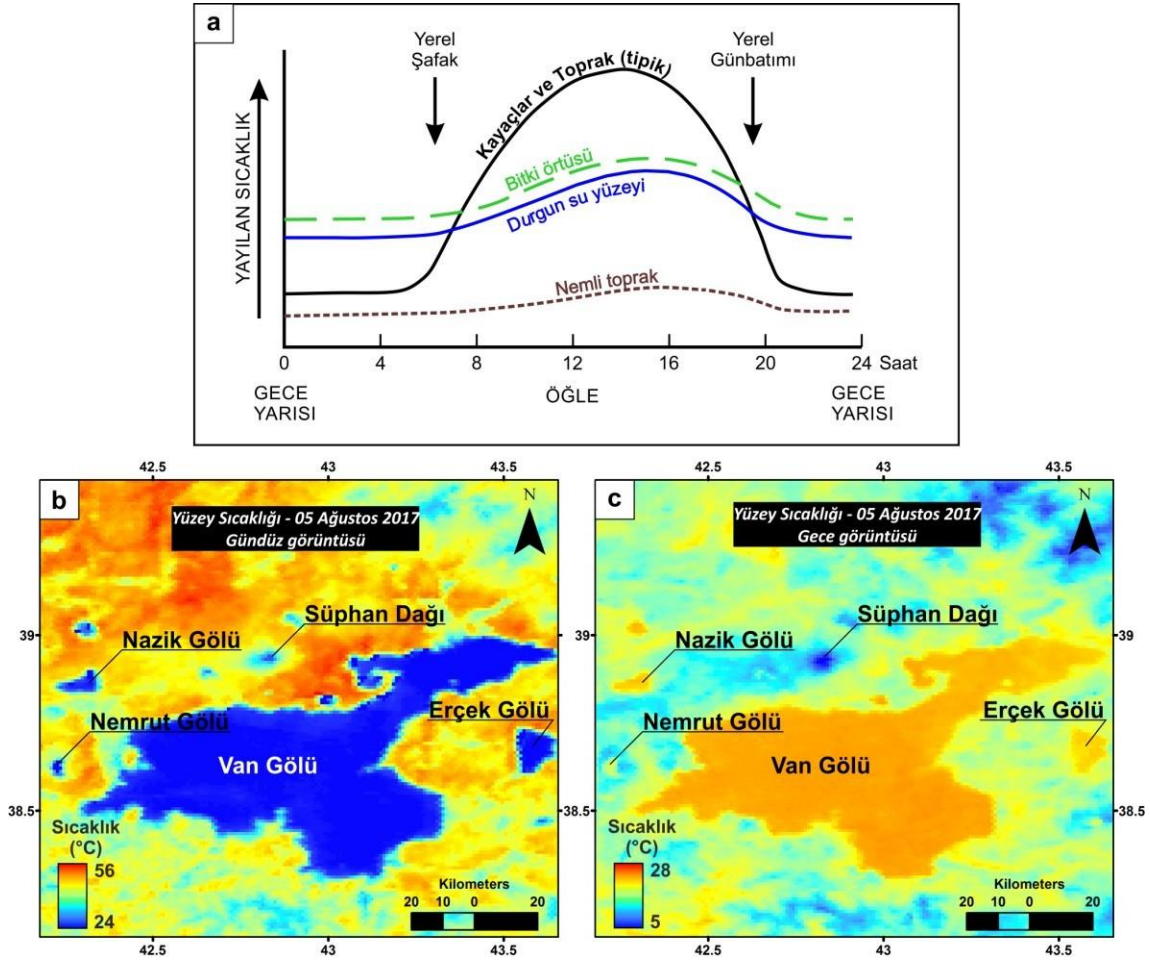
Şekil 1. Gece uydu görüntülerinde topoğrafik etki ve üç aşamalı regresyonla düzeltilmesi. a) Tendürek volkanı gece termal görüntüsünden hesaplanan 'yüzey sıcaklığı', b) Yükseklik etkisinin düzeltilmesinde kullanılan regresyon grafiği ve en iyi çakışma doğrusu, c) Yükseklik etkisi düzeltilmiş görüntü, d) Bakı etkisinin düzeltilmesinde kullanılan regresyon grafiği ve 3. dereceden en iyi çakışma polinom eğrisi, e) Bakı etkisi düzeltilmiş görüntü, f) Eğim etkisinin düzeltilmesinde kullanılan regresyon grafiği ve doğrusu ve son olarak, g) Eğim etkisi de düzeltilmiş 'yüzey sıcaklığı anomalisi' görüntüsü.

Figure 1. Topographic effect in nighttime satellite images and its correction with three stage regression. a) 'Surface Temperature' calculated from nighttime thermal image of Tendürek volcano, b) Regression graph and best-fit line used for the correction of the altitude effect, c) Altitude corrected image, d) Regression graph and 3rd degree best-fit polynomial curve used for the correction of the aspect effect, e) Aspect corrected image, f) Regression graph and best-fit line used for the correction of the slope effect and finally, g) slope corrected 'Surface Temperature Anomaly' image.

## Termal Çaprazlanma ve Termal Görüntülerde Gündüz-Gece Farkı

Her maddenin ve yeryüzündeki her kayacın ısı kaybı ve kazanımı hızı termal kapasitesine ve termal eylemsizliğine (inertia – ısınabilme ve soğuyabilme kabiliyeti) bağlıdır. Yeryüzündeki farklı unsurların termal ısı kaybı ve kazanımı bir gün içerisinde farklı termal kapasiteleri ve eylemsizliği nedeniyle değişiklikler gösterir (Şekil 2a). Bu unsurlardaki en hızlı sıcaklık değişimleri Şekil 2a'deki eğimlerin dikleştiği yerden de anlaşılacağı gibi gün doğumu ve gün batımı zamanlarıdır (Sabins, 1997). Termal çaprazlanma (thermal crossover; Şekil 2a)





Şekil 2. Termal çaprazlanma kavramı ve termal görüntülerde gündüz-gece farkı. a) Farklı yer unsurlarının termal görüntülerde 24 saat içindeki davranışı ve termal çaprazlanma (Sabins, 1997'den Türkçeleştirilerek). Van gölü ve çevresinin 5 Ağustos 2017 tarihli b) gündüz ve c) gece termal uydu (MODIS) görüntülerinde termal çaprazlanmanın etkisi.

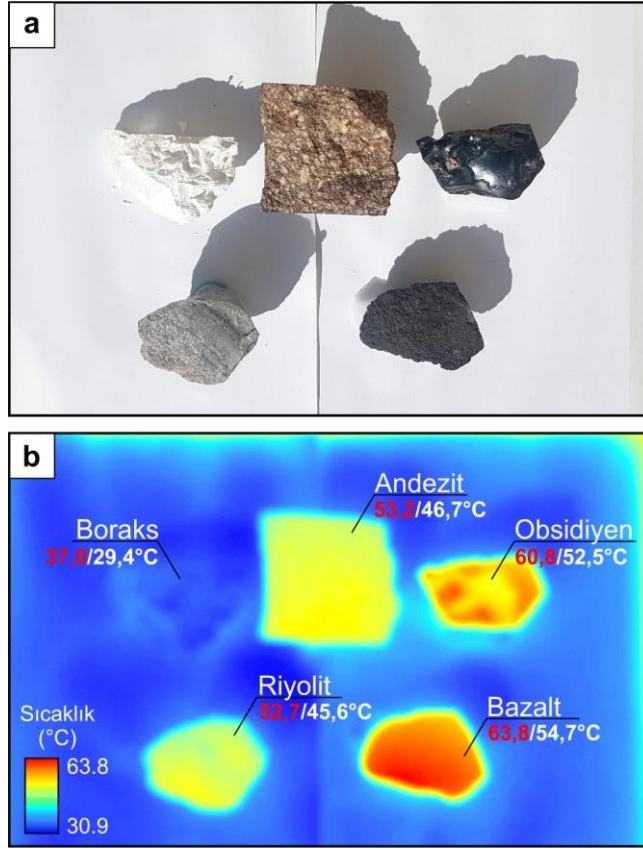
Figure 2. Thermal crossover concept and the difference in nighttime-daytime thermal imagery. a) Response of different surface features in thermal images within 24 hours and thermal crossover (from Sabins, 1997). Effect of thermal crossover in 05 August 2017 dated b) daytime and c) nighttime thermal satellite (MODIS) imagery of Lake Van and its surroundings.

günde iki kere tekrarlanan, bir termal görüntüde iki farklı maddenin kızılıtesi parlaklık değerlerinin birbirinden ayırdedilemediği durumu ifade eden doğal bir olgudur (Sabins, 1997; Retief vd., 2003). Bu kavram askeri, tıbbi ve uzaktan algılama amaçlı termal gözlemede de önem arz eder (Retief vd., 2003; Zhao vd., 2017). Yerbilimlerinde, uzaktan algılama çalışmalarında termal çaprazlanma kavramı analiz ve yorumu doğrudan etkiler. Gündüz termal görüntülerinde kayaçlar ve toprak tipik olarak bitki örtüsünden, su kütlelerinden ve nemli topraktan daha sıcaktır (Şekil 2a). Gündüz-gece geçişlerinde bir termal çaprazlanma sonrasında

bu durum tersine döner. Gece termal görüntülerinde ise durgun su ve bitki örtüsü kayalardan daha sıcak ışıma yapar (Sabins, 1997; Şekil2a). Bunun sonucu olarak gündüz görüntülerinde kayalardan ve yeryüzünden soğuk ışıma yapan durgun su kütleleri ve bitki örtüsü, gece görüntülerinde yeryüzü ve kayalardan daha sıcak görünmeye başlar. Şekil 2b'de Van Gölü ve çevresini gösteren 5 Ağustos 2017 tarihli MODIS gündüz termal uydu görüntüsü, Şekil 2c'de aynı alanın aynı tarihli MODIS gece termal uydu görüntüsü görülmektedir. Gündüz yüzey sıcaklığı görüntüsünde Van Gölü ve çevresindeki göllerin kendilerini çevreleyen yeryüzüne göre daha soğuk olduğu, gece yüzey sıcaklığı görüntülerinde ise bu durumun tersine döndüğü görülebilmektedir. Dolayısıyla termal görüntülerin jeotermal yorumlanmasında suyun, su buharının ve bitki örtüsünün gece görüntülerinde ışıma değerlerinin yüksek olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle jeotermal sinyalin içinde su buharının varlığı göz ardı edilmemelidir.

### **Kara Cisim Işıması, Emisivite ve Yüzey Sıcaklığının Hesaplanması**

Hava sıcaklığı dediğimiz kavramın ölçümü geleneksel olarak ısı akımlarından yalıtılmış, altı açık bir kutu içinde hava ile doğrudan temasla, yerden yaklaşık 1.5 – 2 metre yükseklikte ölçülür (ör. Erell vd. 2005). Uzaktan algılamada kullanılan sıcaklık ölçümü ise uydu veya hava araçlarındaki sensörler ile ölçülen radyometrik sıcaklıktır. Prevost (1791) ve takip eden çalışmalarla biliyoruz ki, mutlak 0'dan (0 Kelvin) yüksek sıcaklığa sahip tüm nesnelere elektromanyetik ışıma şeklinde enerji yayılır ve salınan enerjinin miktarı nesnenin özelliklerine bağlıdır. Bir nesneye çarpan radyatif enerjinin (genellikle) bir kısmı yansır, bir kısmı soğurur ve bir kısmı da nesneden geçer. Tüm nesnelere olduğu gibi kayalar içerisinde de siyah/koyu renkli olanlar geniş bir dalga boyu aralığındaki ışığı soğurur ve üzerine düşen geniş bir dalga boyu aralığındaki ışığın çoğunluğunu yansıtan beyaz/açık renkli bir kayaya göre daha fazla ısınır (Şekil 3). Tendürek Volkanı'nın gece yüzey sıcaklığı görüntüsünde de gözlenebileceği gibi (Şekil 1) bazaltik kayalar renkleri



Şekil 3. Farklı renkteki kayaçların/mineralin aynı ışık koşulları altında ısındıktan sonra yaydıkları enerjinin termal tayfta kaydı. Basit bir deneyle, farklı renklerdeki kayaçları ve bir minerali, bir yaz günü yaklaşık 4 saat güneş ışınlarına maruz bıraktıktan sonra, saat 14:30'da a) görünür ve b) termal görüntüleri alınmıştır. Kayaç/mineral isminin altında kırmızı rakamlar ile ilgili kayacın yüzeyinde gözlenen maksimum sıcaklık ve beyaz rakamlar ile de yüzeyin ortalama sıcaklığı verilmiştir.

Figure 3. After heated under the same solar conditions, registration of the emitted energy from different colored rocks/mineral on thermal spectrum. With a simple experiment, different colored rocks and a mineral was exposed to 4 hours of sun light, and then, at 14:30 their a) visible and b) thermal imagery were acquired. Under the name of the rock/mineral, with red color, maximum temperature and with white color, the average temperature on the specimen surface were indicated.

nedeniyle gün boyu daha fazla ısınmıştır. Kayaçların ışığı yansıtabilme özellikleri, nemlilikleri de bu durumu doğal olarak etkiler. Isı iletkenlikleri ve termal kapasiteleri ısı kaybını veya korunmasını etkileyen faktörlerdir.

Bu aşamada kara cisim ışıması (blackbody radiation) kavramı devreye girer. Kara cisim, tüm dalga boylarında mükemmel soğurgan ve mükemmel yayıcı olarak tanımlayabileceğimiz hipotetik bir nesnedir. Teorik veya model bir kütle olan kara cisim, üzerine düşen tüm ışımayı soğurur, geçirgen değildir ve yansıtmaz (Sabins,

1997). Buna karşın doğadaki gerçek yüzeyler kara cisim gibi davranmazlar. Aynı sıcaklıkta, bir kara cisme kıyasla gerçek bir yüzeyden yayılan ışımının oranı emisivite olarak isimlendirilir (EUMeTrain, 2017). Dolayısıyla, emisivite  $\epsilon$ :

$$C = \frac{F}{F_b} \quad (1)$$

eşitliğiyle tanımlanır, burada F: nesneden ışıyan akı,  $F_b$ 'de kara cisimden ışıyan akı'dır (Sabins, 1997). Örneğin, bilinen emisivitesi 0.96 olan bir yüzey (bu değere yakın bir emisivite değeri için bazalt örnek verilebilir) aynı sıcaklıktaki bir kara cisme göre %4 daha az ışıma yayar (EUMeTrain, 2017). Kirchhoff kanunu ile başlayan bu tanımlamayı takiben, Stefan-Boltzmann kanunu, birim alan başına birkara cismin yaydığı enerjinin, kara cismin sıcaklığının artmasıyla arttığını söyler:

$$F_b = a * T_{kin}^4 \quad (2)$$

burada  $\alpha$ , Stefan-Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır (Sabins, 1997). Son olarak Wien yasası yayılan ışımının dalga boyu ile nesnenin sıcaklığı arasındaki ilişkiyi tanımlar. Buna göre, bir nesnenin sıcaklığı arttıkça maksimum yayılımın dalga boyu artar:

$$\lambda_{max} = \frac{2897^{*}K}{T_{rad}} \quad (3)$$

Burada,  $T_{rad}$  Kelvin cinsinden ışıyan sıcaklık,  $2897^{*}K$ 'de fiziksel bir sabittir (Sabins, 1997). Plank eşitliği, eşitlik (1) ile beraber çözülrse, emisivite ve sensörde ölçülen ışıma ( $F_{rad}$ ) ile (bilinen ışıma sabitleri  $C_1$  ve  $C_2$  kullanılarak) yüzey sıcaklığı hesaplanabilir:

$$F_{rad} = C \frac{C_1}{5\pi(e^{C_2/T-1})} \quad (4)$$

Bu noktadan itibaren yüzey sıcaklığı hesaplamalarındaki kısıt, sıcaklık ile emisiviteyi aralarındaki doğrusal olmayan ilişkiden ötürü ayırmakta yaşanan

zorluktur (Rolim vd., 2016). Uydu görüntülerinden sıcaklığı hesaplayabilmek için üç ana yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi tek kanallı (tek bantlı) yöntem, ikincisi çok kanallı yöntem ve üçüncüsü de çok açılı yöntemlerdir. Tek kanallı yöntem ile yüzey sıcaklığı hesaplamak kolaydır fakat emisivitenin önceden bilinmesi gereklidir ki bu her piksel için pek mümkün değildir. Bu tek bantlı çözümlenmeleri geliştirmeye ve test etmeye yönelik çalışmalar da mevcuttur (ör., Käfer vd., 2020; Çelik ve Kalkan, 2012). Lakin tek bantlı çözümlenmelerde bu geliştirme işlemine çoğu zaman ihtiyaç vardır; çünkü sıcaklığı hesaplamada kullanılan tek bant ya çok geniş aralıklı bir tayfı kaydeder ve/veya baskın bir jeolojik etmeden (örneğin özellikle termal kızılötesi aralığı için silisyum) ya da daha doğru bir deyişle emisiviteden etkilenir.

Çok kanallı yöntemler temel olarak sıcaklık ve emisiviteyi birbirinden ayırmak için farklı algoritmalar kullanılmaktadır (ör. Watson, 1992; Kahle vd., 1980; Becker ve Li, 1995; Gillespie, 1985; Gillespie vd., 1998; Green ve Craig, 1985; Hook vd., 1992; Matsunaga, 1994; Barducci ve Pippi, 1996). Bu sıcaklık ve emisivite ayırma algoritmaları arasında Emisivite Normalizasyonu yöntemi (Gillespie, 1985; Gillespie vd., 1998) düşük hata payı nedeniyle tercih edilebilen bir yöntemdir; emisivite değerlerinin büyük değişimler gösterdiği alanlarda bu yöntemin de veriminin düştüğü akılda tutulmalıdır (Rolim vd., 2016).

## **ÇALIŞMADA KULLANILAN METODOLOJİ**

Kullanılan metodolojinin ana iş-aşısı, termal uydu görüntülerinden yüzey sıcaklığı (YS), yüzey sıcaklığı anomalisi ( $\theta$ ) ve ışıyan bağıl ısı akısının ( $Q_{rel}$ ) hesaplanmasını hedeflemektedir (Şekil 4). Doğal olarak bu hesaplamalar öncesinde, ham veri belli bir noktaya kadar ön hazırlık işlemlerinden geçmelidir.



Çalışmamızda, 5 termal bant kullanılarak sıcaklık ve emisivite birbirinden emisivite normalizasyonu yöntemi (Hook vd., 1992; Kealy ve Hook, 1993; Gillespie vd., 1998) kullanılarak ayrılmıştır. Kelvin cinsinden elde edilen bu veri yüzey sıcaklığı verisidir ve Celsius dereceye çevrilerek kullanılmıştır(Şekil 4).

### **Yüzey Sıcaklığı Anomalisi, Anomali Farkı ve Bağlı Isı Akısı Hesabı**

Beş bandın emisivite normalizasyonu ile elde edilen yüzey sıcaklığı (YS) görüntüsü, sıradaki işlemler için ana girdidir. Yüzey sıcaklığı anomalisi ( $\theta$ ) görüntüsü türetebilmek için gereken işlem topoğrafik düzeltmedir (Şekil 1 ve 4). STcorr kodu ile yapılan topoğrafik düzeltme işlemi için sayısal yükseklik modeline (SYM) ihtiyaç vardır; bu amaçla incelenen her volkanik alanın ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model; ASTER GDEM Validation Team, 2011) SYM'si kullanılmıştır. TIR görüldü bandı ile uyumu açısından yükseklik verisi 90 metre grid çözünürlüğüne indirilmiş, aydınlanma (illumination) düzeltilmesi için kullanılan bakı ve eğim görüntüleri bu SYM'lerden oluşturulmuştur.

Üretilen veri seti Yüzey sıcaklığı anomalisi ( $\theta$ ) görüntüsüdür. Bir sonraki aşama, yüzey sıcaklığı anomali farkı ( $\Delta\theta$ ) görüntüsü oluşturma aşamasıdır (Şekil 4). Bu amaçla, bir merkez piksel ve onu çevreleyen 8 piksel arasındaki ısı farkı hesaplanır ve maksimum ısı farkı merkez pikselin yeni değeri olarak atanır (Ulusoy vd., 2013). Bu işlem  $\theta$  görüntüsünün tüm pikselleri için yapılır, böylece  $\Delta\theta$  görüntüsü oluşturulur.

Işıyan ısı akısı (radiant heat flux), birim zamanda belirli bir yüzeyden ışılan ısı enerjisinin oranıdır; vektörel büyüklüğü  $W/m^2$  cinsinden ölçülür. Arazide ısı akısı ölçmenin yöntemlerinden biri, belli bir alanı temsil eden farklı derinlikteki sıcaklık sensörleri ile ısıyı kaydetmek ve düşey ve yatay profilde birim zamandaki ısıyı ölçmektir. Uzaktan algılamada farklı derinlikteki ısı sensörler yerine komşu alanlar

kullanılır (ör. Gaonac'h vd., 1994; Ganas vd., 2010). Örneğin bir pikselin ısı anomalisi benzer yükseklikte, benzer atmosferik özelliklere sahip, termal aktivitenin olmadığı bir diğer piksele göre hesaplanarak akı bulunur. Işıyan bağılısı akısı terimi (relative radiative heat flux;  $Q_{rel}$ ), bir komşu alana göre ışıyan ısı akısını tanımlar.

Yüzey sıcaklığı anomali farkı, emisivite değerleri ve buhar basıncı kullanılarak ışıyan bağıl ısı akısı ( $Q_{rel}$ ), Stefan-Boltzmann eşitliklerinden türeyen şu iki formülle ile hesaplanır (Tetens, 1930; Haurwitz, 1945; Sekioka ve Yuhara, 1974; Harris ve Stevenson, 1997; Gaonac'h vd., 1994; Ganas vd., 2010; Ulusoy, 2016):

$$e = 6,11 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T_{Gava}}{237,7 + T_{Gava}}\right)} \quad (5)$$

$$O_{rel} = 4,614 s [0,52 + 0,065(e)^{0,5}] \Delta\theta \quad (6)$$

Burada,  $e$ , mbar cinsinden buhar basıncını;  $T_{hava}$  °C cinsinden hava sıcaklığını;  $\varepsilon$  spektral emisiviteyi ve  $\Delta\theta$  de anormal piksel ile çevresindeki pikseller arasındaki °C cinsinden yüzey sıcaklığı farkını ifade eder.

İncelenen tüm görüntüler için yüksek irtifa hava meteorolojik verisi Wyoming Üniversitesi, Atmosferik Bilimler Bölümü radyosonda arşivinden (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) temin edilmiştir. Hesaplamalar için, termal görüntünün çekildiği tarihte, ilgili volkanik alana en yakın meteoroloji istasyonunca kaydedilen meteorolojik veri kullanılmıştır (Çizelge 1). Meteorolojik veriden elde edilen düşey sıcaklık gradyanı (lapse-rate) ve SYM kullanılarak bir Hava sıcaklığı modeli oluşturulur (Şekil 4:  $T_{hava}$  görüntüsü).  $T_{hava}$ 'nın hesaplanması, eşitlik 5 kullanılarak buhar basıncı ( $e$ ) görüntüsünün hesaplanmasına olanak verir. Bu noktadan sonra  $e$ ,  $\Delta\theta$  ve  $\varepsilon$  artık eşitlik 6'da yerine konarak ışıyan bağıl ısı akısı hesaplanır. Tüm bu hesaplanan değerlerin piksel ölçeğinde değil, görüntü ölçeğinde yapılması ile atmosferik ve meteorolojik değişikliklerden bağımsız olduğu için oldukça kullanışlı olan  $Q_{rel}$  görüntüleri oluşturulabilir (Ulusoy, 2016).



Çizelge 1. Isı akısı hesaplanan her volkan için alınan ASTER görüntülerinin kayıt tarihi ve ışıyan bağıl ısı akısı için yüksek hava sonda verilerinin alındığı meteorolojik istasyonlar.

*Table 1. ASTER imagery acquisition date for every volcano that heat flux has been calculated and the meteorological station that provides the upper-air data for relative radiative heat flux calculation.*

<b>Volkan</b>	<b>Görüntü Tarihi</b>	<b>Meteoroloji istasyonu</b>
Ağrı	25/06/2002	Tebriz
	08/12/2010	Erzurum
	16/12/2013	Yarevan
	16/08/2015	Yarevan
	22/12/2015	Erzurum
Tendürek	2001-2014	Erzurum-Yarevan
Nemrut	14/07/2007	Yarevan
	07/08/2010	Erzurum
	15/08/2013	Erzurum
Nisiros	15/09/2013	Heraklion
Santorini	05/03/2007	Santorini
Demavend	17/11/2010	Mehrabad
Taftan	15/08/2012	Zahedan
Telica	09/03/2016	San Andres
	14/04/2014	Corozal
	17/04/2015	Juan Santa Maria
Momotombo	15/02/2016	San Andres
	19/10/2002	Surabaya
Tenger	10/02/2012	Surabaya
	19/10/2002	Surabaya
Semeru	10/02/2012	Surabaya
	13/01/2014	Medan
Sinabung	13/01/2014	Medan
Nyiragongo	18/03/2016	Nairobi
Nyamuragira	18/03/2016	Nairobi

## **BULGULAR: VOLKANLARDA YÜZEY SICAKLIĞI ANOMALİLERİ VE ISI AKISI**

Türkiye'den, yakın çevresinden ve Dünya'dan volkanlar için Yüze y sıcaklığı anomalisi ve ışıyan bağıl ısı akısı önceki bölümde anlatılan yöntemler silsilesi ile hesaplanmıştır. Hesaplama da kullanılan görüntüler, bu görüntülerin tarihleri ve ilgili tarihe ait üst hava sıcaklık verisinin alındığı meteoroloji istasyonları Çizelge 1'de sunulmuştur. Türetilen  $\theta$  ve  $Q_{rel}$  görüntüleri Şekil 5 ile Şekil 10 arasında sunulmuştur. İncelediğimiz volkanlar arasında, özellikle Doğu Anadolu bölgemizde

yer alan Ağrı ve Tendürek Dağları ile Nemrut Kalderası'nda, ayırt edilebilir termal aktivite göstergeleri niteliğindeki olası ve bilinen sıcak yeryüzü, buhar/fümerol çıkışları tespit edilmiştir. Tendürek volkanı için gece TIR görüntülerinden türetilen  $\theta$  ve  $Q_{rel}$  görüntüleri ile uzun dönemli gözlemler yapılabileceği daha önce Ulusoy (2016) tarafından da gösterilmiştir. Bunlar kayda değer anomalilerdir, lakin yakın çevremizde daha yüksek dereceli ısı aktivitenin olduğu aktif volkanlar mevcuttur: Yunanistan sınırları içinde olan, fakat Datça yarımadasına 18 km mesafedeki Nisiros (Nisyros) ve Ege Denizi'nde Kiklad adalarından biri olan Santorini ile İran'daki Demavend ve Taftan volkanlarına ait gece TIR görüntüleri de bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Dünya üzerinde farklı seviyede ve tipte aktiviteleri olan volkanlar da termal çıktının ve bu çıktının uydu görüntülerine nasıl yansıdığına gözlenmesi amacıyla inceleme kapsamına alınmıştır. Bu kapsamda da Endonezya'nın Java adasındaki Semeru volkanı ve Tengger Kalderası ile Sumatra adasında yer alan Sinabung volkanı, Nikaragua'daki Momotombo ve Telica volkanları ve Demokratik Kongo Cumhuriyeti'ndeki Nyiragongo ve Nyamuragira volkanları da incelenmiştir.

### **Doğu Anadolu'daki Genç Volkanlar**

Güncel çalışmalar göstermektedir ki, tarihsel anlamda Türkiye'deki en genç patlayıcı püskürme kayıtları ve güncel aktivite göstergeleri Ağrı Dağı, Tendürek ve Nemrut Kalderası'nda gözlenmektedir (Feraud ve Özkocak, 1993; Aydar vd., 2003; Ulusoy vd., 2008; Karakhanian vd., 2002; Ulusoy, 2016).

Bu volkanlardaki bilinen ve termal görüntülerde gözlenen noktalarda maksimum yüzey sıcaklığı anomalileri ve ışılan bağlı ısı akısı hesap sonuçları bilinen ve muhtemel anomali kaynakları ve yüzey belirtileri Çizelge 2'de özetlenmiştir.

### **Ağrı Dağı**

Ağrı Dağı'nın 2002 – 2015 tarihleri arasında 5 gece-termal uydu görüntüsü incelenmiştir (Şekil 5a,b ve Çizelge 2). Volkan üzerinde, birincisi Ahora krateri (ve vadisi; Şekil 5a,b: ac, av) üzerinde ve ikincisi de Küp gölü ve civarında (Şekil 5a,b:kl) olmak üzere iki belirgin sıcaklık anomalisi gözlenmektedir. Bu anomaliler Ahora kraterinde diğer tarihli görüntülere göre 2002 yılında daha belirgindir ve yüksesıcaklıktadır (Şekil 5a,b; Çizelge 2). Ahora kraterinin güneybatı kenarında gözlenen maksimum yüzey

Çizelge 2. Doğu Anadolu volkanları üzerinde doğrulanmış ve olası ısı kaynakları ile ilişkili Yüzeysel Sıcaklığı Anomalisi ve Işıyan Bağlı Isı akısı hesaplama sonuçları.  $\Theta_{max}$  ve  $Q_{max}$  değerleri ilgili Şekil'de kısaltmalarla işaret edilen alanda hesaplanan maksimum piksel değerleridir (\*<sup>a</sup> Ölmez vd., 1994; \*<sup>b</sup> Ulusoy vd., 2008; \*<sup>c</sup> Atasoy vd., 1988; PS: Doğal-Potansiyel Ölçümleri).

Table 2. Surface Temperature anomaly and Relative radiant heat flux calculation results related to verified and potential heat sources on Eastern Anatolian volcanoes.  $\Theta_{max}$  and  $Q_{max}$  values are the maximum pixel values calculated on the points marked with abbreviations on the related Figure. (\*<sup>a</sup> Ölmez et al., 1994; \*<sup>b</sup> Ulusoy et al., 2008; \*<sup>c</sup> Atasoy et al., 1988; PS: Self-Potential measurements).

Volkan	Alan	İlgili Şekil'deki İşaret	Görüntü Tarihi	Yüzeysel Sıcaklığı Anomalisi $\Theta$ (°C)	Bağlı Işıyan Isı akısı $Q_{rel}$ (W/m <sup>2</sup> )	Muhtemel kaynak	Doğrulanmış kaynak	Yüzeysel belirtisi	Arazide doğrudan ölçüm
Ağrı	Ahora krateri	k	2002	6.3	18.2	Hidrotermal			
			2010	2.8	10.5				
			2013	2.7	9.6				
			2015	4.5	11.5				
			2015	4.9	8.8				
	Ahora vadisi	v	2002	4.7	26.1	Hidrotermal			
			2010	5.0	16.7				
			2013	3.4	7.6				
			2015	4.6	18.1				
			2015	6.7	15.7				
Küp Gölü	k	2002	5.1	28.1		Mevsimlik göl / su kaynakları	Mevsimlik göl / su kaynakları		
		2010	1.8	16.4					
		2013	0.9	13.8					
		2015	2.1	9.5					
Tendürek	Batı krater	Tbk	2001-2014	2.3 ila 10.9	14.4 ila 35.5		Hidrotermal	Fümeroller	40-80 °C * <sup>a</sup>
	Doğu krater	Tdk	arası	0.1 ila 6.0	7.7 ila 28.3	Hidrotermal		Fümeroller ?	
Nemrut	İliçgöl	il	2007	5.1	27.7		Hidrotermal	Sıcak su kaynağı	40-60 °C * <sup>b,c</sup>
			2010	4.1	19.3				
			2013	7.0	38.1				
	Fümerol bacası	f	2007	-	-	Hidrotermal		Fümeroller	32-41 °C * <sup>b</sup>
			2010	0.9	16.8				
			2013	-	12.1				
	Maar	om	2007	0.9	10.9	Hidrotermal		PS anomalileri * <sup>b</sup>	
			2010	1.6	18.2				
			2013	1.6	22.9				
	Freatik krater	fk	2007	0.5	-	Hidrotermal			
			2010	0.3	22.9				
			2013	0.9	22.9				
	Uzun maar	um	2007	1.5	-	Hidrotermal		PS anomalileri * <sup>b</sup>	
			2010	2.0	16.9				
			2013	1.2	16.2				
Büyük maar	bm	2010	2.0	16.9	Hidrotermal		Ps anomalileri * <sup>b</sup>		
		2013	1.2	16.2					
Mazik ve Germav tepesi domları (Nemrut)	Dom	Md	2007	4.1	10.6	Hidrotermal			
			2010	4.2	13.4				
			2013	4.9	21.9				
	Sıcak su kaynağı	Gss	2007	4.0	25.6	Hidrotermal	Sıcak su kaynağı	34-35 °C * <sup>c</sup>	
2010	5.3	21.2							
2013	5.2	31.9							

sıcaklığı anomalisi ( $\Theta_{max}$ ) 6,3 °C'dir; bu değer 18,2 W/m<sup>2</sup>'lik bir  $Q_{rel}$  değeri

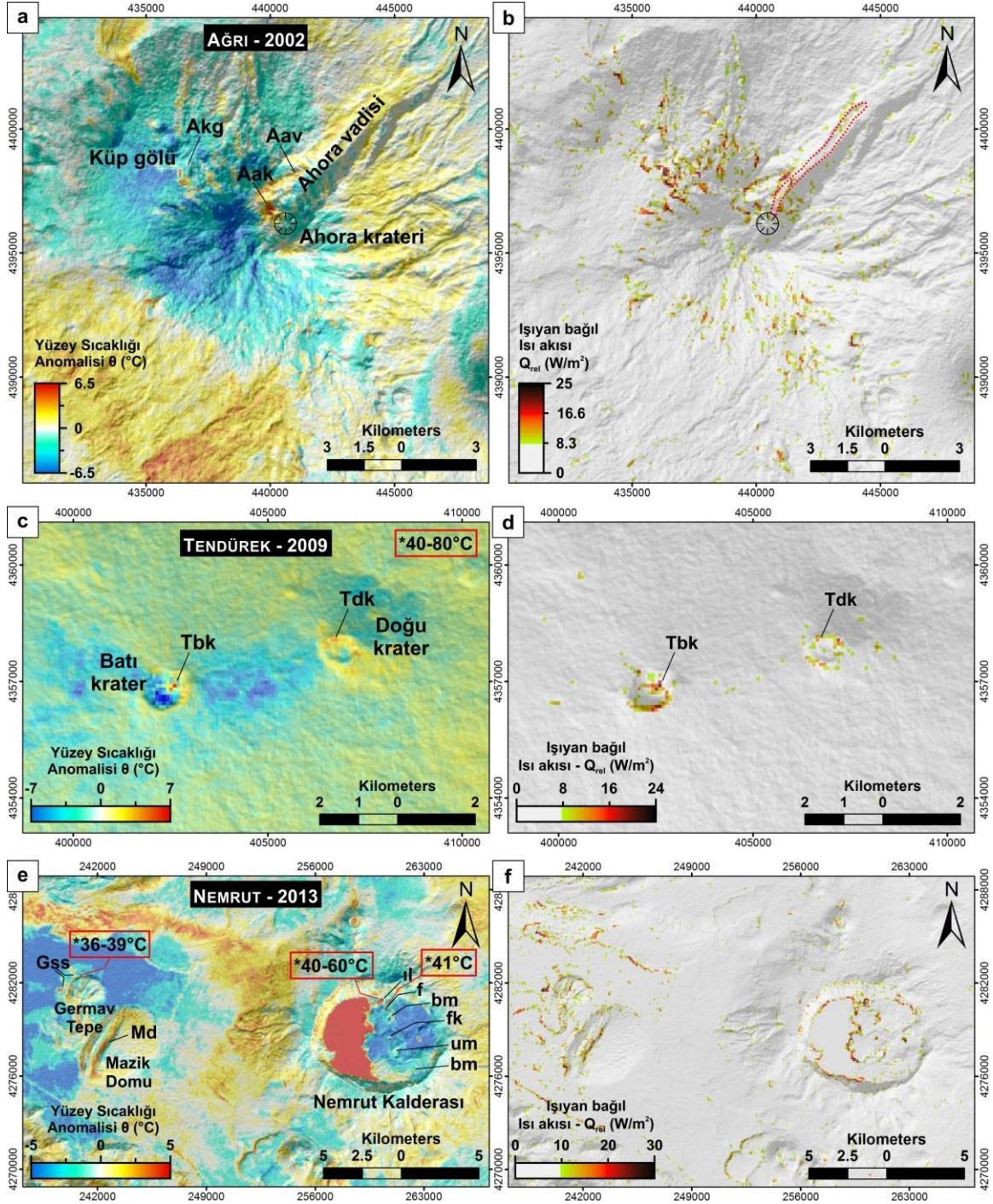
vermektedir ki, bu değerler bir stratovulkan üzerinde 4300 m yükseklikte dikkat çekicidir. Ahora vadisinin batı yamacında gözlenen  $\Theta_{\max}$  6,7 °C, hesaplanan  $Q_{\text{rel}}$  ise 26,1 W/m<sup>2</sup>'dir. Küp gölü ve civarındaki doğal kaynaksuları, gece termal görüntülerinin doğası gereği ('*Termal Çaprazlanma ve Termal Görüntülerde Gündüz-Gece Farkı*' başlıklı bölüme bkz.) 5,1 °C'lik  $\Theta_{\max}$  ve buna bağlı 28,1 W/m<sup>2</sup>'lik bir  $Q_{\text{rel}}$  değeri vermektedir.

### **Tendürek Dağı**

Ulusoy (2016) aynı yöntemi kullanarak 2001 – 2014 tarihleri arasında Tendürek volkanının iki zirve kraterinde zamana bağlı  $\Theta_{\max}$  ve  $Q_{\text{rel}}$  anomalilerini haritalamıştır (Şekil 5c,d; Çizelge 2). Batı kraterinde (Şekil 5c: wcr) gözlenen termal çıktı doğu kraterine (Şekil 5c: ecr) göre daha yüksektir; incelenen zaman aralığında batı kraterde ölçülen  $\Theta_{\max}$  2,7 ila 16,5 °C aralığında ve  $Q_{\text{rel}}$  de 14,4 and 25,2 W/m<sup>2</sup> aralığındadır (Çizelge 2; Ulusoy, 2016).

### **Nemrut Kalderası**

Nemrut Kalderası ve aynı volkanik sisteme ait Mazik ve Germav tepe domları için  $\Theta$  ve  $Q_{\text{rel}}$  görüntüleri üretilmiştir (Şekil 5e,f). Gece termal uydu görüntülerinde tespit edilen termal anomaliler arazide gözlenen/ölçülen güncel anomalilerle korelasyon içindedir. Önceki çalışmalarda Nemrut volkanik sisteminde pek çok sıcak su kaynağı ve buhar bacası belgelenmiş ve arazi ölçümleri not edilmiştir (Çizelge 2).



Şekil 5. Doğu Anadolu volkanları için ASTER görüntülerinden hesaplanan Yüze sıcaklığı anomalisi ve Işyan bağıl ısı akısı görüntüleri: a) ve b) Ağrı Dağı, c) ve d) Tendürek Dağı, e) ve f) Nemrut Kalderası. Anomali adlandırmaları, sıcaklık değerleri (\*) ve ilgili referanslar Çizelge 2’de sunulmuştur.

Figure 5. Surface temperature anomaly and relative radiative heat flux images derived from ASTER images for Eastern Anatolian volcanoes Mt. Ağrı (a and b), Mt. Tendurek (c and d) and Nemrut Caldera (e and f). Please refer to Table 2 for the nomenclature of the anomalous points, temperature measurements (\*) and related references.

Volkan üzerindeki bilinen kaynaklardan Iliğgöl (Şekil 5e: il) etrafındaki kaynaklar TIR türev görüntülerinde en yüksek çıktıyı verenlerdir. Bu kaynaklarda  $\Theta_{max}$  ve  $Q_{rel-max}$  sırasıyla  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $38,1\text{ W/m}^2$  olarak hesaplanmıştır. Üç kaldera içi maarda ölçülen, hidrotermal yükselimle ilişkili Doğal-Potansiyel anomalileri (Ulusoy vd., 2008) TIR görüntülerinde saptanan termal anomalilerle uyumludur (Şekil 5e: obm, lm, bm). Germav tepe domunun KB kenarındaki (Şekil 5e: hs) sıcak su kaynaklarının sıcaklığı  $34 - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığında rapor edilmiştir (Atasoy vd., 1988).

Bu noktada termal uzaktan algılama analizleri  $\Theta_{max}$  için  $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $Q_{rel-max}$  için de  $31,9\text{ W/m}^2$  değerleri vermektedir. Doğrudan arazi ölçümleri rapor edilmemiş olsa da termal anomaliler Mazik domu üzerindeki KKD – GGB doğrultulu fay boyunca da gözlenmektedir (Şekil 5e: md). Mazik domu üzerindeki  $\Theta_{max}$  ve  $Q_{rel-max}$  sırasıyla  $4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $21,9\text{ W/m}^2$  olarak hesaplanmıştır.

### **Aktif Komşu Volkanlar**

Anadolu çevresindeki komşu aktif volkanlardan bazıları da düşük-ortaç termal aktivite göstermektedir. Bu volkanlardan dördü Nisiros, Santorini, Demavend ve Taftan da metodoloji bölümünde tarif edilen iş-akışıyla analiz edilmiştir. Bu dört volkan üzerinde belirgin sıcak noktalar gözlenmiş, gece termal görüntülerinden  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  değerleri hesaplanmıştır.

### **Nisiros Kalderası**

Ülkemiz kıyısına kuş uçuşu 18 km mesafede yer alan ve aktif bir volkan olan Nisiros adası üzerindeki sıcak kaynaklar üzerinde daha önce Ganas vd. (2010) yüzey sıcaklığı ve ışılan bağıl ısı akısı hesabı yapmışlardır. Ganas vd. (2010) 2001 – 2005 tarihleri arasına ait ASTER gece görüntülerinden Stefanos kraterini, Kaminakia ve Polivatos fümerol alanlarını temsil eden pikseller üzerinde  $Q_{rel}$  hesaplamışlardır. Önceki metodoloji üzerinde gerçekleştirdiğimiz basit iyileştirme,  $Q_{rel}$  hesaplamalarını bir veya birkaç pikselden ziyade tüm termal uydu görüntüsü için yapabilmemize olanak vermektedir (ör. Ulusoy, 2016). 2013 tarihli bir ASTER gece görüntüsü ile Nisiros Adası için  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  görüntüleri yeniden hesaplanmıştır (Şekil 6a,b). Hem Stefanos kraterindeki hem de Kaminakia ve Polivatos fümerol alanlarındaki termal anomaliler hâlâ net bir şekilde gözlenebilmektedir. On yıllık bir süre sonunda termal noktalarda hesaplanan  $Q_{rel}$ , önceki hesaplarla benzer değerler vermektedir. Ganas vd. (2010)'nin sırasıyla Stefanos krateri, Polivotis ve Kaminakia zonları için hesapladıkları maksimum  $Q_{rel}$ , değerlerinin ortalamaları  $25,9$ ,  $23,9$  ve  $21,3\text{ W/m}^2$ 'dir. 2013 tarihli görüntü için bizim hesaplamamız yine aynı sırayla  $20,1$ ,  $14,2$  ve  $4,1\text{ W/m}^2$  değerleri vermektedir (Çizelge 3). On yıl öncesine göre ısı akısında, Stefanos kraterinde az miktarda, Polivotis fümerol alanında kısmen düşüş gözlenmektedir. Buna karşın Kaminakia fümerol alanında  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  görüntülerinde sıcak kaynak artık ayırilememektedir (Şekil 6a,b).

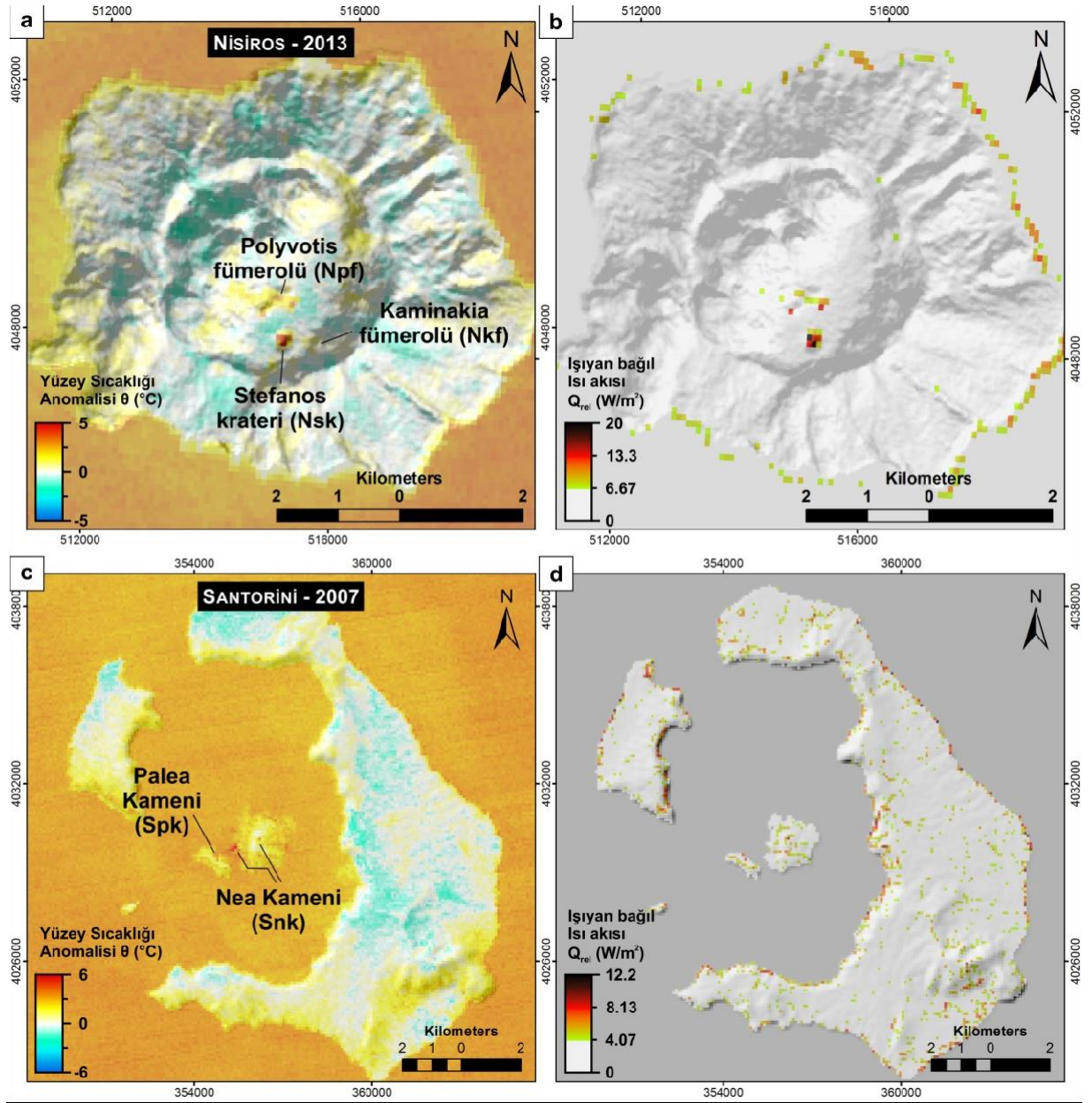
## Çizelge 3. Dünya'daki bazı volkanlar üzerinde doğrulanmış ve olası ısı kaynakları ile

ilişkili Yüzeysel Sıcaklığı Anomalisi ve Işıyan Bağlı Isı akısı hesaplama sonuçları.  $\Theta_{max}$  ve  $Q_{max}$  değerleri ilgili Şekil'de kısaltmalarla işaret edilen alanda hesaplanan maksimum piksel değerleridir (\*<sup>a</sup> Lagios vd., 2007; \*<sup>b</sup> Arriaga vd., 2008; \*<sup>c</sup> Vougioukalakis, 2007; \*<sup>d</sup> Eskandiri vd., 2015; \*<sup>e</sup> Shakeri vd., 2008; \*<sup>f</sup> Hynek vd., 2013; \*<sup>g</sup> Spampinato vd., 2013).

Table 3. Surface temperature anomaly and relative radiant heat flux calculation results

related to verified and potential heat sources on some worldwide volcanoes.  $\Theta_{max}$  and  $Q_{max}$  values are the maximum pixel values calculated on the points marked with abbreviations on the related Figure. (\*<sup>a</sup> Lagios et al., 2007; \*<sup>b</sup> Arriaga et al., 2008; \*<sup>c</sup> Vougioukalakis, 2007; \*<sup>d</sup> Eskandiri et al., 2015; \*<sup>e</sup> Shakeri et al., 2008; \*<sup>f</sup> Hynek et al., 2013; \*<sup>g</sup> Spampinato et al., 2013).

Ülke	Volkan	Alan	İlgili Şekil'deki işaret	Görüntü Tarihi	Yüzeysel Sıcaklığı Anomalisi $\Theta$ (°C)	Bağlı ışıyan ısı akısı $Q_{rel}$ (W/m <sup>2</sup> )	Doğrulanmış Kaynak	Yüzeysel belirtisi	Arazide doğrudan ölçüm	
		Stefanos								
Yunanistan	Nisiros	krateri	Nsk	2013	4,5	20,1			80 - 90 °C * <sup>a</sup>	
		Polyvotis krateri	Npf	2013	2,8	14,2	Hidrotermal	Fümeroller		
		Kaminakia	Nkf	2013	0,9	4,1				
	Santorini	Nea Kameni								
		(ada)	Snk	2007	3,5	10,2		Fümeroller	67 - 97 °C * <sup>b,c</sup>	
		Nea Kameni (sahil)		2007	6,2	13,5	Hidrotermal	Sıcak su kaynağı	34 °C * <sup>b,c</sup>	
Palea Kameni (sahil)		Spk	2007	3,8	7,9		Sıcak su kaynağı	38 °C * <sup>b,c</sup>		
İran	Demavend	zirve	Dz	2010	9,3	23,6	Hidrotermal	Fümeroller	-50 °C * <sup>d</sup>	
	Taftan	zirve	Tz	2012	4,9	19,7	Hidrotermal	Fümeroller		
		yamaç-1	Tgy	2012	3,4	14,5		Fümeroller	48 °C * <sup>e</sup>	
Nikaragua	Momotombo	zirve	Mz	2014	10,5	41,0	Hidrotermal			
				2015	11,1	40,8	Hidrotermal		100 - 605 °C * <sup>f</sup>	
				2016	32,7	102,3	Patlayıcı aktivite	Piroklastik aktivite		
	Güney yamaç	Mgy	2016	12,4	46,7	Patlayıcı aktivite	Kül geri düşme / Kül Bulutu			
		Kuzey yamaç	Mky		6,7	22,7	Lav akıntısı	Lav akıntısı		
Endonezya	Telica	zirve	Tz	2016	5,3	20,7	Hidrotermal			
		Termal havuz	Tth1		6,3	23,1				
		Termal havuz	Tth2		3,8	17,0			75 - 100°C * <sup>f</sup>	
				2002	8,0	26,2				
Endonezya	Tengger	Bromo krateri	Tbk	2012	8,1	34,9	Hidrotermal	Kuvvetli Fümeroller		
		Segara Wedi Lor	Tswl	2002	-	11,2		Fümeroller		
				2012	3,2	15,5		Fümeroller		
				2002	115,3	371,2				
	Semeru	Zirve Piroklastik	Ses	2012	113,1	347,0	Patlayıcı aktivite	Kül bulutu		
Endonezya	Sinabung	akıntı	Sepa	2012	44,6	144,7		Piroklastik akıntılar		
		Piroklastik akıntı	Sipa	2014	105,5	361,1	Patlayıcı aktivite	Piroklastik akıntılar		
Kongo Demokratik Cumhuriyeti	Nyiragongo	Lav gölü	Nyir	2016	110,1	356,9	Lav gölü	Lav gölü	Göl Yüzeysel: -460 - -570 °C * <sup>g</sup> Eriyik: 907 °C * <sup>g</sup>	
	Nyamuragira	Lav gölü	Nyam	2016	108,6	348,7	Lav gölü	Lav gölü		



Şekil 6. Nisiros (a ve b) ve Santorini (c ve d) volkanları için ASTER görüntülerinden hesaplanan Yüzey sıcaklığı anomalisi ve Işyan bağılı ısı akısı görüntüleri. Anomali adlandırmaları Çizelge 3'te sunulmuştur.

Figure 6. Surface temperature anomaly and relative radiative heat flux images derived from ASTER images for Nysiros (a and b) and Santorini (c and d) volcanoes. Please referto Table 3 for the nomenclature of the anomalous points.



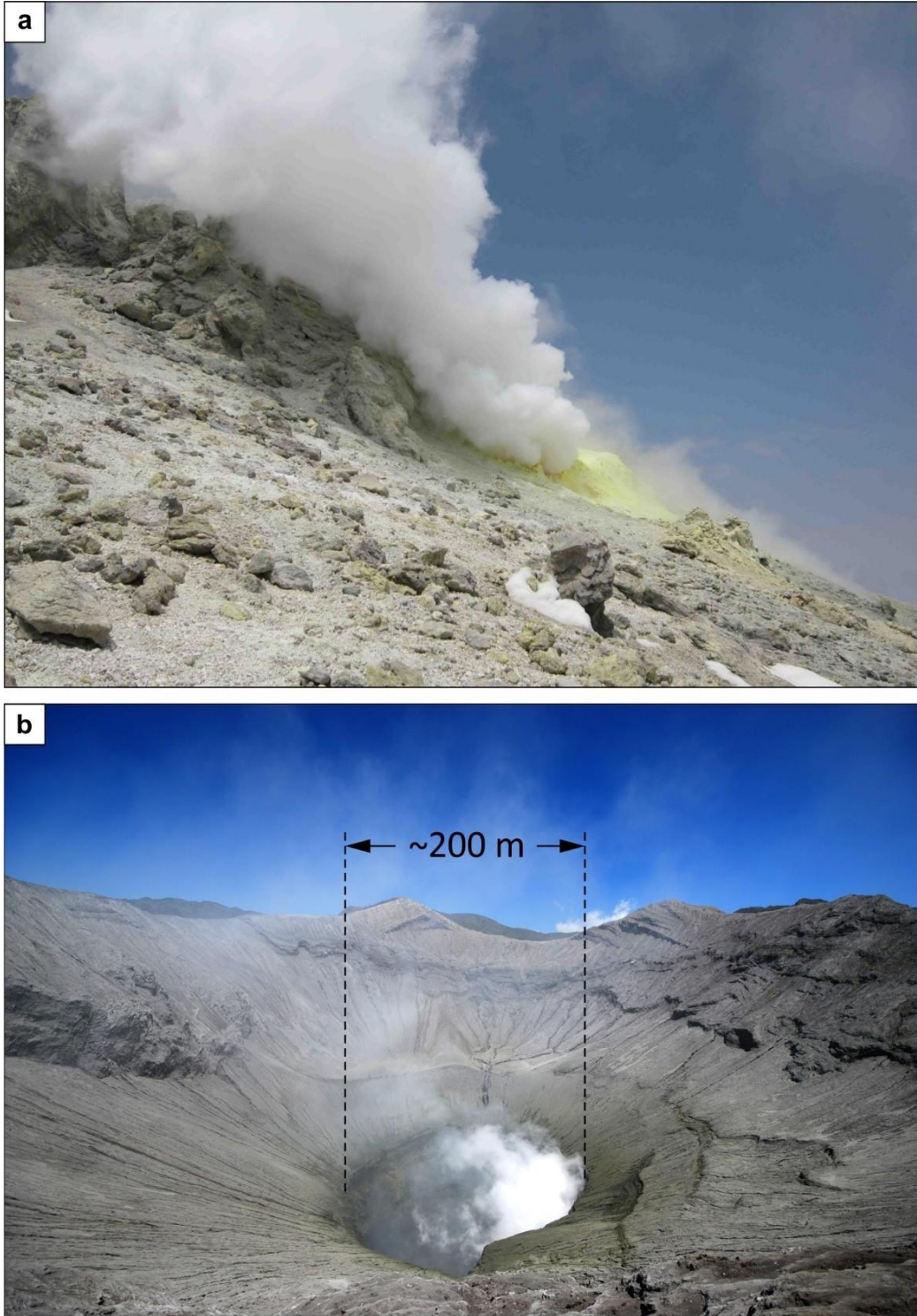
### **Santorini Kalderası**

İncelediğimiz pek çok ASTER gece görüntüsü arasında Santorini Kalderası'nın merkezindeki Nea Kameni Adası'nda mevcut termal anomaliye dair minör çıktılar elde edebildik. 2007 tarihli termal görüntü Nea Kameni adasının ortasındaki ve batı kıyısındaki zayıf termal noktaları haritalamamıza izin vermektedir (Şekil 6c,d).

Hesaplanan  $\Theta_{\max}$  ve  $Q_{\text{rel-max}}$  değerleri diğer incelenen volkanlara kıyasla düşüktür (Çizelge 3). Batı kıyısındaki sıcak kaynaklar civarında  $\Theta_{\max}$  6,2 °C ve  $Q_{\text{rel-max}}$  da 13,5 W/m<sup>2</sup> hesaplanmıştır.

### **Demavend Dağı**

Demavend, Tahran'ın 55 km kuzeydoğusunda yer alan bir stratovolkandır. Güncel olarak zirvesinde hidrotermal aktivite gözlenmektedir. Volkanın güncel aktivitesi, zirvede fümerol bacaları ve bacaların etrafındaki kükürt mineralizasyonu ile gözlenmektedir (Şekil 7a). Yakın zamanda Eskandari vd. (2015) volkan üzerinde yayılan ısı akısını 2002 tarihli bir Landsat ETM+ gündüz görüntüsü kullanarak -69 – 277 W/m<sup>2</sup> aralığında ölçmüşlerdir. 2001 tarihli Landsat ETM+ gece görüntüsü ile hesapladıkları ısı akısı 48 W/m<sup>2</sup>'dir (Eskandari vd., 2015). Bu çalışma kapsamında değerlendirdiğimiz ASTER gece görüntüleri arasında 2010 tarihli görüntü hariç Demavend Dağı'nın zirve bölgesindeki termal anomali belirgin değildir. 2010 tarihli ASTER gece görüntüsünden hesaplanan  $\Theta$  ve  $Q_{\text{rel}}$  görüntüleri Şekil 8a ve b'de sunulmuştur. Anomaliler diğer volkanlarda gözlemlediğimiz kadar belirgin olarak görüntülenmese de yüksek  $\Theta$  ve  $Q_{\text{rel}}$  değerleri ile belirgindir.  $\Theta_{\max}$  ve  $Q_{\text{rel-max}}$ , zirve bölgesinde sırasıyla 9,3 °C ve 23,6 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3).

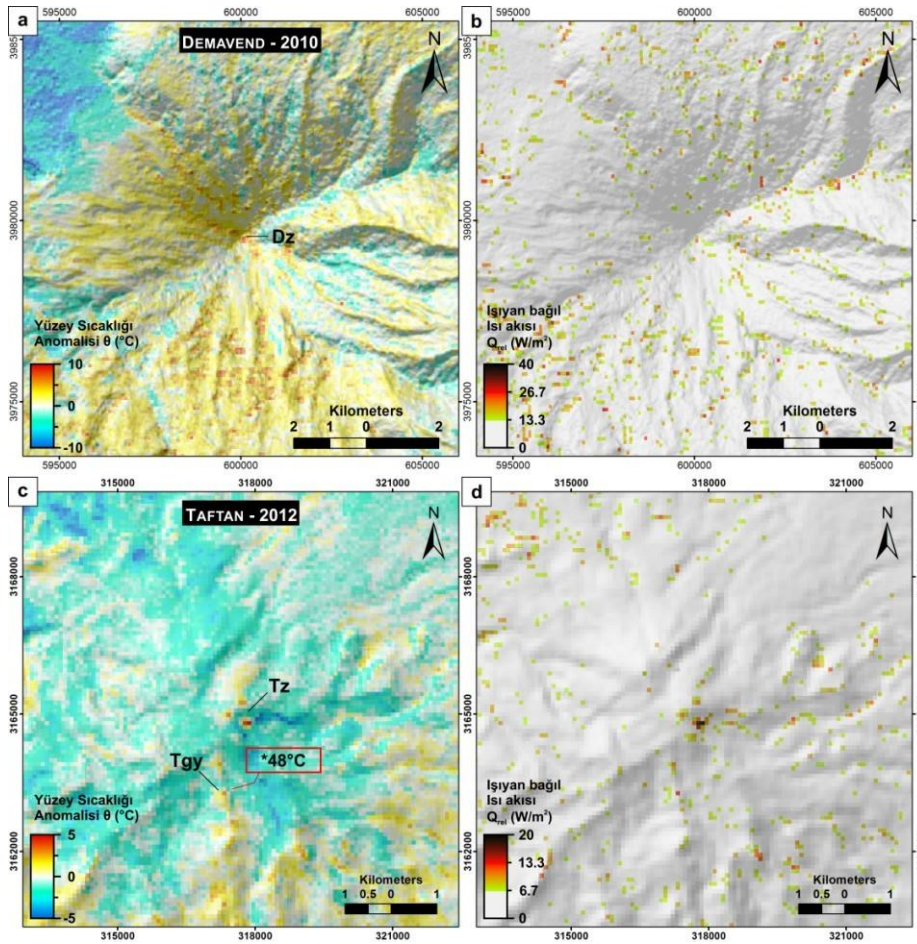


Şekil 7. a) Demavend dağı zirvesindeki sülfürlü buhar bacaları ve b) Tengger Kalderası, Bromo kraterinden buhar emisyonu.

Figure 7. a) Sulphur-rich vapour vents on the summit of Mt. Demavand and, b) Vapour emission from Bromo crater at Tengger Caldera.

## Taftan Dağı

Taftan volkanı Güneydoğu İran'da, Makran filiş zonu içerisinde yer alan aktif bir stratovolkandır; İran'ın önemli jeotermal kaynaklarından biridir (Shakeri vd., 2008). Taftan, Pers dilinde içten içe yanan, tüten anlamına gelmektedir. Zirvede baca cidarlarında sıvama halinde kükürt mineralizasyonları gözlenen, kuvvetli fümeroller mevcuttur; güney yamaçlarında sıcak su ve buhar kaynakları yer almaktadır (Shakeri vd., 2008; 2015). Zirve bacalarında  $\Theta_{\max}$  4,9 °C ve  $Q_{\text{rel-max}}$  da 19,7 W/m<sup>2</sup> hesaplanmıştır (Çizelge 3; Şekil 8c,d). Güney yamacında Shakeri vd. (2008)'nin doğrudan sıcaklık ölçümünün (48 °C) bulunduğu buhar bacasında da  $\Theta_{\max}$  3,4 °C ve  $Q_{\text{rel-max}}$  da 14,5 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3; Şekil 8c,d: tgy).



Şekil 8. Demavend (a ve b) ve Taftan (c ve d) volkanları için ASTER görüntülerinden hesaplanan Yüzey sıcaklığı anomalisi ve İşyan bağlı ısı akısı görüntüleri. Anomali adlandırmaları, sıcaklık değerleri (\*) ve ilgili referanslar Çizelge 3'te sunulmuştur.

Figure 8. Surface temperature anomaly and relative radiative heat flux images derived from ASTER images for Demavend (a and b) and Taftan (c and d) volcanoes. Please refer to Table 3 for the nomenclature of the anomalous points, temperature measurements (\*) and related references.

## **Dünya'daki Aktif Volkanlardan Örnekler**

Anadolu ve çevresindeki komşu aktif volkanlar düşük-ortaç termal aktivite göstermektedir. Bu yakın volkanların tamamı renksiz, beyaz buhar bacaları, sıcak yeryüzü ve bacalar civarında güncel ve/veya uzun süreli hidrotermal aktiviteyi gösteren alterasyon mineralojisi ile gözlenmektedir. Bu düşük/ortaç karakterden daha yoğun hidrotermal aktiviteye ve dahi patlayıcı/yayılmalı volkanik aktiviteye geçildiğinde, termal uydu görüntülerinden hesaplanan  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  anomalilerindeki değişimi ortaya koymak amacıyla Dünya'daki aktif volkanlardan örnekler sunulmuştur. Aynı metodoloji kullanılarak Nikaragua'daki Telica ve Momotombo dağlarının TIR görüntüleri düşük şiddetli volkanik aktiviteye örnek olarak işlenmiştir. Bu volkanlara kıyasla daha şiddetli aktivite potansiyeli olan, Endonezya'dan üç örnek volkan da hesaplamalarımıza dâhil edilmiştir: Sinabung ve Semeru dağları ve Tengger Kalderası. Bu volkanlardan daha yüksek sıcaklıkta bir aktiviteyi temsil edebilecek örnekler olarak da Kongo Demokratik Cumhuriyeti'nde yer alan Nyiragongo ve Nyamuaragira lav gölleri incelenmiştir. Ortaç/yüksek termal/volkanik aktiviteyi temsile eden bu örneklerin her biri için gece termal görüntülerinden  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  değerleri hesaplanmıştır.

### **Telica ve Momotombo dağları**

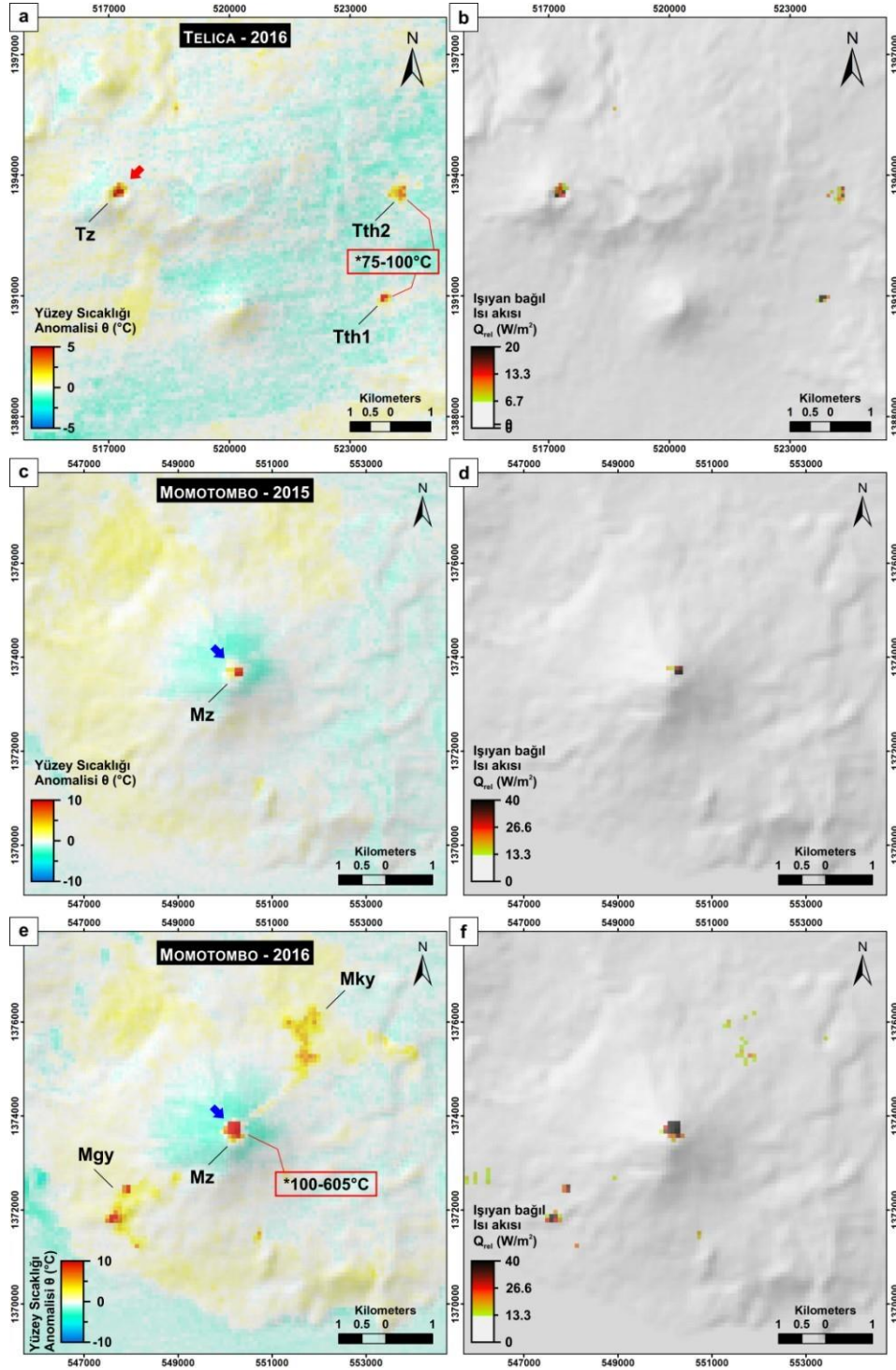
Birbirine komşu Nikaragua volkanları Cerro-Negro, Momotombo ve Telica aktif volkanlarıdır. Bu volkanlar üzerindeki  $SO_2$ 'ce zengin, yoğun buharlı fümerol bacaları etrafında asit-sülfat alterasyonunun yoğun olduğu gözlenir (Hynek vd., 2013; McCollom vd., 2013). Hynek vd. (2013), bu volkanlar üzerinde fümerol/hidrotermal ortamlarını beş ana sınıfa ayırmıştır: (1) oldukça düşük pH'lı (-1 ila 1) ve yüksek sıcaklıklı ( $>100^\circ C$ ) fümeroller, (2) ortaç asiditede (4 ila 5,5 aralığında pH) ve orta sıcaklıkta ( $50 - 100^\circ C$ ) fümeroller, (3) yüksek pH'lı (5,5 –6,5) ve düşük sıcaklıkta ( $40 - 65^\circ C$ ) fümeroller, (4) volkanların eteklerindeki su toplama havzalarında flüviyal

yıkamayla biriken hidrotermal alterasyon ürünleri, ve (5) yüksek sıvı/kayaç oranlı jeotermal havuzlar ve çamur-havuzları (~1,5 ila 4,6 aralığında pH ve 55 – 100°C aralığında sıcaklık). Bu üç komşu volkandan ikisine, aralarında 40 km mesafe olan Telica ve Momotombo stratovulkanlarına ait gece görüntüleri incelenmiştir.

Telica, 23 Eylül 2015 ile 11 Mayıs 2016 tarihleri arasında 2 VEI (volkanik patlama indeksi) hacminde patlamalar gerçekleştirmiştir (GVP, 2013). Volkanın zaman zaman kül bulutları oluşturan kül ve gaz patlamaları arasında 09 Mart 2016 tarihli gece görüntüsü kullanılarak  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  değerleri hesaplanmıştır (Şekil 9a,b).

Telica'nın zirvesinde ( $T_z$ ) hesaplanan maksimum sıcaklık anomalisi  $\Theta_{max}$  5,3 °C ve  $Q_{rel-max}$  da 20,7 W/m<sup>2</sup>'dir (Çizelge 3, Şekil 9a). Volkanın Doğu- Güneydoğusunda yer alan Hervidores de San Jacinto hidrotermal havuzları da TIR görüntülerde net bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 9a: Tth1, Tth2). Bu havuzlarda Hynek vd. (2013) 75 – 100°C sıcaklıklarda kaynaklar raporlamışlardır. Hidrotermal havuzlarda gece termal görüntülerinden hesaplanan maksimum sıcaklık anomalisi  $\Theta_{max}$  6,3 °C ve  $Q_{rel-max}$  da 23,1 W/m<sup>2</sup>'dir (Çizelge 3, Şekil 9a: Tth1, Tth2).

Momotombo, 1918 yılındaki patlamasından 97 yıl sonra 1 Aralık 2015 tarihinde faaliyete geçmiş, faaliyeti 7 Nisan 2016'e kadar devam etmiştir (INETER, 1999; GVP, 2017). Faaliyet, zaman zaman birkaç km yüksekliğe varan kül bulutları ile kül patlamaları, Stromboli tipi patlamalar, kül ve gaz çıkışları, bazaltik lav akıntıları ve piroklastik akıntılar şeklinde gerçekleşmiştir, toplam 2 VEI hacminde malzeme çıkışı hesaplanmıştır (GVP, 2013; INETER, 1999; GVP, 2017). Momotombo'da, toplam 438 patlama kaydedilmiş, bunların 409'unda kül çıkışları not edilmiştir (INETER, 1999). 1 Aralık 2015 ile 1 Mart 2016 arasında 88 patlama kaydedilmiştir; buna karşın sadece Mart 2016'da 314 patlama ile patlama sayısında büyük bir artış olmuştur (INETER, 1999; GVP, 2017).



Şekil 9. Telica (a ve b) ve Momotombo (c-f) volkanları için ASTER görüntülerinden hesaplanan Yüzey sıcaklığı anomalisi ve İşıyan bağlı ısı akısı görüntüleri. Anomali adlandırmaları, sıcaklık değerleri (\*) ve ilgili referanslar Çizelge 3'te sunulmuştur.

Figure 9. Surface temperature anomaly and relative radiative heat flux images derived from ASTER images for Telica (a and b) and Momotombo (c-d) volcanoes. Please refer to Table 3 for the nomenclature of the anomalous points, temperature measurements (\*) and related references.

Momotombo'ya ait patlama öncesi 14 Nisan 2014 ve 17 Nisan 2015 tarihli iki görüntü ve aktivite esnasında alınan 15 Şubat 2016 tarihli TIR uydu görüntülerinden  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  değerleri hesaplanmış, bunlardan son iki tarihli görüntü Şekil 9c-f'te sunulmuştur. Patlamadan 19 ay önce, 14 Nisan 2014 tarihli gece TIR görüntüsünde Momotombo zirvesinde  $\Theta_{max}$  10,5 °C ve  $Q_{rel-max}$  41,0 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3: Mz). Patlamadan 7 ay önce, 17 Nisan 2015 tarihinde de zirvede hem sıcaklık hem de ısı akısı önceki yıla benzer değerler vermektedir:  $\Theta_{max}$  11,1 °C ve  $Q_{rel-max}$  40,8 W/m<sup>2</sup> (Çizelge 3, Şekil 9c,d: Mz). Faaliyetin sürmekte olduğu 15 Şubat 2016 tarihli görüntüde ise zirvede  $\Theta_{max}$ 'ın 32,7 °C'ye ve  $Q_{rel-max}$ 'ın da 102,3 W/m<sup>2</sup>'ye yükseldiği gözlenmektedir (Çizelge 3, Şekil 9e,f: Mz). KB yamaçta 30 Aralık 2015 ile – 5 Ocak 2016 arasında yerleşen (GVP, 2017) lav akıntısının halen sıcaklığını korumakta olduğu görülmektedir (Şekil 9e: Mky). Lav akıntısı üzerinde hesaplanan maksimum  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  sırasıyla 6,7 °C ve 22,7 W/m<sup>2</sup>'dir (Çizelge 3, Şekil 9e,f: Mky). Volkanın güneybatısında ise, patlama bulutu ve taze yerleşen kül geri-düşme görüntülenmiştir (Şekil 9e: Mgy). Bulut üzerinde ölçülen  $\Theta_{max}$  12,4 °C ve  $Q_{rel-max}$  46,7 W/m<sup>2</sup> (Çizelge 3, Şekil 9e,f: Mgy). Şekil 9e vef'nin lejantları özellikle Şekil 9c ve d ile aynı verilmiştir; bunun birinci nedeni her iki tarihli görüntüde sıcak gözlenen alanların birbirleriyle birebir kıyaslanabilir olması, ikinci nedeni de patlama sonrası görüntüde hem zirve alanındaki sıcaklık anomalilerini hem de lav akıntıları / kül bulutu kaynaklı anomalileri aynı anda görülebilir kılmaktır.

### **Sinabung Dağı**

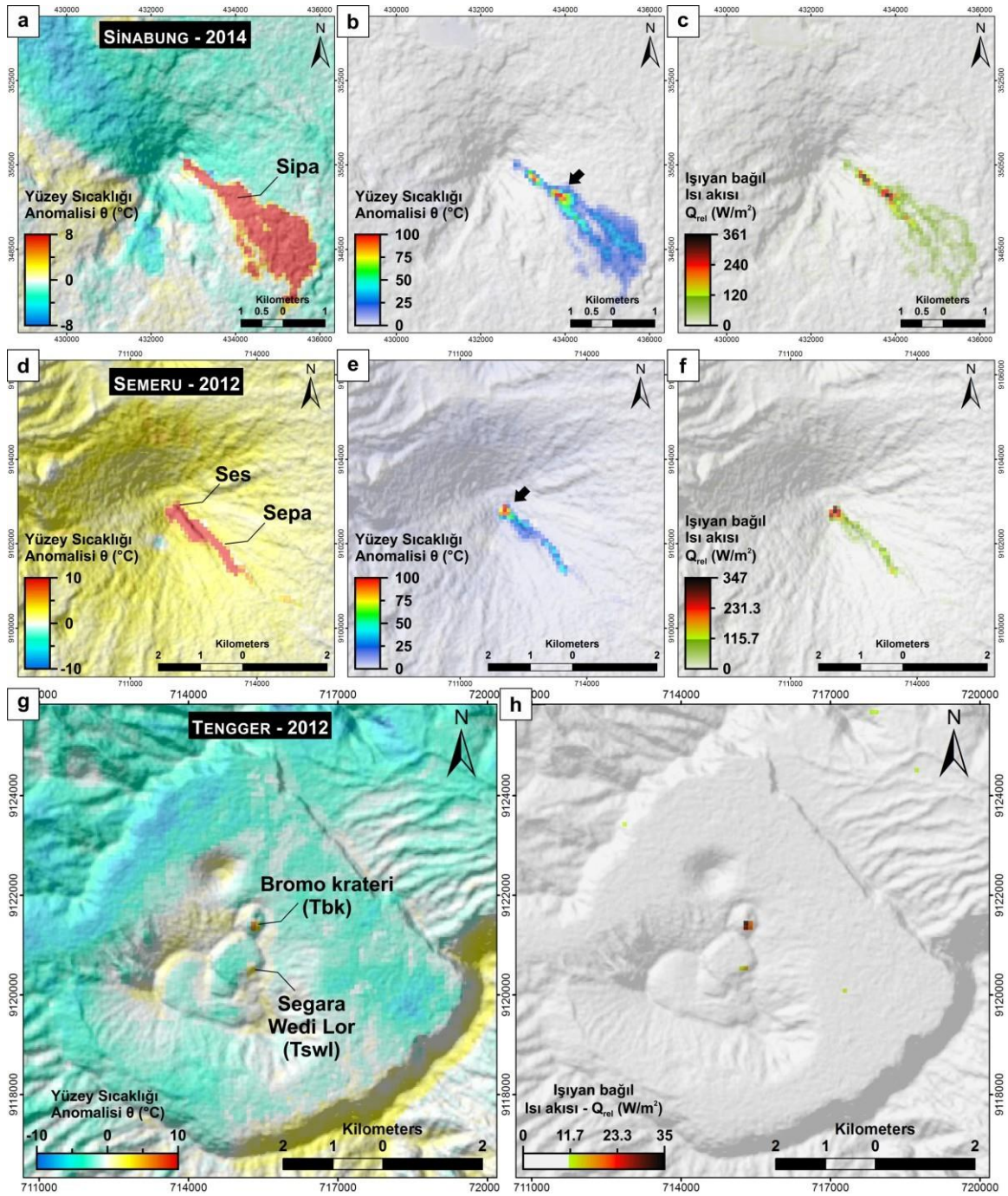
Sinabung, 1881 yılındaki patlamasından yaklaşık 120 yıl sonra 2010 yılındaki patlayıcı püskürmesine kadar uzun bir nekahet dönemi geçirdi. 2010 yılından beri

tekrarlayan yüksek sorguçlu patlayıcı püskürmeleri ve piroklastik akıntıları ile Endonezya'nın en aktif ve tehlikeli volkanlarından biridir. Volkan'ın  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  hesaplamaları 13 Ocak 2014 tarihli ASTER gece görüntüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yerel gözlem birimi Volkanoloji ve Jeolojik Afetleri Azaltma Merkezi'nin (PVMBG: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi) 8 – 14 Ocak 2014 raporuna göre (GVP, 2014):

“Her gün, patlamaların oluşturduğu Kül bulutları oluşmuş, bulut zaman zaman 5 km'ye kadar yükselmiştir. Piroklastik akıntılar D, GD ve G yönünde 0,5 – 4,5 km mesafeye kadar ulaşmıştır. Sismik aktivite sürekli tremor ile yüksek seviyede kalmıştır. Ziyaretçilerin kratere GD yamaçta 7 km, diğer yamaçlarda 5 km'den fazla yanaşmasına izin verilmemiştir. 11 Ocak'ta volkanik depremler artmış, kül sorguçları 1 – 5 km yüksekliğe ulaşmış, pek çok köyde geri düşmeler rapor edilmiştir. GD yönünde 1 – 4,5 km mesafeye, E yönünde 1 km mesafeye kadar ulaşan piroklastik akıntılar gerçekleşmiştir. Tahliye edilen aile sayısı 7.898'e ve insan sayısı 25.516'ya ulaşmıştır.”

Bu aktif dönemde alınan termal uydu görüntüsü, piroklastik akıntıların hem yayılımının hem de yüzey sıcaklığının değişiminin hassas bir şekilde haritalanabilmesine olanak vermektedir (Şekil 10a,b,c). Aynı tarihli ASTER görüntüsünden hesaplanan  $\Theta$  görüntüleri Şekil 10a'da ve Şekil 10b'de iki farklı lejandla sunulmuştur. Şekil 10a'da verilen lejand ile sıcak piroklastik akıntının yayılımını net olarak haritalamak mümkündür. Şekil 10b'de verilen lejand ile de piroklastik akıntı üzerindeki sıcaklık değişimleri haritalanabilmekte, sıcaklığın daha yoğun olduğu bölgeler gözlenebilmektedir (Şekil 10b: siyah ok). Taze, sıcak piroklastik akıntı üzerinde  $\Theta_{max}$  105,5 °C ve  $Q_{rel-max}$  da 361,1 W/m<sup>2</sup> hesaplanmıştır (Çizelge 3, Şekil 10b,c: Sipa).





Şekil 10. Sinabung (a-c), Semeru (d-f) ve Bromo-Tengger (g ve h) volkanları için ASTER görüntülerinden hesaplanan Yüze sıcaklığı anomalisi ve Işyan bağıl ısı akısı görüntüleri. Anomali adlandırmaları Çizelge 3'te sunulmuştur.

Figure 10. Surface temperature anomaly and relative radiative heat flux images derived from ASTER images for Sinabung (a-c), Semeru (d-f) and Bromo-Tengger (g and h) volcanoes. Please refer to Table 3 for the nomenclature of the anomalous points.

## **Semeru Dağı**

Endonezya'nın oldukça aktif volkanlarından biri olan Semeru stratovolkanına ait işlenen ASTER gece termal görüntülerinden 10 Şubat 2012 tarihli görüntü Şekil 10d,e ve f'de sunulmuştur. PVMBG'nin raporuna göre Aralık 2011'de sismik olarak artan aktivite, 2 – 7 Şubat tarihleri arasında patlamaya dönüşmüştür. Kül bulutlarının yaklaşık 600 metreye yükseldiği aktivite esasında zirvede kor rengi ışımalarla ufak patlamalar gözlenmiş, bu patlamalarla oluşan piroklastik çığlar ve fırlatılan malzeme 2,5 km kadar akmış/fırlatılmıştır (GVP, 2013).

Volkanın güneydoğu istikametinde geniş bir vadiye kanalize olan piroklastik çığlar, akıntılar ve döküntüler Şekil 10d,e ve f'de gözlenmektedir. Yüzey sıcaklığı anomalisi ( $\Theta$ ) görüntüleri gözlenen sıcaklıklarda Sinabung volkanında olduğu gibi piroklastik akıntıları detaylı inceleme olanağı sunmaktadır. Aynı tarihli ASTER görüntüsünden hesaplanan  $\Theta$  görüntüleri Şekil 10d'de ve Şekil 10e'de iki farklı lejantla sunulmuştur. Taze piroklastik akıntının yayılımı (Şekil 10d) ve piroklastik akıntı üzerindeki sıcaklık değişimleri net olarak haritalanabilmektedir (Şekil 10e). En yüksek sıcaklıklı aktivitenin zirvede devam ettiği gözlenebilmektedir (Şekil 10e: siyah ok). Solikhin vd. (2012) de ASTER termal görüntüleri kullanarak 2002-2003 yılı piroklastik akıntılarını patlama öncesi ve sonrası iki termal görüntü ile haritalamış ve etkilerini incelemişlerdir. Aylar sonra dahi piroklastik akıntılarda korunan sıcaklığın termal görüntülerle görüntülenebildiğini göstermişlerdir (Solikhin vd., 2012).

İncelediğimiz iki termal görüntüde zirvede gözlenen maksimum  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  sırasıyla 115,3 °C ve 371,2 W/m<sup>2</sup>'dir (Çizelge 3, Şekil 10e,f: Ses). 2012 tarihli görüntüde piroklastik akıntı üzerinde hesaplanan maksimum  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  de 44,6 °C ve 144,7 W/m<sup>2</sup>'dir (Çizelge 3, Şekil 10e,f: Sepa).

## **Tengger Kalderası ve Bromo krateri**

Tengger Kalderası'nda termal hesaplamalar, 2002 ve 2012 tarihli görüntüler ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3). Şekil 10 g ve h da, 10 Şubat 2012 tarihli ASTER

gece termal uydu görüntülerinden hesaplanan  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  haritaları sunulmuştur. Kaldera içindeki en aktif krater Bromo krateridir. PVMBG'nin raporları, görüntünün alındığı tarihte Bromo kraterinde olağan yoğun fümerollerin devam ettiğini, 1 Ocak – 29 Mart arasında beyaz bulutların kraterin 50 metre kadar üzerine ulaştığını ve sismik faaliyetin düştüğünü belirtmektedir (GVP, 2012). Bromo kraterinin olağan fümerollerini 2014 yılındaki ziyaretimizde de devam etmekteydi (Şekil 7b). Volkan, 2015 ve 2019 yıllarında Bromo kraterinden patlayıcı kül püskürmeleri gerçekleştirdi. Volkanın buhar çıkışlarına dair doğrudan sıcaklık ölçümleri mevcut değildir, lakin Aiuppa vd. (2015) gaz ölçümleri gerçekleştirmiştir. Bromo'nun gaz kompozisyonu su baskındır ( $H_2O/SO_2$  oranı  $100\pm 50$ ) ve diğer Java volkanları arasında gaz kompozisyonu yüksek-sıcaklıklı gaz emisyonları arasında kalmaktadır (Aiuppa vd., 2015).

Bromo kraterinde ölçülen maksimum  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  değerleri sırasıyla  $8,1\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $34,9\text{ W/m}^2$ 'dir (Çizelge 3, Şekil 10g,h: Tbk). Bromo kraterinin güneyinde, daha yüksek kotta yer alan Segara Wedi Lor kraterinde hesaplanan  $\Theta_{max}$   $3,2\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $Q_{rel-max}$  da  $15,5\text{ W/m}^2$ 'dir (Çizelge 3, Şekil 10g,h: Tswl).

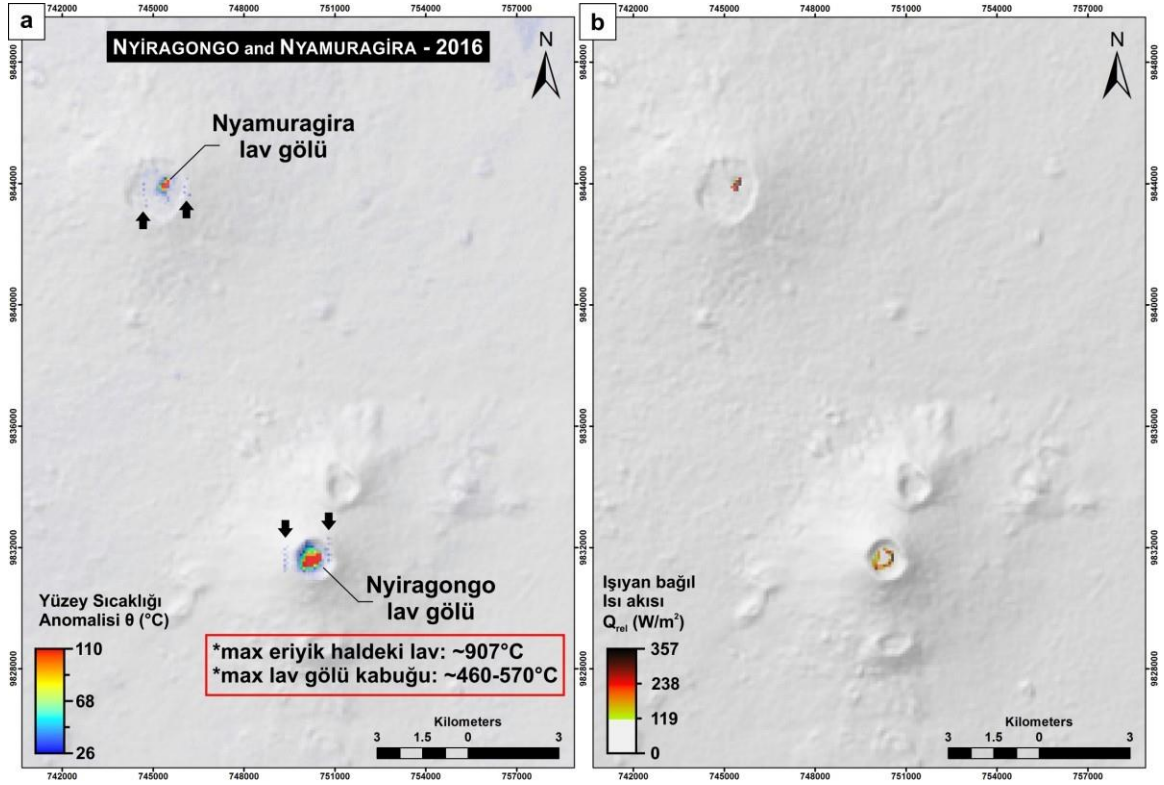
### **Nyiragongo ve Nyamuragira dağları**

Afrika'nın en aktif ve tehlikeli volkanlarından olan Nyiragongo ve Nyamuragira volkanları, Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nde yer alır. İki volkan birbirlerine 13 km mesafededir. Nyiragongo (3470 m) bir stratovolkan, Nyamuragira da (3058 m) kalkan tipi bir volkandır. Nyiragongo zirvesindeki  $\sim 1,3$  km çapındaki krater içinde  $\sim 200$  m çapında aktif bir lav gölü yer almaktadır. Nyamuragira zirvesindeki  $\sim 2,2$  km çapındaki büyük kraterin içinde yer alan 400 m çapındaki pit-krater içinde de zaman zaman lav gölü gözlenmektedir. Spampinato vd. (2013) Nyiragongo lav gölünde sıcaklığın  $907\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşabildiğini, göl yüzeyinde kabuklaşan katı lav üzerinde de  $460 - 570\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklar kaydedildiğini not etmektedir.

Kullanılan ASTER gece termal uydu görüntüsünün alındığı 18 Mart 2016 tarihinden hemen önce ve sonra yayınlanan raporlarında, Goma Volkanoloji Gözlemevi (Observatoire volcanologique de Goma), Nyiragongo volkanında 28 Şubat 2016'da faaliyetin şiddetlendiğini ve zaman zaman kraterin doğu kesiminde ikinci bir lav gölü

de oluşturarak 6 Nisan'a kadar devam ettiğini raporlamıştır (GVP, 2013). Görüntünün alındığı tarihte Nyamuragira'da aktivitenin olduğu bilirse de detaylı bir gözlem raporu mevcut değildir.

Nyirogongo ve Nyamuragira volkanlarının gece termal görüntülerinden hesaplanan  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  değerleri/görüntüleri Çizelge 3 ve Şekil 11a,b'de sunulmuştur. Nyirogongo lav gölü üzerinde hesaplanan  $\Theta_{max}$  110,1 °C ve  $Q_{rel-max}$  356,9 W/m<sup>2</sup>'dir. Nyamuragira lav gölü üzerinde hesaplanan  $\Theta_{max}$  ve  $Q_{rel-max}$  da sırasıyla 108,6 °C ve 348,7 W/m<sup>2</sup>'dir.



Şekil 11. Nyiragongo ve Nyamuragira volkanları için ASTER görüntülerinden hesaplanan a) Yüzey sıcaklığı anomalisi ve b) Işıyan bağıl ısı akısı görüntüleri. Anomali adlandırmaları, sıcaklık değerleri (\*) ve ilgili referanslar Tablo 3'te sunulmuştur.

Figure 11. a) Surface temperature anomaly and b) relative radiative heat flux images derived from ASTER images for Nyiragongo and Nyamuragira volcanoes. Please refer to Table 3 for the nomenclature of the anomalous points, temperature measurements (\*) and related references.

## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yüzey Sıcaklığı (YS), Yüzey Sıcaklığı Anomalisi ( $\Theta$ ) ve Işıyan Bağlı Isı Akısı ( $Q_{rel}$ ) hesaplarımız hem ülkemizdeki hem de yakın çevresindeki volkanlar üzerindedüşük sıcaklıklı termal anomalilerin tespiti ile ilgili önemli sonuçlar sunmaktadır.

Bununla beraber yöntemle dair ve yöntemin geliştirilmesine dair tespitlerde bulunmak da mümkündür. Tespitlerimiz ve bulgularımız bu bölümde özetlenmiştir.

### Yönteme Dair

Jeotermal çalışmalarda gündüz görüntülerinin yansıma ve topoğrafik etki nedeniyle termal kızılötesi radyasyonu gizleme potansiyeli yüksektir. TIR uydu görüntülerinde imkân varsa gece görüntülerinin tercih edilmesi, havadan termal görüntüleme de gece görüntü alınması özellikle üstünde durulması gereken bir husustur. Termal yansıma ve topoğrafik etki gündüz görüntülerinde TIR görüntüde baskındır, düzeltilmesi zorunludur. Gece görüntülerinde dahi, günbatımından saatler sonra topoğrafik etki termal ışımayı önemli ölçüde etkiler (ör., Şekil 1) ve düzeltilmesi gerekir (Coolbaugh vd., 2007; Ulusoy vd., 2012). Termal çaprazlanmanın varlığından habersiz jeolojik ve jeotermal yorumlar TIR analizlerinde araştırmacıları yanlış bir yöne sürükleyebilir. Termal çaprazlanma nedeniyle, buhar ve hidrotermal kaynaklı toprak nemliliği dahi başlı başına gece görüntülerinde pozitif, gündüz görüntülerinde negatif sıcaklık anomalisi kaynağıdır (ör., Şekil 2). Doğrudan ölçmenin zor olduğu, hesaplamalarda kullanılan emisivite değerlerindeki küçük değişiklikler, hesaplanan sıcaklıklara da yansiyacaktır, yerel ölçümler (doğrulama) özellikle düşük sıcaklıklı termal anomaliler ile ilgili çalışmalarda düzeltmelere izin verir (Lagios vd., 2007).

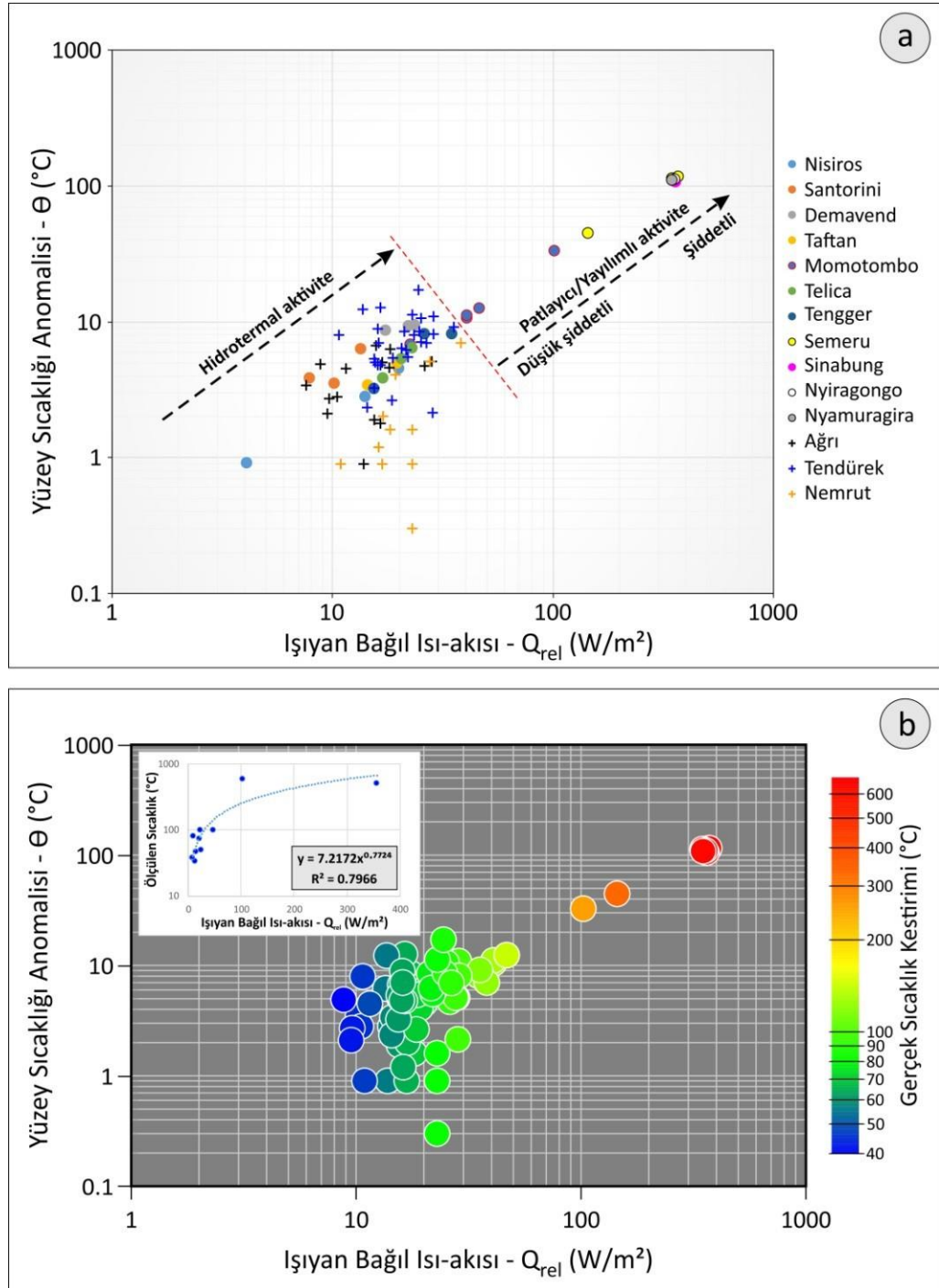
Termal kaynağın kapladığı alan ve kullanılan termal bandın çözünürlüğü TIR incelemelerde daima önem arz eder. Küçük ölçekli termal alanların (örneğin ASTER bantlarında) 90 x 90 m piksel alanı içinde daha soğuk çevre kayalarla termal karışımı nedeniyle, termal görüntüde ölçülen değerleri neredeyse her zaman bu termal kaynakların gerçek sıcaklıklarından daha küçüktür (Lagios vd., 2007; Vaughan vd., 2012).

Gaonac'h vd. (1994) ve Ganas vd. (2010) ışıyan bağlı ısı akısı hesaplamalarında  $T_{hava}$  ve  $e$  değerleri için tek bir pikselin değerini,  $\Delta\theta$  için de iki komşu piksel arasındaki farkı kullanmışlardır. Sonuç olarak anomali beklenen 'bir' veya yan

yana birkaç piksel için  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  değerleri hesaplamışlardır. Ulusoy (2016)'un tek bir piksel değerini kullanarak hesaplamaktan ziyade, tüm görüntü matrisini kullanarak  $T_{hava}$  ve  $\Delta\theta$  'görüntüleri' hesaplamak üzere geliştirdiği prosedür yöntemin çıktısında önemli bir gelişme sunmaktadır. Bu sayede bütün uydu görüntüsü için  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  görüntüleri hesaplanabilir. Sıcaklık-Emisivite ayrımı algoritmasından türetilen Maksimum spektral emisivite ( $\epsilon$ ) görüntüsü de  $Q_{rel}$  hesaplamasına dâhil edilebilir. Bu çalışmada görüntüler arasında dengeli bir karşılaştırma ve kıyaslama yapabilmek için emisiviteyi temsilen tek bir değer(0.96) tercih edilmiştir.

Hesaplanan tüm  $\Theta$  ve  $Q_{rel}$  görüntülerinde sıcak noktaları temsil eden sıcaklık değerleri  $\Theta_{max}$ 'a karşı  $Q_{rel-max}$  grafiği üzerinde sunulmuştur (Şekil 12a); şekilde Doğu Anadolu volkanları '+' işareti ile Dünya üzerindeki diğer volkanlar daire işaretleri ile gösterilmiştir. Log-Log grafikte,  $\Theta_{max}$ 'a karşı  $Q_{rel-max}$ 'ın doğrusal artışı gözlenmektedir. Üzerinde çalıştığımız volkanlar için hidrotermal/fümerol fazdaki aktivite ile patlayıcı/yayımlı aktiviteyi birbirinden net olarak ayırmak mümkündür (Şekil 12a: kırmızı kesikli çizgi); lakin bu ayırım, örnekleme artırıldığında farklılaşabilir. Bununla birlikte hem hidrotermal aktivitenin hem de patlayıcı / yayımlı aktivitenin şiddetinin artan  $\Theta$  -  $Q_{rel}$  değerleriyle orantılı olarak arttığını söylemek mümkündür. Şekil 12a'da Hidrotermal aktivite olarak belirtilen alandaki değerlerin göreceli olarak dağınık olduğu gözlenebilir. Bu dağınıklığın birkaç nedeni vardır:

- 1) Bu bölgeye düşen veri noktalarında hesaplanan sıcaklık anomalisi genellikle düşüktür (ASTER TIR bandında 90x90 metre grid çözünürlüğü için  $<18^\circ$  C). Hidrotermal çıkış noktalarının kapladığı alanın genellikle görüntü çözünürlüğünden daha küçük olması gerçekte olduğundan daha düşük sıcaklık değerleri okunmasına yol açar (ör., Lagios vd., 2007; Vaughan vd., 2012). Farklı tarihli görüntülerde düşük sıcaklıklar sıcak nokta üzerindeki rüzgâr gibi dış etkenlerden etkilenebilmektedir.



Şekil 12. İncelenen tüm volkanlar için a) sıcak noktalar üzerinde ölçülen Yüzey sıcaklığı anomalisine karşın Işıyan bağıl ısı akısının grafik dökümü ve b) Sıcak noktalarda ölçülen sıcaklığa karşılık uydu görüntülerinden hesaplanan ışıyan bağıl ısı akısı ilişkisinden gerçek sıcaklık kestirimi.

Figure 12. For all the volcanoes investigated here a) graphic depiction of surface temperature anomaly versus relative radiative heat flux over the hot sources, and b) Temperature estimation from the relation between satellite derived relative radiative heat flux and measured temperatures at sources.

2) Hidrotermal aktiviteyi tanımlayan farklı noktalardan alınan farklı değerler farklı sonuçlar vermektedir (örneğin Nisiros üzerindeki farklı kraterlerin değerleri).

3) Doğu Anadolu volkanları için çok sayıda uydu görüntüsü kullanılmıştır, hesaplanan sıcaklık değerlerinin mevsimsel farklılıklar gösterebileceği bilinmektedir (Ulusoy, 2016). Özellikle komşu pikseller ile hidrotermal noktalar arasındaki sıcaklık anomalisi farkı  $\Delta\theta$ , dolayısıyla hesaplanan  $Q_{rel}$  değerleri mevsimsel farklılıklar gösterir (Ulusoy, 2016).

Arazide sıcaklık ölçümü yapılan volkanlarda ölçülen sıcaklıklara, hesaplanan bağlı ısı akısı ( $Q_{rel}$ ) arasında kaba bir üssel ilişki olduğu görülmektedir (Şekil 12b – iç grafik). Bu korelasyon *Gerçek Sıcaklık* =  $7,2172 \times Q_{rel}^{0,7724}$  denklemiyle tanımlanır; ilişkinin belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0.7966'dır. Korelasyon, ilgili veri seti ile gerçek sıcaklığı artı/eksi %20,34 hata payı ile kestirebileceğimizi göstermektedir. Kullandığımız metodoloji ile  $Q_{rel}$  değerlerini hesapladığımız volkanlar üzerindeki gerçek sıcaklığa dair elde ettiğimiz üssel ilişkiyi kullanarak bir kestiriminde bulunmak mümkündür (Şekil 12b). Bu kestirim önemlidir, lakin kullandığımız yöntem algoritmasıyla jeotermal aramalarda gerçekçi yaklaşımlar yapmanın mümkün olduğunu göstermektedir. Daha fazla arazi ölçümü ile örneklemin artırılması, bu denklemin belirleme katsayısını düşürür, kestirimin hata payı azalır.

### **Volkanlar Üzerinde Hesaplanan Termal Anomaliler**

Ağrı Dağı üzerinde gece TIR görüntülerinden hesapladığımız en yüksek  $\Theta_{max}$  ve  $Q_{rel-max}$  değerleri Ahora kraterinin kuzeydoğusunda (Şekil 5a), 4200-4400 metre yüksekliklerdedir ve geniş bir alana yayılmıştır. Gözlenen maksimum anomali,  $\Theta_{max}$  6,3 °C ve 4.5 °C üzerinde anomali veren alan 89.100 m<sup>2</sup>'dir. Karakhanian vd. (2002) ve Feraud ve Özkocak (1993)'a göre 2 Temmuz 1840 yılı patlaması Ahora



kraterinden kaynaklanmış, Ahora vadisi boyunca piroklastik akıntılar ve/veya toprak kaymaları oluşmuştur. Tarihsel kayıtlarda (Alishan, 1890; Karakhanian vd., 2002), bu piroklastik akıntıların volkanın eteğindeki Ahora köyünü yıktığı ve kül altına gömdüğü rivayet edilmektedir. Krater kenarındaki yüksek sıcaklık anomalisi iki şekilde yoruma açıktır: 1) Tarihsel kayıtlara göre Anadolu'da bilinen en genç volkanik patlamanın yaşandığı krater, hala hidrotermal olarak aktiftir. Kuzey yamaçta buzun beklenenin aksine güney yamaca göre daha fazla çekildiği gözlenmektedir, bu durumda yüksek jeotermal girdinin katkısı olabilir; 2) Kuzey yamaçta buzulun erimesi kaynaklı sıvı hareketleri, gece görüntülerinde termal çaprazlanma nedeniyle yüksek sıcaklık anomalileri veriyor olabilir.

Ağrı, Tendürek dağları, Nemrut Kalderası ve Ege kıyılarına çok yakında yer alan Nisiros volkanında dikkate değer ölçekte termal anomaliler kaydedilmektedir (Şekil 5, 6a ve 6b). Bundan sonra gerçekleştirilecek gözlem ve takip amaçlı çalışmalarda, detaylı saha incelemeleri için bu anomaliler öncelikli alanlar addedilmelidir. Kaydedilen ölçekteki değerler iki nedenle dikkate değer önemdedir:

1) düşük seviyeli termal anomalilerin uydu görüntüleri ile tespit edilebileceğini göstermektedir ve 2) bu değerlerin sürekli takibi uzun süreli ve düşük maliyetli gözlem olanağı sağlayabilecek özelliğindedir.

Santorini, Demavend ve Taftan volkanlarında bilinen sıcak kaynaklar üzerinde tespit ettiğimiz anomaliler (Şekil 6c, 6d ve 8) her uydu görüntüsünde tespit edilebilen anomaliler değildir. Bu durum anomali kaynağının boyutları veya çevre kayaların emisivite değerleri kaynaklı olabilir. Eskandari vd. (2015) Demavend zirvesindeki fümerol bacalarını görüntü çözünürlüklerinin altında olduğu için belirleyemediklerini kaydetmektedir. İlgili anomali bu çalışmada da 17 yıllık bir dönemde sadece 1 görüntüde tespit edilebilmiştir; bu görüntünün de TIR anomalileri bağlamında oldukça gürültülü olduğu yadsınamaz (Şekil 8a, b). Anomali kaynağının net bir şekilde gürültüden ayırdedilebileceğini söylemek mümkün değildir.

Anomali kaynağının sıcaklığı arttıkça, kaynak bölge alanı genişledikçe tespit kolaylaşmaktadır. İncelediğimiz diğer örneklerde, Telica, Momotombo, Sinabung, Semeru, Tengger, Nyiragongo ve Nyamuragira volkanlarında anomali noktaları net bir şekilde haritalanabilmiştir. Momotombo, Sinabung ve Semeru örneklerinde görüldüğü üzere piroklastik akıntılar ve lav akıntılarını ve dahi bu akıntılar üzerindeki sıcaklık farklılıklarını haritalayabilmek mümkündür (Şekil 9e, 10a-f). Nyiragongo ve Nyamuragira örneklerinde görüldüğü gibi çok yüksek sıcaklıklı termal anomalilerin kaydı mümkündür, lakin bu anomalilerin etrafında kayıtcının kapasitesi ile ilgili sorunlar gözlenebilmektedir. Örneğin Nyiragongo ve Nyamuragira lav göllerinin oluşturduğu çok yüksek sıcaklı termal anomali uydu görüntüsünde anomalinin yaklaşık 250 – 500 metre doğusunda ve batısında çizgi halinde yaklaşık +15 °C'lik yalancı anomaliler gözlenmektedir (Şekil 11a: siyah oklar yalancı anomaliyi işaret etmektedir).

Termal uydu görüntüleri, yere dair jeofiziksel verinin doğrudan uydu görüntüsünden elde edildiği ender veri setlerindedir. On yıllardır termal uydu görüntülerinin uzamsal ve zamansal çözünürlüğü artmaktadır. Yüksek uzamsal çözünürlük termal haritalama ve tespit konusunda, yüksek zamansal çözünürlük de termal gözlem konusunda iddialıdır. Günümüz ve gelecek projeksiyonları bu ikiuç termal görüntü parametresinin gittikçe birbirine yaklaştığını ve hem uzamsal hem de zamansal çözünürlüğü yüksek termal uydu görüntülerin kullanımının hızla yaygınlaşacağını göstermektedir (ör., Ramsey ve Flynn, 2020). Bununa birlikte gelişen insansız hava araçları teknolojisiyle yüksek çözünürlüklü termal hava fotoğraflarının da büyük bir ivmeyle araştırma ve mühendislik alanına gireceği kesindir.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma kapsamında sunulan Doğu Anadolu volkanları ile ilgili incelemeler 113Y032 no'lu TUBITAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar hakemlere hızlı ve yapıcı görüşleri için, Ercan Selim Kolbakır'a Demavend Dağı'nın zirve fotoğrafını paylaştığı için teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

- Aiuppa, A., Bani, P., Moussallam, Y., Di Napoli, R., Allard, P., Gunawan, H., Hendrasto, M., Tamburello, G., 2015. First determination of magma-derived gas emissions from Bromo volcano, eastern Java (Indonesia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 206–213.
- Akyürek, Ö., 2020. Termal Uzaktan Algılama Görüntüleri İle Yüzey Sıcaklıklarının Belirlenmesi: Kocaeli Örneği. *Doğ. Afet. Çev. Derg.*, 6(2), 377–390.
- Alishan, G., 1890. Airarat (Venice).
- Arriaga M-CS, Tsompanakis Y, Samaniego F (2008) Geothermal manifestations and earthquakes in the caldera of Santorini, Greece: an historical perspective. *Proceedings of the XXXIII workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, pp 28–30, SGP-TR- 185.
- ASTER GDEM Validation Team, 2011. *ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results*, 26 pp.
- Atasoy, E., Terzioğlu, N., Mumcuoğlu, H.Ç., 1988. Nemrut volkanı jeolojisi ve jeotermal olanakları. T.P.A.O. Research Group Report, p. 109.
- Aydar, E., Gourgaud, A., Ulusoy, I., Digonnet, F., Labazuy, P., Sen, E., Bayhan, H., Kurttas, T., Tolluoglu, A.U., 2003. Morphological analysis of active Mount Nemrut stratovolcano, eastern Turkey: evidences and possible impact areas of future eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 123, 301–312.

- Barducci, A., Pippi, I., 1996. Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the "Grey body emissivity" method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(3), 681–695.
- Becker, F., Li, Z., 1995. Surface Temperature and Emissivity at Various Scales: Definition, Measurement and Related Problems. *Remote Sensing Reviews*, 12, 225–253.
- Coolbaugh, M.F., Kratt, C., Fallarco, 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, 350–359.
- Çapar, N., 2009. Landsat Uydu Görüntüleri Kullanılarak Jeotermal Kaynakların Araştırılması, Ankara Örneği. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul (yayımlanmamış).
- Çelik, B. ve Kalkan, K., 2012. Isıl Uzaktan Algılama Verileri Yardımıyla Yeryüzü Sıcaklıklarının Tespitinde Farklı Tek-Kanal Algoritmalarının Meteorolojik İstasyon Verileri Kullanılarak Karşılaştırılması: İstanbul Örneği. IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2012), 16–19 Ekim 2012, Zonguldak.
- Diker, C., 2014. Doğu Anadolu Volkanlarının Termal Kızılötesi Uydu Görüntüleri ile Uzun Süreli Termal Aktivitesinin Gözlenmesi. Y. Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara (yayımlanmamış).
- Elachi, C., 1987. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, New York 432 pp.
- Eneva, M., Coolbaugh, M., 2009. Importance of elevation and temperature inversions for the interpretation of thermal infrared satellite images used in geothermal exploration. *GRC Transactions*, 33, 467–470.
- Erenoglu, R.C., Arslan, N., Erenoglu, O., Arslan, E., 2019. Application of spectral analysis to determine geothermal anomalies in the Tuzla region, NW Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 439.

- Erell, E., Leal, V., Maldonado, E., 2005. Measurement of Air Temperature in the Presence of a Large Radiant Flux: An Assessment Of Passively Ventilated Thermometer Screens. *Boundary-Layer Meteorology*, 114, 205–231.
- Eskandari, A., De Rosa, R., Amini, S., 2015. Remote sensing of Damavand volcano (Iran) using Landsat imagery: Implications for the volcano dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 306, 41–57.
- EUMeTrain, 2017. EUMeTrain Product Tutorial on Land Surface Temperature. EUMETNET ([https://www.eumetnet.eu/emc\\_training\\_bulleti/eumetrain-product-tutorial-land-surface-temperature/](https://www.eumetnet.eu/emc_training_bulleti/eumetrain-product-tutorial-land-surface-temperature/)).
- Feraud J. and Özkocak Ö., 1993. Les volcans actifs de Turquie: guide géologique et itinéraires d'excursions. *L'Assoc. Volc. Européenne (LAVE)*, 2, 1–82.
- Florinsky, I.V., Kulagina, T.B., Meshalkina, J.L., 1994. Influence of topography on landscape radiation temperature distribution. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3147–3153.
- Ganas, A., Lagois, E., Petropoulos, G., Psiloglou, B., 2010. Thermal imaging of Nisiros volcano (Aegean Sea) using ASTER data: estimation of radiative heat flux. *Int. J. Remote Sens.*, 31 (15), 4033–4047.
- Gaonac'h, H., Vandemeulebrouck, J., Stix, J., Halbwachs, M., 1994. Thermal infrared satellite measurements of volcanic activity at Stromboli and Vulcano. *J. Geophys. Res.*, 99, 9477–9485.
- Gillespie, A.R., 1985. Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS. The TIMS Paper presented at the Data User's Workshop, JPL Publication, 86(38): 29–44.
- Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothorn, J.S., Hook, S., Kahle, A.B., 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36 (4), 1113–1126.
- Global Volcanism Program (GVP), 2012. Report on Tengger Caldera (Indonesia). In: Sennert, S K (ed.), *Weekly Volcanic Activity Report*, 28 March-3 April 2012. Smithsonian Institution and US Geological Survey.

- Global Volcanism Program (GVP), 2013. Telica (344040), Momotombo (344090), Nyirogongo (223030), Semeru (263300) in *Volcanoes of the World*, v. 4.8.6 (20 Feb 2020). Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 25 Mar 2020 <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>.
- Global Volcanism Program (GVP), 2014. Report on Sinabung (Indonesia). In: Sennert, S K (ed.), *Weekly Volcanic Activity Report*, 8 January-14 January 2014. Smithsonian Institution and US Geological Survey.
- Global Volcanism Program (GVP), 2017. Report on Momotombo (Nicaragua) (Venzke, E., ed.). *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 42:1 Smithsonian Institution.
- Green, A.A., Craig, M.D., 1985. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals. Paper presented at the Proceedings of the airborne imaging spectrometer data analysis workshop. Pasadena, CA. p. 111–119.
- Harris, A.J.L., Stevenson, D.S., 1997. Thermal observations of degassing open conduits and fumaroles at Stromboli and Vulcano using remotely sensed data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 76, 175–198.
- Haurwitz, B., 1945. *Dynamic Meteorology*. McGraw-Hill, New York, N.Y. 365 pp.
- Hernandez-Baquero, E., 2000. *Characterization of the Earth's Surface and Atmosphere from Multispectral and Hyperspectral Thermal Imagery* (Ph.D. Dissertation) Rochester Institute of Technology, Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Hewson, R., Mshiu, E., Hecker, C., van der Werff, H., van Ruitenbeek, F., Alkema, D., van der Meer, F., 2020. The application of day and night time ASTER satellite imagery for geothermal and mineral mapping in East Africa. *Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinformation*, 85, 101991.
- Holben, B.N., Justice, C.O., 1980. The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, 1191–1200.

- Hook, S.J., Gabell, A.R., Green, A.A., Kealy, P.S., 1992. A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies. *Remote Sens. Environ.*, 42, 123–135.
- Hook, S.J., Abbott, E.A., Grove, C., Kahle, A.B., Palluconi, F., 1999. Use of multi-spectral thermal infrared data in geological studies. In: Renez, A.N. (Ed.), *Manual of Remote Sensing*, third ed. *Remote Sensing for Earth Sciences 3*. John Wiley and Sons, New York, pp. 59–110.
- Hynek, B.M., McCollom, T.M., Marcucci, E.C., Brugman, K., Rogers, K.L., 2013. Assessment of environmental controls on acid-sulfate alteration at active volcanoes in Nicaragua: Applications to relic hydrothermal systems on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118, 2083–2104.
- INETER, 1999. Volcanoes en Nicaragua. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (<https://2.ineter.gob.webserverni/vol/dep-vol.html>). Erişim tarihi: 14 Temmuz 2020.
- Johnson, B.R., Young, S.J., 1998. In-scene atmospheric compensation: application to SEBASS data collected at the ARM Site. Technical Report. Space and Environment Technology Center, The Aerospace Corporation.
- Kahle, A.B., Madura, D.P., Soha, J.M., 1980. Middle infrared multispectral aircraft scanner data: analysis for geological applications. *Applied Optics*, 19(14), 2279–2290.
- Karakhianian, A., Djrbashian, R., Trifonov, V., Philip, H., Arakelian, S., Avagian, A., 2002. Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113(1–2), 319–344.
- Käfer, P.S., Rolim, S.B.A., Heinz, L.V.O., Iglesias, M.L., da Rocha, N.S., Diaz, L.R., 2020. Assessment of single-channel algorithms for land surface temperature retrieval at two southern Brazil sites. *J. Appl. Remote Sens.*, 14(1), 016507.
- Kealy, P.S., Hook, S.J., 1993. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperatures. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 31 (6), 1155–1164.

- Lagios, E., Vassilopoulou, S., Sakkas, V., Dietrich, V., Damiata, B.N., Ganas, A., 2007. Testing satellite and ground thermal imaging of low-temperature fumarolic fields: The dormant Nisyros Volcano (Greece). *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 62, 447–460.
- Lemma, K.G., 2019. Assessing The Potential of ASTER Night-time Surface Temperature And Derived Apparent Thermal Inertia for Geological Mapping within Haib, Namibia. MSc Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands (unpublished).
- Matsunaga, T.A., 1994. Temperature-Emissivity Separation Method Using an Empirical Relationship between the Mean, the Maximum, and the Minimum of the Thermal Infrared Emissivity Spectrum. *Journal of Remote Sensing Soc. Japan*, 14(2), 230–241 (İngilizce özet ile Japonca).
- Mayer, P., Itten, K.I., Kellenberger, T., Sandmaier, S., Sandmaier, R., 1993. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(4), 17–28.
- McCollom, T.M., Robbins, M., Moskowitz, B., Berquó, T.S., Jöns, N., Hynek, B.M., 2013. Experimental study of acid-sulfate alteration of basalt and implications for sulfate deposits on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118, 577–614.
- Minnaert, M., 1941. The reciprocity principle in lunar photogrammetry. *Astrophysics Journal*, 93, 403–410.
- Nichol, J., Law, K.H., Wong, M.S., 2006. Empirical correction of low Sun angle images in steeply sloping terrain: a slope-matching technique. *International Journal of Remote Sensing*, 27(3), 629–635.
- Niziol, T.A., 1987. Operational Forecasting of Lake Effect Snowfall in Western and Central New York. *Weather and Forecasting*, 2, 310–321.
- Ölmez, E., Ercan, T., Yildirim, T., 1994. Volcanology and geothermal energy possibilities of the Tendürek area (Diyadin, Zilan, Çaldıran), eastern Anatolia (Turkey). 47th Geological Congress of Turkey, Ankara. Abstracts vol. 47, p. 106.



- Pavlidou, E., van der Meijde, M., van der Werff, H., Hecker, C., 2016. Finding a needle by removing the haystack: A spatio-temporal normalization method for geophysical data. *Computers & Geosciences*, 90 (Part A), 78–86.
- Prévost, P., 1791. Mémoire sur l'équilibre du feu. *Journal de Physique*, Paris: Bachelier, 38, 314–322.
- Ramsey, M.S., Flynn, I.T.W., 2020. The Spatial and Spectral Resolution of ASTER Infrared Image Data: A Paradigm Shift in Volcanological Remote Sensing. *Remote Sensing*, 12, 738.
- Retief, S.J.P., Willers, C.J., Wheeler, M.S., 2003. Prediction of thermal crossover based on imaging measurements over the diurnal cycle. *Proc. SPIE 5097, Geo-Spatial and Temporal Image and Data Exploitation III*.
- Rolim, S.B.A., Grondona, A., Hackmann, C.L., Rocha, C., 2016. Review of Temperature and Emissivity Retrieval Methods: Applications and Restrictions. *American Journal of Environmental Engineering*, 6(4A), 119– 128.
- Sabins, F.F., 1997. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. third ed. W. H. Freeman and Company, New York, 494 pp.
- Sekioka, M., Yuhara, K., 1974. Heat flux estimation in geothermal areas based on the heat balance of the ground surface. *J. Geophys. Res.*, 79, 2053–2058.
- Shakeri, A., Moore, F., Kompani-Zare, M., 2008. Geochemistry of the thermal springs of Mount Taftan, southeastern Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(4), 829–836.
- Shakeri, A., Ghoreyshinia, S., Mehrabi, B., Delavari, M., 2015. Rare-earth elements geochemistry in springs from Taftan geothermal area SE Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 49–61.
- Smith, J.A., Lin, T.L., Ranson, K.J., 1980. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, 1183–1189.
- Solikhin, A., Thouret, J.-C., Gupta, A., Harris, A.J.L., Liew, S.C., 2012. Geology, tectonics, and the 2002–2003 eruption of the Semeru volcano, Indonesia: Interpreted from high-spatial resolution satellite imagery. *Geomorphology*, 138, 364–379.

- Spampinato, L., Ganci, G., Hernández, P.A., Calvo, D., Tedesco, D., Pérez, N.M., Calvari, S., Del Negro, C.D., Yalire, M.M., 2013. Thermal insights into the dynamics of Nyiragongo lava lake from ground and satellite measurements. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 5771–5784.
- Şekertekin, A., 2019. Işınım Transferi Denklemi Baz Alınarak Yer Yüzey Sıcaklığının Landsat-8 Uydu Verileri ile Haritalanması. *AKÜ FEMÜBİD* 19, 035506, 769–777.
- Şener, E., 2016. Burdur Gölü yüzey suyu sıcaklığı mevsimsel değişiminin Landsat 8 uydu görüntüleri kullanılarak belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(2), 67–73.
- Teillet, P.M., Guindon, B., Goodenough, D.G., 1982. On the slope–aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8, 1537–1540.
- Tetëns, O., 1930. Über einige meteorologische Begriffe. *Z. Geophys.*, 6, 297–309.
- Ulusoy, İ., Labazuy, P., Aydar, E., Ersoy, O., Çubukçu, E., 2008. Structure of the Nemrut caldera (Eastern Anatolia, Turkey) and associated hydrothermal fluid circulation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174(4), 269–283.
- Ulusoy, İ., Labazuy, P., Aydar, E., 2012. STcorr: an IDL code for image based normalization of lapse rate and illumination effects on nighttime TIR imagery. *Computers and Geosciences*, 43, 63–72.
- Ulusoy, İ., Labazuy, P., Aydar, E., 2013. Multi-directional derivation of self-potential/elevation gradient (Ce) maps – swirl procedure. *Near Surface Geophysics*, 11(3), 275–282.
- Ulusoy, İ., 2016. Temporal radiative heat flux estimation and alteration mapping of Tendürek volcano (eastern Turkey) using ASTER imagery. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327, 40–54.

- 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. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 33, 255– 269.
- Vaughan, R.G., Kervyn, M., Realmuto, V., Abrams, M., Hook, S.J., 2008. Satellite measurements of recent volcanic activity at Oldoinyo Lengai, Tanzania. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 173, 196–206.
- Vaughan, R.G., Keszthelyi, L.P., Lowenstern, J.B., Jaworowski, C., Heasler, H., 2012. Use of ASTER and MODIS thermal infrared data to quantify heat flow and hydrothermal change at Yellowstone National Park. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 233–234, 72–89.
- Vougioukalakis, G., 2007. Santorini Guide to the Volcano. 82 pp. Scientific advisors: M. Fytikas, P. Dalambakis and N. Kolios. Published by The Institute for the Study and Monitoring of the Santorini Volcano (I.S.M.O.SA.V.).
- Yürür, M.T., 2006. The positive temperature anomaly as detected by Landsat TM data in the eastern Marmara Sea (Turkey): possible link with the 1999 Izmit earthquake. *International Journal of Remote Sensing*, 27(6), 1205–1218.
- Warner, T.A., Chen, X., 2001. Normalisation of Landsat thermal imagery for the effects of solar heating and topography. *International Journal of Remote Sensing*, 22(5), 773–788.
- Watson, K., 1973. Periodic heating of a layer over a semi-infinite solid. *Journal of Geophysical Research*, 78, 5904–5910.
- Watson, K., 1975. Geologic applications of thermal infrared images. *Proceedings of the IEEE* 63, 128–137.
- Watson, K., 1992. Spectral Ratio Method for Measuring Emissivity. *Remote Sensing of the Environment*, 42, 113–116.
- Zhao, H., Ji, Z., Li, N., Gu, J. ve Li, Y. 2017. Target Detection over the Diurnal Cycle Using a Multispectral Infrared Sensor. *Sensors (Basel)*, 17(1), 56.