

بررسی بی‌هنجاری‌های فروسرخ حرارتی (TIR) قبل از زلزله ۲۳ مهرماه ۱۳۸۳ راور کرمان

قاسم عسکری^{۱*}، ناصر حافظی مقدس^۲، محمدرضا رحیمی تبار^۳ و عبدالرضا انصاری^۴

^۱ کارشناس ارشد، سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، ایران

^۴ کارشناس ارشد، سازمان فضایی ایران، تهران، ایران

(دریافت: ۸۵/۱۱/۱۸، پذیرش نهایی: ۸۷/۱۱/۵)

چکیده

در مقاله حاضر بی‌هنجاری فروسرخ حرارتی (thermal infrared) قبل از زلزله ۱۳۸۳ راور کرمان با بزرگی $M_s=5.1$ براساس داده‌های درجه‌بندی (کالیبره) شده شب‌هنگام باند ۴ ماهواره NOAA (حسگر AVHRR) در محدوده طول موج ۱۰.۵ تا ۱۱.۵ میکرومتر با بهره‌گیری از فن‌های پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل نتایج با استفاده از سه مدل ساده ابداعی آرایه مربعی، آرایه مستطیلی و مربعی زمین‌شناسی صورت پذیرفته است. نتایج این بررسی‌ها حاکی از افزایش شدید و غیر عادی شدت تابش، ۶ روز قبل از زلزله در اطراف کانون سطحی زلزله و در امتداد گسل‌های زمین‌لرزه ای منطقه مورد بررسی (گسل‌های لکرکوه، نایبند و کوهبنان) است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات تابشی قبل از زلزله، در رخنمون‌های سنگ‌های آذرین بیشتر از سایر رخنمون‌های سنگی در اطراف کانون زلزله است که این مسئله با نتایج آزمایشگاهی فروند (۲۰۰۷) در آزمایشگاه ژئودینامیک ناسا در راستای اثبات تابش امواج فروسرخ در هنگام اعمال فشار به سنگ‌های سیلیکاته همخوانی دارد. در نهایت نتایج این بررسی قابلیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای NOAA، به منظور ثبت پیش‌نشانگر حرارتی، با هدف پیش‌بینی زلزله برای نواحی مرکزی ایران که دارای سنگ‌های آذرین سیلیکاته هستند را به اثبات می‌رساند.

واژه‌های کلیدی: راور، کرمان، بی‌هنجاری فروسرخ، پیش‌بینی زلزله، گسل

Detection of thermal infrared (TIR) anomalies related to the $M_s=5.1$ earthquake on Oct.14, 2004 near Ravar (SE Iran)

Askari, Gh.¹, Hafezi, N.², Rahimi Tabar, M. R.³ and Ansari, A. R.⁴

¹Research Assistant, Islamic Republic of Iran Meteorological Organization, Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Earth Science, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³Associate Professor, Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

⁴Research Assistant, Iranian Space Agency, Tehran, Iran

(Received: 7 Feb 2007, Accepted: 24 Jan 2009)

Abstract

Over the last two decades there have been numerous reports from different seismically active regions of the world that thermal infrared (TIR) anomalies can be identified around the epicentral areas before major earthquakes [e.g. (Tronin et al., 2002)]. The TIR anomalies reportedly appear as early as 14 to 7 days before the seismic events and affect areas as large as 1000s to 100,000s km² in size. Our case study for detection of TIRs using NOAA -AVHRR data(Band 4) is an $M_s = 5.1$ earthquake that occurred on 14th

October 2004 near Ravar in Kerman province located in Loot and Tabas deserts, southeast-central Iran. The area is part of the Golbaf-Sirj seismogenic zone. It includes major faults comprising regional geology of cenozoic granitic to intermediate igneous rocks in the north and east, but cretaceous shales, sandstone (Shemshak Formation) and limestone in the center and west. The epicentral region is surrounded by the Nayband fault to the east, the Lakarkuh fault in the center, and the Kuhbanan fault to the west. To find TIR anomalies we surveyed the night-time satellite data of the epicentral area representing the period of 2 ½ years before the Ravar earthquake checking the background noise, cloud cover and other meteorological conditions to ensure stable, high quality data. Finally we selected 14 dates of which the first 8 cover 2 ½ years prior to the earthquake to establish a reference TIR background. The remaining 6 dates cover the period from 11 days to 2 days before the event. The last day before and the day of the earthquake were not included due to regional cloudiness. To optimize the information extracted from the available satellite data, three methodologies were designed. Since this is a post-event analysis, we have the advantage of knowing the location of the epicenter.

1- Square Array Method (SAM): We superimpose over the epicenter a series of squares with their edges increasing from 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120, to 200. We integrate the TIR intensities over each of these squares.

2- Rectangle Array Model (RAM): We superimpose rectangles over the epicenter with their longest edges aligned along the trace of the N-S trending Lakarkuh fault, up to a maximum length of 200 km and an aspect ratio of about 5. We integrate the TIR intensities over the area of each of these rectangles.

3- Geologic Square Array Method: we divided the largest square in SAM model into 9 equivalent squares to detect geologic effects spatially igneous rocks item on the appearance TIR anomalies. We integrate the TIR intensities over the area of each of these rectangles.

Results showed the NOAA (AVHRR) band 4 is suitable for detecting thermal anomalies before earthquakes. In this research the abnormal increase of TIR radiation around the epicentral region was detected using three slightly different methodologies, SAM, RAM and GSAM. The primary results indicate that the area emitting enhanced TIR radiation was aligned along the Lakarkuh fault, which ruptured during the event. The results further indicate that the TIR anomaly reached its highest intensity six nights before the Ravar earthquake. Also the GSAM model extracted small differences in the TIR intensity emitted from igneous rocks and sand or gravel surfaces of which the maximum anomaly was allocated to igneous ones. Finally this study has shown that, given near-ideal weather conditions and a barren desert land surface, a TIR anomaly can be clearly identified for a relatively modest seismic event such as the M5.1 Ravar earthquake using NOAA (AVHRR) data.

Key words: Ravar, Kerman, Infrared Anomaly, Earthquake prediction, Fault

۱ مقدمه

آب است. ماهواره‌ها و حسگرهای زمینی نیز به نوبه خود قادرند این پیش‌نشانگرها را ثبت کنند (شو و همکاران، ۱۹۹۹؛ وو و جنگ، ۲۰۰۰؛ علامه زاده و همکاران، ۲۰۰۴؛ آران و چادهیوری، ۲۰۰۶)
بی‌هنجاری‌های حرارتی فروسرخ (TIR) قبل از

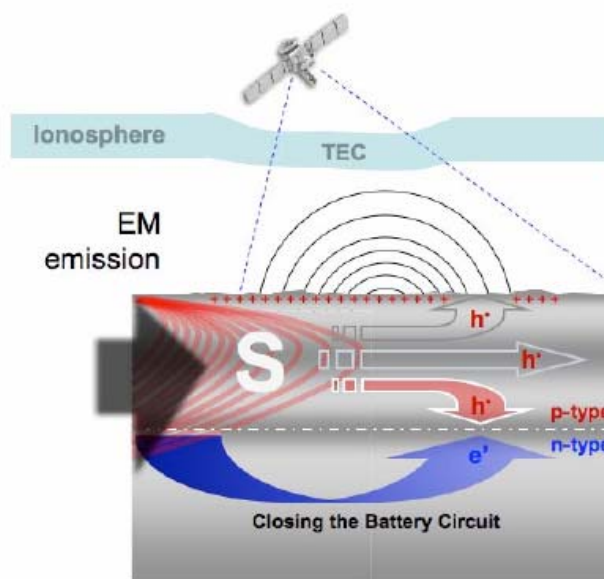
قبل از رخداد زلزله، معمولاً مجموعه علائمی قابل دریافت است که به این علائم پیش‌نشانگرهای زلزله گفته می‌شود. این پیش‌نشانگرها شامل تابش فروسرخ حرارتی، تغییر میدان گرانی و مغناطیسی، تغییرات یونسپهری و برخی دیگر از پیش‌نشانگرها مانند تغییرات ویژگی‌های فیزیکی

کرده‌اند (ترونین و همکاران، ۲۰۰۲؛ فروند، ۲۰۰۴، ۲۰۰۲). تلاش‌های گسترده‌ای در سال‌های اخیر صورت گرفته و در حال صورت گرفتن است تا با ثبت و تحلیل بی‌هنجاری‌های حرارتی قبل از زلزله پیش‌بینی بلندمدت یا کوتاه مدت زلزله صورت پذیرد. در شکل ۱ آخرین نتایج مربوط براساس استفاده از فناوری ماهواره‌ای در ثبت پیش‌نشانگرهای زلزله، نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است بر اساس نظریه حفره‌های P، در هنگام اعمال فشار به یک توده سنگ، در محدوده امواج الکترومغناطیسی بسامد کم، تابش فروسرخ اتفاق می‌افتد. این تابش ممکن است به تغییراتی در محتوی کل الکترون یون‌سپهر (TEC) منجر شود.

در تحقیق حاضر نیز مبتنی بر همین اصل بی‌هنجاری‌های فروسرخ قبل از زلزله ۱۳۸۳ راور کرمان براساس اطلاعات ماهواره NOAA با استفاده از سه مدل ساده ابداعی آرایه مربعی، مستطیلی و مربعی زمین‌شناسی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

بسیاری از زلزله‌ها در اطراف کانون زلزله گزارش شده است و به‌منزله یک پیش‌نشانگر زلزله شناخته می‌شود (ترونین و همکاران، ۲۰۰۲). این بی‌هنجاری‌ها معمولاً تا ۱۴ روز قبل از زلزله‌های بزرگ‌تر از ۴٫۸ ریشتر ($M_s = 4.8$) در وسعت چندصد تا چندین هزار کیلومتر حوالی کانون زلزله وجود دارند و چند روز قبل یا بعد از زلزله از بین می‌روند (کاینگ و جنگ، ۱۹۹۹؛ تراموتولی و همکاران، ۲۰۰۵). دقت ثبت بی‌هنجاری‌های فروسرخ با ماهواره‌ها به عواملی نظیر انتقال جوی (قابلیت عبور امواج از جوی)، درجه حرارت سطحی، توان تابشی طیفی، پستی و بلندی، زمان، فصل و زاویه دید ماهواره بستگی دارد (فیلی زولا و همکاران، ۲۰۰۴).

محققان گوناگون وجود بی‌هنجاری قبل از رخداد‌های لرزه‌ای را به دلیل وجود گازهای گلخانه‌ای (نظیر CH_4 ، CO_2)، تغییر رژیم آب‌های زیرزمینی و افزایش نرخ تابشی ناشی از اصطکاک و یا انتشار حفره‌های p (نوعی حفره الکترونی که در سنگ‌های سیلیکاته بین پیوند های اکسیژنی در هنگام اعمال فشار به وجود می‌آید) عنوان



شکل ۱. نمایش مفهوم استفاده از فناوری ماهواره‌ای برای ثبت پیش‌نشانگرهای الکترومغناطیسی و یون‌سپهری (فروند، ۲۰۰۷).

۲ مشخصات منطقه و زلزله مورد بررسی

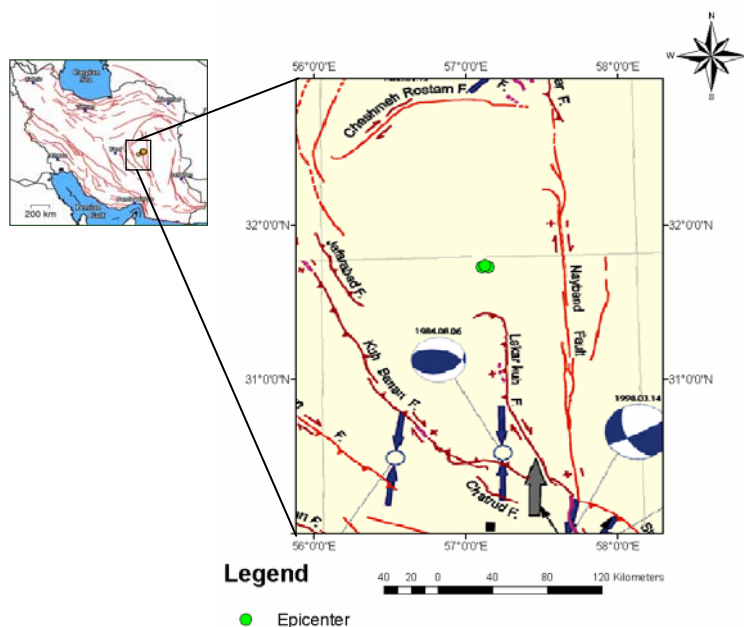
منطقه تحقیقاتی، جزئی از بلوک لوت و طبس است که در حد فاصل بین گسل نایبند، لکر کوه و کوهبنان قرار می‌گیرد (شکل ۲). این منطقه بخشی از پهنه گسلی گلباف-سیرچ است که از پهنه‌های گسلی فعال و لرزه‌زا در شرق ایران محسوب می‌شود. گسله‌های مهم منطقه شامل نایبند، لکر کوه و کوهبنان است که برخی ویژگی‌های ساختاری آنها در جدول ۱ آمده است (حافظی، ۱۳۸۱).

۱- گسل نایبند: این گسل راستای شمالی-جنوبی دارد و بخشی از رشته کوه شتری در جنوب شرقی طبس تا غرب شهداد را شامل می‌شود که طول آن ۳۵۰ کیلومتر است. رخنمون گسل نایبند مرکب از چهار قطعه گسلی اصلی هم‌پوشان، پرشیب و بیشتر به صورت قائم است و مولفه حرکتی آن راستالغز راست‌بر است. ادامه جنوبی آن با هندسه و سازوکار مشابه از راه سامانه گسلی سیرچ یا درازای حدود ۱۰۰ کیلومتر با نام گسل سبزواران از غرب

بم می‌گذرد و به گسل میناب در شمال تنگه هرمز ختم می‌شود.

۲- گسل لکر کوه: این گسل به طول حدود ۶۵ کیلومتر با راستای شمالی - جنوبی و موازی با گسل نایبند در بخش جنوبی بلوک طبس و شرق شهر راور واقع شده است. گسل لکر کوه با شیب به سوی غرب گسل راندگی با مولفه راست‌بر است.

۳- گسل کوهبنان: این گسل از شمال غرب بهاباد آغاز می‌شود و در راستای جنوب شرقی به طول حدود ۱۶۰ کیلومتر تا جنوب شرق زرنند ادامه می‌یابد. گسل کوهبنان خود تشکیل یافته از چند قطعه گسلی کوتاه و بلند است که در دو انتهای خود به صورت هم‌پوشان نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. همه این قطعه‌های گسلی دارای سازوکار راستالغز راست‌بر و واژگون هستند. این گسل در انتهای جنوب شرقی به شاخه‌های ترفشاری خود (راندگی‌های تیگور، پاسور و بازرگان) ختم می‌شود (NGDIR و گروه زمین‌ساخت سازمان زمین‌شناسی کشور).



شکل ۲. نقشه گسل‌های مهم منطقه مورد بررسی و کانون زلزله مربوطه. به همراه پس‌لرزه‌ها. موقعیت پس‌لرزه‌ها بر روی زمین لرزه اصلی قرار گرفته است (برگرفته از سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله).

جدول ۱. گسل‌های مهم منطقه مطالعاتی و برخی ویژگی‌های ساختاری آنها (برگرفته از NGDIR و گروه زمین‌ساخت سازمان زمین‌شناسی کشور).

گسل	طول تقریبی گسل (km)	ویژگی‌های ساختاری	روند گسل	فاصله از کانون زلزله راور (km)
نابیند	۴۰۰	امتداد لغز راستگرد	شمال غربی - جنوب شرقی	۴۰
لکر کوه	۱۳۸	معکوس با مؤلفه راستگرد	شمالی - جنوبی	۱۰
کوهبنان	۳۰۰	معکوس راستگرد	شمال غربی - جنوب شرقی	۸۰

زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی شامل سنگ‌های آذرین اسیدی - حد واسط دوران سوم در شرق محدوده و رخنمون‌های شیل و ماسه‌سنگ سازند شمشک و تناوب آن با آهک کرتاسه در بخش مرکزی و غربی است که این توده‌های سنگی در قسمت‌های غربی به علت قرارگیری در حد فاصل گسل نابیند و کوهبنان خرد شده است.

۳ گزینش داده‌های ماهواره‌ای و زلزله مورد بررسی

هدف از تحقیق حاضر ارزیابی بی‌هنجاری حرارتی قبل از زلزله براساس داده‌های حسگر AVHRR ماهواره NOAA برای ایران بوده است.

برای این منظور فهرست تقریباً جامعی از داده‌های ماهواره‌ای NOAA (حسگر AVHRR) قابل دسترس از زلزله‌های بزرگ‌تر از ۵ ریشتر سال‌های اخیر کل کشور از سازمان فضایی ایران تهیه شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد صرفاً از داده‌های تابشی بانده ۴ این ماهواره برای تحلیل استفاده شد. منظور از داده‌های تابشی، مقادیر درجه‌بندی (کالیبره) شده داده ماهواره با توجه به زاویه دید ماهواره و زمان تصویربرداری است.

پس از اجرای عملیات درجه‌بندی (کالیبراسیون) داده‌ها. براساس ۳ معیار زیر داده‌های ماهواره‌ای و متعاقباً زلزله مناسب انتخاب شد:

۱- به منظور کاهش اثرات تابشی ناشی از تابش‌های خورشیدی، صرفاً از داده‌های ماهواره‌ای شب‌هنگام استفاده شد تا افزایش تابش سطحی ناشی از زلزله بهتر

شناسایی شود.

۲- داده‌هایی که دارای پوشش ابر بودند از بانک اطلاعاتی انتخابی مرحله قبلی حذف شدند.

۳- داده‌هایی که تا شعاع ۵۰ کیلومتری از کانون زلزله انتخاب شدند و در بازه ۲۰ روز قبل و یا بعد از زلزله دارای رخداد زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۴ ریشتر بودند از بانک اطلاعاتی مرحله اول حذف شدند.

اعمال این شرط باعث می‌شود که اثرات احتمالی تابش‌های ناشی از یک زلزله دیگر روی زلزله مورد بررسی تا حد امکان حذف شود. انتخاب شعاع ۵۰ کیلومتری و بازه ۲۰ روز با توجه به بررسی‌های دیگر محققان در سایر نقاط دنیا است (کاینگ و همکاران، ۱۹۹۹؛ ترونین و همکاران، ۲۰۰۲).

براساس شرایط فوق درنهایت زلزله ۱۳۸۳ راور کرمان (۱۴/۱۰/۲۰۰۴ میلادی) برای بررسی مناسب تشخیص داده شد. لذا ۱۴ داده ماهواره‌ای شب‌هنگام قبل از زلزله با فواصل چند سال تا چند روز قبل از زلزله به‌منظور ارزیابی بی‌هنجاری‌های حرارتی انتخاب و به صورت کدهای ۱ تا ۱۴ نامگذاری شدند (جدول ۲). استفاده از کد در مراحل بعدی تجزیه و تحلیل به علت نبود پیوستگی کافی داده‌ها از لحاظ زمانی است. هر چند این ناپیوستگی به معنای نبود ارتباط بین داده‌ها نیست؛ چرا که با حذف اثرات شرایط نامساعد جوی و درجه‌بندی کردن داده‌ها در یک مکان مشخص صرفاً رفتارهای طیفی سطح زمین در تعیین بی‌هنجاری‌های فروسرخ مؤثر است (تراموتولی و همکاران، ۲۰۰۵).

جدول ۲. کدهای داده شده به داده‌های ماهواره‌ای مربوط به زمان‌های گوناگون قبل از زلزله.

کد	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
زمان(روز)	۸۷۷	۳۲۱	۲۲۶	۴۶۳	۴۵۹	۱۵۵	۱۵۳
کد	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
زمان(روز)	۱۴۶	۱۱	۸	۷	۶	۵	۲

۴ پردازش اطلاعات

بعد از انتخاب زلزله راور، تصحیحات هندسی روی داده‌های ماهواره‌ای انتخابی با استفاده از نقاط کنترلی صورت پذیرفت (تصحیحات اولیه را سازمان فضایی ایران به انجام رسانده بود). سپس اطلاعات تابشی باند ۴ ماهواره NOAA در محدوده طول موج‌های ۱۰۵-۱۱۵ میکرومتر به منظور تحلیل و پردازش اطلاعات از فایل اصلی که دارای ۵ باند طیفی است، تفکیک شد.

تاکنون روش‌های متعددی برای ثبت تغییرات بی‌هنجاری‌های تابشی قبل از زلزله صورت پذیرفته است که برخی از مراجع مربوط در قسمت مقدمه آورده شده است. این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر تغییرات درجه حرارت در حوالی کانون زلزله است، اما یکی از اساسی‌ترین مسائلی که تاکنون به صورت تخصصی به آن پرداخته نشده است، برقراری ارتباط منطقی تابش با کانون زلزله، گسل مسبب زمین‌لرزه و زمین‌شناسی منطقه است. لذا هدف اصلی این تحقیق عرضه روش‌هایی هرچند ساده ولی موثر برای دسترسی به این مهم است.

به همین منظور، سه مدل ساده تحت نام‌های آرایه مربعی (Square Array Model, SAM)، مستطیلی (Rectangle Array Model, RAM) و مربعی زمین‌شناسی (Geologic Square Array Model, GSAM) طراحی شد و سپس تغییرات تابشی در فواصل گوناگون از کانون مورد بررسی قرار گرفت تا اولاً احتمال رخداد هرگونه بی‌هنجاری تابشی در حوالی کانون (به کمک آرایه مربعی) بررسی شود و ثانیاً رخداد بی‌هنجاری در

حوالی گسل (به کمک آرایه مستطیلی) و زون‌های متفاوت زمین‌شناسی (به کمک آرایه مربعی زمین‌شناسی) بررسی شود. ضمناً پردازش داده‌ها به کمک نرم‌افزار ENVI 4.0 و محیط برنامه‌نویسی IDL 5.6 صورت پذیرفت.

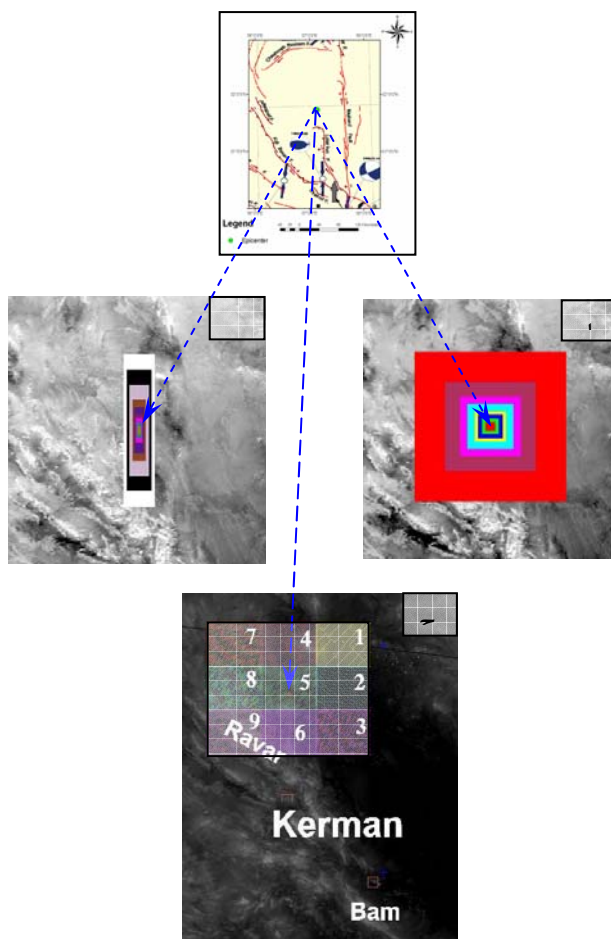
- در مدل آرایه مربعی ۸ مربع به مرکزیت کانون زلزله و به طول ضلع ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ کیلومتری برای تحلیل استفاده شده است (شکل ۳- الف). در این روش نتایج تحلیل به لحاظ مکانی روری داده‌ها به صورت پیوسته یا به عبارتی نتایج مربع‌های بزرگ‌تر متأثر از مربع‌های داخلی‌اند. همان‌طور که از نام آرایه بر می‌آید اضلاع مساوی‌اند. کارایی اصلی این مدل در این است که هرگونه تغییرات غیرعادی حوالی کانون را می‌توان ثبت کرد، بدون اینکه بتوان به مکان دقیق آن پی‌برد. در روش‌هایی که هیچ آرایه‌ای اعمال نمی‌شود، مقایسه عددی تغییرات نسبت به حالت عادی قابل بررسی نیست و فقط می‌توان به وقوع یک زلزله احتمالی پی‌برد. این در حالی است که استفاده از آرایه به ما این امکان را می‌دهد که با طراحی نمودارهای پایه تابشی، به بزرگی، زمان و مکان زلزله برای مناطق متفاوت هدف پی‌بیریم. بدیهی است که هر منطقه ممکن است نمودارهای پایه تابشی متفاوتی نسبت به دیگر مناطق داشته باشد که این مسئله به تغییرات زمین‌شناسی سطح زمین بر می‌گردد.

- در مدل آرایه مستطیلی، مناطق مستطیلی شکل با طول ضلع پنج برابر عرض به مرکزیت کانون زلزله انتخاب شده‌اند و جهت آرایه شمالی- جنوبی یا به عبارتی به

موازات جهت گسل مسبب زلزله انتخاب شده است (شکل ۳-ب). طول آرایه‌ها مشابه با مدل آرایه مربعی است. لذا برای محاسبه عرض آرایه کافی است که طول آرایه‌ها را بر ۵ تقسیم کنیم. برای تقریب نسبت طول به عرض بایستی به نسبت طول گسل مسبب زلزله به زون گسلی آن توجه شود. در این مدل نیز، نتایج آرایه‌های بزرگ‌تر، متأثر از آرایه‌های کوچک‌تر است. لازم به ذکر است که فروند (۲۰۰۲، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷) در آزمایشگاه ژئودینامیک ناسا در حال بررسی مناطق بی‌هنجار تابشی حوالی گسل‌های مسبب زلزله است. لذا تاکنون مدل علمی مشخصی برای تعیین مناطق احتمالی که قبل از زلزله در حوالی گسل، بی‌هنجاری فروسرخ از خود نشان می‌دهند عرضه نشده

است.

- مدل آرایه مربعی زمین‌شناسی با هدف بررسی نقش زمین‌شناسی سطحی طراحی شده است. برای این منظور منطقه تحقیقاتی پراساس جنس کلی سنگ‌ها به ۹ قسمت مساوی تقسیم شده است، به طوری که در هر آرایه توان تابشی تقریباً یکنواخت باشد (شکل ۳-ج). یکنواخت بودن تابش به طور کامل زمانی اتفاق می‌افتد که با استفاده از روش‌های چندطیفی، توان تابشی (گسیلمندی، emissivity) لایه‌های متفاوت سنگی در طول موج‌های متفاوت برای منطقه مورد بررسی تعیین شود. در جدول ۳ جنس کلی لایه‌های زمین‌شناسی عرضه شده است.



شکل ۳. نمایش شکل کلی مدل‌های پردازش آرایه مربعی (الف) مستطیلی (ب) و مربعی زمین‌شناسی (ج). در مدل آرایه مربعی و مستطیلی آرایه‌ها روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. در مدل آرایه مربعی زمین‌شناسی آرایه‌ها با شماره‌های ۱ تا ۹ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳. جنس سنگ‌های تشکیل‌دهنده آرایه‌های شماره ۱ تا ۹ مدل GSAM.

شماره مربع	جنس زمین‌شناسی مربع	شماره مربع	جنس زمین‌شناسی مربع
۱	سنگ‌های آذرین حد واسط و اسیدی + کمی آبرفت	۶	آهک، شیل، ماسه‌سنگ، آبرفت و کنگلومرای پلیستوسن + تداخل‌های سنگ‌های الترامافیک
۲	سنگ‌های آذرین حد واسط و اسیدی + کمی آبرفت و سنگ‌های آذرین بازیکی	۷	آهک، شیل، ماسه سنگ + کمی آبرفت
۳	کنگلومرای پلیستوسن و آبرفت + کمی سنگ‌های آذرین بازیکی	۸	آهک، شیل، ماسه‌سنگ، آبرفت + کمی تداخل‌های آذرین
۴	شیل، ماسه‌سنگ و آبرفت + کمی تداخل‌های سنگ‌های آذرین	۹	آهک، شیل، ماسه‌سنگ، آبرفت و کنگلومرای پلیستوسن
۵	شیل، ماسه سنگ، آبرفت و آهک + کمی تداخل‌های آذرین		

۵ بحث و تحلیل نتایج

به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای، ابتدا تصحیحات هندسی و تابش‌سنجی در سازمان فضایی روی مقادیر دیجیتال (digital number) باند ۵ ماهواره NOAA صورت پذیرفت. عملیات مقایسه برای مقادیر تابشی به‌صورت نسبی است، لذا از ذکر یکای مربوط به مقادیر خودداری شده است. در فعالیت‌های بعدی سعی بر این است که از استانداردهای بین‌المللی (مثلاً کلوین، وات برمتر مربع و مانند آن) برای داده‌ها استفاده شود تا برحسب واحد مشخصی آشفتگی‌های قبل از زلزله عرضه شود. برای سهولت بررسی، از مقادیر میانگین تابشی به‌دست آمده از هر کدام از مربع‌ها یا مستطیل‌های آرایه‌ها استفاده شد که در ادامه به بررسی اجمالی آنها خواهیم پرداخت.

در مدل آرایه مربعی، مقادیر میانگین نسبی تابشی کدهای (یا تاریخ‌های برداشت اطلاعات) ۹ تا ۱۴ که در واقع معادل ۱۱ تا ۲ روز قبل از زلزله‌اند در مقابل فاصله از کانون زلزله (برحسب کیلومتر) ترسیم شد (شکل ۵). برای این منظور در کدهای گوناگون مقدار تابش در فواصل متفاوت از کانون متوسط‌گیری شد. سپس بهترین تابع لگاریتمی بر نمودار به‌دست‌آمده برازش داده شد و

مقدار R^2 به‌دست آمد (رابطه ۱) که در حدود ۰٫۹۷ است (این شاخص آماری قابلیت انطباق بین منحنی برازش داده شده را بر مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهد و بین صفر تا ۱ تغییر می‌کند). خطای استاندارد داده‌ها نیز به کمک رابطه (۲) استخراج شد. خطوط عمودی منطبق بر منحنی تغییرات، محدوده مثبت و منفی خطای استاندارد را نشان می‌دهد. همان‌طور که نمودار مربوطه نشان می‌دهد منحنی برازش داده شده بین مرز مثبت و منفی خطای استاندارد قرار می‌گیرد.

به‌طور مشابه مقادیر تابشی به‌صورت مجزا برای دیگر کدها رسم شد که از این میان کد ۱۲ با شکل ۴ و دیگر کدها مطابقت قابل قبولی نداشت (شکل ۵) و مقدار R^2 نیز از ۰٫۹۷ به ۰٫۸۸ کاهش یافت. از طرف دیگر منحنی لگاریتمی برازش داده شده در مرز مثبت و منفی خطای استاندارد قرار نمی‌گیرد. این مسئله می‌تواند نشان‌دهنده وجود یک آشفتگی مشخص در وضعیت تابش سطح زمین باشد.

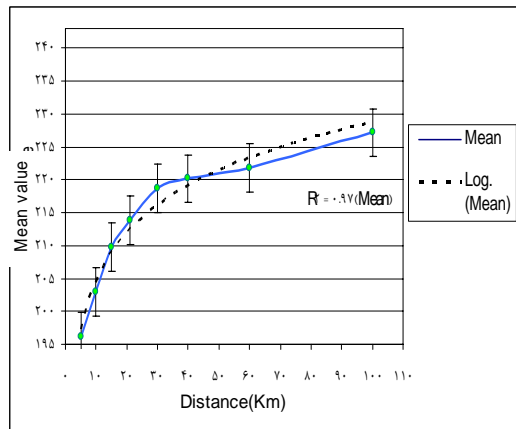
$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

در مدل آرایه مستطیلی، همانند مدل آرایه مربعی، منحنی متوسط مقادیر تابشی برای داده‌های کد ۹ تا ۱۴ (بدون در نظر گرفتن کد ۱۲) به دست آمد و بهترین تابع که در اینجا لگاریتمی است، بر تغییرات برازش داده شد. شاخص R^2 در حدود ۰٫۹ است (شکل ۶). این در حالی است که برای منحنی برازش داده شده بر داده‌های کد ۱۲ شاخص R^2 در حدود ۰٫۵۱ است (شکل ۷). همبستگی کم، می‌تواند مربوط به افزایش تابش در حوالی کانون (تا شعاع ۴۰ کیلومتری) در کد (۱۲) که معادل با ۶ روز به زلزله است باشد.

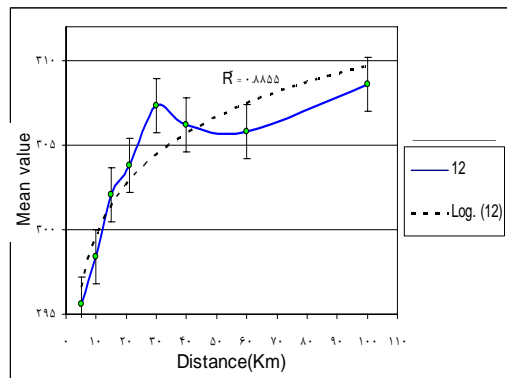
در این رابطه y_i مقدار عددی مشاهده‌ای و \hat{y} مقدار به دست آمده نقاط مشاهده‌ای از فرمول ریاضی برازش داده شده است.

$$S.E = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^m \sum_{i=1}^n y_{is}^2}{(n_y - 1)(n_y)}} \quad (2)$$

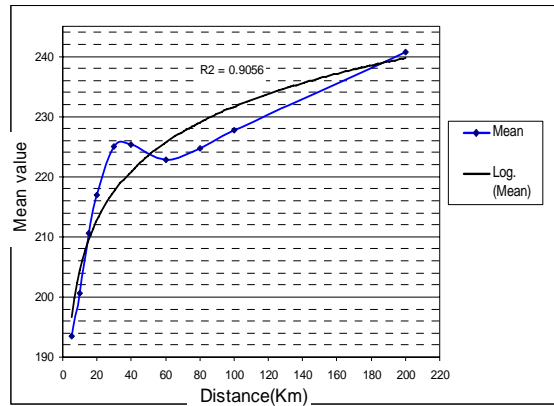
در این معادله S.E خطای استاندارد، S تعداد سری‌ها، i شماره نقطه در سری S، m تعداد سری‌ها برای نقطه y در نمودار، N تعداد نقاط در هر سری، y_{is} مقدار y در سری S در نقطه i، n_y تعداد کل داده‌ها در همه سری‌ها است.



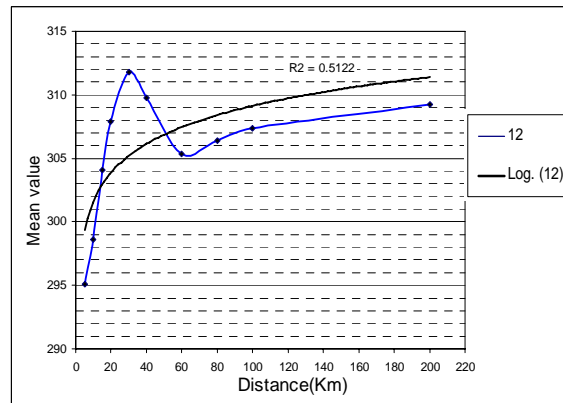
شکل ۴. نمودار تغییرات مقادیر میانگین تابش با فاصله برای منحنی متوسط شب‌های ۹ تا ۱۴ (بدون در نظر گرفتن شب ۱۲). خطوط عمودی منطبق بر منحنی تغییرات، محدوده مثبت و منفی خطای استاندارد هستند.



شکل ۵. نمودار تغییرات مقادیر میانگین تابشی با فاصله برای منحنی کد ۱۲.



شکل ۶. منحنی تغییرات متوسط مقادیر میانگین تابشی شب‌های ۹ تا ۱۴ (به جز روز ۱۲) به همراه تابع لگاریتمی برازش شده بر تغییرات.



شکل ۷. منحنی تغییرات مقادیر میانگین در شب ۱۲ همراه با تابع لگاریتمی برازش شده بر تغییرات.

بعد شده است. تابع اول که در زیر تابع دوم و به رنگ آبی است، حالت بدون وجود آشفستگی در داده‌های ماهواره‌ای منطقه مورد تحقیق را نشان می‌دهد. تابع دوم که به رنگ سرخ است و شیب بیشتری دارد، نشان‌دهنده وجود افزایش تابش در اطراف گسل مسبب زلزله است. برای بارزسازی بی‌هنجاری‌های تابشی (منظور از بی‌هنجاری تغییرات غیر قابل انتظار تابش در حوالی کانون است).

نمودار مقادیر میانگین تابش برای کدهای ۹ تا ۱۴ به‌طور مجزا رسم شد. سپس بر حدفاصل مقادیر مینیمم و

لازم به ذکر است که آهنگ تغییرات تابشی تا فاصله ۴۰ کیلومتری از کانون زلزله در کد ۱۲ تند است و بعد از آن به حالت آرام برمی‌گردد. به همین منظور دو تابع سهموی بر قسمت اول (تا شعاع ۴۰ کیلومتری) و قسمت دوم اطلاعات (از شعاع ۴۰ کیلومتری به بعد) برازش داده شد (شکل ۸).

این نمودار نشان‌دهنده افزایش شدید و غیر نرمال تابش در حوالی کانون است که همین مسئله باعث جدا شدن دو تابع برازش داده شده از شعاع ۱۰ کیلومتری به

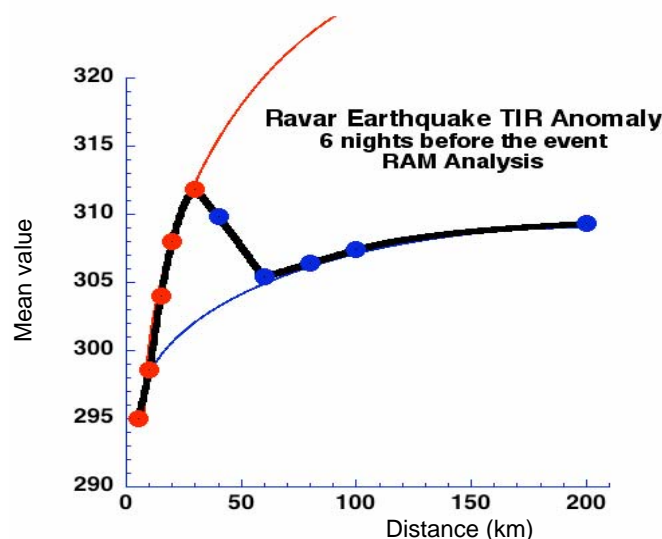
مناطق یکسان با تاریخ‌های دریافت متفاوت، حاصل می‌شوند و به‌نحوی عملیات دورآفت (offset) صورت می‌پذیرد تا نمایش واضحی از تغییرات بافت‌نماها از لحاظ شکل ظاهر فراهم آید.

بررسی‌ها نشان‌دهنده وجود افزایش غیرعادی تابش در آرایه‌های شماره ۱ و ۲ در کد ۱۲ است (شکل ۱۰-الف). همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، اولاً در محدوده پیک بافت‌نما، جمع‌شدگی قابل ملاحظه‌ای رخ داده است، ثانیاً پیک بافت‌نما به سمت مقادیر بالایی جابه‌جا شده است. به‌عبارتی دیگر، کج‌شدگی به سمت راست (مقادیر بالایی تابش) و کوتاه‌شدگی در پهنای پیک بافت‌نما رخ داده است. این در حالی است که برای مثال در آرایه شماره ۴ (شکل ۱۰-ب) کد ۱۲ مشابه کدهای دیگر است. با توجه به اینکه آرایه‌های زمین‌شناسی ۱ و ۲ عمدتاً از سنگ‌های آذرین تشکیل شده‌اند، می‌توان به این نتیجه رسید که با احتمال زیاد سنگ‌های آذرین موجود در منطقه توانسته‌اند تغییرات تابشی قبل از زلزله راور را بهتر از مناطق اطراف، به سطح زمین منتقل کنند.

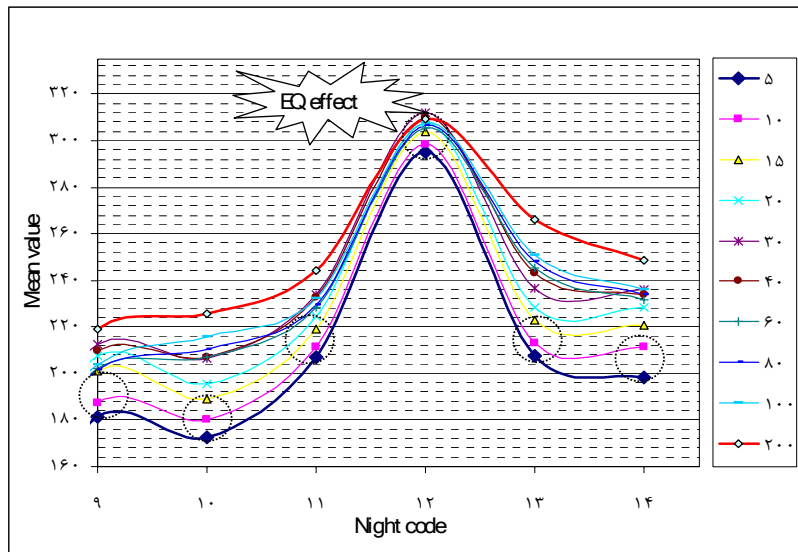
ماکسیم تابش در کد ۱۲ یک دایره محاط شد (شکل ۹). از راه مقایسه می‌توان به افزایش فاصله بین مقادیر مینیمم و ماکسیمم در دیگر کدها اشاره کرد. لازم به ذکر است که دایره پیش‌گفته روی کدهای دیگر نیز منتقل شد تا به‌طور مقایسه‌ای این تفاوت‌ها نمایش داده شود.

در مدل آرایه زمین‌شناسی، به جهت نمایش واضح‌تر تغییرات از استک بافت‌نما (هیستوگرام) های فراوانی استفاده شده است (این نمودارها شرایطی برای نمایش هم‌زمان چندین بافت‌نما را در یک نمودار به‌وجود می‌آورند). برای این منظور از نرم‌افزار ENVI 4.1 استفاده شده است. هدف از رسم نمودارهای استک، بررسی تغییرات بافت‌نما در آرایه‌های متفاوت زمین‌شناسی در طول دوره آماری است. کج‌شدگی بافت‌نماها به سمت مقادیر بالایی و پایینی و جمع‌شدگی محدوده پیک بافت‌نماها، از جمله شاخص‌های تغییرات هستند.

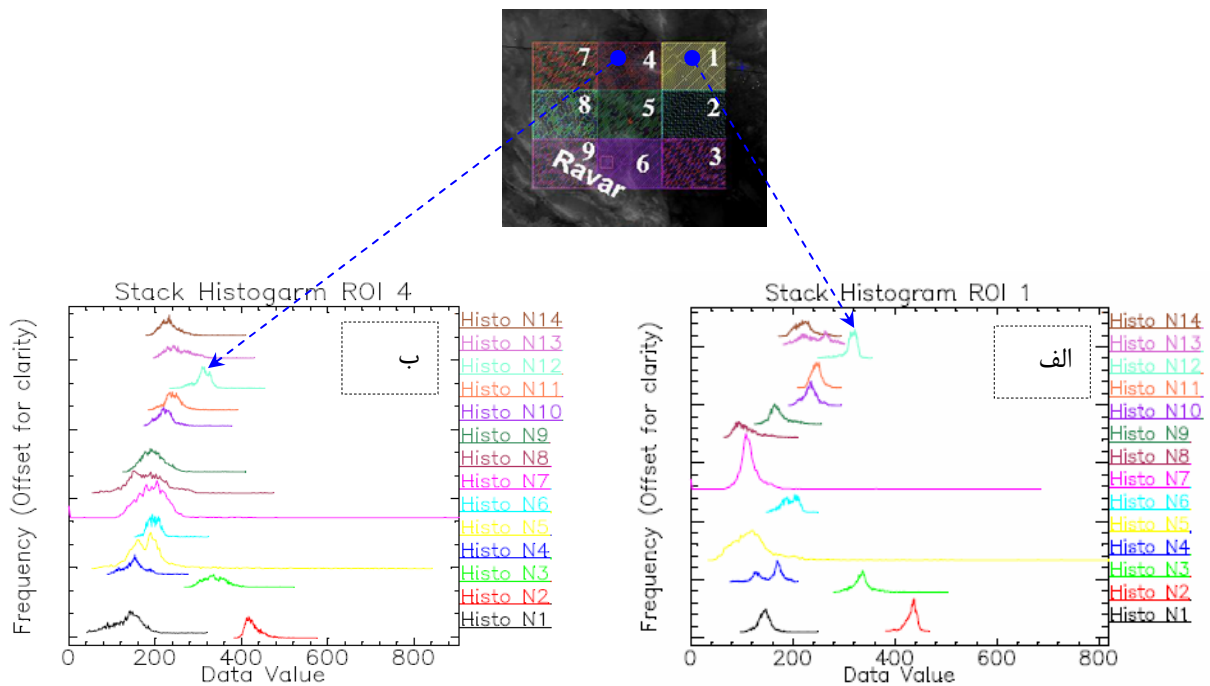
در شکل ۹، محور x مقدار تابش و محور y مقدار فراوانی هرکدام از مقادیر تابشی است. این نمودارها در واقع از قراردادن چندین بافت‌نما متوالی به‌دست آمده از



شکل ۸. نمایش توابع برازش داده شده بر منحنی تغییرات مقادیر تابشی در مدل آرایه مستطیلی با فاصله از کانون. از شعاع ۱۰ کیلومتر به بعد دو تابع سهموی متفاوت، بر تغییرات تابشی برازش داده شده است.



شکل ۹. نمودار تغییرات مقادیر میانگین برای کدهای ۹ تا ۱۴ در شعاع های متفاوت از کانون زلزله. دایره نشان دهنده تفاوت بین مینیمم و ماکسیمم مقادیر تابش در فواصل متفاوت از کانون در کد ۱۲ است.

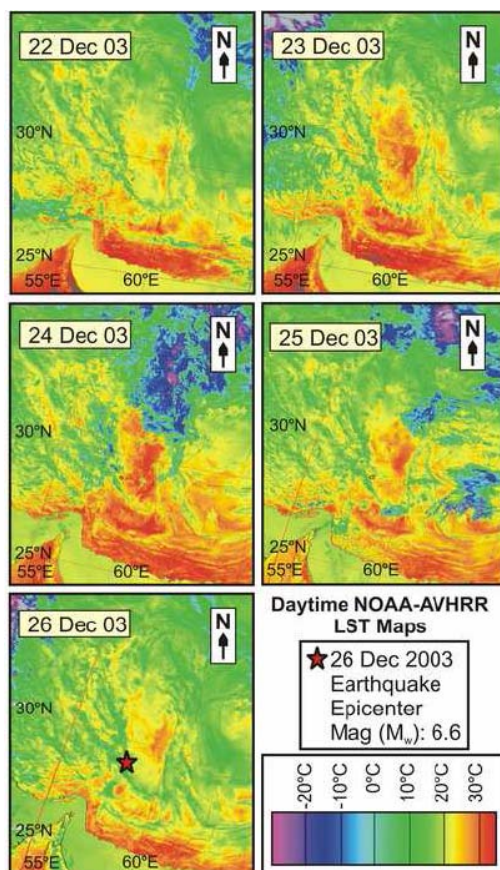


شکل ۱۰. نمودار استک بافت‌نما فروانی در آرایه زمین‌شناسی شماره ۱ (الف) و ۴ (ب) در کل دوره آماری مورد مطالعه. خط‌چین‌های آبی رنگ موقعیت بافت‌نما کد ۱۲ در آرایه‌های ۱ و ۴ را نمایش می‌دهند. جمع‌شدگی محدوده پیک بافت‌نما و کج‌شدگی به سمت مقادیر انتهایی (سمت راست) در آرایه شماره ۱ مشهود است. در راهنمای نمودارها نیز اختصارهای Histo N1 تا Histo N14 نشان‌دهنده داده‌های با کد ۱ تا ۱۴ هستند.

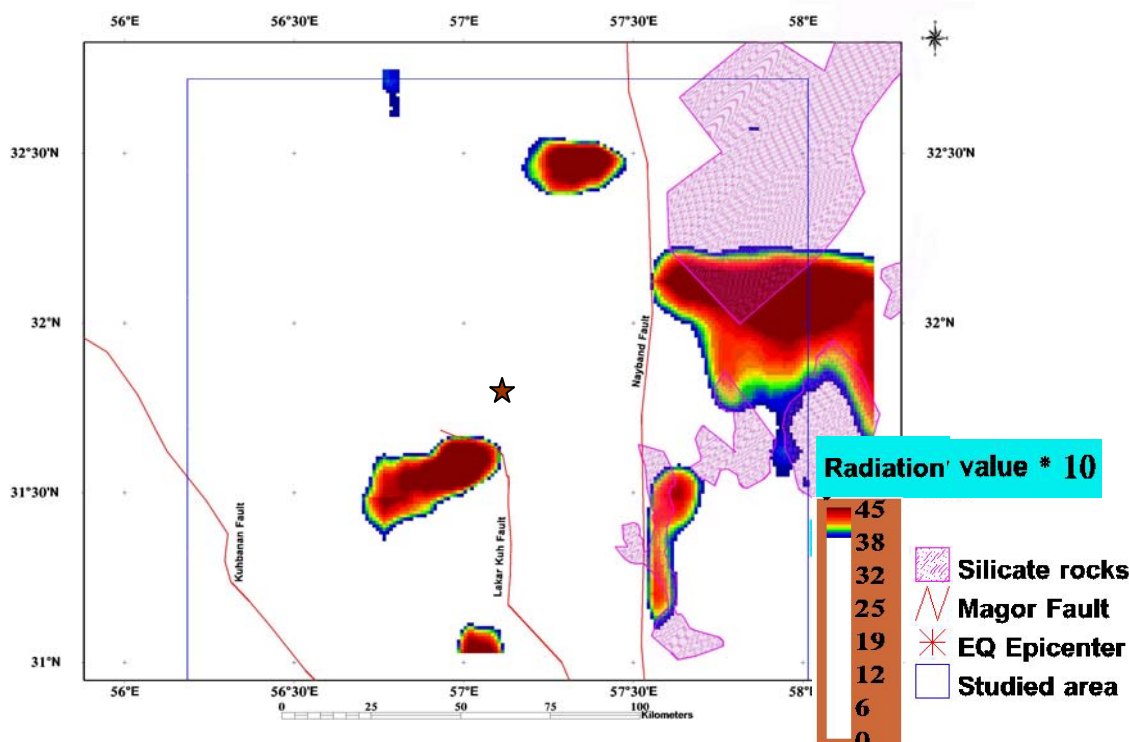
تصاویر نشان می‌دهد که بخش عمده افزایش تابش مربوط به مناطق با پوشش سنگ‌های آذرین است، هر چند این تابش در دیگر مناطق هم ثبت شده است. لازم به ذکر است که اثبات کامل این مسئله تحقیقات گسترده‌تری را می‌طلبد و از حوصله این پژوهش خارج است.

بررسی آماری زلزله‌های بزرگ‌تر از $M_w=5.8$ در ایران (جدول ۴) آران و چادهیوری (۲۰۰۶) نیز مبین این مطلب است که می‌توان به کمک داده‌های سنجش از دور حرارتی، تابش‌های فروسرخ ناشی از زلزله قریب‌الوقوع را ثبت کرد. در جدول ۴ فهرست زلزله‌های بررسی شده آمده است.

در ادامه، نتایج این تحقیق با تحقیقات آران و چادهیوری (۲۰۰۶) مورد بررسی قرار گرفت و روشن شد که برای مثال در زلزله بم ۵ روز مانده به وقوع زلزله (۲۶ دسامبر ۲۰۰۳) بی‌هنجاری‌های حرارتی در حوالی کانون زلزله ظاهر شده است (شکل ۱۱). نقشه مقادیر درجه‌بندی شده زلزله راور نیز ترسیم شد (شکل ۱۲). در این نقشه همان‌طور که در مباحث قبلی ذکر شد از واحد خاصی استفاده نشده است. به عبارتی، مقادیر نشان داده شده روی نقشه، نسبی‌اند. در ضمن نقشه به‌صورت نمایشی بازسازی شده است تا صرفاً مناطق دارای ماکسیمم تابش نمایش داده شوند. به عبارتی بقیه مناطق با رنگ سفید نشان داده شده‌اند. بررسی



شکل ۱۱. نقشه‌های دمای سطح زمین، به‌دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای NOAA از ۵ روز مانده به زلزله بم (آران و چادهیوری، ۲۰۰۶).



شکل ۱۲. نقشه بازسازی شده تابش نسبی تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری از کانون زلزله در ۶ روز مانده به زلزله (معادل کد ۱۲). موقعیت سنگ‌های آذرین و گسل‌های مهم منطقه مورد بررسی و کانون زلزله روی نقشه نشان داده شده است.

جدول ۴. فهرست زلزله‌های بزرگ‌تر از $M_w=5.8$ در کشور که بی‌هنگاری‌های فروسرخ حرارتی به همراه داشته‌اند (آران و چادهیوری، ۲۰۰۶).

S.N.	Earthquake	Origin		Location		Magnitude (USGS) M_w	Focal Depth (km)
		Date	Time (UTC)	Lat. (N)	Long. (E)		
1.	Changureh-Avaj*	22 Jun 02	02:58	35.63°	49.05°	6.5	10
2.	Jahron	10 Jul 03	17:40	28.35°	54.17°	5.8	10
3.	Kerman*	21 Aug 03	04:02	29.05°	59.77°	5.9	20
4.	Bam*	25 Dec 03	01:56	29.00°	58.34°	6.6	10
5.	Firozabad-Kajoor	28 May 04	12:38	36.29°	51.59°	6.3	28
6.	Zarand*	22 Feb 05	02:25	30.75°	56.82°	6.4	14
7.	Qeshm	27 Nov 05	10:22	26.77°	55.86°	6.0	10
8.	Faryab	28 Feb 06	07:31	28.12°	56.87°	6.0	18
9.	Fin	25 Mar 06	07:28	27.57°	55.69°	5.9	18
10.	Persian Gulf	28 Jun 06	21:02	26.82°	55.90°	5.8	10

۶ نتیجه‌گیری

حداکثر خود رسیده است و بیشترین مقدار آن در سمت شرق کانون که دارای سنگ‌های آذرین سیلیکاته است رخ داده است. بررسی آماری زلزله‌های بزرگ‌تر از $M_w=5.8$ در ایران (آران و چادهیوری، ۲۰۰۶) نیز مبین این مطلب است که می‌توان به کمک داده‌های سنجش از

تغییرات وضعیت تابش در حوالی کانون زلزله راور با سه مدل ساده ابداعی آرایه مربعی، مستطیلی و مربعی زمین‌شناسی به ثبت رسید و نشان داد که پراکنش تابش در محدوده امواج فروسرخ حرارتی ۶ روز مانده به زلزله به

- and Zamani, F., 2004. Mid-infrared radiation as a short-term earthquake precursor. arXiv:physics/0403003 v1.
- Arun, K. and Choudhury, S., 2006, Satellite detects pre-earthquake thermal anomalies associated with post major earthquake. Map Asia 2004.
- Filizzola, C., Pergola, N., Pietrapertosa, C. and Tramutoli, V., 2004, Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's earthquake. Phys. Chem. Earth., **2**, 517-527.
- Freund, F., 2002, Positive hole (P-hole) and positive hole Pairs (PHP): key to understanding many pre-earthquake phenomena. 2002 Earthquake Precursor Workshop. Taiwan, National Central University.
- Freund, F., 2004, Toward a better understanding of non seismic pre-earthquake phenomena. SJSU/NASA Ames Research Center, Earthsystem and Technology Branch Moffett, Field, CA 94035-1000.
- Freund, F., 2007, Pre-earthquake signals – Part II: Flow of battery currents in the crust. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., **7**, 1–6.
- Freund, F., Takeuchi, A., Lau, B. W. S., Post, R., Keefner, J., Mellon, J. and Akthem, Al. M., 2004, Stress-induced changes in electrical conductivity of igneous rocks and the generation of ground currents. TAO, **15** (3).
- 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.
- Shou, Z. 1999, Earthquake clouds and short term prediction. Science Utopya., **64**, 53-57.
- Tramutoli, V., Cuomo, V., Filizzola, C., Pergola, N. and Pietrapertosa, C., 2005, Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: The case of Kocaeli (Izmit) earthquake, August 17, 1999. Remote Sens. Environ. **96**, 409-426.
- 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.
- Wu, L., Cui, C., Geng, N. and Wang, J., 2000. Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies. International J. Rock Mech. Min. Sci., **37**, 817-888.
- Yin, X., Mora, P., Peng, K., Wang, Y. and

دور حرارتی، تابش‌های فروسرخ ناشی از زلزله قریب‌الوقوع را ثبت کرد. این مسئله با نتایج فروند (۲۰۰۴) که معتقد است سنگ‌های سیلیکاته که در اغلب نواحی ایران پراکندگی مناسبی دارند، می‌توانند منجر به ظهور امواج فروسرخ حرارتی از چند روز قبل و بعضاً تا چند روز بعد زلزله شوند، مطابقت دارد. در نهایت نتایج این بررسی قابلیت استفاده از داده‌های باند ۵ ماهواره NOAA حسگر AVHRR، به منظور ثبت پیش‌نشانگر حرارتی کوتاه‌مدت زلزله‌های بزرگ‌تر از $M_w=4.8$ را برای نواحی مرکزی ایران که واجد سنگ‌های آذرین سیلیکاته هستند را به اثبات می‌رساند.

۷ تقدیر و تشکر

در پایان لازم می‌دانیم از زحمات ارزنده پروفیسور فروند که مشوق نگارندگان بوده‌اند و راهنمایی‌های ارزنده‌ای عرضه داشته‌اند تشکر نماییم. همچنین راهنمایی‌های مفید فایده داوران مجله در ارتقای سطح علمی کار، تاثیر قابل توجهی داشته است که جا دارد از سردبیر مجله جناب آقای دکتر ایرج ملک‌پور و داوران مقاله تشکر کنیم.

منابع

- حافظی مقدس، ناصر. ۱۳۸۱، مطالعه اثرات ساختگاهی و حرکات شدید زمین‌لرزه‌ها در شرق و مرکز ایران (استان خراسان و کرمان)، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- سازمان زمین‌شناسی کشور، <http://gsi.ir/>
- پایگاه ملی داده‌های علوم زمین، <http://www.ngdir.ir>
- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، <http://www.iiees.ac.ir>
- Allameh-zadeh, M., Ansari, A., Bahraminasab, A., Kaviani, K., Mahdavi Ardakani, A., Mehrnabad, H., Niry, M., Rahimitabar, M.R., Tabatabai, S., Taghavinia, N., Vasaghi, M.

Weatherley, D., 2002, Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction. *Chinas Acad. Sci., Beijing*, **80**, 5-10.

Zmazek, B., Italiano, F., Zivcic, M., Vaupotic, J., Kobal, I. and Martinelli, G., 2002, Geochemical monitoring of thermal waters in Solvenia: relationship to seismic activity. *Appl. Radiat. Isotopes.*, **57**, 919-930.