

## امکان‌سنجی استفاده از داده‌های سنجنده مادیس برای برآورد بی‌هنجاری‌های دمایی سطح زمین به‌عنوان پیش‌نشانگر زمین‌لرزه (مطالعه موردی: زلزله سراوان آوریل ۲۰۱۳)

فرحناز تقوی\*

استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۷/۹/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۹/۳/۲۰)

### چکیده

در این مطالعه سری‌های زمانی بی‌هنجاری دمای سطح زمین (Land Surface Temperature, LST) در محدوده فروسرخ گرمایی از تصاویر سنجنده مادیس (MODIS) برای پیش‌نشانگری زمین‌لرزه سراوان با بزرگای ۷/۵ در روز ۱۶ آوریل ۲۰۱۳ در استان سیستان و بلوچستان با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پردازش تصویر پنجره مجزا (Split Window Technique, SWT) بنام ساب مانو (SobMao) مورد بررسی قرار گرفته است. در این الگوریتم با استفاده از معادله تابش و تعیین ضرایب گسیلمندی زمینی و عبوردهی جوی براساس باندهای فروسرخ نزدیک، مری و گرمایی بی‌هنجاری در سری‌زمانی پارامتر LST محاسبه و بررسی شد. در این تحقیق تغییرات روزانه پارامتر LST در بازه‌زمانی دو هفته (از روز ۱۰۰ تا روز ۱۱۲ در سال ۲۰۱۳) یعنی یک هفته پیش از زمین‌لرزه سراوان و یک هفته پس از آن در منطقه براساس تصاویر مادیس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پردازش تصاویر بیانگر افزایش پارامتر LST یا بی‌هنجاری مثبت گرمایی گسترده در منطقه سراوان پیش از زلزله است، به طوری که در روز ۱۲ آوریل سال ۲۰۱۳ مصادف با چهار روز پیش از زمین‌لرزه بی‌هنجاری گرمایی به بیشینه مقدار خود رسیده است. نتایج بیانگر وجود بی‌هنجاری‌های مثبت گرمایی در وسعتی از ۵۰ تا ۵۰۰ کیلومتر طول در منطقه است، که به سرعت از لحاظ گسترش منطقه‌ای تغییر کرده است و به شدت دچار افت و خیز شده است، به طوری که بیشینه بی‌هنجاری گرمایی دمای سطح زمین چهار روز پیش از زمین‌لرزه ظاهر شده و یک روز پیش از زلزله ناپدید شده است. تغییرات LST در این زلزله، از یک الگوی تقریباً مشابه مطالعه سراف و همکاران (۲۰۰۷) که از حسگر رادیومتر پیشرفته با توان تفکیک بالا استفاده کرده است و نتایج مطالعه فروند (۲۰۰۴) پیروی می‌کند. با توجه به نتایج در زمین‌لرزه سراوان تعیین بی‌هنجاری پارامتر LST می‌توانست به‌عنوان پیش‌نشانگر زلزله مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری گرمایی، پیش‌نشانگر، زمین‌لرزه سراوان، سنجنده مادیس.

### ۱ مقدمه

میانگین‌گیری مکانی مناسب به‌جای مقادیر نقطه‌ای را فراهم کرده است (لی و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج تحقیقات سراف و همکاران (۲۰۰۷) نشان می‌دهد که تغییر در LST مشاهده شده از طریق فن‌آوری سنجش از دور گرمایی در نواحی که به‌لحاظ تکتونیکی فعال هستند، می‌تواند نشانه‌ای برای وقوع زلزله باشد. تغییر ناگهانی در LST که بی‌هنجاری گرمایی نامیده می‌شود و معمولاً ۱ تا ۱۰ روز پیش از زلزله همراه با افزایش دما در مرتبه ۳ تا ۱۲ درجه سلیسوس می‌باشد، به‌عنوان سیگنال پیش‌نشانگر زلزله مورد مطالعه پژوهشگران از جمله (کیانگ و همکاران، ۱۹۹۱ و ۱۹۹۹؛ ترونین، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰؛ ترونین و همکاران، ۲۰۰۴؛ اوزونف و همکاران،

امروزه به‌دلیل اهمیت سنجش از دور گرمایی در مطالعات محیطی، بسیاری از پژوهشگران، تحقیقات پایه در این زمینه و توسعه فناوری سنجنده‌ها و کاربردهای جدید داده‌های گرمایی را ضروری می‌دانند. نیاز گسترده به اطلاعات دمایی در مقیاس بزرگ در مطالعات محیط‌شناسی و فعالیت‌های مدیریتی منابع زمینی سبب شده است که سنجش از دور دمای سطح زمین (LST) به موضوعی مهم تبدیل شود و تلاش‌های بسیاری برای استخراج LST از داده‌های سنجش از دور صورت گیرد (پرایس، ۱۹۸۴، وان و همکاران، ۲۰۰۴؛ مانو و همکاران، ۲۰۰۷؛ نیتلر، ۲۰۱۰). در سال‌های اخیر داده‌های ماهواره‌ای امکان اندازه‌گیری را در کل کره زمین با دقت کافی با

از زلزله مهرماه راور کرمان را با بزرگای گشتاوری ۵/۱ براساس داده‌های درجه‌بندی کالیبره شده شب هنگام حسگر رادیومتر پیشرفته با توان تفکیک بالا (AVHRR، Advance Very HighResolution Radiometer) در محدوده طول‌موج ۱۰/۵ تا ۱۱/۵ میکرومتر را با بهره‌گیری از فن‌های پردازش تصویر بررسی کردند.

حسگر فرسرخ گرمایی AVHRR بر ماهواره نوا (NOAA) سوار است و در یک عبور کلی می‌تواند گسیل زمینی را ثبت کند. نتایج مطالعه آنان افزایش شدید و غیرعادی شدت تابش شش روز قبل از زلزله در اطراف کانون سطحی زلزله و در امتداد گسل‌های زمین‌لرزه‌های منطقه را نشان می‌داد. همچنین نتایج تحقیق آنان نشان می‌داد که تغییرات تابشی در رخنمون‌های سنگ‌های آذرین بیشتر از سایر رخنمون‌های سنگی در اطراف کانون زلزله است که با نتایج مطالعه آزمایشگاهی فروند (۲۰۰۷) همخوانی دارد. نتایج مطالعه ترونین و همکاران (۲۰۰۲) نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های گرمایی فرسرخ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در بسیاری از زلزله‌ها در اطراف کانون زلزله گزارش شده است و به‌منزله یک پیش‌نشانگر زلزله شناخته می‌شود. این بی‌هنجاری‌ها معمولاً تا ۱۴ روز قبل از زلزله‌های بزرگ‌تر از ۴/۸ در مقیاس ریشتر در وسعت چندصد تا چندین هزار کیلومتر کیلومتر مربع حوالی کانون زلزله وجود دارند و چند روز قبل یا بعد از زلزله از بین می‌روند. دقت ثبت بی‌هنجاری‌های فرسرخ با ماهواره‌ها به عواملی نظیر ضریب عبوردهی جوی، دمای سطحی، توان تابشی طیفی، پستی‌وبلندی، زمان، فصل و زاویه دید ماهواره بستگی دارد (فیلی زولا و همکاران، ۲۰۰۴) بعضی از محققین از جمله ترونین و همکاران (۲۰۰۲) و فروند (۲۰۰۴) وجود بی‌هنجاری قبل از رخداد‌های لرزه‌ای را به‌دلیل وجود گازهای گلخانه‌ای نظیر (متان و دی‌اکسیدکربن)، تغییر رژیم آب‌های زیرزمینی و افزایش نرخ تابشی ناشی از اصطکاک و یا انتشار حفره‌های p (نوعی حفره الکترونی که در سنگ‌های سیلیکاته بین پیوندهای اکسیژنی در

۲۰۰۶؛ اوزونف و فروند، ۲۰۰۴؛ پولیتس و همکاران، ۲۰۰۶) قرار گرفته است. عبارت پیش‌نشانگر زلزله برای توصیف انواع گوناگون پدیده‌های فیزیکی، شیمیایی (ژئوشیمیایی)، بیولوژیک (رفتار حیوانات) که قبل از زلزله‌ها رخ می‌دهد، به‌کار گرفته می‌شود. این پدیده‌ها اغلب شامل تغییرات میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی، تغییرات دمایی سطح زمین، گسیل گازها از جمله گاز رادون و تغییرات شیمیایی آب‌های زیرزمینی، دگرشکلی‌های سطحی پوسته زمین و بی‌هنجاری الگوهای لرزه‌ای است. یکی از حوزه‌هایی که در پیش‌بینی زلزله مطرح است تشخیص سیگنال‌های پیش‌نشانگری زلزله است که اصولاً براساس مشاهدات پدیده‌های پیش از زلزله است (سیسرون و همکاران، ۲۰۰۹). در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است تا با ثبت و تحلیل بی‌هنجاری‌های دمای سطح زمین (LST) قبل از زلزله، پیش‌بینی بلندمدت یا کوتاه‌مدت زلزله صورت پذیرد یا تو و کیانگ (۲۰۱۲) تعدادی از زلزله‌ها را براساس بی‌هنجاری‌های گرمایی در چند سال آینده در محدوده ۱۰ تا ۱۰ سال پیش‌بینی کردند. نمونه‌های بارز بی‌هنجاری‌های گرمایی در دو زلزله قوی در منطقه گازی با بزرگای گشتاوری ۷/۲ در تاریخ ۱۹ مارس ۱۹۸۴ که در آن یک هفته قبل بی‌هنجاری‌های مثبت فرسرخ در منطقه مشاهده شد (ترونین، ۱۹۹۶) و دیگری زمین‌لرزه دونگشا در سپتامبر ۱۹۹۲ که افزایش ۶ درجه دمایی در ۵ تا ۲۰ روز پیش از زلزله مشاهده و توسط کیانگ و همکاران (۲۰۰۴) گزارش شده است، دو نمونه از پیش‌بینی‌های موفق در این زمینه است. از سال ۱۹۸۰ محققین زیادی ارتباط بین اطلاعات فرسرخ گرمایی و زمین‌لرزه را موردتوجه قرار دادند و امتیازات استفاده از داده‌های فرسرخ گرمایی تصاویر ماهواره را متذکر شدند از جمله: گورنی و همکاران (۱۹۸۸)، کیانگ و همکاران (۱۹۹۱)، فروند (۲۰۰۲)، اوزونف و فروند (۲۰۰۴)، تراماتولی و همکاران (۲۰۱۳) و کین و ژانگ (۲۰۱۳). در سال ۱۳۸۸ عسکری و همکاران بی‌هنجاری‌های فرسرخ گرمایی قبل

(۲۰۰۳)، زرنده (۲۲ فوریه ۲۰۰۵) و درب آستانه (۳۱ مارس ۲۰۰۶) نشان داد که بی‌هنجاری گرمایی شدید قبل از تمامی این زلزله‌ها به وقوع پیوسته است. چودری و همکاران (۲۰۰۶) نیز بی‌هنجاری‌های گرمایی با سنجنده NOAA\_AVHRR پیش از زلزله بم سال ۲۰۰۳ و زلزله زرنده سال ۲۰۰۵ در ایران را و افزایش دمایی بین ۵ تا ۱۰ درجه سلسیوس را مشاهده کردند. سورکف و همکاران (۲۰۰۶) منشأ ثابت فروسرخ آشکارسازی شده به‌وسیله ماهواره‌ها را در بالای مناطق فعال لرزه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند، نتایج تحقیق آنها منجر به توسعه مدلی نظری برای تبیین بارزسازی گرمایی براساس سازوکار فرآیند همرفتی گرمایش سنگ‌ها شد و بالاآمدن آب‌های زیرزمینی گرم را دلیل اصلی این بی‌هنجاری معرفی کردند. هانگ و همکاران (۲۰۰۸) تابش گرمایی فروسرخ را در زلزله و نشان در چین بر اساس داده‌های مادیس مورد بررسی قرار دادند. لو و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از تصاویر گرمایی سنجنده لندست، همبستگی قوی بین بی‌هنجاری‌های گرمایی با فعالیت گسل‌ها در مقیاس‌های خاصی در گسل ژیان‌شان شائوزینگ (در استان زیجینگ در چین) مشاهده کردند و مناطقی که دماهای بالاتر از دمای پس‌زمینه منطقه را داشتند به‌عنوان منطقه بی‌هنجاری گرمایی معرفی کردند. در همین راستا، ما و همکاران (۲۰۱۰) ارتباط بین تغییرات مکانی-زمانی میدان LST از سنجنده مادیس ترا و فعالیت‌های تکنونیک‌کی روزانه در غرب چین را بررسی کردند. علاوه بر این سراجیان و آخوندزاده (۲۰۱۱) بی‌هنجاری‌های گرمایی براساس روش‌های مختلف در مورد چند زلزله قوی بزرگ‌تر از ۶ ریشتر در ایران را بررسی کردند. یائو و کیانگ (۲۰۱۲) تعدادی از زلزله‌ها را براساس بی‌هنجاری‌های گرمایی در چند سال آینده پیش‌بینی کردند. وئو و همکاران (۲۰۱۲) ارتباط بین گسل‌ها و بی‌هنجاری‌های گرمایی را با استفاده از تصاویر سنجنده لندست بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در مناطق گسلی بی‌هنجاری دمایی آشکار شده است، این بی‌هنجاری‌ها با عمل همرفت طبیعی منطقه زمین

هنگام اعمال فشار به وجود می‌آید) عنوان کرده‌اند. امروزه عوامل مؤثر بر روی دمای سطح زمین، توان تابشی و تابش‌های طیفی در فناوری دورسنجی مطرح است به‌طوری که حتی تأثیر ذرات معلق گرد و غبار در مناطق خشک روی تغییرات درجه حرارت و دیگر شاخص‌ها توسط برخی از متخصصان بررسی شده است. به این ترتیب کارایی و دقت داده‌های فروسرخ گرمایی و استفاده از آنها افزایش چشم‌گیری داشته است. ترونین (۱۹۹۶)، (۲۰۰۰) وجود بی‌هنجاری گرمایی تابش فروسرخ در مناطق سطحی روی گسل‌های فعال و بزرگ را در نواحی لرزه‌خیزی فعال نشان دادند.

نتایج مطالعات سراف (۲۰۰۵) نشان می‌دهد که از لحاظ تاریخی شاید بتوان آغاز به‌کاربردن سنجنش از دور گرمایی در منابع طبیعی را در قرن نوزدهم در روسیه دانست و نخستین کاربرد تصاویر ماهواره‌ای گرمایی نیز در مطالعه زمین‌لرزه در دهه ۸۰ در آسیای میانه بوده است. بعدها تحقیقات مشابهی در چین، ژاپن، هند، ایتالیا، اسپانیا، ترکیه، آمریکا و کشورهای دیگر انجام شده است و بی‌هنجاری‌های گرمایی مهم مرتبط با فعالیت‌های لرزه‌ای برای زمین‌لرزه‌های زیر گزارش شده است: زمین‌لرزه کولیمبا بزرگای گشتاوری ۷/۸ در تاریخ ۲۱ ژانویه ۲۰۰۳ در مکزیک، زمین‌لرزه بواج (گجرات)، با بزرگای گشتاوری ۷/۷ در تاریخ ۲۶ ژانویه ۲۰۰۱، زمین‌لرزه کشمیر با بزرگای گشتاوری ۷/۶ در تاریخ ۱۸ اکتبر ۲۰۰۵ در هند و زمین‌لرزه سیچوآن با بزرگای گشتاوری ۸ در تاریخ ۱۲ می ۲۰۰۸ در چین. در همین راستا سراف و همکاران در سال ۲۰۰۷ زلزله‌های زیادی را در ایران، پاکستان، هند و چین با استفاده از تصاویر حسگر AVHRR مورد مطالعه قرار دادند و به بررسی بی‌هنجاری‌های گرمایی با هدف تشخیص روند تغییرات دمای سطح زمین و ارتباط آن با زمان وقوع زلزله پرداختند. در مطالعه فوق تغییرات LST در یک دوره زمانی قبل از وقوع زلزله بررسی شده است. نتایج تحقیق آنها در مورد سه زلزله مهم ایران شامل بم (۲۵ دسامبر

برای گرفتن اطلاعات قبل از زلزله استفاده شود که می‌تواند موقعیت و زمان وقوع زلزله با بزرگای بیش از ۵/۵ در مقیاس زمانی یک ماه تا شش ماه را پیش‌بینی کند. در همین راستا ونکاتاناتان و همکاران (۲۰۱۷) بی‌هنجاری گرمایی در زلزله بونین را مورد بررسی قرار داده است. همچنین بهاردواج و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه مروری از بی‌هنجاری‌های پارامتر LST به عنوان پیش‌نشانگر زلزله را انجام دادند. وئو و همکاران (۲۰۱۸) روشی را برای تجزیه و تحلیل در تشخیص ناهنجاری‌های سه محصول ماهواره‌ای، از جمله شارگرمایی پنهان سطحی (SLHF)، (Surface Latent Heat Flux)، دمای سطحی پوست (SST) و عمق نوری آئروسول (AOD) برای زمین‌لرزه‌های عراق و ایران یا زمین‌لرزه‌های کرمانشاه در زمستان ۲۰۱۷ پیشنهاد دادند. نتایج آنها استفاده بالقوه از این روش در تشخیص ناهنجاری قبل از لرزه‌ای از مشاهدات ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. اهمیت پیش‌نشانگری زلزله و ضرورت پیش‌بینی زلزله در کشور ما ایران به دلیل خسارت‌ها و تلفات قابل توجه آن همواره مورد توجه بوده است. یکی از حوزه‌هایی که در پیش‌بینی زلزله مطرح است تشخیص سیگنال‌های پیش‌نشانگری زلزله است که اصولاً براساس مشاهدات پدیده‌های پیش از زلزله است. با این حال تاکنون به دلیل پیچیدگی‌ها و متغیرهای متعدد وابسته به رفتار زمین، امکان تعیین دقیق مکان و زمان رویدادهای بزرگ زلزله وجود نداشته است. از سوی دیگر، پیش‌بینی زلزله یک فرآیند انتقالی دینامیکی است و مشاهدات در گذشته در یک نقطه یا منطقه کوچک نمی‌تواند فرآیندهای مکان-زمان را به طور کامل تبیین کند؛ بنابراین باید زلزله به روش‌های جدید که هم در ایستگاه‌ها و هم در میدان بررسی به طور پیوسته در زمان واقعی انجام شود نیاز دارد. با تحقیقات هرچه بیشتر در این زمینه و پاسخ به این پرسش‌ها، می‌توان از طریق سنجش بی‌هنجاری دمایی به عنوان یک روش پیش‌نشانگری کمکی در کنار دیگر پیش‌نشانگرهای پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی همچون داده‌های لرزه‌ای و مغناطیسی، رادون‌سنجی و

گرمایی در گسل‌ها و خصوصاً بر دمای سطحی زمین تأثیر می‌گذارد. آخوندزاده (۲۰۱۴) مدلی ترکیبی برای آشکارسازی بی‌هنجاری‌های گرمایی و محتوای کلی الکترون را در لایه یونسفر براساس تکنیک شبکه‌های عصبی و روش بهینه تجمع پرندگان (PSO، Particle Swarm Optimization) در زلزله سراوان با بزرگای گشتاوری ۷/۵ در آوریل ۲۰۱۳ انجام داد. نتایج او بیانگر افزایش قابل ملاحظه بی‌هنجاری چگالی الکترونی و تغییرات دمایی سطحی زمین در مدت زمان ۴ تا ۸ روز قبل از رویداد زلزله است. نتایج تحقیقات چمیروف و همکاران (۲۰۱۳) در مورد تشخیص و پیش‌نشانگری زلزله نشان می‌دهد که جفت‌شدگی بین اجزای لیتوسفر-جو و اقیانوس قبل از وقوع زلزله اتفاق می‌افتد. زوران و همکاران (۲۰۱۴) بررسی تغییرات قبل از سیگنال‌های لرزه‌ای در پارامترهای در دمای هوا، دمای سطح زمین و تابش طول‌موج‌های خروجی را برای برخی از زلزله‌های ثبت شده در منطقه فعال لرزه‌ای منطقه وانی در رومانی را بررسی کردند. لیزی و همکاران (۲۰۱۵) تکنیک تجزیه و تحلیل ماهواره‌ای قوی (RST، Robust Satellite Technique) را پیشنهاد دادند. آنها زلزله آبروزو (Abruzzo)، ۶ آوریل ۲۰۰۹ با بزرگای ۶/۳ را به عنوان مورد آزمایشی برای بررسی روابط احتمالی بین وقوع زلزله و نوسانات قابل توجه LST حاصل از یک ماهواره زمین‌گرد را در نظر گرفتند. نتایج پژوهش آنها بیانگر این است که بی‌هنجاری در نزدیک محل و مکان زلزله همراه با علل متفاوتی مانند افزایش گازهای گلخانه‌ای مثل متان و دی‌اکسید کربن و تعدیل و تغییر تراز آب و رژیم آن و پدیده‌های پیچیده‌تری همراه بوده است و همه این عوامل با اثرات پیش لرزه‌ها همراه با افزایش دمای سطحی نزدیک زمین و گسیل تابش گرمایی فروسرخ می‌باشد. نتایج مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) نشان می‌دهد که سنجش از دور فروسرخ گرمایی که با اندازه‌گیری تابش فروسرخ سامانه زمین-جو به دست می‌آید شرایط گرمایی زمین را تشخیص می‌دهد و می‌تواند از این شرایط گرمایی

طریق ثبت داده‌های گرمایی سنجنده مادیس موردتوجه قرار گرفته است و با توجه به گستردگی موضوع این مطالعه به‌طور خاص محدود به بررسی پیش‌نشانگر بی‌هنجاری گرمایی از تصاویر مادیس در مورد زلزله سراوان در استان سیستان و بلوچستان شده است.

## ۲. سازوکار بی‌هنجاری‌های گرمایی

تابش فروسرخ به قسمتی از طیف الکترومغناطیس اطلاق می‌شود که طول‌موجی بزرگ‌تر از امواج مرئی و کوچک‌تر از امواج مایکروویو دارد. یکی از مهم‌ترین بخش‌های باندهای فروسرخ، فروسرخ گرمایی (Thermal Infrared) است و به آن دسته طول‌موج‌ها اطلاق می‌شود که در اثر حرارت اجسام تولید شده و تابیده می‌شود. قسمت اعظمی از این انرژی‌های تابشی توسط جو جذب می‌گردند. تنها پنجره‌ای در دامنه ۸ تا ۱۴ میکرومتر وجود دارد که جذب جوی در آن پایین است و باندهای گرمایی سنجنده‌ها نیز در همین قسمت قرار دارند (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۳).

تقویت تنش‌ها در مناطق تکتونیکی منجر به تولید و گسترش ریزترک‌ها می‌شود. گازهای ردیابی شده در این شکاف‌ها فرار می‌کنند و یک اثر گلخانه‌ای محلی و در نتیجه یک بی‌هنجاری گرمایی در نزدیکی سطح زمین ایجاد می‌کنند. همچنین نتایج مطالعات کیانگ و همکاران (۱۹۹۱) در آزمایشگاه شکست سنگ نشان می‌دهد که مقداری گاز در ارتباط با تغییر شکل زیرسطحی آزاد شده است و همین مسأله سبب افزایش دمای سطحی زمین شده است. گسیل‌های فرو سرخ در نمونه‌های تحت فشار سنگ‌ها نیز توسط اوزونوف و فروند در سال ۲۰۰۴ گزارش شده است.

کاربرد تصاویر گرمایی در تهیه نقشه‌های زمین‌شناختی براساس این واقعیت بنا شده که سنگ‌های غیر متخلخل گرما را بهتر از خاک‌های نرم انتقال می‌دهند. بنابراین سنگ‌های سخت غیرمتخلخل در شب گرمای کره‌زمین را

الکترومغناطیسی بهره‌جست. ساده‌ترین فرضیه‌ای که در مورد تشکیل بی‌هنجاری دمای پیش از زلزله ذکر شده است. این است که در مناطق تکتونیکی فعال تنش‌های زیادی ایجاد می‌شود و دما با افزایش فشار زیاد می‌شود و در نتیجه در این نقاط با افزایش تنش‌ها LST افزایش می‌یابد. علاوه‌براین تنش‌ها سبب خروج گاز از لایه سطحی زمین می‌شود و تحت شرایط فرار گازها به جو یک اثر گلخانه‌ای به‌وجود می‌آید و دما در این نواحی افزایش می‌یابد و منطقه بی‌هنجاری گرمایی تشکیل می‌شود. فرضیه دیگری نیز براساس باردارشدن الکتریکی سنگ‌ها قبل از وقوع زلزله توسط فروند (۲۰۰۲ و ۲۰۰۴) و فروند و همکاران (۲۰۰۴) بیان شده است. براساس این نظریه، تغییر شکل پوسته پیش از زمین‌لرزه با یک میدان تنش مرتبط است. با توجه به میدان تنش موجود، فشار زیرسطحی و در نتیجه آن دما افزایش می‌یابد. چنین انحرافی از وضعیت نرمال در رژیم گرمایی می‌تواند به‌عنوان گزینه مناسبی برای مشاهدات مطالعاتی زمین‌لرزه در نظر گرفته شود.

در این مطالعه نیز نظر به اهمیت پیش‌نشانگری زلزله با توجه به ضرورت پیش‌بینی زلزله در کشور ما ایران، به‌عنوان یک منطقه زلزله‌خیز، که بر روی کمر بند زلزله آلپ-همیالیا واقع شده است، آشکارسازی بی‌هنجاری‌های پارامتر LST از طریق ثبت تصاویر گرمایی مطرح شده است. بر طبق اسناد و مدارک به نقل از سایت مرکز لرزه‌نگاری کشوری (۱۳۹۵) در هفتاد سال اخیر ۱۲ زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۷ و به‌طور متوسط هر سال یک زلزله با بزرگای گشتاوری بیش از ۶ در ایران رخ داده است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد برخی از زلزله‌های ایران توسط سراف و همکاران (۲۰۰۷)، چودری و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از حسگر AVHRR مورد بررسی قرار گرفته است و در این پژوهش از داده‌های گرمایی سنجنده مادیس استفاده شده است، به‌همین منظور بی‌هنجاری‌های LST پیش از زمین‌لرزه‌های بیش از ۶ در مقیاس امواج سطحی در یک دهه اخیر از

به نسبت بیشتر از پوشش خاکی مناطق اطراف خود انتقال می‌دهند. در نتیجه در محدوده‌هایی بی‌هنجاری گرمایی به وجود می‌آید که سنجنده‌ها می‌توانند آنها را آشکار کنند. از طرف دیگر سنگ‌های متخلخل، بی‌هنجاری گرمایی یکسانی در تصاویر برداشت شده هنگام شب از خود نشان نمی‌دهند و در واقع ممکن است بعد از بارندگی در آنها بی‌هنجاری سرد ناشی از رطوبت تولید شود. تصاویر ماهواره‌ای، بی‌هنجاری‌های فروسرخ شب هنگام، از اطراف منطقه رومرکز پیش از زمین‌لرزه‌های بزرگ نشان داده‌اند. که به‌عنوان بی‌هنجاری‌های گرمایی از آنها یاد می‌شود و همچنین اغلب ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتر طول دارند. آنها در گزارش‌ها چند روز پیش از زمین‌لرزه‌های بزرگ پدیدار شده‌اند و اغلب به‌سرعت از لحاظ گسترش منطقه‌ای و شدت دچار افت‌وخیز می‌شوند. همچنین گزارش‌ها نشان می‌دهد که خیلی زود پس از شوک اصلی و پس‌لرزه‌های بزرگ ناپدید می‌شوند. سرعتی که بی‌هنجاری‌های گرمایی با آن پدیدار و سپس ناپدید می‌شوند را نشان می‌دهد که آنها توسط گرمایی از منبعی در زیر سنگ‌ها که سطح زمین گرم می‌کند، ایجاد شده‌اند (ترونین، ۲۰۰۰، ۱۹۹۶ و ۲۰۱۰؛ سراف و همکاران، ۲۰۰۹).

### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد توجه شامل شهر سراوان واقع در استان سیستان و بلوچستان در مختصات طول جغرافیایی ۶۲/۲۰ درجه شرقی و ۲۸/۲۰ درجه شمالی انتخاب شد (شکل ۱). در تاریخ ۱۶ آوریل سال ۲۰۱۳ مطابق با روز سه‌شنبه ۲۷ فروردین ماه ۱۳۹۲ در ساعت ۱۵:۱۴:۱۸ (به وقت محلی)، زلزله‌ای در منطقه سراوان رخ داد. زمین‌لرزه سراوان یا گشت در شهرستان سراوان، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۷/۵ و عمق ۹۲ کیلومتر بنابه گزارش مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) موسسه ژئوفیزیک، در نزدیکی شهر گشت از توابع شهرستان سراوان در استان

سیستان و بلوچستان رخ داد. براساس گزارش پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۲) با توجه به تاریخچه لرزه‌خیزی منطقه این زمین‌لرزه بزرگ‌ترین زمین‌لرزه در نیم‌قرن اخیر در این گستره می‌باشد. کانون زلزله در ۸۶ کیلومتری شمال باختری سراوان و ۱۲ کیلومتری شهر گشت در موقعیت  $28/09^{\circ}N$  درجه شمالی و  $62/04^{\circ}E$  درجه شرقی در استان سیستان و بلوچستان به‌وقوع پیوست. دلیل این عمق کانونی ژرف قرارگیری کانون زمین‌لرزه در زون فرورانشی مکران می‌باشد. با توجه به مکان رومرکز زمین‌لرزه، این رویداد لرزه‌ای احتمالاً در زیر سامانه گسلی سراوان رخ داده است. این گسل، گسلی بنیادین، فعال و بزرگ (به‌طول تقریبی ۲۵۰ کیلومتر) با راستای شمال باختری-جنوب خاوری در جنوب خاوری ایران است. این زمین‌لرزه در ناحیه‌ای تقریباً خالی از جمعیت اتفاق افتاد و به دلیل عمق کانونی زیاد و تراکم کم جمعیت در منطقه، در اثر این زمین‌لرزه در ایران ۱ نفر کشته (در روستای قادرآباد شهرستان خاش) و در کشور پاکستان ۴۰ نفر کشته و جمعاً بیش از ۱۸۰ نفر مجروح شدند. این زمین‌لرزه موجب تخریب صدها منزل مسکونی در پاکستان شد و تکان شدید حاصل از آن در ساختمان‌های بلند دبی، دوحه، منامه و حتی در کویت احساس شد. به‌علاوه، این زلزله در کشورهای هند، افغانستان، پاکستان، کشورهای جنوبی خلیج فارس و همچنین در کرمان، شیراز و مناطق شمال استان سیستان و بلوچستان به‌خوبی احساس شد. بررسی گستره لرزه زمین ساخت مکران نشان می‌دهد که استان سیستان و بلوچستان در زون ساختمانی-رسوبی خاور و جنوب خاوری ایران واقع شده است که براساس گزارش پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۹۲) از نظر زمین‌شناسی دارای تقسیمات زیر می‌باشد: ۱- نهبندان-خاش یا فلیش (رسوبات توریدیتی)، ۲- بلوک لوت و ۳- مکران و گودال جازموریان. حد شمالی زون خاور و جنوب خاوری ایران را گسل میامی یا گسل شاهرود، حد خاوری آن را مرز ایران با پاکستان و

جدول ۱. ویژگی باندهایی که در این مطالعه استفاده شده است (سایت مادیس، ۲۰۱۹).

باند	پهنای باند (میکرومتر)
۲	۸۴۱-۸۷۶
۵	۱۲۳۰-۱۲۵۰
۱۷	۸۹۰-۹۲۰
۱۸	۹۳۱-۹۴۱
۱۹	۹۱۵-۹۶۵
۳۱	۱۰۷۸۰-۱۱۲۸۰
۳۲	۱۱۷۷۰-۱۲۲۷۰

### ۳-۳. روش پژوهش

از آنجاکه داده‌های فروسرخ گرمایی ماهواره‌ها از طریق معادله انتقال تابشی با پارامتر LST ارتباط مستقیم دارد، از سال ۱۹۷۰ بازیابی LST از داده‌های فروسرخ مورد توجه زیادی قرار گرفته است و الگوریتم‌های متفاوتی برای محاسبه آن براساس نوع تصاویر ماهواره معرفی شده است. تخمین مستقیم LST از تابش گسیل شده در ناحیه طیفی فروسرخ با دقت زیاد مشکل است، زیرا رادینانس‌های اندازه‌گیری به‌وسیله رادیومترهای متصل به ماهواره‌ها نه تنها به پارامترهای سطحی دما و تابش بلکه به اثرات جوی نیز بستگی دارد. بنابراین علاوه بر کالیبراسیون رادیومتریک و صفحه‌بندی ابر (Cloud Screening) در زمانی که همه پیکسل‌های تصویر یا بخشی از آن دارای پوشش ابر است و میزان گسیل، تعیین LST از فضا براساس اندازه‌گیری در ناحیه طیفی فروسرخ به‌رود تصحیحات جوی و تابش نیاز دارد. در این ارتباط مطالعات زیادی با روش‌های متفاوت برای تخمین و بازیابی LST انجام شده و الگوریتم‌های متفاوتی پیشنهاد شده است (تقوی و همکاران، ۱۳۹۵). به‌طور کلی این روش‌ها به‌سه دسته روش تک‌کاناله، روش چندزاویه‌ای و تکنیک پنجره مجزا (سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۶) تقسیم‌بندی شده است. اگرچه قدیمی‌ترین مطالعه مروری در مورد بازیابی دمای سطحی توسط (پراتا و همکاران، ۱۹۹۵؛ دش و همکاران، ۲۰۰۲) انجام شده است. سوبرینو و همکاران (۲۰۰۴) به بازیابی دمای سطح زمین براساس

افغانستان و حد جنوبی آن را دریای عمان و حد باختری آن زاگرس است. بخشی وسیعی از این زون به‌وسیله شن و ماسه و سنگ‌های آتشفشانی سنوزوئیک پوشیده شده است. سنگ‌های آتشفشانی سنوزوئیک کانسارهای فلزی (مس، سرب، روی، قلع، کرم، تنگستن) و غیرفلزی (پنبه‌سوز، منیزیت) بیشترین فراوانی را دارا می‌باشند.

### ۳-۲. داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از داده‌های سنجنده مادیس (MODIS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) استفاده شده است این سنجنده روزانه در دو زمان ۱۰:۳۰ و ۱۳:۳۰ در ۳۶ باند طیفی از ۰/۴۱۵ تا ۲۳۵/۱۴ میکرومتر با پوشش جهانی تصویربرداری می‌کند (سایت مادیس، ۲۰۱۹). ولی از میان ۳۶ باند مادیس از پنج تا از آنها یا باندهای فروسرخ نزدیک (NIR) از جمله باند ۲ (۰/۸۶۵ میکرومتر)، باند ۵ (۱/۲۴ میکرومتر)، باند ۱۷ (۰/۹۰۵ میکرومتر)، باند ۱۸ (۰/۹۳۶ میکرومتر) و باند ۱۹ (۰/۹۴ میکرومتر) و همچنین از باندهای ۳۱ و ۳۲ با طول‌موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر در مجموعه گسیلمندی استفاده می‌شود. باندهای ۲ و ۵ باندهای پنجره جوی و باندهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ سه باند جذبی هستند. تصاویر این سنجنده دارای سه گروه مقادیر هستند: بازتابش (Reflectance)، تابایی (Radiance) و گسیلمندی (Emissivity). این تصاویر با ویژگی‌هایی که مطرح شد در سایت ناسا (۲۰۱۷) موجود هستند. تصاویر موجود در این سایت با پسوند فرمت داده سلسله مراتبی (Hierarchical Data Format, HDF) است. HDF درواقع کتابخانه و فرمت پوشه چندمنظوره برای انتقال داده گرافیکی و عددی است که به‌طور رایگان در سایت کتابخانه داده‌های سلسله مراتبی (۲۰۱۷) دسترس می‌باشد و برای هر تصویر چند تفکیک شامل ۲۵۰، ۵۰۰ متر و ۱ کیلومتر وجود دارد. در این بررسی از داده‌های تصویر با تفکیک ۱ کیلومتر استفاده شده است.

داده‌های ماهواره‌های هواشناسی نسل دوم (MSG/SEVIRI)، METEOSAT Second Generation/Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) به همراه تصویربرداری مریخی و فرورسرخ بر اساس روش اندازه‌گیری دو دمایی پرداخته‌اند. لی و همکاران (۲۰۱۳) الگوریتم‌های مختلف تخمین LST را مورد بررسی قرار داده‌اند. با وجود این، روش‌های جدیدی نیز در این سال‌ها معرفی شده است. (لو و همکاران، ۲۰۱۶).

در مطالعه حاضر از الگوریتمی براساس تکنیک پنجره مجزا (Split Window Technique, SWT) به نام ساب مائو (ژائو و همکاران، ۲۰۰۹) که ترکیبی از دو روش بر گرفته از الگوریتم سویرینو و همکاران (۲۰۰۳) و مائو و همکاران (۲۰۰۵) است، برای محاسبه LST استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها یک الگوی عمومی دارد و در همه الگوریتم‌ها از ویژگی‌های جذب‌های جزئی در باند گرمایی برای تصحیح اثرات جوی استفاده می‌شود، ولی تکنیک‌های متفاوتی برای محاسبه پارامترها توسط پژوهشگران به کار گرفته شده است. وان و لی (۱۹۹۷) الگوریتمی چند باندهی برای استخراج گسیلمندی (Emissivity) و محاسبه LST از سنجنده EOS/MODIS پیشنهاد کردند. کین و همکاران (۲۰۰۱) ساده‌سازی‌های قابل قبولی در معادله انتقال تابش انجام دادند و الگوریتمی که فقط دو پارامتر گسیلمندی و عبوردهی در آن دخالت داشت، معرفی کردند. در این الگوریتم دقت محاسبه LST زیر ۲ درجه سلسیوس بود. سویرینو و همکاران (۲۰۰۳) روشی را براساس الگوریتم کین و همکاران (۲۰۰۱) و (۲۰۰۴) بسط و توسعه دادند که در آن تصحیحات جوی و گسیلمندی انجام می‌شد. گسیلمندی زمینی، عبوردهی جوی و دو پارامتر محتوای آب جو و پارامتر جذب جوی در این الگوریتم وارد شده بود. برای محاسبه پارامتر عبوردهی از محتوای آب درون جو که اطلاعات آن از ایستگاه هواشناسی گرفته می‌شد، استفاده می‌شد. علاوه بر این روش‌های مختلفی برای محاسبه دو پارامتر مهم

گسیلمندی و عبوردهی براساس باندهای گرمایی، مریخی و نزدیک فرورسرخ وجود دارد. از جمله مائو و همکاران (۲۰۰۵) نیز براساس الگوریتم‌های کین و همکاران (۲۰۰۱) و (۲۰۰۴) و سویرینو و همکاران (۲۰۰۳) روش ساب مائو را با استفاده از داده‌های مادیس برای محاسبه دمای سطح زمین معرفی کردند که در مطالعه حاضر از این روش استفاده می‌شود. مهم‌ترین امتیاز این روش این است که محتوای آب در جو به وسیله باندهای نزدیک فرورسرخ (NIR) سنجنده مادیس تهیه می‌شود و این مسأله امکان تعیین دقیق عبوردهی برای هر پیکسل را به وجود می‌آورد (مائو و همکاران، ۲۰۰۵a؛ مائو و همکاران، ۲۰۰۵b؛ مائو و همکاران، ۲۰۰۵c). همچنین روشی برای ساده‌سازی تابع پلاننگ و تبدیل آن به یک تابع خطی و تعیین ضریب عبوردهی از باندهای فرورسرخ نزدیک این سنجنده و تخمین گسیلمندی انجام می‌شود. در این مطالعه ابتدا تصاویر Mode 02 level 1B سنجنده مادیس مربوط به آن بازه تاریخی از طریق صفحه مربوطه در سایت ناسا (NASA) گرفته شد. سپس تصحیحات رادیومتریک و هندسی جهت زمین مرجع کردن و قرارگیری تصویر در مکان مناسب جغرافیایی خود انجام گرفت. بعد از زمین مرجع کردن تصاویر، باید مقدار هر پیکسل در این تصاویر که اعداد رقمی (Digital Number, DN) هستند به دمای درخشندگی تبدیل شود. DN بازتاب پدیده‌ها به سنجنده موردنظر است. شاخص پوشش گیاهی NDVI جهت استخراج میزان گسیلمندی و دماهای درخشندگی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده مادیس در طول موج‌های ۱۰/۷۸۰ تا ۱۲/۲۷۰ میکرومتر که مرتبط با تابش‌های فرو سرخ می‌باشند نیز جهت استخراج متغیر قابلیت عبور، محاسبه شدند. با توجه به اینکه پیکسل‌های تصاویر دارای خطای هندسی و مقدار درخشندگی اندازه‌گیری شده یا رادیومتری هستند لازم است، پیش‌پردازش اولیه به‌منظور حذف این خطاها انجام شد. در این تحقیق داده‌های ماهواره‌ای یک هفته پیش و یک هفته پس از این زمین‌لرزه بررسی شد و جهت پردازش داده‌های سنجنده

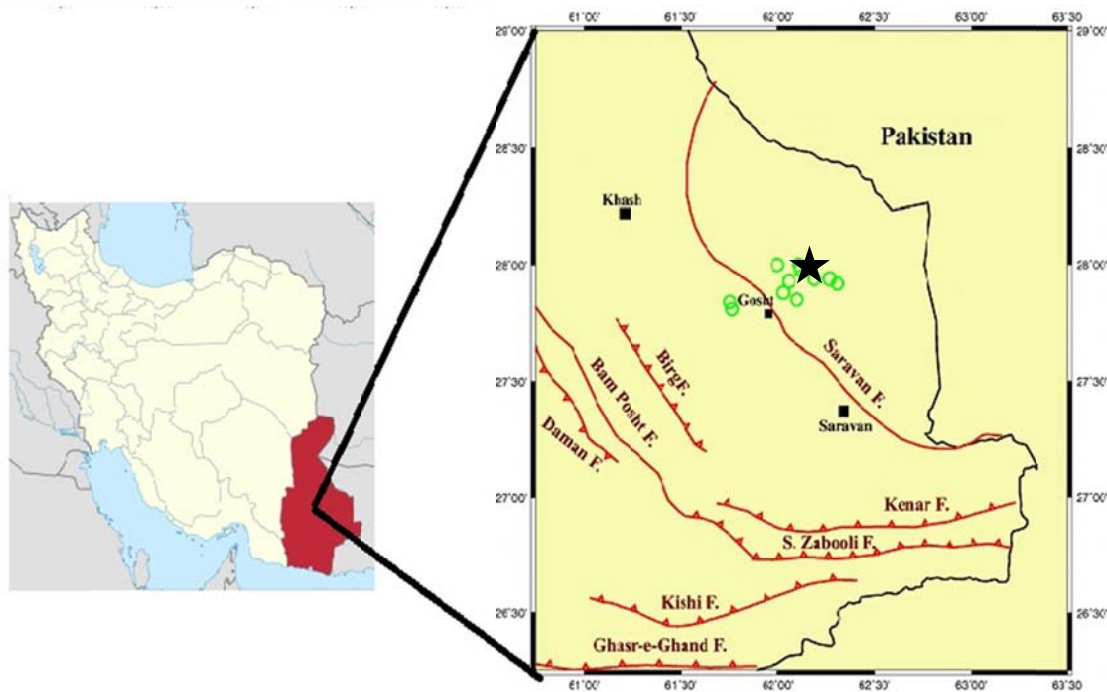


گرمایی زمینی و انتقال آن از زمین به جو معمولاً فرض می‌شود که زمین جسم سیاه هست و گسیلمندی زمین برای محاسبه تابش گرمایی خروجی از زمین در نظر گرفته می‌شود. با توجه به همه پیامدهای آن معادله انتقال تابش را می‌توان به شکل رابطه ۱ نوشت (مائو و همکاران، ۲۰۰۵) که در آن  $T_s$  دمای سطح زمین یا LST،  $B_i(T_i)$  تابش زمینی در دمای درخشندگی  $T_i$  در باند  $i$ ،  $\tau_i$  عبوردهی جوی در زاویه دید  $(\theta)$ ،  $\varepsilon$  گسیلمندی زمینی،  $I_{i\uparrow}$  تابش ورودی و  $I_{i\downarrow}$  تابش خروجی است و اگر مقدار تابش ورودی و خروجی مساوی در نظر گرفته شود و مقادیر ثابتی برای گسیلمندی و عبوردهی در باندهای ۳۱ و ۳۲ در نظر گرفته شود، می‌توان رابطه خطی ساده برای معادله تابش پلانک با رابطه خطی (۲) نوشت. این معادله را برای دو باند ۳۱ و ۳۲ گرمایی سنجنده مادیس بازیابی و به شکل روابط ۳ و ۴ به دست می‌آید. در این رابطه  $B_{31}(T_i)$  و  $B_{32}(T_i)$  تابش در دمای  $T$  مربوط به باندهای ۳۱ و ۳۲ باند گرمایی سنجنده مادیس است.

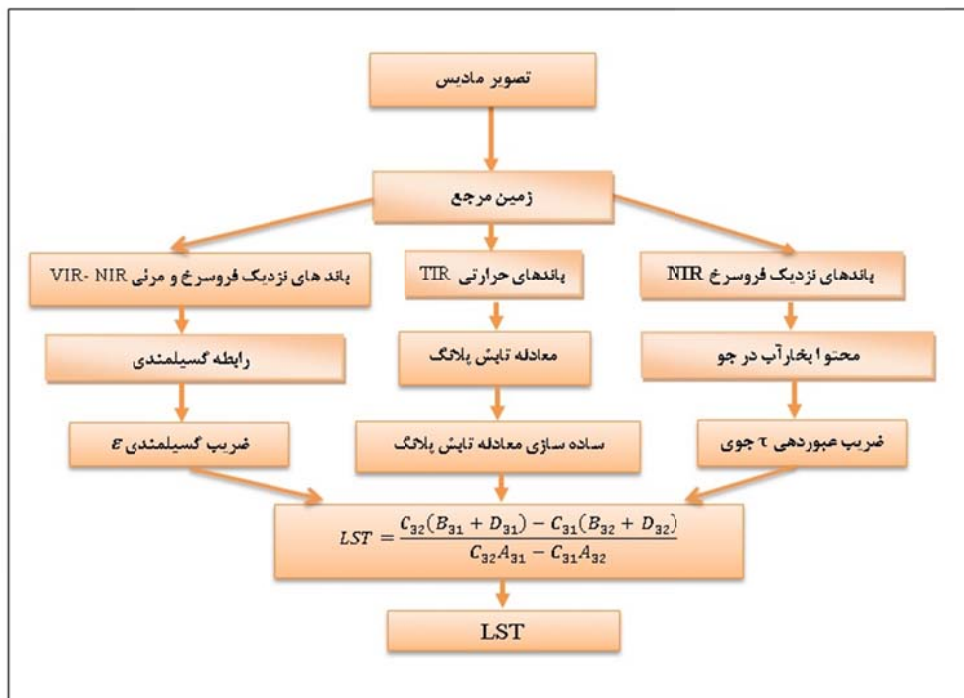
مادیس و محاسبه پارامتر LST و تهیه تمامی نقشه‌ها، از نرم‌افزار (ENVI، Environment For Visualizing Images) استفاده شده است. نرم‌افزار جهت انجام و اجرای برخی از نیازهای خاص به‌خصوص استفاده از داده‌های ماهواره‌ای طراحی شده است. پیاده‌سازی این روش به صورت یک کد عملیاتی در مورد همه زلزله‌های با بزرگای بیش از ۶ در ایران تهیه شده است. در شکل ۲ به صورت فلوچارت محاسبه الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

### ۳-۳-۱. ساده‌سازی تابع پلانک

در این مطالعه جهت محاسبه دمای سطحی زمین از معادله انتقال تابش یا تابع پلانک (Planck Function) استفاده شده است. براساس این تابع طیف تابش اجسام برحسب واحد  $(Wm^{-2}\mu m^{-1} sr^{-1})$  معادل حاصل ضرب مقدار تابش جسم سیاه در گسیلمندی طیفی در طول موج  $\lambda$  و دمای جسم  $T$  برحسب کلونین می‌باشد. برای محاسبه تابش



شکل ۱. موقعیت استان سیستان و بلوچستان و رومرکز زلزله در شمال غرب سراوان در موقعیت جغرافیایی (E ۶۲/۰۴ درجه و N ۲۸/۰۹ درجه) و با ستاره سیاه نمایش داده شده است. خطوط منحنی قرمز رنگ محل گسل‌ها را نشان می‌دهد. رومرکز زلزله در نزدیکی گسل سراوان است. دایره‌های سبزرنگ محل پس‌لرزه‌های این زلزله را نشان می‌دهد (شکل برگرفته از گزارش پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۲).



شکل ۲. فلوجارت استخراج دمای سطح زمین (LST) از داده‌های مادیس براساس الگوریتم ساب مانو (ژائو و همکاران، ۲۰۰۹).

پیشنهاد شده است. در الگوریتم پنجره مجزا شبیه‌سازی برای تخمین این ضریب براساس مقدار بخار آب بر حسب گرم بر سانتی‌متر مربع برای دو باند ۳۱ و ۳۲ مادیس به شکل معادلات ۵ و ۶ انجام می‌شود.

$$T_{31} = 2.89798 - 1.88366e^{-(W/-21.22704)}, R^2 = 0.99748 \quad (5)$$

$$T_{32} = -3.59289 + 4.60414e^{(W/-32.70639)}, R^2 = 0.99685 \quad (6)$$

### ۳-۳-۳. تعیین ضریب گسیلمندی

گسیلمندی (Emissivity) ویژگی ذاتی مواد طبیعی است و با توجه به اینکه تابش اندازه‌گیری شده از فضا در محدوده طیفی از ناحیه مرئی، نزدیک فروسرخ و فروسرخ گرمایی تا موج ماکروویو تغییر می‌کند بنابراین تغییرات طیفی این ضریب بستگی زیادی به جنس مواد در انواع مواد مانند سنگ‌ها، خاک، پوشش گیاهی، آب، یخ و برف دارد و نشانه‌ای از ترکیبات مواد به خصوص مواد سیلیکاتی در سطح زمین دارد و مقدار آن به زاویه دید و ناهمواری سطحی تغییر می‌کند براساس تعریف ضریب

$$B_i(T_i) = \tau_i(\theta)[\varepsilon_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i)I_{i\downarrow}] + I_{i\uparrow} \quad (1)$$

$$B_i = a_i + B_i(T_i) \quad (2)$$

$$B_{31}(T_i) = 0.13787(T_{31}) - 31.65677, R^2 = 0.9971 \quad (3)$$

$$B_{32}(T_i) = 0.11849(T_{32}) - 26.50036, R^2 = 0.9978 \quad (4)$$

### ۳-۳-۲. تعیین ضریب عبوردهی جوی

عبوردهی جوی (Atmospheric Transmittance) یکی از پارامترهای کلیدی در محاسبه دمای سطحی زمین (LST) در الگوریتم پنجره مجزا SWT است. بسیاری از اجزای جو مانند گازهای دی‌اکسید کربن، اکسید نیتروژن، ازن، متان و بخار آب بر عبوردهی تأثیر زیادی دارند و از بین آنها مقدار بخار آب بسیار متغیر است و بنابراین پارامتر عبوردهی جوی بستگی زیادی به محتوای بخار آب درون جو دارد. به همین علت روشی برای تعیین محتوای آب از داده‌های مادیس بر اساس باندهای گرمایی به شکل زیر

۰/۹۲ و ضریب گسیلمندی در باند ۳۲ برای پوشش گیاهی، خاک و آب به ترتیب ۰/۹۷۶، ۰/۹۹۱ و ۰/۹۸۸ می‌باشد (مائو و همکاران، ۲۰۰۵).

### ۳-۳-۴. الگوریتم پنجره مجزا بر اساس داده‌های مادیس

برای محاسبه LST براساس فلوجارت شکل ۱ ابتدا تابش ورودی و خروجی را به شکل روابط ۱۳ و ۱۴ نوشته و در معادله انتقال تابش (رابطه ۱) جایگزین می‌شود. سپس معادله انتقال تابش یا رابطه ۱ را برای دو باند ۳۱ و ۳۲ ساده‌سازی کرده و با ترکیب با معادله ۳ و ۴ به شکل معادله‌های ۱۵ تا ۲۴ نمایش داده می‌شود و با حل این معادله مقدار دمایی سطح زمین  $T_s$  یا LST براساس معادله ۲۵ تعیین می‌شود. در این رابطه ضرایب A، B، C، D برای دو باند ۳۱ و ۳۲ به ترتیب به شکل زیر تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که میانگین ضریب عبوردهی باند ۳۱ و ۳۲ به ترتیب  $\tau_{31} = 0.857237$  و  $\tau_{32} = 0.778058$  است.

$$I_{i\uparrow} = (1 - \tau_i(\theta')) B_i(T_a \uparrow) \quad (13)$$

$$I_{i\downarrow} = (1 - \tau_i(\theta')) B_i(T_a \downarrow) \quad (14)$$

$$A_{31}T_s = B_{31} - C_{31}T_a + D_{31} \quad (15)$$

$$A_{32}T_s = B_{32} - C_{32}T_a + D_{32} \quad (16)$$

$$A_{31} = 0.13787 \times \varepsilon_{31} \times \tau_{31} \quad (17)$$

$$B_{31} = 0.13787 \times T_{31} + 31.65677 \times \tau_{31} \times \varepsilon_{31} - 31.65677 \quad (18)$$

$$C_{31} = (1 - \tau_{31})(1 + (1 - \varepsilon_{31}) \times \tau_{31}) \times 0.13787 \quad (19)$$

$$D_{31} = (1 - \tau_{31})(1 + (1 - \varepsilon_{31}) \times \tau_{31}) \times 31.65677 \quad (20)$$

$$A_{32} = 0.11849 \times \varepsilon_{32} \times \tau_{32} \quad (21)$$

$$B_{32} = 0.11849 \times T_{32} + 26.50036 \times \tau_{32} \times \varepsilon_{32} - 26.50036 \quad (22)$$

$$C_{32} = (1 - \tau_{32})(1 + (1 - \varepsilon_{32}) \times \tau_{32}) \times 0.11849 \quad (23)$$

$$D_{32} = (1 - \tau_{32})(1 + (1 - \varepsilon_{32}) \times \tau_{32}) \times 26.50036 \quad (24)$$

گسیلمندی برابر است با نسبت تابش گسیل شده از جسم در دمای T به تابش جسم سیاه در همان دما. در این الگوریتم سطح زمین را شامل سه مؤلفه اصلی پوشش گیاهی، خاک و آب فرض می‌شود و عموماً پیکسل‌های مادیس را به دو دسته آب و خشکی تقسیم‌بندی می‌شود و برای تعیین گسیلمندی طیفی آب از دو باند گرمایی مادیس استفاده می‌شود. شواهد اندازه‌گیری نشان می‌دهد که این ضریب در مورد باندهای ۳۱ و ۳۲ مادیس (۱۲/۲۴۰ - ۱۱/۷۷۰ و ۱۱/۲۸۰ - ۱۰/۷۸۰) است. برای پیکسل‌های خشکی از رابطه ۷ که گسیل خشکی را شامل خاک و پوشش گیاهی در نظر می‌گیرد، استفاده می‌شود. اگر سطح زمین شامل این سه مؤلفه باشد از رابطه ۸ برای تعیین گسیلمندی میانگین استفاده می‌شود. در این رابطه  $P_v$  کسر پوشش گیاهی،  $P_w$  کسر سطح آبی،  $R_v$  و  $R_s$  نسبت تابش خاک و پوشش گیاهی،  $\varepsilon_s$  گسیلمندی خاک و  $\varepsilon_v$  گسیلمندی پوشش گیاهی است. کین و همکاران (۲۰۰۴) برای تعیین مقادیر دقیق این دو نسبت تابش برای پیکسل‌های خشکی از روابط ۹ و ۱۰، استفاده کردند. آنها برای تعیین  $P_v$  از معادله شماره ۱۱ که از شاخص اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) که براساس تعریف اختلاف بازتابش دو باند ۲ (NIR) و باند ۱ (RED) مادیس که با رابطه ۱۲ نمایش داده می‌شود، استفاده کردند. مقدار این شاخص در مورد پوشش گیاهی حدود ۰/۶۵ و در مورد خاک حدود ۰/۰۵ است.

$$\varepsilon B(T) = P_v B(T_v) \varepsilon_v + (1 - P_v) B(T_s) \varepsilon_s \quad (7)$$

$$\varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v - P_w) R_s \varepsilon_s \quad (8)$$

$$R_v = 0.9332 + 0.0585 P_v \quad (9)$$

$$R_s = 0.9902 + 0.1068 P_v \quad (10)$$

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (11)$$

$$NDVI = \frac{(NIR) - (RED)}{(NIR) + (RED)} \quad (12)$$

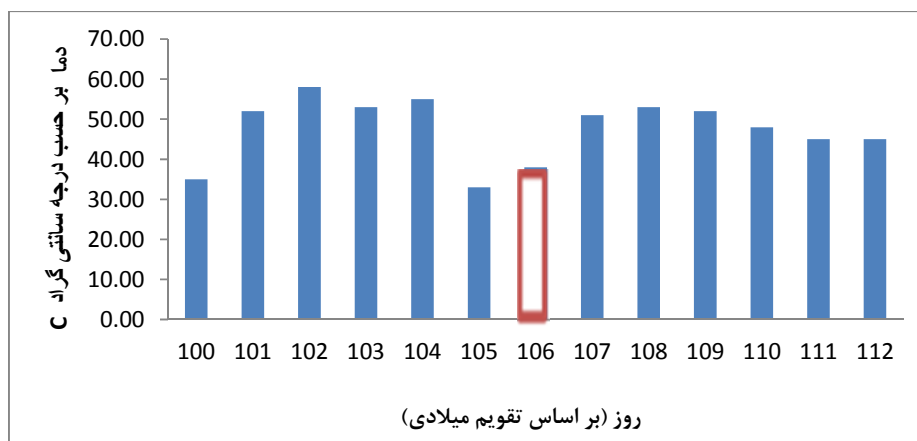
براساس این روش مقدار ضریب گسیلمندی در باند ۳۱ برای پوشش گیاهی، خاک و آب به ترتیب ۰/۹۸۶، ۰/۹۹ و ۰/۹۸۶ و

بی‌هنجاری‌ها، آمار و اطلاعات هواشناسی شامل میانگین روزانه دما، رطوبت، فشار، نقشه‌های هواشناسی و خروجی مدل در بازه زمانی هفتگی رویداد زلزله برای ایستگاه هواشناسی سراوان مورد بررسی قرار گرفت. ایستگاه هواشناسی سراوان در موقعیت (طول و عرض جغرافیایی ۶۲/۲۰ درجه و ۲۷/۲۰ درجه) قرار دارد. شکل ۴ سری‌زمانی میانگین دما و رطوبت و فشار ایستگاه سراوان در یک هفته قبل و یک هفته بعد از زلزله (شکل ۴-الف و ۴-ب) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار تغییرات دمایی مشاهده می‌شود، تغییر دمایی قابل‌ملاحظه‌ای وجود ندارد تغییرات متداول شبانه‌روزی در نمودارها مشخص است. برای اطمینان بیشتر نقشه فشار سطح نیز بررسی شد. تنها در تاریخ ۱۶ آوریل یک افت فشار دیده می‌شود که با توجه به نقشه‌ها تنها یک پدیده محلی است و سامانه جوی در این منطقه حاکم نیست و پدیده هواشناسی قابل‌ملاحظه‌ای مانند عبور امواج گرمایی که باعث تغییرات شدید در دمای سطح زمین شود مشاهده نشد.

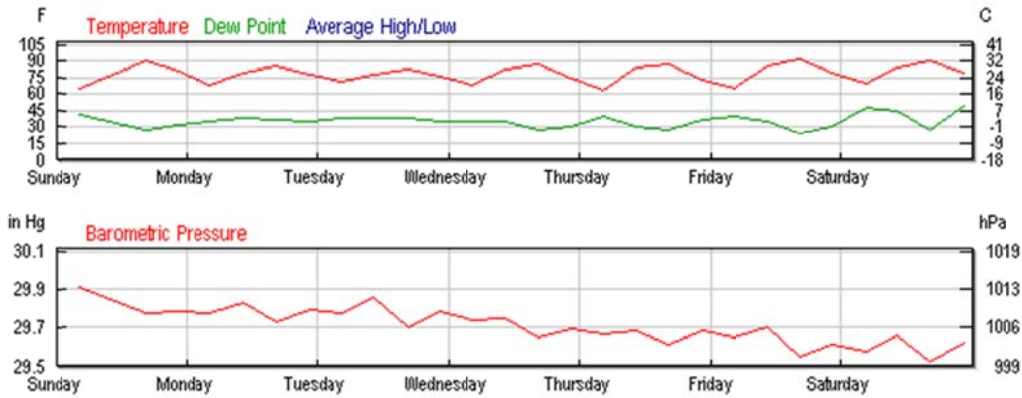
$$LST = T_s = \frac{C_{32}(B_{31}+D_{31})-C_{31}(B_{32}+D_{32})}{C_{32}A_{31}-C_{31}A_{32}} \quad (25)$$

#### ۴. نتایج و بحث

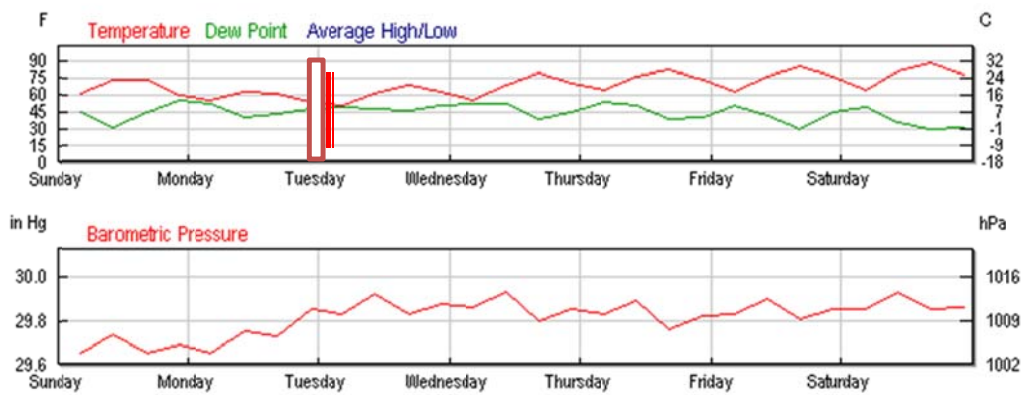
در این تحقیق ابتدا منحنی تغییرات LST در بازه‌زمانی یک هفته پیش و یک هفته پس از زمین‌لرزه سراوان (از روز ۱۰۰ تا روز ۱۱۲ در سال ۲۰۱۳) براساس الگوریتم پنجره مجزا فلوچارت (شکل ۲) با استفاده از داده‌های مادیس بررسی شد. شکل ۳ سری‌زمانی تغییرات دمای سطح زمین (LST) زمین‌لرزه سراوان در یک محدوده پیکسل نزدیک به مرکز زلزله در این بازه‌زمانی را نشان می‌دهد همان‌گونه که در نمودار شکل ۳ دیده می‌شود، بی‌هنجاری گرمایی در روز ۱۰۲ مصادف با چهار روز پیش از زمین‌لرزه یا روز ۱۲ آوریل ۲۰۱۳ به بیشینه مقدار خود رسیده است. زمین‌لرزه در روز ۱۰۶ (۱۶ آوریل ۲۰۱۳) اتفاق افتاده است. با توجه به شکل ۳، افزایش LST حدود ۱۰ درجه سلسیوس در ۴ روز قبل از زلزله و ۲ روز پس از زلزله کاملاً مشهود است. بیشترین افزایش LST قبل از رخداد زلزله ایجاد شده است. برای اطمینان از علل تشکیل این



شکل ۳. سری‌زمانی تغییرات دمای سطح زمین (LST) زمین‌لرزه سراوان از روز ۱۰۰ تا روز ۱۱۲ سال ۲۰۱۳، زمین‌لرزه در روز ۱۰۶ (ستون قرمز رنگ) اتفاق افتاده است. همان‌طور که در نمودار نیز دیده می‌شود در روز ۱۰۲ مصادف با چهارروز پیش از زمین‌لرزه LST به بیشینه مقدار خود رسیده است.



(الف)

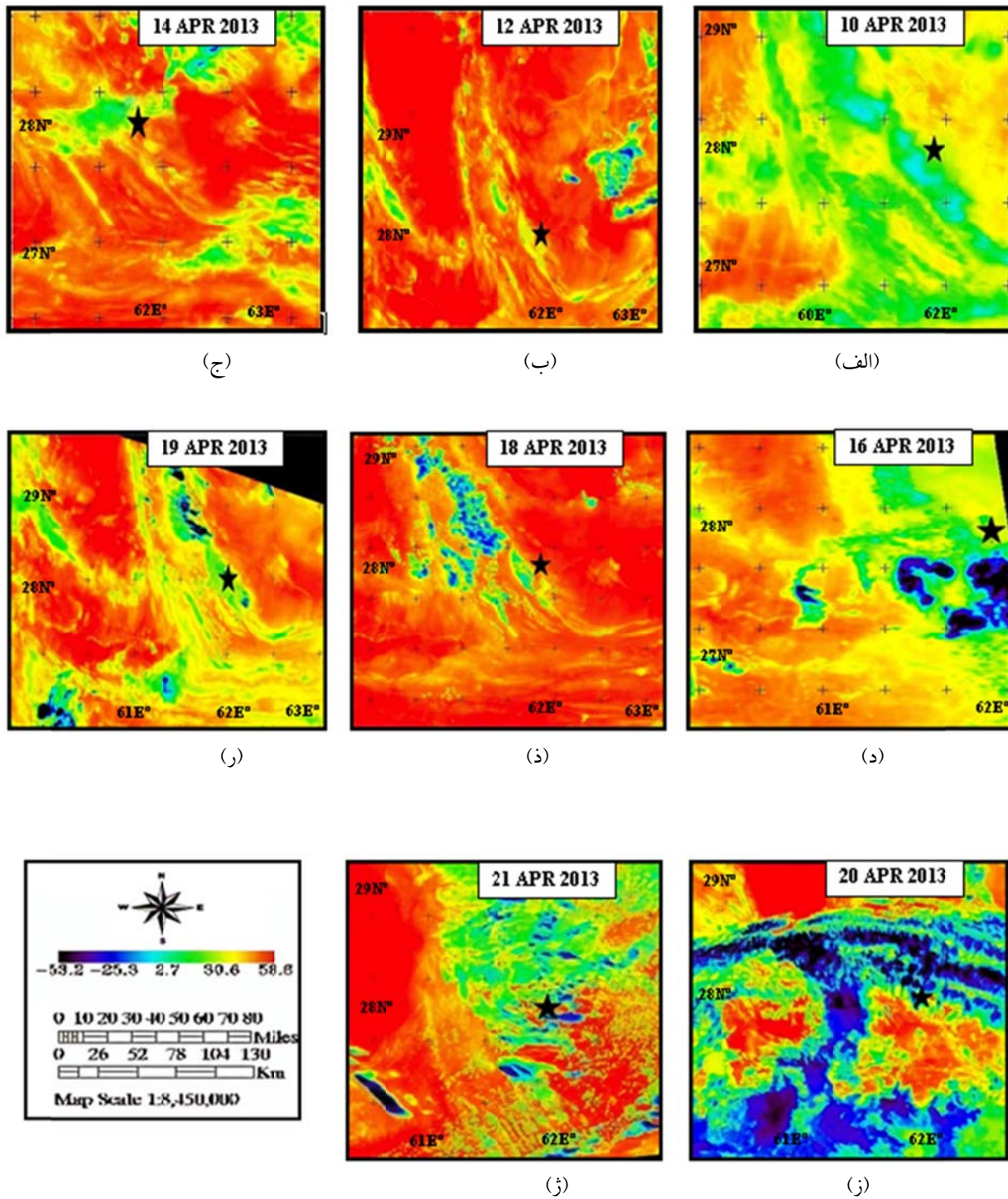


(ب)

شکل ۴. (الف) سری‌زمانی تغییرات میانگین دما، رطوبت و فشار روزانه برای روزهای ۱۴ تا ۲۰ آوریل سال ۲۰۱۳ (روزهای ۱۰۴ تا ۱۱۰ از سال ۲۰۱۳) در منطقه سراوان. روز زلزله با ستون قرمز رنگ نمایش داده شده است. این نمودارها تغییرات شبانه‌روزی متداول پارامترهای هواشناسی را نشان می‌دهد و بیانگر این است که سامانه جوی خاصی در این بازه‌زمانی وجود نداشته که بتواند بی‌هنجاری‌های گرمایی سطح زمین را توجیه کند.

با مقایسه نقشه‌های به‌دست‌آمده از روز ۱۰۰ تا روز ۱۱۲ در شکل‌های ۵ (الف تا ز)، مقادیر دمایی سطح زمین (LST) برای روزهای پیش و پس از زمین‌لرزه سراوان مشاهده می‌شود که بی‌هنجاری گرمایی شدید چهار روز قبل از زلزله اصلی، یعنی در روز ۱۲ آوریل ۲۰۱۳ (روز ۱۰۲ سال ۲۰۱۳) ایجاد شده است و در روز زلزله یعنی روز ۱۰۶ بی‌هنجاری ناپدید شده است. همچنین بی‌هنجاری دیگری در روز ۱۸ آوریل یا (روز ۱۰۸ سال ۲۰۱۳) دو روز قبل از پس‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۵ تشکیل شده است.

سپس برای تشخیص وسعت مکانی این بی‌هنجاری نقشه‌های دمایی سطح زمین با استفاده از سنجنده مادیس برای این بازه تهیه شد (شکل ۵). همان‌گونه که از مقایسه نقشه‌های به‌دست‌آمده در این بازه‌زمانی از روز ۱۰۰ تا ۱۱۲ سال ۲۰۱۳ دیده می‌شود، بی‌هنجاری LST پیش از زمین‌لرزه سراوان به‌وضوح دیده می‌شود. در این نقشه‌ها رومرکز زلزله با ستاره سیاه در روز زلزله یا روز ۱۰۶ نمایش داده شده است. رنگ‌های قرمز بی‌هنجاری دمایی مثبت و رنگ‌های سبز بی‌هنجاری منفی دمایی را نشان می‌دهد



شکل ۵. الف تا ژ- نقشه تغییرات پارامتر LST برای روزهای ۱۰۰ الی ۱۱۲ سال ۲۰۱۳، روزهای ۱۰ آوریل تا ۲۲ آوریل قبل و پس از زمین‌لرزه اصلی سراوان. رومرکز زمین‌لرزه، با ستاره سیاه و لکه‌های سرمه‌ای اثرات ابر را نشان می‌دهد. رنگ‌های قرمز بی‌هنجاری مثبت دمایی و رنگ سبز بی‌هنجاری منفی دمایی را نشان می‌دهد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا روشی برای به‌دست آوردن LST با استفاده از داده‌های سنجنده دمایی مادیس ارائه شد. در صورت استفاده یک طرحواره مناسب که در این مقاله معرفی شد، می‌توان میدان دمای سطحی زمین را به‌خوبی ارائه کرد. در این مطالعه از طرحواره‌ای بر اساس تکنیک پنجره مجزا برای محاسبه LST و آشکارسازی بی‌هنجاری گرمایی در زلزله سراوان (۱۶ آوریل، ۲۰۱۳) منطقه‌ای در جنوب شرق ایران، در زمان‌های قبل، حین و بعد زلزله استفاده شد. نقشه‌های میدان LST در منطقه سراوان نشان می‌دهد که بی‌هنجاری گرمایی شدید چهار روز قبل از زلزله اصلی، یعنی در روز ۱۲ آوریل ۲۰۱۳ (روز ۱۰۲ سال ۲۰۱۳) ایجاد شده است و در روز زلزله یعنی روز ۱۰۶ بی‌هنجاری ناپدید شده است. همچنین بی‌هنجاری دیگری در روز ۱۸ آوریل یا (روز ۱۰۸ سال ۲۰۱۳) دو روز قبل از پس‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۵ تشکیل شده است. نتایج بیانگر وجود بی‌هنجاری‌های مثبت گرمایی در وسعتی از ۵۰ تا ۵۰۰ کیلومتر طول در منطقه است که به‌سرعت از لحاظ گسترش منطقه‌ای تغییر کرده است و به‌شدت دچار افت‌وخیز شده است به‌طوری‌که بیشینه بی‌هنجاری گرمایی چهار روز پیش از زمین‌لرزه ظاهر گشته و یک روز پیش از زلزله ناپدید شده است. تغییرات گرمایی سطح زمین در این زلزله از یک الگوی تقریباً مشابه مطالعات سراف و همکاران (۲۰۰۷) و فروند (۲۰۰۴) پیروی می‌کند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که

در مورد زمین‌لرزه سراوان می‌توان نتیجه گرفت که محاسبه پارامتر LST که در واقع میزانی از تابش دمایی زمین در بازه بسامدی فروسرخ است، شاید می‌توانست به‌عنوان پیش‌نشانگر زلزله در نظر گرفته شود.

## تشکر و قدردانی

از داوران محترم این مقاله که نظرات بسیار سازنده‌ای ارائه کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

تقوی، ف.، احمدی، ع. و زرگران، ز.، ۱۳۹۵، کاربست روش شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر حرارتی مادیس، مجله سنجش از دور و GIS ایران، ۸(۲)، ۷۲-۵۳.

سایت مرکز لرزه نگاری کشوری ۱۳۹۵، (<http://IIEES/ir.ac.ut.irsc.www/>)

عسکری، ق.، حافظی، ن. م.، رحیمی تبار، م. و انصاری، ع.، ۱۳۸۸، بررسی بی‌هنجاری‌های فروسرخ حرارتی قبل از زلزله ۲۳ مهر راور کرمان ۱۳۸۳، م. فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۵ (۴)، ۱-۱۶.

گزارش مقدماتی زمین‌لرزه بیست و هفتم فروردین ۱۳۹۲ شمال باختری سراوان، ۱۳۹۲، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

فاطمی، ب. و رضایی، ی.، ۱۳۹۳، مبانی سنجش از دور، انتشارات آزاده، ۲۹۶ ص.

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, *Advance in Space Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.017>.

Bhardwaj, A., Singh, S., Sam, L., Joshi, P. K., Bhardwaj, A., Torres, F. J. M., Kumar, R., 2017, A review on remotely sensed land surface temperature anomaly as an earthquake precursor, *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.002>

Chmyrev, V., Smith, A., Kataria, D., Nesterov, B., Owen, C., Sammonds, P., Sorokin, V. and

Vallianatos, F., 2013, Detection and monitoring of earthquake precursors: TwinSat, a Russia-UK satellite project Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), *Advances in Space Research* 52 1135-1145.

Cicerone, R. D., Ebel, J. E. and Briton, J. M., 2009, A systematic compilation of earthquake precursors, *Tectonophysics*, 476, 371-396.

Dash, P., Gottsche, F. M., Olesen, F. S. and Fischer, H., 2002, Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 2563-2594.

Filizzola, C., Pergola, N., Pietrapertosa, C. and

- Tramadol, V., 2004, Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's earthquake. *Phys. Chem. Earth* 29, 517–527.
- Freund, F., 2002, Positive hole (P-hole) and positive hole Pairs (PHP): key to understanding many pre-earthquake.
- Freund, F., 2004, Toward a better understanding of nonseismic pre-earthquake phenomena. SJSU/NASA Ames Research Center, Earth system and Technology Branch Moffett.
- Freund, F., 2007, Pre-earthquake signals – Part II: Flow of battery currents in the crust. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 543–548, 2007.
- Freund, F., Takeuchi, A., Lau, B. W. S., Post, Keefner, J., Mellon, J. and Akthem, A. M., 2004, Stress-induced changes in electrical conductivity of igneous rocks and the generation of ground currents. *TAO*, 15 (3).
- Gorny, V. I., Salman, A. G., Tronin, A. A. and Shilin, B. V., 1988, The earth's outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity. *Proc. Acad. Sci. USSR* 301 (1), 67–69.
- Hierarchical Data Format, HDF library, 2017, <http://www.hdfgroup.org/HDF-FAQ.html>.
- Huang, J., Mao, F., Zhou, W. and Zhu, X., 2008, Satellite thermal IR associated with Wenchuan earthquake in China using MODIS data with Wenchuan earthquake in China using MODIS data. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Kang, J., Tan, J., Jin, R., Li, X. and Zhang, Y., 2019, Reconstruction of MODIS Land Surface Temperature Products Based on Multi-Temporal Information Remote Sens. 2018, 10(7), 1112; <https://doi.org/10.3390/rs10071112>.
- Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F. and Sobrino, J. A., 2013, Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sens. Environ.* 2013, 131, 14–37.
- Lisi, M., Filizzola, C., Genzano, N., Paciello, R., Pergola, N. and Tramutoli, V., 2015, Reducing atmospheric noise in RST analysis of TIR satellite radiances for earthquakes prone areas satellite monitoring. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C Volumes 85–86*, 2015, Pages 87-97.
- Lu, X., Meng, Q.Y., Gu, X. F., Zhang, X. D., Xie, T. and Geng, F., 2016, Thermal infrared anomalies associated with multi-year earthquakes in the Tibet region based on China's FY-2E satellite data. *Advance in Space Research*, 58, 989-1001 <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.038>.
- Lu, S. L., Shen, X. H., Zou, L. J., Zhang, G. F., Wu, W. Y., Li, C. J. and Mao, Y. J., 2008., Remote sensing image enhancement method of the fault thermal information based on scale analysis: a case study of Jiangshan–Shaoxing fault between Jinhua and Quzhou of Zhejiang Province, China. *Chinese Journal of Geophysics* 51, 1047–1057.
- Mao, K., Shi, J., Li, Z. L. and Tang, H., 2007, An RM-NN algorithm for retrieving land surface temperature and emissivity from EOS/MODIS data *JGR*, VOL. 112, D21102, doi:10.1029/2007JD008428, 2007.
- Mao, k., Shi, J., Li, Z. L., Z., Qin, Z., li, M., Xu, B., 2005, A physics-based statistical algorithm for retrieving land surface temperature from AMSR-E passive microwave data *Sci China Ser D-Earth Sci | July 2007 | vol. 50 | no. 7 | 1115-1120*.
- Mao, K., Qin, Z., Shi, J. and Gong, P., 2005a, A practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from MODIS data, *Int. J. Remote Sens.*, 15, 3181–3204.
- Mao, K., Shi, J., Qin, Z., Gong, P., Liu, W. and Xu, L., 2005b, A multiple band algorithm for retrieving land-surface temperature and emissivity from MODIS data, in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2005*, vol. 5, edited by S. Liang et al., pp. 3269–3272,
- Mao, K., Shi, J., Qin, Z. and Gong, P., 2005c, An advanced and optimized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from ASTER data, paper presented at Ninth International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Inst. Of Geogr. Sci. and Nat. Resour. Res., Beijing, China.
- Mao, K., Shi, J., Li, Z.L., Qin, Z., Wang, X.F., 2006, A multiple-band algorithm for separating land surface emissivity and temperature from ASTER imagery, in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2005*.
- Ma, J. S., Chen, X., Hu, P. and Liu, L., 2010, Spatial-temporal variation of the land surface temperature field and present-day tectonic activity *Geoscience Frontiers*, Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/gsf](http://www.elsevier.com/locate/gsf).
- MODIS, 2019, <http://www.modis.gsfc.nasa.gov>.
- NASA, 2017, <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data> and <https://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/realtime>.
- Neteler, M., 2010, Estimating Daily Land Surface Temperatures in Mountainous Environments by Reconstructed MODIS LST Data, *Remote Sens.* 2010, 2, 333-351; doi:10.3390/rs1020333.
- Ouzounov, D., Bryant, N., Logan, T., Pulinets, S. and Taylor, P., 2006, Satellite thermal IR



- phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999–2003. *Phys. Chem. Earth* 31, 154–163.
- Ouzounov, D. and Freund, T., 2004, Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed remote sensing data. *Adv. Space Res.* 33, 268–273.
- Prata, A. J., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J. A., and Otle, C., 1995, Land surface temperatures derived from satellite, current status and future Prospects, *Remote Sensing Review*, 10(3-4), 175-224.
- Price, J.C., 1984, Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *J. Geophys. Res.*, 89, 7231-7237.
- Pulinets, S.A., Ouzounov, D. Karelin, A.V. Boyarchuk, K.A and Pokhmelnikh, L.A., 2006, The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes, *Physics and Chemistry of the Earth* 31 (2006) 143–153.
- Qin, M., Zhang, Y., 2013, Thermal Infrared Anomalies of Several Strong Earthquakes, *The Scientific World Journal* Volume 2013, Article ID 208407, 11 pages
- Qiang, Z., Dian, C., Li, L., Xu, M., Ge, F., Liu, T., Zhao, Y. and Guo, M., 1999, Satellite thermal infrared brightness temperature anomaly image – short term and impending earthquake precursor. *Sci. Sinica D.*, 42, 1-8.
- Qiang, Z. J., Xu, X. D., and Dian, C. G., 1991, Thermal infrared anomaly precursor of impending earthquakes, *Chin. Sci. Bull.*, 36, 319–323,
- Qin, Z., Dall Olmo, G., Karnieli, A. and Berliner, P., 2001, Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-AVHRR data. *J. Geophys. Res.*, 106(D19): 22655-22670.
- Qin, Z. H., Li, W. J., Xu, B., Chen, Z. X., Liu, J., 2004, The estimation of land surface emissivity for LANDSAT TM6. *Remote Sensing for land & Resources* 61, 28-32.
- Saraf A., K. and Choudhury, S., 2006, Satellite detects pre-earthquake thermal anomalies associated with post major earthquake. *Map Asia* 2004.
- Saraf, A., Choudhury, S., Panda, S. and Dasgupta, S., 2007, Satellite Based Observations of Pre-Earthquake Transient Thermal Anomalies in Iran”, *International of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES)*, Vol.14.
- Saraf, A., K., Rawat, V., Choudhury, S., Dasgupta, S. and Das, J., 2009, Advances in understanding of the mechanism for generation of earthquake thermal precursors detected by satellite <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.07.003>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Munoz, J. C., El-Kharraz, J., Gómez, M., Romaguera, M. and Sòria, G., 2004, “Single-channel and two-channel methods for land surface temperature retrieval from DAIS data and its application to the Barrax site,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 25, no. 1, pp. 215–230.
- Sobrino, J. A., Coll, C. and Caselles, V., 1991, Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR channels 4 and 5. *Remote Sens. Environ*, 38: 19-34.
- Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P. and Becker, F., 1994, Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 32(2), 243-253.
- Sobrino, J. A. Li, Z.-L., Stoll, M. P and Becker, F., 1996, “Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data,” *Int. J. Remote Sens.*, 17(11), 2089–2114.
- Sobrino, J.A., Jimenez Muoz, J.C., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A. and Martinez, P., 2008, Land Surface Emissivity Retrieval from Different VNIR and TIR Sensors. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46, 316–327.
- Surkov, V. V., Pokhotelov, O. A., Parrot, M. and Hayakawa, M., 2006, On the origin of stable IR anomalies detected by satellites above seismo-active regions, *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 164–171.
- Saradjian, M. R. and Akhoondzadeh, M., 2011, Thermal anomalies detection before strong earthquakes ( $M > 6.0$ ) using interquartile, wavelet and Kalman filter methods. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1099–1108, 2011, [www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1099/2011/](http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1099/2011/) doi:10.5194/nhess-11-1099-2011.
- Tramutoli, V., Aliano, C., Corrado, R., Filizzola, C., Genzano, N., Lisi, M., Martinelli, G. and Ergola, N., 2013, On the possible origin of Thermal Infrared Radiation (TIR) anomalies in earthquake-prone areas observed using Robust Satellite Techniques (RST). *Chem. Geol.* 339, 157–168.
- Tronin, A.A., 2010, Satellite Remote Sensing in Seismology. *A Review. Remote Sens.* 2010, 2, 124-150; doi:10.3390/rs2010124.
- Tronin, A. A., 1996, Satellite thermal survey—a new tool for the study of seismoactive regions. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1439–1455.
- Tronin, A. A., 2000, Thermal IR satellite sensor data application for earthquake research in

- China. *International Journal of Remote Sensing* 21, 3169–3177.
- Tronin, A. A., Biagi, P. F., Molchanov, O. A., Khatkevich, Y. M. and Gordeev, E. I., 2004, Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area. *Phys. Chem. Earth* 29, 501–504.
- Tronin, A. A., Hayakawa, M. and Molchanov, O. A., 2002, Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China. *J. Geody.* 33, 519-534.
- Tronin, A. A., 2006, Remote sensing and earthquakes: A review, *Physics and Chemistry of the Earth* 31 (2006) 138–142.
- Venkatanathan, N., Yang, Y. C. and Jun, L., 2017, Observation of abnormal thermal and infrasound signals prior to the earthquakes: a study on Bonin Island earthquake M7.8 (May 30, 2015) *Environ Earth Sci* (2017) 76:228 DOI 10.1007/s12665-017-6532.
- Wan, Z., Li, Z.-L., 1997, A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data, *IEEE Trans. Geosci., Remote Sens.*, vol. 35, no. 4, pp. 980-996.
- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., and Li Z. L., 2004, Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature INT. *J. REMOTE SENSING*, Jan, 2004, 25(1), 261–274.
- Wu, L., Zhou, Y., Miao, Z. and Qin, K., 2018, Anomaly Identification and Validation for Winter 2017 Iraq and Iran Earthquakes 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria, p.5800.
- Yao, Q. L. and Qiang, Z. J., 2012, Thermal infrared anomalies as a precursor of strong earthquakes in the distant future *Nat Hazards* (2012) 62:991–1003 ,DOI 10.1007/s11069-012-0130-8.
- Zhang ,X., Zhang, Y., Tian, X., Zhang, Q. and Tian, J., 2017, Tracking of Thermal Infrared Anomaly before One Strong Earthquake-In the Case of Ms6.2 Earthquake in Zadoi, Qinghai on October 17th, 2016, CTCE2017 IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 910 (2017) 012048 doi :10.1088/1742-6596/910/1/012048.
- Zhao, S., Qin, Q., Yang, Y., Xiong Y. and Qiu, G., 2009, Comparison of two split-window methods for retrieving land surface temperature from MODIS data ,*J. Earth Syst. Sci.* 118(4), 345–353.
- Zoran, M., Savastru, R., Savastru, D., 2014, Seismic Precursors and Climate Fluctuations Assessment Through Time Series Geospatial and In-situ monitoring Data ,5thEARSel Workshop on Remote Sensing and Geology "Surveying the Geosphere" 14 ,Warsaw, Poland, 19th – 20th June, 2014.
- Zhang, X., Zhang, Y., Tian, X., Zhang, Q. and Tian, J., 2017, Tracking of Thermal Infrared Anomaly before One Strong Earthquake-In the Case of Ms6.2 Earthquake in Zadoi, Qinghai on October 17th, 2016,CTCE2017 IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 910 (2017) 012048 doi :10.1088/1742-6596/910/1/012048.

## Feasibility study of using MODIS data to estimate thermal anomalies as earthquake precursor (Case study: Saravan earthquake April 2013)

Taghavi, F.\*

Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 9 Dec 2018, Accepted: 9 June 2020)

### Summary

In this study, thermal infrared data from Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor with spatial resolution of 1000m are selected to investigate about the Land Surface Temperature (LST) anomalies before Saravan earthquake. Many studies have already documented an extensive elevated thermal anomaly near epicenters that appear within dozens of days before the earthquakes such as (Qiang, et al., 1991, 1999; Tronin, et al., 2002; Tronin, 2006; Saraf, et al., 2007; Huang, et al., 2008; Ma, et al., 2010; Yao and Qiang, 2012; Wu, et al., 2012; Tramutoli, et al., 2013; Akhoondzadeh, M., 2014; Lisi, et al., 2015; Lu, et al., 2016; Venkatanathan, et al., 2017; Zhang, et al., 2017). Satellite-based thermal infrared (TIR) data linked to the LST through the radiative transfer equation. The earthquake of Saravan in Sistan and Baluchistan province occurred on April 16, 2013, at Iran Standard Time (local time) of 15:14 pm (Lat: 28.04°, Lon: 62.03°). In this paper, a practical split-window algorithm as named Sob Mao (Mao, et al., 2005) is used to retrieve LST from MODIS data which involves two essential transmittance and emissivity parameters. The general radiance transfer equation for remote sensing of LST is formulated as follows:

$$B_i(T_i) = \tau_i(\theta)[\varepsilon_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i)I_{i\downarrow}] + I_{i\uparrow} \quad (1)$$

Where  $T_s$  is the LST,  $T_i$  is the brightness temperature in channel  $i$ ,  $\tau_i(\theta)$  is the atmosphere transmittance in band  $i$  at viewing direction  $\theta$  (zenith angle from nadir), and  $\varepsilon_i$  is the ground emissivity.  $B_i(T_s)$  is the ground radiance, and  $I_{i\downarrow}$  and  $I_{i\uparrow}$  are the downwelling and upwelling path radiances, respectively. Time series of LST parameter (Eq2.) has been analyzed to examine about the probable LST fluctuations before and after these events.

$$LST = T_s = \frac{C_{32}(B_{31}+D_{31})-C_{31}(B_{32}+D_{32})}{C_{32}A_{31}-C_{31}A_{32}} \quad (2)$$

The results show positive deviation of  $>10$  °C four days before the main shock on April 12, 2013 (102 of day of year) and it disappears a few days after the main event. The time scale of the observed variations is a one week before the onset of the seismic event. The results confirmed the existence of an anomaly in LST data before for Saravan earthquakes. A comparison of the maps in Fig. 2 reveals that the thermal anomaly had been formed four days before the main shock on April 12, 2013 (i.e. the 102 day of the year) and two days before an aftershock of Mw 5 on April 18 (i.e. the 108 day of the year). The anomalies formed are usually of 50 to 500 km length. They are often of drastic fluctuations. To ensure that the reasons of these anomalies are well understood, the meteorological maps and the model outputs in the weekly time intervals around the time of the event were examined for the Saravan area. Time series of Saravan temperature and the pressure maps are also investigated, as it can be seen no significant meteorological phenomenon was observed that can cause such drastic changes. The LST map results illustrate that before the Saravan earthquake, a large anomaly of LST is created and that these anomalies follow the mentioned trend in other scientific papers, therefore it could be considered as an earthquake precursor.

**Keywords:** Thermal Anomalies, Precursor, Saravan Earthquake, MODIS data.

\* Corresponding author:

ftaghavi@ut.ac.ir