



Investigation of the Thermal Anomaly Precursor in the 2017 Azgeleh Earthquake in Kermanshah, Iran

Mostafa Heidari^a, Ahmad Mazidi^{a,b}, Iman Rousta^b

^a Master in Remote Sensing, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

^b Associate Professor in Climatology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

Received: 15 July 2023

Revised: 10 August 2023

Accepted: 18 August 2023

Abstract

The warming of the air and the earth before the occurrence of earthquakes is a precursor that has been known since ancient times. Today, the truth of this myth, with the scientific title of thermal anomaly, has been proven in many earthquakes. The present study aims to investigate the occurrence of the anomaly in the long-term period of three years before the 2017 Azgeleh earthquake, using the simple method of deviation from the moving average. The results showed that one or two weeks before the occurrence of the earthquake, a rare or unprecedented daily anomaly occurred in both the meteorological parameters of air temperature, soil temperature, and air humidity at the synoptic station of Tazeh-Abad, as well as in the satellite parameter of the land surface temperature. These thermal anomalies can be related to the occurrence of the earthquake. The spatial investigation of the land surface temperature anomaly that occurred 15 days before the earthquake, revealed that on that day, the land boundary between the Arabian and Eurasian plates in the west of Iran was warm, and a hot area appeared in the center of Iraq with elongation toward the epicenter of the earthquake. Other tests showed that this simple anomaly detection method is also able to identify the thermal anomaly before the 2003 Bam and 2010 Mohammad-Abad Rigan earthquakes, both in Kerman province. The Azgeleh earthquake was a typical earthquake of the active and densely populated Zagros zone. This type of research hopes to better understand the precursors of earthquakes in each zone, with the aim of realizing the dream of earthquake prediction.

Keywords: Thermal anomaly, Earthquake prediction, Earthquake precursors, Land surface temperature, Moving average deviation method, Zagros region of Iran

*. Corresponding author: Ahmad Mazidi

Email: mazidi@yazd.ac.ir

Tel:+989133531135

How to cite this Article: Heidari, M., Mazidi, A., & Rousta, I. (2022). Investigation of the Thermal Anomaly Precursor in the 2017 Azgeleh Earthquake in Kermanshah, Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2), 93-114.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)





دسترسی آزاد


DOI: 10.22067/geoh.2023.83439.1397

مقاله پژوهشی

بررسی پیش‌نشانگر ناهنجاری حرارتی در زمین‌لرزه ۱۳۹۶ ازگله کرمانشاه

مصطفی حیدری - کارشناس ارشد سنجش‌ازدور، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران 

دکتر احمد مزیدی^۱ - دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران 

دکتر ایمان روستا - دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲۷

چکیده

گرم شدن هوا و زمین پیش از رخداد زلزله‌ها، پیش‌نشانگری است که از دوران باستان شناخته شده است. امروزه درستی این افسانه، با عنوان علمی ناهنجاری حرارتی، در زلزله‌های بسیاری به اثبات رسیده است. هدف این پژوهش، بررسی بروز این ناهنجاری در دوره بلنمدت سه ساله پیش از زلزله ۱۳۹۶ ازگله کرمانشاه با روش ساده انحراف از میانگین متحرک است. نتایج نشان داد که در یکی دو هفته پیش از رخداد این زلزله، هم در پارامترهای هواشناسی دمای هوا، دمای خاک و رطوبت هوا در ایستگاه همدید تازه‌آباد و هم در پارامتر ماهواره‌ای دمای سطح زمین، ناهنجاری روزانه کم‌سابقه یا بی‌سابقه‌ای رخ داده است. این ناهنجاری‌ها حرارتی می‌تواند با رخداد زلزله در پیوند باشد. بررسی مکانی ناهنجاری در دمای سطح زمین که ۱۵ روز پیش از زلزله رخ داده بود، روشن ساخت که در آن روز، مرز خشکی دو صفحه عربستان و اوراسیا در غرب ایران، گرم بوده و ناحیه‌ای داغ در مرکز عراق با کشیدگی به سمت رومرکز زلزله پدیدار شده است. دیگر آزمون‌ها نشان داد این روش ساده کشف ناهنجاری، قادر به شناسایی ناهنجاری حرارتی پیش از زلزله‌های ۱۳۸۲ بم و ۱۳۸۹ محمدآباد ریگان، هر دو در استان کرمان نیز هست. زلزله ازگله، شاخصی برای زلزله‌های منطقه فعال و پرجمعیت زاگرس است. امید این دست پژوهش‌ها، شناخت بهتر پیش‌نشانگرهای زلزله در هر منطقه با هدف تحقق رؤیای پیش‌بینی زلزله است.

کلیدواژه‌ها: ناهنجاری حرارتی، پیش‌بینی زلزله، پیش‌نشانگرهای زلزله، دمای سطح زمین، روش انحراف از میانگین متحرک، زاگرس ایران

مقدمه

زلزله از ویرانگرترین مخاطرات است. بشر دریافته که پیش از زلزله‌های بزرگ، نشانه‌هایی پدیدار می‌شود (جدول ۱). هدف از بررسی این پدیده‌ها، پیش‌بینی زلزله‌های آینده است. امروز، هرگونه تغییر قابل‌اندازه‌گیری در میانگین مشاهدات محیطی، پیش از رخداد زلزله را با نام پیش‌نشانگر زلزله می‌شناسیم. یکی از آن‌ها، ناهنجاری حرارتی است که مهم‌ترین پارامتر آن، دمای سطح زمین (LST)^۱ است و عموماً یکی دو هفته پیش از رخداد زلزله‌های بزرگ، چند درجهٔ سلسیوس در رومرکز افزایش می‌یابد (Zhao, Pan, Sun, Guo, Zhang, & Feng, 2021).

با آغاز عصر فضا و پرتاب ماهواره‌های دیدبانی زمین در نیمهٔ دوم سدهٔ بیستم، علم سنجش‌ازدور پا گرفت که هنر و فن‌آوری کسب اطلاعات از پدیده‌ها از راه دور است. در دههٔ ۱۹۸۰، برای نخستین بار، تغییر دمای سطح زمین پیش از زلزله‌های آسیای میانه در تصاویر حرارتی دیده شد؛ و این‌چنین، تاریخچهٔ کاربرد سنجش‌ازدور حرارتی در بررسی پیش‌نشانگر ناهنجاری حرارتی در زلزله‌ها گشوده شد (Tronin, 2010).

کلید پیش‌بینی زلزله، پایش پیش‌نشانگرها و کشف ناهنجاری در آن‌ها با تحلیل سری زمانی است. هر چه شدت ناهنجاری بیشتر باشد، زلزله‌ای با بزرگای بیشتر و یا عمقی کمتر رخ می‌دهد (Shen, Zhang, Hong, Jing, Zhao, 2013)؛ اما منتقدان معتقدند مبنای نظری پیش‌نشانگرها و مکانیسم ناهنجاری‌ها کاملاً روشن نیست؛ و زلزله‌های بزرگ نادرند و قابل تکرار نیستند. همچنین داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های سنجش‌ازدوری دارای عدم قطعیت‌اند و با چالش‌های فراوانی روبرو هستند (Picozza, Conti, & Sotgiu, 2021).

جدول ۱- فهرست کلی پیش‌نشانگرهای رایج زلزله (Conti, Picozza, & Sotgiu, 2021)

Table1- General list of common earthquake precursors

سپهر	پیش‌نشانگر
سنگ‌کره	- وقوع پیش‌لرزه و تغییر لرزه‌خیزی - جابجایی و دگرشکلی زمین
آب‌کره	- تغییر دبی رود و چشمه - تغییر سطح آب‌های زیرزمینی
هواکره	- تغییر دما و رطوبت و فشار هوا - تغییر محتوای گازهای جو
سایر	- تغییر محتوای کل الکترون و شب‌تابی - تغییر گرانش زمین
	- تغییر دما و رطوبت سطح و اعماق زمین - تغییر رسانایی و مقاومت خاک - تغییر دمای آب چاه، رود، چشمه و دریا - تغییر عناصر شیمیایی آب چشمه و چاه - تغییر محتوای هواویز - تشکیل ابر زلزله - آشفستگی میدان الکتریکی یا مغناطیسی زمین - تغییر رفتار جانوران

¹ Land Surface Temperature

گرم شدن هوا و زمین پیش از زلزله‌ها، از دوران چین باستان شناخته شده بود (Feng & Wu, 2010). اعتقاد بر این است که تنش موجود در پوسته زمین و افزایش آن پیش از زلزله، سبب افزایش LST و در نتیجه افزایش تابش مادون‌قرمز حرارتی (TIR)^۱ می‌شود (Saraf, Rawat, Choudhury, Dasgupta, Das, 2009). این افزایش تابش TIR که توسط ماهواره‌ها قابل تشخیص بوده و بروز آن پیش از زلزله‌ها بارها گزارش شده است، ناهنجاری حرارتی خوانده می‌شود (Freund, et al., 2005).

تاکنون چندین فرضیه برای توجیه گرمای پیش از زلزله ارائه شده است؛ از جمله تراوش گاز و بخار آب از زمین در اثر باز شدن حفره و شکاف‌های درون زمین و انتقال گرمای همرفتی با تشدید اثر گلخانه‌ای محلی (Qiang, Xu, & Dian, 1991)، ایجاد گرما در اثر اصطکاک بین بلوک‌های گسل (Bhardwaj, et al., 2017)، گرمایی در واکنش یونیزاسیون هوا توسط گاز مادون منتشر شده از زمین (Pulinets, 2004) و جدا شدن الکترون‌های آنیون اکسیژن از سنگ‌های آذرین که سبب تابش امواج مادون‌قرمز میانی (MIR)^۲ و ثبت آن در تصاویر حرارتی به صورت گرما می‌شود (Freund, 2002).

بررسی ناهنجاری حرارتی در زلزله‌ها، ادبیاتی غنی دارد (Tramutoli, et al., 2015). نخستین مورد در تاریخ علم، متعلق به (Gornyi, Salman, Tronin, & Shilin, 1988) است که بروز آن پیش از زلزله‌های آسیای میانه را در تصاویر حرارتی ماهواره NOAA نشان دادند. (Qiang, Xu, & Dian, 1997) با تصاویر ماهواره Meteosat به افزایش دمای زمین تا ۶ درجه سلسیوس در هفته منتهی به زلزله‌ای در چین پی بردند. (Tronin, Hayakawa, & Molchanov, 2002) با بررسی هفت سال تصاویر حرارتی ماهواره NOAA در شرق آسیا، بین ناهنجاری‌های مثبت حرارتی در گسل‌ها و رخداد زلزله‌های کم‌عمق در چین و ژاپن، همبستگی خوبی یافتند.

(Ouzounov, & Freund, 2004) برای اولین بار با محصولات سنجنده MODIS، ثابت کردند که ۶ روز پیش از زلزله گجرات هند، LST در رومرکز تا ۴ درجه سلسیوس افزایش یافته است. (Saraf, et al., 2008) با کاوش ده زلزله ایران از جمله زلزله بم روی تصاویر حرارتی ماهواره NOAA، دریافتند که ۱۰ تا ۱ روز پیش‌ازین زلزله‌ها، افزایشی در LST رومرکز با شدت ۲ تا ۱۳ درجه سلسیوس رخ داده است.

(Saradjian, & Akhoondzadeh, 2011) با محصول LST سنجنده MODIS، بروز ناهنجاری حرارتی، ۲۰ تا ۱ روز پیش از زلزله‌های بم، زرنند و بروجرد را با شدتی تا ۳ درجه سلسیوس شناسایی کردند. (Akhoondzadeh, 2014) بروز ناهنجاری LST در ۸ روز پیش از زلزله سراوان را کشف کرد. (Bellaoui, Hassini, & Bouchouicha, 2017) با بررسی پنج سال تصاویر حرارتی شبگاه سنجنده MODIS و آمار

¹ Thermal Infrared

² Mid-Infrared

دمای هوای سه ایستگاه هواشناسی نزدیک، ناهنجاری حرارتی مثبتی را به‌طور هم‌زمان در هر دو سری داده، پیش از زلزله‌ای در الجزایر یافتند.

(Barkat, et al., 2018) در محصول LST سنجنده MODIS، افزایشی ۳ تا ۱۰ درجه سلسیوس در یکی دو هفته پیش از سه زلزله پاکستان یافتند. (Khalili, Alavi Panah, Abdollahi Eskandar, 2019) با کاوش همین محصول در دوره ده‌ساله، رومرکز زلزله سراوان را در سال رخداد این زلزله و در روزهای پیش و پس‌از آن، ناهنجار دیدند.

(Genzano, Filizzola, Hattori, Pergola, & Tramutoli, 2021) با بررسی ۱۱ سال تصاویر حرارتی شبگاه ماهواره‌های MTSAT، دریافتند که ۶۲ درصد ناهنجاری‌های حرارتی رخ داده در ژاپن، به زلزله‌ای با بزرگای دست‌کم ۶ ختم شده است. عین همین پژوهش را (Filizzola, et al., 2022) با بررسی ۱۲ سال تصاویر حرارتی شبگاه ماهواره Meteosat روی ترکیه انجام دادند و به نسبت ۷۴ درصد برای زلزله‌های با بزرگای دست‌کم ۴ رسیدند.

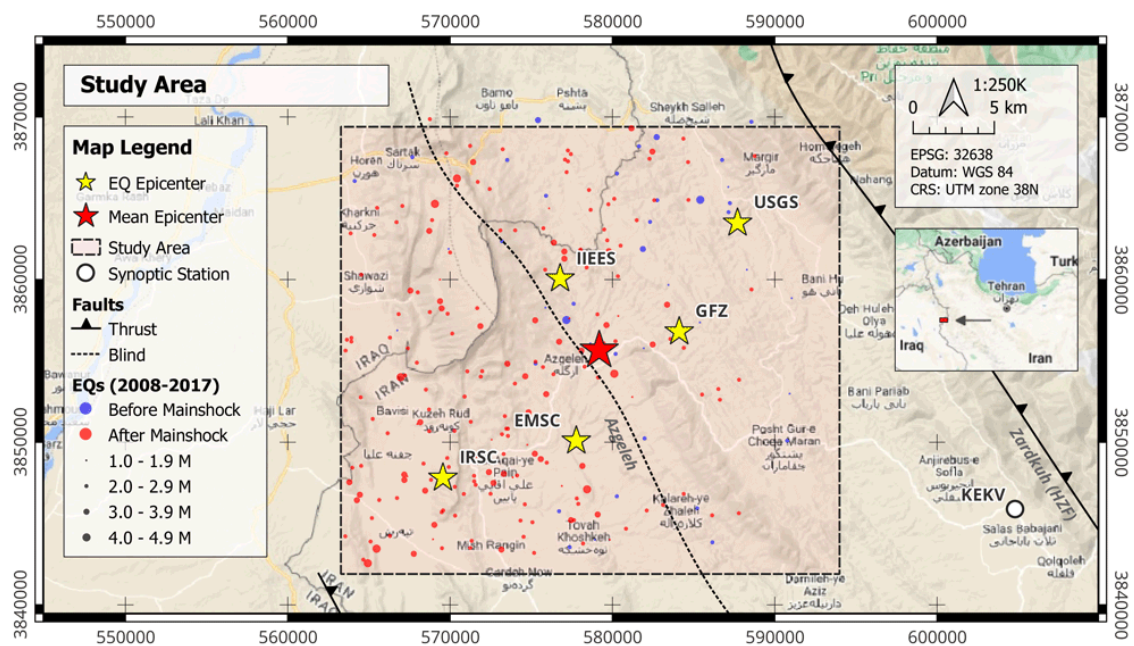
(Askari, Hafezi, Rahimi tabar, & Ansari, 2010) در تصاویر حرارتی ماهواره NOAA، افزایش شدیدی در ۶ روز پیش و در رومرکز زلزله راور دیدند. (Choubsaz, Akhoondzadeh, & Saradjian, 2015) نیز با همین تصاویر، بروز ناهنجاری حرارتی در یکی دو هفته پیش از سه زلزله اهر، کاکلی و سراوان را یافتند. (Saber Mahani, & Sepahvand, 2017) با محصول LST شبگاه سنجنده MODIS، بروز ناهنجاری حرارتی در ۲ روز پیش از زلزله محمدآباد ریگان را شناسایی کردند. (Khoshgoftar, Saradjian, 2021) در محصول LST سنجنده MODIS و سه پیش‌نشانگر دیگر، انواع ناهنجاری در دو زلزله بم و ازگله را تشخیص دادند؛ چنان که بازه زمانی و بزرگای هر دو، قابل پیش‌بینی بوده است.

ایران در کمربند زلزله آلپ هیمالیا و در برخوردگاه صفحه عربستان با اوراسیا قرار دارد و زلزله‌خیز است. واپسین زلزله شدید ایران، زلزله ۱۳۹۶ ازگله کرمانشاه است. در این پژوهش، یک بار دیگر بروز پیش‌نشانگر حرارتی در این زلزله، ولی برای اولین بار در دوره‌ای بلندمدت و با روشی ساده و با کمک داده‌های ایستگاه همدید، بررسی خواهد شد. زلزله ازگله، شاخصی برای زلزله‌های منطقه لرزه‌ای زاگرس است. هر دو سال یک بار، زلزله‌ای با بزرگای دست‌کم ۶، سبب جان باختن و بی‌خانمانی ساکنان این منطقه می‌شود. منطقه زاگرس، ده استان و یک‌چهارم جمعیت کشور را در خود جای داده است. هر شناختی از فرآیند پیش‌نشاندگی زلزله‌ها با رویکرد هشدار یا پیش‌بینی، می‌تواند منجر به حفظ جان و مال مردم و مدیریت بهتر بحران گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مرکز ثقل رومرکزهای زلزله در گزارش‌ها (جدول ۲)، به‌عنوان مرکز منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. این نقطه در ۲ کیلومتری جهت ENE شهر ازگله قرار دارد. مرز منطقه به اندازه یک انحراف معیار از پراکندگی رومرکزها، دورتر از رومرکزهای پیرامونی کشیده شد. منطقه مورد مطالعه، ۳۰/۷ کیلومتر طول و ۲۷/۵ کیلومتر عرض دارد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه، رومرکزهای زلزله ازگله و ایستگاه سینوپتیک تازه‌آباد.

Fig.1. The location of the study area, epicenters of Azgoleh earthquake and Tazehabad synoptic station

زلزله مورد مطالعه

روز یکشنبه، ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ ساعت ۱۸:۱۸ به وقت جهانی، برابر با ۲۱ آبان ۱۳۹۶ ساعت ۲۱:۴۸ به وقت محلی، زلزله‌ای با بزرگای ۷/۳ در غرب کشور در نزدیکی شهر ازگله در شهرستان ثلاث باباجانی در استان کرمانشاه و در چند کیلومتری مرز عراق به وقوع پیوست.

زلزله ازگله، مرگبارترین زلزله جهان در سال ۲۰۱۷ و خونبارترین زلزله ایران از سال ۲۰۰۳ است که در آن دست‌کم ۶۳۰ نفر جان باختند و بیش از ۹ هزار نفر مجروح شدند. همچنین، چند شهر به‌طور کامل یا

جزئی تخریب شد و ۳۰ هزار واحد مسکونی روستایی آسیب جدی دید و در مجموع زندگی ۴۳۰ هزار نفر تحت تأثیر قرار گرفت (Maghsoudi & Moshtari, 2021) و در پی عدم تاب‌آوری مردم، پیامدهای ناگوار اجتماعی، خانوادگی، اقتصادی، بهداشتی و روانی به بار آورد (Shahbazi, Papzan, & Gholami, 2021). ویژگی‌های لرزه‌شناسی این زلزله از آخرین نسخه گزارش‌های بین‌المللی گرفته شد (جدول ۲ و شکل ۱).

جدول ۲- ویژگی‌های لرزه‌شناسی زلزله ۱۳۹۶ از گله.

Table2- Seismological characteristics of the 2017 Azgeleh earthquake

منبع گزارش	بزرگا (M)	عمق (km)	عرض (N)	طول (E)	زمان (UTC)	کد
مرکز لرزه‌نگاری کشوری، دانشگاه تهران	۷/۳	۱۸	۳۴/۷۷	۴۵/۷۶	۱۸:۱۸:۱۶/۴	IRSC
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی ایران	۷/۳	۱۸	۳۴/۸۸	۴۵/۸۴	۱۸:۱۸:۱۷/۸	IIES
سازمان زمین‌شناسی آمریکا	۷/۳	۱۹	۳۴/۹۱	۴۵/۹۶	۱۸:۱۸:۱۷/۲	USGS
مرکز زلزله‌شناسی اروپا و مدیترانه	۷/۳	۲۴	۳۴/۷۹	۴۵/۸۵	۱۸:۱۸:۱۷/۳	EMSC
مرکز پژوهشی علوم زمین آلمان	۷/۳	۲۲	۳۴/۸۵	۴۵/۹۲	۱۸:۱۸:۱۷/۲	GFZ
-	۷/۳	۲۰	۳۴/۸۴	۴۵/۸۷	۱۸:۱۸:۱۷/۲	میانگین

دریافت داده‌های هواشناسی

نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی همدید، در ۱۱ کیلومتری منطقه مورد مطالعه، ایستگاه تازه‌آباد با کد KEKV، شناسه ۹۹۴۲۸ و ارتفاع ۱۲۲۶ متر از سطح دریا است (شکل ۱). انواع پارامترهای دمای هوا (AT)^۱، رطوبت هوا و دمای خاک این ایستگاه برای دوره سه ساله ۲۰۱۵ تا پایان ۲۰۱۷ از سازمان هواشناسی کشور (IRIMO)^۲ دریافت شد. داده‌های این ایستگاه مفقودی کمی دارد ولی از لحظه زلزله تا دو هفته قطع می‌شود.

دریافت داده‌های ماهواره‌ای

دو سنجنده MODIS^۳ در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (NASA)^۴ روی ماهواره‌های Terra و Aqua با هدف پایش تغییرات زمین در مدار قرار گرفتند. آن‌ها در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری و در مداری شبه‌قطبی و خورشیدآهنگ با زمان بازدید ۱۶ روزه قرار دارند و به ترتیب

¹ Atmospheric Temperature

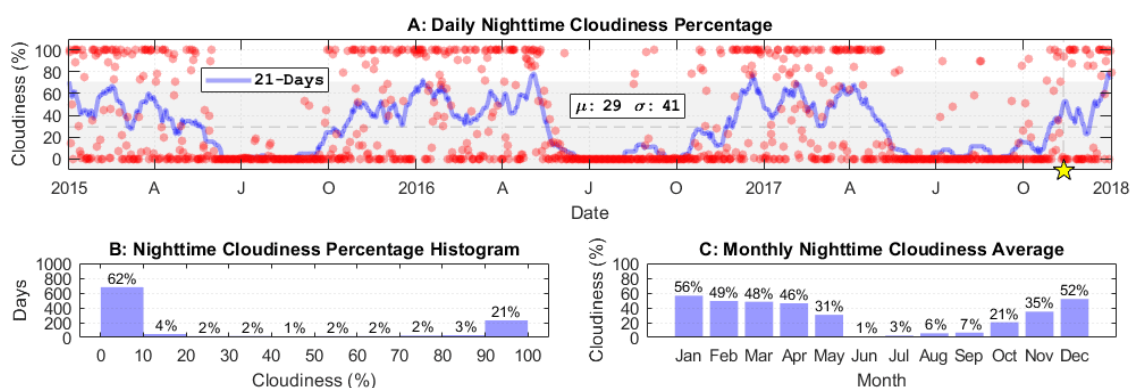
² Islamic Republic of Iran Meteorological Organization

³ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

⁴ National Aeronautics and Space Administration

در مدار نزولی با گذر ۱۰:۳۰ و مدار صعودی با گذر ۱۳:۳۰ به وقت محلی بر استوا، با توان تفکیک مکانی دست‌کم ۱ کیلومتر، در ۳۶ باند تصویر برمی‌دارند (Justice, et al., 2002).

محصول دما و گسیلمندی سطح زمین در ماهواره Aqua با نام MYD11A1 به‌طور روزانه با توان تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و در گستره جهانی تولید می‌شود. در این پژوهش از لایه دمای سطح زمین (LST) شبگاه از نسخه ۶ استفاده شد. اگرچه این محصول توان اندازه‌گیری در آسمان ابری را ندارد؛ ولی ۶۲ درصد از شب‌ها، ابرناکی منطقه مورد مطالعه کمتر از ۱۰ درصد است (شکل ۲). این محصول در انواع پوشش‌های زمین و شرایط مختلف آب‌وهوایی با داده‌های زمینی اعتبارسنجی شده و صحت LST شبگاه آن با خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)^۱ کمتر از ۲ کلوین به تأیید رسیده است (Duan, et al., 2019).



شکل ۲- وضعیت ابرناکی شبگاه منطقه مورد مطالعه. A- روزانه؛ B- هیستوگرام ابرناکی؛ C- میانگین ماهانه.

Fig.2. The nighttime cloudiness condition of the study area: A- Daily; B- Cloudiness histogram; C- Monthly average

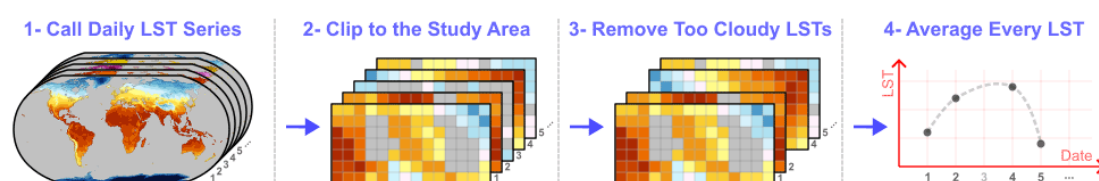
روش انجام پژوهش

از همان نخستین پژوهش‌ها در این زمینه، پژوهشگران به برتری تصاویر حرارتی شبگاه نسبت به روزگاه آگاه بوده‌اند. تصاویر حرارتی شبگاه وابستگی کمتری به گرمای تابشی خورشید دارند و گرمای درونی زمین را بهتر نشان می‌دهند. همچنین در روز، بخشی از امواج حرارتی خورشید در اثر پخش یا انعکاس به سنجنده می‌رسد که خطاساز است (Saraf & Choudhury, 2005). آن‌ها که هر دو سری را در نظر گرفته‌اند، دیده‌اند که ناهنجاری حرارتی نخست در سری شبگاه ظاهر شده (Saraf, et al., 2008) و شدت آن در سری روزگاه خفیف‌تر است؛ چنان‌که گاه تنها در سری شبگاه مشاهده می‌شود (Mohamed, Gahalaut, Sekertekin, & Inyurt, 2021).

¹ Root Mean Square Error

بنابراین از دیرهنگام‌ترین تصاویر LST که برای باند شبگاه محصول MYD11A1 از ماهواره Aqua و برای حوالی زمان محلی ۲ بامداد است، استفاده گردید. به دلیل استفاده از محصول آماده LST، مراحل پیش‌پردازش تنها در ۴ مرحله ساده در سامانه موتور زمین گوگل (GEE)^۱ انجام شد (شکل ۳):

- ۱- فراخوانی محصول: سری محصول روزانه LST در بازه زمانی مورد نظر فراخوانی شد.
- ۲- برش تصاویر: همه تصاویر طبق مرز منطقه مورد مطالعه برش خورد.
- ۳- حذف تصاویر ابری: تصاویر با آستانه ابرناکی ۵۰ درصد کنار گذاشته شد.
- ۴- میانگین‌گیری: برای استخراج LST روزانه از هر تصویر میانگین گرفته شد.



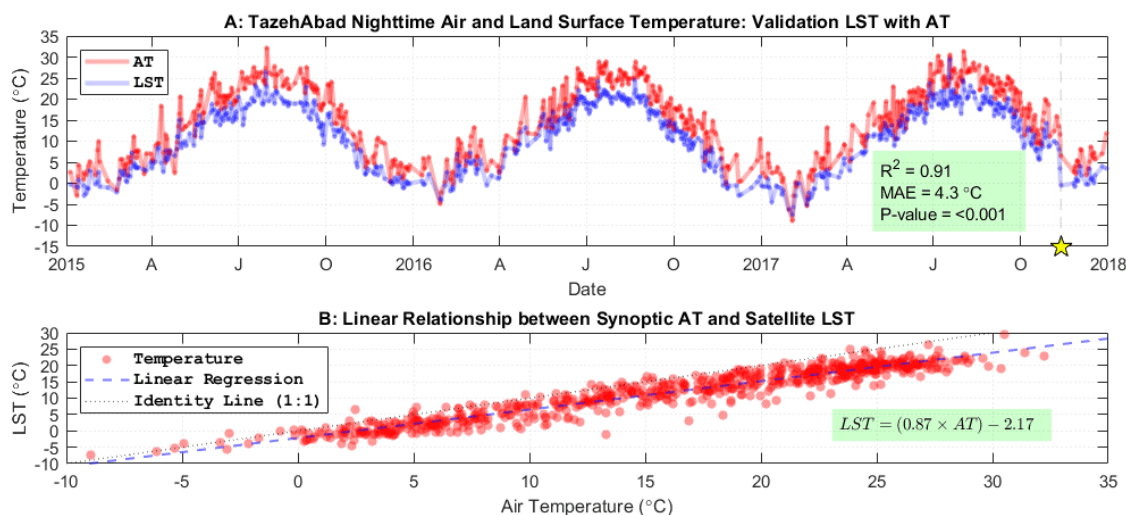
شکل ۳- مراحل پیش‌پردازش محصول LST به منظور کشف ناهنجاری حرارتی.

Fig.3. Preprocessing steps of LST product in order to detect thermal anomaly

برای اعتبارسنجی محصول LST شبگاه، از داده‌های ایستگاه هواشناسی همدید تازه‌آباد استفاده شد. بازه زمانی سه ساله مورد مطالعه یعنی از آغاز ۲۰۱۵ تا پایان ۲۰۱۷، شامل ۱۰۹۷ روز می‌شود. در این مدت، ایستگاه هواشناسی ۱۲۰ روز مفقودی و محصول LST نیز ۳۴۷ روز ابرناکی در آن پیکسل داشت. این دو، ۶۷۰ روز برابر با ۶۱ درصد بازه زمانی سه‌ساله را داده هم‌زمان دارند.

از آنجایی که محصول روزانه LST از تصاویر برداشتی در گذرهای مختلف تولید می‌شود، محصولات، زمان محلی متفاوتی بین ۱:۳۷ تا ۳:۱۴ با متوسط ۲:۲۳ و انحراف معیار ۲۸ دقیقه داشت. چون ایستگاه تازه‌آباد، دمای سطح زمین را تنها در صبح‌ها برداشت کرده است، برای اعتبارسنجی محصول LST، از دمای هوای میان‌یابی شده در همان زمان تصویربرداری استفاده گردید و همبستگی آن‌ها با ضریب تعیین ۰/۹۱ تأیید شد. در اکثر شب‌ها، دمای هوا به‌طور متوسط ۴/۳ درجه سلسیوس گرم‌تر از دمای سطح زمین است (شکل ۴).

¹ Google Earth Engine



شکل ۴- اعتبارسنجی محصول LST در سنجنده MODIS با دمای هوا در ایستگاه تازه‌آباد.

Fig.4. Validation of MODIS LST product with air temperature at Tazehabad station

در شب، زمین حرارت خود را تابش کرده و خنک‌تر از هوا می‌شود. سایر پژوهش‌ها نیز همبستگی قوی و مثبت این دو پارامتر را با رابطه‌ای خطی نشان داده‌اند (Bevis, et al., 1992) که البته شیب آن متأثر از طبقه پوشش اراضی و به‌ویژه نوع پوشش گیاهی منطقه است (Mildrexler, Zhao, & Running, 2011).

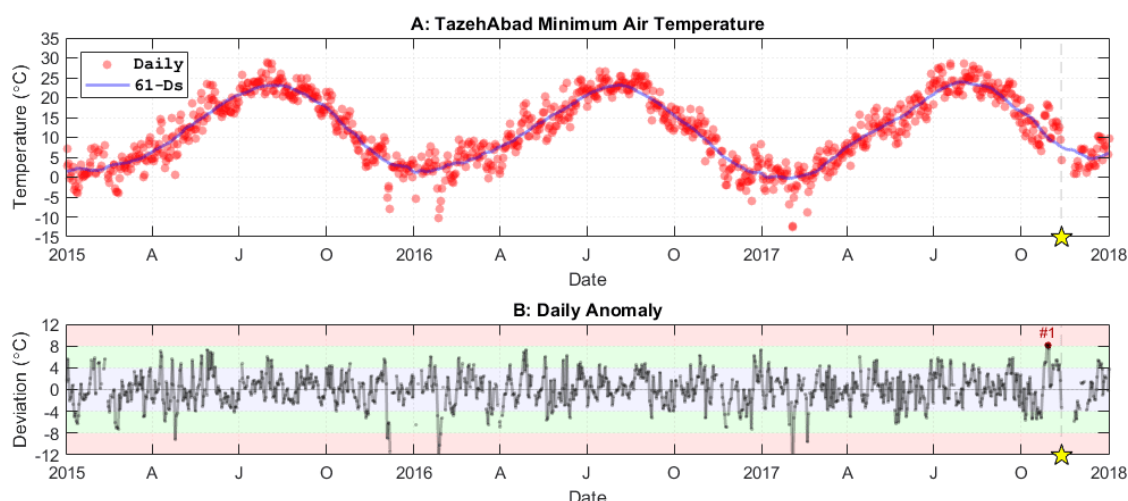
نتایج و بحث

داده‌های هواشناسی ایستگاه همدید

سری داده‌های پارامترهای هواشناسی ایستگاه تازه‌آباد به‌عنوان شاهدهی از منطقه، در سه بخش بررسی شد. در مورد هر پارامتر، ناهنجاری روزانه به‌صورت میزان انحراف از میانگین متوسط ۶۱ روزه محاسبه گردید.

دمای هوا

دمای هوا، روزانه در ۸ پارامتر سه‌ساعته و ۲ پارامتر دمای کمینه و دمای بیشینه ثبت می‌شود. در بیشتر این پارامترها و به‌ویژه در پارامترهای شبگاه، ناهنجاری مثبتی پیش از زلزله دیده می‌شود که چشمگیرترین آن در پارامتر دمای کمینه رخ داده است (شکل ۵).



شکل ۵- سری داده دمای کمینه در ایستگاه تازه‌آباد: A- داده‌های روزانه؛ B- ناهنجاری روزانه.

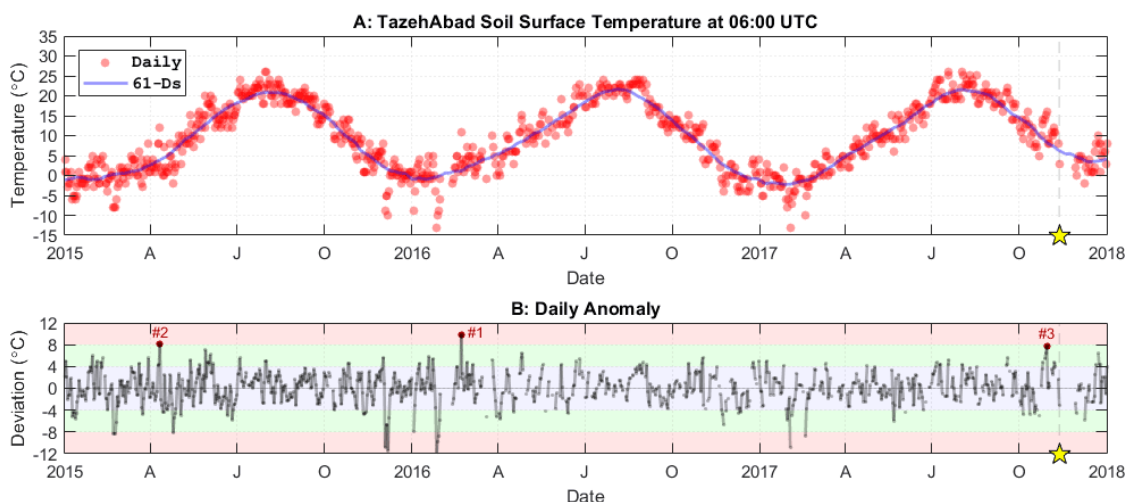
Fig.5. Minimum temperature data series at Tazehabad station: A- Daily data; B- Daily Anomaly

نمودار بالا نشان می‌دهد که در این دوره سه‌ساله، بیشترین انحراف دمای کمینه با $8/2$ درجه سلسیوس برای ۲۹ اکتبر ۲۰۱۷ یعنی ۱۴ روز پیش از زلزله بوده است. (Jing & Singh, 2022) نیز در داده‌های سنجنده AIRS^۱، دمای هوا در ۲۷ اکتبر را در رومرکز و بیشتر بخش‌های خاورمیانه دارای ناهنجاری مثبت یافته‌اند. همچنین بررسی داده ایستگاه‌های هواشناسی در شش زلزله قوی مکزیک نشان داده که یکی دو هفته پیش از زلزله‌ها، ناهنجاری مثبت در دمای هوا و دامنه دمای روزانه رخ داده است (Dunajacka & Pulinets, 2005). بررسی مدل هواشناسی در زلزله‌ای در چین نیز ناهنجاری مثبت دمای هوا در ۱۲ روز پیش از زلزله را نشان می‌دهد که این گرما از زمین سرچشمه گرفته و سپس به لایه‌های بالاتر جو منتقل شده و سرانجام ناپدید شده است (Zhang, Meng, Wang, Lu, Hu, 2021). بررسی چهارده زلزله قوی آسیای میانه نیز نشان داده که در همه موارد، دمای هوا در ماه رخداد زلزله از همه ماه‌های مشابه در دوره‌ای چند ده‌ساله گرم‌تر بوده است (Milkis, 1986).

دمای خاک

دمای خاک، روزانه در ۱ پارامتر برای سطح زمین در ساعت ۶ جهانی و در ۶ پارامتر برای اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر در ساعت ۹ جهانی ثبت می‌شود. با اینکه هیچ‌کدام از این پارامترها برای شبگاه نیست، ولی در پارامترهای دمای اعماق کم خاک و همچنین در پارامتر دمای سطح خاک (شکل ۶) ناهنجاری مثبت کم‌سابقه‌ای پیش از زلزله دیده می‌شود.

¹ Atmospheric Infrared Sounder



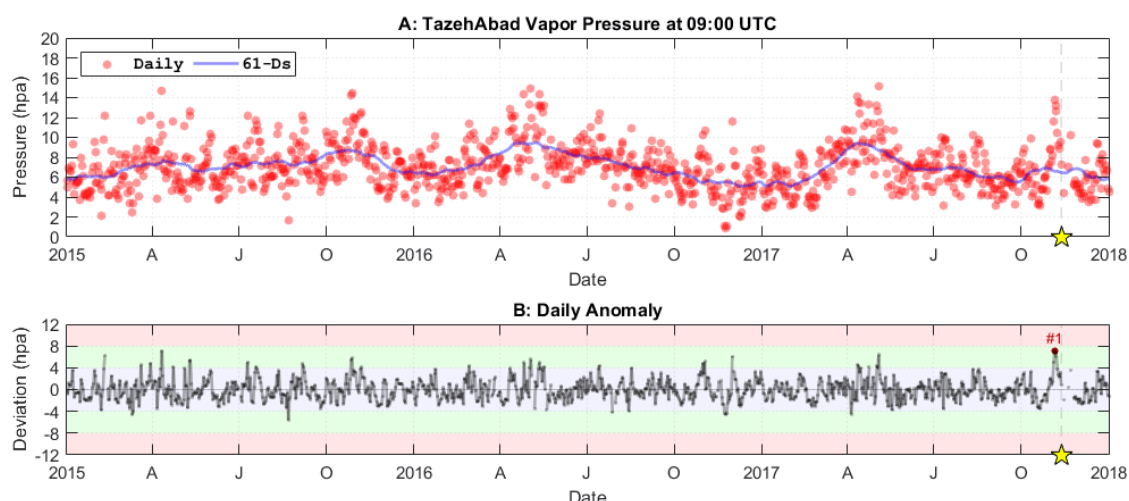
شکل ۶- سری داده دمای سطح خاک روزگانه در ایستگاه تازه‌آباد: A- داده‌های روزانه؛ B- ناهنجاری روزانه.

Fig.6. Daytime soil surface temperature data series at Tazehabad station: A- Daily data; B- Daily anomaly.

طبق نمودار بالا، در دوره سه ساله پیش از زلزله، سومین انحراف بزرگ دمای سطح خاک با ۷/۷ درجه سلسیوس برای ۳۰ اکتبر ۲۰۱۷ یعنی ۱۳ روز پیش از زلزله بوده است. بررسی این پارامتر در ایستگاهی در رومرکز زلزله‌ای در مکزیک نیز نشان داده که میانگین دمای سطح خاک ماهانه در آن ماه، از ماه‌های مشابه در ۵۰ سال اخیرش گرم‌تر بوده است (Pulinets, et al., 2006).

رطوبت هوا

رطوبت هوا، روزانه در پارامترهای سه ساعته رطوبت نسبی هوا و فشار بخار ثبت می‌شود. در بیشتر این پارامترها و به‌ویژه در فشار بخار روزگانه، ناهنجاری چشمگیر مثبتی پیش از زلزله دیده می‌شود؛ که اوج آن در پارامتر فشار بخار در ساعت ۹ جهانی (شکل ۷) نمود دارد.



شکل ۷- سری داده فشار بخار ساعت ۹ جهانی در ایستگاه تازه‌آباد: A- داده‌های روزانه؛ B- ناهنجاری روزانه.

Fig.7. Vapor pressure data series at 9 UTC at Tazehabad station: A- Daily data; B- Daily anomaly.

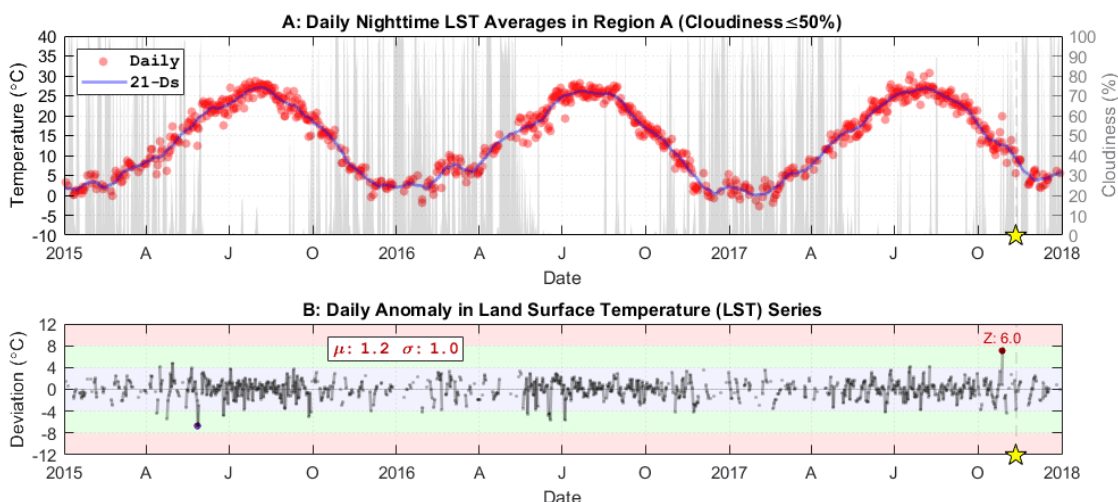
طبق نمودار بالا، بیشترین انحراف فشار بخار با ۷/۱ هکتوپاسکال برای ۵ نوامبر ۲۰۱۷ یعنی ۷ روز پیش از زلزله بوده است. (Akhoondzadeh, De Santis, Marchetti, Piscini, Jin, 2019) نیز در مدل جهانی جو ECMWF، محتوای بخار آب را ۶ روز پیش از این زلزله ناهنجار یافته‌اند. افزایش ناگهانی این پارامتر، ۱۱ روز پیش از زلزله‌ای در چین و پس از بروز ناهنجاری حرارتی در آن گسل (Liu, Cui, Wu, Wang, 2009)، ۶ روز پیش از زلزله‌ای در آلاسکا و ۱ تا ۱۴ روز پیش از ۴۰ زلزله ساحلی نیز رخ داده است (Singh, Cervone, Singh, & Kafatos, 2007).

کشف ناهنجاری در دمای سطح زمین شبگاه

ناهنجاری زمانی

ناهنجاری زمانی در داده‌های روزانه، پس از کنار گذاشتن تصاویر ابری با آستانه ابرناکی ۵۰ درصد، به صورت میزان انحراف از میانگین متحرک ۲۱ روزه محاسبه گردید (شکل ۸). حذف نکردن تصاویر ابری از سری زمانی می‌تواند موجب سوگیری در LST و نمود ناهنجاری کاذب شود (Blackett, Wooster, & Malamud, 2011).

¹ European Centre for Medium-range Weather Forecasts



شکل ۸- سری زمانی LST شبگاه در منطقه مورد مطالعه: A- داده‌های روزانه؛ B- ناهنجاری روزانه.

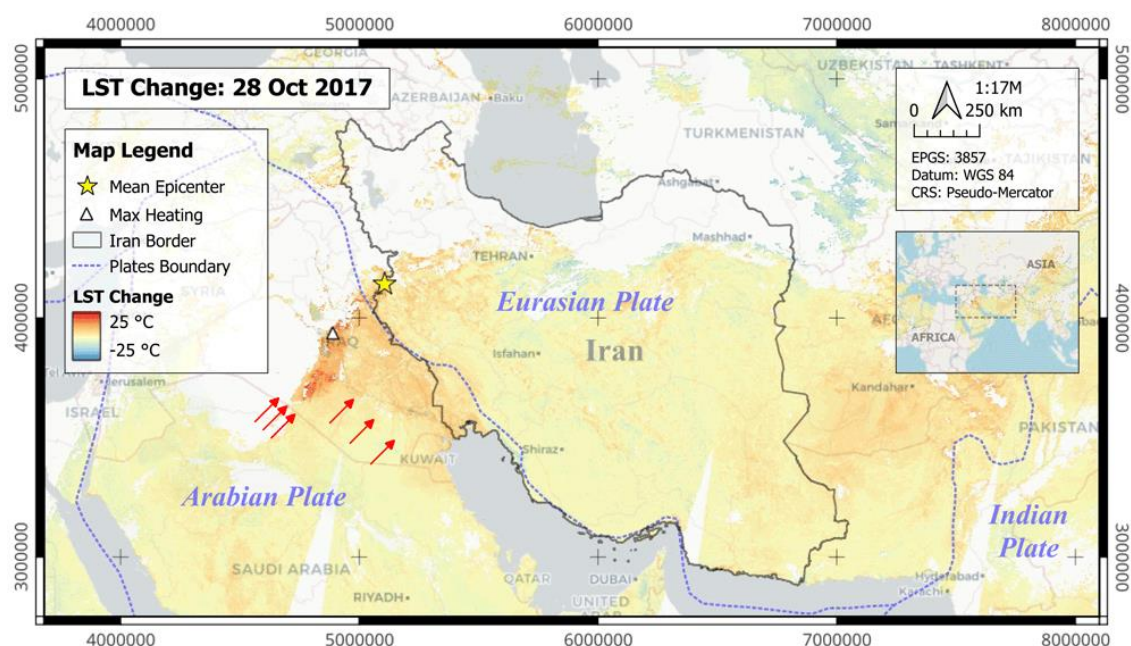
Fig.8. Nighttime LST time series in the study area: A- Daily data; B- Daily anomaly

طبق نمودار بالا، در این دوره سه ساله پیش از زلزله، بیشترین انحراف LST شبگاه در منطقه مورد مطالعه، با $7/2$ درجه سلسیوس و نمره استاندارد $6/0$ در بین روزهای دارای انحراف مثبت، برای ۲۸ اکتبر ۲۰۱۷ یعنی ۱۵ روز پیش از زلزله بوده است. این ناهنجاری در هر میانگین متحرکی از چند تا چند ده روزه آشکار است. (Akhoondzadeh, De Santis, Marchetti, Piscini, Jin, 2019) نیز با بررسی و مقایسه داده‌های روزانه چهار ماه پیش از زلزله ازگله با داده‌های تاریخی بلندمدت چهار ساله در مدل جهانی جو ECMWF دریافتند که ۱۵ روز پیش از زلزله، ناهنجاری شدید مثبتی با شدت بیش از 10 درجه سلسیوس در دمای سطح زمین در محدوده 3 درجه‌ای اطراف رومرکز این زلزله رخ داده است. (Jing & Singh, 2022) هم با کمک ۱۸ سال داده سنجنده AIRS از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ و بررسی دمای سطح زمین در منطقه رومرکز زلزله ازگله به طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۲ و ۱ درجه، دریافتند که این پارامتر در ۲۹ اکتبر و ۷ نوامبر ۲۰۱۷ دارای ناهنجاری مثبت بوده است.

ناهنجاری مکانی

برای درک توزیع مکانی این ناهنجاری حرارتی، اختلاف LST شبگاه در روز ۲۸ اکتبر ۲۰۱۸ نسبت به روز قبل از خود محاسبه و به نقشه درآمد (شکل ۹). طبق این نقشه، مرز خشکی صفحه عربستان و اوراسیا در غرب ایران گرم است. وجود ناحیه‌ای داغ در مرکز عراق که راستایش به رومرکز زلزله ازگله می‌رسد نیز جالب است. گویا شدیدترین فشار صفحه‌ای از آن ناحیه وارد می‌شود. داغ‌ترین نقطه نقشه با $24/2$ درجه سلسیوس اختلاف دما، در ۲۵۰ کیلومتری جنوب غرب رومرکز در شهر فلوجه عراق واقع شده است. آنجا،

داغ‌ترین ناحیه در آن روز در نیمکره شمالی است و بروز آن با این شدت در این منطقه، از سه سال پیش از زلزله سابقه ندارد.



شکل ۹- نقشه اختلاف LST شبگاه در ۲۸ اکتبر ۲۰۱۷ نسبت به روز قبل از خود.

Fig.9. Map of the nighttime LST difference on October 28, 2017 compared to the previous day

بررسی تصاویر ماهواره‌ای در زمان بروز این ناهنجاری، پدیده ویژه‌ای را نشان نمی‌دهد؛ ولی از چند ساعت بعد، طوفان گردوغبار سنگینی از شمال عربستان برخاسته و عراق را می‌پوشاند. افزایش ناگهانی AT و LST پیش از طوفان گردوغبار سابقه گزارش دارد (Kayetha, Kumar, Prasad, Cervone, & Singh, 2007).

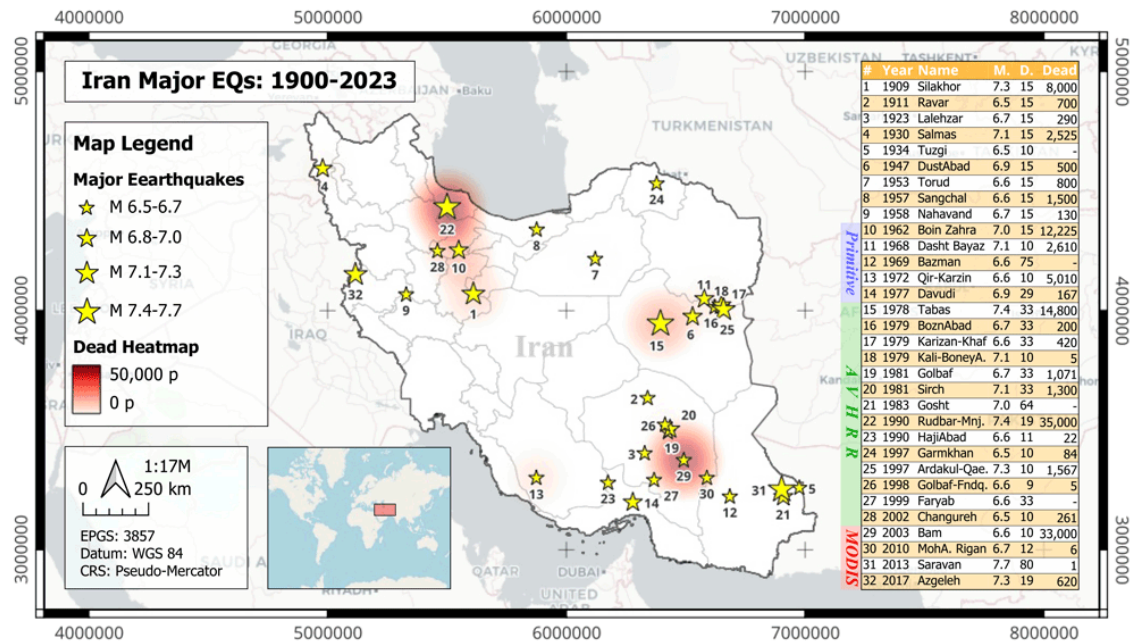
(Wu, Zhou, Miao, & Qin, 2018) نیز ناهنجاری شدیدی در شار گرمای نهان سطح (SLHF)^۱ در غرب رومرکز و دو هفته پیش از زلزله ازگله یافته‌اند که روز بعد با برخاستن طوفان سهمگینی از عربستان و عراق ناپدید شده و دو روز بعد، محتوای هواویز (AOD)^۲ به بیشینه رسیده است. (Jing & Singh, 2022) هم وجود ناحیه‌ای داغ با مقادیر بالای LST در ۲۷ و ۲۹ اکتبر را در شمال عربستان گزارش کرده‌اند که تا آخر ماه میلادی به سمت شمال ایران حرکت کرده است. ایشان به رخداد طوفان در منطقه و بیشینه شدن AOD هم اشاره داشته‌اند.

¹ Surface Latent Heat Flux

² Aerosol Optical Depth

بررسی ناهنجاری حرارتی در زلزله‌های قوی ایران

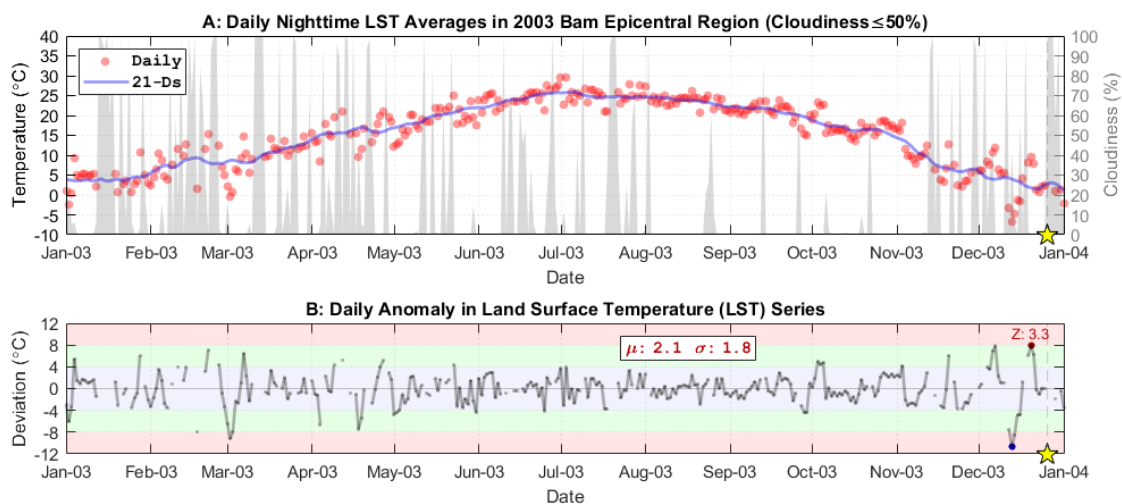
نخست، زلزله‌های دستگاهی و قوی ایران از کاتالوگ USGS استخراج شد (شکل ۱۰). طبق این فهرست، در دوره دستگاهی، ۳۲ زلزله قوی با بزرگای دست‌کم ۶٫۵ در ایران رخ داده است. چهار زلزله آخر این فهرست در دوره عملیاتی سنجنده MODIS رخ داده و می‌توان یافته‌ها را روی آن‌ها نیز آزمود.



شکل ۱۰- نقشه زلزله‌های دوره دستگاهی ایران با بزرگای دست‌کم ۶٫۵ از کاتالوگ USGS.

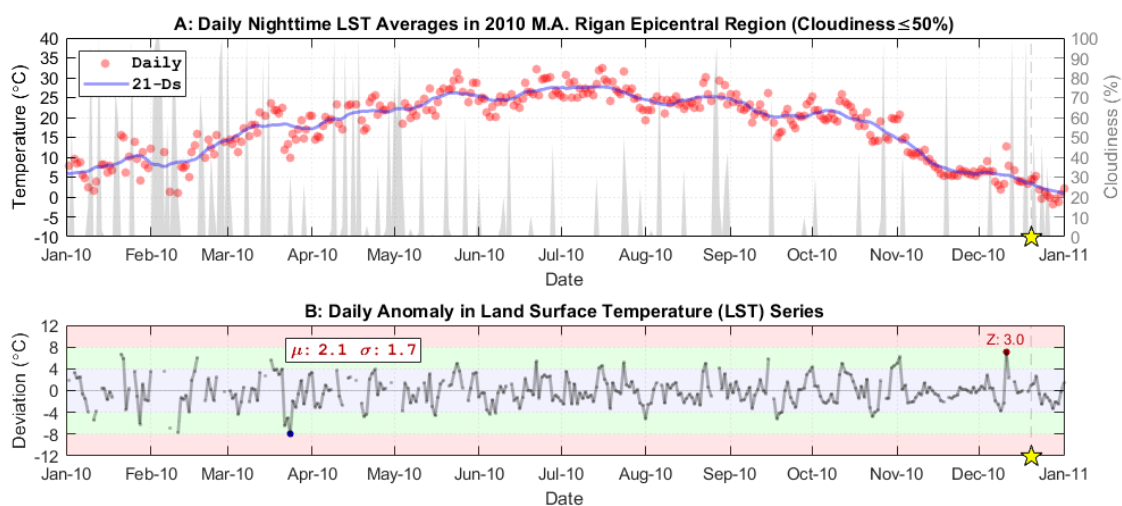
Fig.10. Earthquakes map of Iran in instrumental era with a magnitude of at least 6.5 from the USGS catalog

برای هر یک از این چهار زلزله اخیر، محدوده‌ای مربعی به طول ۲۵ کیلومتر به مرکزیت رومرکز آن‌ها طبق کاتالوگ USGS انتخاب شد و داده‌های LST شبکه از همان محصول MODIS، برای حدود یک سال پیش از هرکدام استخراج گردید و با همان شرایط، کشف ناهنجاری حرارتی روی آن‌ها آزموده شد. نتایج نشان داد زلزله ۶٫۶ بم کرمان به سال ۲۰۰۳ (شکل ۱۱)، زلزله ۶٫۷ محمدآباد ریگان کرمان به سال ۲۰۱۰ (شکل ۱۲) و البته زلزله ازگله (شکل ۱۳) دارای پیش‌نشانگر حرارتی بوده‌اند.



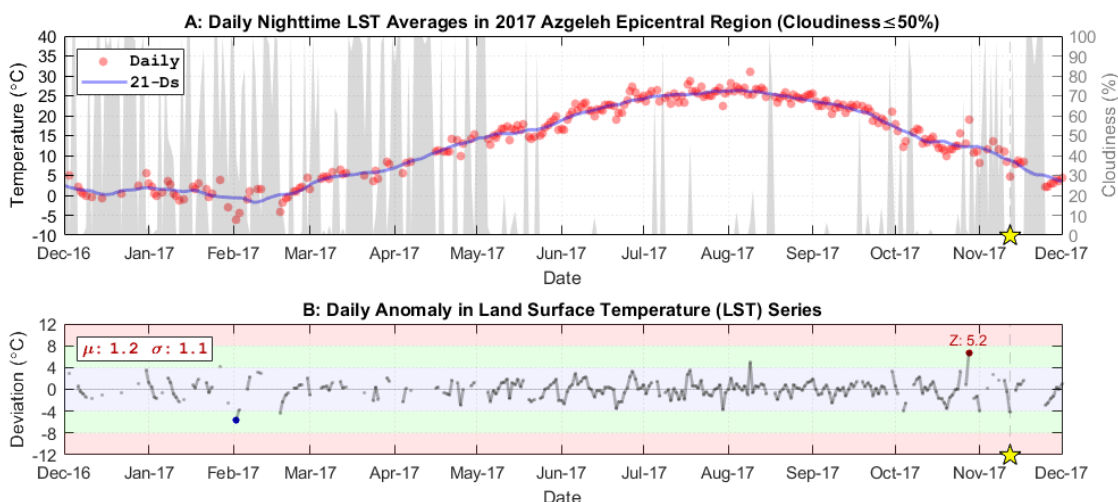
شکل ۱۱- سری زمانی LST شبگاه در زلزله بم: A- داده‌های روزانه؛ B- ناهنجاری روزانه.

Fig.11. Nighttime LST time series in Bam earthquake: A- Daily data; B- Daily anomaly



شکل ۱۲- سری زمانی LST شبگاه در زلزله محمدآباد ریگان: A- داده‌های روزانه؛ B- ناهنجاری روزانه.

Fig.12. Nighttime LST time series in Mohammadabad Rigan earthquake: A- Daily data; B- Daily anomaly



شکل ۱۳- سری زمانی LST شبگاه در زلزله ازگله: A- داده‌های روزانه؛ B- ناهنجاری روزانه.

Fig.13. Nighttime LST time series in Azgeleh earthquake: A- Daily data; B- Daily anomaly

طبق نمودارهای بالا، شدیدترین ناهنجاری حرارتی در رومرکز و در سال منتهی به این سه زلزله، حداکثر ۱۵ روز پیش از وقوع آن‌ها رخ داده که بی‌سابقه‌ترین برای زلزله ازگله است (جدول ۳). پیش‌نشانگر حرارتی، تنها در زلزله ۷/۷ سراوان سیستان و بلوچستان به سال ۲۰۱۳، بروز نکرده است. این زلزله، زمستانی نیست و عمق زیادی دارد. گفته شده که ناهنجاری حرارتی در زلزله‌های با عمق بیشتر از ۶۰ کیلومتر، بروز سطحی ندارد (Tronin, Hayakawa, & Molchanov, 2002). اگرچه، چندین مطالعه با روش آماری (Khalili, Alavi (Panah, Abdollahi Eskandar, 2019) یا به‌کارگیری شبکه عصبی (Nekoei & Shah Hosseini, 2020) بروز ناهنجاری حرارتی در این زلزله را نیز یافته‌اند.

جدول ۳- نتایج آزمون کشف ناهنجاری حرارتی روی چهار زلزله قوی و اخیر ایران.

Table3- The results of thermal anomaly detection test on four strong and recent earthquakes in Iran

مرجع موافق	روز مانده	نمره (Z)	عمق (km)	بزرگا (M)	تاریخ	زلزله
(Choudhury, et al., 2006)	۶	۳/۳	۱۰	۶/۶	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	بم
(Akhoondzadeh, et al., 2019)	۹	۳/۰	۱۲	۶/۷	۲۰۱۰/۱۲/۲۰	محمدآباد ریگان
-	(۹۶)	۴/۵	۸۰	۷/۷	۲۰۱۳/۰۴/۱۶	سراوان
(Saber Mahani, et al., 2017)	۱۵	۵/۲	۱۹	۷/۳	۲۰۱۷/۱۱/۱۲	ازگله

۴- نتیجه‌گیری

امروز، افسانه باستانی گرم شدن هوا و زمین پیش از زلزله‌ها، با نام ناهنجاری حرارتی در صدها پژوهش به اثبات رسیده است؛ اما استفاده از روش‌های متعدد در کشف ناهنجاری و بررسی بازه‌های زمانی و محدوده‌های مکانی گوناگون، مانع از جمع‌بندی نهایی و ارائه سامانه‌ای برای پیش‌بینی زلزله شده است. حال، توسعه علوم داده‌کاوی در داده‌های حجیم و هوش مصنوعی، امیدها را برای راه‌اندازی چنین سامانه‌ای زنده کرده است.

در این پژوهش، وجود ناهنجاری حرارتی در زلزله ازگله در سری داده‌های هواشناسی و ماهواره‌ای از سه سال پیش از زلزله با روش ساده انحراف از میانگین متحرک مورد بررسی قرار گرفت و دیده شد که یکی دو هفته پیش از زلزله، هم در پارامترهای هواشناسی و هم در LST، ناهنجاری روزانه‌ای بروز می‌کند.

بررسی آمار ایستگاه همدید تازه‌آباد، نشان داد که پارامترهای دمای هوا، دمای خاک و رطوبت هوا، یکی دو هفته مانده به زلزله ناهنجار شده‌اند؛ مثلاً دمای کمینه در ۱۴ روز، دمای سطح خاک ساعت ۶ جهانی در ۱۳ روز و فشار بخار ساعت ۹ جهانی در ۷ روز پیش از زلزله، انحراف مثبت بی‌سابقه یا کم‌سابقه‌ای داشته‌اند. بررسی زمانی روند LST، فاش کرد که بیشترین انحراف، ۱۵ روز پیش از زلزله رخ داده است. بررسی مکانی این ناهنجاری، روشن ساخت که در آن روز، مرز خشکی دو صفحه عربستان و اوراسیا گرم بوده و ناحیه‌ای داغ در مرکز عراق و در راستای رومرکز زلزله پدیدار شده است. از چند روز بعد، پیش‌نشانگر ابر زلزله (Heidari, Mazidi, & Rousta, 2024) و ناهنجاری یونوسفری (Senturk, Inyurt, Sertcelik, 2020) هم بروز نموده‌اند.

همچنین، آزمون این فرآیند کشف ناهنجاری حرارتی روی سه زلزله قوی و اخیر دیگر ایران نشان داد که دو زلزله بم و محمدآباد ریگان نیز دارای ناهنجاری بی‌سابقه‌ای به ترتیب در ۶ و ۹ روز پیش از زلزله بوده‌اند. در پایان، تکرار چنین پژوهش‌هایی با روش‌های ماشینی کشف ناهنجاری پیشنهاد می‌شود؛ تا در نهایت بتوان با پایش خودکار LST و یا پارامترهای هواشناسی همچون دمای هوا، به امکان صدور هشدار زلزله رسید.

سپاسگزاری

از پشتیبانی دانشگاه یزد در به انجام رسیدن پایان‌نامه مطالعه پیش‌نشانگرهای زلزله ۱۳۹۶ ازگله با کمک سنجش‌ازدور، که این پژوهش، بخشی از یافته‌های آن بود، صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

References

- Akhoondzadeh, M. (2014). Thermal and TEC Anomalies Detection Using an Intelligent Hybrid System Around the Time of the Saravan, Iran, (Mw=7.7) Earthquake of 16 April 2013. *Advances in Space Research*, 53(4), 647–655. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.017>
- Akhoondzadeh, M.; De Santis, A.; Marchetti, D.; Piscini, A.; Jin, S. (2019). Anomalous seismo-LAI variations potentially associated with the 2017 MW=7.3 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from Swarm satellites, GPS-TEC and climatological data. *Advances in Space Research*, 64(1), 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.020>
- Askari, G., Hafezi, N., Rahimi tabar, M. R., & Ansari, A. (2010). Detection of Thermal Infrared (TIR) Anomalies Related to the Ms=5.1 Earthquake on Oct.14, 2004 Near Ravar (SE Iran). *Journal of the Earth and Space Physics*, 35(4), 1–16. <https://doi.org/10.1001.1.2538371.1388.35.4.1.4>
- Barkat, A., Ali, A., Rehman, K., Awais, M., Riaz, M.S., Iqbal, T. (2018). Thermal IR Satellite Data Application for Earthquake Research in Pakistan. *Journal of Geodynamics*, 116, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.01.008>
- Bellaoui, M., Hassini, A., & Bouchouicha, K. (2017). Pre-seismic Anomalies in Remotely Sensed Land Surface Temperature Measurements: The Case Study of 2003 Boumerdes Earthquake. *Advances in Space Research*, 59(10), 2645–2657. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.03.004>
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., Rocken, C., Anthes, R.A., & Ware, R.H. (1992). GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), 15787–15801. <https://doi.org/10.1029/92JD01517>
- Bhardwaj, A., Singh, S., Sam, L., Joshi, P.K., Bhardwaj, A., Martin Torres, F.J., & Kumar, R. (2017). A Review on Remotely Sensed Land Surface Temperature Anomaly as an Earthquake Precursor. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.002>
- Blackett, M., Wooster, M.J., & Malamud, B.D. (2011). Exploring Land Surface Temperature Earthquake Precursors: A focus on the Gujarat (India) Earthquake of 2001. *Geophysical Research Letters*, 38(15), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2011GL048282>
- Choudhury, S., Dasgupta, S., Saraf, A.K., Panda, S. (2006). Remote Sensing Observations of Pre-Earthquake Thermal Anomalies in Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 27(20), 4381–4396. <https://doi.org/10.1080/01431160600851827>
- Choubsaz, S., Akhoondzadeh, M., & Saradjian, M.R. (2015). Thermal Anomaly Detection Prior to Earthquakes with Training Artificial Neural Networks with Ant Colony Optimization. *Environmental Management Hazards*, 2(2), 207–224. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2015.55062>
- Conti, L., Picozza, P., & Sotgiu, A. (2021). A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors. *Frontiers in Earth Science*, 9, 1–30. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.676766>
- Duan, S.B., Li, Z.L., Li, H., Gottsche, F.M., Wu, H., Zhao, W., Leng, P., Zhang, X., & Coll, C. (2019). Validation of Collection 6 MODIS Land Surface Temperature Product Using in Situ Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 225, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.020>

- Dunajacka, M.A. & Pulinets, S.A. (2005). Atmospheric and Thermal Anomalies Observed Around the Time of Strong Earthquakes in Mexico. *Atmosfera*, 18(4), 235–247. https://scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-2362005000400003&script=sci_arttext
- Feng, R., & Wu, Y. (2010). Research on History of Chinese Seismology. *Earthquake Science*, 23(3), 243–257. <https://doi.org/10.1007/s11589-010-0720-z>
- Filizzola, C; Corrado, A; Genzano, N; Lisi, M; Pergola, N; Colonna, R; Tramutoli, V. (2022). RST analysis of anomalous TIR sequences in relation with earthquakes occurred in Turkey in the period 2004–2015. *Remote Sensing*, 14(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs14020381>
- Freund, F.T. (2002). Charge Generation and Propagation in Igneous Rocks. *Journal of Geodynamics*, 33(4–5), 543–570. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00015-7)
- Freund, F.T., Keefner, J., Mellon, J.J., Post, R., Takeuchi, A., Lau, B.W.S., La, A., Ouzounov, D. (2005). Enhanced Mid-Infrared Emission from Igneous Rocks Under Stress. *Geophysical Research Abstract*, 7.
- Genzano, N., Filizzola, C., Hattori, K., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2021). Statistical Correlation Analysis Between Thermal Infrared Anomalies Observed from MTSATs and Large Earthquakes Occurred in Japan (2005–2015). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(2), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2020JB020108>
- Gornyi, V.I., Salman, A.G., Tronin, A.A., & Shilin, B.V. (1988). Terrestrial Outgoing Infrared Radiation as an Indicator of Seismic Activity. *In Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*, 301(1), 67–69. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.11762>
- Heidari, M., Mazidi, A., & Rousta, I. (2024). Investigating the Earthquake Cloud Precursor in the 2017 Azgeleh Earthquake in Kermanshah, Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(1), 151–172. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75548.1186>
- Jing, F., & Singh, R.P. (2022). Response of Surface and Atmospheric Parameters Associated with the Iran M 7.3 Earthquake. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 5841–5852. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3188003>
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Vermote, E.F., Masuoka, E., Wolfe, R.E, Saleous, N., Roy, D.P., & Morisette, J.T. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 3–15. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00084-6)
- Kayetha, V.K., Kumar J.S., Prasad, A.K., Cervone, G., & Singh, R.P. (2007). Effect of Dust Storm on Ocean Color and Snow Parameters. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 35(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/BF02991828>
- Khalili, M., Alavi Panah, S.K., Abdollahi Eskandar, S.S. (2019). Using Robust Satellite Technique (RST) to Determine Thermal Anomalies Before a Strong Earthquake: A Case Study of the Saravan Earthquake (April 16th, 2013, MW= 7.8, Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 173, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.01.009>
- Khoshgoftar, M.M, Saradjian, M.R. (2021). Estimation of parameters (Date and Magnitude) of Two Strong Earthquakes in Iran by Integrating Different Earthquake Precursors. *Journal of Geospatial Information Technology*, 9 (2), 67–81. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/jgit.9.2.67>
- Liu, S., Cui, L., Wu, L., Wang, Z. (2009, July). Analysis on the Water Vapor Anomaly Before Wenchuan Earthquake Based on MODIS Data. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 412–415. Cape Town, South Africa

<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5418102>

- Maghsoudi, A., Moshtari, M. (2021). Challenges in Disaster Relief Operations: Evidence from the 2017 Kermanshah Earthquake. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 11(1), 107–134. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-08-2019-0054>
- Mildrexler, D.J., Zhao, M., & Running, S.W. (2011). A Global Comparison Between Station Air Temperatures and MODIS Land Surface Temperatures Reveals the Cooling Role of Forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G3), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2010JG001486>
- Milkis M.R. (1986). Meteorological precursors of strong earthquakes. *Izvestiya, Earth Physics*, 22, 195–204.
- Mohamed, E.K., Gahalaut, V.K., Sekertekin, A., & Inyurt, S. (2021). Atmospheric, Ionospheric and Earth-related Variations Associated with the 11th August 2012 Earthquakes, Ahar, Iran. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105595>
- Nekoe, M., & Shah Hosseini, R. (2020). Thermal Anomaly Detection Using NARX Neural Network Method to Estimate the Earthquake Occurrence Time. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 4(2), 98–108. <https://doi.org/10.22059/eoge.2021.292253.1067>
- Ouzounov, D., & Freund, F.T. (2004). Mid-Infrared Emission Prior to Strong Earthquakes Analyzed by Remote Sensing Data. *Advances in Space Research*, 33(3), 268–273. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00486-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00486-1)
- Picozza, P., Conti, L., & Sotgiu, A. (2021). Looking for Earthquake Precursors from Space: A Critical Review. *Frontiers in Earth Science*, 9, 1–21. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.676775>
- Pulinets, S.A. (2004). Ionospheric Precursors of Earthquakes; Recent Advances in Theory and Practical Applications. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(3), 413–435. [https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.3.413\(EP\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.3.413(EP))
- Pulinets, S.A., Ouzounov, D., Ciraolo, L., Singh, R., Cervone, G., Leyva, A., Dunajecka, M., Karelin, A.V., Boyarchuk, K.A., & Kotsarenko, A. (2006). Thermal, Atmospheric and Ionospheric Anomalies Around the Time of the Colima M7.8 Earthquake of 21 January 2003. *Annales Geophysicae*, 24(3), 835–849. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-835-2006>
- Qiang, Zj., Xu, Xd. & Dian, Cg. (1991). Thermal infrared anomaly precursor of impending earthquakes. *Chinese science bulletin*, 4, 319–323. [In Chinese]
- Qiang, Zj., Xu, Xd. & Dian, Cg. (1997). Case 27 thermal infrared anomaly precursor of impending earthquakes. *PAGEOPH*, 149, 159–171. <https://doi.org/10.1007/BF00945166>
- Saber Mahani, S., & Sepahvand, M. (2017). Investigating the Precursors of Earthquake Cloud and Temperature Changes in Identifying Earthquake-Causing Faults Case Study: The Earthquake in Mohammad-Abad-e-Rigan (January 27, 2011). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 26(101), 25–32. [In Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2017.25723>
- Saradjian, M.R., & Akhoondzadeh, M. (2011). Thermal Anomalies Detection Before Strong Earthquakes ($M > 6.0$) Using Interquartile, Wavelet and Kalman Filter Methods. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(4), 1099–1108. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1099-2011>

- Saraf, A.K., & Choudhury, S. (2005). Thermal Remote Sensing Technique in the Study of Pre-Earthquake Thermal Anomalies. *Journal of Indian Geophysical Union*, 9(3), 197–207. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1841723>
- Saraf, A.K., Rawat, V., Banerjee, P., Choudhury, S., Panda, S.K., Dasgupta, S., & Das, J.D. (2008). Satellite Detection of Earthquake Thermal Infrared Precursors in Iran. *Natural Hazards*, 47(1): 119–135. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9201-7>
- Saraf, A.K., Rawat, V., Choudhury, S., Dasgupta, S., Das, J.D. (2009). Advances in Understanding of the Mechanism for Generation of Earthquake Thermal Precursors Detected by Satellites. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(6), 373–379. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.07.003>
- Senturk, E., Inyurt, S., Sertcelik, I. (2020). Ionospheric Anomalies Associated with the Mw 7.3 Iran-Iraq Border Earthquake and a Moderate Magnetic Storm. *Annales Geophysicae*, 38(5), 1031–1043. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-1031-2020>
- Shahbazi, S., Papzan, A., & Gholami, M. (2021). Investigating the causes of lack of resilience of local communities against natural disasters (case study: Kermanshah province earthquake). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(3), 163–179. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.68474.1014>
- Shen, X., Zhang, X., Hong, S., Jing, F., & Zhao, S. (2013). Progress and Development on Multi-Parameters Remote Sensing Application in Earthquake Monitoring in China. *Earthquake Science*, 26(6): 427–437. <https://doi.org/10.1007/s11589-013-0053-9>
- Singh, R.P., Cervone, G., Singh, V.P., & Kafatos, M. (2007). Generic Precursors to Coastal Earthquakes: Inferences from Denali Fault Earthquake. *Tectonophysics*, 431(1–4), 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.05.040>
- Tramutoli, V., Corrado, R., Filizzola, C., Genzano, N., Lisi, M., & Pergola, N. (2015). From Visual Comparison to Robust Satellite Techniques: 30 Years of Thermal Infrared Satellite Data Analyses for the Study of Earthquake Preparation Phases. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, 56(2), 167–202. <https://doi.org/10.4430/bgta0149>
- Tronin, A.A. (2010). Satellite Remote Sensing in Seismology; A Review. *Remote Sensing*, 2(1), 124–150. <https://doi.org/10.3390/rs2010124>
- Tronin, A.A., Hayakawa, M., & Molchanov, O.A. (2002). Thermal IR Satellite Data Application for Earthquake Research in Japan and China. *Journal of Geodynamics*, 33(4–5), 519–534. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00013-3)
- Wu, L., Zhou, Y., Miao, Z., & Qin, K. (2018). Anomaly Identification and Validation for Winter 2017 Iraq and Iran earthquakes. In *20th EGU General Assembly*, EGU2018.
- Zhang, Y., Meng, Q., Wang, Z., Lu, X.; Hu, D. (2021). Temperature Variations in Multiple Air Layers Before the Mw 6.2 2014 Ludian Earthquake, Yunnan, China. *Remote Sensing*, 13(5), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs13050884>
- Zhao, X., Pan, S., Sun, Z., Guo, H., Zhang, L., & Feng, K. (2021). Advances of Satellite Remote Sensing Technology in Earthquake Prediction. *Natural Hazards Review*, 22(1), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000419](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000419)