

پیش‌نشانگرهای گرمایی لرزه‌ای احتمالی حاشیه غرب صفحه لوت ایران - منطقه کرمان

حسین جلال کمالی^{۱*}، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۲ و حسین امیری^۳

^۱ استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

^۲ استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

(دریافت: ۸۸/۴/۲۷، پذیرش نهایی: ۹۰/۱۱/۱۱)

چکیده

تاکنون تحقیقات چندی در زمینه بی‌هنجاری شارهای تغییرات گرمایی سطح زمین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و آب‌های زیرزمینی در ارتباط با زمین‌لرزه‌ها صورت گرفته است. در این مقاله، تغییرات دمایی عمق یک متری خاک دو ایستگاه بم و زرنند (استان کرمان) و ارتباط احتمالی داده‌های دمایی این عمق، با زمین‌لرزه‌های این مناطق مورد بررسی قرار گرفته است. شهرهای بم و زرنند نزدیک گسل‌های فعالی قرار دارند که هرگونه فعالیت آنها ممکن است به بی‌هنجاری‌های دمایی خاک که با ایستگاه‌های هواشناسی دیده‌بانی می‌شوند، منجر شود. معمولاً نزدیک سطح، دمای خاک به دلیل تغییرات جوی و تابش خورشید دست‌خوش نوسان‌های زیادی می‌شود، اما در عمق‌های پایین‌تر مثلاً بیش از ۰/۵ متر این تغییرات دمایی کوتاه‌مدت، ناچیز است. بررسی دمای خاک، به‌ویژه دمای عمق یک متری آن در این ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که دما بین دو تا چهار هفته قبل از زلزله‌های بزرگ تا ۱/۵ درجه و نزدیک به چهار هفته بعد از آن، افزایش چشمگیر ۲/۵ درجه سلسیوس داشته است. این تغییرات ممکن است مرتبط با تغییرات شرایط زیر سطح زمین در طول دوره فعالیت زمین‌لرزه باشد.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری دمایی، ضریب پخش گرمایی، زمان تأخیر، زلزله، دمای خاک

Possible thermal seismic precursors along Western boundary of Lut plate (IRAN)-Kerman area

Jalal Kamali, H.¹, Ali-Akbari Bidokhti, A. A.² and Amiri, H.³

¹ Assistant Professor, Physics Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

² Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Physics Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

(Received: 18 Jul 2009, Accepted: 31 Jan 2012)

Abstract

So far a number of works on the heat flux anomalies of the earth surface based on the satellite images and underground water as seismic precursors have been carried out. In this paper the soil temperature data at 1m depth (deep enough to filter temperature variation due to high frequency meteorological forcings) has been considered to see if there are connections between earthquakes in Bam and Zarand (Kerman province) and seismic activities. Bam and Zarand are situated near the active faults; hence the activities of these faults may lead to thermal anomalies recorded at the soil temperature monitoring stations (Iranian Meteorological Organization). Usually near the surface soil temperature changes very rapidly by the meteorological forcing as daily variations of surface temperature due to changes of solar heating, but at deeper depth, say more than 0.5 m the changes are nearly negligible. Temperature data of different soil depth, namely, 10, 20,

30, 50, and 100 cm at 03, 09, and 15 universal times for years 1996-2005 are obtained from the Metrological Organization for Bam and 2003-2005 for Zarand stations. By analyzing the penetration of daily heat waves into the ground, the damping depths indicate that temperature deeper than 10 cm is usually unaffected by surface temperature variations. Hence we used temperature records of 100 cm and try to see if there are any anomalous changes prior to the major earthquakes in these two regions. The anomalies are deviation of temperature records from the mean trends of temperatures at these stations. The time lags between the time of troughs of anomalous signals and the time of minimum temperatures of the month earthquake occurred, were also estimated indicating that they are about 4-7 days. From the vertical temperature graints in the deeper soil, thermal diffusivity of the soil at and around of the time of the events were also calculated, indicating some changes. Also the water levels of some wells at these two stations indicated some changes, going down or up rather suddenly. All these changes show that there may be some variations prior and after the earthquakes. From these the actual temperature changes more vividly. Mean daily soil temperatures at 1m depth at these stations were analyzed, showing decrease (about 1.5 degrees) before the strong earthquakes and larger increase (about 2.5 degrees) after them. These changes may be due to seismic effects near the active zones.

Key words: Thermal anomaly, Thermal diffusivity, Delay time, Earthquake, Soil temperature

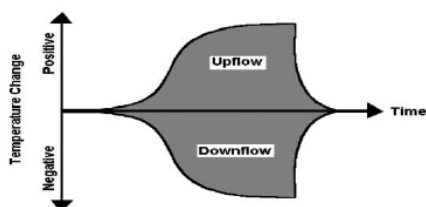
۱ مقدمه

سطح زمین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (سراف و همکاران، ۲۰۰۵؛ ترونین و همکاران، ۲۰۰۲).
بررسی تغییرات دمایی ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی که هم در نواحی اقیانوسی و هم در نواحی قاره‌ای گزارش شده‌اند به دو گونه عمقی یا سطحی بوده است (سراف و همکاران، ۲۰۰۵). گزارش‌های گونه نخست یعنی تغییر دما تا چندصد متر عمق، مربوط به بررسی آب‌های زیرزمینی است (روالوفس، ۱۹۹۸). قبل از رخداد زلزله در دمای آب‌های زیرزمینی تغییراتی به شکل افزایشی و یا کاهشی مشاهده و گزارش شده است. این تغییرات دمایی را در بعضی گزارش‌ها به‌منزله پیش‌نشانگر یاد کرده‌اند (وایت‌هد و همکاران، ۱۹۸۴) و یکی از علت‌های اصلی افزایش یا کاهش دمای آب‌های زیرزمینی را شیب دمایی درون زمین معرفی کرده‌اند (همزه، ۲۰۰۱). چون با افزایش عمق، دما زیاد می‌شود، آب‌هایی که در عمق‌های پایین‌تری هستند دمای بیشتری نسبت به آب‌های

محققان به‌منظور کنترل خسارت‌های جانی و مالی پدیده طبیعی زمین‌لرزه، با تلاش زیاد به دنبال پیش‌بینی و یافتن ارتباط تغییرات ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی و یا هرگونه تغییرات زیست‌محیطی در ارتباط با زلزله به‌صورت پیش‌نشانگر هستند. برای نمونه از پیش‌نشانگرهایی که تاکنون گزارش شده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: تغییر الگوی مقاومت‌های ویژه الکتریکی (وارتسوس و الکسوپلوس، ۱۹۸۴) تغییر مشخصه‌هایی مانند غلظت در گازها و تنش و کرنش برای سنگ‌ها، در راستای یک گسل فعال (سوکی ساکی و همکاران، ۱۹۹۶) تغییرات غلظت گاز رادن در خاک (سینگ و والیا، ۲۰۰۱؛ توتین و جین کلود، ۱۹۹۹) تغییر در جریان آب‌های زیرزمینی (شیمامورا و همکاران، ۱۹۸۵؛ موگی و همکاران، ۱۹۸۹؛ همزه، ۲۰۰۱؛ کیتاگوا و همکاران، ۱۹۹۶) پیش‌نشانگرهای شیمیایی (واکیتا و همکاران، ۱۹۸۸) تغییر در سرعت امواج زلزله (هدایتی و همکاران، ۱۹۷۸) بی‌هنجاری‌های گرمایی

معمولاً تا عمق حدود ۴۰ سانتی‌متری، روی این دماها محسوس است ولی این تغییرات در عمق‌های بیشتر از آن، برای تغییرات شبانه‌روزی معمولاً محسوس نیست. بنابراین هرگونه تغییر در عمق‌های بیش از حدود ۰/۵ متر ممکن است مربوط به فعالیت‌های درونی زمین باشد (شکل ۲). در این تحقیق به بررسی دماها تا عمق یک متر خاک در دو ایستگاه هواشناسی بم و زرنده می‌پردازیم. این ایستگاه‌ها در استان کرمان و در نزدیکی گسل‌های فعال حاشیه غرب لوت قرار دارند.

شکل ۲ تغییرات دمای عمق‌های متفاوت را برای مدت ده روز نشان می‌دهد. تأثیر نامحسوس دماهای سطحی، روی دمای عمق یک متر خاک، به خوبی در این شکل دیده می‌شود. حال اگر تغییرات دمای همین عمق را برای زمان یک سال رسم کنیم، با توجه به موج دمایی سطحی سالانه که عمق نفوذ آن $(365)^{1/2}$ برابر بیشتر از عمق نفوذ موج دمایی شبانه‌روزی است (آریا، ۱۹۹۸) نمودار تقریباً به شکل سینوسی (همراه با اُفت‌وخیزهایی با دوره‌های کوتاه‌مدت) در خواهد آمد. با میانگین‌گیری این نمودارها برای چند سال، اُفت‌وخیزهای کوچک که ناشی از عوامل گوناگون (مثلاً تغییر رطوبت خاک) است، کم خواهد شد. شکل ۳ تغییرات میانگین روز به روز دمای عمق یک متر خاک، در دهه ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵، ایستگاه بم را نشان می‌دهد. این دماها هر روز در ساعت ۰۰ UTC: ۰۳ اندازه‌گیری شده‌اند. براساس شکل ۳، دما در این ایستگاه، طی یک سال، بین ۱۹/۲ تا ۳۶/۵ درجه سلسیوس تغییر می‌کند.



شکل ۱. نمودار تغییرات دمای آب‌های زیرزمینی در مراحل پیش‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای (همزه، ۲۰۰۱).

سطوح بالاتر دارند. قبل از رخداد زلزله در اثر وجود تنش‌های زمین‌ساختی نزدیک گسل‌ها ممکن است تغییراتی در سطح تراز آب‌های زیرزمینی رخ دهد. اگر انتقال و نفوذ آب به سمت بالا باشد، افزایش نسبی دما را داریم و اگر عکس آن رخ دهد، به دلیل جایگزین شدن آب‌های سطوح بالاتر که دمای کمتری دارند، تغییرات به شکل کاهش دما است. مثلاً شکل ۱ به‌طور کیفی نشان می‌دهد که چگونه قبل از یک فعالیت لرزه‌ای، دمای آب‌های زیرزمینی ممکن است تغییر کند (همزه، ۲۰۰۱).

با استفاده از داده‌های دمای سطحی زمین، که با استفاده از ماهواره‌ها اندازه‌گیری می‌شود و با تجزیه و تحلیل آن نیز می‌توان پدیده‌های گرما لرزه‌ای را مورد بررسی قرارداد. این‌گونه ماهواره‌ها با استفاده از طیف فروسرخ، میدان دمایی سطح زمین را با تفکیک ۰/۵ تا ۵ کیلومتر برای فاصله ۰/۱۲ تا ۰/۵ درجه سلسیوس برای دما، دیده‌بانی می‌کنند. این کار برای نمونه‌ای از ماهواره‌های مربوط به NOAA (National Ocean and Atmospheric Administration) هر ۱۲ ساعت و برای نوع دیگر آنها، یعنی ماهواره‌های زمین‌ایستا (Geostationary)، هر ۳۰ دقیقه تکرار می‌شود. بررسی داده‌های این ماهواره‌ها نشان می‌دهد که تغییراتی قبل و بعد از زلزله در الگوی دمایی زمین رخ می‌دهد (ترونین و همکاران، ۲۰۰۲).

در این تحقیق از دماهای عمق یک متر خاک که در بعضی از ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند، استفاده شده است.

۲ تغییرات دما در خاک

دمای زیر سطح خاک معمولاً در عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری در ایستگاه‌های هواشناسی با دقت ۰/۲ درجه سلسیوس اندازه‌گیری می‌شود. تأثیر تغییرات واداشت‌های شبانه‌روزی هواشناسی سطحی،

و شار گرمایی در سطح از رابطه زیر به دست می آید:

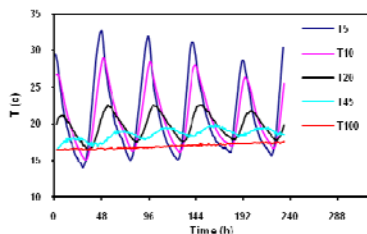
$$H_{z=0} = \rho c (\kappa \omega)^{1/2} \cos(\omega t + \pi/4) \quad (7)$$

بنا بر این، با توجه به روابط فوق می توان از تغییرات دما در خاک به عمق نفوذ موج گرمایی و ضریب انتقال گرما در خاک (k) پی برد. در اینجا با بررسی دما در زیر سطح خاک به تحلیل بی هنجاری های احتمالی آن برای دو ایستگاه بم و زرنند که در آنها زلزله هایی رخ داده است می پردازیم. بی هنجاری های دمایی و تغییرات احتمالی κ که به عمق نفوذ موج گرمایی در خاک مربوط است، جزء تغییراتی است که در ارتباط با فعالیت های لرزه ای بررسی می شود. قبل از این بررسی ها ابتدا به معرفی زلزله های بزرگ این مناطق در سال های اخیر می پردازیم.

۳ زلزله بم و زرنند

شهر بم در جنوب شرقی ایران و در جنوب غربی کویر لوت واقع است. در تاریخ ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ زمین لرزه ای به بزرگای ۶/۶ ریشتر رخ داد که ناشی از فعال شدن گسل بم بود. این گسل از بین بروات و شهر بم می گذرد.

گسل های اصلی این منطقه، شمالی- جنوبی با کمی تمایل به سوی غرب (گسل های نایند و لکرکوه) و همچنین شمال غربی- جنوب شرقی (گسل کوهبنان) هستند. این دو سامانه گسلی در ناحیه غربی دشت لوت با هم تلاقی می کنند (شکل ۴، IIEES).



شکل ۲. نمونه تغییرات دمای عمق های ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۵ و ۱۰۰ سانتی متر (ساعت ۱۶ به وقت محلی) ایستگاه هواشناسی مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران نسبت به زمان، از روز ۱۹۹۵/۴/۲۸ تا ۲۴۰ ساعت بعد.

علت تغییرات دما در شکل ۲، انتقال گرما از سطح زمین و به صورت رسانشی است و بنا به قانون و معادله فوریه، شار گرما در امتداد محور z عبارت است از (آریا، ۱۹۹۸):

$$H = -k(\partial T / \partial z) \quad (1)$$

با فرض انتقال انرژی به شکل گرما در یک بُعد (z) و اصل پایستگی انرژی در یک لایه خاک می توان نوشت:

$$(\partial T / \partial t) = \kappa(\partial^2 T / \partial z^2) \quad (2)$$

که در آن، H شار گرما در راستای قائم (z)، T دما، k ضریب رسانش گرمایی (که اینجا ثابت فرض می شود)، $\kappa = k / \rho c$ ضریب پخش گرمایی، P و C به ترتیب چگالی و گرمای ویژه خاک است. با حل معادله (۲)، موج دمایی روزانه یا سالانه در عمق های گوناگون به دست خواهد آمد [برگرفته از (آریا، ۱۹۹۸)]. اگر موج دمایی سطحی به صورت سینوسی در نظر گرفته شود:

$$T(z, t) = \bar{T} + \text{Re}\{a(z) \exp(i\omega t)\} \quad (3)$$

که $T(z \rightarrow \infty) = \bar{T}$ و ω بسامد زاویه ای موج است و دامنه موج:

$$a(z) = A \exp[-(1+i)z/D] \quad (4)$$

که در آن، $a(0) = A$ ، $a(z \rightarrow \infty) = 0$ و D به عمق میرایی موج معروف و عبارت است از:

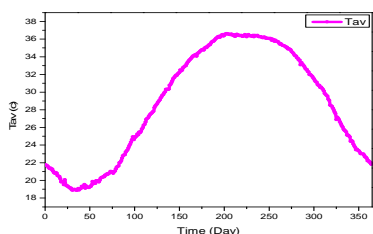
$$D = (2\kappa / \omega)^{1/2} \quad (5)$$

بنابراین با داشتن گرادیان دمای خاک در سطح $(\partial T / \partial z)$ در $(z = 0)$ و با داشتن دمای زیر سطح (بدون تأثیر بیرونی)، دما در هر عمق و در هر زمان چنین به دست می آید:

$$T(z, t) = \bar{T} + \exp(-z/D) \cos(\omega t - z/D) \quad (6)$$

این شکل، منحنی تغییرات دمای عمق یک متر خاک از سپتامبر ۲۰۰۳ تا اوت ۲۰۰۴، در کنار نمودار میانگین ده ساله تغییرات دمای این عمق را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این نمودار با پالایش پایین‌گذر نوفه‌ها (تأثیرات و خیزهای احتمالی دمای سطحی) با استفاده از برنامه Origin رسم شده است. در این نمودار، زلزله‌هایی با بزرگای بیشتر از ۴ به همراه زمان وقوع آنها تا شعاع ۳۰ کیلومتری از ایستگاه هواشناسی مشخص شده‌اند (جدول ۱). شکل ۵-ب از تفریق دو منحنی شکل ۵-الف به دست آمده است که نمودار تغییرات $T-T_{av}$ نسبت به زمان را نشان می‌دهد. در این نمودار که تغییرات فصلی دمای آن حذف شده، بی‌هنجاری‌های دمایی قبل و بعد از زلزله دیده می‌شود. کاهش نسبی دمای عمق یک متر خاک، از یک ماه قبل از زلزله اصلی، ابتدا با شیب کم در دو هفته اول، سپس با شیب بیشتر در دو هفته آخر، تا کاهش حدود ۱/۵ درجه سلسیوس رسیده است. بعد از رخداد زلزله اصلی، دمای نسبی عمق یک متر خاک شروع به افزایش کرده به طوری که بعد از ۷۵ روز این افزایش با یک افت و خیز تا ۳/۵ درجه سلسیوس رسیده است.

مکان رومرکز زلزله‌های پیش‌گفته که در طی سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ رخ داده‌اند در شکل ۵-ج نشان داده شده است. مکان رومرکز زلزله اصلی که با ستاره مشخص شده است در فاصله نسبتاً نزدیک ۳/۷ کیلومتری ایستگاه هواشناسی قرار دارد.



شکل ۳. تغییرات میانگین روزبه‌روز طی ده سال (۱۹۹۶-۲۰۰۵) دمای عمق یک متر خاک، ایستگاه بم.

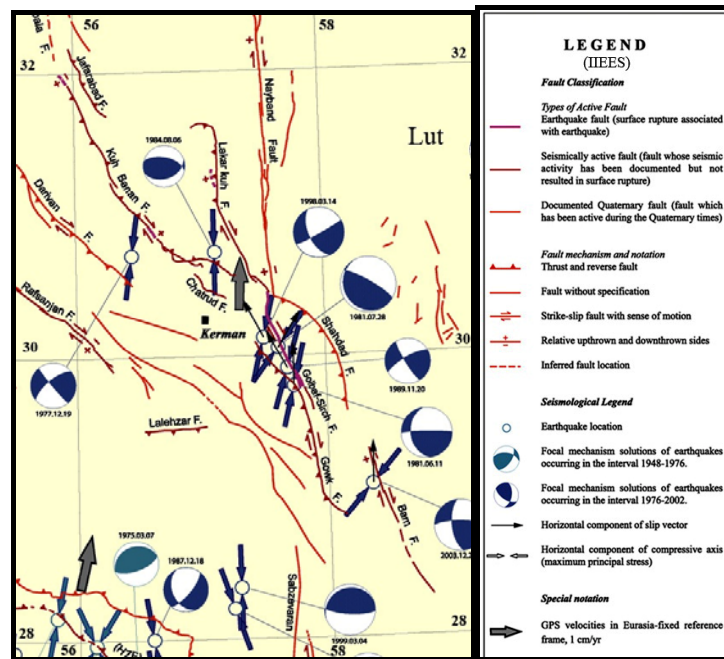
از گسل‌های نزدیک شهر زرنند می‌توان به گسل‌های کوهبنان و داهوئیه اشاره کرد. گسل کوهبنان با راستای شمال غربی - جنوب شرقی در شرق زرنند و گسل داهوئیه با طولی حدود ۳۰ کیلومتر با پهنه گسل کوهبنان تلاقی کرده است. صفحه گسلی کوهبنان از لرزه‌خیزترین روندهای ساختاری استان کرمان محسوب می‌شود (عشقی و همکاران، ۲۰۰۳).

۴ داده‌ها و تحلیل

اندازه‌گیری دمای عمق خاک در ایران با توجه به اطلاعات موجود در بعضی ایستگاه‌های سازمان هواشناسی از اواسط سال ۱۹۹۲ آغاز شده است. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، اندازه‌گیری دما در عمق‌های متفاوت، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از سطح زمین هر روز در ساعت‌های ۰۳، ۰۹ و ۱۵ به وقت جهانی صورت می‌پذیرد. شکل ۲ نشان می‌دهد که دامنه تغییرات کوتاه‌مدت دما در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری نسبت به بقیه عمق‌ها، کمترین مقدار است. در این تحقیق به دلیل کاهش تأثیر گرمای سطحی تابش خورشید، از داده‌های دمایی ساعت ۰۳ UTC استفاده شده است. مقایسه نمودار سالانه دمای عمق ۱۰۰ سانتی‌متر خاک در زمان وقوع زلزله (برای هر منطقه) با نمودار میانگین ده ساله (۱۹۹۶-۲۰۰۵) برای بم و نمودار میانگین سه ساله (۲۰۰۳-۲۰۰۵) برای زرنند، وجود بی‌هنجاری‌های دمایی را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از فعالیت‌های زمین‌لرزه‌ای باشد.

۴-۱ مورد بم

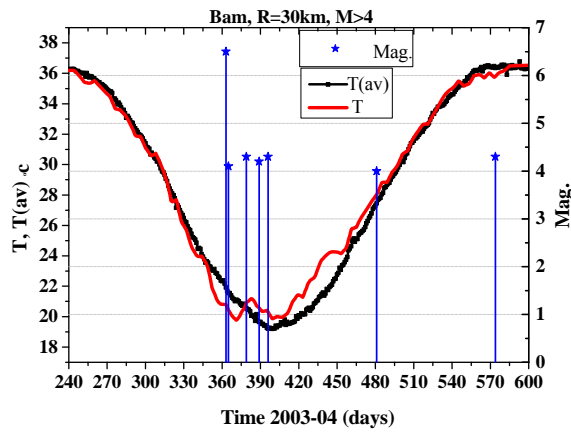
با داده‌های موجود در ایستگاه بم، نمودار ۵-الف رسم شد.



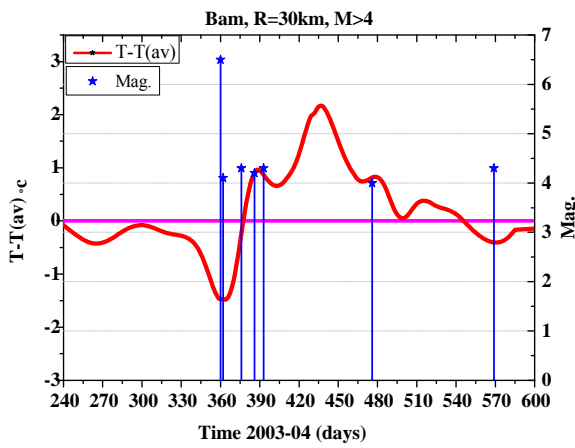
شکل ۴. گسل‌های فعال منطقه مورد بررسی (IIIES).

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ منطقه بم که در شعاع ۳۰ کیلومتری از ایستگاه هواشناسی آن با بزرگای بیش از ۴ ریشتر رخ داده‌اند، (برگرفته از IIIES و USGS).

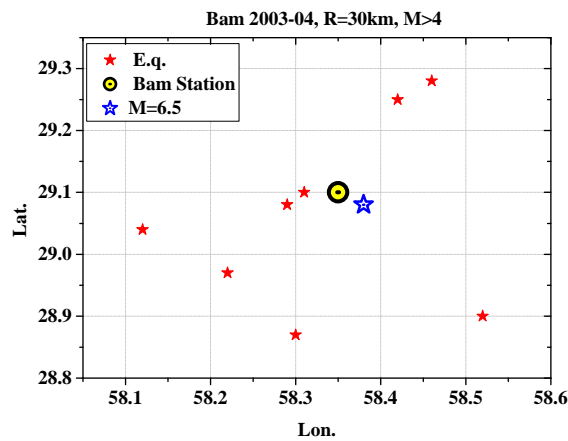
بزرگا (ریشتر)	عمق (Km)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	زمان (UTC)	تاریخ
Mw : ۶/۶	۱۰	۵۸/۳۸	۲۹ / ۰۸	۰۱ : ۵۶ : ۵۶	۲۰۰۳/۱۲/۲۶
mb : ۵/۱	۱۰	۵۸/۳۲	۲۸/۹۲	۰۳ : ۰۶ : ۱۵	۲۰۰۳/۱۲/۲۶
mb : ۴/۱	۱۰	۵۸/۳۱	۲۸/۹۹	۰۳ : ۲۱ : ۰۹	۲۰۰۳/۱۲/۲۶
mb : ۴/۵	۱۰	۵۸/۳۲	۲۸/۹۸	۰۳ : ۵۳ : ۲۷	۲۰۰۳/۱۲/۲۶
mb : ۴/۱	۱۰	۵۸/۲۱	۲۹/۰۲	۰۹ : ۱۶ : ۳۵	۲۰۰۳/۱۲/۲۶
mb : ۴/۶	۱۰	۵۸/۲۱	۲۹/۰۳	۱۴ : ۰۸ : ۱۷	۲۰۰۳/۱۲/۲۶
mb : ۴/۱	۱۰	۵۸/۲۹	۲۹/۰۸	۱۵ : ۰۲ : ۱۲	۲۰۰۳/۱۲/۲۸
mb : ۴/۳	۱۵	۵۸/۳۰	۲۸/۸۷	۰۵ : ۰۶ : ۰۲	۲۰۰۴/۰۱/۱۱
mb : ۴/۲	۱۰	۵۸/۳۱	۲۹/۱۰	۱۳ : ۲۳ : ۳۴	۲۰۰۴/۰۱/۲۱
mb : ۴/۳	۳۳	۵۸/۲۲	۲۸/۹۷	۱۷ : ۲۹ : ۳۲	۲۰۰۴/۰۱/۲۸
mb : ۴	۱۰	۵۸/۱۲	۲۹/۰۴	۰۲ : ۴۱ : ۱۰	۲۰۰۴/۰۴/۲۰
ML : ۴/۳	۱۴	۵۸/۵۲	۲۸/۹۰	۰۴ : ۵۱ : ۳۵/۹	۲۰۰۴/۰۷/۲۲
ML : ۴/۱	۱۴	۵۸/۴۲	۲۹/۲۵	۰۷ : ۱۵ : ۵۷/۱	۲۰۰۴/۱۰/۰۸



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. (الف) مقایسه دمای عمق یک متر خاک از اوت ۲۰۰۳ تا اواخر اکتبر ۲۰۰۴ با دمای متوسط ده ساله، (ب) تغییرات اختلاف دما با متوسط دمای عمق یک متری خاک ایستگاه بم و زمان وقوع زلزله‌هایی با بزرگای بیش از ۴ تا شعاع ۳۰ کیلومتری ایستگاه و (ج) موقعیت رومرکز زلزله‌های مورد بررسی نسبت به ایستگاه هواشناسی.

آن و ضریب پخش گرمایی خاک را به دست آورد. بنابر مقادیر محاسبه شده در جدول ۲ و نمودار شکل ۶، اختلاف زمان تأخیر در کمینه دما با مقدار میانگین پنج ساله، در ۲۰۰۳ که زلزله در روزهای پایانی آن سال رخ داده $3/6+$ روز و در ۲۰۰۴ که کمینه دما در ماه اول آن یعنی حدود یک ماه بعد از زلزله بوده، $6/6+$ روز است. در حالی که این اختلاف در سالهایی که زمین لرزه رخ نداده بسیار کوچک تر و حتی منفی است.

ضریب پخش گرمایی محاسبه شده در جدول ۲ نشان می دهد که در کمینه دمای ۲۰۰۴ یعنی حدود یک ماه بعد از زلزله، مقدار آن تا ۵۷٪ مقدار میانگین چهار سال قبل از زلزله کاهش پیدا کرده است. با کاهش ضریب پخش گرما، دامنه موج گرما باید زیاد شود که در اینجا با توجه به نمودار شکل های ۵ و ۶، این موضوع تأیید می شود.

به منظور بررسی رطوبت خاک در زمان رخداد زلزله، میزان ماهانه بارندگی ۲۰۰۳ (سال وقوع زلزله) با میانگین ۵۰ ساله ایستگاه بم در شکل ۷ مقایسه شده است. این نمودار براساس داده های سازمان هواشناسی کشور رسم شده و نشان می دهد که شهر بم از ماه هفتم ۲۰۰۳ تا آخر سال هیچ گونه بارشی نداشته است. این بدان معنا است که تغییر دمای عمق خاک در حوالی زمان رخداد زلزله، ناشی از تغییرات رطوبت خارجی نیست.

کمیت دیگری که در زمان رخداد این زلزله مورد بررسی قرار گرفت، ضریب پخش گرمایی خاک (K) است. برای به دست آوردن این کمیت طبق روابط زیر نیاز به زمان تأخیر موج دمایی (Δt) است. با توجه به رابطه (۶) زمان تأخیر موج گرما در دو عمق متفاوت از رابطه زیر به دست می آید.

$$\Delta t = \Delta z / (\omega D) \quad (8)$$

با ترکیب روابط ۵ و ۸ ضریب پخش گرمایی K نیز به صورت زیر به دست می آید:

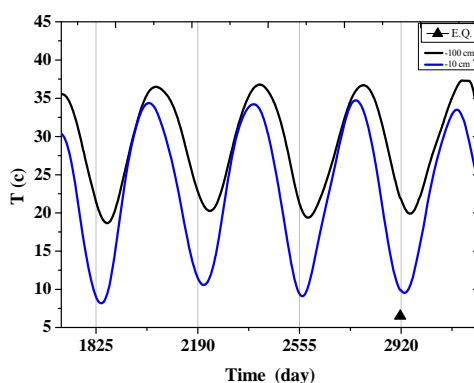
$$K = [(\Delta z)^2 / (2\omega)] (\Delta t)^{-2} \quad (9)$$

با فرض $\gamma = (\Delta z)^2 / (2\omega)$ درحکم یک ثابت در نمودار شکل ۶ می توان نوشت:

$$K = \gamma (\Delta t)^{-2} \quad (10)$$

به عبارتی ضریب پخش با توان دوم زمان تأخیر نسبت عکس دارد و بنابراین هرگونه تغییر احتمالی K در زمان فعالیت های لرزه ای ممکن است در Δt نشان داده شود.

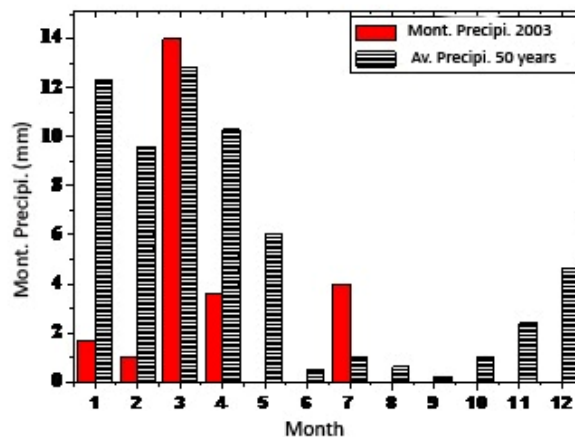
با استفاده از رابطه ۱۰ و شکل ۶ که در آن تغییرات اختلاف فاز در کمینه دمای عمق های ۱۰ و ۱۰۰ سانتی متر ایستگاه بم نشان داده شده است، می توان زمان تأخیر در کمینه دما، اختلاف زمان تأخیر با مقدار میانگین



شکل ۶. تغییرات دمای عمق های ۱۰ و ۱۰۰ سانتی متر خاک در زمان ۰۳ UTC مربوط به ایستگاه بم از اواسط سال ۲۰۰۰ تا اواخر سال ۲۰۰۴. زمان وقوع زلزله با علامت \blacktriangle نشان داده شده است.

جدول ۲. تأخیر زمان، اختلاف زمان تأخیر با مقدار میانگین ۵ ساله آن و مقدار ضریب پخش گرمایی در کمینه دمای سالانه ایستگاه بم.

در سال	Δt زمان تأخیر در کمینه دمای سالانه (روز)	اختلاف زمان تأخیر در کمینه دما با مقدار میانگین ۵ ساله آن (روز)	χ ضریب پخش گرمایی $m^2 s^{-1} 10^{-6}$
۱۹۹۹	۲۴	-۱/۴	۰/۴۷۳
۲۰۰۰	۲۶	۰/۶	۰/۴۰۳
۲۰۰۱	۲۶	۰/۶	۰/۴۰۳
۲۰۰۲	۲۲	-۳/۴	۰/۵۶۳
۲۰۰۳	۲۹	۳/۶	۰/۳۲۴
۲۰۰۴	۳۲	۶/۶	۰/۲۶۶

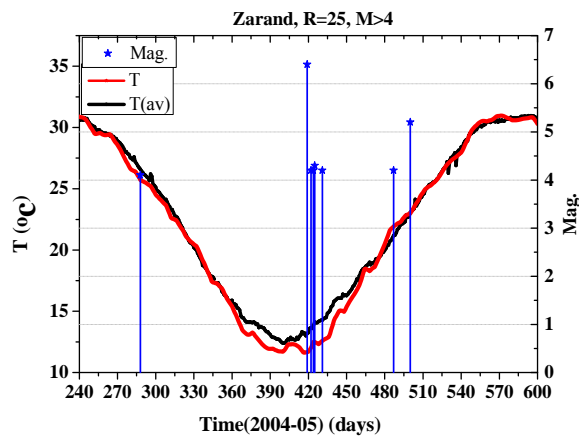


شکل ۷. میزان ماهانه بارندگی برحسب میلی‌متر، ستون‌های سرخ‌رنگ بارندگی سال ۲۰۰۳ و ستون‌های دارای خطوط مشکی، بارندگی میانگین ۵۰ سال ایستگاه بم را نشان می‌دهند.

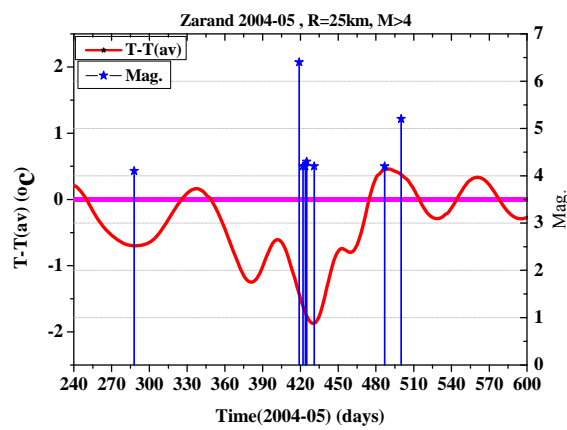
بوده و آن‌گاه نزدیک ۰/۸ درجه سلسیوس در عرض ۱۶ روز کاهش پیدا کرده است. در مدت ۱۲ روز که پس‌لرزه‌هایی با بزرگای بیش از ۴ رخ داده بود نیز دمای نسبی همچنان روند کاهشی تا حدود ۲ درجه را دارد. بعد از پس‌لرزه‌ها، دمای نسبی در عرض ۷۰ روز با یک اُفت‌وخیز به میزان نزدیک ۲/۳ درجه سلسیوس زیاد می‌شود که از مقدار میانگین، حدود ۰/۵ درجه بیشتر است.

۴-۲ مورد زرد

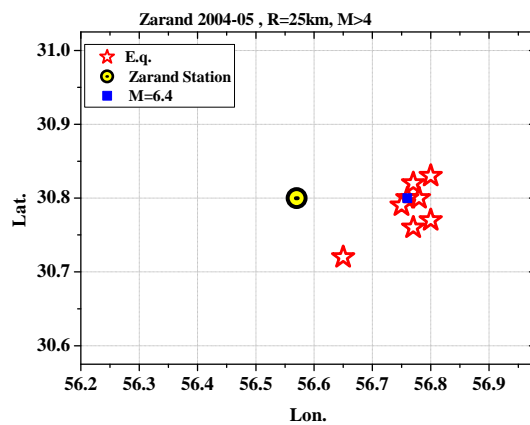
حاصل تحقیقات صورت گرفته در زرد نیز مانند بم در نمودارهای شکل ۸ با در نظر گرفتن زلزله‌هایی با بزرگای بیش از ۴ تا شعاع ۲۵ کیلومتر نشان داده شده است. شکل ۸-ب نشان می‌دهد که برای ایستگاه زرد، تغییرات دمای نسبی عمق یک متر خاک، حدود ۸۰ روز قبل از زلزله اصلی به مدت ۴۲ روز در حال کاهش به میزان ۱/۴۲ درجه و سپس تا مدت ۲۲ روز، افزایش ۰/۶۵ درجه‌ای



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸ (الف) مقایسه دمای عمق یک متر خاک از اوت ۲۰۰۴ تا اواخر اکتبر ۲۰۰۵ با دمای میانگین سه ساله، (ب) تغییرات اختلاف دما با میانگین دمای عمق یک متری خاک نسبت به زمان، به همراه زمان وقوع زلزله‌هایی تا شعاع ۲۵ کیلومتری و بزرگای بیش از ۴ در هر نمودار و (ج) موقعیت رومرکز زمین‌لرزه‌های مورد بررسی نسبت به ایستگاه هواشناسی زرنند.

۳-۴ بحث

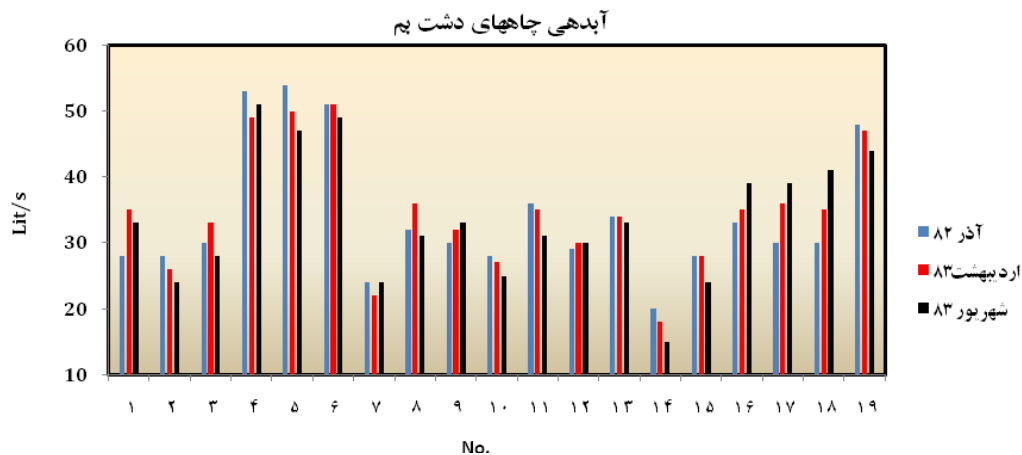
در اثر زلزله، به وجود آمده است. متفاوت بودن بی‌هنجاری‌های ناشی از زلزله در مناطق گوناگون دشت بم را به فاصله و محل قرارگیری چاه‌ها یا قنات‌ها نسبت به گسل‌های منطقه دانسته است. جدول ۳ و نمودار شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ که با استفاده از نتایج آن تحقیق رسم شده‌اند، به ترتیب میزان آبدهی چاه‌ها، موقعیت چاه‌ها و قنات‌ها نسبت به شهر بم و میزان آبدهی قنات‌ها دشت بم را نشان می‌دهند. شکل ۹ میزان آبدهی ۱۹ چاه در آذر ۸۲ یعنی یک ماه قبل از زلزله، اردیبهشت ۸۳ (حدود چهارالی پنج ماه بعد از زلزله) و همچنین در شهریور ۸۳ را نشان می‌دهد.

مطابق این نمودار، آبدهی چاه‌های شماره ۲، ۵، ۱۰، ۱۱ و ۱۴، در هر سه اندازه‌گیری، روند کاهشی، و چاه‌های شماره ۹، ۱۶، ۱۷ و ۱۸، روند افزایشی و چاه‌های شماره ۱، ۳ و ۸، ابتدا افزایش و سپس کاهش و بعضی دیگر مثل چاه‌های شماره ۴ و ۷ اول کاهش و بعد افزایش آبدهی داشته‌اند. لازم به ذکر است شهر بم و گسل بم در غرب چاه‌های ذکر شده قرار دارد (شکل ۱۰). میزان آبدهی قنات‌ها دشت بم که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند، تغییراتی کم و بیش شبیه تغییرات آبدهی چاه‌های آن منطقه دارند.

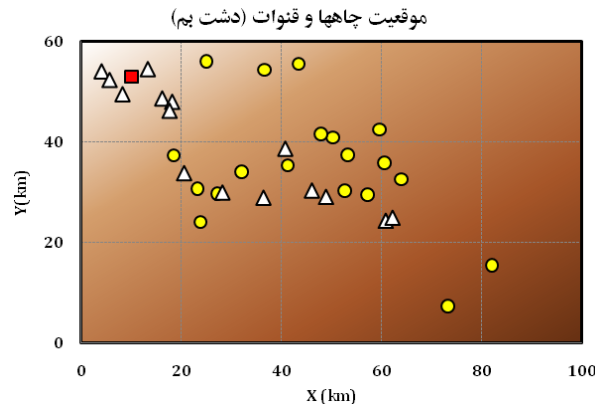
در هر دو منطقه مورد بررسی، با در نظر گرفتن نمودار شکل‌های ۵-ب برای بم و ۸-ب برای زرنده، به میزان محسوسی کاهش دما قبل از زلزله و افزایش دما بعد از آن مشاهده می‌شود. تغییرات مشابهی در دمای آب‌های زیرزمینی در زلزله‌های ۱۹۷۸ ایزو-آشیما-لینکای ژاپن (نگائی و همکاران، ۱۹۷۹) و ۱۹۹۵ لینکانگ چین (چن و همکاران، ۱۹۹۶) نیز رخ داده است.

جدول ۱ کاهش مقدار ضریب پخش گرمایی برای ایستگاه بم را در حدود زمان زلزله نشان می‌دهد، ممکن است آن‌گونه که اشاره شد، مربوط به پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی در اثر وقوع زلزله باشد. گزارش‌ها محلی از روستاهای زلزله‌خیز زرنده مثل هتکن و کتکوئیه نشان می‌دهد، تغییر سطح آب‌های زیرزمینی، هم افزایش و هم کاهش داشته است اما از محل ایستگاه هواشناسی که در آن دمای عمق خاک اندازه‌گیری می‌شود و تا رومرکز زلزله حدود ۱۸ کیلومتر فاصله دارد، گزارشی در این مورد در دست نیست.

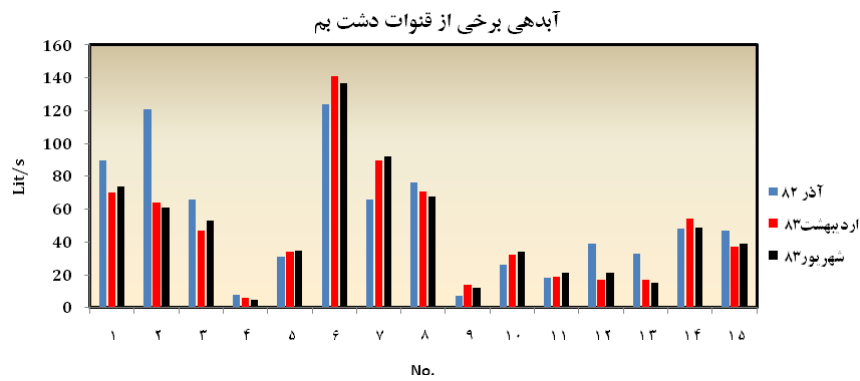
سالاری (۱۳۸۴) در زمینه اثر زلزله بم بر منابع آب‌های زیرزمینی آن منطقه، تحقیقی را به انجام رسانده است که نشان می‌دهد، بی‌هنجاری‌هایی در آبدهی چاه‌ها و قنات‌ها



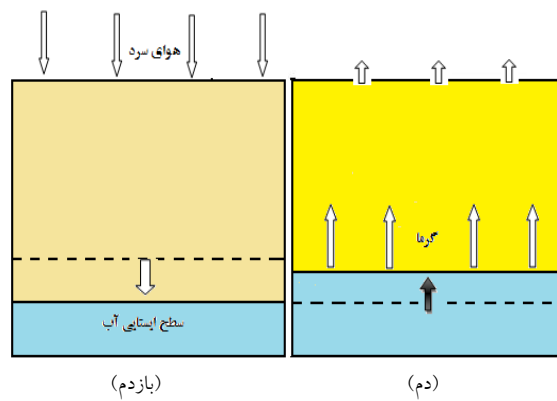
شکل ۹. میزان آبدهی و تغییرات آن در برخی از چاه‌های دشت بم، قبل و بعد از زلزله دی‌ماه ۱۳۸۲.



شکل ۱۰. موقعیت مکانی چاه‌های جدول ۲ (دایره‌ها) و قنوات‌ها نمودار شکل ۹ (سه‌گوش‌ها) مربوط به دشت بيم، نسبت به خود شهر بيم (چهارگوش).



شکل ۱۱. میزان آبدهی و تغییرات آن در برخی از قنوات‌ها دشت بيم، قبل و بعد از زلزله دی‌ماه ۱۳۸۲.



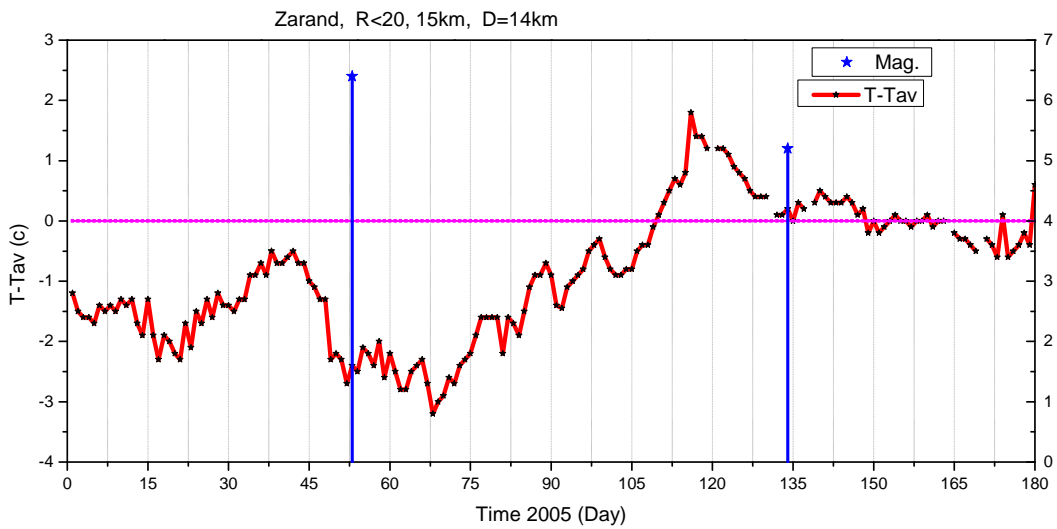
شکل ۱۲. شکل ساده‌ای از تغییرات سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی و جابه‌جایی هوای سرد و گرم نزدیک سطح و ایجاد به‌اصطلاح دم و بازدم زمین.

هوای سطحی که معمولاً سرد است به داخل زمین نفوذ کرده باشد و باعث کاهش دما شده باشد و پس از آن با تنظیم مجدد و بالا آمدن آن، هوای گرم‌تر

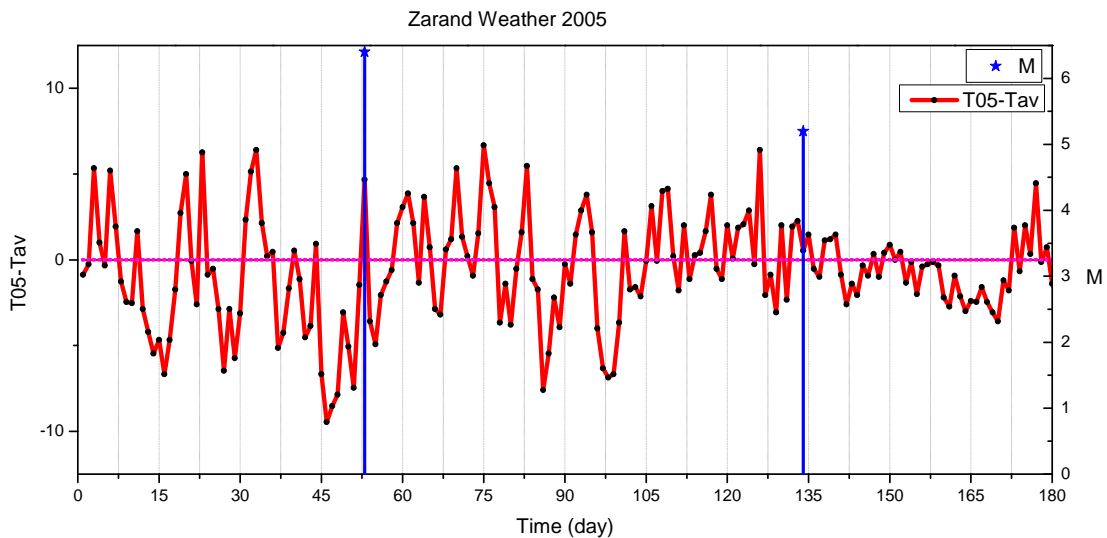
با توجه به اینکه هر دو زمین‌لرزه در ماه‌های سرد سال رخ داده است، امکان دارد که با آفت احتمالی سطح ایستایی آب به دلیل تنش و کرنش‌های درونی زمین،

(شکل‌های ۱۳ و ۱۴). شبیه نبودن این دو نمودار نشان‌دهنده تأثیر بیشتر فعالیت‌های لرزه‌ای نسبت به واداشتهای جوئی یا تابشی در هنگام زلزله است. در این زمینه تحقیقات دیگری نیز صورت گرفته است که این ارتباط را نشان می‌دهد (رضاپور و همکاران، ۲۰۰۷) (جلال‌کمالی و همکاران، ۲۰۰۹).

زمین به بالا نفوذ کرده باشد. این را می‌توان در اصطلاح، به صورت «دم» و «بازدم» زمین تعبیر کرد. شکل ۱۲ این مطلب را به صورت طرحوار نشان می‌دهد. در آخر، نمودار تغییرات $T - T_{av}$ مربوط به عمق یک متر خاک و همچنین مربوط به هوا (در بالای سطح خاک) برای شش ماهه اول ۲۰۰۵ ایستگاه زرنند رسم شده است



شکل ۱۳. تغییرات $T - T_{av}$ عمق یک متر ایستگاه زرنند در شش ماه اول ۲۰۰۵ و موقعیت زمانی زلزله‌ها.



شکل ۱۴. تغییرات $T - T_{av}$ مربوط به دمای بالای سطح زمین، ایستگاه زرنند در شش ماه اول ۲۰۰۵ و موقعیت زمانی زلزله‌ها.

جدول ۳. میزان آبدهی برخی از چاه‌های دشت بم قبل و بعد از زلزله دی‌ماه ۱۳۸۲، (برگرفته از سالاری، ۱۳۸۴).

شماره چاه	موقعیت X km	موقعیت Y km	آذرماه ۸۲ Lit/s	اردیبهشت‌ماه ۸۳ Lit/s	شهریورماه ۸۳ Lit/s
۱	۷۳/۱۷۴	۷/۳۳۷	۲۸	۳۵	۳۳
۲	۸۲/۰۴۶	۱۵/۴۲۴	۲۸	۲۶	۲۴
۳	۱۸/۴۰۷	۳۷/۳۵۵	۳۰	۳۳	۲۸
۴	۲۳/۷۹۷	۲۴/۱۱۶	۵۳	۴۹	۵۱
۵	۳۱/۹۹۴	۳۴/۰۷	۵۴	۵۰	۴۷
۶	۲۳/۱۴۵	۳۰/۶۹۶	۵۱	۵۱	۴۹
۷	۴۱/۲۴۸	۳۵/۳۶۳	۲۴	۲۲	۲۴
۸	۲۷/۱۲۲	۲۹/۷۰۲	۳۲	۳۶	۳۱
۹	۵۹/۵۱۶	۴۲/۵۰۴	۳۰	۳۲	۳۳
۱۰	۴۳/۴۰۹	۵۵/۶۵۳	۲۸	۲۷	۲۵
۱۱	۳۶/۵۲۵	۵۴/۴۷۸	۳۶	۳۵	۳۱
۱۲	۵۰/۲۲۱	۴۰/۹۹	۲۹	۳۰	۳۰
۱۳	۴۷/۸۱۱	۴۱/۵۹۳	۳۴	۳۴	۳۳
۱۴	۲۴/۹۲	۵۶/۱۵۴	۲۰	۱۸	۱۵
۱۵	۶۳/۹۰۵	۳۲/۶۶۲	۲۸	۲۸	۲۴
۱۶	۵۳/۱۵۱	۳۷/۴۷۷	۳۳	۳۵	۳۹
۱۷	۱۴۲/۵۹۶	۳۰/۳۷	۳۰	۳۶	۳۹
۱۸	۶۰/۵۴۴	۳۵/۸۴۶	۳۰	۳۵	۴۱
۱۹	۵۷/۱۴۳	۲۹/۴۹۸	۴۸	۴۷	۴۴

۵ نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه داده‌های دمایی تا عمق یک متر خاک هم‌اکنون در بیشتر ایستگاه‌های هواشناسی قابل دسترس است، شاید بتوان قبل از زلزله با بررسی‌های دقیق‌تر از این‌گونه تغییرات دما مربوط به نواحی زلزله‌خیز، به‌منزله پیش‌نشانگر استفاده کرد.

در هر دو ایستگاه بم و زرنده، قبل از زلزله اصلی، کاهش محسوس دمای نسبی (حدود ۱/۵ درجه سلسیوس) و بعد از آن افزایش نسبی دما (حدود ۲ الی ۲/۵ درجه سلسیوس) در عمق یک متر مشاهده شد. به عبارتی هر دو زلزله در کمینه دمای نسبی رخ داده‌اند.

تشکر و قدردانی

از همکاری آقایان: دکتر علی نگارستانی، دکتر محمد شجاعی و دکتر عباس رنجبر صمیمانه تشکر می‌کنیم.

در زلزله بم علاوه بر بی‌هنجاری در دمای عمق یک متر، در ضریب پخش گرمایی خاک نیز بی‌هنجاری دیده می‌شود. بنابر گزارش‌های محلی در زرنده و تحقیق صورت گرفته در بم، سطح تراز آب زیرزمینی بعد از زلزله در بعضی نقاط پایین و در بعضی مناطق بالا آمده است. نحوه تغییرات دمای عمق خاک و سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی در زمان رخداد زلزله این دو منطقه را می‌توان در اصطلاح به دم و بازدم زمین، قبل و بعد از زلزله تشبیه کرد. یعنی مثلاً با پایین رفتن سطح ایستایی آب در اثر تنش و کرنش، احتمالاً حالت مکش هوای سرد بالای سطح اتفاق می‌افتد و این باعث افت دمای عمق یک متر خاک به‌طور نسبتاً طولانی در مدت قبل از زلزله می‌شود (دم سرد). بعد از رخداد زلزله، مجراهایی در اثر تغییرات درونی زمین، جابه‌جایی و تغییر درشکاف‌ها، گسل‌ها، درزها و شکستگی‌های پوسته، به‌وجود می‌آید. شاره‌ها و گازهای موجود در سطح‌های فوقانی سنگ‌سپهر از طریق این مجاری به سمت بالا حرکت می‌کنند و یا خارج می‌شوند. این اتفاق‌ها باعث بی‌هنجاری انتقال گرمای درون زمین در هنگام زلزله می‌شود (بازدم گرم).

از جمله عوامل گوناگون در نمودارهای دمایی دو منطقه می‌توان به تفاوت ساختار مواد تشکیل‌دهنده پوسته زمین، اختلاف در ژرفای کانون زلزله در دو ناحیه و یا اختلاف فاصله ایستگاه اندازه‌گیری دمای عمق خاک تا مرکز زمین لرزه‌ها، اشاره کرد که نیاز به بررسی بیشتر دارد.

منابع

سالاری، ه.، ۱۳۸۴، اثرات گسل بم و زلزله بم بر روی منابع آب زیرزمینی دشت بم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۲۸۶.

- Arya, S. P., 1998, Introduction to micrometeorology, Academic Press.
- Chen, L., Luo, P., and Cai, J., 1996, Medium-short term and impending predictions and precursory anomaly features for M=7.3 earthquake Menglian Yunnan at the border area of China and Burma, In: Li, L., Wu, b. (Eds.), The Selected Papers of Earthquake Prediction in China." State Sismological Bureau, Beijing, China, 19-29.
- Eshghi, S., Zare, M., Nasseradi, K. S., Razzaghi, M., Ahari, M., and Motamedi, M., 2003, Preliminary reconnaissance report on Dec. 26, 2003 Bam (Iran) Earthquake, jivhk, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
- Hamza, V. M., 2001, Tectonic leakage of fault bounded aquifers subject to non-isothermal recharge: a mechanism generating thermal, Physics of the Earth and Planetary Interiors, **126**, 163-177.
- Hedayati, A., Brander, J. I., and Mason, R. G., 1978, Instances of premonitory crustal velocity ratio changes in Iran, Tectonophysics, **44**, T1-T6.
- Jalal Kamali, H., Bidokhti, A. A., and Amiri, H., 2009, Relation between integral effect of sub-surface temperature variation (I) and seismic effects, Nat. Hazards and Earth Syst. Sci., **9**, 1815-1821.

- Wakita, H., Nakamura, Y., and Sano, Y., 1988, Short term and intermediate term geochemical precursors, *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 267-278.
- Whitehead, R. L., and Harper, R. W., Sisco, H. G., 1984, Hydrologic changes associated with the October 28, 1983, Idaho earthquake, *Pure Appl. Geophys.*, **122**, 280-293.
- Kitagawa, Y., Koizumi, N., and Tsuskuda, T., 1996, Comparison of post-seismic groundwater temperature changes with earthquake-induced volumetric strain release: Yudani hot spring, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **23**(22), 3147-3150.
- Mogi, K., Mochizuki, H., and Kurokawa, Y., 1989, Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu peninsula (Japan) and their relation to earthquake, *Tectonophysics*, **159**, 95-108.
- Nagai, S., Ikeda, K., Goto, H., Abe, K., Nagata, S., and Oba, N., 1979, Change of groundwater temperature and quality before and after the Izu-Oshima-kinkai earthquake, 1978, Special Report, Geological Survey of Japan, **7**, 87-118.
- Rezapour, N., Bidokhti, A. A., and Fattahian, M., 2007, Study of some relationship between thermal properties of the ground and earthquake activity in Alborz region, International earthquake symposium Kocaeli, Turkey.
- Roeloffs, E. A., 1998, Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **103**(B1), 869-889.
- Saraf, A. K., and Choudhury, S., 2005, Thermal remote sensing technique in the study of pre-earthquake thermal anomalies, *J. Ind. Geophysics*, **9**, 197-207.
- Shimamura, H., Ino, M., Hikawa, H., and Iwasaki, T., 1985, Groundwater micro-temperature in earthquake regions, *Pure Appl. Geophys.*, **122**, 933-946.
- Singh, H., and Walia, N. K., 2001, Helium/radon precursory anomalies of Chamoli earthquake Garhwal Himalaya India, *Journal of Geodynamics*, **31**, 201-210.
- Sugisaki, R., Anno, H., and Ui, H., 1996, Geochemical features of gases and rocks along active faults, *Geochemical Journal*, **143**, 101-112.
- Toutain, J. P., and Jean-Claude, B., 1999, Gas geochemistry and seismotectonics: a review, *Tectonophysics*, **304**, 1-27.
- Tronin, A. A., Hayakawa, M., and Molchanov, O. A., 2002, Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China, *Journal Geodynamics*, **33**, 519-534.
- Varotsos, P., and Alexopoulos, K., 1984, Physical properties of the variation of the electric field of the Earth preceding earthquakes, *Tectonophysics*, **110**, 93-98.