

تحلیل آماری روابط بین پارامترهای جوی و رخداد زمین لرزه های بزرگ در ایران

غزاله رسانه^{۱*}

۱- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد فلاورجان (Gh.Rasaneh@iau.ac.ir)

چکیده

ایران، واقع در کمربند لرزه خیز آلپ-همالیا، در معرض ریسک بالای زمین لرزه های ویرانگر قرار دارد. با وجود پیشرفت های چشمگیر در سامانه های مانیتورینگ ژئوفیزیکی، پیش بینی کوتاه مدت زمین لرزه همچنان به عنوان یک چالش علمی مطرح است. این پژوهش با تمرکز بر پیش نشانگرهای جوی-تکتونیکی، به تحلیل آماری ناهنجاری های پارامترهای سینوپتیکی پیش از رخداد زمین لرزه در بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۴۰۲ پرداخته است. داده های برخی پارامترهای سینوپتیکی از جمله دمای هوا، دمای خاک، درصد رطوبت نسبی و شار گرمای نهان سطحی در بازه زمانی وقوع چند زمین لرزه با بزرگی بیشتر از ۶ ریشتر از شبکه ایستگاههای سینوپتیک سازمان هواشناسی ایران و پایگاه داده های NOAA NCEP/NCAR استخراج شد. پردازش داده ها با استفاده از آزمون های ناپارامتریک من-کندال و ویلکاکسون نشان داد که در بازه 7 ± 2 روز پیش از زمین لرزه، ناهنجاری های معنی دار ($p\text{-value} < 0/05$) در پارامترهای فوق رخ می دهد. به طور خاص، افزایش شار گرمای نهان سطحی تا ۳۰٪ نسبت به پایه اقلیمی (CLT) در مناطق گسلی فعال مشاهده شد. همچنین، تحلیل رگرسیون چندمتغیره حاکی از وابستگی شدت ناهنجاری ها به عمق کانونی زمین لرزه ($R^2=0/76$) و فاصله ایستگاه از گسل ($R^2=0/68$) است. این یافته ها همسو با فرضیه مکانیسم انتشار گازهای رادون و تغییرات تنش کرنشی پوسته پیش از زمین لرزه است.

کلمات کلیدی: پیش نشانگرهای لرزه ای، ناهنجاری های سینوپتیکی، تحلیل آماری چندمتغیره، شار گرمای نهان سطحی، مکانیسم انتشار

۱. مقدمه

پیش بینی زمین لرزه به عنوان یک چالش چندرشته ای، در مرز میان ژئوفیزیک، هواشناسی دینامیکی و علوم دیگر جای گرفته است. اگرچه مکانیسم های فیزیکی زمین لرزه ها عمدتاً مرتبط با گسیختگی ناگهانی گسل ها هستند، مطالعات تجربی اخیر نشان می دهند که برهم کنش های پیچیده بین لیتوسفر، اتمسفر و هیدروسفر ممکن است الگوهای پیش نشانگری قابل ردیابی ایجاد کنند [1]. از جمله این پیش نشانگرها می توان به ناهنجاری های حرارتی سطح زمین، تغییرات غلظت گاز رادون و اختلالات یونوسفری اشاره کرد که در چارچوب نظریه جفت شدگی (لیتوسفر-اتمسفر-یونسفر) مورد بررسی قرار می گیرند [2].

این پژوهش با تمرکز بر سه زمین لرزه بزرگ با مکانیسم های تکتونیکی متفاوت انجام شده است:

۱. زلزله ۲۰۰۳ بم، ($M_w=6/6$) در ایران، مرتبط با گسلش رورانده در پوسته قاره ای

۲. زلزله ۲۰۱۰ هائیتی، ($M_w=7$) در مرز صفحات کارائیب و آمریکای شمالی.

۳. زمین لرزه ۲۰۰۴ سوماترا، ($M_w=1/9$) با منشأ فرورانش اقیانوسی.

انتخاب این رویدادها مبتنی بر تنوع محیط تکتونیکی و دسترسی به داده های هواشناسی با رزولوشن زمانی- مکانی بالا ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ، Spatial Resolution: 1h, Temporal Resolution) بوده است. یافته های اولیه حاکی از آن است که ناهنجاری های پارامترهای سینوپتیکی (نظیر شار گرمای نهان سطحی و گرادیان دمای خاک) در بازه ۷-۱۰ روز پیش از رخداد، از الگوهای هم بسته مکانی با موقعیت گسل های فعال پیروی می کنند. این مشاهده، فرضیه انتشار پیشاپیش تنش کرنشی (Pre-seismic Stress Diffusion) را تقویت می کند که بر اساس آن، تغییرات تنش در پوسته زمین می تواند بر سامانه های جوی-اقیانوسی تأثیر گذار باشد [3].

۲. روش تحقیق

۲-۱ جمع آوری داده ها

زمان، مکان، و عمق کانونی زمین لرزه ها از پایگاه USGS Earthquake Catalog استخراج شد و پارامترهای مکانیزم کانونی (نظیر گشتاور لرزه ای و راستای گسل) با استفاده از نرم افزار GMT (Generic Mapping Tools) پردازش گردید. داده های روزانه دمای هوا (T_{avg} , T_{max} , T_{min})، رطوبت نسبی (RH)، و سرعت باد (WS) از شبکه ایستگاه های سینوپتیک سازمان هواشناسی ایران و پایگاه NCEP/NCAR Reanalysis v2 با تفکیک مکانی ۰/۷۵ درجه استخراج شد. شار گرمای نهان سطحی (LHFLX) و دمای خاک (ST) از پروژه ERA5-Land (با تفکیک ۰/۱ درجه) اخذ گردید.

برای زمین لرزه سوماترا، داده های ارتفاع سطح دریا (SSH) و دمای سطح آب (SST) از ماهواره Jason- و MODIS-Aqua استفاده شد.

۲-۲ پیش پردازش داده ها

حذف نویز با فیلتر Savitzky-Golay و نرمال سازی داده ها بر اساس میانگین بلندمدت. (CLT: 1981-2010) انجام شد و شناسایی ناهنجاری ها با استفاده از شاخص Z-Score صورت گرفت.

۲-۳ تحلیل آماری و مدل سازی مکانی

از آزمون همبستگی پیرسون برای بررسی ارتباط زمانی بین پارامترهای جوی و رخداد زمین لرزه و از تحلیل طیفی موجک (Wavelet Analysis) جهت شناسایی الگوهای فرکانسی پیش لرزه ای استفاده شد [5]. در نهایت تولید نقشه های پراکنش ناهنجاری ها با الگوریتم IDW (Inverse Distance Weighting) در محیط ArcGIS Pro انجام شد.

۳. معرفی زلزله های مورد مطالعه

۳-۱ زلزله هاییتی

زلزله هاییتی در ساعت ۲۱:۳۵:۱۰) به وقت جهانی در روز ۱۳ ژانویه سال ۲۰۱۰ با بزرگای گشتاوری ۷ بر روی مرز صفحه کارایی و آمریکای شمالی روی داد رو مرکز این زلزله در شکل (۱) نشان داده شده است. این زلزله از نوع کم عمق بوده به طوری که عمق این زلزله ۱۳ کیلومتر گزارش شده است [4].



شکل ۱. گستره زلزله هاییتی

۳-۲ زلزله بم

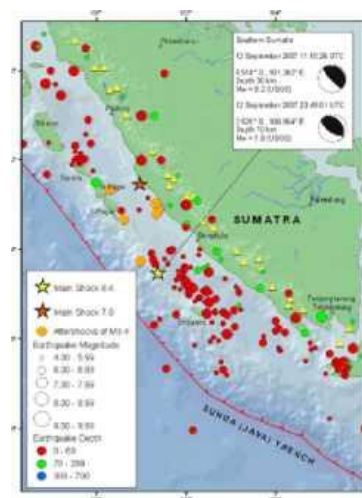
زمین لرزه ۵ دیماه ۱۳۸۲ به در ساعت ۵:۲۶:۲۶ به وقت محلی ساعت ۱:۲۶:۲۶ روز ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ به وقت بین المللی (GMT) در شهر تاریخی بم در جنوب شرقی کشور و در جنوب شرقی کرمان رخ داد (شکل ۲). زلزله بم با بزرگای گشتاوری ۶/۵ با محاسبه گشتاور لرزه ای در اثر جنبانی مجدد گسل بم رخ داد و شهر بم را به دلیل اثرحوزه نزدیک گسل ویران نمود. گسیختگی های سطحی بین بم و بروات مشاهده شد. ژرفای کانونی ۸ کیلومتر با در نظر گرفتن لرزه اصلی و پس لرزه ها برای این زلزله برآورد شد [5]. بیشینه شدت در پهنه رو مرکز مه لرزه ای شهر بم در حد ۹ و در آستانه تخریب کامل تخمین زده شده است. اثر حوزه نزدیک نیز موجب جهت پذیری قائم و مشاهده جنبشهای شدید در مولفه های قائم و عمود بر گسل شرقی غربی شده است [6].



شکل ۲. گستره زلزله بم

۳-۳ زلزله سوماترا

در ساعت ۱۶:۱۷ به وقت محلی (۱۰:۱۶ به وقت جهانی و ۱۳:۴۶ به وقت تهران روز ۲۰۰۹/۹/۳۰ میلادی) زمین لرزه ای با بزرگی ۷/۶ در مقیاس بزرگای گشتاوری در ۴۵ کیلومتری غرب شمال غربی شهر پادانگ جزیره سوماترا اندونزی و ۹۶۰ کیلومتری شمال غربی جاکارتا پایتخت اندونزی به وقوع پیوست. (شکل ۳). بر اساس گزارش مراکز زلزله شناسی عمق این زمین لرزه ۸۰ کیلومتر بوده است [۷].

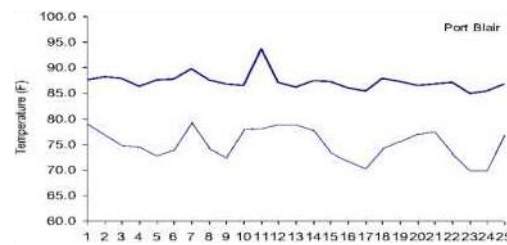
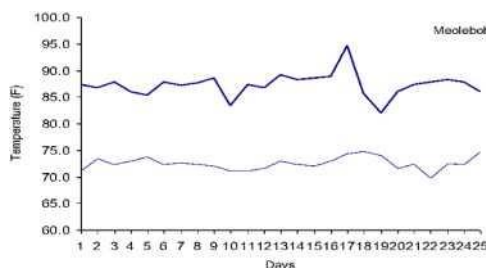


شکل ۳. زمین لرزه جنوب سوماترا

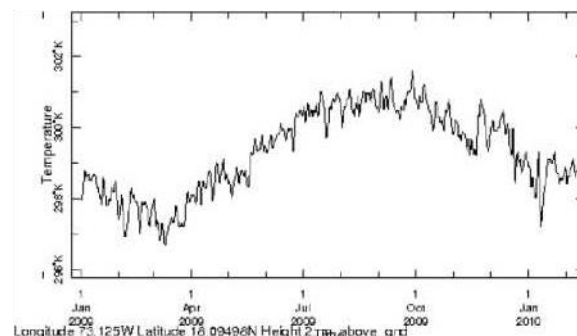
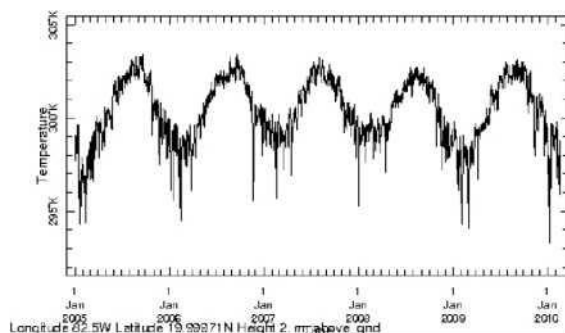
۴. تغییرات در پارامترهای جوی قبل از وقوع زلزله ها

۴-۱- تغییرات دمای هوا

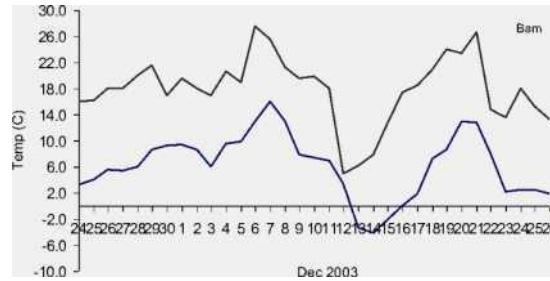
به عنوان اولین پارامتر، تغییرات دمای هوا قبل از وقوع هر یک از زلزله ها را با استفاده از داده های ایستگاههای هواشناسی مورد بررسی قرار دادیم. نمودار تغییرات دمای هوا قبل از وقوع هر یک از زلزله های مذکور در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها تغییرات در دمای هوا قبل از وقوع زلزله مشهود است.



شکل ۴. آنومالی مشاهده شده در بیشینه و کمینه دما بر حسب درجه فارنهایت در ۱ تا ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ قبل از رخداد زلزله اندونزی (نمودار سمت راست مربوط به منطقه پرت بلایر در جزایر آندمان و نمودار سمت چپ مربوط به متولیو در اندونزی می باشد).



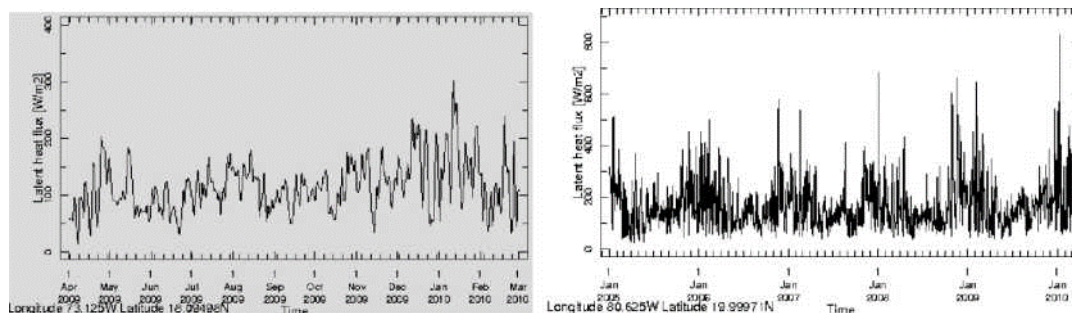
شکل ۵. نمودار دمای هوا قبل از زلزله هایتی (نمودار سمت راست در ناحیه رومرکز و نمودار سمت چپ در ناحیه ای با شار گرمای نهان بالا).



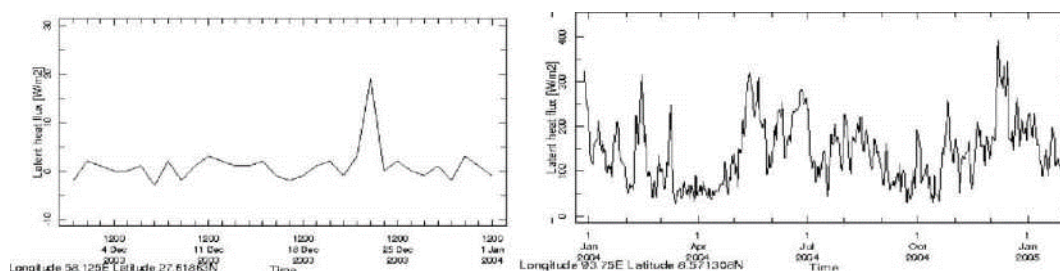
شکل ۶. نمودار دمای هوا ی بیشینه و کمینه قبل از وقوع زلزله بم.

۲-۴ - تغییرات شار گرمای نهان سطحی

شار گرمای نهان سطحی (SLHF) یکی از پارامترهای مهم مربوط به بودجه گرمای زمین است. بر همکنش بین زمین، اقیانوس و اتمسفر باعث ایجاد آنومالی هایی در مقادیر شارگرمای نهان سطحی قبل از وقوع زلزله های مورد بررسی شده است. وقتی انرژی داخلی زمین قبل از وقوع زمین لرزه بر اثر جابجایی و اصطکاک بین لایه ها و صفحات پوسته زمین در امتداد گسل ها افزایش می یابد و یا اینکه فشار در لایه های زیرین سطح زمین بالا می رود، گرمای زیادی تولید میشود [۸]. این امر موجب افزایش نرخ تبادل انرژی بین زمین و اتمسفر میشود که در نتیجه شارگرمای نهان سطحی افزایش میابد. نمودار شار گرمای نهان سطحی برای زلزله های هایتی بم و سوماترا به ترتیب در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷. شار گرمای نهان سطحی قبل از وقوع زلزله هایتی. نمودار سمت راست شار گرمای نهان سطحی ناحیه رو مرکز را در بازه زمانی اول آوریل ۲۰۰۹ تا اول مارس ۲۰۱۰ نشان میدهد و شکل سمت چپ همین شار را در یک دوره بلند مدت ۵ ساله از اول ژانویه ۲۰۰۵ تا اول مارس ۲۰۱۰ نشان میدهد.

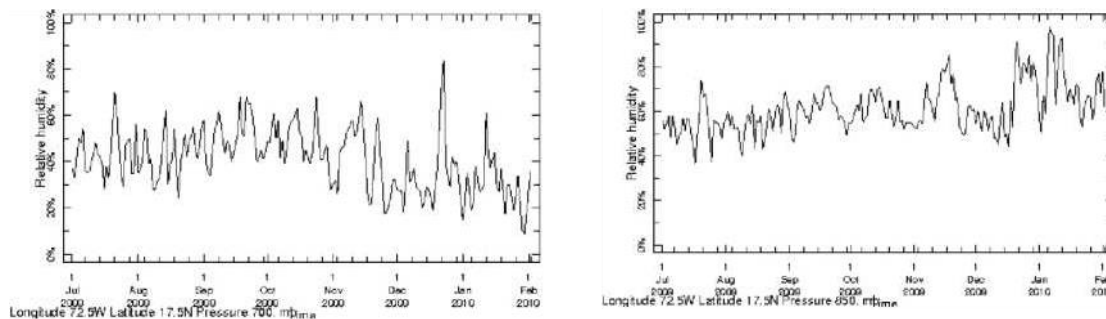


شکل ۸. نمودار سمت راست شارگرمای نهان سطحی مربوط به زلزله سوماترا در یک دوره از ۲۸ دسامبر ۲۰۰۳ تا ۳۰ ژانویه ۲۰۰۵ نمودار سمت چپ شار گرمای نهان سطحی زلزله بم

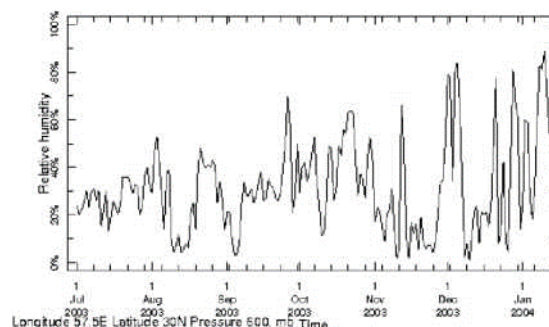
با توجه به بازه زمانی افزایش آنومالی در شارگرمای نهان سطحی مشاهده میشود که روزهای افزایش دمای هوا با افزایش شار گرمای نهان سطحی مطابقت دارد. نمودار شار گرمایی زلزله سوماترا نشان میدهد شارگرمای نهان سطحی در زلزله سوماترا بیشترین مقدار در یک سال قبل از آن بوده است و نمودار شار گرمای نهان سطحی در زلزله بم نشان می دهد که در روز ۲۳ سامبر شار گرمای نهان سطحی افزایش غیر عادی دارد.

۳-۴ - تغییرات رطوبت نسبی

پارامتر بعدی که بررسی شد مربوط به تغییرات رطوبت نسبی در ترازهای ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکالی در ناحیه رو مرکز قبل از وقوع زلزله هایتی بود. در شکل (۹) نمودار تغییرات درصد رطوبت نسبی از اول جولای ۲۰۰۹ تا ۱۰ فوریه ۲۰۱۰ را نشان میدهد. همانطور که در شکل مشهود است، مقادیر رطوبت نسبی ناهنجاریهایی را در روز قبل از وقوع زلزله نشان می دهد. هر چند که در روزهای دیگر نیز مقادیر بالای رطوبت نسبی دیده شده است که این مقادیر بالاتر به علت تغییرات در شرایط آب و هوایی میباشد.

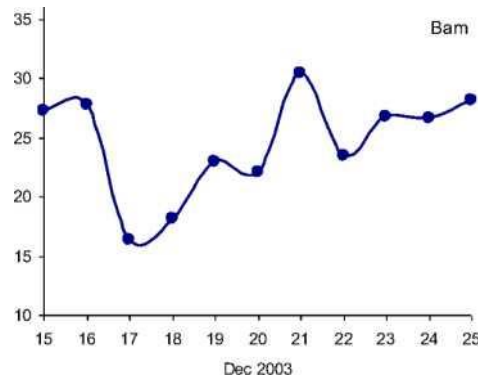


شکل ۹. تغییرات رطوبت نسبی در ناحیه رو مرکز زلزله هایتی
(شکل راست در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی و شکل چپ در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی).



شکل ۱۰. نمودار تغییرات رطوبت نسبی در ناحیه رو مرکز زلزله بم در تراز ۶۰۰ هکتوپاسکالی

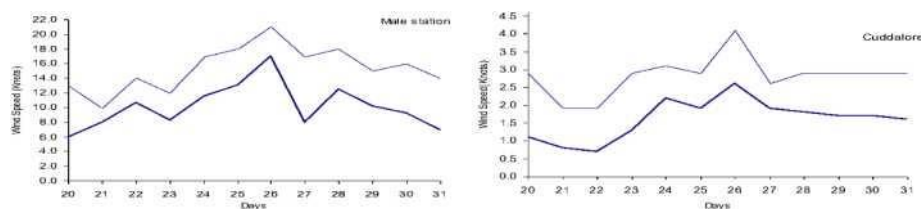
همانطور که در شکل (۱۰) مشهود است در روز قبل از زلزله بم مقدار رطوبت نسبی در تراز ۶۰۰ هکتوپاسکالی بالا بوده است. این ناهنجاریها در میزان رطوبت نسبی در سطح زمین نیز مشهود است. بیشترین افزایش مربوط به روز ۲۱ دسامبر بوده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. نمودار رطوبت نسبی در سطح زمین در ایستگاه بم

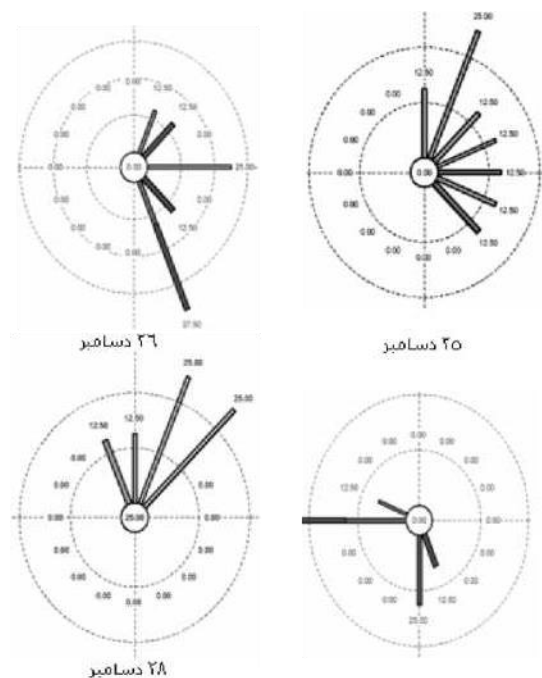
۳-۴ - تغییرات در سرعت و جهت باد

بررسی داده های باد در سطح زمین از روز ۲۰ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۰۴ که از سایت NOAA و سایت هواشناسی هند برای ایستگاه های کودالور در ایالت تامیل نادا کشور هند و منطقه ماله در کشور مالدیو گرفته شد. بررسیها نشان داد که سرعت و جهت باد در روز وقوع سونامی و بعد از آن افزایش داشته است. شکل (۱۲) تغییرات سرعت باد را نشان میدهد.



شکل ۱۲. تغییرات میانگین و بیشینه سرعت باد (نمودار سمت راست مربوط به منطقه کودالور در هند و نمودار سمت چپ مربوط به منطقه ماله در مالدیو میباشد).

این تغییر در جهت و سرعت باد تا مسافت زیادی دورتر از سواحل اندونزی و اقیانوس هند ادامه داشته است. به طوری که داده های باد در ایستگاه چابهار که از سازمان هواشناسی ایران به دست آمده نیز این تغییرات را نشان داده است [9]. شکل (۱۲) نشان میدهد که سرعت باد در انتشار سونامی به سواحل ایران افزایش حدود ۵۰ داشته است. ستاره در شکل زمان رسیدن امواج سونامی به سواحل ایران نشان میدهد. همان طور که در نمودارهای شکل (۱۳) مشاهده میشود جهت باد در زمان رسیدن سونامی به سواحل ایران (حدود ۱۱ به وقت جهانی در ایستگاه چابهار به طور مداوم و بدون تغییر به مدت تقریباً ۲۳ ساعت از سمت جنوب جنوب شرقی بوده است. این الگوی جهت باد با توجه به ترسیم گلباد در این ایستگاه، در روزهای دیگر دیده نشده است.



۵. نتیجه گیری و پیشنهادات

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ناهنجاری‌های مشخصی در پارامترهای جوی و حرارتی زمین، به‌ویژه شار گرمای نهان سطحی و گرادیان دمای خاک، در بازه زمانی ۲ تا ۷ روز پیش از رخداد زمین لرزه‌های بزرگ و مناطق گسلی فعال رخ می‌دهد. این ناهنجاریها با استفاده از آزمون من - کندال و ویانکسون بررسی شد و مقدار $p\text{-value} < 0.05$ ارتباط معنا دار بین گرادیان دمای خاک و پارامترهای لرزه خیزی را تأیید میکند. همچنین همبستگی مثبت قوی بین افزایش گرادیان دمای خاک در عمق ۱۰۰ سانتی متری و کاهش ناگهانی رطوبت نسبی جو در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مشاهده شد که همسو با مکانیسم جفت شدگی تنش - انتشار گاز میباشد [10]. بر اساس این مکانیسم، افزایش نفوذپذیری سنگ‌های پوسته پیش از زلزله، موجب انتشار گازهای رادون و تغییرات فشار جزئی در اتمسفر میشوند که به نوبه خود بر تبادل انرژی زمین - اتمسفر تأثیر می‌گذارد [11].

تحلیل رگرسیون چندمتغیره نیز وابستگی معنادار شدت ناهنجاری‌ها به عمق کانونی زمین لرزه را تأیید می‌کند. این یافته‌ها حاکی از آن است که سیگنالهای لرزه ای در زمین لرزه های کم عمق (عمق کمتر از ۱۵ کیلومتر) و در ایستگاههای واقع بر صفحه گسل ناهمگنی مکانی در توزیع ناهنجاریها با شدت بیشتری آشکار می شود و این نشان دهنده تأثیرپذیری این سیگنالها از شرایط زمین ساختی و اقلیمی محلی است [12].

اگرچه این مطالعه گام مهمی در شناسایی پیش‌نشانگرهای جوی-تکتونیکی برداشته، محدودیت‌هایی شامل عمق کم اندازه‌گیری دمای خاک (۱ متر) و تکرار روزانه داده‌ها، دقت شناسایی ناهنجاری‌ها را کاهش می‌دهد. برای بهبود قابلیت اطمینان، پیشنهادهای زیر مطرح می‌شود:

- ۱- اندازه‌گیری پارامترهای ژئوترمال در عمق ≤ 4 متر
- ۲- نمونه‌برداری ساعتی از داده‌ها (به ویژه داده های SHLF)
- ۳- ادغام داده‌های ماهواره‌ای راداری برای پایش تغییرات رطوبت خاک با دقت مکانی بالا (۱۰۰ متر)

در نهایت، این پژوهش شواهد آماری مستحکمی دال بر ارتباط بین تغییرات پارامترهای جوی و فرآیندهای تکتونیکی پیشا-لرزه‌ای ارائه می‌دهد. با توسعه سیستم‌های پایش یکپارچه اتمسفر-لیتوسفر، می‌توان از این الگوها به‌عنوان مولفه‌ای مکمل در سیستم‌های هشدار زودهنگام زمین لرزه استفاده کرد، هرچند تحقیقات گسترده‌تر در محیط‌های تکتونیکی متنوع ضروری است.

۶. مراجع

1. Pulinets, S., et al. (2023). LAIC model for earthquake precursors. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 242, 105999.
2. Dunajecka, M., & Pulinets, S. (2010). Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth*.
3. Ouzounov, D., et al. (2021). *Pre-earthquake processes: Multidisciplinary approach*. Wiley.
4. Calais, E., Freed, A., Mattioli, G., Amelung, F., Jonsson, S., Jansma, P., ... & Pr  petit, C. (2010). Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake.
5. *Nature Geoscience*, *3*(11), 794–799. Eshghi, S., & Zare, M. (2004). Bam (Iran) earthquake of December 26, 2003: Preliminary reconnaissance report on the performance of structures. *Earthquake Spectra*, *20*(S1), S181–S218.
<https://doi.org/10.1193/1.1765107>
6. Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., & Berberian, M. (2006). Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International*, *167*(2), 679–697.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03045.x>
7. Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Nettles, M., Ward, S. N., Aster, R. C., ... & Sipkin, S. A. (2005). The Great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004. *Nature*, *434*(7033), 581–587. USGS. (2023). USGS Earthquake Catalog.
<https://earthquake.usgs.gov>
8. Pulinets, S., Ouzounov, D., Karelin, A., & Davidenko, D. (2015). Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults. *Advances in Space Research*, *56*(5), 813–825.
9. Rasaneh, G., et al. (2023). Statistical analysis of relationships between atmospheric parameters and large earthquake occurrences in Iran [Unpublished conference paper]. Islamic Azad University, Falavarjan Branch.
10. Freund, F. T., Takeuchi, A., & Lau, B. W. (2006). Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions. *Physics and Chemistry of the Earth*, *31*(4-9), 389–396.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.026>
11. Transient Effects in Atmosphere and Ionosphere Before the 2019 Ridgecrest, CA Earthquake. *Remote Sensing*, *13*(16), 3139. <https://doi.org/10.3390/rs13163139>.
12. Ghosh, S., Chakraborty, S., & Mukherjee, S. (2023). Integrated geochemical and atmospheric anomalies associated with crustal stress accumulation: Implications for earthquake precursor studies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *128*(5), e2022JB025619.
<https://doi.org/10.1029/2022JB025619>